

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年に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との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
エアロゾル	————	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		

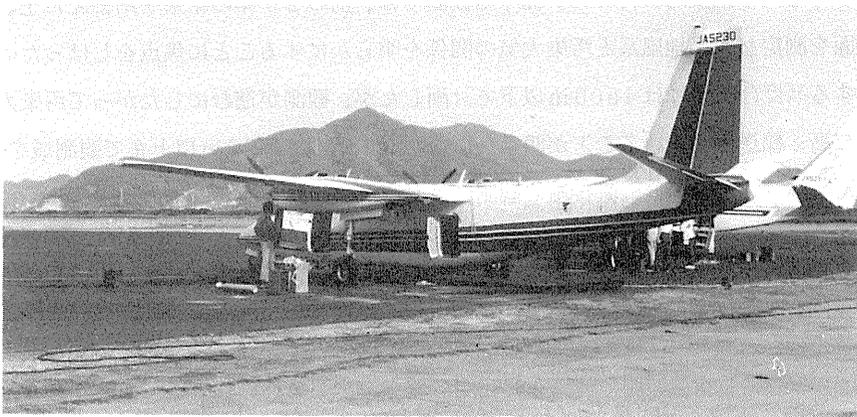


Fig. 4.1 Photograph of Aero commander 685 (at Okayama Airport in 1980).

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	GTS10-520 K	GTS10-520 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。

高気速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。

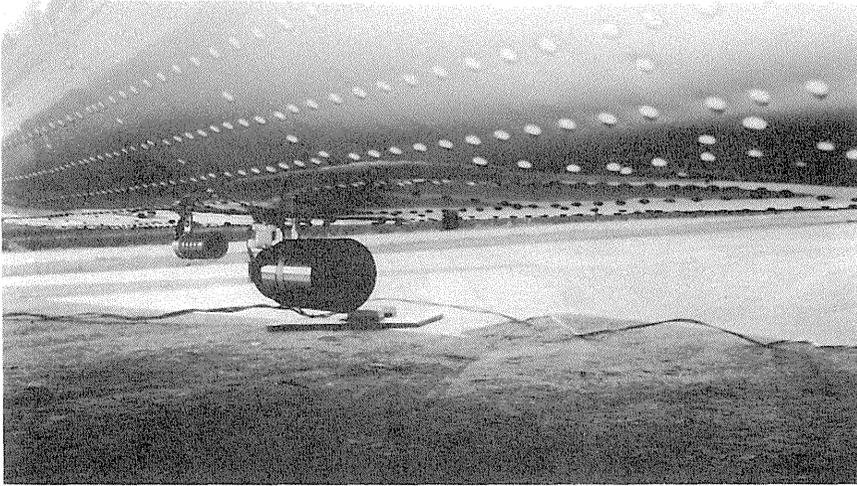


Fig. 4.4 Sensing probe of the thermistor thermometer.

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 × 140 (mm) 変換器 220 × 150 × 120 (mm)

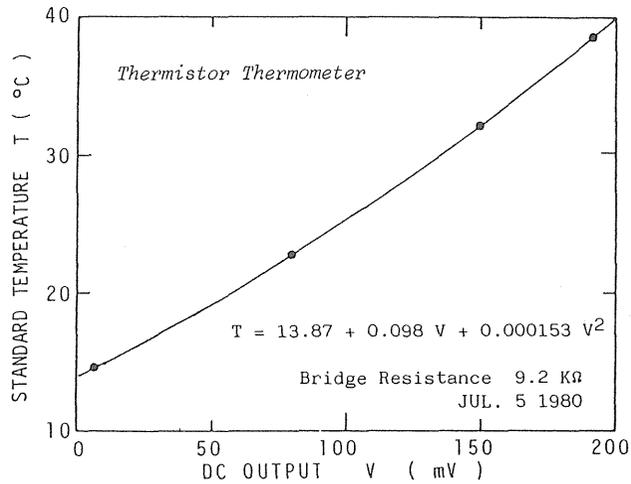


Fig. 4.5 Calibration curve of the thermistor thermometer.

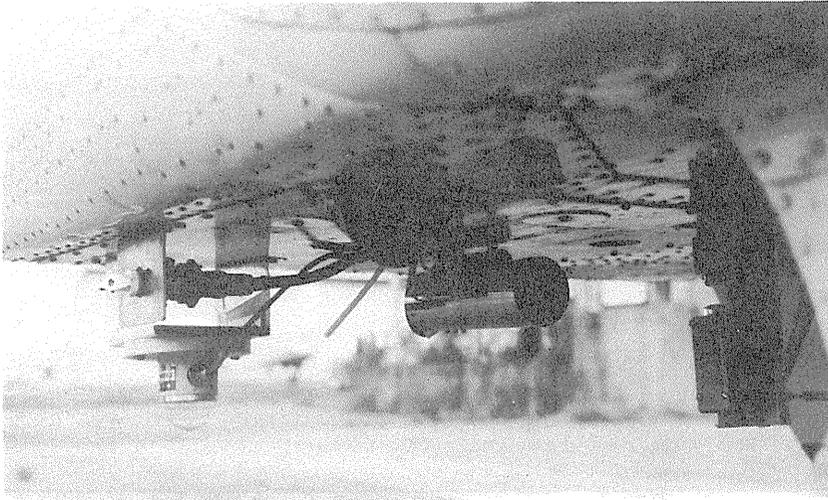


Fig. 4.6 Sensing probe of the platinum resistance thermometer (the middle).

Table 4.4 Specifications, Platinum resistance thermometer.

項 目	仕 様
セ ン サ ー	Pt 100Ω (0.5級)
測 定 範 囲	-10℃ ~ +40℃
出 力	DC 0 ~ 1 V
時 定 数	3.3 sec
電 源	AC 100 V (50/60Hz) または DC 12 V
外 形 寸 法	シエルター 65φ × 200 (mm) 変換器 220 × 180 × 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 (100Ω) 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。

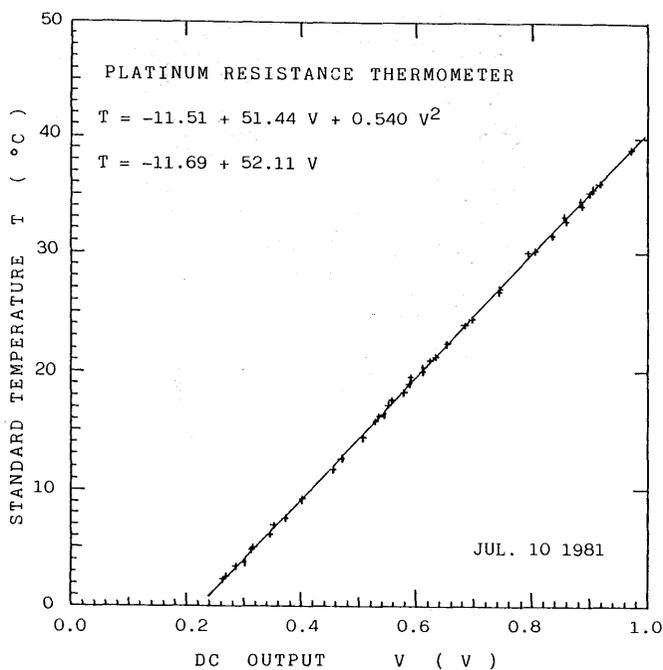


Fig. 4.7 Calibration curve of the platinum resistance thermometer.

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

項目	仕様
測定範囲	-50°C ~ +50°C
測定精度	0°C ~ 50°C は ±0.5°C -30°C ~ 0°C は ±0.6°C -50°C ~ -30°C は ±1.1°C
応答時間	2°C/sec
再現度	±0.5°C
出力	0 ~ 5 V DC
周囲温度	コントロールユニット -20°C ~ +60°C センサーユニット -60°C ~ +70°C
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.

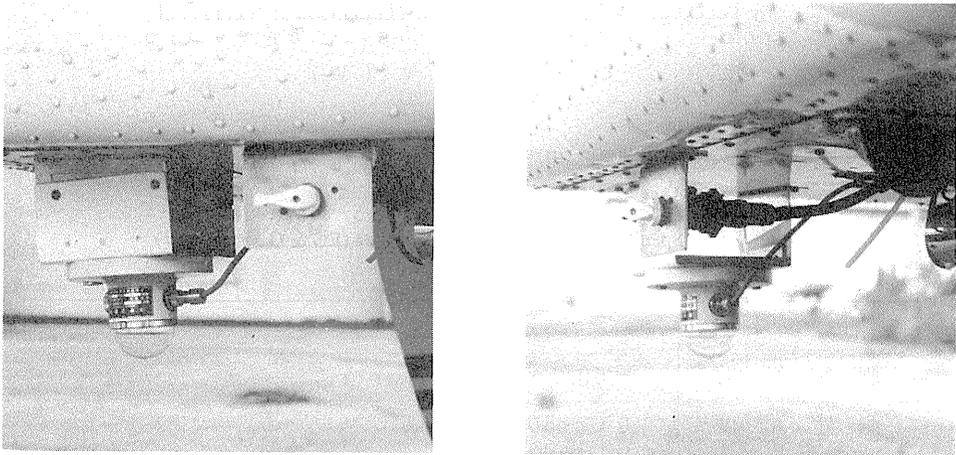


Fig. 4.9 Sensing probe of the aircraft hygrometer (left: side view, right: front view).

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 \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 Reserch 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)

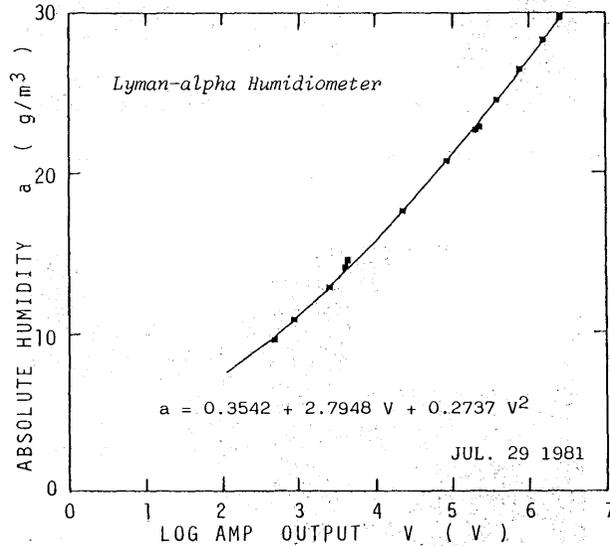


Fig. 4.10 Calibration curve of the lyman-alpha humidimeter Model BLR (in 1981, in a wind tunnel).

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)。

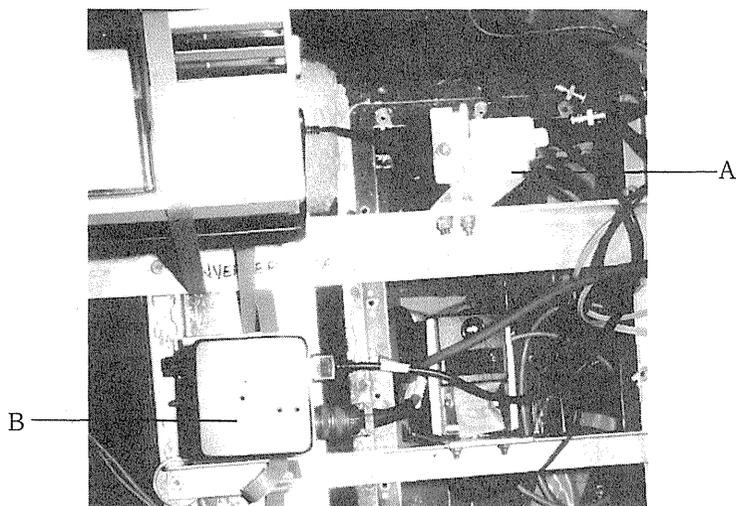


Fig. 4.11 Lyman-alpha humidimeter locked in the cabin (A) and its power supply (B).

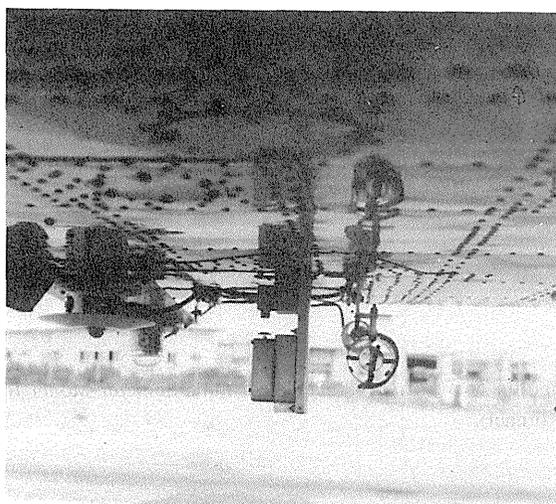


Fig. 4.12 Sensor head of the lyman-alpha humidimeter (the middle, in 1982).

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°C から 40°C 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。

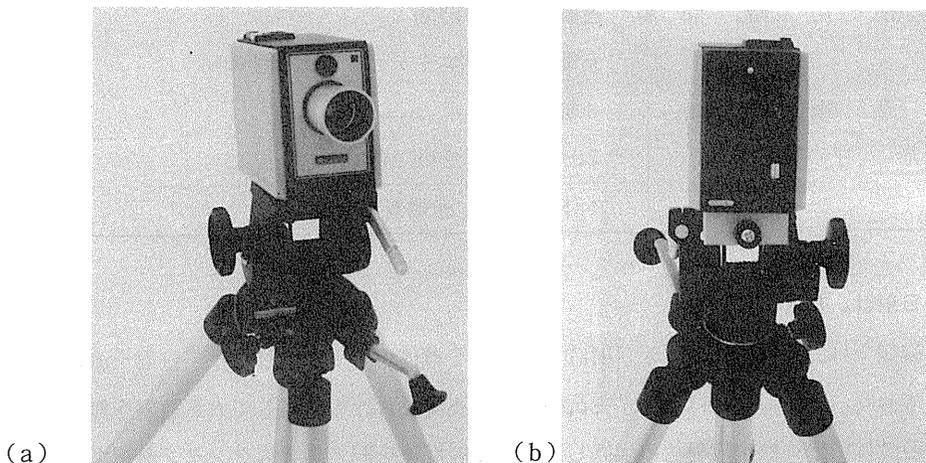


Fig. 4.13 Infrared radiation thermometer ER-2007 ((a) front view, (b) rear view).

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

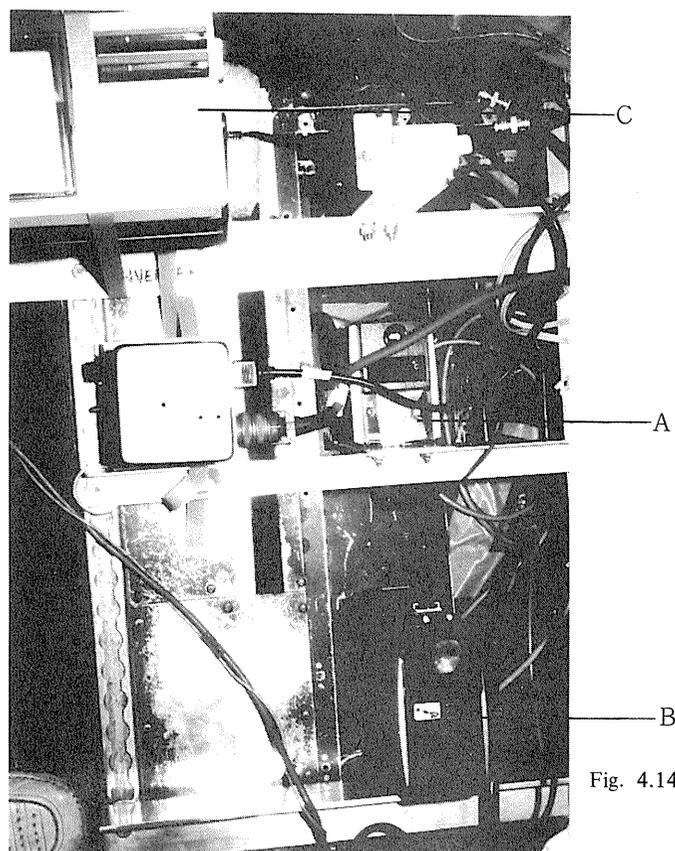


Fig. 4.14 A: Infrared radiation thermometer in the cabin, B: Video camera, C: Monitor TV.

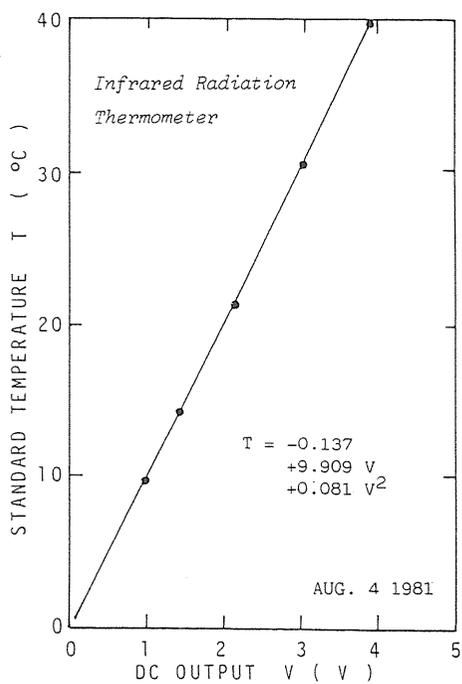


Fig. 4.15 Calibration curve of the infrared radiation thermometer ER-2007 (in 1981).

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 μV/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 - ム	66 mm φ ガラスドーム (0.3 ~ 2.8 μm)
寸 法	150 φ × 120 mm
出 力	0 ~ 10 mVDC

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

項 目	仕 様
直 線 性	± 1 %, 0 ~ 700 W/m ²
感 度	5 μV/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 - ム	30 mm φ シリコンドーム (3.5 ~ 50 μm)
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 μV/w · m ⁻²
	22064 F 3	4.07 μV/w · m ⁻²

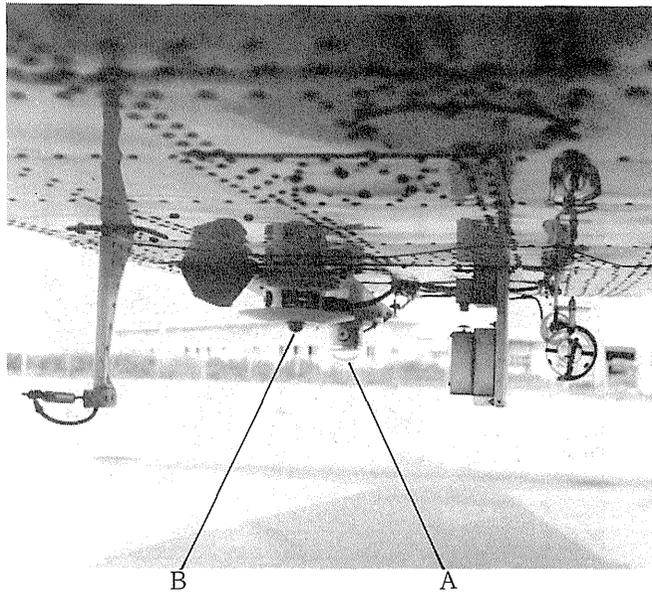


Fig. 4.16 Pyranometer (A) and Pyrgeometer (B).

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

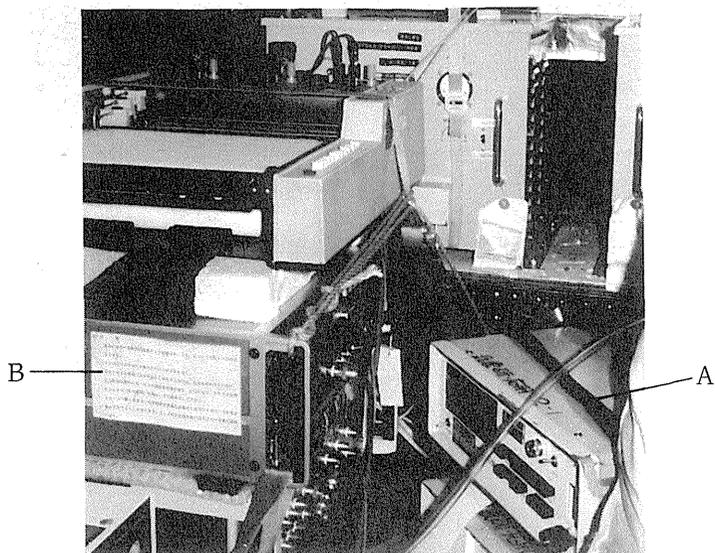


Fig. 4.17 Particle counter RION KC-01 (A) and Cassette data recorder TEAC R-80 (B) (in 1981).

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

項 目	仕 様
測 定 範 囲	粒径 0.3 μm 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 °C, 相対湿度 85%以下
電 源	100 VAC \pm 10 V, 約 110 VA
外 形 寸 法	約 29 \times 11 \times 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 25mm 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

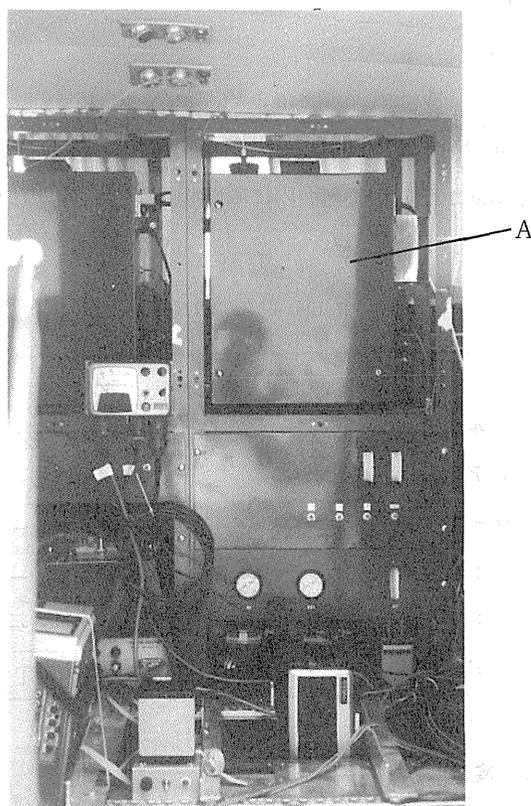


Fig. 4.18 Air pollutants measuring system (A: Ozone meter).

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。

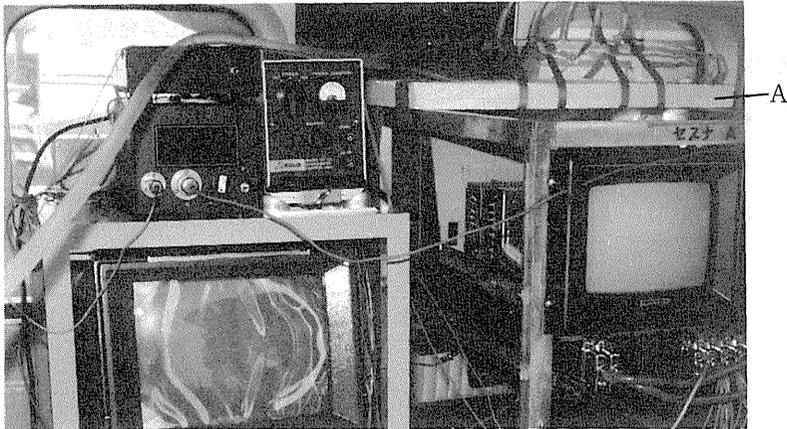


Fig. 4.19 Air sampling system (Teflon tubes and manifold (A), in 1980).

4.2.11 VTRシステム

81年と82年の観測では、Video Camera、Video Tape Recorder、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年に使用したの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。

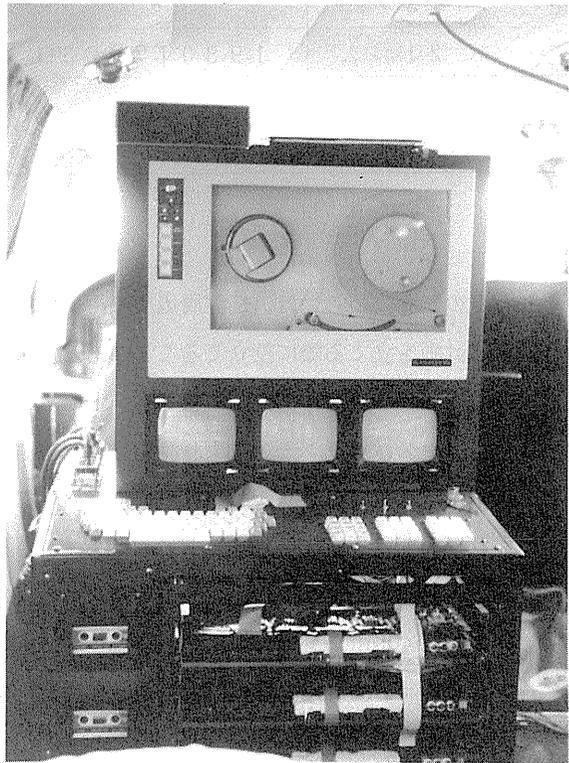


Fig. 4.20 Data acquisition system in 1981. Data and tracks are displayed on the CRT displays.

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
11	1980年7月22日	04:55	06:55
12	"	09:32	11:26
13	"	13:58	15:52
21	1980年7月23日	04:51	06:52
22	"	09:49	11:47
23	"	14:02	14:58

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）。

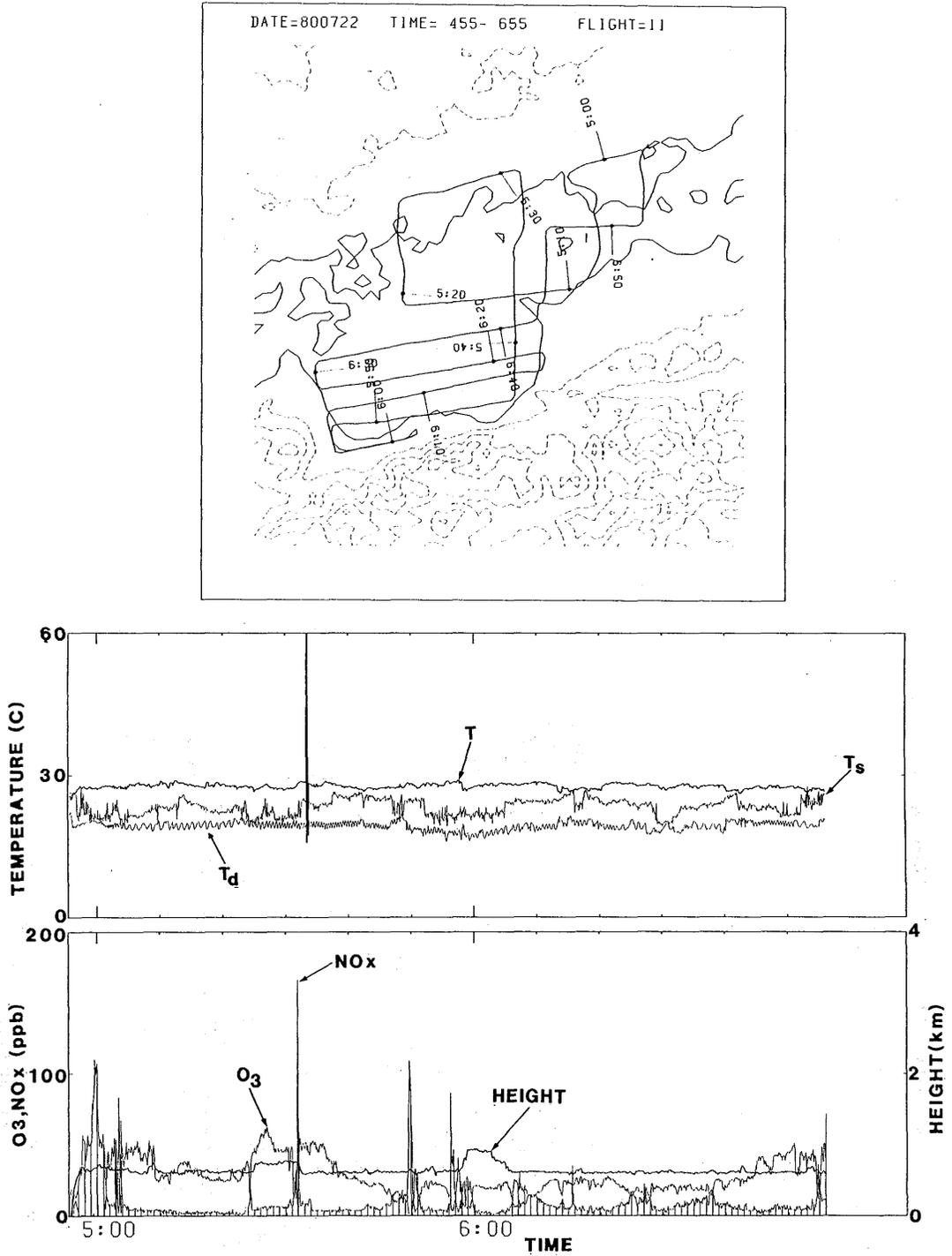


Fig. 4.21 Flight course and time (top) and examples of observed data (bottom two boxes), flight 11 in 1980. T: air temperature, Ts: surface temperature, Td: Dew-point temperature.

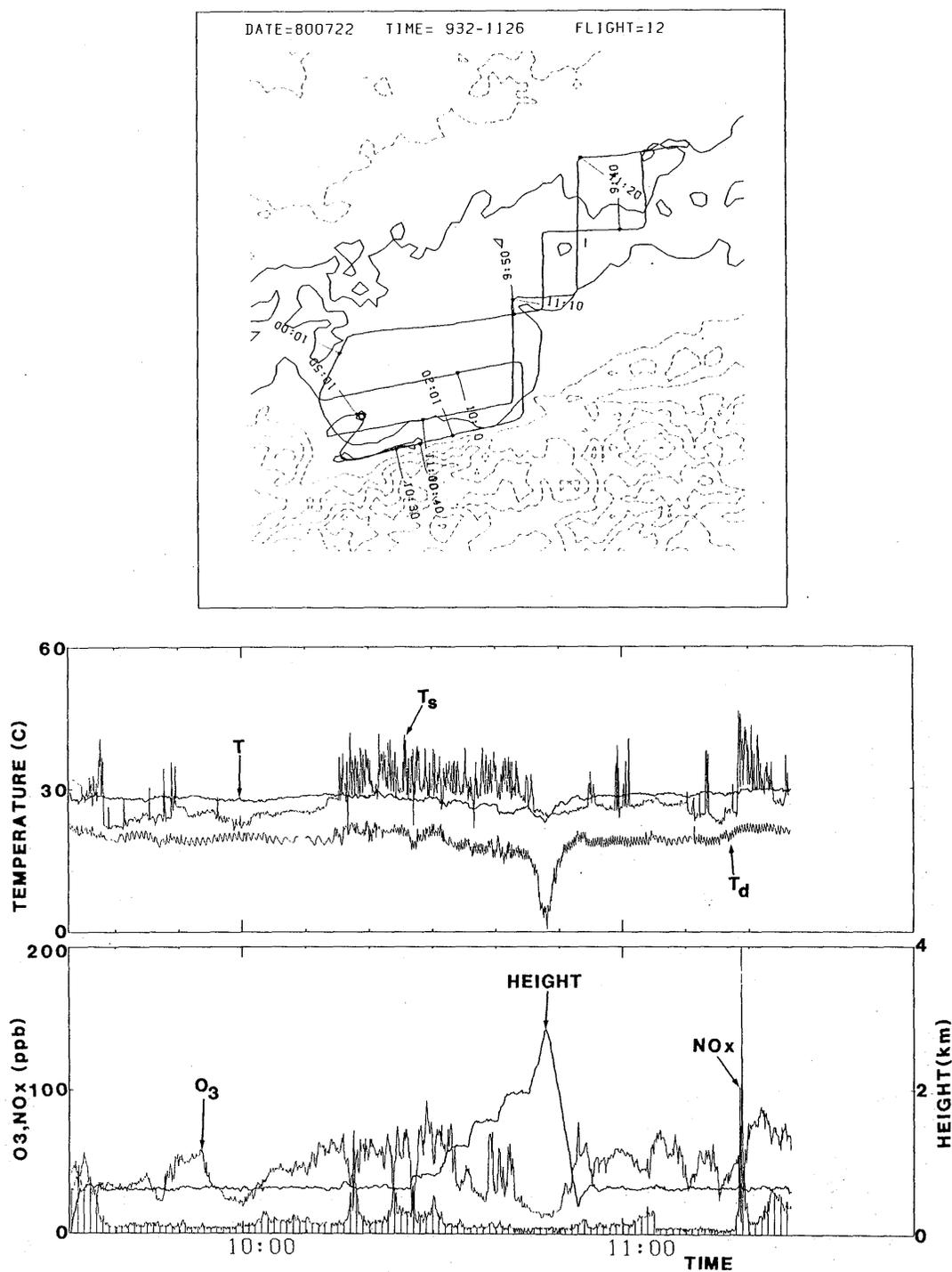


Fig 4.22 Same as in Fig. 4.21, but flight 12.

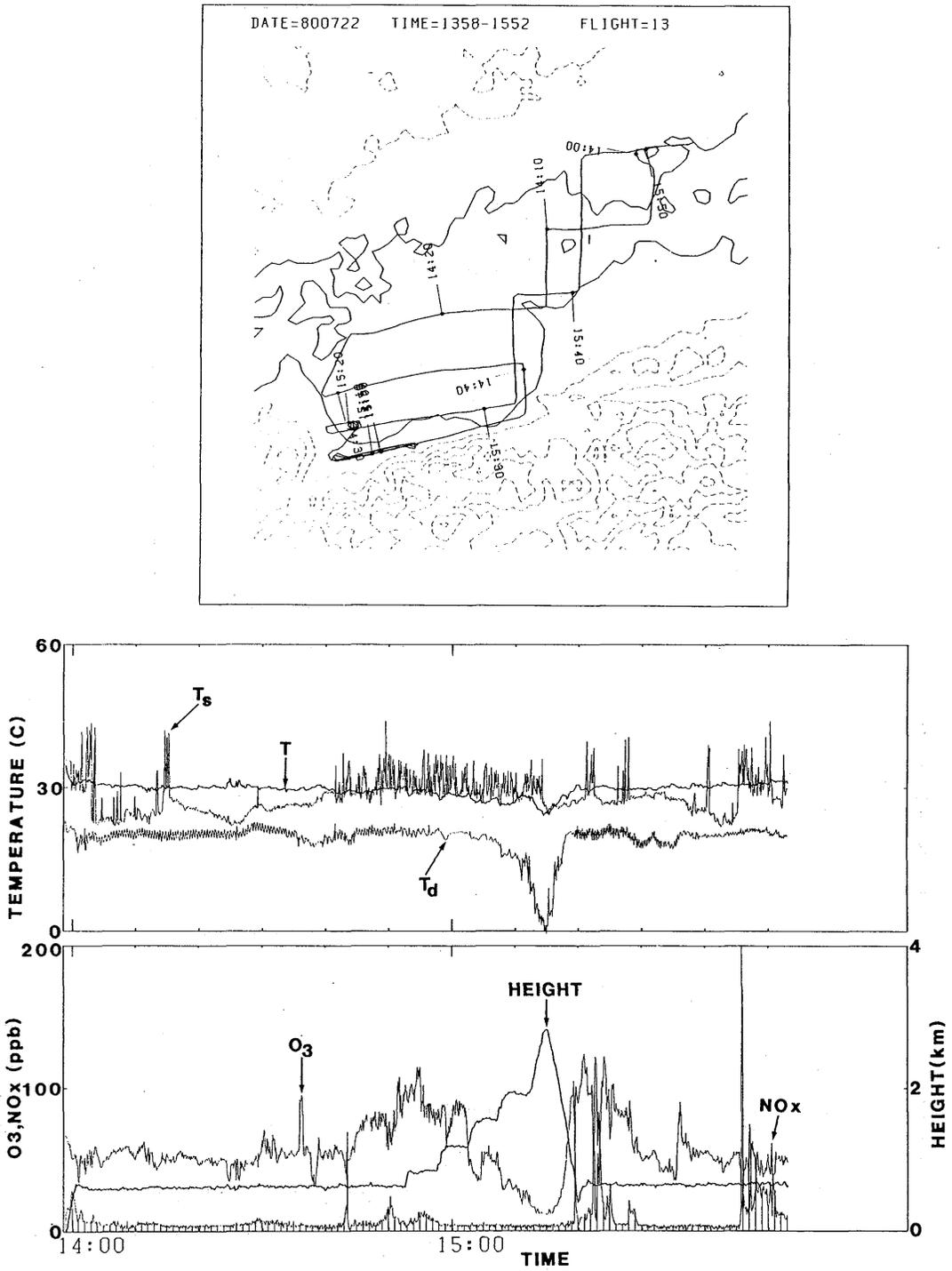


Fig. 4.23 Same as in Fig. 4.21, but flight 13.

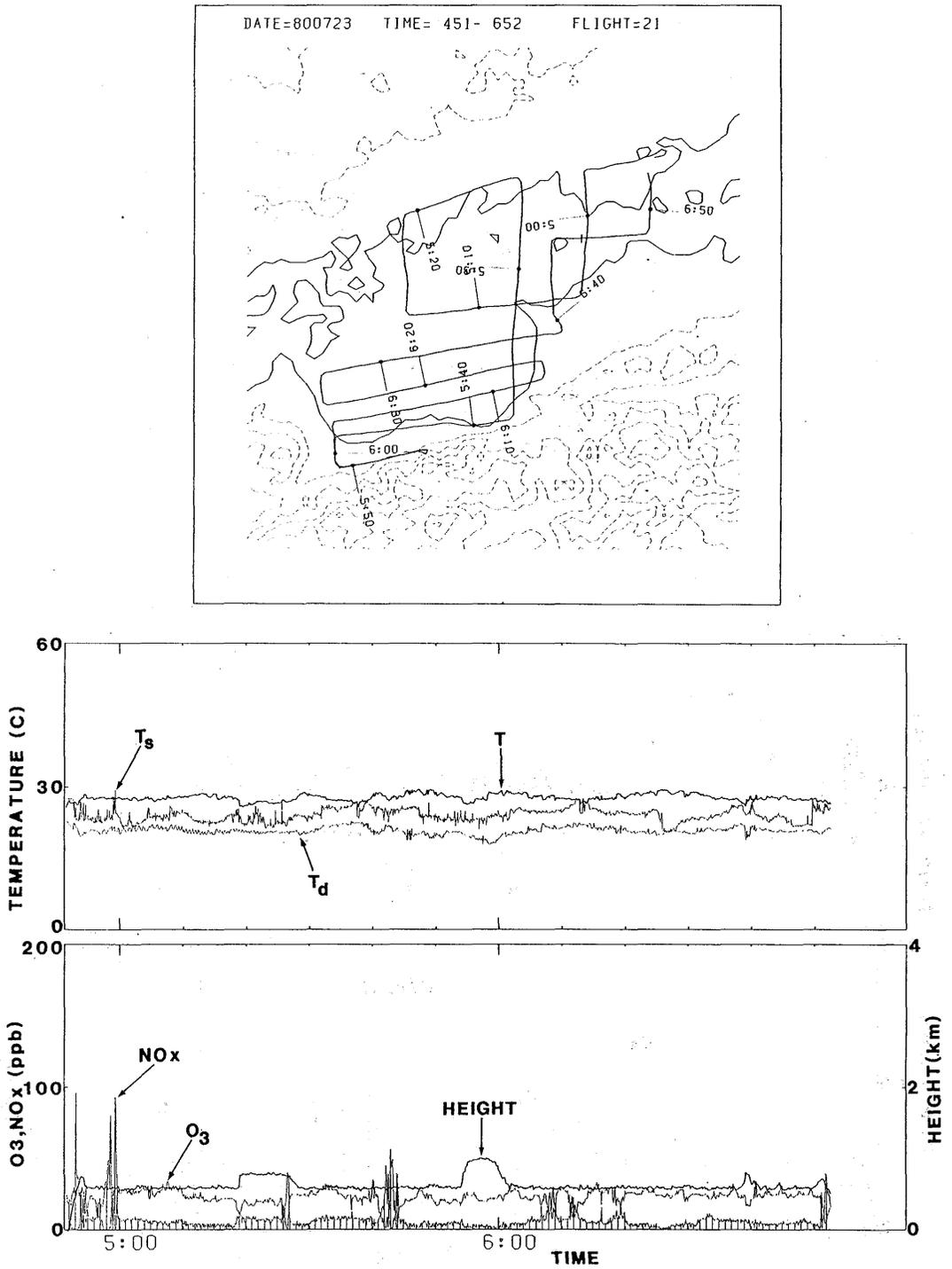


Fig 4.24. Same as in Fig. 4.21, but flight 21.

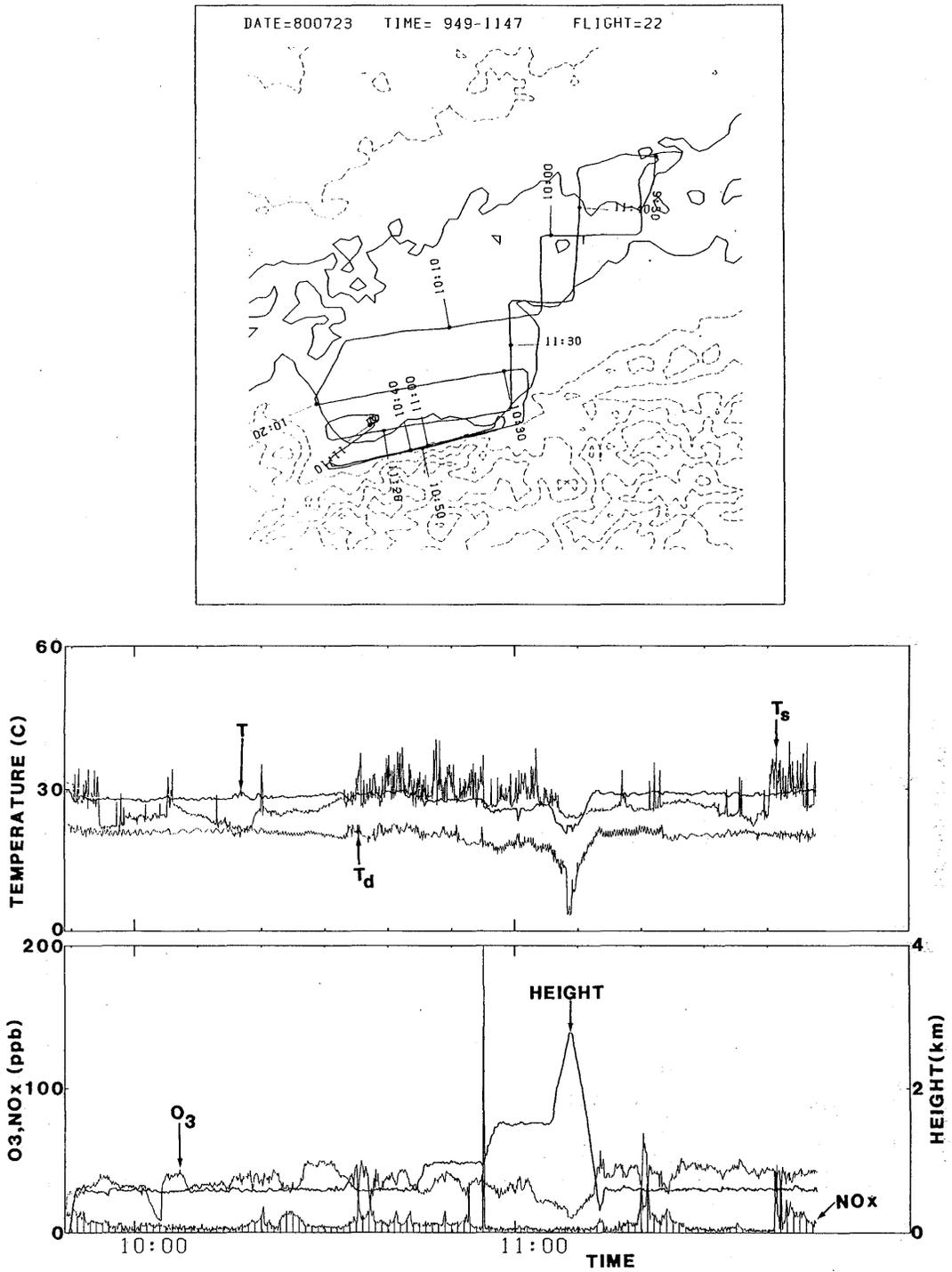


Fig. 4.25 Same as in Fig. 4.21, but flight 22.

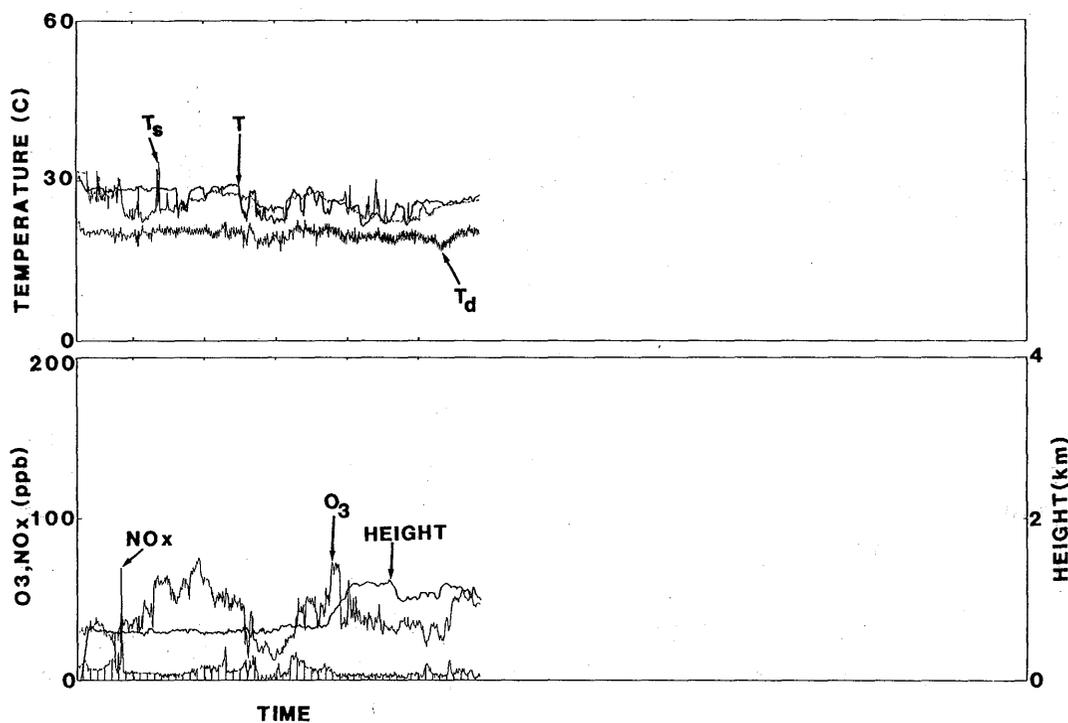
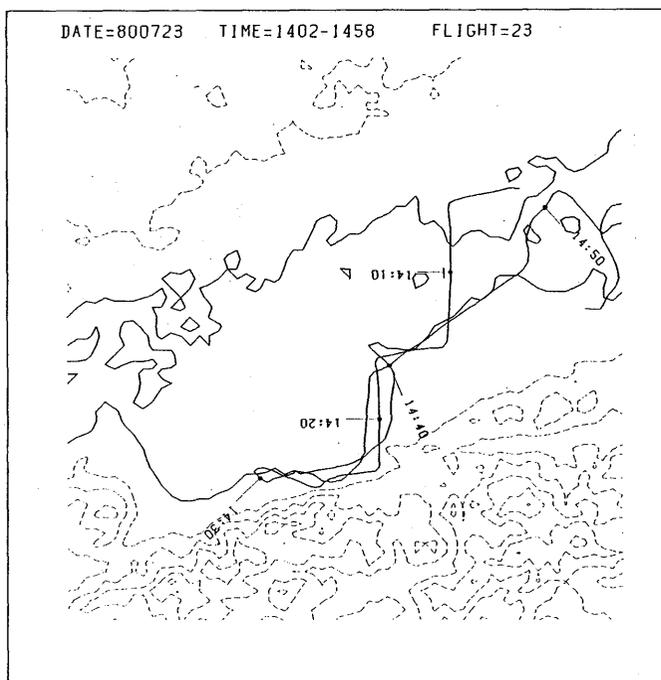


Fig. 4.26 Same as in Fig. 4.21, but flight 23.

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

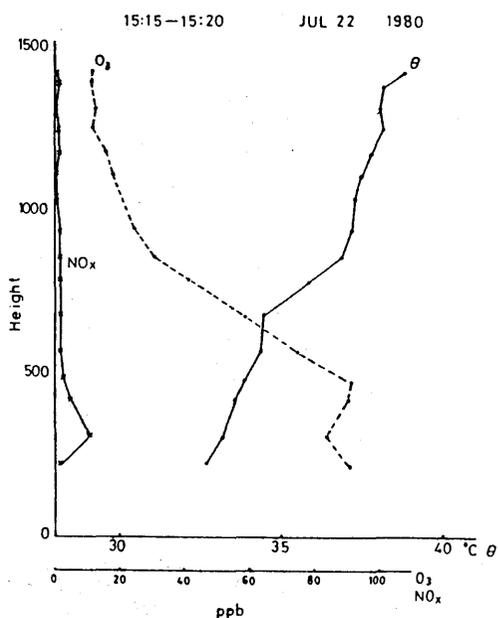


Fig. 4.27 Vertical profiles of potential temperature and concentrations of NO_x and O_3 observed in flight 13 (July 1980).

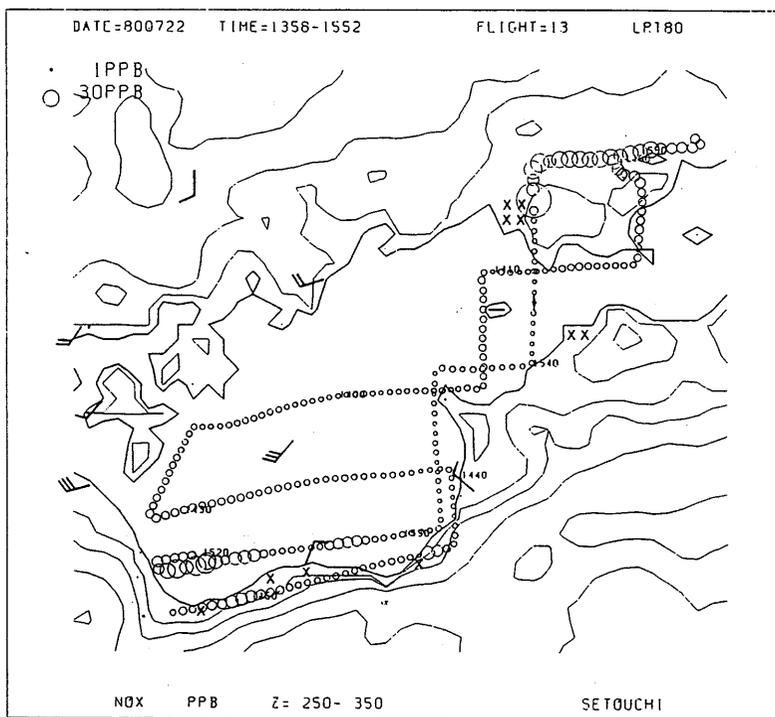


Fig. 4.28 An example of horizontal distribution of observed NO_x concentration. Flight 13, on 22 July 1980. Wind arrows indicate observed wind velocity at the level of 300 m.

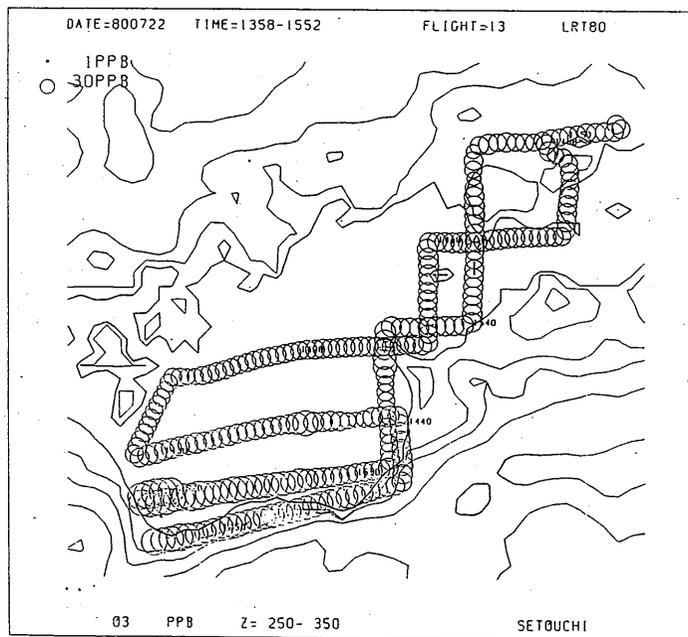


Fig. 4.29 Horizontal distribution of O₃ concentration observed at the same time as in Fig. 4.28.

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 よりは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

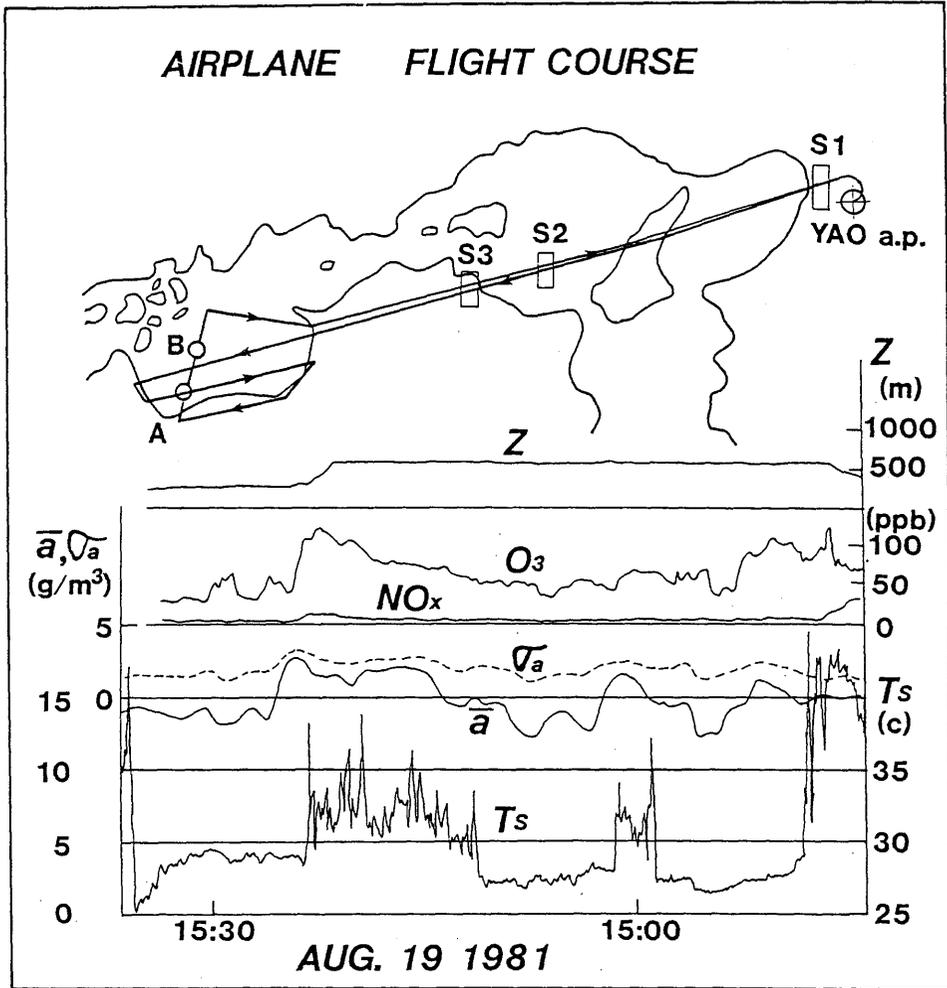


Fig. 4.30 Top: Typical flight course in the observation in 1981. Bottom: Altitude, concentrations of O₃ and NO_x, absolute humidity and its R. M. S. and surface temperature, observed on the course from Osaka to Hiuchi-nada.

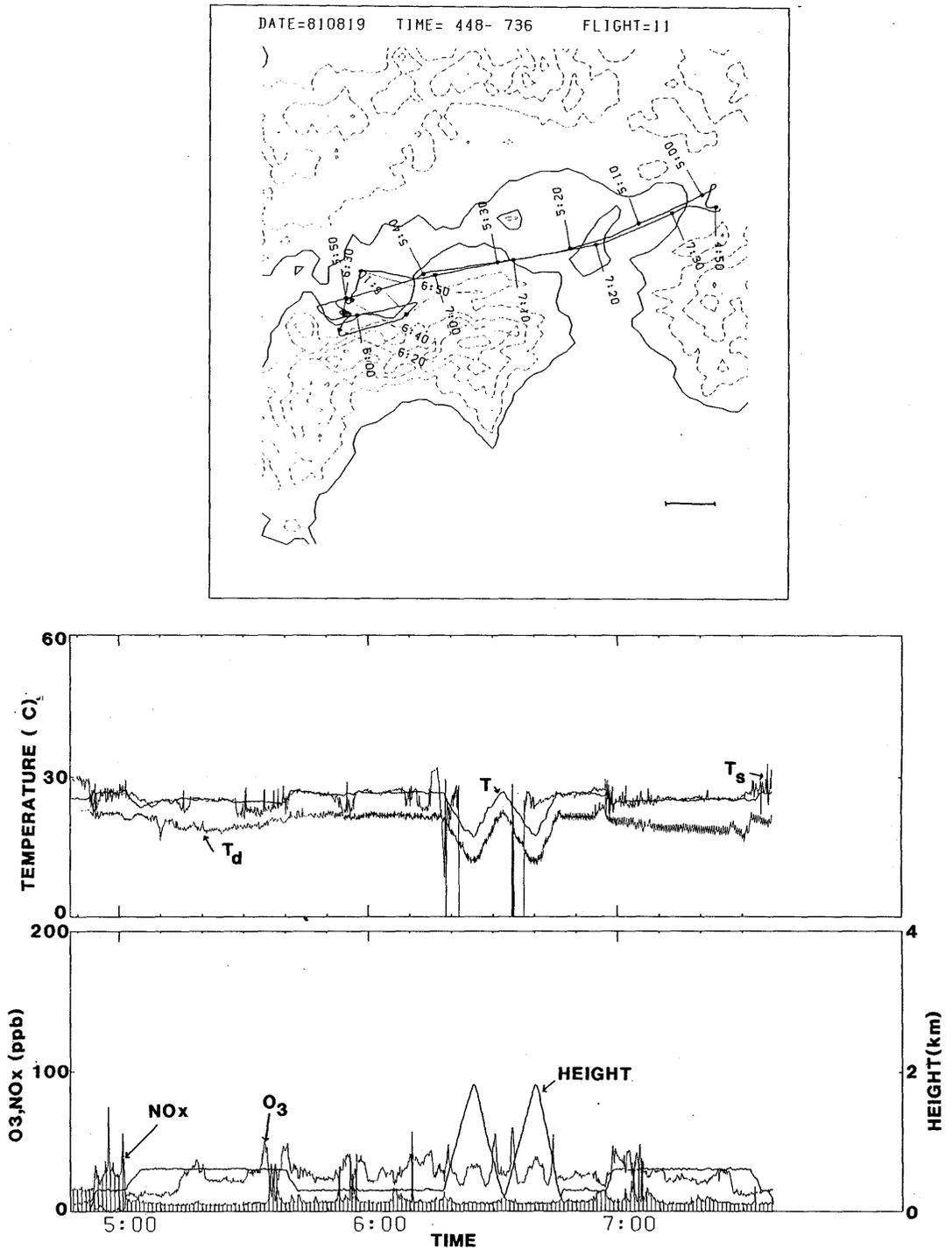


Fig. 4.31 Same as in Fig. 4.21, but flight 11 in 1981.

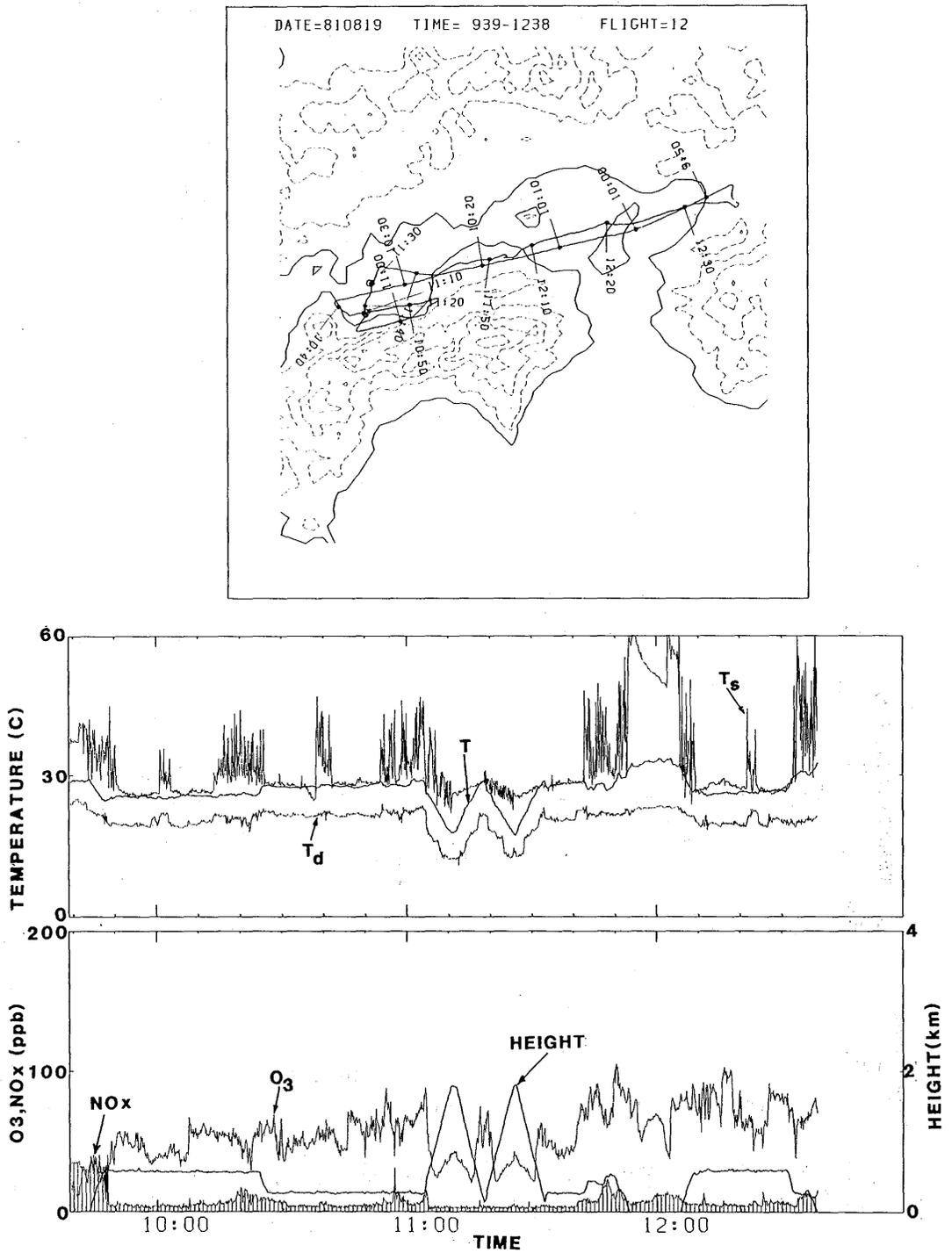


Fig 4.32 Same as in Fig. 4.21, but flight 12 in 1981.

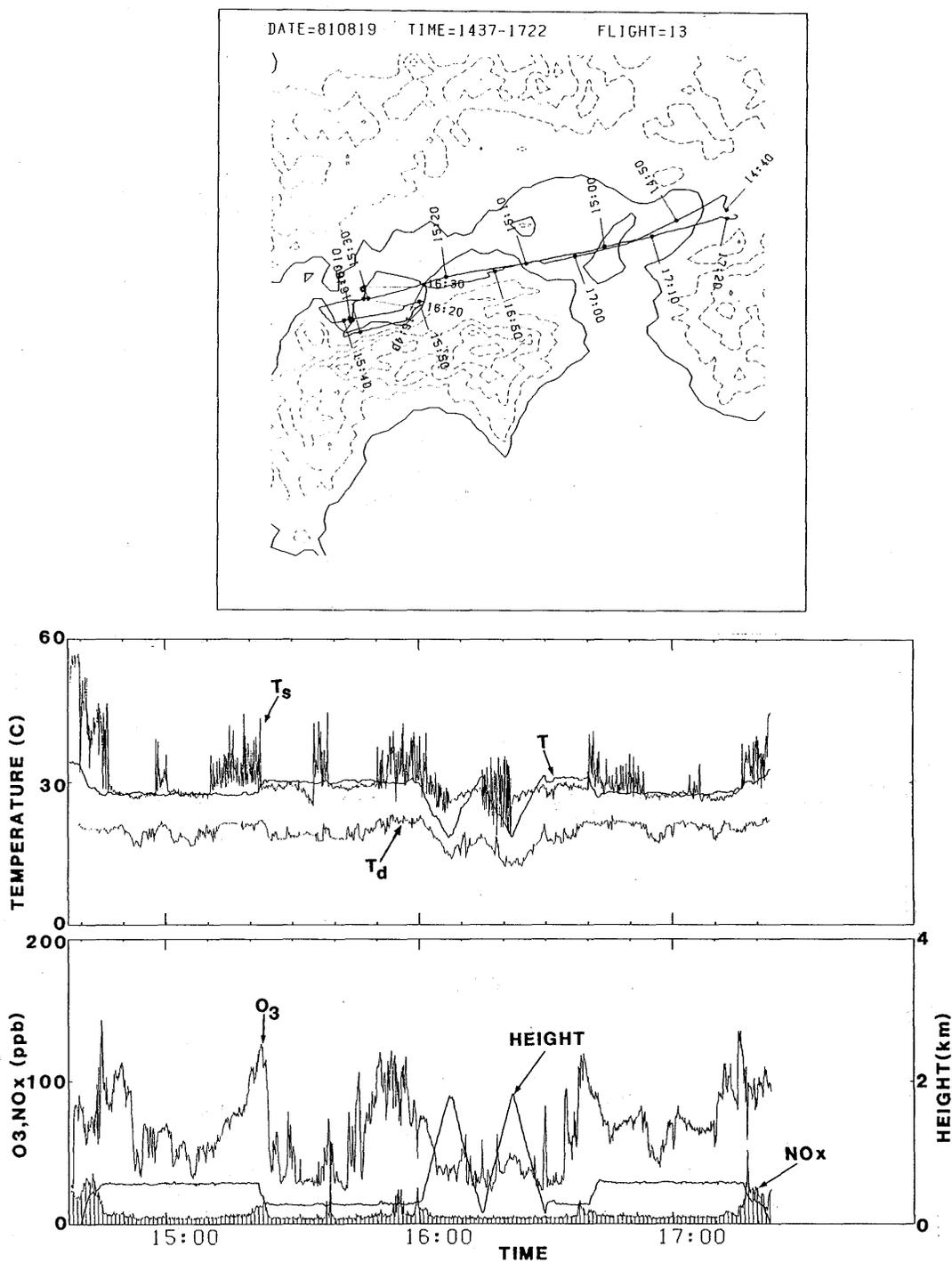


Fig. 4.33 Same as in Fig. 4.21, but flight 13 in 1981.

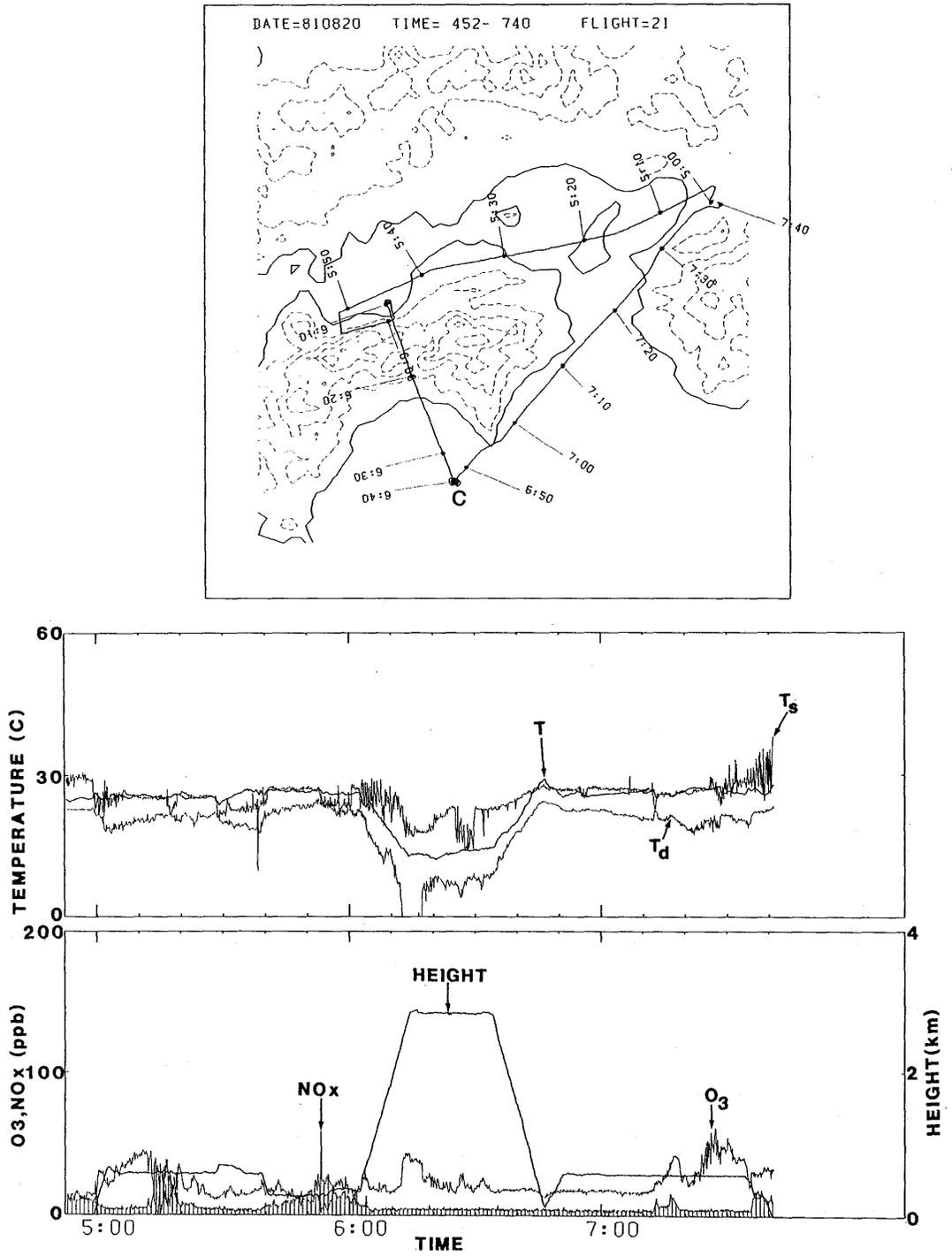


Fig 4.34 Same as in Fig. 4.21, but flight 21 in 1981.

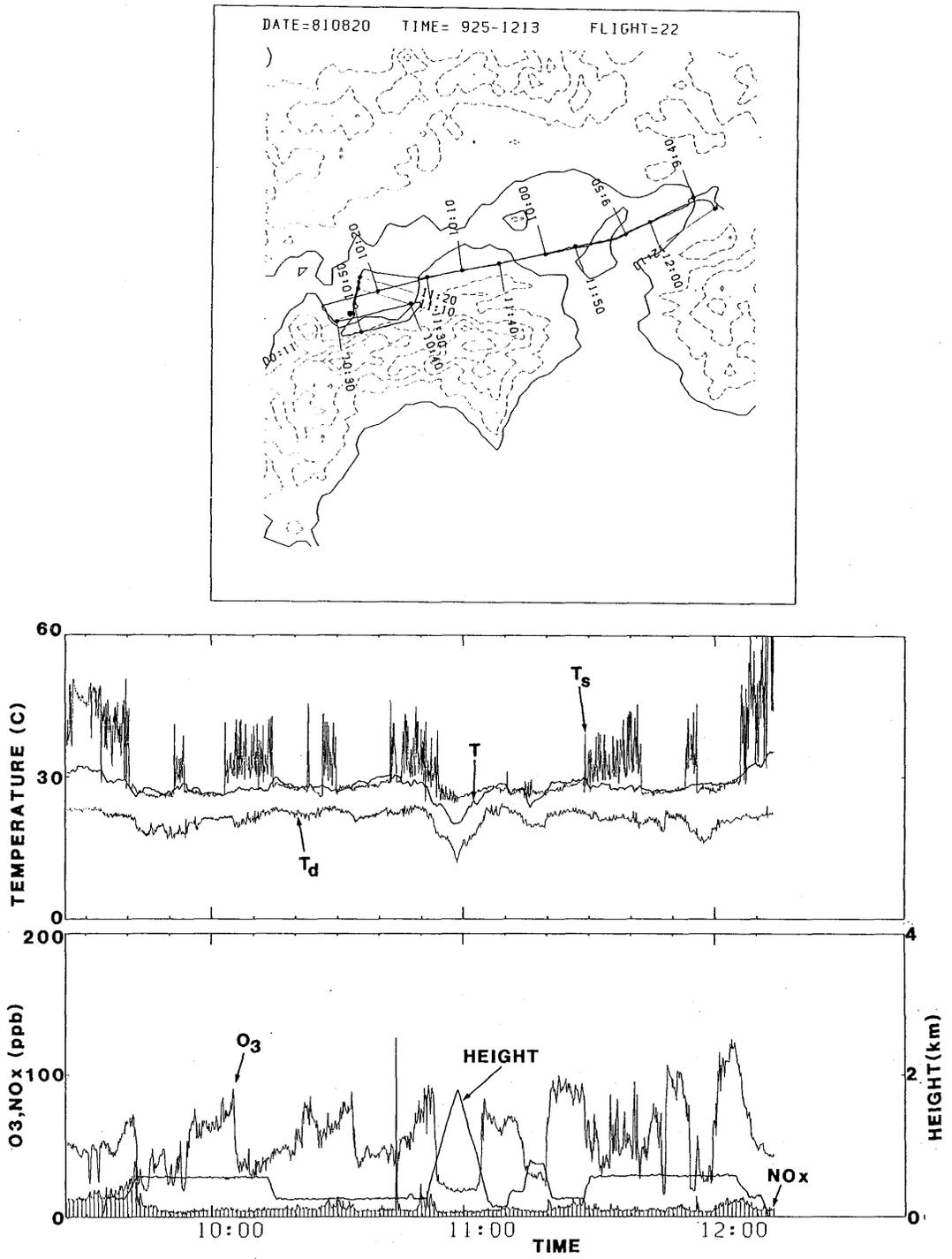


Fig. 4.35 Same as in Fig. 4.21, but flight 22 in 1981.

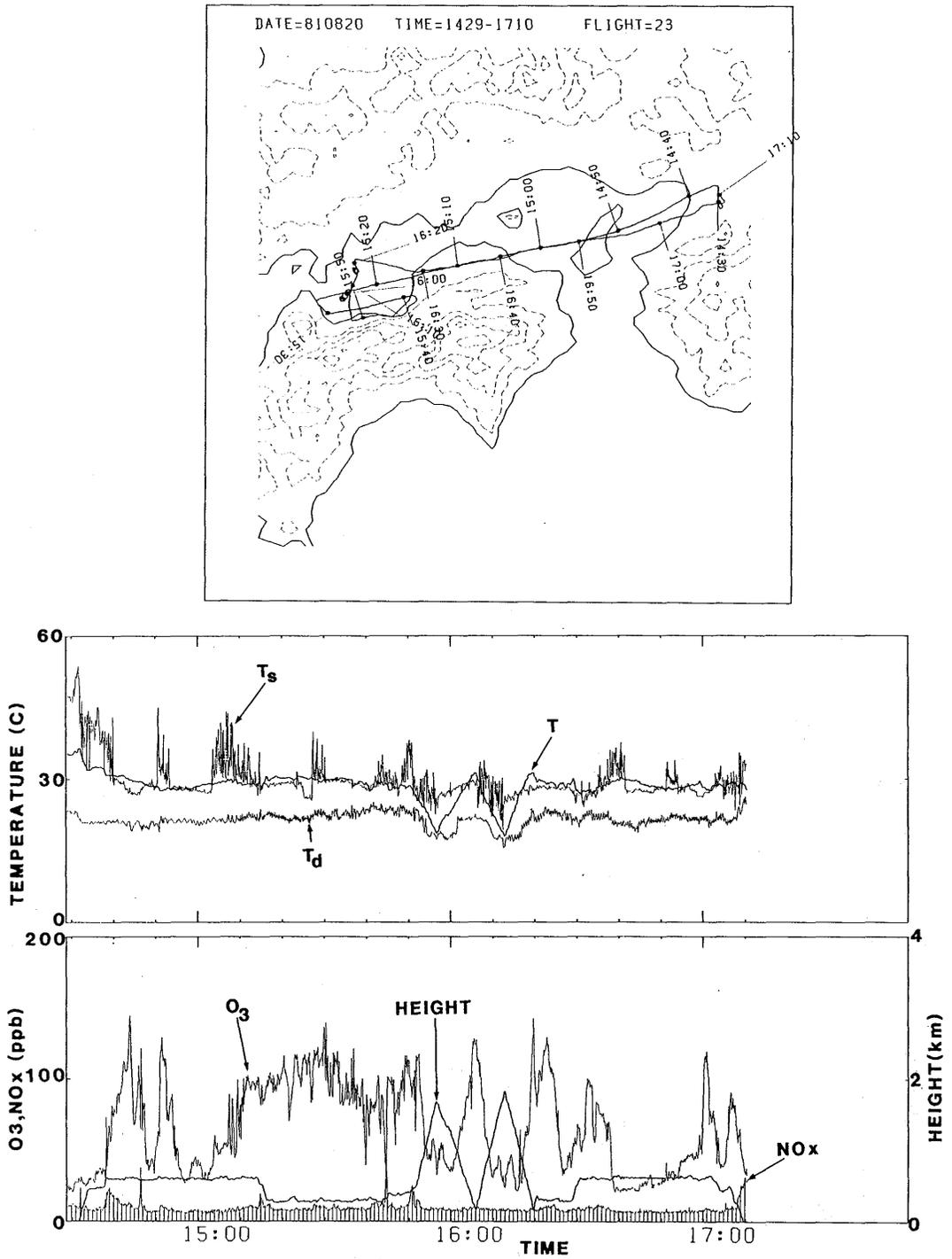


Fig. 4.36 Same as in Fig. 4.21, but flight 23 in 1981.

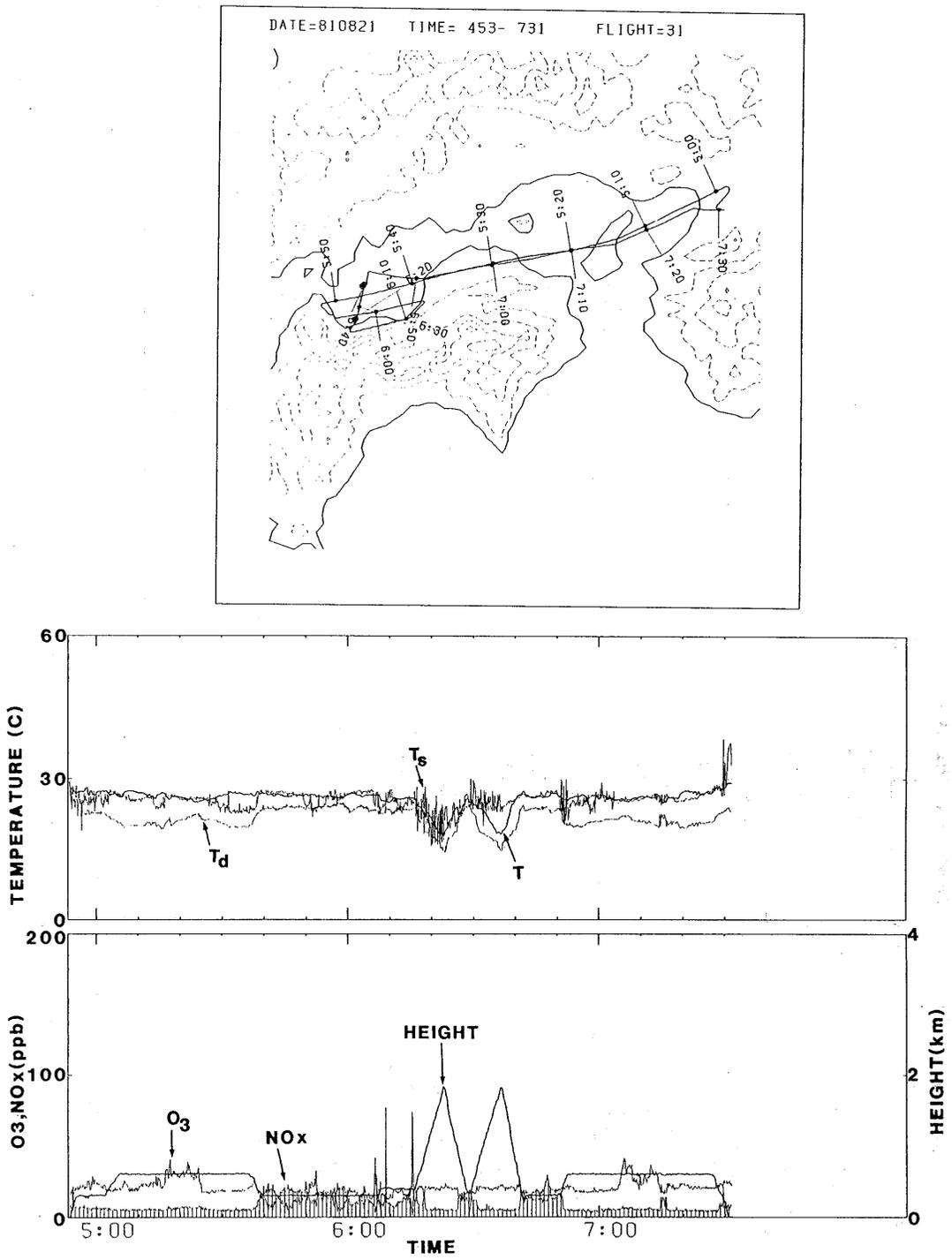


Fig. 4.37 Same as in Fig. 4, Fig. 4.21, but flight 31 in 1981.

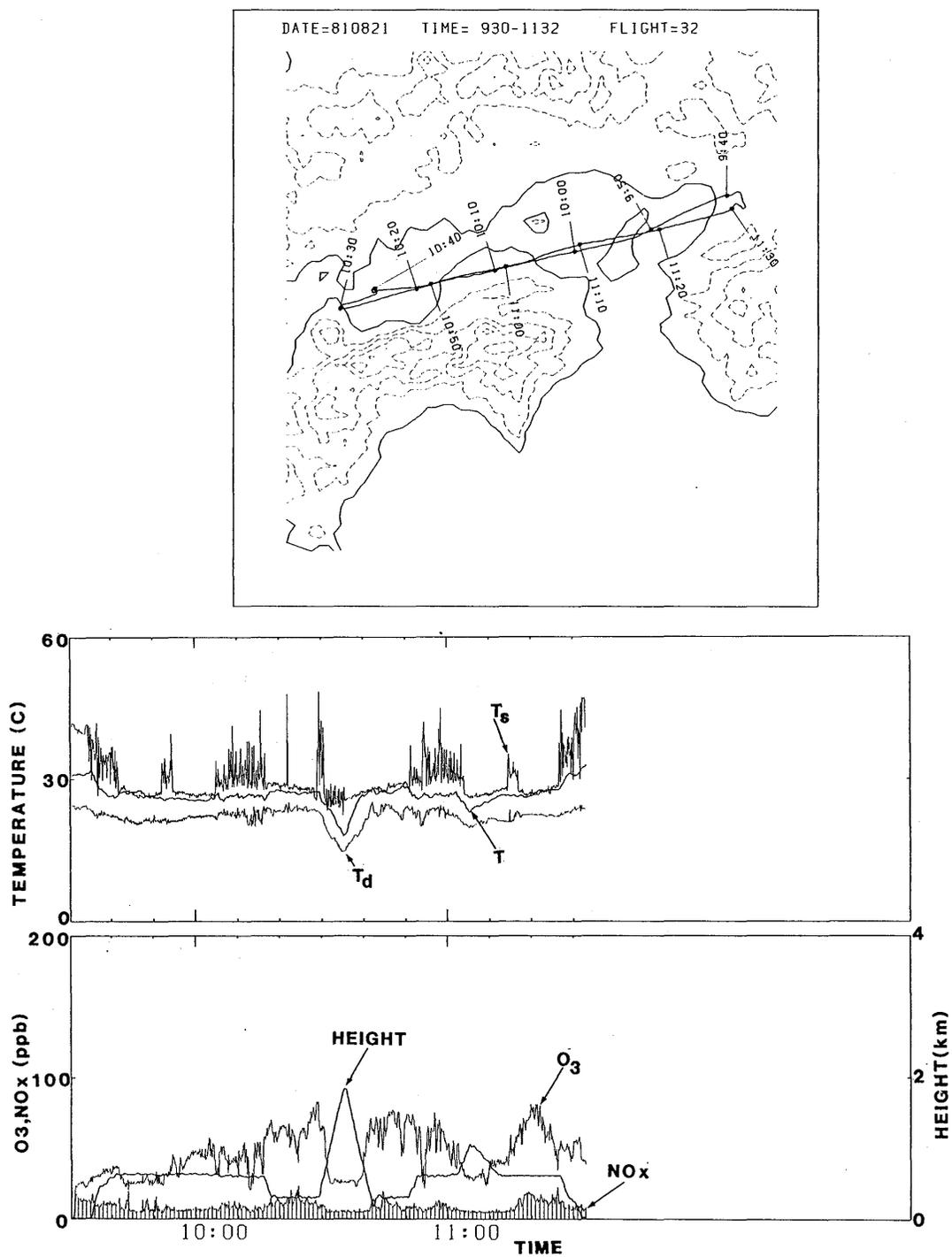


Fig. 4.38 Same as in Fig. 4.21, but flight 32 in 1981.

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がいにより、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

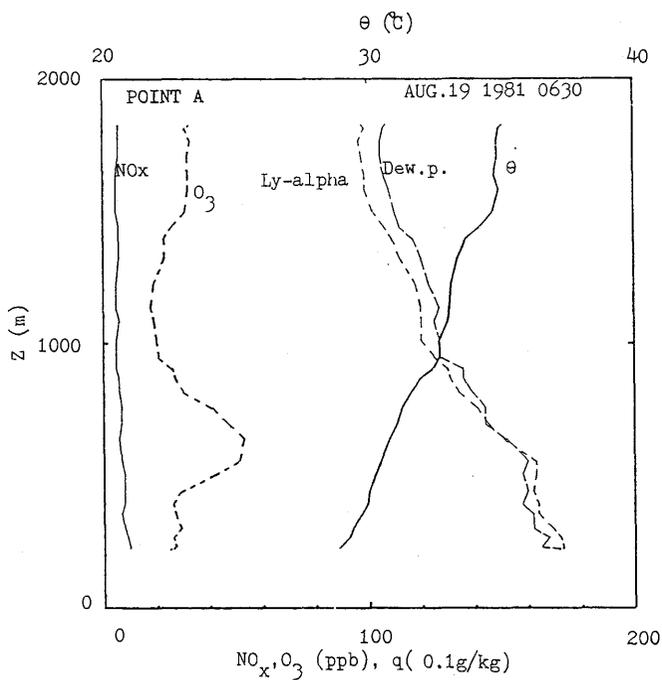


Fig. 4.39 Vertical profiles of concentrations of NO_x and O_3 , potential temperature and mixing ratio by lyman-alpha humidimeter and dew-point temperature observed at the point A in Fig.4.30 about at 0630 JST, 19 Aug. 1981.

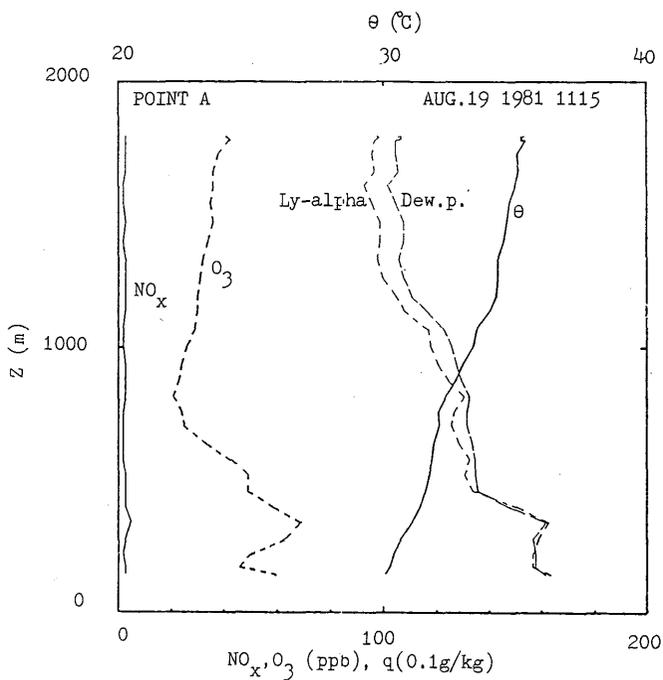


Fig. 4.40 Same as in Fig. 4.39, but about at 1115 JST, 19 Aug.

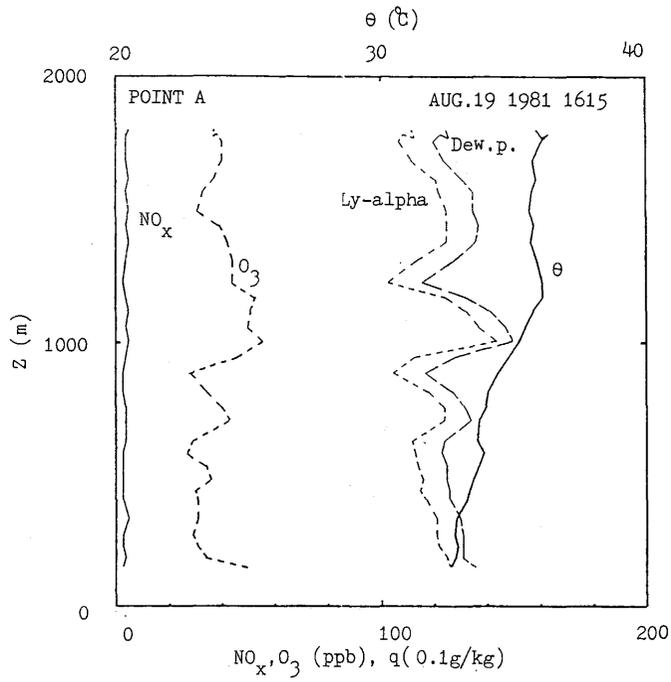


Fig. 4.41 Same as in Fig. 4.39, but about at 1615 JST, 19 Aug.

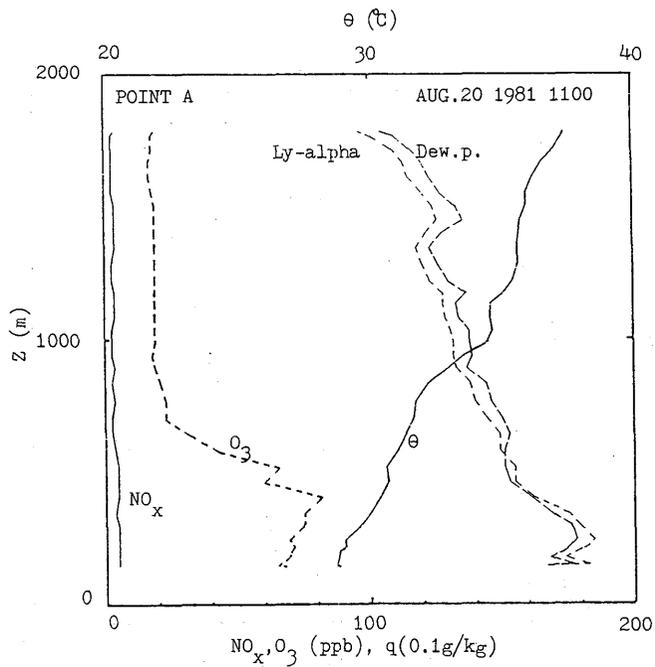


Fig. 4.42 Same as in Fig. 4.39, but about at 1100 JST, 20 Aug.

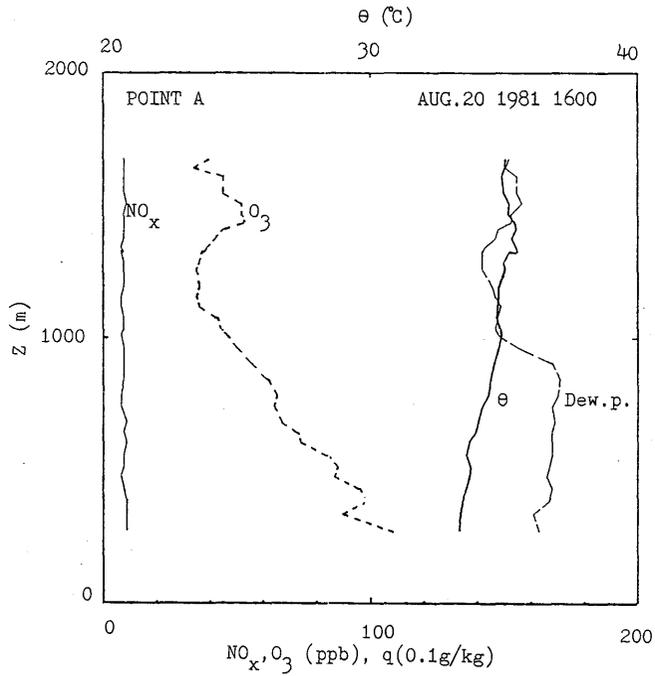


Fig. 4.43 Same as in Fig. 4.39, but about at 1600 JST, 20 Aug.

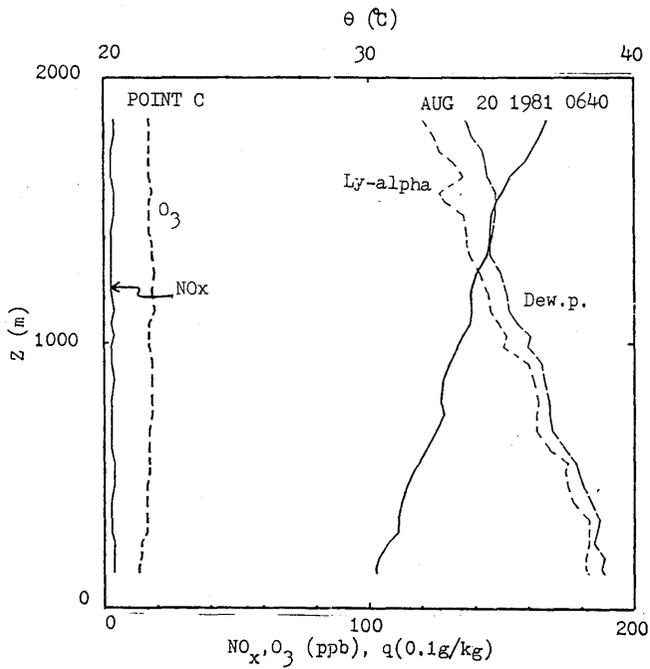


Fig. 4.44 Same as in Fig. 4.39, but about at 0640 JST, 20 Aug. at the point C in Fig. 4.34.

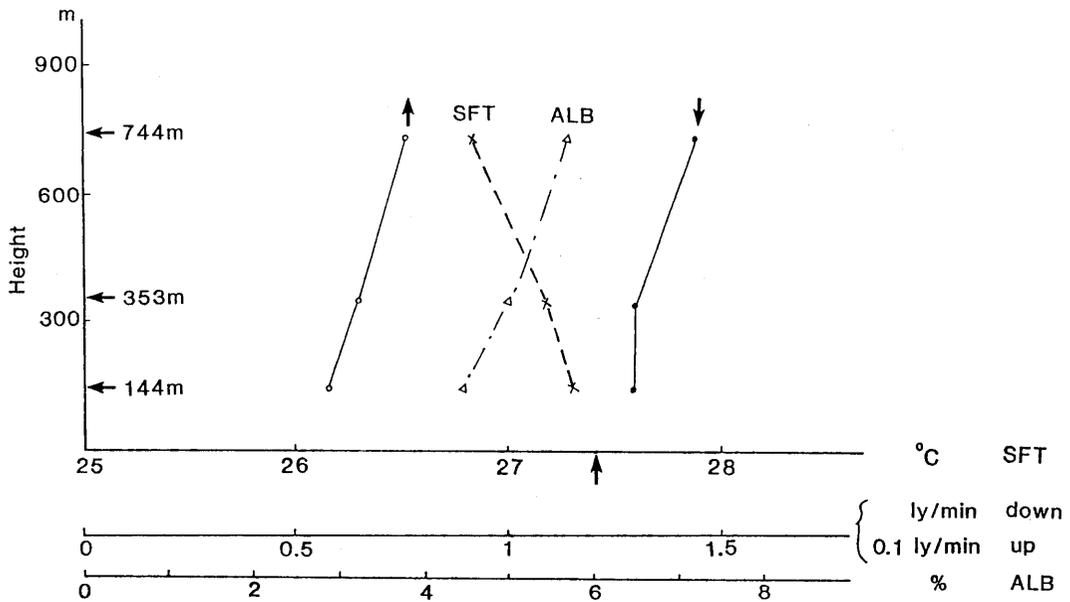


Fig. 4.45 Relationship between altitude and observed value of upward and downward short wave radiation, sea surface temperature and albedo. An arrow directed upward indicates sea water temperature observed by a ship at the same time.

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。

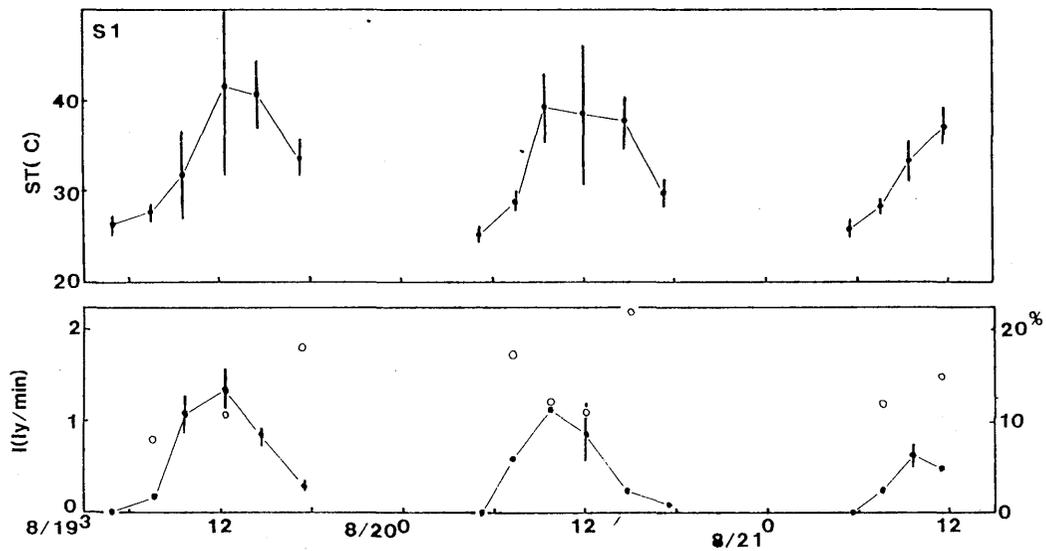


Fig. 4.46 Surface temperature (top, closed circles), short wave radiation (bottom, closed circles) and albedo (bottom, open circles) at S1 in Fig. 4.30. Error bars indicate R. M. S. of surface temperature and short wave radiation.

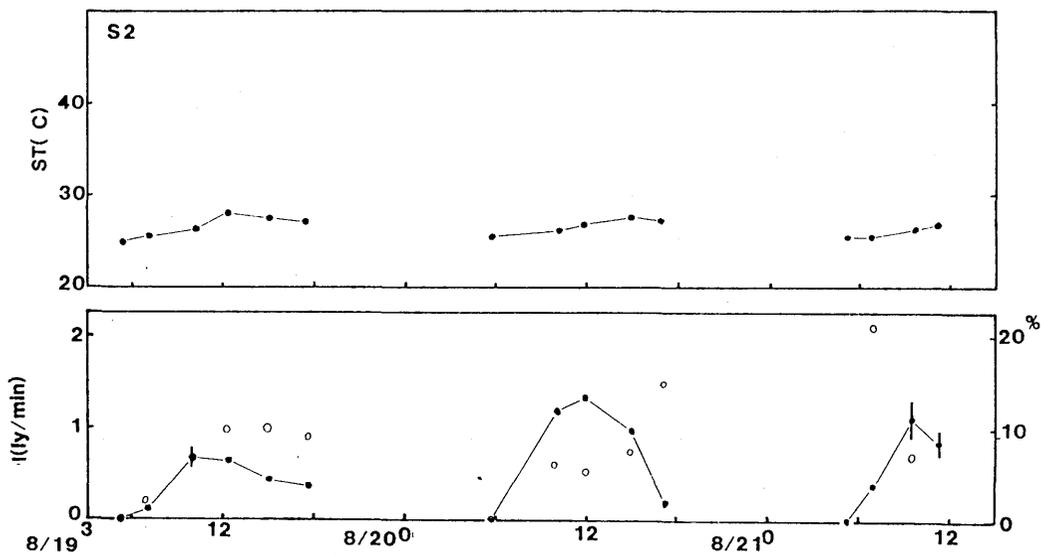


Fig. 4.47 Same as in Fig. 4.46, but at S2.

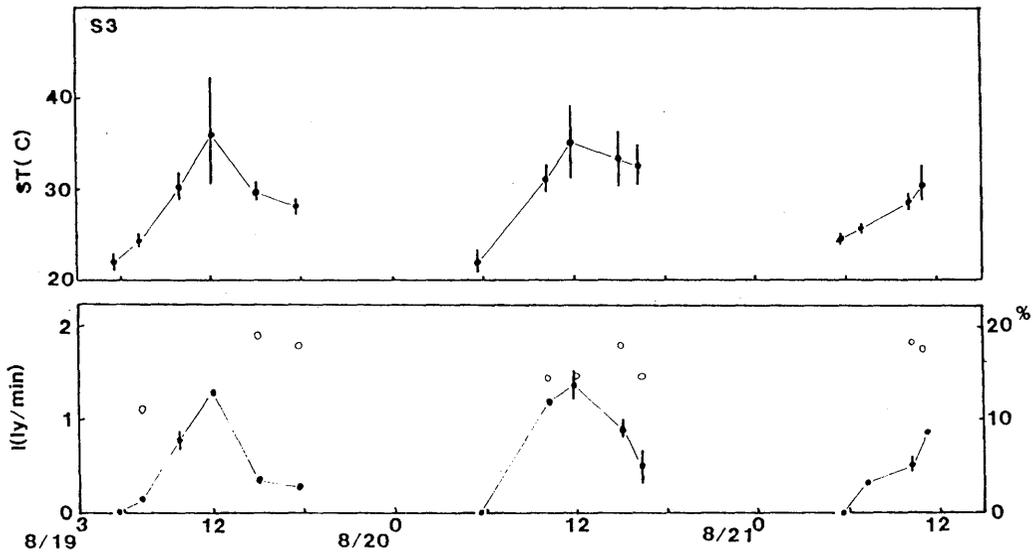


Fig. 4.48 Same as in Fig. 4.46, but at S3.

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. ($\sigma_a \equiv \sqrt{a'^2}$) 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)の例で明らかのように、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		A11	A13	A21	A22	A31
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 Ts	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	Vz = 0	0.02973	0.03929	0.03650	0.03267	0.03356
	H _{SPAN}	2983	3069	3030	3035	3010

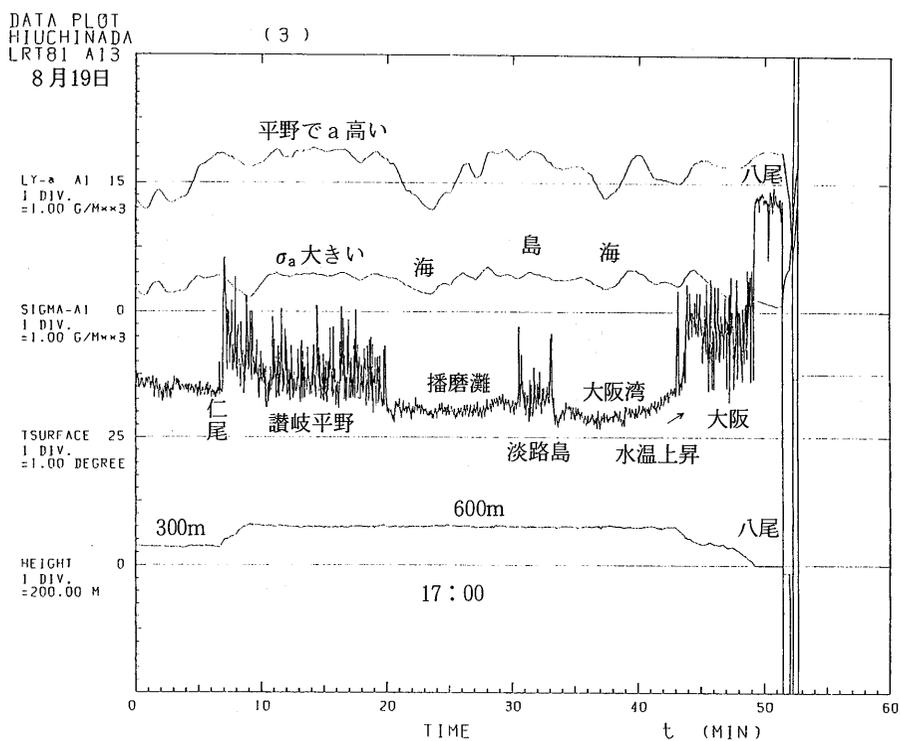
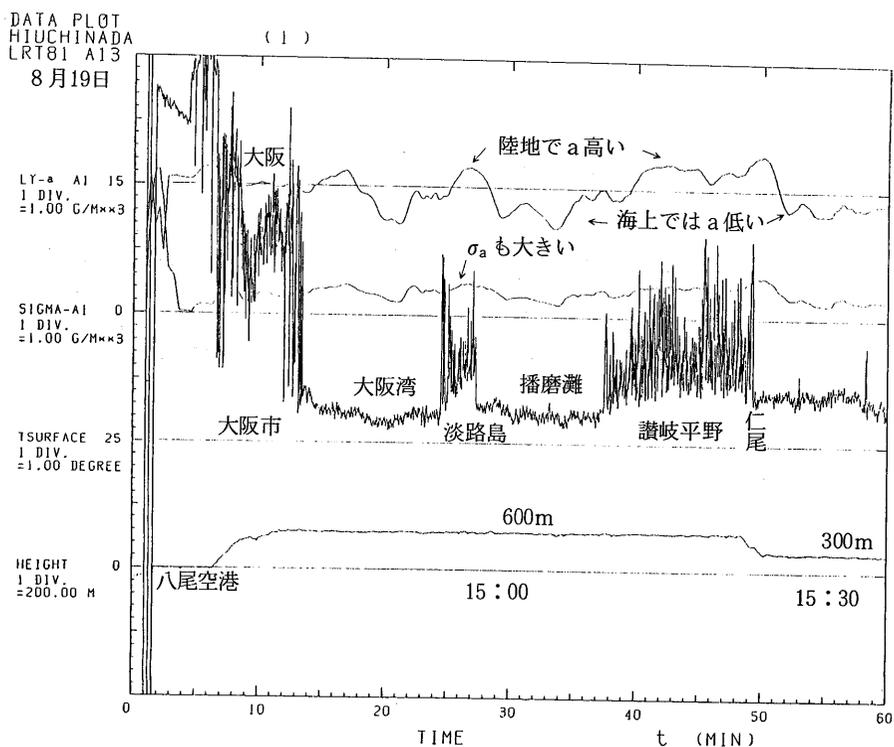
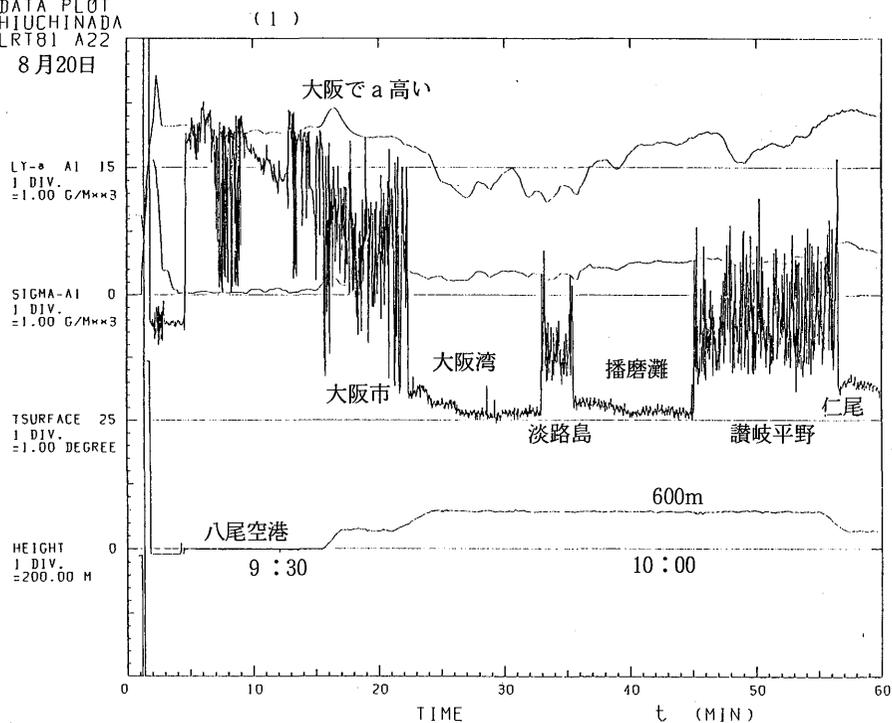


Fig. 4.49 (a) Variance of moisture, surface temperature and altitude on the course between Hiuchi-nada and Osaka on 19 Aug. 1981.

DATA PLOT
HIUCHINADA
LRT81 A22

8月20日



DATA PLOT
HIUCHINADA
LRT81 A22

8月20日

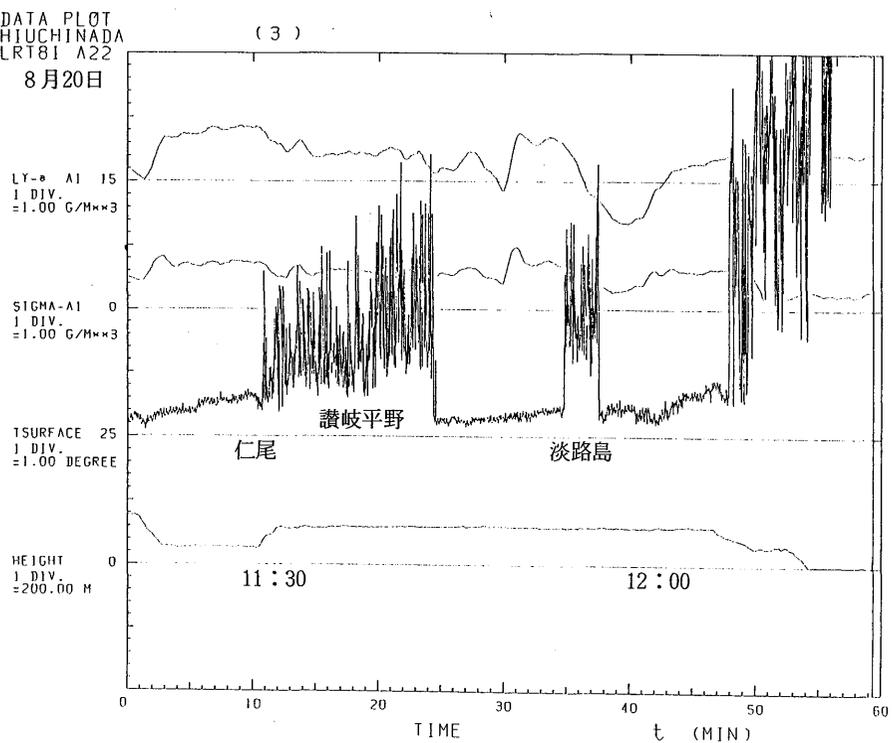


Fig. 4.49 (b) Same as in Fig. 4.49 (a), but on 20 Aug.

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 0.3~0.5 μm) 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。

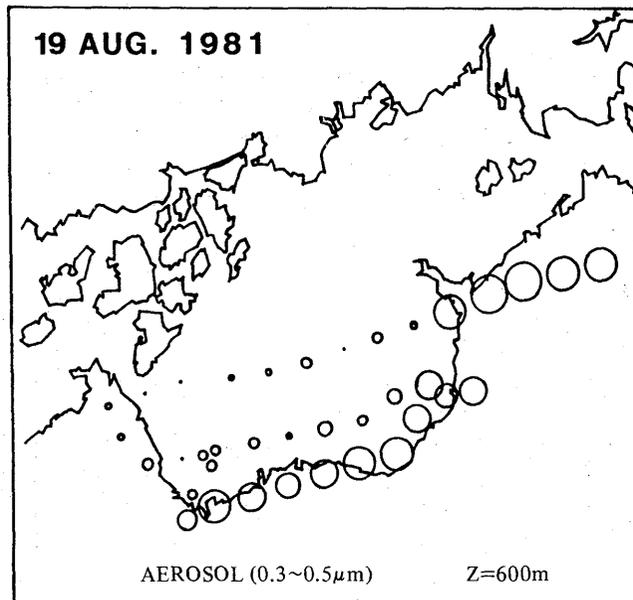


Fig. 4.50 Concentration of particles observed in the afternoon on 19 Aug. 1981.

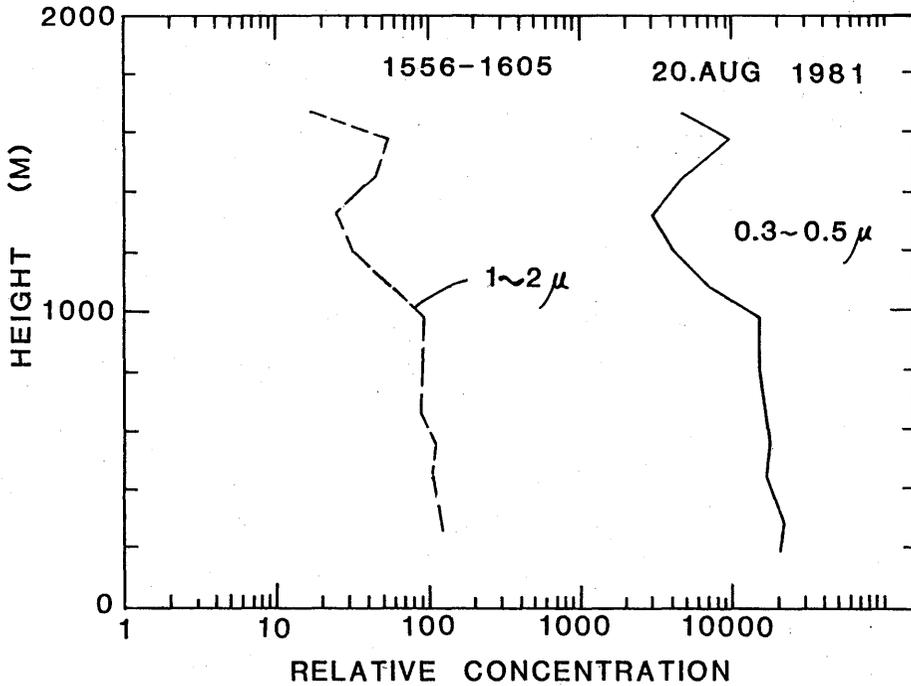


Fig. 4.51 Vertical profiles of concentration of particles.

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

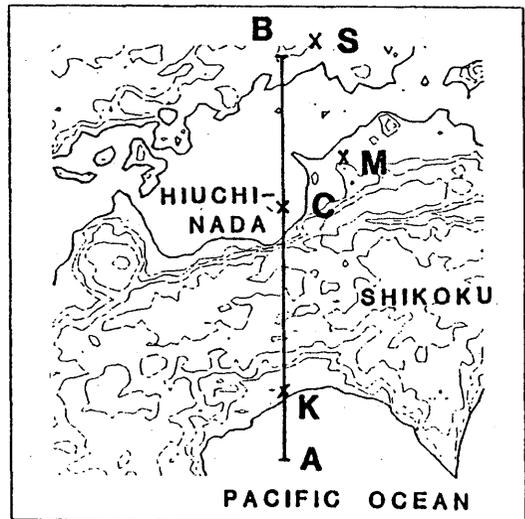


Fig. 4.52 Flight course of aircraft observation. Period: 27-29 July 1982. S, K and M indicate upper layer wind observation points, Sohja, Manno and Kohchi, respectively.

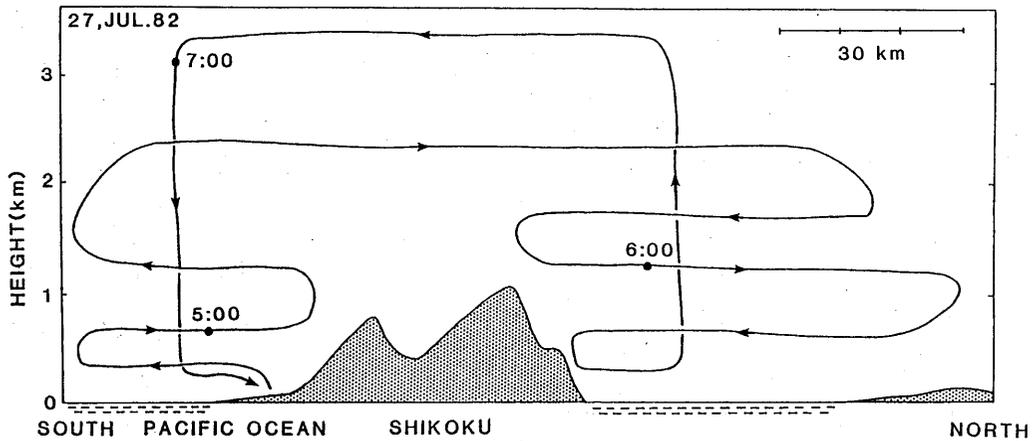


Fig. 4.53 A side view of the flight course.

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

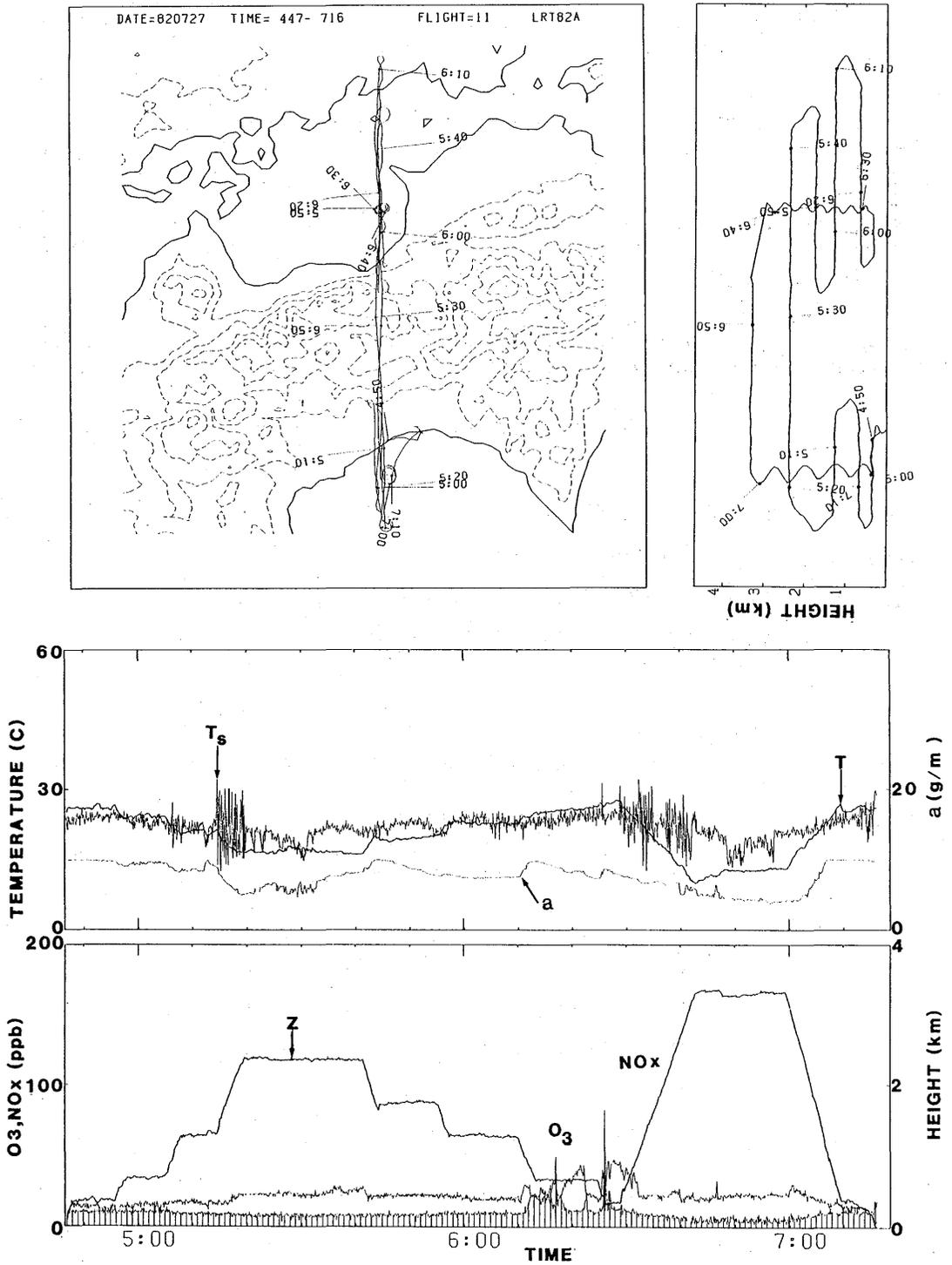


Fig. 4.54 Flight course and time (top left), a side view of the course (top right) and examples of observed data (bottom two boxes), flight 11, in July 1982.

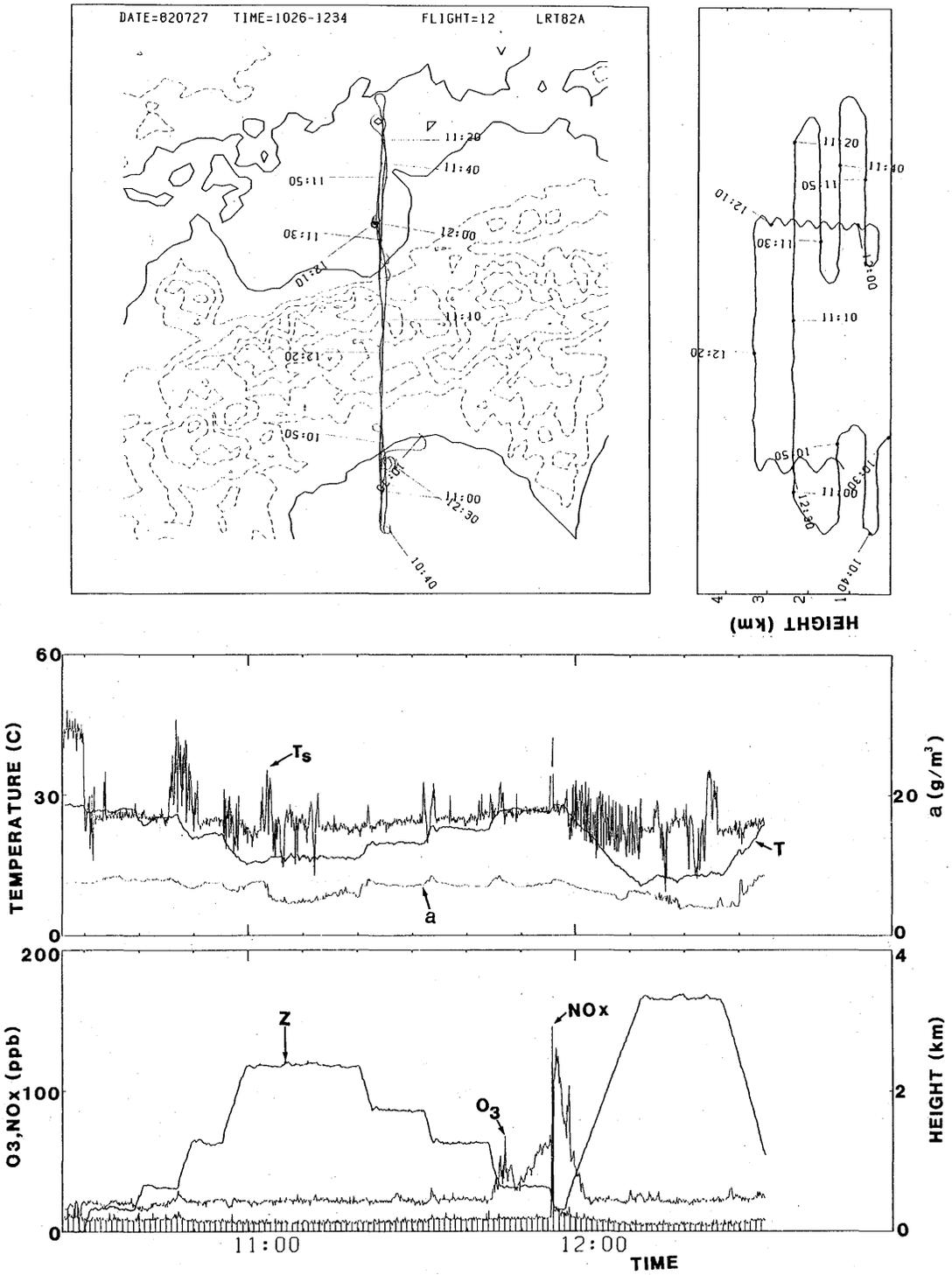


Fig. 4.55 Same as in Fig. 4.54, but flight 12.

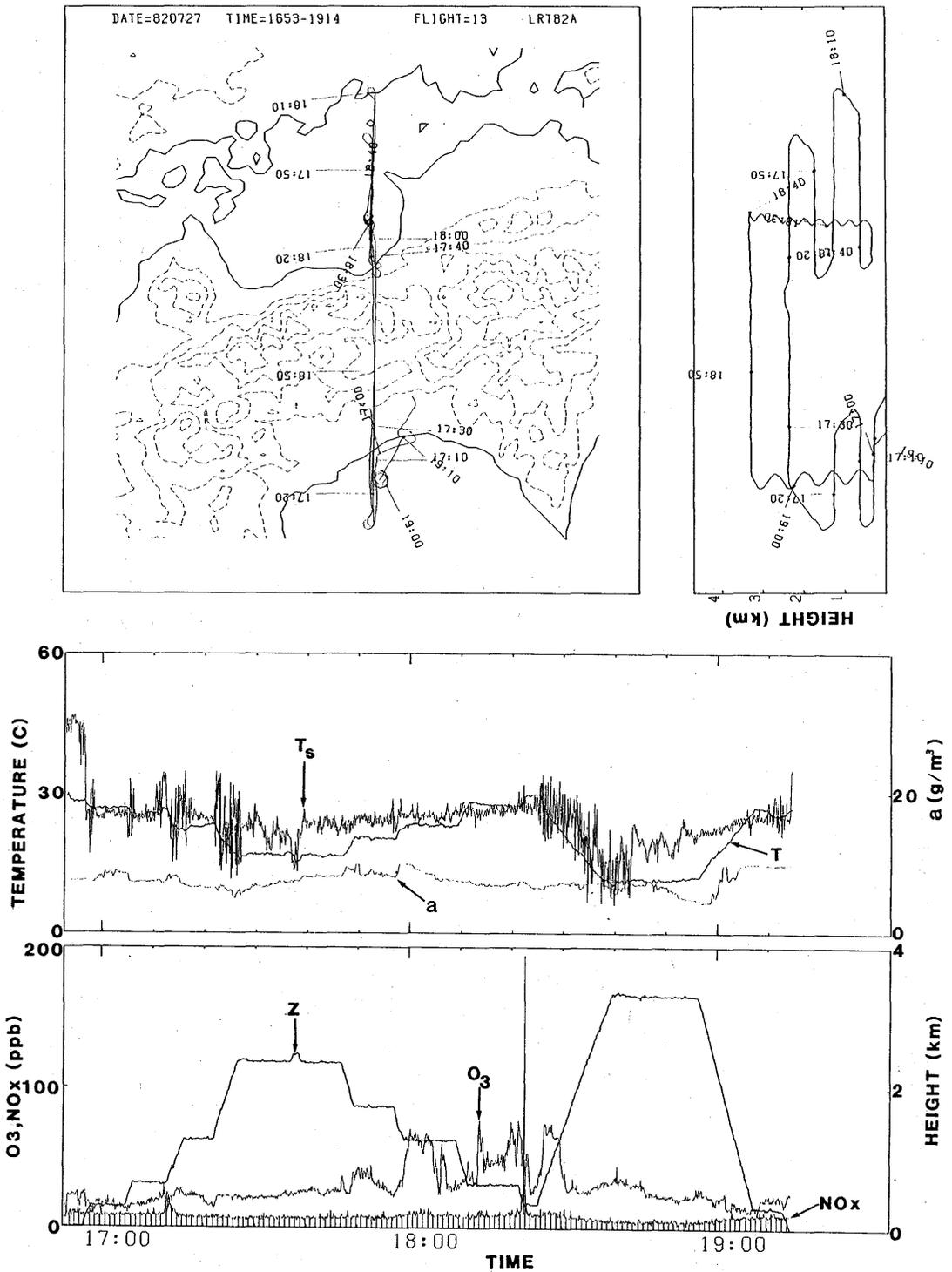


Fig. 4.56 Same as in Fig. 4.54, but flight 13.

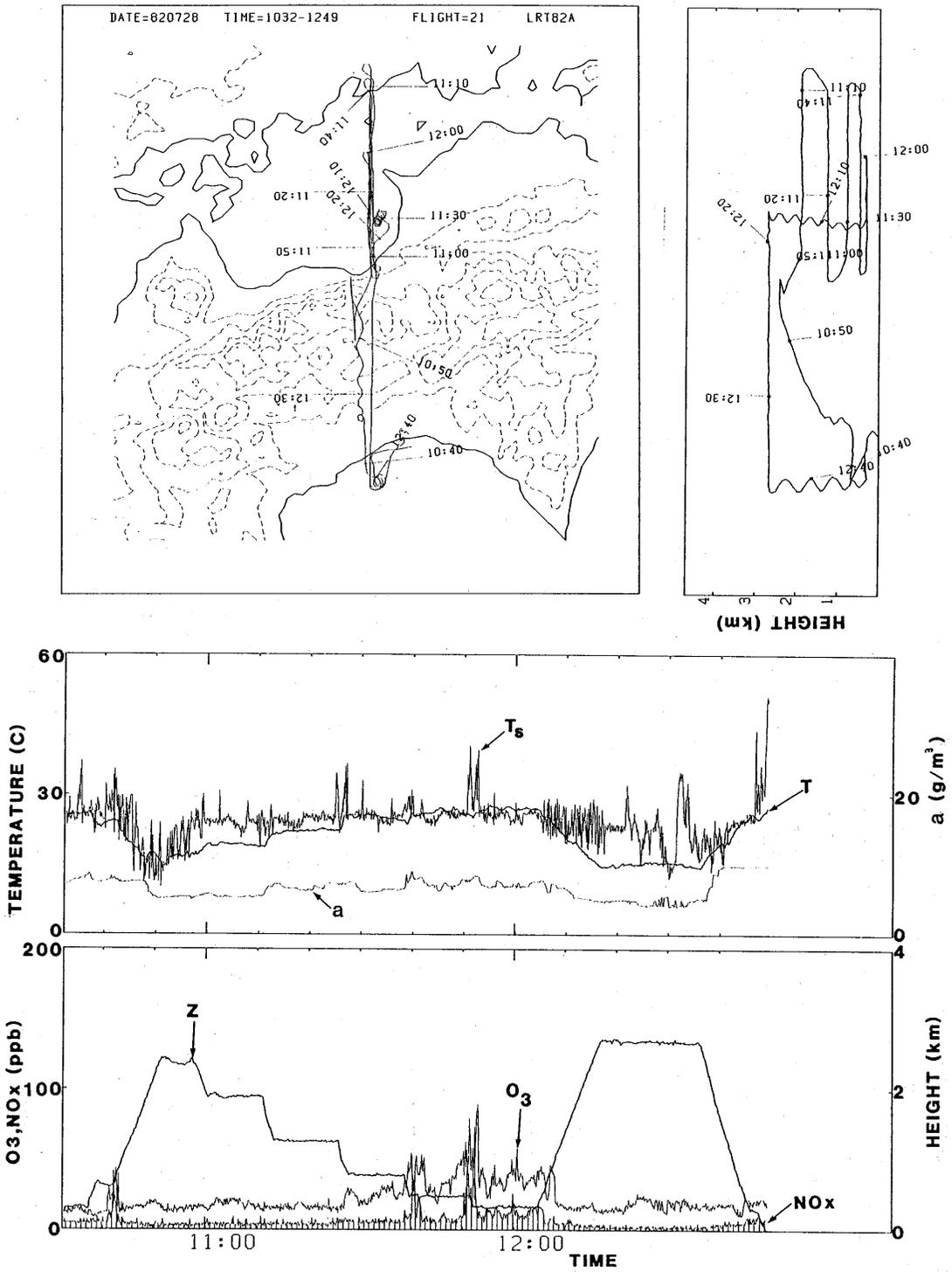


Fig. 4.57 Same as in Fig. 4.54, but flight 21.

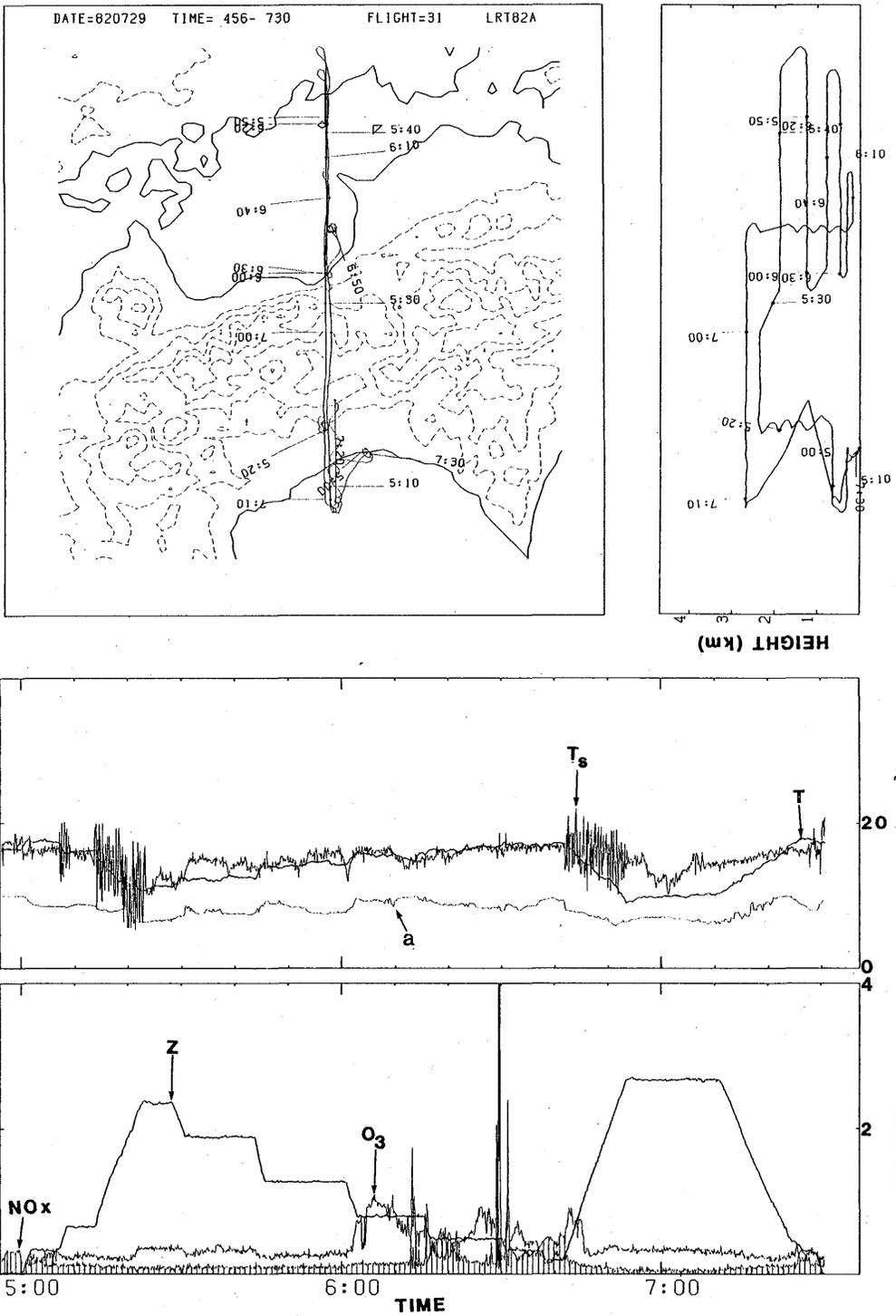


Fig. 4.58 Same as in Fig. 4.54, but flight 31.

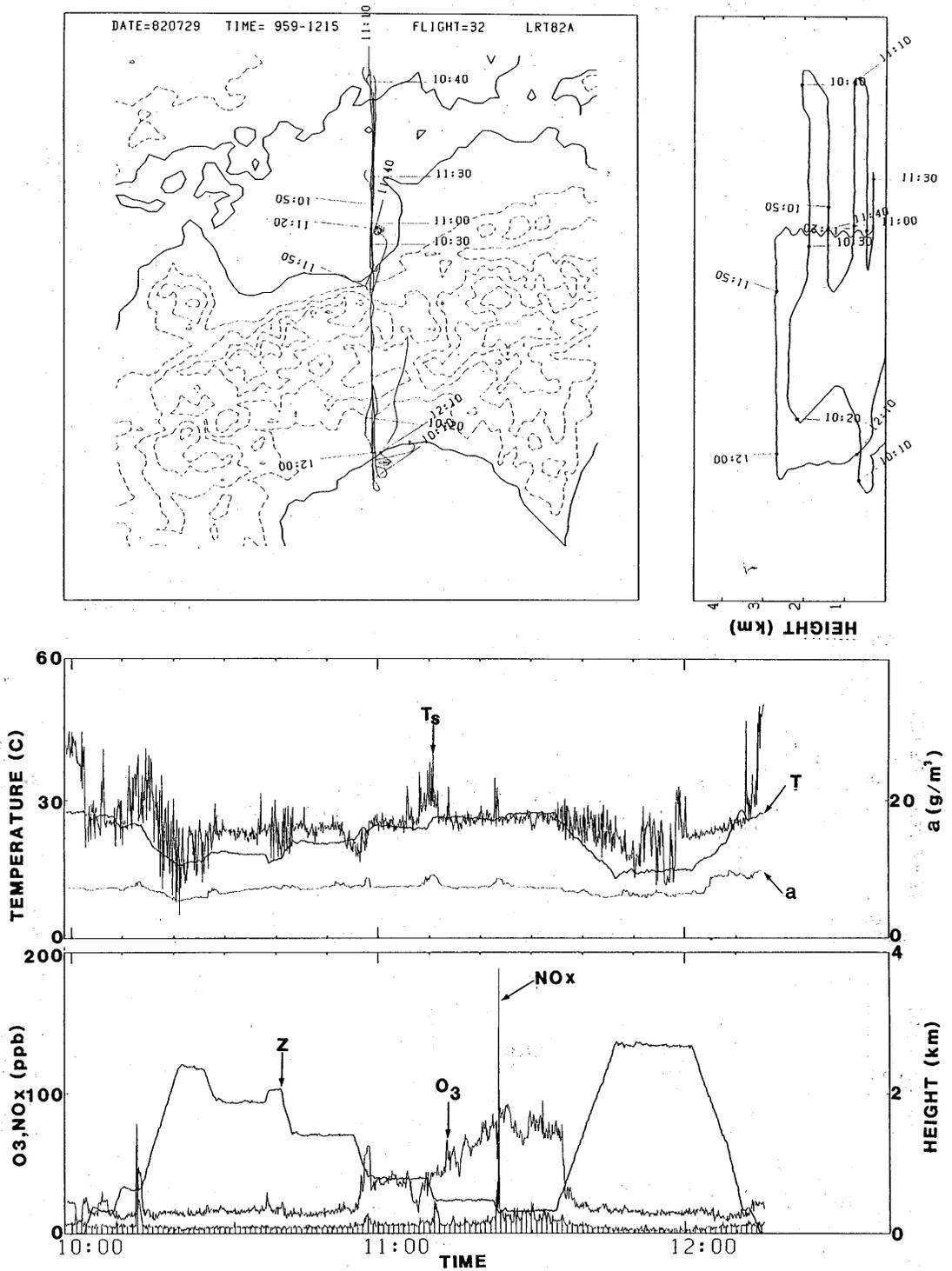


Fig. 4.59 Same as in Fig. 4.54, but flight 32.

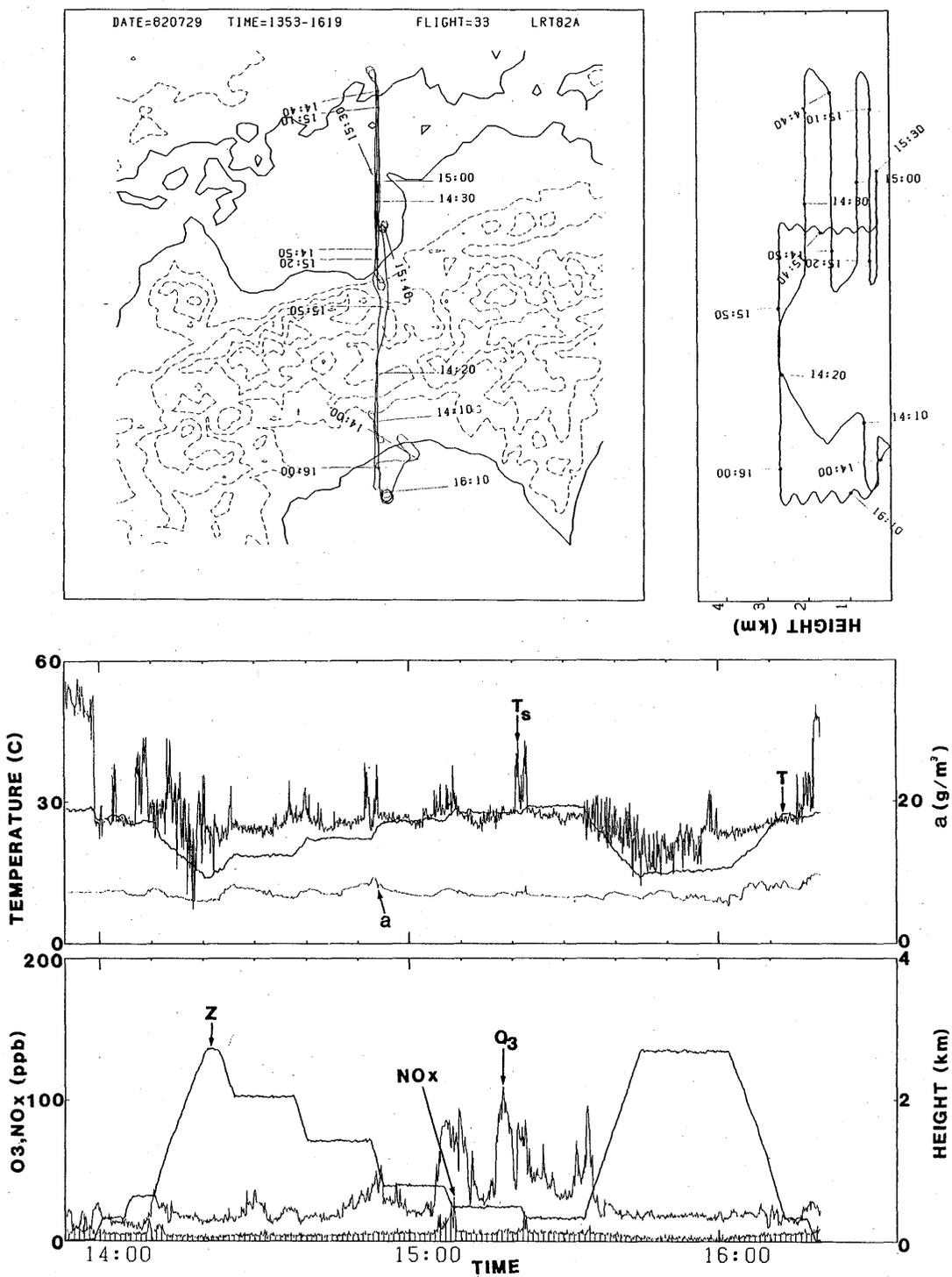


Fig. 4.60 Same as in Fig. 4.54, but flight 33.

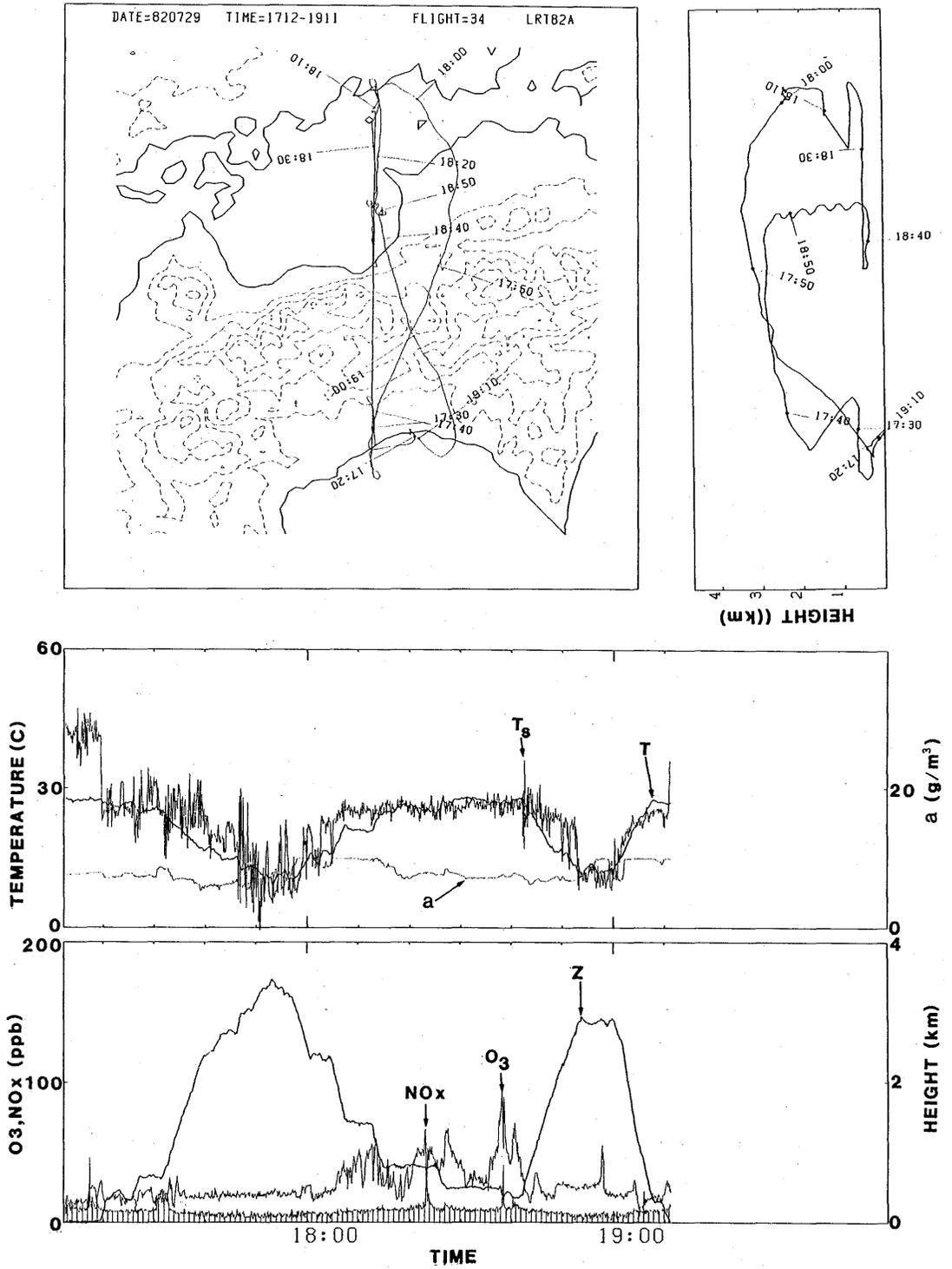


Fig. 4.61 Same as in Fig. 4.54, but flight 34.

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NO₂の和、ppb)、エーロゾル (0.3~0.5 μm、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、

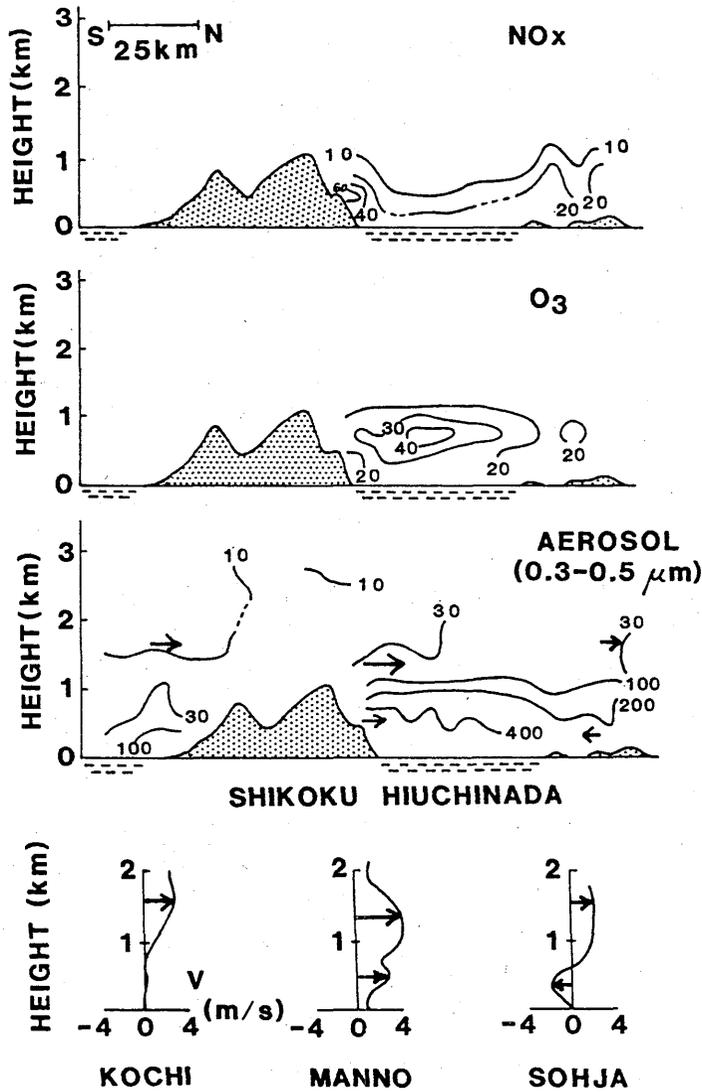


Fig. 4.62 Vertical cross-section of concentrations observed by aircraft in the early morning on 29 July 1982. Top: NO_x(ppb), the second: O₃ (ppb), the third: particle (relative value), bottom: vertical profiles of north-south component of wind velocity at Kohchi, Manno and Sohja.

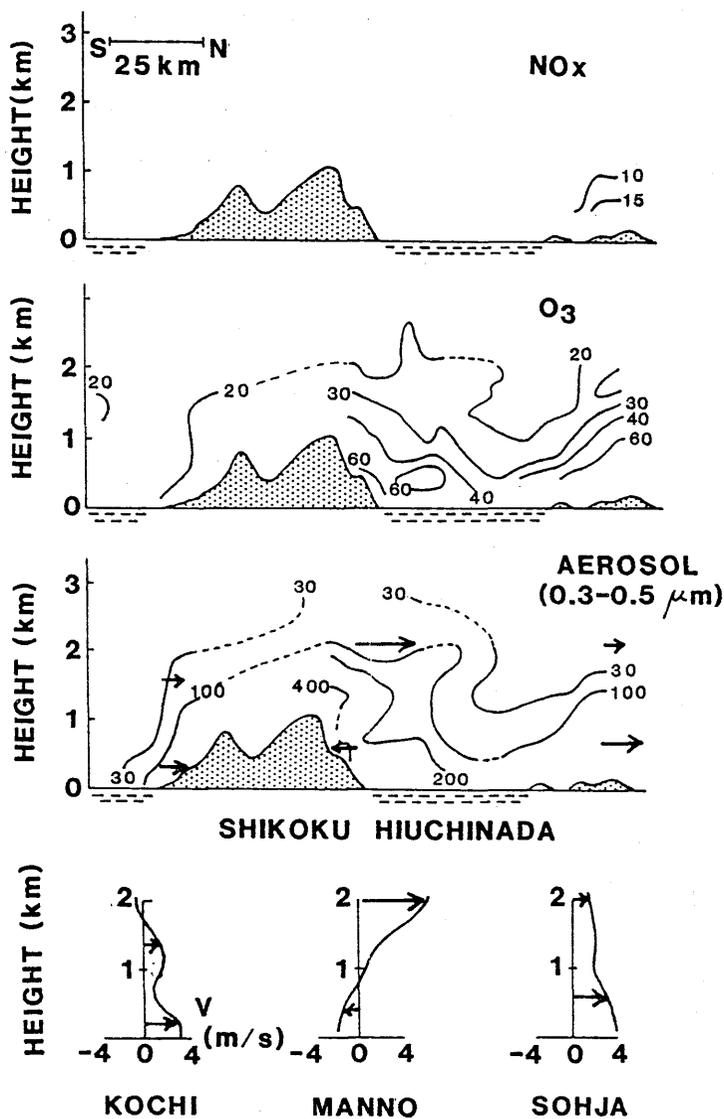


Fig. 4.63 Same as in Fig. 4.62, but in the afternoon.

おおむね 500m 以下に、また O_3 はその上の 500 m から 1000 m の高さに層状に分布している。エア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ア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。 O_3 やエアロゾルは 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。

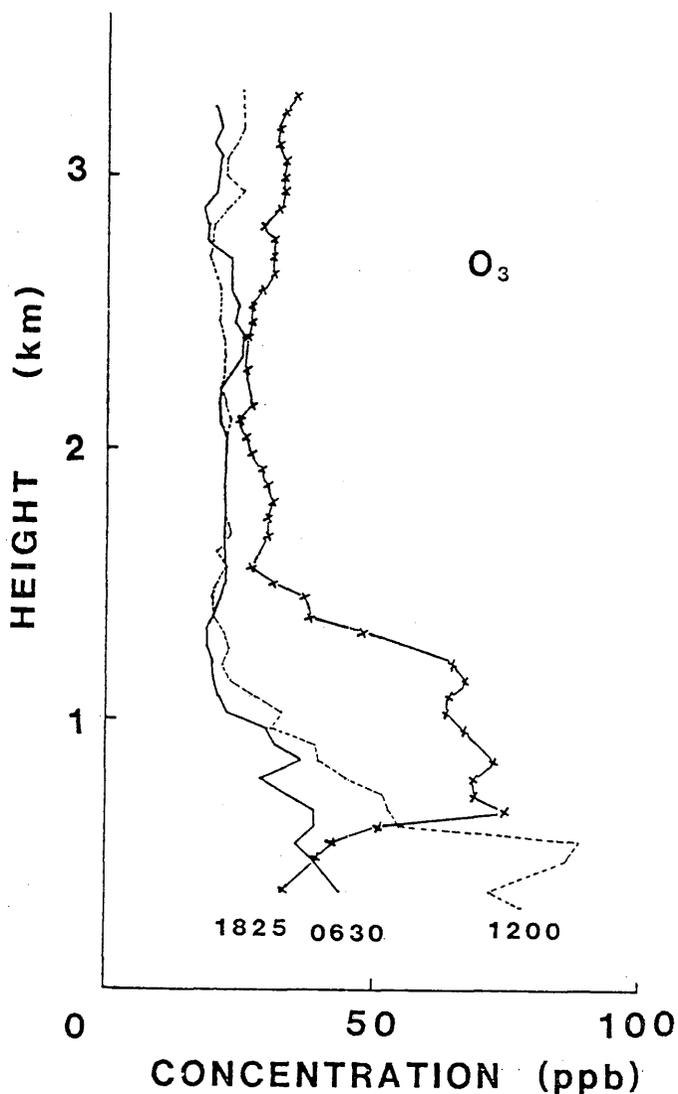


Fig. 4.64 Vertical profiles of ozone concentration observed at point C in Fig.4.52, on 27 July 1982.

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。

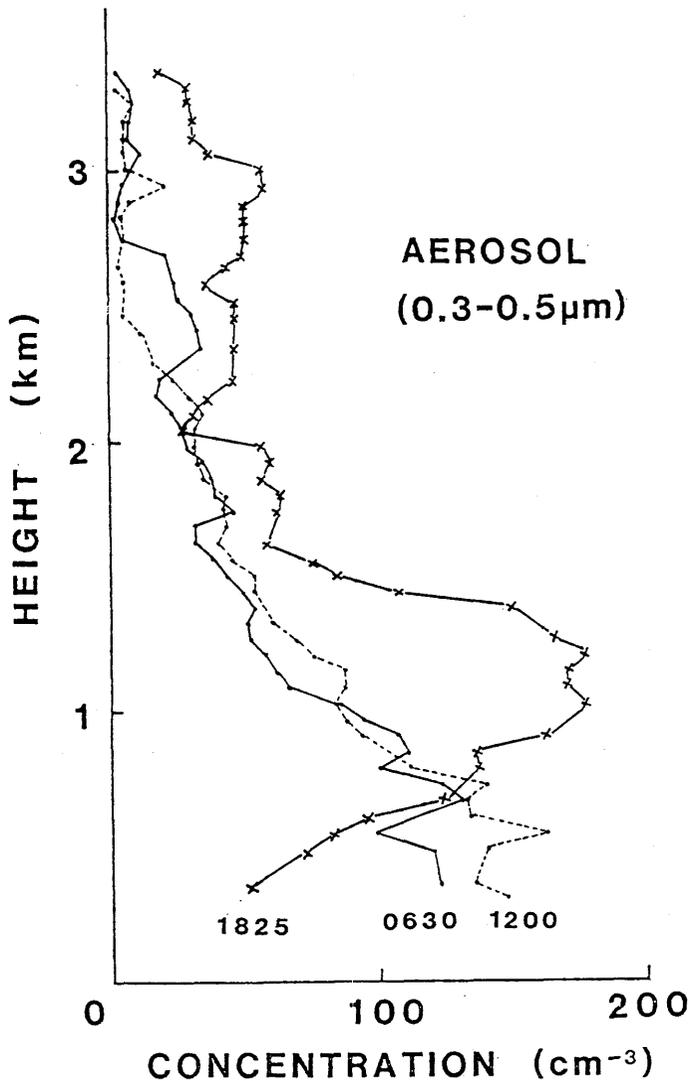


Fig. 4.65 Same as in Fig. 4.64, but concentration of particle (0.3-0.5 μ m).

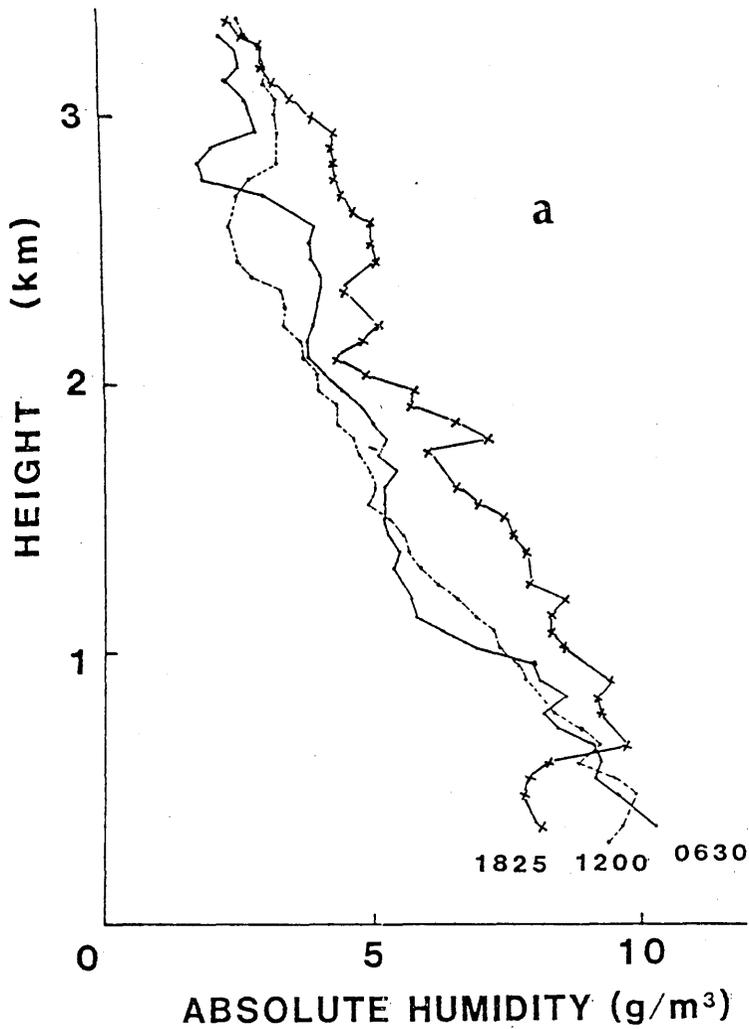


Fig. 4.66 Same as in Fig. 4.64, but absolute humidity.

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。

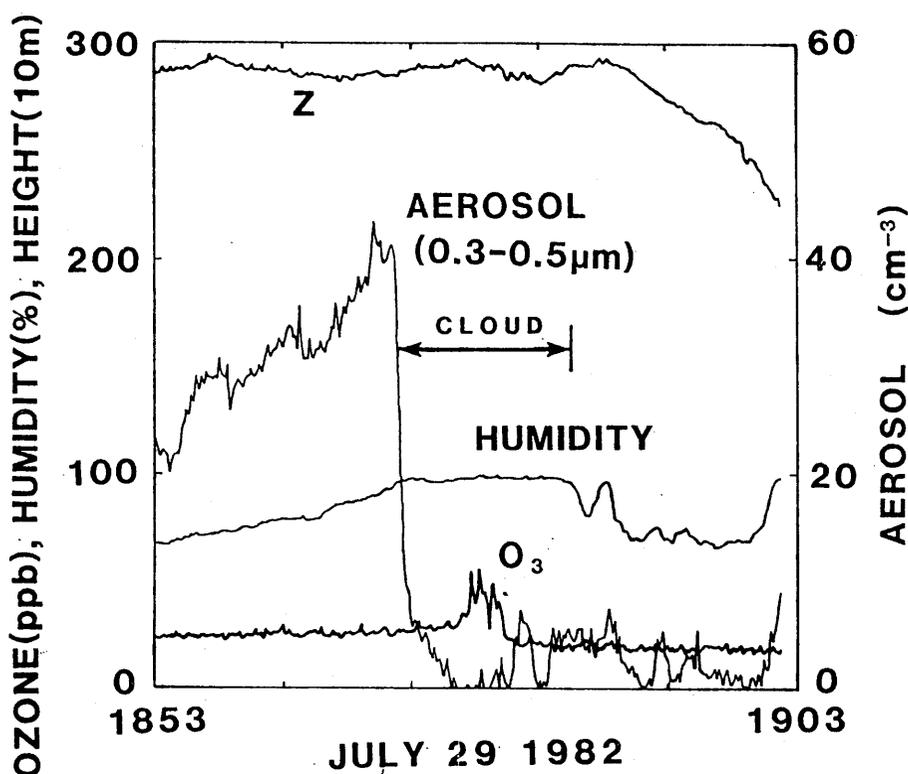


Fig. 4.67 Altitude, concentration of particle, relative humidity and concentration of ozone observed by an aircraft crossing a cumulonimbus on 29 July 1982.

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 に比べて 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

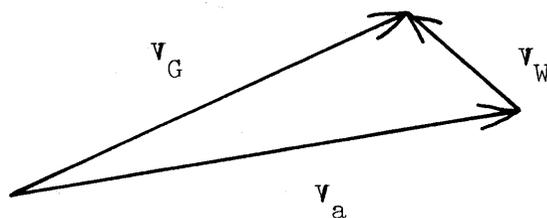


Fig. 4.68 Schematic diagram of wind measurements by an aircraft.
 V_G : ground speed of the aircraft,
 V_a : air speed, V_w : wind velocity.

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ヶ年にわたり行われた。2ヶ年も観測コースは同じで図4.69の地図に

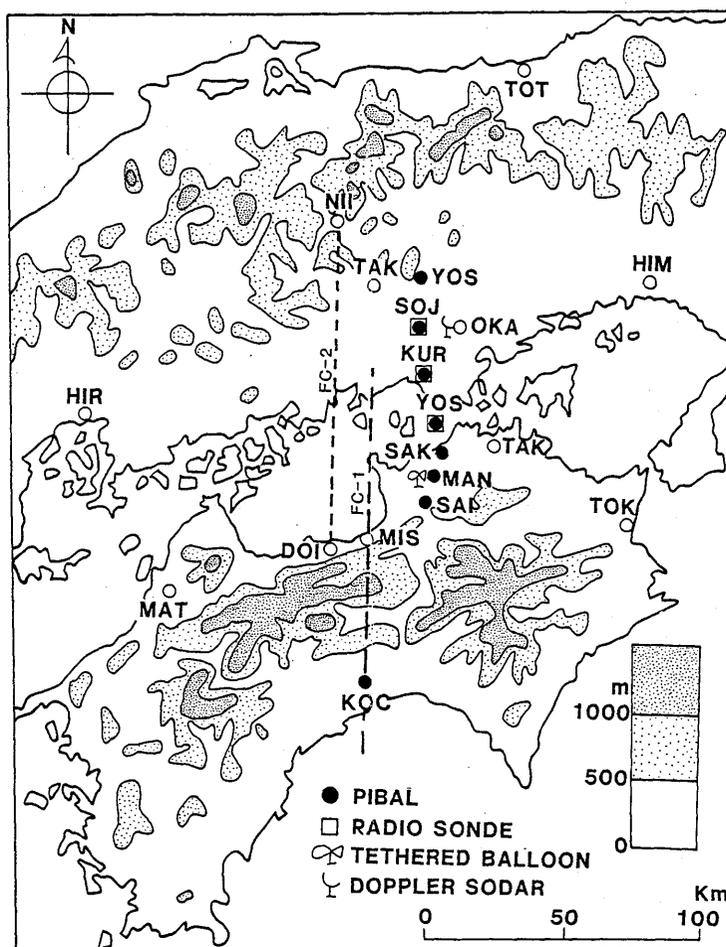


Fig. 4.69 Flight course of wind observation by Doppler radar system (FC-2), in 1981 and 1982. Observed stations indicated in the figure are in 1982.

示す破線FC-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2m/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

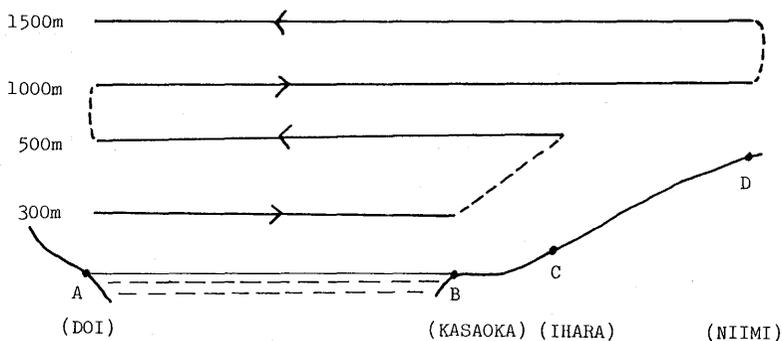


Fig. 4.70 A side view of the flight course.

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

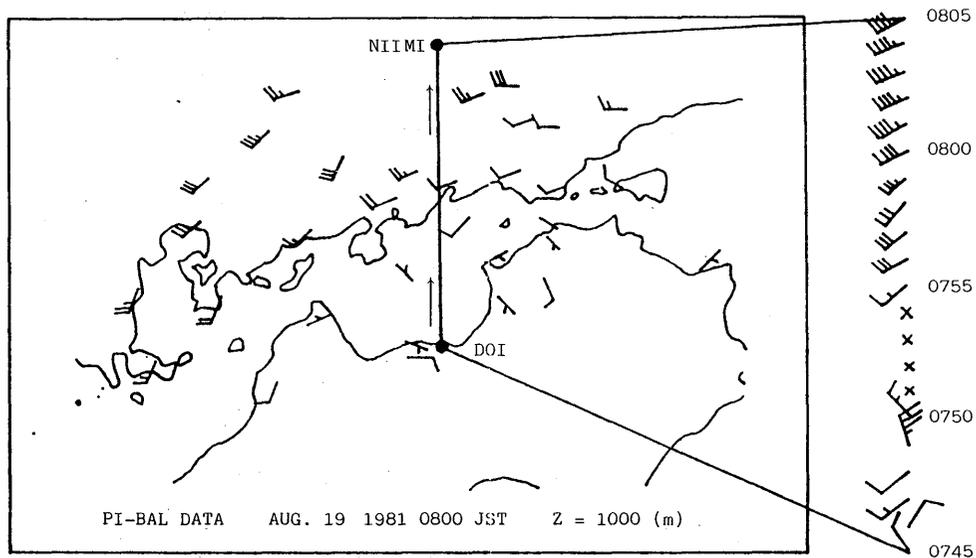


Fig. 4.71 An example of wind velocity measured by Doppler radar system on 19 Aug. 1981, given by the Maritime Self-Defence Force.

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5~7m/secと見積られるのに対し、航空機による測定では7~9m/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2~3m/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とは、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 O₃ 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。エア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、エア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

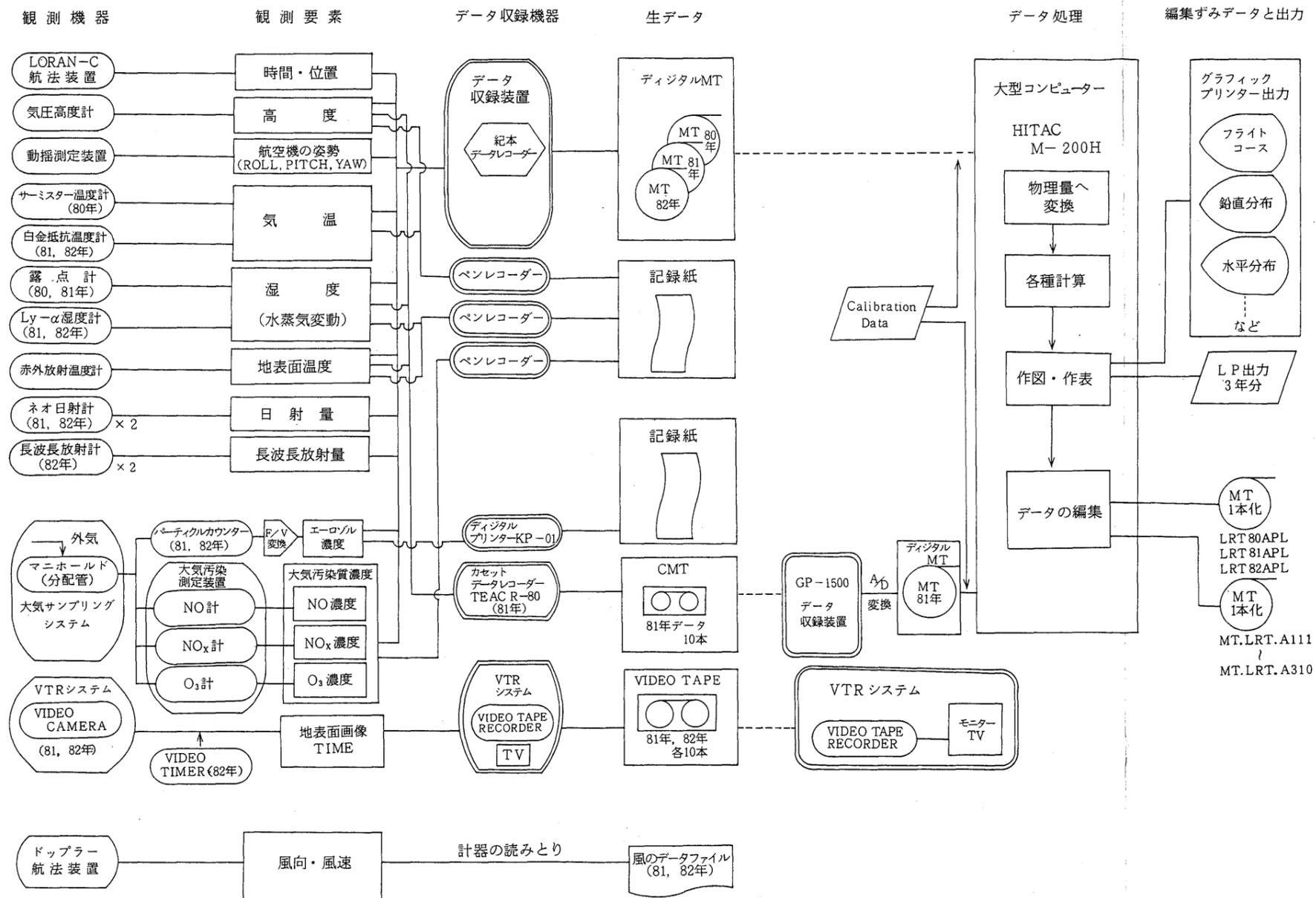


Fig. 4.72 A flow diagram of data recording and analysing system.

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 = 'LRT80APL'	('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 = 'LRT81APL'	('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 = 'LRT82APL'	('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 つき記録 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 2 RUN
{		⋮	
n	IDATA	第 2 RUN 最後のデータ	

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	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	' 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

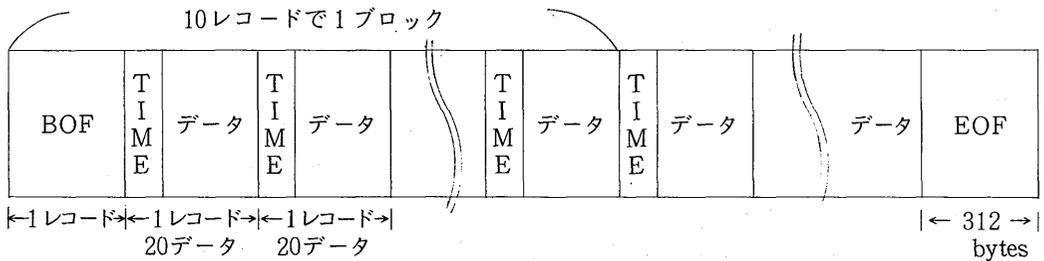
VOL SER = TSPCTR

DENSITY = 6250 BPI

DS Name	DS NO.	REC. FM	LRECL	BLKSIZE	BLKCOUNT
MT.LRT 81 .A 111	8	FB	312	3120	572
" .A 112	9				419
" .A 131	10				560
" .A 132	11				496
" .A 210	12				569
" .A 221	13				570
" .A 222	14				562
" .A 310	15				526

(b) MT FORMAT

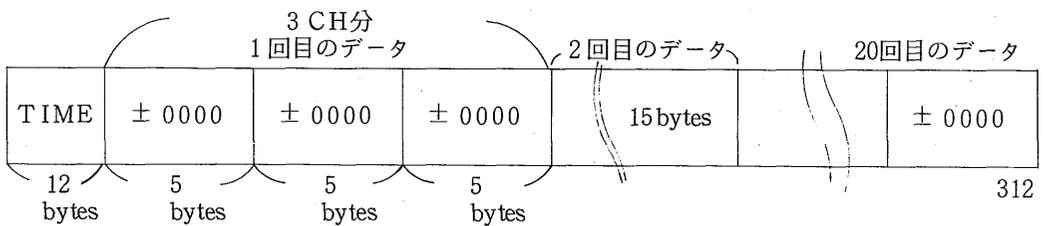
1レコード = 312 bytes でデータは次の様に入っている。



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1Vを示す高度。

なお、Ly- α 湿度計はAMPにより-3V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。