



TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.11

OBSERVATIONS AND NUMERICAL EXPERIMENTS ON LOCAL CIRCULATION
AND MEDIUM-RANGE TRANSPORT OF AIR POLLUTIONS

By

APPLIED METEOROLOGY RESEARCH DIVISION, MRI

気象研究所技術報告

第11号

局地風と大気汚染物質の輸送に関する研究

応用気象研究部

気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

MARCH 1984

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director : Dr. S. Moriyasu

Forecast Research Division	Head : Mr. T. Yoshida
Typhoon Research Division	Head : Dr. M. Aihara
Physical Meteorology Research Division	Head : Dr. T. Okabayashi
Applied Meteorology Research Division	Head : Mr. N. Murayama
Meteorological Satellite Research Division	Head : Dr. K. Naito
Seismology and Volcanology Research Division	Head : Dr. H. Watanabe
Oceanographical Research Division	Head : Dr. H. Iida
Upper Atmosphere Physical Research Division	Head : Dr. M. Kano
Geochemical Research Division	Head : Mr. T. Akiyama

1-1, Nagamine, Yatabe-Machi, Tsukuba-Gun, Ibaraki-Ken 305, Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Dr. T. Okabayashi

<i>Editors</i> :	Dr. T. Akiyama	Mr. H. Kondoh	Dr. Y. Sasyo
	Dr. T. Yoshikawa	Dr. J. Aoyagi	Dr. M. Seino
	Dr. M. Endoh	Dr. K. Koderu	Dr. K. Fushimi

Managing Editors : K. Nishida, H. Nishimura

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of survey articles, technical reports, data reports and review articles on meteorology, oceanography, seismology and related geosciences, contributed by the members of the MRI.

序

気象研究所応用気象研究部では1980年代初期における応用気象の研究として特に大気汚染気象の研究に重点を置いて実施してきており、経常研究のテーマはこれと何らかの関係をもった低層大気の物理過程の研究から構成されている。これらの研究を基礎にしたより実用的な研究のひとつとして、大気汚染質のうち特に二次汚染質の挙動を気象学的側面から究明するため、“局地循環と大気汚染物質の長距離輸送”という課題(気象庁予報部要望課題)を環境庁国立機関公害防止等試験研究費(1980～82年)による特定研究として実施した。この研究は野外気象観測と数値モデルによるシミュレーションからなり、試験地域として沿岸の複雑地形を選んだ。海陸風や山谷風などが関与した局地気象とそれの影響下にある大気汚染質のメソスケールの輸送の解明を目的として実施した。

大気境界層の気象の野外観測については、古くは米国のO' Neillのもの、近年はオーストラリアのWangara実験(1967年)、Koorin実験(1973年)があり、それぞれ後日データを含む印刷物が刊行されている。これらは平坦地の特殊な気候帯のところでのより大規模な野外観測である。また日本においては環境気象評価のためのいくつかの観測が1970年代に行なわれ、とりわけ南関東大気環境調査(1976年)は大規模な野外観測であり、それぞれ報告物が出版されている。これらの野外気象観測よりは期間が短かく規模は小さいが、より複雑な地形——熱的にも幾何学的にも複雑という意味の complex terrain——での、昼夜連続の局地気象観測のデータは数少なく貴重である。一般にこの種の気象観測には多くの経費と労力を要するという意味でも第一目的以外の多くのことに役立てることが大切であり、この主旨において本技術報告に記すことにした。一方本研究のうちの数値モデルについては現在世界の気象界における研究のレベルを見るときやや先がけた成果が得られていると思う。数値モデルの例証については大局的に見てかなり良いものであるが、パラメータの不確定さや観測データの代表性などの点からまだ不十分であり、これらはこれからの多くの進んだ研究にまたれるものである。

特定研究については、1979年に菊地幸雄(応用気象研究部長)らによって計画され、1980年から3年間実施された。観測の実施計画は原田朗、村山信彦、吉川友章らによって立案準備を行なった。

野外観測の実施に当たり、大阪管区気象台と管内気象官署(松山、岡山、広島、高知、高松、室戸岬)および現地の地方自治体特に愛媛県、岡山県、香川県の各公害関係研究センターの協力をえた。1980～81年の野外観測は環境庁が実施する地方自治体の観測と同時に実施し、資料の交換を行った。トレーサ実験は主として試料分析について日本原子力研究所との協同研究(矢野直ほか)によって実施された。また一部の観測で防衛庁の協力をえた。全般の観測について下記の応用気象研究部職員によるほか日本気象協会、昭和航空の受託によって実施された。現地観測は本報告書各

章執筆者ほか数人の職員ないし執筆者以外の職員のグループによって実施された。数値実験は主として木村富士男、荒川正一らにより気象研究所電算機 M200 Hを使用して開発された。本報告書のとりまとめは主として佐藤功が当たった。

研究の中間成果は 1981 年、1982 年の日米大気汚染気象委員会にも報告された。

本研究の担当者は荒川正一、木村富士男、小出孝、小林隆久、佐藤純次、戸矢時義、村山信彦、矢野直、吉川友章(以上 1980～82 年)、原田朗(1980 年)、鈴木彌幸(1981、82 年)、佐藤功、栗田進(以上 1982 年)、白崎航一(1981、82 年研究協力者)である。

昭和59年 2 月

気象研究所 応用気象研究部長

村 山 信 彦

目 次

序

概要(和文)	1
概要(英文)	5

第1章 地上・低層気象観測	11
1.1 観測地点	11
1.2 観測時刻	20
1.3 観測装置の仕様	22
1.3.1 低層ゾンデ	22
1.3.2 係留気球	23
1.4 代表地点の観測結果およびデータ収録仕様	24
参考文献	32

第2章 瀬戸内海の海陸風の特性と局地気象現象	33
2.1 瀬戸内海の海陸風の特性	33
2.1.1 1980年度観測	33
2.1.2 1981年度観測	36
2.1.3 1982年度観測	40
2.2 風速分布	44
2.3 混合層	44
2.4 K_z の地点別特性	48
2.5 瀬戸内海の局地気象現象	50
参考文献	51

第3章 ノンリフトバルーンによる気流観測	55
3.1 観測の概要	55
3.2 観 測	55
3.3 観測結果	58
3.4 解析例	71
参考文献	71
付 録 ノンリフトバルーンの調整	72

第4章 航空機観測	79
4.1 はじめに	79
4.2 観測機器	79
4.2.1 航空機	79
4.2.2 サーミスター温度計	82
4.2.3 白金抵抗温度計	82
4.2.4 露点計	84
4.2.5 Lyman- α 湿度計	86
4.2.6 赤外放射温度計	89
4.2.7 日射計・長波長放射計	90
4.2.8 パーティクルカウンター	93
4.2.9 大気汚染測定装置	93
4.2.10 大気サンプリングシステム	94
4.2.11 VTR システム	96
4.2.12 データ収録装置	96
4.3 80年観測概要	98
4.4 80年観測結果の解析と考察	105
4.4.1 温位と大気汚染質濃度の鉛直分布の特徴	105
4.4.2 大気汚染質濃度の水平分布の特徴	105
4.5 81年観測概要	107
4.6 81年観測結果の解析と考察	117
4.6.1 大気汚染質濃度と温位、混合比の鉛直分布の特徴	117
4.6.2 地表面温度の日変化	117
4.6.3 水蒸気変動量の観測	123
4.6.4 エーロゾルの観測	127
4.7 82年観測概要	128
4.8 82年観測結果の解析と考察	138
4.8.1 大気汚染質濃度の鉛直断面の特徴	138
4.8.2 積雲内の汚染濃度	142
4.9 ドップラー航法による風の観測	143
4.9.1 測定原理	143
4.9.2 観測の概要	144
4.9.3 観測結果と考察	145

4.10	まとめ	147
	参考文献	148
	付 録	149
1	データ処理のブロックダイアグラム	149
2	航空機観測データMT情報	151
第5章	ドップラーソーダによる気流と乱流パラメータの3次元測定	159
5.1	装置の基礎概念	159
5.2	実地測定	160
5.3	拡散パラメータの検討	164
5.4	あとがき	167
	参考文献	167
	付 録	168
1	各種の測定による拡散パラメータの算定式	168
2	ドップラーソーダのMT収録仕様	168
第6章	エア・トレーサーによる拡散実験	173
6.1	はじめに	173
6.2	Activable Multiple Air Tracer (AMAT) システム	174
6.2.1	放出方法	175
6.2.2	サンプリング	176
6.3	トレーサー実験	177
6.3.1	新居浜におけるトレーサー予備実験	177
6.3.2	海陸風循環内におけるAMAT輸送実験	181
6.4	AMATの沈着および比較実験	193
6.4.1	実験の目的	193
6.4.2	野外トレーサー実験の概要	193
6.4.3	結 果	195
6.5	結 論	201
	参考文献	201
	付 録 トレーサー実験データ	204
第7章	局地気象モデルを利用した光化学大気汚染の数値シミュレーション	217
7.1	はじめに	217

7.1.1	大気汚染研究における局地風の重要性	217
7.1.2	局地風の研究へのフィードバック	217
7.1.3	数値モデルの概要	217
7.2	局地気象モデル	218
7.2.1	基礎方程式	218
7.2.2	地面からの熱収支	221
7.2.3	境界層の扱い	225
7.2.4	上部境界条件	227
7.2.5	水平方向の境界条件とワンウェイネスティング	229
7.3	大気汚染モデル	231
7.3.1	移流拡散モデル	231
7.3.2	パラメータ化した光化学反応	232
7.4	2次元の海陸風と光化学大気汚染	239
7.4.1	計算条件	239
7.4.2	風と汚染の立体分布	241
7.4.3	地上濃度の日変化	243
7.4.4	まとめ	247
7.5	中国・四国地方の静穏時の局地風シミュレーション	247
7.5.1	実測風の特徴	247
7.5.2	数値シミュレーションによる地上風の特徴	249
7.6	観測期間中の局地風と大気汚染のシミュレーション	253
7.6.1	1981年度観測との比較	253
7.6.2	1982年度観測との比較	276
7.7	関東地方への応用	285
7.7.1	関東地方の光化学大気汚染の特徴	285
7.7.2	計算の条件	286
7.7.3	シミュレーションの結果	288
7.7.4	結果の検討	291
7.8	まとめ	294
	参考文献	295
	関係発表論文リスト	297
	図・表説明リスト(和文)	301

概 要

現在、社会的、行政的に問題になっている光化学スモッグは、大気中における汚染物質の滞留時間および輸送距離が長いため、汚染源と被汚染地域の地理的な関連が明らかでない場合が多く、大気汚染防止対策を困難なものにしている。このような現状において、わが国の今後の大気汚染防止対策を進めるため、発達した局地風のもとで、長時間にわたって輸送される大気汚染物質の挙動に関する研究が必要である。本研究はこのような背景のもとに、瀬戸内海の中央部の燧灘とその周辺地域を観測および実験の対象地域として、下層大気における局地循環と大気汚染物質の長距離(100～200 km)、長時間(1～2日)にわたる輸送現象を解明することを目的として計画した。

研究は、現象やその実態を解明する手段によってつぎの3項目より構成されている。

- (1) 局地循環の実態の解明
- (2) 大気汚染物質の 100～200 km、1～2 日にわたる輸送の解明
- (3) 数値シミュレーションによる局地循環内の輸送の解明

(1)、(2)は現地における観測・実験によって遂行され、(3)は数値モデルによる実験である。また(2)で行う中距離用多重トレーサー実験は、その手法の開発を行い、それを野外実験に用いた。

本研究の観測と実験は3年計画で行なったが、初年度と2年度は環境庁・関係自治体などで同時に観測が行われたので、解析にあたっては他機関のデータも使用した。当部が実施した観測および実験項目は下記の通りである。

〔初年度(1980年)〕

項 目	観 測 方 法	観 測 要 素	観 測 地 点	観 測 日 時	備 考
地 上 気 象	一般測器と目視	一般気象	新居浜・魚島 福山	7月22日 9時 ～24日 11時	毎 時
上 層 風	1点セオドライト によるパイボール	風向・風速 (地上～3000m)	"	"	"
鉛 直 気 温	低層ゾンデ	気 温	新 居 浜	7月22日 9時 ～24日 9時	毎3時間
低層風鉛直分布	バイスタティック ドップラーソーダ	風向・風速 風の乱れ	"	7月22日～24日	連続測定
ノンリフトバルーン	テトルーン レーウィンゾンデ 2点追跡	気球の軌跡	"	期間中6回	船上・陸上 放 球
航 空 機 観 測	航空機による直 接測定	O ₃ 、NO _x 濃度 海地表面放射温度	燧灘およびその 周辺地域	期間中6回	
トレーサー実験	希土類元素の放 射化分析	トレーサー捕集	新居浜周辺	放出：期間中5回 捕集：深夜を除く 毎2時間	放出：船上、陸上各点 捕集：船上、魚島 新居浜7点

〔2年度(1981年)〕

項 目	観 測 方 法	観 測 要 素	観 測 地 点	観 測 日 時	備 考
地 上 気 象	一般測器と目視	一般気象	松永、鵜、竹原、魚島、宮窪、三崎、別子、観音寺、新居浜今治、春風丸	8月19日6時～22日9時	76回 ただし新居浜のみ18日9時～23日12時の124回
上 層 風	1点セオドライトによるパイボール	風向・風速 (地上2000m)	"	"	毎 時
上 層 気 象	低層ゾンデ	気温・湿度 (地上～2000m)	新居浜・松永 魚島	19日6時～22日9時	気温26回(3時間毎) 湿度13回(6時間毎)
	係留気球 無線・自動印字	風向・風速 気温・湿度 (海上400m)	春 風 丸	19日15時～21日21時	3 時間毎
低層風鉛直分布	バイスタティック ドップラーゾンダ	風向・風速 風の乱れ (地上500m)	新 居 浜	18日から28日までの10日間	連続測定
ノンリフトバルーン	テトルーン レーウィンゾンデ 2点追跡	気球の軌跡	"	期間中10回	
航 空 機	航空機による直接測定	風向・風速 気温・湿度 日射・地(海)面 放射温度 O ₃ 、NO _x 濃度 エアロゾル	燧灘とその周辺の地域	風向・風速 19日と21日の9時と13時、O ₃ 、NO _x 濃度等は19日と20日は3回21日は2回	
トレーサー実験	希土類元素の放射化分析	トレーサー捕集	放出:地上、船上 航空機上各1点 捕集:新居浜8点 鵜、魚島、春風丸 宮窪、三崎、観音寺、東予、北木島 弓削、伊予三島、玉津、長津、関川、漁船	放出:8月19日 8月21日 それぞれ3回ずつ 捕集:20日の夜を除き2時間毎	

〔3年度(1982年)〕

項 目	観 測 方 法	観 測 要 素	観 測 地 点	観 測 日 時	備 考
地 上 気 象	一般測器と目視	気温、湿度 全雲量、視程、 天気	吉川、総社、倉敷、坂出、満濃、財田、高知	7月27日9時～30日9時	毎時(73回)
上 層 風	1点セオドライト パイボール	風向・風速 (地上2000m)	"	"	"
上 層 気 象	低層ゾンデ	気温・湿度 (地上2000m)	総社、倉敷 与島	7月27日9時～30日9時	3時間毎(25回)
	係留気球 観測装置	気圧、気温、湿度 風向・風速 (地上500m)	満 濃	"	"
低層風鉛直分布	バイスタティック ドップラーゾンダ	風向・風速 風の乱れ (地上～500m)	岡 山	7月24日～8月7日 8月21日～8月22日	連 続
航 空 機	航空機による直接測定	風向、風速、気温、湿度、日射 地(海)面放射温度 O ₃ 、NO _x 濃度 エアロゾル	高知・伊予三島・三崎・高梁線上 高さ300～3500m	7月27日～29日	
トレーサー実験	希土類元素の放射化分析	沈着による損失と鉛直濃度分布への影響	筑 波	8月4日～6日	放出:気象研究所 南南西3.2km 農業技術研究所 40m の給水塔

数値シミュレーションについては下記の年次計画によって行った。

初年度：局地循環のシミュレーションが可能な数値モデルの開発と計算領域の決定に関するテスト。

二年度：初年度開発したモデルの改良と、それによる種々の一般場における局地風循環の数値実験。

三年度：局地風による汚染質の輸送を数値実験するための光化学反応をとり入れた新しいモデルの作成。

上層風の観測から

- (1) 地表付近の海陸風の上層には、四国側には顕著な反流が認められるが、中国側には海風の反流はほとんどみられないこと。
- (2) 日中の局地循環は四国側でより顕著に現われること。
- (3) 下層にジェット状の強風域が発生すること。
- (4) 夜半から早朝にかけては、アメダスデータからは陸風が明瞭に認められない場合でも、100m層では陸風が明瞭であること。
- (5) 海風時の海面上の発散線は海峡部ではほとんど定まった位置にあるが、燧灘では中央～北部を振動すること。
- (6) 中国側の海風収束線は地形を反映して複雑であるが、四国側では山が急峻なために、谷風が発達して、短時間に内陸に達すること。
- (7) 一般流と海陸風が逆方向のところでは、2つの風系の間に100m程の転移層が認められること。

などが明らかになった。また燧灘では、海上には夜間に厚く、日中ほとんど消滅する冷氣塊が存在し、海陸風との対応が示され、また雷雨による鉛直方向の熱交換の地域差によって、中国側と四国側との海陸風に変化のあることが認められた。

1980、1981年の航空機観測により、

- (1) 早朝燧灘周辺の広い地域にわたって高さ500mくらいまで、 NO_x の濃度が高いこと。
- (2) 早朝 O_3 の高い層が高さ500m以上に観測される場合があること。
- (3) 午後になるとかなりの量の汚染質が高さ1500m以上の上空まで輸送されることが明らかになった。1982年には、
 - (1) 早朝 NO_x は燧灘では高さ500m以下で、 O_3 は500～1000mの層で高い。
 - (2) 午後になると O_3 やエーロゾルの層は四国山脈の南北斜面と中国側で厚く、2000m付近まで達しているが、燧灘での汚染空氣の層は浅くなること。
 - (3) 四国山脈の上層に輸送された汚染質は上層反流によって燧灘の上層へ戻されていることが観測された。
 - (4) 雲中の汚染質の分布から、発達した積雲は O_3 の鉛直輸送に重大な影響を与えているととも

にエーロゾルの強い除去作用のある可能性が見出された。

トレーサー実験の結果、

- (1) 新居浜付近では、陸風時、海風時ともトレーサーは遠距離にまで運ばれず、放出点付近に長時間滞留すること。
- (2) 海岸から20 km 沖合で航空機から午後海風にのせて放出したトレーサーは、陸上で長時間にわたって捕捉され、放出後11時間たっても検出された。
- (3) 今回用いたトレーサーは距離50 km、時間40時間以上追跡可能であることが認められ、地表面への沈着も1%以下にすることが可能であること。

などがわかった。

ドップラーソーダによる観測では、

- (1) 水平流はパイボールによる観測結果とよく一致した。
- (2) 鉛直流は海風、陸風ともその吹きはじめのころ400～500mの高さで著しい上昇が起こり、海風や陸風の最盛期には下降流域が厚くなる傾向が認められた。
- (3) 鉛直方向の乱れは一般に下層で大きく上空で小さいが、風向急変を伴うじょう乱では上空まで乱れることが観測された。

ノンリフトバルーンによる観測では、燧灘南部海域での海風循環は沖合10 km 付近でも測定され、そこでは海から陸に向かう流れは300～400mの厚さを持っていることなど、海上における海風循環の模様を7時間にわたってとらえた観測例が得られた。

数値シミュレーションは局地風に関する既存のモデルを改良して、種々の一般流のもとでの海陸風循環について、現実的な再現に成功した。また局地風による汚染質の輸送を数値実験するための新しいモデルを開発した。このモデルは光化学反応について大巾に簡略化されているので、精度上の問題は多く残されてはいるが、従来の汚染モデルで扱うことがほとんどできなかった局地風による汚染質の三次元的な輸送を、詳細な気象資料を要しないで見積ることが可能となった点など、大気環境の予測に有効な手段となるものと思われる。

SYNOPSIS

The present project consists of three parts: (a) observation of the meteorological field with local circulations under complex terrain, (b) observation of medium-range transport of air pollutants and (c) numerical simulation of local circulation and transport of air pollutants in it.

The studies were performed for the three fiscal years 1980 to '82. The observations (a) and (b) were made in the central part of the Inland Sea and its coastal regions during 22–24 July 1980, 18–20 August 1981 and 27–30 July 1982.

We describe our experiment in the following for each year. The preliminary experiment was done in the year 1980. Hourly pilot balloon observation was made at three sites to reveal the general flow and the characteristic features of local circulation. A Doppler sodar installed at Niihama reinforced the observations, and gave some information about turbulence aloft. Radiosonde observation in the lower atmosphere was also made at Niihama and provided vertical temperature distribution.

Aircraft measurements were made of NO , NO_x and O_3 concentrations, air temperature, dew point temperature, ground surface temperature. The measurement aimed at tracking pollutants emitted by large stacks in the Niihama area, which were transported both by the general wind and the complex local winds.

A multiple air tracer technique applicable to the range of 10 to 100 Km was developed, and field experiments of the technique were conducted at Niihama. In those experiments, two different chemical compounds, Dysprosium and Europium, were used for tracer materials, which were released in the sea-breeze and land-breeze flows respectively. After applying neutron rays to the sample filters

Nobuhiko Murayama, Akira Harada,* Tomoaki Yoshikawa, Shoichi Arakawa** Junji Sato,†
Fujio Kimura, Tokiyoshi Toya, Takahisa Kobayashi, Takashi Koide, Naoshi Yano,†† Yako Suzuki,
Isao Sato and Susumu Kurita: Applied Meteorology Research Division, MRI

* Magnetic Observatory

** Marine Division, JMA

† Office of planning, MRI

†† Saitama University

in an atomic reactor, electron energy was measured to obtain the concentrations of the two atomic elements.

In order to find the actual local circulations and the related transport of air pollutants in the area concerned, trajectory experiments were conducted by tracking a non-lift balloon ("tetroom"). A tetroom equipped with a set of RAWIN was launched six times during the periods, and was tracked by the double-rawin technique which was to measure the height and position of tetroom. Though the 1980 field experiment was not necessarily conducted under the best conditions to observe the local circulation, we were able to have a valuable experience related to the experiments themselves. An evidence of local circulation under the prevailing synoptic flow which was found in both the field experiment and numerical experiment encourages us to further studies.

Following the preliminary experiment of the year 1980, the 1981 experiment on local circulation and the medium-range air pollutant transport was carried out in the Hiuchinada area, the central part of the Inland Sea and its coastal region. The pilot balloon and surface air observations were conducted hourly at eleven sites. The upper air temperature and humidity were measured 3-and 6-hourly respectively by slowly rising radiosondes at three sites. The air temperature, humidity and wind up to about 400 m in altitude were measured 3-hourly using tethered balloons. The sea water temperature was recored on ship about 10 Km off the Niihama coast. The upper air observations showed that the temperature over the Inland Sea varied in the same manner with that over the land, in spite of the difference of cooling or heating between land and sea surface. The temperature inversion layer often appeared several hundred meters above the sea surface. The inversion layer reached the maximum height of about 500 m in the morning and near the sea surface in the evening. A Doppler sodar was operated and wind and turbulence data were obtained during 10th-28th August in Niihama. Aircraft measurements were made of the vertical profiles and horizontal distribution of air temperatures, humidities, dew point temperatures, aerosols, O₃ and NO_x concentrations and surface temperatures in Hiuchinada and its surroundings through 8 flights. A non-lift balloon (tetroom) was released at 500 m in altitude and tracked by the double-rawin technique for several hours, 10 times in the Niihama area. The tetrooms were flown to the west and no local circulation effect was distinct.

Three different chemical compounds, Europium, Holmium and Dysprosium, were released from the ground, boat and aircraft respectively, on 19th and 21st. The tracers were collected at 9 spots in Niihama and 11 spots in the surrounding area including 2 boats. After applying neutron rays to the sample filters in an atomic reactor, gamma ray energy was measured to get the concentrations

of the three atomic elements. Whether the wind was inshore or off-shore, the high concentration was kept long and the air mass of the tracer appeared to stagnate in certain restricted areas near Niihama. The analysis of the surface and upper winds and surface concentrations showed that the high-concentration air mass hovered between land and sea owing to the land and sea breezes and could not move far away and that the pollutants were slow to diffuse.

The numerical simulation technique developed in the year 1980 was improved. The ground temperature was provided in definite form in the previous model, but it was determined by the energy balance based on the solar radiation and surface characteristics in the revised model. One of the characteristics of the wind data in the lower atmosphere over the Hiuchinada and its surroundings was the strengthening of the wind along the prevailing wind direction in the northern part of the Inland Sea, whenever the wind was easterly or westerly. The lower level jet was more remarkable at night than in the daytime. This was also successfully simulated in the numerical model.

The observation points of the year 1982 were distributed along the line passing through Kurashiki and Sakaide. The observations started soon after the end of the rainy season and terminated just before the coming of typhoons. The field experiment consisted of PIBAL, radio sounding, aircraft and other observations. A harmonic analysis of the upper wind variation was tried. The one-day component of the surface wind variation showed alternation of the sea breeze in the daytime and the land breeze in the nighttime. The hodograph of surface wind variations showed an ellipse with its longer axis perpendicular to the contour of the land surface. The wind direction backed below the 800 m-level and veered above the level which is in accord with the inertial wind direction change.

The vertical distribution of the wind was monitored continuously by the Doppler sodar system in Okayama. The results observed were compared with that of the nearby pibal and that of sodar in Niihama in the preceding year. It was found that the lower and upper winds shift simultaneously in Okayama. The updraft continued during weak easterly winds in the daytime and the downdraft prevailed during southeasterly winds. The variations of wind speed and direction were large when wind shifts and the variation of the vertical wind component was large at a specified time of the day, in a specified wind and so on.

It was found by aircraft measurements that polluted air was transported upwards vigorously by the local winds, especially by the valley wind in the daytime, and reached to the 3000 m level in the

evening. The high concentration of pollutants appeared at two levels above the coast of the Inland Sea in the evening. The developed cumulus clouds seemed to help the vertical transport of ozone and scavenging of the aerosols.

The tracer experiments were made at Tsukuba where the installation and equipment were enough to challenge the problems encountered in the previous experiments. It was found that the loss of tracer material in the form of minute particles due to the deposition to the ground surface was within 1% of the released material and the effect of the deposition on the plume was small.

Numerical simulation of the air pollution over the Inland Sea was carried out by the two step model. The first step was a three-dimensional time-dependent local wind model, which calculated wind velocity and the vertical diffusion coefficient. This model had been developed by the year 1981. The second step was the photochemical air pollution model which was also a three-dimensional model using the result of the first step model as input data. A second step model was further constructed with two submodels, a diffusion and advection model and a photochemical reaction model. The emission rate of pollutants was assumed to be a constant on the land surface whose altitude was less than 1000 meters. But on the southern side of Shikoku, no pollutant source was assumed. The results showed that ozone was transported upward by the well developed valley wind in the daytime, and the vertical distribution of pollutants agreed well with the aircraft observation. In the night time, however, there was some disagreement about the vertical transport of pollutants between simulation and observation.

In Chap. 1, ground-based observation is summarized with the description on the observation network and period, specifications of the low-level radiosonde and tethered balloon used, and examples of data with the format of MT data files stored.

In Chap. 2, the meteorological aspects of the atmospheric boundary layer in the Inland Sea area are discussed from the viewpoint of land-and-sea breeze by using the field observations. Individual paragraphs deal with wind field, mixing layer, vertical diffusivity and the local phenomena, i. e., convergence and divergence associated with land-and-sea breeze, and cyclonic vortex appearing at the time of wind direction inversion. Analyses of temperature and wind fields observed on the ship, at an inland and coastal stations are particularly shown by crosssectional presentations to clarify the features of the boundary layer.

In Chap. 3, air flow observation in the land-and-sea breeze regime is described with paragraphs on non-lift balloon observation and analysis of 1980 RUN 1. The data are presented with horizontal trajectories and vertical fluctuation both in Figure and Table.

In Chap. 4, aircraft measurements of various meteorological elements and air pollutants, such as NO_x , ozone and airborne particulates, are described in detail. We were rather successful in getting data on the areal distribution using a twin-engine plane. Instrumentation with specifications and calibration of each instrument used and the data acquisition system are first given, followed by the data observed and analyzed for 1980, 81 and 82 respectively. In particular, the vertical profiles of pollutants and the diurnal variation of surface temperature are analyzed, and the data of moisture fluctuation are discussed for 1981, while the diurnal variation of the pollutant distribution is discussed with vertical cross-sectional presentation. The abrupt change of pollutant concentration observed in a convective cloud is shown with a continuous record for 1982. Furthermore wind observations by use of Doppler navigation are discussed with the data obtained in trial experiment. The data acquisition system is shown in a flow chart which contains the MT file name.

In Chap. 5, Doppler sodar observation is presented, by which vertical profiles of wind field and turbulent parameter are obtained up to several hundred meters in altitude. After summarizing measurement concept, an example of the results observed is presented and the variation of the wind field in the boundary layer is discussed for the days of 1981 and 1982. In the last part, the MT file data-set of the Doppler sodar is dealt with.

In Chap. 6, transport or diffusion experiment conducted concurrently with field observation in 1980 and 1981 and that in Tsukuba in 1982 by use of activable multiple air tracers (AMAT) are overviewed. Here are presented a review of the foregoing studies, techniques of the AMAT, the sampling, a comparison with that using SF_6 tracer, the results of field experiments, the experiment to evaluate deposition of the tracer and the overall summary and conclusion.

In Chap. 7, Which is the last, under the title of numerical simulation of photo-chemical air pollution using the local wind model, the numerical experiment on transport of primary and secondary air pollutants is described in detail. Starting with the first paragraph on the role of local wind field upon air pollution, summary of a numerical model and mesoscale or local-scale meteorology model is presented with basic equation, heat budget at the ground, description of boundary layer, upper bound-

ary condition and horizontal boundary and a simple one-way nesting method.

Secondly, an air pollution model is presented with the description of an advection-diffusion submodel and a parameterized photo-chemical reaction submodel. In the fourth paragraph, two-dimensional land-and-sea breeze and photo-chemical air pollution are discussed with computational condition, cross-sections of wind and pollutants, diurnal variation of pollutant concentration at the ground. Next, the local wind simulation at the calm in the Inland Sea area is discussed through comparison with field observation.

A part of this research was supported by the fund for researches on environmental pollution prevention granted to national research institutes.

第1章 地上・低層気象観測

初年度と第2年度は環境庁と関係自治体も周辺地点で観測を実施した。第2年度には神戸海洋気象台の春風丸が参加した。そこでここには、参加各機関の観測地点も掲載してある。

1.1 観測地点

初年度（1980年）の観測点の配置状況を図1.1に、観測項目及び観測地点の所在地を表1.1に示す。地点の選定は昭和55年度は対象地域を南北に縦断する4～5本の線を想定して気象現象を捕捉する考えで決められた。そのうち、岡山県吉川と香川県満濃を結ぶ線、広島県中野と愛媛県新居浜を結ぶ線、山口県広瀬と愛媛県松山を結ぶ線の3本の線上の地点を重要な観測点として昼夜観測を実施した。岡山、広島、山口、愛媛、香川、徳島の6県内の30点で上層風を、岡山、広島、高松、新居浜の4地点で鉛直気温を観測した。

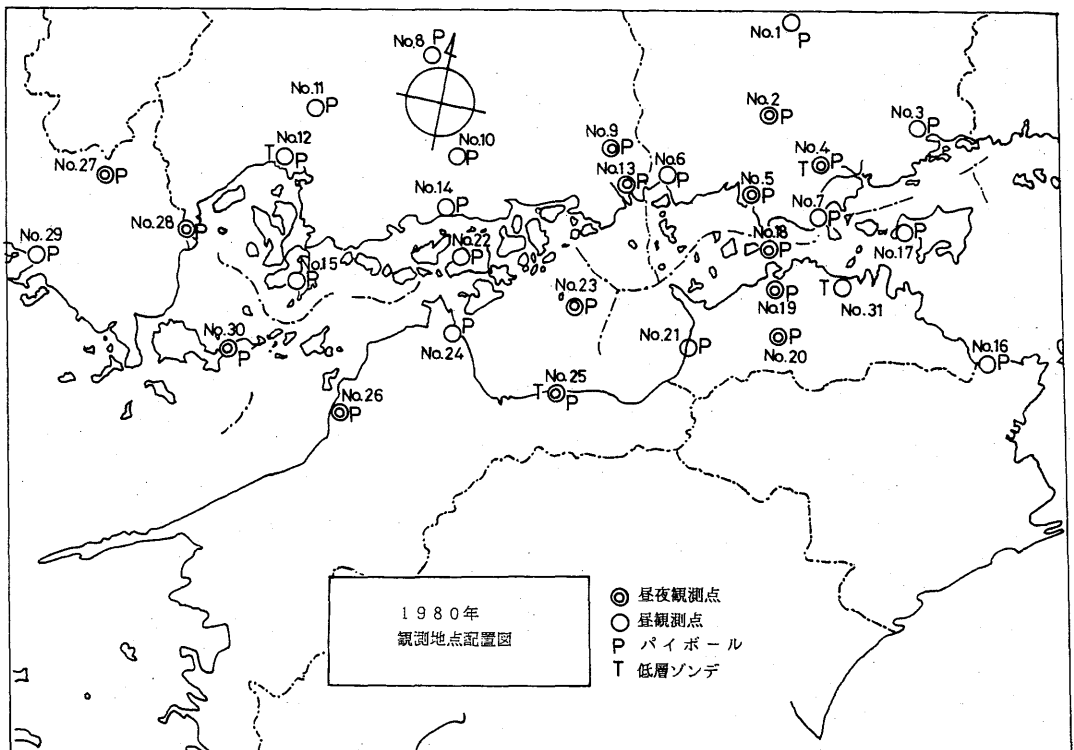


Fig. 1.1 The network of observation points (1980)

Table 1.1 The location and classification of observation points in 1980

観測 地点名	県別 番号 通し 番号	観測種別			観測場所	緯度	経度	標高 (海拔高度 +地上高)	備考 (実施主体 等)
		上層 風	鉛直 気温	地上 気象					
久世	66 1	○			岡山県真庭郡久世町 久世町役場西養魚場跡	35° 4.1	133° 45.1	145m (145+0)	岡山県
吉川	66 2	○			岡山県上房郡賀陽町吉川 吉川公民館北側広場	34° 49.0	133° 45.3	370m (370+0)	"
備前	66 3	○			岡山県備前市東片上126 備前市庁舎屋上	34° 44.5	134° 11.5	12m (1.5+10.5)	"
岡山	66 4	○			岡山県岡山市高松町 高松城址公園	34° 42.6	133° 40.5	5.8m (5.8+0)	"
倉敷	66 5	○			岡山県倉敷市福田町古新田 倉敷市公害監視センター南裏露場	34° 32.2	133° 45.8	5.0m (5.0+0)	"
笠岡	66 6	○			岡山県笠岡市笠岡1876-1 笠岡市庁舎屋上	34° 30.3	133° 30.6	13.2m (3.2+10)	"
玉野	66 7	○			岡山県玉野市宇野1-27-1 玉野市庁舎屋上	34° 29.3	133° 57.0	21.5m (1.5+20)	"
甲田	67 8	○			広島県高田郡甲田町下小原 甲田町浄水場	34° 40.3	132° 45.1	200m (200+0)	広島県
中野	67 9	○			広島県福山市御幸町森脇 御幸小学校屋上	34° 32.1	133° 21.2	25m (10+15)	"
甲山	67 10	○		○	広島県世羅郡世羅町本郷 世羅高校	34° 35.1	133° 2.8	340m (340+0)	環境庁

観測地点名	県別 番号 通し 番号	観測種別			観測場所	緯度	経度	標高 (海拔高度 +地上高)	備考 (実施主体 等)
		上層 風	鉛直 気温	地上 気象					
可部	67 11	○			広島県広島市安佐北区可部町 県可部合同庁舎屋上	34°30.9	132°30.7	35m (20+15)	広島県
広島	67 12	○			広島県広島市南区皆実町 県環境センター屋上	34°22.6	132°28.3	32m (0+32)	"
福山	67 13	○		○	広島県福山市松永町53-1 福山測候所	34°26.6	133°15.0	1.5m (15+0)	気象 研究所
竹原	67 14	○		○	広島県竹原市竹原町北堀1546 竹原市役所屋上	34°20.3	132°54.6	13m (3+10)	環境庁
倉橋	67 15	○			広島県安芸郡倉橋町西深見 倉橋東中学校	34°6.3	132°32.8	0m (0+0)	広島県
折野	71 16	○		○	徳島県鳴尾市北灘町折野屋敷363-3 岩井自転車店裏空地	34°12.9	134°29.3	3m (3+0)	環境庁
小豆島	72 17	○		○	香川県小豆郡土庄町 宿屋横の空地	34°28.9	134°11.1	5m (5+0)	"
与島	72 18	○		○	香川県坂出市与島町 船着場	34°22.9	133°49.5	2m (2+0)	"
坂出	72 19	○			香川県坂出市入船町1-2-28 坂出保健所屋上	34°19.1	133°51.5	11m (1+10)	香川県
満濃	72 20	○			香川県仲多度郡満濃町岸ノ上112 神野小学校	34°10.7	133°51.0	90m (90+0)	"

観測 地点名	県別 番号 通し 番号	観測種別			観測場所	緯度	経度	標高 (海拔高度) (+地上高)	備考 (実施主体 等)
		上層 風	鉛直 気温	地上 気象					
観音寺	72 21	○		○	香川県観音寺市駅前 ホテル九十九屋上	34° 7.3	133° 39.4	15m (5+10)	環境庁
大三島	73 22	○		○	愛媛県越智郡大三島町 大三島町役場駐車場	34° 14.7	133° 0.0	2m (2+0)	"
魚島	73 23	○		○	愛媛県越智郡魚島村 集会所	34° 10.5	133° 19.5	2m (2+0)	気象 研究所
今治	73 24	○		○	愛媛県今治市別宮町1丁目 今治市庁舎屋上	34° 3.8	133° 0.1	15m (3+12)	環境庁
新居浜	73 25	○	○	○	愛媛県新居浜市菊本町 2-15-1 下水処理場	33° 58.9	133° 17.0	2m (2+0)	気象 研究所
松山	73 26	○		○	愛媛県松山市北持田町102 松山地方気象台構内	33° 50.4	132° 46.8	32.2m (32.2+0)	環境庁
広瀬	81 27	○		○	山口県玖珂郡錦町須万地 村上別館屋上	34° 15.5	131° 57.4	107.5m (100+7.5)	"
岩国	81 28	○			山口県岩国市麻里布町 6-15-26 岩国保健所屋上	34° 9.1	132° 13.3	9.3m (1.9+7.4)	山口県
徳山	81 29	○			山口県徳山市月丘4-10 今指小学校	34° 3.6	131° 48.3	8.5m (8.5+0)	"
東和	81 30	○			山口県大島郡東和町大字和田 東和農協柑橘選果場	33° 55.5	132° 24.5	3m (3+0)	"

観 測 地点名	県別 番号 通し 番号	観 測 種 別			観 測 場 所	緯 度	経 度	標 高 (海拔高度) (+地上高)	備 考 (実施主体) (等)
		上層 風	鉛直 気温	地上 気象					
岡 山	6 6 4		○		岡山県岡山市津島桑ノ木町 1-16 岡山地方気象台構内	34°41.0	133°55.0	3.3m (3.3 + 0)	環 境 庁
広 島	6 7 1 2		○		広島県広島市中区江波南 1-40-1 広島地方気象台構内	34°22.0	132°26.0	29.1m (29.1 + 0)	"
高 松	7 2 3 1		○		香川県高松市伏石町 1277 高松地方気象台構内	34°19.0	134° 3.0	8.7m (8.7 + 0)	"

第2年度（1981年）は対象地域を岡山、広島、山口、愛媛、香川、徳島の各県のうち、瀬戸内海沿岸部、島しょ部及び内陸部とした。

観測点の配置は、前年度の観測点の他に、新たに内陸部における風の場の構造を解明できるデータを得るために、岡山県西部に新見、高梁の2点を、広島県北部に三次を、愛媛県南東部に別子を、燧灘沿岸に松永、鞆、北木島、三崎、宮窪を、周防灘に橘を加えた。また新居浜と魚島の間で春風丸を停泊して海上の観測を実施した（図1.2、表1.2）。

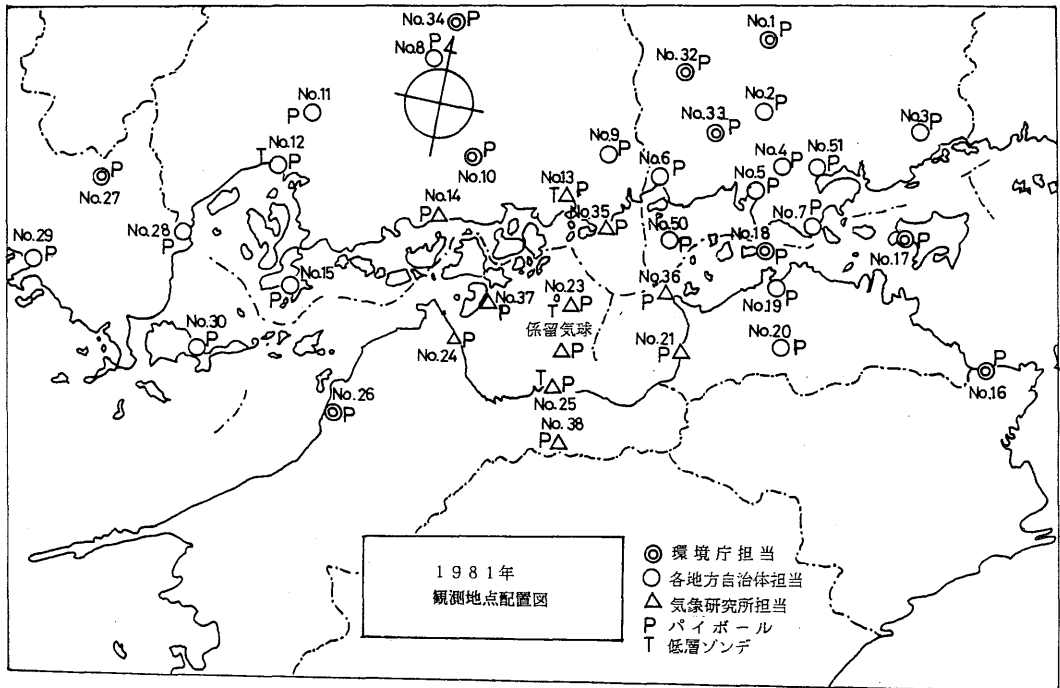


Fig. 1.2 The same as in Fig. 1.1 but 1981

Table 1.2 The location and classification of additional observation points in 1981

観測 地点名	県別 番号 通し 番号	観測種別			観測場所	緯度	経度	標高 (海拔高度) (+地上高)	備考 (実施主体 等)
		上層 風	鉛直 気温	地上 気象					
新見	66 32	○		○	岡山県新見市高尾2281-1 県振興局独身寮屋上	34°55.4	133°28.6	216.6m (2052+11.4)	環境庁
高梁	66 33	○		○	岡山県高梁市落合町近似 286-1 高梁環境保健所	34°47.5	133°36.9	68.2m (60+8.2)	"
北木島	66 50	○			岡山県笠岡市北木島町	34°22.5	133°32.8	2.5m (2.5+0)	特 志
松永	67 13	○	○	○	広島県福山市松永町53-1 福山測候所	34°26.6	133°15.0	1.5m (1.5+0)	気象 研究所
三次	67 34	○		○	広島県三次市十日市町救 1130-3 三次合同庁舎	34°48.1	132°51.7	175m (155+20)	環境庁
鞆	67 35	○		○	広島県福山市鞆町 福山市鞆支所	34°22.9	133°23.2	20.8m (5.7+15.1)	気象 研究所
三崎	72 36	○		○	香川県三豊郡詫間町大字大 浜 荘内自然休養センタ ー屋上	34°13.8	133°36.8	15.3m (7+8.3)	"
宮窪	73 37	○		○	愛媛県越智郡宮窪町宮窪 町役場屋上	34°10.1	133°4.5	17.3m (6+11.3)	"
別子	73 38	○		○	愛媛県新居浜市中筋町 1-12-10 山根配水場	33°55.3	133°18.5	51m (51+0)	"
橘	81 30	○			山口県大島郡橘町上居 町立中島小学校	33°54.9	132°17.4	1.8m (1.8+0)	山口県
春風丸		○	○	○		34°16.2	133°30.0		神戸海洋 気象台

第3年度（1982年）は、前2年の観測から海陸風循環が四国側に片寄る傾向がみられたので、この点をさらに追求する目的で備讃瀬戸を選定し、岡山県吉川と香川県満濃、財田を結ぶ線上で観測した。吉川、総社、倉敷、与島、坂出、満濃、財田の7地点のほか、高知で上層風を、総社、倉敷、与島、満濃の4地点で鉛直気温を観測した。

表に示した観測地点番号は、県別番号にアメダス表示番号を、地点番号には県内の北から南、東から西の順に一連番号を付した（図1.3、表1.3）。

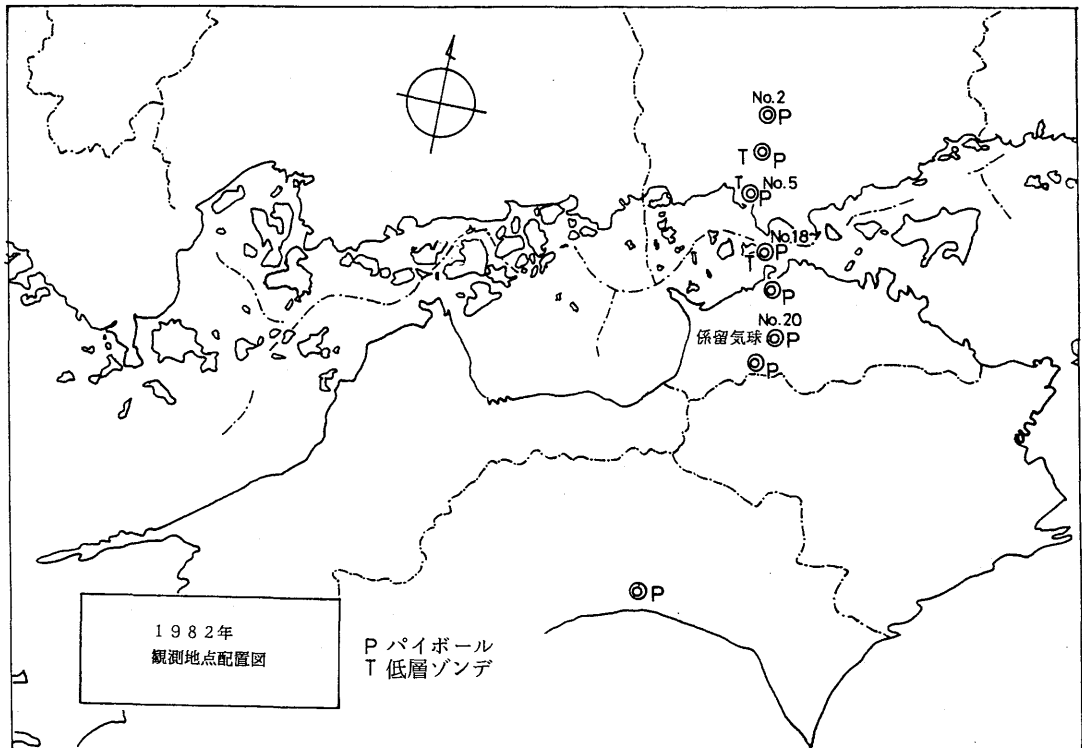


Fig. 1.3 The same as in Fig. 1.1 but 1982

Table 1.3 The same as in Table 1.1 but 1982

観測 地点名	県別 番号 通し 番号	観測種別			観測場所	緯度	経度	標高 (海拔高度) (+地上高)	備考 (実施主体) (等)
		上層 風	鉛直 気温	地上 気象					
吉川	66 2	○			岡山県上房郡賀陽町吉川 吉川公民館北側広場	34°49.0	133°45.3	370m (370+0)	気象 研究所
総社		○	○		岡山県総社市中央1-1-2 消防署屋上	34°41'	133°45'		"
倉敷	66 5	○	○		岡山県倉敷市福田町古新田 倉敷市公害監視センター南裏露場	34°32.2	133°45.8	5.0m (5.0+0)	"
与島	72 18	○	○	○	香川県坂出市与島町 船着場	34°22.9	133°49.5	2m (2+0)	"
坂出	72 19	○			香川県坂出市常盤町2丁目 常盤公園内	34°19'	133°50'		"
満濃	72 20	○	○		香川県仲多度郡琴平町5条 313 消防署訓練場	34°11'	133°49'		"
財田		○			香川県三豊郡財田町財田上 3487-1 宝山農協財田上支所 前	34°07'	133°48'		"
高知		○			高知県南国市物部国有無番 地 高知空港	33°32'	133°41'	10m	"

1.2 観測時刻

観測期間及び回数は地点によって異なるので表 1.4～1.6 に年ごとに各地点の観測時刻を示した。

Table 1.4 The durations of observations and classifications of observation points in 1980

	型	観 測 期 間	回数	観 測 地 点 名
上 層 風 観 測	I	1980 年 7 月22日 6 時～21時	28回	備前、笠岡、玉野、甲田、甲山、可部
		1980 年 7 月23日 6 時～17時		広島、竹原、倉橋、折野、小豆島 観音寺、大三島、今治、徳山
	II	1980 年 7 月22日 6 時～21時	32回	久世、吉川、岡山、倉敷、与島、坂出
		1980 年 7 月22日 21時 1980 年 7 月23日 1 時、3 時 5 時～17時		満濃、松山、広瀬、岩国、東和
上 層 気 温 観 測	III	1980 年 7 月22日 6 時 ～1980 年 7 月23日 ～17時	36回	福山、魚島
	IV	1980 年 7 月22日 6 時 ～1980 年 7 月24日 ～17時	53回	新居浜
上 層 気 温 観 測	I	1980 年 7 月22日 6 時～24時	18回	新居浜
	II	1980 年 7 月22日 9 時～18時 (3 時間毎) 1980 年 7 月23日 8 時～15時 (3 時間毎)	9 回	岡山、広島、高松

Table 1.5 The same as in Table 1.4 but 1981

	型	観 測 期 間	回数	観 測 地 点 名
上 層 風 観 測	I	1981 年 8 月19日 6 時～21時 1981 年 8 月20日 6 時～17時	28回	久世、備前、笠岡、玉野、新見、高梁 岡山、甲田、甲山、可部、広島、倉橋、 三次、折野、小豆島、徳島
	II	1981 年 8 月19日 6 時 ～ 1981 年 8 月20日 17時	36回	吉川、岡山、倉敷、北木島、中野、与島 坂出、満濃、松山、広島、岩国、橘
	III	1981 年 8 月19日 6 時 ～ 1981 年 8 月22日 9 時	76回	松永、竹原、鞆、観音寺、三崎、魚島 今治、宮窪、別子
	IV	1981 年 8 月18日 6 時 ～ 1981 年 8 月23日 9 時	124回	新居浜
	V	1981 年 8 月19日 15時 ～ 1981 年 8 月21日 21時	55回	春風丸
上 層 気 温 観 測	I	1981 年 8 月19日 8 時～18時 1981 年 8 月20日 8 時～15時	9 回	岡山、広島
	II	1981 年 8 月19日 6 時 ～ 1981 年 8 月22日 9 時	26回	松永、魚島、新居浜
	III	1981 年 8 月19日 15時 ～ 1981 年 8 月21日 21時	19回	春風丸

Table 1.6 The same as in Table 1.4 but 1982

	型	観 測 期 間	回数	観 測 地 点 名
上層風観測	昼	1982年 7月27日 9時	73回	吉川、総社、倉敷、与島、坂出、満濃 財田、高知
	夜	～1982年 7月29日 9時		
上層気温観測	昼	1982年 7月27日 9時	25回	総社、倉敷、与島、満濃
	夜	～1982年 7月29日 9時 (3時間毎)		

1.3 観測装置の仕様

本研究のための観測に使用した低層ゾンデと係留気球観測装置の主な仕様は次の通りである。

1.3.1 低層ゾンデ

1 規格と主要性能

(1) 測定要素ならびに精度

気温： $-20^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ 、 0.1°C

気圧：1040mb～950mb、10mbごと、950～750mbは30mbごと、 $\pm 1\text{mb}$ 。

(2) 送信器

発振周波数： $404.5\text{MHz} \pm 2500 \times 10^{-6}$

空中線電力：20mW

変調周波数：10～200Hz

電波型式：AM(A₂)

(3) 電源：18V、OO6P×2

(4) 寸法・重量：145×150×125mm、410g

2 センサー

(1) 気圧：空盒に連結した横干とプリント板接点により回路が作動すると、記録されている気温カーブが 1°C 低温側にシフトする。接点の気圧は気圧チャンバーにより飛揚前に検定しておく。

(2) 気温：タングステン・ワイヤーの抵抗変化をブリッジにより電圧変換し、10～200Hzの低周波信号に変換。

(気象協会仕様書による)

1.3.2 係留気球

昭和56年の春風丸と昭和57年の香川県の満濃で行った（低層ゾンデの代りに使用した）係留気球の観測装置の主な仕様は次の通りである。

A 感部

通風式乾湿球温度計：サーミスター

気圧：空盒

風速：3杯発電式

風向：磁針

B 送信

周波数：403.5 MHz、FM

出力：5 mW

チャンネルA：2500 Hz、時間切換 10 チャンネル

チャンネルB：連続

C 送信器

大きさ：9 × 12 × 48 cm³

重さ：1000 g

D 受信器

大きさ：15 × 11.5 × 44.5 cm³

重さ：672 g

マイコン内蔵：記憶容量 2500 ワード

E 気球

大きさ：4.9 × 1.39 m

体積：3.25 m³

浮力：1.9 kg

材質：プラスチック

F ウィンチ

線長：1000 m

重さ：27 kg

大きさ：40 × 23 × 25 cm

消費電力：12 V. 1 ~ 5 A

1.4 代表地点の観測結果及びデータ収録仕様

期間中の地上・低層気象観測結果は紙面の都合上全部掲載できないので、各年の代表的な地点の観測結果を表 1.7～1.9 及び図 1.4～1.6 に、また収録されているデータの仕様を図 1.7 に示した。

地点名 ^{ニイハマ} 新居浜

Table 1.7 The record of surface weather observation (1980)

月日	種別 \ 時刻	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
7月22日	気温 °C						25.0	25.1	26.4	26.7	27.8	28.4	29.4	29.2	29.2	29.1	29.0	28.8	28.6	28.2	27.4	27.4	27.2	27.2	27.0
	天気						⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	視程 km						10	10	6	6	5	6	6	6	8	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	雲(量・形)						5 Cc Ac	2 Ci Cc	3 Ci	4 Ci	8 Ci	8 Ci	9 Ci Ac	9 Cs Ac	9 Ac	10 Ac	6 Ac	10 Ac	9 Ac	10 Ac	10 Ac	10 Ac	10 Ac	10 Ac	10 Ac
7月23日	気温 °C	26.5	26.4	26.2	26.1	25.8	25.5	26.0	26.3	26.7	27.6	28.1	28.2	28.0	27.3	←		欠測		→	23.0	23.2	23.2	22.6	22.8
	天気	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	▽	▽						⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	視程 km	10	10	10	10	10	5	5	3	2	3	3	3	3	2						15	10	10	10	10
	雲(量・形)	8 Ac	10 Ac	10 Ac	10 Ac	10 Ac	10 Ac	10 Ac	10 Cs	10 Cs	10 Cs	10 Ac	10 Ac	10 Ns	10 Ns						10 As Ac	10 As Ac	10 Ac	10 Ac	10 Ac
7月24日	気温 °C	23.5	22.7	23.6	22.8	22.8	23.4	23.6	24.2	24.6	25.5														
	天気	⊙	⊙	⊙	⊙	●	⊙	●	⊙	⊙	⊙														
	視程 km	10	10	10	10	10	10	10	10	15	10														
	雲(量・形)	10 Cu Ac	10 Ac	10 St Cu Ac	10 St Cu Ac	10 St Ns	10 St Cu As	10 St Cu Cb	10 St Cu As	10 St Cu Ac	5 St Cu Ac As														

Table 1.8 The same as in Table 1.7 but 1981

地点名 新居浜

月日	種 別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
8月	気 温 °C	26.4	25.1	24.7	25.0	24.6	25.0	26.0	26.5	27.2	27.4	27.9	28.7	29.3	30.0	30.0	29.2	29.0	28.5	28.4	28.0	27.2	27.6	27.0	26.5
	湿 度 %	83	81	84	84	81	85	74	75	75	78	78	72	72	64	75	75	73	69	68	73	81	75	80	80
	天 気	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ
	視 程 km	15	15	15	15	15	15	15	15	15	10	10	10	10	15	15	15	10	10	10	10	10	10	10	10
19日	雲(量・形)	6 Ac	7 Ac Ci	0 Ac	0 Ci	5 Ac Ci Cc	7 Ac Cu Ci	10 Ac	10 Ac Ci	7 Ac Ci Cc	8 Ac Cu	8 Ac Cu	2 Ci Cu	7 Ci Cc Cu Cb	8 Ac Ci Cu Cb	8 Ac Ci Cu	8 Ac Ci Cu	9 Ac Ci Cc Cu Cb	6 Ci Ac Cc Cu	8 Ci Ac Cu Cc	10 As Cs	7 Cs	7 Cs	7 Ac Cs	8 Cs Ac
8月20日	気 温 °C	26.7	26.6	25.6	25.7	25.2	25.6	27.3	26.9	27.6	28.2	27.8	28.6	28.8	29.2	30.5	29.7	28.4	27.5	27.2	27.0	26.9	26.4	26.6	26.0
	湿 度 %	82	80	80	78	81	79	70	82	80	77	80	80	79	77	71	73	85	91	86	90	89	91	89	93
	天 気	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓐ
	視 程 km	10	15	10	15	15	15	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	7
21日	雲(量・形)	6 Ac Ci Cs	8 Cs Ci Ac	8 Cs Ci Ac	7 Ac	7 Cu	8 Cu As	9 Ac Cu Ci	1 Ac Ci	2 Cc Ac	1 Ci Cc Ac Cu	8 Ac Ci Cc Cu	2 Ci Cu	7 Ac Ci Cu	8 Cu Ci Ac	10 Cu Ac	10 Cu Ac	10 Cu Cb Ac	10 Cu Ac Cb	10 Cu Ac	8 Cu Ac	8 Cu	8 Cu	10 Cu	4 Cu
8月21日	気 温 °C	26.0	25.9	26.0	26.1	26.0	26.1	26.2	26.0	27.1	27.9	28.4	28.8	29.5	29.9	30.2	29.2	28.7	28.9	28.4	27.6	27.8	27.8	27.0	27.0
	湿 度 %	94	93	92	92	87	88	88	93	86	83	81	79	76	73	73	76	75	80	81	85	87	82	82	83
	天 気	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ	Ⓐ
	視 程 km	7	8	6	6	5	8	8	7	7	7	7	8	10	10	10	10	10	10	7	10	10	10	10	10
22日	雲(量・形)	3 Cu St	8 Cu St	9 Cu St	9 Cu St	9 Cu St	7 Cu Ac St	7 Cu Ci St	8 Cu	8 Cu Ac	7 Cu Ac	9 Cu Ac	9 Ac Cu	8 Ac Cu	7 Ci Cu Ac	8 As Cu Ac	9 As Cu Ac Ci	8 As Cu Ac Ci	7 Ci Ac Cb Cu	3 Ci Cu Ac	3 Ci Cu	2 Ci	3 Ci	3 Ci Ac	5 Ci Ac

地点名 クラシキ 倉敷

Table 1.9 The same as in Table 1.8 but 1982

月日	時刻 種別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
7月27日	気温 °C									27.4	27.6	29.4	27.4	31.0	32.0	31.8	31.5	30.5	30.2	28.4	29.5	29.4	26.2	25.4	25.2
	天気									☉	☉	☉	⊙	☉	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	☉	☉	☉	☉	☉	☉
7月28日	気温 °C	24.8	24.8	24.8	24.6	23.7	24.3	25.1	26.0	26.3	28.0	28.2	28.8	29.5	30.0	31.2	29.6	28.6	27.6	23.0	23.0	22.8	23.3	23.3	23.6
	天気	☉	☉	☉	⊙	☉	☉	☉	☉	☉	☉	☉	⊙	⊙	⊙	⊙	☉	☉	☉	☉	☉	⊙	☉	☉	☉
7月29日	気温 °C	23.2	23.1	23.2	23.2	23.5	23.8	24.6	25.2	26.4	28.4	30.2	30.6	32.6	32.4	31.4	30.2	29.6	29.2	26.4	24.3	24.8	24.8	24.4	24.0
	天気	☉	☉	☉	☉	☉	☉	☉	☉	☉	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	☉	☉	☉	☉	☉	☉	⊙
7月30日	気温 °C	23.5	23.8	23.6	22.9	22.8	23.6	24.2	24.8	25.4															
	天気	⊙	☉	⊙	☉	☉	☉	☉	☉	⊙															

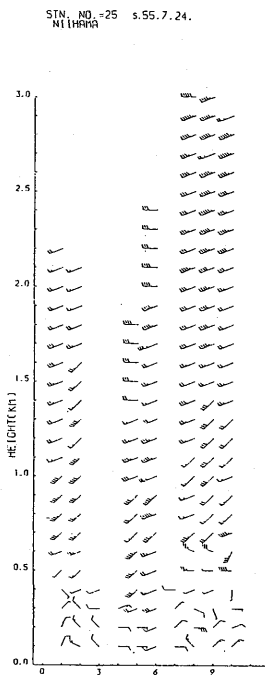
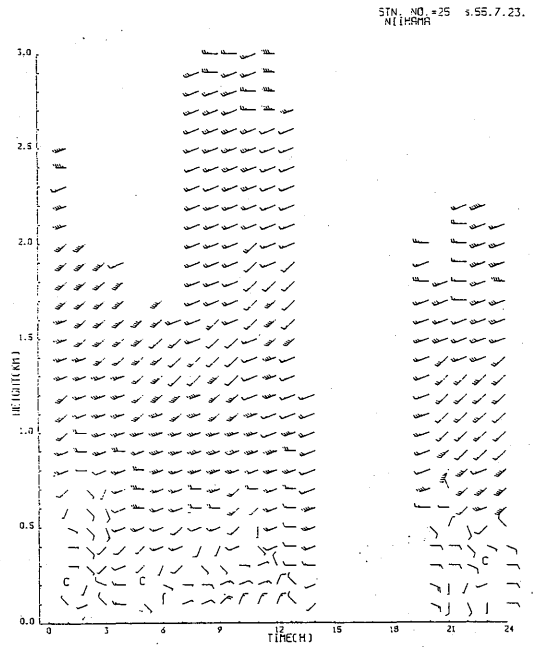
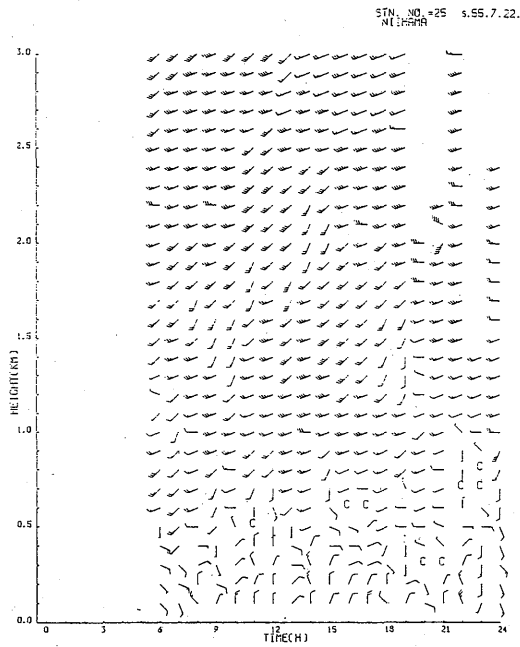


Fig. 1.4 The vertical time cross-section of wind at a representative point (1980, Niihama)

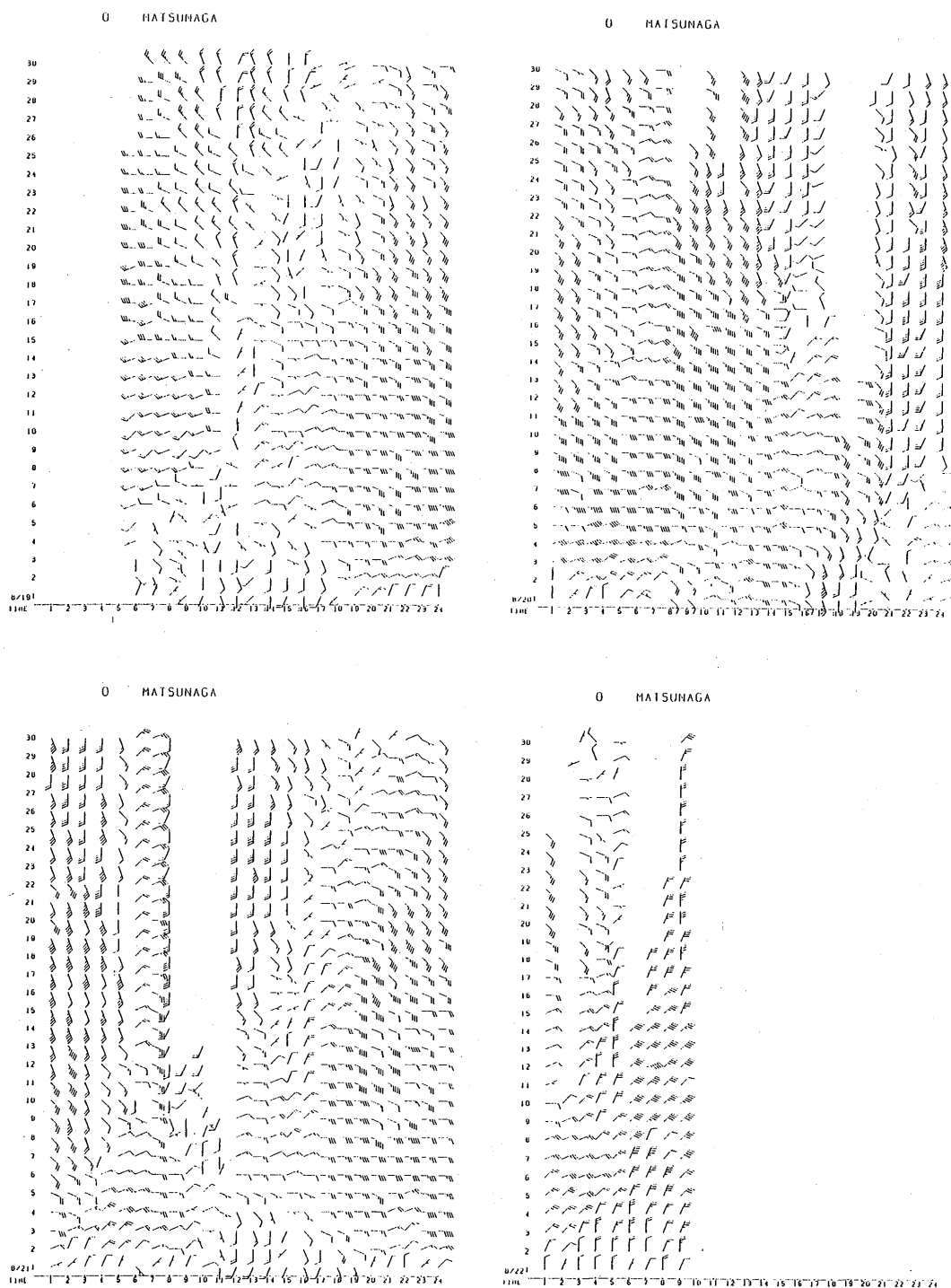


Fig. 1.5 The same as in Fig. 1.4 but 1981, Matsunaga

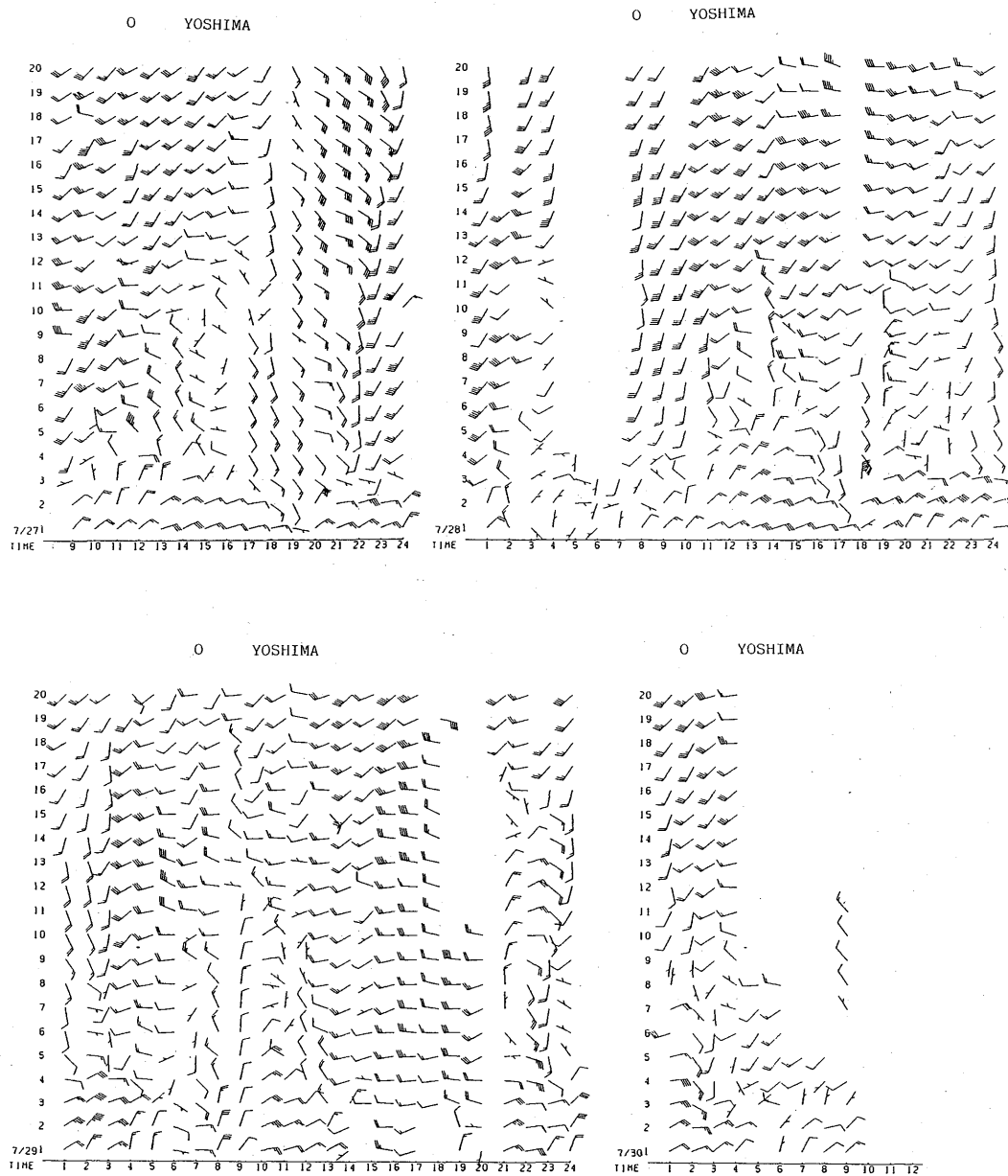


Fig. 1.6 The same as in Fig. 1.4 but 1982, Yoshima

パイロットバルーンフォーマット

3	6	11	31	51
県別	番号	高度	観測地点名 (カタカナ)	観測地点名 (ローマ字)
○	○	○	○	○

4	6	8	10	12	14	16	19	24	29	34
番号	通番	年	月	日	時	分	観測回数	修正高度角	修正方位角	中止理由
0	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○

5	10	15	
100 m 高度角	100 m 方位角	200 m 高度角	
○	○	○	

5	10	
300 m 高度角	300 m 方位角	
○	○	

5	10	
1700 m 高度角	1700 m 方位角	
○	○	

5	10	
2500 m 高度角	2500 m 方位角	
○	○	

70	75	80	
800 m 高度角	800 m 方位角		
○	○		

70	75	80	
1600 m 高度角	1600 m 方位角		
○	○		

70	75	80	
2400 m 高度角	2400 m 方位角		
○	○		

5	10	
300 m 方位角		
○		

ゾンデフォーマット

3	6	11	31	51
県別	番号	高度	観測地点名 (カタカナ)	観測地点名 (ローマ字)
○	○	○	○	○

4	6	8	10	12	14	16	19	22	30
番号	通番	年	月	日	時	分	観測回数	特異回数	
○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

4	8	12	16
地上気温	100 気温	200 気温	300 気温
○	○	○	○

4	8	12	16
2000 気温	2100 気温	2200 気温	
○	○	○	

4	8	12	16
特異点高度	特異点気温	特異点高度	特異点気温
○	○	○	○

72	76	80	
1700 気温	1800 気温	1900 気温	
○	○	○	

36	40	44	
2900 気温	3000 気温		
○	○		

収録順序

File 1 パイロット 200 m/min 21点
 File 2 " 150 m/min 9点
 File 3 ゾンデ 4点

Fig. 1.7 Specification of the upper wind MT data

参 考 文 献

Morris, A. L., D. B. McBeth, 1975: A small tethered ballon sounding system. Bull. Amer. metro. Soc., 56, 964-969.

第2章 瀬戸内海の海陸風の特徴と局地気象現象*

2.1 瀬戸内海の海陸風の特徴

2.1.1 1980年度観測

瀬戸内海地域において1980年のパイロットバルーンの観測網はかつてない密度の高いものであった。観測期間中の海風と陸風の発達した状態を示す風の分布図が図2.1、2.2に示されている。両図と

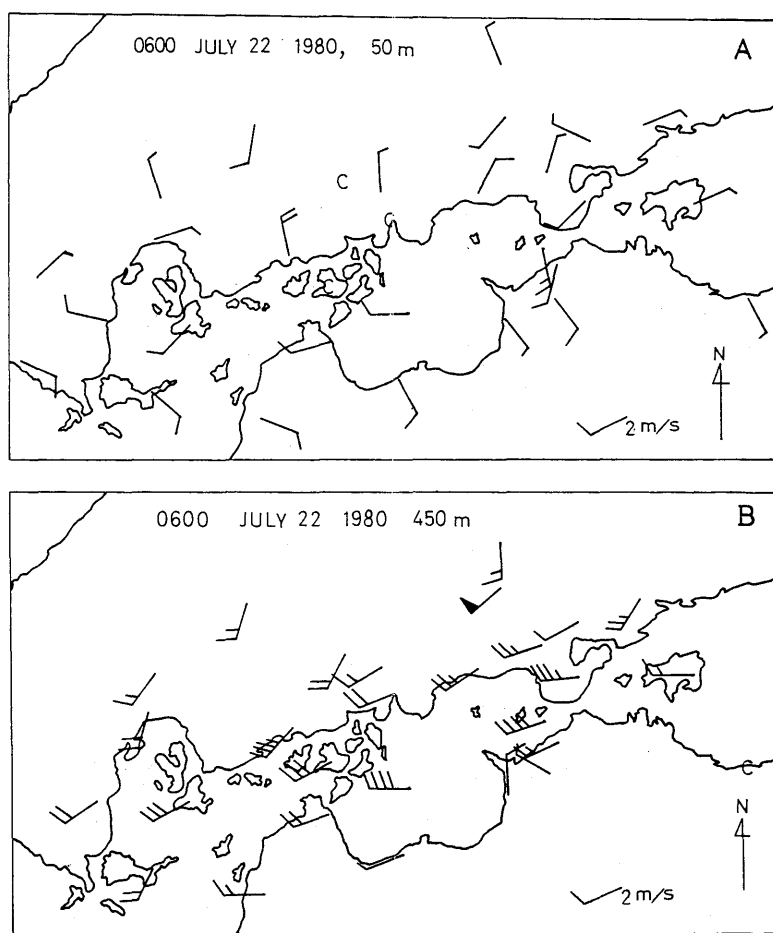


Fig. 2.1 An example of the wind distribution in the case of land breeze (0600JST 22nd July 1980). The upper and lower figures belong to the altitude of 50 m and 450 m respectively. A half barb is equivalent to 1 m/s in the following of this report.

* 鈴木彌幸・吉川友章・小出 孝：応用気象研究部

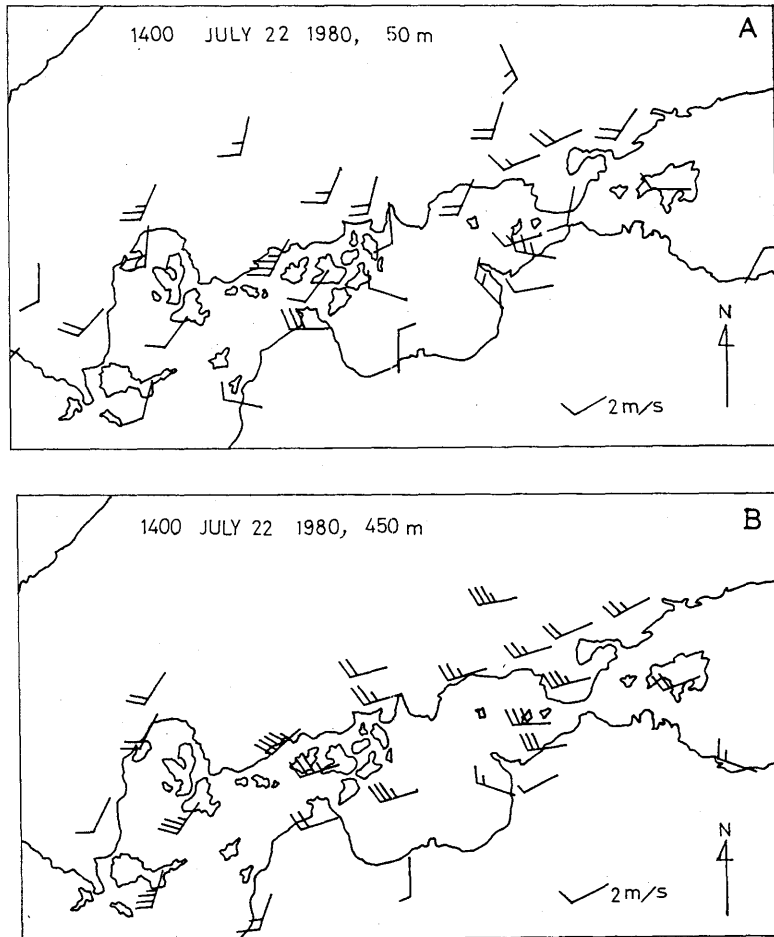


Fig. 2.2 An example of the wind distribution in the case of sea breeze (1400JST 22nd July 1980). The upper and lower figures belong to the altitudes of 50 m and 450 m respectively.

も、450 mの高度では瀬戸内海をほぼ西南西から東北東に向かって5～8 m/sの風が吹き抜けている。その下の50 mの高度では、日中には陸へ向かう流れが、また早朝には海に向かう流れがある。これはそれぞれ海風、陸風に対応している。この地表付近の海陸風の上には、図 2.3 に見られるように四国側の新居浜では顕著な反流がみられる。しかし、中国側には海風の反流は明瞭でない。日中の局地循環は四国側でより顕著に現れていることが分かる。

夏の瀬戸内海の風系の特徴として、下層にジェット状況の強風域が発生することがある。図 2.4 にその一例が示されている。破線で囲まれた部分に10 m/s を越す西～南西の強風域がある。これは、この観測では瀬戸内海の北岸にみられる。類似の現象には宮田 (1976) の指摘があり、また第 7 章で述べる数値シミュレーションでも指摘される。

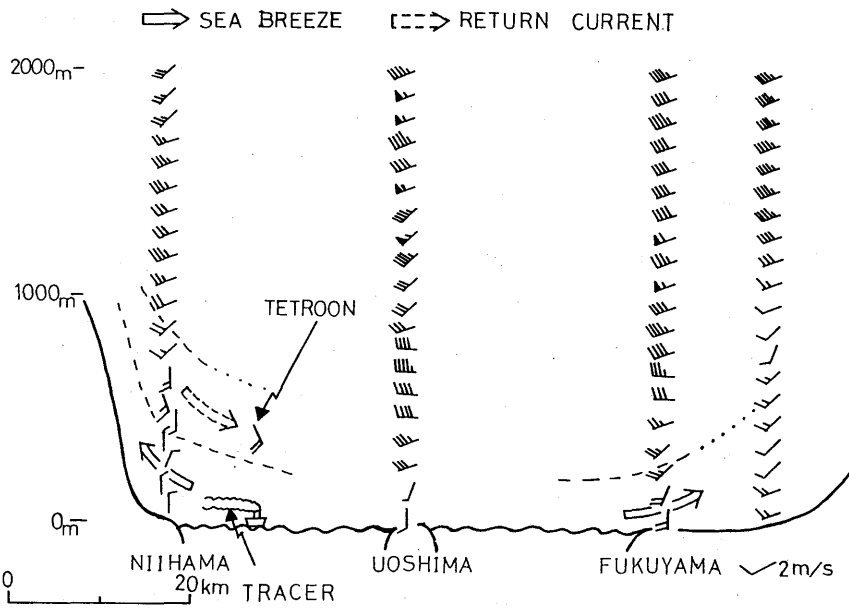


Fig. 2.3 A model of local circulation in the daytime of summer on the north-south cross-section through the Hiuchinada with the actual winds at 1400JST 22nd July 1980.

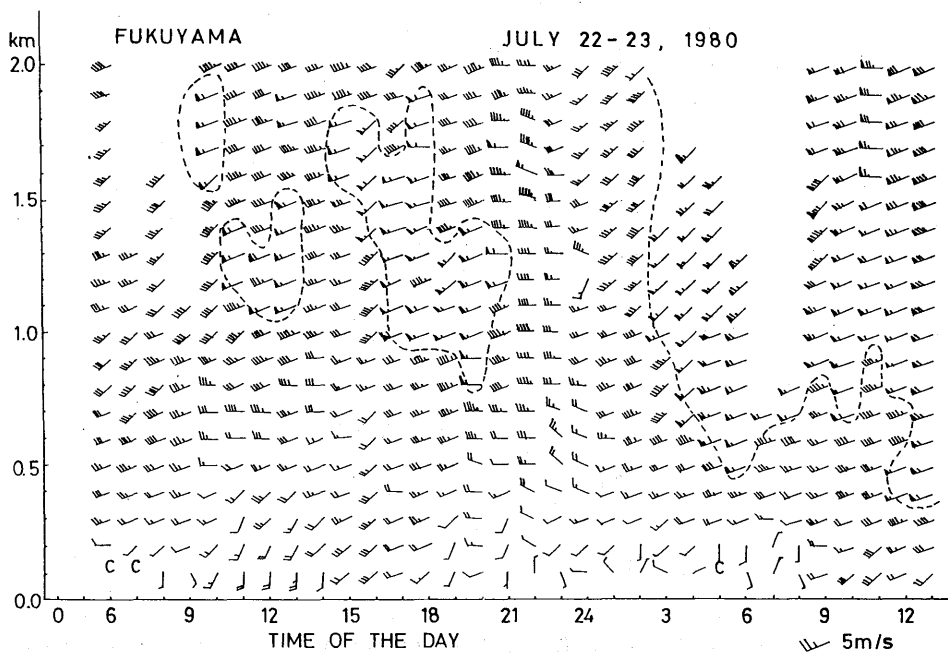


Fig. 2.4 A time-altitude cross-section in Fukuyama. The winds within broken lines are strong.

もう一つの特徴は、瀬戸内海を通り抜ける一般流と、一般流が弱く局地循環がより顕著に発達する地域の分布である。図 2.1 (B) では、燧灘の北半分は瀬戸内海をほぼ西から東へ吹き抜ける風の通路となっているが、南半分の海域は東西風成分の弱い地域となっていることが分かる。これはトレーサー実験、ノンリフトバルーンの追跡においても確認されている。

2.1.2 1981 年度観測

1981年の観測では、高さ 1,500 m ではほぼ東南東 4 m/s 程度の風が吹いていた。海風の例として 19日15時瀬戸内海中部の南北断面を図 2.5 に示す。低層では海より陸の方が高温であり、海風が吹いている。図 2.6 等の上層風の分布図を見ると、瀬戸内海北部を東西に走る線から風が南北に吹き出している。鞆では高さ 650 m、別子では高さ 350 m で海風の反流が認められる。瀬戸内海が狭くなっている三崎半島付近では風が強く、高さ 650 m では 6 m/s の風が吹いている。陸風の例として 20日 3時の瀬戸内海中部の南北断面図が図 2.7 に示されている。低層では海より陸の方が低温である。図 2.8 の上層風の分布図を見ると、高さ 100 m では (A) 瀬戸内海と中国地方は北風、新居浜、今治では弱い南風が吹いており、春風丸付近をほぼ東西に走る線に風が南北から集まってきている。瀬戸内海上層では東寄り 2~10 m/s の風が吹いており、四国北岸の観音寺、新居浜、別子、春風丸の上層では弱い南風が吹いている (B)。

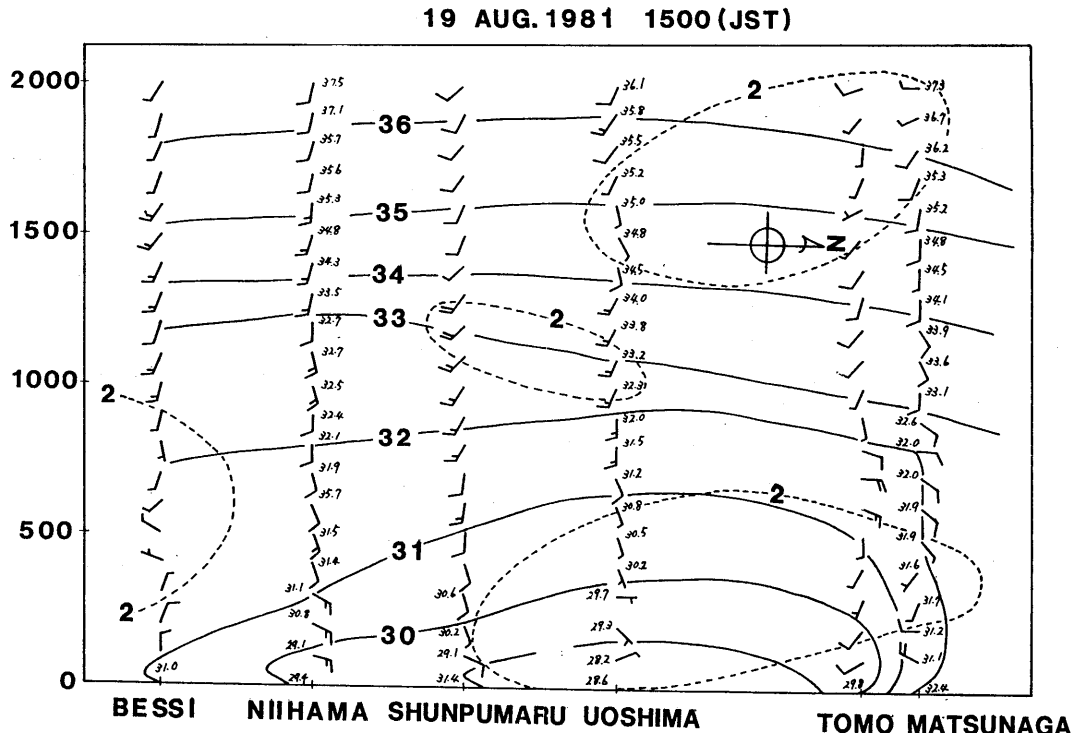
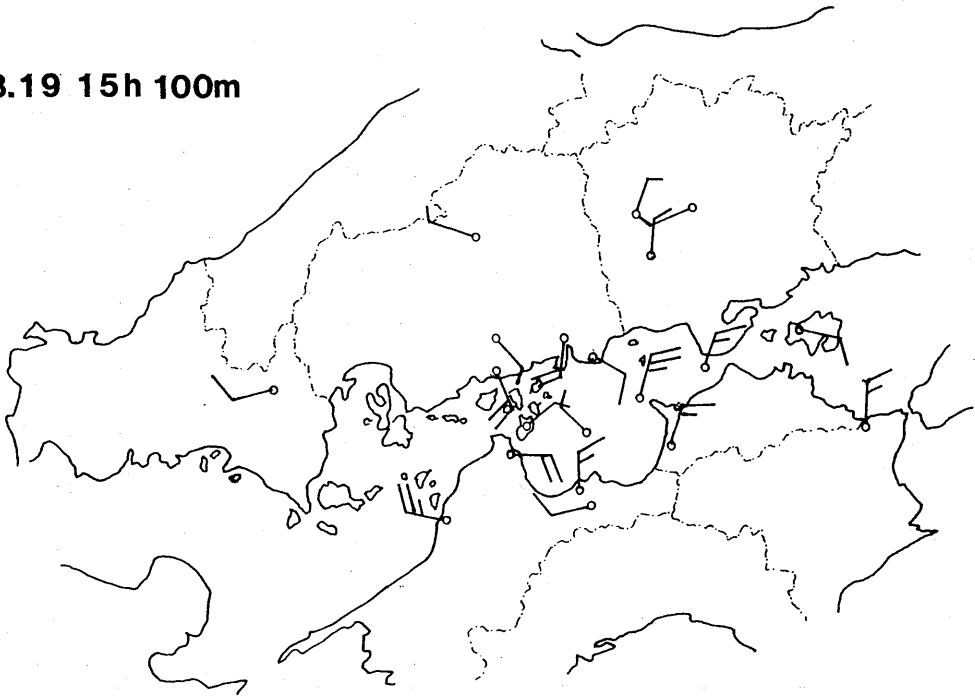


Fig. 2.5 The north-south cross-section through the Hiuchinada (1500JST 19th August 1981).

8.19 15h 100m



8.19 15h 500m

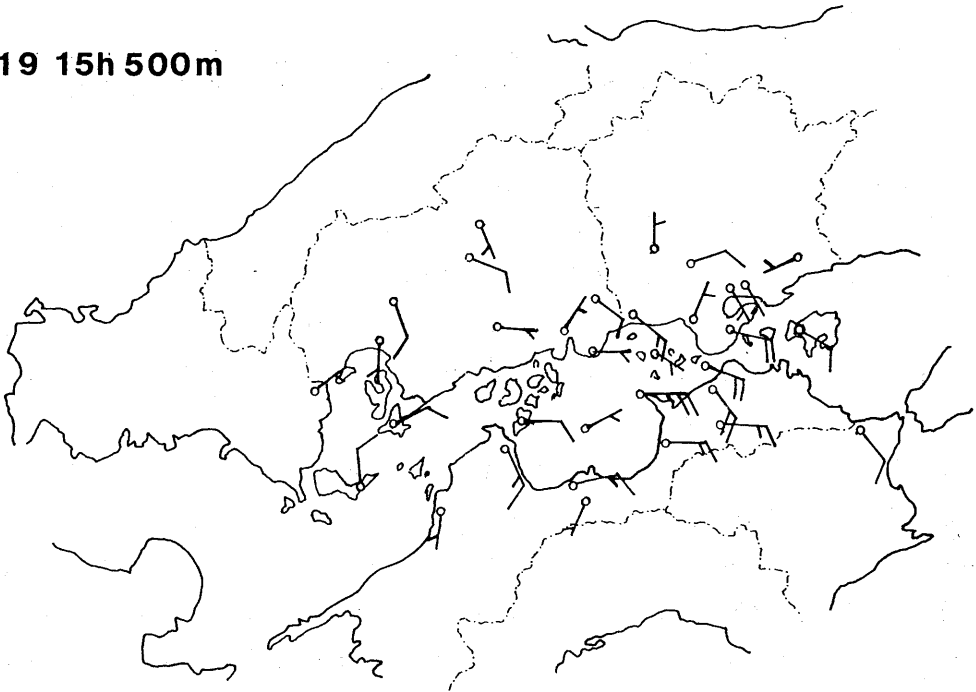


Fig. 2.6 An example of the wind distribution in the case of sea breeze (1500JST 19th August 1981). The upper and lower figures belong to the altitudes of 100 m and 500 m respectively.

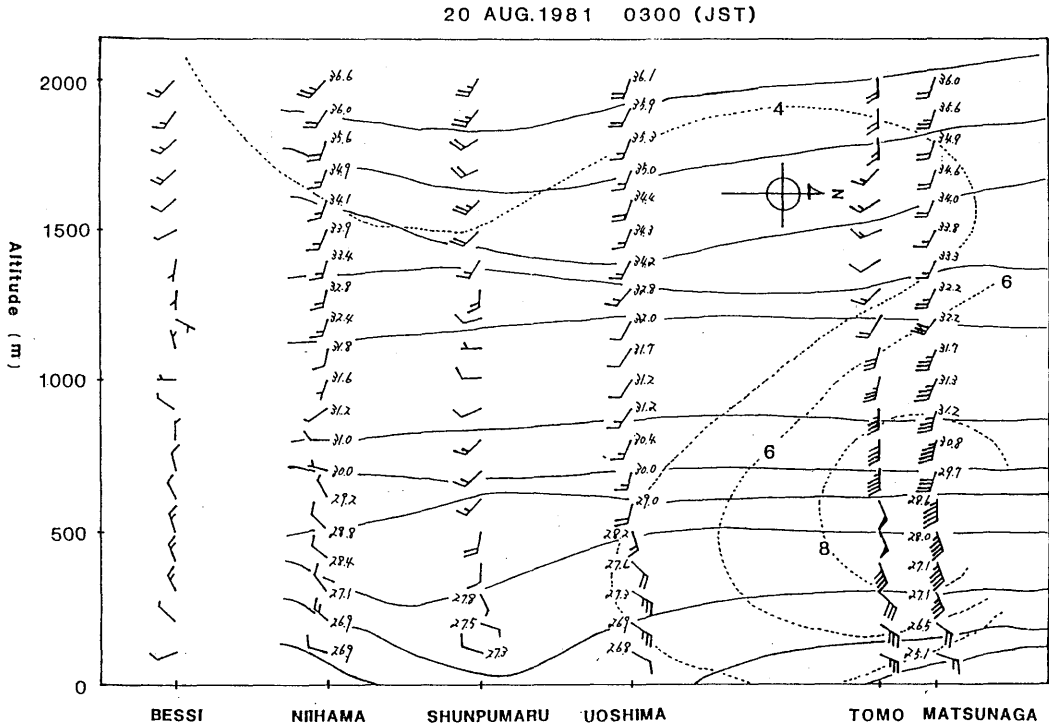
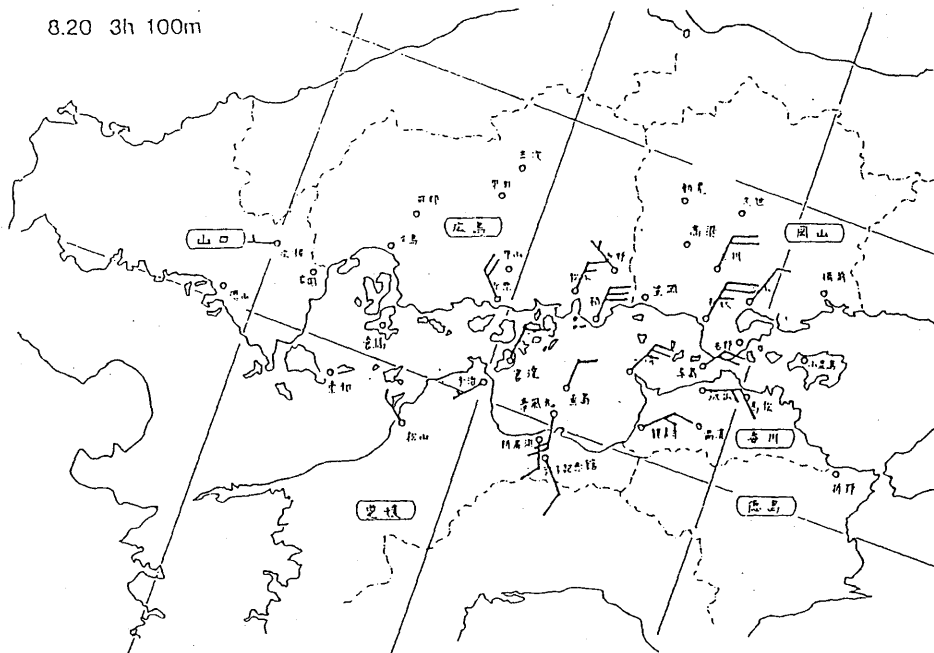


Fig. 2.7 The vertical cross-section of wind, potential temperature and dew-point temperature on the north-south line through Niihama (0300JST 20th August 1981).

図 2.9 は、船上で、高さ11mの風速計、高さ6.8mの温湿度計、深さ3mの水温計の資料を用いて求めた熱と水蒸気のフラックスである。顕熱と潜熱のフラックスは平均53 ly/日、47 ly/日、早朝最大それぞれ、325 ly/日、210 ly/日、Bowen ratio はほぼ1.1であった。蒸発量にすると平均0.8 mm/日、最大3.6 mm/日であった。顕熱、潜熱のいずれのフラックスの変化も風速の変化とよく似ているが、19日から20日にかけて潜熱のフラックスが最大になった後で顕熱のフラックスが最大になっており、差が認められる。

図 2.9 にはフラックス計算に用いた水温、気温、風速のほか、係留気球によって観測した高さ100mと200mの気温の変化も示す。水温は28.3℃～27.1℃で18時頃が高く、6時頃が低い。海面近くの気温は26～30℃で気層は午前中は不安定、午後は安定である。図 2.10 に係留気球によって観測した温位と混合比を示す。20日の両者の最大値の起時にはやはり3～6時間程度の差が認められる。これは夜半に水面温度と気温がほとんど同じで海面から空気への熱の輸送がなかったことによるのだろう。

A 8.20 3h 100m



B 8.20 3h 400m

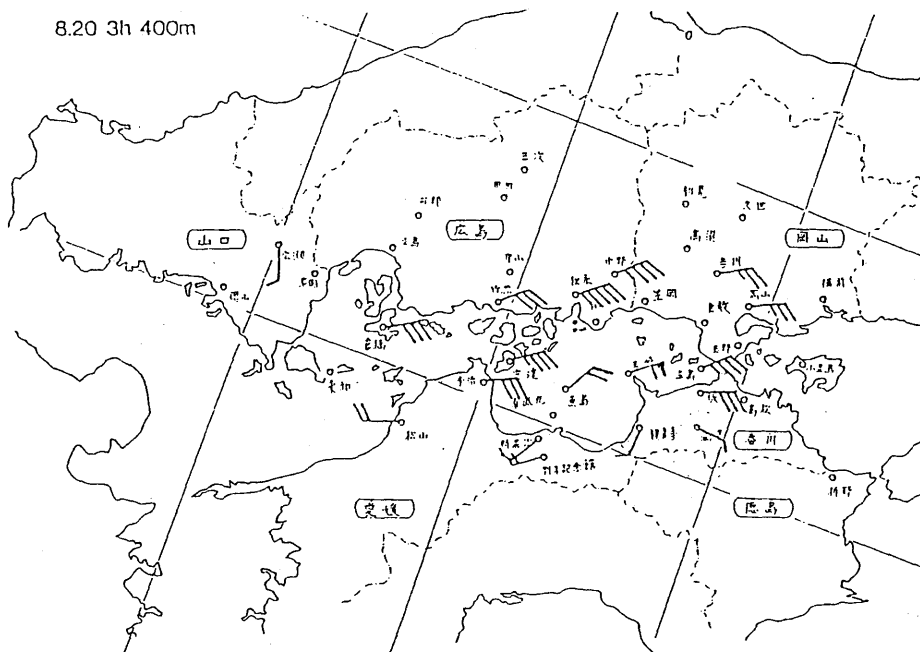


Fig. 2.8 The wind distribution in the case of land breeze (0300JST 20th August 1981).
The upper and lower figures belong to the altitude of 100m and 400m respectively.

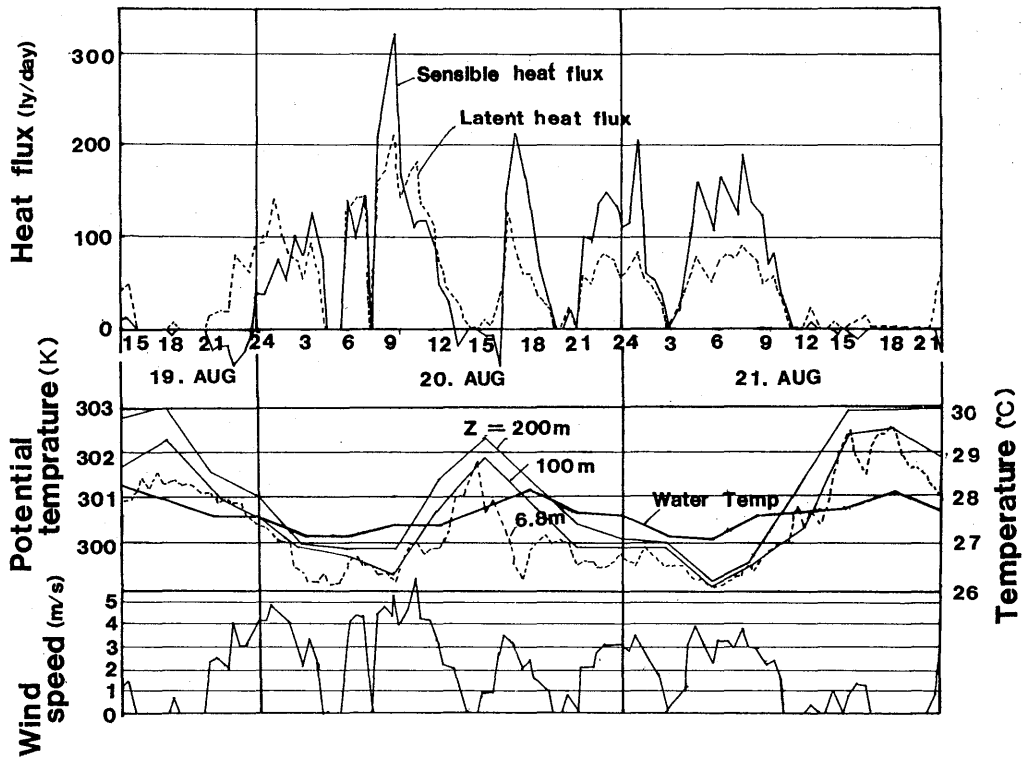


Fig. 2.9 The data observed on the ship off Niihama (19th-21st August 1981).

2.1.3 1982年度観測

1982年の観測から、海風の例を29日12時の南北断面として図2.11 (A) に示す。海上すなわち与島の上には温位28℃、海水温と同じ程度の冷たい空気が溜っている。倉敷は別として、そのほかの場所では海風が吹いている。陸風の例として29日6時の南北断面を図2.11 (B) に示す。中国地方の24℃程度の冷たい空気が陸風により海上に流れ出している。図2.12に与島の温位の鉛直分布の日変化を示す。温位28℃線付近は温位線が混んで気温は逆転している。この逆転層は、夜間は高くなって日出頃最高500mくらいに達し、日中は低くなって15時頃には地表面近くに達する。

上層風を調和解析し日変化を求めた。4日分の上層風の観測データから長期トレンドを差し引き、1～24時間の各時刻に対し平均の風を求めた。さらに東西成分、南北成分のそれぞれについて調和解析を行い、1日周期成分を求め、合成して風のホドグラフ (図2.13) を描いた。ホドグラフの回転方向は、800mより上層では、全観測点で時計廻りで慣性振動の回転方向と合うが、下層では満濃だけが時計廻りで、他の観測点では反時計廻りであった。ホドグラフの楕円の長軸は地表に近いところでは等高線に直交しており、局地的な海陸風、山谷風を示している。また財田、坂出、与島の高さ600～1200mで夜間、風が強い。この低層の強風の成因には、中規模スケールのじょう乱が関係しているようである。

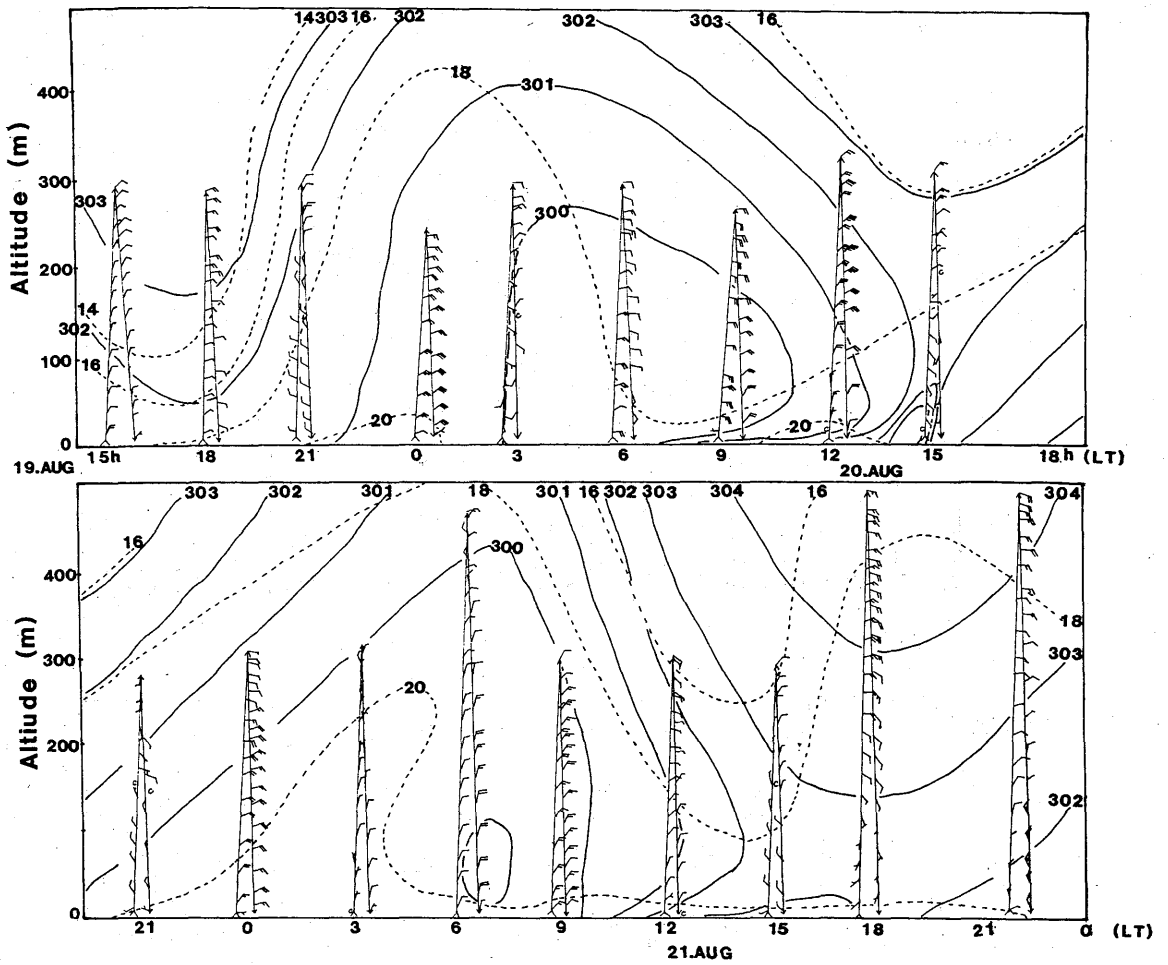


Fig. 2.10 Potential temperatures (K, solid lines) and mixing ratios (g/kg, broken lines) observed by tethered balloon (19th-21st August 1981).

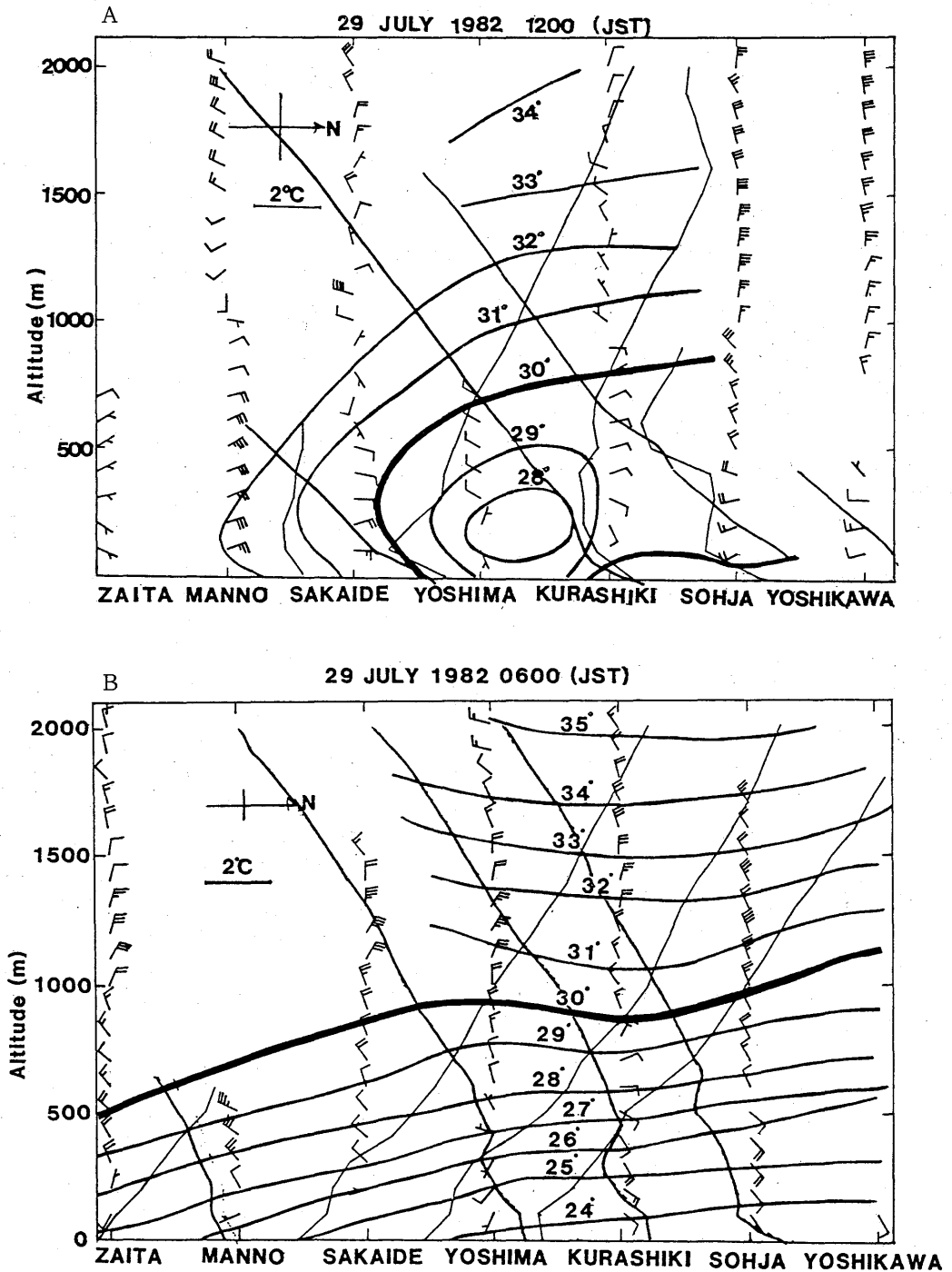


Fig. 2.11 Cross-sections through the Bisanseito (29th July 1982). A belongs to 1200JST, B belongs to 0600JST. The distance between the left and right ends is about 70 km. The ordinate is altitude (m). Broad lines are isentropes. Narrow lines show the vertical profiles of potential temperatures.

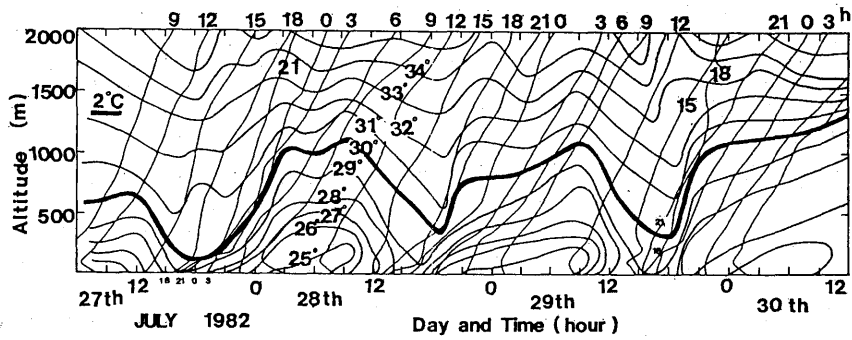


Fig. 2.12 The diurnal variation of the potential temperature vertical profile in the Yoshima (July 1982). The abscissa is the time and date and the ordinate is the altitude (m). Broad lines are isentropes. Narrow lines are vertical profiles of potential temperatures. Intersections of the 30° line and vertical profile lines pass through equivalent time lines. The times of vertical profile lines are also identified by numbers at the tops of the vertical profile lines. The scale of temperature is shown in the left upper corner.

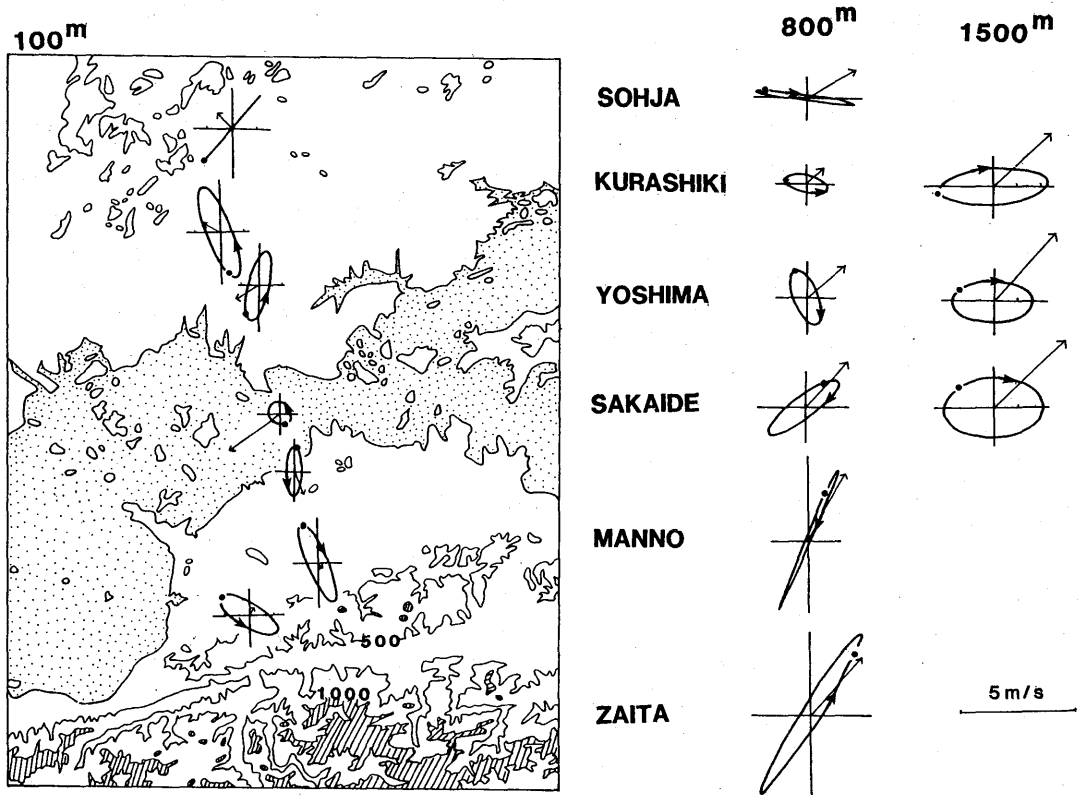


Fig. 2.13 Hodographs of the diurnal wind variations and average wind vectors for July 27-30 1982. Large dots indicate midnight. Direction of time lapse is shown by arrow marks on the ellipse. On the left areal distribution of hodographs at an altitude of 100 m is shown. On the right those at 800 m and 1500 m are shown.

2.2 風速分布

(1)瀬戸内海では一般流として、東西方向の風が吹き易く、これに東西方向の海陸風が重合する。この中でも急峻な四国山脈に囲まれた燧灘は一般風が弱い、海陸風と山谷風が重なった形で明瞭に検出され、発生頻度が高い。

(2)夏の晴天日の地表と海表上の風の水平分布は、日中の海風と夜半前の陸風が明瞭に認められるが、夜半から早朝にかけてはアメダスの測定では 1m/s 以下を無風とするため無風域が多く、風系が定まらないことがある。しかしパイボールの 100m の風では夜半～早朝の陸風がはっきりしている。

(3)日中の海風の吹きだしは、西部では瀬戸内海の中国ないしやや山陽よりのにびる発散線、東部では中央ないし四国より位置する発散線から起る。発散線は海峡部ではほとんど一定の位置に停っているが、燧灘では時間によって中央～北部を振動する。

これに対し海風の先端部は中国側の海岸部で早朝に陸風との収束線を形成し、昼前に岡山県の内陸山地に侵入する。広島県では広島湾から北東に吹き込む海風が急速に中国山地の稜線まで達して、海陸風収束線を東西に分断することがある。中国山地中部はなだらかな丘陵地で稜線がいくつもあがあるため、日中の内陸収束線は異なる谷の谷風や日本海側からの海風が関係して、何本も形成されながら全般には内陸に集まる。中国山地西部では、収束線は山脈の稜線付近で振動している。四国側は山が急峻なため、海風と谷風は短時間で稜線に達し、西部では主稜線で太平洋側からの海風とバランスする。東部では吉野川沿の東よりの谷風が入り、瀬戸内海からの風および太平洋からの海風との間で収束線が分岐して持続する。

(4) 100m 上空のパイボールデータでは、早朝あるいは夕方に収束線が山陽地区沿岸にかかったとき、広島湾、児島湾等で収束線が折れ曲がり、低気圧性のうずを生ずることがある。

(5)風の鉛直分布は $200\sim 300\text{m}$ より下層に海陸風、その上方に一般流が吹く例が多い。一般流と海陸風が逆方向のところでは、間に 100m くらいの転移層ができることが多い。新居浜上空では一般流が東西で、四国沿岸に北よりの海風が吹くとき南東の反転流がみられた。

2.3 混合層

新居浜上空のパイボールによる風のプロファイルと低層ゾンデによる気温の状態曲線を測定時刻に従って並べ、風と気温の不連続に注目して成層状態を解析した(図2.14)。図中Hと書かれた実線は地表に接した不安定層と上空の中立層の境界を、気温減率と風向に注目して引いた線で、混合層上面とみなされる。夜間は反転流上面と一致しているが、日中は鉛直拡散や対流による一般流へのエントレイメントのため、一般流の中まで侵入している。下層には海陸風や反転の層がみられ、それぞれの境界と気温減率の変異点が一致する。

パイボールとゾンデのデータを用い、グリッドごとのリチャードソン数により安定条件を表現し、

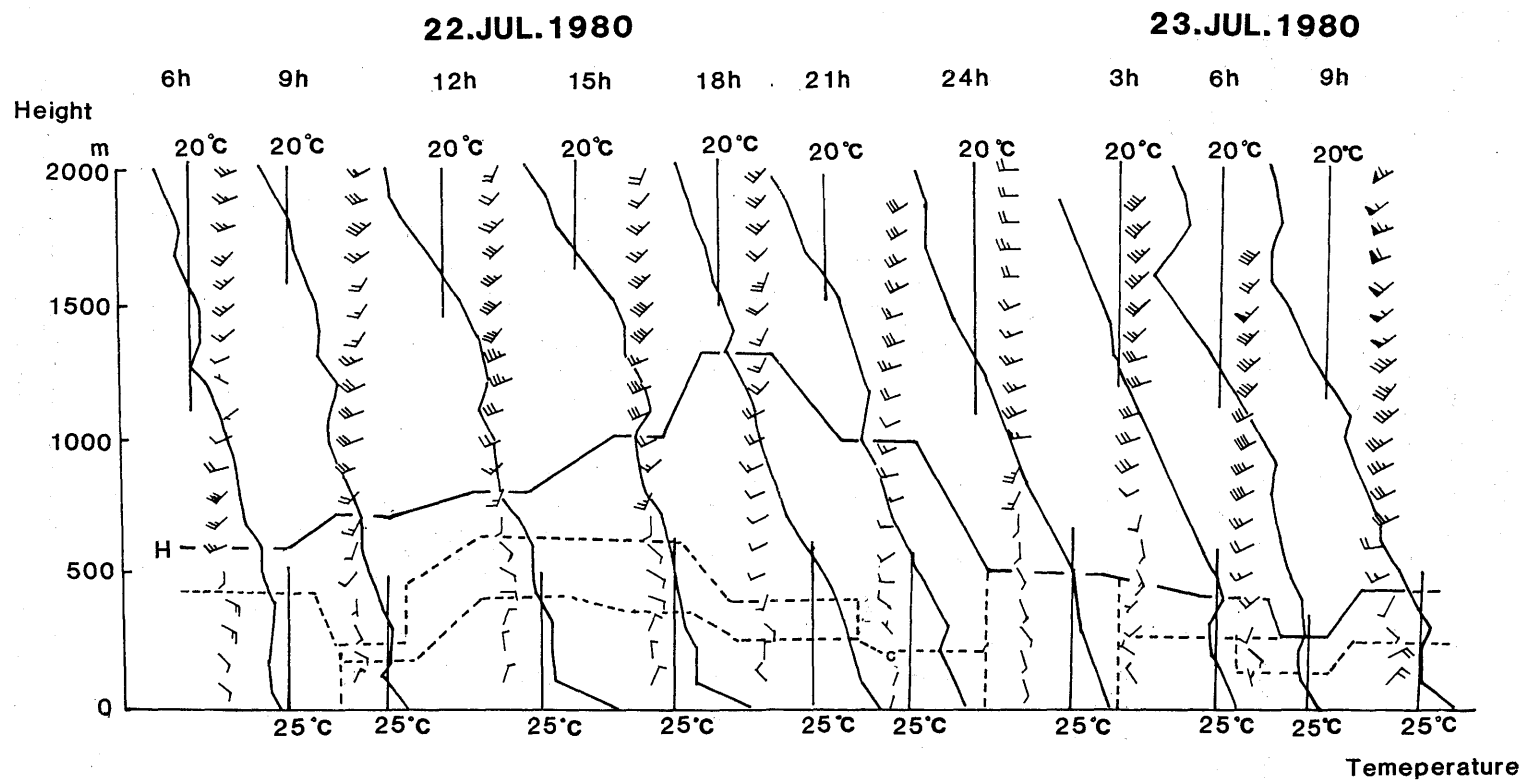


Fig. 2.14 Mixing layer (depth H is shown, with real line) and local wind system (divided with dotted lines) over Niihama for July 1980, analyzed with pibal and radio-sonde data.

これを含む鉛直拡散係数 K_z を求めた (図 2.15)。算定式は第 5 章末尾の付録 1 に示されているものを用いた。図中 H を付記した点線は混合層上面を示す。一般に K_z は昼過ぎから夕方にかけて全層で大きくなるが、混合層上面付近では夜中から早朝にかけても団塊状に大きな値を示すことがある。

H によって高度を無次元化した混合層内の K_z の各時刻プロファイルの事例 (図 2.16) では、 K_z は早朝に混合層上面の直下でやや大きく、9 時は接地層内のみがやや大きい。12~15 時は接地層でやや大きいほかに、中層~上面に最も大きな部分ができる。18~21 時は全層で値が小さい。これを海風、陸風、反流、一般流の 4 つの風系に分類し、無次元高度と K_z の値の分布域を示すと図 2.17 のようになる。中層以上の傾度風域では拡散パラメータの変動が大きく、反流内では $8 \text{ m}^2/\text{s}$ 以下、海風では $4 \text{ m}^2/\text{s}$ 以下、陸風では $2 \text{ m}^2/\text{s}$ 以下となっている。 K_z の時間変動をみると (図 2.18)、日中の熱的な効果が顕著に現われている。

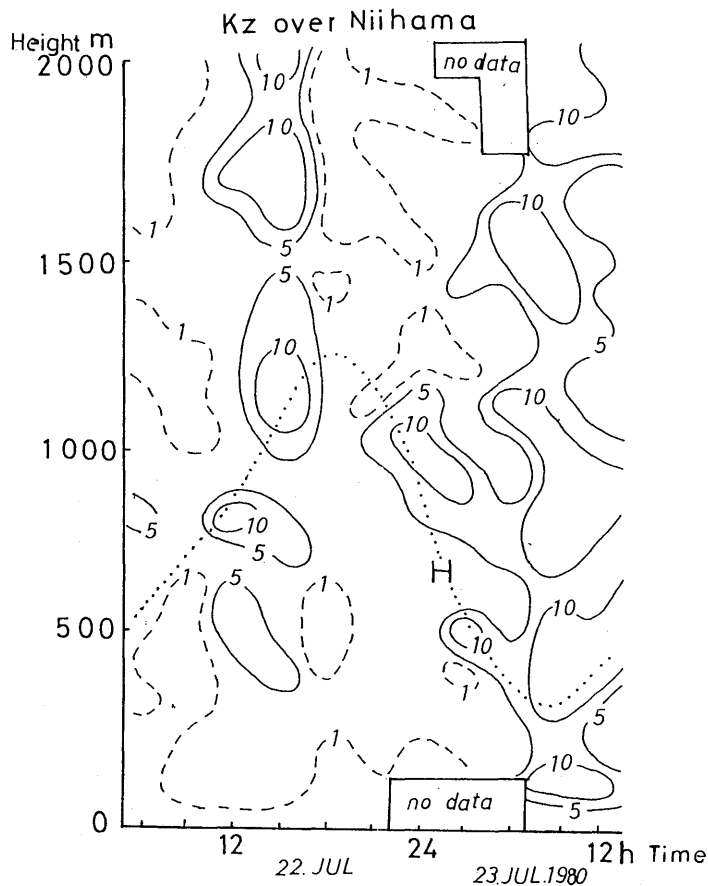


Fig. 2.15 Vertical diffusion coefficient K_z over Niihama, estimated from pibal and radio-sonde data for July 1980 (dotted line is the mixing depth.).

22.JUL.1980

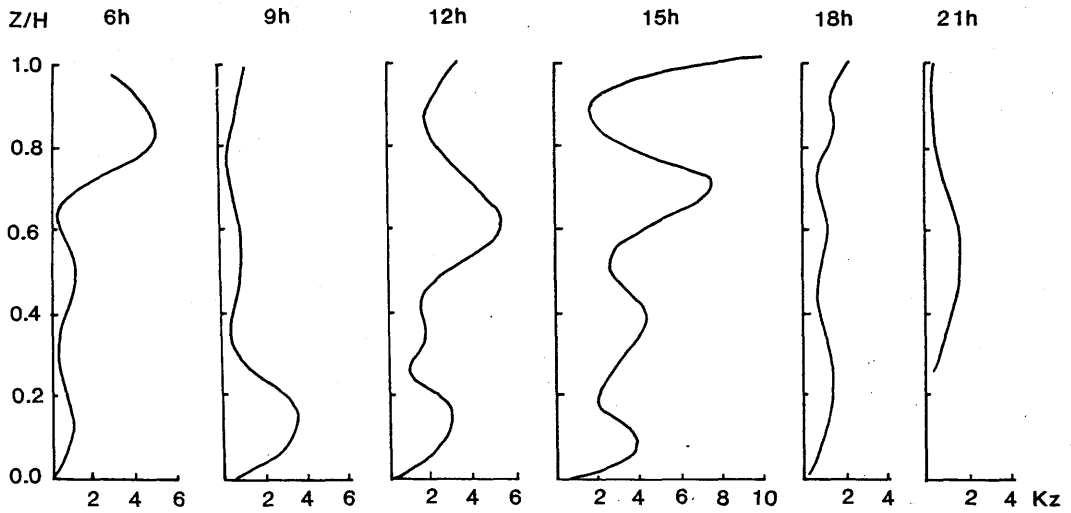


Fig. 2.16 Time-height cross-section of vertical diffusion coefficient K_z for July 1980, normalized with the mixing depth.

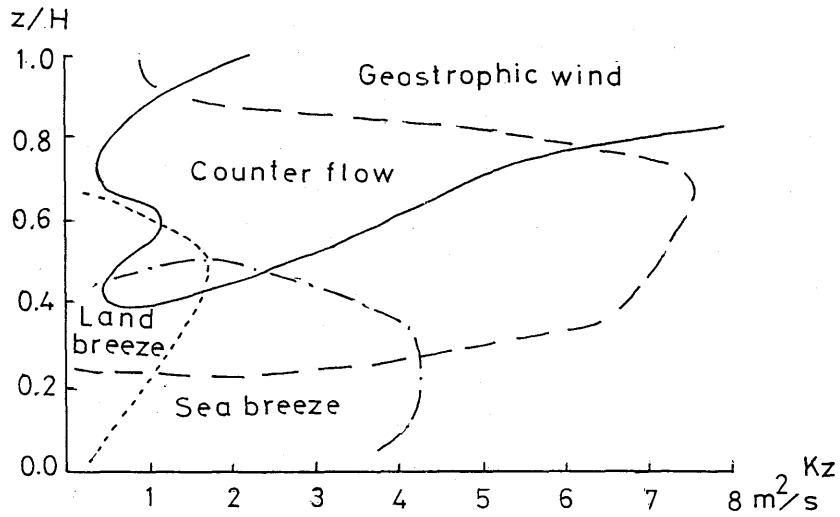


Fig. 2.17 K_z distributions in each wind system for July 1980.

2.4 Kz の地点別特性

パイボールとゾンデのデータから求めた燧灘をはさむ中国側（松永）、海上（魚島）および四国側（新居浜）の地上～1,500 m 上空の Kz の時間断面〔図 2.18 (a～c)〕をみると、1981年は安定した夏晴れでなかったため、上空では必ずしも日中に乱れが大きいわけでなく、シノプティックスケールのシャーラインに対応して、時刻を問わず全層にわたり、乱れが大きくなっている。19日夕方～20日は松永と魚島で共通する2回の乱れがみられ、新居浜では20日の分のみ遅れて起こっている。20日夜～21日午前の乱れは松永で長時間にわたって著しく、これが魚島では20日夜と21日早朝の2回に分かれた。新居浜では21日早朝の分のみ見られる。21日夜から22日午前にかけても、2回にわたる乱れがあり、中国側で著しい。これを求めた1981年夏の観測期間は19日早朝のみ西よりの風で以後は一般流が台風外縁の東よりの風であり、台風のアウトーバンドと思われるにわか雨や雷雨を伴ったシャーラインが西進し、山陽側に直接的に侵入した。新居浜では四国山脈や三崎半島にのびる丘陵の陰になって、東からシャーラインが届かなかったり、到達が遅れたりした。

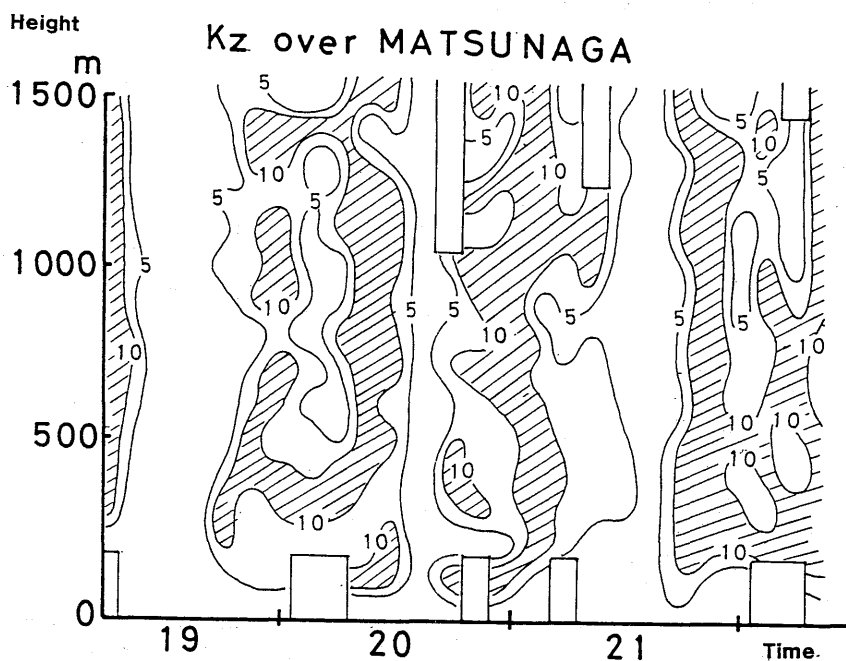


Fig. 2.18 (a) Kz over Matsunaga for Aug. 1981, estimated from pibal and radiosonde data.

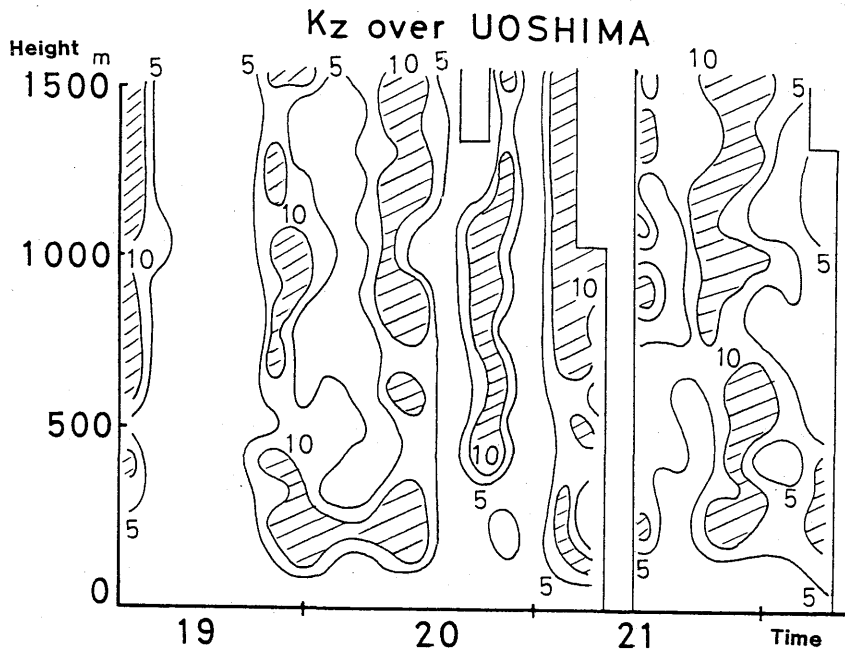


Fig. 2.18 (b) The same as Fig.2.16 (a) except over Uoshima.

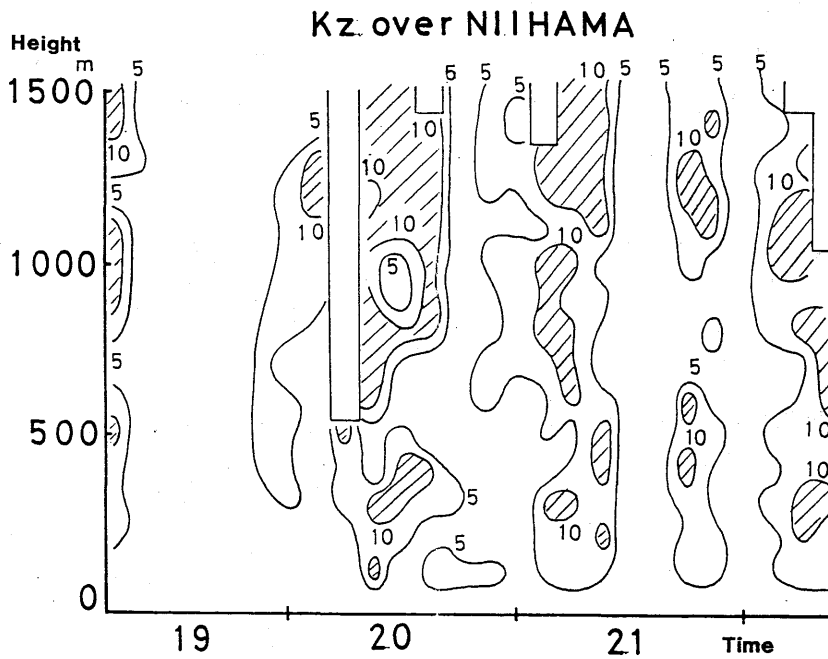


Fig. 2.18 (c) The same as Fig.2.16 (a) except over Niihama.

一方、夕方の海風から陸風に移行するときにも、広島、三原、岡山南岸あたりにうずがみられ、岡山付近の沿岸ぞいに東北東へ移動してるらしい。これらのうずの生因として、地形と海陸風の相互作用のほか、都市や工業地の熱効果も考えられる〔図 2.20 (f-2、g-2)〕。

参 考 文 献

宮田 賢二、1976：瀬戸内海沿岸付近における海陸風、天気、23、205-206

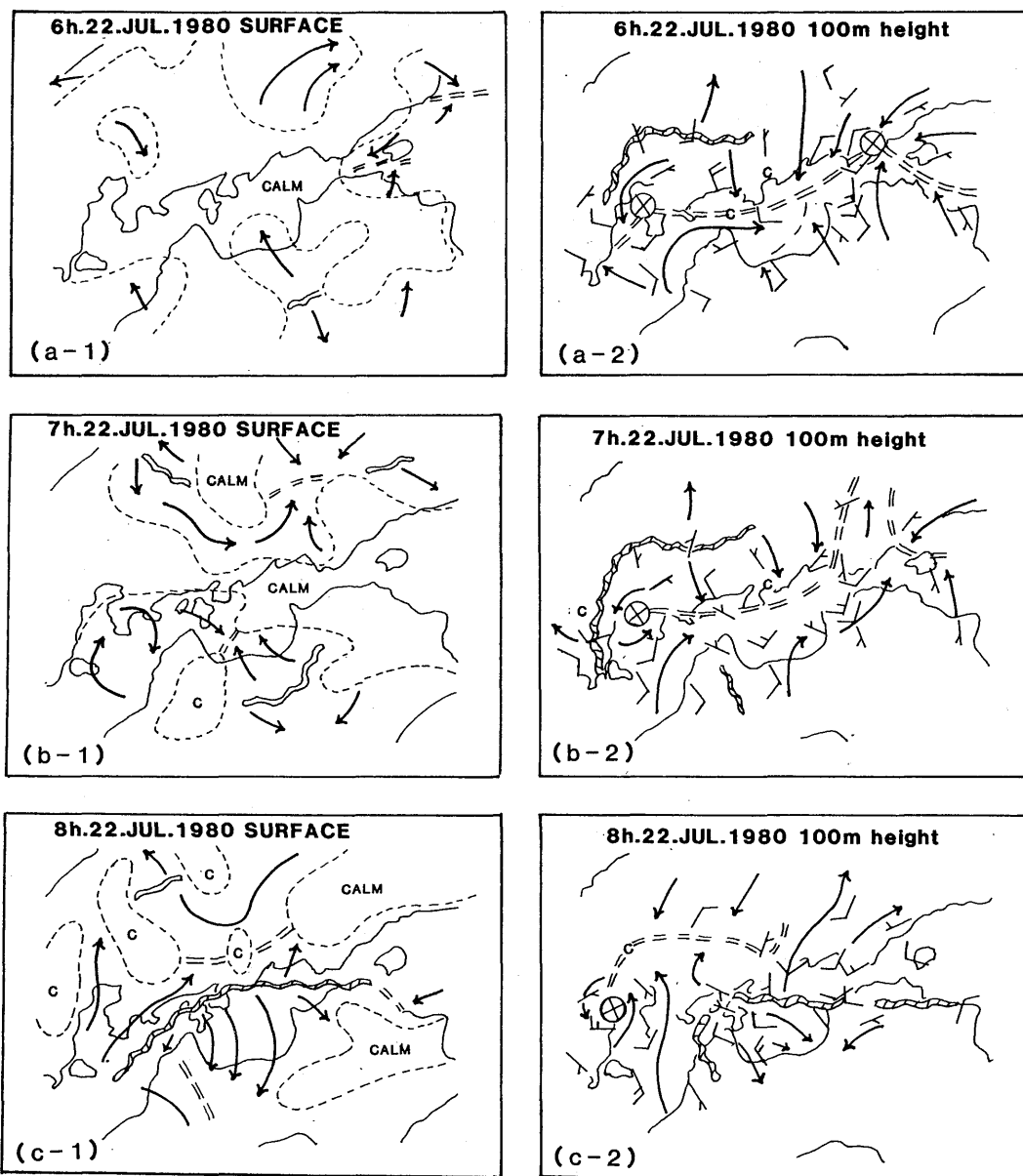
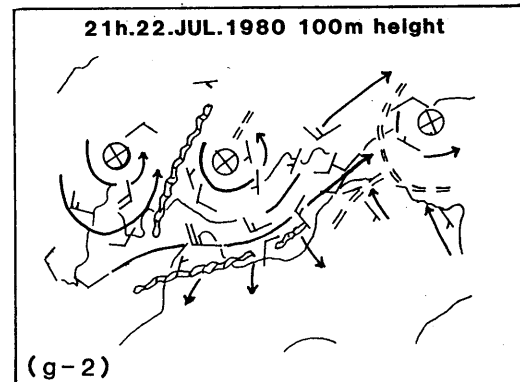
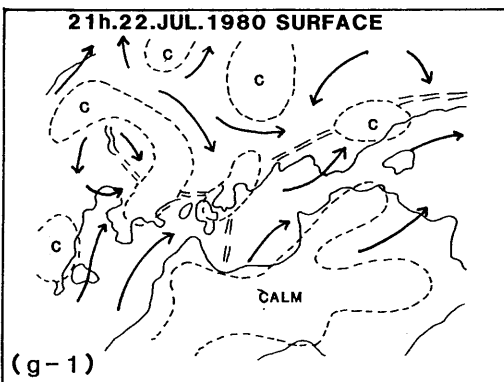
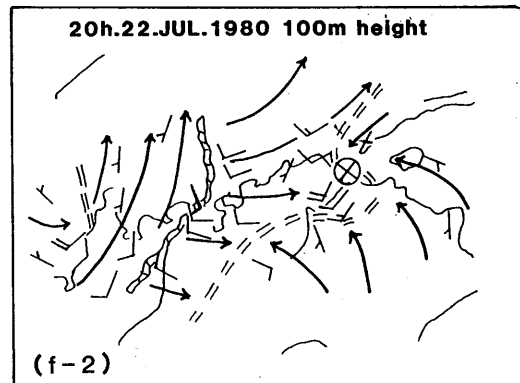
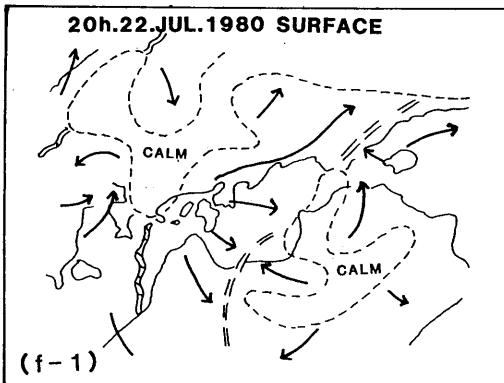
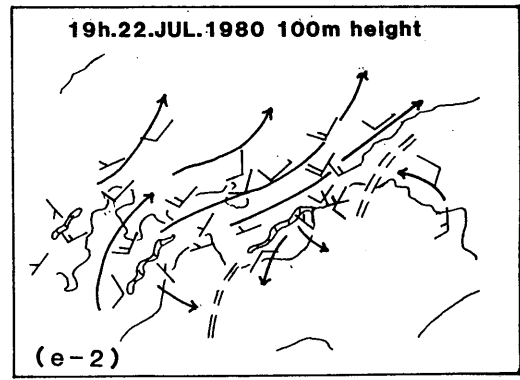
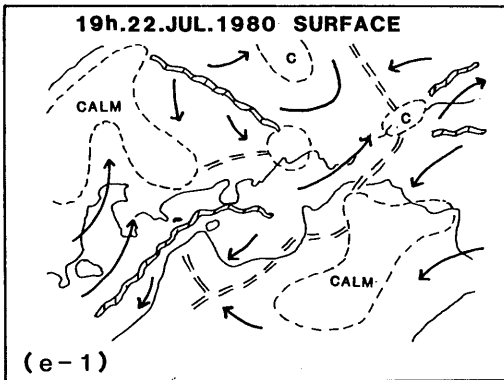
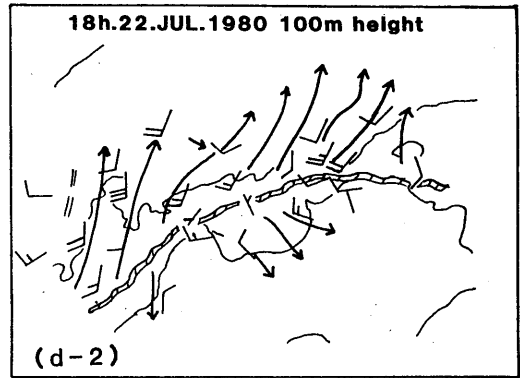
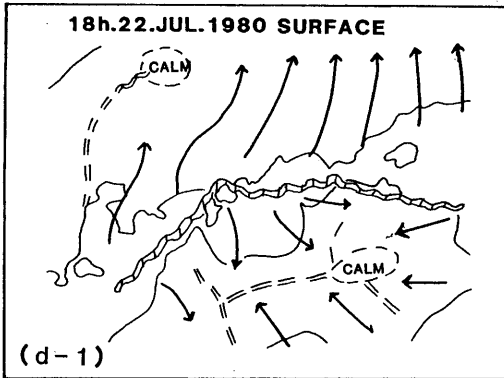


Fig. 2.20 The same as in Fig. 2.19 but for each time. The left and right figures belong to the ground surface and altitudes of 100 m respectively.



第3章 ノンリフトバルーンによる気流観測*

3.1 観測の概要

瀬戸内海沿岸地域に発達する局地循環の実態を把握するため、1980年7月と1981年8月に新居浜市においてノンリフト・レーウィンゾンデ観測を実施した。

ノンリフト・レーウィンゾンデ観測は、内容量400ℓのノンリフト気球（テトラ型）にレーウィンゾンデ発信器（JWA-79W型又はJNL-77型）を吊り下げて、指定高度で浮遊するように地上で浮力調整を行って放球した。これをゾンデ受信器（RD65A型）2台で、同時に受信、自動追跡した。

観測結果は自動追跡2地点の方位角を用いて水平位置を算出した。また気球高度は受信したゾンデの気圧値より求めた。

3.2 観 測

観測は、気球の自動追跡を2地点に設置し、気球の放球点は風向等を考慮して決定した（図3.1）。

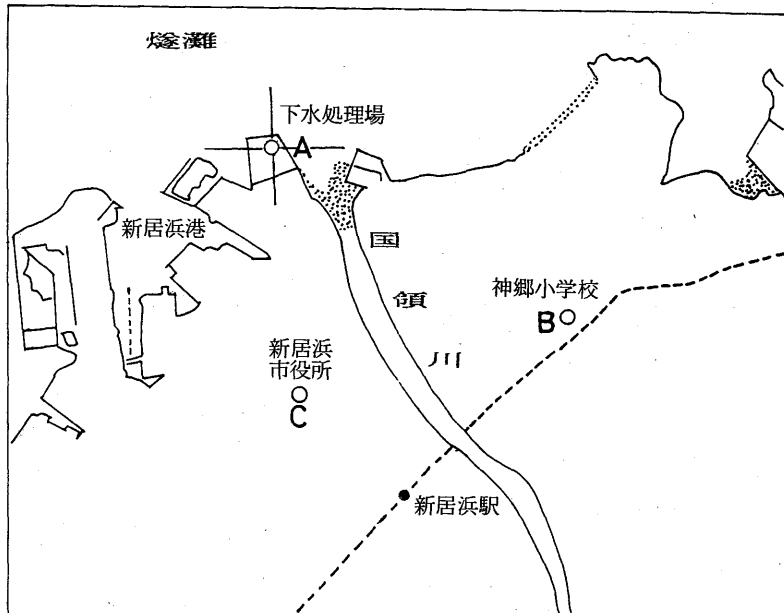


Fig. 3.1 A schematic diagram of Niihama city, and locations of releasing sites (A, C) and tracking sites (A, B).

*栗田 進：応用気象研究部 佐藤純次：企画室

(1) 追跡点

A点…新居浜市下水処理場屋上、標高20m

B点…新居浜市神郷小学校屋上、標高25m

基線長 (A—Bを結ぶ) … 3,730 m

基線角 (真北と基線のなす角) … 122度

(2) 気球放球点

○新居浜市下水処理場 (A点)

○新居浜市役所 (C点)

○新居浜沖海上

(3) 水平面上の流跡

レーウィンゾンデ受信結果から気球の流跡を水平面上に投影した位置を求めるために、追跡地点間の距離 (基線長 3,730 m) と、追跡地点の方位角・真北からの基線の角度を用いた。

位置計算には次に示す計算式を使用した。水平面の原点はA点 (新居浜市下水処理場) に置き、図3.2に示すように、東西方向をX軸、南北方向をY軸にとり、X軸のプラスを東、Y軸のプラスを北とした。

計算式

$$l = d \cdot \frac{\sin \theta_A}{\sin (\theta_A + \theta_B)}$$

$$x = l \cdot \tan \theta_A$$

$$y = l \cdot \cos \theta_A$$

$$X = -x \cdot \sin \alpha + y \cdot \cos \alpha$$

$$Y = x \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha$$

ここで

l : A点から気球までの距離 (m)

d : 基線長 (3,730 m)

θ_A : A点の受信方位角

θ_B : B点の受信方位角

X : A点より東西軸上の距離

Y : A点より南北軸上の距離

以上の式で気球の位置を算出すれば平均風速は、水平面上の流跡として表わされるが、レーウィンゾンデ受信器による自動追跡では、追従性の問題及び気球の位置等で測風経緯儀による2点観測ほど精度が高くない。また気球の高度が下がり高度角が低くなると、地面や建物による電波の反射などの影響も現われる。これらの問題点は計算結果で流跡のふらつき現象になる。今回は、この流跡のふらつきを考慮して、観測値の移動平均を行って流跡を求めた。移動平均には、30秒間隔で収

録しているデータを計算時刻の前後、3 データずつ6 個の移動平均とした。

(4) 気球の浮遊高度

気球の高度計算には、測高公式を用い、使用データは地上気圧と気温、気球浮遊高度の気圧はレーウィンゾンデ信号より求めた。

$$H = 18,400 (1 + \alpha \cdot T) \cdot \log \left(\frac{P_o}{P_n} \right) + Z_o$$

ここで H : 気球浮遊高度 (m)

α : 空気の膨張系数 (0.00367)

T : 地と浮遊高度間の平均気温場 (°C)

P_o : 地上気圧 (mb)

P_n : レーウィンゾンデ信号による浮遊高度の気圧値 (mb)

Z_o : 地表高度 (m)

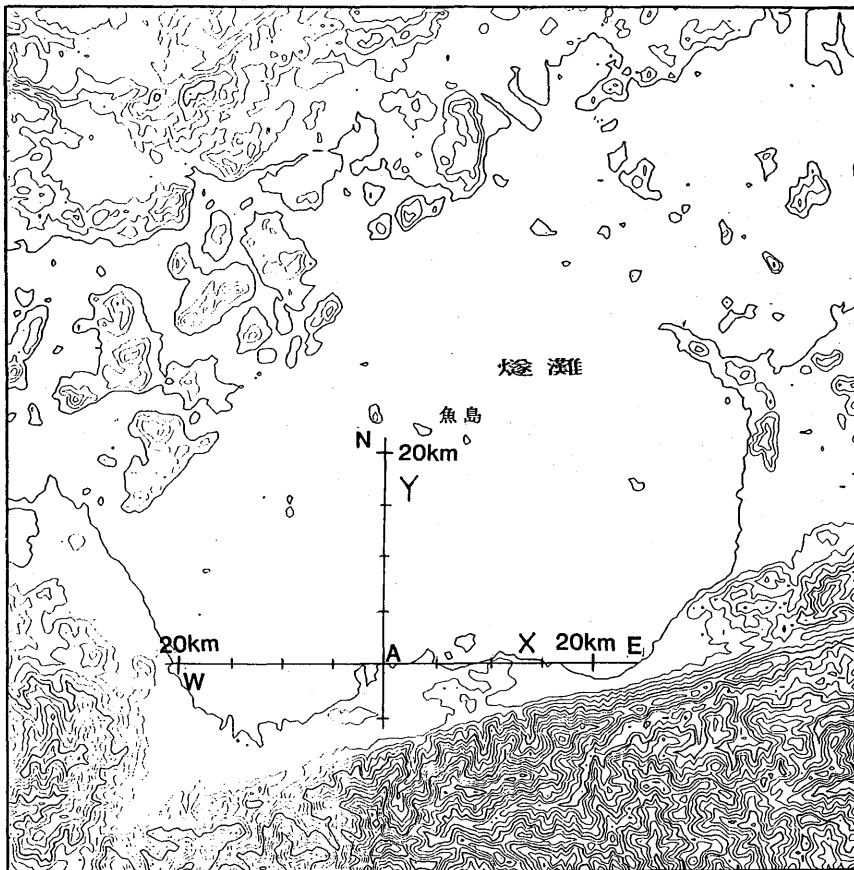


Fig. 3.2 A terrain around Hiuchinada area, and locations of two axes of the reference coordinate.

3.3 観測結果

ノンリフト・レーウィンゾンデ観測では1980年に6回、1981年に9回の観測を実施し、方位角・気圧値のデータを収録した。このデータから流跡・浮遊高度を求めた。

全体の観測範囲は、新居浜市下水処理場（A点）を中心に、北に20km、東に10km、西に20km、南に7kmにわたり、図3.2に示すように燧灘の南半分をカバーしている。

1時間以上追跡できた7例について、放球場所、時刻、追跡時間、流れの方向、浮遊高度範囲を表3.1にまとめて示し、水平流跡、浮遊高度を図及び表で示した（図3.3～3.9、表3.2～3.5）。

各水平流跡図は、図3.2に示すA点を中心とした、東西及び南北の基準線に対して描かれている。丸印は放球後30分毎に、添数字は放球後の経過時間（分）を示している。

浮遊高度図は、横軸が放球後経過時間（分）、縦軸が高度（m）で、丸印は放球後30分毎に示してある。表の星印は欠測を示す。

Table 3.1 List of the non-lift balloon observations.

Year	1980			1981			
Month	July			August			
RUN NO.	1	4	5	1	5	7	9
Day	22	23	23	19	20	21	21
Time	11:05	01:02	05:29	06:20	10:30	06:22	22:35
Releasing site	sea	A	A	A	sea	A	C
Tracking duration (hours)	8	3	1.5	2.5	4	2.5	3.5
Main direction	NNE	NW	ENE	WSW	W	SW	ENE
Elevation (m)	200 — 400	350 — 500	250 — 400	200 — 350	450 — 550	200 — 300	100 — 350

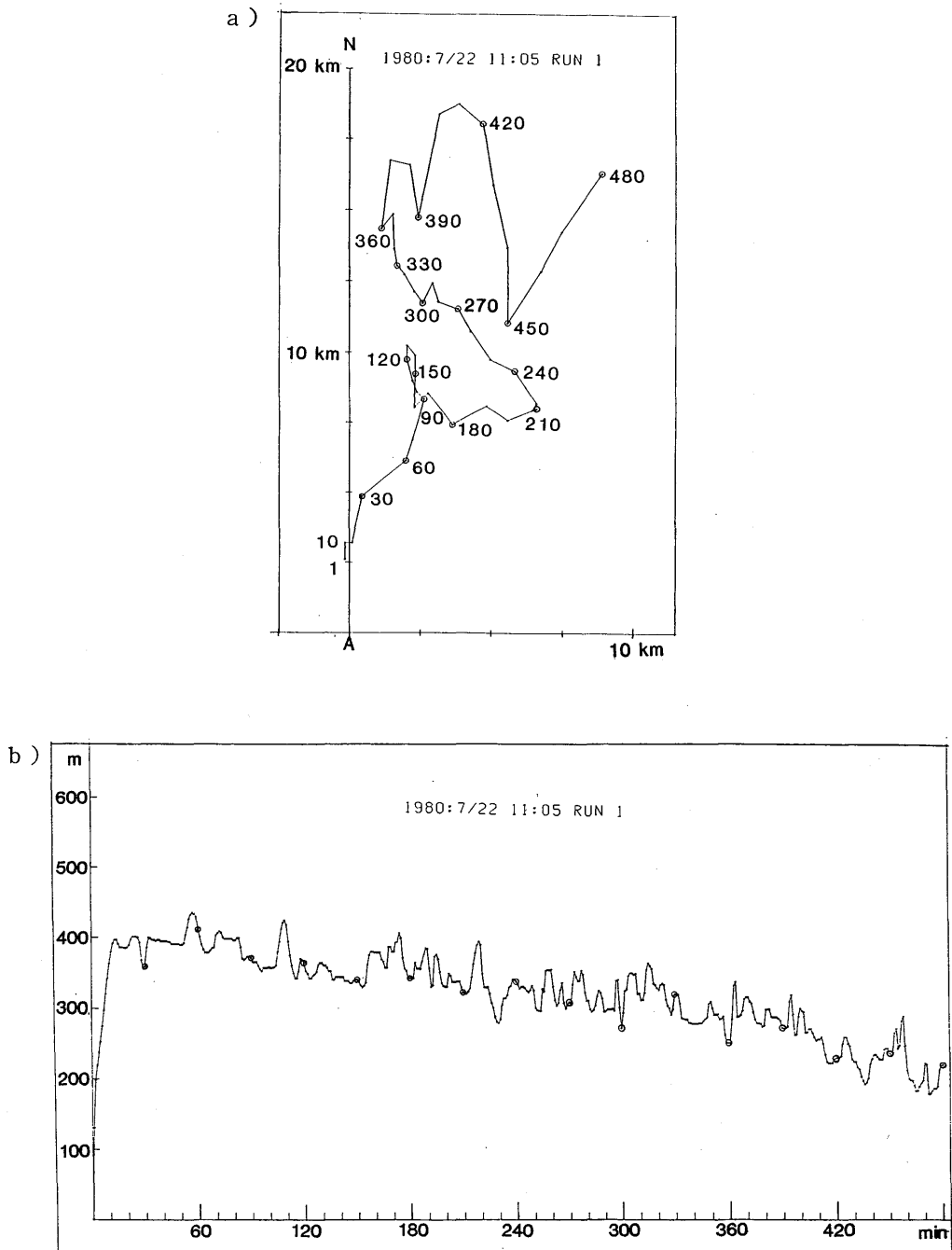


Fig 3.3 1980 RUN 1. Open circles are placed for every 30 minutes after release of the balloon.

a) Horizontal trajectory, and the numbers mean elapse time after release of the balloon.

b) Vertical fluctuation.

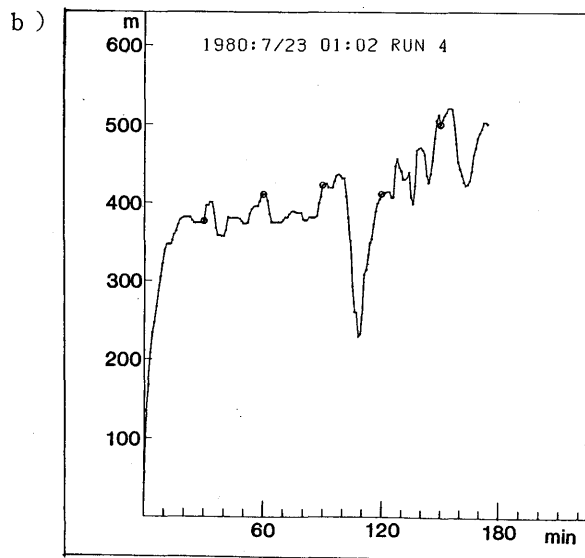
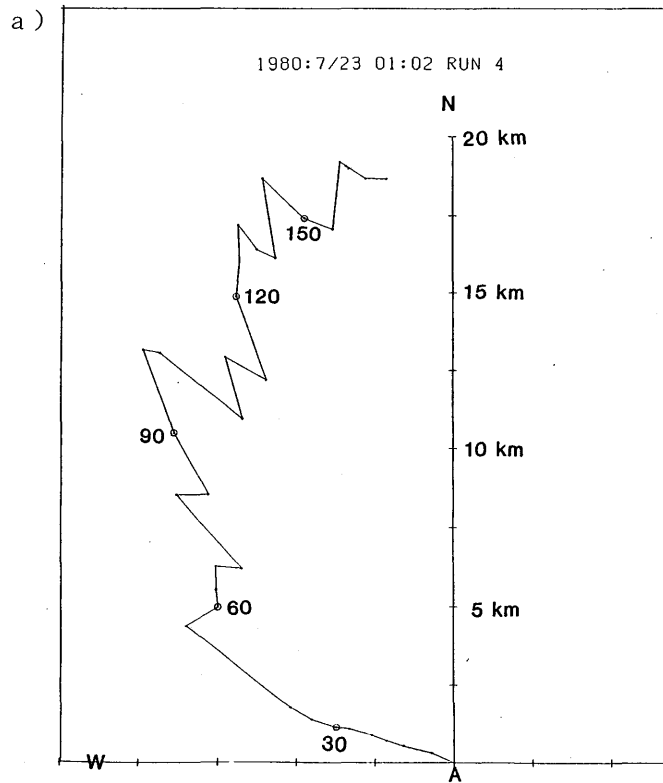


Fig. 3.4 Same as Fig.3.3 except for 1980 RUN 4.

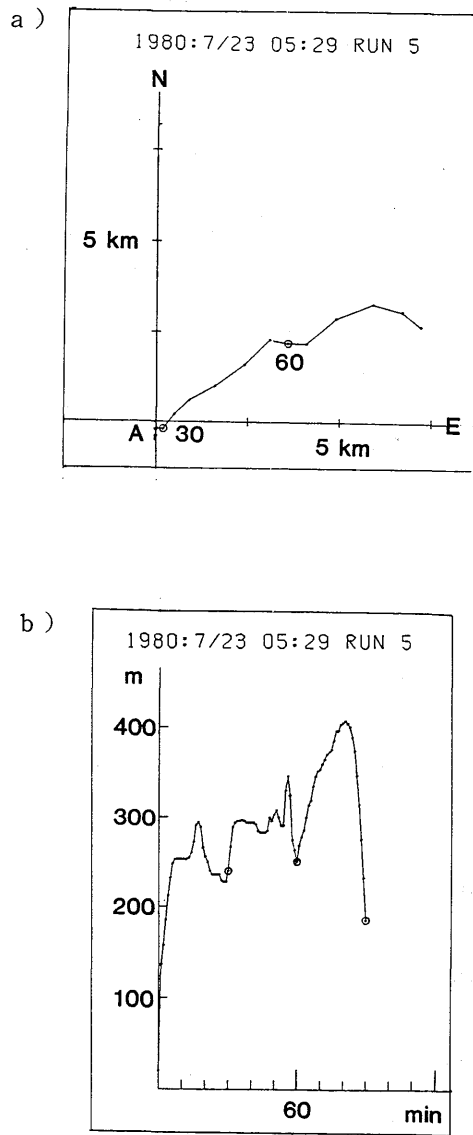


Fig. 3.5 Same as Fig.3.3 except for 1980 RUN 5.

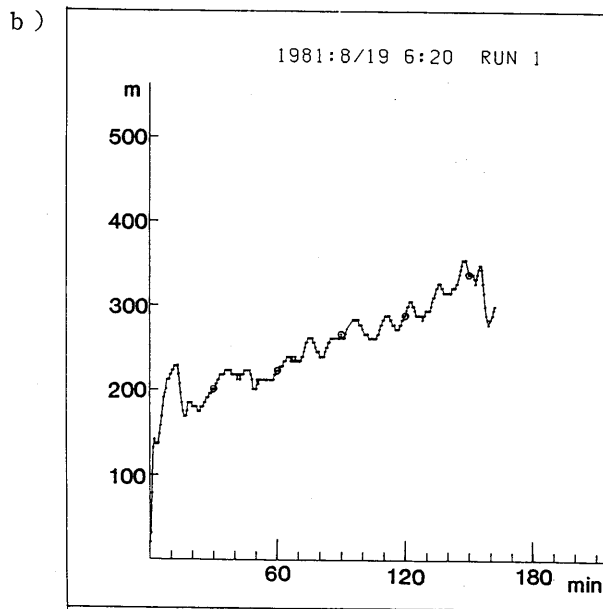
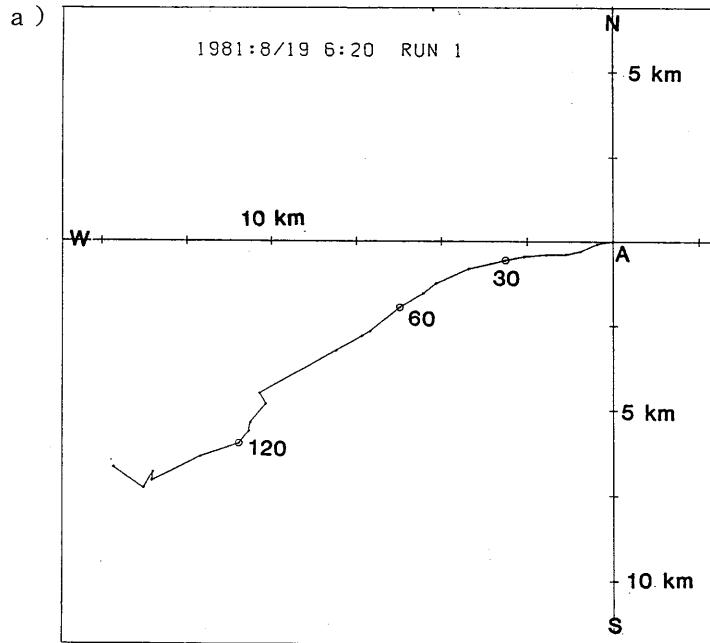


Fig. 3.6 Same as Fig.3.3 except for 1981 RUN 1.

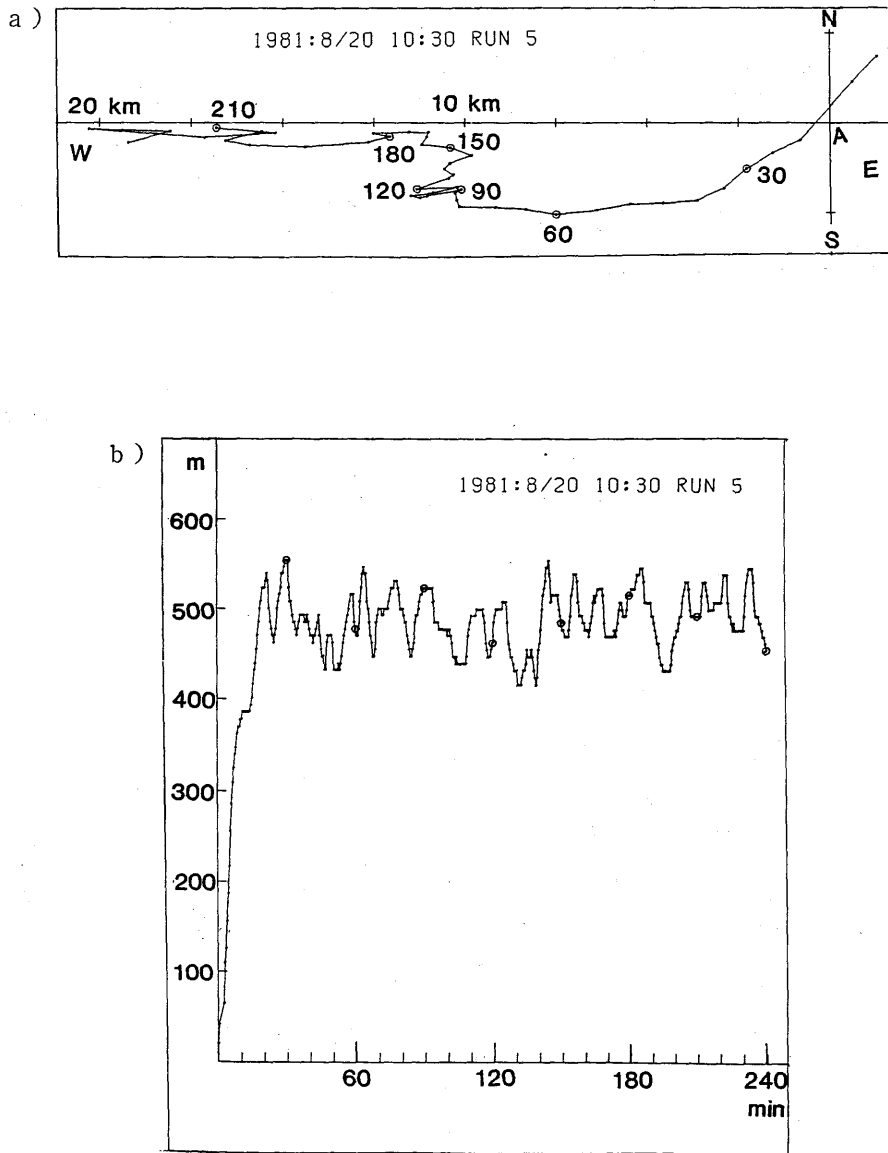


Fig. 3.7 Same as Fig.3.3 except for 1981 RUN 5.

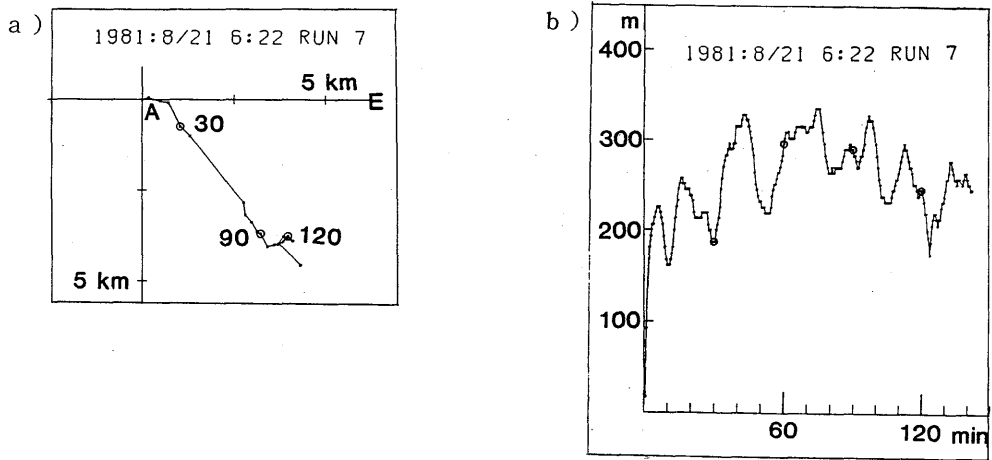


Fig. 3.8 Same as Fig.3.3 except for 1981 RUN 7.

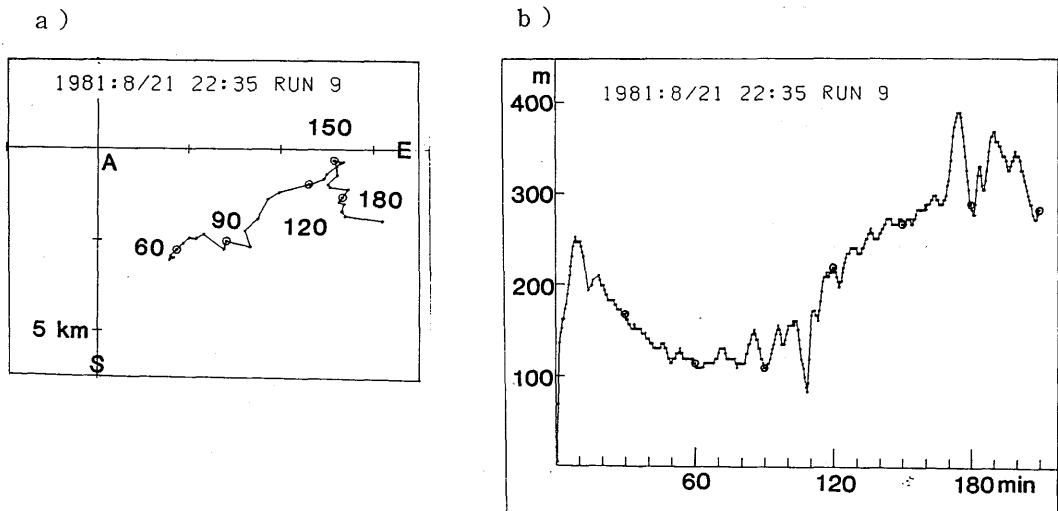


Fig. 3.9 Same as Fig.3.3 except for 1981 RUN 9.

Table 3.2 Elapse time after release of the ballons and horizontal coordinates,
a) 1980 RUN 1, b) 1980 RUN 4, c) 1980 RUN 5.

1980 RUN1			
T	X	Y	
(MIN)	KM	KM	
0	-0.15	2.60	
10	-0.15	3.20	
20	0.10	3.20	
30	0.45	4.85	
40	*****	*****	
50	*****	*****	
60	2.00	6.15	
70	2.25	6.90	
80	*****	*****	
90	2.65	8.35	
100	2.40	8.60	
110	2.25	9.00	
120	2.05	9.75	
130	2.05	10.25	
140	2.35	9.90	
150	2.35	9.25	
160	2.30	8.05	
170	2.80	8.55	
180	3.65	7.45	
190	4.85	8.10	
200	5.60	7.60	
210	6.60	8.00	
220	6.45	7.95	
230	6.60	8.20	
240	5.85	9.35	
250	5.00	9.75	
260	4.30	10.75	
270	3.85	11.55	
280	3.15	11.80	
290	2.95	12.45	
300	2.60	11.75	
310	2.30	12.15	
320	1.95	12.75	
330	1.70	13.05	
340	1.60	13.65	
350	1.55	14.85	
360	1.15	14.35	
370	1.45	16.75	
380	2.15	16.60	
390	2.45	14.75	
400	3.20	18.40	
410	3.90	18.75	
420	4.75	18.05	
430	5.10	15.90	
440	5.60	13.70	
450	5.60	11.05	
460	6.75	12.85	
470	7.50	14.25	
480	8.90	16.30	

1980 RUN4			
T	X	Y	
(MIN)	KM	KM	
0	0.0	0.0	
5	-0.72	0.31	
10	-1.60	0.52	
15	-2.13	0.68	
20	-2.59	0.85	
25	-3.32	1.06	
30	-3.73	1.11	
35	-4.52	1.36	
40	-5.18	1.76	
45	*****	*****	
50	-8.45	4.35	
55	*****	*****	
60	-7.45	4.96	
65	-7.52	5.50	
70	-7.53	6.22	
75	-6.70	6.16	
80	-8.75	8.50	
85	-7.75	8.50	
90	-8.82	10.48	
95	-9.78	13.16	
100	-9.25	13.06	
105	-6.65	10.92	
110	-7.20	12.93	
115	-5.90	12.19	
120	-6.85	14.86	
125	-6.74	15.98	
130	-6.78	17.18	
135	-6.19	16.39	
140	-5.60	16.10	
145	-6.02	18.67	
150	-4.69	17.40	
155	-3.80	17.05	
160	-3.58	19.20	
165	-2.76	18.66	
170	-2.10	18.65	

1980 RUN5			
T	X	Y	
(MIN)	KM	KM	
0	0.0	0.0	
5	0.03	-0.20	
10	-0.03	-0.40	
15	-0.03	-0.50	
20	0.0	-0.40	
25	-0.03	-0.20	
30	0.20	-0.20	
35	0.50	0.20	
40	0.90	0.60	
45	1.60	1.00	
50	2.40	1.60	
55	3.10	2.30	
60	3.60	2.20	
65	4.10	2.20	
70	4.90	2.90	
75	5.90	3.30	
80	6.70	3.10	
85	7.20	2.70	

Table 3.3 The same as table 3.1 except for a) 1981 RUN 1, b) 1981 RUN 5, c) 1981 RUN 7, d) 1981 RUN 9.

1981 RUN1		
T	X - Y	
(MIN)	(KM - KM)	
0	0.0	0.0
5	-0.46	-0.07
10	-0.95	-0.29
15	-1.38	-0.39
20	-1.94	-0.39
25	-2.58	-0.44
30	-3.13	-0.55
35	*****	*****
40	-4.20	-0.81
45	*****	*****
50	-5.16	-1.25
55	-5.53	-1.55
60	-6.22	-1.97
65	*****	*****
70	-7.10	-2.68
75	-7.34	-2.82
80	-8.09	-3.25
85	*****	*****
90	*****	*****
95	*****	*****
100	-10.36	-4.52
105	-10.18	-4.84
110	-10.65	-5.40
115	-10.70	-5.66
120	-10.99	-6.00
125	-12.13	-6.40
130	-13.56	-7.10
135	-13.54	-6.85
140	-13.81	-7.32
145	*****	*****
150	*****	*****
155	*****	*****
160	-14.69	-6.72

1981 RUN5		
T	X - Y	
(MIN)	(KM - KM)	
0	*****	*****
5	1.29	1.85
10	0.61	1.15
15	*****	*****
20	-0.80	-0.48
25	-1.55	-0.84
30	-2.28	-1.28
35	-2.90	-1.83
40	-3.62	-2.16
45	-4.57	-2.23
50	-5.47	-2.26
55	-6.38	-2.42
60	-7.49	-2.55
65	-8.34	-2.40
70	-9.17	-2.35
75	-10.18	-2.33
80	-10.24	-2.16
85	-10.29	-1.95
90	-10.10	-1.86
95	-11.05	-2.03
100	-11.25	-2.09
105	-11.50	-2.03
110	-10.90	-1.95
115	-10.22	-1.79
120	-11.33	-1.84
125	-10.45	-1.54
130	-10.33	-1.44
135	-10.58	-1.28
140	-10.42	-1.13
145	-9.81	-0.90
150	-10.40	-0.68
155	-11.20	-0.59
160	-11.07	-0.39
165	-11.01	-0.27
170	-11.53	-0.25
175	-12.52	-0.29
180	-12.07	-0.38
185	-12.66	-0.53
190	-14.38	-0.66
195	-15.90	-0.62
200	-16.57	-0.49
205	-15.57	-0.25
210	-16.81	-0.15
215	-15.20	-0.28
220	-17.12	-0.40
225	-20.29	-0.17
230	-18.07	-0.24
235	-19.22	-0.55

1981 RUN7		
T	X - Y	
(MIN)	(KM - KM)	
0	0.0	0.0
5	0.17	0.05
10	0.48	-0.03
15	0.71	-0.08
20	*****	*****
25	*****	*****
30	1.04	-0.75
35	1.30	-1.01
40	*****	*****
45	*****	*****
50	*****	*****
55	*****	*****
60	*****	*****
65	2.76	-2.85
70	*****	*****
75	2.80	-3.19
80	2.97	-3.39
85	3.13	-3.65
90	3.23	-3.70
95	3.41	-4.05
100	3.61	-4.00
105	3.72	-3.98
110	3.86	-3.77
115	4.11	-3.90
120	3.98	-3.77
125	3.84	-3.93
130	3.73	-3.97
135	*****	*****
140	4.31	-4.55

1981 RUN9		
T	X - Y	
(MIN)	(KM - KM)	
0	*****	*****
5	*****	*****
10	*****	*****
15	*****	*****
20	*****	*****
25	*****	*****
30	*****	*****
35	*****	*****
40	*****	*****
45	2.09	-2.98
50	1.98	-3.04
55	2.01	-2.93
60	2.18	-2.77
65	2.35	-2.59
70	2.51	-2.44
75	2.71	-2.46
80	2.90	-2.35
85	3.46	-2.74
90	3.53	-2.52
95	4.18	-2.67
100	4.03	-2.24
105	4.38	-1.91
110	4.66	-1.37
115	4.96	-1.19
120	5.76	-0.96
125	5.81	-0.97
130	6.17	-0.81
135	6.25	-0.68
140	6.62	-0.37
145	6.68	-0.35
150	6.44	-0.30
155	6.51	-0.48
160	6.52	-0.72
165	6.28	-0.97
170	6.34	-1.05
175	6.82	-1.10
180	6.67	-1.31
185	6.58	-1.44
190	6.71	-1.49
195	6.66	-1.70
200	6.74	-1.83
205	7.74	-1.96

Table 3.4 Vertical heights of the balloons for 1980 RUN 1,4, 5.

1980 RUN1,4,5					T(MIN)-Z(M)																										
T	R1	R4	R5		T	R1	R4	R5		T	R1	R4		T	R1		T	R1		T	R1		T	R1		T	R1		T	R1	
0	0	20	20																												
1	131	135	136		61	401	411	269		121	353	414		181	342																
2	199	168	157		62	390	403	278		122	349	414		182	342																
3	220	208	185		63	383	386	286		123	342	415		183	364																
4	238	234	212		64	379	376	300		124	342	415		184	356																
5	253	247	232		65	379	376	314		125	346	408		185	356																
6	275	267	248		66	379	376	319		126	348	408		186	355																
7	297	287	253		67	382	376	335		127	351	448		187	366																
8	320	305	253		68	385	376	346		128	361	457		188	376																
9	342	322	253		69	386	376	352		129	364	446		189	385																
10	363	340	253		70	403	379	354		130	364	442		190	384																
11	380	347	253		71	406	382	360		131	361	431		191	356																
12	392	347	253		72	409	382	365		132	360	431		192	330																
13	397	347	255		73	407	386	371		133	357	433		193	332																
14	397	352	260		74	400	389	374		134	352	440		194	373																
15	391	360	272		75	398	390	376		135	352	408		195	376																
16	386	364	291		76	398	389	386		136	340	400		196	369																
17	386	373	294		77	398	388	397		137	340	423		197	351																
18	386	379	289		78	398	388	397		138	344	468		198	335																
19	385	381	266		79	398	388	404		139	344	470		199	331																
20	386	382	256		80	396	380	406		140	344	471		200	330																
21	389	382	250		81	396	379	408		141	344	468		201	330																
22	397	382	240		82	399	379	405		142	344	462		202	349																
23	401	382	236		83	399	382	401		143	338	436		203	346																
24	401	378	236		84	386	382	390		144	338	427		204	337																
25	401	375	236		85	370	382	375		145	338	438		205	337																
26	400	375	236		86	368	382	347		146	335	455		206	337																
27	393	375	229		87	370	384	315		147	335	483		207	337																
28	368	375	228		88	373	400	276		148	338	506		208	337																
29	356	375	228		89	373	408	233		149	340	513		209	329																
30	359	377	240		90	371	423	186		150	340	500		210	322																
31	386	397	267		91	365	425	0		151	338	506		211	322																
32	400	397	289		92	365	425	0		152	332	512		212	320																
33	399	401	294		93	365	420	0		153	329	516		213	323																
34	397	401	296		94	360	420	0		154	331	521		214	327																
35	397	387	296		95	355	420	0		155	335	521		215	343																
36	395	368	297		96	352	428	0		156	361	520		216	362																
37	397	359	296		97	357	435	0		157	375	500		217	378																
38	397	359	294		98	357	437	0		158	380	476		218	389																
39	395	358	294		99	357	435	0		159	380	453		219	394																
40	395	358	294		100	358	432	0		160	379	444		220	389																
41	395	365	294		101	357	432	0		161	379	436		221	348																
42	395	382	292		102	357	409	0		162	379	427		222	329																
43	394	381	285		103	358	382	0		163	379	423		223	329																
44	394	381	283		104	360	352	0		164	369	424		224	329																
45	391	381	283		105	380	294	0		165	366	429		225	320																
46	391	381	283		106	394	262	0		166	357	441		226	307																
47	391	381	285		107	412	261	0		167	357	461		227	300																
48	391	380	300		108	421	230	0		168	367	470		228	288																
49	391	377	296		109	424	233	0		169	367	483		229	281																
50	390	374	303		110	418	259	0		170	380	489		230	279																
51	390	374	308		111	394	309	0		171	380	494		231	284																
52	392	375	300		112	375	315	0		172	393	503		232	304																
53	404	387	291		113	360	334	0		173	394	503		233	314																
54	414	392	291		114	350	350	0		174	406	501		234	314																
55	426	395	330		115	342	355	0		175	399	0		235	318																
56	432	396	346		116	342	374	0		176	371	0		236	329																
57	435	396	325		117	352	390	0		177	356	0		237	331																
58	433	402	275		118	370	400	0		178	353	0		238	340																
59	429	409	264		119	368	405	0		179	342	0		239	340																
60	411	411	251		120	364	412	0		180	342	0		240	337																

Table 3.5 The same as table 3.4 except
for 1981 RUN 1,5,7,9.

1980 RUN1 T(MIN)-Z(M)							
T	R1	T	R1	T	R1	T	R1
241	333	301	293	361	251	421	230
242	327	302	324	362	284	422	230
243	330	303	326	363	331	423	232
244	330	304	345	364	336	424	250
245	323	305	349	365	268	425	259
246	324	306	349	366	268	426	259
247	322	307	347	367	290	427	250
248	325	308	348	368	296	428	246
249	331	309	320	369	312	429	227
250	325	310	320	370	315	430	224
251	300	311	311	371	315	431	224
252	297	312	311	372	309	432	216
253	296	313	321	373	306	433	213
254	296	314	354	374	294	434	203
255	327	315	363	375	284	435	197
256	323	316	359	376	279	436	192
257	353	317	355	377	279	437	194
258	354	318	334	378	278	438	200
259	354	319	332	379	274	439	221
260	354	320	328	380	275	440	226
261	330	321	325	381	298	441	234
262	311	322	332	382	298	442	234
263	303	323	334	383	298	443	231
264	307	324	332	384	288	444	228
265	325	325	312	385	287	445	227
266	335	326	303	386	287	446	227
267	307	327	300	387	287	447	241
268	299	328	291	388	285	448	243
269	304	329	298	389	282	449	243
270	308	330	319	390	272	450	236
271	307	331	319	391	272	451	232
272	333	332	319	392	272	452	237
273	351	333	306	393	274	453	265
274	344	334	286	394	309	454	271
275	338	335	285	395	318	455	243
276	338	336	284	396	291	456	247
277	353	337	284	397	262	457	282
278	347	338	279	398	263	458	288
279	322	339	279	399	288	459	247
280	310	340	278	400	299	460	212
281	310	341	278	401	296	461	200
282	298	342	278	402	294	462	198
283	295	343	278	403	266	463	197
284	297	344	279	404	266	464	191
285	303	345	279	405	271	465	183
286	316	346	282	406	271	466	183
287	324	347	285	407	265	467	189
288	321	348	287	408	259	468	194
289	313	349	306	409	254	469	197
290	295	350	309	410	256	470	222
291	295	351	300	411	256	471	220
292	298	352	291	412	259	472	179
293	296	353	291	413	250	473	179
294	298	354	291	414	234	474	183
295	299	355	284	415	224	475	186
296	296	356	285	416	222	476	186
297	338	357	288	417	222	477	189
298	339	358	262	418	222	478	213
299	301	359	251	419	227	479	219
300	272	360	251	420	229	480	220

1981 RUN1,5,7,9				
T	R1	R5	R7	R9
0.0	20	0	20	4
0.5	31	41	17	4
1.0	78	***	92	68
1.5	132	***	***	136
2.0	142	***	168	147
2.5	137	64	181	152
3.0	137	110	193	162
3.5	137	126	206	162
4.0	137	156	206	173
4.5	148	187	213	178
5.0	158	217	219	189
5.5	169	256	225	199
6.0	180	286	225	210
6.5	191	309	225	220
7.0	196	325	219	231
7.5	201	340	213	242
8.0	212	347	206	247
8.5	212	363	193	252
9.0	212	370	181	247
9.5	218	370	168	247
10.0	218	378	162	247
10.5	223	378	162	247
11.0	223	386	162	242
11.5	228	386	168	236
12.0	228	386	174	231
12.5	228	386	181	***
13.0	228	386	200	***
13.5	218	386	213	***
14.0	207	386	225	194
14.5	196	393	232	***
15.0	185	401	245	***
15.5	175	416	251	199
16.0	169	432	257	205
16.5	169	439	257	***
17.0	169	455	251	***
17.5	175	470	251	***
18.0	185	485	245	***
18.5	185	500	245	210
19.0	185	508	245	205
19.5	185	523	245	199
20.0	180	523	238	199
20.5	180	523	238	199
21.0	180	531	232	194
21.5	180	539	219	189
22.0	180	531	213	189
22.5	175	500	213	183
23.0	175	485	213	183
23.5	175	477	213	183
24.0	180	470	213	183
24.5	180	462	213	183
25.0	180	470	219	183
25.5	185	477	219	178
26.0	185	500	219	178
26.5	191	508	219	173
27.0	191	516	219	173
27.5	191	523	206	173
28.0	196	539	200	173
28.5	196	539	200	168
29.0	196	546	187	168
29.5	201	554	187	168
30.0	201	554	187	168

1981 RUN1,5,7,9 T(MIN)-Z(M)																							
T	R1	R5	R7	R9		T	R1	R5	R7	R9		T	R1	R5	R7	R9		T	R1	R5	R7	R9	
30.5	201	554	187	162		60.5	223	470	302	110		90.5	261	523	283	110							
31.0	207	523	200	162		61.0	228	470	309	110		91.0	261	523	283	110							
31.5	207	508	206	157		61.5	228	477	309	110		91.5	261	523	277	115							
32.0	212	503	213	157		62.0	228	508	309	110		92.0	266	523	270	115							
32.5	212	493	225	152		62.5	223	523	302	110		92.5	272	523	270	120							
33.0	218	485	245	152		63.0	234	539	302	110		93.0	***	523	277	126							
33.5	218	485	257	152		63.5	234	540	302	110		93.5	***	523	283	131							
34.0	218	477	270	157		64.0	234	539	302	115		94.0	***	508	283	136							
34.5	218	470	277	152		64.5	239	539	302	115		94.5	***	485	290	141							
35.0	218	477	283	152		65.0	239	508	309	115		95.0	***	485	296	147							
35.5	223	485	283	152		65.5	239	500	315	115		95.5	283	485	309	152							
36.0	223	493	290	152		66.0	239	485	315	115		96.0	283	485	315	157							
36.5	223	493	296	152		66.5	234	470	315	115		96.5	283	477	322	152							
37.0	223	493	290	147		67.0	239	462	315	115		97.0	283	477	328	147							
37.5	223	493	290	147		67.5	234	447	315	115		97.5	283	477	322	136							
38.0	223	485	290	147		68.0	234	447	315	115		98.0	283	477	322	136							
38.5	218	485	296	147		68.5	239	455	315	120		98.5	277	477	322	136							
39.0	218	493	296	141		69.0	234	485	315	120		99.0	277	477	315	141							
39.5	218	485	315	141		69.5	234	493	***	120		99.5	277	477	309	147							
40.0	218	477	315	141		70.0	234	500	309	126		100.0	272	470	296	152							
40.5	218	470	315	136		70.5	234	500	309	131		100.5	***	477	283	157							
41.0	212	470	315	136		71.0	234	500	***	131		101.0	266	477	270	157							
41.5	218	462	315	136		71.5	239	493	315	131		101.5	266	470	257	157							
42.0	218	470	322	131		72.0	239	493	315	131		102.0	266	462	251	157							
42.5	212	470	328	131		72.5	245	500	315	131		102.5	266	447	238	162							
43.0	218	477	328	131		73.0	250	500	322	126		103.0	261	447	238	157							
43.5	218	485	328	131		73.5	256	500	328	120		103.5	261	439	238	162							
44.0	218	493	322	131		74.0	256	500	335	120		104.0	261	447	232	162							
44.5	223	470	322	131		74.5	261	508	335	120		104.5	261	439	232	152							
45.0	223	455	315	131		75.0	261	516	335	120		105.0	261	439	232	141							
45.5	223	447	309	136		75.5	261	523	335	120		105.5	261	439	232	131							
46.0	223	447	302	136		76.0	261	523	***	120		106.0	261	439	232	120							
46.5	223	432	290	136		76.5	261	523	***	120		106.5	261	439	232	115							
47.0	223	432	283	131		77.0	256	531	309	120		107.0	266	439	238	110							
47.5	218	462	264	131		77.5	256	531	296	115		107.5	266	439	245	100							
48.0	212	470	251	126		78.0	250	531	283	110		108.0	272	439	245	89							
48.5	201	470	245	120		78.5	245	523	277	115		108.5	277	447	251	84							
49.0	201	470	238	120		79.0	245	516	270	115		109.0	277	470	257	94							
49.5	201	470	232	115		79.5	245	500	264	115		109.5	283	477	257	120							
50.0	201	462	232	115		80.0	239	500	264	115		110.0	283	485	264	147							
50.5	212	432	225	120		80.5	239	500	264	115		110.5	288	493	270	168							
51.0	207	432	225	120		81.0	239	493	270	115		111.0	288	493	277	173							
51.5	212	432	225	120		81.5	239	485	264	115		111.5	288	493	283	173							
52.0	212	432	219	126		82.0	239	485	264	126		112.0	288	493	290	173							
52.5	212	439	219	126		82.5	245	470	270	126		112.5	288	493	296	168							
53.0	212	432	219	126		83.0	250	462	270	136		113.0	283	500	290	168							
53.5	212	439	219	131		83.5	250	455	270	136		113.5	283	500	290	162							
54.0	212	447	219	126		84.0	256	447	270	141		114.0	277	500	283	173							
54.5	212	462	225	126		84.5	256	447	270	147		114.5	277	500	277	183							
55.0	212	470	238	120		85.0	261	455	270	147		115.0	277	500	270	194							
55.5	212	477	245	120		85.5	261	462	277	152		115.5	272	500	270	205							
56.0	212	485	251	120		86.0	261	485	283	147		116.0	272	493	264	210							
56.5	212	493	251	120		86.5	261	493	290	141		116.5	272	485	251	210							
57.0	212	500	257	120		87.0	261	493	290	141		117.0	272	462	251	215							
57.5	212	508	264	120		87.5	261	500	290	131		117.5	277	455	251	210							
58.0	212	516	264	120		88.0	261	508	290	131		118.0	277	447	245	210							
58.5	218	516	270	120		88.5	261	516	296	120		118.5	283	447	238	215							
59.0	218	516	277	120		89.0	261	516	296	120		119.0	283	447	238	215							
59.5	223	485	283	115		89.5	261	523	290	115		119.5	288	455	245	215							
60.0	223	477	296	115		90.0	266	523	290	110		120.0	288	462	245	220							

1981 RUN1,5,7,9 T(MIN)-Z(M)														
T	R1	R5	R7	R9	T	R1	R5	R9	T	R5	R9	T	R5	
120.5	294	485	245	220	150.5	337	477	268	180.5	516	284	210.5	470	
121.0	299	493	232	215	151.0	337	477	268	181.0	523	279	211.0	470	
121.5	299	500	219	210	151.5	337	470	268	181.5	523	279	211.5	470	
122.0	305	500	219	205	152.0	337	470	274	182.0	523	290	212.0	470	
122.5	305	500	200	199	152.5	332	470	274	182.5	523	306	212.5	470	
123.0	305	500	193	205	153.0	326	470	274	183.0	531	322	213.0	477	
123.5	299	500	174	205	153.5	332	477	274	183.5	539	332	213.5	470	
124.0	299	500	187	215	154.0	337	493	268	184.0	539	332	214.0	477	
124.5	294	508	206	220	154.5	345	516	268	184.5	539	322	214.5	485	
125.0	288	508	213	226	155.0	348	523	274	185.0	546	311	215.0	500	
125.5	288	508	219	231	155.5	348	539	274	185.5	546	306	215.5	508	
126.0	288	508	219	236	156.0	343	539	279	186.0	546	306	216.0	508	
126.5	288	485	213	236	156.5	326	539	284	186.5	531	316	216.5	500	
127.0	288	462	206	236	157.0	315	531	284	187.0	508	327	217.0	493	
127.5	288	455	213	242	157.5	299	508	284	187.5	508	338	217.5	493	
128.0	283	447	213	242	158.0	288	493	284	188.0	508	348	218.0	493	
128.5	268	447	225	242	158.5	283	493	284	188.5	508	359	218.5	500	
129.0	288	439	232	242	159.0	277	493	284	189.0	508	365	219.0	516	
129.5	294	432	232	242	159.5	***	485	284	189.5	508	365	219.5	516	
130.0	294	432	238	242	160.0	283	485	290	190.0	493	370	220.0	516	
130.5	294	432	245	236	160.5	***	477	284	190.5	493	370	220.5	523	
131.0	294	416	257	236	161.0	288	477	290	191.0	485	359	221.0	523	
131.5	294	416	257	236	161.5	294	477	290	191.5	477	359	221.5	523	
132.0	299	416	264	236	162.0	299	470	290	192.0	470	359	222.0	523	
132.5	305	416	277	242	162.5	0	477	295	192.5	462	354	222.5	531	
133.0	310	424	277	242	163.0	0	485	295	193.0	462	354	223.0	539	
133.5	310	432	270	247	163.5	0	493	300	193.5	447	348	223.5	539	
134.0	315	432	264	252	164.0	0	508	300	194.0	439	343	224.0	539	
134.5	321	439	257	252	164.5	0	516	300	194.5	439	343	224.5	546	
135.0	321	455	257	258	165.0	0	508	295	195.0	432	343	225.0	546	
135.5	326	447	251	258	165.5	0	516	295	195.5	432	338	225.5	546	
136.0	326	447	257	263	166.0	0	523	290	196.0	432	332	226.0	531	
136.5	326	447	257	258	166.5	0	523	290	196.5	432	327	226.5	508	
137.0	321	455	***	258	167.0	0	523	290	197.0	432	327	227.0	508	
137.5	321	447	***	252	167.5	0	523	290	197.5	432	332	227.5	508	
138.0	315	432	251	252	168.0	0	523	295	198.0	432	338	228.0	508	
138.5	315	424	257	252	168.5	0	516	295	198.5	439	338	228.5	508	
139.0	315	416	264	252	169.0	0	485	300	199.0	455	343	229.0	508	
139.5	315	424	264	252	169.5	0	470	311	199.5	462	348	229.5	493	
140.0	315	455	257	258	170.0	0	470	316	200.0	470	343	230.0	493	
140.5	315	462	251	258	170.5	0	470	327	200.5	470	343	230.5	485	
141.0	315	477	251	263	171.0	0	470	338	201.0	477	343	231.0	477	
141.5	315	500	245	263	171.5	0	470	348	201.5	477	338	231.5	470	
142.0	321	516	245	268	172.0	0	470	365	202.0	485	327	232.0	462	
142.5	321	523	0	268	172.5	0	470	375	202.5	493	327	232.5	462	
143.0	321	531	0	274	173.0	0	470	381	203.0	493	322	233.0	447	
143.5	321	546	0	274	173.5	0	477	386	203.5	508	316	233.5	439	
144.0	326	546	0	274	174.0	0	470	391	204.0	516	311	234.0	439	
144.5	326	554	0	274	174.5	0	477	391	204.5	523	306	234.5	432	
145.0	332	539	0	274	175.0	0	485	391	205.0	531	300	235.0	432	
145.5	337	508	0	268	175.5	0	500	386	205.5	531	295	235.5	432	
146.0	343	516	0	268	176.0	0	508	375	206.0	531	290	236.0	432	
146.5	348	516	0	268	176.5	0	508	365	206.5	523	290	236.5	432	
147.0	354	516	0	268	177.0	0	500	354	207.0	500	279	237.0	432	
147.5	354	516	0	268	177.5	0	493	343	207.5	493	274	237.5	432	
148.0	354	516	0	268	178.0	0	493	327	208.0	493	274	238.0	439	
148.5	354	516	0	274	178.5	0	493	316	208.5	493	274	238.5	455	
149.0	***	500	0	274	179.0	0	500	306	209.0	493	279	239.0	462	
149.5	***	493	0	274	179.5	0	516	290	209.5	493	284	239.5	470	
150.0	337	485	0	268	180.0	0	516	290	210.0	493	284	240.0	470	

3.4 解析例

各RUNのうち浮遊時間が長く、燧灘に深く入り込んだ、1980年RUN1を解析する。

気球は新居浜の沖合3kmの海上で400mの高度に飛揚された。この気球は8時間にわたって海上を浮遊し、燧灘の南部海域の200~400mの高度の風を観測した。

7月22日の11時5分に放球された気球は、その後約2時間ほど400mの高度を北へ向かって流れている。同時に行われたトレーサー実験(第6章)によると、海上で放出されたトレーサーは南へ向かい、新居浜のトレーサー捕集地点まで運ばれている。これはおそらく、沿岸の沖合10km付近まで、海風循環が伸びていることを示しているものと考えられる。すなわち、日中には海上又は地表付近では北風が、400mの高度ではその反流の南風が卓越することを表わしていると思われる。さらにこの領域では、風の東西成分が弱く、南北方向の成分のみが顕著に現われていることも、注目すべきである。夏の燧灘の南半分の海域は、下層の風系は基本流が弱く、南北方向に発達する局地循環が顕著に発達することが確認された。

新居浜・魚島・福山を通る南北断面(図2.3)で各高度の風を比較すると、魚島と福山は下層の数100mを除いてほぼ西南西の一般流が顕著である。したがってその間の海域も両地点の風とほぼ同様な風が吹いていることが予想される。しかし、魚島の南では、ノンリフトバルーンの航跡と魚島における風の鉛直分布による風向とを対比してみると、魚島上空の風向とその南側の海域の風向とは大きな違いが見出される。したがって、この海域の風の分布は、魚島と新居浜の風の補間では推定し難く、その地域のより詳細な風の観測が必要であることが分かった。

参 考 文 献

- J. Sato 1975: Estimation of Turbulent Diffusivity over the Tokyo Metropolitan Area from Constant-volume Balloons. Pap. Meteorol. Geophys. 26, 35-46
- 1981: Some Aspects of Diurnal Variation and Profile of Vertical Turbulent Diffusivity in the Atmospheric Boundary Layer, Pap. Meteorol. Geophys. 32, 247-256

付 録

ノンリフト・バルーンの調整

1. ノンリフト・バルーンとは

ノンリフト・バルーン観測に使用するバルーンは外力による膨張変形を極力押さえ、同一容積を保つように作られている。このためバルーンの浮力は空気の密度のみに比例することになるので、バルーンに加える錘りの調整によって、バルーンが到達し、かつ浮遊しようとする〔自重（錘りを含む）と浮力とが釣り合う〕空気の密度面（気圧の遞減が高度に比例すると考えれば、高度面）を任意に指定することができる。このように、調整されたバルーンは自由浮力（浮力より自重をひいたもの）が零になるようなそのバルーンに特有の空気の密度面を浮遊すると考えられ、このことが“ノンリフト（non-lift）・バルーン”と呼ばれる理由でもある。

2. 錘りの調整

前節に述べたように錘りを調整することによって、観測したい高度にバルーンを浮遊させることができる。

1) 調整の理論

a) ノンリフト・バルーンの地上での自由浮力 L_0 及び高度 Z での自由浮力 L_z は、次の式で表わされる。

$$L_0 = \rho_{a0} V - \rho_{h0} V - w \quad \text{①}$$

$$L_z = \rho_{az} V - \rho_{hz} V - w \quad \text{②}$$

ただし

{	V_0 :	地上でのバルーンの容積	
	V_z :	高度 Z でのバルーン容積	
	ρ_{a0} :	地上での空気密度、 ρ_{az} :	高度 Z での空気密度
	ρ_{h0} :	地上でのヘリウム密度	
	ρ_{hz} :	高度 Z でのヘリウム密度	
	w :	バルーンの自重	

実際にはバルーン内圧と外気圧とのバランスによってバルーンの容積は、わずかであるが変化するので、これを考慮してある。

適当な錘りをつけ地上で自由浮力が零 ($L_0 = 0$) になるようにしたバルーンに、さらに高度 Z で自由浮力が零 ($L_z = 0$) になるように加える錘り Δw は、この L_z と L_0 との差より求められる。

$$\Delta w = L_z - L_0 \quad \text{③}$$

ただし、 $L_z < L_0$ の時は錘りを減らすことになる。

③式に①、②式を代入する。

$$\begin{aligned}\Delta W &= (\rho_{az}V_z - \rho_{hz}V_z - W) - (\rho_{ao}V_o - \rho_{ho}V_o - W) \\ &= (\rho_{az}V_z - \rho_{ao}V_o) - (\rho_{hz}V_z - \rho_{ho}V_o) - (W - W) \\ &= \rho_{az}V_z - \rho_{ao}V_o \quad \text{④}\end{aligned}$$

(ヘリウムガスの重量は不変により、 $\rho_{hz}V_z - \rho_{ho}V_o = 0$)

ここで、次のようにおき④式を変形する。

$$V_z = V_o + \Delta V \quad \text{⑤}$$

$$\rho_{az} = \rho_{ao} - \Delta \rho_a \quad \text{⑥}$$

$$\begin{aligned}\Delta W &= (\rho_{ao} - \Delta \rho_a)(V_o + \Delta V) - \rho_{ao}V_o \\ &= \rho_{ao}V_o + \rho_{ao}\Delta V - \Delta \rho_a V_o - \Delta \rho_a \Delta V - \rho_{ao}V_o \\ &= \rho_{ao}\Delta V - \Delta \rho_a V_o - \Delta \rho_a \Delta V \quad \text{⑦}\end{aligned}$$

⑦式で實際上第3項は無視してよく

$$\therefore \Delta W = \rho_{ao}\Delta V - \Delta \rho_a V_o \quad \text{⑧}$$

b) Vについてノンリフト・バルーン固有の膨張係数 α を仮定して

$$\Delta V = V_o \cdot \alpha \cdot \Delta P \quad \text{⑨}$$

とおく。 ΔP は容積一定とした場合のノンリフト・バルーンの内外圧差の仮の増分である。

⑨式を⑧式に代入する。

$$\Delta W = \rho_{ao}V_o \cdot \alpha \cdot \Delta P - \Delta \rho_a \cdot V_o \quad \text{⑩}$$

この⑩式がノンリフト・バルーン調整上の基本式である。

b') ΔP は次のようにして求める。

$$\Delta P = (\text{外気圧の変化による増分}) + (\text{内圧の温度変化による増分})$$

第1項は、ノンリフト・バルーン内圧を外圧より高くして放球するので

$$P_{ao} (\text{地上気圧}) - P_{az} (\text{高度} Z \text{での気圧})$$

で求め、第2項も同じ理由によって、内圧の増分 ΔP_h となるので

$$\Delta P_h = P_{hz} - P_{ho} \quad \text{⑪}$$

で求める。ただし、 P_{hz} 、 P_{ho} はバルーンのそれぞれ高度Z、地上での内圧である。 ΔP_h は

$$\frac{P_{ho}}{T_o} \left(= \frac{P_{hz}}{T_z} \right) = \frac{P_{ho} + \Delta P_h}{T_o + \Delta T} \quad \text{⑫}$$

より、〔ただし、 T_o は地上気温、 $T_o + \Delta T (= T_z)$ は高度Zでの気温〕

$$\Delta P_h = P_{ho} \frac{\Delta T}{T_o} \quad \text{⑬}$$

で表わせる。

c) V_o について

①式より

$$V_0 = \frac{L_0 + w}{\rho_{ao} - \rho_{ho}} \quad (14)$$

で表わせる。

2) 調整上の注意

調整は1)調整の理論により、ノンリフト調整野帳(図3.10)に従ってやってもらえばよいが、以下注意事項を上げておく。

テトローン調整野帳

調整場所 _____ 調整年月日 _____

通し番号 _____ 指定高度 _____ m

バルーン番号 _____ 容積 _____ l 自重 (ω) _____ g

高度 _____ 気温 _____ 気圧 _____ 内圧差 _____ He 圧 _____

地上 _____ m T_0 _____ °C P_{a0} _____ mb _____ mb P_{a0} _____ mb

指定高度区 _____ m T_z _____ °C P_{az} _____ mb _____ mb P_{az} _____ mb

○基本式 $\Delta W = \rho_{a0} V_0 \alpha \Delta P - \Delta \rho_a V_0$

Flowchart illustrating the calculation of ΔW (g) based on the basic formula:

Inputs: T_z , $T_0(^{\circ}\text{C})$, $T_0(^{\circ}\text{K})$, ω (g), L_0 (g), P_{a0} (mb), P_{az} (mb), ρ_{a0} (g/l), ρ_{az} (g/l), ΔP (mb), ΔV (l), ΔW (g).

Calculations:

- $T_0(^{\circ}\text{K}) = 273.2 + T_0(^{\circ}\text{C})$
- P_{a0} (mb) and P_{az} (mb) are used to calculate ΔP (mb).
- ρ_{a0} (g/l) and ΔP (mb) are used to calculate ΔV (l).
- ΔV (l) and ΔP (mb) are used to calculate ΔW (g).

Final result: ΔW (g)

L_0 (g) - ΔW (g) = L_z (g)

放球時刻 _____ 放球場所 _____

記事 _____

Fig. 3-10 The field book used in regulating the non-lift balloon.

a) 調整は錘りを釣り合わせ際の風の影響、また日射の影響を考慮し、屋内又はテント内などで行う。

b) バルーン内圧の調整

バルーン内圧はテトルーンの場合、地上気圧より約20mb位高くしておく。これは、この時バルーンの膨張変形が最も少ないと考えられるからで、その調整には、図 3.11のようなU字管を用いる。

c) L_0 : 錘りを釣り合わせることによって求める。錘りを上皿天秤によって計る。

d) w : 気球表面に記入してある。

e) T_0 、 P_{a0} : c) を求めた時点に測定する。

f) T_z 、 P_{az}

ノンリフト・バルーン放球直前のゾンデ観測によるか、それぞれ気温の通減率 ($0.60^\circ\text{C}/100\text{m}$)、気圧の通減率 ($12\text{mb}/100\text{m}$) より推算する。

ただし、 T_0 (調整場所) をもとに T_z を求めるのではなく別に屋外での地上気温 T_0' を測定してこれから推算した方がよい。

g) ρ_{a0} 、 ρ_{az} 、 ρ_{ho}

それぞれの場合の気温と気圧より、調整用グラフ (図 3.12、図 3.13) で読みとる。

h) α : テトルーンの場合は $2 \times 10^{-4} (\text{mb}^{-1})$ とする。

3. 以上より調整野帳に従って計算をし、 L_z の錘りをテトルーンにつけて放球する。

4. テトルーン調整用具一式

ヘリウムガスボンベ

ヘリウム用減圧弁

ゴムホース、三又コック

口ガラス (三又コックにゴムホースをつなぎ、それとバルーンのガス注入口とのつなぎに用いる)

U字管

気圧計 (アネロイド等)

温度計 (アスマン等)

上皿天秤

釣り合わせ錘 (適当なものでよい)

錘りをバルーンに釣り下げる際のとめ金のようなものがあれば便利

ビニール袋 (砂をつめて、 L_z と同じ重さにして、バルーンに釣り下げ放球する)

調整用グラフ、野帳、計算尺

(日本気象協会東京本部技術マニュアルによる)

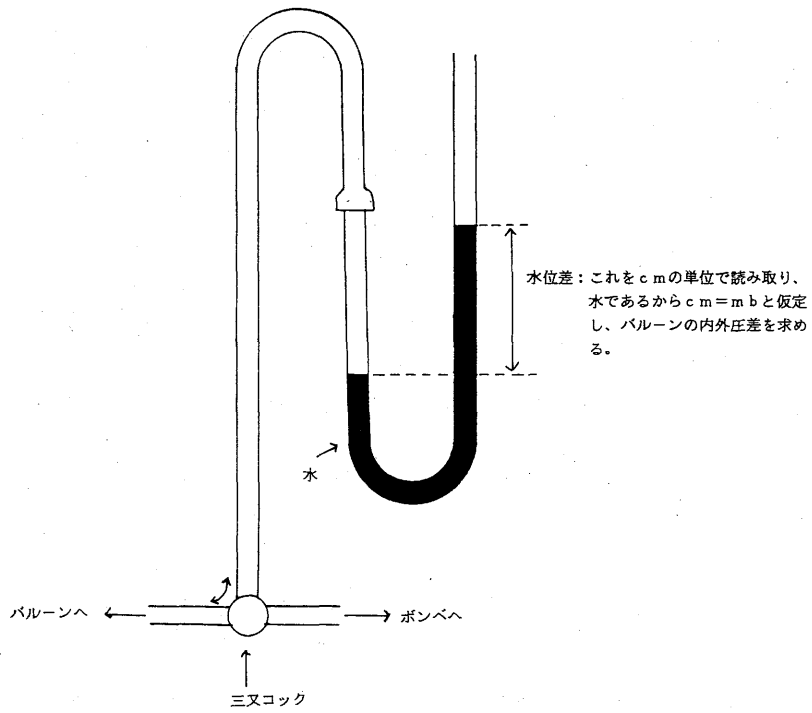


Fig. 3 11 A U tube used in regulating the internal pressure of balloon. It is shown by the difference of water level of U tube measured by cm , assumed to $cm = mb$.

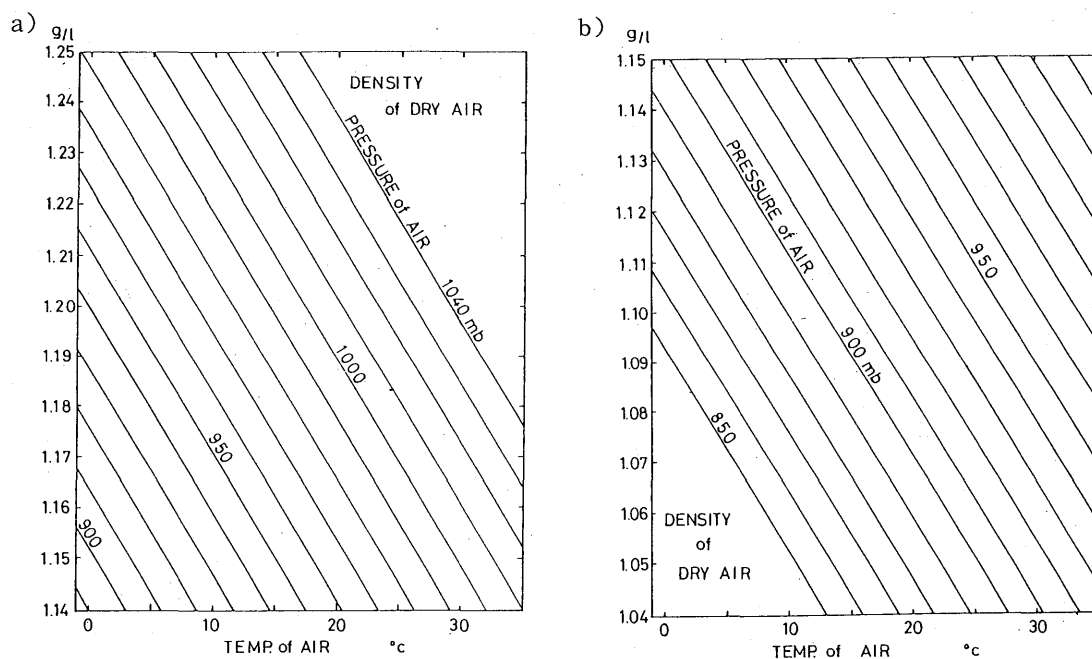


Fig. 3-12 The nomogram used in calculating the density of dry air as functions of air pressure and temperature.

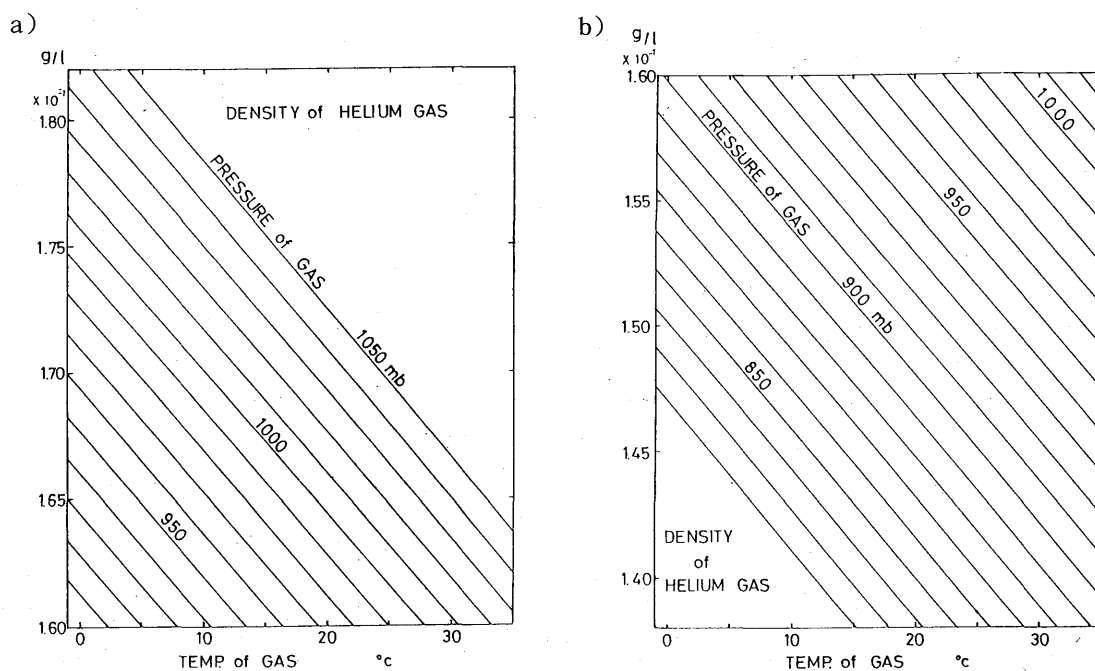


Fig. 3-13 The nomogram used in calculating the density of He gas as functions of air pressure and temperature.

第4章 航空機観測^{*}

4.1 はじめに

瀬戸内海のような複雑な地形では、汚染質の挙動にとって局地風による3次元的な輸送はたいへん重要である。局地風による輸送過程を解明することを目的に、パイボールなどによる気象観測と平行して、航空機による気象要素と汚染濃度の観測を実施した。この観測の重点は、汚染濃度の絶対値を正確に測定することよりも、むしろ汚染の立体的な広がりや、その時間による変化の実態を把握することにある。航空機観測のもう一つの目的は、地表面温度やアルベードの測定である。これらの量は、局地風のエネルギー源である地面からの熱フラックスと直接関係のある重要な量である。また地表面温度は場所によるちがいが大きい、航空機観測ではある範囲の平均値を容易に測定することができる。

80年の観測では、燧灘の上空での汚染の実態をおおまかに把握するため、主に水平分布の測定を行った。81年では水平分布に加えて鉛直分布の測定にも重点を置いた。また地表面温度やアルベードの測定もできるだけ系統的に行った。82年の観測では、前の2ヶ年の結果を踏まえた上、汚染濃度の南北断面を測定し、局地風系と汚染大気関係を明らかにすることに焦点を絞った。また観測の対象とする高度は80年には1500m以下で計画したが、観測が進むにしたがって汚染大気は初めの推定より高く輸送されていることが明らかになり、82年には3000m以上まで観測域を拡張した。

なお、この観測においては、直接風の観測は行わず、別の航空機（海上自衛隊、PS-1）にて、ドップラー航法による間接的な風の観測を行った。（4.9を参照）

4.2 観測機器

表4.1に3年間に航空機観測で使用した観測機器を示す。それぞれ小型・軽量であり、航空機観測に適した機器を搭載した。以下に各観測機器の概要について述べる。

4.2.1 航空機

観測に使用した航空機は、AERO COMMANDER 685（80年）とCESSNA 404（81、82年）の2機種で、図4.1、4.2にその外観を、表4.2に性能を示した。

機内に装備されたロラン-C航法装置、気圧高度計、動揺測定装置により、時間、航空機の位置、高度、姿勢（ROLLING, PITCHING, YAWING）を把握することができる。

ロラン-C航法システムは双曲線航法の1つで、2点からの距離の差が一定となる軌跡はこの

* 木村富士男・戸矢 時義：応用気象研究部

Table 4.1 Aircraft instrumentation.

項 目	観 測 機 器		
	1980年	1981年	1982年
航 空 機	AERO COMMANDER 685	CESSNA 404	
位 置	ロラン-C航法装置	ロラン-C航法装置	
高 度	気圧高度計	気圧高度計	
姿 勢	————	動揺測定装置	
気 温	サーミスター温度計	白金抵抗温度計	
湿 度	露 点 計	露点計, Ly- α 湿度計	Ly- α 湿度計
地表面温度	赤 外 放 射 温 度 計		
放 射 量	————	日 射 計	日射計, 長波長放射計
エーロゾル	————	パーティクルカウンター	
大気汚染質	大気汚染測定装置 (NO計, NO _x 計, O ₃ 計)		
地表面画像	————	VTR システム	
そ の 他	大気サンプリングシステム, データ収録装置		

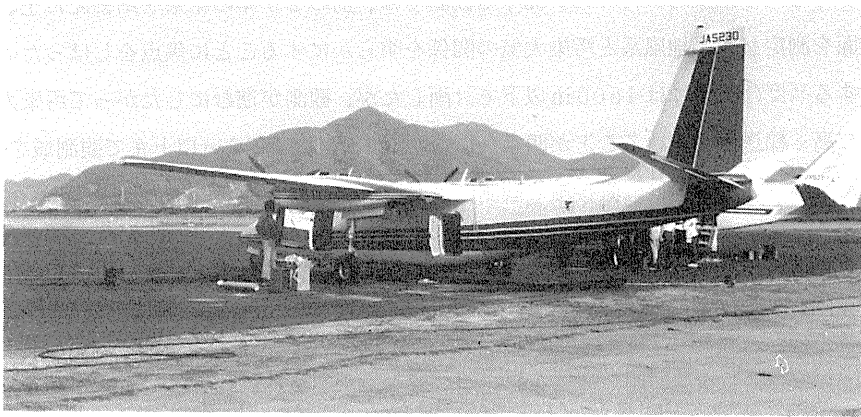


Fig. 4.1 Photograph of Aero commander 685 (at Okayama Airport in 1980).

2点を焦点とした双曲線になるという原理を利用している。25局で全球をカバーしており、2対の主一従局から2本の位置線を決めてこの交点から位置を求める(村山1983)。この様にして決定された位置はVIDEO PLOTTER(図4.3)により、刻々とブラウン管上に表示され、航跡図が得られる。

気圧高度計はピトー静圧管からの静圧測定によるもので、精度は約30m、高度約10kmまで使用出来る。



Fig. 4.2 Photograph of Cessna 404 (at Kochi Airport in 1982).

Table 4.2 Performance specifications of aircrafts.

項 目	A. C.— 6 8 5	C.— 4 0 4
最大離陸重量	9,000 LBS	8,400 LBS
自 重	6,472 LBS	5,377 LBS
基本運航重量	6,693 LBS	5,547 LBS
総 積 載 料	2,307 LBS	2,853 LBS
燃 料 消 費 量	40 G/H (240 LBS/H)	34 G/H (204 LBS/H)
燃料搭載限界	322 G	340 G
飛行時間(最大)	8.00 H	10.00 H
巡 行 速 度	306 km/H	306 km/H
電 源 容 量	DC 28 V. 200 A × 2 台	DC 28 V. 100 A × 2 台
航続距離(最大)	1,450 NM	1,793 NM
上 昇 率	1,490 f/min	1,575 f/min
離 陸 距 離	820 m	721 m
着 陸 距 離	685 m	649 m
エ ン ジ ン	GTSIO-520 K	GTSIO-520 M
馬 力	435 HP × 2 台	375 HP × 2 台
最大運用高度	25,500 ft	30,000 ft
全 幅	14.19 m	14.12 m
全 長	13.10 m	12.05 m
全 高	4.56 m	4.04 m
客 室 全 長	2.55 m	3.60 m
胴 体 地 上 高	0.18 m	0.75 m



Fig. 4.3 Loran-C video plotter.

4.2.2 サーミスター温度計

サーミスターを用いた抵抗温度計で、80年の観測において外気温の測定に使用した。

3重のシェルターの中央にサーミスターを取り付け、シェルターは飛行方向に向けて機体下部に取り付けた(図4.4)。蒲生ら(1972)によれば、筒内の風速は外気大気速度の約1/3程度であると考えられ、飛行中のサーミスターの見かけ上の温度上昇は抑えられる。表4.3および図4.5に使用した牧野応用測器製航空機用サーミスター温度計の仕様と検定結果を示す。

4.2.3 白金抵抗温度計

81年と82年の観測には、牧野応用測器製の航空機用白金抵抗温度計を用いた。

これは100Ωの白金抵抗線の温度変化による抵抗の変化を測定して温度を求めるもので、サーミスターに比べて出力特性がリニアであるという利点を持っている。

高大気速度での温度上昇を抑えるため、2重のシェルター構造となっている。図4.6に機体への取り付け状況を、また表4.4にその仕様を、図4.7に検定した結果を示す。

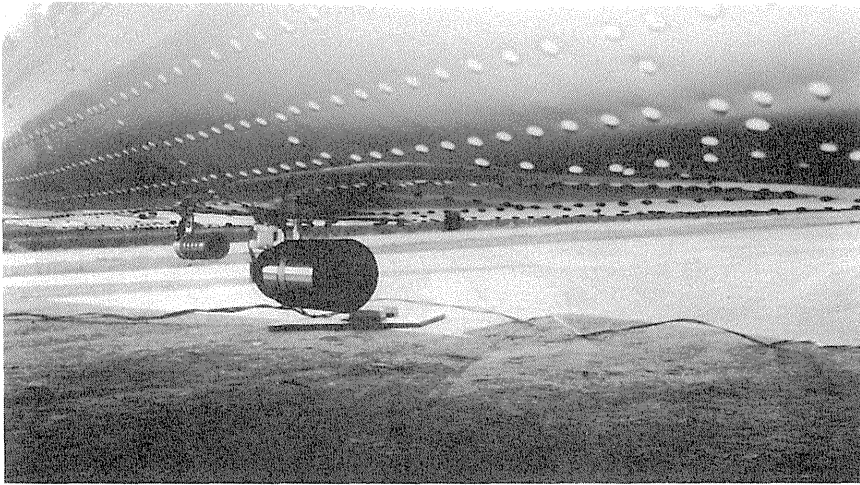


Fig. 4.4 Sensing probe of the thermistor thermometer.

Table 4.3 Specifications, Thermistor thermometer.

項 目	仕 様
セ ン サ ー	サーミスター (石塚電子 5 BT 2)
時 定 数	20 ~ 30 sec
電 源	DC 1.5 V (単 1)
外 形 寸 法	シェルター 80 ϕ $\times$ 140 (mm) 変 換 器 220 $\times$ 150 $\times$ 120 (mm)

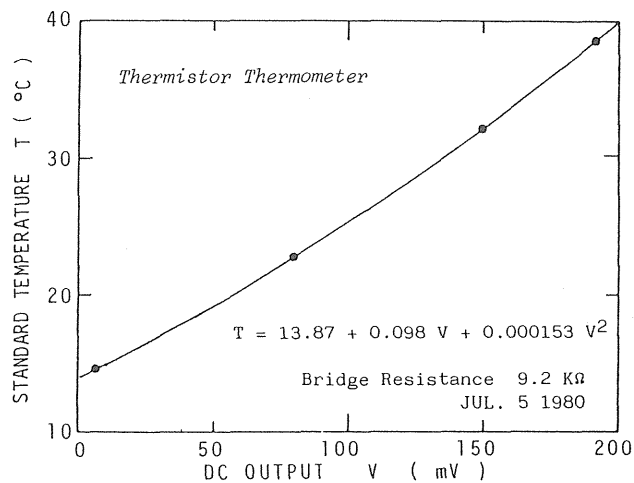


Fig. 4.5 Calibration curve of the thermistor thermometer.

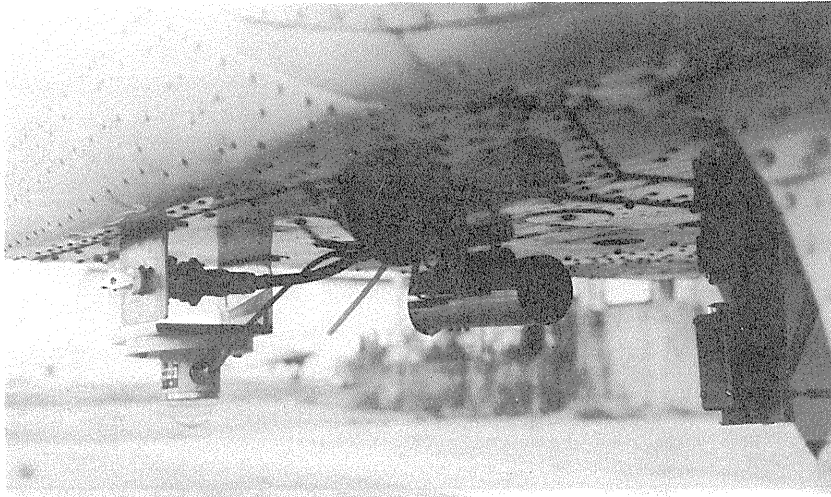


Fig. 4.6 Sensing probe of the platinum resistance thermometer (the middle).

Table 4.4 Specifications, Platinum resistance thermometer.

項 目	仕 様
セ ン サ ー	Pt 100 Ω (0.5 級)
測 定 範 囲	-10 $^{\circ}\text{C}$ ~ +40 $^{\circ}\text{C}$
出 力	DC 0 ~ 1 V
時 定 数	3.3 sec
電 源	AC 100 V (50/60 Hz) または DC 12 V
外 形 寸 法	シェルター 65 ϕ $\times$ 200 (mm)
	変 換 器 220 $\times$ 180 $\times$ 130 (mm)

4.2.4 露点計

80年と81年の湿度の観測には、露点計 (EG & G International, Inc. MODEL 137) を使用した。

これはセンサー内の鏡面上に外気を取り入れ、これを冷却して結露させ、鏡面に常に一定の厚さの露の層を維持するようにコントロールして、大気中の水蒸気圧と平衡になった時の鏡面の温度を白金抵抗 (100 Ω) で測定するものである。表 4.5 に露点計の仕様を、図 4.8 にセンサーの外観を、図 4.9 に機体への取り付け状況を示す。

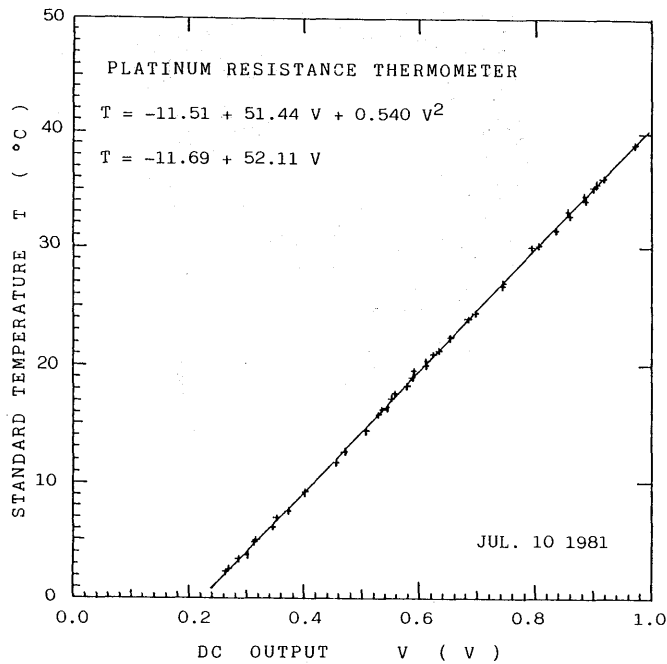


Fig. 4.7 Calibration curve of the platinum resistance thermometer.

Table 4.5 Specifications, Aircraft hygrometer (EG & G Model 137).

項 目	仕 様
測 定 範 囲	- 50℃ ~ + 50℃
測 定 精 度	0℃ ~ 50℃ は ± 0.5℃ - 30℃ ~ 0℃ は ± 0.6℃ - 50℃ ~ - 30℃ は ± 1.1℃
応 答 時 間	2℃ / sec
再 現 度	± 0.5℃
出 力	0 ~ 5 V DC
周 囲 温 度	コントロールユニット - 20℃ ~ + 60℃ センサーユニット - 60℃ ~ + 70℃
電 源	115 VAC, 50 ~ 400 Hz, 55 W
外 形 寸 法	コントロールユニット 300 × 200 × 150 (mm) センサーユニット 105 × 65φ (mm)
総 重 量	約 6 kg



Fig. 4.8 EG & G Hygrometer Model 137 aircraft sensor assembly.

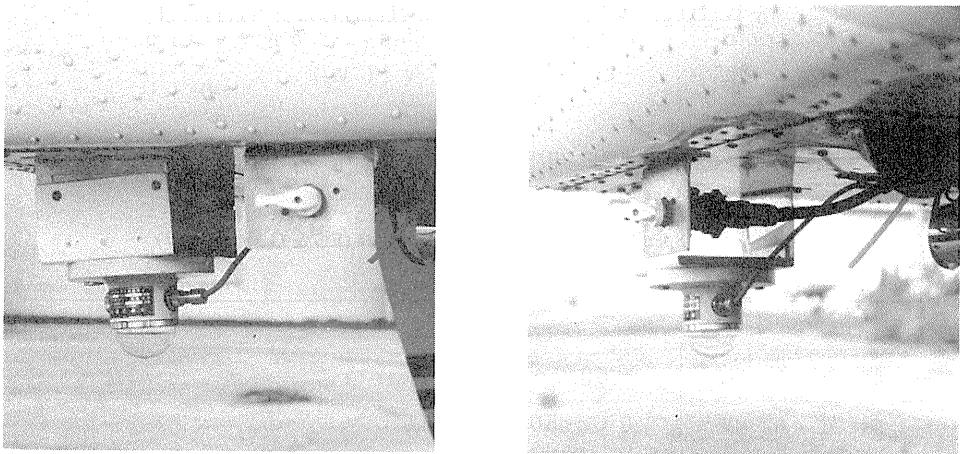


Fig. 4.9 Sensing probe of the aircraft hygrometer (left: side view, right: front view).

4.2.5 Lyman-alpha 湿度計

Ly- α 湿度計は水素を封入した放電管から出た $1215.6\text{ \AA}$ の Ly- α 線の水蒸気による吸収を NO イオンチャンバーで検出して絶対湿度を測定するもので、水蒸気変動量を正確にかつ速い応答速度で測定する湿度計としてアメリカで開発され (Buck (1973, 1976))、主に航空機観測に用いられて来たが (Lemone など (1980) など)、最近は乱流観測にも利用されている (藤谷 (1980)、戸矢他 (1983))。

使用した Electromagnetic Research Corpo. 製の Ly- α 湿度計 Model-BLR の仕様を表 4.6 に示す。図 4.10 は農技研小風洞での検定結果の例 (81 年使用のもの) である。出力が絶対湿度にはほぼ比例するようにログアンプが付属している。

Table 4.6 Specifications, Lyman-alpha humidimeter Model BLR.

項 目	仕 様
測 定 範 囲	0 ~ 30 g/m ³
出 力	0 ~ 5 V
対 数 増 幅 器	直線性; ± 1 % 使用温度; - 20 ~ + 60 °C 温度特性; 0.1 % / °C (0 ~ 40 °C) 周波数特性; 1 KHz
使 用 温 度	感部; - 55 ~ + 55 °C コントロールユニット; - 20 ~ + 60 °C
所 要 電 源	24 ~ 32 VDC, 0.1 A max
外 形 寸 法	感部; 4 × 24 × 8 cm コントロールユニット; 12 × 17 × 9 cm
重 量	約 2 kg (ケーブルを含む)

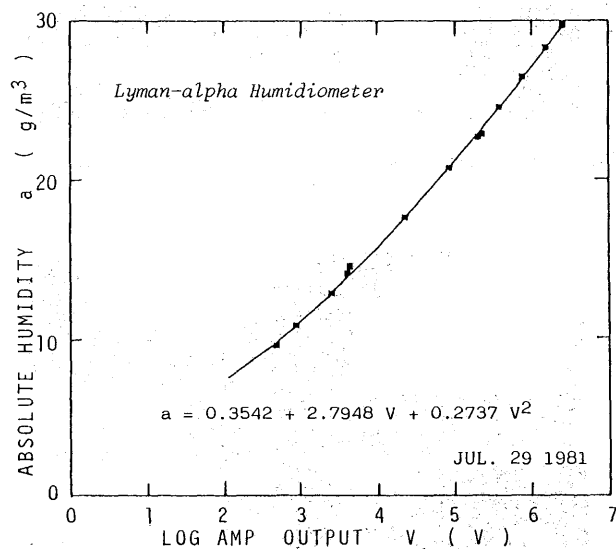


Fig. 4.10 Calibration curve of the lyman-alpha humidimeter Model BLR (in 1981, in a wind tunnel).

Ly- α 湿度計は小型・軽量で 1 KHz の応答があるなどの利点があるが、反面窓に使われている MgF_2 が水滴によりエッチングされ易いという欠点を持っている。また飛行中は窓面が汚れることは避けられないので、日射計のガラスドームなどと同様に、毎離陸前には無水アルコールで窓をクリーニングした。

機体への取り付けにあたっては、砂や雨滴が窓に当るのを避けるため、滑走中や悪天時にはスライド式に機内へ引き込みロックできるように工夫し（図 4.11）、離陸後機体下部の穴からセンサーを機外へ出して測定した（図 4.12）。

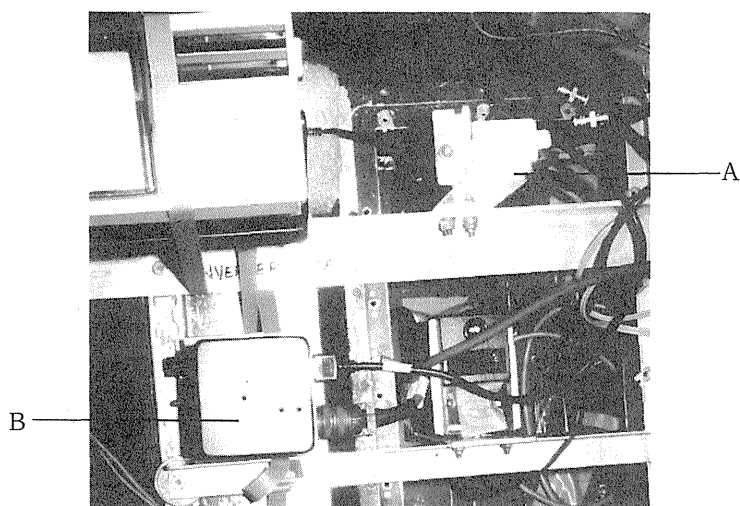


Fig. 4.11 Lyman-alpha humidiometer locked in the cabin (A) and its power supply (B).

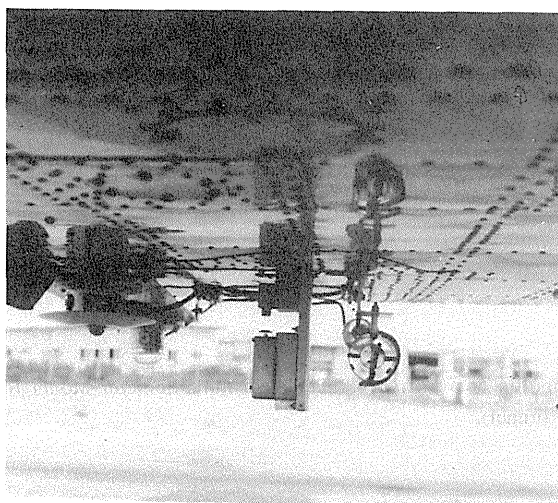


Fig. 4.12 Sensor head of the lyman-alpha humidiometer (the middle, in 1982).

4.2.6 赤外放射温度計

地表面温度の測定には、焦電型赤外放射温度計（松下通信 ER-2007）を使用した。

これは、物体からの赤外放射エネルギーをレンズで収束して赤外線検出器へ入力し、検出素子（ PbTiO_3 ）の温度変化によって電圧出力を得るもので、被測定物体からの赤外放射エネルギーと基準赤外放射エネルギー（基準黒体；室温）をミラーチョッパーによって交互に素子に入力することによって、そのエネルギー差に相当する出力を得て、これに白金センサーによって測定された室温を赤外放射エネルギーに換算して加算する事により、被測定物体からの赤外放射エネルギー（温度に換算される）を得ている。

ER-2007にはデジタル表示窓が備えてあり、従来航空機で使用されて来たバーンズ社のものよりも大幅に小型・軽量化が図られている。また放射率が0.5から1.0まで変えられるように設計されているが、この放射率補正が反射による背景雑音を消去するように設計されている（久保井ほか（1977））ために室内での使用には補正が有効であるが、屋外で使用する場合は、放射率補正が逆に誤差を生むという欠点を持っているため、観測にあたっては放射率を1.0に固定して使用した。

図4.13に外観図を、表4.7にその仕様を示した。機体へはビデオカメラと同様、機体下部に小さな穴をあけて、飛行中真下をスキャンするように機内に取り付けた（図4.14）。

放射温度計の較正には、サーミスター、白金抵抗温度計と同様、気象研の水平面長波長放射計検定槽にて水温を約10℃から40℃まで変化させて行った。図4.15に81年8月に検定した結果を示す。ER-2007にはリニアライザーが付属していて出力がほぼ直線になるよう調整されているが、ここでは2次曲線で回帰させた。

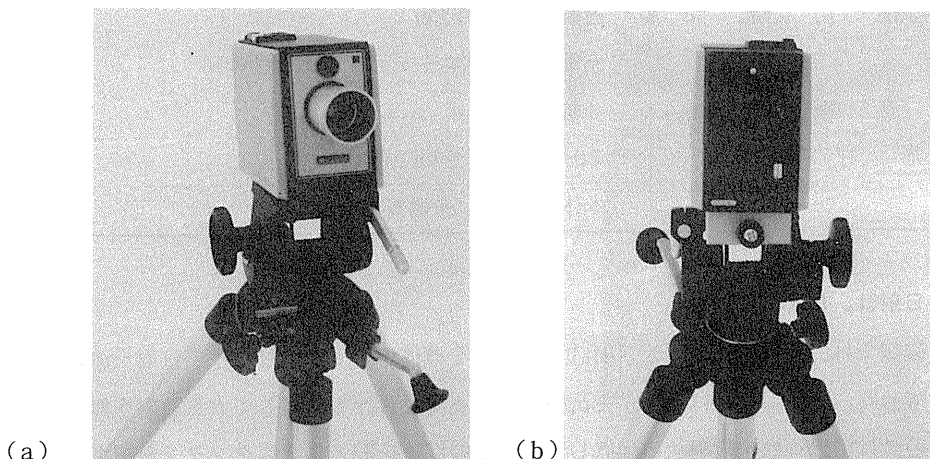


Fig. 4.13 Infrared radiation thermometer ER-2007 ((a) front view, (b) rear view).

Table 4.7 Specifications, Infrared radiation thermometer ER-2007.

項 目	仕 様
測 定 温 度 範 囲	-30 ~ +150 °C
測 定 精 度	測定温度 0 ~ +150 °Cでは± 1.5 °C以内 -30 ~ 0 °Cでは± 3.0 °C以内
測 定 感 度	-10 °C以上では 0.1 °C以下 -10 °C以下では 0.2 °C以下
測 定 視 野 角	2° (標準)
応 答 波 長 領 域	8.5 ~ 12.5 μm
応 答 速 度	95 %の立上がりに対して 0.7 秒以下
測 温 表 示	パネル面ではデジタル表示 4桁 ファインダ内ではデジタル表示 3桁
ア ナ ロ グ 出 力	
出 力 電 圧	± 10 V (開放電圧)
電 圧 感 度	100 mV/°C
出力インピーダンス	500 Ω以下
ゼロシフト範囲	-30 ~ +125 °C
放 射 率 補 正	1.0 ~ 0.5 (連続可変)
使 用 周 囲 温 度	0 ~ +40 °C
電 源	NiCd (NR-SC) × 4 個 (12 V)
使 用 時 間	連続使用で 2 時間 充電器にてフローティング連続使用可
充 電 時 間	3 時間
外 形 寸 法	79 × 112 × 215 mm
重 量	本体 1.2 kg, 充電器 0.2 kg

4.2.7 日射計、長波長放射計

81年の観測では、英弘精機のネオ日射計 MS-42 を機体の上下に取り付けて日射を測定しアルベードを求めた。また82年にはさらに Eppley の長波長放射計を使用して大気放射を測定した。

ネオ日射計は白黒両板を放射状に配置し、両者の温度差を銅/コンスタンタン熱電堆で測定する事により日射エネルギーを求めるものでドームにはガラスドームが用いられている。

長波長放射計は受光面とベース間の温度差を熱電堆で測定するもので、シリコンドームを使っ

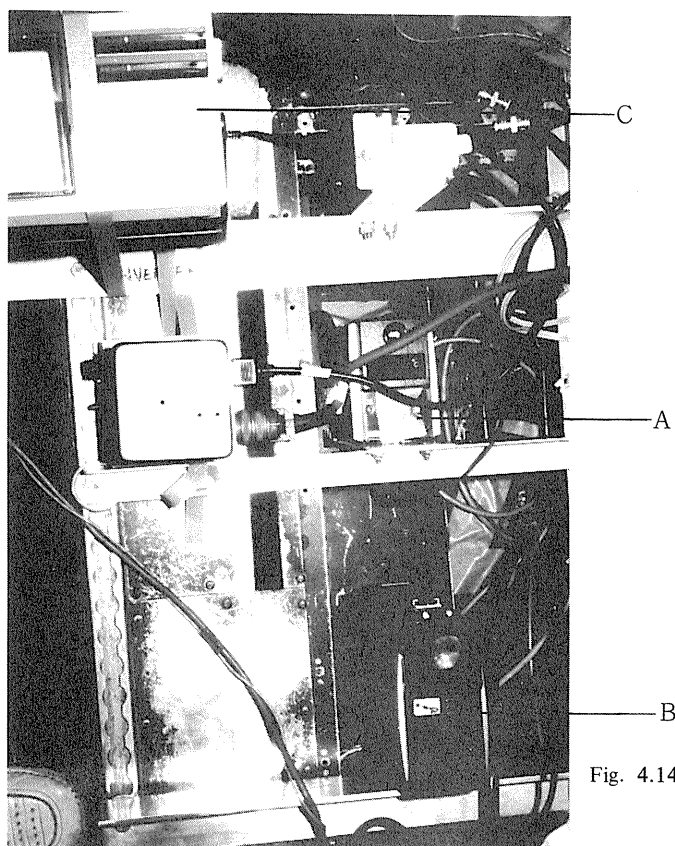


Fig. 4.14 A: Infrared radiation thermometer in the cabin, B: Video camera, C: Monitor TV.

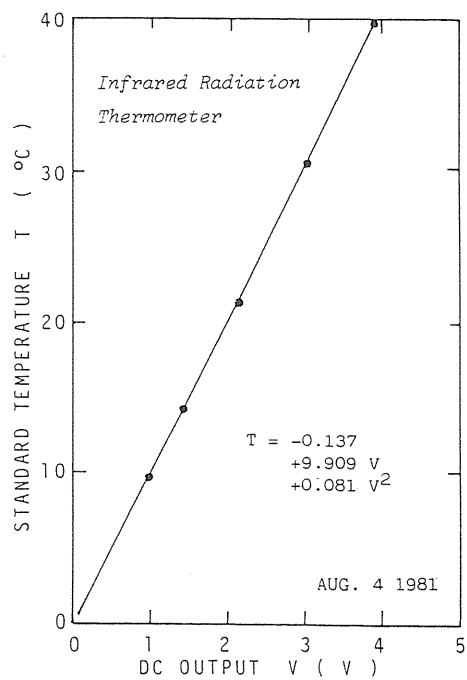


Fig. 4.15 Calibration curve of the infrared radiation thermometer ER-2007 (in 1981).

て可視光域をカットして赤外放射だけを測定する。

表 4.8、4.9 にそれぞれの仕様を、表 4.10 に検定定数を示す。図 4.16 は機体への取り付け状況を示す。

Table 4.8 Instrument characteristics, EIKO Pyranometer MS-42.

項 目	仕 様
測 定 範 囲	0 ~ 2.0 ly/min
感 度	5 mV/ly · min (7 μ V/W · m ⁻²)
内 部 抵 抗	500 Ω
応 答 速 度	約 3.8 sec (1/e 追従)
温度ドリフト	約 0.1 %/°C
Cosine 特性	約 2 %
方 向 性	な し
ド ー ム	66 mm ϕ ガラスドーム (0.3 ~ 2.8 μ m)
寸 法	150 ϕ × 120 mm
出 力	0 ~ 10 mVDC

Table 4.9 Instrument characteristics, EPPLEY Precision Infrared Radiometer (Pyrgometer).

項 目	仕 様
直 線 性	± 1 %, 0 ~ 700 W/m ²
感 度	5 μ V/W · m ⁻²
内 部 抵 抗	約 700 Ω
応 答 速 度	2 sec (1/e 追従)
温度依存性	± 2 %, -20 °C ~ 40 °C
Cosine 特性	5 %以内
方 向 性	な し
ド ー ム	30 mm ϕ シリコンドーム (3.5 ~ 50 μ m)
寸 法	190 ϕ × 80 mm

Table 4.10 Calibration constants of radiometers.

機 種	検 定 定 数
英弘ネオ日射計 A 81161	6.78 mV/kw · m ⁻²
A 81167	6.83 mV/kw · m ⁻²
EPPLEY 長波長放射計 22063 F 3	4.33 μ V/w · m ⁻²
22064 F 3	4.07 μ V/w · m ⁻²

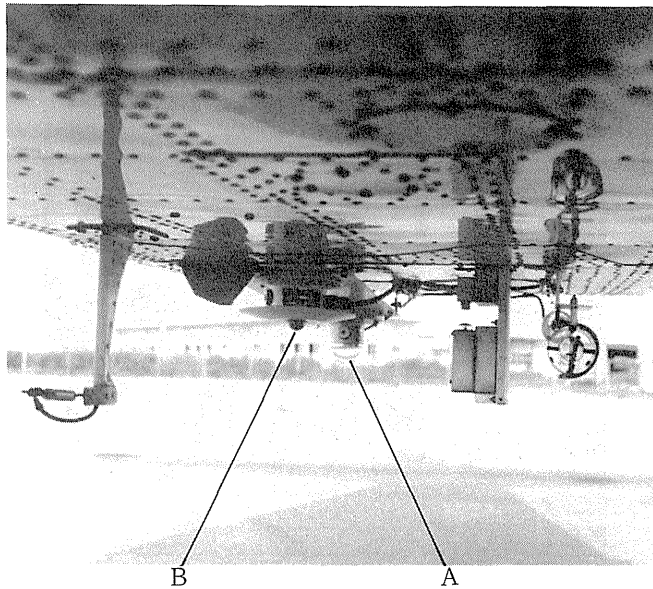


Fig. 4.16 Pyranometer (A) and Pyrgeometer (B).

4.2.8 パーティクルカウンター

大気中に浮遊しているエアロゾルの濃度を測定する装置で、一定流量の空気をポンプで吸引し、これをランプで照射して個々の粒子によって散乱された光を光電子増倍管によりパルス状電気信号に変換する。散乱光の強度はエアロゾルの粒径に依存するため、パルスの数と波高値（散乱光強度）によりエアロゾルの粒径分布が測定される。

81年と82年の観測において、リオン社のパーティクルカウンターKC-01を使用し、同社のデジタルプリンターKP-01も併用した。なお82年にはパルス信号をアナログ電圧に変換し、直接データ収録装置に入力する方法をとった。機内での取り付け状況を図4.17に、またその仕様を表4.11に示す。

4.2.9 大気汚染測定装置

大気汚染測定装置はNO計、NO_x計、O₃計の3つの部分から構成される。いずれも化学発光法（ケミルミネッセンス法）による測定器である。NO計はサンプル大気を高濃度のO₃と混合・反応させ、その時O₃とNOの反応により出る光を光電子増倍管により電圧に変換する。NO_x計はNO計の前段に還元装置を取り付けNO₂をNOに還元して測定するもので、NOとNO₂の濃度の和を測定する。O₃計はサンプル大気をエチレン（C₂H₄）と混合し、O₃とC₂H₄の反応により出る光をNO計と同様な方法で測定する。

化学発光法による測定器は動作が安定で検出感度が良い上に応答速度も数秒程度と速いため航空機観測には適しているが、気象測器などと比べると重量があり、また電力も多く必要とするの

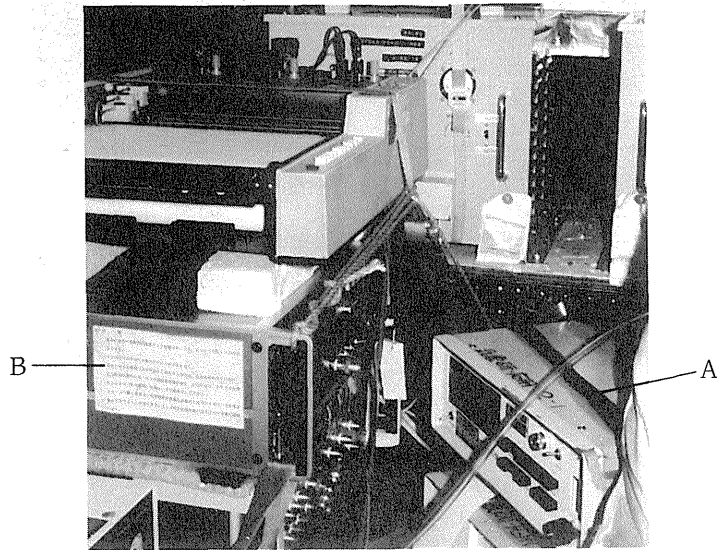


Fig. 4.17 Particle counter RION KC-01 (A) and Cassette data recorder TEAC R-80 (B) (in 1981).

Table 4.11 Specifications, Particle counter (RION KC-01).

項 目	仕 様
測 定 範 囲	粒径 $0.3 \mu\text{m}$ ϕ 以上 5 レンジ (0.3, 0.5, 1, 2, 5 μm) 粒子数 0 ~ 100,000 個/ℓ
光 学 系	光軸交角 70° 側方散乱方式
試 料 吸 引 速 度	0.01 cf/34 sec. (0.5 ℓ/min.)
粒子個数の計数損失	5 % 以下 (100,000 個/ℓ の場合)
出 力	ディジタルプリンター用出力及び各粒径レンジについてパルス出力
周 囲 温 度	0 ~ 40 $^\circ\text{C}$, 相対湿度 85 % 以下
電 源	100 VAC $\pm$ 10 V, 約 110 VA
外 形 寸 法	約 29 × 11 × 42 cm
重 量	約 11 kg

であり小さな航空機には搭載できない。表 4.12 に使用した紀本電子工業製の大気汚染測定装置の仕様を、図 4.18 に機内での設置状況を示す。

4.2.10 大気サンプリングシステム

大気のサンプリングは航空機の先端部から動圧による取り込みを行った。直径 25 mm のテフロ

Table 4.12 Specifications, Air pollutants measuring system (KIMOTO).

項 目	仕 様		
	NO 計	NO _x 計	O ₃ 計
原 理	化学発光法		化学発光法
最 小 検 出 感 度	1 PPb		1 PPb
測 定 範 囲	1 ~ 2000 PPb		1 ~ 2000 PPb
応 答 速 度	5 sec 以下 (90 %値)		5 sec 以下 (90 %値)
ゼ ロ ド リ フ ト	± 2 PPb 以下/日		± 1 PPb 以下/日
ス パ ン ド リ フ ト	2 %以内/日		2 %以内/日
寸 法	38 × 46 × 18.5 cm		38 × 46 × 18.5 cm
重 量	約 18 kg		約 16 kg

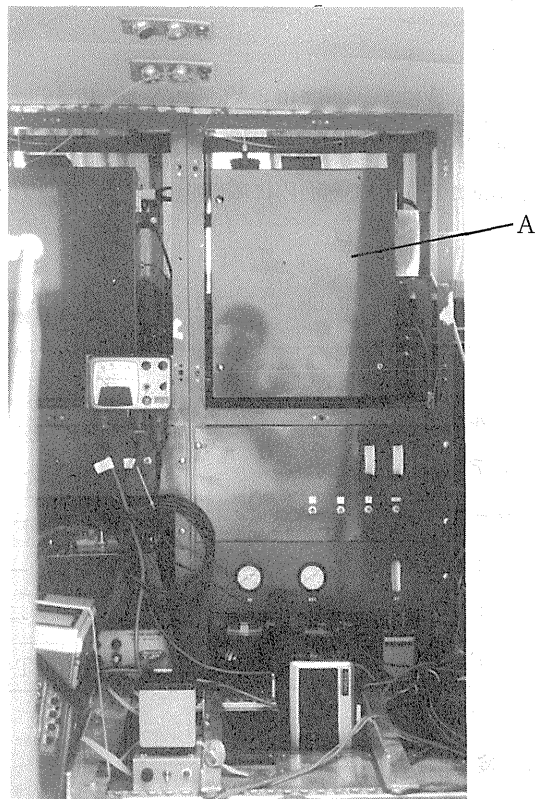


Fig. 4.18 Air pollutants measuring system (A: Ozone meter).

ン管によりキャビン内に引き込まれた大気は、ガラス製のマニホールド（分配管）により分岐され、大気汚染測定装置（NO、NO_x、O₃計）とパーティクルカウンターへ分配された。図 4.19 にテフロンチューブとマニホールドを示す。

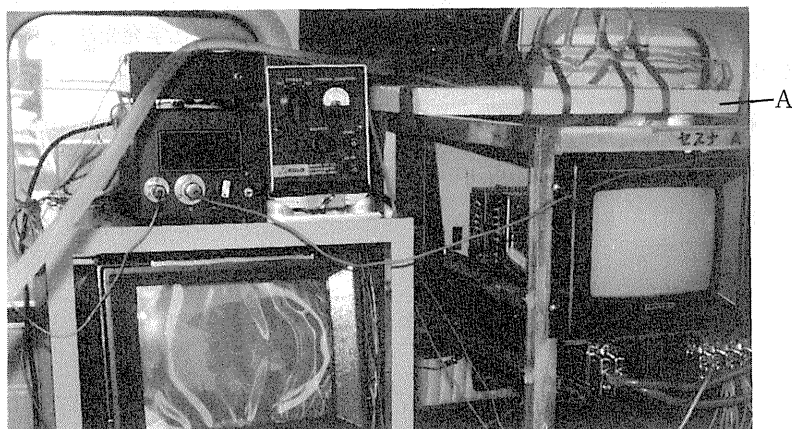


Fig. 4.19 Air sampling system (Teflon tubes and manifold (A), in 1980).

4.2.11 VTRシステム

81年と82年の観測では、Video Camera、Video Tape Recoder、モニターTVを搭載し、航空機直下の雲や地表面の様子を Video Tape に収録した。時刻の記録は、81年は音声で吹き込み、82年は Video Timer を用いて画面内に同時収録した。使用した VTR システムを表 4.13 に示す。

Table 4.13 VTR system.

項 目	品 名
ポータブルビデオレコーダー	ビクター HR-2200 (VHS)
カラービデオカメラ	ビクター GX-V 8
ACパワーアダプター	ビクター AA-P 22
ズームマイクロホン	ビクター MZ-V 78
モニターTV	ビクター CX-61 (6型)
ビデオタイマー	FOR-A VTG-33

4.2.12 データ収録装置

観測したデータは主にデジタルデータ収録装置（紀本電子工業製）により磁気テープ上に記録した。使用したデータ収録装置とその主な仕様を表 4.14 に示す。80年に使用したものと81年、

Table 4.14 Specifications, Data acquisition system (KIMOTO).

項 目	仕 様	
	1980年	1981, 1982年
機 種	紀本電子工業 DP-103	紀本電子工業 MCDAS-F1106
CPU	8ビット	8ビット
A/D 変 換	12ビット変換	12ビット変換
デ ー タ 出 力	ディジタルカセット MT×2	9トラック オープンMT
データ容量/記録密度	90KB×2	1200ft, 1600BPI

82年に使用したものとは機種が異なるが、どちらも8ビットのマイクロコンピュータを利用した収録装置である。

測定器からのアナログ信号は、まずアンプやアッテネーターにより電圧が調整された後、A/D変換器によりディジタル信号に変換される。その際、定められた平均化時間内に何回も変換が行われ、その平均値が算出される。平均化されたディジタル信号はマイクロコンピュータによりブロック単位にまとめられ、時間の信号や他のディジタル信号と合わせて磁気テープ上に記録される。設定した平均化時間は各年毎にまちまちで、80年が4秒、81年が3秒、82年が1.7秒である。図4.20にデータ収録装置の外観を示す。



Fig. 4.20 Data acquisition system in 1981. Data and tracks are displayed on the CRT displays.

4.3 80年観測概要

航空機に大気汚染測定装置（NO計、NO_x計、O₃計）、赤外放射温度計（地表面温度）、サーミスター温度計、露点計を搭載し、燧灘上空及びその周辺の観測を行った。これらの測定データはデジタルデータ収録装置にて収録し、またロラン-Cによる航空機の位置も同時に収録した。

岡山空港を基地とし、表 4.15に示す時間に合計6回の観測飛行を行った。

Table 4.15 List of observational flights in 1980.

フライト番号	日 付	観 測 開 始 時 刻	終 了 時 刻
1 1	1 9 8 0 年 7 月 2 2 日	0 4 : 5 5	0 6 : 5 5
1 2	"	0 9 : 3 2	1 1 : 2 6
1 3	"	1 3 : 5 8	1 5 : 5 2
2 1	1 9 8 0 年 7 月 2 3 日	0 4 : 5 1	0 6 : 5 2
2 2	"	0 9 : 4 9	1 1 : 4 7
2 3	"	1 4 : 0 2	1 4 : 5 8

80年度の観測のねらいは、燧灘周辺での汚染の状況を、おおよそ把握し、次年度以降のより詳細な観測の計画を立てる際に役立てることにある。そのため、主に燧灘下層での汚染の水平分布の測定を行った。図 4.21から図 4.26に各フライトの飛行コース（上）とその時の主な測定値（下）を示す。飛行コースはロラン-Cにより測定された位置を連続的にプロットして書いたもので、10分ごとの時刻も記されている。観測値は上段に気温（T）、地表面温度（Ts）および露点温度（Td）が示されていて、下段には O₃ と NO_x 濃度および高度が示されている。フライト番号12、13、22の3回のフライトでは東予の沖でスパイラル飛行による鉛直分布の測定を行った。測定高度はほぼ200mから1,400mまでである。

なお、この年は瀬戸内地方で環境庁が気象研と同時に航空機観測を実施した（数理計画、1981）。

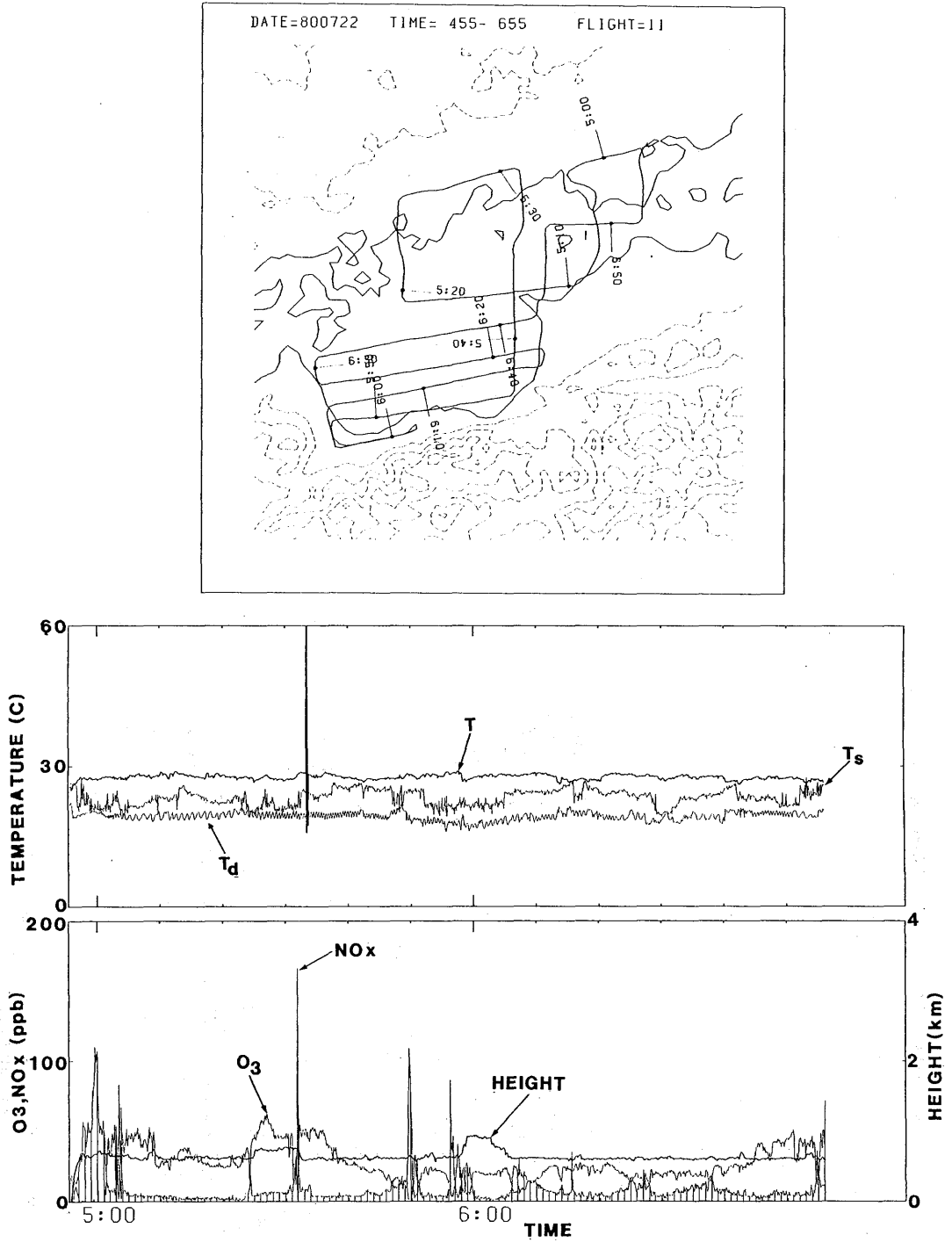


Fig. 4.21 Flight course and time (top) and examples of observed data (bottom two boxes), flight 11 in 1980. T: air temperature, Ts: surface temperature, Td: Dew-point temperature.

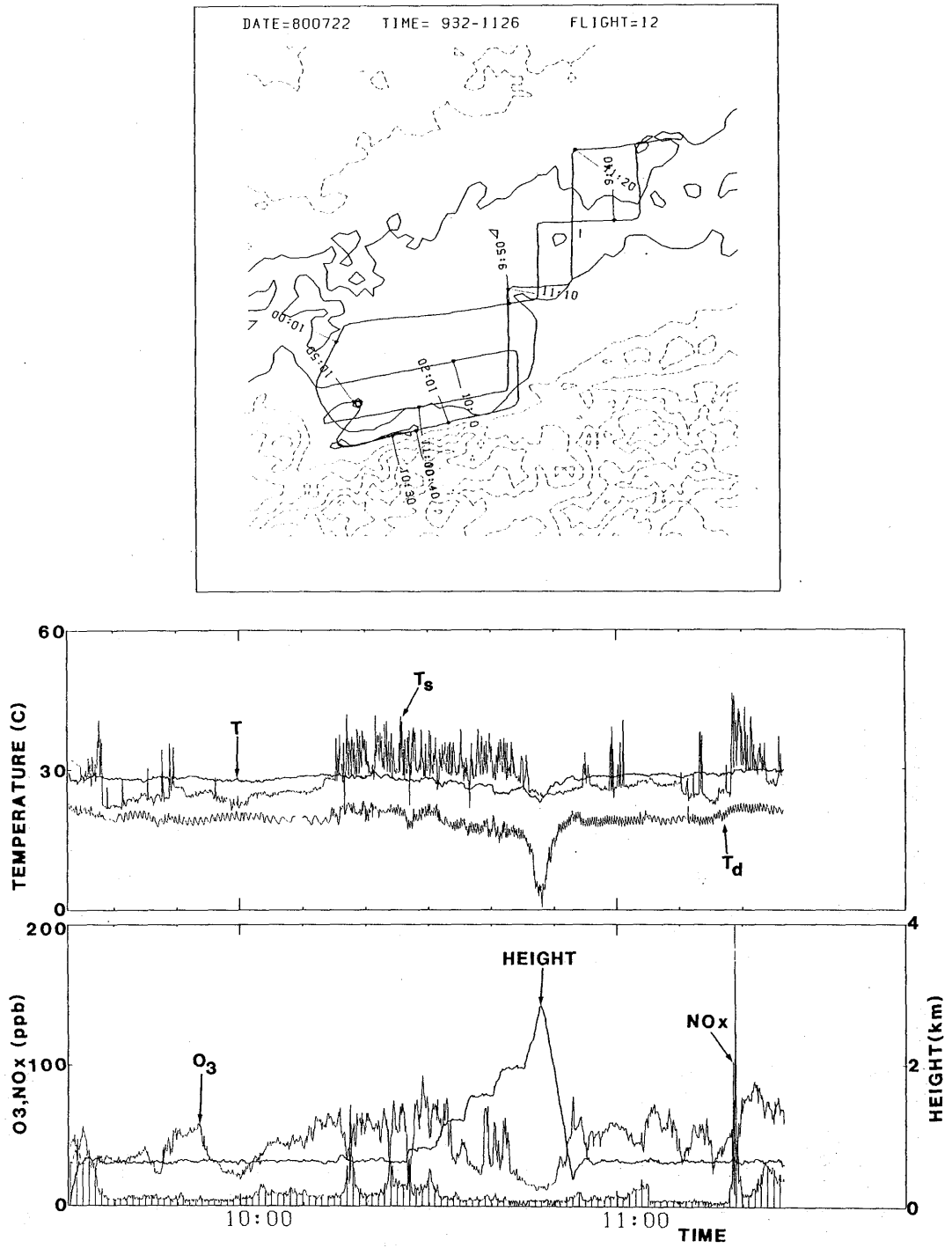


Fig 4.22 Same as in Fig. 4.21, but flight 12.

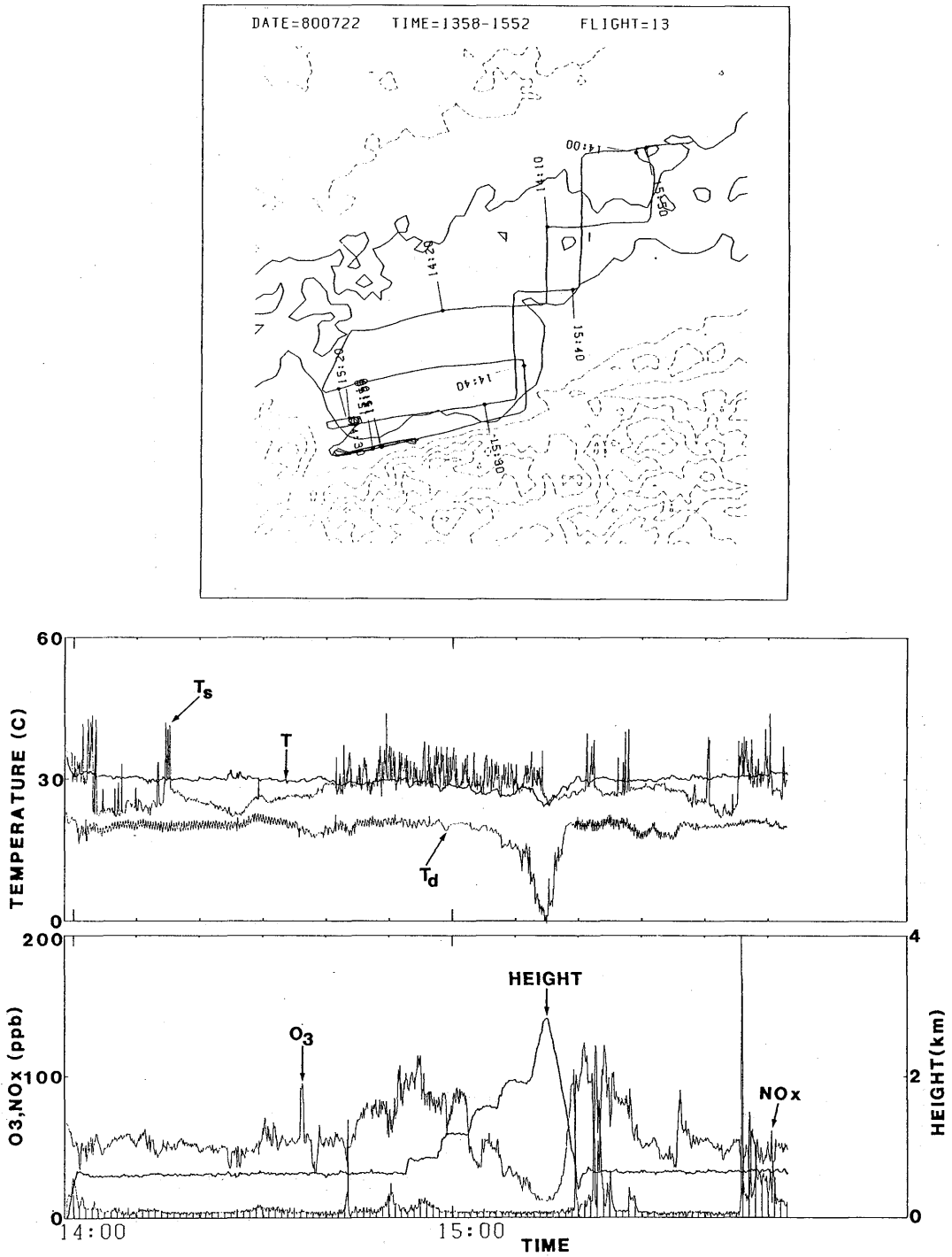


Fig. 4.23 Same as in Fig. 4.21, but flight 13.

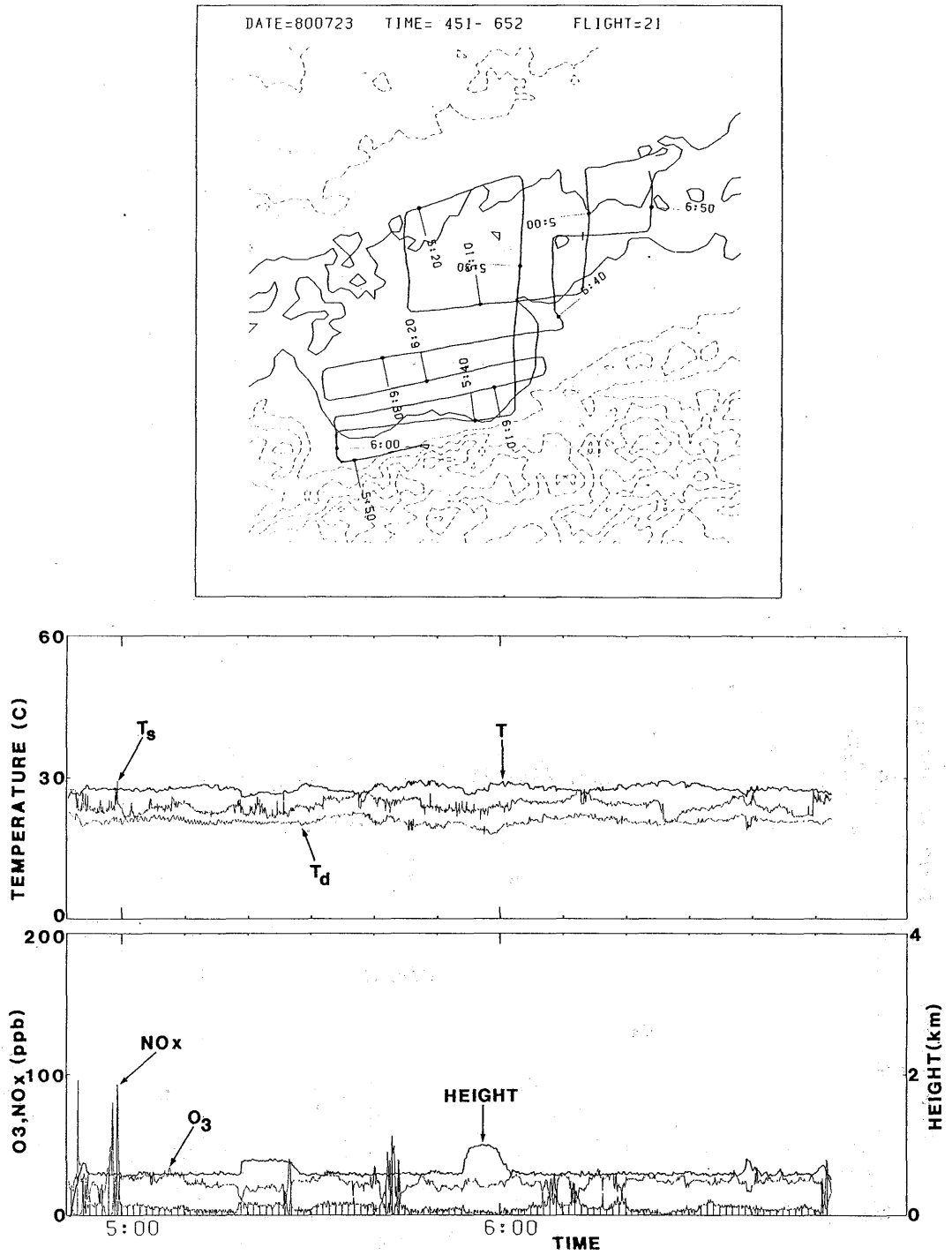


Fig 4.24 Same as in Fig. 4.21, but flight 21.

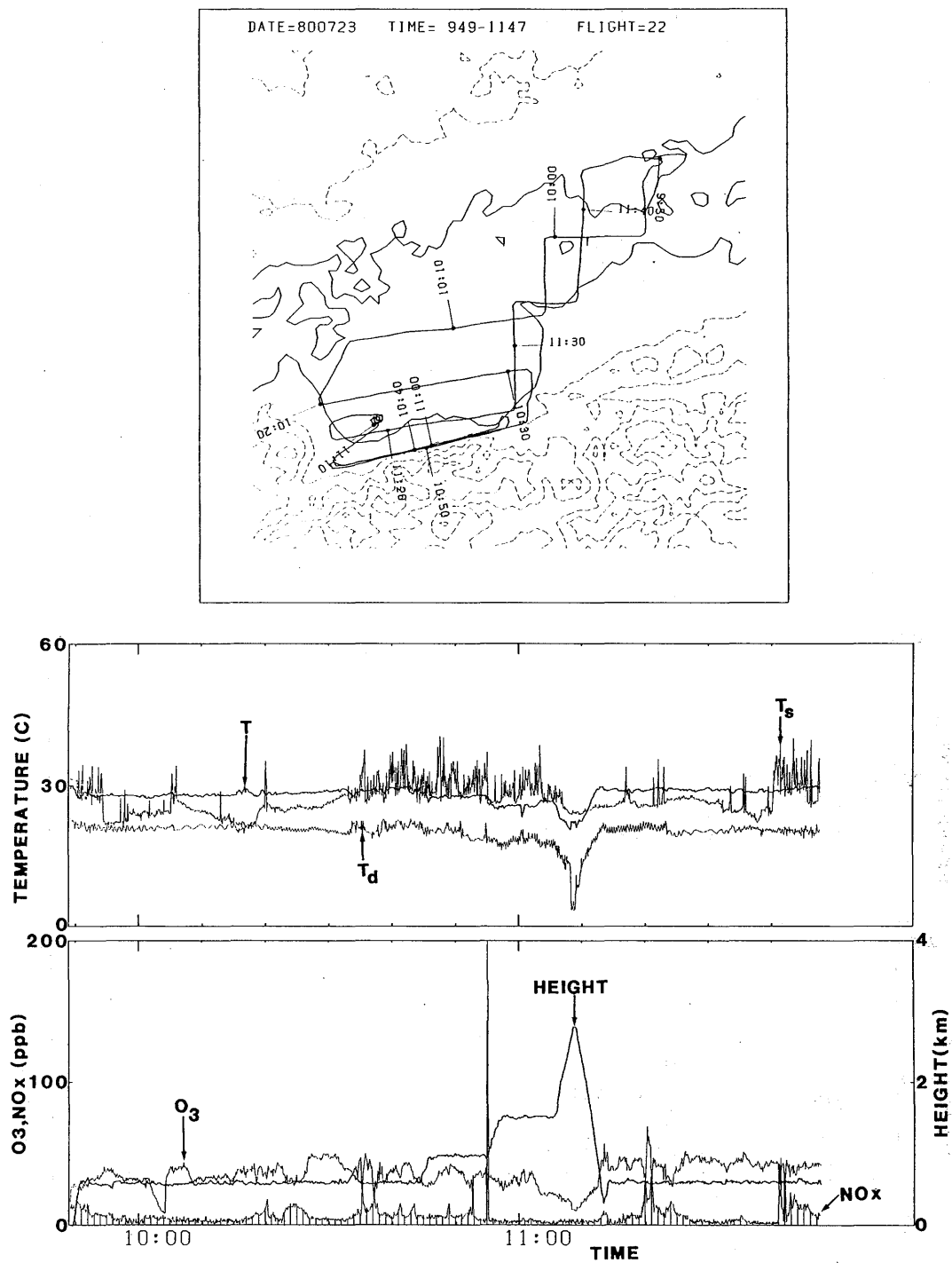


Fig. 4.25 Same as in Fig. 4.21, but flight 22.

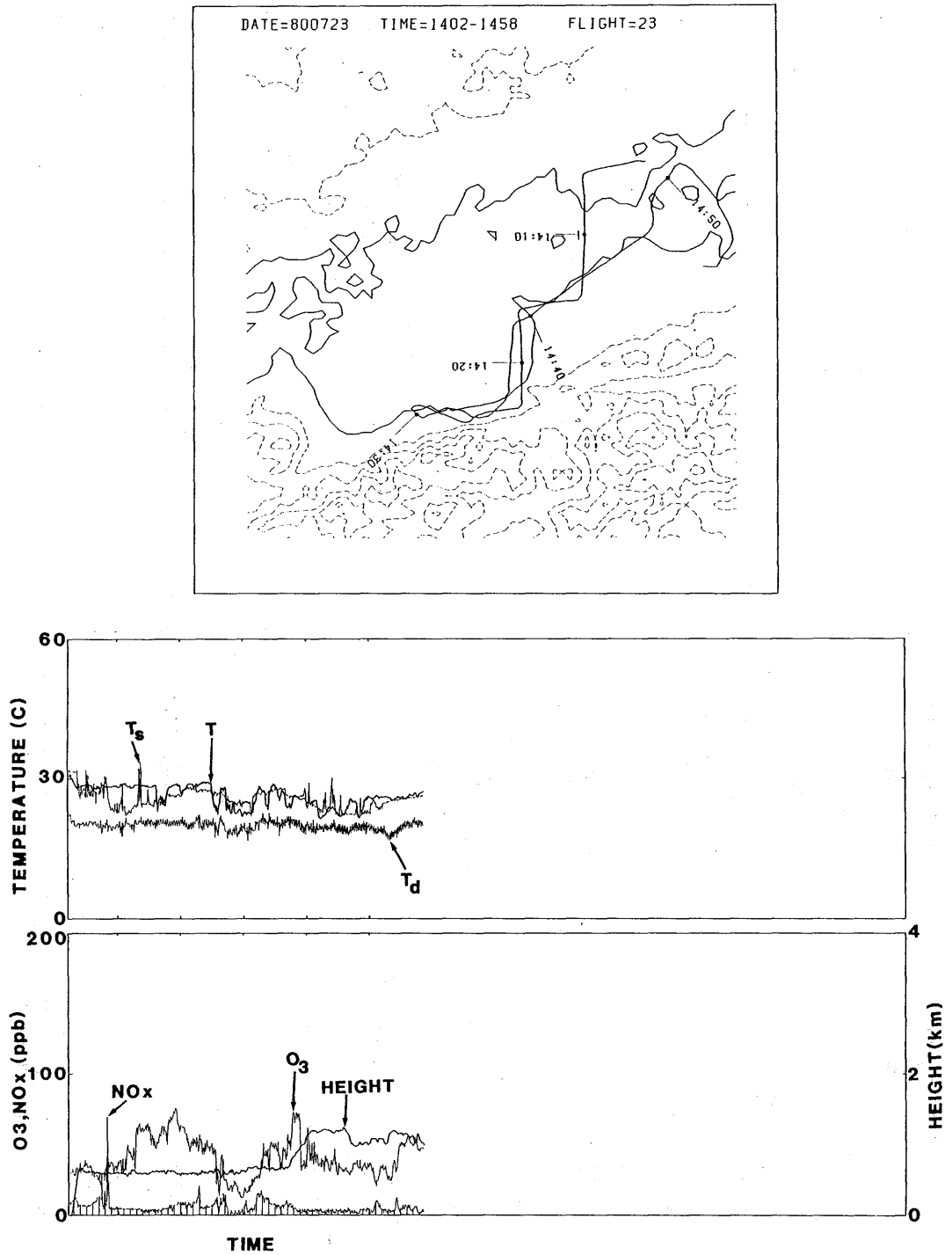


Fig. 4.26 Same as in Fig. 4.21, but flight 23.

4.4 80年観測結果の解析と考察

4.4.1 温位と大気汚染質濃度の鉛直分布の特徴

東予市の沖約 10 km においては、期間中に 3 回温位と大気汚染質濃度の鉛直分布の観測を行った。3 回の観測とも温位の鉛直分布は明確な混合層の存在を示してはいないが、22 日の 2 回の観測では 200～600 m に弱安定層 600～800 m に強安定層(逆転層)、その上にまた弱い安定層が存在していた。図 4.27 に 1 例としてフライト 13 のときに測定された温位 NO_x 、 O_3 濃度の鉛直分布を示す。温位と O_3 濃度には逆相関がある。 O_3 濃度は下層の弱安定層で高濃度、強安定層では高さとともに急激に減少、上層の安定層では低濃度となっている。また、1200 m 以上では 3 回の観測とも 12 ppb 前後ではほぼ一定であった。 NO_x 濃度は全体的に低く、5 ppb をこえるのは 400 m 以下にわずかに見られるのみであった。

4.4.2 大気汚染質濃度の水平分布の特徴

高度 250～350 m のときに測定されたデータを使って書いた NO_x 濃度の水平分布を図 4.28 に示す。図に示されている丸印の面積はその点の濃度に比例する。観測は 22 日の 13 時 58 分～15 時 52 分に行ったもので、15 時の高度 300 m でのパイボールによる風速が図に書き込まれている。また領域内にある主な高煙源を×印で示す。新居浜では朝 10 時頃から高度 300～400 m まで、弱い海風が吹いていた。このため汚染質は燧灘の四国側沿岸に止まっているように見える。燧灘中央を東西に横切る線上では NO_x 濃度はかなり低く、四国側の NO_x は山陽側へ輸送されているようには認められない。

図 4.29 は同時に測定された O_3 濃度である。 NO_x 濃度の分布とは異なって、 O_3 濃度は領域全体にはほぼ一様に広がった分布をしている。ただ、燧灘南西部でやや濃度が高い。図 4.27 で示したように高度 800 m 以上ではかなり低濃度なので、この O_3 は瀬戸内周辺で排出された一次汚染質に原因があると考えてよいであろう。それにもかかわらず、 NO_x と O_3 の分布の特徴が異なるのは反応が関係しているためであると考えられる。 NO_x が反応によって消滅する時間程度の短い時間スケールでは、四国側から排出された汚染質は燧灘の四国側領域内で、ある程度発生源との対応がつくようなプルーム状、あるいはパフ状に存在している。これに対して O_3 濃度は、発生

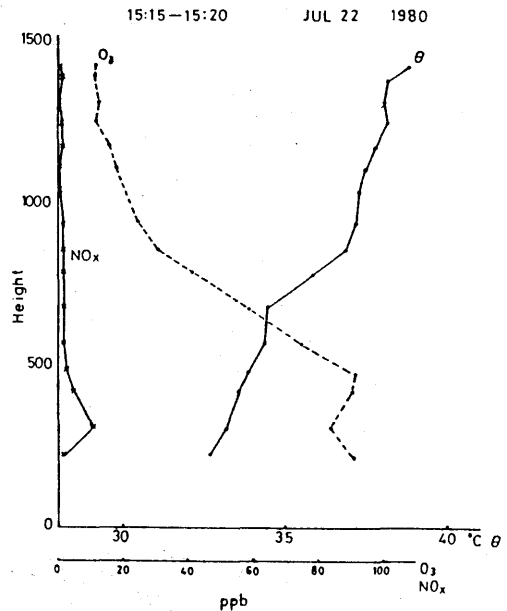


Fig. 4.27 Vertical profiles of potential temperature and concentrations of NO_x and O_3 observed in flight 13 (July 1980).

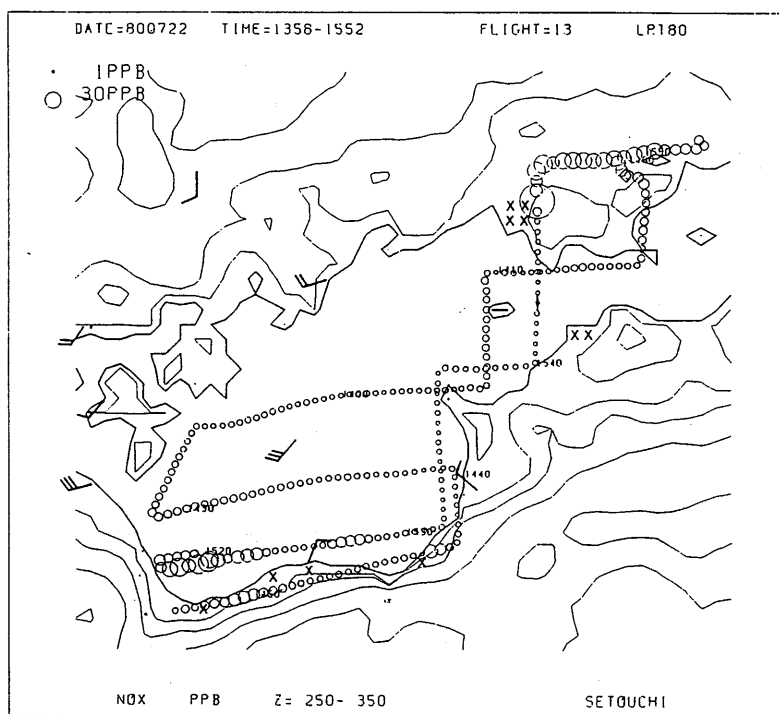


Fig. 4.28 An example of horizontal distribution of observed NO_x concentration. Flight 13, on 22 July 1980. Wind arrows indicate observed wind velocity at the level of 300 m.

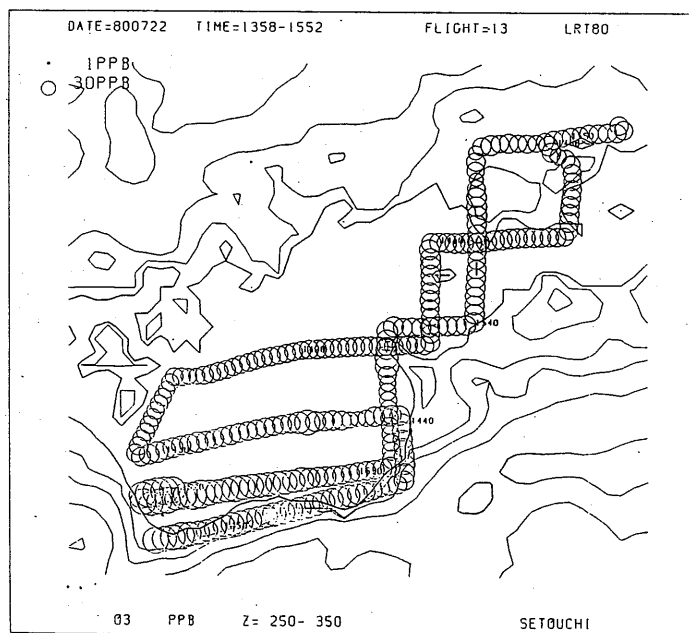


Fig. 4.29 Horizontal distribution of O₃ concentration observed at the same time as in Fig. 4.28.

源との対応がほとんどつかないほど燧灘全域に拡散している。これは O_3 の寿命が長く、 NO_x よりもう少し長い時間スケールの移流・拡散とかかわっているためと考えられる。

4.5 81年観測概要

81年度は航空機に大気汚染測定装置（ NO 計、 NO_x 計、 O_3 計）、白金抵抗温度計、露点計、 $Ly-\alpha$ 湿度計、赤外放射温度計、上向・下向日射計、パーティクルカウンター、ビデオカメラを搭載して表 4.16に示す時間に合計 8 回の観測飛行を行った。

81年度の観測では前年度と同様、燧灘での汚染濃度の水平分布の測定のほか汚染の鉛直構造をより明らかにするため、鉛直分布の測定回数を大幅に増やし、より高い高度まで測定した。図 4.30の上段に、代表的な飛行コースを示す。図に示されているように、基地を大阪府八尾空港におき、燧灘・大阪間を毎回同じ経路で往復し、経路の途中でも汚染濃度と上向き下向きの短波放射、地表面温度の日変化を測定した。これらの量は局地風のエネルギー源である顕熱フラックスと直接関係しているので、局地風の特徴を調べる上で大変重要である。図の下にはフライト番号13の8月19日の午後到大阪から燧灘へ向かう時に測定された高度、 O_3 、 NO_x 濃度、 $Ly-\alpha$ 湿度計による絶対温度とその r. m. s. (σ_a) および放射温度が示されている。陸上と海上の各測定値の違いが顕著である。図 4.31から図 4.38までには全フライトの飛行コース（上）とその時の主な測定値（下）を示す。図の見方は、4.3節の図 4.21～図 4.26に同じである。

8月20日の早朝のフライトでは、バックグラウンド濃度を測定するため、高知沖の太平洋で鉛直プロファイルを測定した（図 4.34参照）。

Table 4.16 List of observational flights in 1981.

フライト番号	日 付	観 測 開 始 時 刻	終 了 時 刻
1 1	1981年8月19日	04:48	07:36
1 2	"	09:39	12:38
1 3	"	14:37	17:22
2 1	1981年8月20日	04:52	07:40
2 2	"	09:25	12:13
2 3	"	14:29	17:10
3 1	1981年8月21日	04:53	07:31
3 2	"	09:30	11:32

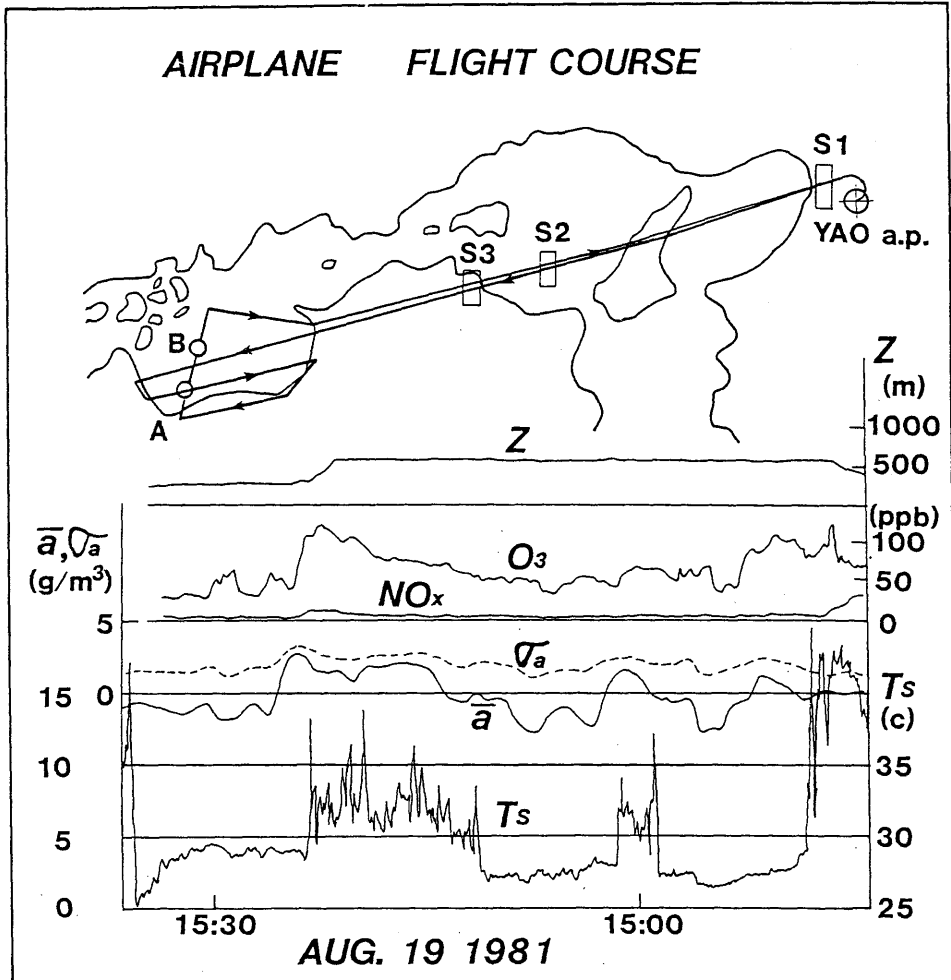


Fig. 4.30 Top: Typical flight course in the observation in 1981. Bottom: Altitude, concentrations of O_3 and NO_x , absolute humidity and its R. M. S. and surface temperature, observed on the course from Osaka to Hiuchi-nada.

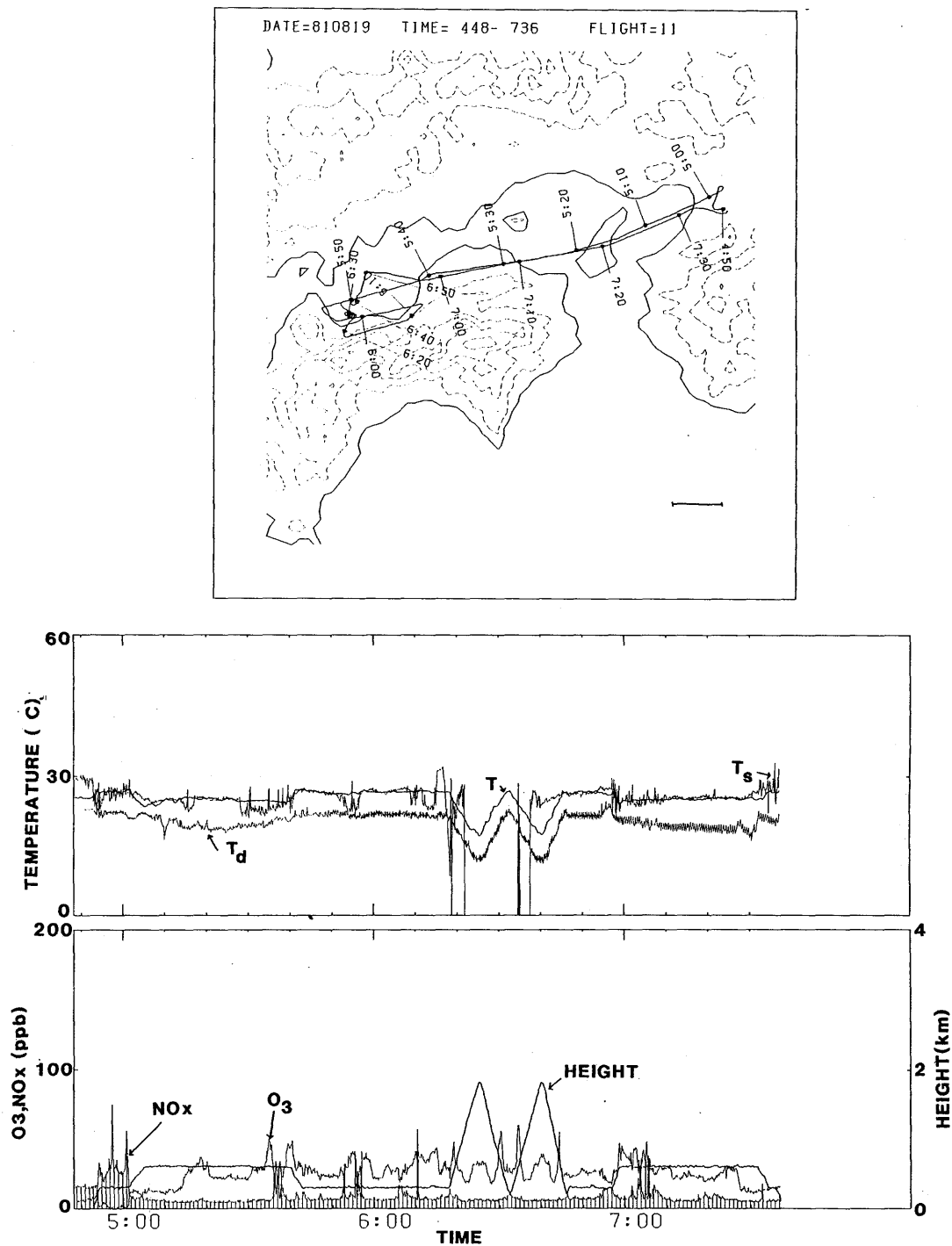


Fig. 4.31 Same as in Fig. 4.21, but flight 11 in 1981.

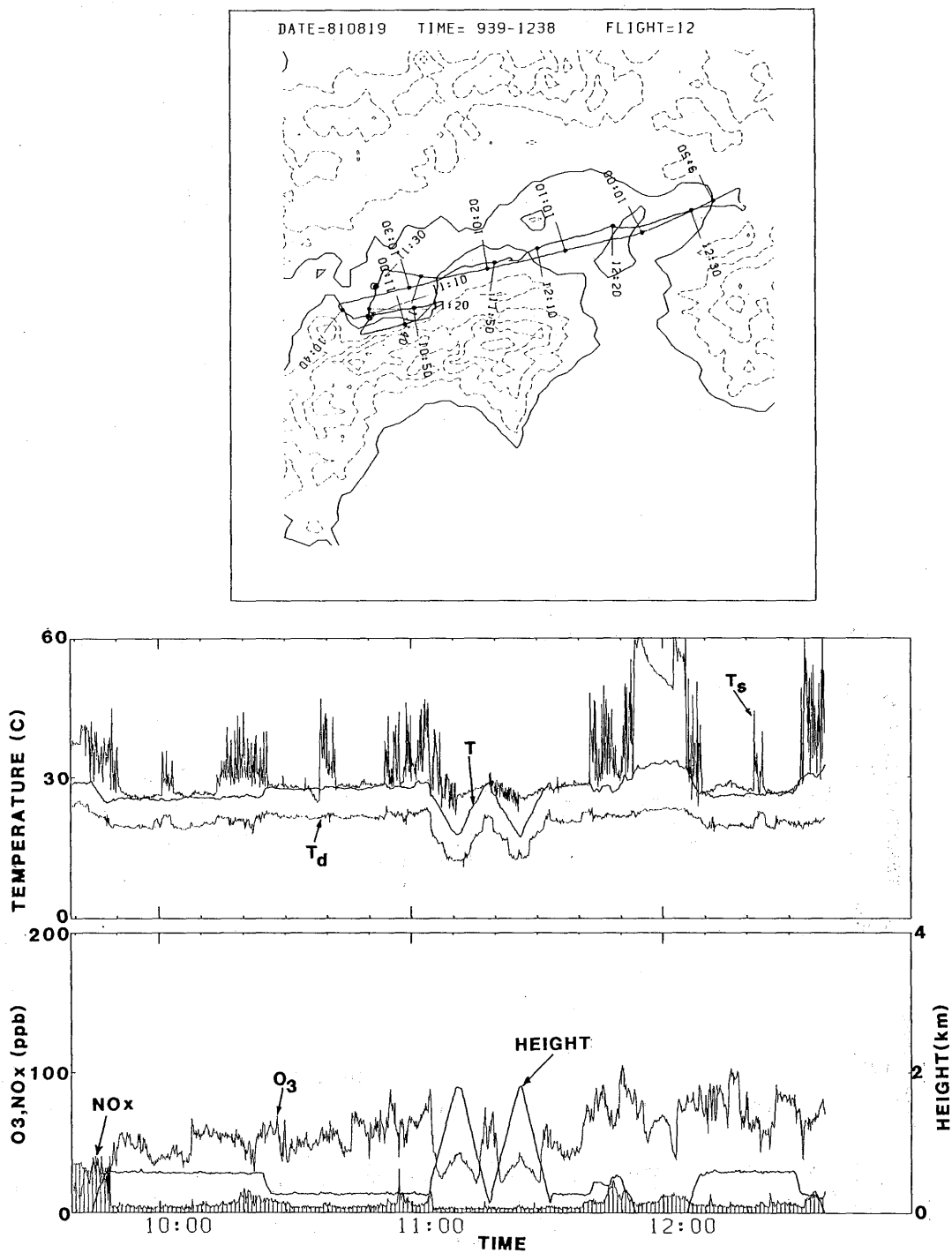


Fig 4.32 Same as in Fig. 4.21, but flight 12 in 1981.

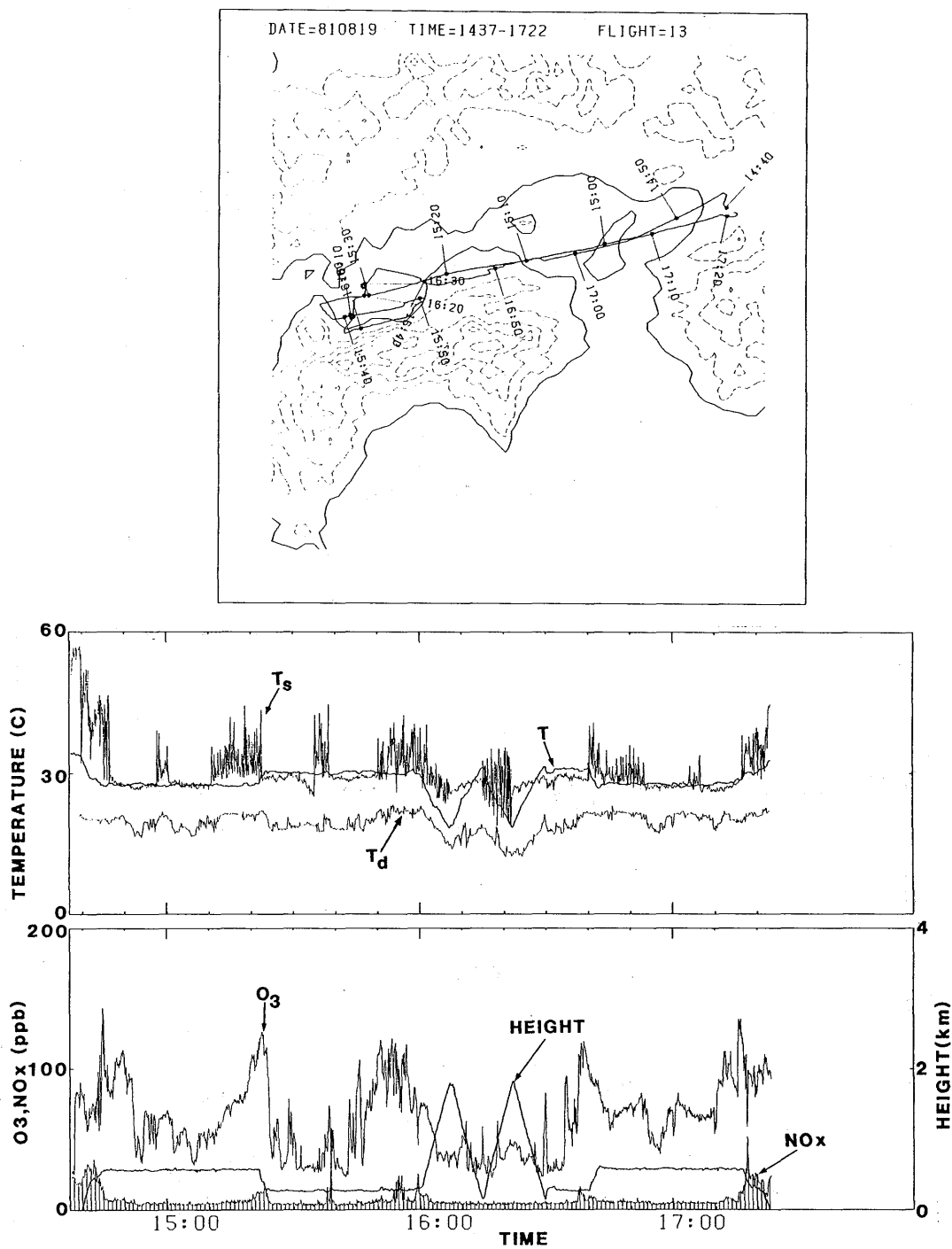


Fig. 4.33 Same as in Fig. 4.21, but flight 13 in 1981.

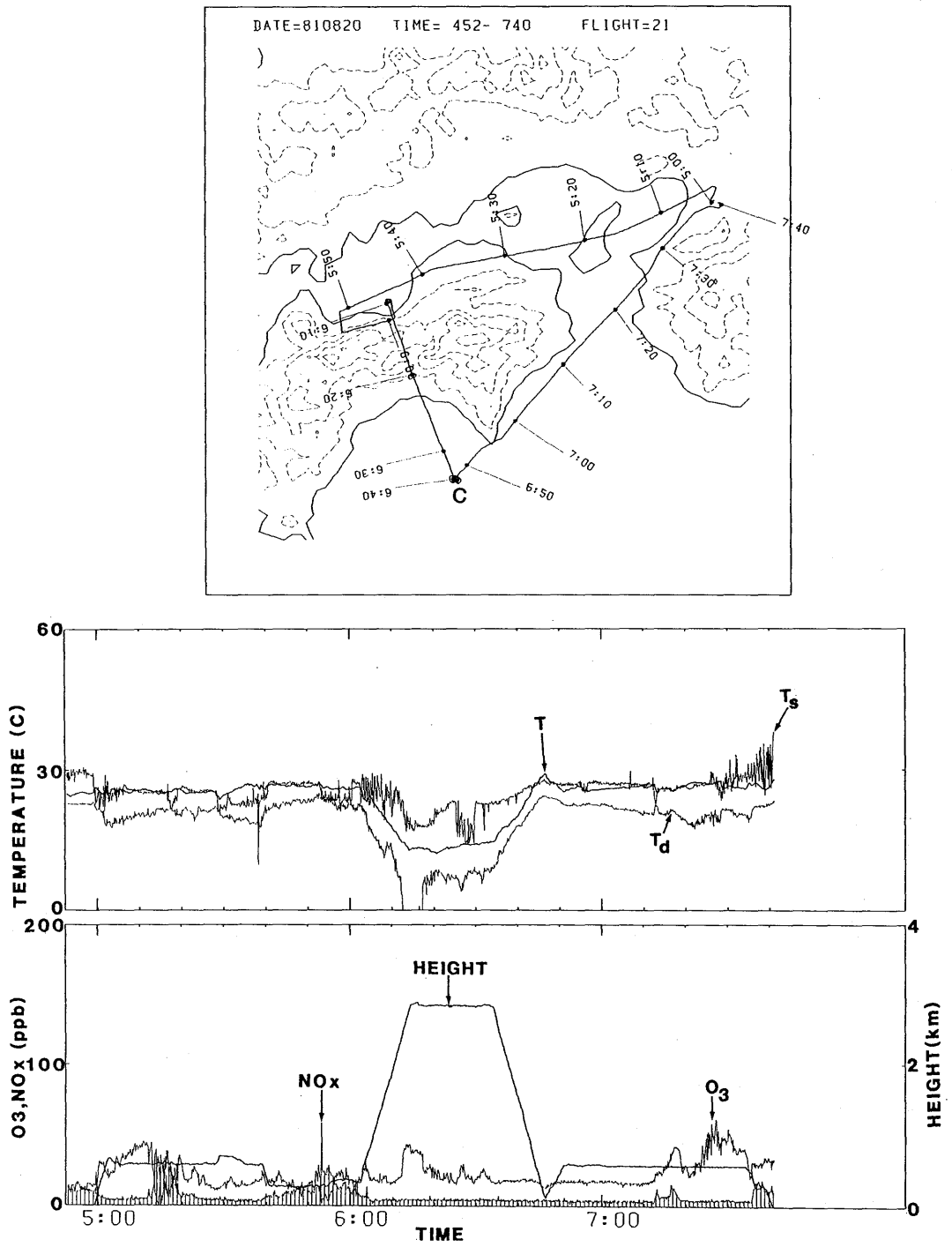


Fig 4.34 Same as in Fig. 4.21, but flight 21 in 1981.

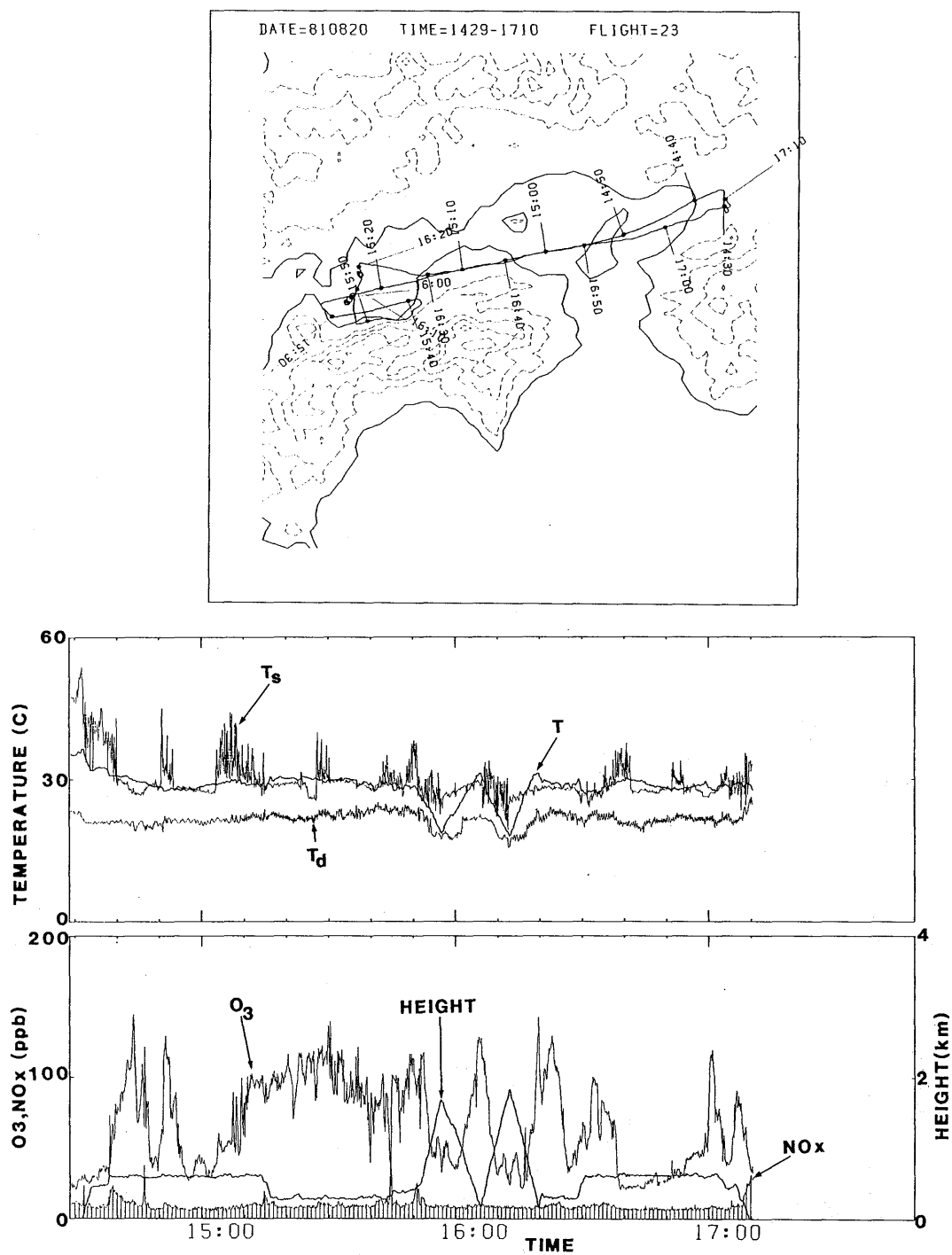


Fig. 4.36 Same as in Fig. 4.21, but flight 23 in 1981.

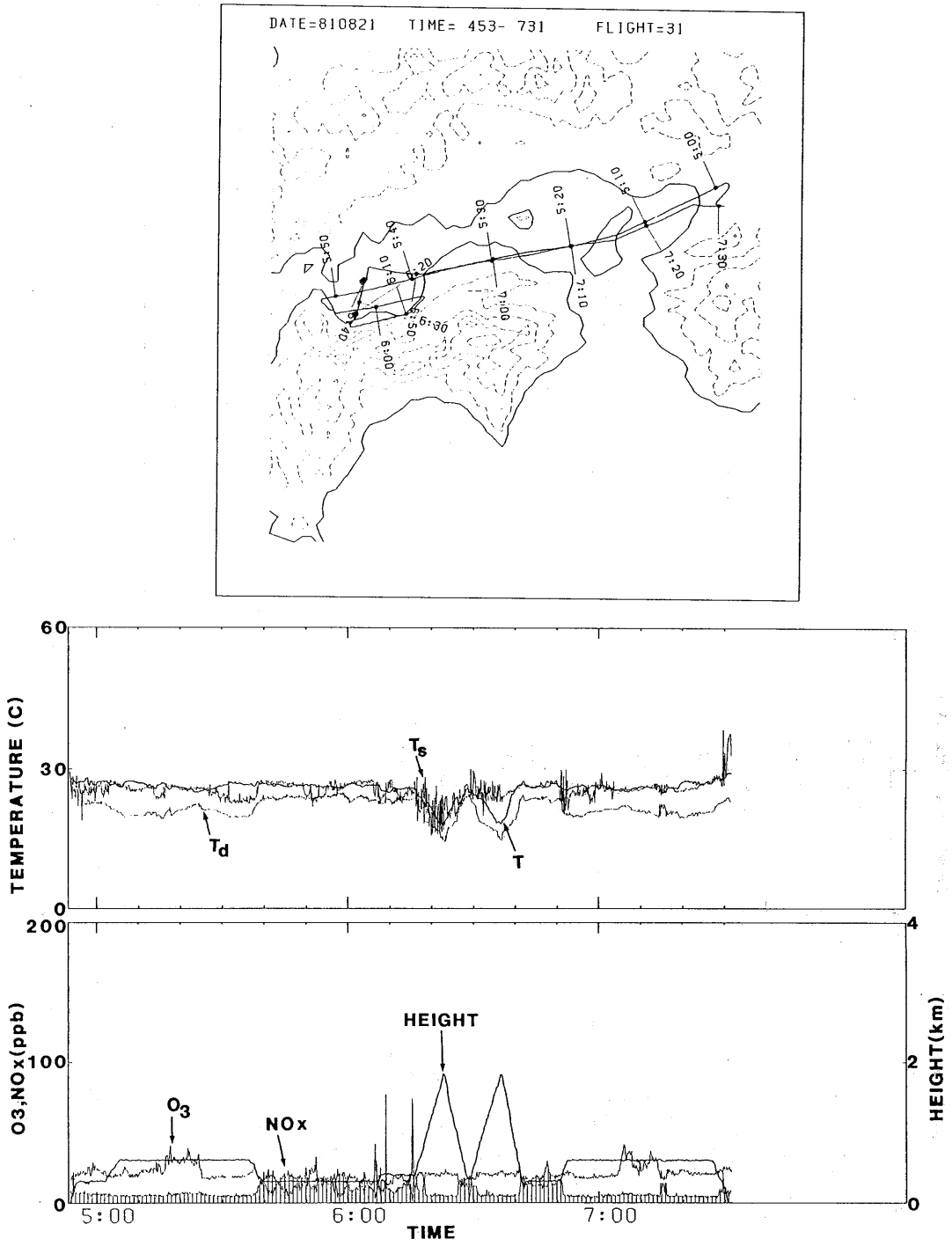


Fig. 4.37 Same as in Fig. 4, Fig. 4.21, but flight 31 in 1981.

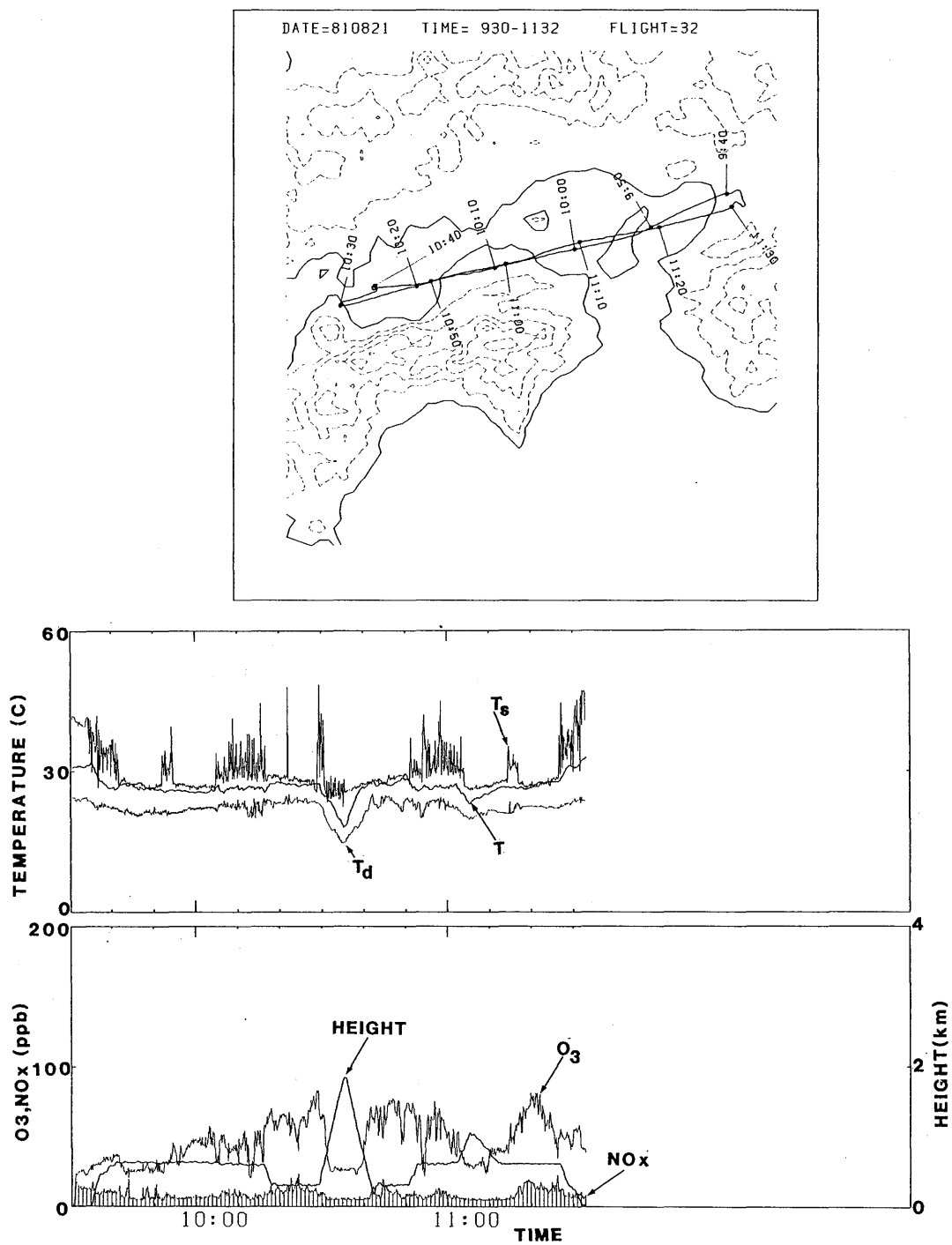


Fig. 4.38 Same as in Fig. 4.21, but flight 32 in 1981.

4.6 81年観測結果の解析と考察

4.6.1. 大気汚染質濃度と温位、混合比の鉛直分布の特徴

図 4.39～4.43にそれぞれフライト番号11、12、13、22、23で図 4.30に A で示す点で測定した各要素の鉛直プロファイルを示す。図には NO_x 、 O_3 濃度、温位 θ 、および露点計と $\text{Ly}-\alpha$ 湿度計で測定された混合比 q が示されている。ただし、図 4.43のフライト番号23では $\text{Ly}-\alpha$ 湿度計での測定は行っていない。露点計と $\text{Ly}-\alpha$ の湿度計による混合比は図 4.39から図 4.42に共通して良く一致しているが、高高度では露点計の方がわずかに高めに測定されている。なお、露点温度や絶対湿度から混合比への換算は標準大気を仮定した。

NO_x 濃度のレベルは常に低く、これから鉛直輸送に関する情報を引き出すことはできそうにない。 O_3 濃度は8月19日の早朝と午前では1000 m付近に最小値があり、上層と下層で高くなっている。一方、8月20日の早朝に土佐沖で測定した O_3 濃度の鉛直分布は高さ200 mから1800 mまではほぼ一様でその濃度は約18 ppbであった(図 4.44)。このことからバックグラウンド濃度は一応18 ppb程度と考えることができる。19日の早朝には、全測定高度にわたって O_3 濃度は明らかにこれより高く、特に500 m付近と1500 m以上では顕著である。また日射量が非常に弱いことから考えて、この O_3 は前日に作られた O_3 が残っていた可能性が高い。同じように19日の午前の観測でも、上層に存在する O_3 濃度は前日に排出された汚染質により発生したものと考えられる。しかし、下層の O_3 は19日になってから反応により生成された O_3 の寄与も大きいと見られる。午後になると O_3 濃度の鉛直分布は複雑な形となる。このとき O_3 濃度と混合比の間にははっきりした正の相関が認められる。この現象は翌日の午後(図 4.43)にも顕著に見られる。これは下層の湿った汚染濃度の高い気塊が対流により、1000 m以上の上層へ輸送されていることを示している。鉛直方向への輸送が、どのくらいの高さまで行われているかは、1800 mまでの観測ではつかむことができなかった。8月20日早朝(図 4.42)では上層に前日から残留している O_3 は認められなかった。これは上層風の僅かなちがいのにより、上層の汚染大気が観測域からずれたためと推定される。

4.6.2 地表面温度の日変化

放射温度計による地表面温度の測定は、航空機の高度が高くなると、途中の大気に含まれる水蒸気等の影響により誤差を生じる。上向き下向きの日射の測定にも同様なことが言える。フライト番号22のときに、図 4.30の A B間で3高度において往復し、これらの影響を調べた。図 4.45は上向き、下向き日射、海面温度、およびアルベードの測定高度による依存性を示したものである。また温度のスケールに上向きの矢印で記してあるのは春風丸により、同時刻にほぼ同じ海域で測定された海水温を示す。これは放射温度計による測定値とよく一致している。放射温度計は高度353 m、744 mでの測定では高度144 mでの測定値に比べて、それぞれ0.1℃、0.5℃ほど低く測定されているが、高度による依存性は100 mにつき0.1℃以下にすぎない。また上向き日射は

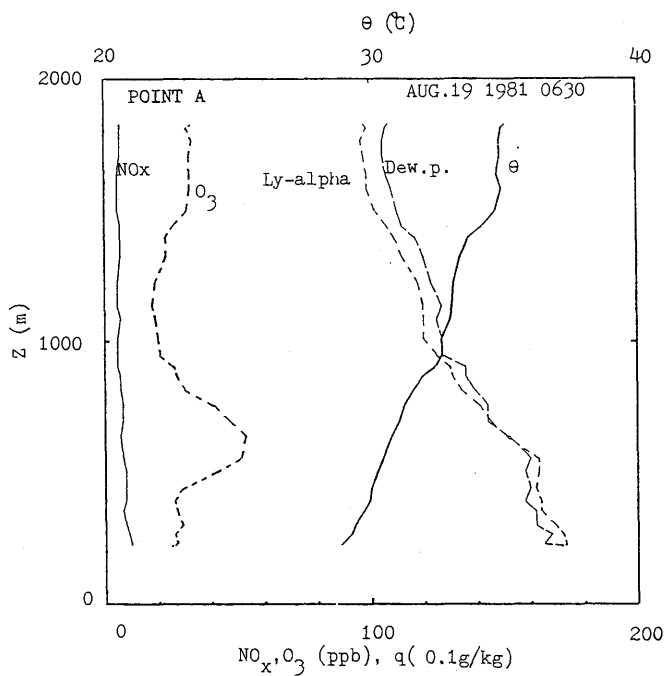


Fig. 4.39 Vertical profiles of concentrations of NO_x and O_3 , potential temperature and mixing ratio by lyman-alpha humidimeter and dew-point temperature observed at the point A in Fig.4.30 about at 0630 JST, 19 Aug. 1981.

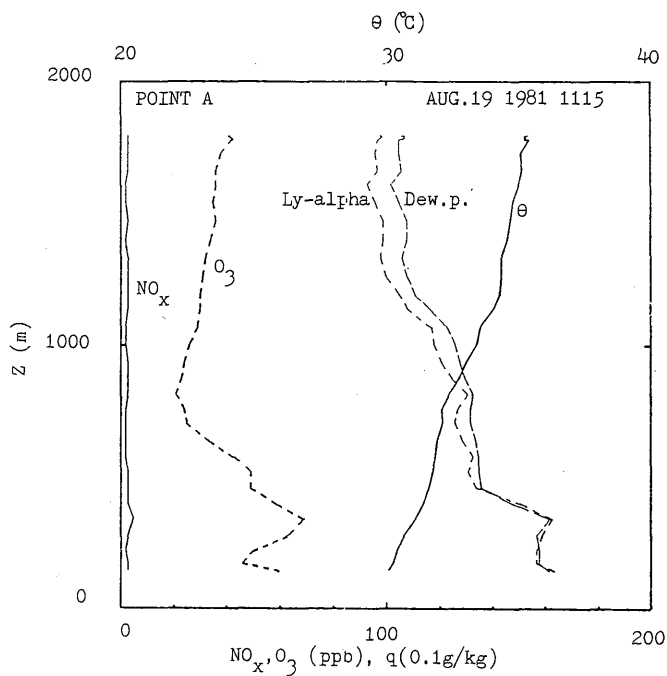


Fig. 4.40 Same as in Fig. 4.39, but about at 1115 JST, 19 Aug.

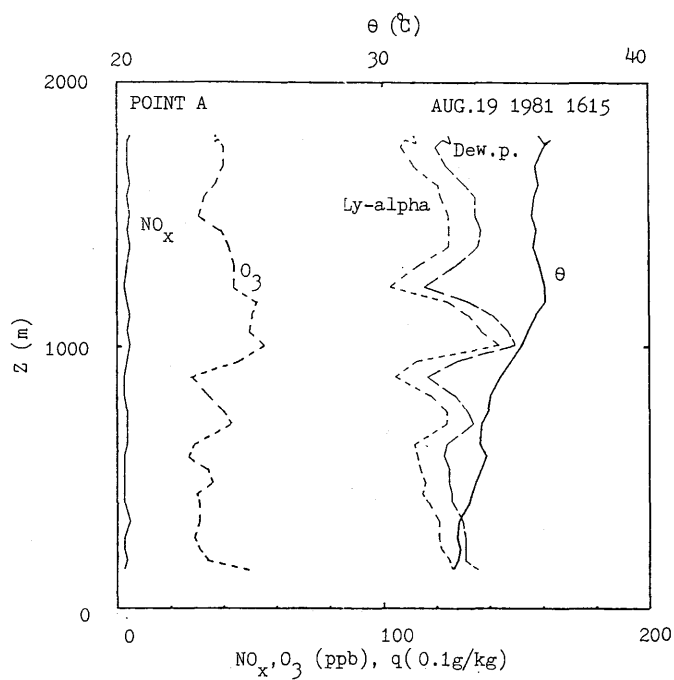


Fig. 4.41 Same as in Fig. 4.39, but about at 1615 JST, 19 Aug.

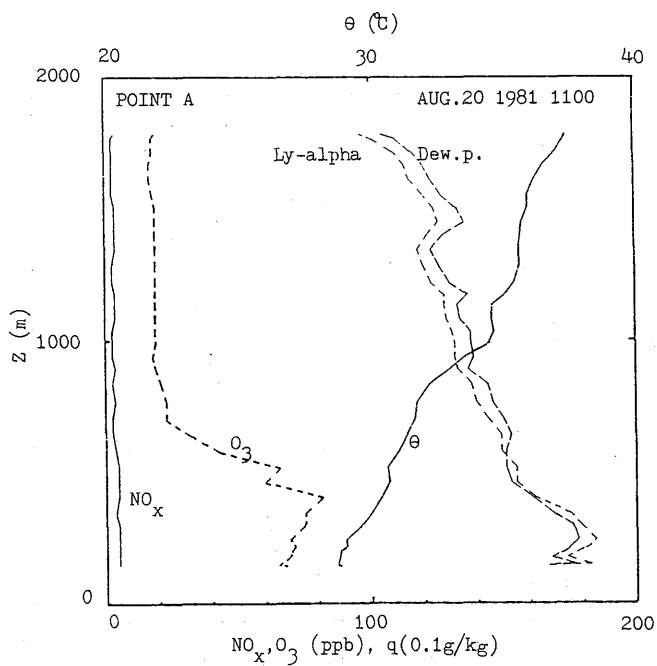


Fig. 4.42 Same as in Fig. 4.39, but about at 1100 JST, 20 Aug.

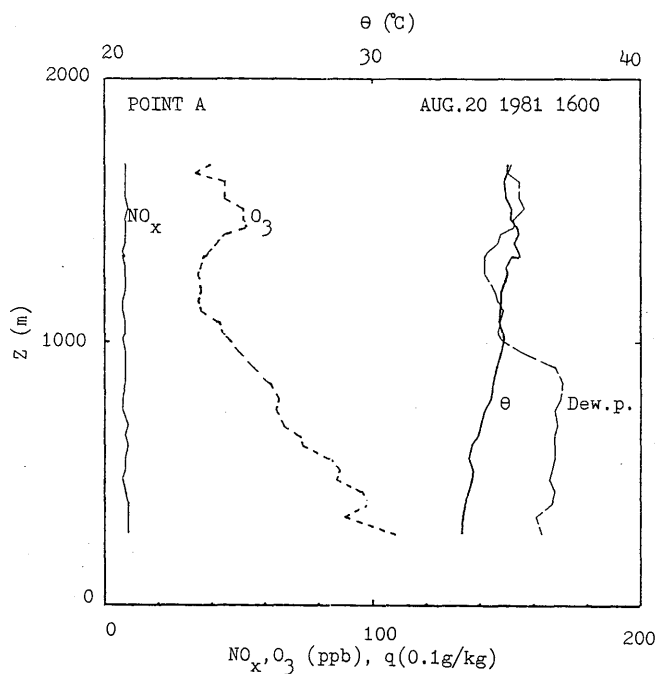


Fig. 4.43 Same as in Fig. 4.39, but about at 1600 JST, 20 Aug.

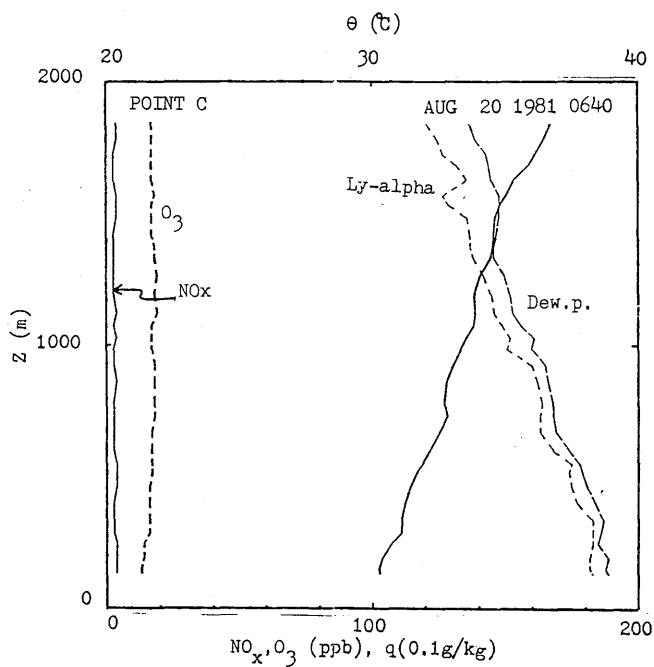


Fig. 4.44 Same as in Fig. 4.39, but about at 0640 JST, 20 Aug. at the point C in Fig. 4.34.

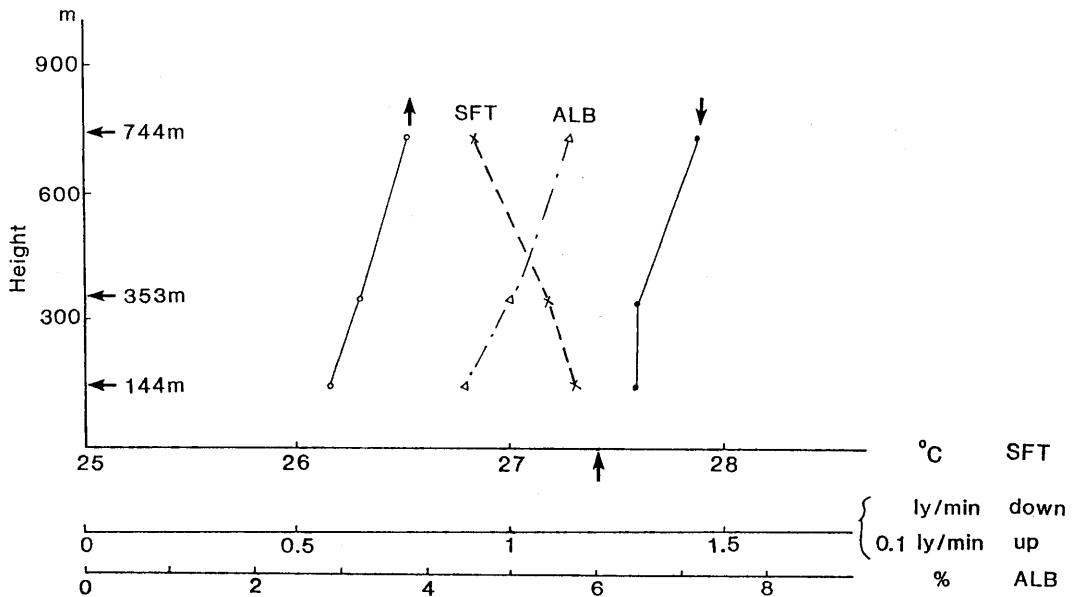


Fig. 4.45 Relationship between altitude and observed value of upward and downward short wave radiation, sea surface temperature and albedo. An arrow directed upward indicates sea water temperature observed by a ship at the same time.

144 mの測定に対し 353 m、744 mではそれぞれ13%、33%大きく測定された。下向き日射もそれぞれ 0.5 %、3.8 %ほど大きく測定された。このためアルベードは 144 mの測定値よりも 353 m、744 mではそれぞれ 0.006、0.015 だけ大きかった。これらの誤差は大気の状態により変化すると考えられるが、測定高度が 800 m以下ではそれほど大きなものではないと言えるので、今後は高度差による誤差は考慮しないものとする。

図 4.46～4.48は地表面温度（上・黒丸）、日射量（下・黒丸）およびアルベード（下・白丸）の観測期間中の時間変化を示す。図 4.46は図 4.30の S 1（大阪市）を通過したときの東西の幅 5 km の領域の平均値を示す。また地表面温度と日射量の標準偏差を誤差棒として示してある。同様に図 4.47は図 4.30の S 2（播磨灘）、図 4.48は S 3（讃岐平野・地目は主に農地）での測定値である。一般に陸上では地表面温度の標準偏差は大きく、また日変化も大きい、海上では標準偏差は非常に小さく、また日変化は大きくても 2～3℃くらいである。大阪市の地面温度は讃岐平野のものより常に高く、また早朝は讃岐平野では海面温度を下廻るのに、大阪市内では下廻ることはない。これは都市効果の影響が表れているものと思われる。アルベードの平均値は讃岐平野で 16.2 %、播磨灘で 9.1 %、大阪で 12.9 %である。高度の補正として 1～2 %を考えても、シミュレーションでの設定値の海上 5 %、陸上 12 %より若干大きめである。

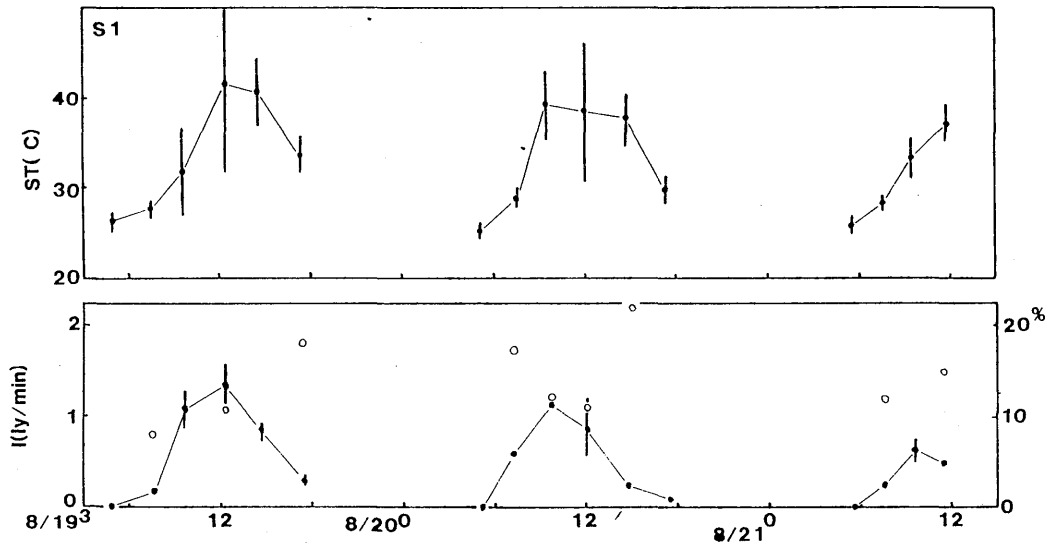


Fig. 4.46 Surface temperature (top, closed circles), short wave radiation (bottom, closed circles) and albedo (bottom, open circles) at S1 in Fig. 4.30. Error bars indicate R. M. S. of surface temperature and short wave radiation.

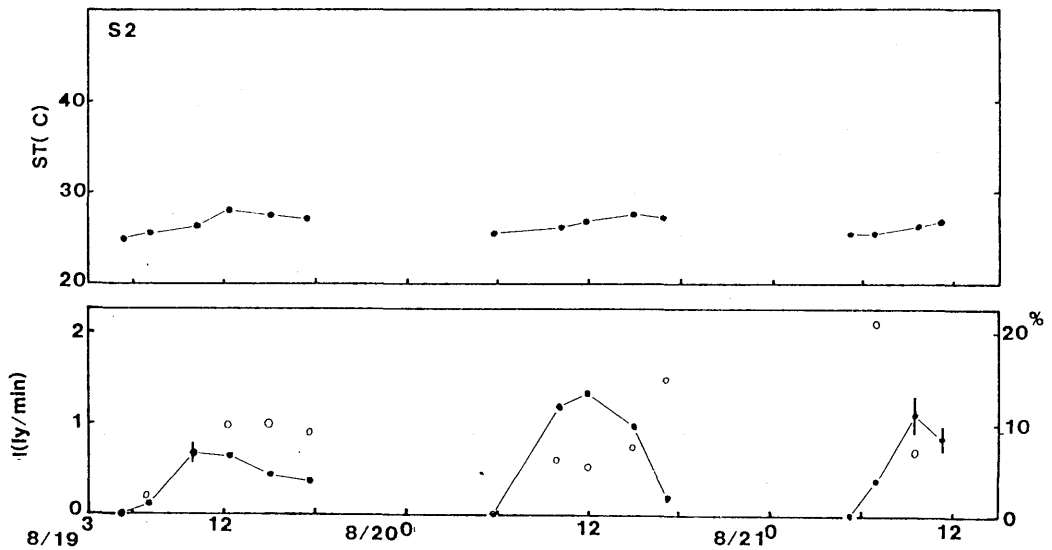


Fig. 4.47 Same as in Fig. 4.46, but at S2.

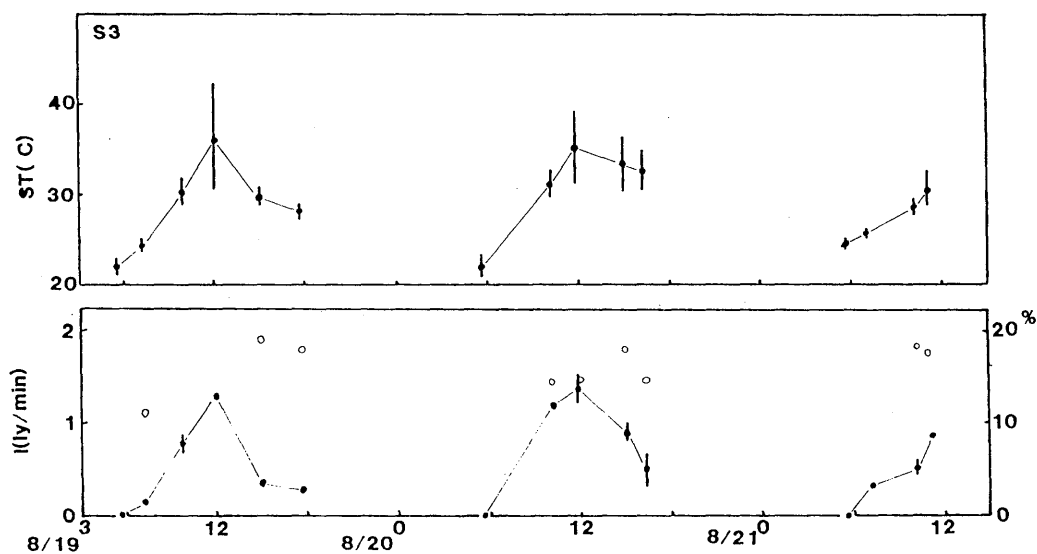


Fig. 4.48 Same as in Fig. 4.46, but at S3.

4.6.3 水蒸気変動量の観測

81年の観測では、カセットデータレコーダー (TEAC R-80) を搭載し、Lyman- α 湿度計による絶対湿度の空間分布を測定し、その R. M. S. ($\sigma_a \equiv \sqrt{\overline{a'^2}}$) を求めた。

このカセットデータレコーダーでは最大90分間のアナログデータを4チャンネル収録する事が可能だが、1フライトが3時間弱あるため、途中でカセットテープを交換して収録を続けた。入力した要素は絶対湿度 a 、地表面温度 T_s 、高度 H の3チャンネルで (表 4.17) 6フライトについてアナログデータを収録し、後にフライト番号12を除く5フライトについて気象研鉄塔付属の GP-1500 データ収録装置を用いて 20 Hz で A/D 変換し、MT に編集した (表 4.18)。

MT FORMAT などの MT 情報については章末にまとめて示したので参照されたい。

各フライトの初めと終わりに収録した CAL データ (-1, 0, 1 ボルト) から求めた ZERO、

Table 4.17 Elements inputted into the cassette data recorder (TEAC R-80).

CH	要素	測器
1	絶対湿度 a	Ly- α 湿度計 Model BLR
2	地表面温度 T_s	放射温度計 ER-2007
3	高度 H	気圧高度計
4	ノイズ補償	

SPANなどCALIBRATIONに関する数値(表 4.19)を用いて章末に示した交換式により物理量に交換した。

図 4.49(a),(b) はその解析例で、燧灘への往復経路における絶対湿度 $\bar{a}$ 、 σ_a 、地表面温度 T_s 、飛行高度 H を示している。ここで σ_a などの計算に用いた平均は、1 分の移動平均値である。

8月19日(A13)の例で明らかなように、陸上で絶対湿度が高く、 σ_a も大きい。反対に海上では絶対湿度は低く、 σ_a も小さい。これは日中陸上に発達している混合層によるものと考えられる。

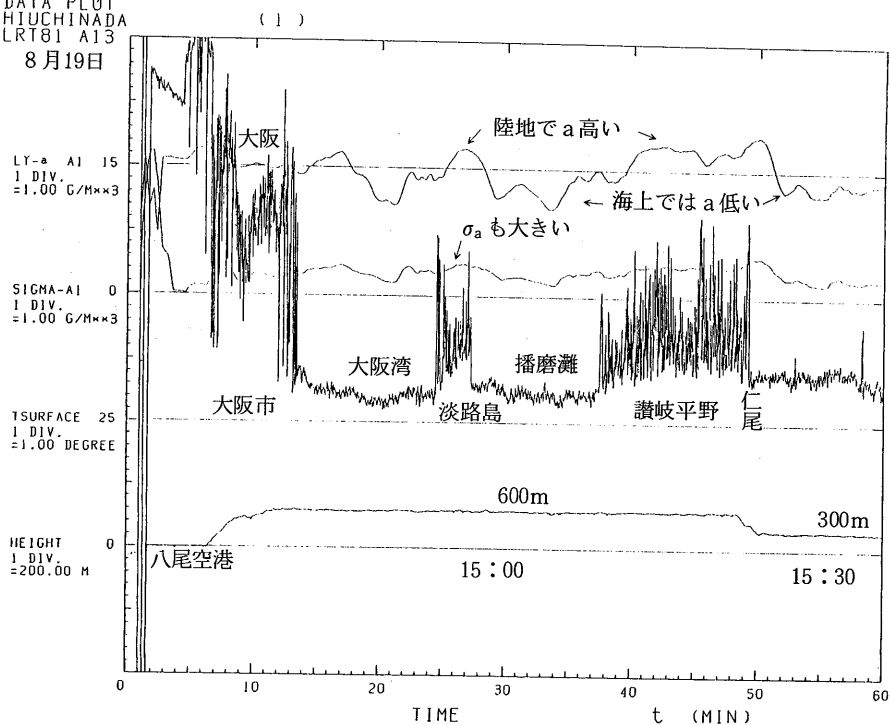
Table 4.18 List of flights for the measurement of moisture fluctuation and MT data-set names.

フライト NO.	CMT NO.	MT DS Name
# 11	1	MT. LRT. A 1 1 1
	2	MT. LRT. A 1 1 2
12	3	
	4	
13	5	MT. LRT. A 1 3 1
	6	MT. LRT. A 1 3 2
21	7	MT. LRT. A 2 1 0
22	8	MT. LRT. A 2 2 1
	9	MT. LRT. A 2 2 2
31	10	MT. LRT. A 3 1 0

Table 4.19 Calibration parameters (in volts except for H_{span} in meters).

フライト		A 11	A 13	A 21	A 22	A 31
1 CH a	ZERO	-0.003	-0.003	-0.009	-0.005	-0.007
	SPAN	0.999	1.005	1.003	1.000	1.003
2 CH T_s	ZERO	0.017	0.017	0.012	0.015	0.013
	SPAN	1.017	1.022	1.022	1.019	1.021
3 CH H	ZERO	0.009	0.009	0.003	0.008	0.006
	SPAN	1.009	1.018	1.013	1.010	1.013
H 補正	$V_z = 0$	0.02973	0.03929	0.03650	0.03267	0.03356
	H_{SPAN}	2983	3069	3030	3035	3010

DATA PLOT
HIUCHINADA
LRT81 A13
8月19日



DATA PLOT
HIUCHINADA
LRT81 A13
8月19日

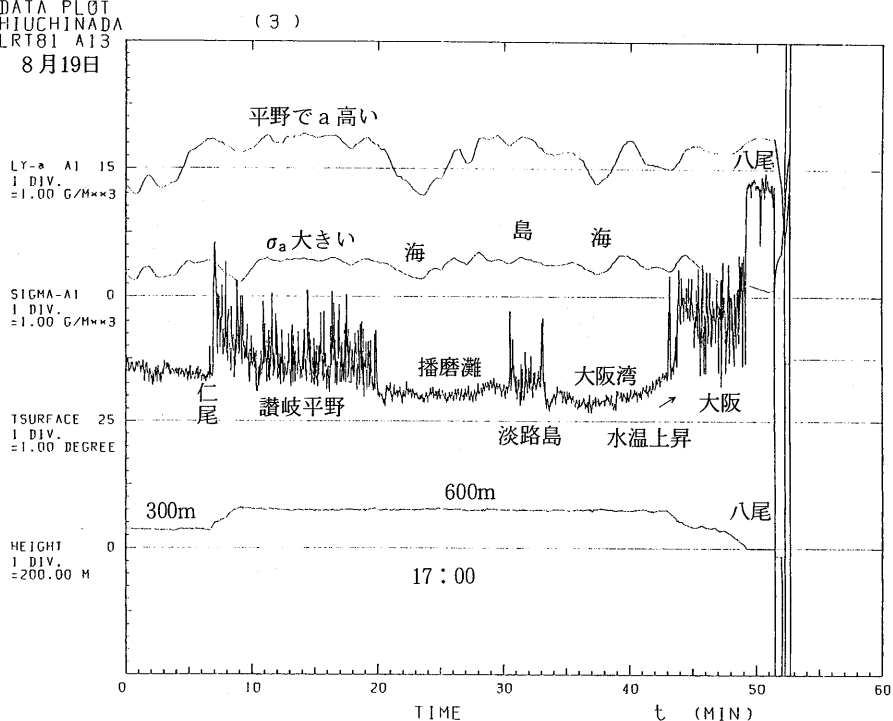
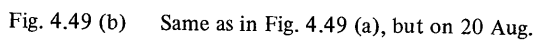


Fig. 4.49 (a) Variance of moisture, surface temperature and altitude on the course between Huichi-nada and Osaka on 19 Aug. 1981.

8月20日



東風が約 2 m/s (図 2.6) と弱い 8 月 19 日の例では明瞭ではないが、東風が約 6 m/s (図 7.22(c)、7.24(c)) と強い 8 月 20 日の例では、強い東風のために、内部境界層が発達して、海、陸に対応する領域が西側にシフトしているのが特徴である。

4.6.4 エーロゾルの観測

図 4.50 に 19 日の 15 時 20 分ごろの高さ 600 m で測定されたエーロゾル濃度(直径 $0.3\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$) の水平分布を示す。エーロゾルは陸上で多く海上では極めて少ない。図 4.51 には同日 16 時ごろ測定された燧灘上空でのエーロゾル濃度の鉛直分布を示す。高さ 1600 m くらいまでは比較的高い濃度であることが分かる。本年の観測ではエーロゾル濃度は 30 秒以上の長い時間の平均濃度しか得られなかったもので、分布の詳細については言及できないが、エーロゾル濃度は汚染の指標として有効な情報を与えてくれるものと期待できる。

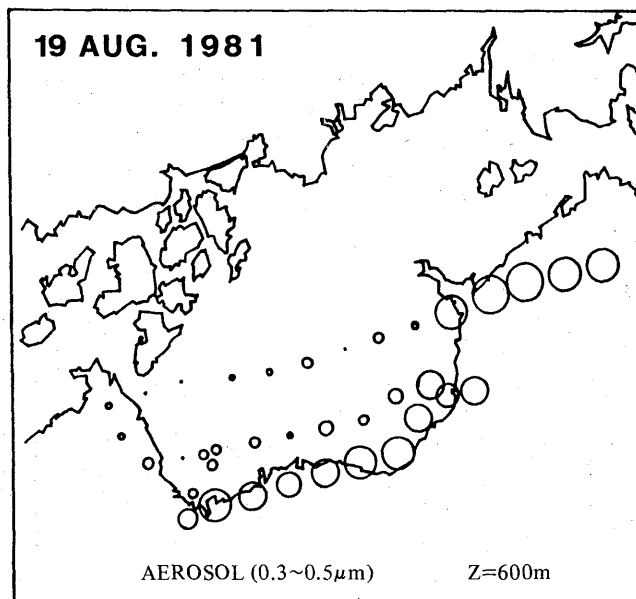


Fig. 4.50 Concentration of particles observed in the afternoon on 19 Aug. 1981.

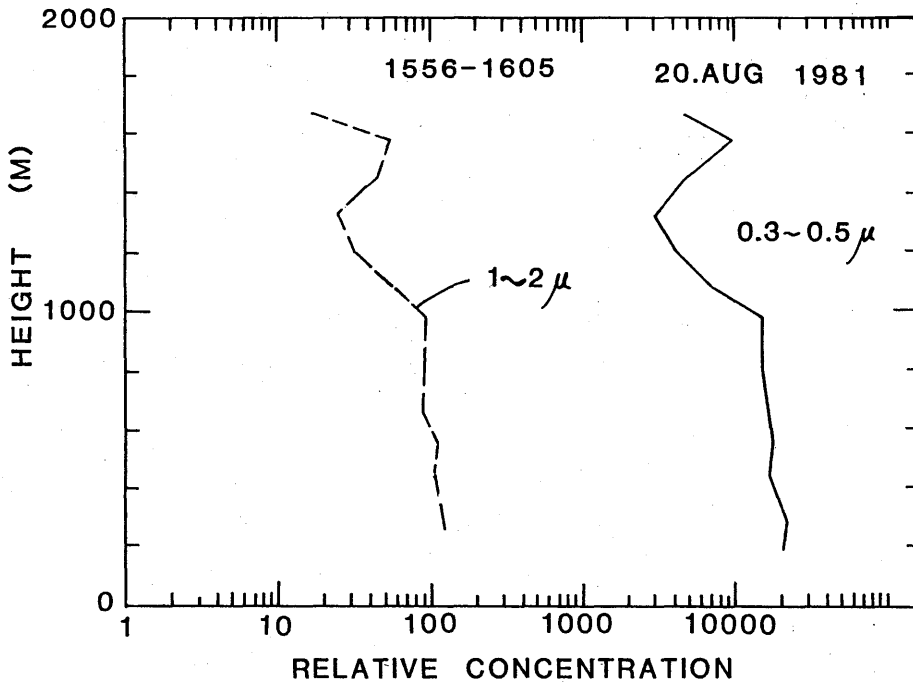


Fig. 4.51 Vertical profiles of concentration of particles.

4.7 82年観測概要

80年、81年の観測で、燧灘では汚染大気は1800m以上の上空まで輸送されていることが明らかになった。このような強い鉛直輸送は海陸風や山谷風によって行われると考えられる。そこで82年は高知空港を基地に図4.52に示す直線ABを図4.53に一例が示されているように飛行して、気象要素と汚染濃度の鉛直分布を測定し、局地風による汚染大気の輸送をより詳細に調べた。搭載測器は白金抵抗温度計、Ly- α 湿度計、上向き、下向き日射計、上向き、下向き長波長放射計、赤外放射温度計、パーティクル・カウンター、大気汚染測定装置(NO計、NO_x計、O₃計)およびビデオカメラである。パーティクル・カウンターはプリンターによる記録のほか、カウ

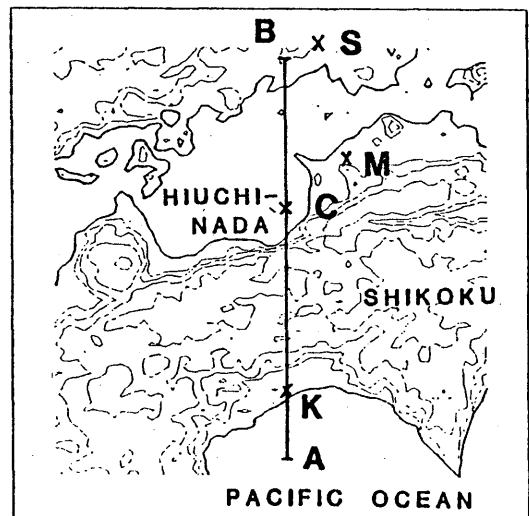


Fig. 4.52 Flight course of aircraft observation. Period: 27-29 July 1982. S, K and M indicate upper layer wind observation points, Sohja, Manno and Kohchi, respectively.

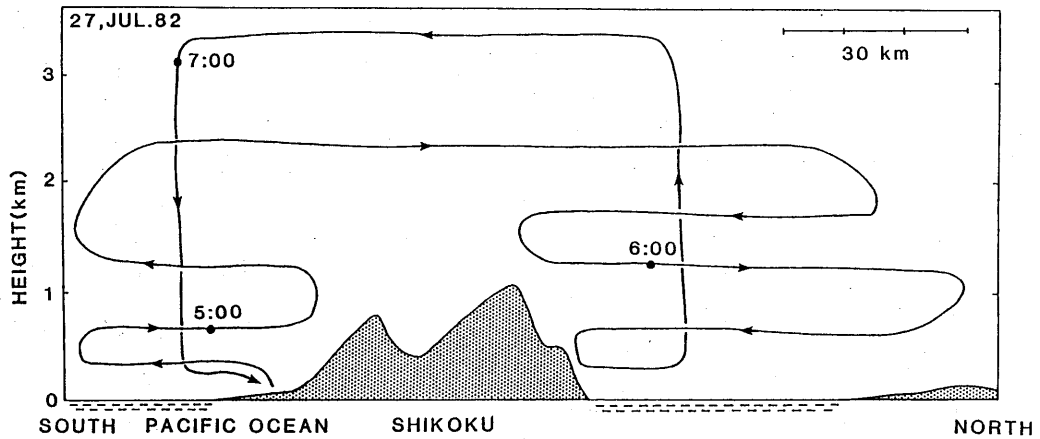


Fig. 4.53 A side view of the flight course.

ント・パルスの頻度を電圧に直接変換する装置を使って、他のデータと同じようにデータ収録装置に記録した。これにより約3秒平均の粒子濃度を得た。

表 4.20に示す時間に合計8回の観測を行った。図 4.54から図 4.61までに各フライトのコース(上左)とその時の側面図(上右)、下段に主な測定値を示す。

Table 4.20 List of observational flights in 1982.

フライト番号	日 付	観測開始時刻	終了時刻
11	1982年7月27日	04:47	07:16
12	"	10:26	12:34
13	"	16:53	19:14
21	1982年7月28日	10:32	12:49
31	1982年7月29日	04:56	07:30
32	"	09:59	12:15
33	"	13:53	16:19
34	"	17:12	19:11

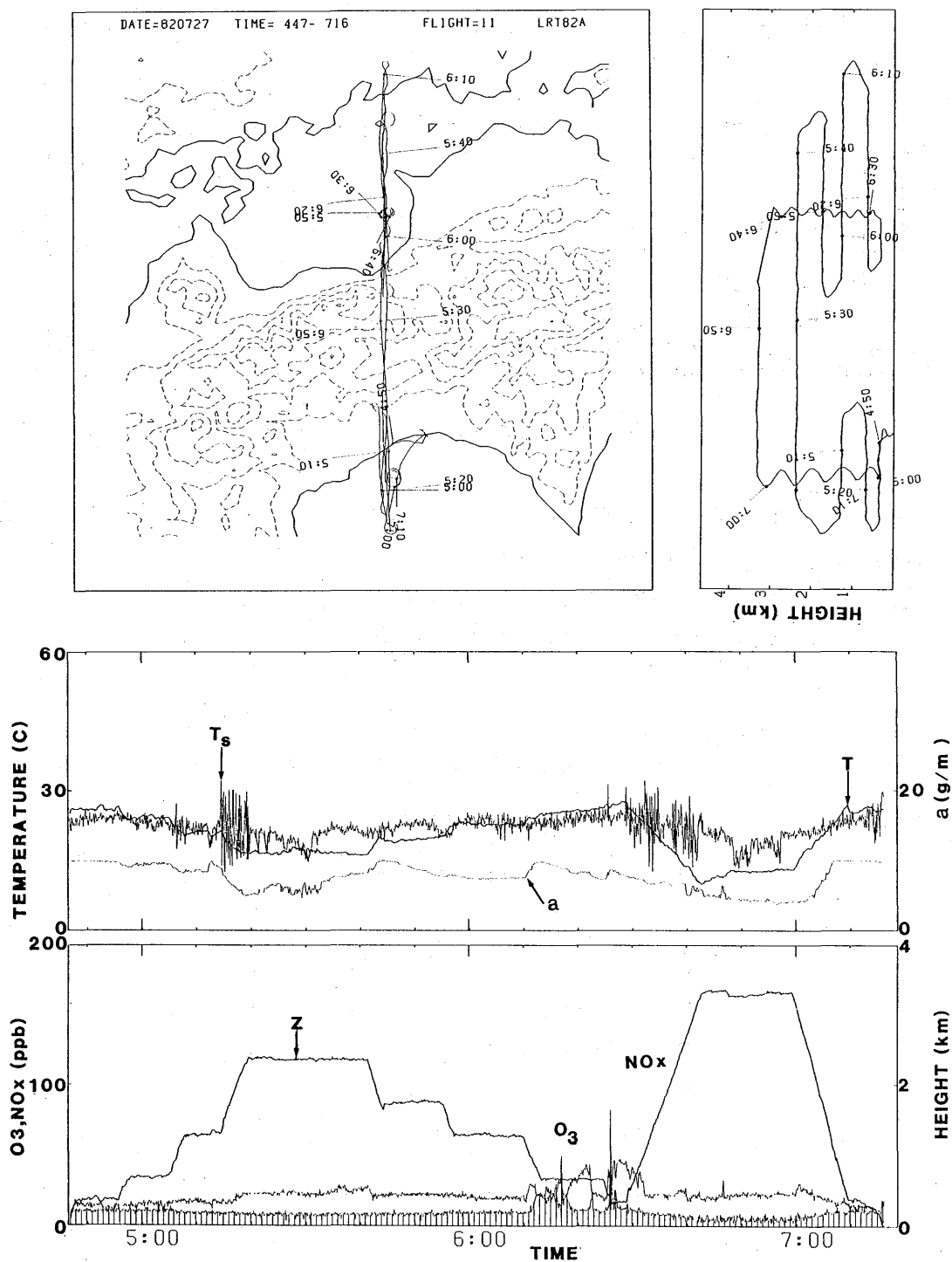


Fig. 4.54 Flight course and time (top left), a side view of the course (top right) and examples of observed data (bottom two boxes), flight 11, in July 1982.

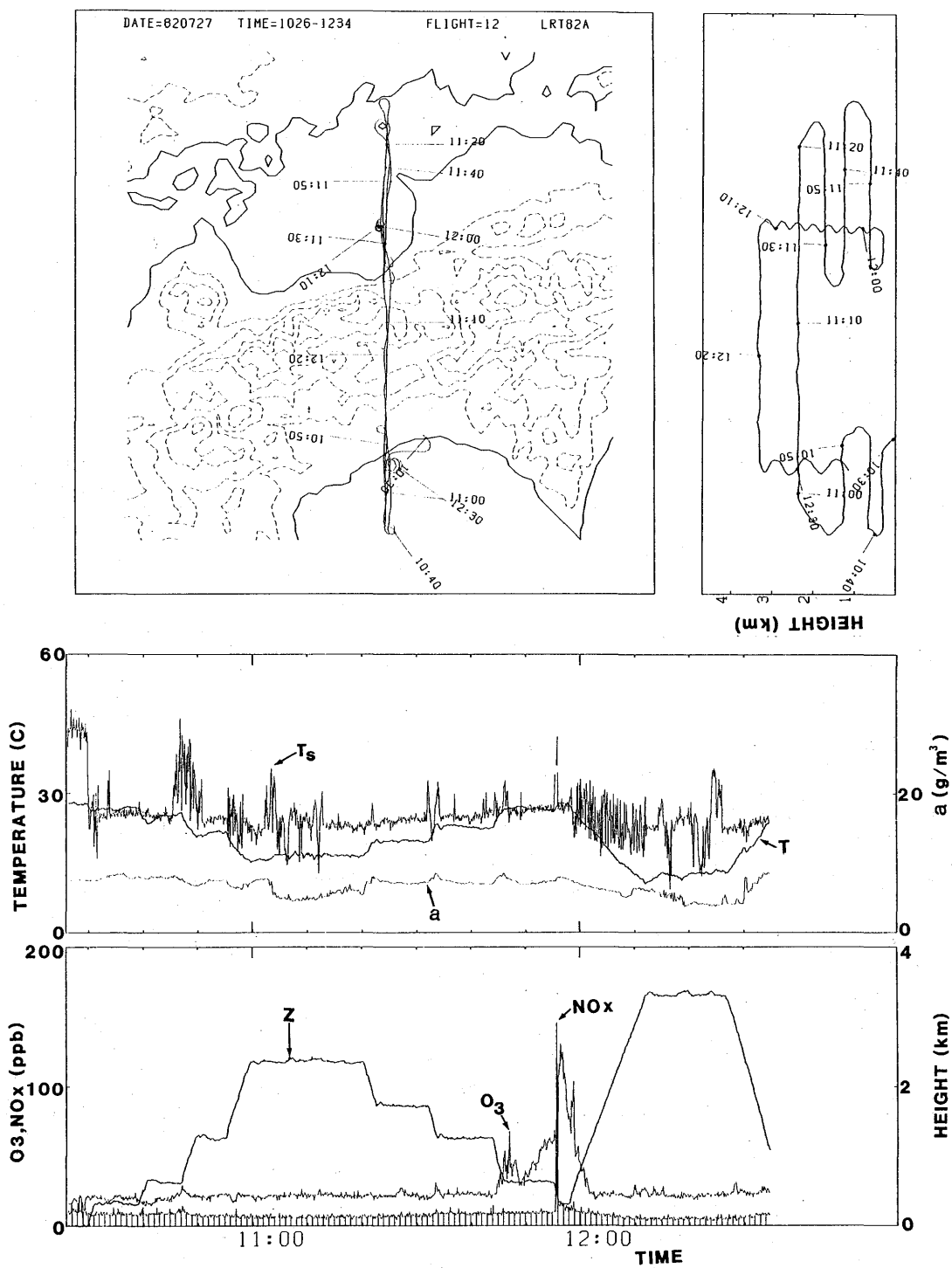


Fig. 4.55 Same as in Fig. 4.54, but flight 12.

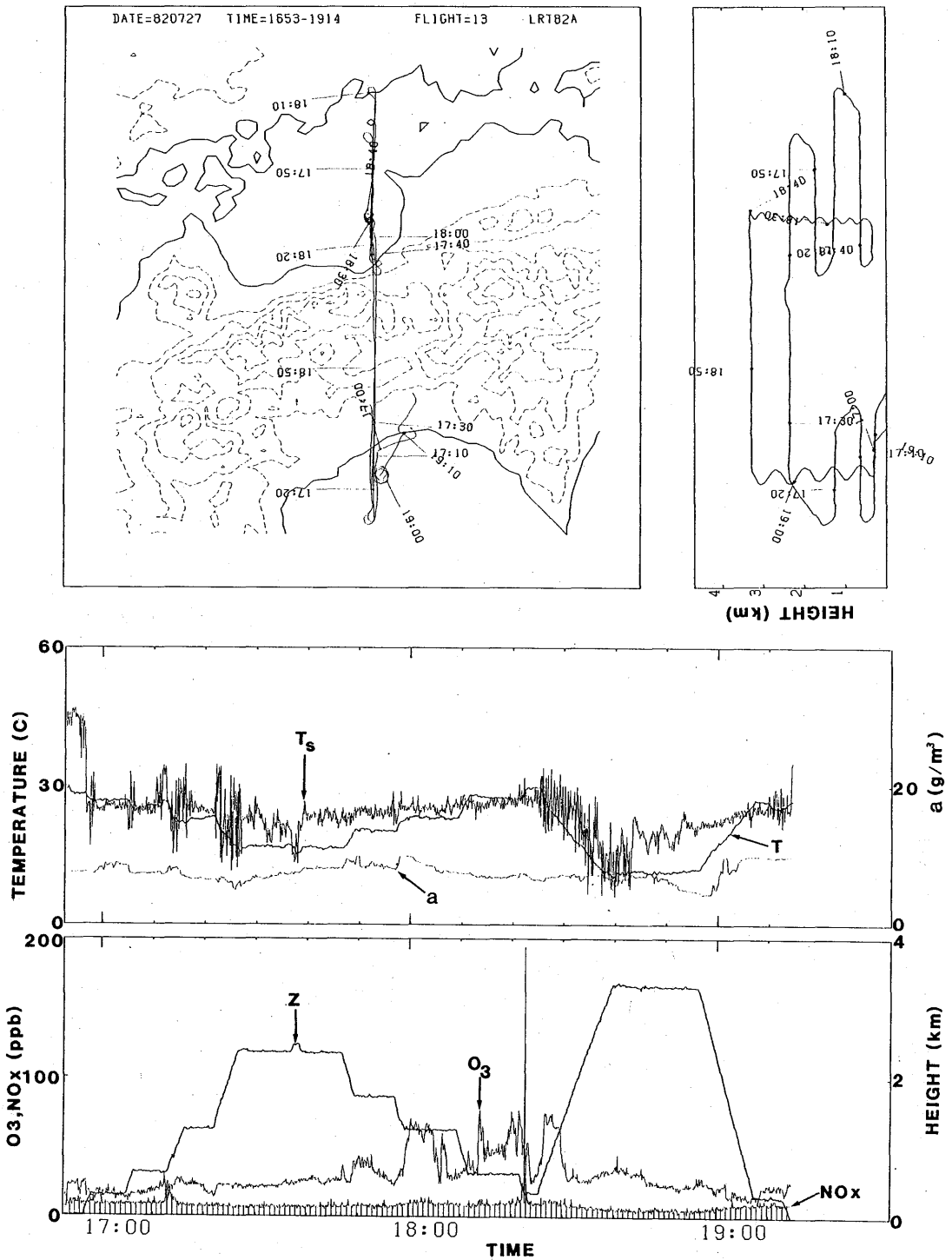


Fig. 4.56 Same as in Fig. 4.54, but flight 13.

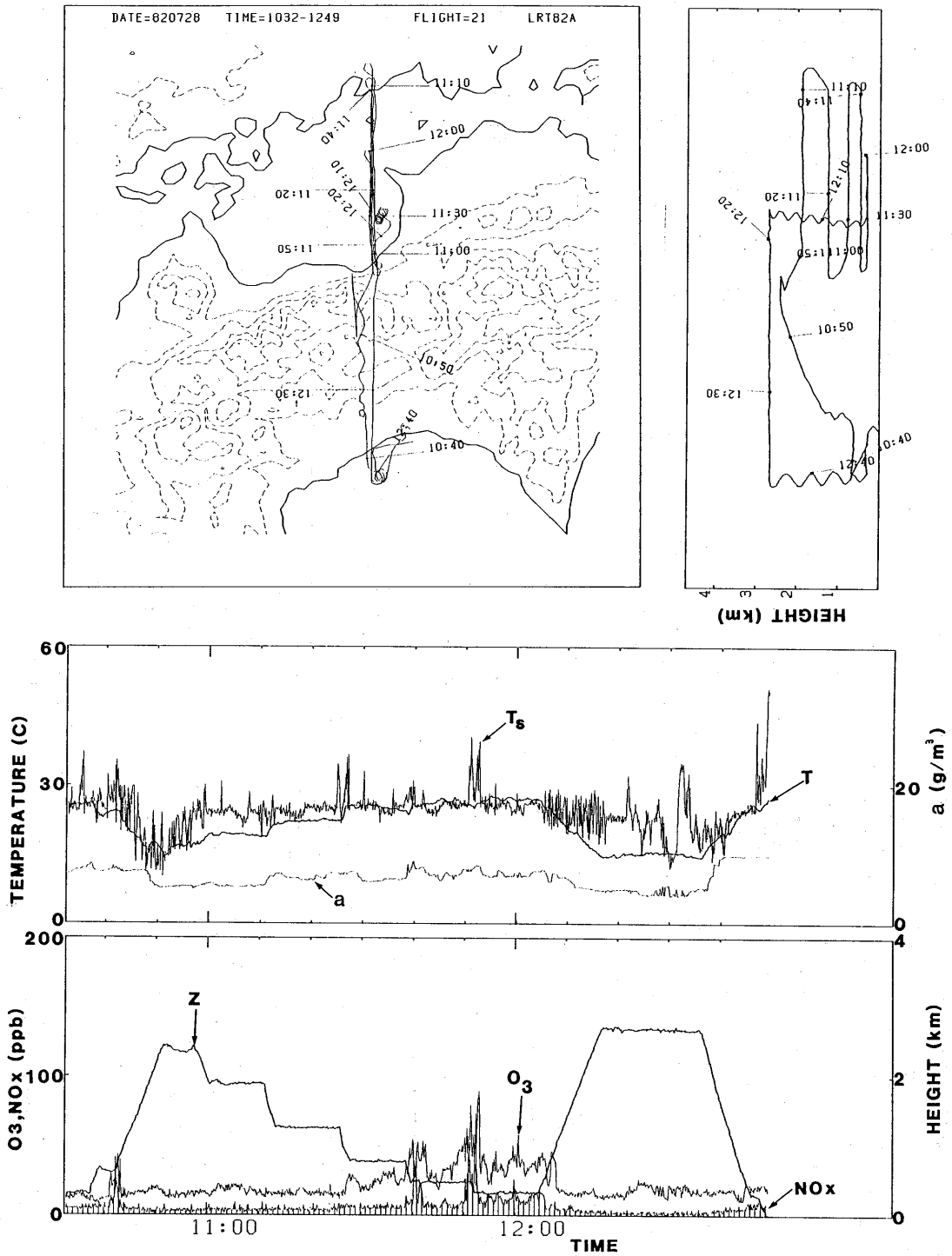


Fig. 4.57 Same as in Fig. 4.54, but flight 21.

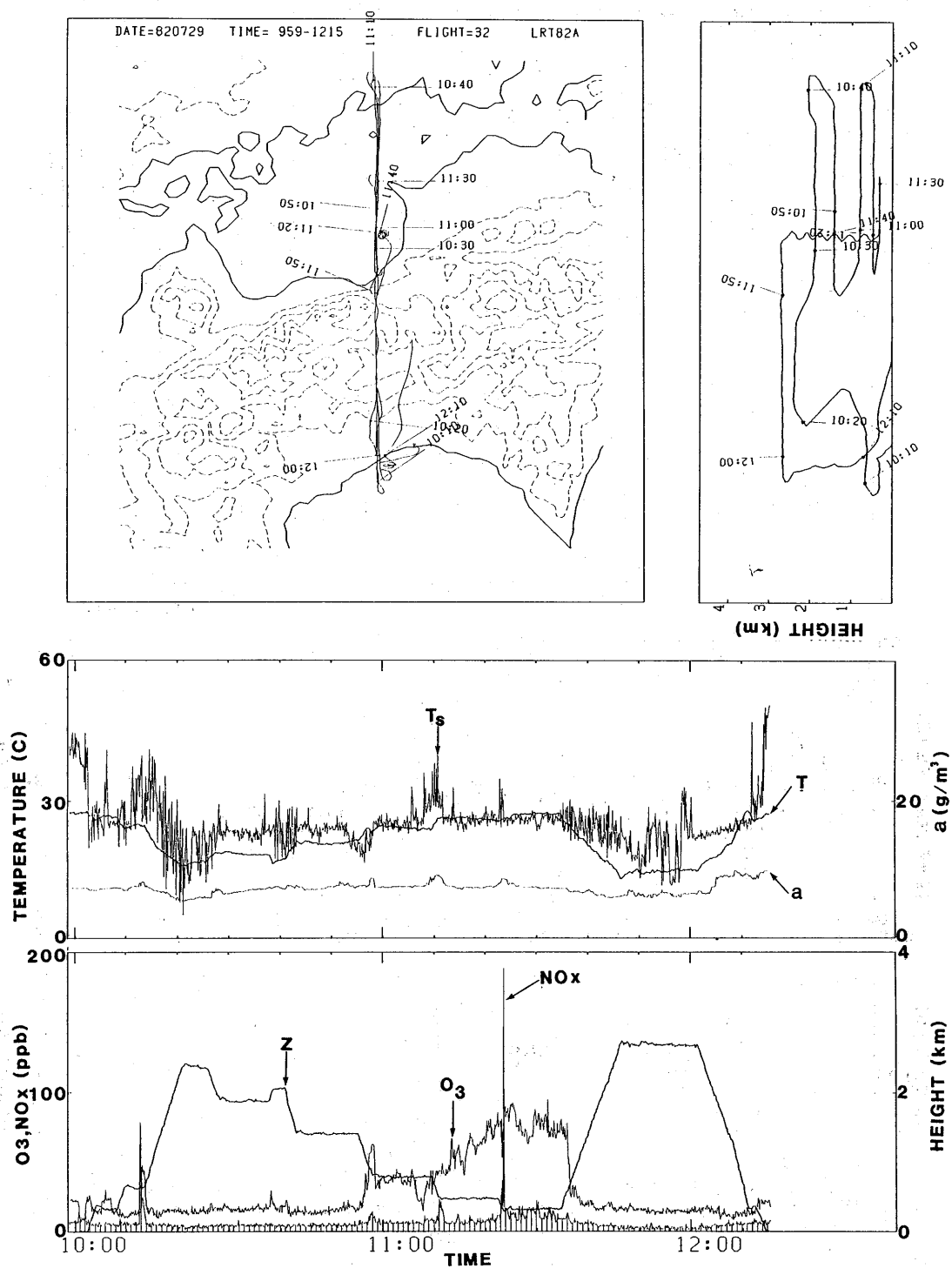


Fig. 4.59 Same as in Fig. 4.54, but flight 32.

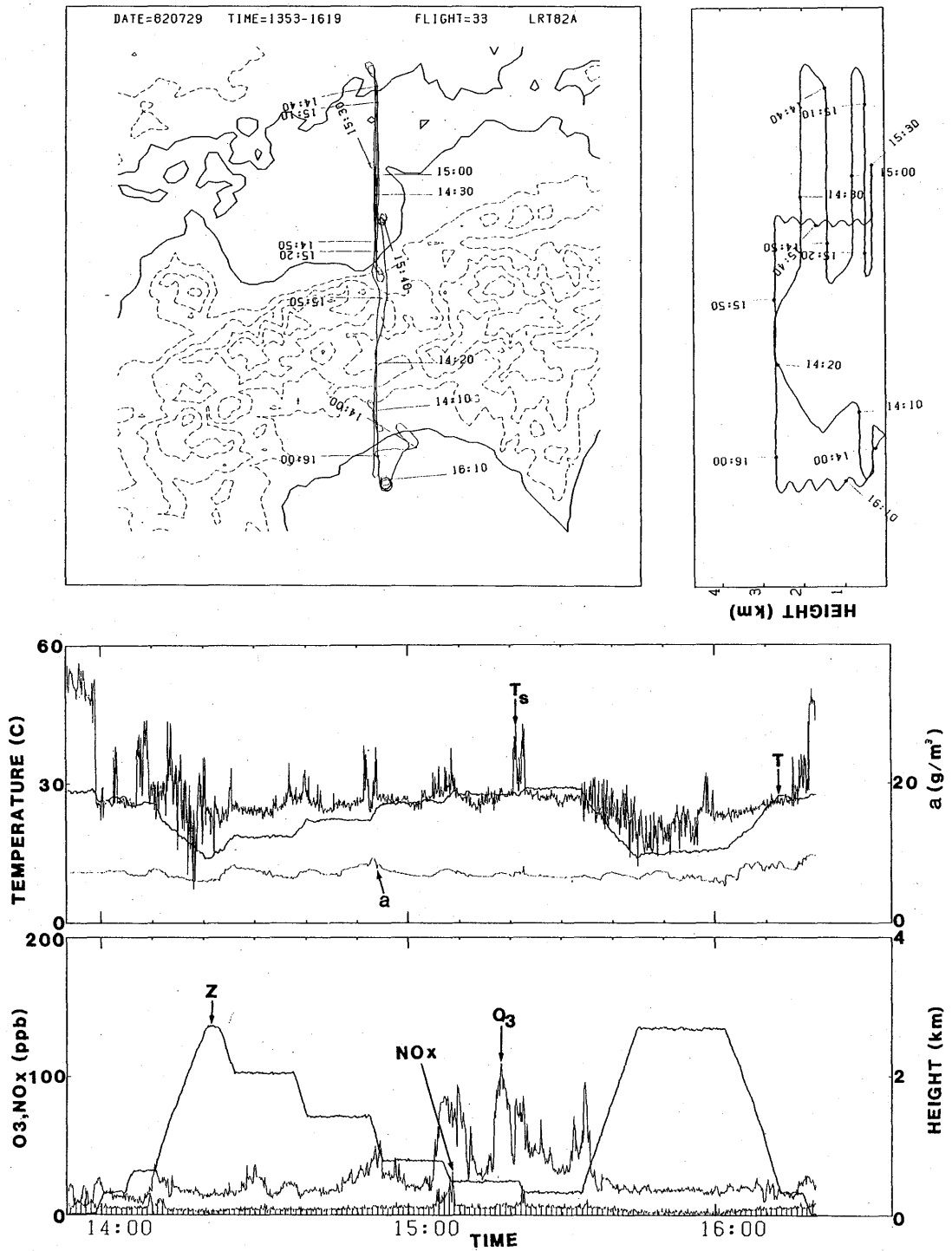


Fig. 4.60 Same as in Fig. 4.54, but flight 33.

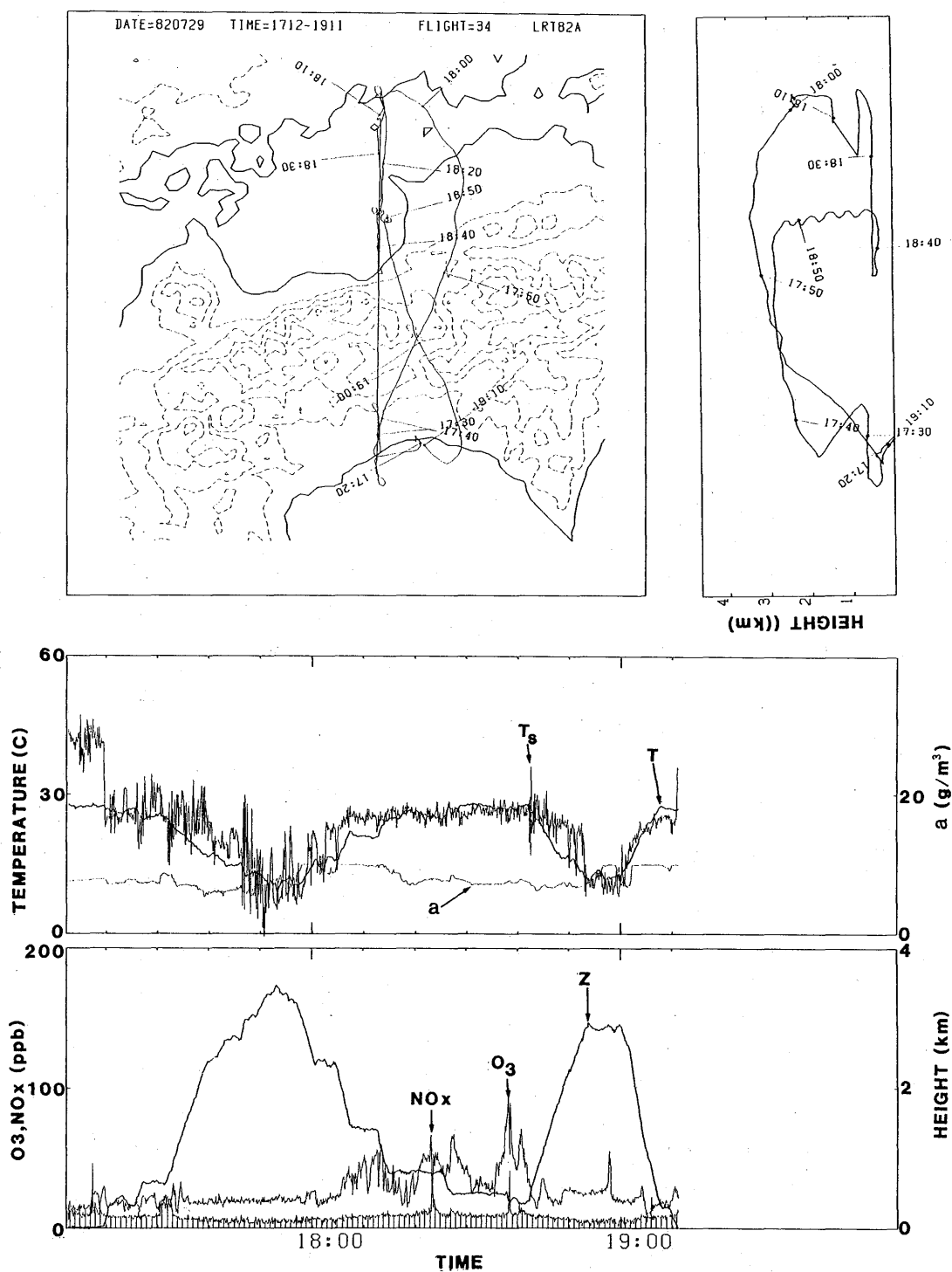


Fig. 4.61 Same as in Fig. 4.54, but flight 34.

4.8 82年観測結果の解析と考察

4.8.1 大気汚染質濃度の鉛直断面の特徴

図4.62と図4.63に、それぞれ1982年7月29日の早朝と午後に測定された NO_x (NO と NO_2 の和、ppb)、エーロゾル ($0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、相対値)の濃度と、高知(図4.52のK)、満濃(M)、総社(S)でパイボールにより観測された高さ2 kmまでの風の南北成分を示す。

早朝、下層では高知はほぼ無風、他の地点では山風/陸風が認められる。 NO_x は燧灘では、

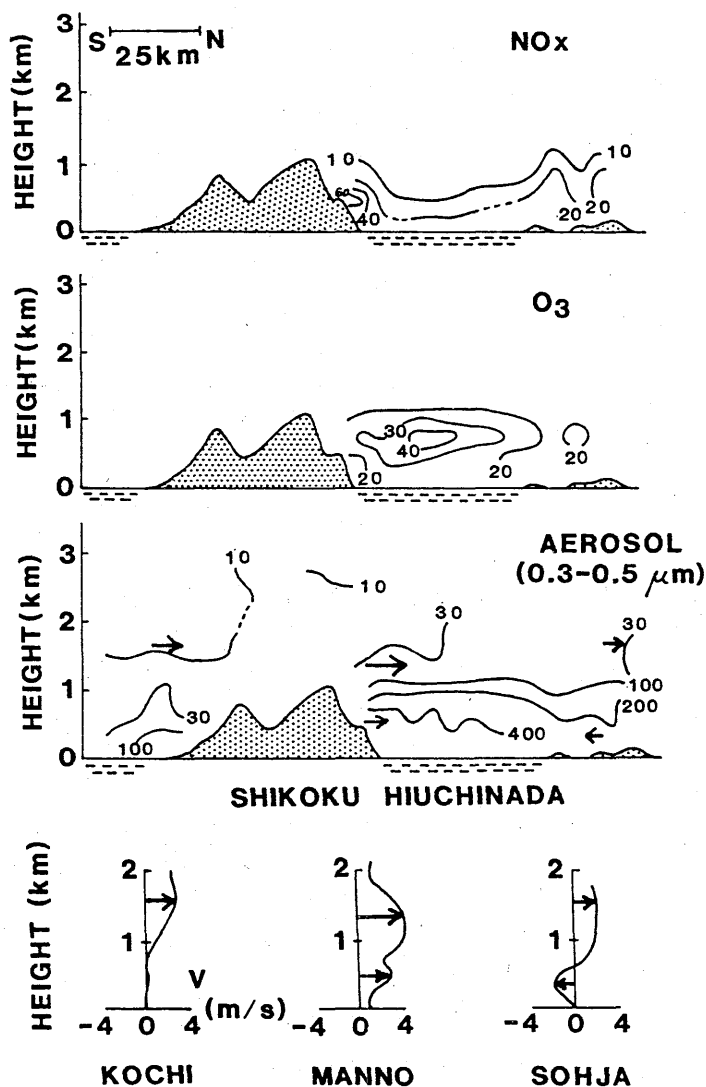


Fig. 4.62 Vertical cross-section of concentrations observed by aircraft in the early morning on 29 July 1982. Top: NO_x (ppb), the second: O_3 (ppb), the third: particle (relative value), bottom: vertical profiles of north-south component of wind velocity at Kohchi, Manno and Sohja.

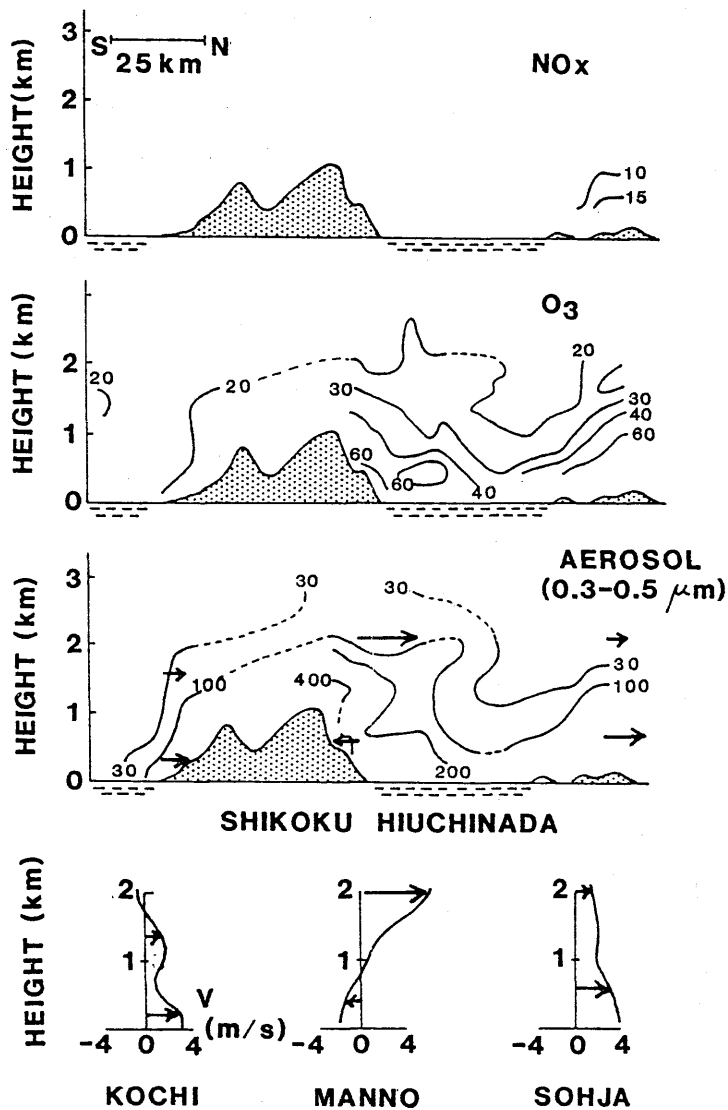


Fig. 4.63 Same as in Fig. 4.62, but in the afternoon.

おおむね 500m 以下に、また O₃ はその上の 500 m から 1000 m の高さに層状に分布している。エーロゾル濃度は燧灘の 1000m 以下の層で高く、等濃度線はほぼ水平となっている。高知側でも低層でエーロゾル濃度はやや高い。早朝には汚染は 1000 m 以下で燧灘全体に広がっていると言える。

午後になると、NO_x の濃度は化学反応により著しく低下する。O₃ やエーロゾルは 四国山脈の南北斜面、および中国側で厚く分布し、高さ 2000m くらいまで達している。これに対し、燧灘での汚染大気の層は浅くなる。これはよく発達した谷風／海風により、汚染質が輸送された結果

と考えられる。四国山脈の上層に輸送された汚染質は南西の上層風によって燧灘の上層へゆっくりと戻されている。

図 4.64～4.66は図 4.52の C点において7月27日の3回の観測で測定されたオゾン、エアロゾルおよび絶対湿度の鉛直分布をそれぞれ示す。オゾン、エアロゾル及び絶対湿度の鉛直分布は次に示すような共通の変化の特徴がある。

1. 早朝と12時ごろの鉛直分布を比べると上層の濃度変化は小さく、変化はほぼ1000m以下に限られる。

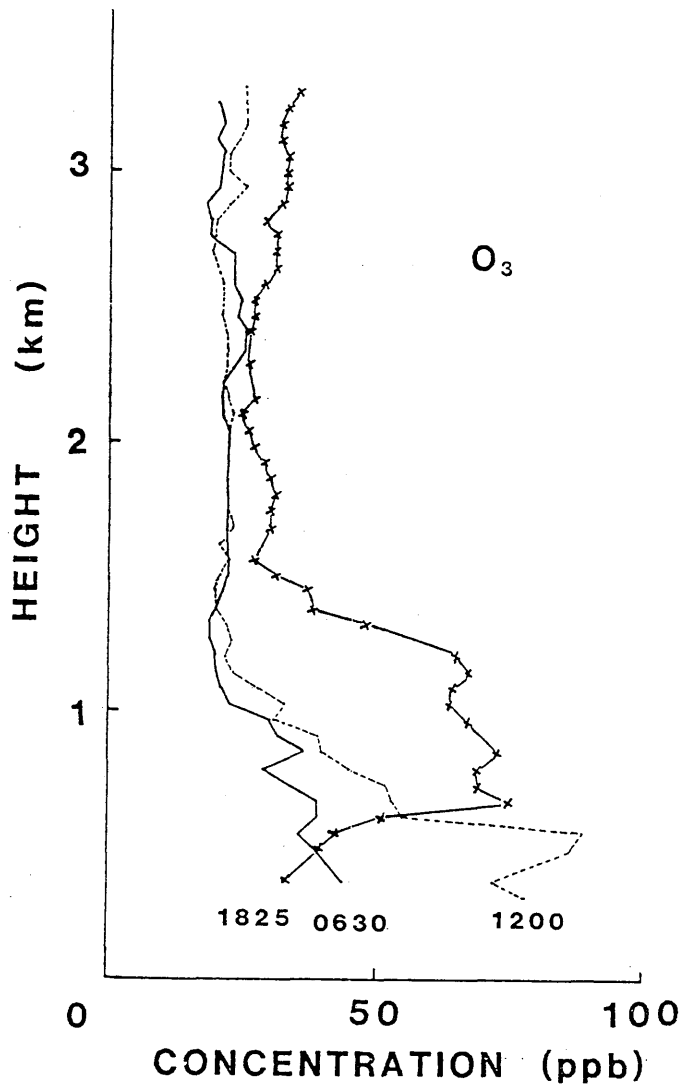


Fig. 4.64 Vertical profiles of ozone concentration observed at point C in Fig.4.52, on 27 July 1982.

2. 夕方になると濃度の変化は高さ 3000m 以上にまでおよぶ。1500m ~ 2000m に比較的变化の小さい層が見られ、2000m ~ 3000m における変化の方が大きい。

同じような特徴は29日の観測にも見られる。これらの特徴は局地風により汚染質が輸送されたためにもたらされたものと考えられる。このほか、早朝、高さ 2000m から 2500m にやや高いエアロゾル濃度が観測される。この高度では太平洋側ではエアロゾル濃度は著しく低いことから、これは前日に下層から輸送された結果ではないかと考えられる。オゾンや絶対湿度は、もともとバックグラウンド値が高いのでわかりにくい。

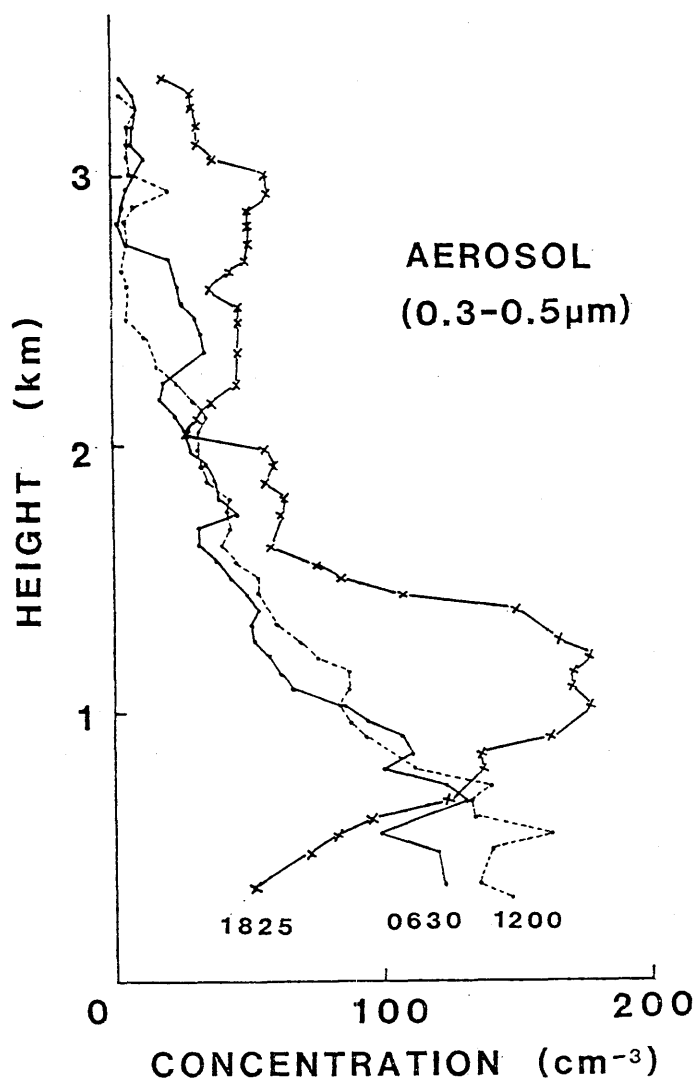


Fig. 4.65 Same as in Fig. 4.64, but concentration of particle (0.3-0.5 μ m).

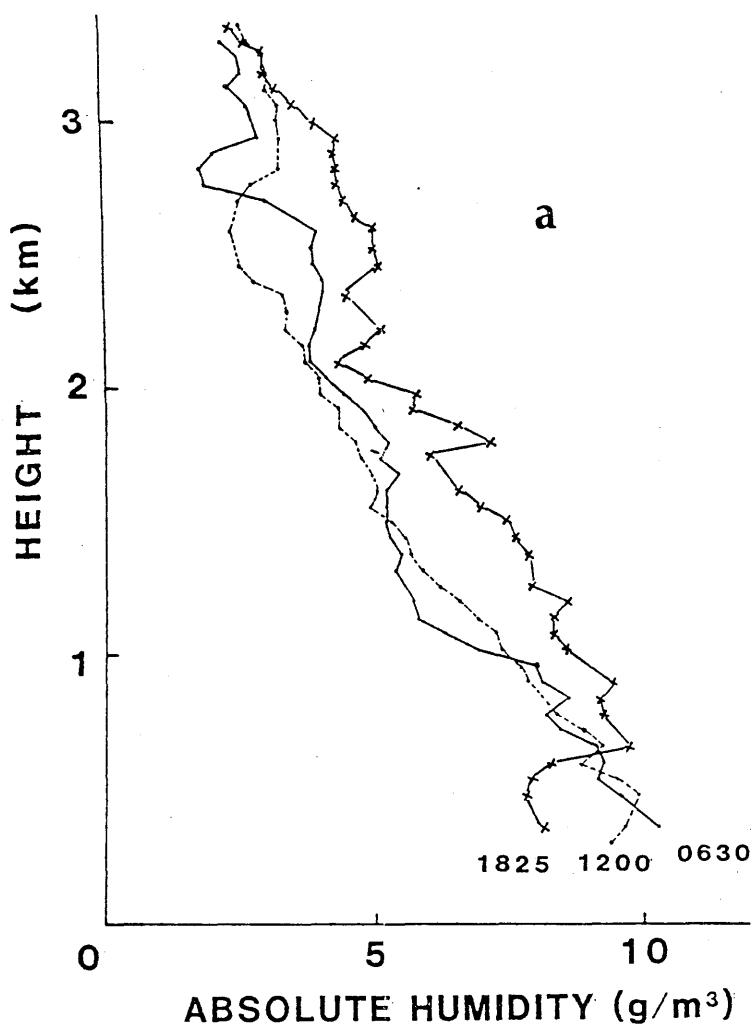


Fig. 4.66 Same as in Fig. 4.64, but absolute humidity.

4.8.2 積雲内の汚染濃度

29日の夕方、四国山脈の上空に発達した、降水を伴う積雲の内部を約2800mの高度で横切った(図4.67)。積雲を境に O_3 、エアロゾル濃度は燧灘側で高く、太平洋側で低い。また積雲の内部では、エアロゾル濃度が急激に減少する一方、かなり高い O_3 濃度が測定されている。雲中での測定上の問題はあるものの前者は積雲によるエアロゾルの除去作用の可能性を、後者は積雲対流によるオゾンのはげしい鉛直輸送の可能性を示唆している。

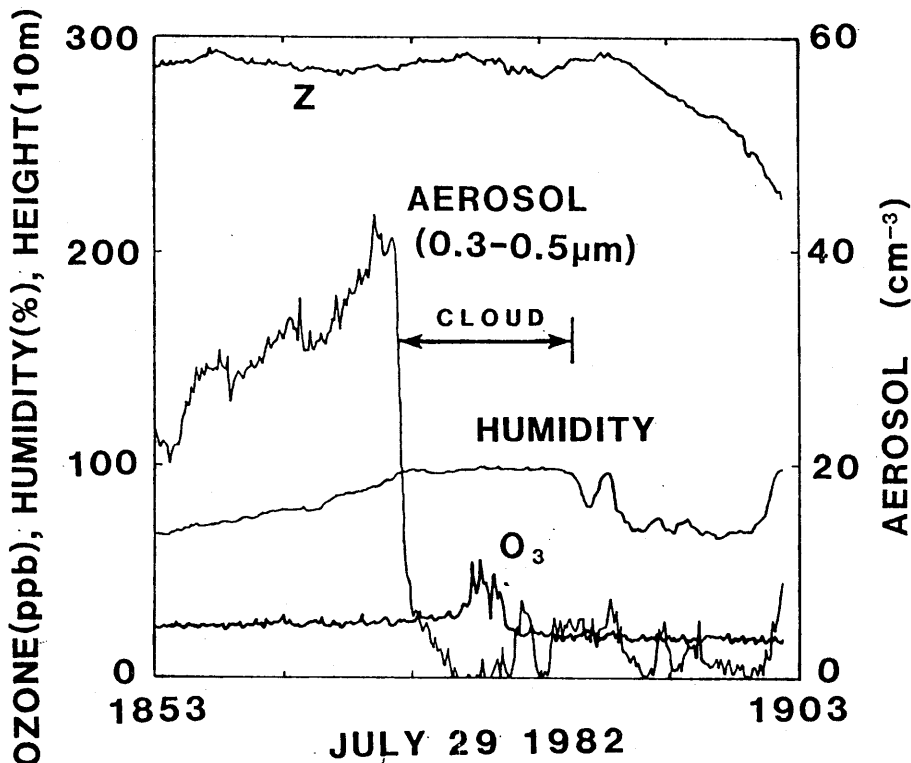


Fig. 4.67 Altitude, concentration of particle, relative humidity and concentration of ozone observed by an aircraft crossing a cumulonimbus on 29 July 1982.

4.9 ドップラー航法による風の観測

4.9.1 測定原理

航空機による風速の測定原理は、図 4.68 に示すように、航空機の地面に対する速度 V_G と大気に対する速度 V_a を別々に測定し、その差から風速 V_w を求める。しかし、この測定法は航空機の速度が V_w にくらべて 10 倍以上速いため、 V_G と V_a の測定に含まれる誤差が風速の精度に大きく影響する。したがって、 V_G 、 V_a をできるだけ高い精度で測定する必要がある。対地速度 V_G を測定する方法には、慣性航法装置 (INS) による航法と、ドップラーレーダーによる航法がある。また対気速度を測定する方法はピトー管による方法と超音波風速計 (SAT) による方法がある。光本 (1983) は INS と SAT を使って、関東地方において風の観測を実

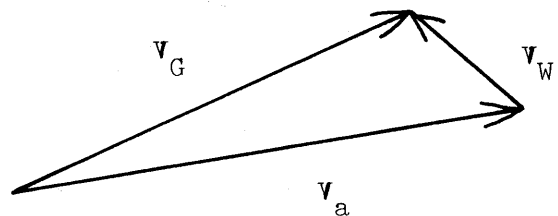


Fig. 4.68 Schematic diagram of wind measurements by an aircraft.

V_G : ground speed of the aircraft,
 V_a : air speed, V_w : wind velocity.

施している。

燧灘での観測では、81年と82年にわたり、海上自衛隊の協力により、ドップラー航法装置を搭載した飛行艇（PS-1）を使って、パイロットバルーンと比較観測を実施した。この航空機では対気速度はピトー管により測定される。ドップラー航法はレーダービームを地面へ向けて3～4方向に発射し、その反射波のドップラーシフトから地面に対する速度を求める方法である。この方法による風の観測は、関東地方において、やはり海上自衛隊の航空機（P2-J）を使って実施されている（中山1975）。中山の見積りによると、この方法による航空機の進行方向の風の成分の誤差は3 knots 以下とされている。

4.9.2 観測の概要

観測は81年と82年の2ケ年にわたり行われた。2ケ年とも観測コースは同じで図4.69の地図に

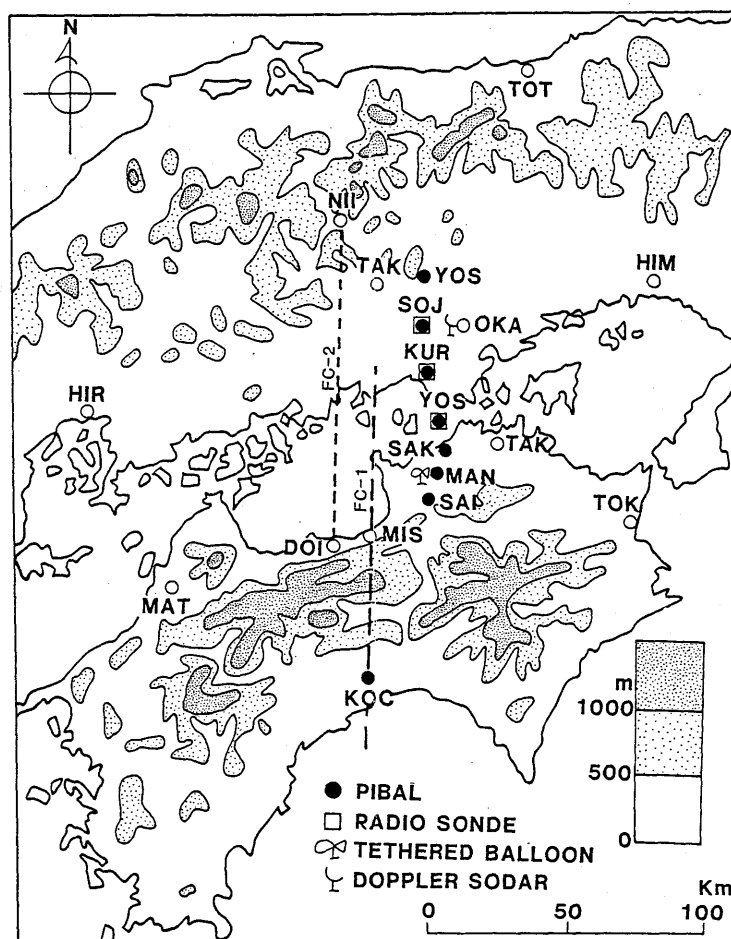


Fig. 4.69 Flight course of wind observation by Doppler radar system (FC-2), in 1981 and 1982. Observed stations indicated in the figure are in 1982.

示す破線 F C - 2 の上を図 4.70 に示す高度で飛行し、風を観測した。ただし 82 年には、図 4.70 に示されている 500m、1000m、1500m の各コースそれぞれについて往復し、30 秒毎に測定した。データの記録は航空機に搭載されている計器を直接読みとることにより行った。表 4.21、4.22 にそれぞれ 81 年、82 年に行われた各フライトの日付と時間を示す。

4.9.3 観測結果と考察

ドップラー航法の性質上、海面近くの風が弱いと波がなくなり、レーダー反射波が弱くなるので測定不能となる。また前にも述べたように、少なく見積っても 2 m/sec 程度の誤差はあると見られ、あまり弱い風速での測定はむずかしい。図 4.71 は、81 年 8 月 19 日の朝に高さ 1000m にてドップラー航法により測定された風向風速を示す。図の×印は、海面上に波がないためによる欠測を意味する。図には、ほぼ同じ時刻に同じ高度で、パイボールにより測定された風の分布が記さ

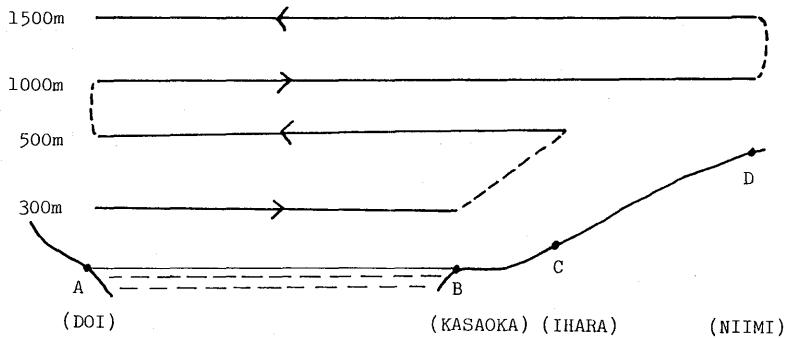


Fig. 4.70 A side view of the flight course.

Table 4.21 List of flights for wind measurements by the Doppler radar system in 1981.

フライト番号	日 付	観測開始時刻	終了時刻
N 11*	1981年8月19日	07:12	08:27
N 12*	"	08:33	09:53
N 13*	"	12:07	13:13
N 21**	1981年8月21日	07:07	08:13
N 22**	"	08:36	09:48
N 23**	"	12:05	13:25

* 海上自衛隊岩国分遣隊、機番 51-5816、機長：小笠 3 佐、TACO：斉藤 2 尉、NAV：今井 2 尉

** 同隊、機番 51-5822、機長：成田 1 尉、TACO：津吉 2 尉、NAV：高木候補生

Table 4.22 List of flights for wind measurements by the Doppler radar system in 1982.

フライト番号	日 付	観測開始時刻	終了時刻
N 11 *	1982年7月27日	14:01	15:33
N 21 **	1982年7月28日	07:32	09:03
N 31 ***	1982年7月29日	07:25	09:20
N 32 ****	"	13:57	16:00

* 海上自衛隊岩国分遣隊, 機番 5810, 機長: 岩尾 1 佐
 ** " 機番 5815, 機長: 田中 1 尉
 *** " 機番 5810, 機長: 安達 1 尉
 **** " 機番 5815, 機長: 高場 1 尉

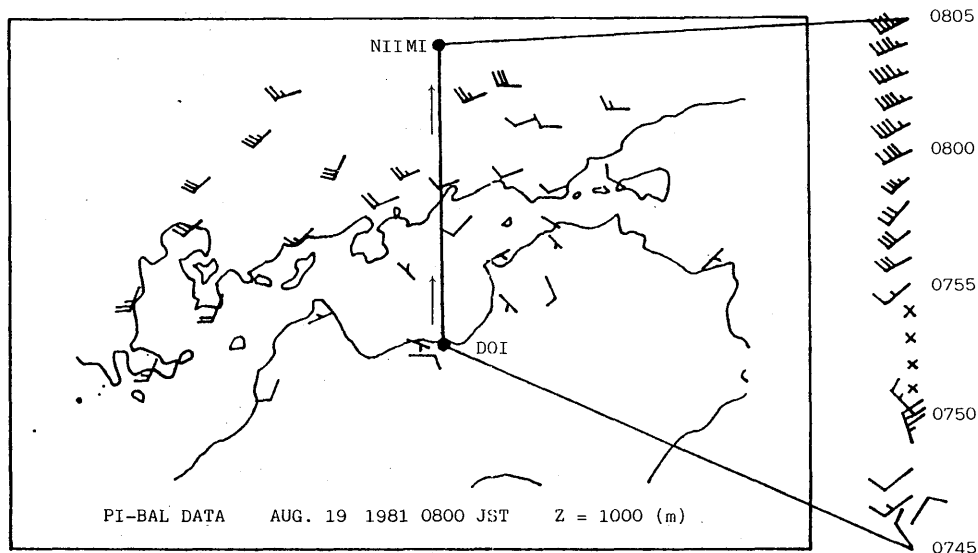


Fig. 4.71 An example of wind velocity measured by Doppler radar system on 19 Aug. 1981, given by the Maritime Self-Defence Force.

れている。両者をくらべると、燧灘の南部では風が弱いこと、中国地方の陸上では南西ないし西南西の風が強いことなどの特徴はよく一致している。しかし中国地方での風速はパイボールでは $5 \sim 7 \text{ m/sec}$ と見積られるのに対し、航空機による測定では $7 \sim 9 \text{ m/sec}$ とやや大きめに見積られている。結局この結果に関する限り、両者の差は $2 \sim 3 \text{ m/sec}$ 程度と見積られる。

測定精度については、航空機とパイボールが同時に揃ったデータが少ないので、正確にはわからなかったが、航空機が南下するときと北上するときでは、誤差に系統的と思われる違いがあること、航空機に個性があり、機番により誤差の大きさに差があることが分かった。そのため、

特性のよくわかった同じ航空機を使うこと、また、82年に実施したように同じコースを同じ高度で往復することなどにより、精度を若干向上させられると考えられる。

局地風の水平方向の構造を調査する場合、パイロットバルーンによる風の測定では、測定点を数多く配置しなくてはならず、コストがかさむ上、その時々気象条件に合った観測点の配置をとることができない。航空機観測は、広い範囲での風速の水平方向の変化を観測することができ、局地風の研究には大変有効な観測手段になる可能性がある。

4.10 まとめ

航空機による気象要素や汚染濃度の測定は、汚染質の局地風による鉛直輸送を調べる最も有力な手段の一つである。局地風の研究では汚染質をトレーサーと見立てるわけであるが、 NO_x は日中の反応による減衰がはげしく、夜間や発生源の近くでしか、高い濃度を検出しないので、局地風のスケールでは良いトレーサーとは言えなかった。これに対して O_3 は、かなり上層まで輸送された汚染大気中でもバックグラウンド濃度にくらべて十分高い濃度が検出されるので、このスケールでのトレーサーとして有用であった。しかし、夜間には NO_x 濃度の高い所では反応により濃度が下がっているので、 NO_x 濃度との同時観測は必要である。エロゾル濃度も昼夜を問わず、汚染大気の指標として有用だが、発生源や大気中での変質過程に不明の点が多いのが欠点である。また湿度の分布も、他の物質濃度と平行した解析を行なうことにより、鉛直輸送に関する有益な情報を得ることができた。

3年間の航空機観測により明らかになった燧灘周辺での汚染質の輸送過程の特徴をまとめると次のようになる。

1. 早朝には汚染大気は燧灘全体に高い1000m以下の層に水平に広がっていることが多い。
2. 汚染大気は日中になると、さかんに上層へ輸送され、夕方には3000mくらいに達する。また燧灘の下層は発散場となり、汚染質は海上から四国側、中国側へ輸送される。これは主に局地風、特に四国側の斜面に発達する谷風によるためである。
3. この結果、夕方には燧灘の海上では、下層と上層の2層で濃度の高くなる2重構造をもつことがある。
4. 上層に輸送された汚染質は次の日の朝まで残留することがあるように思われるが、これについては明確にすることができなかった。
5. 発達した積雲はオゾンの鉛直輸送に重大な影響を与えているとともに、エロゾルの強い除去作用を持っている可能性が示唆された。

航空機による観測では上記した汚染大気の挙動に関する知見とは別に、地表面温度の日変化や場所によるちがいが、またアルベードなどに関するデータを同時に得ることができた。これらの量は後に示す数値シミュレーションの結果を検証する上で大変に重要なデータとなる。

またドップラー航法による風の測定では、いくつかの条件が揃えば、誤差を2～3 m/sec 以下にすることは可能と考えられる。航空機による風の測定は、広い範囲の風速分布が比較的短時間のうちに得られるので、将来は局地風の研究を行なう上で、非常に有効な測定手段になる可能性がある。

参 考 文 献

- Buck, A. L., 1973: Development of an improved Lyman alpha hygrometer, Atmos. Tech., 1, No.2, 43-46.
- Buck, A. L., 1976: The variable-path Lyman-alpha hygrometer and its operating characteristics. Bull. Amer. Meteor. Soc., 57, 1113-1118.
- Lemone, M. A. and W. T. Pennel 1980: A comparison of turbulence measurements from aircraft. J. A. M. vol 19, 1420-1437.
- 蒲生 稔・山本 晋・横山長之、1972：飛行機による境界層上部の乱流観測—その観測システムについて—、公害、7、4、49.
- 久保井常雄・伊勢 敏・貝和良一・猪股陽二・榎本 裕、1977：赤外線放射温度計ER—2007、National Technical Report Vol.23、No.5、905—910.
- 数理計画、1981：光化学大気汚染予測システム設定調査(瀬戸内地域)、環境庁委託業務結果報告書.
- 戸矢時義・安田延壽、1983：裸地面からの蒸発—Lyman- α 湿度計の周波特性—、気象学会予稿集、1983年秋季大会、118.
- 藤谷徳之助、1980：紫外線湿度計による湿度変動の測定、天気、27、649—655.
- 光本茂記、1983：航空機による風の測定、環境科学研究報告、「広域大気汚染の動態」291—313.
- 村山信彦、1983：「これからの気象観測」東京堂出版、pp. 212.

付 録

1. データ処理のブロックダイアグラム

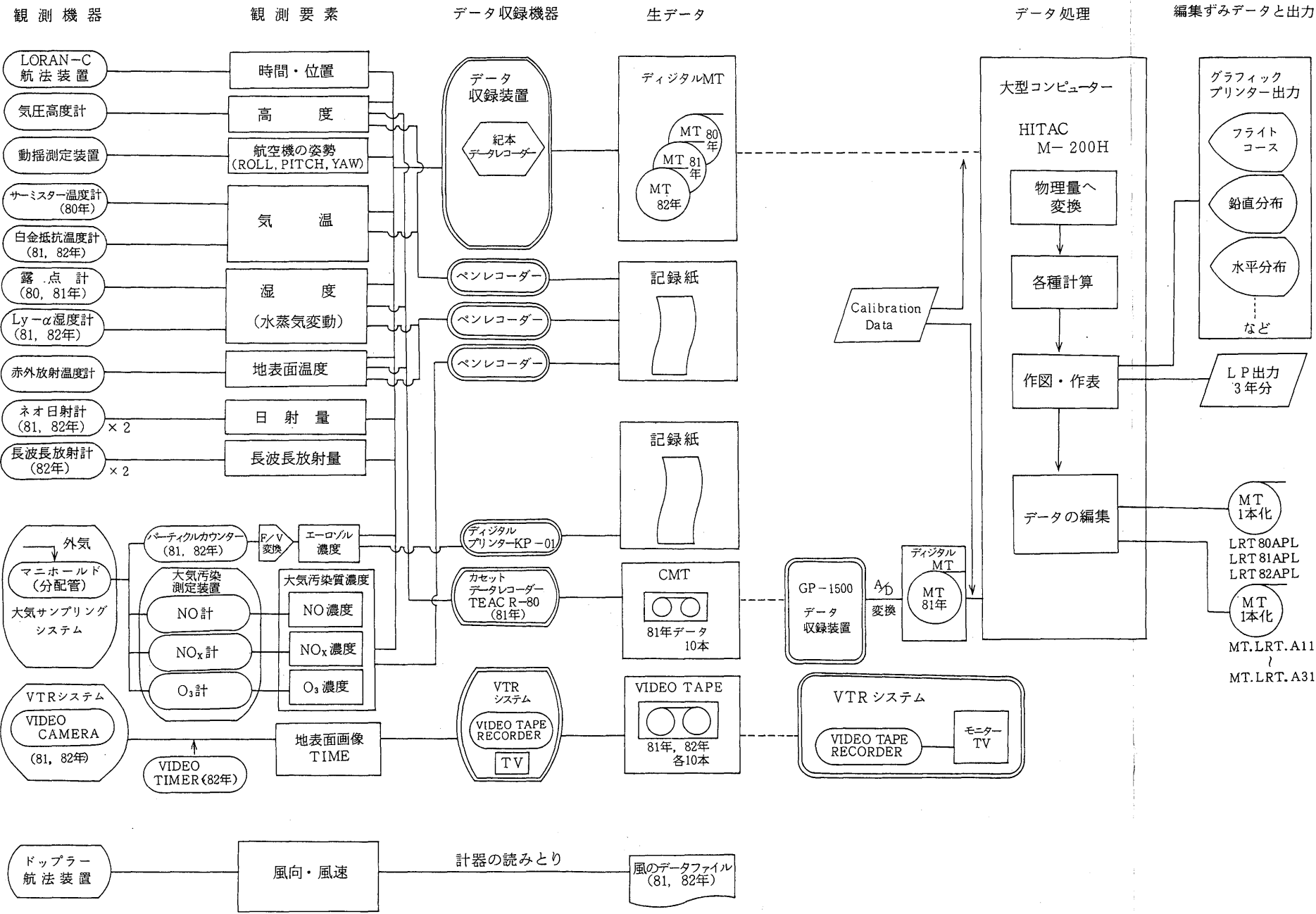


Fig. 4.72 A flow diagram of data recording and analysing system.

2. 航空機観測データ MT 情報

(1) 一般観測データ

(a) MT の仕様

記 録 密 度	1600	VOLSEL = ' LRTAPL '
ラ ベ ル 形 式	SL	
第 1 ファイル	DSN = ' LRT 80 APL '	('80年データ)
	RECFM = FB	
	LRECL = 48 B	
	BLKSIZE = 4800 B	
	ファイルの長さ = 約 630 KB	
第 2 ファイル	DSN = ' LRT 81 APL '	('81年データ)
	RECFM = FB	
	LRECL = 80 B	
	BLKSIZE = 3200 B	
	ファイルの長さ = 約 2,810 KB	
第 3 ファイル	DSN = ' LRT 82 APL '	('82年データ)
	RECFM = FB	
	LRECL = 120 B	
	BLKSIZE = 4800 B	
	ファイルの長さ = 約 6,400 KB	
記 録 型 式	フォートランによる FORMAT 付き記録 整数型データの A コード (バイナリー) による出力	

レコード番号	記録内容		
1	IA 1	第 1 RUN 初めの記録	} 見出し (3 レコード)
2	IA 2		
3	IA 3		
4	IDATA	第 1 RUN 初めのデータ	} データ
⋮	"	"	
m	IDATA	第 1 RUN 最後のデータ	
m + 1	IA 1	第 2 RUN 初めの記録	} 第 1 RUN
{		⋮	
n	IDATA	第 2 RUN 最後のデータ	
			} 第 2 RUN

読み出し方法 (例)

```

INTEGER*4   IA 1 (n), IA 2 (n), IA (n), IDATA (n)
              (n は年次により異なる、80年:12、81年:20、83年:30)

READ (MT, 1)  IA 1, IA 2, IA 3          見出しの読みこみ
1  FORMAT (nA 4)
DO 10  I = 1, N
    READ (MT, 1)  IDATA                  データの読みこみ
    {
        IF (IDATA(I). NE. 0) GO TO 20    次のRUNの初まりの検出(註)
    }
10 CONTINUE
20 BACKSPACE MT
    {

```

注) あるレコードが、IA 1, IA 2, IA 3 または IDATA のいずれであるかの判定は、レコードの先頭の識別コードを利用すると便利である。

(b) 記録内容

LRT 80 APL (1980年データ) n = 12

配列名	I A 1	I A 2	I A 3	IDATA
1 ch	9	1	2	0 (識別コード)
2	フライト番号	' 1 '	' F. NO '	フライト番号
3	年 月 日	' HMS '	' TIME '	時分秒 (6ケタ)
4		' 001M '	' N '	緯度 (0.01分) 34° Nからの変移
5		' 001M '	' E '	経度 (0.01分) 133° Eからの変移
6		' PPB '	' NO '	NO 濃度 (ppb)
7		' PPB '	' NOX '	NO _x 濃度 (ppb)
8		' PPB '	' O3 '	O ₃ 濃度 (ppb)
9		' M '	' Z '	高 度 (m)
10		' 01DG '	' SFT '	放射温度 (0.1°C)
11		' 01DG '	' TMP '	気 温 (0.1°C)
12		' 01DG '	' DEW '	露点温度 (0.1°C)

注) ' ' にかこまれているのは文字型データ、空欄は未使用、その他は整数型データ。

LRT 81 APL (1981年データ) n = 20

配列名	IA 1	IA 2	IA 3	IDATA
1 ch	9	1	2	0 (識別コード)
2	フライト番号	' '	' F. NO '	フライト番号
3	年 月 日	' HMS '	' TIME '	時、分、秒 (6ケタ)
4		' 0.1M '	' N '	緯度 (0.1分) 34°Nからの変形
5		' 0.1M '	' E '	経度 (0.1分) 133°Eからの変形
6		' PPB '	' NO '	NO 濃度 (ppb)
7		' PPB '	' NOX '	NO _x 濃度 (ppb)
8		' PPB '	' O3 '	O ₃ 濃度 (ppb)
9		' M '	' Z '	高度 (m)
10		' ML/M '	' DOWN '	下向き日射 (10^{-3} ly/min)
11		' ML/M '	' UP '	上向き日射 (10^{-3} ly/min)
12		' 0.1G '	' LYMA '	混 合 比 (0.1g/kg)
13		' 01DG '	' SFT '	放射温度 (0.1°C)
14		' 01DG '	' DEW '	露点温度 (0.1°C)
15		' 01DG '	' ATMP '	気温 (0.1°C)
16		' 01DG '	' PICH '	航空機のピッチ角 (0.1°)
17		' 01DG '	' ROLL '	" ロール角 (0.1°)
18		' 01DG '	' YO '	" ヨー角 (0.1°)
19		' '	' '	
20		' '	' '	

注) ▽ ▽ にかこまれているのは文字型データ、空欄は未使用、その他は整数型データ。

LRT 82 APL

(1982年データ)

n = 30

配列名	IA1	IA2	IA3	IDATA
1 ch	9	1	2	0 (識別コード)
2	フライト番号	' '	' F. NO '	フライト番号
3	年 月 日	' HMS '	' TIME '	時、分、秒 (6ケタ)
4		' M '	' Z '	高度 (m)
5		' 0.1M '	' N '	緯度 (0.1分) 34°Nからの変移
6		' 0.1M '	' E '	経度 (0.1分) 133°Eからの変移
7		' '	' ERR '	ローランのエラーコード
8		' PPB '	' NO '	NO 濃度 (ppb)
9		' PPB '	' NOX '	NO _x 濃度 (ppb)
10		' PPB '	' O3 '	O ₃ 濃度 (ppb)
11		' 100 '	' P1 '	0.3~0.5 μm エロゾルカウント (100コ/分)
12		' 10/M '	' P2 '	0.5~1.0 " (10コ/分)
13		' 10/M '	' P3 '	1.0~2.0 " (")
14		' 10/M '	' P4 '	2.0~5.0 " (")
15		' 10/M '	' P5 '	5.0~ " (")
16		' 01DG '	' ATMP '	気温 (0.1°C)
17		' '	' '	
18		' 0.1G '	' LYMA '	混 合 比 (0.1 g/kg)
19		' % '	' HUM '	相対湿度 (%)
20		' 01DG '	' SFT '	放射温度 (0.1°C)
21		' ML/M '	' DS '	下向短波放射 (10 ⁻³ ly/min)
22		' ML/M '	' US '	上向短波放射 (10 ⁻³ ly/min)
23		' ML/M '	' DL '	下向長波放射 (10 ⁻³ ly/min)
24		' ML/M '	' UL '	上向長波放射 (10 ⁻³ ly/min)
25		' DG '	' PICH '	航空機のピッチ角 (1°)
26		' DG '	' ROLL '	" ロール角 (1°)
27		' DG '	' YO '	" ヨー角 (1°)
28		' '	' '	
29		' '	' '	
30		' '	' '	

注) ▽ ▽ にかこまれているのは文字型データ、空欄は未使用、その他は整数型データ。

エロゾルカウントの濃度への換算は、

$$y = 0.74 + 2.05 \times 10^{-3} x$$

y : 濃度 (個/cm³)

x : カウント (個/sec)

による。

(2) '81年水蒸気変動量データ

(a) MT仕様

MT

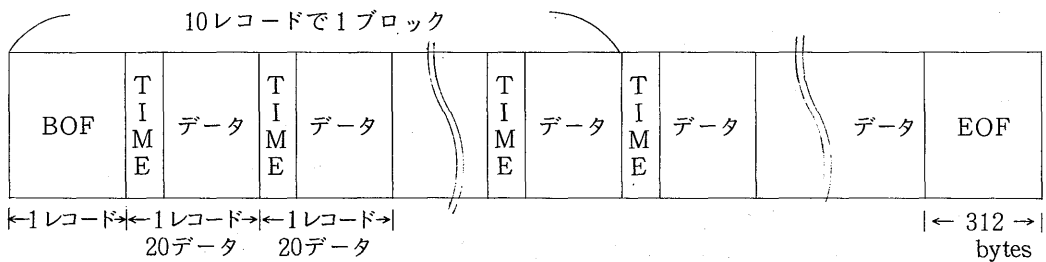
VOL SER=TSPCTR

DENSITY=6250 BPI

DS Name	DS NO.	REC. FM	LRECL	BLKSIZE	BLKCOUNT
MT.LRT81.A111	8	FB	312	3120	572
" .A112	9				419
" .A131	10				560
" .A132	11				496
" .A210	12				569
" .A221	13				570
" .A222	14				562
" .A310	15				526

(b) MT FORMAT

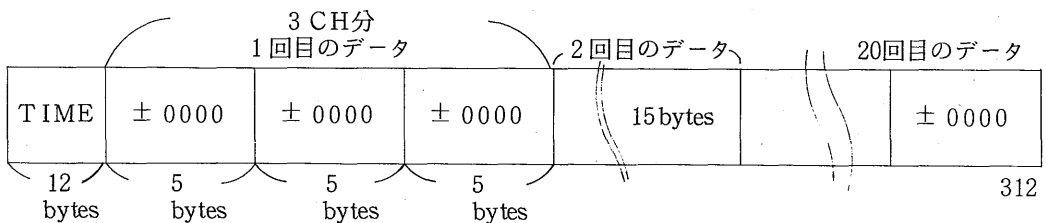
1レコード=312 bytes でデータは次の様に入っている。



BOF及びEOF（312 bytes）には、初めの84 bytesにラベル情報が入っている。

あとはblankでうめている。

データの入っている1レコードは次の通り。



$$1 \text{ レコード} = 12 + 3 \times 5 \times 20 = 312 \text{ bytes}$$

A/D変換は 20 Hz (0.05 sec) で行ったので、1 レコード = 1 sec となる。

(c) データとして使うレコードは次の通り。

フライト	DS Name	データ (レコード)	備 考
A 11	.LRT .A 111	1 ~ 5672	1 ~ 10 はPASSさせる
	.A 112	11 ~ 3950	
A 13	.A 131	1 ~ 5557	1 ~ 37 はPASSさせる
	.A 132	38 ~ 4841	
A 21	.A 210	1 ~ 5665	
A 22	.A 221	1 ~ 5672	1 ~ 79 はPASSさせる
	.A 222	80 ~ 5012	
A 31	.A 310	1 ~ 4764	

(d) 物理量への変換式

各CHについて

$$V_{\text{真}} = (V - \text{ZERO}) / \text{SPAN}$$

(1) Ly- α 湿度計

$$V_L = V_{\text{真}} \times 3 - 3 \quad (\text{V})$$

$$a \text{ (g/m}^3\text{)} = 0.35417 + 2.79477 \cdot V_L + 0.27375 V_L^2$$

(2) 放射温度計

$$V_R = V_{\text{真}} \times 10 \quad (\text{V})$$

$$T_s \text{ (}^\circ\text{C)} = -0.13684 + 9.90900 V_R + 0.08117 V_R^2$$

(3) 高度

$$Z \text{ (m)} = (V_{\text{真}} - V_{z=0}) \times H_{\text{SPAN}}$$

ここで $V_{z=0}$ は地上での電圧、 H_{SPAN} は 1 Vを示す高度。

なお、Ly- α 湿度計は AMP により -3 V シフトさせ、GAINを 1/3にした。放射温度計は出力を 1/10 に減衰して使用した。

第5章 ドップラーソーダによる気流と乱流パラメータ の3次元測定*

5.1 装置の基礎概念

上空に向けて発射された音波パルスが各高度で反射し、X Y方向に離れて配置された受信機1、2および発信点での受信機3で、それぞれ f_1 、 f_2 、 f_3 の周波数のずれを測定したとき(図5.1)、風の3方向成分は

$$u = \frac{c}{f} \frac{1}{\cos \theta_1} \left\{ f_1 - f_3 \frac{1 + \sin \theta_1}{2} \right\}$$

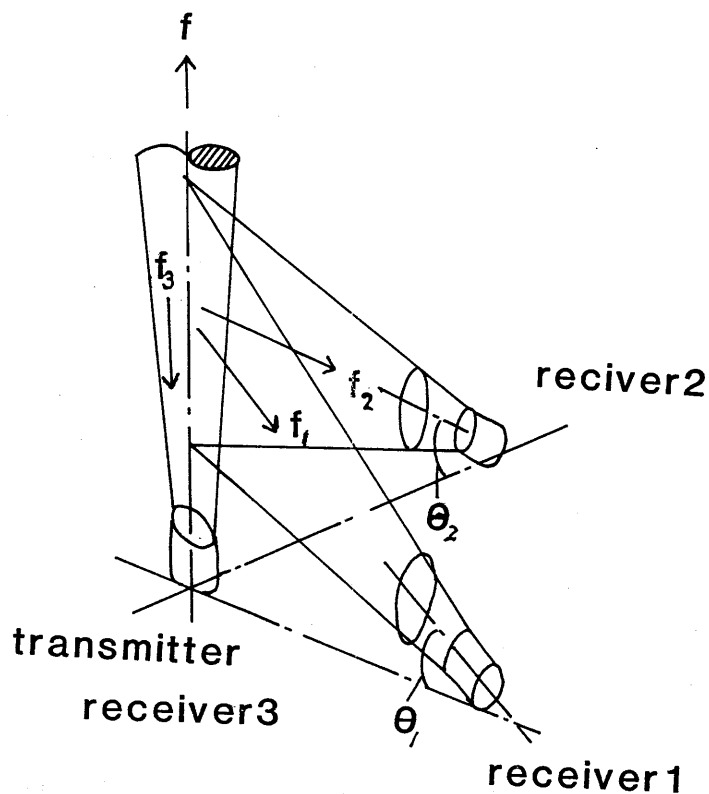


Fig. 5.1 General view of the Doppler sodar system.

* 吉川友章：応用気象研究部

$$v = \frac{c}{f} \frac{1}{\cos \theta_2} \left\{ f_2 - f_3 \frac{1 + \sin \theta_2}{2} \right\}$$

$$w = -\frac{c}{2f} f_3$$

で与えられる。ここで θ_1 、 θ_2 : 受信機 1 と 2 から測定点を仰ぐ角度、 c : 音速 ($= 331 + 0.61T$)、 T : 気温、 f : 発信音波の周波数 (表参照)。

また、時間間隔 s 内の平均風速の成分 m とその標準偏差 σ は x 成分の場合、分布関数 $x(t)$ より

$$m = \frac{1}{s} \int_0^s x(t) dt$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{s} \int_0^s x^2(t) dt - m^2}$$

と定義される。Y、Z 成分についても同様に扱われ、これより 3 次元の平均風速と 3 方向の乱流パラメータが導かれる。

5.2 実地測定

1981年夏、瀬戸内海の家陸風調査に際して、この測定器による気流・乱流の高度分布測定を行った。概要は表のようになっており、測定高度は 500 m まで、測定時間間隔は 5 秒以上であれば自由に変えられる。測定は自動的に連続して行ない内蔵電算機により、5 秒毎の測定値を 2 分ぶん (24 個) に集積して、平均風向・平均風速 (水平と鉛直)、風向変動の標準偏差、水平と鉛直の風速変動標準偏差を求めた。ただしこれらのデータを磁気テープに収録する際には、さらに 5 個の平均値をまとめて、10 分の平均値と偏差値を求め、1 時間にそれぞれ 6 個の値として保存した。また今回の設定条件によると、測定は空間的には気層の厚さが 53 m、断面積が 100 m 上空で約 60 m²、500 m 上空で 1,500 m² ほどの容積平均値を求めたことになる。

機 種 3 方向バイスタティック型ドップラーソーダ

使用音波 2,000 Hz、160 m sec パルス、250 W

測定時刻 5 sec ごと連続、10 分間平均

測定高度 150 m ~ 500 m の 50 m ごと

時間・場所 1981年 8 月 10 日 ~ 28 日、新居浜海岸

1982年 7 月 24 日 ~ 8 月 7 日および 8 月 12 日 ~ 22 日、岡山県環境保健センター構内

図 5.2 に 1981 年に新居浜海岸で測定された毎正時前 10 分間の平均水平流 (矢羽根表示) と鉛直流 (等値線) をとりだし、高度・時間断面図に描いた例を示す。早朝、西よりの風が東よりに急変したのは、夏型気圧配置の一般流が台風外辺の風と入れ替わったもので、下層では陸風が持続して交替

が遅れた。日中は海風と傾度風の向きが近いため、下層と上層のシャーは少なく、100 m高度では海岸に直角に北よりの海風が吹いている。夕方には下層に再び陸風が吹き始め、夜半には全層にわたる一般流のじょう乱が見られる。これらは同時に同じ場所で行なったパイボールの観測とよく一致する。

鉛直流については一般流が東から西へ変わるときと、下層に陸風が吹き始めるとき、400～500 mに著しい上昇流がみられる。

図5.3に乱流パラメータの例として、 σ_w/u の高度・時間断面を示す。一般に σ_w/u の値は

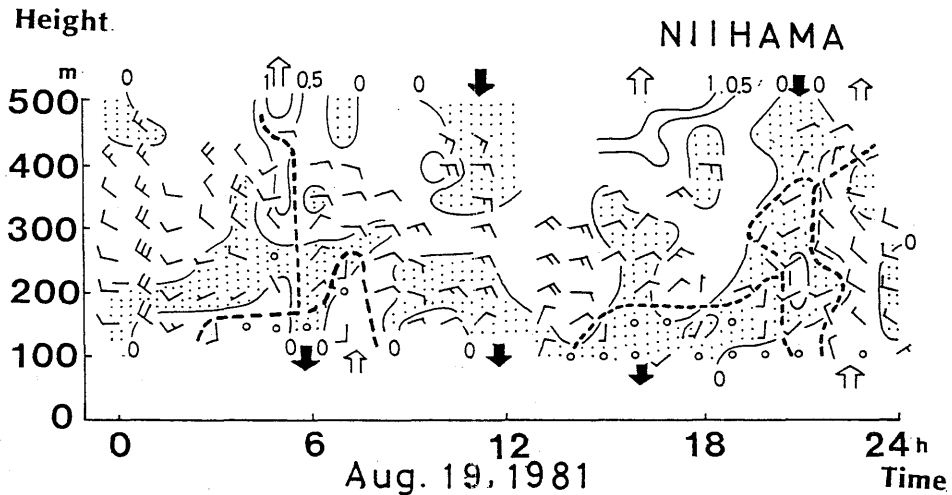


Fig. 5.2 An example of the three dimensional wind data observed with Doppler sodar. (Broken line denotes systematic turn of the wind direction, white circles mean calm condition and shadow areas correspond with the descent air stream.)

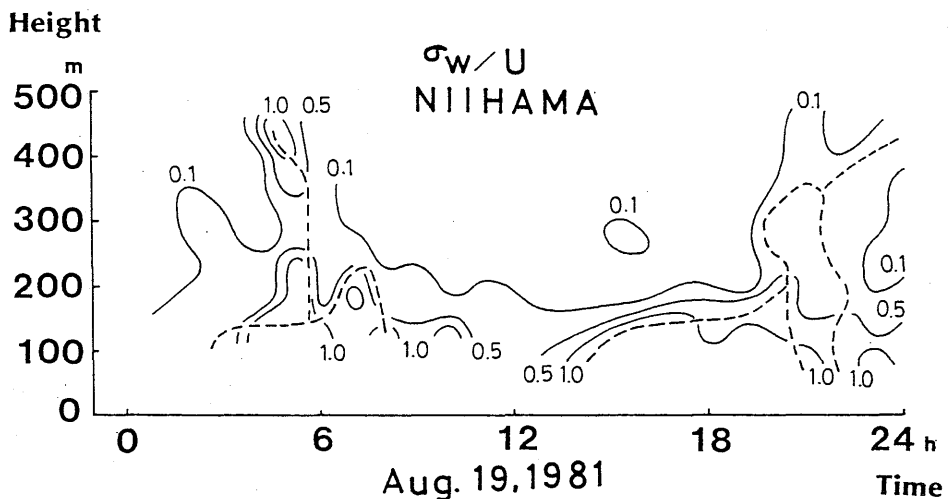


Fig. 5.3 An example of turbulent parameters, estimated from the observed wind data. (Aug. 1981 over Niihama)

10^{-1} のオーダーにあり下層で大きく、上層で小さいが、風向急変を伴う一般流のじょう乱域では、上空までこの値が大きい。

1982年夏は測定点を岡山平野の中央にある県の環境衛生センター構内に変えて、気流・乱流の特徴を調べた（図 5.4 上）。南西約20kmの倉敷のパイバルデータ（図 5.4 下）と比較すると、次のことがいえる。

(1) 両地点ともほぼ一樣な風向が続いたり、ゆるやかに変転する気流系が共通して認められ、各気流系は明瞭な風向のギャップによって区分される。（図中の2重線）

(2) 気流区分は両地点とも定性的には一致するが、岡山が地上から500mまで、同時に気流系が入れ替わることが多いのに対し、倉敷は下層と上層の間で数時間かかって移行したり、異なる気流系が立体交差することが多い。これは岡山が広い平坦地であるのに対し、倉敷は南東近くに丘陵をひかえていることと関係しているらしい。

図 5.4 に岡山と倉敷で測られた水平流（矢羽根表示）、鉛直流（等値線）、シャーライン（2重線）

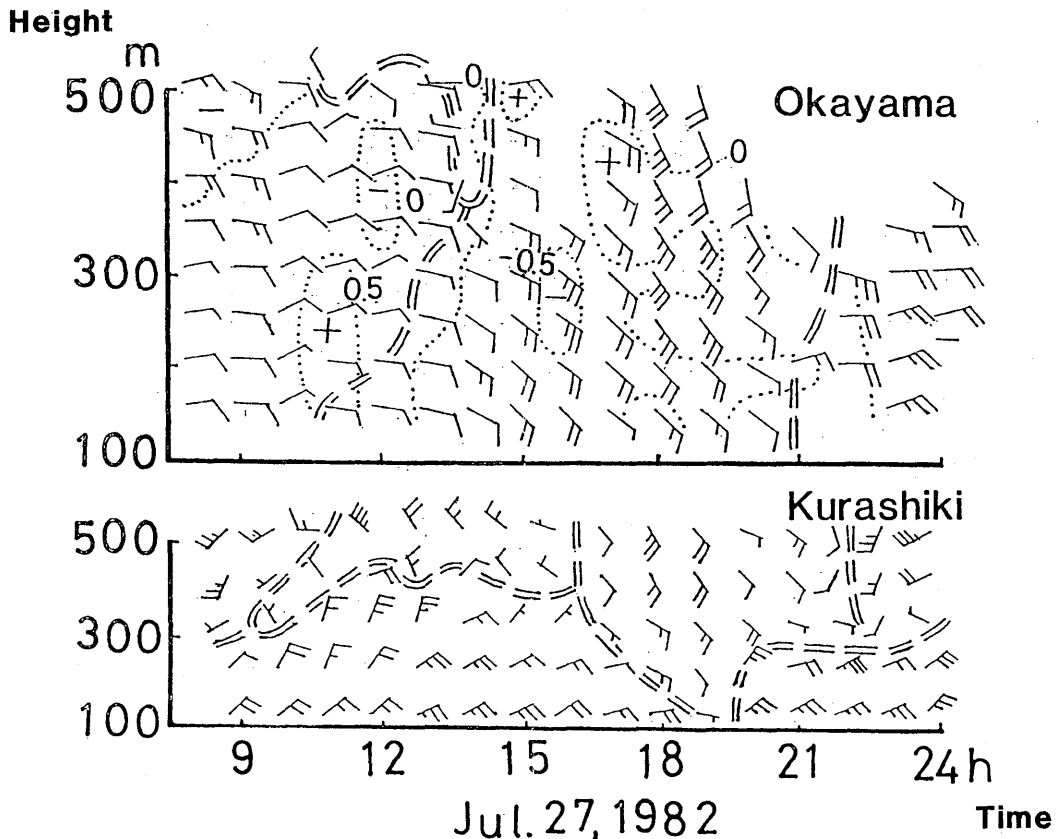


Fig. 5.4 An example of the wind data observed over a flat inland field in Jul. 1982.
(Double broken line denotes systematic turn of the wind direction.)

および図 5.5 に図 5.4 と同じ時の岡山の水平方向の乱流パラメータ σ_u 鉛直方向の乱流パラメータ σ_w および風向の乱れ幅 σ_d の高度・時間断面図を示す。前年の新居浜のデータ（図 5.2 等）と比較すると、それぞれ次のことが特徴づけられる。

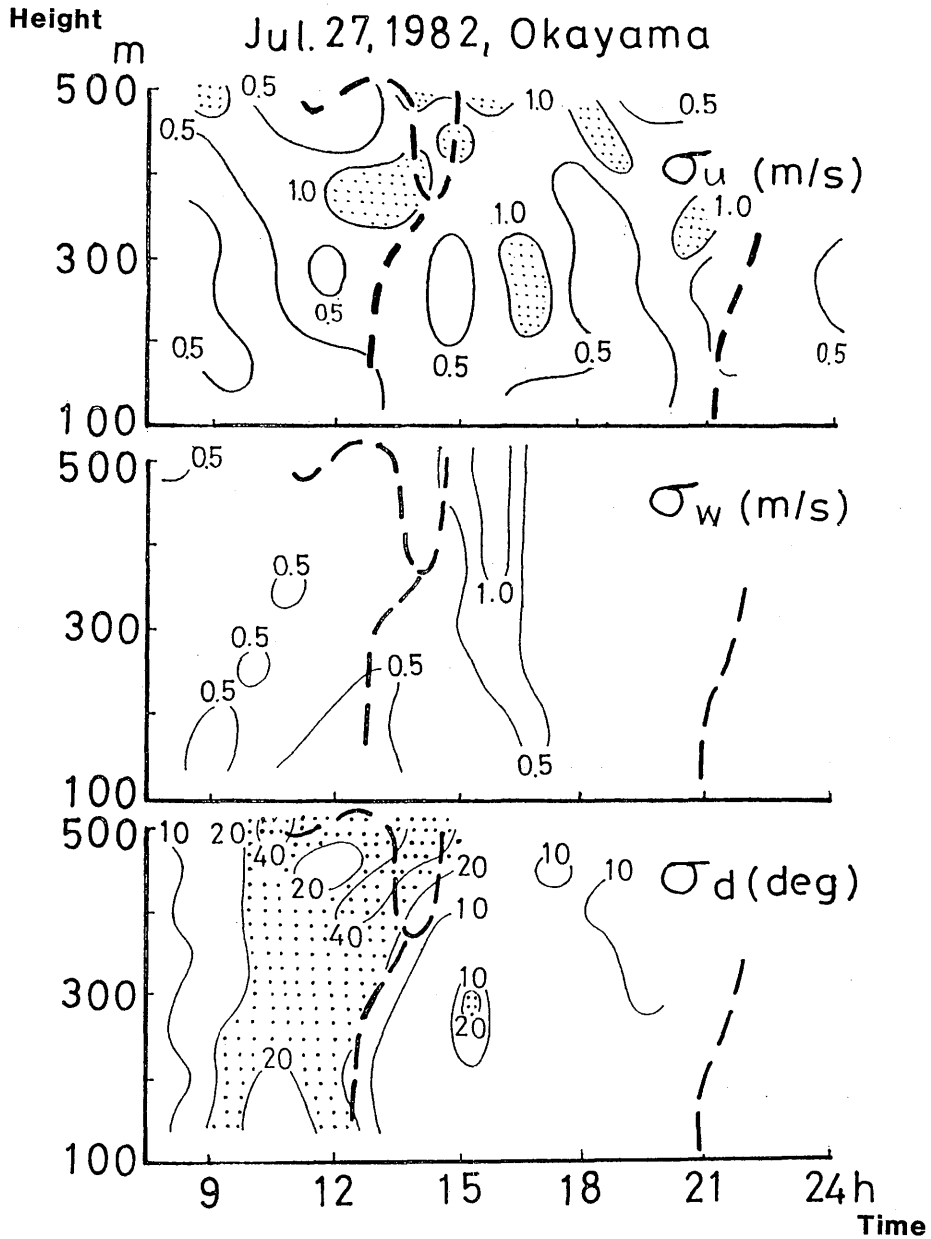


Fig. 5.5 An example of turbulent parameters over a flat inland field. (Jul. 1982 over Okayama)

新居浜海岸では、朝夕の海陸風の交替あるいは総観スケールの前線通過に対応して、風向急変と著しい鉛直流が起こり、乱流パラメータが3成分とも大きな値を示した。風向急変は短時間内に全層で起こり、海風、陸風とも一様に吹くときは乱れは小さい。

岡山では不安定な夏型配置のためあって、東よりの一般風に南東からの海風が重なっているのが認められるが、陸風は明らかでない。鉛直流は前線の通過前後に著しく大きい、海風の侵入に際して顕著でない。むしろ日中の弱い東よりの風系内で上昇流が持続する。測定地が水田地帯の孤立裸地の南西隅のため、東～北東の気流のときサーマルプルームが生じるためと思われる。これに対し、南東風のとき下降流を生じるのは、南東側に6階建ての庁舎（長さ80 m、幅20 m、高さ25 mくらい）があるため、建物によるダウンドラフトが起こっているものと思われる。

乱流パラメータのうち、風向の乱れ（ σ_d ）と水平風速の乱れ（ σ_u ）は定性的に一致し、気流系の境界（風向急変）で大きな値を示すが、鉛直流の乱れ（ σ_w ）はサーマルプルームやダウンドラフトに対応して、特定の時間帯あるいは特定の風向の一様な気流の中で大きくなっている。

5.3 拡散パラメータの検討

拡散パラメータの3成分の相関を調べるため、 σ_w と他の2成分の対応を求めた（図5.6）。一般にパイバルとゾンデでは拡散パラメータとして Ri と K_z しか求められないため、気象条件別に K_z と K_x 、 K_y の関係を求めておくことは、パイバル・ゾンデデータの利用価値も高める。岡山ではあらゆる気象条件の時を合わせて各成分の相関を求めても対応はよくない。しかし特定風系に限定すれば、0.8以上の相関が得られる。なかでもSE風データが弱風から強風に広く分布し、乱れの成分に特徴があるため図5.6にSE風のときの例を示す。白丸は風向急変直後1時間以内または直前1時間以内を意味し、斜線は夜間（19時～5時）の値を示す。これより風向急変時に各因子とも大きな値となりやすいことが認められ、特に σ_d にその傾向が強いが、相関にはあまり関係していない。また昼夜による相関差も少ない。ただし σ_w と σ_d より σ_w と σ_u の方がやや相関がよい。

ドップラーソーダの測定値から直接 K_z を求めるには、モーメントの拡散として

$$K_z = -\overline{u'w'} / \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

を使えばよいが、現時点では $\overline{u'w'}$ を求めるようプログラム化されていないため $\overline{u'w'} \approx (\overline{u'^2})^{1/2} \cdot (\overline{w'^2})^{1/2}$ と仮定し、 $(\overline{u'^2})^{1/2}$ と $(\overline{w'^2})^{1/2}$ を σ_u と σ_w から導く方法を採用した。 σ_u と σ_w からの換算も分布関数が記録されていないため、詳細は不明であるが、正規分布の中央部分を矩形とみなせば近似的に $\overline{u'} \approx \frac{50}{68} \sigma_u$ 、 $\overline{w'} \approx \frac{50}{68} \sigma_w$ が使える。ここでは変化傾向だけをみるため、

$$K_z \sim \sigma_u \cdot \sigma_w \left(\frac{\Delta u}{\Delta z} \right)$$

を求めた。その際、 Δz を50 mとし、 $\Delta u / \Delta z$ は上下二層を合わせて100 mの値を求めた。その

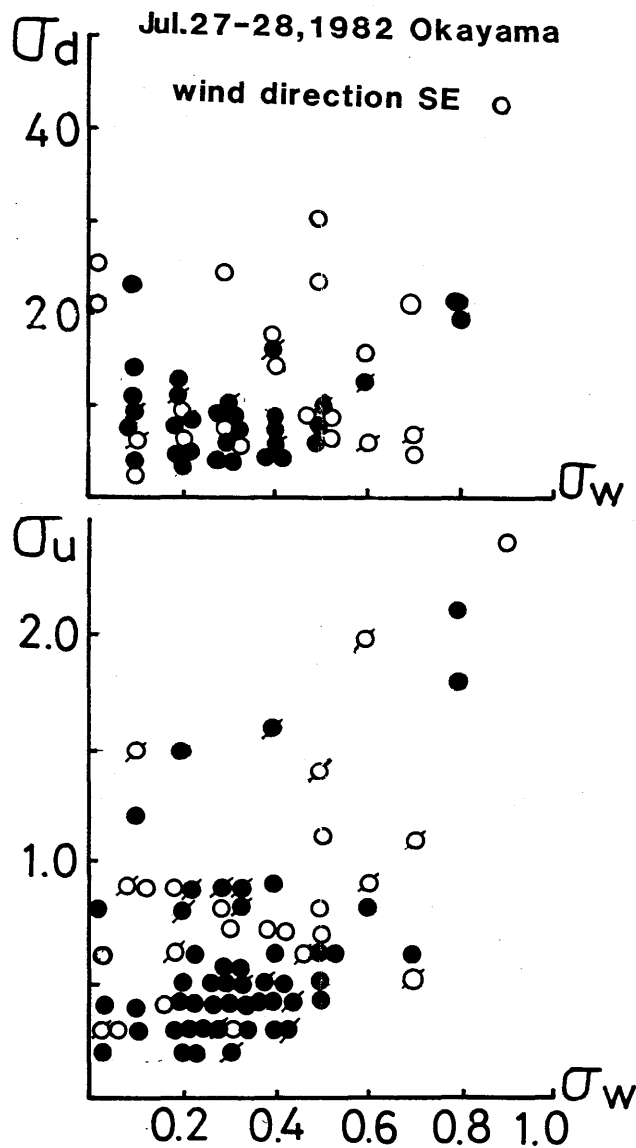


Fig. 5.6 Correlations between three dimensional components of the turbulent parameter. (white circles denote the case in one hour or less before or after a systematic wind turn and black circles mean the case in an uniform wind field. Slanting lines on some circles mean the data in the night time (19-5 local time)

結果は図 5.7 のようになり、絶対値が 100 を越える所があってやや大きすぎる感じがあるが、換算係数として $(50/68)^2 \approx 0.54$ を考慮するとほぼ妥当なレベルになる。3 日間の変化傾向から、風系や前線との対応を求めると一般に日中の風向が ENE のとき大きな値が続き、SE のとき、とき折団塊状の値を示す。風向急変の最中あるいは直後に全層にわたり大きな値となることが多い。

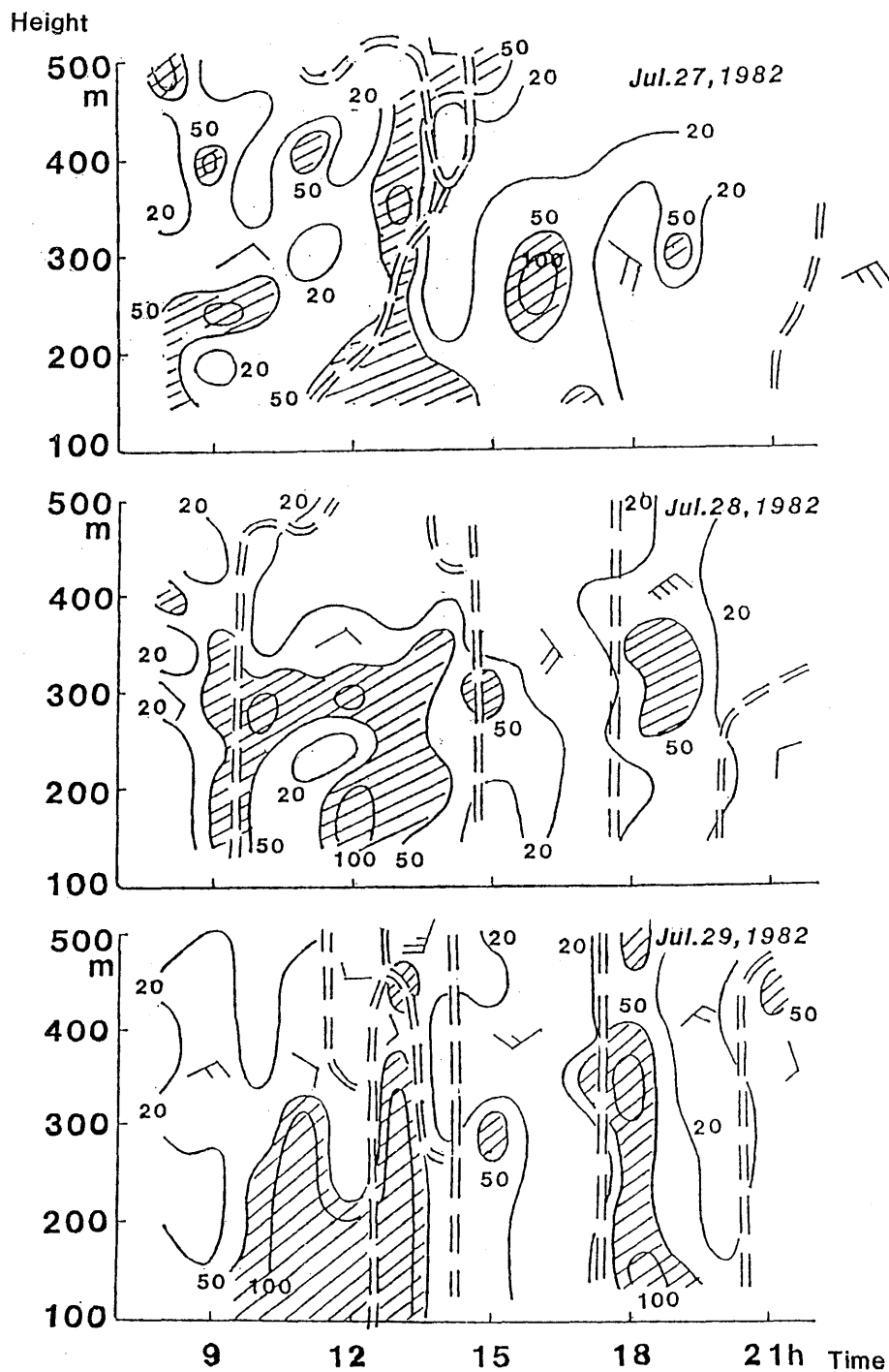


Fig. 5.7 Cross-section of Kz over Okayama in Jul. 1982

S W域では概して値が小さい。これらは測定点が広い水田地域の中にあり、NE方向に200m×150mくらいの裸地のグラウンド、SE方向に長さ80m、高さ25m、幅20m くらいの庁舎があることを考えると、日中のサーマルプルームや庁舎のダウンドラフトとして説明づけられる。

5.4 あとがき

ドップラーソーダは気流・乱流を3次元的に自動測定でき、パイボールや低温ゾンデでは得られない要素も測れる利点がある。また気球を飛ばして測る方式は、いつも流されながら異なる点の値を測るため、山岳や都市などの局地現象への寄与を識別することが難しいのに対し、ドップラーソーダは常に上空の同一点の値を測るため、地形効果や熱的效果の検証に適している。

今後、測定高度を1,000m以上に延ばすことができれば、各方面で役立つものと思われる。

参 考 文 献

- Balser, M., C. A. Mc Nary, A. E. Nagy, R. Lovel and D. Diskson, 1975: Remote wind sensing by acoustic radar. Jour. Appl. Met., Vol. 15, pp.50-58.
- Balser, M., C. A. Mc Nary and D. Anderson, 1976: A remote acoustic wind sensor for air port approaches. Jour Appl. Met., Vol. 15, pp. 665-668.
- Balser, M. and D. Netterville, 1980: Measuring wind turbulence with doppler-acoustic radar. Report of Xonics Technology, Inc.
- Beran, D. W. 1974: Remote sensing wind and wind shear system. Report No. FAA-RD-74-3.
- Beran, D. W. et al., 1974: Operational test results of acoustic doppler wind shear detector, 6th Conference on Aerospace and Aeronautical Meteorology, Nov. 12-15, 1974 (Amer. Met. Soc.), pp. 412-417.
- Beran, D. W. and F. F. Hall, Jr., 1974: Remote sensing for air pollution meteorology, Bulletin of American Meteorological Society, Vol. 55, No. 9, pp. 1087-1105.
- Fukushima, M., 1975: Status of sodar observation in Japan. Journal of Radio Research Laboratories, No. 109, pp. 151-164
- Gaynor, J. E., 1977: A coustic doppler measurement of atmospheric boundary layer, velocity structure functions and energy dissipation rates. Jour. Appl. Met., Vol. 16, PP. 148-155.
- Kaimal, J. C. and D. A. Haugen, 1977: An acoustic doppler sounder for measuring wind profiles in the boundary layer Jour. Appl. Met., Vol. 16, pp. 1298-1305.
- 西宮 昌, 赤井幸夫, 1977: 音波探査による下層大気の風の観測, 電力中央研究所, 278026
- 福島 圓, 1975: ソーダ観測の現状, 日本音響学会誌, 31巻7号, pp.458-562
- 吉川友章, 佐藤純次, 1979: ドップラーソーダによる気流と拡散パラメータの鉛直分布の測定, 大気汚染学会予稿集, 503

付 録

1. 各種の測定による拡散パラメータの算定式

(1) パイボールと低層ゾンデによる K_z

$$K_z = \begin{cases} l^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} (1 + \alpha Ri) & Ri \leq 0 \\ l^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / (1 - \alpha Ri) & Ri > 0 \end{cases}$$

$$l = \frac{K_o (Z + Z_o)}{1 + K_o (Z + Z_o) / R}$$

$$\alpha = -3.0 \quad R = E (R_o) U_g / f \quad E = (R_o) \approx 0.00027$$

$$Ri = [gd\theta/dz] / \theta \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]$$

(2) ノンリフトバルーンによる K_z

$$K_z = \overline{w'^2} \int_0^t R(\xi) dt$$

$$R(\xi) = \frac{\overline{w'(t)w(t+E)}}{\overline{w'^2}}$$

(3) ドップラーソーダによる σ

m_i を方向 i の受信音波ピータと発信周波数のずれ、 $x(t)$ を m の時間分布関数とすると

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt - m_i^2$$

これを N 回測定して重合平均すると

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{N} [\sum \sigma_i^2 - \sum_N m_i^2 - \overline{m_i^2}]$$

2. ドップラーソーダのMT収録仕様

ドップラーソーダのデータは内蔵の電算機によってリアルタイムに処理され、指定された気象要素が即座に印字されるとともに、MTに収録される。その内容と配列は表 5.1 のようになっている。

まず始動の際にインプットする基本データが示され、内蔵電算機の計算にとり入れられる。その内容は、気温（音速を決めるのに各測定時の値が必要であるが、 ± 10 m、誤差にして $1/30$ 以下を容認するなら、月平均値を見こして与えれば十分）、測定点の最低高度、同じく最高高度、高度間隔、発信音波のパルス時間、1 回のデータ処理をする時間間隔（各要素はこの間の重合平均値として算出される）、音波の発信時間間隔となっている。さらに測定点の配置に関するパラメータが 4 個、す

すなわち、基本点（発信、鉛直成分受信点）から受信機1までの距離、基本点から受信機2までの距離、基本点と受信機1の海拔高度差、基本点と受信機2の海拔高度差、受信機2（南北成分用）の位置の真北からのずれ角度（右まわりを正とする）、受信機1と2のなす角の90度からのずれが入力される。これで指定時間（ここでは120秒）ごとの平均値が出力されるが、今回は気象庁の風の平均時間が10分であることや、MTの容量を考慮して、最後のコメントで10分の平均値にまとめるよう指示してある。

これより気流と乱流パラメータが一定の配列で収録される。すなわち、測定月、日、年、時刻、分、平均化時間が入ったあと、150m から 500m まで50mごとに、高度、平均風向、平均水平風速、平均鉛直風速、風向変動幅標準偏差、水平風速変動標準偏差、鉛直風速変動標準偏差の値が繰返される。

なお、パイボール、低層ゾンデ等による特別観測期間中は、ドップラーソーダはここに示した例のように毎10分ごとの値を連続測定したが、その他の期間は1時間に1回、毎正時前10分間の平均値を測定するように指示した。

LI
LI
COMMAND OK

TEMPERATURE 20 DEG C
MINIMUM ALTITUDE 150 METERS
MAXIMUM ALTITUDE 500 METERS
ALTITUDE SEPARATION 50 METERS
PULSE LENGTH (LONG) 140 NSEC
AVERAGING TIME 120 SEC
PULSE REP INTERVAL 5.0 SEC
GEOMETRY PRINT OPTION 4
BASE TO RECEIVER 1 235 METERS
BASE TO RECEIVER 2 305 METERS
HEIGHT OF RECEIVER 1 0 METERS
HEIGHT OF RECEIVER 2 0 METERS
ROTATION ANGLE 35 DEG
SEPARATION ANGLE 0 DEG
SUNSHATION PERIOD 10 MIN

7/24/82		13:0		10-MIN. AVE.			
ALT	DIR	V	VZ	SD	SV	SZ	
N	DEG	N/SEC	N/SEC	DEG	N/SEC	N/SEC	
150	102	6.1	0.3	8.2	0.5	0.4	
200	105	7.4	0.5	6.1	1.0	0.5	
250	107	8.5	0.5	5.8	0.9	0.4	
300	107	10.0	0.5	3.1	0.9	0.2	
350	110	10.0	0.5	4.8	1.4	0.4	
400	112	11.9	0.8	7.6	1.3	0.4	
450	114	12.7	0.7	6.7	1.3	0.5	
500	114	12.4	1.2	6.1	0.3	0.5	

7/24/82		14:0		10-MIN. AVE.			
ALT	DIR	V	VZ	SD	SV	SZ	
N	DEG	N/SEC	N/SEC	DEG	N/SEC	N/SEC	
150	105	4.9	0.1	5.9	0.7	0.6	
200	110	5.8	0.2	4.5	0.7	0.5	
250	113	4.5	0.2	7.0	1.0	0.4	
300	113	7.5	0.1	5.9	1.0	0.5	
350	114	8.5	0.1	5.3	1.1	0.5	
400	118	10.2	0.1	3.8	0.8	0.5	
450	120	11.5	0.1	2.9	0.5	0.5	
500	127	12.4	0.2	2.9	0.4	0.4	

7/24/82		13:10		10-MIN. AVE.			
ALT	DIR	V	VZ	SD	SV	SZ	
N	DEG	N/SEC	N/SEC	DEG	N/SEC	N/SEC	
150	101	5.4	0.2	4.5	1.1	0.7	
200	105	6.6	0.3	7.3	1.1	0.4	
250	105	7.3	0.4	7.9	1.0	0.5	
300	108	8.5	0.3	5.9	1.1	0.5	
350	109	9.3	0.3	6.8	1.4	0.4	
400	111	10.4	0.2	6.1	1.3	0.4	
450	113	11.7	0.2	4.0	1.2	0.4	
500	115	13.2	0.1	3.5	1.6	0.4	

7/24/82		14:10		10-MIN. AVE.			
ALT	DIR	V	VZ	SD	SV	SZ	
N	DEG	N/SEC	N/SEC	DEG	N/SEC	N/SEC	
150	107	5.0	0.2	6.2	0.4	0.2	
200	111	6.1	0.2	4.8	0.5	0.2	
250	112	6.7	0.1	5.0	0.3	0.1	
300	114	7.5	0.3	4.1	0.4	0.2	
350	114	9.1	-0.1	3.0	0.6	0.1	
400	120	10.2	0.5	3.8	1.1	--	
450	121	12.4	0.0	1.3	0.5	--	
500	--	--	--	--	--	--	

7/24/82		13:20		10-MIN. AVE.			
ALT	DIR	V	VZ	SD	SV	SZ	
N	DEG	N/SEC	N/SEC	DEG	N/SEC	N/SEC	
150	97	5.2	-0.0	4.1	0.8	0.4	
200	101	6.0	-0.0	4.2	0.9	0.5	
250	104	6.6	-0.0	7.0	1.0	0.5	
300	108	7.2	0.0	5.9	0.8	0.5	
350	112	7.4	0.2	5.2	1.0	0.4	
400	112	9.4	-0.0	4.9	0.8	0.4	
450	114	10.3	-0.1	2.7	1.2	0.5	
500	115	11.7	-0.2	4.0	0.6	0.5	

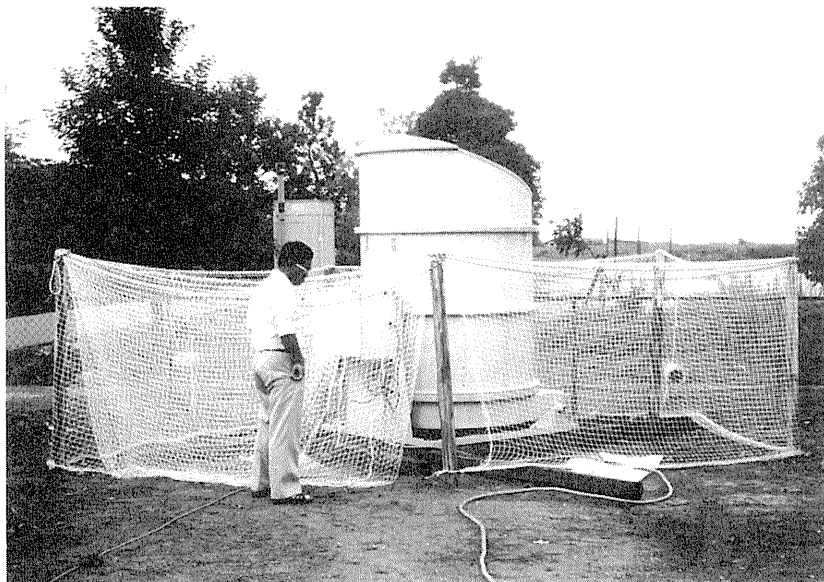
7/24/82		14:20		10-MIN. AVE.			
ALT	DIR	V	VZ	SD	SV	SZ	
N	DEG	N/SEC	N/SEC	DEG	N/SEC	N/SEC	
150	104	4.9	0.1	5.4	0.6	0.5	
200	108	5.7	0.0	5.4	0.8	0.3	
250	110	4.6	-0.1	5.9	0.8	0.4	
300	111	7.9	-0.2	4.8	0.7	0.5	
350	114	9.3	-0.3	5.0	1.1	0.5	
400	118	10.0	-0.1	2.7	0.8	0.4	
450	116	11.8	-0.4	2.6	0.7	0.4	
500	125	12.4	-0.2	2.7	0.8	0.3	

7/24/82		13:30		10-MIN. AVE.			
ALT	DIR	V	VZ	SD	SV	SZ	
N	DEG	N/SEC	N/SEC	DEG	N/SEC	N/SEC	
150	105	5.6	0.1	5.2	0.5	0.4	
200	106	6.8	0.0	6.0	0.6	0.1	
250	110	7.7	-0.0	4.1	0.7	0.2	
300	112	8.9	-0.2	4.5	0.8	0.3	
350	115	9.6	-0.4	6.1	1.5	0.3	
400	120	9.7	-0.3	4.6	0.8	0.0	
450	122	11.2	-0.3	4.0	1.4	0.2	
500	124	13.0	-0.5	3.4	2.0	0.0	

7/24/82		14:30		10-MIN. AVE.			
ALT	DIR	V	VZ	SD	SV	SZ	
N	DEG	N/SEC	N/SEC	DEG	N/SEC	N/SEC	
150	102	5.5	-0.1	5.4	0.6	0.7	
200	105	6.3	-0.1	6.2	0.7	0.6	
250	108	7.4	-0.2	5.9	0.7	0.6	
300	111	8.6	-0.3	5.1	0.7	0.6	
350	115	9.0	-0.3	4.1	0.6	0.5	
400	116	10.2	-0.4	3.0	0.4	0.5	
450	120	10.0	-0.3	3.6	0.7	0.4	
500	118	10.6	-0.5	5.3	0.8	0.4	

Table 5.1 Data format of the real time printout and MT recording of the Doppler sodar system.

(a)



(b)

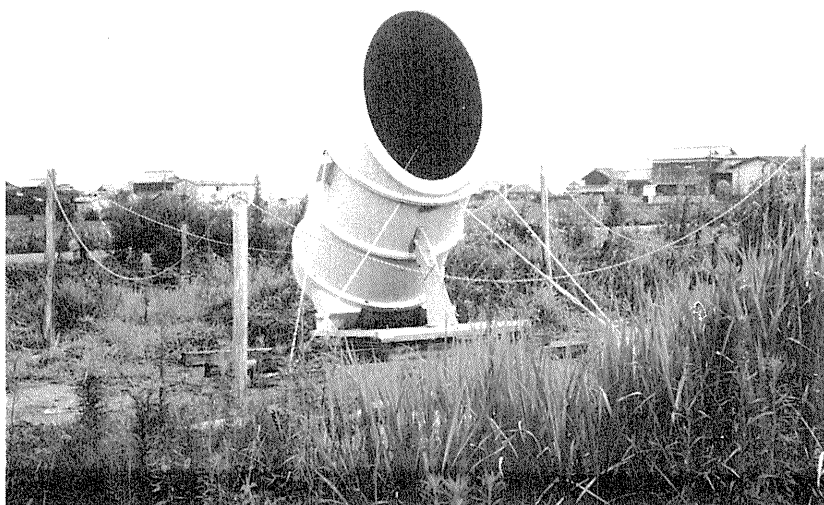


Fig. 5.8 Running state of the Doppler sodar at Okayama. a) Transmitter and receiver 3.
b) Receiver 2.

第6章 エア・トレーサーによる拡散実験*

6.1 はじめに

最近電子計算機の大型化および高速化に伴って大気汚染質の濃度予測や、海陸風の循環について数値シミュレーションによる研究が活発に行われている。また、汚染質の長距離・長時間輸送が全球的な汚染に関連して関心を集めているが、これらのシミュレーションの結果の検証や野外拡散実験にはトレーサーによる方法がよく用いられており、現在までに種種の方法が開発されている。なかでもよく使用されているのが SF_6 でLambら、(1978a、1979b)は、 SF_6 と CBrF_3 を用いて大規模な拡散実験を行っている。この SF_6 は安定、安全、バックグラウンド濃度が低い等の特性のため日本でも大気拡散実験や汚染質の輸送に関連して巾広く用いられている。また、Ferberら、(1981)は、イギリスで製造された2種のパーフルオロカーボン、 C_7F_{14} および C_8F_{16} を用いて長距離の拡散実験を行っている。この物質は大気中におけるバックグラウンド値が非常に低く(C_7F_{14} で0.0024ppt)、分析感度が高いため長距離用トレーサーとして今後有望と考えられている。

その他次に述べるように過去に種種のトレーサー実験が行われている。Hay and Pasquill (1957)によるリコボジウムを用いた短距離の実験や、二酸化いおう(Cramer、1958a、1959b)、オイルフォッグ(Barad and Shorr、1954、Smithら、1958)やXenon 133のような放射性物質(Eggelton and Thompson、1961)を用いた例もあるが、これ等は現在大気環境中、特に都市に近い域では安全性、定量性等といった点でトレーサーとして不適とされている。硫化カドミウム亜鉛のような蛍光粒子も一時期広く用いられた(Brahamら、1952、Crozier and Seely、1955、Leighton、1975、Barad and Fuquay、1962 and Leightonら、1965)が、放出量を精度よく知ることが困難で、試料の定量にも精度に問題があり、現在はあまり行われていない。ウラン顔料は、有望と考えられたが(Robinsonら、1959)、高温に弱く、最近バックグラウンドが高くなっているとも考えられている。

このように多くのトレーサー物質があるが、これらは限界検出感度、試料の保存性、多重トレーサー機能および扱い易さといった点のすべてを十分に満たしているとはいえず、特に多重トレーサーとしての機能は不十分な状態となっている。上記の点で有望なのが、インジウム(In)やジスプロシウム(Dy)のような放射化分析感度の高い元素を使う方法で、In、Dyおよびアンチモン(Sb)では(Haines、1957、およびNorden and Van As、1979)、Dyでは(Kühnら、1976)、

* 佐藤純次：企画室 小林隆久：応用気象研究部、

In では (Dingle、1968 Dahl ら、1970)、Co では (Nakasa and Ohno、1967)、Au では (Guerin ら、1971) のような例がある。ここではこの方法について使うべき元素やその放出およびサンプリング方法について検討して開発したエア・トレーサーシステムについて述べるとともに、このシステムと SF₆ との比較や、瀬戸内海で行った海陸風循環内におけるトレーサー輸送実験について報告する。

6.2 Activable Multiple Air Tracer (AMAT) システム

この方法は放射化分析感度の高い、主として希土類元素の化合物を粒子として放出し、フィルター上にサンプリングして放射化分析により定量化するものであり、バックグラウンドの低い物質を選ぶことにより、少量の放出で広範囲の拡散実験を行うことができる。また、フィルター上に捕集するため、予測濃度が低い場合や捕集時刻を細かく特定する必要のない時には長時間サンプリングすることによって蓄積できるため都合がよい。さらに、試料は元素のため長期間の保存も可能であり、フィルターのため運搬も容易である。また後述するような方法で元素を選択すれば、容易に多重トレーサー実験を行うことができる。欠点としては、SF₆ のように短時間のサンプリング (数秒～数分) では経済的に拡散実験を行うことができないことが挙げられる。

表 6.1 は本 AMAT法としてユーロピウム (Eu)、および Dy について SF₆ 等、種類のトレーサーと比較したもので、Relative Emission Rate の欄には、同じ希釈率でバックグラウンド値の10倍の濃度を得られるために必要な相対放出量を、SF₆ を 100 として記してある。つまり SF₆ を 1 kg 放出しなければならない場合、Eu だと 0.3 g でよいことになる。この右の欄は、この放出量に価格を乗じた経済性を表わすもので SF₆ を 1 として計算してある。Eu の場合 0.2 で、SF₆ より 5 倍の経済性があることがわかる。なお粒子トレーサーについては 10 m³ のサンプリングで計算してある。ハイボリウムサンプラーのように大吸引量ポンプを用いてより多く捕集すればさらに経済性は増すことになる。ただ、表 6.1 には分析費用は含まれていない。

上に示したように、経済性ではバックグラウンド値が低いことが重要だが、その他にトレーサー元素を選択するための条件としては・放射化分析感度がよいこと、・無害であること、・経済的であること、・半減期やピークエネルギー等、放射化分析が容易に行える特性を持つこと等がある。これらを考慮して、いくつかの元素を選択し比較したのが表 6.2 であり、半減期が約 1 時間以上、10¹² n/cm² sec の中性子フラックスに 1 時間照射した比放射能が 10⁵ dpm/ng 以上あるものから選択してある。表 6.1 と同様な相対放出量 (Eu を 10 としてある) および経済性を記してある。この計算で用いたバックグラウンド値は、日本での種類の測定値 (Mamuro ら、1973) からの代表的な値を用いている。Eu と Dy については 0.02 ng/m³ と 0.1 ng/m³ を用いているが、瀬戸内海での実験での値は各 0.03 ng/m³、0.08 ng/m³ であった。この表から最もよいと考えられるのが、Eu、Dy、ホルミウム (Ho) および Lu であり、また In もよいが場所によりバックグ

Table 6.1 Comparison of various air tracer methods. The asterisks mean 10 m^3 sampling of air.

Tracers	Molecular Weight (g)	Sensitivity	Background Concentration	Cost/Kg (Yen)	Relative Emission Rate	Relative Cost/Emission
SF ₆	146	1. ppt	1. ppt	2,300	100	1
C ₇ F ₁₄	350	< 1 ppt	0.0024 ppt	23,100	0.6	0.06
C ₈ F ₁₆	400	< 1 ppt	0.026 ppt	23,100	7.2	0.72
Uranine Dye	121	100×10^{-12} g	(0.1 ?) ng	1,000	1.5	0.01*
Fluorescent Particles	210	100×10^{-12} g	(0.1 ?) ng	2,500	1.5	0.02*
Eu	152	20×10^{-12} g	0.02 ng	15,000	0.03	0.2*
Dy	162	20×10^{-12} g	0.1 ng	3,700	0.15	0.25*

Table 6.2 Comparison of the characteristics of activable multiple air tracers. The asterisk means 1 hour irradiation of 10^{12} n/cm²/sec neutron flux.

Elements	Half-life	Specific Radioactivity* (dpm/μg)	Sensitivity (ng)	Background Concentration (ng/m ³)	Relative Emission Rate	Relative Cost/Emissions
In	54m	2.5×10^7	0.006	0.1-20	2,000	400
Sm	1.96d	1.4×10^5	0.1	0.07- 4	400	144
Eu	9.2h	1.3×10^7	0.02	0.02-	2	3
Dy	2.3h	3.9×10^7	0.02	0.1 -	10	4
Ho	1.1d	3.4×10^5	0.09	(0.1 ?)	10	8
Lu	3.7h	1.3×10^6	0.03	<0.05	5	15
Re	16.7h	4.6×10^5	0.2	(0.1 ?)	10	45
Ir	19.0h	5.7 ± 10^5	0.2	(0.1 ?)	10	90
Au	2.7d	2.0×10^5	0.07	0.2-0.1	10	45

ラウンド値が高い場合がある。

6.2.1 放出方法

粒子をトレーサーとして放出する場合には、自由落下による沈着が無視できるよう十分小さな粒子として放出する必要がある。この方法としては、トレーサー物質を溶液に溶かし、アトマイズしたり、沸点以上に熱して放出するものがある。前者としては Beniamin and Lee (1975)、後者としては Kühn ら、(1976) や Dingle (1968) が Dy や In を flare から放出し、Dahl ら、(1970) は In をアルコール溶液にしてオイルバーナーから放出、Thomas ら、(1973) は Acetone hexane を燃焼させて放出した。また、Norden and Van As (1979) は In をエタノールに溶かし、燃焼させてサブミクロン級の粒子発生装置を作った。

今回、われわれが用いた方法は圧縮空気を用いる特殊なバッフル板のついた噴霧器で、トレーサ

一物質を水に溶かし、超微霧として直接大気中に放出するもので（図 6.1）この放出粒子の累積粒子径分布を図 6.2 に示してある。図 6.2 は、放出点から風下 10 m、100 m 及び 20 km においてアンダーセンサンプラーにより測定したもので、90% 以上が空気動力学径 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒子として放出されていることが分かる。この場合の沈着速度は $0.1\sim 0.3\text{ cm/sec}$ である（Sehmel、1980）。より小さな粒子として放出するには、Norden and Van As（1979）のように燃焼させればよいが、飛行機やヘリコプターから放出する計画もあったため、この方法を採用した。

6.2.2 サンプリング

トレーサーの捕集は、フィルター上に行う。ポンプは、運搬や操作上コンパクトなものが好ましく（Ferber ら、1981）、分析や経済性の面ではできるだけ採気量の多いものが望まれる。ここでは主としてハイボリウムサンプラーを用いたが、これは吸引量が大い反面、音が大きくかさばり重量も大きくまたバッテリーでの運転は困難という欠点もある。このため一般的には予測濃度の高

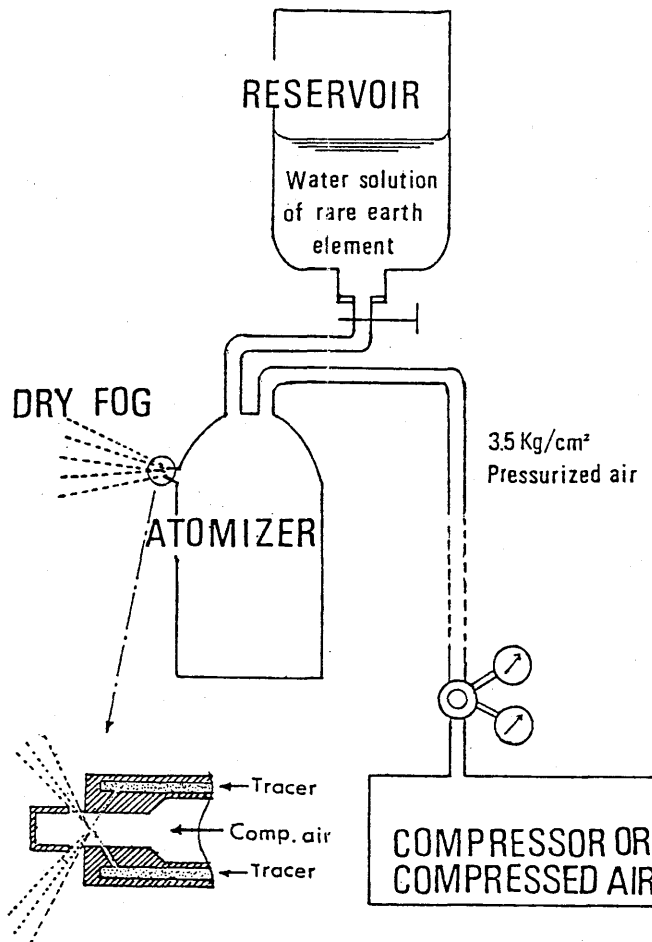


Fig. 6.1 Atomizer for releasing AMAT.

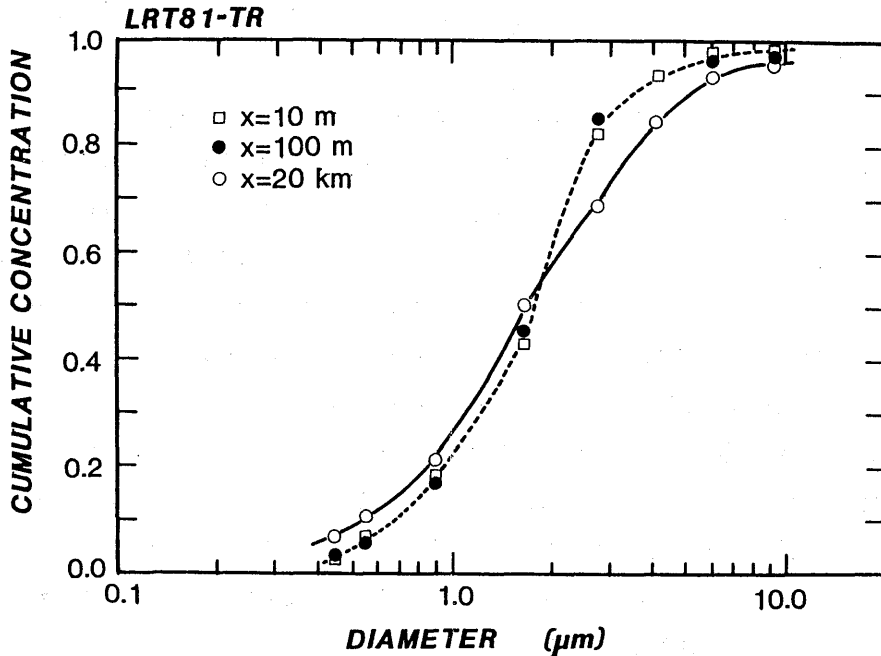


Fig. 6.2 Cumulative distributions of the particle diameters generated by the atomizer at 10 m, 100 m and 20 Km.

い所ではローボリウムサンプラー等コンパクトなものにし、低い所ではハイボリウムサンプラーにすればトレーサー捕集量のばらつきも少なくなり分析も容易になる。なお、フィルターを自動的に交換する自動サンプラー等を利用することによる省力化も望まれる。

フィルターについては、捕集後原子炉で10サンプル程度一度に照射できるよう、ハイボリウムサンプラーでは10cm ϕ のものを使用した。また妨害元素の少ないことも必要なため、圧損はやや大きいが妨害元素の少ないワットマン41や、価格は高いが上記の点でより優れているテフロン製のPF-1フィルターを使用した。

なお、サンプリングは、土砂等の舞い上がりによる妨害元素の捕集を避けるため、建物の屋上などある程度の高さを持つ所や、草地のような場所で行い、フィルター交換も汚染されないよう十分注意して行った。

6.3 トレーサー実験

6.3.1 新居浜におけるトレーサー予備実験

新居浜においては1980年7月22～24日、前章までに記述した野外の総合気象観測と同時に、その一環としてAMATトレーサーの予備拡散実験が行われた。新居浜は西日本の瀬戸内海に面した工業都市で、石鎚山脈が海岸から南側約8 km にせまっている。海風時、陸風時に各Eu、Dyを新

居浜沖合の漁船（ Dy_1 、 Dy_2 、 Dy_3 ：数字はランナンバーを示す）と新居浜の南、海岸から7kmの高合から（ Eu_1 ）放出した（図6.3）。

サンプリングは、図6.3に示すように測定点Dから点Iまでの6か所でハイボリウムサンプラーによって行った。陸風の場合、放出点からサンプリング地点までの距離は、点Iで2km、点D～Hで5.5～6.5kmで $U=1\text{m/sec}$ とした場合、5.5～6.5kmでのブルームの軸上での予測濃度は放出率 $Q=1\text{g/sec}$ とした場合 $5 \times 10^{-7}\text{g/m}^3$ となる。また、海風時、沖合5kmから放出（run 1）した場合、点D～Hは放出点から6.5～8.5km、Iは10.5kmとなり、10.5kmでの予測濃度は $2 \times 10^{-7}\text{g/m}^3$ となる。この新居浜での陸風の吹く時間帯は、3時～6時、また海風は、10時～16時頃で実験は海風時に3回、陸風時に2回の計5回行った。

放出は Eu 、 Dy とも約40gを1～2時間で行い、サンプリングは、100分間捕集・20分間でフィルター交換のサイクルを連続して行った。採気量は、15～60 m^3 である。放出高度は、船においては海面上約3m、陸では約10mの崖の上から前述した圧縮空気を利用した特殊噴霧器で行った。気象条件は、7月23日、12時30分～14時50分の海上放出時に前線通過による強風・強雨があった他は、 $U=1\sim 2\text{m/sec}$ の状態であった。1例として7月22日、午前8時の新居浜市の地上風向・風速を図6.4に示す。点線は小高い丘のある所を示すがこのために風系が乱れている。

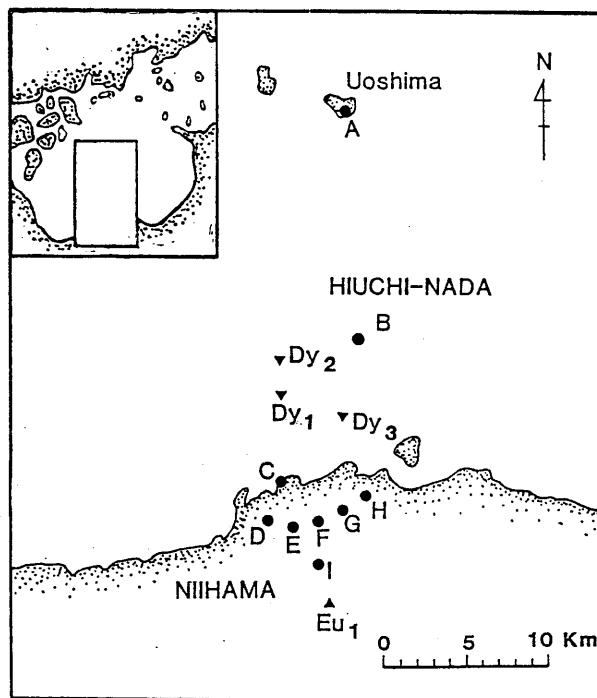


Fig. 6.3 Location of the Niihama Experiment region and the sampling network.

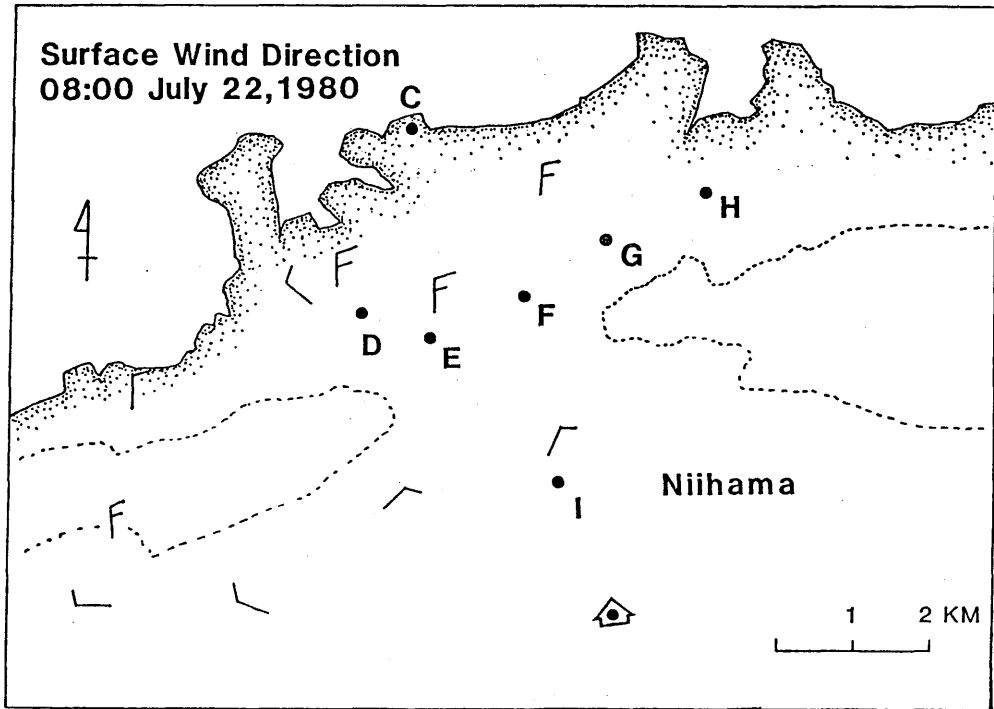


Fig. 6.4 Surface wind system in the Niihama area at 08:00, July 22, 1980.

サンプリングした試料は立教大学原子力研究所の実験用原子炉 TRIGA-II型で放射化し分析した。原子炉の中性子束は、 $4 \times 10^{12} \text{ n-cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ で照射は30分間、冷却時間は60～100分、測定時間300秒で行った。Dy およびEu の定量に用いたエネルギーは各 94Kev、122Kev である。なお照射は1カプセルに10試料ずつ入れて同時に行った。

図 6.5 に海風時の結果を示してある。A～I がサンプリング地点で、縦軸に時間、横軸にバックグラウンドレベルに対する濃度比を示してある。1目盛が5倍を表わす。1回目の放出は、7月22日6時15分～7時10分、沖合5km でこの場合には約2時間遅れて、地点Hにおいて26倍の濃度が観測された。2回目の放出は、7月22日12時～13時45分、沖合7km でこの場合も約2時間後に、今度は地点Fに32倍の濃度が観測された。それぞれの濃度は、2.3 ng/m、2.9 ng/mである。

図 6.6 は陸風時の結果であるが、1目盛が50倍となっている他は、図 6.5 と同じである。1回目は7月23日3時～6時12分に放出した。放出地点から2km のI地点では、すぐに89倍、続いて113倍の濃度が見られ、また地点Dでは約2時間後に142倍の濃度が観測された。2回目は7月24日3時16分～4時11分でこの場合は最も近いI地点でも2時間後に235倍の濃度が観測された。プルームの軸濃度としての計算による予測濃度と観測値との比較は表 6.3 の通りである。

プルームモデルからも分かるように煙源の近距離では煙流軸を少しでも外れると、濃度は激減す

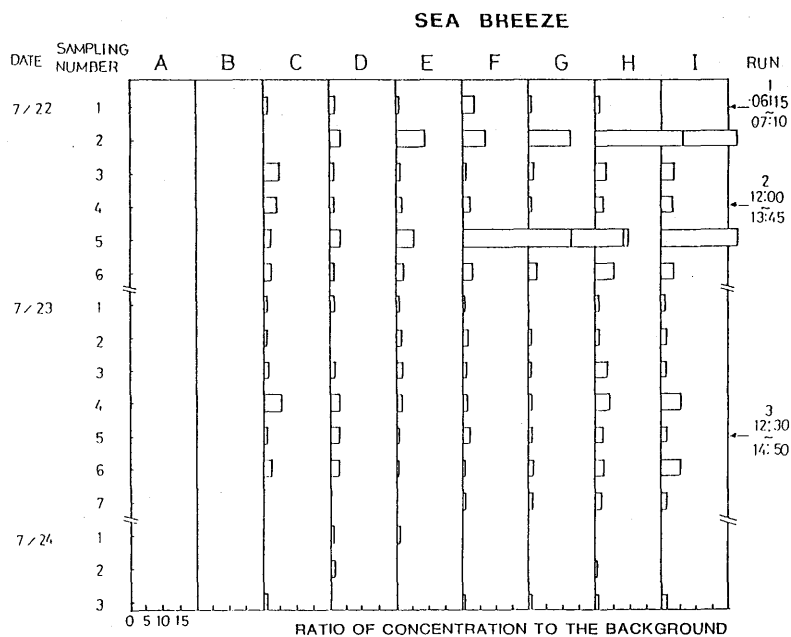


Fig. 6.5 Time variation of AMAT (Dy) concentration after release during sea breeze. A and B are the sampling points at Uoshima and 5 Km offshore, respectively.

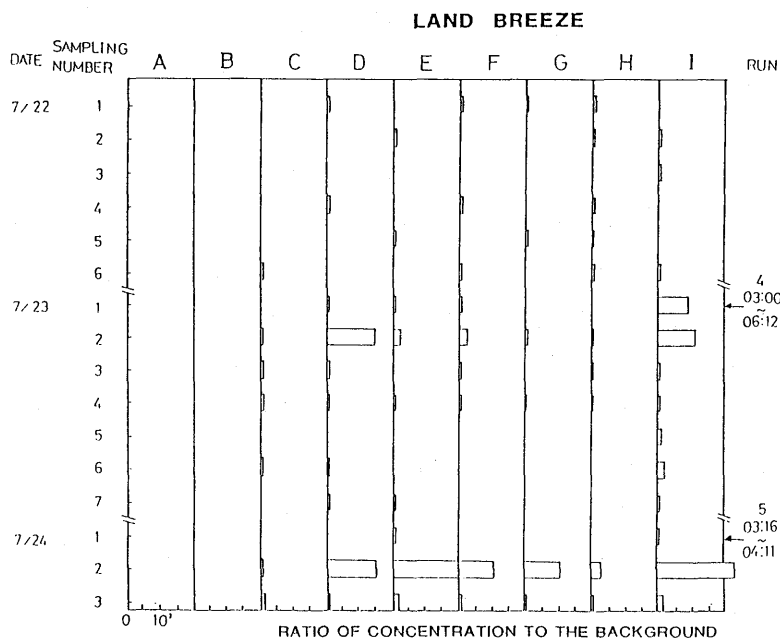


Fig. 6.6 Same as Fig.7.8 but during land breeze.

Table 6.3 Comparison of predicted and observed axial concentrations in the Niihama Experiment.

Eu				Dy			
Downwind Distance	Run	Axial concentration		Distance Downwind	Run	Axial concentration	
		Predicted	Observed			Predicted	Observed
2 (Km)	4	4.5×10^{-6}	6.3×10^{-7}	8 (Km)	1	3×10^{-7}	1.8×10^{-7}
	5	4.5×10^{-6}	5.2×10^{-7}				
5 (Km)	4	6×10^{-7}	8×10^{-7}	10 (Km)	1	2×10^{-7}	1.5×10^{-7}
	5	6×10^{-7}	4.4×10^{-7}				

る。2 km における実測値の濃度は実際に正確な軸上濃度を示しているかどうかは観測点の密度からみてもそれ程正確ではない。一方、ある程度煙源から遠くなると濃度の横方向の分布はブロードになり、多少軸から外れても濃度はそれほどの差は持たない。

6.3.2 海陸風循環内における AMAT 輸送実験

(1) AMAT 輸送実験の概要

一般風が南西のときに実施した 1980 年 7 月の観測結果によって、燧灘周辺では海陸風による顕著な局地循環が出現することが確認された。この局地循環の特徴は、日中では燧灘のほぼ中央が風の発散域であり、これを挟んで中国側及び四国側に海風が発達している。特に四国側では反流が顕著であることも見出された。このような局地循環の中では、大気汚染物質が時間的及び空間的にどのような経過をたどって輸送されるかということも興味ある問題である。

開発したアクチバブル・マルチ・エア・トレーサー (AMAT) 法を用いることにより、数 10 km 程度の距離までは追跡可能であることも見積られている。従って 1981 年 8 月の実験では、エア・トレーサー測定網を前年の予備実験よりは空間的に拡張し、各実験毎における観測時間を延長することによって局地循環による物質の輸送を把握することを目的とした。

早朝の陸風時において、新居浜市の内陸 8 km 地点の地上高 10 m より Eu を約 1 時間 30 分放出した。一方日中の海風時には新居浜の沖合 20 km の燧灘中央付近において、高度 330 m より航空機によって Dy を 1 時間放出し、(図 6.7) また同時に沖合 10 km に碇泊した船によって高度 3 m より Ho を約 1 時間 30 分放出してこれらのトレーサーが海風によって輸送される経過を陸風時の場合と併わせて陸上および海上に展開した測定点において捕集し、それぞれのトレーサーの振舞を長時間にわたって観測した。

トレーサーの測定網は図 6.8 に示されている燧灘全域を取り囲む広域的なもの、この中に含まれる新居浜市を中心とした比較的密で局地的なもの (図 6.9) とを併せて展開した。この測定網は船による海上の 2 点を含む 23 か所のトレーサー測定点で形成されている。測定網を示した図にお

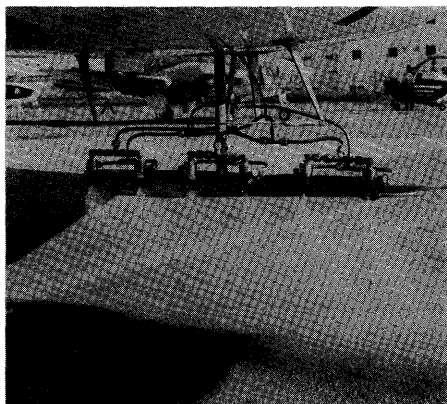


Fig. 6.7 Photograph of the atomizer on the aircraft.

ける Dy、Ho および Eu はそれぞれ記号の示すトレーサーの放出点の位置を示すが、Dy および Ho についてはどのような風向にも対処できるように新居浜中心部の公害センター（X地点）を中心に112.5度の範囲内でそれぞれ22.5度間隔で6点ずつをあらかじめ設定しておき、各実験毎に風向を考慮して放出点の位置を決定した。

トレーサーには大気中におけるバックグラウンド濃度が非常に低い希土類元素が用いられているが、新居浜市は工業地域であり、この地域における各トレーサー物質のバックグラウンド濃度値を把握して

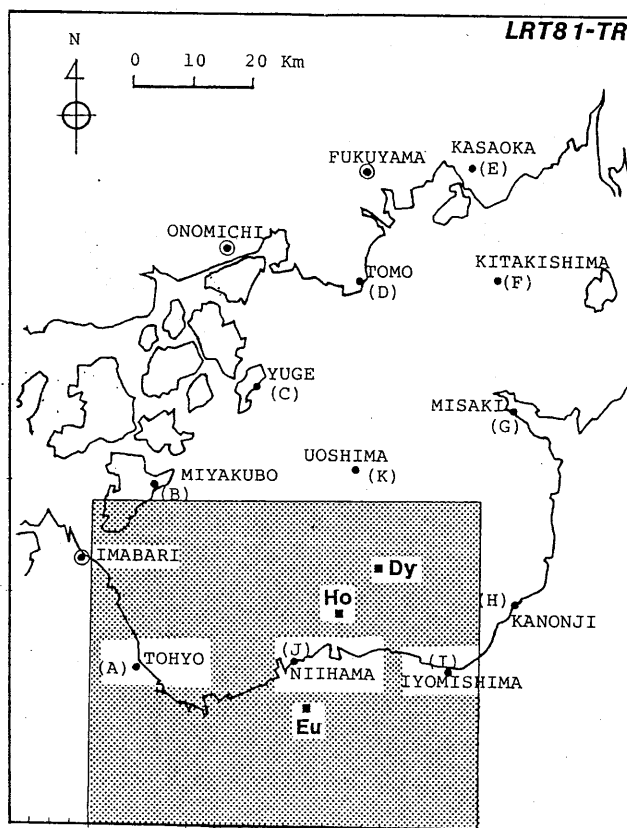


Fig. 6.8 Air tracer sampling network deployed in the Hiuchi-nada area. Dy, Ho and Eu mean the respective tracer releasing points. The local sampling network was deployed in the stippled area.

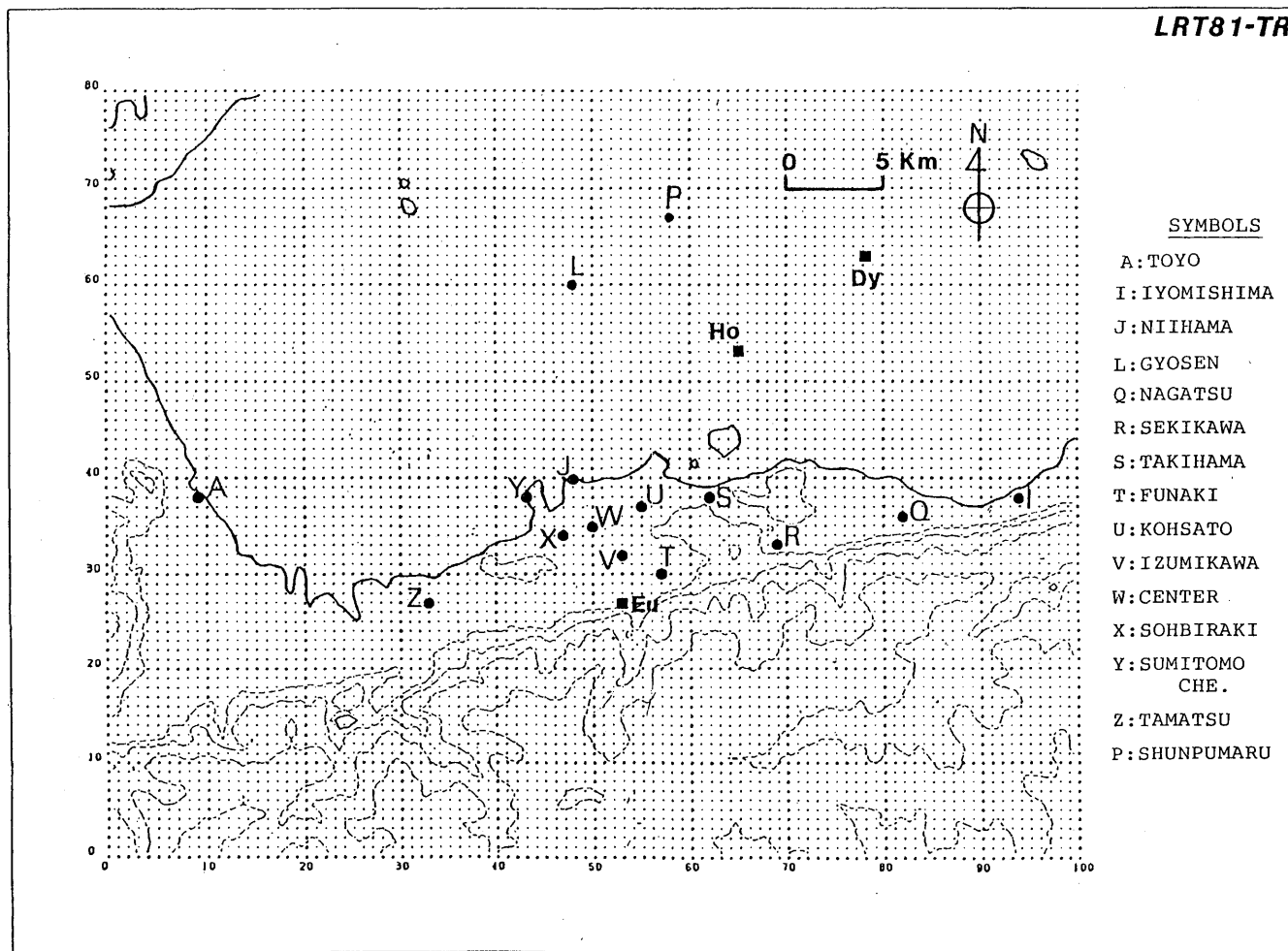


Fig. 6.9 Local sampling network around Niihama city.

おく必要がある。そこで第1回目のトレーサー放出の前日である8月18日にバックグラウンド濃度の日変化を惣開測定点(X)において測定し、この測定結果で各トレーサー物質のバックグラウンド濃度を代表させた。当日の気象条件は、天気は晴で風は昼間はN~NNE、3 m/s 以下、夜間はほとんど Calm であった。図 6.10 は例として Eu のバックグラウンド濃度の日変化を示したものである。Dy および Ho についても Eu と全く同じ日変化を示している。ここでは濃度の日変化の平均値 $\bar{C}_b$ と 3σ を加えたものを各トレーサーのバックグラウンド濃度 C_b として定義した。これらの C_b に関する統計値は表 6.4 に示されている。実験期間中の各トレーサーの濃度 (C) は

$$C = C_o - C_b$$

として評価した。ここで C_o は実測されたトレーサー濃度である。すなわち、バックグラウンド濃度日変化の最大値の 99.7 % 以上のトレーサー濃度だけを C として有意であると定義したわけである。

各トレーサーは表 6.5 に示される条件で8月19日および21日放出し、輸送や滞留状態を長時間にわたって観測するために、8月20日はトレーサーを放出しないで前日に放出された各トレーサーの濃度測定だけを継続した。

トレーサーが大气とともに挙動するには、大气中において重力落下が無視できる程度にトレーサー粒子が小さくなければならない。本研究における一連のトレーサー実験ではトレーサー物質であ

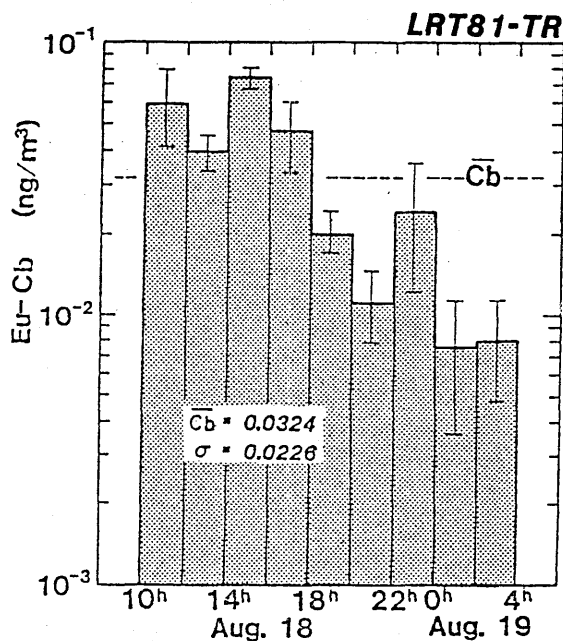


Fig. 6.10 An example of temporal variation of Eu background concentration (C_b) in the ground level air.

Table 6.4 The background concentration of each element observed in the ground level air.

Tracer Materials	C_b (ng/m^3)	σ (ng/m^3)	C_b (ng/m^3)
Eu	0.0324	0.0226	0.1002
Dy	0.1709	0.1257	0.5480
Ho	0.2918	0.2595	1.0703

Table 6.5 Tracer release conditions.

DATE	RELEASE TIME	RELEASED TRACER	TOTAL AMOUNT OF RELEASED TRACER (g)	RELEASE RATE (g/sec)	RELEASE HEIGHT (m)
AUG. 19	0430-0600	EuCl ₃ 6H ₂ O	500 (207.38)	0.0926 (0.0384)	10 ASL
	1420-1520	DyCl ₃ 6H ₂ O	2000 (862.26)	0.5556 (0.2395)	330 ASL
	1440-1620	HoCl ₃ 6H ₂ O	500 (207.38)	0.0833 (0.0362)	3 ASL
AUG. 21	0411-0535	EuCl ₃ 6H ₂ O	500 (217.40)	0.0992 (0.0411)	10 AGL
	1410-1512	DyCl ₃ 6H ₂ O	2000 (862.26)	0.5376 (0.2318)	330 ASL
	1450-1610	HoCl ₃ 6H ₂ O	500 (217.40)	0.1042 (0.0453)	3 ASL

る希土類元素化合物の水溶液をアトマイザーによってドライフォグの状態で放出したが、アンダーセンサンプラーによるDyトレーサーの動力学的粒子径分布の測定結果によると、粒子のほぼ100%が直径10 μm 以下であり、さらにそのうちの70%が2 μm 以下である(図6.2)。粒子の形態が球形であると仮定すると、直径2 μm の粒子の終局沈降速度は約 $1.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ であり、動力落下は無視してもさしつかえないであろう。

いまトレーサーの放出率を Q 、その大気中における濃度を C 、輸送風速を $\bar{u}$ とすると、

$$\bar{u} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty C dy dz + q = Q \quad (1)$$

の連続条件が成立つ。ここで q はトレーサーの樹葉や地面への付着、沈降等による損失である。このトレーサーの損失の問題は今後の研究課題として残されるが、今回の実験結果の解析では $q = 0$ 、すなわちトレーサーの変質、付着および沈降による損失はないものと仮定した。沈降によるトレーサーの損失を見積るための実験およびその結果については後述する。

(2) 海陸風によるトレーサーの輸送 (1981年8月19日の実験)

ハイボリウムサンプラーによるトレーサーの捕集はフィルター (PF-1) の目詰まりによる採気量の変動を防止するため、2時間毎にフィルターを交換しながら8月19日4時から20日20時までおよび21日4時から22日4時までの二つの期間に分けて連続的に行った。したがってここで評価する濃度は一連の2時間平均値である。さらに以下の解析においては、濃度はすべてトレーサー放出率で割った規準化濃度 (C/Q) を用いた。

Eu 放出点から5 km、Dy 放出点から22 km の測定点惣開 (X) における規準化濃度の時間変化を例として図 6.11 に示す。Eu 放出後すぐに顕著な濃度が出現しており、この濃度は陸風から海風へ転化した後も持続し、12時まで8時間に及んでいる。また風下8 km の住友化学測定点 (Y) においても濃度が6時間にわたって持続している。一方 Dy についても図 6.11 に見られるように、16時から10時間も濃度が続いている。Dy 放出開始から約2時間後に Dy 濃度が出現し始めているが、22 km の距離の輸送時間として2時間を考慮すると、この間の輸送風速は14時~16時のパイポール観測による300 m より下層の平均の風速 (約 3 m/s) と一致する。

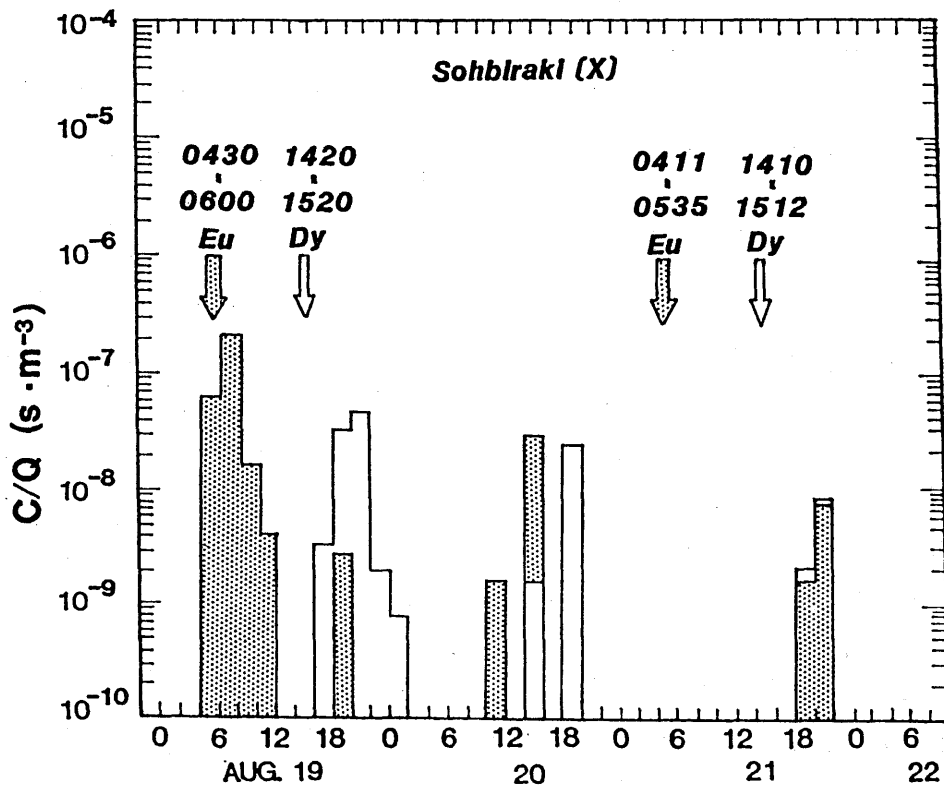


Fig. 6.11 The temporal variation of Eu and Dy tracer concentration observed at Sohbirak sampling point (X). The arrows show releasing times.

8月19日の瀬戸内地方は北緯25° 東経135° 付近に北上してきた台風8115号の影響が現われ始め、新居浜地域では早朝には西風であったが、1000 m より下層では6時、上層では11時に東風に転向している。しかしこのような状況の下でも新居浜地域では早朝には弱風ではあるが陸風が吹いている。この陸風の層の厚さは100～200 m くらいで非常に浅い(図6.12)。5時45分の温位の鉛直分布も200 m 以下の層が安定気層であることを示しており(図6.13)、山風も伴ったと思われるこの陸風の気層は非常に弱風で安定である。このような安定気層の中へ放出された Eu トレーサーのプルームは横方向にはそれほど拡散していない。図6.14は2時間平均濃度の地上分布を各時間ステップ毎に示したものである。図からも明らかなように、(A)の時間ステップではEu 放出点の風下方向にはほぼ一直線上にある測定点〔惣開(X)(濃度26.0)および住友化学(Y)(濃度16.4)〕にのみ濃度が出現しており、このことからトレーサープルームの拡散幅が狭いことが推察される。風速とトレーサー放出時間を考慮すると、これらの測定点ではこの時間ステップ内の後半以降にトレーサーが到達していることが分かる。トレーサーのプルームの長さが有限であるのでプルームの前端および後端では時間平均濃度の評価に留意が必要である。いま単純に風速が一定と仮定すると捕集時間Tにおける平均濃度を C_T とし、Tの間に実際にトレーサーが捕集されている時間を t とするとこの間のプルームの平均濃度 C_t は

$$C_t = C_T \frac{T}{t}$$

となる。今回の実験では実測濃度の時間分解能は2時間であり、厳密な t を得ることができないが、実測された風速によって t を推定し、トレーサーが到達した時点以降の時間平均濃度に補正すると括弧内の数値のようになり、次の時間ステップにおける濃度と比較して合理的であるといえる。

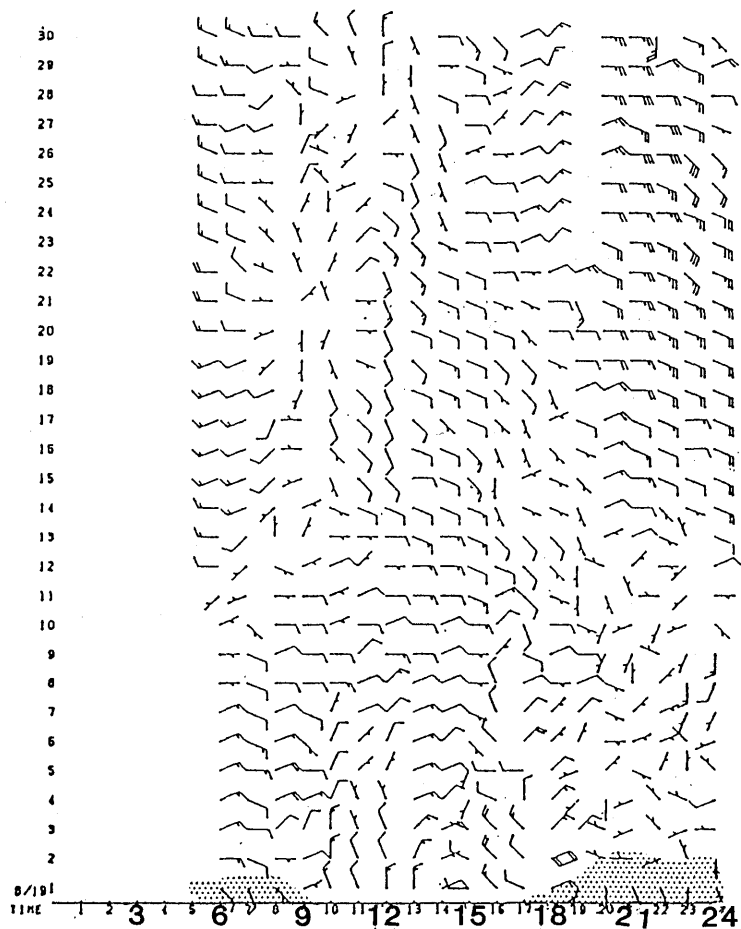
時間ステップ(B)でも濃度は陸上では前の時間ステップと同じ測定点にのみ出現しているが、沖合10kmの測定点までトレーサーが達していることが分かる。濃度は前のステップと大差ないが、風速とEu 放出終了時間から概算すると惣開(X)測定点ではプルームの後半部分が観測されていることになる。風は内陸部を除いて陸風が続いている。

時間ステップ(C)になると風は海風に転化してしまっているが、沖合10kmにおける濃度は依然として続いており、陸上における濃度は著しく低下している。この陸上における低濃度はプルーム後端の名残りと考えるとプルームはこの時間には海上にあるものとみなすことができる。

時間ステップ(D)では沖合の濃度は消滅してしまっており、(B)および(C)で沖合に出現した濃度とはほぼ同等の濃度が海岸線から約100mの新居浜測定点(J)に出現している。プルームは海風によって復路を移流しているものと考えられる。新居浜測定点ではこの後も16時迄濃度が継続している。

図6.12からも分かるように日中で1000 m 以下の気層では風はすでにEに転じているが、200 m より下層ではN～NNEの薄い海風の層である。したがって海面高度330 m からのDyの放出は海風

O BESSHI



O NIIHAMA

LRT81

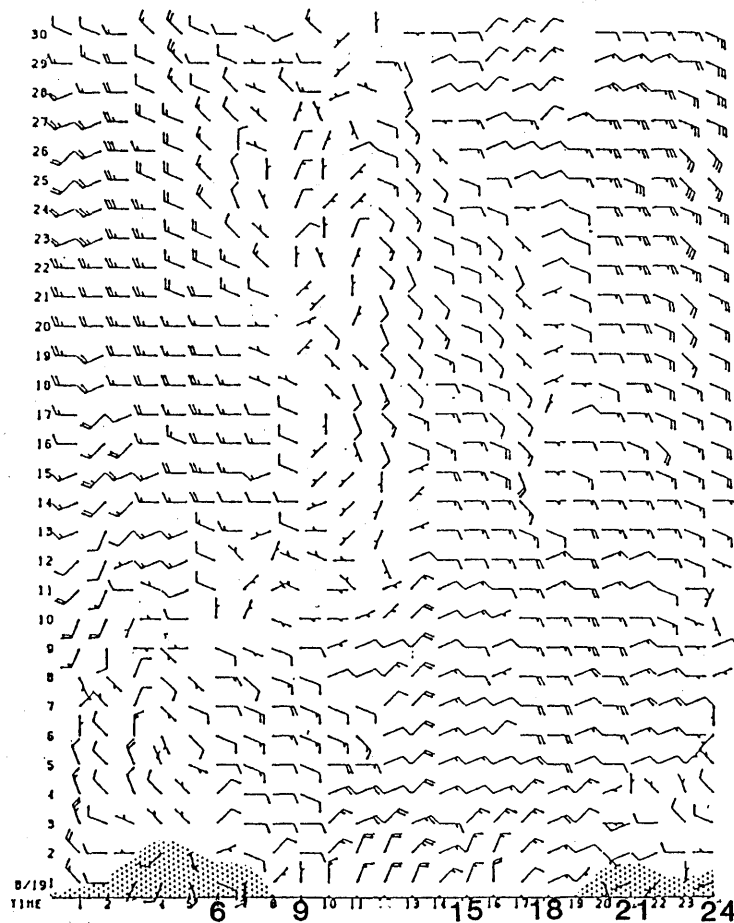


Fig. 6.12 Time isopleth of the vertical wind profile at Besshi and Niihama observed with PIBAL.

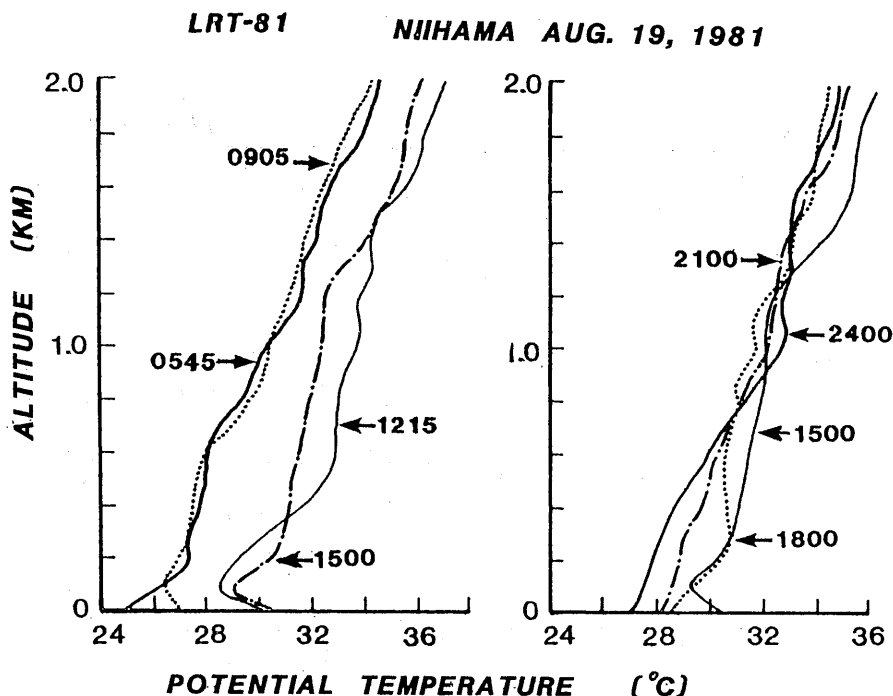


Fig. 6.13 Time variation of the vertical distribution of potential temperature at Niihama.

層の上部境界近傍である。Dy の地上濃度分布の時間変化を図 6.15 (a) ~ (d) に示す。海上における測定点がないため海上における輸送経路は定かではないが、14時~16時の $Z = 200 \sim 300$ m の風速 (3m) で輸送時間を見積るとはば 2 時間となり観測された濃度の出現時刻と一致する。また 15時~16時の $Z = 200 \sim 300$ m の風向は NE ~ NNE であり、図 6.15 (a) の地上濃度分布から海上では NNE の風によって輸送されてきたことが十分推定できる。Dy の放出は航空機によって半径 900m の円源からなされており、横方向へのトレーサーの拡散には 1.8 km の初期値が与えられたことになる。初期段階からこのような水平幅を持った 1 時間の長さ ($u = 3\text{m/s}$ として 10.8 km) のトレーサーを含んだ気塊は陸上に達するまでの間に拡散によってかなり大きくなっていることが図 6.15 (a) から分かる。等濃度線は $1 \times 10^{-8} (\text{sec}/\text{m}^3)$ である。陸上まで輸送されてきたトレーサー気塊はそこで西へ向かって移流して行っているが、新居浜市は内陸へ 10km 程度入ったところで急斜面をもった石鎚山脈が追っており、また図 6.15 (b) に示されている 19時の地上風をみると山裾付近ではすでに斜面風とみられる弱い SSE ~ SE の風であり、この二つのことが要因となって急斜面に平行に西の方向へ移流したものと思われる。20時~22時では平野部も陸風の領域に入っているが濃度は継続している (図 6.15 c)。しかし 1×10^{-8} 以上の濃度域は狭くなっており、これは陸風によって再び海上へ移流して行った気塊の後端部と思われるが、夜間の海上における濃度測定がなされていないために定かではない。しかしその次のステップ (22時~24時 図 6.

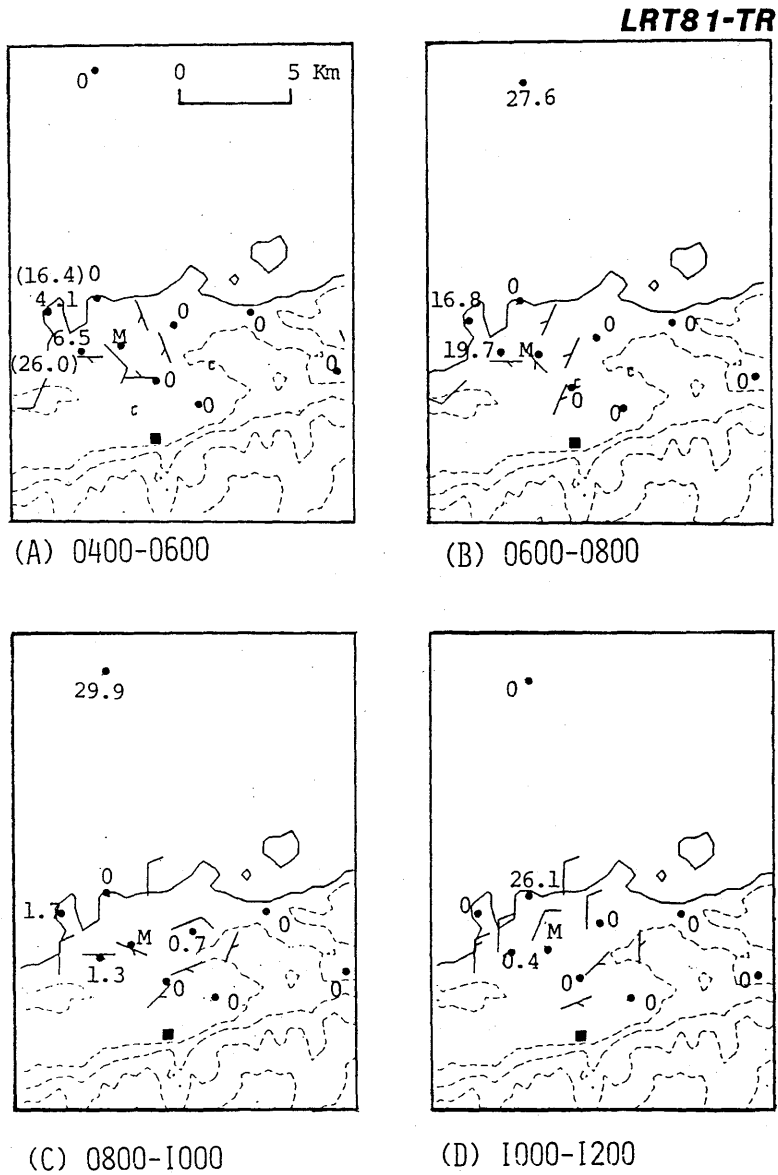


Fig. 6.14 The surface wind and Eu concentration during the early stage of Eu tracer transported on 19 August 1981. Concentrations normalized by source emission rate C/Q (10^{-8} sec. m^{-3}) are shown.

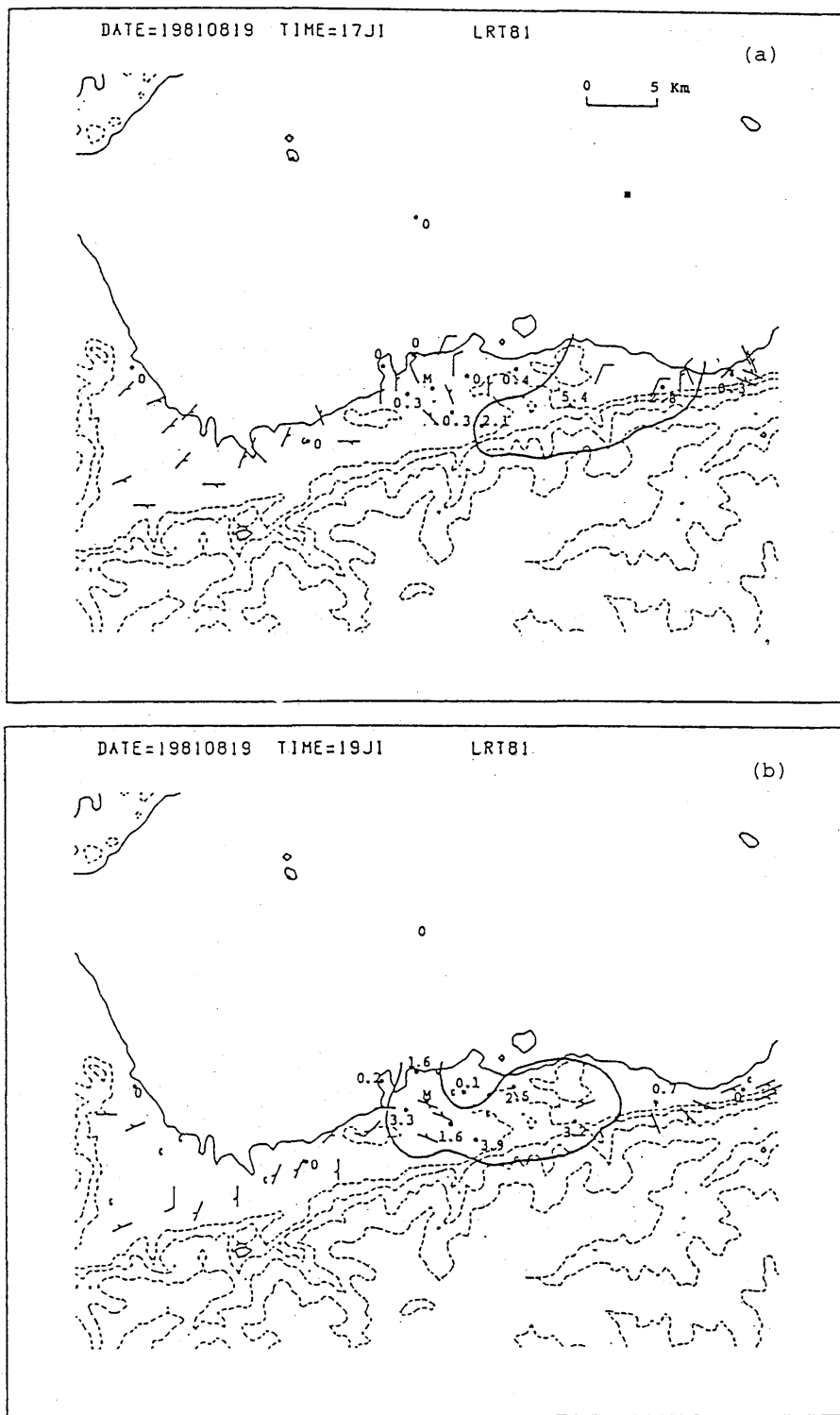
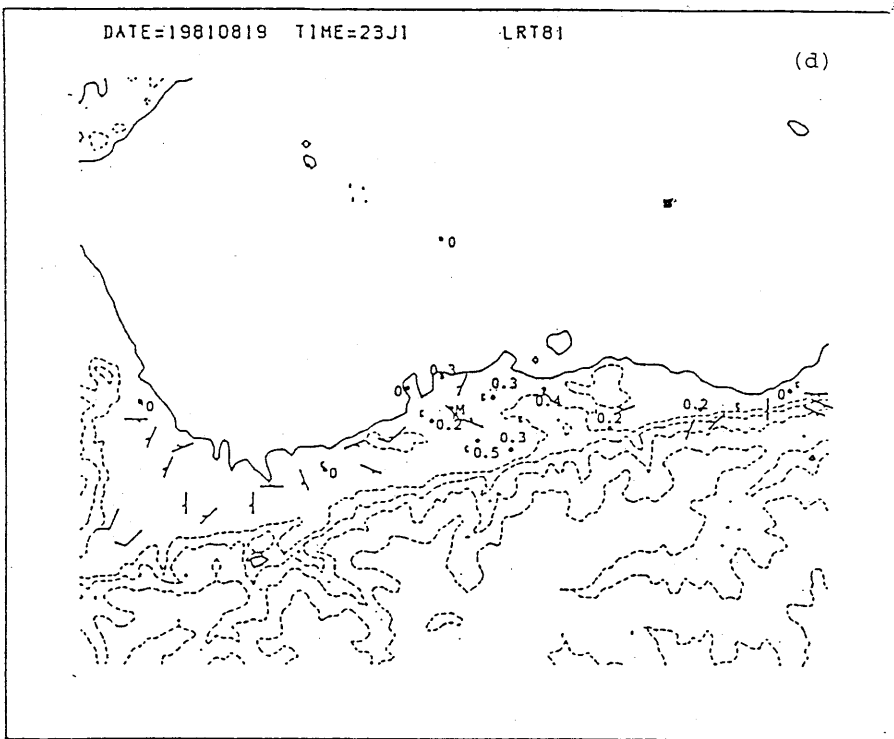
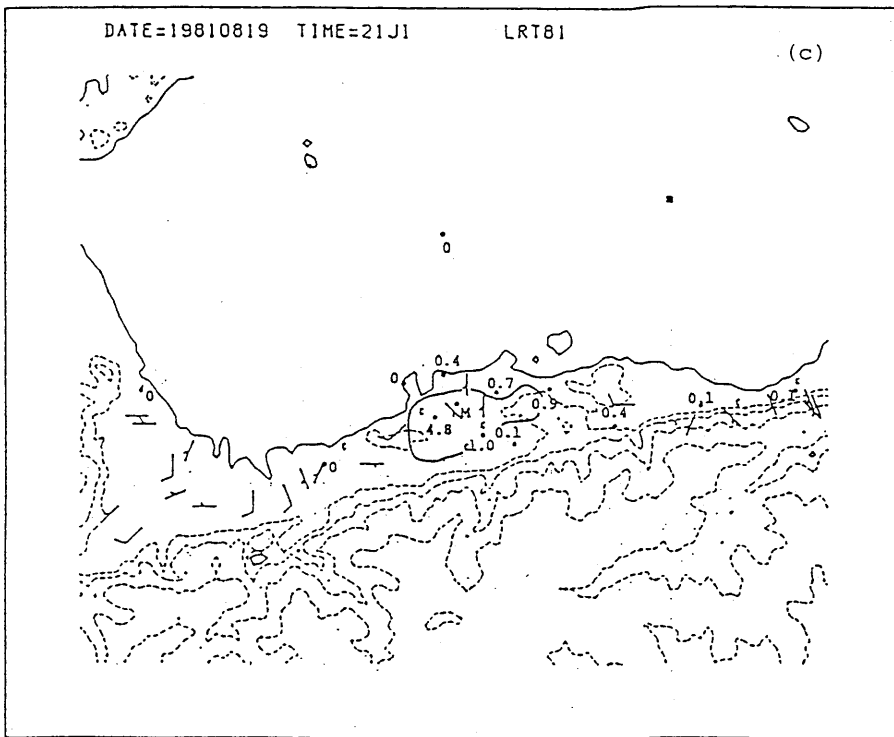


Fig. 6.15 Same as Fig.6.17 but for Dy concentration during sea breeze.



15 d) の濃度分布をみると濃度の高い部分はなく全体的に低濃度となり、図には示していないが、濃度は次第に低下し20日の4時には陸上におけるトレーサー濃度は測定限界以下になってしまっているが、20日の海風時に陸上の数地点で再び濃度が出現している。このことから夜間にトレーサーを含んだ気塊は陸風によって海上へ移流したと考えてよいであろう。また陸上におけるトレーサーの輸送経路は測定された濃度の最高値出現地点を追跡することによっても明らかに西の方向へ移っていることが分る。

なお H_0 トレーサーについてはバックグラウンド濃度が予想外に高く、トレーサー濃度の有意性が疑わしいために今回の解析から除外した。

6.4 AMAT の沈着および比較実験

6.4.1 実験の目的

AMATを用いることによって、距離50km、時間40時間以上にわたり大気中における物質の輸送を追跡可能なことが過去2回の野外実験によって確認された。しかし AMAT は微粒子トレーサーであるため、沈着による大気中トレーサーの損失が問題として残されていたので、最終年度は沈着によるトレーサーの損失とこれによる鉛直濃度分布への影響を見積もる為の実験に重点を置いた。一般に大気中の粒子状物質の沈着には i) 重力落下、ii) 大気乱流による地表面や草木への衝突・付着、iii) 降水機構に伴うレインアウトおよびウォッシュアウトが考えられるが、今回の実験では iii) の問題は除外した。また i) については大気中に放出された AMAT の動力的粒径分布のほぼ100%近くが直径10 μm 以下にあり、そのモードは約2 μm 付近であることが確認されていることから、AMATの大気中における重力落下の効果は非常に小さいと考えられる。今年度の実験では微粒子状トレーサーであるAMATと気体トレーサーである SF_6 を同時に放出し、これらの複数のトレーサー間の濃度値および水平・鉛直濃度分布を相互比較する一方、放出点近傍におけるAMATの地表面への沈着量を見積もるための実験を行った。

6.4.2 野外トレーサー実験の概略

鉛直濃度分布の測定に気象研究所の高さ213mの気象観測鉄塔を使用することにして、8月4日～6日の期間にトレーサー実験を行った。筑波地域の8月における最多風向であるSSW風を対象にしてトレーサー捕集網を展開した。トレーサー放出点は鉄塔より南南西3.2kmに位置する農業技術研究所の高さ40mの給水塔に設置した。この放出点の風下1kmのアーク上に約100m間隔で4地点、2kmのアーク上に約170m(5度)間隔で8地点の地上濃度測定点を配置した(図6.16)。鉄塔における鉛直濃度分布測定高度は1.5、50、100、150、および200mの5高度である。AMATの捕集にはハイポリウム・エアサンプラーを用い、600 ℓ/min の採気量でポリフロン濾紙上に採集し、3時間の捕集時間内で1時間毎に濾紙の交換を行った。

SF_6 の捕集にはバッグサンプラーを用い、ポリエステルバッグに採集し、ECDガスクロマト

LRT82-TR

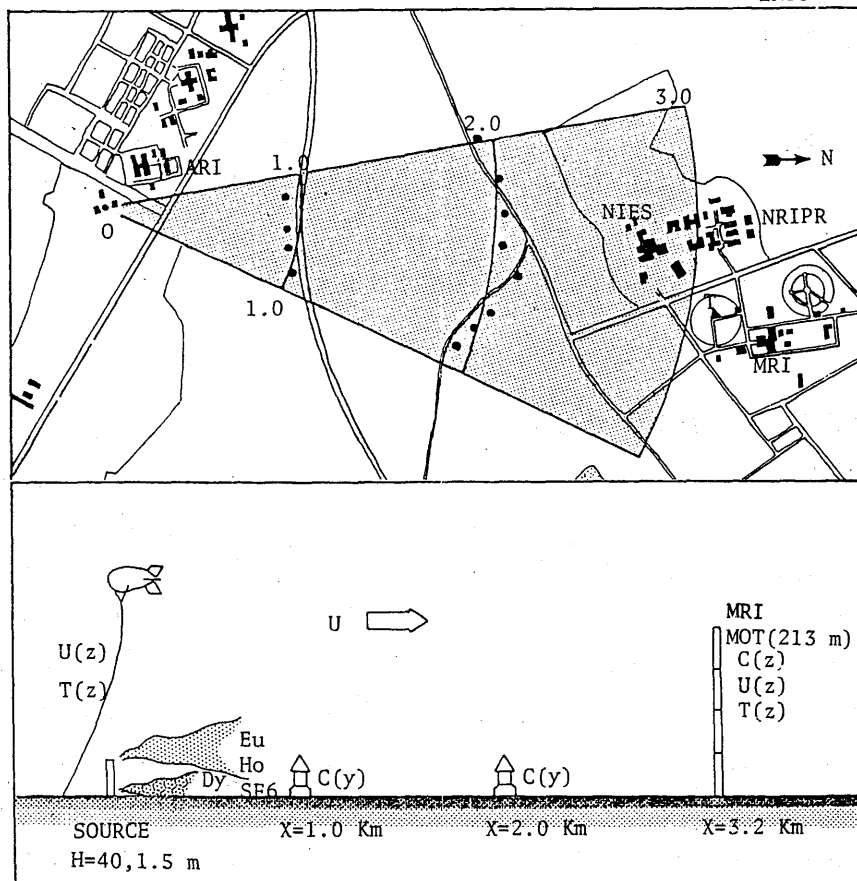


Fig. 6.16 Experimental design schematic.

グラフによって濃度の定量分析をした。一方AMATの地表面への沈着量の測定は放出点近傍において図6.17に示したような位置の地上に置いたシャーレの中の濾紙に付着したそれぞれのトレーサー量を定量分析した。

今回使用したAMATは前年燵灘で用いたものと同じでEu、Dy、およびHoの3種類であり、濾紙上に捕集したこれらのAMAT濃度は日本原子力研究所の原子炉 JRR-3を使用して熱中性子照射による放射化分析法によって定量化した。

地上500m迄の風向・風速・気温・湿度の鉛直分布の測定を放出点の風上約100mにおいて係留気球を用いて実施した。また気象観測塔の地上10、25、50、100、150、200mの6高度において常時観測されている風向・風速・気温・湿度のデータも利用できる他に、同じ6高度に設置されている3次元超音波風向風速温度計を用いて0.1秒間隔で乱流測定も行った。

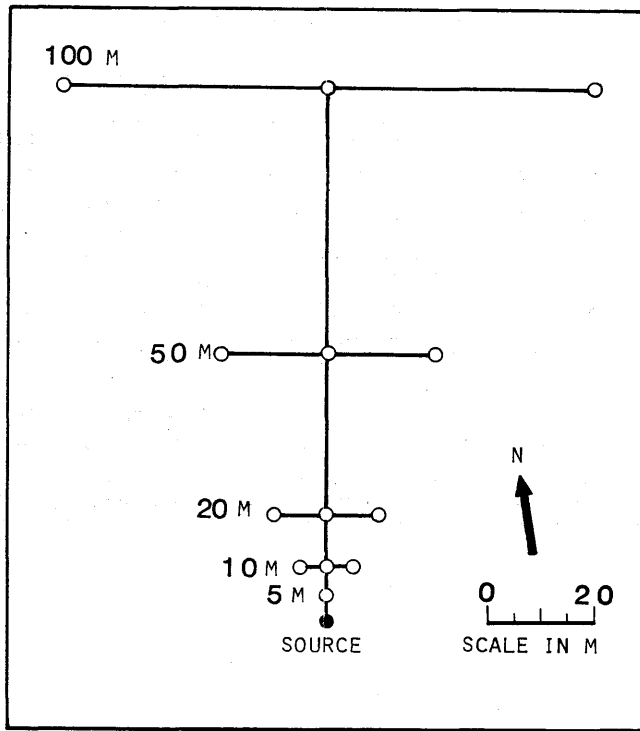


Fig. 6.17 Air tracer deposition measurement network.

6.4.3 結果

実験第1日目の8月4日は各トレーサーの相互比較を行うため4種類のトレーサーを高度 40 m から表 6.6 に示すような条件で同時に放出した。図 6.18はこの場合のそれぞれのトレーサー放出率で規準化した濃度の地上水平分布を示したものである。SF₆とAMATの濃度値を比較してみると、 $x = 1 \text{ km}$ ではSF₆の方がAMATより5～9倍高い濃度値を示しているが、 $x = 2 \text{ km}$ ではあまり大きな差は見られない。一方濃度分布のパターンを見るとEuとHoとが全く同じであり、SF₆とDyとがピークを2つ持った類似したパターンを示している。この1つのピークを持ったEu、Hoと2つのピークを持ったSF₆、Dyとの間の相違は放出時間に起因している。すなわち表 6.6 から分かるようにEu、Hoの放出時間（ $T = 38 \text{ 分}$ ）に対してSF₆、Dyの場合は $T = 60 \text{ 分}$ であり、しかもこの60分間の後半には風向が次第にSWへと変化している。図 6.19はトレーサー放出高度に最も近い高度である気象観測鉄塔における地上 50mの風を示したものであるが、トレーサー放出開始時刻には風向はSであったのが後半にはSWへと変化しているのが分かる。したがってSF₆、Dy濃度分布の2つのピークは前半に起ったものと後半の風向のシフトによるものと考えることができ、前半に起ったピークがEu、Hoのピークに対応する。

鉛直濃度分布はHoを除いた3つのトレーサーについて得られており、図 6.20に示すように上層

Table 6.6 Tracer release conditions.

August	Ho	Dy	Eu	SF ₆
4	H=40 m Q=0.074 g/sec T=1530-1608 (38 min)	H=40 m Q=0.048 g/sec T=1530-1630 (60 min)	H=40 m Q=0.046 g/sec T=1530-1608 (38 min)	H=40 m Q=8.69 g/sec T=1530-1630 (60 min)
5	H=40 m Q=0.067 g/sec T=1305-1347 (42 min)	H=1.5 m Q=0.009 g/sec T=1305-1419 (74 min)	H=40 m Q=0.042 g/sec T=1305-1347 (42 min)	H=1.5 m Q=9.78 g/sec T=1305-1405 (60 min)
6	H=40 m Q=0.07 g/sec T=1300-1340 (40 min)	H=1.5 m Q=0.004 g/sec T=1300-1400 (60 min)	H=40 m Q=0.044 g/sec T=1300-1400 (40 min)	H=1.5 m Q=9.78 g/sec T=1300-1400 (60 min)

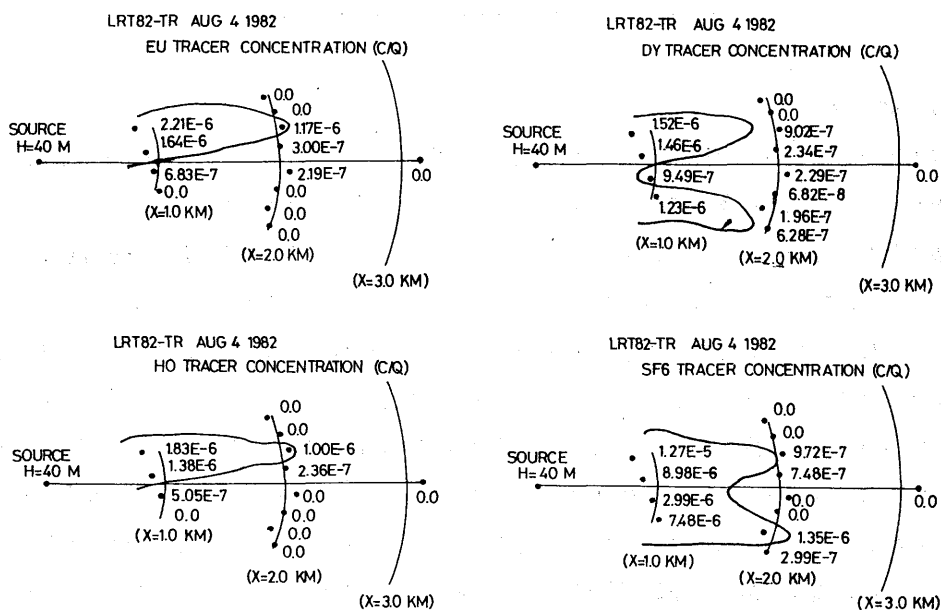


Fig. 6.18 Distribution of the surface normalized concentration. X and the solid lines mean the downwind distance from releasing point and the isopleth of 10^{-5} m^{-2} concentration respectively.

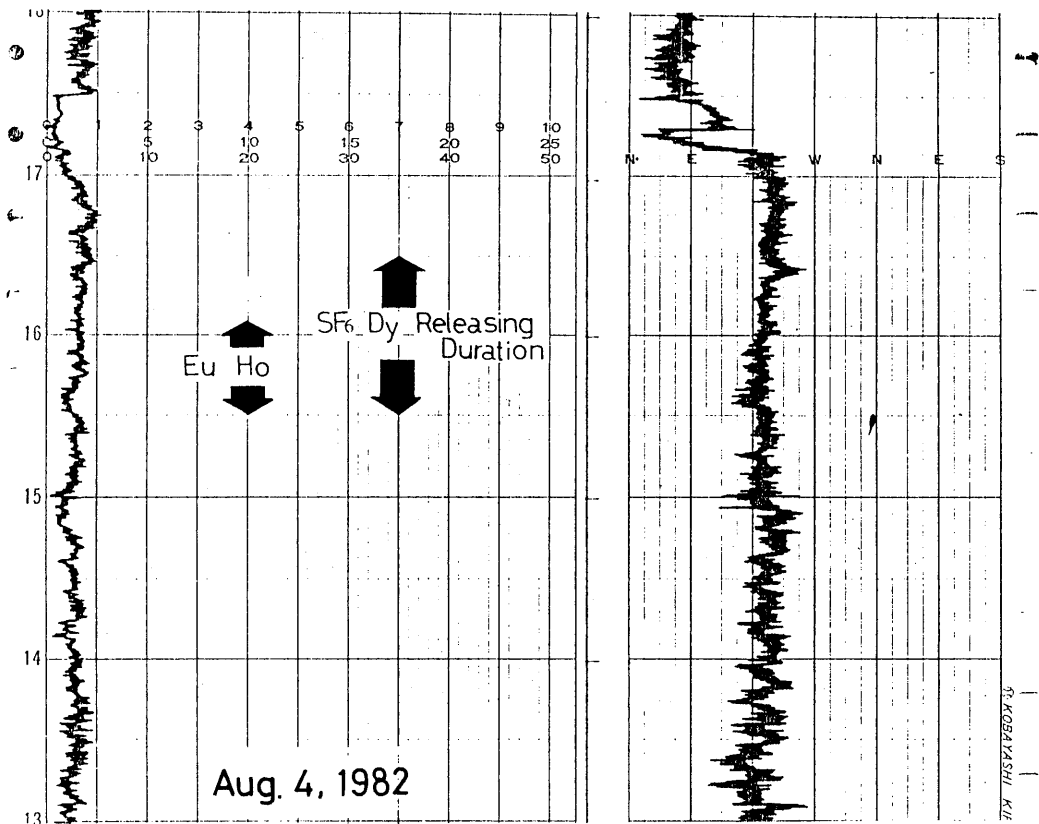


Fig. 6.19 Time variation of wind direction and speed at 50 m observed at the meteorological tower.

ほど濃度が高くなっている。温位の鉛直分布をみると(図6.21)地上100m位までが不安定気層でその上層200mまでは弱い安定から中立の成層をしている。したがって強不安定気層中へ放出されたトレーサーは徐々に上層へ輸送されたものと推察される。なお、図6.20において濃度はすべて200m高度における濃度との比をとって無次元化しており、高さもトレーサー放出高度で割って無次元化してある。

8月5日および6日はトレーサー放出高度をEu、Hoについては40m、SF₆、Dyについては1.5mとしたが両日も風向に恵まれず、水平および鉛直濃度分布は得られなかった。しかしこの両日には沈着量の測定を行っており、興味深いデータが得られた。図6.22に示されるように地表面におけるトレーサー沈着量は風下距離に対して指数的な減少を示していることがわかる。図における沈着率は風下方向にとったx軸上で1時間当たりに1m²の面積に沈着したトレーサー量と1時間に放出したトレーサーの総量との比率を意味している。風下距離100m以内では40m高度から放出したEuトレーサーの沈着は全く見られず、100m地点で少量検出されているだけである。これらの

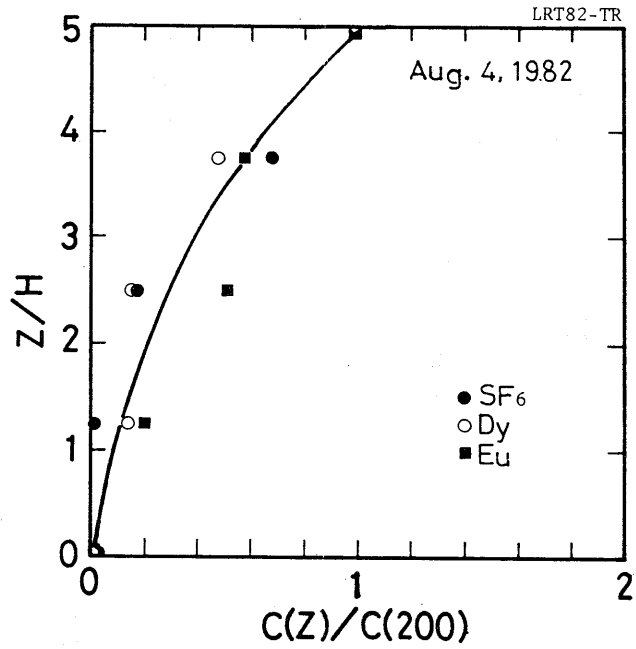


Fig. 6.20 Vertical profile of the relative concentration. $C(Z)$ means the concentration at altitude Z and H means the height of release.

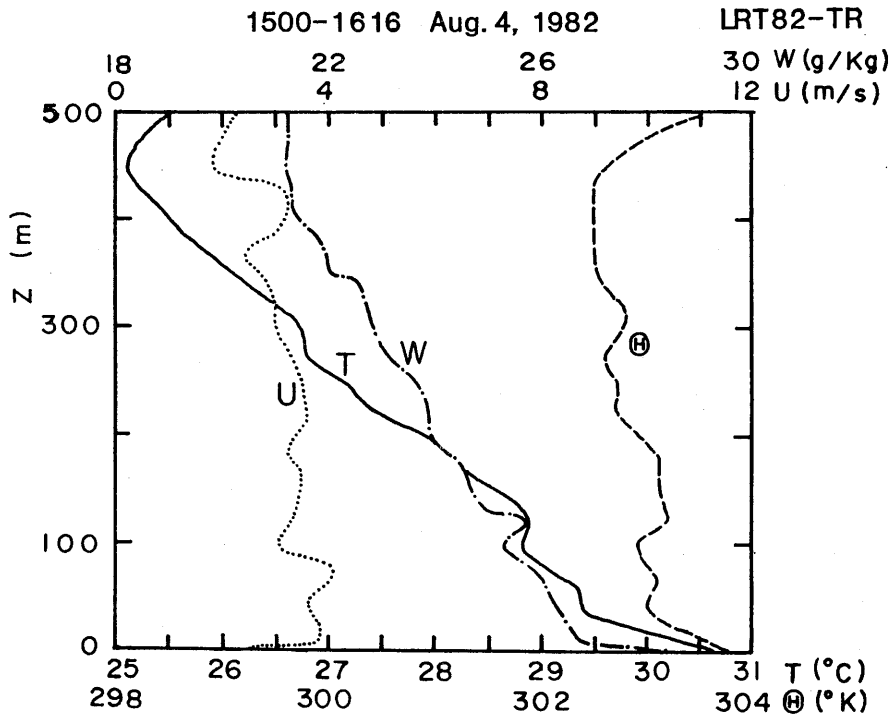


Fig. 6.21 Vertical profile of potential temperature $H(^{\circ}\text{K})$, wind speed U (m/sec), temperature $T(^{\circ}\text{C})$ and mixing ratio W (g/Kg).

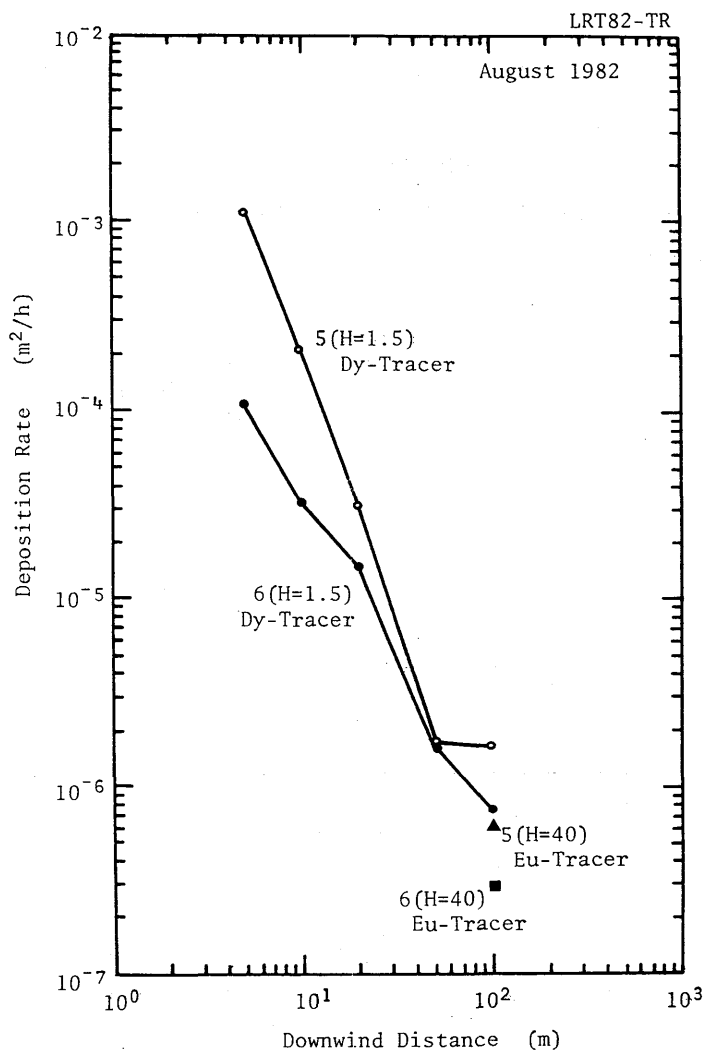


Fig. 6.22 Deposition rate of the tracers with downward distance. Numbers mean the date of the experiment and H means the height of release.

地表面上の沈着量の横方向の分布は図 6.23に見られるように正規分布によって近似することができる。したがって地表面上のある風下距離 x_1 までの全沈着量 $D_T(x, y)$ は

$$D_T(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{x_1} D(x, y) dx dy \quad (1)$$

として得られるが、横方向には正規分布を仮定することができるから、その標準偏差を $\Delta y(x)$ とすると(1)式は

$$D_T(x, y) = \sqrt{2\pi} \int_0^{x_1} \Sigma y(x) D(x, 0) dx \quad (2)$$

となる。 $D(x, 0)$ は $y = 0$ における沈着量で図 6.22 に示される量であり、 $\Sigma y(x)$ は図 6.23 に示される分布より得られる。(2) 式より計算した結果では地表面における全沈着量は放出したトレーサーの総量の 1% 未満であった。

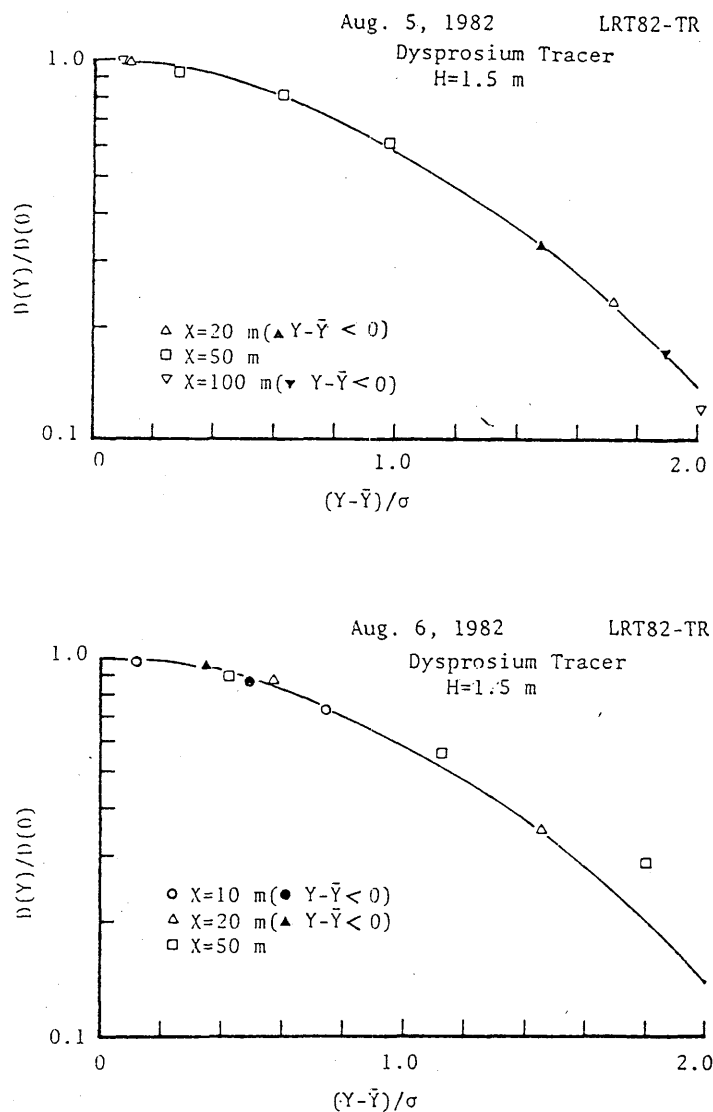


Fig 6.23 Crosswind distribution of surface deposition rate. The solid line means normal distribution.

6.5 結 論

当研究で開発したAMATシステムは大気中に排出された汚染物質の長距離および海陸風循環等における長時間輸送に十分に適用可能であり、SF₆等の気体トレーサーとの比較においても遜色のないことが確かめられた。粒子状トレーサーであるために懸念されていた地表面への沈着の問題もトレーサー放出時に粒径を小さくすることによって解決できることが分かった。しかし草木や家屋等への付着量の見積りが未知の問題として残されるが、これは非常に難しい問題であり、この問題の解決には今後の研究結果に期待するほかない。

AMATシステムは濃度の時間変化に対する分解能に分析手法上限度があり、濃度の瞬間値およびこれに近い短時間平均濃度が得られないという短所もある。しかし1時間以上の捕集時間を採用することによって多重煙源からの汚染質の長距離および長時間輸送の問題において、ある地点における濃度に対する各煙源からの寄与率が同時に識別できるなど他のエア・トレーサーにない特徴を活用することができる。

なお、トレーサー実験（1981年）の各捕集地点のトレーサー放出後、数時間のトレーサー濃度を付録に表としてまとめている。

参 考 文 献

- Barad, M. L., and J. J. Fuquay, editors, 1962: Green glow diffusion program Vol. 1, HW 71400-Vol. 1, OTS, U. S. Department of Commerce, Washington 25, D. C., 77 pp.
- Barad, M. L. and X. Shorr, 1954: Field studies in diffusion of aerosols. Amer. Indust. Hyg. Assn. Quart., **15**, 136-140.
- Braham, R. R., B. K. Seely and W. D. Crozier, 1952: A technique for tagging and tracing air parcels. Trans. Amer. Geophys. Union, **33**, 825-833.
- Benjamin, Y. H. Liu and K. W. Lee, 1975: An aerosol generator of high stability. Amer. Indust. Hyg. Assoc. J., **36**, 861-865.
- Cramer, H. E., 1958a: The study of diffusion of gases or aerosols in the lower atmosphere. AFRCR-TR-59-207, MIT, Cambridge, 33pp.
- Cramer, H. E., 1958b: Diffusion measurements during project prairie grass. Geophys. Res. Paper No. 59, AFRCR-TR-58-235 (1) edited by M. L. Barad, 57-280.
- Crozier, W. D. and B. K. Seely, 1955: Concentration distribution in aerosol plumes three to twenty-two miles from a point source. Trans. Amer. Geophys. Union. **36**, 42-52.
- Dahl, J. B., E. Steinnes and J. Thomassen, 1970: Proc. Symp. Nuclear Techniques in Measuremental Pollution, IAEA, 26-30, Oct., 1970, Vienna.
- Dingle, A. N., 1968: "Rain Scavenging Studies", The Univ. of Michigan Dept. of Meteorology and Oceanogr-

- aphy, Progress Rep. No. 4.
- Eggleton, A. E. J. and N. Thompson 1961: Loss of fluorescent particles in atmospheric diffusion experiments by comparison with radioxenon tracer. *Nature*, **192**, 935-936.
- Ferber, G. J., K. Telegades, J. L. Heffter, C. R. Dickson, R. N. Dietz and P. W. Krey, 1981: Demonstration of a Long-Range Atmospheric Tracer System using Perfluorocarbons. EPA-600/7-81-006 Jan. 1981.
- Guerin, P., J. Hugon, R. Le Quinio, R. Rzekrecki, F. Santelli and R. Sarteur, 1971: Proc. Symp. Nuclear Techniques in Environmental Pollution, 267, IAEA, March, 1971, Vienna.
- Haines G. F., Jr., W. C. L. Hemeon and H. Cember, 1957: "Method for tracing the ground-level distribution of stack gas emissions", presented at the 50th Ann. Meeting of the Air Pollution Control Association, June 2-6, Environmental Studies Project, AIF/NESP-007b, SRI Project 3588.
- Hay, J. S. and F. Pasquill, 1957: Diffusion experiments from a fixed source at a height of a few hundred feet in the atmosphere. *J. Fluid. Mech.*, **2**, 299-310.
- Kühn, W. K. G., W. Alps and D. Korn, 1976: Proc. Development of Nuclear-based Techniques for Measurement, Detection and Control of Environmental Pollutants, IAEA, March 15-19, Vienna.
- Lamb, B. K. and F. H. Shair, 1978: Atomospheric Dispersion and Transport within Coastal Regions, Part II Tracer Study of Industrial Emmissions in the California Delta Region. *Atmos. Environ.*, **12**, 2101-2128.
- Lamb, B. K., A. Lorenzen and F. H. Shair, 1979: Atmospheric Dispersion and Transport within Coastal Regions, Part I Tracer Study of Power Plant Emission from the Oxnard Plain. *Atmos. Environ.*, **12**, 2089-2100.
- Leighton, P. A., 1975: The Stanford fluorescent particle tracer technique. Department of Chemistry, Stanford Univ. (Defence Documentation Center, AD 248 607).
- Leighton, P. A., W. A. Perkins, S. W. Grinnell and F. X. Webster, 1965: The fluorescent particle atmospheric tracer. *J. Appl. Meteor.*, **4**, 334-348.
- Mamuro, T., A. Matsuda and A. Mizohata, 1973: Comparative multielement analyses of airborne particle samples collected in various areas. *Ann. Rep. Radiat. Center Osaka Prefecture*, **14**, 11-18.
- Nakasa, H. and H. Ohno, 1967: Proc. Symp. Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics, p. 239. IAEA, Vienna.
- Norden, C. E. and D. Van As, 1979: A technique for generating Indium aerosols for atmospheric tracer studies. *Aerosol Sci.*, **10**, 299-307.
- Robinson, E., J. A. Macleod and C. E. Lapple, 1959: A meteorological tracer technique using uranine dye. *J. Meteor.*, **16**, 63-67.
- Shemel, G. A., 1980: Particle and gas dry deposition. *Ann. Rev. Atmos. Environ.*, **14**, 983-1011.
- Smith, M. E., I. A. Singer, F. E. Barlett and L. Marcus, 1958: The variations of effluent concentrations during

temperature inversions. J. Air Poll. Cont. Assoc., 7, 194-197.

Thomas C. W., H. G. Rieck, Jr., J. A. Youngh and N. A. Wogman, 1973: Pacific Northwest Laboratory Report BNWL-1751, Part 2, 75.

付 録

トレーサー実験データ

昭和56年8月19日から21日にかけて行ったトレーサー実験の結果を表6.8に示してある。RUN
ナンバーに対応する採取時刻は表6.7に示してある（ただし、地点により若干異なる場合がある）。
地点名で FUNEは春風丸（地点P）を示し、GYOSENは漁船一地点L）を示す。左側の値が
濃度（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）、右側の数字が誤差を示す。--- 印は測定限界以下の微量を示す。なお、有効数
字は2けたである。

Table 6.7 List of tracer sampling times.

RUN No.	採 取 時 刻	RUN No.	採 取 時 刻	RUN No.	採 取 時 刻
19-1	19日 4:00~ 6:00	20-1	20日 0:00~ 2:00	21-1	21日 4:00~ 6:00
2	6:00~ 8:00	2	2:00~ 4:00	2	6:00~ 8:00
3	8:00~10:00	3	6:00~ 8:00	3	8:00~10:00
4	10:00~12:00	4	10:00~12:00	4	10:00~12:00
5	12:00~14:00	5	14:00~16:00	5	12:00~14:00
6	14:00~16:00	6	18:00~20:00	6	14:00~16:00
7	16:00~18:00			7	16:00~18:00
8	18:00~20:00			8	18:00~20:00
9	20:00~22:00			9	20:00~22:00
10	22:00~24:00			10	22:00~24:00
				11	22日 0:00~ 2:00
				12	2:00~ 4:00

Table 6.8 Tracer Experiment Data.

a: Europium

	TOYO	MIYAKUBO	YUGE
19 - 1			
2			
3			
4	0.5118E-04 0.3353E-05	0.5084E-05 0.2500E-05	0.5574E-05 0.2693E-05
5	0.1105E-04 0.2622E-05	0.3939E-05 0.2083E-05	0.3565E-05 0.2572E-05
6	0.1571E-04 0.3135E-05	0.4466E-05 0.2330E-05	0.3222E-05 0.2313E-05
7	0.3087E-04 0.3930E-05	0.1008E-04 0.2806E-05	0.9078E-05 0.2690E-05
8	0.7710E-04 0.4398E-05	0.1577E-04 0.2515E-05	0.2820E-05 0.2227E-05
9	0.1669E-04 0.2832E-05	0.5270E-05 0.2141E-05	0.6307E-05 0.2939E-05
10	0.6432E-05 0.2043E-05	0.5290E-05 0.2301E-05	0.6400E-05 0.2176E-05
20 - 1	0.6070E-05 0.2378E-05	0.3491E-05 0.2312E-05	0.1364E-04 0.2990E-05
2	0.7582E-05 0.2376E-05	0.3744E-05 0.2034E-05	0.7583E-05 0.3262E-05
3	0.8711E-05 0.2995E-05	0.1545E-04 0.3996E-05	0.9677E-05 0.2936E-05
4	0.1171E-04 0.3130E-05	0.6532E-05 0.2693E-05	0.5686E-05 0.2679E-05
5	0.2456E-04 0.3755E-05	0.1734E-04 0.3414E-05	0.1525E-04 0.3297E-05
6	0.8634E-05 0.2617E-05	0.2879E-05 0.3345E-05	0.6527E-05 0.3420E-05
21 - 1			
2			
3			
4			
5	0.2063E-04 0.3720E-05	0.2593E-05 0.2255E-05	0.2619E-05 0.2745E-05
6	0.4399E-04 0.4018E-05	0.5360E-05 0.2305E-05	0.3974E-05 0.2606E-05
7	0.4025E-04 0.3913E-05	0.5131E-05 0.2674E-05	0.6027E-05 0.2848E-05
8	0.4644E-04 0.3908E-05	0.1419E-04 0.2601E-05	0.5467E-05 0.3075E-05
9	0.2185E-04 0.3368E-05	0.7621E-05 0.2369E-05	0.8862E-05 0.3420E-05
10	0.5659E-05 0.2444E-05	0.4486E-05 0.2177E-05	0.6471E-05 0.3249E-05
11	0.3141E-05 0.2434E-05	0.3668E-05 0.2236E-05	0.1074E-04 0.3260E-05
12	0.7741E-05 0.2391E-05	0.3798E-05 0.2473E-05	0.4835E-05 0.3262E-05
	TOMO	KASAOKA	KITAKISHIMA
19 - 1			
2			
3			
4	0.1874E-04 0.3521E-05	0.1805E-04 0.5738E-05	0.3552E-04 0.4444E-05
5	0.2120E-04 0.3573E-05		0.2996E-04 0.4853E-05
6	0.9292E-05 0.2872E-05	0.1060E-04 0.4715E-05	0.4121E-04 0.4445E-05
7	0.1402E-04 0.2899E-05	0.1209E-04 0.3671E-05	0.3450E-04 0.4410E-05
8	0.1714E-04 0.3122E-05	0.1031E-04 0.3579E-05	0.2016E-04 0.3000E-05
9	0.1171E-04 0.2909E-05	0.1410E-04 0.3498E-05	0.4603E-05 0.2676E-05
10	0.2710E-04 0.4425E-05	0.9722E-05 0.2683E-05	0.5285E-05 0.2552E-05
20 - 1	0.2269E-04 0.4271E-05	0.7629E-05 0.2460E-05	0.1167E-04 0.3466E-05
2	0.1238E-04 0.3913E-05	0.1805E-04 0.2860E-05	0.8923E-05 0.4029E-05
3	0.1663E-04 0.3982E-05	0.8621E-05 0.2627E-05	0.1624E-04 0.4419E-05
4	0.1692E-04 0.4043E-05	0.1834E-04 0.4635E-05	0.4611E-04 0.4838E-05
5	0.1201E-04 0.3675E-05	0.2729E-04 0.3863E-05	0.3235E-04 0.3780E-05
6	0.4230E-05 0.3139E-05	0.1356E-04 0.3053E-05	0.2910E-05 0.2141E-05
21 - 1			
2			
3			
4			
5	0.6552E-05 0.3515E-05	0.1340E-04 0.4075E-05	0.8574E-05 0.3016E-05
6	0.5338E-05 0.3149E-05	0.7852E-05 0.3531E-05	0.3496E-04 0.3712E-05
7	0.6016E-05 0.3087E-05	0.8270E-05 0.3510E-05	0.3524E-04 0.3826E-05
8	0.8163E-05 0.3312E-05	0.1289E-04 0.3782E-05	0.9631E-05 0.2862E-05
9	0.1676E-04 0.3724E-05	0.1035E-04 0.3786E-05	0.5560E-05 0.2521E-05
10	0.1799E-04 0.4593E-05	0.9952E-05 0.3116E-05	0.9750E-05 0.3149E-05
11	0.1829E-04 0.5286E-05	0.9139E-05 0.2778E-05	0.8094E-05 0.3064E-05
12	0.8728E-05 0.4552E-05	0.5033E-05 0.2535E-05	0.3369E-05 0.2410E-05

	SOHBIRAKI		KOHSATO		IZUMIKAWA	
19 - 1	0.2598E-02	0.1280E-03	0.1100E-04	0.2787E-05	0.5362E-05	0.2847E-05
2	0.7667E-02	0.3760E-03	0.1649E-04	0.2727E-05	0.5207E-04	0.4556E-05
3	0.6145E-03	0.3132E-04	0.3489E-03	0.1802E-04	0.8906E-04	0.5878E-05
4	0.2351E-03	0.1348E-04	0.3670E-04	0.4070E-05	0.8587E-04	0.6035E-05
5	0.7486E-04	0.6220E-05	0.1576E-04	0.3215E-05	0.1205E-04	0.3358E-05
6	0.9361E-04	0.2186E-04	0.3270E-04	0.4931E-05	0.8806E-05	0.3784E-05
7	0.8476E-04	0.2096E-04	0.5020E-04	0.5652E-05	0.2690E-04	0.4399E-05
8	0.1201E-02	0.1586E-03	0.9307E-04	0.7892E-05	0.3383E-04	0.5324E-05
9	---	---	0.8914E-04	0.7485E-05	0.7010E-04	0.6835E-05
10	0.3673E-04	0.1083E-04	0.1284E-04	0.3816E-05	0.8341E-05	0.3236E-05
20 - 1	0.2214E-04	0.1641E-04	0.7356E-05	0.3584E-05	0.6582E-05	0.2696E-05
2	0.3421E-04	0.1146E-04	0.6342E-05	0.3571E-05	0.6049E-05	0.2922E-05
3	0.5631E-04	0.1473E-04	0.3034E-04	0.3603E-05	0.2854E-04	0.3589E-05
4	0.5869E-04	0.1600E-04	0.5989E-04	0.5060E-05	0.1135E-04	0.2953E-05
5	0.1667E-03	0.1019E-04	0.3602E-04	0.3832E-05	0.2410E-04	0.4058E-05
6	0.1176E-02	0.1569E-03	0.1832E-04	0.3527E-05	0.1417E-04	0.3511E-05
21 - 1	0.1035E-04	0.3850E-05	0.2676E-04	0.3756E-05	0.4022E-03	0.2092E-04
2	0.1589E-04	0.3602E-05	0.3373E-02	0.1659E-03	0.7544E-02	0.3709E-03
3	0.4712E-04	0.5974E-05	0.4635E-03	0.2405E-04	0.3635E-03	0.1938E-04
4	0.4236E-04	0.5686E-05	0.3491E-04	0.4079E-05	0.5832E-04	0.5132E-05
5	0.9079E-04	0.7111E-05	0.3378E-04	0.3689E-05	0.1971E-04	0.3370E-05
6	0.8094E-04	0.1821E-04	0.3454E-04	0.4846E-05	0.1760E-04	0.3863E-05
7	0.8308E-04	0.1657E-04	0.5139E-04	0.5589E-05	0.3166E-04	0.4395E-05
8	0.1739E-03	0.2830E-04	0.5414E-04	0.5767E-05	0.5418E-04	0.5788E-05
9	0.4390E-03	0.6096E-04	0.2344E-04	0.4341E-05	0.2159E-04	0.4215E-05
10	0.2111E-04	0.3234E-05	0.1710E-04	0.3802E-05	0.1928E-04	0.3230E-05
11	0.1149E-04	0.3272E-05	0.1772E-04	0.4319E-05	0.2670E-04	0.4551E-05
12	0.1609E-04	0.5442E-05	0.1777E-04	0.3732E-05	0.1307E-04	0.3350E-05
	TAKIHAMA		SEKIKAWA		NAGATSU	
19 - 1	0.7845E-05	0.2620E-05	0.5907E-05	0.2653E-05	0.2794E-04	0.3966E-05
2	0.6946E-05	0.2539E-05	0.1554E-04	0.3015E-05	0.1022E-03	0.6164E-05
3	0.1724E-04	0.3133E-05	0.1109E-04	0.2998E-05	0.3245E-04	0.6126E-05
4	0.7419E-05	0.3181E-05	0.1018E-04	0.2840E-05	0.1515E-03	0.8888E-05
5	0.5649E-05	0.2675E-05	0.1102E-04	0.2954E-05	0.9850E-04	0.6135E-05
6	0.9469E-05	0.2773E-05	0.1579E-04	0.2798E-05	0.6398E-04	0.4763E-05
7	0.1967E-04	0.4256E-05	0.1918E-04	0.3226E-05	0.2610E-04	0.3686E-05
8	0.9240E-04	0.6982E-05	0.6737E-03	0.4011E-04		
9	0.8734E-05	0.3766E-05	0.1375E-04	0.3014E-05	0.9362E-04	0.5563E-05
10	0.8410E-05	0.3428E-05	0.1465E-04	0.2820E-05	0.1170E-04	0.3167E-05
20 - 1	0.1013E-04	0.3386E-05	0.7609E-05	0.2045E-05	0.5569E-05	0.2891E-05
2	0.6106E-05	0.3312E-05			0.2040E-04	0.3390E-05
3						
4						
5						
6						
21 - 1	0.1994E-03	0.7070E-05	0.4893E-05	0.2580E-05	0.5156E-05	0.3078E-05
2	0.6242E-03	0.1798E-04	0.7826E-05	0.3077E-05	0.2722E-05	0.2735E-05
3	0.6420E-05	0.2914E-05	0.4714E-04	0.3583E-05	0.2180E-04	0.3157E-05
4	0.1954E-04	0.3379E-05	0.7217E-04	0.4366E-05	0.8268E-04	0.4564E-05
5	0.1643E-04	0.3339E-05	0.1902E-04	0.3118E-05	0.1092E-04	0.3253E-05
6	0.1871E-03	0.1146E-04	0.1669E-04	0.3296E-05	0.1566E-04	0.2787E-05
7	0.3548E-04	0.3615E-05	0.2149E-04	0.3353E-05	0.4317E-04	0.3645E-05
8	0.1316E-04	0.2774E-05	0.3709E-03	0.2490E-04	0.3909E-04	0.3265E-05
9	0.1368E-04	0.2926E-05	0.5587E-03	0.3477E-04	0.3062E-04	0.3308E-05
10	0.6618E-05	0.3077E-05	0.1296E-04	0.3238E-05	0.1181E-04	0.2902E-05
11	0.1138E-04	0.2675E-05	0.1234E-04	0.2995E-05	0.1251E-04	0.3237E-05
12	0.1103E-04	0.2858E-05	0.2036E-04	0.3331E-05	0.1671E-04	0.2717E-05

	FUNAKI		TAMATSU		SUMITOMO	
19 - 1	0.8500E-05	0.3055E-05	0.4143E-05	0.2823E-05	0.1689E-02	0.4942E-04
2	0.2336E-04	0.3930E-05	0.1163E-04	0.2668E-05	0.6532E-02	0.1800E-03
3	0.4865E-04	0.4128E-05	0.2363E-03	0.8093E-05	0.7328E-03	0.2366E-04
4	0.1059E-04	0.3240E-05	0.8852E-04	0.5093E-05	0.4755E-04	0.3370E-05
5	0.1531E-04	0.2878E-05	0.2897E-04	0.3782E-05	0.1146E-04	0.2500E-05
6	0.1433E-04	0.3022E-05	0.2366E-04	0.3709E-05	0.1168E-04	0.2530E-05
7	0.6510E-04	0.4941E-05	0.4293E-04	0.4076E-05	0.7573E-05	0.2262E-05
8	0.5123E-04	0.4340E-05	0.2911E-04	0.3633E-05	0.1141E-04	0.2984E-05
9	0.2584E-04	0.3599E-05	0.1362E-04	0.3052E-05	0.1467E-04	0.4696E-05
10	0.1005E-04	0.3013E-05	0.8911E-05	0.3098E-05	0.2472E-04	0.3620E-05
20 - 1	0.1192E-04	0.3233E-05	0.4439E-05	0.2292E-05	0.8734E-05	0.3838E-05
2	0.1243E-04	0.3162E-05	---	---	0.8323E-05	0.4398E-05
3						
4						
5						
6						
21 - 1	0.4818E-03	0.1573E-04	0.1019E-04	0.3111E-05	0.1727E-04	0.4705E-05
2	0.6262E-05	0.3250E-05	0.1131E-04	0.3415E-05	0.9037E-05	0.4118E-05
3	0.1042E-02	0.3292E-04	0.6390E-05	0.2643E-05	0.8494E-05	0.3358E-05
4	0.8973E-04	0.5240E-05	0.6705E-05	0.2796E-05	0.6633E-05	0.2598E-05
5	0.3487E-04	0.4175E-05	0.2979E-04	0.3839E-05	0.4768E-04	0.4209E-05
6	0.2570E-04	0.3488E-05	0.7630E-04	0.4973E-05	0.4067E-04	0.3547E-05
7	0.4873E-04	0.4601E-05	0.4485E-04	0.4162E-05	0.5948E-04	0.3979E-05
8	0.9136E-04	0.5533E-05	0.3876E-04	0.3907E-05	0.1802E-04	0.3484E-05
9	0.4845E-04	0.4059E-05	0.1391E-04	0.3253E-05	0.1173E-04	0.3735E-05
10	0.2430E-04	0.3428E-05	0.8363E-05	0.2949E-05	0.1233E-04	0.4555E-05
11	0.1243E-04	0.2934E-05	0.1128E-04	0.3171E-05	0.2151E-04	0.5365E-05
12	0.1980E-04	0.3193E-05	0.6324E-05	0.2876E-05	0.1731E-04	0.3855E-05
	GYOSEN					
19 - 1	0.4604E-05	0.2731E-05				
2	0.1060E-02	0.1958E-04				
3	0.1147E-02	0.2110E-04				
4	0.9816E-05	0.2081E-05				
5	0.4739E-05	0.1841E-05				
6	0.4376E-05	0.2084E-05				
7	0.5738E-05	0.2225E-05				
8						
9						
10						
20 - 1						
2						
3	0.7778E-05	0.3339E-05				
4	0.5295E-05	0.2198E-05				
5	0.7356E-05	0.2757E-05				
6						
21 - 1	0.2429E-05	0.2044E-05				
2	0.6458E-05	0.2123E-05				
3	0.1529E-04	0.2552E-05				
4	0.6197E-05	0.2515E-05				
5	0.2436E-05	0.2183E-05				
6	0.3428E-04	0.2615E-05				
7	0.3441E-04	0.2733E-05				
8						
9						
10						
11						
12						

	MISAKI	KANONJI	IYOMISHIMA
19 - 1			
2			
3			
4	0.4327E-05 0.3555E-05	0.8490E-05 0.2963E-05	0.7176E-05 0.2879E-05
5	0.9966E-05 0.4039E-05	0.1081E-04 0.3049E-05	0.7178E-04 0.4574E-05
6	0.8258E-05 0.3897E-05		0.1256E-03 0.6168E-05
7	0.6737E-05 0.3554E-05	0.1809E-04 0.3387E-05	0.1218E-03 0.5937E-05
8	0.7618E-05 0.3571E-05	0.1776E-04 0.3000E-05	0.1945E-04 0.3074E-05
9	0.7304E-05 0.4018E-05	0.2527E-04 0.3172E-05	0.1307E-04 0.3029E-05
10	0.1153E-04 0.3630E-05	0.1408E-04 0.2584E-05	0.1076E-04 0.2954E-05
20 - 1	0.1094E-04 0.3103E-05	0.7260E-05 0.2017E-05	0.4672E-05 0.2137E-05
2	0.7692E-05 0.3269E-05	0.2717E-05 0.2019E-05	0.7907E-05 0.2422E-05
3	0.6348E-05 0.3722E-05	0.6164E-05 0.2152E-05	0.3060E-05 0.1676E-05
4	0.1341E-04 0.3629E-05	0.1801E-04 0.2803E-05	0.3668E-05 0.2144E-05
5	0.1105E-04 0.4242E-05	0.1630E-04 0.3246E-05	0.2926E-04 0.3203E-05
6	0.3385E-05 0.2163E-05	0.4014E-05 0.2655E-05	
21 - 1			
2			
3			
4			
5	0.2558E-05 0.2019E-05	0.4361E-05 0.2450E-05	0.1007E-04 0.2608E-05
6	0.5143E-05 0.2046E-05	0.2618E-05 0.2278E-05	
7	0.4866E-05 0.2173E-05	0.6782E-05 0.2630E-05	0.1237E-04 0.2897E-05
8	0.8431E-05 0.2374E-05	0.1566E-04 0.3212E-05	0.1819E-04 0.2973E-05
9	0.7650E-05 0.2136E-05	0.1457E-04 0.2786E-05	0.4735E-05 0.2048E-05
10	0.6771E-05 0.2104E-05	0.1153E-04 0.2530E-05	0.7963E-05 0.2340E-05
11	0.6094E-05 0.2325E-05	0.6200E-05 0.2254E-05	0.7717E-05 0.2500E-05
12	0.7874E-05 0.2383E-05	0.4331E-05 0.2179E-05	0.4590E-05 0.2259E-05
	NIHAMA	UOSHIMA	FUNE
19 - 1	0.8184E-05 0.2329E-05		
2	0.1011E-01 0.2765E-03		
3	0.1949E-02 0.5634E-04		
4	0.1030E-03 0.4696E-05	0.9468E-05 0.3151E-05	
5	0.2583E-04 0.3081E-05	0.7346E-05 0.3103E-05	
6	0.4267E-05 0.2702E-05	0.8239E-05 0.2876E-05	
7	0.1048E-04 0.2909E-05	0.8146E-05 0.2928E-05	0.4831E-05 0.2379E-05
8	0.7119E-04 0.4226E-05	0.3615E-05 0.2603E-05	0.1919E-05 0.2250E-05
9	0.9450E-05 0.2694E-05	0.8841E-05 0.2971E-05	0.2683E-05 0.1877E-05
10	0.1091E-04 0.3008E-05	— — —	0.7300E-05 0.1878E-05
20 - 1	0.1171E-04 0.3421E-05	0.5369E-05 0.3108E-05	0.7079E-05 0.1732E-05
2	0.8030E-05 0.3222E-05	0.3765E-05 0.3147E-05	0.3784E-05 0.1311E-05
3	0.1596E-04 0.3885E-05	0.8109E-05 0.3609E-05	0.4014E-05 0.1847E-05
4	0.1502E-04 0.3134E-05	0.1552E-04 0.4000E-05	0.2993E-05 0.1607E-05
5	0.1384E-04 0.3848E-05	0.9413E-05 0.3555E-05	0.4786E-05 0.1768E-05
6	0.6147E-05 0.2817E-05	0.2782E-05 0.2570E-05	— — —
21 - 1	0.5721E-05 0.3236E-05		
2	0.1413E-02 0.3941E-04		
3	0.8794E-05 0.3581E-05		
4	0.1020E-04 0.3317E-05		
5	0.3015E-04 0.3677E-05	0.9280E-05 0.4963E-05	0.2240E-05 0.1587E-05
6	0.4102E-04 0.3879E-05	0.7717E-05 0.3932E-05	0.3695E-05 0.1598E-05
7	0.5917E-04 0.4199E-05	0.5271E-05 0.3870E-05	0.9195E-04 0.2774E-05
8	0.8843E-04 0.5671E-05	0.8117E-05 0.3564E-05	0.4104E-05 0.1893E-05
9	0.1575E-04 0.4685E-05	0.7817E-05 0.3785E-05	
10	0.2551E-04 0.4733E-05	0.1261E-04 0.3885E-05	
11	0.2082E-04 0.4298E-05	0.9390E-03 0.3041E-03	
12	0.1820E-04 0.4401E-05	0.1002E-02 0.3256E-03	

b: Dysprosium

	TOYO		MIYAKUBO		YUGE	
19 - 1						
2						
3						
4	0.6784E-04	0.1040E-04	0.2671E-04	0.5917E-05	0.1525E-04	0.1034E-04
5	0.5932E-04	0.1005E-04	0.3534E-04	0.5423E-05	0.1631E-04	0.1016E-04
6	0.9295E-04	0.1230E-04	0.3155E-04	0.6045E-05	0.1646E-04	0.9879E-05
7	0.1677E-03	0.1594E-04	0.9644E-04	0.7839E-05	0.4203E-04	0.1130E-04
8	0.3824E-03	0.1898E-04	0.1735E-03	0.8426E-05	0.2920E-04	0.9642E-05
9	0.1014E-03	0.1185E-04	0.7397E-04	0.6435E-05	0.5238E-04	0.1350E-04
10	0.4231E-04	0.8666E-05	0.1183E-04	0.6163E-05	0.3870E-04	0.1024E-04
20 - 1	0.4340E-04	0.1056E-04	0.1394E-04	0.6614E-05	0.6975E-04	0.1394E-04
2	0.1195E-03	0.1189E-04	0.1584E-04	0.5594E-05	0.3207E-04	0.1527E-04
3	0.7064E-04	0.1382E-04	0.7963E-04	0.1173E-04	0.4038E-04	0.1404E-04
4	0.1378E-03	0.1535E-04	0.5022E-04	0.8365E-05	0.3966E-04	0.1351E-04
5	0.1966E-03	0.1830E-04	0.1073E-03	0.1083E-04	0.5470E-04	0.1728E-04
6	0.6963E-04	0.1297E-04	0.1873E-04	0.1032E-04	0.2211E-04	0.1762E-04
21 - 1						
2						
3						
4						
5	0.8504E-04	0.1802E-04	0.1356E-04	0.7302E-05	0.1826E-04	0.1443E-04
6	0.7090E-04	0.1860E-04	0.2386E-04	0.7868E-05	0.3088E-04	0.1425E-04
7	0.1153E-03	0.1936E-04	0.3354E-04	0.8811E-05	---	---
8	0.2671E-03	0.2147E-04	0.2500E-03	0.1193E-04	0.3535E-04	0.1768E-04
9	0.1966E-03	0.1921E-04	0.2449E-03	0.1179E-04	0.5388E-04	0.1975E-04
10	0.2662E-04	0.1369E-04	0.4546E-04	0.8371E-05	0.6750E-04	0.1974E-04
11	0.1724E-04	0.1378E-04	0.9325E-04	0.9511E-05	0.4529E-04	0.1998E-04
12	0.2466E-04	0.1419E-04	0.3131E-04	0.9621E-05	0.5543E-04	0.2123E-04
	TOMO		KASAOKA		KITAKISHIMA	
19 - 1						
2						
3						
4	0.7328E-04	0.4980E-05	0.1335E-03	0.7326E-05	0.1898E-03	0.7376E-05
5	0.3160E-04	0.4592E-05	0.5502E-04	0.6080E-05	0.1258E-03	0.7840E-05
6	0.2330E-04	0.4228E-05	0.8744E-04	0.5355E-05	0.1911E-03	0.7946E-05
7	0.1766E-04	0.3961E-05	0.9960E-04	0.5426E-05	0.1747E-03	0.7910E-05
8	0.5301E-04	0.4756E-05	0.1022E-03	0.5424E-05	0.5042E-04	0.4830E-05
9	0.3129E-04	0.4498E-05	0.5808E-04	0.4254E-05	0.2614E-04	0.4526E-05
10	0.9956E-04	0.7116E-05	0.4347E-04	0.4032E-05	0.2379E-04	0.4462E-05
20 - 1	0.8623E-04	0.7204E-05	0.2965E-04	0.4228E-05	0.6308E-04	0.5674E-05
2	0.5289E-04	0.6759E-05			0.3978E-04	0.6513E-05
3	0.5682E-04	0.6930E-05	0.5242E-04	0.4437E-05	0.7781E-04	0.7635E-05
4	0.6947E-04	0.7402E-05	0.3082E-03	0.9159E-05	0.2085E-03	0.9579E-05
5	0.5537E-04	0.6764E-05	0.7882E-04	0.6344E-05	0.1953E-03	0.7532E-05
6	0.1092E-04	0.5916E-05	0.7568E-04	0.5638E-05	0.5500E-04	0.4444E-05
21 - 1						
2						
3						
4						
5	0.1421E-04	0.3986E-05	0.5761E-04	0.5536E-05	0.3385E-04	0.5348E-05
6	0.2005E-04	0.3803E-05	0.5524E-04	0.5019E-05	0.1606E-03	0.7425E-05
7	0.1638E-04	0.3912E-05	0.5791E-04	0.5097E-05	0.2194E-03	0.8351E-05
8	0.3152E-04	0.4342E-05	0.1149E-03	0.5886E-05	0.5557E-04	0.5432E-05
9	0.5026E-04	0.4906E-05	0.9610E-04	0.5822E-05	0.2507E-04	0.4733E-05
10	0.1102E-03	0.6641E-05	0.6404E-04	0.4903E-05	0.7364E-04	0.6322E-05
11	0.7470E-04	0.7412E-05	0.4686E-04	0.4516E-05	0.3586E-04	0.5885E-05
12	0.2806E-04	0.6398E-05	0.2426E-04	0.4052E-05	0.2537E-04	0.4860E-05

	SOHBIRAKI		KOHATO		IZUMIKAWA	
19 - 1	0.1319E-03	0.3434E-04	0.7629E-04	0.1143E-04	0.3826E-04	0.1323E-04
2	0.2246E-03	0.4828E-04	0.1164E-03	0.1126E-04	0.1514E-03	0.1707E-04
3	0.6966E-03	0.5065E-04	0.1921E-03	0.1653E-04	0.7567E-04	0.1510E-04
4	0.5968E-03	0.5149E-04	0.1846E-03	0.1696E-04	0.8082E-04	0.1799E-04
5	0.3490E-03	0.3993E-04	0.1040E-03	0.1403E-04	0.6139E-04	0.1679E-04
6	0.7801E-04	0.6685E-05	0.2687E-03	0.1282E-04	0.7214E-04	0.8746E-05
7	0.2068E-03	0.9970E-05	0.1881E-02	0.5800E-04	0.1170E-02	0.3825E-04
8	0.1269E-02	0.3977E-04	0.1250E-02	0.4066E-04	0.4402E-02	0.1325E-03
9	0.1837E-02	0.5818E-04	0.2257E-02	0.6941E-04	0.2936E-02	0.9008E-04
10	0.1555E-03	0.7506E-05	0.1257E-02	0.4006E-04	0.1647E-02	0.5674E-04
20 - 1	0.1118E-03	0.8214E-05	0.5206E-03	0.1918E-04	0.6921E-03	0.2336E-04
2	0.4844E-04	0.5087E-05	0.2750E-03	0.1305E-04	0.3232E-03	0.1377E-04
3	0.4089E-04	0.5806E-05	0.2497E-03	0.1398E-04	0.2552E-03	0.1542E-04
4	0.6329E-04	0.6819E-05	0.5182E-03	0.2182E-04	0.1486E-03	0.1251E-04
5	0.9522E-03	0.3706E-04	0.2588E-03	0.1482E-04	0.2055E-03	0.1651E-04
6	0.1007E-02	0.3933E-04	0.1493E-03	0.1310E-04	0.9886E-04	0.1428E-04
21 - 1	0.5974E-04	0.3176E-04	0.1198E-03	0.1118E-04	0.3071E-04	0.9709E-05
2	0.8945E-04	0.3075E-04	0.1921E-03	0.1769E-04	0.1183E-03	0.2417E-04
3	0.2466E-03	0.4796E-04	0.1257E-03	0.1566E-04	0.3286E-03	0.1890E-04
4	0.1774E-03	0.4553E-04	0.1690E-03	0.1308E-04	0.1238E-03	0.1189E-04
5	0.2056E-03	0.4631E-04	0.1307E-03	0.1128E-04	0.5442E-04	0.9288E-05
6	0.3695E-04	0.5236E-05	0.2141E-03	0.8947E-05	0.5020E-04	0.5583E-05
7	0.5151E-04	0.4785E-05	0.3256E-03	0.1224E-04	0.1221E-03	0.7420E-05
8	0.1641E-03	0.8524E-05	0.4245E-03	0.1497E-04	0.3307E-03	0.1320E-04
9	0.3824E-03	0.1490E-04	0.1977E-03	0.8690E-05	0.1598E-03	0.8544E-05
10	0.1796E-03	0.1269E-04	0.8155E-04	0.5910E-05	0.7634E-04	0.5452E-05
11	0.1959E-03	0.1428E-04	0.1982E-03	0.9063E-05	0.1812E-03	0.9375E-05
12	0.1080E-03	0.2040E-04	0.1608E-03	0.7738E-05	0.1310E-03	0.7167E-05
	TAKIHAMA		SEKIKAWA		NAGATSU	
19 - 1	0.2171E-04	0.1338E-04	0.4362E-04	0.1716E-04	0.1221E-03	0.3178E-04
2	0.3670E-04	0.1309E-04	0.1404E-03	0.2112E-04	0.5544E-03	0.4882E-04
3	0.6026E-04	0.1575E-04	0.9185E-04	0.2067E-04	0.1503E-03	0.5335E-04
4	0.4603E-04	0.1776E-04	0.6335E-04	0.1998E-04	0.7830E-03	0.7189E-04
5	0.3734E-04	0.1593E-04	0.8135E-04	0.2154E-04	0.6225E-03	0.5285E-04
6	0.5171E-04	0.4980E-05	0.1127E-03	0.1136E-04	0.3775E-03	0.1730E-04
7	0.1525E-02	0.4703E-04	0.1338E-01	0.4459E-03	0.7210E-02	0.2404E-03
8	0.6526E-02	0.1932E-03	0.2594E-02	0.9185E-04	0.2333E-02	0.7983E-04
9	0.2660E-02	0.8008E-04	0.1527E-02	0.5509E-04	0.8201E-03	0.3119E-04
10	0.1574E-02	0.4844E-04	0.9522E-03	0.3659E-04	0.9443E-03	0.3416E-04
20 - 1	0.7282E-03	0.2391E-04	0.3745E-03	0.1634E-04	0.7743E-03	0.2859E-04
2	0.2042E-03	0.1005E-04			0.5860E-03	0.2652E-04
3						
4						
5						
6						
21 - 1	0.7652E-04	0.7098E-05	---	---	0.7224E-04	0.1761E-04
2	0.6806E-04	0.7265E-05	0.3811E-04	0.2342E-04	0.5566E-04	0.1639E-04
3	0.5923E-04	0.6024E-05	0.5286E-04	0.2268E-04	0.2264E-04	0.1712E-04
4	0.3894E-04	0.6594E-05	0.5301E-04	0.2465E-04	0.4309E-04	0.1949E-04
5	0.4422E-04	0.6807E-05	0.2227E-04	0.2433E-04	0.2101E-04	0.1987E-04
6	0.9381E-03	0.3820E-04	0.1121E-03	0.1710E-04	0.9130E-04	0.9330E-05
7	0.2182E-03	0.1101E-04	0.1544E-03	0.1754E-04	0.2195E-03	0.1358E-04
8	0.1317E-03	0.7967E-05	0.8658E-03	0.3973E-04	0.2753E-03	0.1418E-04
9	0.1426E-03	0.8625E-05	0.1414E-02	0.5882E-04	0.1576E-03	0.1240E-04
10	0.2715E-03	0.1258E-04	0.7515E-04	0.1742E-04	0.4261E-04	0.1002E-04
11	0.2308E-03	0.1103E-04	0.1018E-03	0.1708E-04	0.1581E-03	0.1314E-04
12	0.2068E-03	0.1056E-04	0.1571E-03	0.1979E-04	0.1243E-03	0.1071E-04

	FUNAKI		TAMATSU		SUMITOMO	
19 - 1	0.5693E-04	0.2009E-04	0.4561E-04	0.2322E-04	0.1383E-03	0.3972E-04
2	0.1692E-03	0.2617E-04	0.3258E-04	0.2035E-04	0.1542E-03	0.5658E-04
3	0.1696E-03	0.2516E-04	0.5558E-04	0.2349E-04	0.5086E-04	0.3180E-04
4	0.8668E-04	0.2266E-04	0.1588E-03	0.3326E-04	0.7150E-04	0.1648E-04
5	0.9785E-04	0.2044E-04	0.1738E-03	0.3153E-04	0.7046E-04	0.1629E-04
6	0.1194E-03	0.8904E-05	0.1600E-03	0.1427E-04	0.7289E-04	0.1352E-04
7	0.5594E-02	0.1872E-03	0.2723E-03	0.1746E-04	0.7133E-04	0.1261E-04
8	0.9781E-02	0.3256E-03	0.1868E-03	0.1479E-04	0.1013E-02	0.4144E-04
9	0.2434E-02	0.8298E-04	0.2607E-03	0.1607E-04	0.2460E-03	0.2798E-04
10	0.1196E-02	0.4249E-04	0.4091E-03	0.2019E-04	0.4094E-03	0.2607E-04
20 - 1	0.5883E-03	0.2327E-04	0.1340E-03	0.1152E-04	0.2658E-03	0.2594E-04
2	0.3325E-03	0.1593E-04	0.3029E-04	0.8234E-05	0.6994E-04	0.2578E-04
3						
4						
5						
6						
21 - 1	0.5965E-04	0.3279E-04	0.4984E-04	0.2889E-04	0.1102E-03	0.3734E-04
2	0.4918E-04	0.2421E-04	0.6401E-04	0.3139E-04	0.7689E-04	0.3267E-04
3	0.1528E-03	0.5426E-04	0.6300E-04	0.2586E-04	---	---
4	0.1346E-03	0.2991E-04	0.6566E-04	0.2804E-04	0.3342E-04	0.2166E-04
5	0.2179E-03	0.3120E-04	0.7255E-04	0.3496E-04	0.9480E-04	0.3007E-04
6	0.1554E-03	0.1186E-04	0.6193E-04	0.1627E-04	0.5685E-04	0.1879E-04
7	0.4126E-03	0.2008E-04	0.1568E-03	0.1719E-04	0.7609E-04	0.2017E-04
8	0.6737E-03	0.2827E-04	0.1101E-03	0.1575E-04	0.1570E-03	0.2477E-04
9	0.4027E-03	0.1922E-04	0.8229E-04	0.1463E-04	0.8466E-03	0.4338E-04
10	0.1614E-03	0.1255E-04	0.4001E-04	0.1320E-04	0.1395E-03	0.3340E-04
11	0.8721E-04	0.1061E-04	0.3388E-04	0.1509E-04	0.3459E-03	0.4229E-04
12	0.1430E-03	0.1243E-04	0.2318E-04	0.1403E-04	0.5512E-04	0.2834E-04
	GYOSEN					
19 - 1	0.1724E-04	0.5467E-05				
2	0.1787E-04	0.4927E-05				
3	0.2012E-04	0.5204E-05				
4	0.1705E-04	0.4117E-05				
5	0.1431E-04	0.3971E-05				
6	0.1735E-04	0.4686E-05				
7	0.1208E-04	0.5167E-05				
8						
9						
10						
20 - 1						
2						
3	0.8452E-04	0.1216E-04				
4	0.3114E-04	0.8009E-05				
5	0.3902E-04	0.1023E-04				
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
21 - 1	0.1312E-04	0.6105E-05				
2	0.2265E-04	0.6307E-05				
3	0.1923E-04	0.7265E-05				
4	0.1594E-04	0.7835E-05				
5	0.1094E-04	0.6983E-05				
6	---	---				
7	0.1701E-04	0.7570E-05				
8						
9						
10						
11						
12						

	MISAKI	KANONJI	IYOMISHIMA
19 - 1			
2			
3			
4	0.4676E-04 0.1326E-04	0.6905E-04 0.5607E-05	0.3889E-04 0.6355E-05
5	0.3820E-04 0.1481E-04	0.6533E-04 0.5894E-05	0.5154E-03 0.2009E-04
6	0.3555E-04 0.1509E-04		0.8003E-03 0.2971E-04
7	0.5128E-04 0.1406E-04	0.1352E-03 0.7432E-05	0.1263E-02 0.4451E-04
8	0.4667E-04 0.1461E-04	0.1774E-03 0.7528E-05	0.2052E-03 0.1066E-04
9	0.9216E-04 0.1720E-04	0.1689E-03 0.7854E-05	0.4306E-03 0.1738E-04
10	0.8534E-04 0.1545E-04	0.8855E-04 0.5846E-05	0.7272E-03 0.2682E-04
20 - 1	0.4466E-04 0.1435E-04	0.3846E-04 0.4447E-05	0.6004E-03 0.2624E-04
2	0.1776E-04 0.1478E-04	0.2401E-04 0.4457E-05	0.5755E-03 0.2608E-04
3	0.2480E-04 0.1661E-04	0.3420E-04 0.4797E-05	0.9245E-04 0.1090E-04
4	0.7573E-04 0.1745E-04	0.1205E-03 0.7027E-05	0.3086E-03 0.1792E-04
5	0.5169E-04 0.2028E-04	0.7928E-04 0.7763E-05	0.2075E-03 0.1789E-04
6	0.7348E-05 0.1028E-04	0.1047E-04 0.6150E-05	
21 - 1			
2			
3			
4			
5	---	0.1863E-04 0.6221E-05	0.3842E-04 0.1386E-04
6	0.2121E-04 0.1082E-04	0.2638E-04 0.5563E-05	
7	0.3278E-04 0.1137E-04	0.3907E-04 0.6869E-05	0.5208E-04 0.1598E-04
8	0.3655E-04 0.1289E-04	0.8765E-04 0.8736E-05	0.1021E-03 0.1746E-04
9	0.2638E-04 0.1203E-04	0.7747E-04 0.7835E-05	0.3095E-04 0.1250E-04
10	0.3292E-04 0.1212E-04	0.6695E-04 0.7329E-05	0.1040E-03 0.1648E-04
11	0.3215E-04 0.1369E-04	0.2885E-04 0.6404E-05	0.8841E-04 0.1667E-04
12	0.3112E-04 0.1441E-04	0.2613E-04 0.6376E-05	0.5283E-04 0.1511E-04
	NIHAMA	UOSHIMA	FUNE
19 - 1	0.1334E-04 0.7462E-05		
2	0.7071E-04 0.2994E-04		
3	0.4083E-04 0.1933E-04		
4	0.3294E-04 0.8754E-05	0.4805E-04 0.1136E-04	
5	0.3444E-04 0.9509E-05	0.4009E-04 0.1116E-04	
6	0.2877E-04 0.5443E-05	0.4365E-04 0.1096E-04	
7	0.3974E-04 0.6071E-05	0.3607E-04 0.1077E-04	0.1831E-04 0.4903E-05
8	0.4321E-02 0.1446E-03	0.2443E-04 0.1010E-04	0.1638E-04 0.4804E-05
9	0.1504E-02 0.5128E-04	0.4156E-04 0.1204E-04	0.1430E-04 0.4097E-05
10	0.1298E-02 0.4498E-04	0.4261E-04 0.1254E-04	0.3496E-04 0.4326E-05
20 - 1	0.5654E-03 0.2187E-04	0.3950E-04 0.1285E-04	0.3909E-04 0.5217E-05
2	0.1749E-03 0.1056E-04	---	0.4808E-04 0.4422E-05
3	0.1413E-03 0.1086E-04	0.9721E-05 0.1534E-04	0.8872E-04 0.6408E-05
4	0.6644E-04 0.8229E-05	0.1183E-03 0.1831E-04	0.1814E-04 0.3186E-05
5	0.7367E-04 0.1023E-04	0.8161E-04 0.1683E-04	0.2092E-04 0.3560E-05
6	0.1708E-04 0.7295E-05	0.1471E-04 0.1207E-04	0.6659E-05 0.3656E-05
21 - 1	0.3960E-04 0.8889E-05		0.8025E-05 0.3592E-05
2	0.4602E-04 0.1074E-04		0.3922E-05 0.3696E-05
3	0.4999E-04 0.1020E-04		0.5242E-05 0.3808E-05
4	0.4367E-04 0.9802E-05		0.1764E-02 0.3862E-04
5	0.3725E-04 0.9629E-05	0.2494E-04 0.1601E-04	
6	0.5398E-04 0.7655E-05	0.3884E-04 0.1285E-04	
7	0.6183E-04 0.8064E-05	0.2239E-04 0.1271E-04	
8	0.8234E-03 0.3229E-04	0.2322E-04 0.1207E-04	
9	0.2798E-02 0.9702E-04	0.2979E-04 0.1326E-04	
10	0.3774E-03 0.1934E-04	0.4529E-04 0.1349E-04	
11	---	0.5860E-02 0.1870E-02	
12	---	0.7749E-02 0.2096E-02	

c: Holmium

	Toyo	MIYAKUBO	YUGE
19 - 1			
2			
3			
4	0.1265E-03 0.7723E-04	0.1216E-03 0.7580E-04	0.9994E-04 0.7448E-04
5	0.9088E-04 0.7251E-04	---	---
6	0.9340E-04 0.8483E-04	0.1002E-03 0.7287E-04	0.7636E-04 0.6426E-04
7	0.1208E-03 0.1038E-03	0.8863E-04 0.8397E-04	0.1222E-03 0.7140E-04
8	0.1428E-03 0.1013E-03	0.1370E-03 0.7256E-04	0.7884E-04 0.6227E-04
9	0.1511E-03 0.7348E-04	0.6035E-04 0.6230E-04	0.1160E-03 0.7997E-04
10	0.1059E-03 0.5304E-04	---	0.1320E-03 0.5933E-04
20 - 1	0.1294E-03 0.6431E-04	---	0.1074E-03 0.7762E-04
2	0.7925E-04 0.6325E-04	0.9301E-04 0.5934E-04	0.9976E-04 0.8525E-04
3			
4	0.7937E-04 0.7800E-04	0.1603E-03 0.1155E-03	0.1329E-03 0.7726E-04
5		0.1136E-03 0.7821E-04	0.1237E-03 0.7097E-04
6	0.1803E-03 0.9378E-04	0.1726E-03 0.9712E-04	0.1655E-03 0.8803E-04
7	0.1474E-03 0.9236E-04	0.1224E-03 0.9745E-04	---
8	0.1443E-03 0.6675E-04		---
21 - 1			
2			
3			
4			
5	0.1644E-03 0.9492E-04	0.8944E-04 0.6497E-04	0.9324E-04 0.7227E-04
6	0.1654E-03 0.9422E-04	0.1060E-03 0.6657E-04	0.8104E-04 0.6824E-04
7	0.1474E-03 0.9236E-04	0.1102E-03 0.7405E-04	---
8	0.1194E-03 0.9159E-04	0.1385E-03 0.7056E-04	0.9765E-04 0.8063E-04
9	0.1036E-03 0.8041E-04	---	0.1052E-03 0.8731E-04
10	0.1047E-03 0.6334E-04	0.1052E-03 0.6160E-04	0.9268E-04 0.8292E-04
11	0.1029E-03 0.6152E-04	0.6097E-04 0.6308E-04	0.1069E-03 0.8379E-04
12	0.7339E-04 0.6070E-04	---	0.1558E-03 0.8080E-04
	TOMO	KASAOKA	KITAKISHIMA
19 - 1			
2			
3			
4	0.2003E-03 0.1041E-03	0.1432E-03 0.1906E-03	0.2496E-03 0.1252E-03
5	0.1542E-03 0.1044E-03		0.1072E-03 0.1447E-03
6	0.1459E-03 0.8972E-04	0.2847E-03 0.1585E-03	0.1184E-03 0.1271E-03
7	0.1824E-03 0.8460E-04	0.1364E-03 0.1193E-03	0.2001E-03 0.1244E-03
8	0.1171E-03 0.9211E-04	0.2105E-03 0.1150E-03	0.1356E-03 0.8060E-04
9	0.1483E-03 0.8630E-04	---	0.1117E-03 0.7812E-04
10	0.2440E-03 0.1293E-03	0.1029E-03 0.8447E-04	0.9657E-04 0.7500E-04
20 - 1	0.1001E-03 0.1250E-03	0.1393E-03 0.7894E-04	0.1656E-03 0.1090E-03
2	0.1624E-03 0.1134E-03	0.8455E-04 0.8453E-04	0.2369E-03 0.1289E-03
3			
4	0.2046E-03 0.1144E-03	0.1010E-03 0.8036E-04	---
5	0.2364E-03 0.1191E-03	0.1855E-03 0.1451E-03	0.2228E-03 0.1448E-03
6	0.1284E-03 0.1038E-03	0.1169E-03 0.1143E-03	0.1222E-03 0.1112E-03
7	0.7692E-04 0.9607E-04	0.1210E-03 0.9175E-04	0.1067E-03 0.6863E-04
21 - 1			
2			
3			
4			
5	0.1383E-03 0.1131E-03	0.1192E-03 0.1357E-03	0.1471E-03 0.9284E-04
6	0.1787E-03 0.1014E-03	0.8975E-04 0.1161E-03	0.1466E-03 0.1088E-03
7	0.1457E-03 0.9659E-04	0.1626E-03 0.1159E-03	0.2436E-03 0.1141E-03
8	0.1775E-03 0.1040E-03	0.1870E-03 0.1214E-03	0.1002E-03 0.8552E-04
9	0.1718E-03 0.1125E-03	---	---
10	---	---	0.1101E-03 0.9468E-04
11	0.2515E-03 0.1599E-03	0.1236E-03 0.8703E-04	0.8337E-04 0.8910E-04
12	---	0.1228E-03 0.7939E-04	0.9012E-04 0.7228E-04

	SOHBIRAKI		KOHSATO		IZUMIKAWA	
19 - 1	0.3212E-03	0.1046E-03	0.9909E-04	0.6983E-04	0.7792E-04	0.7138E-04
2	0.9726E-03	0.1482E-03	0.9309E-04	0.6129E-04	---	---
3	0.1420E-03	0.1225E-03	0.2062E-03	0.8836E-04	0.8055E-04	0.7343E-04
4	0.2545E-03	0.1229E-03	---	---	0.9071E-04	0.8987E-04
5	0.7937E-04	0.9884E-04	0.1143E-03	0.7604E-04	0.1213E-03	0.8043E-04
6	0.9536E-03	0.5345E-03	0.1903E-03	0.1320E-03	0.1493E-03	0.1048E-03
7	0.5081E-03	0.5359E-03	0.2580E-03	0.1517E-03	0.1123E-02	0.1339E-03
8	0.1349E-02	0.8635E-03	0.2612E-03	0.1832E-03	0.1292E-03	0.1552E-03
9	0.2446E-02	0.1638E-02	0.2612E-03	0.1745E-03	0.2970E-03	0.1687E-03
10	0.5380E-03	0.2886E-03	0.2201E-03	0.1139E-03	0.1978E-03	0.9790E-04
20 - 1	0.5886E-03	0.4889E-03	0.1402E-03	0.1103E-03	0.6433E-04	0.6732E-04
2	0.3013E-03	0.2951E-03	0.1663E-03	0.1076E-03	0.1531E-03	0.8652E-04
3	0.8510E-03	0.3679E-03	0.9549E-04	0.8645E-04	0.1597E-03	0.8493E-04
4	0.5953E-03	0.3868E-03	0.2070E-03	0.1073E-03	0.9766E-04	0.7677E-04
5	0.1906E-03	0.1426E-03	0.9926E-04	0.8530E-04	0.9983E-04	0.9919E-04
6	0.1685E-02	0.9030E-03	0.9500E-04	0.8842E-04	0.1427E-03	0.8955E-04
21 - 1	0.6851E-04	0.8164E-04	0.9473E-04	0.9574E-04	0.2591E-03	0.1085E-03
2	0.1770E-03	0.7470E-04	0.6623E-03	0.1568E-03	0.1476E-02	0.2814E-03
3	0.9201E-04	0.1135E-03	0.2536E-03	0.1301E-03	0.2151E-03	0.1515E-03
4	0.1426E-03	0.1051E-03	0.1555E-03	0.9890E-04	0.2110E-03	0.1101E-03
5	0.1939E-03	0.1056E-03	0.1355E-03	0.8249E-04	0.1774E-03	0.8766E-04
6	0.6006E-03	0.4288E-03	0.3107E-03	0.1522E-03	0.1610E-03	0.1211E-03
7	0.8266E-03	0.3813E-03	0.1348E-02	0.1804E-03	0.3631E-02	0.1791E-03
8	0.5429E-03	0.4829E-03	0.1418E-03	0.8467E-04	0.1952E-03	0.1611E-03
9	0.1339E-02	0.5929E-03	0.1397E-03	0.1379E-03	0.1583E-03	0.1290E-03
10	---	---	0.1268E-03	0.1223E-03	0.2131E-03	0.9868E-04
11	0.1299E-03	0.8660E-04	0.2745E-03	0.1427E-03	0.2177E-03	0.1350E-03
12	0.1915E-03	0.1436E-03	0.1804E-03	0.1195E-03	0.6707E-04	0.1024E-03
	TAKIHAMA		SEKIKAWA		NAGATSU	
19 - 1	0.1074E-03	0.6432E-04	0.1587E-03	0.7138E-04	0.1022E-03	0.8908E-04
2	---	---	0.1275E-03	0.7668E-04	0.3639E-03	0.1230E-03
3	0.6569E-04	0.6955E-04	0.8308E-04	0.7736E-04	0.2046E-03	0.1459E-03
4	0.9190E-04	0.7748E-04	0.1187E-03	0.7580E-04	0.2165E-03	0.1693E-03
5	---	---	---	---	0.2320E-03	0.1215E-03
6	0.1398E-03	0.8975E-04	0.8849E-04	0.8162E-04	0.1459E-03	0.1379E-03
7	0.1946E-03	0.1336E-03	0.1322E-03	0.1151E-03	---	---
8	0.2061E-03	0.1707E-03	0.2033E-02	0.5555E-03	0.2297E-03	0.1540E-03
9	0.2872E-03	0.1274E-03	0.1947E-03	0.9142E-04	0.3251E-03	0.1483E-03
10	0.2520E-03	0.1139E-03	0.1480E-03	0.8376E-04	---	---
20 - 1	0.2468E-03	0.1074E-03	0.8460E-04	0.5890E-04	0.1081E-03	0.9516E-04
2	0.1062E-03	0.1029E-03	---	---	0.1053E-03	0.9613E-04
3	---	---	---	---	---	---
4	---	---	---	---	---	---
5	---	---	---	---	---	---
6	---	---	---	---	---	---
21 - 1	0.2218E-03	0.1264E-03	0.1256E-03	0.6995E-04	0.1323E-03	0.8390E-04
2	0.1447E-03	0.1286E-03	0.8382E-04	0.7788E-04	0.2262E-03	0.7604E-04
3	0.9779E-04	0.1017E-03	0.7084E-04	0.7149E-04	0.1356E-03	0.7683E-04
4	0.1327E-03	0.1134E-03	0.1089E-03	0.7743E-04	0.7365E-04	0.8376E-04
5	0.1927E-03	0.1155E-03	0.1205E-03	0.7374E-04	0.1749E-03	0.8531E-04
6	0.2626E-02	0.3583E-03	---	---	0.1147E-03	0.8568E-04
7	0.1480E-03	0.1147E-03	0.1427E-03	0.9089E-04	0.1459E-03	0.1013E-03
8	0.1682E-03	0.9554E-04	0.5916E-03	0.3932E-03	0.1083E-03	0.8738E-04
9	0.1338E-03	0.9766E-04	0.6519E-03	0.4771E-03	0.1557E-03	0.9509E-04
10	0.1309E-03	0.1054E-03	0.1297E-03	0.9012E-04	0.1875E-03	0.8541E-04
11	0.9611E-04	0.8777E-04	0.1953E-03	0.8278E-04	0.1212E-03	0.9736E-04
12	0.1246E-03	0.9311E-04	0.1994E-03	0.8786E-04	---	---

	FUNAKI		TAMATSU		SUMITOMO	
19 - 1	0.9002E-04	0.8116E-04	0.8011E-04	0.7521E-04	0.1934E-03	0.1228E-03
2	0.2036E-03	0.9561E-04	0.9830E-04	0.6242E-04	0.1159E-03	0.1073E-03
3	0.8160E-04	0.9065E-04	0.1244E-03	0.6779E-04	0.1450E-03	0.8600E-04
4	0.1384E-03	0.8097E-04	0.8613E-04	0.9321E-04	0.1127E-03	0.6788E-04
5	0.1052E-03	0.7113E-04	---	---	0.1154E-03	0.9134E-04
6	0.1737E-03	0.9708E-04	0.1653E-03	0.1094E-03	0.1051E-03	0.7748E-04
7	0.1297E-03	0.1510E-03	0.1984E-03	0.1136E-03	0.1305E-03	0.8078E-04
8	0.1764E-03	0.1450E-03	0.1629E-03	0.1010E-03	0.2043E-03	0.9248E-04
9	0.1625E-03	0.1161E-03	0.1116E-03	0.9100E-04	0.1015E-03	0.9789E-04
10	0.9014E-04	0.9809E-04	0.1320E-03	0.9409E-04	0.2091E-03	0.1184E-03
20 - 1	0.2341E-03	0.1027E-03	0.1372E-03	0.7084E-04	0.1835E-03	0.1421E-03
2	0.1587E-03	0.1004E-03	0.6844E-04	0.5754E-04	0.8769E-04	0.9956E-04
3						
4						
5						
6						
21 - 1	0.3197E-03	0.1204E-03	0.7567E-04	0.7886E-04	0.3584E-03	0.1852E-03
2	0.1159E-03	0.8358E-04	0.1624E-03	0.8562E-04	0.1150E-02	0.2764E-03
3	---	---	0.8744E-04	0.6631E-04	0.2277E-03	0.1342E-03
4	0.1058E-03	0.9957E-04	0.4892E-04	0.7095E-04	0.1155E-03	0.7034E-04
5	0.1335E-03	0.9471E-04	0.1191E-03	0.8591E-04	0.8798E-04	0.6817E-04
6	0.4205E-03	0.1063E-03	0.1609E-03	0.1156E-03	0.8938E-04	0.7110E-04
7	0.4119E-03	0.1340E-03	---	---	0.1075E-03	0.6349E-04
8	0.5542E-03	0.1478E-03	0.8193E-04	0.1013E-03	---	---
9	0.1392E-03	0.1121E-03	0.9967E-04	0.9166E-04	0.2276E-03	0.1312E-03
10	0.1422E-03	0.9928E-04	0.1513E-03	0.8572E-04	0.2217E-03	0.9628E-04
11	0.1621E-03	0.8947E-04	0.7045E-04	0.8971E-04	0.1546E-03	0.1071E-03
12	---	---	0.1214E-03	0.8134E-04	0.2081E-03	0.1216E-03
	GYOSEN					
19 - 1	---	---				
2	0.1693E-03	0.8143E-04				
3	0.1841E-03	0.8151E-04				
4	0.1073E-03	0.6141E-04				
5	0.1092E-03	0.5851E-04				
6	0.1159E-03	0.6511E-04				
7	0.1361E-03	0.7181E-04				
8						
9						
10						
20 - 1						
2						
3	0.2211E-03	0.9443E-04				
4	0.1331E-03	0.6221E-04				
5	0.9912E-04	0.7668E-04				
6						
21 - 1	0.1650E-03	0.6396E-04				
2	0.4659E-03	0.6836E-04				
3	0.2299E-02	0.9522E-04				
4	0.2153E-02	0.9646E-04				
5	0.6541E-03	0.7275E-04				
6	0.1540E-02	0.8000E-04				
7	0.3023E-02	0.9940E-04				
8						
9						
10						
11						
12						

	MISAKI	KANONJI	IYOMISHIMA
19 - 1			
2			
3			
4	0.1727E-03 0.9950E-04	0.1290E-03 0.9530E-04	0.1124E-03 0.1006E-03
5	0.1372E-03 0.1090E-03	0.1708E-03 0.9940E-04	0.1955E-03 0.1291E-03
6	0.9415E-04 0.1044E-03		0.2709E-03 0.1566E-03
7	0.1205E-03 0.9572E-04	0.1466E-03 0.1070E-03	0.2955E-03 0.1510E-03
8	0.1254E-03 0.9144E-04		---
9	0.2136E-03 0.1067E-03	0.1040E-03 0.9811E-04	0.1621E-03 0.1012E-03
10	0.1851E-03 0.9244E-04	0.1373E-03 0.7786E-04	0.2003E-03 0.9933E-04
20 - 1	0.1690E-03 0.8450E-04	0.1292E-03 0.6130E-04	0.8518E-04 0.6279E-04
2	0.1155E-03 0.8798E-04	0.1443E-03 0.6334E-04	0.1097E-03 0.6697E-04
3	0.1481E-03 0.9824E-04	0.6733E-04 0.6613E-04	0.1118E-03 0.4901E-04
4	0.1352E-03 0.9725E-04	0.6585E-04 0.8180E-04	0.9993E-04 0.5867E-04
5	---	0.1046E-03 0.9780E-04	0.1501E-03 0.7873E-04
6	0.6093E-04 0.5668E-04		0.1137E-01 0.5565E-02
21 - 1			
2			
3			
4			
5	---	---	0.1013E-03 0.7245E-04
6	0.7190E-04 0.5293E-04	0.1016E-03 0.6825E-04	---
7	0.5686E-04 0.5946E-04	0.9499E-04 0.8043E-04	0.2078E-03 0.7658E-04
8	0.6624E-04 0.5383E-04	0.1546E-03 0.9505E-04	---
9	0.8805E-04 0.5367E-04	0.1361E-03 0.8322E-04	0.7023E-04 0.5601E-04
10	0.8766E-04 0.5939E-04	0.1393E-03 0.7265E-04	0.9446E-04 0.6421E-04
11	0.1087E-03 0.5907E-04	0.1071E-03 0.6756E-04	0.1356E-03 0.6697E-04
12		0.7897E-04 0.6516E-04	0.9964E-04 0.6172E-04
	NIHAMA	UOSHIMA	FUNE
19 - 1	0.9278E-04 0.7399E-04		
2	0.2397E-02 0.3511E-03		
3	0.4528E-03 0.1946E-03		
4	0.1050E-03 0.8255E-04	0.1435E-03 0.9858E-04	
5	0.1682E-03 0.8379E-04	0.1304E-03 0.9657E-04	
6	0.1362E-03 0.9240E-04	---	
7	0.7404E-04 0.1000E-03	---	0.1247E-03 0.7595E-04
8	0.4489E-03 0.1317E-03	0.1044E-03 0.7884E-04	---
9	0.1487E-03 0.9835E-04	0.1537E-03 0.8900E-04	0.9065E-04 0.5842E-04
10	0.1637E-03 0.1070E-03	0.1346E-03 0.9265E-04	0.9645E-04 0.5718E-04
20 - 1	0.2077E-03 0.1172E-03	0.1205E-03 0.9176E-04	0.8355E-04 0.5050E-04
2	0.1469E-03 0.1112E-03	0.8174E-04 0.9705E-04	0.6241E-04 0.3742E-04
3	0.2007E-03 0.1297E-03	0.1803E-03 0.1079E-03	0.6832E-04 0.5392E-04
4	0.1647E-03 0.9901E-04	0.1569E-03 0.1140E-03	0.8566E-04 0.5315E-04
5	0.1578E-03 0.1270E-03	0.1019E-03 0.1008E-03	0.8611E-04 0.5676E-04
6	0.1319E-03 0.9526E-04	0.1209E-03 0.7660E-04	0.8720E-04 0.6058E-04
21 - 1	0.1214E-03 0.1058E-03		
2	0.3135E-03 0.1352E-03		
3	0.1205E-03 0.1153E-03		
4	0.5276E-04 0.1097E-03		
5	0.2274E-03 0.1066E-03	0.2754E-03 0.1507E-03	
6	0.1146E-03 0.1138E-03	0.1290E-03 0.1165E-03	0.7837E-04 0.5025E-04
7	0.2003E-03 0.1163E-03	0.1457E-03 0.1096E-03	0.7886E-03 0.5777E-04
8	0.8333E-03 0.1447E-03	0.1461E-03 0.1033E-03	0.7362E-04 0.6193E-04
9	0.1818E-03 0.1468E-03	0.1643E-03 0.1088E-03	
10	0.1875E-03 0.1354E-03	0.2424E-03 0.1078E-03	
11	---	0.7857E-02 0.7674E-02	
12	---	0.1152E-01 0.8097E-02	

第7章 局地風モデルを利用した光化学大気汚染の数値シミュレーション*

7.1 はじめに

7.1.1 大気汚染研究における局地風の重要性

大気汚染の数値シミュレーションは、汚染濃度と排出源との因果関係を定量的に明らかにすることができる。これは排出源の削減計画や新たな施設を計画する際の事前評価に必要である。自動車や工場から大気中へ排出された汚染質は風により運ばれる。汚染濃度と排出源との因果関係を明確にするためには、まずこの風の働きを正確にとらえる必要がある。

風下数 km くらいの小規模汚染では、多くの場合、風は水平方向には一様と仮定できる。しかし光化学スモッグのように、汚染の範囲が 100 km 以上におよぶ場合には、そうはいかない。とくに、わが国によくみられるように汚染源が海や山で囲まれた平野の中にある場合には、大気の流れは局地風の影響を強く受けて複雑なものとなる。光化学大気汚染のシミュレーションにとって、地上風ばかりでなく上層風も重要な要素であることが、感度解析の手段により示されている (Seigneur, et al. 1981)。つまり、局地風の立体的構造を知る必要がある。

7.1.2 局地風の研究へのフィードバック

大気中の汚染質の挙動を調べることは、気象学的立場からみても重要なことである。つまり、汚染質を大気の流れを追うトレーサーとみることができるからである。局地風は地上でか、せいぜいパイボールなどによる上層の水平風しか直接には観測できない。汚染濃度は、水平風のほか鉛直風や乱流拡散の影響を受けた結果であり、間接的ながら、これら直接測定が難しい量をチェックできる。とくに後に述べるように航空機やカイツーンによる立体的な汚染観測は、局地風の鉛直構造に関する有益な情報を与えてくれる。最も現実的には、途中での反応や変質があったり、排出源が正確につかめないなど難しい問題もある。

7.1.3 数値モデルの概要

この研究では、主に数値モデルにより局地風と光化学大気汚染の挙動との関係を明らかにしようと試みる。とくに汚染質の輸送過程の基本的な性質を調べる。ただし、ここで用いられる数値モデルは、排出規制などの実用にただちに供せられるほどの高い精度を持っていないことを強調しておく。その目的のためには、輸送過程だけではなく、反応過程や排出源情報などあらゆる要素の精度

*木村富士男：応用気象研究部

を揃える必要があり、多くの分野の専門家の協力が不可欠である。

この数値モデルは図 7.1 に示すように 2 段階になっている。第 1 段階の局地風モデルには地形一般風、地表の状態などが入力され、風や拡散係数の立体分布と時間変化が出力される。これらのデータはそのまま次の光化学大気汚染モデルへの入力となる。第 2 段階の光化学大気汚染モデルは移流拡散モデルと光化学反応モデルの 2 つのサブモデルにより構成されている。第 1 段階の結果に汚染源活動のデータを加えて、移流拡散と光化学反応の数値積分が行われ、汚染濃度が出力される。

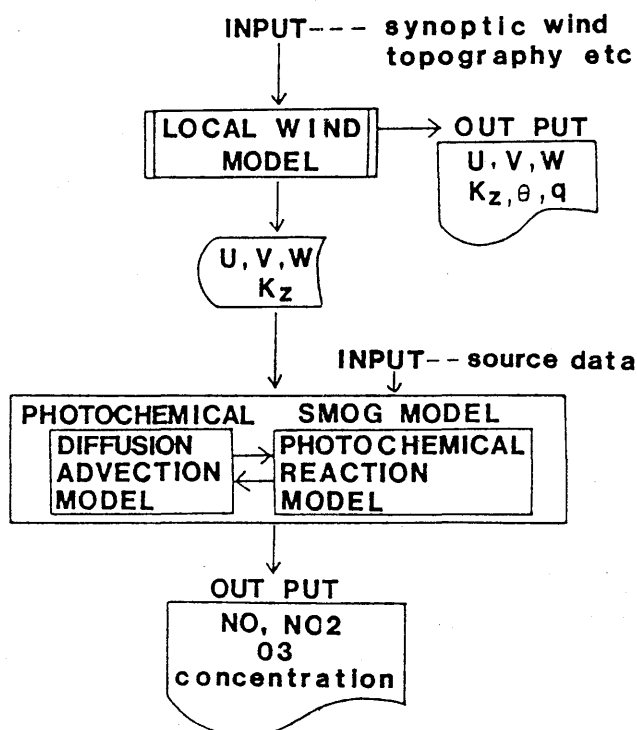


Fig. 7.1 A flow-chart of the two-step model.

7.2 局地気象モデル

7.2.1 基礎方程式

局地気象モデルは Kikuehi et al. (1981) により開発されたものを改良する。基本方程式は Boussinesq 近似、静力学平衡を仮定した方程式系で、これは海陸風のように大気の厚さに比べて浅く、水平スケールも数 10 km くらいの対流を表わすのに適している。方程式は以下に示すように地面に沿った非直交座標系 (z^* 系) で書かれている。

運動方程式

$$\frac{\partial h u}{\partial t} + \frac{\partial h u u}{\partial x} + \frac{\partial h u v}{\partial y} + \frac{\partial h u w^*}{\partial z^*} = f h v - h \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + g h \frac{\theta'}{\theta} \frac{z_T - z^*}{z_T} \frac{\partial z_G}{\partial x}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_m \frac{\partial u}{\partial z^*}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} + \frac{\partial hvw^*}{\partial z^*} = -fhu - h\theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} + gh \frac{\theta'}{\theta} \frac{z_T - z^*}{z_T} \frac{\partial z_G}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{z_T}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_m \frac{\partial v}{\partial z^*}) \end{aligned} \quad (2)$$

熱力学の式

$$\frac{\partial h\theta'}{\partial t} + \frac{\partial hu\theta'}{\partial x} + \frac{\partial hv\theta'}{\partial y} + \frac{\partial hw^*\theta'}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial \theta'}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial \theta'}{\partial y}) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_h \frac{\partial \theta'}{\partial z^*}) \quad (3)$$

連続の式

$$\frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + \frac{\partial hw^*}{\partial z^*} = 0 \quad (4)$$

静力学平衡の式

$$\frac{\partial \pi'}{\partial z^*} = \frac{h}{z_T} \frac{g\theta'}{\theta^2} \quad (5)$$

混合比の式

$$\begin{aligned} \frac{\partial hq}{\partial t} + \frac{\partial hqu}{\partial x} + \frac{\partial hqv}{\partial y} + \frac{\partial hqw^*}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial x} (hK_H \frac{\partial q}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (hK_H \frac{\partial q}{\partial y}) \\ + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} (K_h \frac{\partial q}{\partial z^*}) \end{aligned} \quad (6)$$

ここでは z^* はこの座標系での鉛直座標で、デカルト座標系での z と次の関係がある。

$$z^* = z_T \frac{z - z_G}{h}, \quad h = z_T - z_G$$

ここで z_T はモデル大気上面(後に示すE層の上面)の高さで、 z_G は地面の高さである。方程式系に含まれるその他の記号は習慣に従うものとする。

数値モデルの鉛直構造は図 7.2 に示すように15層から成っている。このうち上に示した方程式の支配している領域は下層の14層(E層と呼ぶ)のみで、 z_T より上にある第15層(M層と呼ぶ)は上部に自由表面を持っていて、方程式はこの自由表面に沿った座標系で書かれている。M層は連続の式の鉛直積分の際に領域内で質量を保存させるために設定されている。M層では(1)~(6)式は次のように書き換えられる。

Free Atmosphere

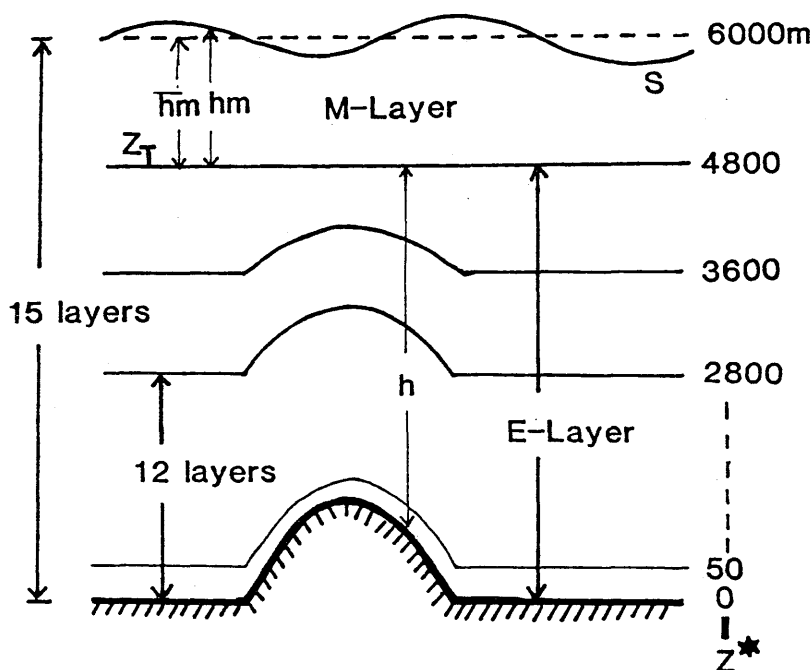


Fig. 7.2 Vertical coordinate system of the numerical model.

運動量の保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_m u}{\partial t} + \frac{\partial h_m u u}{\partial x} + \frac{\partial h_m u v}{\partial y} + \frac{\partial h_m u w^*}{\partial z^*} \\ = f h_m v - h_m \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + g h_m \frac{z^*}{h_m} \frac{\partial h_m}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (h_m K_H \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h_m K_H \frac{\partial u}{\partial y}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_m v}{\partial t} + \frac{\partial h_m u v}{\partial x} + \frac{\partial h_m v v}{\partial y} + \frac{\partial h_m v w^*}{\partial z^*} \\ = -f h_m u - h_m \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} + g h_m \frac{z^*}{h_m} \frac{\partial h_m}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (h_m K_H \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h_m K_H \frac{\partial v}{\partial y}) \end{aligned} \quad (8)$$

熱力学の式

$$\frac{\partial h_m \theta'}{\partial t} + \frac{\partial h_m u \theta'}{\partial x} + \frac{\partial h_m v \theta'}{\partial y} + \frac{\partial h_m w^* \theta'}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial x} (h_m K_H \frac{\partial \theta'}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h_m K_H \frac{\partial \theta'}{\partial y}) \quad (9)$$

連続の式

$$\frac{\partial h_m}{\partial t} + \frac{\partial h_m u}{\partial x} + \frac{\partial h_m v}{\partial y} + \frac{\partial h_m w^*}{\partial z^*} = 0 \quad (10)$$

静力学平衡の式

$$\frac{\partial \pi'}{\partial z^*} = \frac{h_m}{\bar{h}_m} \frac{g \theta'}{\theta^2} \quad (11)$$

混合比の式

$$\frac{\partial h_m q}{\partial t} + \frac{\partial h_m u q}{\partial x} + \frac{\partial h_m v q}{\partial y} + \frac{\partial h_m w^* q}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h_m K_H \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_m K_H \frac{\partial q}{\partial y} \right) \quad (12)$$

ここで $h_m = s - z_T$ 、 $z^* = \bar{h}_m \frac{z - z_T}{s - z_T}$ 、また s は自由表面の高さである。M層の自由表面は質量の保存を満足させるほか、短い波長の重力波のエネルギーを吸収することもできる。これについては後に示す。

7.2.2 地面からの熱収支

(1) 地面温度

地面と大気との熱交換は、局地風のエネルギー源であり、大変重要である。地表面温度 θ_0 は Bhumralker (1975) や Deardorff (1978) により提案されている force restore method により決定する。

$$\frac{\partial \theta_0}{\partial t} = \frac{1}{C_1} (S + R_L - H - \ell E) - \frac{1}{C_2} (\theta_0 - \theta_1) \quad (13)$$

ここで S と R_L は下向きの日射量および長波放射量、 H と ℓE は上向きの顕熱、潜熱フラックス、 θ_1 は平均の地面温度である。 C_1 と C_2 は次のように与えられる。

$$C_1 = \sqrt{kc/2\omega}, \quad C_2 = 1/\omega$$

ここに $\omega = 2\pi/(24 \text{ hrs})$ 、 k と c はそれぞれ土の熱伝導係数と熱容量である。これらの量は片山 (1978) に従って次のように見積る。

$$c = 0.386 + 0.15 w' \quad [\text{cal cm}^{-3} \text{ K}^{-1}]$$

$$k = 0.02 + 0.0002 w' \quad [\text{cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ K}^{-1}]$$

ここでは w' は土の wetness (地中の含水量/最大可能保水量) であり、一定と仮定される。

海面や水面の温度は、日射が水中にまで及ぶことなどから (13) 式は正確には成立しない。しかし海面温度の日変化は小さく、局地風にとってそれほど重要でないので、ここでは $c = 1.0 \text{ cal cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ および $k = 10 \text{ cal}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ K}^{-1}$ を仮定し、(13) 式をそのまま適用する。

(2) 短波長放射

全天日射は直達日射と散乱光とに分けられるが、前者には斜面の効果を加味すべきである。斜面への日射の入射角を i とすると、単位面積の斜面に当る直達日射 S_s は

$$S_s = S_0 a^m \cos i \quad (14)$$

ここで S_0 は大気外の日射の強さ、 a は大気の透過率、 m は大気的路程である。入射角 i は次の

ようにして季節毎に時々刻々決められる。

$$\cos i = \cos a \sin h_{\odot} + \sin a \cos h_{\odot} \cos \varphi \quad (15)$$

$$\text{ただし } \psi = \psi_{\odot} - \psi_n \quad (16)$$

$\psi_{\odot}$ 、 ψ_n はそれぞれ太陽と斜面の法線の方位角 (南から時計回りに測る。図 7.3 参照) である。

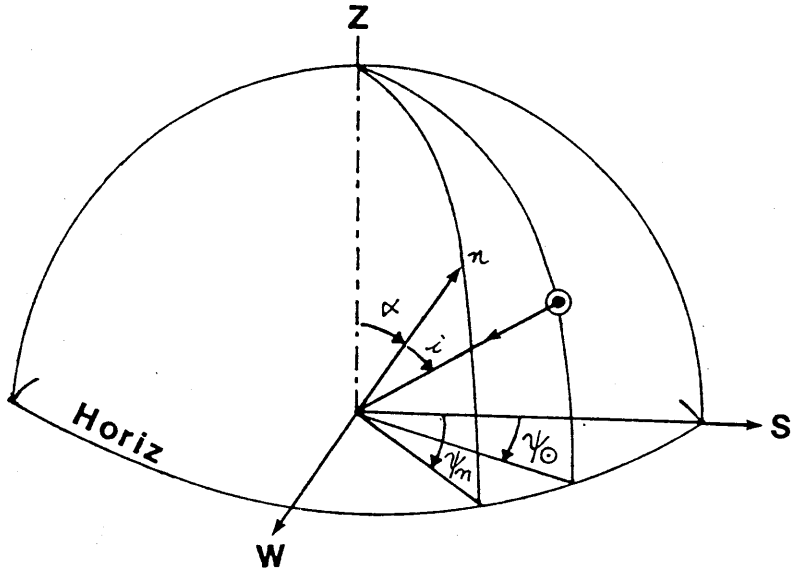


Fig. 7.3 Coordinate system for the calculation of the short wave radiation.

また

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{\partial z_G}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_G}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (17)$$

$$\psi_n = \tan^{-1} \left\{ \frac{\partial z_G}{\partial x} / \frac{\partial z_G}{\partial y} \right\} \quad (18)$$

$$\sin h_{\odot} = \sin \psi \sin \delta + \cos \psi \cos \delta \cos \varnothing \quad (19)$$

$$\cos \psi_{\odot} = \frac{\sin h_{\odot} \sin \psi - \sin \delta}{\cos h_{\odot} \cos \psi} \quad (20)$$

$$\sin \psi_{\odot} = \frac{\cos \delta \cos \varnothing}{\cos h_{\odot}} \quad (21)$$

z_G : 地面の標高、 ψ : 緯度、 δ : 赤緯、

$h_{\odot}$: 太陽の高度角、 $\varnothing$: 時角

また m は

$$m = \left\{ \left(\frac{R}{H} \right)^2 \sin^2 h_{\odot} + 2 \frac{R}{H} + 1 \right\}^{1/2} - \frac{R}{H} \sin h_{\odot} \quad (22)$$

R : 地球半径、 H : 齊一大気の厚さ

散乱光は次のようにして求める。すなわち、太陽光のうち9%は大気中の水蒸気とオゾン等で吸収されると考え、吸収で減じた直射光と上で求めた S_s との差が散乱光であると仮定し、その半分が地上に達すると考えた (List, 1963)。すなわち

$$D = \left(0.455 - \frac{a^m}{2} \right) S_0 \sin h_{\odot} \quad (23)$$

結局、斜面に当たる全天日射量 S は、単位水平面に換算して

$$S = (1 - A) (S_s + D) \sec \alpha \quad (24)$$

但し A は地表面アルベドで、ここでは次のような値をとった。

$$A = \begin{cases} 5\%, & \text{海上} \\ 12\%, & \text{陸上} \end{cases}$$

(3) 長波長放射

地表面における長波長放射収支は、地表面からの上向き放射 ($L^{\uparrow}$) と大気中の主として水蒸気からやってくる下向き放射 ($L^{\downarrow}$) とがある。下向き放射にはこのほかに炭酸ガスからの放射もあるが、これについてはあとで述べる。

$L^{\downarrow}$ に関しては山本の放射図の原理に従う。それによれば

$$L^{\downarrow} = \pi B(T_0) + \int_{T_0}^0 \frac{1}{\tau_f(u, T)} \frac{d}{dT} (\pi B) dT \quad (25)$$

但し $\pi B(T_0)$: 温度 T_0 の黒体放射、 $\frac{1}{\tau_f(u, T)}$: フラックスの透渦間数の全波長にわたる荷重平均、 T_0 : 地表温度で、大気上端の温度は 0°K としてある。一方、 $L^{\uparrow}$ は $\pi B(T_0)$ であるから、地表面における正味の放射は

$$L = L^{\downarrow} - L^{\uparrow} = \int_{T_0}^{T_H} \frac{1}{\tau_f(u, T)} \frac{d}{dT} (\pi B) dT - \alpha \cdot \frac{1}{\tau_f(u_H, T_H)} \pi B(T_H) \quad (26)$$

T_H はモデル大気の上面の気温である。第1項は地上からモデルのトップ (H) までの気温と水蒸気の分布を知って計算できる。第2項は H より上には水蒸気はないとして適当な $\tau_f(u_H, T)$ の関数関係を仮定して求められる。ここでは $T = T_H$ から $T = 0$ までの範囲で τ_f を T の2次式で近似すると、第2項で $\alpha = 2/3$ となる。

第1項で $\tau_f(u, T)$ は u と T の関数であるが、山本のチャートを見ても分かるように、通常の温度範囲 ($T \geq 230\text{ K}$) ではほとんど T に関係せず u のみの関数と見なされる。その値は Yamamoto

(1952)の論文にのっている。ここではその表に基づいて内挿法によって $\overline{\tau_f(u)}$ を求めることにした。

u は圧力補正を施した有効水蒸気量で次式から求められる。

$$u = \frac{1}{g} \int_p^{p_0} q \frac{p}{p_0} dp \quad (27)$$

但し、 p_0 : 地上気圧、 q : 比湿である。

炭酸ガスによる下向放射 $L_{CO_2}^{\downarrow}$ は Elsasser の方式に従い、最下層の気温の関数として次式から求めた。

$$L_{CO_2}^{\downarrow} = 0.0011 t_1 + 0.084 \quad (ly/min) \quad (28)$$

(4) H と $L E$ の見積り

地表面における顕熱と潜熱のフラックス(H と $L E$)はモデル大気の下層に接地層を仮定し、Monin-Obukhovの相似則より求める。同時に運動量フラックス τ も求める。地表面における顕熱、潜熱、運動量のフラックス(H 、 $L E$ 、 τ)は次の式で表わせる。

$$H = -\rho C_p u_* \theta_* \quad (29)$$

$$L E = -\rho u_* q_* \quad (30)$$

$$\tau = -\rho u_*^2 \quad (31)$$

ただし、 u_* は摩擦速度、 θ_* は摩擦温度、 q_* は摩擦比湿であってこれら3量は接地層中の温度、比湿、風速と次の関係がある。

$$\theta' - \theta'_0 = \frac{\theta_*}{k} \psi_h(\zeta) \quad (32)$$

$$q - q_0 = \frac{q_*}{k} \psi_h(\zeta) \quad (33)$$

$$\sqrt{u^2 + v^2} = \frac{u_*}{k} \psi_m(\zeta) \quad (34)$$

ただし

$$\psi_h = \int_{\zeta}^{\zeta_0} \frac{\phi_h}{\zeta} d\zeta, \quad \psi_m = \int_{\zeta_0}^{\zeta} \frac{\phi_m}{\zeta} \alpha \zeta \quad (35)$$

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= \frac{z}{L}, \quad \zeta_0 = \frac{z_0}{L} = \frac{z_0}{z} \zeta \\ L &= \frac{\bar{\theta} u_*^2}{kg \theta_*} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

z は θ 、 q 、 u を測った高さ、 ϕ_h 、 ϕ_m は無次元シャー関数、 L は Monin-Obukhov の長さ、 k は von Karman 定数、 z_0 は粗度長、 $\bar{\theta} = (\theta_1 + \theta_0)/2$ である。無次元シャー関数 ϕ_m 、 ϕ_h は次

式のように表わせる。(Busch, 1973, Kondo, et al. 1978)。

$$\left. \begin{aligned} \phi_m &= (1 - r\zeta)^{-1/4} \\ \phi_h &= (1 - r\zeta)^{-1/2} \end{aligned} \right\}, \quad \zeta < 0 \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \phi_m &= \phi_h = 1 + \alpha\zeta, \quad \zeta_c > \zeta > 0 \\ &= 1 + \alpha\zeta_c, \quad \zeta \geq \zeta_c \end{aligned} \quad (38)$$

ただし、 $\zeta_c = 5/7$, $\alpha = 7$, $r = 16$ である。一方、(36)と(32)、(34)より

$$\zeta = B \frac{\phi_m^2(\zeta)}{\phi_h(\zeta)} \quad (39)$$

ここで、 $B = \frac{g}{\theta} \frac{\theta - \theta_0}{U^2}$ z : バルクリチャードソン数である。故に B を与えて ζ を求め
[$\zeta < 0$ (不安定)のときには繰返し法により、 $\zeta > 0$ (安定)のときには直接的に]、以下次の手順によりフラックス H 、 IE を求める。

$$(35) \quad (32) \quad (29)$$

$$(37) \quad (33) \quad (30)$$

$$(38) \quad (34) \quad (31)$$

$$\zeta \longrightarrow \phi \longrightarrow \theta_*, q_* \longrightarrow H, \ell E, \tau$$

なお接地層内の拡散係数 K_m 、 K_h は

$$\left. \begin{aligned} K_m &= kz \frac{u_*}{\phi_m} \\ K_h &= kz \frac{u_*}{\phi_h} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

から求まる。

次に地表面での比湿 q_0 は見積りが難しいが、ここでは次の方法による。

$$q - q_0 = \beta (q - q_0^*) \quad (41)$$

ここでも q_0^* は地面での飽和比湿で、これは地面温度より求まる。 β は蒸発効率と呼ばれるパラメータで、片山、1978 により、次のように見積る。

$$\beta = \text{Min} (1, 2w') \quad (42)$$

w' は前出の wetness である。

7.2.3 境界層の扱い

境界層内の乱流のパラメタリゼーションは局地風にとって重要であるばかりでなく、汚染質の輸送にとっても非常に重要である。そこで Mellor と Yamada (1974) により提案された乱流 closure model を適用する。この closure model は乱流過程をどこまで表現するかによって level 1~4 までの4つの精度階級に分かれている。この研究の目的から考えると、乱流エネルギーなどの予報方

程式を持つ level 3 程度を適用するのが理想的と考えられるが、計算機への負荷を考えて、ここでは乱流エネルギーを診断式から決定する level 2 を採用する。level 2 では乱流の物理量の予報方程式を持たず、乱流拡散係数 K_m 、 K_h は次のように与えられる。

$$K_m = \ell^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} S_M \quad (43)$$

$$K_h = \ell^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} S_H \quad (44)$$

ここで ℓ は乱流の特徴的長さ、また S_M 、 S_H は次の式で与えられる。

$$S_M = B_1^{1/2} (1 - R_f)^{1/2} \widetilde{S}_M^{3/2} \quad (45)$$

$$S_H = B_1^{1/2} (1 - R_f)^{1/2} \widetilde{S}_M^{1/2} \widetilde{S}_H \quad (46)$$

ここで R_f は flux Richardson 数で gradient Richardson 数 Ri と次のような関係がある。

$$R_f = 0.725 [Ri + 0.186 - (R_i^2 - 0.316 Ri + 0.0346)^{1/2}]$$

また

$$Ri = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta' / \partial z}{(\partial \sqrt{u^2 + v^2} / \partial z)^2} \quad (47)$$

であり温位 θ' と風速 u 、 v の鉛直分布より求まる。また $\widetilde{S}_M$ と $\widetilde{S}_H$ は次の式により R_f より求まる。

$$\widetilde{S}_M = 3 A_1 \frac{r_1 - C_1 - (6 A_1 + 3 A_2) \Gamma / B_1}{r_1 - r_2 \Gamma + 3 A_1 \Gamma / B_1} (r_1 - r_2 \Gamma) \quad (48)$$

$$\widetilde{S}_H = 3 A_2 (\Gamma - r_2 \Gamma) \quad (49)$$

ただし、 $\widetilde{S}_M \geq 0$ 、 $\widetilde{S}_H \geq 0$

ここで $\Gamma = R_f / (1 - R_f)$ (50)

また A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 は closure model に現われるパラメーターでそれぞれ 0.78、0.78、15、8、0.056 と見積られている。また $r_1 = \frac{1}{3} - (2 A_1 / B_1)$ 、 $r_2 = B_2 / B_1 + 6 A_1 / B_1$ である。

次に特徴的長さ ℓ は次の式により与えられる

$$\ell = \frac{kz}{1 + kz / \ell_0} \quad (51)$$

k はカルマン定数で ℓ_0 は

$$\ell_0 = \alpha \frac{\int_0^\infty z q dz}{\int_0^\infty q dz} \quad (52)$$

で与えられる。 α は経験的定数で $\alpha = 0.1$ を適用する。また q は乱流エネルギーと平方根で乱流エネルギーの生成消散の釣り合いから次式が成り立つ。

$$\frac{q^3}{B_1 \ell} = - \overline{u'w'} \frac{\partial u}{\partial z} - \overline{v'w'} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g}{\theta} \overline{w'\theta''} \quad (53)$$

ここで各フラックス $\overline{u'w'}$, $\overline{v'w'}$, $\overline{w'\theta''}$ は次式で与えられる。

$$- (\overline{u'w'}, \overline{v'w'}) = \ell q \widetilde{S}_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (54)$$

$$- \overline{w'\theta''} = \ell g \widetilde{S}_H \frac{\partial \theta'}{\partial z} \quad (55)$$

(54)、(55)より $\overline{u'w'}$ 、 $\overline{v'w'}$ 、 $\overline{w'\theta''}$ を消去すると

$$q^2 = B_1 \ell^2 \left\{ \widetilde{S}_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{g}{\theta} \widetilde{S}_H \frac{\partial \theta'}{\partial z} \right\} \quad (56)$$

となる。この式は ℓ を含んでいるので結局 (51)、(52)、(56) の陰公式により ℓ_0 を求めることとなる。これは繰り返し法により計算できるが、実際には前の計算ステップの q を使って ℓ_0 を計算しても、結果はほとんど変わらないので、繰り返し法はシミュレーションの初めにだけ行なえば十分である。

closure model による拡散係数は強い不安定時に極端に小さくなり、拡散実験などの結果と大きく異なることがある。そこで、この違いを小さくするために拡散係数に最小値を設定する。ここでは

$$K_h \geq 0.5 \text{ m}^2 / \text{sec} \quad (57)$$

$$K_m \geq 0.5 \text{ m}^2 / \text{sec} \quad (58)$$

を仮定した。一方、強い不安定時には K_h 、 K_m は $100 \text{ m}^2 / \text{sec}$ をこえるような大きな値になることがある。このような場合には鉛直方向の数値積分に陰公式を持ってしても、 Δt をかなり小さくしないと、 K_h 、 K_m の鉛直分布に計算モードが発生する。このため K_h 、 K_m の上限値を設け、あまり大きな値とならないようにする。

$$K_h \leq 65.8 \text{ m}^2 / \text{sec} \quad (59)$$

$$K_m \leq 50 \text{ m}^2 / \text{sec} \quad (60)$$

ここで K_h と K_m の上限値が異なるのは、不安定の極限、 $Ri \rightarrow -\infty$ のときの Pr 数 $K_m / K_h = 0.76$ を考慮したためである。 K_h 、 K_m に上限値を設定したことによる影響はそれほど大きくないことが、2次元の海陸風シミュレーションにより確かめられている。

7.2.4 上部境界条件

前に記したようにモデルの最上層には上面が自由表面のM層が置かれている。一般場の気圧傾度力は、この自由表面を通して伝えられる。またこれには、シミュレーションに有害な短い波長の重力波(水平境界に長波長の重力波が反射されたときに発生する計算モード波など)のエネルギーを吸収する働きを持たせることもできる。自由表面上での π' は次の式により定める。

$$\pi' = \bar{\pi}'(x, y) + g \frac{\theta_F - \theta}{\theta} (\bar{h}_m - h_m) + F \frac{\partial h_m}{\partial t} \quad (61)$$

ここで第1項は、一般場の高さ $z_T + \bar{h}_m$ の気圧分布に対応する。第2項は、自由表面の高さの基準高度 ($z_T + \bar{h}_m$) からのずれに相当する分の気圧差の項である。このとき自由表面のさらに上に温位 θ_F をもつ自由大気を仮定している。この自由大気を仮定したために、自由表面を波面とする重力波の位相速度は低くおさえられる。つまりモデル大気を θ の等温位と仮定すると、この重力波 (一種の外部重力波) の進行速度は

$$C = V + \sqrt{g^*(Z_T + \bar{h}_m)} \quad (62)$$

で与えられる。ここに

$$g^* = \frac{\theta_F - \theta}{\theta_F} g \quad (63)$$

また V は平均流速である。自由大気の代りに真空を仮定した場合 ($g^* = g$) に比べて進行速度が大幅におそくなっていることが分かる。重力波の進行速度は数値積分の時間ステップ Δt と深い関係があり、上のことは Δt の設定条件をかなり緩めることになる。

(61)式の第3項はエネルギーの吸収項である。Kikuchi et al., 1981. では h_m に表れる短波長と重力波 (計算モード波) を取り除くため、 h_m の予報式に水平拡散項を入れたり、smoothing をかけたりした。しかし、この方法で長時間の積分を行うと、M層の温度場に大規模な変型が起こる。これは smoothing が質量と温度の保存性をこわしているためと考えられる。ここでは smoothing などのかわりに、(61)式に第3項を付け加えることで、これら短波長の重力波を取り除く方式をとる。第3項は自由表面の上昇・下降に抵抗する力 (F はパラメーター) で、これによりエネルギー吸収が起こる。重力波の鉛直流・水平流の特徴的な大きさを w 、 u とすれば $\frac{\partial h_m}{\partial t} \sim w$ であるから単位時間、単位面積に吸収されるエネルギーは

$$Fw^2 \quad (64)$$

のオーダーである。一方、この重力波の単位面積当りのエネルギーの総量のオーダーは Hu^2 (H は大気の厚さ、ここでは $Z_T + \bar{h}_m$) であるから重力波がエネルギーを全部失なうまでの時間スケール T との間に

$$Fw^2 T \sim Hu^2 \quad (65)$$

が成立する。重力波の波長のスケールを L とすると、 $w/u \sim L/H$ だから

$$T \sim \frac{L^2}{FH} \quad (66)$$

となる。つまり、重力波の寿命は波長の2乗に比例し、 F を適当に決めてやると、短波長の重力波だけを取り除くことができる。最も短い波長、 $L \sim 2.4x$ のとき T が5~10分くらいになるように F を決めると、短波長の重力波を取り除くのに効率的でかつ、下層の局地風にほとんど影響を与え

ないことが経験的に確められている。

上記の見積りは浅水波の方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (67)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + H \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (68)$$

の(67)式の左辺に、(61)式の第3項に対応する項 $\frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial h}{\partial t} \right)$ をつけ加えて解析解を求めても似たような結果を得る。ここでは詳しい計算は省略するが、この場合、短波長の重力波は減衰するほか、位相速度も若干の変形を受ける。

7.2.5 水平方向の境界条件とワンウェイネスティング

水平方向の境界は計算能力に限界があるために設けられた人為的な仮定である。したがって、境界条件の選び方は単に自然法則の定式化だけでは定まらず、ある程度経験的に選んでやらなければならない。このときの目標は、計算領域のできるだけ広い範囲において、境界条件の影響をできるだけ受けない解が得られることである。これは大変難しいことであり、最良の方法は数値実験の目的に依存すると思われる。この数値モデルでもいくつかの境界条件をテストした結果を下に示す radiation condition が一般的には良い結果を与えることがわかった。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (69)$$

ここで ϕ は一般の物理量、 C は代表的位相速度である。(69)式は次のように差分表示に書き直せる。

$$\phi_b^{n+1} = \phi_b^n (1 - r) + r \phi_{b-1}^n \quad (70)$$

ここに ϕ_b^n は境界点での $t = n \cdot \Delta t$ の値、 ϕ_{b-1}^n はそのひとつの内側の格子点の値である。また $r = C \Delta t / \Delta x$ である。 r の値は一つずつ内側の格子点で $t = (n-1) \Delta t$ の時点についての ϕ の値を(70)式に代入し、 r を逆算する。

$$r = \frac{\phi_{b-1}^n - \phi_{b-1}^{n-1}}{\phi_{b-2}^{n-1} - \phi_{b-1}^{n-1}} \quad (71)$$

ただし $0 \leq r \leq 1$ とする。

(70)式はもともと重力波が境界をうまく透過するように考えられた条件なので、境界付近の値が鉛直混合によって変化するような場合にはあまり良い結果をもたらさないことがある。この場合には $\partial \phi / \partial x = 0$ つまり $\phi_b = \phi_{b-1}$ の方が良い結果を与えるので、数値実験の目的により使い分けが必要である。この報告では2次元モデルには後者、3次元モデルには前者を適用した。

上記のような境界条件では、境界の外にある地形の影響は考慮できない。現実には遠くの地形の影響を強く受ける一方で、近くの微細な地形の影響も重要な場合がある。このような場合は、計算能力を節約するため、分解能を場所により変えることが有効である。

分解能を場所により変える場合、ワンウェイネスティングの試みがよく行われる。すなわち、広い範囲を粗い格子間隔でおおい、その中の一部を細かい格子間隔でおおう。粗い格子による計算結果の情報は細かい格子の計算に使われるが、その逆は行われない。情報は粗い格子から細かい格子へ一方的に流れる。局地風シミュレーションの場合には、風の間をフーリエ成分に展開して考えると長周期・長波長成分は広い範囲の大きな地形の特徴によって、短周期・短波長成分は狭い範囲の微細な地形の構造に支配されていると期待できるので、ワンウェイネスティングの方法は有効であろう。

ワンウェイネスティングの接続境界条件は次の性質を持つ必要がある。

- 1) 境界外からのじょう乱は境界内にそのまま伝わる。
- 2) 境界内で発生したじょう乱が接続境界で不自然に反射されてはならない。

しかし、現実には上記の2つの条件を同時に満すのはなかなか難しい。ここでは、境界外からは長周期・長波長成分だけ内部に伝わることを考え、次に示すような接続境界条件を使用する。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial x} = \tau (\phi - \phi_B) \quad (72)$$

ここで、 C はじょう乱の位相速度、 ϕ_B は粗い格子間隔による接続境界面での値、 τ は時間の逆数の次元をもつ接続のパラメーターである。 $\tau = 0$ とおくと、式(72)は前に述べた radiation condition となる。 τ は前記の2つの条件をできるだけ満たすように決めなければならない。このため次のような最も簡単な浅水波の方程式に適用する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \phi}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial x} + H \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (73)$$

以下詳しい計算は省略するが、式(72)を box 法による空間差分で近似し、この差分方程式の解析解〔式(72)の解析解ではない〕を求め接続境界条件の式に代入して、接続境界面の反射・透過波の大きさを解析的に調べる。その結果、

$$\frac{1}{\tau} \gg \frac{\Delta x}{2C} \quad \text{ただし } C = \sqrt{gH} \quad (74)$$

であれば通常の radiation condition とあまり変わらない程度に条件2)を満たすことがわかる。ここで Δx は格子間隔である。次に周波数 ω 、振幅 A_1 の波が接続境界の外から侵入してきたとき内部へ伝わる波の振幅 A_2 と位相差 θ は、簡単なため波長が Δx より長いと仮定すると次のようになる。

$$|A_2/A_1| e^{i\theta} \simeq \frac{\tau}{\tau - 2i\omega} \quad (75)$$

$\tau \gg \omega$ であれば $A_2 \simeq A_1$ 、 $\theta \simeq \frac{2\omega}{\tau}$ となる。 τ が ω の10倍程度であれば、振幅はほぼ完全なまま内部に伝わる。また若干の位相の遅れが生じるが、式(72)の ϕ_B にこの遅れに対応した時間だけ進んだ値を使うことにより補正することもできる。

海陸風モデルに適用する場合には、 $\Delta x = 4 \text{ km}$ 、 $C = 5 \text{ m/sec}$ 、粗い格子から内側へ伝わる波の周期 $1/\omega = \text{半日}$ とすると

$$12\text{h} \gg \frac{1}{\tau} \gg \frac{\Delta x}{2C} = 400 \text{ sec} \quad (76)$$

なので $1/\tau$ を1時間程度にとるとよいことがわかる。

7.3 大気汚染モデル

7.3.1 移流拡散モデル

汚染質の輸送式は局地気象モデルと同じく Z^* 系で表示する。格子間隔が10km のオーダーでは水平拡散は無視できるので鉛直拡散だけを考える。

$$\frac{\partial hC_i}{\partial t} + \frac{\partial hC_i}{\partial x} + \frac{\partial hC_i}{\partial y} + \frac{\partial hC_i W^*}{\partial z^*} = \frac{Z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} K_h \frac{\partial C_i}{\partial z^*} + hQ_i + hR_i \quad (77)$$

ここで C_i は全部で n 種の汚染濃度、 Q_i 、 R_i 、はそれぞれ汚染質 i の発生量と反応生成量である。地表面での境界条件は汚染質の地表への吸着で定まる。吸着による下向きのフラックスは次式で与えられる (Garland, et. al 1979)。

$$F \equiv \left(K \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0} = -v_d(z_1)C(z_1) \quad (78)$$

ここで $v_d(z_1)$ は高度 z_1 (普通は1m) で定義された沈着速度である。モデルで計算される最下層の濃度は $z_2 = 25 \text{ m}$ のものなので、濃度分布にも constant flux layer を仮定して次式により z_1 の濃度に換算する。

$$C(z_1) = C(z_2) - \frac{F}{ku^*} \ln z_2/z_1 \quad (79)$$

ここで u^* は接地層での摩擦度、 k はカルマン定数である。(78)、(79)を連立させて F を求めることができる。ここで(79)式は中立成層のときの式であり、安定・不安定の時には正確でない。しかし v_d そのものが、安定度や地面の状態によりどのように変化するかわかっていないので、ここでは最も簡単な(79)式を仮定する。

O_3 に関する v_d の値に関して、野外での実例は数多く行なわれているが、データはかなりばらついている。Galbally (1971) や Garland, et al. (1979) などのまとめを総合すると $0.3 \sim 0.8 \text{ cm/sec}$ の間にはいるデータが多く、夜よりも昼の方が若干大きいとされている。 NO_x に関する v_d は O_3 のものよりかなり小さいと言われている。あとで示すように、実際のシミュレーショ

ンでは O_3 の v_d に 0.3 cm/sec 、 NO_x に対しては 0 を仮定した。

一般的に汚染濃度の分布は局所的で空間変動が大きいので、(77)式の数値積分に単純な中央差分・松野スキームなどを適用すると擬似拡散と呼ばれているある種の計算誤差を生じる。この主な原因は短波長成分の位相速度の遅れにある。このモデルでは中央差分・松野スキームと2次の風上差分を1回おきにくり返すことにより、位相速度の遅れを少なくし、擬似拡散を軽減している。このスキームの詳しい議論は Kimura, 1983 を参照されたい。

7.3.2 パラメーター化した光化学反応

前にも述べたように、この研究では現実の複雑な光化学反応そのままではなく、大幅に簡略化した光化学反応を考える。ここでは特に O_3 濃度のふるまいに注意して、すでに提案されている反応モデルを合理的に簡略化した反応系を導く。まず反応系のもつ次のような性質に着目する。すなわち O_3 の生成量は、一次汚染質の NO 、 NO_2 の量と非メタン炭化水素 HC の量と種別、それに紫外線強度などに依存することが知られているが、初期値として、 HC の量が NO 、 NO_2 の量に比べて十分多い場合、(だいたい10倍以上)では O_3 の生成量は HC の量や種別にはあまり依存しなくなる。また現実の日本の都市部やその周辺の大気中にも NO 、 NO_2 に比べて十分多量の HC が存在することが多いと言われている(鈴木、1979)。そこで NO 、 NO_2 の存在する場合には必ず十分多量の HC が存在していると仮定し、 HC を独立変数から除外する。こうすれば最もよく分かっていない HC の発生源についてのデータも不用となる。

上記に留意の上、今までに提案されている反応モデル例えば Ikeda, et al. (1977) の基礎反応モデル(以下BPRMと略す)を NO 、 NO_2 、 O_3 の生成・消滅を中心に見直す。まず上記物質については次の三つの反応が非常に重要であることが古くから知られている(Seinfeld, 1975)。



ここで k_1 、 k_2 、 k_3 は各反応の速度定数である。しかし上記の三反応だけでは正味のオゾンの生成はない。光化学オキシダントの発生には有機物質の関与する他の多くの反応も重要な働きをしているわけであるが、ここではそれらを前記の池田のモデルに基づき次のように分類する。まず NO が酸化されて NO_2 になる反応(グループ1)は、

グループ1

反 応	速度定数
$HO_2 + NO \rightarrow HO + NO_2$	k_8
$RO_2 + NO \rightarrow \lambda RCHO + \delta HO_2 + NO_2$	k_{12}
$RO_2' + NO \rightarrow RO_2 + NO_2$	k_{13}
$NO_3 + NO \rightarrow 2NO_2$	k_{28}

ここで反応速度定数などの記号はBPRMに従った。また λ 、 δ などのギリシャ文字は反応モデルのパラメーターで大きさは1のオーダーである。これはBPRM自体がすでに複雑な反応を簡略化したものであり、1つの反応式で多くの反応を代表させるために導入されたパラメーターである。

また RO_2 、 RO_2' は有機パーオキシラジカル(CH_3O_2 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$ など)の総称である。

反応グループ1によるNOの消滅速度つまり NO_2 の生成速度は次のように書ける。

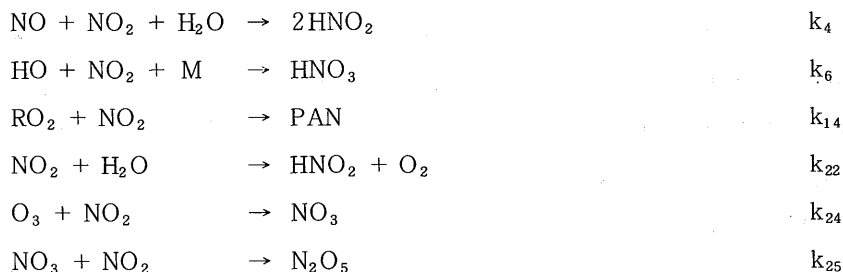
$$-\left(\frac{d[\text{NO}]}{dt}\right)_{\text{group1}} = \left(\frac{d[\text{NO}_2]}{dt}\right)_{\text{group1}} = R_1[\text{NO}]$$

ここでパラメーター R_1 は次のように定義される。

$$R_1[\text{NO}] = (k_8[\text{HO}_2] + k_{12}[\text{RO}_2] + k_{13}[\text{RO}_2'] + k_{28}[\text{NO}_3])[\text{NO}]$$

以下同様に、 NO_2 の除去反応(グループ2)は

グループ2

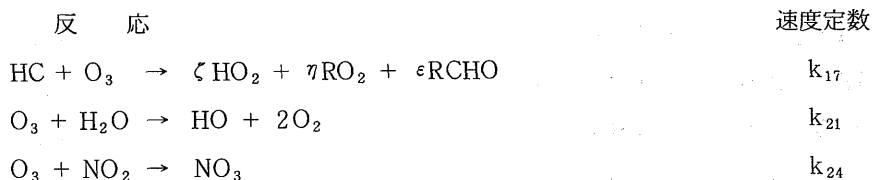


であり、パラメータ R_2 を次のように定義する。

$$R_2[\text{NO}_2] = (k_4[\text{NO}][\text{H}_2\text{O}] + k_6[\text{HO}][\text{M}] + k_{14}[\text{RO}_2] + k_{22}[\text{HO}_2] + k_{24}[\text{O}_3] + k_{25}[\text{NO}_3])[\text{NO}_2] \quad (18)$$

上の反応でPANはペルオキシアシルナイトレートの総称である

グループ3 (O_3 の除去反応)



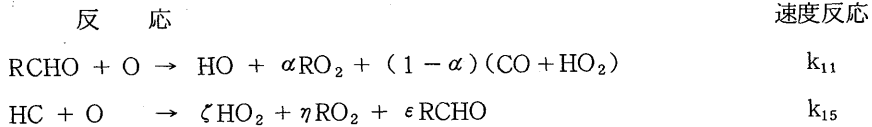
$$R_3[\text{O}_3] = (k_{17}[\text{HC}] + k_{21}[\text{H}_2\text{O}] + k_{24}[\text{NO}_2])[\text{O}_3]$$

グループ4 (NO の除去反応)



$$R_4[\text{NO}] = (k_4[\text{NO}_2][\text{H}_2\text{O}] + k_{20}[\text{HO}])[\text{NO}]$$

グループ5 (Oの除去反応)



$$R_5[O] = (k_{11}[RCHO] + k_{15}[HC])[O]$$

グループ6 (NOの生成反応)



パラメータ F_1 を次のように定義する。

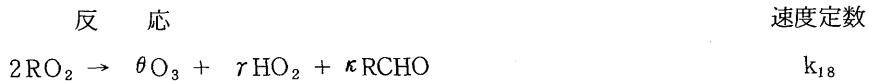
$$F_1 = k_5[HNO_2]$$

グループ7 (NO₂の生成反応)



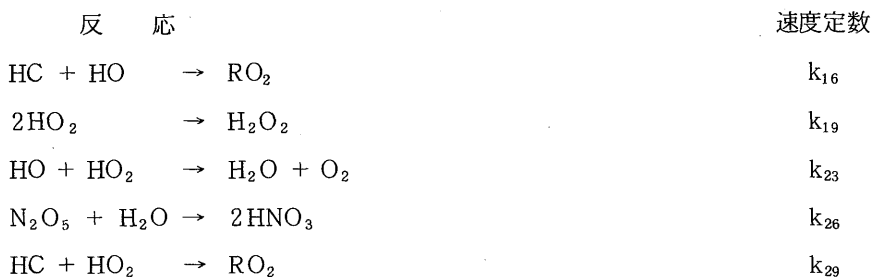
$$F_2 = k_{27}[N_2O_5] + k_{28}[NO_3][NO]$$

グループ8 (O₃の生成反応)



$$F_3 = \theta k_{18}[RO_2]^2$$

BPRMには、上記のどのグループにも分類されない次に示す反応も含まれている。



これらの反応は NO, NO₂, O, O₃ の生成・除去を直接には含まないもので、これから導こうとする反応モデルには直接には考慮されない。しかしこれらの反応の効果は間接的にパラメーター $R_1 \sim R_5$, $F_1 \sim F_3$ を通して扱われる。

パラメーター $R_1 \sim R_5$, $F_1 \sim F_3$ の反応系の中での役割を模式図にして図 7.4 に示す。以上のパラメーターを使うと NO, NO₂, O₃, O のそれぞれの保存式は次のように書ける。

$$\frac{d}{dt}[\text{NO}] = -k_3[\text{NO}][\text{O}_3] + k_1[\text{NO}_2] - R_1[\text{NO}] - R_4[\text{NO}] + F_1 \quad (80)$$

6×10^{-4} 10^{-1} 10^{-1} 2×10^{-3} 5×10^{-5} 10^{-4}

$$\frac{d}{dt}[\text{NO}_2] = k_3[\text{NO}][\text{O}_3] - k_1[\text{NO}_2] + R_1[\text{NO}] - R_2[\text{NO}_2] + F_2 \quad (81)$$

10^{-3} 10^{-1} 10^{-1} 2×10^{-2} 10^{-2} 10^{-2}

$$\frac{d}{dt}[\text{O}] = k_1[\text{NO}_2] - k_2'[\text{O}] - R_5[\text{O}] \quad (82)$$

2×10^{-10} 10^{-1} 10^{-1} 5×10^{-4}

$$\frac{d}{dt}[\text{O}_3] = -k_3[\text{NO}][\text{O}_3] + k_2'[\text{O}] - R_3[\text{O}_3] + F_3 \quad (83)$$

4×10^{-3} 10^{-1} 10^{-1} 3×10^{-3} 10^{-7}

ここで $k_2' = k_2[\text{O}_2][\text{M}]$

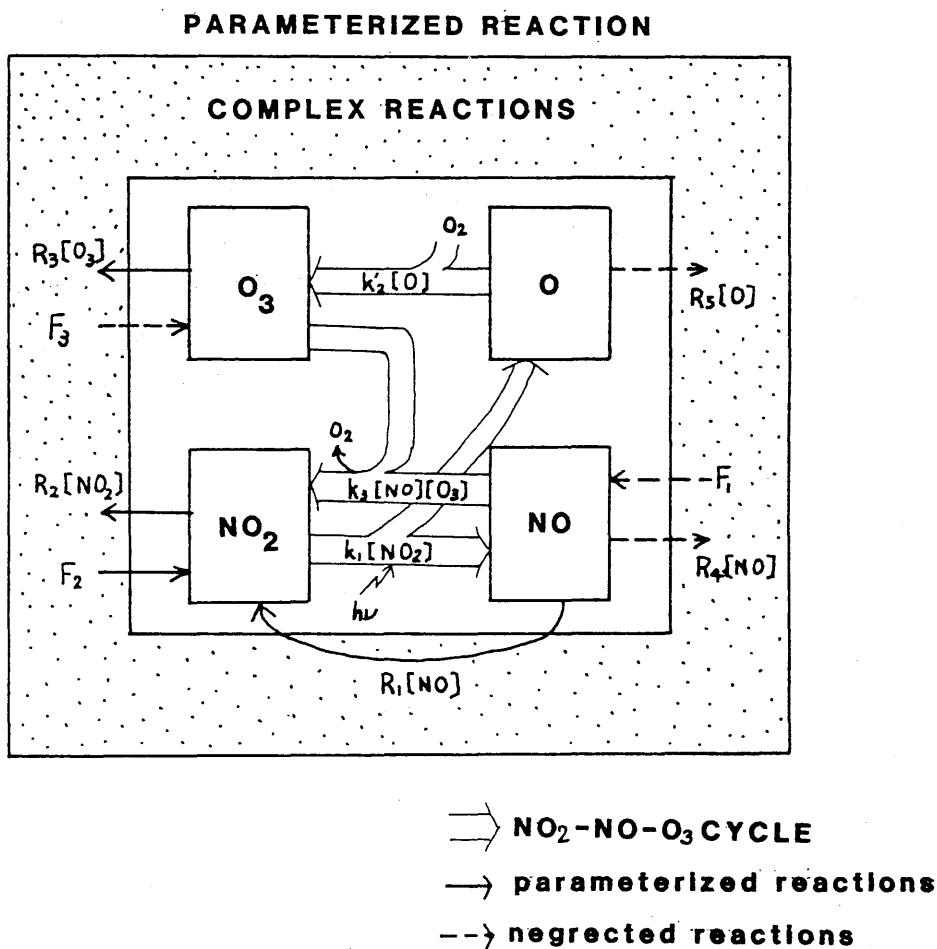


Fig. 7.4 Schematic diagram of the parameterized reaction model.

さて、上式を簡略化するため各項の大きさを見積ってみる。各項の大きさは初期濃度のちがいや経過時間によりかなり大きく異なるが、代表的な濃度での反応の最盛期について計算してみるとだいたい各項の下に記した程度の大きさとなる。やはり反応〔1〕～〔3〕による寄与が大きく他の項と比べて10倍以上になっているのが分かる。しかし、ここで 10^{-2} 以下の項をすべて無視してしまうと、〔1〕～〔3〕による定常状態を示す式が出てくるだけで、光化学オキシダントの発生はなくなってしまう。そこで 10^{-2} 以下の項を詳しく見るために 10^{-1} の大きさの項を消去した式を作る。これは(80) + (81)と(81) + (82) + (83)によって2つ得られる。

$$\frac{d}{dt} [\text{NO}_x] = -R_2 [\text{NO}_2] + F_2 - R_4 [\text{NO}] + F_1 \quad (84)$$

$$\frac{d}{dt} [\text{PO}] = R_1 [\text{NO}] - R_2 [\text{NO}_2] + F_2 - R_2 [\text{O}] - R_3 [\text{O}_3] + F_3 \quad (85)$$

ただし

$$[\text{NO}_x] = [\text{NO}] + [\text{NO}_2] \quad (86)$$

$$[\text{PO}] = [\text{NO}_2] + [\text{O}] + [\text{O}_3] \quad (87)$$

これらの式から NO_x および PO (ここでは potential ozone と仮称する)は NO , NO_2 , O , O_3 単独よりゆっくり反応し、この反応速度が O_3 の正味の生成・消滅を表わしていることが分かる。したがって、これらの式は光化学反応の最も重要な過程を表している。式(84)、(85)を採用すれば(80)～(83)のうち2つは独立でないので不要である。このうち(82)、(83)を残して(82)～(85)式の4つの独立した式を考え、各式の中で最大項より2ケタ以上小さい項を無視すると

$$k_1 [\text{NO}_2] - k_2 [\text{O}] = 0 \quad (88)$$

$$-k_3 [\text{NO}] [\text{O}_3] + k_2 [\text{O}] = 0 \quad (89)$$

$$\frac{d}{dt} [\text{NO}_x] = -R'_2 [\text{NO}_2] \quad (90)$$

$$\frac{d}{dt} [\text{PO}] = R_1 [\text{NO}] - R'_2 [\text{NO}_2] - R_3 [\text{O}_3] \quad (91)$$

が得られる。ここで $R'_2 [\text{NO}_2]$ は NO_2 の正味の除去反応の速さで

$$R'_2 [\text{NO}_2] = R_2 [\text{NO}_2] - F_2$$

で定義される。

(88)、(89)から

$$[\text{NO}] [\text{O}_3] = k_1 / k_3 [\text{NO}_2] \quad (92)$$

これと(86)、(87)を使うと $[\text{NO}_x]$, $[\text{PO}]$ から $[\text{NO}]$, $[\text{NO}_2]$, $[\text{O}_3]$ を求める換算式を得る。

$$\left. \begin{aligned} [\text{NO}_2] &= S/2 - \sqrt{S^2/4 - [\text{PO}][\text{NO}_x]} \\ [\text{NO}] &= [\text{NO}_x] - S/2 + \sqrt{S^2/4 - [\text{PO}][\text{NO}_x]} \\ [\text{O}_3] &= k_1/k_3 [\text{NO}_2]/[\text{NO}] \end{aligned} \right\} \quad (93)$$

ただし $S = [\text{PO}] + [\text{NO}_x] + k_1/k_3$

ここで仮に R_1 、 R'_2 、 R_3 が既知であるとする、(90)、(91)の2つの予報式と診断式(93)の組合わせて方程式は閉じ、その解は元の反応モデルの良い近似となっているはずである。ここで近似式を導く上で光定常態の関係式(92)が表われるが、この近似方程式系は通常の意味での準定常近似すなわち NO と NO_2 の予報式を立て、 O_3 濃度を(92)式から算出する方法とは少し意味が異なることに注意したい。 O_3 のような高濃度の物質に対し通常の準定常近似を適用することは非常に悪い結果をもたらすことが知られているが、この原因は反応〔1〕～〔3〕で成立するはずの PO の保存則が破られることに大きな原因があると考えられる。一方(90)、(91)、(93)の方程式系ではこの保存則は完全に保証されている。

さて、上記方程式系において R_1 、 R'_2 、 R_3 は残念ながら前述したような未知の物質濃度の関数となっていて、系は閉じていない。ここで系を強制的に閉じさせるために大胆な仮定をする。つまり R_1 、 R'_2 、 R_3 を経験的パラメータと考え、 NO 、 NO_2 、 O_3 濃度の関数で近似する。この3つの量を近似する上で光化学反応の持つ次のような性質に着目する。

1) 正味のオゾンの生成量、すなわち〔1〕、〔2〕、〔3〕の寄与を除いた生成量、(上記の方程式系では R_1 に相当する)、は紫外線量にはほぼ比例して増大する。

2) NO_x 、 O_3 の正味の消滅速度(それぞれ R'_2 、 R_3 に対応)は汚染大気中では大きい、清浄大気中では小さい。

まず、3つのパラメータのうち最も重要な R_1 は $[\text{O}_3]$ に比例すると仮定する。

$$R_1 = r_1 [\text{O}_3] \quad r_1 = \text{constant} \quad (94)$$

(92)式を使って変型すると

$$\begin{aligned} R_1 [\text{NO}] &= r_1 [\text{O}_3] [\text{NO}] \\ &= \frac{r_1}{k_3} k_1 [\text{NO}_2] \end{aligned} \quad (95)$$

となって $[\text{NO}_2]$ の光分解速度に比例し、上記の性質1)を満たす。また元の反応モデル(BPRM)の結果から R_1 を見積ってみてもほぼ $[\text{O}_3]$ に比例し、その係数はだいたい $3 \text{ min}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$ くらいであることが分かる。

次に

$$R'_2 = r_2 [\text{O}_3] \quad (96)$$

$$R_3 = r_3 [\text{NO}_x] \quad (97)$$

と仮定すると、 O_3 にとっては NO_x が、 NO_x にとっては O_3 の存在が消滅反応を起こさせることになるので、性質 2) とだいたい一致する。BPRM の結果からは (96)、(97) は (94) ほどよい近似ではないことが示されるが、 r_2 、 r_3 はともにだいたい $10^{-1} \text{ min}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$ のオーダーであることが分かる。(94)～(97) の仮定により方程式は閉じ、(90)、(91) の 2 つの予報式と (93) の診断式の組合せで解が求まる。ここで係数 r_1 、 r_2 、 r_3 の値については、そのオーダーしか分からないので、実験データより決める。上述の方程式系は極端な簡略化を行なっているので、一次汚染質の濃度が現実の環境濃度と同程度の条件で行なわれた実験結果と比較しないと大きな誤差を生じる危険がある。

図 7.5 は Sakamaki ら、(1981) によるチャンバーシミュレーションの結果の一部で、HC の初期値を 0.5 ppm に固定し、 NO_x の初期値を変えたときの最高 O_3 濃度を示したものである。最高 O_3 濃度は NO_x の初期濃度のおよそ 1/2 乗に比例し、また HC の種類にあまりよらないことが示されている。上記の方程式系による計算結果を黒丸で示す。計算値は実験値とほぼ同様のふるまいをすることが分かる。ここで計算に用いたパラメーターは他のチャンバー実験結果も考え合せて、次のように決めた。

$$(r_1, r_2, r_3) = (3.6, 0.1, 0.08)$$

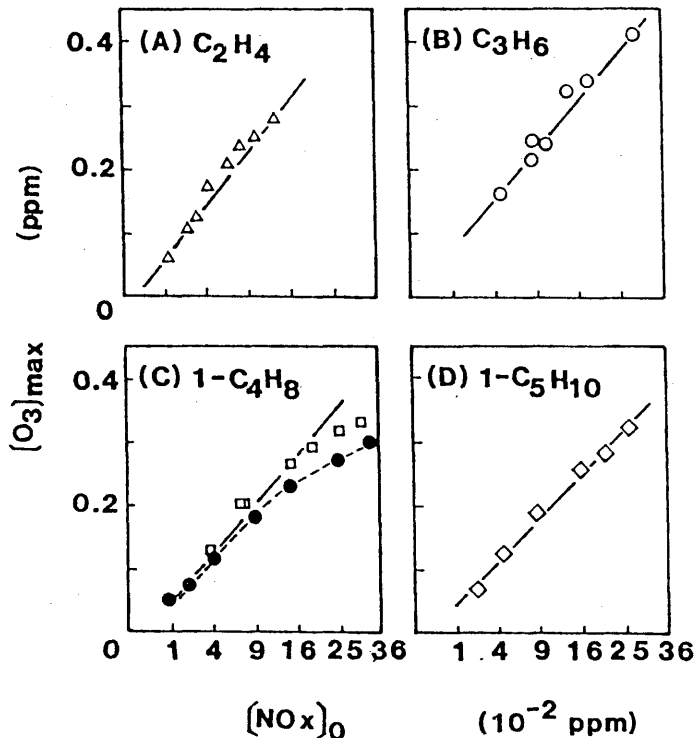


Fig. 7.5 The maximum ozone concentration and initial NO_x concentration in the case of HC excess provided by a chamber experiment carried out by Sakamaki et al. (1981). The black circles are calculated values.

また k_1 は実験条件より 0.21 min^{-1} 、 k_3 は文献によるとだいたい $20 \sim 30 \text{ min}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$ なので $25 \text{ min}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$ を仮定する。図 7.6 は O_3 の最大生成速度と NO_x の初期濃度との関係を示したものである。 NO_x の初期値が低いと実験値同様 NO_x の初期値の増大とともに増加するが、実験値が一定値以上大きくならないのに対し、計算値はそのまま増大し、ついに過大となる。図 7.7 は O_3 の最大生成速度と k_1 との関係を示すもので、計算値は実験値と同じように k_1 とより比例関係を示す。また、図 7.8 は NO 、 NO_2 、 O_3 の各濃度の時間変化を示すが、Hect et al. (1974) などにより引用されている多くのチャンバー実験の結果とよく似た変化をしている。

上に示したように、パラメータ化した反応モデルによって現実の光化学反応による低 NO_x 、高 HC 下での O_3 濃度をかなりの程度は再現できるといえる。しかし言うまでもないことであるが、パラメータ化した反応モデルは現実の反応系を極端に単純化しているため、現実の光化学スモッグのあらゆる性質を再現しているものではなく、このモデルを使った結果を解釈する上では充分留意する必要がある。反応過程が結論に微妙な影響を与えと考えられる問題については、より精密な反応モデルを使用しなければならない。

7.4 2次元の海陸風と光化学大気汚染

7.4.1 計算条件

初めに局地風と大気汚染の基本的な関係を調べるため、もっとも簡単な局地風のひとつである2次元の海陸風の中での汚染質の挙動を調べる。

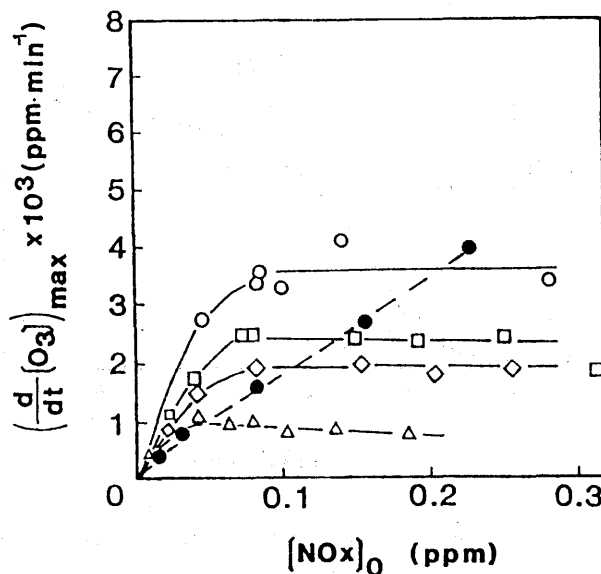


Fig. 7.6 The maximum ozone formation rate v. s. initial concentration.

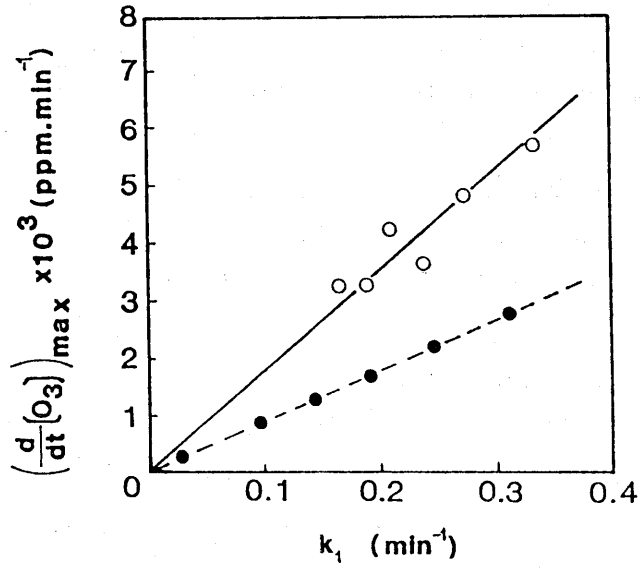


Fig. 7.7 The maximum ozone formation rate v. s. light intensity.

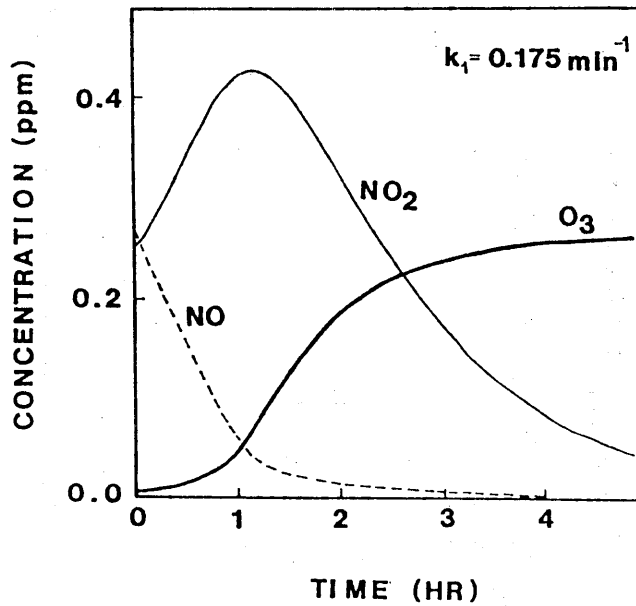


Fig. 7.8 One of the solutions of the parameterized photochemical reaction model.

海と平坦な陸地を考え、海岸から内陸30 km までに発生源が存在すると仮定する。格子間隔を7.5 km、全体の計算領域を225 km にとり、次のような計算条件を仮定しシミュレーションを行う。

(1) 気象関係

- ・ 太陽高度：北緯35°での夏至に相当
- ・ 一般風なし
- ・ 初期温位分布： $\partial\theta/\partial z = 0.0035^\circ\text{C}/\text{m}$ （午前0時にて）
- ・ 初期湿度分布：全域で相対湿度50%（ “ ” ）
- ・ 初期表面温度：海面温度＝地面温度＝地上気温（ “ ” ）
- ・ 地表のWetness： $w' = 0.1$ 、これにより蒸発効率 β は0.2となる。

ここで $w' = 0.1$ の仮定は地面がかなり乾いていることを意味し、太陽からの放射エネルギーは比較的効率がよく顕熱となって大気に伝わる。

(2) 汚染関係

- ・ 初期値： $\text{O}_3 = 25 \text{ ppb}$, $\text{NO}_x = 0$
- ・ 発生源：7^hより20^hまで、 NO および非反応性汚染NRを地上面源として $200 \text{ m}^3/\text{h}(7.5 \text{ km})^2$ の割合で一様に放出する。
- ・ 地表面沈着：陸上において O_3 の速度 v_d を $0.3 \text{ cm}/\text{sec}$ に仮定し、その他の汚染質の吸着はないものとする。

また NO_2 の光分解速度 k_1 は中緯度での日中で $0.4 \sim 0.5 \text{ min}$ （秋元、1979）といわれているので、ここでは日射量 $S (\text{cal}/\text{cm}^2/\text{min})$ に比例すると考えて、 $k_1/k_3 = 0.013 S$ を仮定する。これにより日射のもっとも強い時で $k_1 = 0.46 \text{ min}^{-1}$ に相当する。なお上で仮定した発生量は、30 km 四方の都市を考えると $3200 \text{ m}^3/\text{h}$ となるが、首都圏での移動発生源は全体で $10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ くらいなので、これよりやや少ない。

7.4.2 風と汚染の立体分布

局地風と汚染の数値積分は午前0時に開始し、48時間行った。図7.9は2日目の6^h、つまり計算を開始してから30時間後の風、 O_3 、 NO_x およびNR（非反応性汚染質、トレーサーと考える）の分布を示したものである。計算は地上から高度6000 m まで行っているが下層の2000 m までが示されている。

地上から500 m くらいまで広い範囲にわたって弱い陸風が吹いていて、その上空にさらに弱い反流が見られる。 O_3 濃度は地上付近は低濃度となっているが、汚染源の上空500 m から1500 m 近くまでの層にかなり高濃度の O_3 が存在する。これは前日排出された汚染質によるものである。 NO_x は汚染源より内陸側のごく下層にわずかに存在する。一方、NRは下層ばかりでなく、かなり上層

にも存在し、 NO_x より高濃度となっている。NR と NO_x の排出量は同じなので、両者の濃度の差は反応により除去された量に相当する。

12^h(図 7.10)では海岸から30 km くらいの範囲で海風が吹いている。陸上では混合層が発達し、鉛直拡散が盛んになる。日射により反応も盛んになって、排出された NO_x から O_3 が作られる。上空にあった前日からの O_3 とも混合し、発生源地帯の内陸側を中心に高濃度となる。しかし NO_x は反応による除去と鉛直拡散により、あまり高濃度とならない。15^h(図 7.11)になると海風は内陸50 km 以上侵入し、風速も最大では5 m/s を超え、また上昇流も強くなる。強い海風による清浄大気の侵入によって発生源地帯の下層では O_3 、NR 濃度が低下する。一方、上層の汚染質は海風の反流によってゆっくり海側に輸送されるが、これが下層の海風に乗って再上陸するような現象はあ

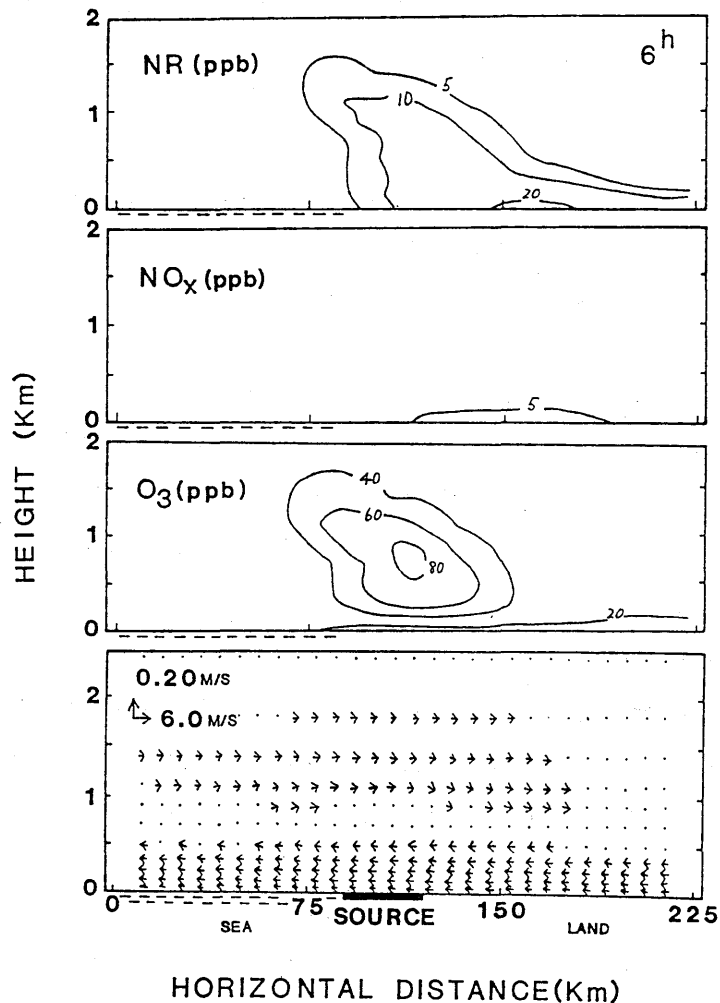


Fig. 7.9 Distribution of wind velocity, ozone, NO_x and NR (non-reactive pollutant) calculated by the model at 0600 LST on the second day.

まり見られない。さらに18^h(図7.12)では海風は内陸深く侵入するが、大気の状態は次第に安定に変わる。 NO_x は上層へ拡散せず、地上付近の濃度は上昇する。これに伴って O_3 濃度は低下し、発生源地帯の地上濃度はついに0になる。これに対し、上層では依然高濃度の O_3 が存在し、これは翌日まで発生源地帯の上空に止まる。

発生源地帯の地上付近での夜間、 O_3 濃度は非常に低いが、上層では高濃度のオゾンが存在することはカイツーンなどによって実際に観測されている(鶴田、1982)。

7.4.3 地上濃度の日変化

図7.13の最下段は海岸から26 kmの、発生源帯のもっとも内陸側の格子点での地上風、地上濃度(高度25 m)の日変化である。 O_3 濃度は13^hごろにピークをもつ1山型、 NO_x 濃度は朝夕にピー

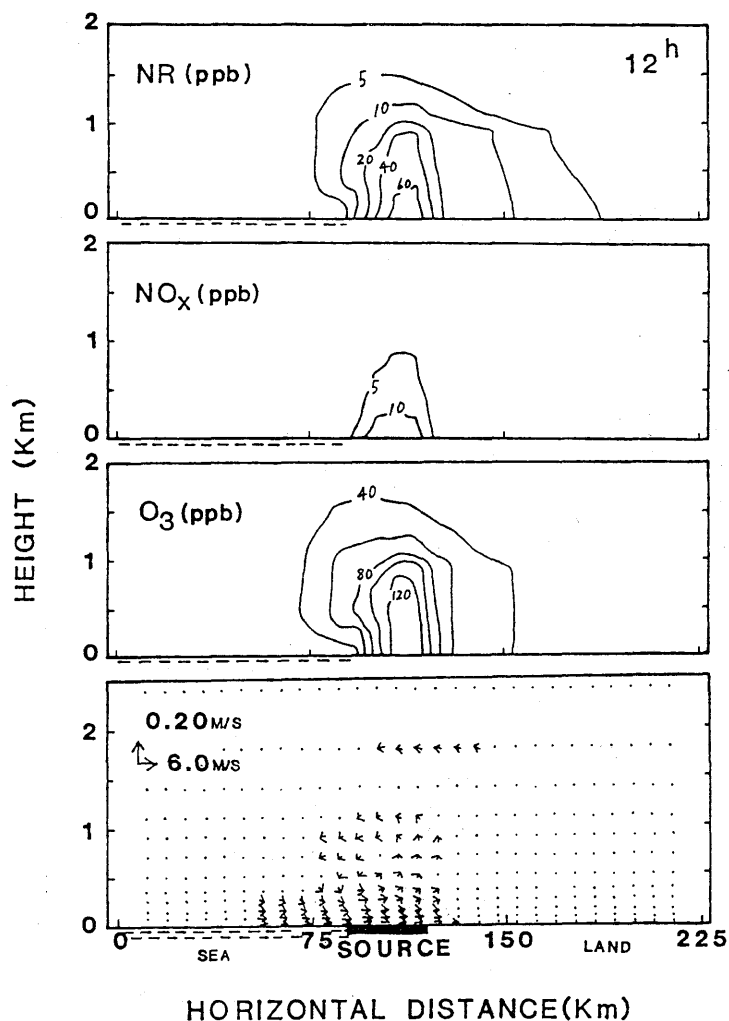


Fig. 7.10 Same as in Fig.7.9, but at 1200 JST.

クをもつ2山型をしている。これらは都市周辺の常時測点でごく普通に見られる日変化パターンである(原田、1979)。地上風は夜半から早朝にかけて陸風であるが、風速は弱く最大でも1m/sくらいである。9時前には海風に変わるが、風速は弱く本格的に海風になるのは昼過ぎで、13^hから18^hごろには風速は5m/s 近くになる。海風は、その後徐々に弱くなり夜半前後に消滅する。この日変化パターンは東京や大阪周辺あるいはロスアンゼルスなど観測されている海陸風の日変化とよく一致している。

午前中の NO_x の濃度は発生源活動が開始されると上昇する。その後混合層の発達に伴って鉛直拡散が盛んになり、同時に反応により消費され NO_x 濃度は低下する。さらに午後になると強い海風により清浄な大気が供給され一層低下する。しかし夕方近くになると大気は徐々に安定になり排

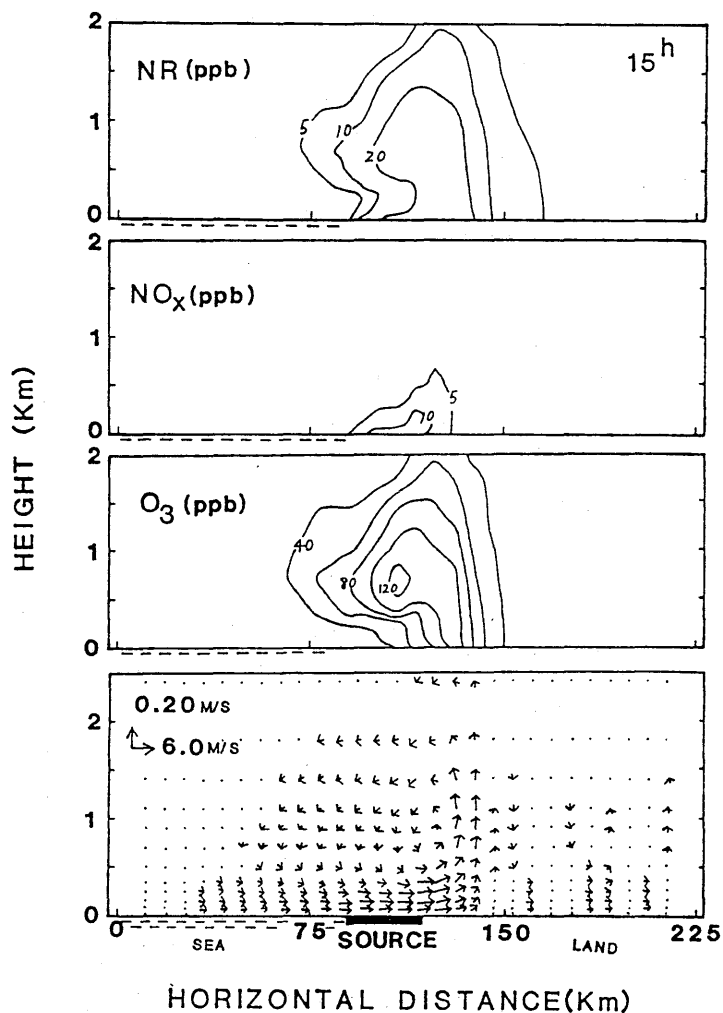


Fig. 7.11 Same as in Fig.7.9, but at 1500 JST.

出された NO_x は上方へ拡散しにくくなって、地上付近に高濃度をもたらし、第2のピークを作る。上記の過程は NO_x と NR の日変化を比べて見ると理解し易い。一方、 O_3 濃度は午前中には反応により生成されるのに加えて、鉛直混合による上空から供給もあって昼すぎまで急速に上昇する。しかし午後になると海風が強くなるため低下する。さらに夕方には NO_x 濃度が上昇するため地上付近では反応によりほとんど消滅する。

図には海岸からの距離が41, 56, 71 km の各点における地上風と地上濃度(高度25 m)も同時に示されている。内陸に行くに従って海風の吹き初めと O_3 のピークの時間は遅くなって $X = 71 \text{ km}$ では夕刻となる。内陸ほど O_3 濃度のピーク時間が遅れる現象は現実にも関東やロスアンゼルスでよく知られている(河村、1975)。しかし、いわゆる海風前線の進行と高オゾン気塊の移動の速度は

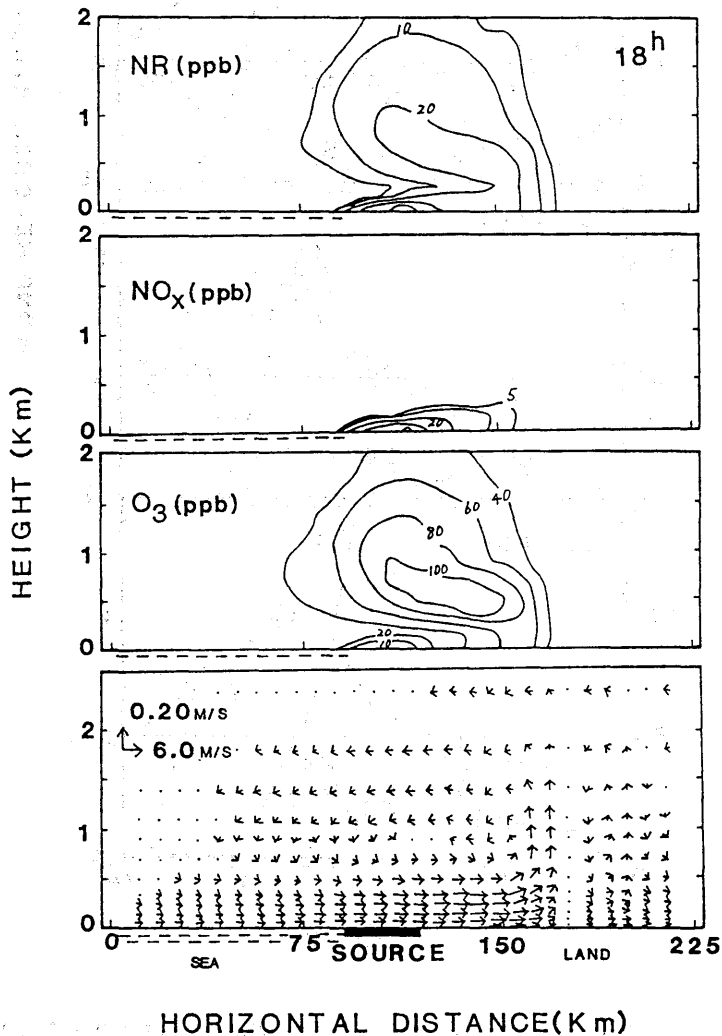


Fig. 7.12 Same as in Fig 7.9. but at 1800 JST.

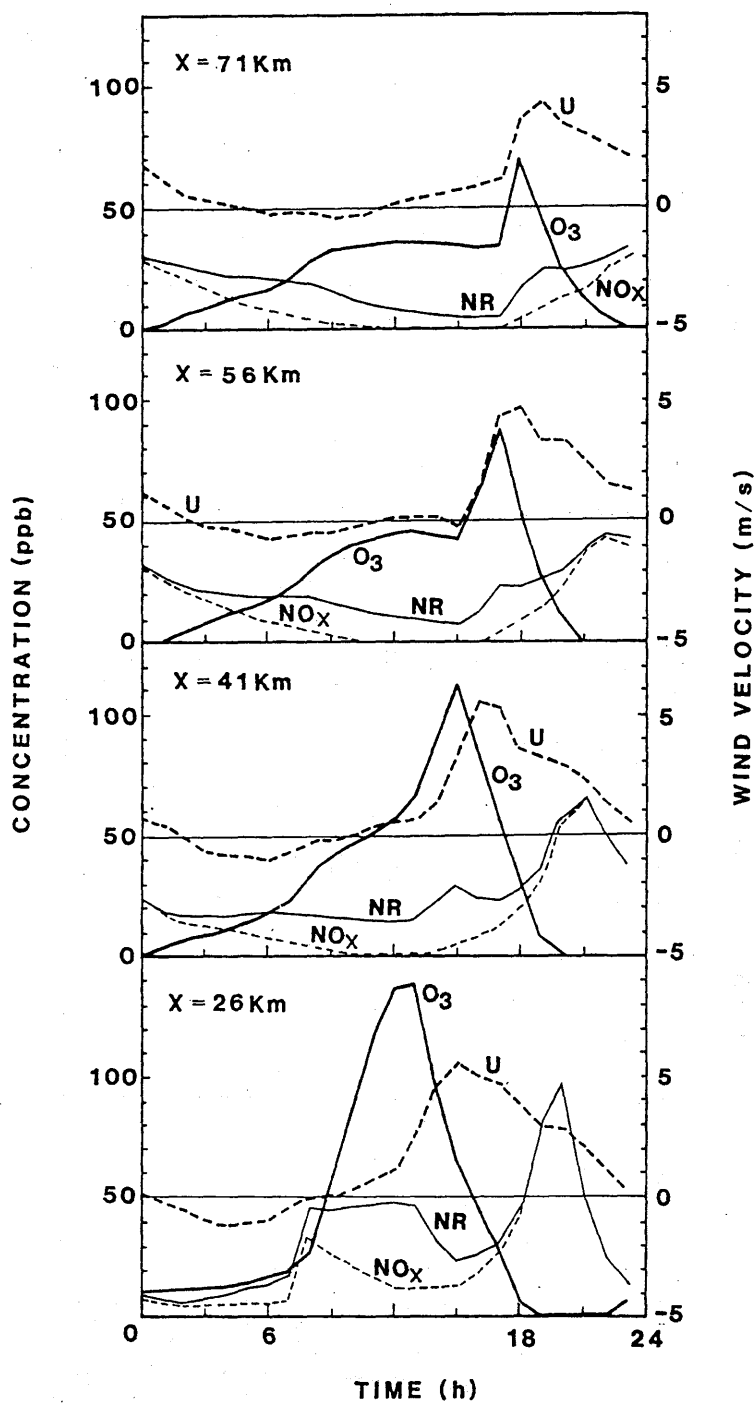


Fig. 7.13 Diurnal variation of wind velocity and concentrations at the level of 25 m on the second day. X is the distance from the coast.

必ずしも一致していない。X = 50 km 以上の内陸深くでは O_3 濃度は夕方にシャープなピークを持つ反面、昼ごろにもゆるやかな別なピークが表われ、2山型となる。数値実験によると、昼ごろのピークは前日に排出された汚染物質の影響であることが分かる。

7.4.4 まとめ

2次元のモデルによって、海に近い平地で一般的に観測される次のような光化学大気汚染の基本的な特徴を再現できた。

(1) 汚染源地域では、 O_3 の日変化は昼ごろに大きなピークを持つ1山型、 NO_x は朝夕にピークを持つ2山型になる。(2) 汚染源から離れて、内陸に入るにつれて、 O_3 濃度の最高値の出現する時刻は次第に遅くなる。(3) 夜間には、汚染源付近の上層にはかなり多量のオゾンが残っているが、地上付近では著しく低濃度となる。

7.5 中国・四国地方の静穏時の局地風シミュレーション

7.5.1 実測風の特徴

前記の局地風の数値モデルを使って、中国・四国地方に発達する海陸風や山谷風を再現し、アメダスによる観測と比較する。村山ほか(1981)の報告により、瀬戸内海を中心とする狭い領域の数値シミュレーションは、境界付近に高い山が存在することになるので、あまりよい結果を与えないことが分かっている。そのため、もう少し広い範囲を考え、中国・四国全体を対象として選んだ。

はじめに、この地域の局地風の特徴をアメダスによる観測値から調べる。図 7.14 は 1200 JST の風向・風速をプロットしたものである。1979 ~ 1981 の間で、西日本が高気圧におおわれ、晴天で一般風の弱い日を8日選び出した。点線で示されている等高線は 400 m おき、風の矢羽は1本について 2 m/sec を表わしている。図をよくみると、風向・風速の再現性のよい地点と悪い地点のあることがわかる。再現性のよい測定点は海岸部や平地に多く、再現性の悪い測定点は内陸部・山間部に多い。また海岸部であっても四国の三崎、足摺、室戸、蒲生田といった岬の先端では再現性が著しく悪い。また来島海峡周辺の久比、今治、および備讃瀬戸の東側の玉野、高松、小豆島でもあまりよくない。また中国地方の日本海側、特に萩から出雲にかけての海岸線の風向も変動が大きい。

海岸部の再現性のよい地点では、風はほぼ海岸に直角に陸に向かって吹いて、安定した海風や谷風が吹いているものと考えられる。一方、内陸部で風向の再現性が悪いのは、周囲の微細な地形の影響を受けていること、複数の局地風系間の境界に近いこと、わずかな気象条件の違いにより、大きな差が現われることが考えられる。海峡付近についても、局地風系の境界になりやすいためと考えられる。岬の先端では、わずかな一般場の違いを敏感に反映しているのではないかと推定される。

土佐湾、燧灘の南岸、北岸の3本の海岸線に吹く海風(正確には海風と谷風の複合と考えられる)

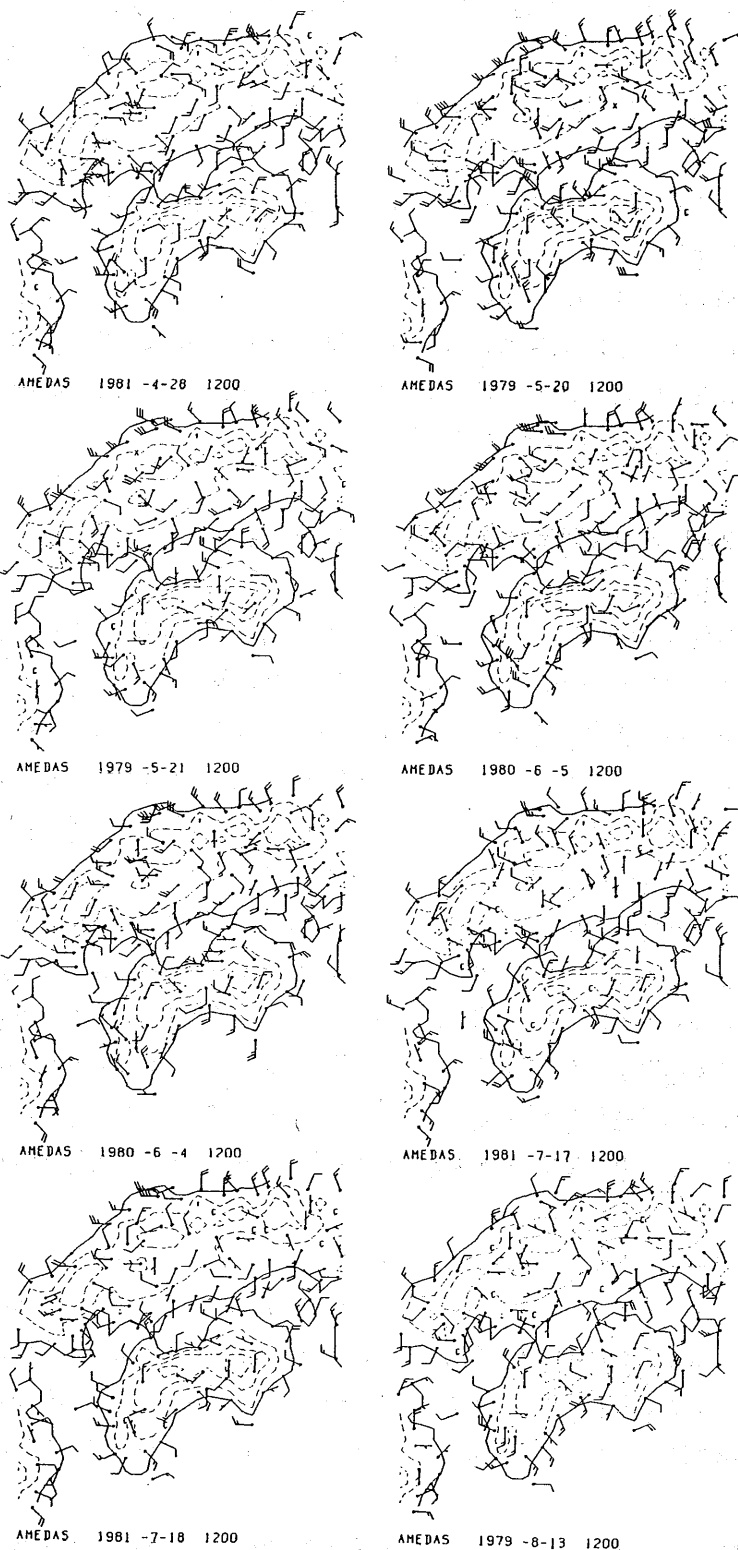


Fig. 7.14 Surface wind velocity at 1200 JST in the days when the large scale wind is mild and the sky is clear.

の強さを比べると、土佐湾からの海風が $2\sim4\text{ m/sec}$ で最も強い。燧灘の南岸、北岸の強風はどちらも $1\sim3\text{ m/sec}$ 程度だが、南岸(四国側)に吹く海風の方が強いことの方がやや多いようである。次に燧灘周辺の海風の東西成分に着目すると、燧灘の東側では岡山側でも香川側でも西風が顕著であるのに対し、西側に吹くべき東風は相対的に目立たない。また、やや判別しにくいが広島から岡山にかけて、やや内陸側の測定点も含めて南西風がしばしば出現する。これに対して岡山より東の播磨灘沿岸とその内陸では真南かやや東よりの南風が現われる。この2つの風系は午後になると、より明確となる。図7.15に15時の風系を2例示す。中国地方の瀬戸内側では全体的に南西風系におおわれている。しかし播磨灘沿岸には南風が残っているのが認められる。この2つの風系、特に広島市から岡山市にかけての南西風は、海陸風よりもややスケールの大きな局地風と考えられ、燧灘の東側で西風が顕著であることも関連があると見られる。海陸風とそれよりスケールの大きな局地風が同時に存在することは藤部と浅井(1979)により関東地方で指摘されているが、上記の風系が、これと同じように、より広い範囲の地形の影響によって形成されたものであるかどうかは、これだけの解析ではわからない。

昼の海風・谷風に対して、夜の陸風・山風はアメダス観測網ではわかりにくい(図7.16)。一般に風が弱く、 1 m/sec 単位の測定では無風とされている測定点が多くなるためである。また昼間より、さらに微細な地形の影響を受け易くなるためか、再現性は悪くなる。その中でも、やや再現性のよい地点を挙げると燧灘の南岸、北岸、とくに南岸の陸風・山風、広島湾に向かって吹く陸風、姫路平野から播磨灘へ吹く陸風、四国の西岸から豊後水道へ吹く陸風、および四国の東岸から紀伊水道へ吹く陸風などである。

7.5.2 数値シミュレーションによる地上風の特徴

まず数値シミュレーションの計算条件から述べる。計算は午前0時に無風状態を仮定して出発する。その時の温位分布は水平方向には一様、鉛直には一定の温位傾度($=3.5^\circ\text{C/km}$)を仮定する。

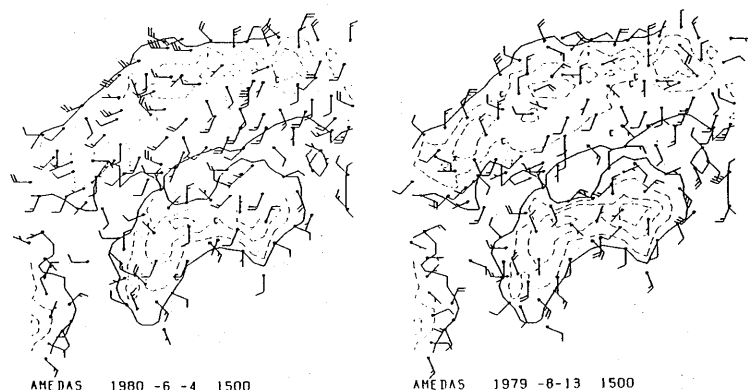


Fig. 7.15 Same as in Fig.7.14, but at 1500 JST.

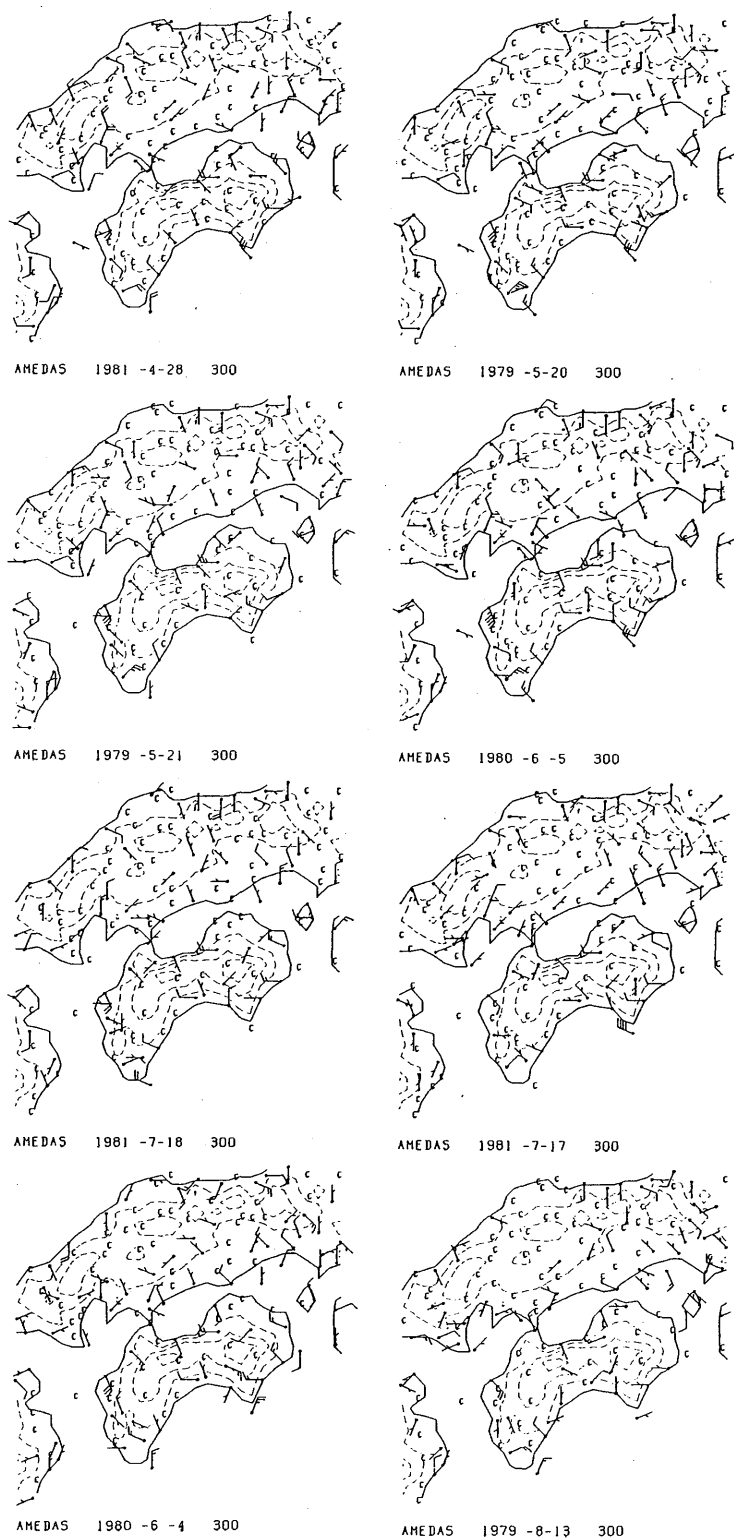


Fig. 7.16 Same as in Fig.7.14, but at 0300 JST.

地表面温度は地上の大気温位に相当する温度を仮定、wetness は 0.25 を仮定する。太陽高度は夏至を想定する。結果に及ぼす初期値の効果を減らすため、48時間のシミュレーションを行ない、2日目の24時間の結果を比較の対象とする。

図 7.17 は計算された12時の地上風である。正確には $z^* = 25 \text{ m}$ の高さ(地表からほぼ25 m の高さ)での風速分布である。アメダスの測定点より高いことに注意しておく。複雑になってしまうのを避けるため、図には、格子点1つおきの矢羽が書かれている。海岸線の急変する場所を除いて、海風は海岸線にほぼ直角に吹いている。海岸部では実測とほぼ一致する場所が多いが、広島湾の両岸に吹き分ける海風や、四国の高縄半島を廻り込むように吹く、丹原の北東風は表現されない。このくいちがいは数値モデルの分解能が十分でないことに原因の大部分がある。図 7.18 は前の節で述べたワンウェイ・ネスティングの方法により、燧灘の周辺を拡大した数値シミュレーションの結果である。格子間隔は 5 km である。粗いモデルでは北北西の風であった丹原付近に、東よりの成分が出てきているのがわかる。

再び図 7.17 の粗いモデルに戻って、土佐湾、燧灘の南岸、北岸の風速に着目すると、土佐湾の海風が最も強く 4 m/sec くらい、次いで燧灘の南岸の海風で 3 m/sec くらい、北岸の海風は最も

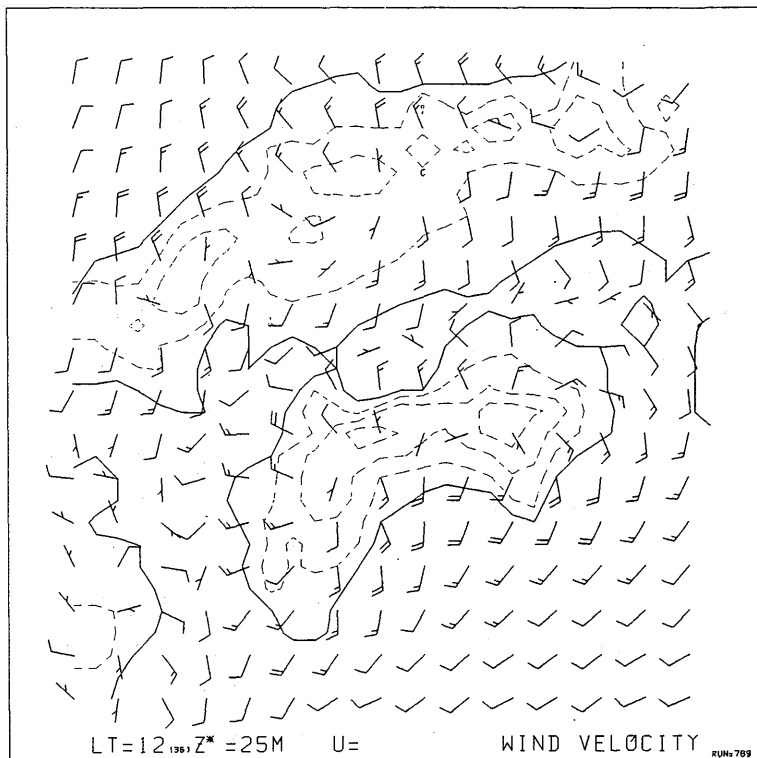


Fig. 7.17 Simulated wind velocity at the level of 25 m at 1200 LST.

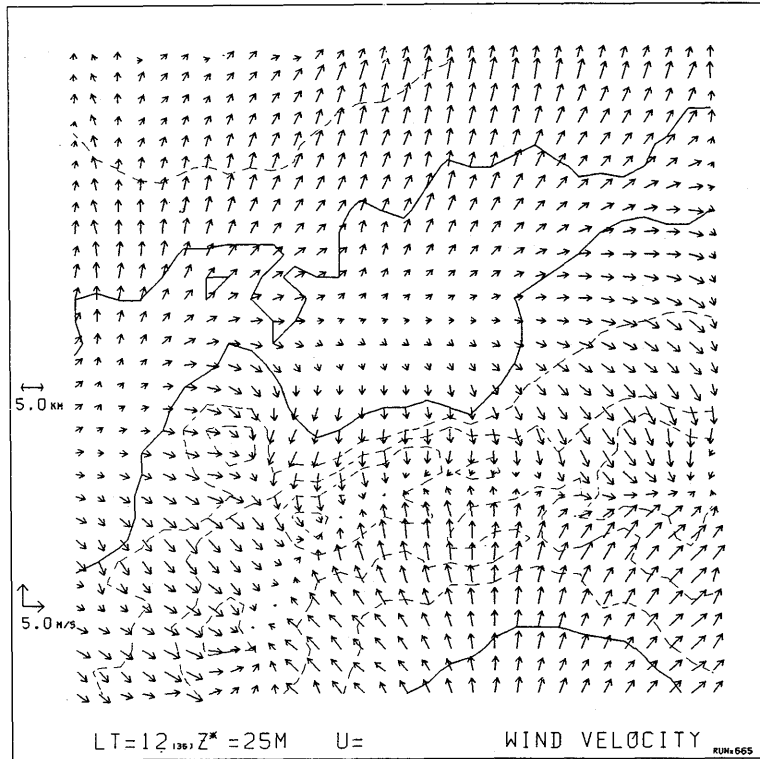


Fig. 7.18 Same as in Fig.7.17, but by the fine grid model (5 km interval).

弱く 2 m/sec くらいである。土佐湾の海風が強いのは外洋に面しているからであり、燧灘の南岸は内陸の斜面が中国側に比べて急峻であるため谷風成分が大きいと思われる。

広島市から岡山市にかけての内陸には実測データにも見られたような南西風が入りこむ。この風系をさかのぼると伊予灘に達する。伊予灘からの西成分を持った風系は燧灘の中央部にも延び、備讃瀬戸に達している。一方紀伊水道からの南風は播磨灘に入って東成分を持ち、一部は備讃瀬戸に達している。また別の一部は姫路平野の海風につながっているように見える。

実測と同じように午後になると伊予灘からの西成分を持った風系と、紀伊水道からのやや東成分を持った風系の2つの、スケールの大きな風系はより明確となる。シミュレーションでは特に18時ごろに最もはっきりする(図 7.19)。伊予灘からの南西風は、風系の厚さも海陸風より厚く、700 m 以上に及ぶ。上記の2つの風系は、瀬戸内海が海風により南北方向に発散場となっているのを補償しているものと思われる。実測風では淡路島では北風が吹いていることが多く、紀伊水道からの南風と姫路平野に吹く海風のつながりは、地上風の実測値からは確認できない。

夜間の陸風時の地上風を図 7.20 に示す。燧灘の南・北岸、土佐湾に陸風や山風が見えるが、一般に実測と比べて風が強い。これは数値モデルの最下層の高度(25m)とアメダスの測定高度に差があ

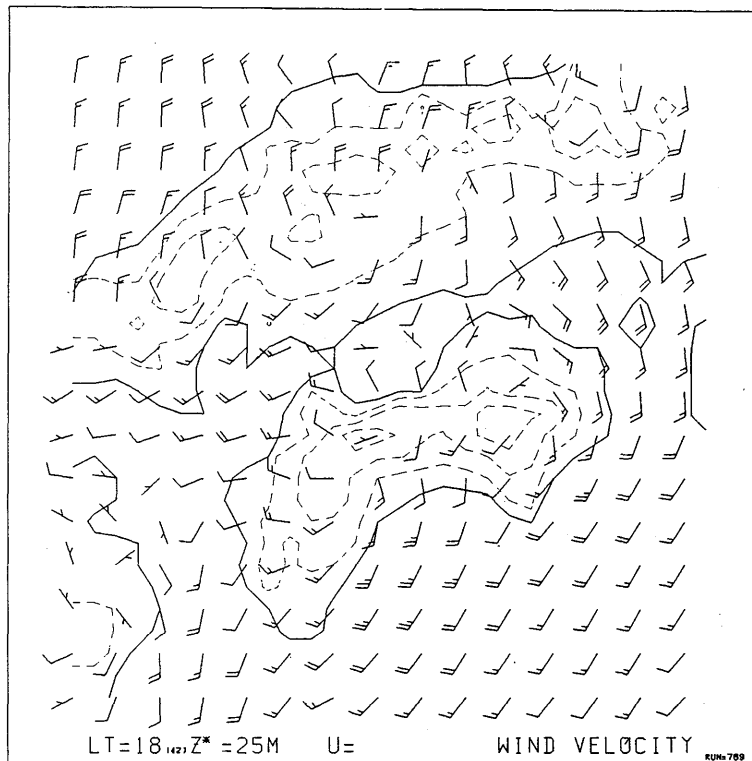


Fig. 7.19 Same as in Fig.7.17, but at 1800 LST.

る上、夜間は高さによる風速差が大きくなるためと説明ができる。しかし、実測では陸風の卓越し易い姫路平野では東風が支配しているなど、実測との一致は日中の海風よりも悪い。瀬戸内地方への応用に限らず一般にシミュレーションでは昼間に作られた、海陸風よりもスケールの大きな風系が翌日までなかなか消滅しない傾向にある。夜間の大気の放射冷却などの見直しが必要となるかもしれない。

7.6 観測期間中の局地風と大気汚染のシミュレーション

7.6.1 1981年度観測との比較

1981年8月19～21日特別観測時の一般場を与えて数値計算をした。計算に用いた因子は、

一般風	E 4.0 m/s
逓減率	0.6 C/100 m
wetness	0.25
格子間隔	12 km

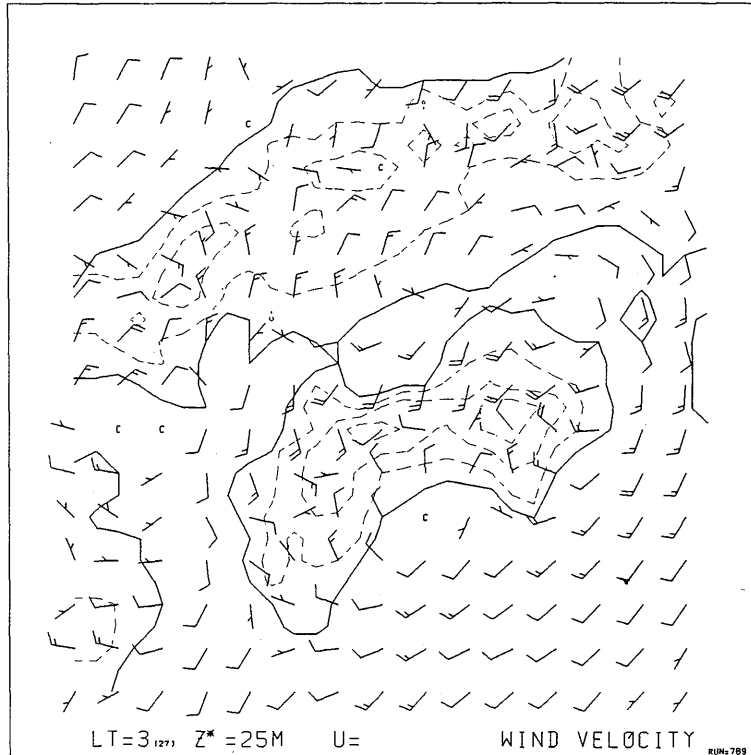


Fig. 7.20 Same as in Fig.7.17, but at 0300 LST.

8月19日21時から20日15時までの6時間おきのパイボールにより得られた風向・風速を高さ100 mでプロットした図を数値シミュレーションにより得られた $Z^* = 75$ m の図と対比させて、図7.21(A)～(D)に示す。同様に図7.22(A)～(D)には高さ400 mの実測風と $Z^* = 350$ mの計測値、図7.23(A)～(D)には1500 mの実測風と1400 mの計算値を示す。また図7.24(A)～(D)には新居浜を通る南北断面上の風向・風速・温位の実測値の分布を示す。この図において矢羽の向きが、右が北になっているので注意が必要である。これに対応する計算結果は図7.25(A)～(D)に示す。上の図が風の水平成分に風向・風速(上向きのベクトルは南風を示す)、下の図は風速の等値線を示す。これらの図から見た実測風と計測値の特徴の比較を表7.1に示す。

表6.1でも指摘したように、図7.22(B)の3時の400 mの実測では、松山、新居浜、別子において西風が吹いている。数値シミュレーションでは、これらの地域では弱い東風となっていて、実測とは一致しない。しかし、わずかに計算条件を変えてやると、この西風を再現することができる。図7.26は一般風の風速をE 4 m/sec からE 3 m/sec に少し弱めて実施したシミュレーションの結果である。松山から新居浜にかけて西風が入っているのが分かる。これは、豊後水道から伊予灘を通り燧灘南部に達する比較的大きな風系の一部であることが分かる。これは静穏時のシミュレーショ

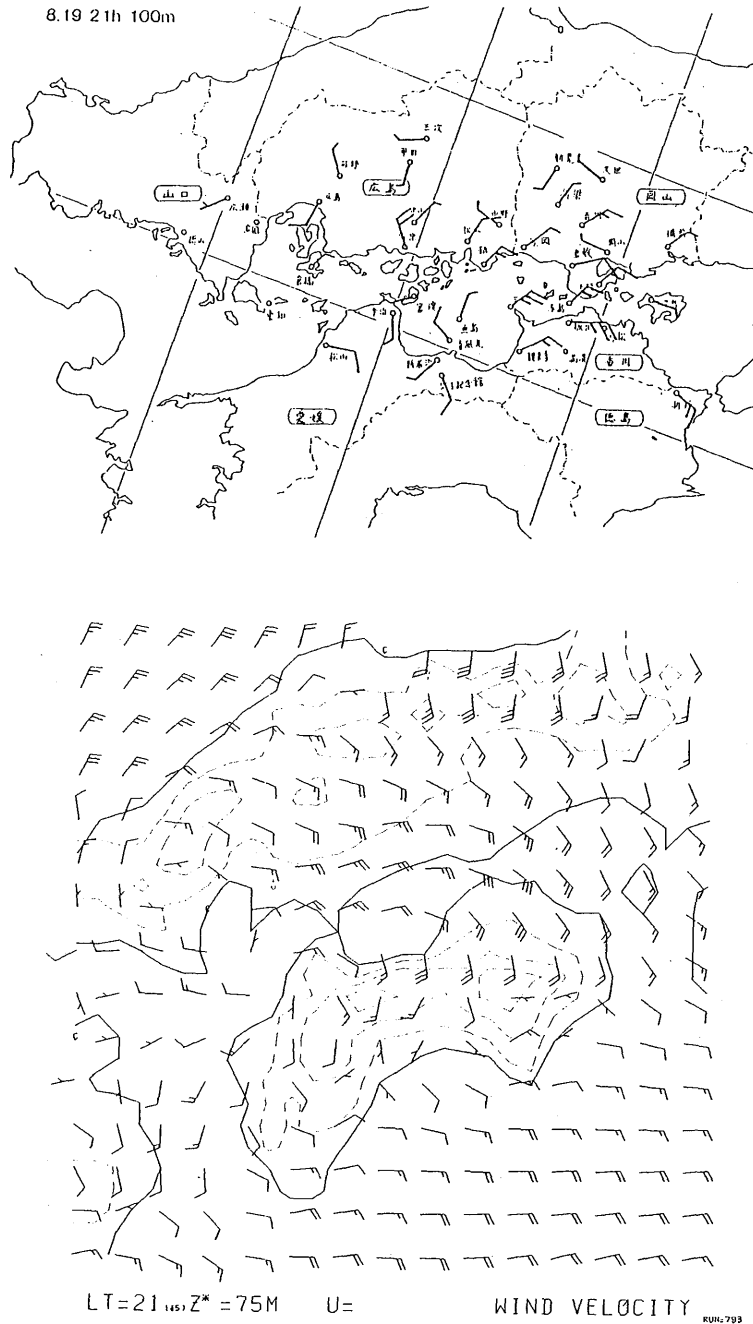


Fig. 7.21 Observed wind velocity at the level of 100 m (top), and simulated wind velocity at the level of 75 m (bottom). A:2100 JST, 21, Aug., 1981, B:0300 JST, C: 0900 JST, D:1500 JST.

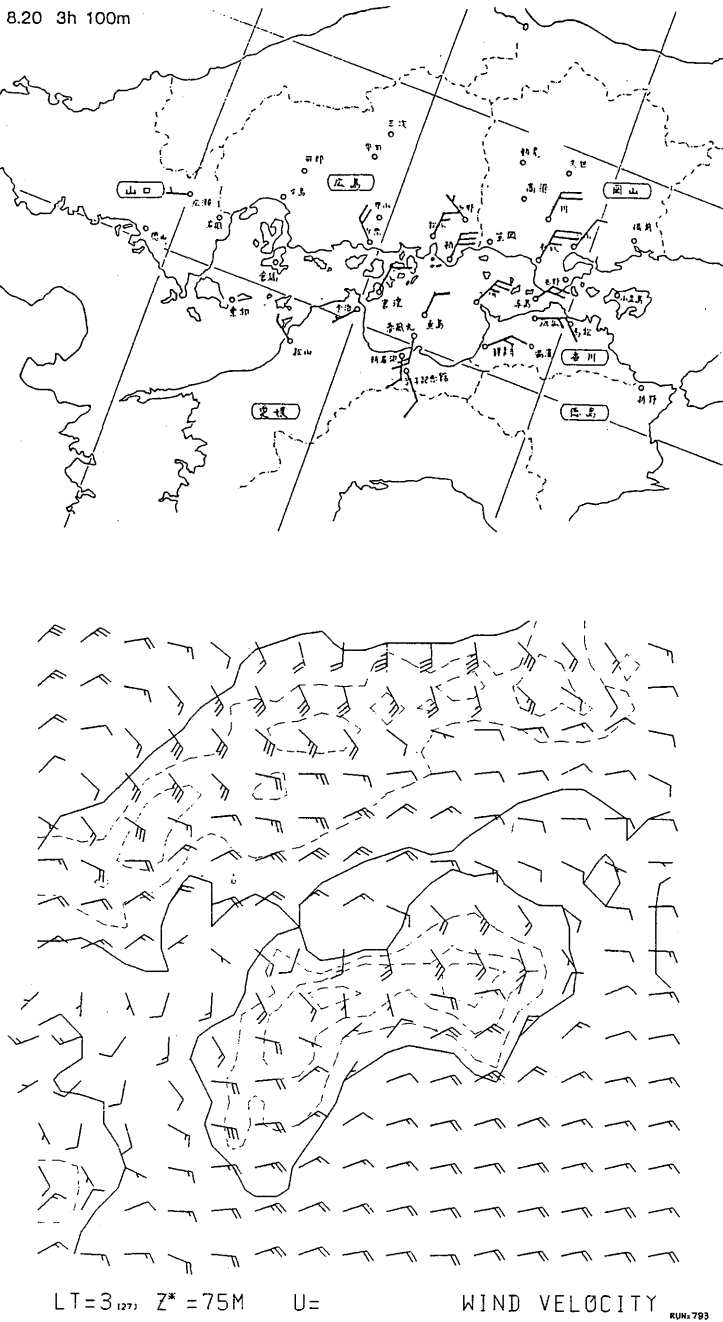


Fig. 7.21(B)

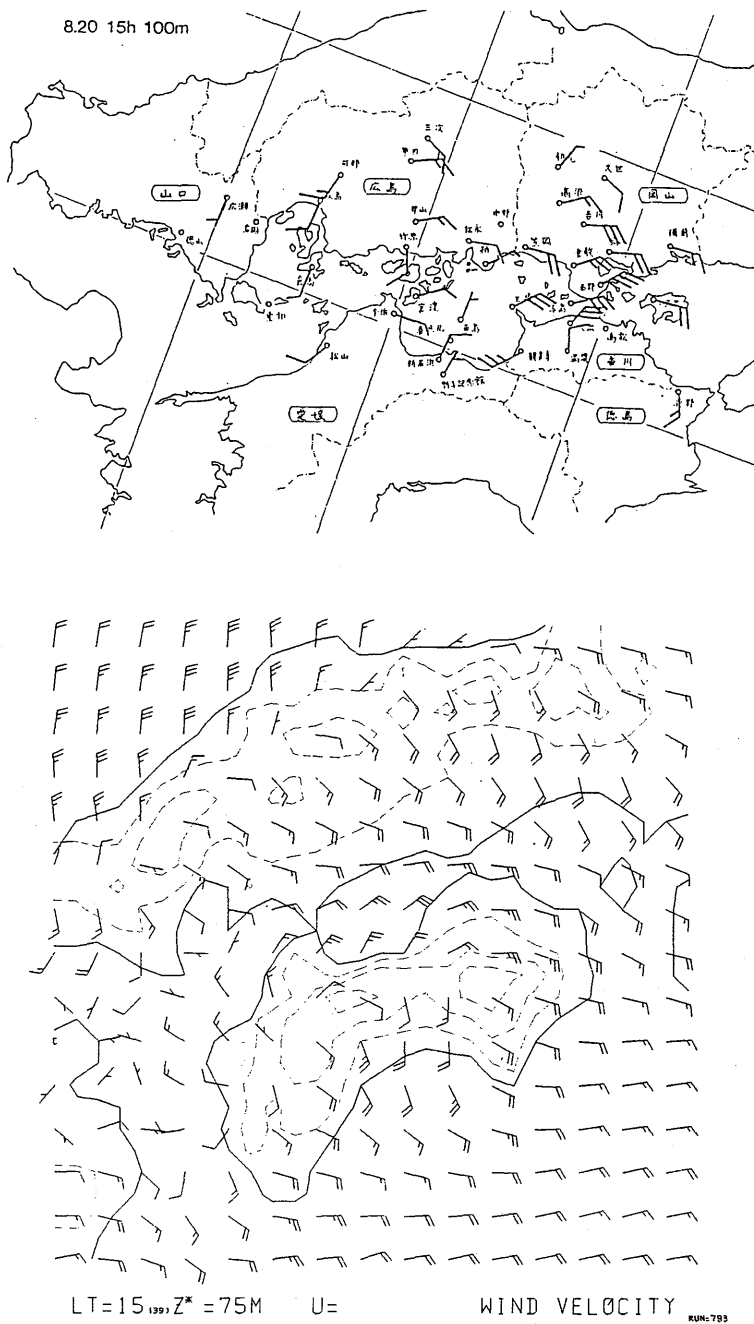


Fig. 7.21(D)

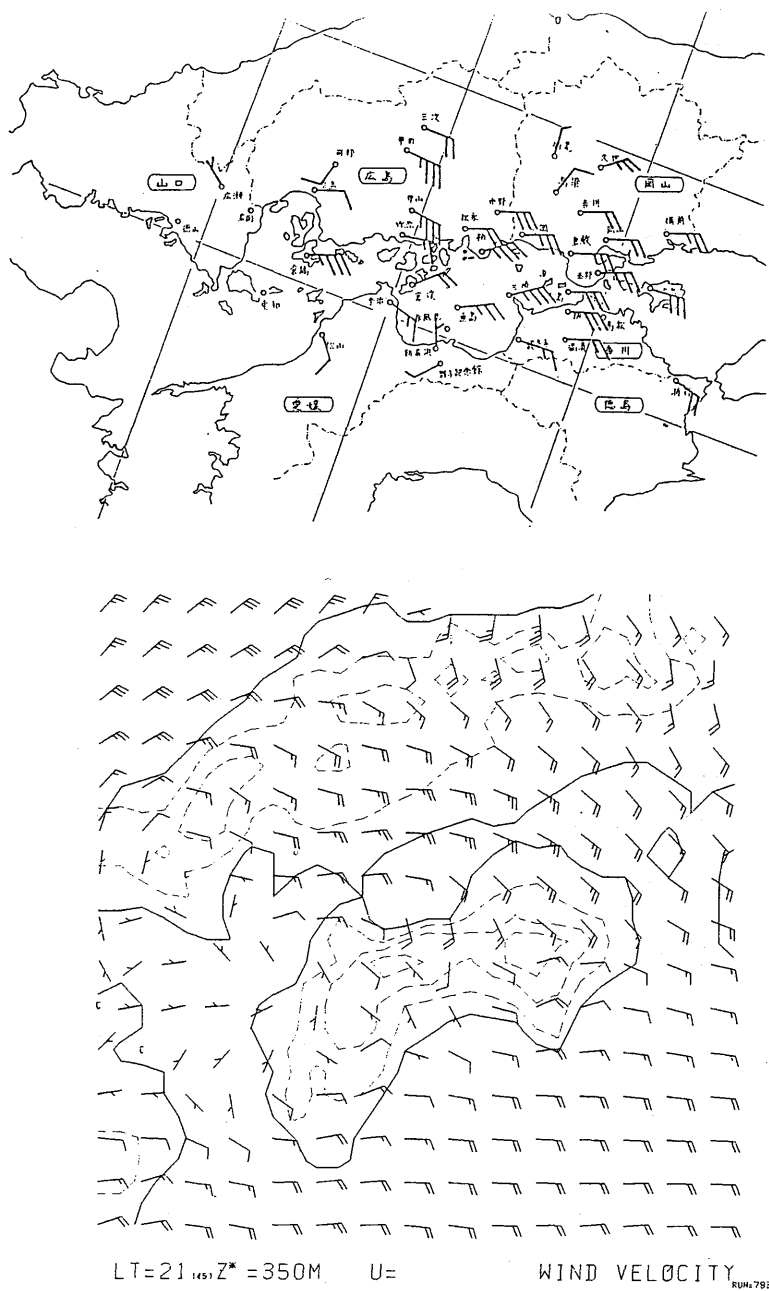


Fig. 7.22 Observed wind velocity at the level of 400 m (top), and the simulated one at the level of 350 m (bottom). A:2100 JST, B:0300 JST, C:0900 JST, D:1500 JST.

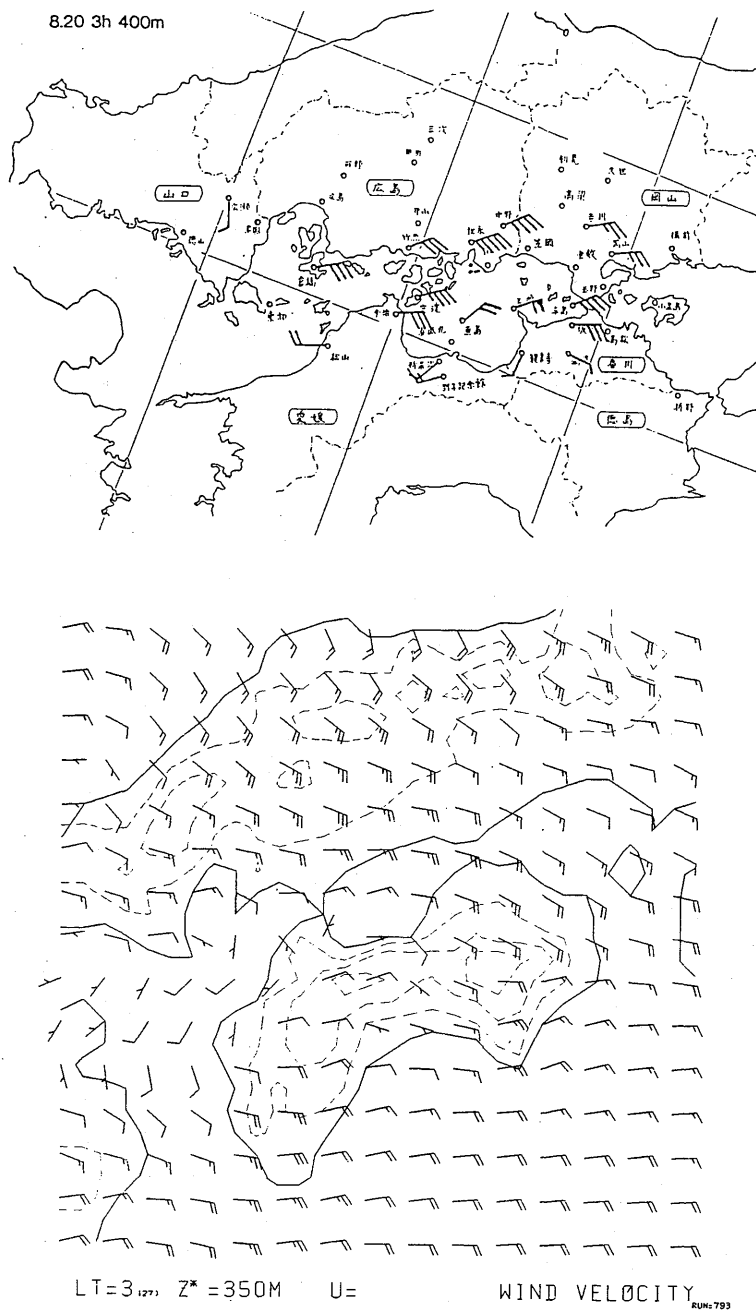


Fig. 7.22(B)

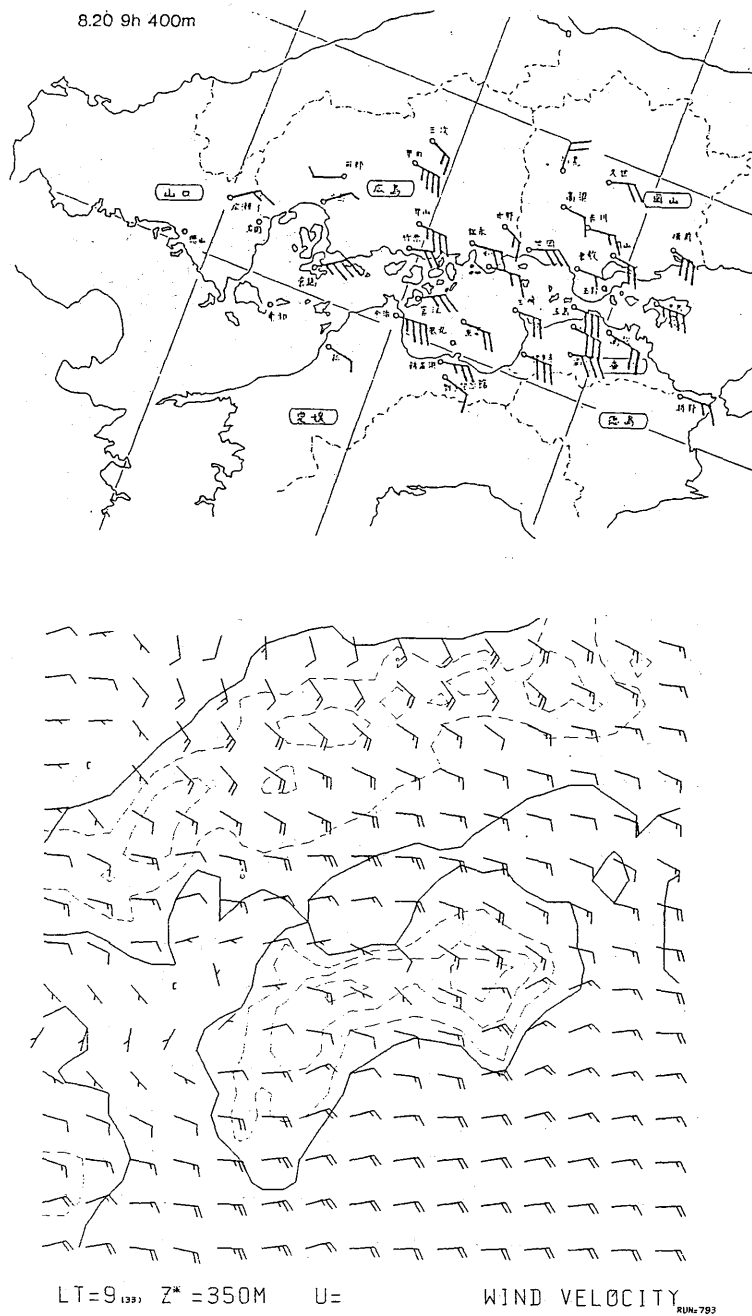


Fig. 7.22(C)

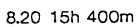


Fig. 7.22(D)

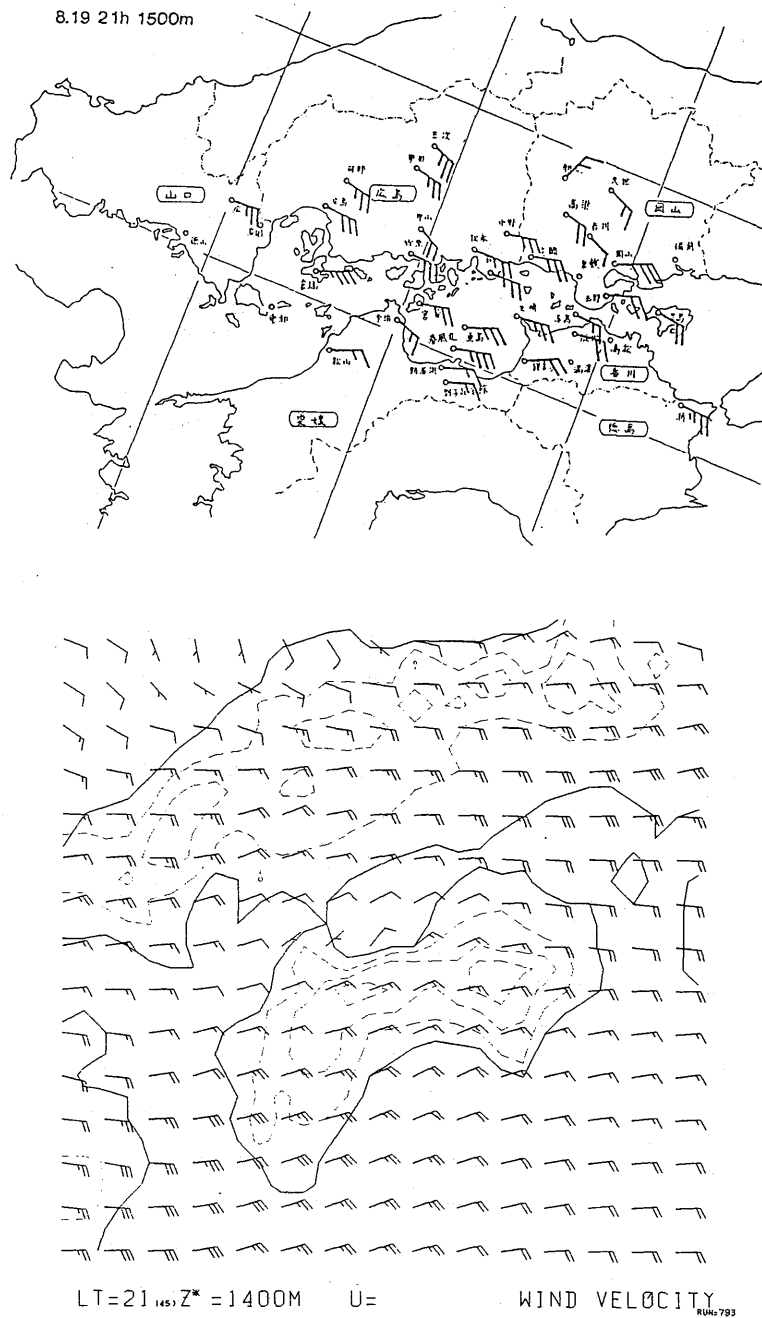


Fig. 7.23 Observed wind velocity at the level of 1500 m (top), and the simulated one at the level of 1400 m (bottom). A:2100 JST, B:0300 JST, C:0900 JST, D:1500 JST.

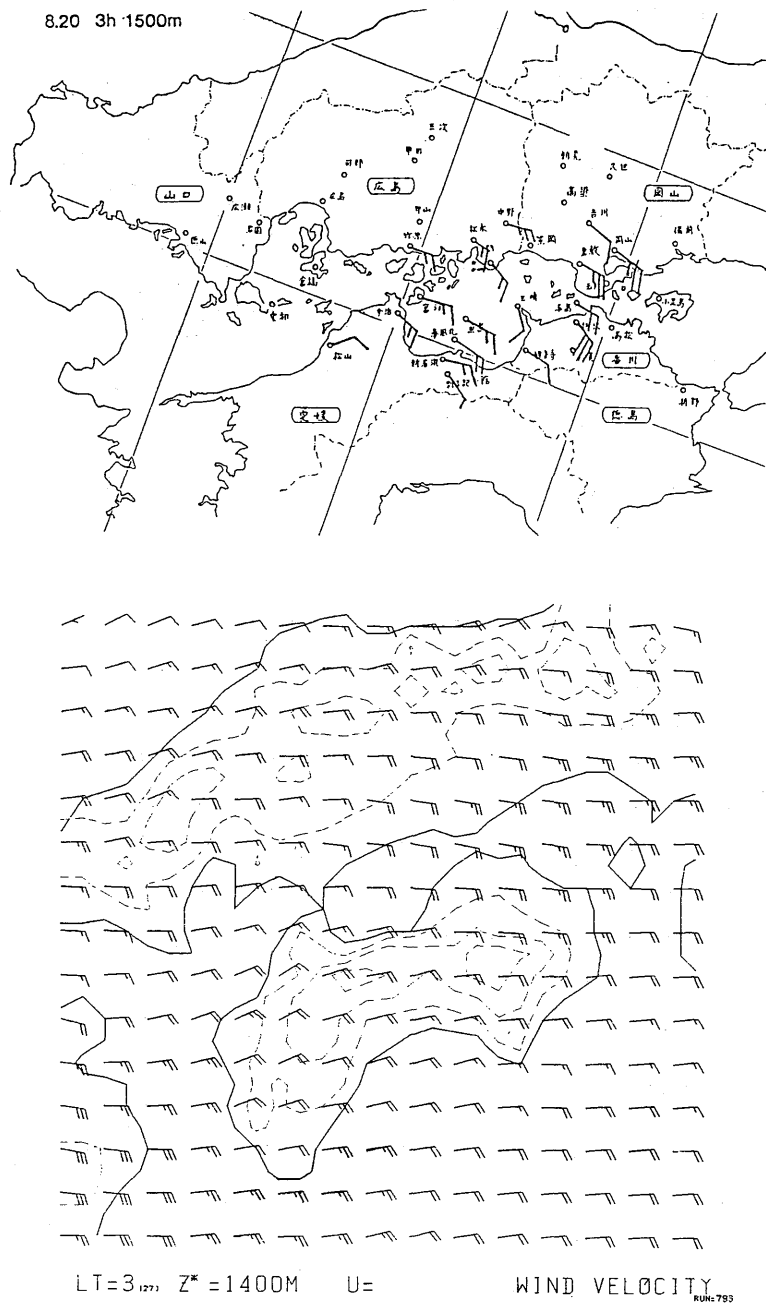


Fig. 7.23(B)

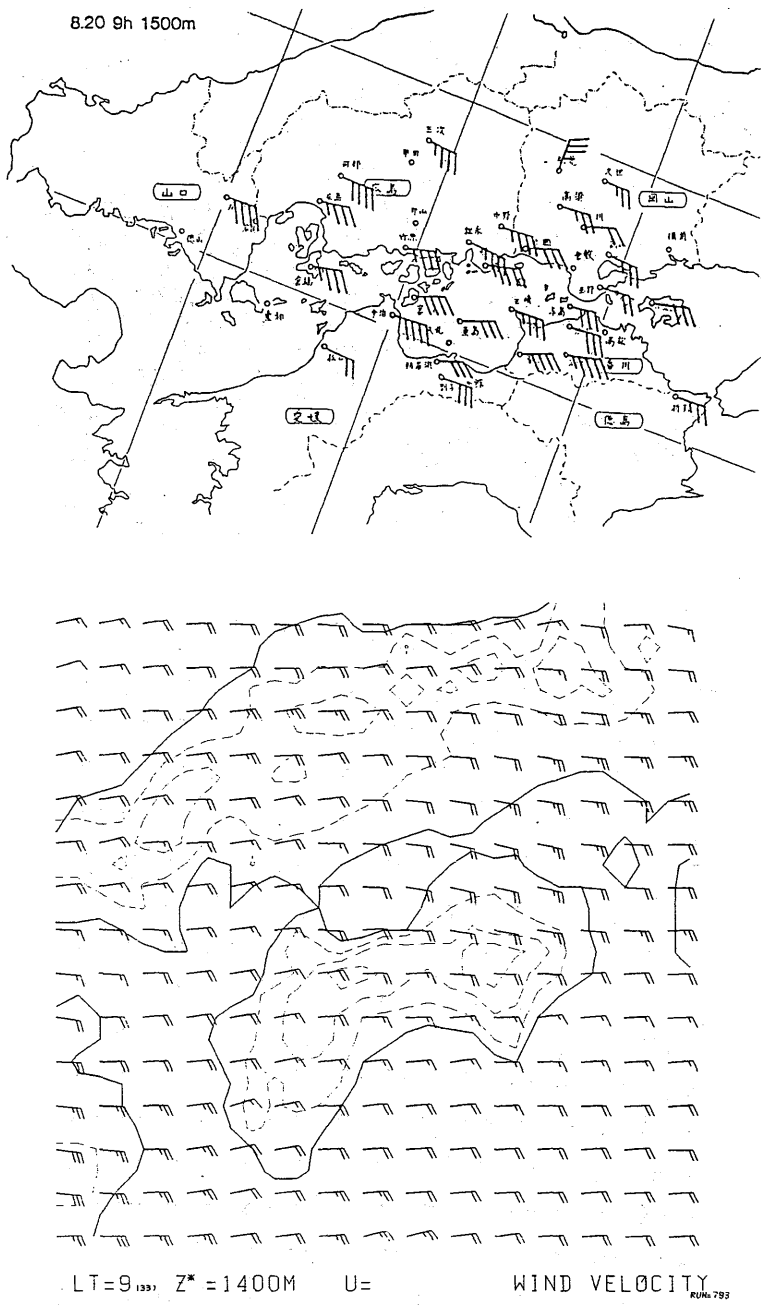


Fig. 7.23(C)

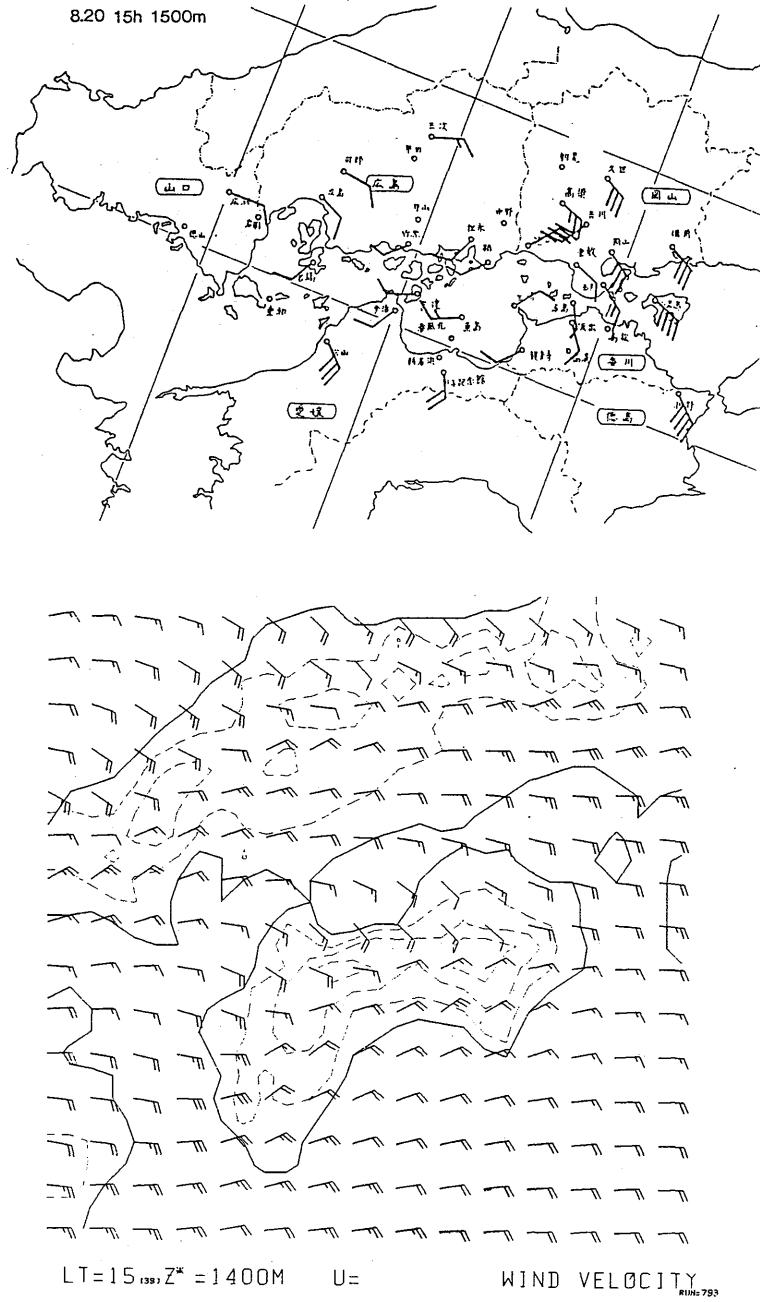


Fig. 7.23(D)

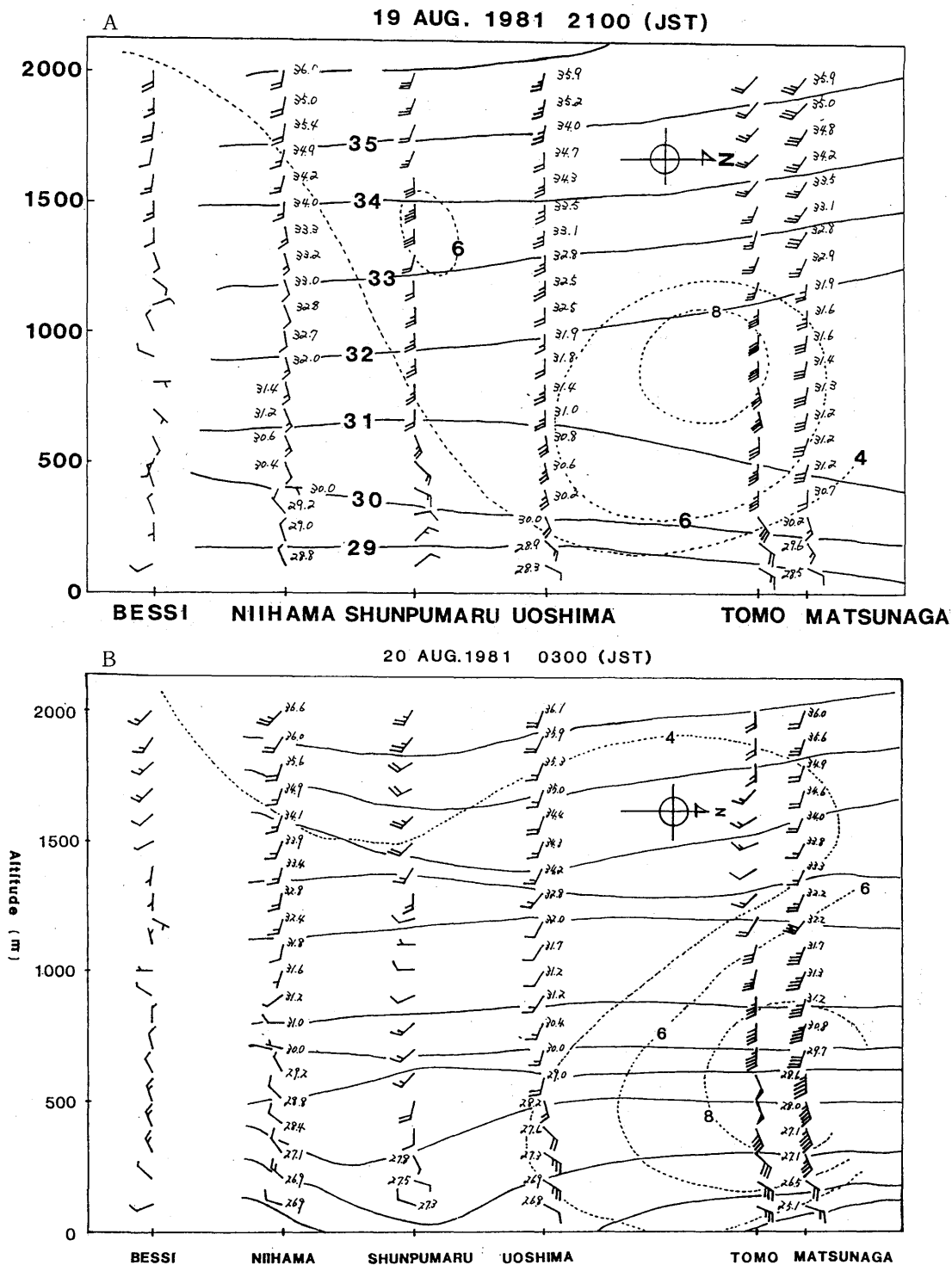
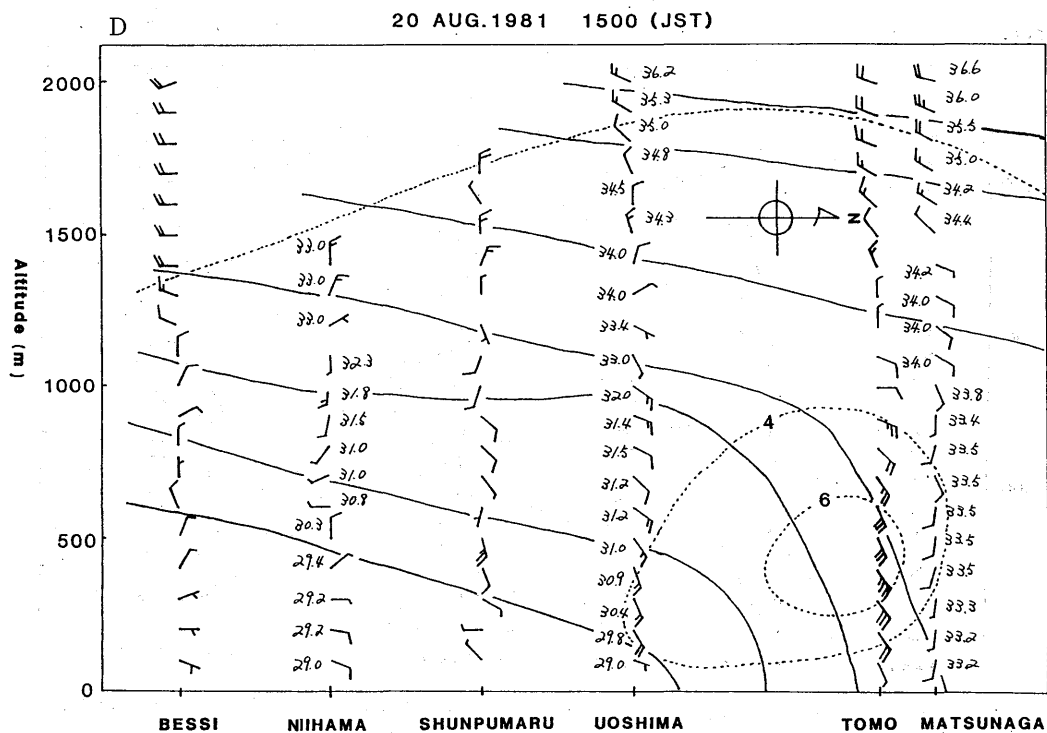
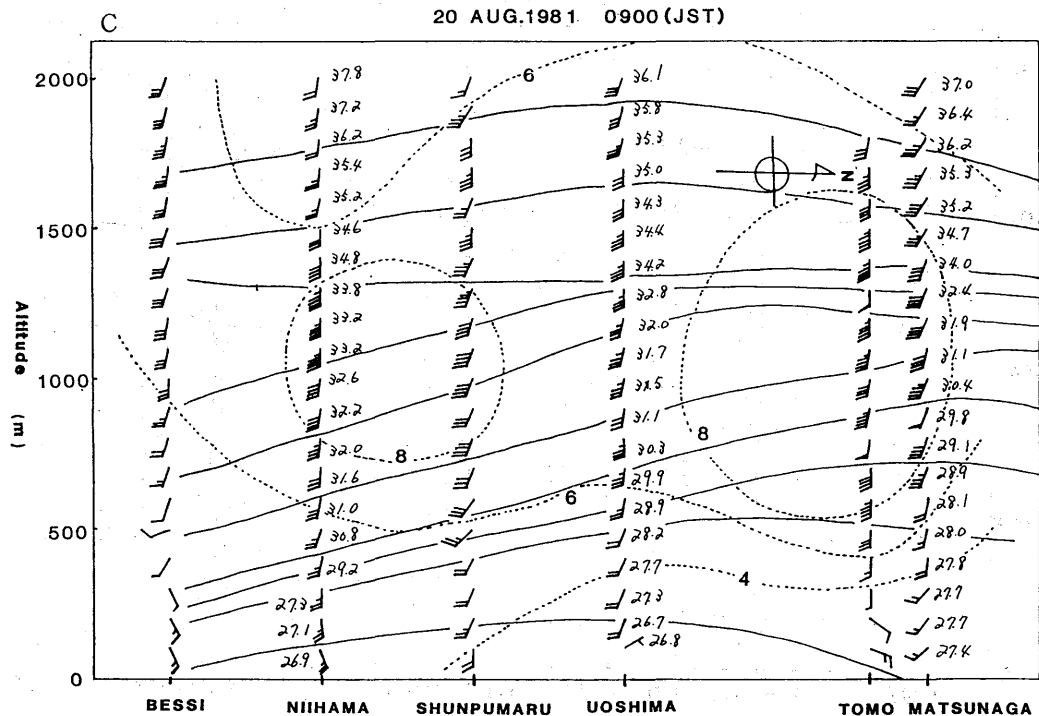


Fig. 7.24 Vertical cross-section of observed wind velocity and potential temperature on the north-south line crossing Niihama. A:2100 JST, 19, Aug, 1981, B:0300 JST, 20, C:0900 JST, D:1500 JST.



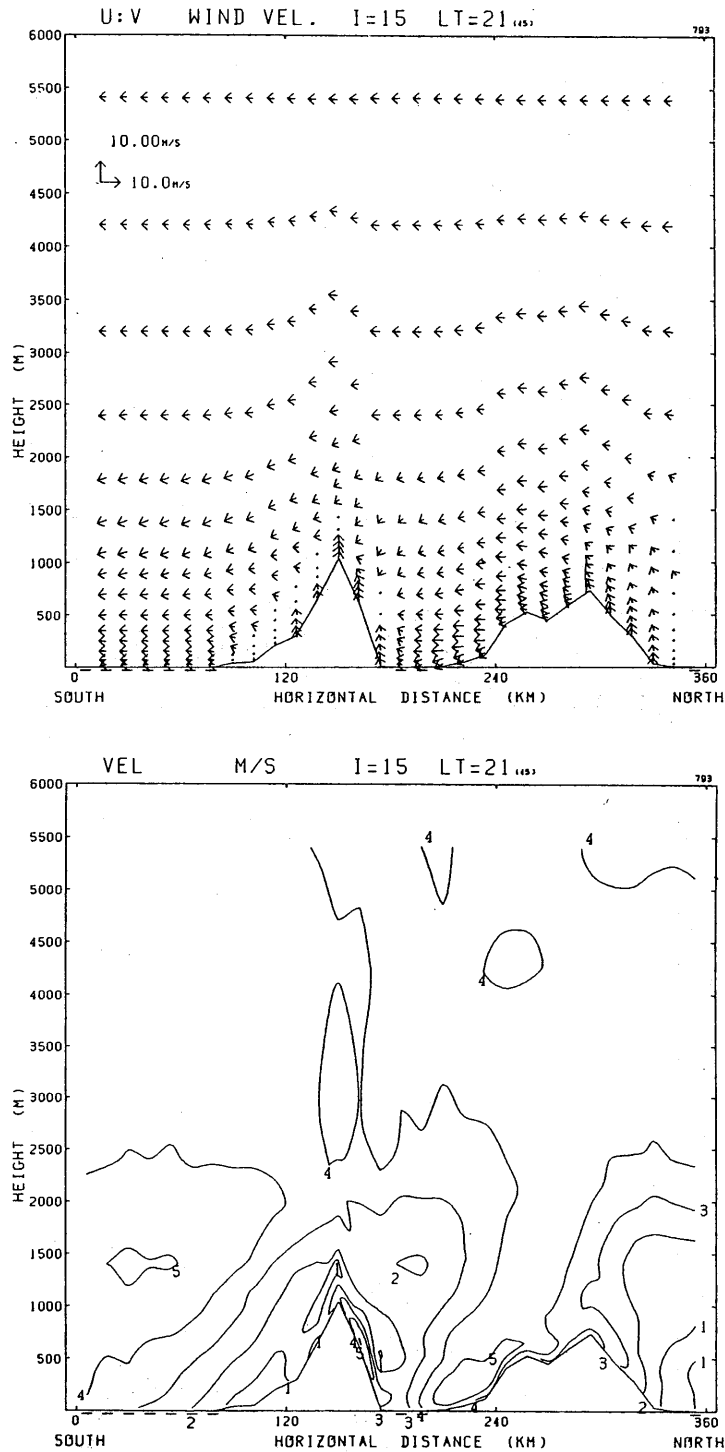


Fig. 7.25 (A)

Fig. 7.25 Same as in Fig.24., but by the simulation.

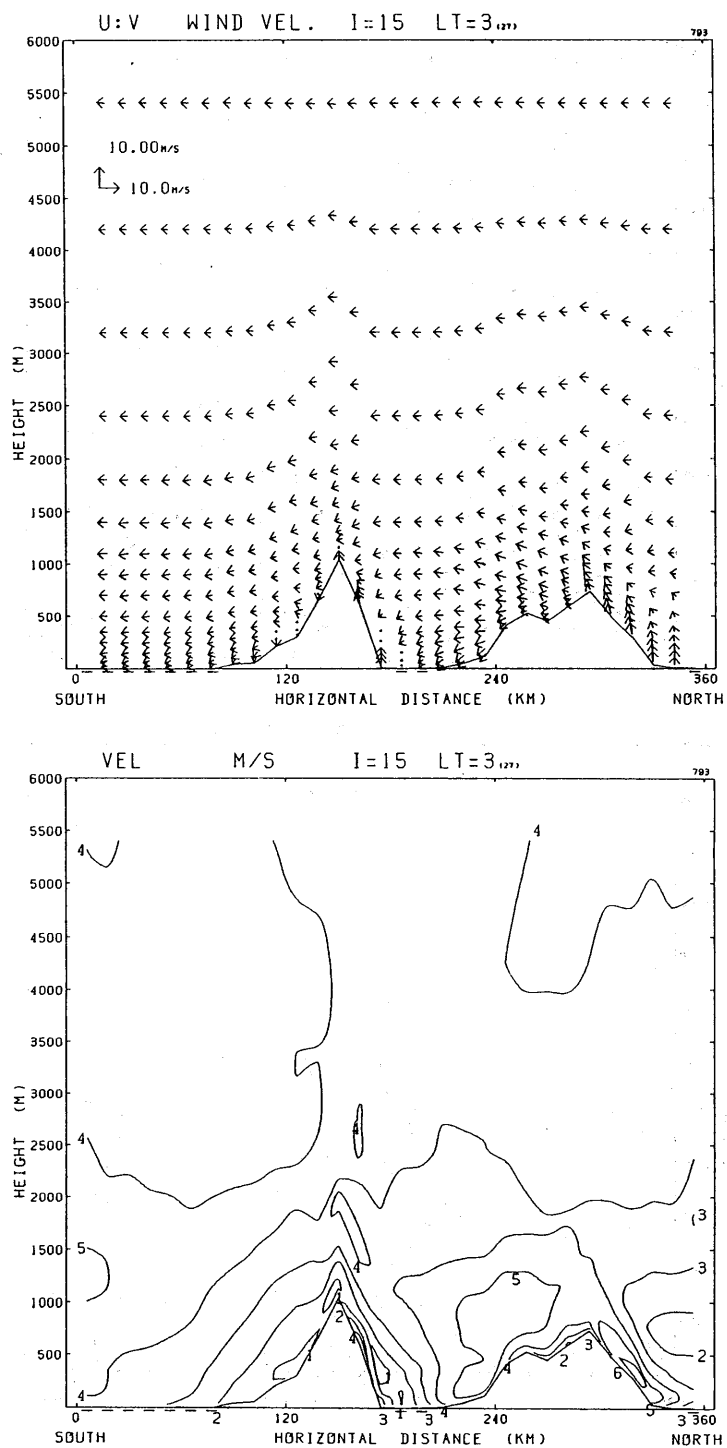


Fig. 7.25 (B)

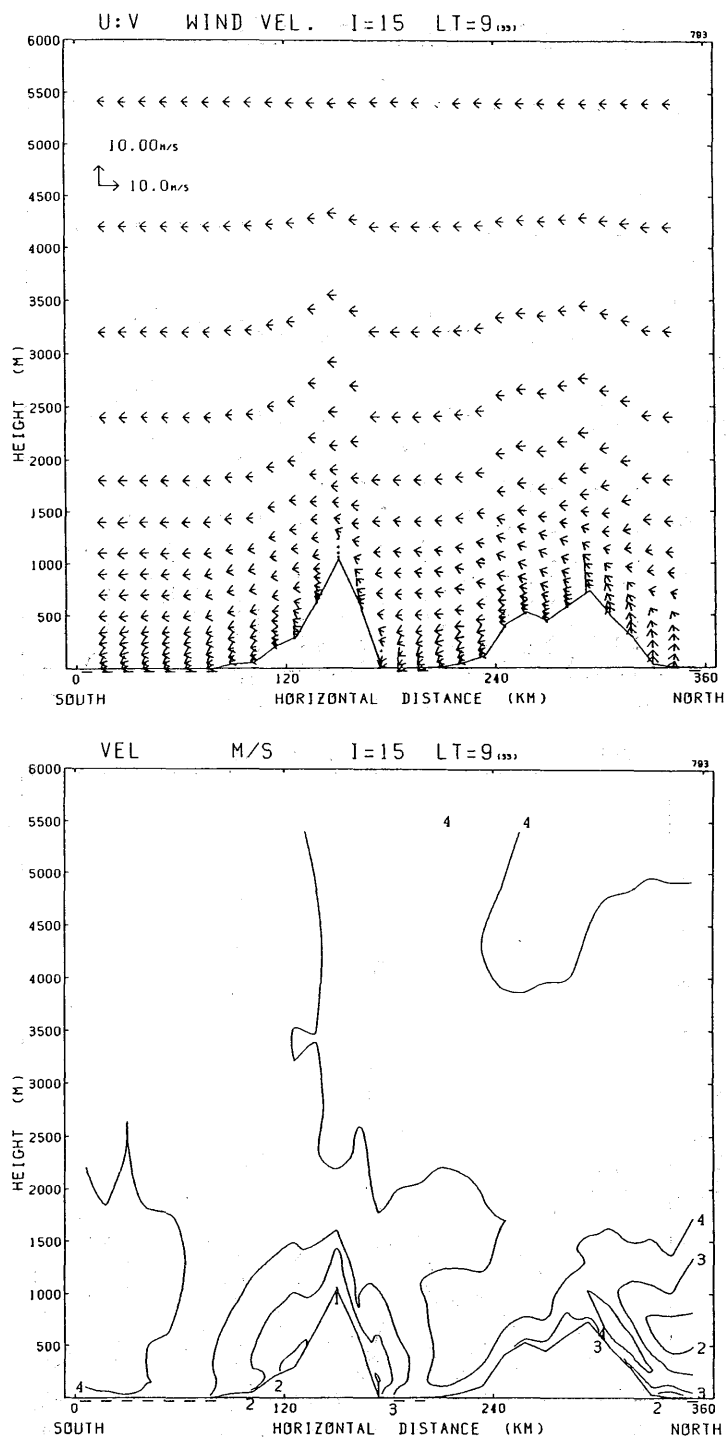


Fig. 7.25 (C)

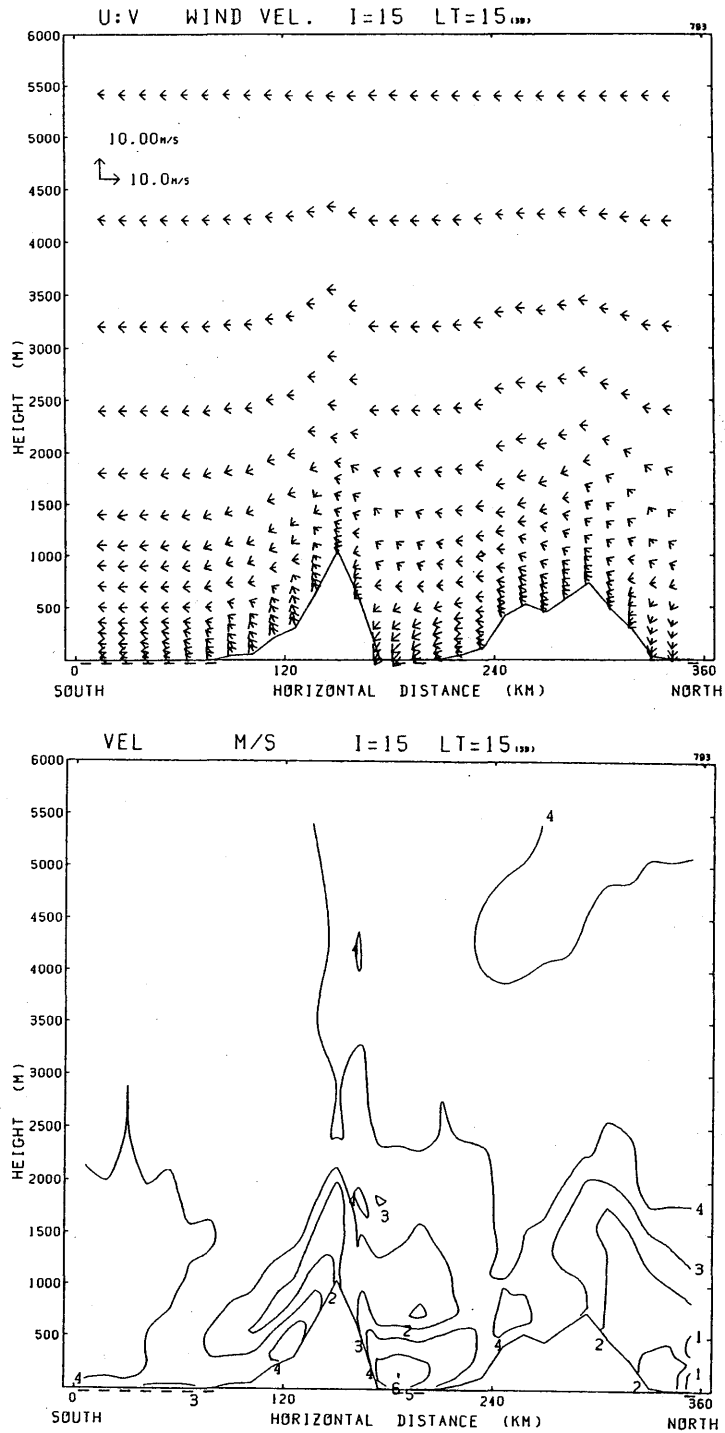


Fig. 7.25 (D)

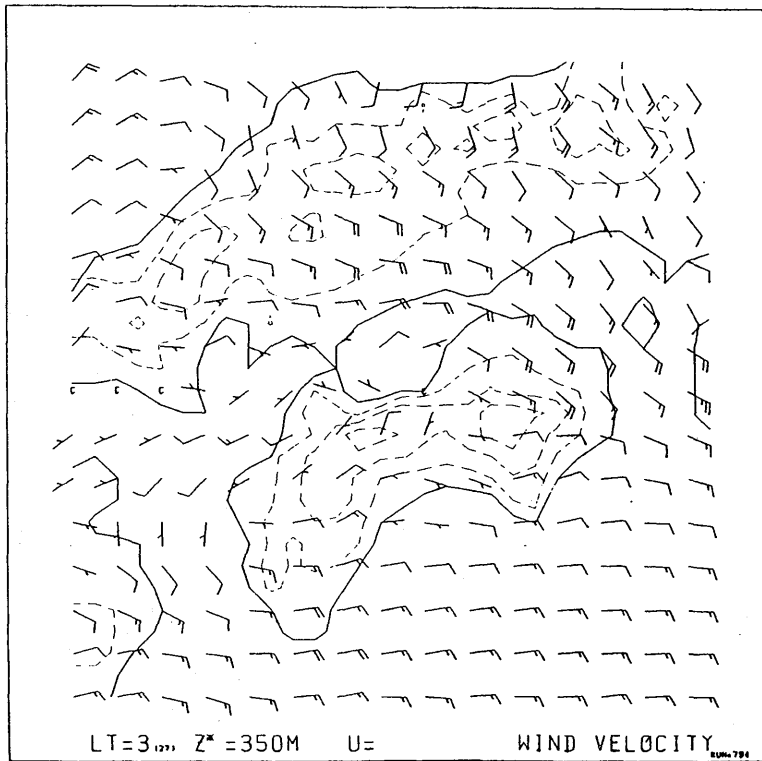


Fig. 7.26 Simulated wind velocity at the level of 350 m at 0300 LST, large scale wind velocity is assumed to be E 3m/sec.

ンで発達した西風成分を持った大きな風系とよく似ている。一般風が東風のため、播磨灘に発達する東よりの成分を持つもうひとつの風系が広く瀬戸内地方を覆っていて、伊予灘からの風系は発達がおさえられている。瀬戸内海ではこの2つのスケールの大きな東西風が一般場の状態により勢力範囲を変えているとも解釈することができる。

燧灘を中心とした下層大気風の観測から得られた一つの特徴は瀬戸内海北部の下層で、どちらかというと夜間、主風向の方向の風が強まることである。1980年7月は高さ800～1500mで西寄り12m/s以上の風、1981年8月は高さ300～1000mで東寄り8m/s以上の風が吹いていた。東よりの強風帯は瀬戸内海北部にあって東西に延び、高松一宇野間で特に強い。昼も夜にも現われるが、夜の方が強く、低層に現われる傾向が分かる。この現象は瀬戸内地区の局地循環の特徴として多くの研究者(富田1974、中島1981など)によって指摘されている。風速はやや弱くなるものの図7.25(B)を見ると岡山側の1500m以下の層に5m/sec以上の東風が現われている。

図7.27は燧灘の北岸、松永で測定された温位の鉛直分布の日変化である。19日の夕方17時ごろから下層に安定層が形成され成長していく様子がよくわかる。午前6時には安定層の厚さは1kmく

Table 7.1 Comparison between simulation and observation (1981).

	観測	計算
高さ100mの風 (図 7.21 A~D)	高松・岡山の海峡(備讃瀬戸)で東風が強い。3時には岡山側、15時には香川側が強い傾向がある。燧灘の海陸風の交代は四国側の方が顕著である。	備讃瀬戸より下流、すなわち備後灘(燧灘北部)燧灘地区で東風が強い。前者は3時に強く、後者は15時に強い点は実測と同じ。これは東の一般風と海陸風の相互干渉の結果と思われる。東風が剣山を迂回しているのがよくわかる。
高さ400mの風 (図 7.22 A~D)	東の強風域は備讃瀬戸から山陽道に沿って広島県まで及ぶ。21時と3時に広がり強さとも顕著である。最大風速12m/s。3時には松山、新居浜、別子に西風がはいる、燧灘南部に左廻りのうずができてるように見える。	実測と同じ傾向が21時と3時にみられる。一方、15時に東の強風は備讃瀬戸から燧灘を通して東予地区にのびる。剣山の迂回効果は21時と3時の方が顕著だ。今治付近に低気圧性の渦がある。これらの特徴は高さ25mのものと同じだが高さ350mの方が顕著である。
高さ1500mの風 (図 7.23 A~D)	東風は9時に最も卓越、最大風速8m/s、領域が広い。15時には東風が最も弱い。また別子には海風の反流が見える。	対象地区(海峡、備讃灘、燧灘)の東風は3時と9時に最も強く、15時に最も弱い。15時には別子付近の海風の反流が明らかである。
新居浜を通る 南北断面図 (図 7.24 A~D, 図 7.25 A~D)	東風の強風軸はほとんど常時軸の上空にあり、夜間ほど低く(3時に500m)強い。日中は高く、15時には全体に弱い。新居浜では9時を除いて東風が達せず、風が弱く、海陸風が卓越する。別子の陸風と海風は高く1000mに及ぶ。(山風と谷風)	瀬戸内海と山陽側の低層(地上~1500m)では東風が卓越している。21時と3時には、備後灘、山陽側の下層(地上~500m)で東風が強い。(5、6m/s以上)。燧灘、四国側では海陸風、山谷風の成分(南)が強い。15時と21時には燧灘上空500m~1500mで風が弱い。大勢において観測と一致している。

らいになり、日中からあった上層の安定層と一体になる。しかし7時くらいになると日射により下層から暖められて混合層(図に破線で示す)が成長する。混合層の高さは9時には、速くも1000mに達し、昼すぎには1400mくらいになる。夕方になると混合層は再び安定層に変わるが、このときは前日と異なり下層から上層まではほぼ同時に変化し、地面から放射冷却で安定層が作られるといった通常の境界層モデルでは説明できない。図7.28には、これに相当する計算結果を示す。図には平均温位 θ ($= 35.5^{\circ}\text{C}$) との差が示されている。また破線で混合層の高さ (K_h が $1\text{m}^2/\text{sec}$ 以上の領域) を示す。朝、実測と同じように混合層が成長していくが、成長速度は実測よりやや遅く、また最大高度も1000mに満たず、やや低い。18時をすぎると下層から安定層が成長し、混合層は消滅するが、実測に比べると安定度はやや弱い。全体的に見て、安定度の日変化がやや弱い、変化パターンは実測とよく似ている。

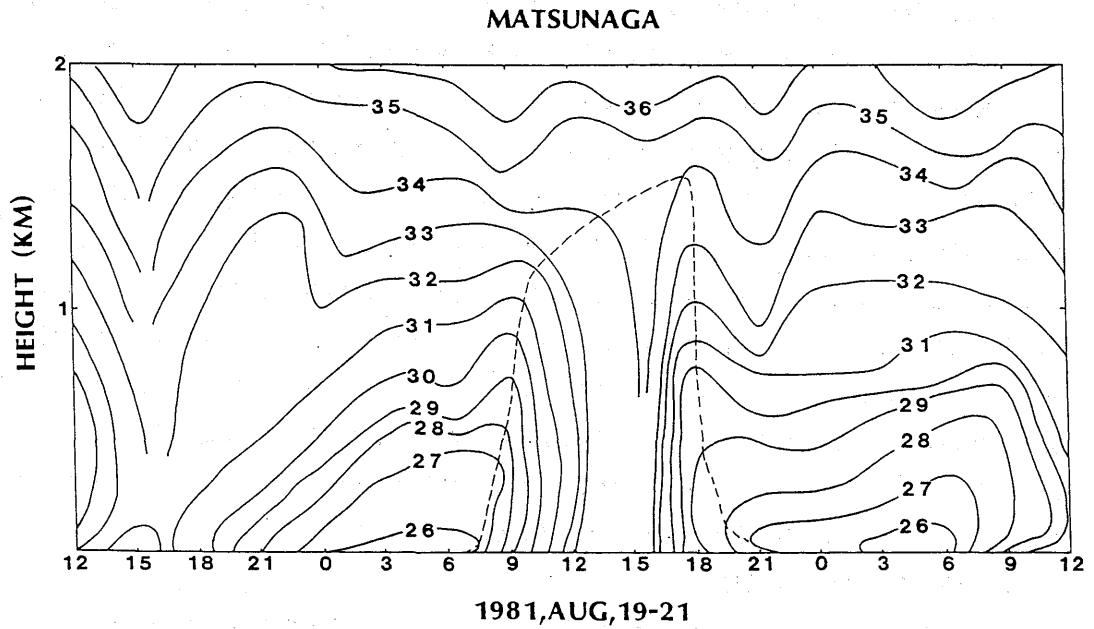


Fig. 7.27 Diurnal variation of the observed vertical profile of potential temperature at Matsunaga, 19-20, Aug., 1981. Broken line shows the top of the mixing layer.

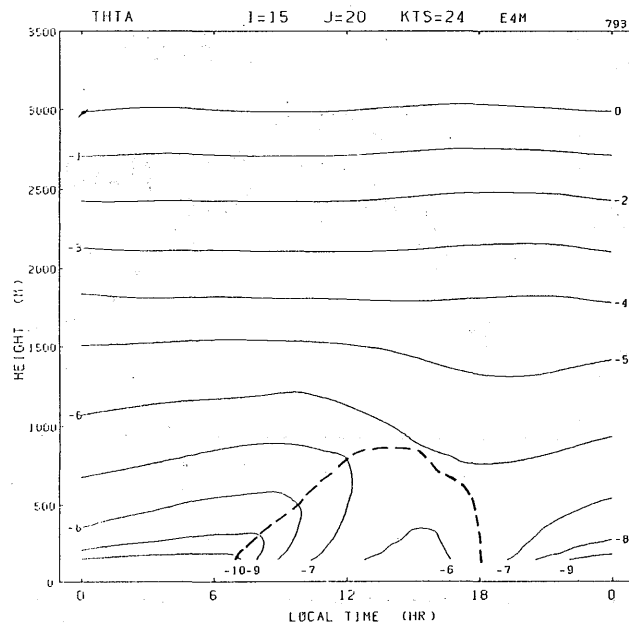


Fig. 7.28 Same as in Fig.7.27, but simulated one.

次に航空機観測で得られた地面温度と、シミュレーションで計算された地表面温度の比較結果について述べる。地表面温度は局地風のエネルギー源である顕熱フラックスを決める重要な量である。また地面温度は場所による変化が大きいため、シミュレーションと比較するためには航空機観測のように、ある範囲の平均の測定値が必要である。この意味で航空機による地面温度の日変化のデータは貴重なものであると言える。図 7.29 に黒丸で示すのは 8 月 19 日と 20 日に測定された讃岐平野東部における地面温度である。2 本の実線は地面の蒸発効率 β を 0.2 と 0.5 に仮定したときの数値シミュレーションによる同じ場所の地面温度である。 $\beta = 0.5$ は今まで述べてきたシミュレーションで設定されていた値である。実測データのばらつきは大きいけれども、だいたいこの 2 本の実線の間におさまっている。また、よく比較すると午前中はシミュレーションより実測の方が低めに、午後は高めになっているのが分かる。これは午前は蒸発効率が高く（すなわち、地面が湿っている）、午後は低くなっている（乾燥している）ことを意味する。 β を一定とせずに地中の水分量の予報を行うと、シミュレーションによる地面温度の変化が改善される可能性がある。

7.6.2 1982 年度観測との比較

1982 年度の観測では汚染濃度の鉛直断面が得られているので、汚染質の鉛直輸送に焦点をしばってシミュレーションとの比較・検討を行なう。汚染質の鉛直断面濃度の測定例は少なく、わが国では関東平野で何例か行なわれている程度である。特に今回の観測のように、急峻な山岳を背後にも

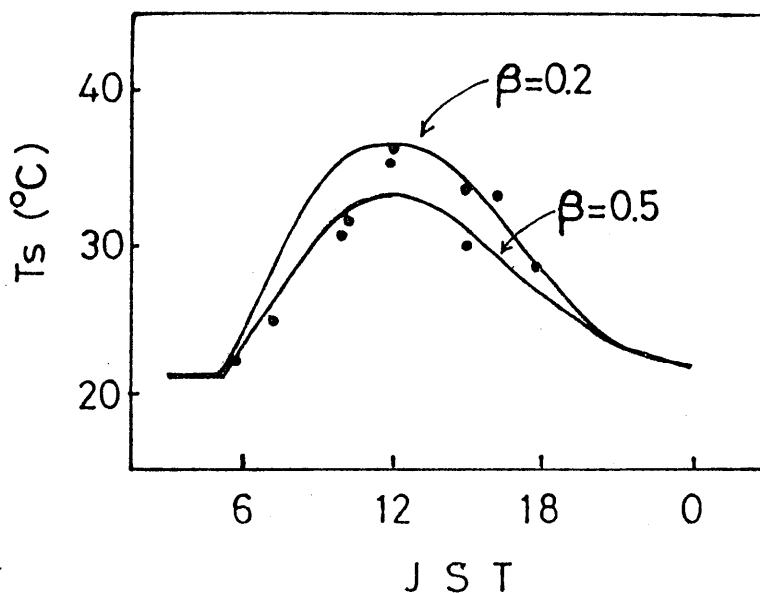


Fig. 7.29 Comparison of surface temperature between observation (black circles) and simulation (solid lines). Surface temperature is measured by an aircraft in the eastern part of Sanuki Plain on 19 and 20, Aug., 1981. β is evaporation efficiency which is assumed in the numerical model.

つ内海での観測はいままでほとんど例がなく、山岳による汚染質の鉛直輸送、ひいては局地風の鉛直構造を解明する上で、非常に貴重なデータである。

図 7.30は観測を行なったコースを示しているが、汚染濃度のシミュレーションも、この図に示されている程度の範囲(5 km 格子)で行なう。しかし、前にも述べたように、瀬戸内海を支配している風系には海岸にはほぼ直角に吹く海陸風だけでなく、四国を西や東から廻り込むように吹くスケールの大きな風系もある。これらを再現するには、この領域では狭すぎるので、まず前節のシミュレーションと同じ領域(12 km 格子)で計算を行ない、次にワンウェイ・ネスティングの手法を用いて、5 km 格子の領域(図 7.31のわくの中)で行なう。

計算条件は観測期間中に合わせるため、一般場に傾圧大気を考え、高さ 6000 m では西12m/sec、海面高度では東 1m/sec とし、その間を直線補間する。このときの温度場(初期値)は次の式により定まる。

$$\frac{\partial \theta'}{\partial y} = -\frac{z_T}{h} \frac{f\theta}{g} \frac{\partial u_g}{\partial z^*}$$

シミュレーションのその他の条件は前節と同じにとる。

図 7.31は粗い格子の局地風モデルによる計算結果(2日目の15時の最下層の風)を示す。また図 7.32には比較対象として7月29日15時のアメダスによる地上風を示す。海岸沿いの風向風速など、両者の一致はかなりよいと言える。

図 7.33(A)、(B)は計算領域内の NO_x の発生源分布を示す。(A)は自動車および低煙源(煙突の

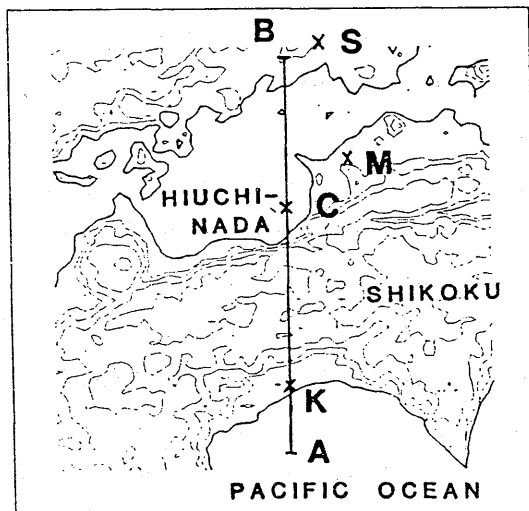


Fig. 7.30 Flight course of the aircraft observation (line AB). Points K, M and S indicate Kohchi, Manno and Sohja, respectively.

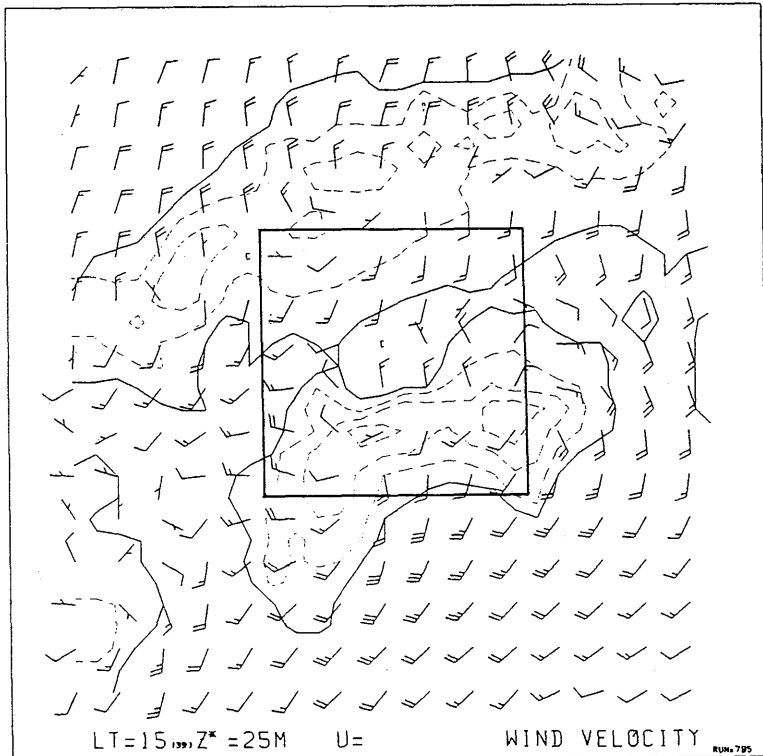


Fig. 7.31 Wind velocity at the level of 25 m at 1500 LST calculated by the coarse grid model (grid interval: 12 km). An enclosed area shows the region of fine grid model.

実体高 100 m 以下)からの排出量で、総量は日平均で約 $3900 \text{ m}^3/\text{h}$ である。

(B)は高煙源(実体高が 100 m 以上)のもので、総量は $3600 \text{ m}^3/\text{h}$ である。これらの合計は首都圏の発生量の $1/2 \sim 1/3$ くらいである。シミュレーションでは低煙源は最下層(25 m)に与え、高煙源は煙の持つ熱による上昇分、つまり有効煙突高を考慮して 350 m の高さに与えた。移流・拡散の効果だけを見るため、光化学大気汚染と平行して非反応性物質 NR(トレーサー)のシミュレーションも行なうが NR の発生量は NO_x の 5 倍を仮定した。

図 7.34 にシミュレーションの結果を示す。図の上から、2 日目の 6 時の風(南北・鉛直ベクトル) NR 濃度、オゾン濃度の鉛直断面分布を示す。鉛直断面は航空機観測を実施した線上にとった。夜間から早朝にかけては山風や陸風が発達するが比較的弱く、鉛直流速も小さい。図には四国北岸付近に上昇流が残っているが、これは一般場と地形の影響によるものである。また 2 km 以上の高度では風が弱いように見えるが、実は紙面に直角成分(西風)が吹いている。NR は大気が安定であるため大部分は地上から 500 ~ 1000 m くらいまでの層にたまる。特に燧灘の中国側では高濃度となっている。一部は先に述べた上昇流により、四国の北岸付近の上層にも分布している。図には示され

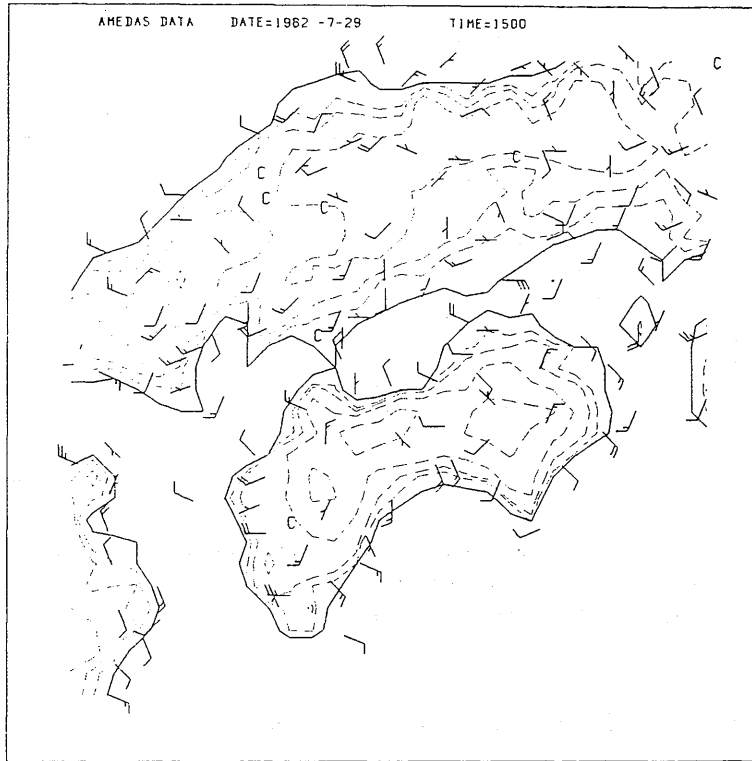


Fig. 7.32 Observed wind velocity at 1500 JST 29, July, 1982.

ていないが、この時点では NO_x の分布は NR とよく似ている。 O_3 は NO により破壊されるため下層で低く、ちょうど NR と逆の分布をしている。

図 7.35 は 15 時の分布である。谷風／海風がよく発達し、その層も厚く、風速も強いので NR はさかんに上空へ輸送される。また O_3 は反応により多量に生成され高濃度となり、分布も NR とよく似ている。これに対して、図には示されていないが NO_x 濃度は反応により消費されるため低下する。汚染質の分布の高さは 2 km に達している。またこのあと夕方には 3 km くらいまで達する。

図 7.36 に 1983 年 7 月 29 日に行なわれた航空機観測の結果をここでもう一度示す。早朝には山風／陸風が吹き、燧灘では NO_x 、 O_3 、エアロゾル濃度とも 1000 m 以下の層に分布している。午後になると谷風／海風が発達する。 NO_x 濃度は反応により低下、 O_3 、エアロゾル濃度は山の斜面で厚く分布し、2000 m くらいの高さに達する。燧灘の海上では濃度は低い。シミュレーションと航空機観測の結果はよく一致していると言ってよい。また両者の結果から、瀬戸内地方の汚染質の挙動には山岳、とくに四国山地により引き起こされる局地風による鉛直輸送が重要であることが示唆される。鉛直風を直接測定するよい手段がないことから、汚染濃度の鉛直断面を測定することは、

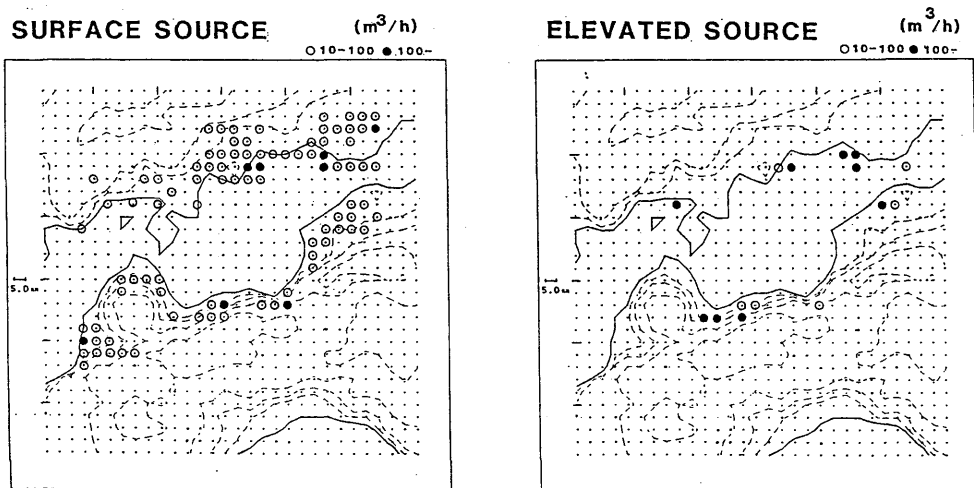


Fig. 7.33 Distribution of NO_x source, a: area source (automobile and stationary source whose stack height is less than 100 m). b: elevated source. Open circles: 10-100 m^3/h , closed circles: 100 m^3/h .

局地風による鉛直輸送を解明する上で大変重要なことである。

鉛直輸送に関する有効な情報は汚染濃度ばかりでなく、水蒸気量分布を測っても得られることがある。図 7.37 は図 7.36 (B) と同時に測定された相対湿度の分布である。燧灘は比較的乾燥していて、陸上とくに山岳地帯で湿度が高い。汚染濃度との類似性はかなり高い。これは一般に上昇流の強い所が相対湿度が高くなるからである。なお、四国山脈の上空には、この時間には積雲が存在していた。航空機はこの積雲の上を越えて四国山脈を横切っているので、この積雲の雲頂高度は、3 km に満たない。しかし、このあと積雲は急速に成長した(航空機観測の章を参照)。

図 7.38 はシミュレーションによる15時の相対湿度を示す。燧灘では比較的乾燥していて、陸上、山岳部で高湿度となっているのは観測とよく一致している。しかし四国の太平洋側では海上で実測では高湿度となっているのに、シミュレーションでは低湿度となっている。このくいちがいは四国沖の海面温度が実際にはかなり高温であった(シミュレーションでは海面温度は場所によらず一定)ためと思われる。図38で四国山脈の上空と北側境界付近の点々をつけた領域は過飽和、つまり相対湿度が100%を超えている領域を示す。これらは本来は雲となるべき領域であるが、現在の局地風モデルには凝結過程が組み入れられていないので過飽和のまま計算が行なわれている。過飽和水蒸気を凝結させると、潜熱の解放が行なわれ上昇流が増強されて、局地風系が多少変型されると予想される。

図 7.38 と図 7.35 を比べると、過飽和領域に汚染質の一部がとり込まれているのがわかる。とり込まれる汚染質の量は夕方にはもっと多くなる。また実際に凝結過程を導入すると先に述べたように、

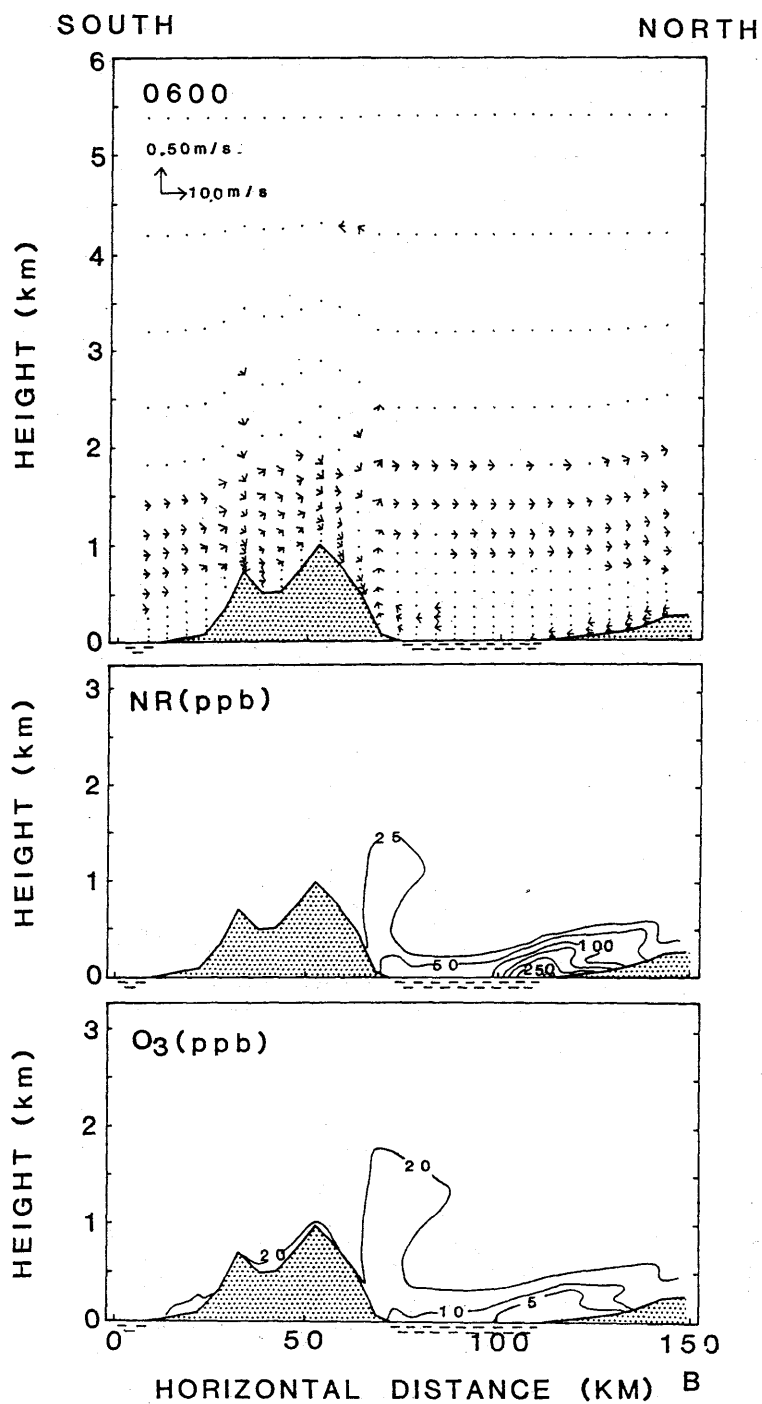


Fig. 7.34 Vertical cross-section calculated by the numerical model on the line AB in Fig. 7.30, at 0300 LST. Top: wind velocity, middle: NR (non-reactive pollutant concentration), bottom: ozone concentration.

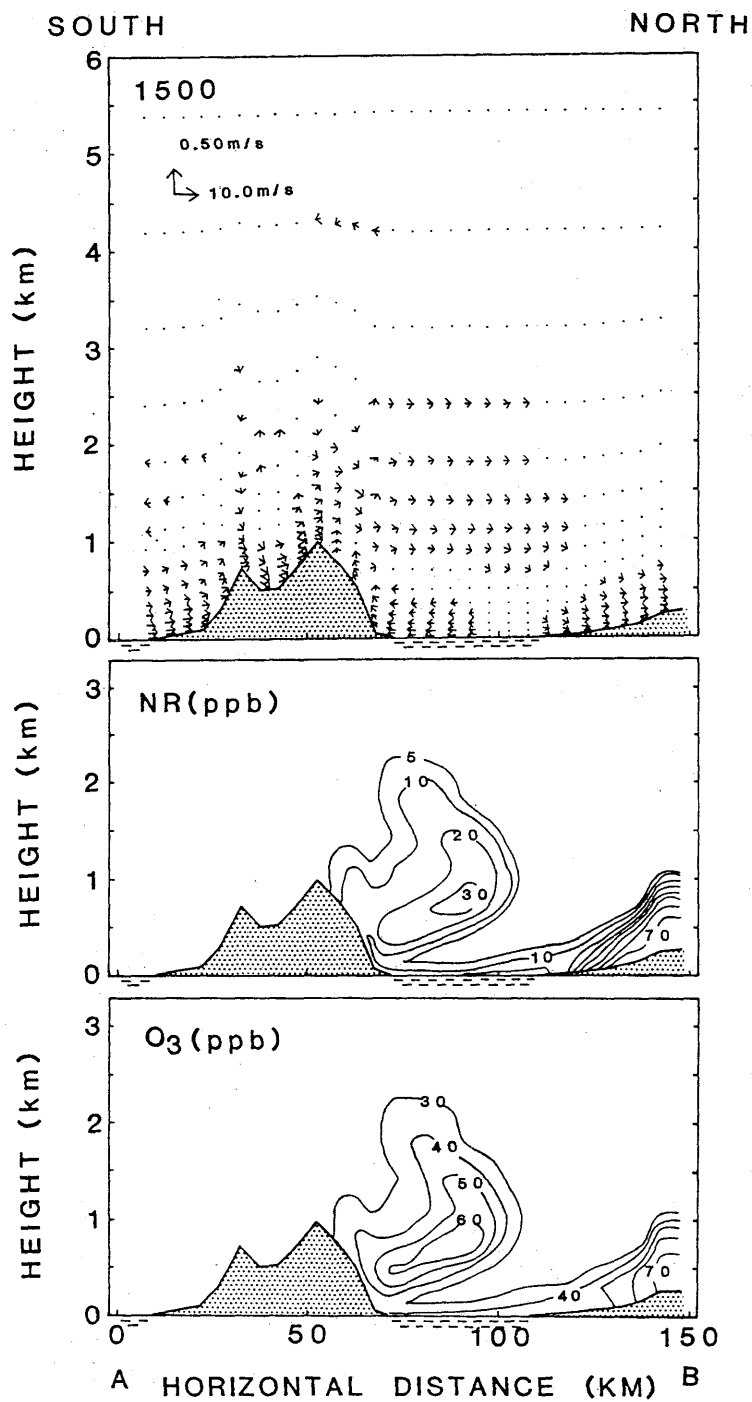


Fig. 7.35 Same as in Fig.7.34, but at 1500 LST.

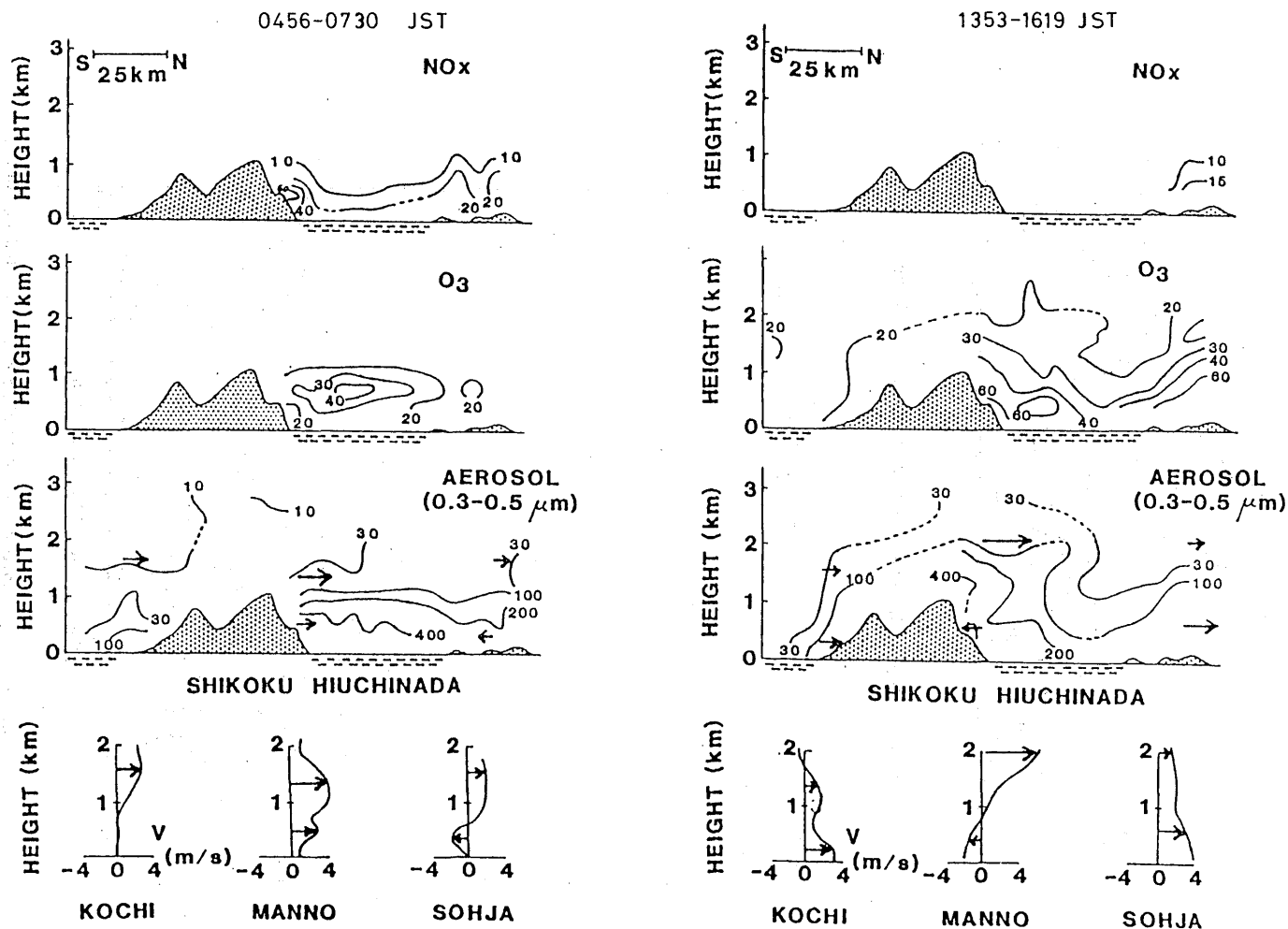


Fig. 7.36 Vertical cross-sections of concentrations observed by aircraft on 29 July, 1982. Left: in the early morning, right: in the afternoon. Top: concentration of NO_x (ppb), the second: O₃ (ppb), the third: particle (relative value), bottom: Vertical profile of north-south component of wind velocity at Kochi, Manno and Sohja.

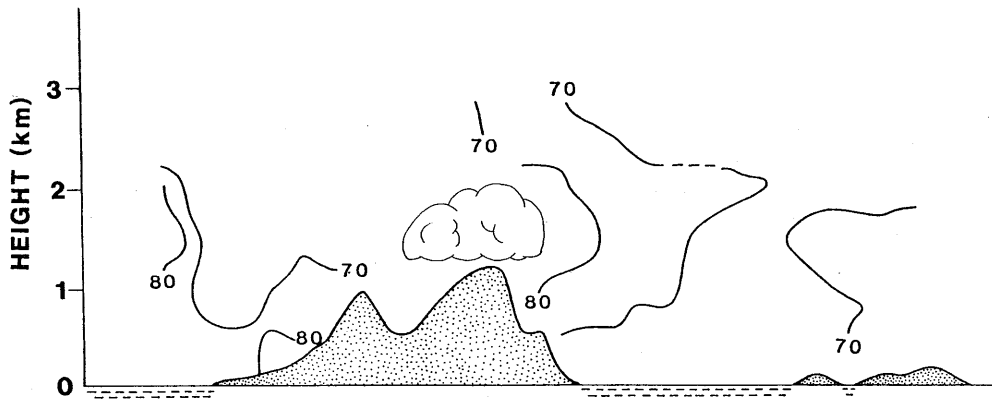


Fig. 7.37 Relative humidity (%) observed in the afternoon, on 29 July, 1982.

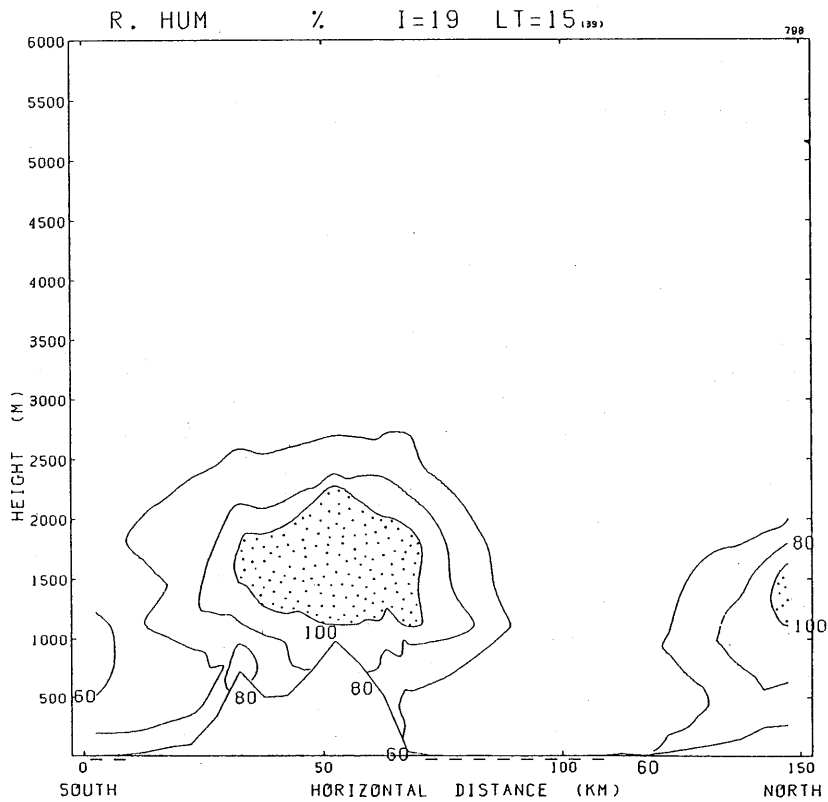


Fig. 7.38 Relative humidity given by numerical simulation at 1500 LST. Dotted area shows over saturated area.

上昇流が増強され、さらに多くの汚染質が雲に取り込まれると考えられる。局地風によりできる雲には汚染質が取り込まれ易いと考えられる。雲は汚染質の鉛直輸送や除去過程を考える上で、重要と思われるだけでなく、両者の関係については酸性雨を解明する上でも今後の研究が望まれる。

7.7 関東地方への応用

7.7.1 関東地方の光化学大気汚染の特徴

シミュレーションモデルを関東地方へ適用する。初めに関東地方に発生する光化学大気汚染の特徴を述べる。

図 7.39は富士通 FIP (1982)によりまとめられた 1978 年、'79年の各 6～8 月におけるランク別オキシダント日最高濃度の出現回数をグラフにしたものである。主要な NO_x の発生源は B_1 にある。発生源の少ない A_1 , A_2 , A_3 ブロックのうちでは A_3 が特別に出現日数が多く、 A_1 は著しく低い。つまり汚染質は北西へは多く運ばれるが、北東へはあまり輸送されないことを意味している。

図 7.40は鶴田 1983、が示した O_x の高濃度気塊の主な輸送経路である。北へ輸送される A コース、北西へ輸送される B コース、それに西へ向かう C コースが示されている。

図 7.41は A コースにある各測定点での O_x 濃度の時刻変化である。東京湾から測って、荒川は約 10 km、春日部、宇都宮、黒磯はそれぞれ 40 km、100 km、140 km くらいである。 O_x 濃度のピークは荒川、草加では昼ごろであるが内陸に行くにしたがって遅くなっているのが分かる。7.4 章で述べた 2 次元モデルによる数値実験の結果(図 7.13)とよく似ているのが分かる。図 7.40に戻る

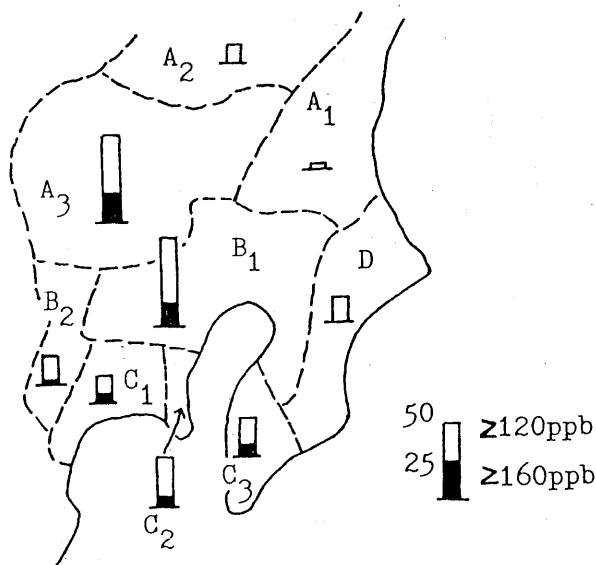


Fig. 7.39 Number of days of high ozone concentration in the areas indicated, in 1978 and 1979. (after Fujitsu F. I. P., 1982).

と、図 7.40 には東へ向かうコースは示されていない。つまり図 7.39 でも示されたように汚染質は西へは輸送されるが東へはあまり輸送されないことを意味している。しかし関東には決して西よりの風が吹かないということではない。むしろ 1500 m ぐらいの上層では西よりの風の頻度が高い。これは、光化学スモッグが発生するような気象条件、つまり日射が強く、風があまり強くないとの条件のときに限り下層では、西よりの風が吹きにくいために起る現象である。そのような条件の時には局地風が発達し、その局地風の性質により東へは輸送されにくくなるのであらうと思われる。

7.7.2 計算の条件

関東地方の局地風系は、中部山岳地帯の影響を強く受けているので、計算領域はこれを含むように十分広くとる(図 7.42)。格子点間隔は 15 km で 30×30 の格子点で全領域をおおう。領域内の NO_x の発生量は公開されている文献(数理計画、1979.)を参考にしうえ、大幅に簡略・モデル化して与えた。自動車を主とする地上発生源と、工場の煙突などの高煙源の 2 つに分けて考え、移動発生源は図の砂目をつけた領域に一樣に、また高煙源は東京湾の兩岸の各 1 つずつの格子点(図の黒

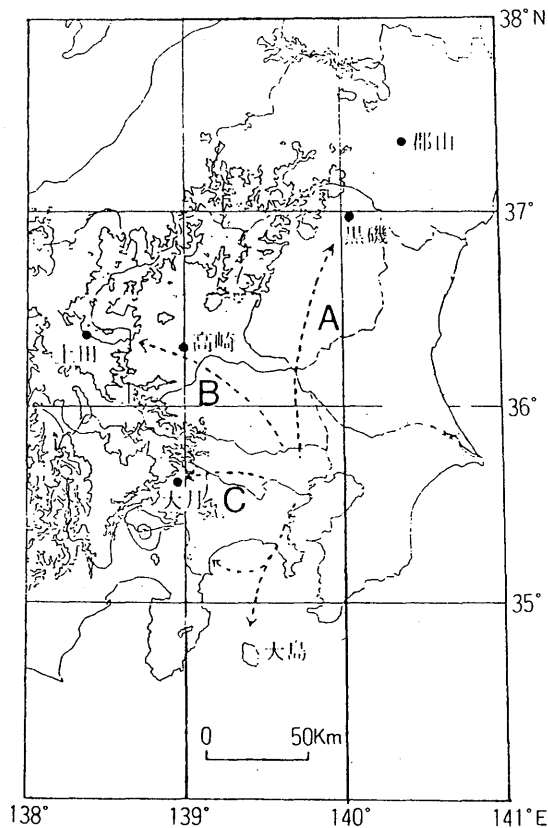


Fig. 7.40 Typical transport routes of air parcel include much ozone which is formed in the Tokyo bay area. (Tsuruta, 1983).

丸)に高さ 500 m に分け与えた。これらは京浜・京葉工業地帯に対応するものである。

図 7.43 は移動発生源と高煙源の1時間当りの総排出量の日変化を示す。移動発生源は明確な日変化を持っているので、図に示すように深夜・早朝は日中の 1/5 の発生量まで減らした。高煙源についても発電所などでは排出量の日変化が大きい、高煙源全体としての日変化はないものと仮定

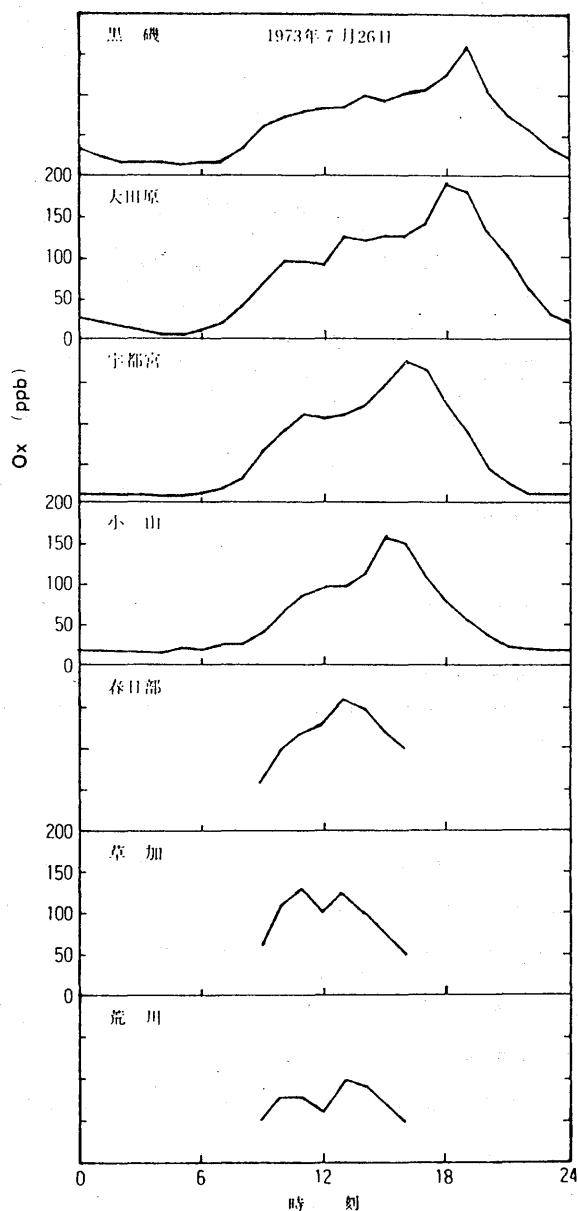


Fig. 7.41 Variations with time of O_x concentration in the stations on the course A in Fig. 7.40.

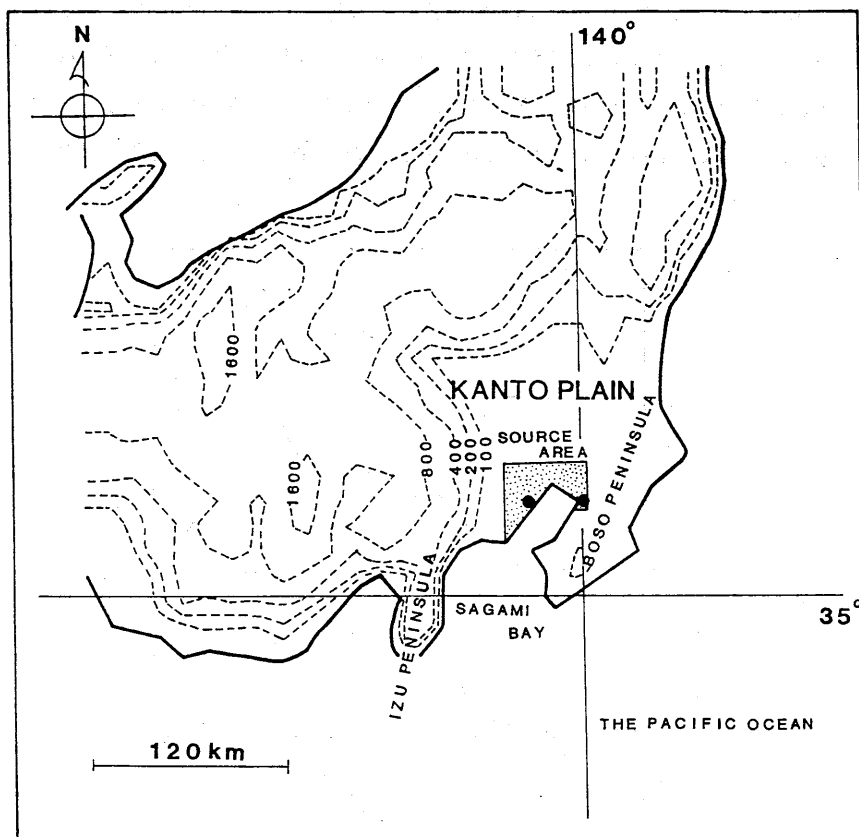


Fig. 7.42 An area in which the numerical simulation is carried out, and distribution of pollutant source. Dotted area shows area source and closed circles shows elevated sources.

した。シミュレーションは一般風のない場合 (Case C)、東風 3 m/sec の場合 (Case E)、南風 3 m/sec の場合 (Case S)、西風 3 m/sec の場合 (Case W) および北風 3 m/sec の場合 (Case N) の 5 Case について、それぞれ夏の晴れた日の日射量を仮定して行った。計算はそれぞれ 48 時間分を行い、初期値の影響を考慮して 2 日目の 24 時間の結果を検討の対象とする。

7.7.3 シミュレーションの結果

図 7.44 に E、S、W、N の 4 Case における 6 時と 12 時の地上風 (地上 25m) の分布を示す。図には関東地方の部分だけを取り出して示してある。

まず Case E および S については山沿いの地域を除くと、一般風によって強く支配されていて、それぞれ東風・南風が広く関東平野を覆っている。これに対して、Case W および N では一般風よりも局地風の影響が強く現われ、とくに 12 時にはどちらの Case でも北関東では南東、南関東で

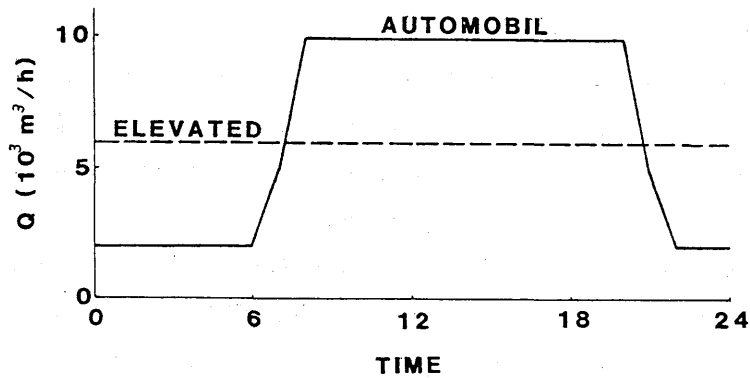


Fig. 7.43 Diurnal variations of hourly total emission rates of area source and elevated source.

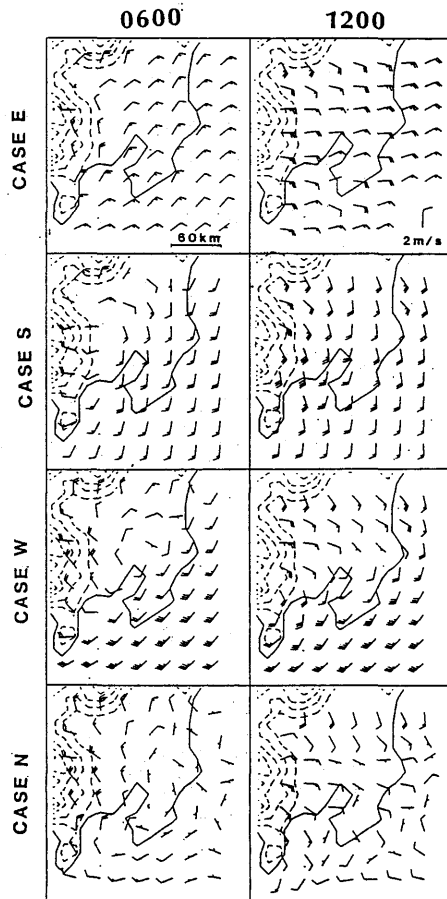


Fig. 7.44 Wind velocity in the Kanto Plain at the level of 25 m calculated by the numerical model. The large scale wind is assumed to be E (top), S, W and N (bottom) 3m/sec. At 0600 LST (left) and 1200 LST (right).

も南よりの風が発達し、むしろ一般風に逆らう風向となっている。この原因の一つには Case E、S では一般風の風向と海風の風向が一致しているのに対し、Case W、N では逆になっていることもあるが、それより関東の西部・北部の山岳の影響によるところが大きいと思われる。つまり、一般風が北や西風の場合には関東平野は山岳地帯の風下になる。山岳地帯に向かう風は、山を大きく迂回する性質があるため、関東平野では一般風が変型されたり、弱められたりする。これに熱的な原因による局地風の効果が加わり、上記のような風系となる。とくに中部地方の山岳の影響は、後に述べるように関東の光化学スモッグの輸送過程に重大な影響を及ぼしている。

図 7.45 は各 Case の地上 25 m での O_3 濃度の 80 ppb 等値線を 3 時間ごとに書いたものである。また図 7.46 はそのときの最高濃度の日変化を示す。

Case C では、朝 9 時に東京の都市部で 80 ppb に達し、そのあと、12 時には半径 40 km くらいに拡大する。この領域は 15 時にはやや北々東に移動し、その後ややスピードを速めて、18 時には関東平野の北西部に達し、やがて消滅する。

Case E では 9 時に相模湾上で 80 ppb を超える領域が現われる。これは早朝の北東風によって一次汚染質の NO_x が流されていたためである。12 時になると東京湾の西部より伊豆半島の根元を通り、静岡周辺に至る東西に長い帯状の高濃度帯が現われる。高濃度帯はゆっくり北上し、18 時には甲府盆地から東京都西部にかけての領域に分布する。さらに 21 時になっても秩父山地の一部に高濃度域が残る。この Case では関東平野では神奈川県と東京都の一部だけが高濃度となるのが大きな特徴である。

Case W では 9 時に東京湾の北端から濃度が上昇し初め、12 時には Case C と似た分布をするが、Case C の場合よりやや東西にのびた領域に広がる。このとき最高濃度は Case C のときよりも高い。高濃度域はゆっくり北北西または北へ移動し、18 時には関東平野北部に達する。関東平野の広い範囲が高い濃度にさらされるもっとも危険な Case である。

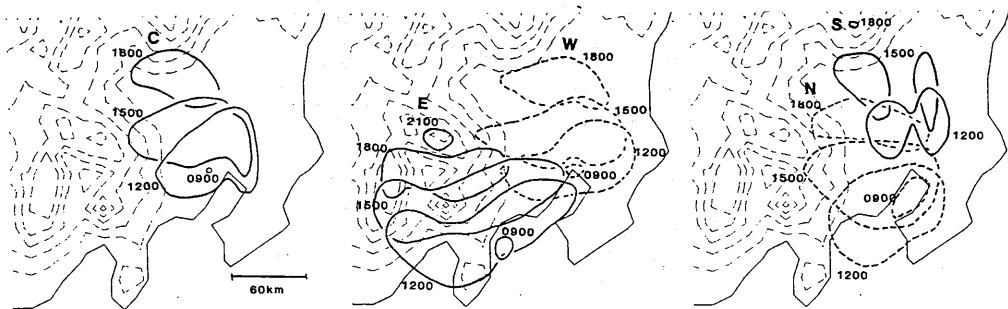


Fig. 7.45 Contour of 80 ppb of O_3 concentration at interval of three hours. Letters C, E, S, W and N show case of no large scale wind and cases in which the large scale wind is E, S, W and N 3 m/sec, respectively.

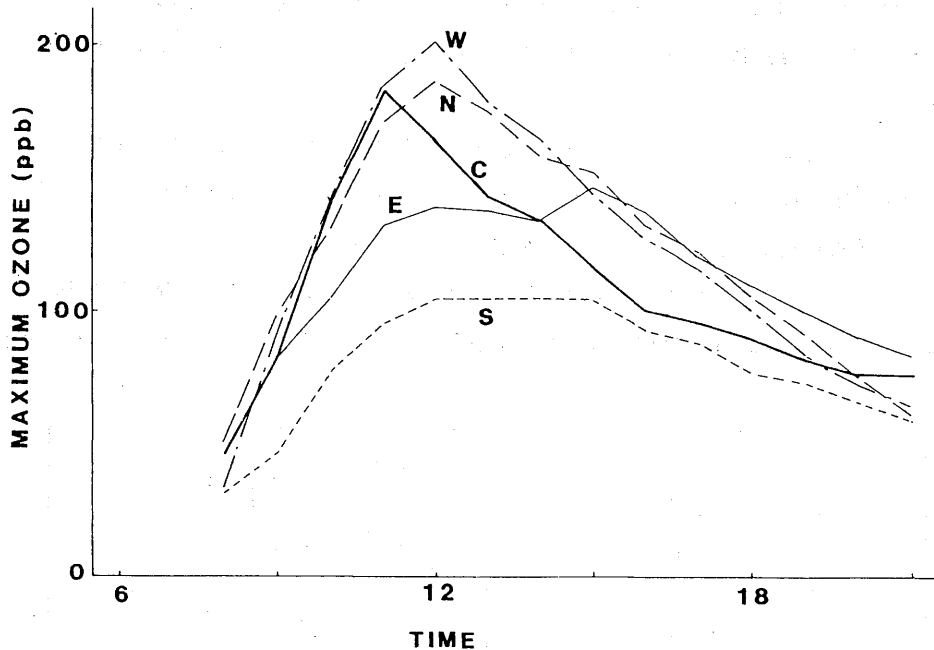


Fig. 7.46 Diurnal variations of the maximum ozone concentration in each case.

Case Sでは、9時に80 ppbを超える場所はない。12時には煙源地帯の北側で、ほぼ東西2つの領域に分かれて高い濃度が現われる。15時になると完全に分離し、また北へ流されて一部は早くも北部の山岳に達する。18時には高濃度域は小さくなり、ほとんど消滅寸前にある。

Case Sでは、関東平野の南部の O_3 濃度は1日を通して上がらず、また中部・北部の O_3 濃度もそれほど高くはないのが特徴である。

Case Nでは、9時に東京湾上で高濃度となり、12時には周囲に広がって関東平野の南部、相模湾を覆う。15時にはやや北に移り、神奈川・東京を広く覆い、18時には関東平野中部まで移動し、その後消滅する。このCaseでは一部相模湾上に出た汚染気塊が、逆戻りして再上陸する現象がもっともはっきり見られる。

以上の結果と図7.40を比較すると、Case SとWは図のAコースに、Case CとNはBコースに、Case EはCコースにはほぼ対応する。結局、数値シミュレーションによっても汚染気塊が東の方向へはあまり輸送されないことが示されている。

7.7.4 結果の検討

シミュレーションによれば、汚染質が東へ輸送されにくい原因は、一般場が東風のとき東風が広く関東平野をおおい、汚染質は西へ流されるのに対して、西風のときは局地風の影響が大きく、南関東で南西風、北関東では南東風になるためである。

図 7.47、図 7.48は関東地方の一般場がそれぞれ弱い東よりの風、西よりの風のときの、アメダスによる6時と12時の地上風、天気図およびブロック別日最高オキシダントレベルを示したものである。

東風のときは12時になるとシミュレーションと同じように関東平野全体は東風に覆われている。オキシダント濃度も神奈川でのみ高くなる。シミュレーションでは汚染気塊はさらに西へ延び、静岡・山梨の一部にも及ぶが、ここではデータがないので分からない。

これに対して西よりの一般風の場合には12時の風系をみると、南関東では房総半島を中心に、南西風となっているが、北関東では風向は場所により多少ばらついているものの東よりの成分を持つ

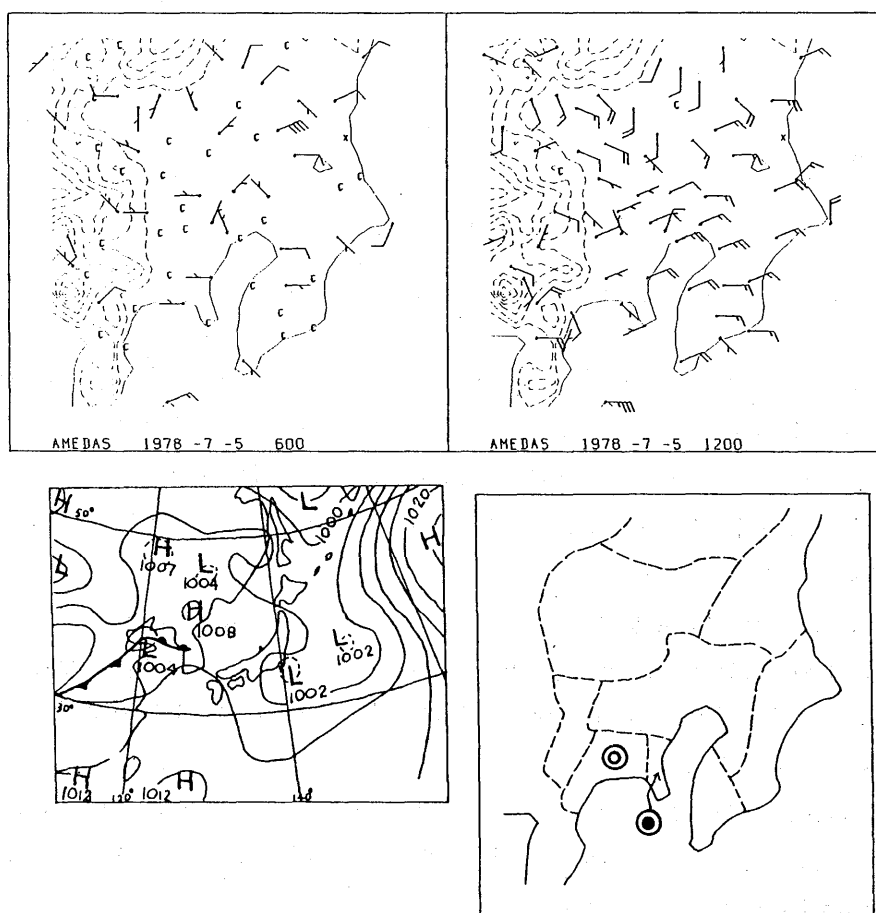


Fig. 7.47 Observed wind velocity at 0600 JST and 1200 JST (top two boxes), surface pressure (bottom left) and the maximum ozone concentration in the indicated area (bottom right) in a day in which the large scale wind is mild easterly. Circle shows that the maximum ozone concentration is larger than 120 ppb, and double circle shows it is larger than 160 ppb.

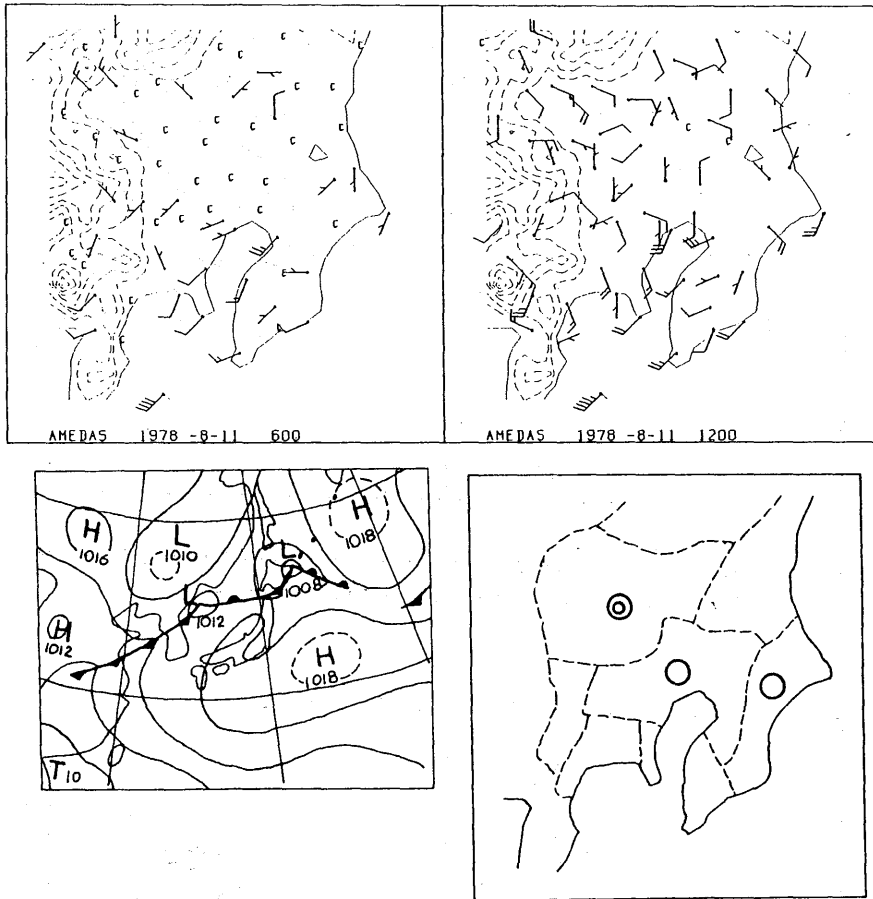


Fig. 7.48 Same as in Fig.7.47, but the large scale wind is mild westerly.

ところが多い。オキシダント濃度を見ても千葉県の一部で少し高くなっているほか、埼玉・群馬方向で高濃度が出現している。これらの特徴はシミュレーションの結果とよく一致している。

関東地方の局地風は中部山地の影響を強く受けていると考えられる。これを数値シミュレーションにより確かめるため、山を取り除いた計算を行なった。図7.49、図7.50はそれぞれCase C(無風)とCase W(W 3 m/sec)の場合である。どちらの場合も汚染質は東へ流されている。つまり山がなくなると汚染質は東へも流されるようになる。山岳地帯の存在は関東平野の光化学オキシダントのふるまいに大きな影響を与えていることが分かる。

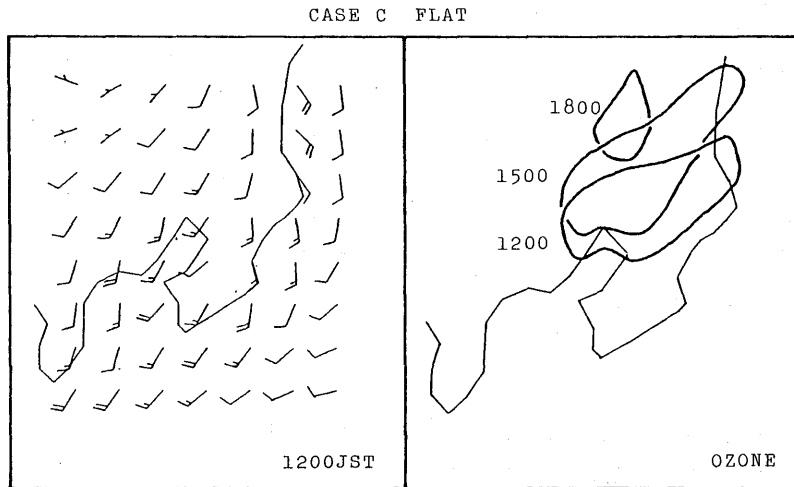


Fig. 7.49 Wind velocity at 1200 and contour of 80 ppb of ozone concentration at interval of three hours in the case of mountain-free and no large scale wind.

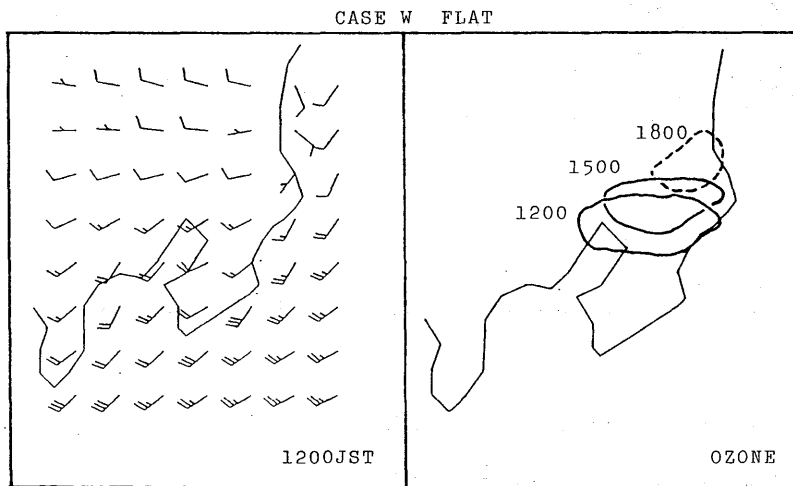


Fig. 7.50 Same as in Fig.7.49, but the large scale wind is W 3 m/sec. Broken line at 1800 LST indicates contour of 60 ppb.

7.8 まとめ

局地風モデルを含んだ光化学大気汚染の数値モデルを開発した。初めに2次元の海陸風の中での光化学大気汚染の挙動を再現し、海岸部や内陸部の地上濃度のおおまかな日変化の特徴がほぼ説明できた。またこれらの特徴には海風の発達と夜間の安定層の形成が大きな役割を果たしていることが明らかになった。瀬戸内海の数値シミュレーションと航空機観測の結果はよく一致したと言って

よい。またこの地方の汚染質の挙動には山岳、特に四国山地により引き起こされる局地風による鉛直輸送が重要であることが示唆された。さらに凝結過程と汚染質の鉛直輸送との関係解明が、将来の課題として提起された。関東地方への適用結果についても、風系、 O_3 濃度の挙動とも基本的特徴がよく一致した。首都圏を発生源とする光化学オキシダントは、北や西には輸送され易いが、東へはあまり輸送されない。これは関東地方の局地風系の働きによるものであるが、特に中部山岳の影響が大きいことが示された。

従来の光化学大気汚染の数値モデルでは、測定に多くの費用のかかる上層風を含めて大量の気象データを入力データとして必要とした。しかし、局地風モデルを含んだ光化学大気汚染の数値モデルは、気象データの不足をかなりカバーできそうである。さらに、局地風と大気汚染の関係を従来のモデルよりも、より明確にできる。しかし、本報告の数値モデルでは発生源情報や反応過程のモデル化が粗く、排出規制のためのシミュレーションなどには精度が不十分である。

参 考 文 献

- Bhumralker, C. M. 1975. Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model. J. A. M. 14, 1246-1258
- Dearodoff, J. W. 1978: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. J. G. R. 83, 1889-1903.
- Galbally, I. E. 1971: Ozone profiles and ozone fluxes in the atmospheric surface layer. Quart. J. R. Met. Soc. 97, 18-29
- Garland, J. A. and R. G. Derwent 1979: Destruction at the ground and the diurnal cycle of ozone and other gases Quart. J. R. Met. Soc. 105, 169-183.
- Ikeda, Y., M. Hiraoka and T. Kawamoto 1977: Modeling of reaction mechanism of photochemical smog. 'Taikiosen Kenkyu' 6, 463-484. (in Japanese with English abstract).
- Kikuchi, Y. and S. Arakawa, F. Kimura, K. Shirasaki and Y. Nagano 1981: Numerical study on the effects of mountains on the land and sea breeze circulation in the Kanto district. J. Meteor. Soc. Japan 59, 723-737.
- Kimura, F. and S. Arakawa 1983: A numerical experiment of the nocturnal low level jet over the Kanto Plain. J. Meteor. Soc. Japan 61, 248-261.
- Kimura, F. 1983: A numerical simulation of local winds and photochemical air pollution (I): Tow-dimensional land and sea breeze. J. Meteor. Soc. Japan 61, 262-278.
- Mellor, G. L. and T. Yamada 1974: A hierarchy of turbulence closure model for planetary boundary layers. J. A. S. 31, 1791-1805.
- Sakamaki, F., H. Akimoto and M. Okuda, 1981: Photochemical reactivity and ozone formation in 1-olefine-nitrogen oxide air system. Environ. Sci. Tech. 15, 665-671.
- Seigneur, C. S., T. W. Tesxhe, P. M. Roth and L. E. Reid 1981: Sensitivity of a complex urban air quality model to input data. J. A. M. 20., 1020-1040.
- Seinfeld, J. H. 1975: "Air Pollution, Physical and Chemical Fundamentals" McGraw-Hill, Inc.
- 秋元肇 1979: 「大気の光化学」鈴木伸編
- 数理計画 1979: 昭和53年度環境庁委託調査、光化学大気汚染予測システム設定調査報告書

鶴田治雄 1982：相模湾域における海陸風と汚染物質の分布、日本気象学会 1982 年秋季大会講演予稿集

原田朗 1979：「都市の大気環境」河村武編

富士通 F I P 1982：昭和56年環境庁委託業務結果報告書、光化学大気汚染に係る統計解析モデル検討調査

関係発表論文リスト

発表項目	発表者	発表年月	発表機関	掲載刊行物
(講演) Experimental and numerical studies of local circulation and medium-range transport of air pollutants in Japan. - the planning and preliminary results -	N. Murayama A. Harada and staff	56年	the 6th meeting of US-Japan air pollution related meteorology in Washington D.C	
瀬戸内海の局地循環と大気汚染質の中距離輸送について 1. 特別観測のメソスケール解析 2. 数値シミュレーション 3. アクチバブル・マルチ・トレーサーの開発	村山 信彦・矢野 直 原田 朗・荒川 正一 吉川 友章・佐藤 純次 木村富士男・戸矢 時義 小林 隆久・小出 孝	56年	日本気象学会	
ドップラーソーダによる気流と拡散パラメータの測定	吉川 友章・佐藤 純次 荒川 正一・村山 信彦	57年 5 月	日本気象学会	57年春季講演予稿集
瀬戸内の局地循環内の low level jet	小出 孝・荒川 正一 木村富士男・村山 信彦	"	"	"
瀬戸内の大気汚染と気象の航空機観測	木村富士男・戸矢 時義 小出 孝・村山 信彦	"	"	"
エア・トレーサーの海陸風による長時間輸送	佐藤 純次・矢野 直 小林 隆久・小出 孝	"	"	"
瀬戸内海における夏の熱と水蒸気のフラックス観測	鈴木 弥幸・戸矢 時義 村山 信彦 (気研・応用) 城 松幸・矢吹文太郎 武田 尚之・梶原 明仁 森本 邦彦・山本 二郎 篠原 吉雄 (神戸海洋) 寺田仁一郎・平野 邦夫 (大阪管区) 藤本 雅裕 (気象協会)	"	"	"
局地循環と汚染質の輸送	村山 信彦・荒川 正一	56年10月	気 象 研 究 所	秋季研究発表会

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲載刊行物
瀬戸内海の局地観測— 1982—	鈴木 弥幸・村山 信彦 荒川 正一・吉川 友章	58年5月	日本気象学会	58年春季大会 予稿集
瀬戸内の大気汚染と気象の 航空機観測(第2報)	村山 信彦・木村富士男 戸矢 時義・小出 孝 栗田 進	58年5月	”	”
瀬戸内海における低層気象 立体観測	応用気象研究部 (村山 信彦)	57年11月	文部省環境科学特別研究「広域大気汚染の動態」第3回研究会	
大気拡散トレーサー (AM AT) 法の開発	矢野 直・佐藤 純次 小林 隆久・小出 孝 村山 信彦・(富永 洋 今橋 強・立川 登)	57年12月	気 象 研 究 所	昭和57年度気 象研究所研究 発表会要旨集
Experimental studies on local circulation and the related transport of air pollution in the complex coastal region Part 1. “ planning and present status ”	N. Murayama and A. Harada	57年11月	7 th US — Japan Meeting on Air Pollution related Meteorology	
ibid. Part 2. “ results ”	N. Murayama Y. Suzuki S. Arakawa J. Sato T. Yoshikawa F. Kimura T. Toya N. Yano T. Kobayashi T. Koide I. Sato S. Kurita and A. Harada			

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲載刊行物
A numerical simulation on local winds and photochemical air pollution	F. Kimura	57年12月	7th US - Japan Meeting on Air Pollution related Meteorology and Joint Meeting with photochemical Air Pollution Panel	
Medium-range dispersion of air pollutants in an inland sea area surrounded by complex terrain	N. Murayama T. Yoshikawa F. Kimura J. Sato T. Koide S. Arakawa and T. Toya	58年 5 月	VIth World Congress on Air Quality, 16-20 May 1983, Paris	Proceedings

近畿地方における局地風の数値シミュレーションと実測風との比較

木村富士男・荒川正一・佐藤功・村山信彦, 同上

局地循環シミュレーションの動画について

村山信彦・木村富士男・荒川正一・竹内秀子(日情サ)

昭和58年10月 1983年気象学会秋季大会予稿集

ドップラーソーダによる気流・乱流の鉛直分布の測定(Ⅱ)

吉川友章, 同上

瀬戸内特別観測期間中の局地風の特徴

佐藤功・小出孝, 同上

局地風モデルを利用した光化学大気汚染の数値シミュレーション

木村富士男

昭和58年11月 気象研究所昭和58年度研究発表会予稿集

図 説 リ ス ト

図 1.1 観測点配置図 (1980 年)

図 1.2 観測点配置図 (1981 年)

図 1.3 観測点配置図 (1982 年)

図 1.4 代表地点の低層風の時間変化 (1980 年、新居浜)

図 1.5 代表地点の低層風の時間変化 (1981 年、松永)

図 1.6 代表地点の低層風の時間変化 (1982 年、与島)

図 1.7 低層風データ MT 収録仕様

表 1.1 1980 年観測点位置・種別一覧表

表 1.2 1981 年追加観測点位置・種別一覧表

表 1.3 1982 年観測点位置・種別一覧表

表 1.4 1980 年観測期間および観測地点分類表

表 1.5 1981 年観測期間および観測地点分類表

表 1.6 1982 年観測期間および観測地点分類表

表 1.7 地上気象観測表 (1980 年)

表 1.8 地上気象観測表 (1981 年)

表 1.9 地上気象観測表 (1982 年)

図 2.1 陸風時の風の分布例 (1980 年 7 月 22 日 6 時)

上段は高度 50 m、下段は高度 450 m、矢羽根半分が 1 m/s 以下本書ではすべて同じ。

図 2.2 海風時の風の分布例 (1980 年 7 月 22 日 14 時)。

上段は高度 50 m、下段は高度 450 m

図 2.3 燧灘を通る南北断面上の夏の日中の局地循環の模式図、実測風は昭和 55 年 7 月 22 日 14 時を示す。

図 2.4 福山における風の時間一高度断面図、破線内部の風が強い。

図 2.5 燧灘を通る南北断面図 (1981 年 8 月 19 日 15 時)

図 2.6 海風時の風の分布例 (1981 年 8 月 19 日 15 時)

上段は高度 100 m、下段は高度 500 m

図 2.7 新居浜を通る南北断面上の風向・風速、温位 (実線)、露点温度 (点線) の分布 [1981 年 8 月 20 日 3 時 (JST)]

図 2.8 陸風時の風向・風速分布、上段は高さ 100 m、下段は高さ 400 m、[1981 年 8 月 20 日 3 時 (JST)]

図2.9 新居浜沖での船上観測資料(1981年8月19日~21日)

図2.10 係留気球による温位(K 、実線)と混合比(g/kg 、破線)(1981年8月19日~21日)

図2.11 備讃瀬戸を通る南北断面図(1982年7月29日)

Aは12時、Bは6時、横軸の左端から右端まで約70 km、縦軸は高さ(m)、太線が等温位線、細線が温位の鉛直分布

図2.12 与島の温位の鉛直分布の日変化(1982年7月)

横軸が日時、縦軸が高さ(m)、太線が等温位線、細線は温位の鉛直分布、温位 $30^{\circ}C$ 線と交わる点の真下の時刻に対応する。(また対応時刻を上に示してある。)図の左上に温度の尺度を示す。

図2.13 1982年観測期間中のベクトル平均風と日楕円分布、楕円上の矢印は、時間変化の向きを示す。楕円上の黒丸が零時、ベクトルは、期間中の平均風を示す。左図は高さ100 m、右図は高さ800 mと1500 m

図2.14 パイボールと低層ゾンデデータによる新居浜上空の混合層(上面高度 H 、図中実線)と局地風系区分(点線)(1980年7月)

図2.15 パイボールと低層ゾンデデータから算出した新居浜上空の鉛直拡散係数 K_z (図中の点線は混合層高度 H)(1980年7月)

図2.16 混合層高度 H で正規化された新居浜上空の鉛直拡散係数 K_z の時刻別高度分布(1980年7月)

図2.17 新居浜上空の K_z 値の風系別分布(1980年7月観測から)

図2.18(a) パイボールと低層ゾンデデータから算出した松永上空の K_z (1981年8月)

図2.18(b) (a)と同じ、ただし魚島上空の K_z

図2.18(c) (a)と同じ、ただし新居浜上空の K_z

図2.19 海陸風に伴う収束線・発散線の動向(1980年7月)

図2.20 各時刻ごとの海陸風に伴う収束線・発散線の動向(1980年7月)

図3.1 新居浜市付近の地形図。A点(下水処理場);追跡および放球点、B点(神郷小学校);追跡点、市役所;放球点

図3.2 燧灘でのA点を中心とした基準線(X軸・Y軸)の配置図

図3.3(a) 1980年RUN 1の(海上放球)水平流跡図。白丸は放球後30分毎、数字は放球の経過時間(分)

図3.3(b) 1980年RUN 1の浮遊高度図。白丸は放球後30分毎

図3.4(a) 1980年RUN 4の水平流跡図

図3.4(b) 1980年RUN 4の浮遊高度図

図3.5(a) 1980年RUN 5の水平流跡図

- 図 3.5 (b) 1980 年 RUN 5 の浮遊高度図
図 3.6 (a) 1981 年 RUN 1 の水平流跡図
図 3.6 (b) 1981 年 RUN 1 の浮遊高度図
図 3.7 (a) 1981 年 RUN 5 の (海上放球) 水平流跡図
図 3.7 (b) 1981 年 RUN 5 の浮遊高度図
図 3.8 (a) 1981 年 RUN 7 の水平流跡図
図 3.8 (b) 1981 年 RUN 7 の浮遊高度図
図 3.9 (a) 1981 年 RUN 9 の水平流跡図
図 3.9 (b) 1981 年 RUN 9 の浮遊高度図
図 3.10 テトールン調整野帳
図 3.11 バルーンの内圧の調整に用いる U 字管。

水位差を cm の単位で読みとり、 $\text{cm} \approx \text{mb}$ と近似させてバルーン内外圧差を求める。

- 図 3.12(a) } 気圧と気温から乾燥空気の密度を求めるノモグラム
(b) }
図 3.13(a) } 気圧と気温からヘリウムガスの密度を求めるノモグラム
(b) }

表 3.1 ノンリフト・バルーン観測一覧表

- 表 3.2 (a) 1980 年 RUN 1 の放球後の経過時間 (分) と A 点を基準とした水平座標 (km)
表 3.2 (b) 1980 年 RUN 4 の水平座標
表 3.2 (c) 1980 年 RUN 5 の水平座標
表 3.3 (a) 1981 年 RUN 1 の水平座標
表 3.3 (b) 1981 年 RUN 5 の水平座標
表 3.3 (c) 1981 年 RUN 7 の水平座標
表 3.3 (d) 1981 年 RUN 9 の水平座標
表 3.4 1980 年 RUN 1, 4, 5 の 1 分毎の浮遊高度 (m)
表 3.5 1981 年 RUN 1, 5, 7, 9 の 0.5 分毎の浮遊高度 (m)

- 図 4.1 AERO COMMANDER 685 型機 (1980 年、岡山空港にて)
図 4.2 CESSNA 404 型機 (1982 年、高知空港にて)
図 4.3 ロラン-C VIDEO PLOTTER
図 4.4 サーミスター温度計センサー部
図 4.5 サーミスター温度計の検定結果
図 4.6 白金抵抗温度計センサー部 (中央の筒がそのシェルター部)

- 図 4.7 白金抵抗温度計の検定結果
- 図 4.8 露点計航空機用センサー(右)とコントロールユニット(左)
- 図 4.9 露点計の取り付け状況(左:側面, 右:正面)
- 図 4.10 $Ly-\alpha$ 湿度計の風洞での検定結果(1981年)
- 図 4.11 $Ly-\alpha$ 湿度計を機内に引き込みロックしたところ(A)、Bは $Ly-\alpha$ 湿度計の電源
- 図 4.12 $Ly-\alpha$ 湿度計を機外へ出したところ(中央、1982年)
- 図 4.13 赤外放射温度計ER-2007の外観((a)正面, (b)後面)
- 図 4.14 赤外放射温度計(A)、Bはビデオカメラ、CはモニターTV
- 図 4.15 赤外放射温度計ER-2007の検定結果(1981年)
- 図 4.16 ネオ日射計(A)と長波長放射計(B)
- 図 4.17 パーティクルカウンターRION KC-01(右下)、左下はカセットデータレコーダー
TEAC R-80(1981年)
- 図 4.18 大気汚染測定装置(Aは O_3 計)
- 図 4.19 大気サンプリングシステム(テフロン管とマニホールド(A)、1980年)
- 図 4.20 データ収録装置(1981年)、下の3台のCRT上に各種のデータと航跡図が表示される。
- 図 4.21 フライト番号11(1980年)の飛行コースと時刻(上)とその時の主な測定値(下の2段)
上段: 気温 T 、地表面温度 T_s 、および露点温度 T_d 、下段: O_3 濃度、 NO_x 濃度および高度、
 NO_x 濃度は1分ごとに細い縦線を入れてある。
- 図 4.22 図 4.21に同じ、ただしフライト番号12
- 図 4.23 図 4.21に同じ、ただしフライト番号13
- 図 4.24 図 4.21に同じ、ただしフライト番号21
- 図 4.25 図 4.21に同じ、ただしフライト番号22
- 図 4.26 図 4.21に同じ、ただしフライト番号23
- 図 4.27 温位、 NO_x 、 O_3 濃度の鉛直分布(1980年7月フライト番号13)
- 図 4.28 燧灘における NO_x 濃度の観測例、1980年7月22日のフライト番号13、矢羽根はパイ
ボールによる高さ300mでの実測風
- 図 4.29 図 4.28の NO_x と同時に観測された O_3 濃度の分布
- 図 4.30 1981年の代表的な飛行コース(上)と、大阪から燧灘へ向かう時に測定された高度、 O_3 、
 NO_x 濃度、 $Ly-\alpha$ による絶対湿度とそのr.m.s(σ_a)および地表面温度(下)
- 図 4.31 図 4.21に同じ、ただし1981年のフライト番号11
- 図 4.32 図 4.21に同じ、ただし1981年のフライト番号12
- 図 4.33 図 4.21に同じ、ただし1981年のフライト番号13
- 図 4.34 図 4.21に同じ、ただし1981年のフライト番号21

- 図 4.35 図 4.21に同じ、ただし 1981 年のフライト番号 22
- 図 4.36 図 4.21に同じ、ただし 1981 年のフライト番号 23
- 図 4.37 図 4.21に同じ、ただし 1981 年のフライト番号 31
- 図 4.38 図 4.21に同じ、ただし 1981 年のフライト番号 32
- 図 4.39 1981 年 8 月 19 日の 6 時 30 分ごろに測定された NO_x 、 O_3 濃度、温位 θ 、および $\text{Ly} - \alpha$ 湿度計と露点温度計により測定された混合比 q の鉛直分布
- 図 4.40 図 4.39に同じ、ただし 8 月 19 日 11 時 15 分ごろ
- 図 4.41 図 4.39に同じ、ただし 8 月 19 日 16 時 15 分ごろ
- 図 4.42 図 4.39に同じ、ただし 8 月 20 日 11 時ごろ
- 図 4.43 図 4.39に同じ、ただし 8 月 20 日 16 時ごろ
- 図 4.44 図 4.39に同じ、ただし 8 月 20 日 6 時 40 分ごろ、土佐湾沖
- 図 4.45 上向き、下向き日射、海面温度およびアルベドの測定高度による依存性、上向きの矢印は船により測定された海水温
- 図 4.46 図 4.30の S 1 (大阪市) で測定された地面温度 (上、黒丸)、日射量 (下、黒丸) およびアルベド (下、白丸)、誤差棒は地表面温度と日射量の標準偏差を示す (1981 年 8 月)。
- 図 4.47 図 4.46に同じ、ただし S 2 (播磨灘)
- 図 4.48 図 4.46に同じ、ただし S 3 (讃岐平野)
- 図 4.49(a) 燧灘への往復経路における水蒸気変動量分布および地表面温度、飛行高度 (1981 年 8 月 19 日)
- 図 4.49(b) 図 4.49(a)に同じ (ただし、1981 年 8 月 20 日)
- 図 4.50 1981 年 8 月 19 日の午後に測定されたエーロゾル濃度 (直径 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$)、円の面積は濃度の相対値を示す。
- 図 4.51 エーロゾル濃度の鉛直分布 (1981 年 8 月)
- 図 4.52 1982 年 7 月航空機観測のコース (直線 A B)
S. K. M はパイボールの観測点でそれぞれ、総社、満濃、高知
- 図 4.53 観測飛行コースの側面図 (1982 年 7 月)
- 図 4.54 飛行コースと時刻 (上左) とその側面図 (上右)、下段は主な測定値、フライト番号 11 (1982 年 7 月)
- 図 4.55 図 4.54に同じ、ただしフライト番号 12
- 図 4.56 図 4.54に同じ、ただしフライト番号 13
- 図 4.57 図 4.54に同じ、ただしフライト番号 21
- 図 4.58 図 4.54に同じ、ただしフライト番号 31
- 図 4.59 図 4.54に同じ、ただしフライト番号 32

- 図 4.60 図 4.54に同じ、ただしフライト番号 33
- 図 4.61 図 4.54に同じ、ただしフライト番号 34
- 図 4.62 1982 年 7 月 29 日の早朝に測定された NO_x 、 O_3 およびエロゾル ($0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$) の濃度の鉛直分布と高知、満濃、総社で観測された風の南北成分の鉛直分布
- 図 4.63 図 4.62に同じ、ただし午後
- 図 4.64 図 4.52の C 点で 7 月 27 日の 3 回の観測で測定された O_3 の鉛直分布
- 図 4.65 図 4.64に同じ、ただしエロゾル ($0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$) 濃度
- 図 4.66 図 4.64に同じ、ただし絶対湿度
- 図 4.67 積雲を横断したときに観測した高度、エロゾル濃度、相対湿度、 O_3 濃度、1982 年 7 月 29 日フライト番号 34
- 図 4.68 航空機による風の測定原理、 V_G ；航空機の対地速度、 V_a ；航空機の対気速度、 V_w ；風速
- 図 4.69 ドップラー航法による風の測定のフライトコース (FC-2)、1981 年、1982 年共通、ただし図に示されている気象観測点の配置は 1982 年のもの。
- 図 4.70 フライトコースの側面図、1981 年
- 図 4.71 ドップラー航法により測定された風速の例、パイボールによる風速の測定値が、地図上にプロットされている。1981 年 8 月 19 日。
- 図 4.72 データ処理のブロックダイアグラム
- 表 4.1 航空機観測に使用した機器
- 表 4.2 航空機の性能
- 表 4.3 航空機用サーミスター温度計の仕様
- 表 4.4 航空機用白金抵抗温度計の仕様
- 表 4.5 露点計 EG & G MODEL 137 の仕様
- 表 4.6 $\text{Ly}-\alpha$ 湿度計 (MODEL-BLR) の仕様
- 表 4.7 赤外放射温度計 ER-2007 の仕様
- 表 4.8 英弘ネオ日射計 MS-42 の仕様
- 表 4.9 EPPLEY 長波長放射計 MODEL PIR の仕様
- 表 4.10 ネオ日射計・長波長放射計の検定定数
- 表 4.11 パーティクルカウンター RION KC-01 の仕様
- 表 4.12 大気汚染測定装置 (紀本電子工業製) の仕様
- 表 4.13 VTR システム
- 表 4.14 データ収録装置 (紀本電子工業製) の仕様
- 表 4.15 1980 年航空機観測
- 表 4.16 1981 年航空機観測

表 4.17 R-80に入力した要素

表 4.18 CMT、MTに収録したフライト

表 4.19 CALIBRATION に関する数値 (単位は H_{SPAN} が m、他はすべてボルト)

表 4.20 1982 年航空機観測

表 4.21 ドップラー航法による風の観測 (1981 年)

表 4.22 ドップラー航法による風の観測 (1982 年)

図 5.1 ドップラーソーダ装置の概要

図 5.2 気流の 3 次元測定結果の例 (破線は風向ギャップ、白丸はCalm、影の区域は下降域を示す)

図 5.3 実測データから導いた乱流パラメータの例 (1981 年 8 月)

図 5.4 内陸平野での測定結果の例 (2 重線は風向ギャップを示す) (1982 年 7 月)

図 5.5 内陸平野での乱流パラメータの測定例 (1982 年 7 月)

図 5.6 各拡散パラメータの対応 (白丸は前後 1 時間に風向急変、斜線付きは夜間を意味する) (1982 年 7 月)

図 5.7 岡山における K_z の高度時間断面 (1982 年 7 月)

図 5.8 (a) 発信部と受信部 (b) 受信部

表 5.1 ドップラーソーダによる観測データのプリントアウトとMT収録内容

図 6.1 AMAT 放出用噴霧器

図 6.2 アトマイザーから放出されたトレーサー粒子の累積分布曲線

図 6.3 新居浜トレーサー実験 (1981 年) での捕集地点

図 6.4 新居浜付近の地上風系 (1980 年 7 月 22 日 8 時)

図 6.5 海風時における各捕集地点での AMAT 濃度の時間変化。A は魚島、B は新居浜沿岸から 5 km 沖の船上での捕集を示す。

図 6.6 陸風時における各捕集地点での AMAT 濃度の時間変化。A は魚島、B は新居浜沿岸から 5 km 沖の船上での捕集を示す。

図 6.7 航空機からの放出に用いたアトマイザー

図 6.8 トレーサーの広域的な観測網、Dy、Ho、Eu はそれぞれのトレーサーの放出点

図 6.9 トレーサーの局地的観測網

図 6.10 Eu バックグラウンドの濃度の日変化 (1981 年 8 月)

図 6.11 惣開地区 (X) における規準化濃度の時間変化 (Cb を差引いた値) (1981 年 8 月)

図 6.12 新居浜および別子のパイボールの垂直断面図

図 6.13 新居浜における 1981 年 8 月 19 日の上層の温位分布

図 6.14 陸風から海風への変化時の新居浜付近の AMAT 濃度 (1981 年 8 月) A = 4—6 時、B = 6—8 時、C = 8—10 時、D = 10—12 時 (JST)

図 6.15 航空機から海風で流した Dy トレーサーのトレース、実線は規準化濃度で 10^{-8} の等値線を示す (1981 年 8 月)。

図 6.16 1982 年 トレーサー実験計画

図 6.17 トレーサーの沈着測定の配置

図 6.18 1982 年 8 月 4 日地上濃度分布、放出率で規準化した濃度 10^{-5} (m^{-2}) の等値線を示す。X は放出点からの距離、左側が 38 分間放出したトレーサー、上が Eu、下が Ho、右が 60 分間放出したトレーサー。上が Dy、下が SF_6

図 6.19 1982 年 8 月 4 日気象鉄塔、地上 50m の風向・風速の記録。縦軸が時間、左端の数字は時間、横軸は左が風速 (m/s)、右が風向、N が北、E が東、S が南、W が西を示す。

図 6.20 濃度の鉛直分布、測定点と放出点の距離 3.2 km、放出点の高さ 40 m、横軸は高さ Z の濃度 C と高さ 200 m の濃度 C (200) の比、縦軸は高さ Z と放出点の高さの比。

図 6.21 温位 Θ (K)・風速 U (m/s)・気温 T ($^{\circ}\text{C}$)・混合比 W (g/kg) の鉛直分布

図 6.22 風下への距離 (m、横軸) と沈着率 (m^{-2} 、縦軸) の関係。沈着トレーサーの放出率で割ってある。数字は実験日、括弧内の数字は放出点の高さ (m)。

図 6.23 風向に直角な方向の距離と沈着率の関係、両者の関係を正規分布で近似し、横軸は風向に直角な方向の距離 $Y - \bar{Y}$ と標準偏差 σ の比で示した。縦軸は沈着率 D と放出点に最も近い点の沈着率 D (O) の比。○、△、□、▽ はそれぞれ風下 10、20、50、100 m、 $Y - \bar{Y}$ が正の点で測定、 $Y - \bar{Y}$ が負の点の測定は黒で塗り潰した。上図は 1981 年 8 月 5 日 Dy、放出点の高さ 1.5 m、下図は 1982 年 8 月 6 日 Dy、放出点の高さ 1.5 m。

表 6.1 各種トレーサーの比較 (* は、 10 m^3 の空気捕集の場合を示す)

表 6.2 アクチバブル・マルチ・エア・トレーサーとしての元素の比較 (* は、 $10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ 、1 時間照射の場合の値)

表 6.3 新居浜トレーサー実験 (1981 年) での観測および計算軸濃度の比較

表 6.4 各トレーサー物質のバックグラウンド濃度の統計値

表 6.5 各トレーサーの放出条件

表 6.6 各トレーサーの放出条件

表 6.7 Run ナンバーと採集時刻

表 6.8 トレーサー実験データ

a : ユーロピウム

b : ジスプロシウム

c : ホルミウム

図 7.1 数値モデルの流れ図

図 7.2 数値モデルの鉛直構造

図 7.3 斜面に当たる日射計算式のための天球座標、n : 斜面の法線、 $\odot$: 太陽、Z : 天頂、S : 真南、W : 真西

図 7.4 パラメータ化した反応モデルの概念図。破線で示されている反応グループは最終的には無視される。

図 7.5 チャンバー実験による NO_x の初期値と最高 O_3 濃度の関係、HC の種類と初期値は A : C_2H_4 、B : C_3H_6 、C : $\ell\text{-C}_4\text{H}_8$ 、D : $\ell\text{-C}_5\text{H}_{10}$ おおの 0.5ppm、C の黒丸はパラメータ化した反応モデルの結果。実測値は Sakamaki ら (1981) による。

図 7.6 NO_x の初期値と O_3 の最大生成速度の関係、記号は、図 7.5 に同じ。

図 7.7 図 7.6 に同じ、ただし光の強さ (K_1 値) との関係

図 7.8 パラメータ化した反応モデルによって計算された NO 、 NO_2 、 O_3 の各濃度の時間変化

図 7.9 NR (トレーサー)、 NO_x および O_3 濃度、風の断面図、2 日目の 6 時 (LT)

図 7.10 図 7.9 に同じ、12 時 (LT)

図 7.11 図 7.9 に同じ、15 時 (LT)

図 7.12 図 7.9 に同じ、18 時 (LT)

図 7.13 地上 25m の NR、 NO_x および O_3 濃度と風の U 成分 (海岸と直角方向) の日変化、X は海岸から内陸へ測った距離。

図 7.14 晴天で一般風の弱い日の 12 時 (JST) のアメダスによる地上風

図 7.15 図 7.14 に同じ、ただし 15 時 (JST)

図 7.16 図 7.14 に同じ、ただし 3 時 (JST)

図 7.17 シミュレーションによる 12 時 (JST) の風、高さ 25m

図 7.18 図 7.17 と同じ、ただし 5km 格子モデルによる風ベクトル

図 7.19 図 7.17 と同じ、ただし 18 時 (LT)

図 7.20 図 7.17 と同じ、ただし 3 時 (LT)

図 7.21 パイボールによる高さ 100m の風向・風速 (上) と数値シミュレーションによる高さ 75m の風向・風速 (下)、A : 1981 年 8 月 19 日 21 時、B : 8 月 20 日 3 時、C : 9 時、D : 15 時

図 7.22 パイボールによる高さ 400m の風向・風速 (上) と数値シミュレーションによる高さ 350m の風向・風速 (下)、A : 1981 年 8 月 21 日 21 時、B : 3 時、C : 9 時、D : 15 時

- 図 7.23 パイボールによる高さ 1500 m の風向・風速 (上) と数値シミュレーションによる高さ 1400 m の風向・風速 (下)、A : 1981 年 8 月 19 日 21 時、B : 3 時、C : 7 時、D : 15 時
- 図 7.24 新居浜を通る南北断面上の風向・風速、温位の分布 (実測値)、矢羽根は右が北。A : 1981 年 8 月 19 日 21 時、B : 20 日 3 時、C : 9 時、D : 15 時
- 図 7.25 新居浜を通る南北断面上の水平風ベクトル (上) と風速分布 (下) (計算値)、風ベクトルの向きは上が北、A : 21 時、B : 3 時、C : 9 時、D : 15 時 (L T)
- 図 7.26 数値シミュレーションによる高さ 350 m、3 時の風、一般場は $E\ 3\text{ m/sec}$
- 図 7.27 温位の鉛直分布の日変化、(実測値 : 1981 年 8 月 19 日 ~ 21 日 (J S T)、松永、破線は混合層の高さを示す)。
- 図 7.28 図 7.27 に対応する計算値
- 図 7.29 地面温度の計算値 (実線) と実測値 (黒丸)、実測は 1981 年 8 月 19 日、20 日に讃岐平野において航空機によって測定した。計算値の β は蒸発効率
- 図 7.30 航空機観測を行なったコース (直線 A B)、点 K、M、S はそれぞれ高知、満濃、総社
- 図 7.31 粗い格子間隔 (12 km) のモデルによる計算結果 15 時 (L T) の高さ 25 m の風、実線のワクは 5 km 格子モデルの領域を示す。
- 図 7.32 1982 年 7 月 29 日 15 時 (J S T) のアメダスによる実測風
- 図 7.33 NO_x の発生源分布、a : 低煙源 (移動発生源と実体高 100 m 以下の固定発生源)、b : 高煙源、白丸は $10 - 100\text{ m}^3/\text{h}$ 、黒丸は $100\text{ m}^3/\text{h}$ 以上を示す。
- 図 7.34 シミュレーションによる風、NR 濃度 (非反応性物質ないしトレーサー) および O_3 濃度の鉛直断面濃度、断面は図 7.30 の直線 A B 上、3 時 (L T)
- 図 7.35 図 7.34 に同じ、15 時 (L T)
- 図 7.36 1982 年 7 月 29 日の断面図、左図は早朝、右図は午後 (J S T)。陰影部分は山、中程の山は四国山地、右の低い山は中国山地、横破線で海を示す。縦軸は高さ (km)。上図は NO_x 濃度 (ppb)、中の図は O_3 濃度 (ppb)、下図はエアロゾル濃度の相対値。その下の図は高知・満濃・総社 (KOCHI・MANNO・SOHJA) の風の鉛直分布、横軸は風速 (m/s)、縦軸は高さ (m)
- 図 7.37 1982 年 7 月 29 日午後に観測した相対湿度分布 (%)
- 図 7.38 シミュレーションによって計算された 15 時の相対湿度分布 (%)。影の区域は過飽和を示す。
- 図 7.39 ブロック別、ランク別のオキシダント日最高濃度の出現回数、1978 年、1979 年 (富士通 FIP 1982 より)
- 図 7.40 東京湾岸地域で生成された高濃度の O_x を含む汚染気塊の内陸域への輸送経路 (鶴田、1983 より)

- 図 7.41 図 7.40の A コース上にある各測定点での O_x 濃度の時間変化
- 図 7.42 数値シミュレーションの対象領域と発生源分布。影の区域には移動発生源を仮定し、黒丸には高煙源を仮定する。
- 図 7.43 移動発生源と高煙源の 1 時間当りの総排出量の日変化
- 図 7.44 数値シミュレーションによる関東地方の地上風（高さ 25 m）、上から一般風がそれぞれ東、南、西、北 3 m/sec の場合で、左が 6 時、右が 12 時（L T）
- 図 7.45 3 時間毎の O_3 濃度 80 ppb の等値線、図中の C、E、S、W、N はそれぞれ一般風のない場合および、東、南、西、北 3 m/sec の場合を示す。
- 図 7.46 図 7.45 の各ケースにおける最高オゾン濃度の日変化
- 図 7.47 一般場が弱い東よりの風のときのアメダスによる 6 時と 12 時の地上風、天気図およびブロック別日最大オキシダント濃度を示す。オキシダント濃度は丸印が 120 ppb 以上、2 重丸が 160 ppb 以上である。
- 図 7.48 図 7.47 に同じ、ただし一般場が西寄りのとき。
- 図 7.49 山を取り去ったときの、地上風（12 時 L T）と 3 時間ごと（L T）のオゾンの 80 ppb 等濃度線、一般風のないとき。
- 図 7.50 図 7.49 に同じ、ただし西 3 m/sec の一般風のとき、18 時（L T）の破線は 60 ppb の等濃度線を示す。
- 表 7.1 計算結果と観測結果の比較（1981 年度観測）

気 象 研 究 所

1946 (昭和21年) 設立

所 長 : 理 博 森 安 茂 雄

予 報 研 究 部	部 長 :	吉 田 泰 治
台 風 研 究 部	部 長 :	理 博 相 原 正 彦
物理気象研究部	部 長 :	理 博 岡 林 俊 雄
応用気象研究部	部 長 :	村 山 信 彦
気象衛星研究部	部 長 :	工 博 内 藤 恵 吉
地震火山研究部	部 長 :	理 博 渡 辺 偉 夫
海 洋 研 究 部	部 長 :	理 博 飯 田 隼 人
高層物理研究部	部 長 :	理 博 嘉 納 宗 靖
地球化学研究部	部 長 :	秋 山 勉

気象研究所技術報告

編集委員長 : 岡 林 俊 雄

編集委員 : 秋 山 孝 子 近 藤 洋 輝 佐 粧 純 男
吉 川 友 章 青 柳 二 郎 清 野 政 明
遠 藤 昌 宏 小 寺 邦 彦 伏 見 克 彦

事 務 局 : 西 田 圭 子 西 村 浩 弥

気象研究所技術報告は、気象学、海洋学、地震学、その他関連の地球科学の分野において、
気象研究所職員が得た研究成果に関し、技術報告、資料報告及び総合報告を掲載する。

気象研究所技術報告は、1978年(昭和53年)以降、必要の都度刊行される。

昭和59年3月30日発行 ISSN 0386-4049

編集兼発行所 気 象 研 究 所

茨城県筑波郡谷田部町長峰1-1

印 刷 所 (株) イ セ ブ

TEL 0298 (51) 2515 (代)