

STUDIES OF THE MIDDLE ATMOSPHERE

BY

UPPER ATMOSPHERE PHYSICS RESEARCH DIVISION,
METEOROLOGICAL SATELLITE RESEARCH DIVISION,
FORECAST RESEARCH DIVISION, MRI.
THE MAGNETIC OBSERVATORY

気象研究所技術報告

第18号

中 層 大 気 の 研 究

高層物理研究部・気象衛星研究部

予 報 研 究 部・地磁気観測所

気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

MARCH 1986

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director : Dr. Kazuko Yanagihara

Forecast Research Division	Head : Dr. Masahiko Aihara
Typhoon Research Division	Head : Mr. Keizo Masamura
Physical Meteorology Research Division	Head : Mr. Hachiro Uemura
Applied Meteorology Research Division	Head : Mr. Tsunehiro Majima
Meteorological Satellite Research Division	Head : Dr. Keikichi Naito
Seismology and Volcanology Research Division	Head : Dr. Masaji Ichikawa
Oceanographical Research Division	Head : Dr. Hayato Iida
Upper Atmosphere Physics Research Division	Head : Dr. Hisafumi Muramatsu
Geochemical Research Division	Head : Dr. Osamu Asaoka

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

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief: Tsunehiro Majima

Editors :	Koji Yamazaki	Haruo Ohnishi	Tomoyuki Ito
	Tomoaki Yoshikawa	Tsutomu Takashima	Masami Okada
	Masahiro Endoh	Yukio Makino	Katsumi Hirose

Managing Editor : Keiko Nishida, Yusai Yuhara

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

中層大気国際協同観測計画 (MAP) は超高層物理学および気象学の観点から中層大気 (対流圏境界面から熱圏下部に至る高度約 10 ~ 120 km の領域) に関する国際的な総合協同観測を実施しそのデータにもとづいて中層大気の構造・力学および物性について地球全域の様相を明らかにしようとするものである。

この計画は太陽地球系物理学科学委員会 (SCOSTEP) により提案され 1978 年秋国際学術連合会議 (ICSU) 総会で 1982 - 1985 年の 4 カ年計画として決定され ICSU メンバー国に通達され MAP への参加が勧告された。

これに対応して日本学術会議は 1978 年秋の総会で日本の MAP 参加を日本政府に勧告した。また測地学審議会では実施について審議した結果昭和 55 年 5 月 30 日「中層大気国際協同観測計画 (MAP) の実施について」という建議を提出した。

この建議のなかで MAP 計画の意義は次のように述べられている。即ち「地球を包む自然環境のうち、天気現象を支配する対流圏は、バルーン等の気象観測により、又、超高層現象が惹起する電離圏は地上からの電波観測や、人工衛星、ロケットの直接観測により、それぞれ詳しく調査され多くの地球物理学的知識や理解が得られてきた。これに反し、その中間に位置する中層大気圏については、これまで有力な観測手段がないまま、バルーン、気象ロケット等による極めて限られた観測が行われてきたに過ぎず、中層大気中に生起している複雑な諸現象を総合的に理解する途は大きく阻まれてきたままであった。

しかし、近年、地球環境全体を通じて流れる種々のエネルギー伝達と物質の輸送の実体を把握することの必要性がますます高まり、又、気候変動等の人間生存環境解明の上でも中層大気のもつ役割の重要性が強く叫ばれる様になった。

加えて、近年、観測技術が急速に進展し、特に新しい手法としてめざましい発展を遂げたりリモートセンシング技術は、超高層を飛翔する人工衛星による中層大気の温度と微量成分密度の測定を可能とし、また、地上からの大型レーダーによる中層大気運動の高精度連続観測技術等も確立してきている。

MAP はこれら最新の技術を重要な柱とし、従来の飛翔体による直接観測と各種の地上観測をも総合して、中層大気圏を国際協力により解明しようとするものである。」

我国の MAP の研究課題として次の 5 課題が設定された。

課題 I 中層大気の風系と波動

課題 II 中層大気の組成

課題 III エアロゾルと放射

課題Ⅳ 南極中層大気の総合観測

課題Ⅴ データ解析・モデリング

気象研究所では課題Ⅱ、Ⅲ、Ⅴに関して研究を分担し、特別研究「中層大気の研究」を昭和56年度一昭和60年度に実施した。実施にあたっては三崎方郎（高層物理研究部）らによって準備され、嘉納宗靖らを中心に開始された。

研究の分担は次の通りである。

1. 中層大気の組成；高層物理研究部
2. エーロゾルと放射
 - (イ) エーロゾルのモニタリング；気象衛星研究部
 - (ロ) 放射特性の観測；高層物理研究部
3. データ解析・モデリング；予報研究部・地磁気観測所・高層物理研究部

研究の成果は、MAPシンポジウム、日本気象学会、国際会議（International MAP Symposium等）で発表、討議されまた既に印刷発表されたものもある。

本報告は、特別研究で得られた成果のうち資料を中心にまとめたものである。

MAP計画での中心的課題は

- (1) 人間の活動の結果により、例えばオゾン密度の低下など、成層圏の自然がそこなわれる可能性があるか。
- (2) 天気や気候変動に対して中層大気はどのような役割を演ずるのか。

であった。これらの重要な課題に対する解答は、MAP期間の研究では与えられるものではなく、この研究で得られた資料の解析や、現在計画されている気候変動国際協同研究計画（WCRP）での研究に期待される。

昭和61年2月

気象研究所 高層物理研究部長
村 松 久 史

目 次

序

概要（和文）	1
Abstract（英文）	5

第1章 ガスクロマトグラフ法による対流圏および成層圏微量化学成分の分布の測定

11

1.1 はじめに	11
1.2 測定法	12
1.2.1 空気の採集	12
1.2.1.1 航空機による空気の採集	12
1.2.1.2 気球による空気の採集	13
1.2.2 ガスクロマトグラフ測定	15
1.2.2.1 CH ₄ の測定	16
1.3 結果	16
1.3.1 対流圏における CF ₂ Cl ₂ 、CFCl ₃ および N ₂ O	16
1.3.2 成層圏における CF ₂ Cl ₂ 、CFCl ₃ 、N ₂ Oおよび CH ₄	23
1.4 まとめ	27

第2章 オゾンゾンデ観測

29

2.1 はじめに	29
2.2 ゾンデの試験	29
2.2.1 気圧計	29
2.2.2 ポンプ	32
2.2.3 反応管	35
2.2.4 信号切換及び資料整理	37
2.3 飛揚実験及び結果	37
2.4 解析	49
2.5 まとめ	52

第3章 航空機搭載赤外分光装置による微量成分測定

55

3.1 はじめに	55
----------------	----

3.2	分光装置	55
3.3	観測	57
3.4	解析・結果	61
3.4.1	N_2O	61
3.4.2	CH_4	65
3.4.3	CF_2Cl_2	68
3.4.4	$CFCI_3$	69
3.5	まとめ	70
第4章	成層圏におけるイオン生成率の測定	73
4.1	はじめに	73
4.2	電離函の諸元と観測方法	73
4.3	電離電流の算出	76
4.4	飛揚観測結果	76
4.5	検討	79
4.6	おわりに	79
第5章	ライダー観測	81
5.1	まえがき	81
5.2	使用したライダーの特性	81
5.3	観測資料の処理	81
5.4	資料について	82
第6章	日射ゾンデ	115
6.1	日射ゾンデの構造および器械定数の決定	115
6.2	日射ゾンデの揺れの補正	116
6.3	観測結果	124
第7章	放射ゾンデ	127
7.1	放射ゾンデの構造	127
7.2	器械定数およびその風速依存性の決定	128
7.3	観測結果	131
7.4	中層大気における赤外放射の分布の解析例	131

第8章 航空機による放射観測	145
8.1 はじめに	145
8.2 測定要素及び測器	145
8.3 観測要領	145
8.4 測定誤差	147
8.5 観測概況	152
8.6 測定結果	153
8.7 まとめ	163
第9章 データ解析	165
9.1 中層大気擾乱と地磁気変動	165
9.1.1 はじめに	165
9.1.2 Sq電流系の日々変動と中層大気擾乱	165
9.1.3 sfeに伴う変動と中層大気擾乱	169
9.1.4 Sqの振幅の準2年周期振動	170
9.1.5 地磁気経年変化と地表気温の相関	173
9.1.6 まとめ	175
9.2 地磁気擾乱の地球大気の循環におよぼす影響について	176
9.2.1 はじめに	176
9.2.2 データ・解析法	177
9.2.3 気圧高度変化	177
9.2.4 予報誤差	181
9.2.5 議論およびまとめ	183
第10章 モデリング	185
10.1 序—中層大気モデリング	185
10.2 経度平均モデル	185
10.3 内部重力波の数値実験	189
10.4 中層大気大循環の数値実験	192
10.5 モデリングのまとめ	199

参考資料

I 高緯度地方におけるオゾンの季節変化	203
II 赤外分光法による N_2O 全量の定量	210
III 大気微量成分濃度の広域分布	228
研究成果の発表リスト	239

概 要

近年成層圏汚染等による中層大気環境変化により、気候変動が誘発されることが憂慮されているが、中層大気（高度10 km—120 km）に関しては、未知な点が多くこれより上方の領域や下層の対流圏に比して研究が著しく遅れている。気象研究所・地磁気観測所はこの中層大気に関する国際的な総合協同観測計画に参加しその一部を分担した。

その1は「中層大気の組成」である。

この項目では成層圏オゾン及びその変動に関連する微量気体成分の観測を実施した。成層圏オゾンと直接反応してこれを破壊する成分は NO_x 、 HO_x 、 ClO_x 、等であるが、これ等の源となる物質は N_2O 、 H_2O 、クロロフルオロメタン（特に CF_2Cl_2 と CFCl_3 ）等である。近年、人間の活動の結果、クロロフルオロメタンと N_2O が増大し、オゾン層の破壊をひき起すことが懸念されている。我々の観測は、クロロフルオロメタンと N_2O の分布、変動に関する資料及び、オゾンの変動の資料を得ることを主たる目的とした。 CF_2Cl_2 、 CFCl_3 、 N_2O 、 CH_4 の対流圏から成層圏にわたる濃度は、化学的方法と光学的方法により測定した。化学的方法は空気試料を採取し、それをガスクロマトグラフにより分析した。対流圏内は航空機を、成層圏内は気球を利用して空気の採取を行った。

光学的方法は太陽を光源とした赤外吸収スペクトルを利用するもので、光路中の吸収物質の積分量や、高度分布を求めた。測定は、地上及び航空機から行った。

オゾンは、高度40kmまでの分布を、オゾンゾンデにより観測した。

また N_2O から生成される NO_x と宇宙線による電離から生成される NO_x の寄与を明らかにするため、電離函によりイオン生成率の高度分布の測定を行った。

これ等の結果は第1章から第4章に述べられている。

観測、解析から明らかになったことは、

- (1) CF_2Cl_2 及び CFCl_3 の日本付近の対流圏内の平均的体積混合比はここ数年4—6%/年で増加している。 N_2O の混合比はほとんど一定である。
- (2) CF_2Cl_2 、 CFCl_3 、 N_2O の日本付近の対流圏の平均的体積混合比は、1984年12月—1985年1月の時点で、361ppt、218ppt、303ppbであった。
- (3) 成層圏内の CF_2Cl_2 、 CFCl_3 及び N_2O の混合比を筑波で観測した。これ等の成分の濃度の高度にともなう減少は光化学—拡散モデルとよく一致していた。成層圏内の CF_2Cl_2 と CFCl_3 の経年変化は確定できなかった。
- (4) 高度約40km（～3 mb）までのオゾン、気温、風の観測を1983年2月から1985年12月までの期間、冬季に筑波で行った。4 mb高度でのオゾン濃度は気温と負の相関が、また風速の東向き成分とは正の相関があった。また1983年の2、3月の10 mb高度以上のオゾン濃度は、それ以後の値に

比べて小さかった。これは1982年春のEl Chichon火山の噴火の影響かどうか注目される。

- (5) 大気中のイオン対生成率はポツァー極大の高度(17—18km)で最大で、三陸付近では約22イオン対 $\text{cm}^{-3}\text{sec}^{-1}$ である。また、イオン対生成率は太陽活動と関連しており、太陽黒点数が減少するとイオン対生成が増加することが観測された。

その2は「エアロゾルと放射」である。この項目は「ライダーによるエアロゾルのモニタリング」と「放射特性の観測」の2つの小項目から成る。前者はライダーによる成層圏エアロゾルの観測であり、後者は日射、赤外放射の水平面フラックス、気温、湿度等の観測を実施し、エアロゾルの放射収支に及ぼす効果を明らかにすることを目的とした。結果は第5—第8章に述べられている。

ルビーライダー(694.3 nm)により、筑波において、El Chichon火山の噴火(1982年3月—4月)起源の成層圏エアロゾルの観測を行い、後方散乱係数、散乱比及びそれ等の標準偏差、高度16.5—30.5 kmの後方散乱係数の積分値 B を得た。観測・解析から次の特徴が明らかになった。

- (1) 1982年5月と11月に B の極大が現われた。
- (2) B の値は1982年12月—1983年9月の期間に時定数約7ヶ月で減少した。
- (3) 成層圏エアロゾルの季節変動はまだ明らかでない。

対流圏から約10mbまでの成層圏の日射及び赤外放射フラックスを航空機、日射ゾンデ、放射ゾンデを用いて筑波—鹿島灘の領域で冬季に観測を行い、放射収支に及ぼすエアロゾルの効果を解明するための基礎資料を蓄積した。

この資料を用いて解析を行い次の結果を得た。

- (1) 対流圏のエアロゾルは日射を吸収し大気を加熱する。その大気加熱の効果は水蒸気による効果の2—3倍大きい。
- (2) 対流圏のエアロゾルの赤外放射による大気の冷却率に対する効果は、エアロゾルの濃い層内では、冷却率を小さくし、その上方では冷却率を大きくする。
- (3) 成層圏内で日射の吸収による大気の加熱率は、1984年1月、1984—1985年の冬季の、南中時近くでは、20—100 mbの層の平均値として $2.06 \pm 0.70^\circ\text{C}/\text{day}$ である。
- (4) 成層圏内の赤外放射による大気の冷却率は、冬季において、10—100 mbの高度では、清澄大気に対する理論的計算では、 $1.35^\circ\text{C}/\text{day}$ であるが、放射ゾンデの観測では、負(すなわち加熱)であった。

その3は「データ解析・モデリング」である。

この項目では太陽活動、地磁気変動と気象要素との関連を世界各地の長期にわたる資料を用いて解明し、また中層大気の数値モデルを開発し、中層大気大循環の形成や下層大気との相互作用等に

関する数値実験を行うことを目的とした。この結果は第9、10章に述べられている。

データ解析では、上層と下層との大気間のカップリングを明らかにすることを目標とし、特に地磁気静穏日日変化と風・エネルギーの鉛直輸送との関連、太陽活動・地磁気擾乱と下層大気の循環等の関連に主眼をおいた。

データ解析から次のことが明らかになった。

- (1) 地磁気静穏日日変化 S_q の中心緯度は周期数日—数10日の日々変動をする。この変動は冬季においては、対流圏起源のプラネタリー波動と関連していることが示唆される。
- (2) S_q の振動に準2年周期振動が存在する。また S_q とオゾン全量、E層臨界周波数 f_oE の間に正の相関が存在する。
- (3) 太陽フレアに伴い、地磁気及びVLF（ミリメートル波）に周期約70秒の振動がみられる。これの原因として太陽フレアに伴い発射されるX線の強さの振動が考えられる。
- (4) 地磁気擾乱後に、地上—100 mbの高度で大循環のパターン、気圧配置に変化が生じる。この変化は冬季の定在波及びこれに対応する気圧配置に近い。地上気圧の変化の大きさは、地磁気擾乱の2日後以内にアラスカ湾—カナダ北部、グリーンランド—アイスランド付近で約5 mbの低下である。
- (5) 地磁気擾乱の1日後に、数値予報モデルから計算される気圧高度の予報誤差が増大する。特に北太平洋、カナダ北部で大きい。これ等の解析の結果は、中層大気の擾乱が対流圏の循環に関連することを示すものである。

モデリングにおいては、中層大気中での内部重力波の伝播、役割の解明を行った。即ち3次元プリミティブ方程式により、数100 km以上の東西波長をもつ内部重力波を陽に表現する（従来はパラメタリゼーションで表現していた）モデルを開発した。このモデルによる数値実験の結果次のことが明らかになった。

- (1) 下層で励起される小スケールの内部重力波は上方に伝播し、メソポーズ付近でこわれ、それによって上部中間圏及び下部熱圏における熱的に作られている平均東西風及び温度場を大きく変える。
- (2) このモデルにより中層大気中の大循環の重要な特徴、例えば、平均東西風の逆転（下部熱圏においては、中間圏の東西風と逆向きの東西風がある）、気温の南北傾度の逆転（メソポーズ付近では冬極が高温、夏極が低温であること）等が再現できた。
- (3) 対流圏を含む3次元全球モデルによる数値実験に際して、内部重力波とプラネタリースケール運動の3次元相互作用をシミュレートできる見通しがついた。

Abstract

The internationally coordinated MAP (Middle Atmosphere Program) is an attempt to obtain the scientific knowledge which is required for answering the important questions :

- (1) What are the possibilities of damage to the earth's middle atmosphere as a result of mankind's activities such as the permanent reduction of the ozone concentration in the stratosphere?
- (2) What role does the middle atmosphere play in determining climate and climatic changes?

The MAP in Japan consists of five projects : (1) Winds and waves (2) Constituents (3) Aerosols and radiation (4) Coordinated observations in Antarctica (5) Data analysis and modelling.

The Meteorological Research Institute participated in the projects (2), (3) and (5).

(a) Constituents

Ozone and ozone-related constituents such as CF_2Cl_2 , CFCl_3 , N_2O , CH_4 , were observed to understand the structure and behavior of the ozone layer. Various techniques, such as the electrochemical ozonesonde, chemical analysis of sampled air, and absorption spectroscopy, were used. The results are described in Chapter 1 through Chapter 5.

In Chap. 1 the measurement of CF_2Cl_2 , CFCl_3 , and N_2O by GC-ECD is described. Air samples have been collected over Japan and analyzed for CF_2Cl_2 , CFCl_3 and N_2O by a GC-ECD method since 1978. Mean tropospheric volume mixing ratios of CF_2Cl_2 and CFCl_3 have increased by 4 - 6 % yr^{-1} in the last few years. That of N_2O was almost constant in the same period. They were 361 ppt for CF_2Cl_2 , 218 ppt for CFCl_3 and 303 ppb for N_2O between December 1984 and January 1985. The mixing ratios of CF_2Cl_2 , CFCl_3 and N_2O in the stratosphere decreased with increasing altitude in accordance with our 1-D photochemical-diffusive model. No tendency of CF_2Cl_2 and CFCl_3 to increase in the stratosphere could be detected.

In Chap. 2 the observation of ozone by the ozonesonde is described. The vertical profiles of atmospheric ozone, temperature and wind up to about 3 mb level were obtained by the electrochemical ozonesondes with 5 kg balloon.

An aneroid barometer (RS 2 - 80) was used to measure ambient pressure. The measurement error at 3 mb was estimated to be about 0.23 mb, corresponding to about 550m in altitude. The pump system is the same type as used in the KC- 79 ozonesonde, with some improvement to assure that the bubbling of the air stops below 2 mb.

Ozonesondes were launched in the winter season during February 1983 through December 1985. At 4 mb level (about 37.5 km) ozone concentration decreased with temperature and increased with westerly wind speed. The ozone above 10 mb level showed low concentration in the winter of 1982 - 1983, which suggests some relation with the eruption of El Chichon.

In Chap. 3 the measurement of minor constituents by absorption spectroscopy is described. The sunset infrared solar spectra were obtained by aircraft and total column abundances and mixing ratios of N_2O , CH_4 , $CFC1_3$ and CF_2Cl_2 in the winter season were estimated.

The volume mixing ratios of N_2O in the troposphere in 1984 were 0.292 ppm (12 Dec) and 0.310 ppm (13 Dec), which were very close to the value 0.303 ppm obtained in the same winter by gas- chromatographic method, while the mixing ratio in lower stratosphere- upper troposphere obtained in February 1984 was about 0.425 ppm. CH_4 in the upper troposphere showed a very high mixing ratio (above 2.2 ppm) compared with 1.74 ppm in the lower troposphere obtained by gas- chromatographic method. Those of CF_2Cl_2 and $CFC1_3$ were 301 and 196 ppt, respectively at the level of the tropopause, and 365 and 200 ppt, respectively in the upper troposphere.

In Chap. 4 the ion- pair production rate in the stratosphere is described. The ion- pair production rates in the stratosphere were observed by using three Al- ionization chambers with different wall thicknesses (i. e. 0.4, 0.8 and 3.0 mm) and the same volume, loaded in the large balloon launched from the Sanriku Balloon Observatory, ISAS, on May 25, 1984.

(1) Pfozter Maximum was observed at 17 - 18 km height. (2) There were no significant differences among the values of ion production rates in the free air observed by three chambers, above Pfozter Maximum, while (3) slight differences were found below Pfozter Maximum, especially at 4 - 15 km height. (4) It was found that the value of the ion-pair production rate at Pfozter Maximum in 1984 was large by about 1 % than in 1982. (5) Our values of ion-pair production rates in the stratosphere are plotted, compared with those by Braesser and Nicolet (1973).

(b) Aerosols and radiation

To understand the possible role of aerosols on radiation, integrated aerosol - radiation experiments were carried out. Aerosols in the stratosphere and the troposphere were observed by use of a lidar system and an aircraft. Measurements of downward and upward fluxes of solar and infrared radiation were made by a balloon - borne sonde and an aircraft. The effect of aerosols on the radiative heat budget was evaluated. The results are described in Chapter 5 through Chapter 8.

In Chap. 5 ground - based lidar monitoring of stratospheric aerosol is described. Large amounts of dust particles were injected into the stratosphere by the volcanic eruption of El Chichon in late March and early April 1982. The ruby lidar (wavelength 694.3 nm) at the Meteorological Research Institute detected an increase of dust particles.

Backscattering ratio (R), backscattering coefficients (β_A) and integrated β_A over a height range of 16.5 - 30.5 km (B) are shown in the tables, and the time variation of B in the figure. After the eruption, two enhancements of B appeared - in May and in December 1982. The value of B decreased gradually with a time constant of about 7 months during December 1982 through September 1983. No seasonal variation of the stratospheric aerosols was clear as yet.

R or β_A was estimated as follows. The backscattering coefficient of atmospheric molecules was calculated by $\beta_M = n \times 1.771 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, n is the density of atmospheric molecules obtained from daily rawinsonde at Tateno near the lidar site and average data of meteorological rocket sondes at Ryori (39° 03' N, 141° 50' E). A weighted mean method was used to calculate R , β_A and their standard deviation (Russel et al., 1979). The ratio of aerosol extinction to aerosol backscatter was assumed to be 50 steradians.

In Chap. 6 observation of the fluxes of solar radiation by solar radiation sonde is described. The structure and calibration of our solar radiation sonde are briefly described. Unlike the radiometer sonde, the swing of the solar radiation sonde affects largely on the measurement of downward solar radiation. The method of eliminating or minimizing the effect of the swing is described.

Then the observation results on the altitude distribution of both upward and downward solar radiation fluxes on several days under a clear sky are shown. The observation shows the upward (reflective) solar radiation flux is clearly affected by the reflective property

of the ground surface and that the atmosphere is heated by solar radiation as expected by theoretical estimation.

In Chap. 7 observation of the fluxes of infrared radiation by radiometer sonde is described. The structure of our radiometer sonde is briefly described and the calibration of the radiometer sonde, especially the effect of wind speed (air flux) on the instrument constants of the sonde is described on the basis of the experiments.

Then the results of observation of the altitude distribution of both upward and downward infrared radiative fluxes on several days under a clear sky are shown. The infrared radiative net fluxes (upward flux minus downward flux) observed cause atmospheric heating in layers above 100 mb level, while those computed using the altitude distribution of temperature and humidity obtained by radiosonde within three hours after each observation of radiative flux cause atmospheric cooling in the same layer as usual.

In Chap. 8 simultaneous measurement of aerosols and solar and infrared radiation by aircraft is described. A series of aircraft observations was carried out for this purpose over Tsukuba (land) and Kashimanada (sea) in three winter seasons.

Effects of tropospheric aerosols on the solar and infrared radiative heat budget were evaluated. In the lower troposphere the solar heating rate due to absorption by aerosols is about twice as large as that due to water vapor. In a dense haze the infrared radiative cooling rate tends to be smaller, with an intensified cooling rate near the top of the layer. The vertical profile of radiative heating and cooling rates well corresponds to the vertical distribution of aerosols, which is, in turn, closely related to the atmospheric profiles such as temperature inversion and mixing layer.

(c) Data analysis and numerical modelling

Global data analysis was made to understand the coupling between the upper and the lower atmosphere. Special attention was focused on the relation between the day-to-day change of geomagnetic Sq fields due to ionospheric wind variations and the vertical energy propagation. The relationship between the climatic variation and the geomagnetic variation was also studied by statistical method. For the understanding of the physical processes in the middle atmosphere numerical models were constructed without any parameterization for small-scale motions such as internal gravity wave and dry convections, and the role of

these motions was studied. The results are described in Chapters 9 and 10.

In Chap. 9 the relationship between middle atmosphere disturbances and geomagnetic variations have been studied using various data, such as geomagnetic variations, geomagnetic activity indices, ionospheric variations, aerological data, surface meteorological data and sunspot numbers. Various relationships are suggested from the observational results of the present study.

It is clarified that the focus of Sq currents varies day by day with a period of several to several ten days. It is also suggested that the variation of the Sq focus is related to the planetary wave. Secondly, it is clarified that QBO is also seen in the geomagnetic variations. However, the physical relationship between the geomagnetic QBO and the meteorological QBO is reserved for future study. The relationship between the climatic variation and the geomagnetic variation is also examined in the present study.

The influence of geomagnetic disturbances on the tropospheric circulation has been investigated for five winter seasons (1976 - 1981) using superposed epoch analysis.

It was found that changes in planetary wave activity occur in middle and high latitudes after geomagnetic disturbances. Significant increase of weather forecast errors near the trough regions are also found one day after geomagnetic disturbances.

In Chap. 10 the general circulation of the middle atmosphere is simulated by means of a two-dimensional and a three-dimensional primitive equation models. The models are capable of explicitly representing internal gravity waves of zonal wavelength greater than a few hundred kilometers (in a three-dimensional model). No parameterization is employed for subgrid-scale eddy viscosity.

With the assumption of a simple external-heating function corresponding to solstice conditions, time integration was performed. During the whole period, random forcings were imposed on each grid of the lowest level in order to generate small-scale upward propagating internal gravity waves.

Experiments have shown that small-scale waves were indeed excited, propagating upward, broke up near the mesopause, and greatly changed the thermally induced zonal mean motion and temperature fields in the upper mesosphere and the lower thermosphere. As a result, important features of the general circulation at that level, such as reversals of the zonal motion and the latitudinal gradient of zonal mean temperature, were reproduced.

In Appendix some of the observations in Antarctica concerning minor constituents are described. Ozone observations were carried out at Syowa Station, Antarctica ($69^{\circ} 00' S$, $39^{\circ} 35' E$) from February 1982 to January 1983. The observation items were total ozone amount, vertical distribution by ozonesonde and Umkehr observations, and surface ozone mixing ratio. Many interesting characteristics have emerged from these results, such as the total ozone maximum in winter.

Columnar amounts of atmospheric minor constituents such as N_2O , CH_4 , $CFCI_3$, CF_2Cl_2 and HNO_3 were determined from the infrared solar spectra for the period 24 March 1983 - 29 December 1984 at Syowa Station, Antarctica. Total atmospheric nitrous oxide (N_2O) deduced from the transmittance of solar radiation at 2576 cm^{-1} ($3.88\text{ }\mu\text{m}$) indicated seasonal variation with two maxima - in spring and autumn. The volume mixing ratio of tropospheric N_2O was close to 300 ppb.

At Syowa Station, volume mixing ratios CF_2Cl_2 and $CFCI_3$ increased by 5 - 6 % yr^{-1} between February 1982 and December 1984. Those at Syowa Station were 3 - 4 % lower for CF_2Cl_2 and 5 - 7 % lower for $CFCI_3$ than those observed over Japan in the same period. These increasing rates and differences between the southern and northern hemispheres were both smaller than those observed in the 1970' s. Volume mixing ratio of N_2O was almost constant in the same period, and no difference was found between the southern and northern hemispheres.

第1章 ガスクロマトグラフ法による対流圏および成層圏微量化学成分の分布の測定*

1.1 はじめに

オゾンは太陽放射を吸収して中層大気の温度分布を支配し、大気のような運動を励起するエネルギー源になっている。さらにオゾン層の消長は地上に到達する太陽紫外線量を左右し生物圏にも影響を与えることが知られている。

オゾン層は光化学反応による生成・消滅のバランスの上に成り立っているが、この光化学反応には酸素原子の他に NO_x ・ HO_x ・ ClO_x 等が関与している。これらの酸化物は N_2O ・ H_2O ・ CH_4 ・ハロゲン化炭化水素等の分解によって生成される。

従って NO_x ・ HO_x ・ ClO_x 等の高度分布を求め、最終的にオゾン層の消長を予測する為にはそれらの源になる化合物の高度分布や経年変化を精度よく測定することが必要になってくる。特にハロゲン化炭化水素のうち CF_2Cl_2 や CFCl_3 はそのほとんどが工業製品であり、その使用量が急速に増加してきたため、又 N_2O は化学肥料の大量使用や燃焼によって発生量が増加すると予想されるため、オゾン層への影響がとりわけ注目されている化合物である。

N_2O や H_2O ・ CH_4 ・ハロゲン化炭化水素等の化合物は強い太陽紫外線や励起酸素原子の作用がなければ大気中で安定なため、空気を適当な容器に採集して来てガスクロマトグラフ法で定量することによってその濃度を求めることができる。

我々はこれらの化合物のうち、特に CF_2Cl_2 ・ CFCl_3 および N_2O について、大気中における分布と挙動を明らかにする目的で、それらの測定を 1978 年以来継続している。1981 年までの測定結果についてはすでに前報（広田他、1982、Muramatsu et al., 1982、Hirota et al., 1984 a）において報告した。

本章では 1981 年以後、主として「中層大気の研究」期間中に行われた観測結果について報告する。測定法については前報（広田他、1982）に報告しているので、ここでは主に改良した点について述べる。対流圏（高度～8 km まで）の空気は航空機によって、又成層圏（高度～30 km まで）の空気はゴム気球によってそれぞれステンレススチール製の容器に採集し、電子捕獲型検出器（ECD）または水素炎イオン化検出器（FID）付ガスクロマトグラフによって分析を行った。

* 広田道夫、村松久史、佐々木徹、牧野行雄、旭 満：高層物理研究部

1.2 測定法

1.2.1 空気の採集

1.2.1.1 航空機による空気の採集

1982年2月以後、空気採集を行った時の各飛行ごとの使用機種・飛行コース・試料数等を表1.1に示す。

空気採集用器材の材質からの汚染の可能性を小さくするため、空気取入口からエアポンプまでの管には外径1/4インチのステンレススチールパイプ又は銅パイプを使用した。又エアポンプは1台（日本理化学器械UP-2型（排気量20ℓ/分））にした。試料容器にはステンレススチール製のシ

表1.1 試料採集飛行一覧表（1981年度以降）

年 月 日	航 空 機	コ ー ス	最高高度 (km)	試 料 数 *		
				CF ₂ Cl ₂	CFC1 ₃	N ₂ O
1981年度						
1982- 2-14	セスナ 404	羽田↔御蔵島	5.0	9	9	9
2-15	"	" ↔ 八丈島	7.2	5	9	7
2-16	"	" ↔ 八丈島	4.8	10	6	9
2-18	"	" ↔ 仙台	8.1	11	14	10
1982年度						
1982-10-28	ピラタスポーターPC-6	調布↔仙台	6.6	7	6	—
12-20	セスナ 404	羽田↔伊那	4.6	2	2	1
12-21	"	" ↔ 軽井沢	8.2	6	5	4
1983- 2- 3	"	八尾↔浜松沖	1.2	5	1	2
2- 4	"	" ↔ "	1.1	12	5	11
2- 4	"	" ↔ "	3.2	4	4	3
2- 5	"	" ↔ "	1.0	4	4	3
2- 7	エーロコマンダー 685	" ↔ 名古屋 ↔ 浜松↔ 神津島	7.0	6	5	6
1983年度						
1984- 2- 8	エーロコマンダー 685	八尾↔ 名古屋 ↔ 浜松↔ 新島	6.7	7	7	7
2-27	セスナ 404	羽田↔ 日光山地	6.0	4	3	4
2-28	"	" ↔ 阿武隈山地	6.0	2	2	2
1984年度						
1984-12-12	セスナ 404	竜ヶ崎↔ 長野	3.8	4	4	4
12-13	"	" → 日光山地→ 羽田	7.5	6	6	6
12-14	"	羽田→ 竜ヶ崎	4.1	2	2	2
1985- 1-29	"	八尾↔ 浜松↔ 新島	7.1	8	8	8

* 信頼しうるデータが得られた試料

リンダー (0.5ℓ、0.3ℓ、Whitey. 0.3ℓ、橋本製作所) を使用した。Whitey のリンダーにはシャットオフバルブ SS-14 DKM4S4、SS-16 DKM4F4 (Whitey) 又はボールバルブ SS-4 JB1 (Nupro) を使用し、橋本製作所のリンダーにはボールバルブ SS-4 JB (Nupro) 又はベローズバルブ B-4 HG (Nupro) を使用した。これらの中ではリンダーとバルブの接合部にテフロンテープを使用しておらず、しかも試料空気が Kel-F 樹脂やグリースに一切触れない B-4 HG バルブを取り付けたリンダーが採集容器として一番優れている。管やポンプ、リンダーの接続部には通常のユニオン (Swagelok) の他に ULTRA TORR Union (Cajon) や Flexible Tubing (Cajon) を使用した。

流路内の空気を外気と十分置換するため、ポンプは離陸直後から作動させておき、予定の場所又は高度でバルブを閉じ空気の採集を行った。

1.2.1.2 気球による空気の採集

成層圏の空気を採集するための「試料採集ゾンデ」を図 1.1. a、b に示す。このゾンデは前報 (広田他、1982) の図 1.3 に示したものと基本的に同じであるが、若干改良を行った。

5ℓ のステンレススチール製容器 (橋本製作所) に取り付けるバルブはトグル式ベローズバルブ SS-4 BKT (Nupro) 1 個とし、パッキングやグリース類から汚染の可能性のある SS-4 JB バルブは取り外した。SS-4 BKT バルブでもステムチップなどに使われている Kel-F 樹脂から汚染の可能性はあるが、後者は減圧加熱処理 ($\sim 10^{-3}$ mmHg、 $\sim 175^{\circ}\text{C}$) によって汚染の可能性を小さくすることができる。

容器は飛揚前に 10^{-5} mmHg 程度に減圧しておき、数日間その真空度が不変なものだけを使用した。

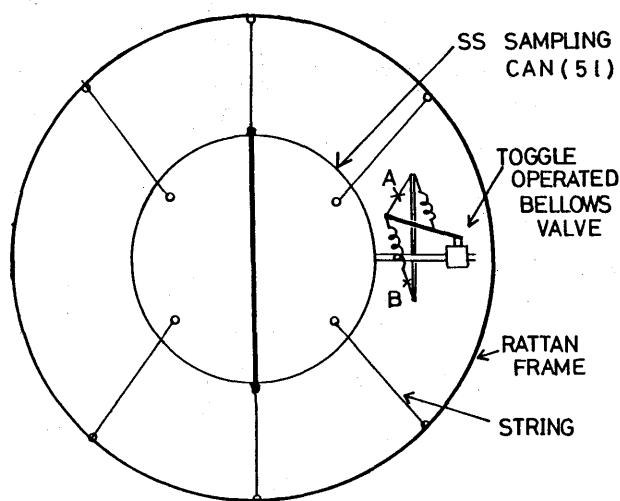


図 1.1 試料採集ゾンデ

a) ステンレススチール製採集容器

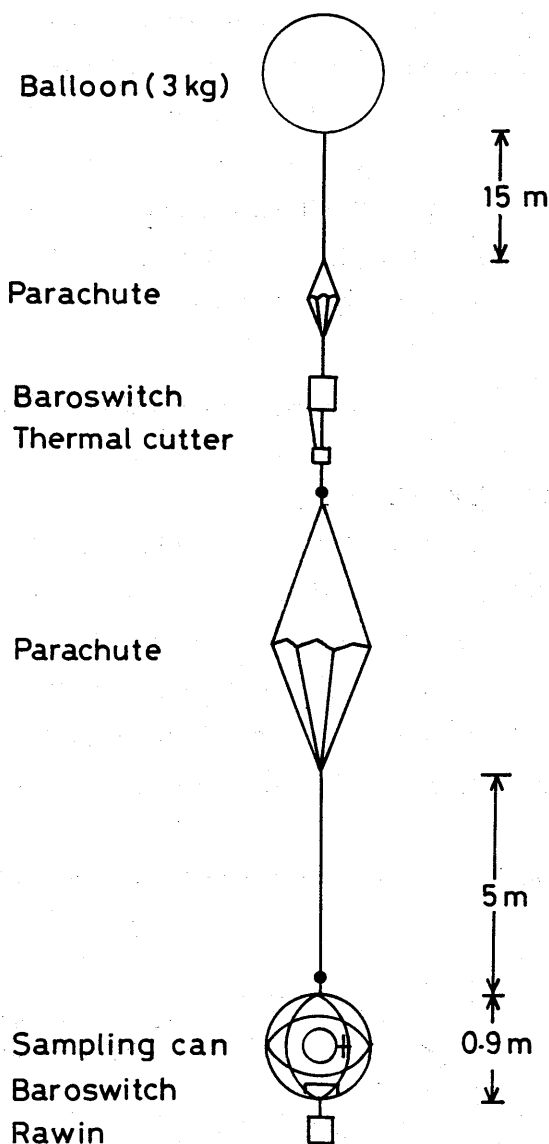


図1.1 b) ゾンデの構成

又落下の際のショックを小さくするため容器は籐製の輪7個から作った籠の中に16本の紐で固定した。

試料採集があらかじめ設定した気圧高度で正確に行われるよう、気圧スイッチ用の空盒気圧計はそれまで使用していたP64型、P64A型、P75型からP79型に切り換えた。

気圧スイッチの電気回路は2個のサイリスタと1個のトランジスタから成っていて、設定した気圧高度に達すると気圧計を利用した回路が閉じ、ヒーター1がナイロン紐をA(図1.1.a)の箇所

で焼き切りトグルバルブが開く。約30秒後ヒーター2がB（図1.1.a）の箇所でナイロン紐を焼き切りトグルバルブは閉じる。

試料採集を確実にするため空気採集後ゾンデはさらに数100m以上上昇させてから、P79型気圧計を利用したスイッチによりナイロンロープを焼き切りゴム気球を切り離した。採集容器は特殊ゾンデ用パラシュートで降下させた。ゴム気球はすべて3kgのものを使用した。

採集容器を速く、確実に回収するためには当日の落下予想地点を精度よく推定することが必要で、これは実験の安全性の点からも重要である。さらに降下中のゾンデのそれまでの飛行データから落下地点をすばやく推定することも必要である。

その為にゾンデの方では、レーウィンの気圧計にP79型を使用し、注水電池は3～4時間発振を続けられるようにB75型を3ないし4個並列につないで使用した。

落下地点の予想にはPC8800（NEC）のシステムを使用した。まず8時半放球のゾンデデータを利用し当日の落下予想位置を推定した。採集ゾンデ放球後はその上昇データを入力し、気球切り離した後ただちに落下位置を予想できるようにした。この予想は降下時のデータを追加入力することによりただちに修正できるようにした。

1.2.2 ガスクロマトグラフ測定

ガスサンプラー（島津MGS-4）の六方コックは回転面にテフロンを使用しているので、汚染の可能性を小さくするためこれを鍍金属製のバルブCarle 2021に取り替えた。

気球によって採集した試料の測定に際し、バルブの開き方が不十分ではなかったかと思われる結果が何回か見つかったので、1983年の夏からはすべての容器について回収後すぐ内圧を測定するようにした。また濃縮操作の際に加える超高純度 N_2 がしばしば汚染の原因になったので、内圧が50mb以上ある試料についてはなるべく濃縮せずに測定を行った。

CF_2Cl_2 および $CFCl_3$ の参照用ガスには、それらを約20ppm含む三種混合ガス（ベースガス： N_2 日本酸素、東洋酸素または製鉄化学）を引き続き1次標準ガスとして使用した。 N_2O の参照用ガスは前回報告した方法では希釈倍率が大きすぎて精度を維持することが難しいので、 N_2O 970ppmを含

表1.2 空気試料（1気圧）に対する
ガスクロマトグラフ測定上の誤差

化 合 物	CF_2Cl_2	$CFCl_3$	N_2O
検 出 限 界	15 ppt	4 ppt	10 ppb
参照用ガスの混合比	400 ppt	400 ppt	300 ppb
参照用ガスの測定の精度	1.9 %	0.6 %	2.1 %
参照用ガス間の精度	2.3 %	3.2 %	2.9 %
試料の平均測定誤差	± 1.0 %	± 0.9 %	± 2.0 %

む混合ガス（ベースガス：空気、高千穂化学工業）を標準ガス発生機（Standard Technology SG GU-72 AC3）によって、N₂で0.3 ppmにまで希釈して使用した。

試料空気（1気圧）に対するガスクロマトグラフ測定上の誤差等を表1.2に示す。濃度の単位はすべて体積混合比で示しており、1 ppm = 10⁻⁶ V/V、1 ppb = 10⁻⁹ V/V、1 ppt = 10⁻¹² V/Vである。

1.2.2.1 CH₄の測定

気球で採集した試料についてCH₄の測定を数回試みた。ただし試料の濃縮は行わなかった。

測定には島津ガスクロマトグラフGC-mini 2を使用しデータ処理には島津クロマトバックC-R3Aを使用した。測定条件を表1.3に示す。参照用ガスは空気に大気と同程度（～1.7 ppm）のCH₄を混合させたもの（高千穂化学工業）を使用した。ピーク面積は0.2～3.0 ppm（1気圧）の範囲でCH₄濃度に比例した。チャート上の検出限界は7 ppb、参照用ガスの測定の繰り返し誤差は0.5%以下であった。

表1.3 ガスクロマトグラフによるCH₄の分析条件

カラム	ガラスカラム 3 m × 3 mm i.d.
充填剤	モレキュラーシーブ 5 A (30～60メッシュ)
温度	50 °C
キャリアーガス	超高純度 N ₂ (99.9995 %)
流量	20 ml/min
検出器	FID
温度	100 °C
水素	高純度 H ₂ (99.99 %)
空気	乾燥管（シリカゲル）を通した空気（一般）
試料量	5 ml (島津ガスサンプラー-MGS-4)

1.3 結果

1.3.1 対流圏におけるCF₂Cl₂、CFCl₃およびN₂O

航空機によって採集した試料の測定結果を年度ごとに表1.4～1.7に示す。

CF₂Cl₂ および CFCl₃ について年度ごとの平均値および標準偏差値を表1.8に示す。発生源から直接の影響を除くため高度2 km以下の測定値を除いた平均値および標準偏差値も（ ）内に示す。高度2 km以下の測定値を除いた平均値を日本上空（34°～38°N）における対流圏のバックグラウンド濃度と考えたが、その経年変化を図1.2に示す（●：平均値と標準偏差）。ここで1980年度と1981年度のCF₂Cl₂の平均値は大変小さく、ガスクロマトグラフ測定に問題があったと思われるので削除

表 1.4 飛行機で採集してきた試料の測定結果 (1982年2月)

月 日	高 度 km	気 圧 mb	時 刻	場 所	容 器	体 積 混 合 比		
						CF ₂ Cl ₂ ppt	CFCl ₃ ppt	N ₂ O ppb
1982年								
2月14日	5.0	572	14:25	川 崎	A-1	—	—	—
	2.0	806	14:41		A-2	345	216	344
	2.0	798	14:50		A-3	325	196	331
	1.9	802	14:57		A-4	329	199	316
	1.7	830	15:15	御 蔵 島	A-5	342	201	321
	0.9	910	15:28	〃	C-1	336	200	343
	0.9	914	15:43	利 島 の 東	C-2	351	207	336
	0.9	910	15:53		C-3	362	217	336
	0.9	910	15:58	城 ケ 島	C-4	355	214	345
	0.9	912	16:03		C-5	373	213	344
2月15日	1.2		11:16		A-6	329	206	335
	4.9		11:32		A-7	308	190	329
	5.1		11:41		A-8	310	191	319
	5.1		12:24		A-9	307	183	335
	7.2		13:01		A-14	—	187	350
	7.2		13:27		C-6	—	201	—
	7.2		13:33		C-7	—	185	345 *
	7.2		13:56	三宅島の北	C-8	—	193	330 *
	5.0	539	14:14		C-9	312	187	—
2月16日	1.0	910	11:44		C-19	330	224	340
	2.4	758	11:50		C-20	—	—	—
	4.8	565	12:01		C-24	308 *	189	335
	2.6	748	12:28	大島の北東	C-25	308	184	336
	2.6	748	12:45	三 宅 島	C-14	309	—	—
	2.6	748	12:59	八丈島の北	C-15	304	190	332
	4.7	560	13:16		C-16	297	—	324
	3.4	660	13:25		C-17	311	—	326
	1.3	868	13:40	八丈島の北東	C-18	305	—	322
	1.3	868	14:10	利 島 の 東	C-54	305	187	333
	0.7	935	14:27	逗 子 の 東	C-55	—	—	—
	0.4	970	14:31	横 浜	C-56	446	284	333
2月18日	2.0	800	13:57		C-29	313 *	226	338
	3.1	702	14:03		C-31	—	184	338 *
	3.9	617	14:08		C-32	306	181	348 *

表1.4 (続)

月 日	高 度 km	気 圧 mb	時 刻	場 所	容 器	体 積 混 合 比		
						CF ₂ Cl ₂ ppt	CFCl ₃ ppt	N ₂ O ppb
2月18日	5.2	543	14:47	百 里 基 地	C-34	300	190	—
	6.0	473	14:23		C-33	306	—	328
	7.1	409	14:33		C-10	—	193	343 *
	8.1	355	14:47		C-11	307	182	—
	8.0	360	14:58		C-12	—	192	—
	6.0	476	15:44		C-13	312	183	—
	5.0	546	15:51		C-37	295	186	336
	4.0	624	16:19		C-45	—	179	343 *
	3.0	711	16:25		C-51	305	185	351
	1.2	897	16:37		C-57	370	268	333
	1.0	909	16:41		C-60	473	344	343
	0.5	965	16:45		C-62	453	320	—

* 試料が少なく1回だけの測定

表1.5 飛行機で採集してきた試料の測定結果 (1982年10月~1983年2月)

月 日	高度 km	気 圧 mb	時 刻	場 所	容 器	体 積 混 合 比		
						CF ₂ Cl ₂ ppt	CFC1 ₃ ppt	N ₂ O ppb
1982 年								
10月28日	6.6		11 : 45	36.6°N、140.1°E	59	328	—	—
	5.5		12 : 07	37.2°N、140.4°E	60	335	200	—
	4.6		12 : 12	37.5°N、140.6°E	61	336	196	—
	3.7		12 : 19	37.8°N、140.7°E	62	330	200	—
	2.7		12 : 26	37.9°N、140.8°E	63	361	203	—
	1.5		12 : 31	38.0°N、140.9°E	64	376	213	—
	0.9		12 : 38	37.9°N、140.9°E	65	397	221	—
12月20日	4.6		16 : 44	35.9°N、138.0°E	C—45	343	192	314
	3.8		16 : 47	35.7°N、137.9°E	C—37	345	190	—
12月21日	8.2		16 : 35	36.3°N、138.6°E	C—46	345	—	—
	7.3		16 : 40		C—58	335	194	—
	6.1		16 : 44		C—48	333	187	317
	4.9		16 : 49		C—50	340	184	323
	4.1		16 : 52		C—61	333	190	310
	2.0		16 : 59		C—53	332	195	313
1983 年								
2 月 3 日	0.7		15 : 55	34.5°N、137.2°E	C—42	340	235	316

表1.5 (続)

月 日	高 度 km	気 圧 mb	時 刻	場 所	容 器	体 積 混 合 比		
						CF ₂ Cl ₂ ppt	CFC1 ₃ ppt	N ₂ O ppb
2月3日	0.7		16:23	34.1°N、137.7°E	C-43	—	—	—
	1.2		16:42	34.0°N、137.4°E	C-41	340	—	—
	1.2		16:56	34.3°N、138.0°E	C-51	346	—	—
	1.2		17:16	34.5°N、137.3°E	C-56	331	—	—
	1.2		17:36	34.9°N、136.7°E	C-39	340	—	333
2月4日 ①	1.1		10:48	34.6°N、136.6°E	C-10	362	213	329
	0.7		10:56	34.6°N、137.0°E	C-12	351	210	—
	0.7		11:05	34.6°N、137.5°E	C-63	331	—	318
	0.7		11:19	34.6°N、138.1°E	C-36	360	—	307
	0.7		11:43	34.1°N、138.1°E	C-21	349	—	328
	0.3		12:00	34.0°N、138.1°E	C-60	361	—	322
	0.3		12:11	34.5°N、138.1°E	C-44	366	—	324
	0.3		12:18	34.7°N、138.1°E	C-38	371	212	314
	0.3		12:28	34.6°N、137.8°E	C-40	358	212	322
	0.3		12:34	34.5°N、137.5°E	C-55	371	221	327
	0.3		12:41	34.6°N、137.2°E	C-52	356	—	317
	0.3		12:53	34.8°N、136.7°E	C-59	349	—	320
2月4日 ②	3.2		15:27	34.7°N、136.5°E	A-2	344	211	324
	3.2		15:56	34.0°N、137.9°E	C-64	330	191	323
	1.7		16:20	34.0°N、137.6°E	A-9	350	205	—
	0.7		16:42	34.0°N、137.9°E	A-1	377	226	310
2月5日	1.0		11:00	34.5°N、137.2°E	C-6	345	222	—
	0.5		11:50	34.0°N、137.8°E	A-7	355	201	320
	0.5		12:17	34.6°N、137.9°E	A-13	372	216	308
	0.5		12:38	34.6°N、137.0°E	A-14	369	220	312
2月7日	3.0		11:29	34.7°N、137.9°E	65	338	191	310
	5.0		11:36	34.7°N、137.9°E	64	336	200	326
	7.0		11:46	34.7°N、138.0°E	63	341	—	307
	3.0		12:40	34.2°N、139.2°E	60	323	189	311
	5.0		12:47	34.2°N、139.3°E	61	334	191	318
	7.0		12:57	34.2°N、139.3°E	62	323	201	321

表 1.6 飛行機で採集してきた試料の測定結果（1984年2月）

月 月	高 度 km	気 圧 mb	時 刻	場 所	容 器	体 積 混 合 比		
						CF ₂ Cl ₂ ppt	CFCl ₃ ppt	N ₂ O ppb
1984 年								
2 月 8 日	4.8	526	11:29	35.0°N、136.9°E	95	348	210	301
	4.8	529	11:46	34.5°N、138.0°E	91	351	213	304
	6.7	403	12:07	34.4°N、139.0°E	89	343	209	301
	2.7	693	12:25	34.3°N、138.9°E	94	357	209	306
	0.8	913	12:32	34.4°N、138.9°E	92	357	211	312
	0.1	990	12:57	34.6°N、138.0°E	93	381	323	303
	4.0	582	13:19	34.6°N、138.0°E	88	350	207	309
2 月 27 日	6		17:50	日 光 付 近	87	340	209	295
	5		17:54		C—40	342	209	304
	4		17:59		C—44	356	—	289
	3		18:04		C—60	357	211	303
2 月 28 日	6.0		17:48	36.4°N、140.4°E	86	351	207	296
	5.4		17:53	36.2°N、140.4°E	C—39	345	207	304

表 1.7 飛行機で採集してきた試料の測定結果（1984年12月～1985年1月）

月 日	高 度 km	気 圧 mb	時 刻	場 所	容 器	体 積 混 合 比		
						CF ₂ Cl ₂ ppt	CFCl ₃ ppt	N ₂ O ppb
1984 年								
12月12日	3.8		15:40	36.7°N、138.1°E	82	357	216	303
	2.9		15:51	36.5°N、138.8°E	23	361	213	301
	2.0		16:00	36.3°N、139.3°E	56	378	221	305
	1.1		16:07	36.0°N、139.8°E	91	419	239	309
12月13日	7.5		16:36	36.2°N、139.7°E	89	362	214	304
	5.9		16:46	36.3°N、139.5°E	84	360	215	298
	5.0		16:53	36.3°N、139.6°E	57	358	221	299
	4.1		16:58	36.1°N、139.6°E	88	358	215	303
	2.9		17:05	36.1°N、139.6°E	87	363	217	301
	2.0		17:15	36.1°N、139.8°E	86	372	220	305
12月14日	4.1		9:40	36.1°N、139.9°E	61	360	223	310
	3.2		9:47	36.1°N、139.9°E	62	364	218	310

表 1.7 (続)

月 日	高 度 km	気 圧 mb	時 刻	場 所	容 器	体 積 混 合 比		
						CF ₂ Cl ₂ ppt	CFCl ₃ ppt	N ₂ O ppb
1985 年								
1 月 29 日	4		11:27	34.9°N、136.5°E	1	367	217	303
	4.6	549	11:37	35.3°N、137.0°E	3	361	225	304
	4.6	546	12:04	34.5°N、138.8°E	5	359	221	299
	7.1	404	12:27	34.5°N、139.1°E	7	360	217	297
	6		12:39	34.6°N、139.0°E	9	359	216	303
	0.5		12:57	34.5°N、139.1°E	11	384	238	298
	7.0		14:10	34.5°N、138.3°E	12	364	218	302
	3.5		14:28	36.5°N、138.1°E	13	368	225	302

 表 1.8 対流圏における CF₂Cl₂ および CFCl₃ の体積混合比

年 度	採 集 期 間	高度範囲 (km)	試 料 数		平 均 値 (ppt)		標準偏差値 (ppt)	
			CF ₂ Cl ₂	CFCl ₃	CF ₂ Cl ₂	CFCl ₃	CF ₂ Cl ₂	CFCl ₃
1981	1982-2	0.4~8.1	35 (17)	38 (21)	333(306)	207(188)	44 (5)	37 (5)
1982	1982-10~1983-2	0.3~8.2	46 (19)	32 (16)	348(335)	204(194)	17 (7)	13 (7)
1983	1984-2	0.1~6.7	13 (11)	12 (10)	352(349)	219(209)	11 (6)	33 (2)
1984	1984-12~1985-1	0.5~7.5	20 (16)	20 (16)	367(361)	221(218)	14 (3)	7 (4)

() 内の数字は高度 2 km 以下の測定値を除いたもの。

してある。破線は北海道・女満別における CF₂Cl₂ の連続測定から求めたバックグラウンド濃度の経年変化 (Hirota et al. 1984 b) で、高緯度 (43.9°N) の観測点であるため絶対値が少しばかり大きいことを除けば航空機観測の結果とよく一致する傾向を示している。

最近の傾向は CF₂Cl₂、CFCl₃ 共に年 4~6% の割合で増加していることが分かる。これを 1970 年代後半の増加率 (~10%, Rasmussen et al., 1981) と比較すると 1980 年代に入ってから増加率は小さくなっていることが分かるが、その後はほぼ同様の増加率を保っているようである。星印は Rasmussen et al. (1981) や Cunnold et al. (1983 a, b) の測定結果 (45°N Oregon, U.S.A.) であるが、我々の結果とよく一致している。ただし Rasmussen et al. (1981) の値には補正係数 (CF₂Cl₂ で 0.95、CFCl₃ で 0.96, Rasmussen & Lovelock, 1983) を掛けてある。

N₂O の年度ごとの平均値および標準偏差値を表 1.9 に示す。表 1.4~1.7 から分かるように N₂O は地表から 7~8 km までほとんど均一に混合されていて、CF₂Cl₂ や CFCl₃ に比較して発生源がより広く一様に分布していることが分かる。参照用ガスの作り方を改めて以後、N₂O はほぼ 300 ppb を示している。Khalil & Rasmussen (1983) によれば N₂O は 1.0 ppb/年あるいはそれ以下の

割合で増加している。

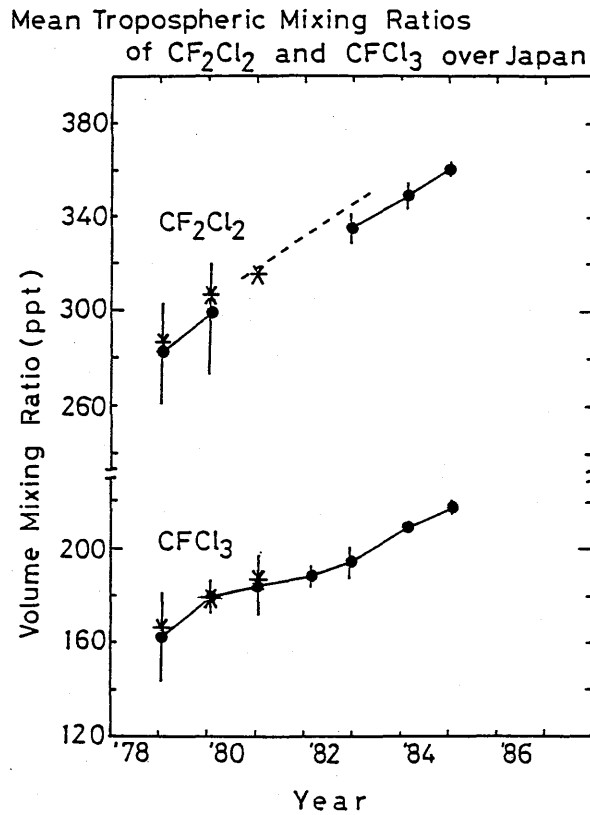


図 1.2 対流圏における CF_2Cl_2 および CFCl_3 の平均体積混合比

- ◆：日本上空における平均値と標準偏差
- ：北海道・女満別における CF_2Cl_2 の連続測定から求められた経年変化
- ＊：米国オレゴン州（45°N）における平均値

表 1.9 対流圏における N_2O の体積混合比

年 度	採 集 期 間	高度範囲 (km)	試 料 数	平 均 値 (ppb)	標準偏差値 (ppb)
1981	1982- 2	0.4 ~ 7.2	35	(325)	9
1982	1982-10 ~ 1983- 2	0.3 ~ 6.1	30	301 (318)	7
1983	1984- 2	0.1 ~ 6.7	13	302	6
1984	1984-12 ~ 1985- 1	0.5 ~ 7.5	20	303	4

() 内の数字は参照用ガスの作り方を改める前の値。ただし1981年度の値には N_2O の品質劣化による補正を施してある。

1.3.2 成層圏におけるCF₂Cl₂、CFCl₃、N₂OおよびCH₄

気球によって採集した試料の測定結果を表1.10～1.15に示す。1980年、1981年の結果は前報でも報告したが、測定値に若干修正を加えたので改めて表1.10～1.11に示す。気温と高度は当日朝のゾンデデータによった。又それぞれの化合物の鉛直分布を図1.3～1.6に示す。図には1978年以来的の結果を示すが、表に含まれる測定値のうち異常値については図に含めなかった。図中の実線は一次元光化学拡散モデルによる鉛直分布(村松他、1982)である。図1.3～1.5で10km以下の所に斜線で示してあるのは航空機で採集した測定値の範囲である。又図1.6で→|←で示したのは筑波における地上の平均値(1985年6月～11月、110試料)と標準偏差である。

測定例の少ないCH₄を除けば、皆一次元モデルに大体一致した鉛直分布を示したが、いずれの化合物についても顕著な経年変化は見出されなかった。これは最も低い採集高度である圏界面付近にお

表1.10 成層圏におけるCF₂Cl₂、CFCl₃、N₂Oの体積混合比(1980年8、9月)

No.	飛 場 月 日 時刻	試 料 採 集 高度 (km) 気圧 (mb) 気温 (°C)	落 下 地 点	発見月日	CF ₂ Cl ₂ (ppb)	CFCl ₃ (ppb)	N ₂ O (ppm)
1	8月6日 12:13	26.4 22 -43.8	茨城県筑波郡谷和原村樺木	8月6日	—	—	0.046
2	8月7日 11:49	22.0 43 -54.5	茨城県岩井市半谷	8月15日	—	—	0.358
3	8月8日 11:48	17.9 82 -63.5	千葉県印旛郡印旛村岩戸	12月5日	0.131	0.112以下	0.402
4	8月9日 12:02	22.9 37 -53.5	茨城県下妻市比毛字川原	8月9日	0.105	—	0.116
5	8月11日 13:35	27.7 18 -47.2*	茨城県岩井市半谷	10月9日	—	—	0.075
6	8月12日 13:30	24.5 29 -52.5	茨城県西茨城郡岩瀬町猿田	12月31日	—	—	0.172☆
7	8月13日 13:28	19.8 61 -63.0	茨城県竜ヶ崎市上町	8月13日	—	—	0.230
8	8月14日 13:26	24.3 30 -51.0	茨城県行方郡玉造町上山	11月25日	—	—	0.037☆
9	8月16日 13:31	27.2 19 -47.3	茨城県鹿島郡大洋村の沖	9月20日	—	—	0.174

* 過去5年間の平均値(高層気象台)。

☆ テーリングの大きなピークに重なって読み取り誤差が大きい。

表1.11 成層圏におけるCF₂Cl₂、CFCl₃、N₂Oの体積混合比(1981年8月)

No.	飛 場 月 日 時刻	試 料 採 集 高度 (km) 気圧 (mb) 気温 (°C)	落 下 地 点	発見月日	CF ₂ Cl ₂ (ppb)	CFCl ₃ (ppb)	N ₂ O (ppm)
1	8月10日 13:24	31	茨城県鹿島郡神栖町田畑	8月10日	採集容器故障		
2	8月11日 11:30	25.6 24.5 -49.0	茨城県行方郡北浦村小貫	8月11日	0.085	—	0.101
3	8月13日 11:22	21.0 50 -54.0	茨城県那珂郡那珂町福田	8月13日	0.132	—	0.191
4	8月13日 14:26	27.2 19.5 -43.5	茨城県勝田市津田	8月13日	0.042	—	0.090
5	8月14日 11:16	17.6 87 -65.3	茨城県那珂郡緒川村吉丸	1月1日*	0.132	—	0.161
6	8月14日 14:21	15.2 129 -70.3	茨城県久慈郡金砂郷村赤土字大野	9月26日*☆	0.375	0.212	0.214

* 1982年。 ☆ 缶の内圧 143 mb (23°C)。

いても測定値に大きなバラツキがあったためであるが、その原因については、1) 測定上の誤差の他に、2) その空気の流入経路の問題もあると思われる (Schmidt, 1982)。

表 1.12 成層圏における CF_2Cl_2 、 CFCl_3 、 N_2O の体積混合比 (1982 年 8 月)

No.	飛 場 月 日 時刻	試 料 採 集 高度 (km) 気圧 (mb) 気温 (°C)	落 下 地 点	発見月日	測 定 結 果 CF_2Cl_2 (ppb) CFCl_3 (ppb) N_2O (ppm)
1	8 月 9 日 11:06	24.4 29 -48.8	栃木県小山市下初田	8 月 12 日	0.098 0.042 0.077
2	8 月 9 日 15:45	21.4 47 -56.3	茨城県真壁郡明野町谷原	8 月 9 日	0.105 0.026 0.119
3	8 月 10 日 11:33	18.6 73 -62.2	埼玉県大里郡妻沼町江波	8 月 13 日	(0.031)* (0.025)* (0.041)*
4	8 月 10 日 14:52	27.3 19 -44.2	茨城県古河市新久田	11 月 24 日☆	0.082 — 0.125

* バルブの開き方が不十分。 ☆ 缶の内圧 15.3 mb (21°C)。

表 1.13 成層圏における CF_2Cl_2 、 CFCl_3 、 N_2O の体積混合比 (1983 年 8 月)

No.	飛 場 月 日 時刻	試 料 採 集 高度 (km) 気圧 (mb) 気温 (°C)	落 下 地 点	発見月日	缶の内圧(室温) (mb) (°C)	測 定 結 果 CF_2Cl_2 (ppb) CFCl_3 (ppb) N_2O (ppm)
1	8 月 21 日 12:35	25.5 24.5 -46.7	茨城県那珂湊市の沖	8 月 23 日	24.6 24.5	— — —
2	8 月 26 日 12:26	22.1 42 -54.7	霞ヶ浦、出島の沖	8 月 26 日	46.0 24	— — 0.087
3	8 月 27 日 12:51	19.0 69 -66.0	茨城県行方郡麻生町青沼	8 月 29 日	85.3 24	0.181 0.097 0.149
4	8 月 27 日 14:55	14.6 145 -66.0	茨城県行方郡潮来町日出	8 月 28 日	181 24	— — 0.292

表 1.14 成層圏における CF_2Cl_2 、 CFCl_3 、 N_2O 、 CH_4 の体積混合比 (1984 年 7 月)

No.	飛 場 月 日 時刻	試 料 採 集 高度 (km) 気圧 (mb) 気温 (°C)	落 下 地 点	発見月日	缶の内圧(室温) (mb) (°C)	測 定 結 果 CF_2Cl_2 (ppb) CFCl_3 (ppb) N_2O (ppm) CH_4 (ppm)
1	7 月 24 日 12:56	24.0 31 -52.4	茨城県筑波郡筑波町六所	7 月 24 日	22.7 25	— — — —
2	7 月 25 日 11:56	26.8 20 -48.7	茨城県結城郡石下町馬場	7 月 25 日	21.3 25	0.076 — 0.117 —
3	7 月 26 日 12:12	18.0 80 -65.8	茨城県筑波郡筑波町作谷	7 月 28 日	80.0 25	0.279 0.148 0.213 1.50
4	7 月 27 日 13:00	20.8 51 -59.2	茨城県猿島郡三和町下片野	7 月 27 日	63.3 25	0.172 0.077 0.187 —

表 1.15 成層圏における CF_2Cl_2 、 CFCl_3 、 N_2O 、 CH_4 の体積混合比 (1985 年 8 月)

No.	飛 場 月 日 時刻	試 料 採 集 高度 (km) 気圧 (mb) 気温 (°C)	落 下 地 点	発見月日	缶の内圧(室温) (mb) (°C)	測 定 結 果 CF_2Cl_2 (ppb) CFCl_3 (ppb) N_2O (ppm) CH_4 (ppm)
1	8 月 2 日 11:18	20.4 54 -59.9	茨城県稲敷郡牛久町井ノ岡新田	8 月 2 日	62.9 25	0.223 0.078 0.239 1.58
2	8 月 3 日 11:18	24.7 28 -52.8	茨城県結城郡石下町館方☆	8 月 3 日	28.0 25	0.088 — 0.088 —

☆ 又は千代川村鯨

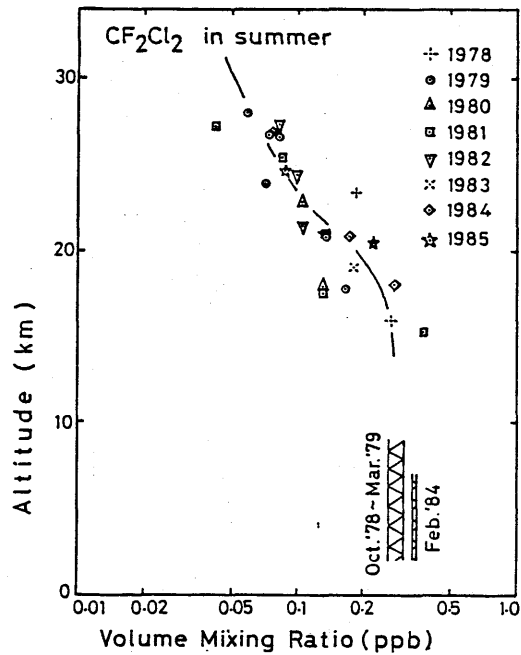


図 1.3 成層圏における CF₂Cl₂ の鉛直分布
 1978年はマイラー袋に空気を採集した。
 ◻: 航空機で採集した試料の測定値の範囲
 —: 一次元モデルによる鉛直分布 (村松他、1982)

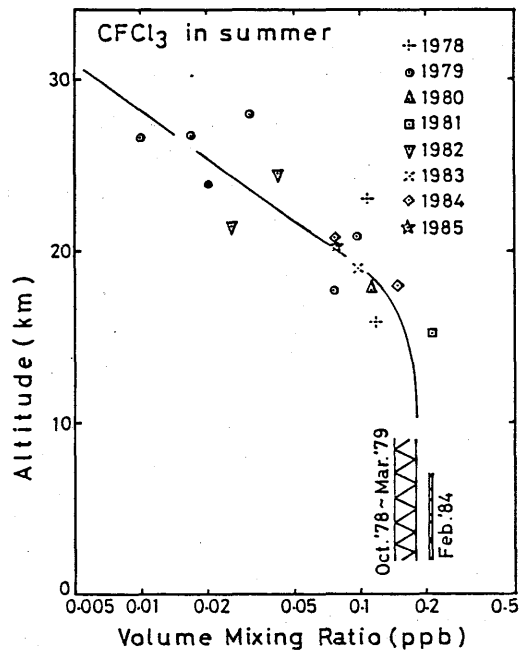


図 1.4 成層圏における CFC13 の鉛直分布
 1978年はマイラー袋に空気を採集した。
 ◻: 航空機で採集した試料の測定値の範囲
 —: 一次元モデルによる鉛直分布 (村松他、1982)

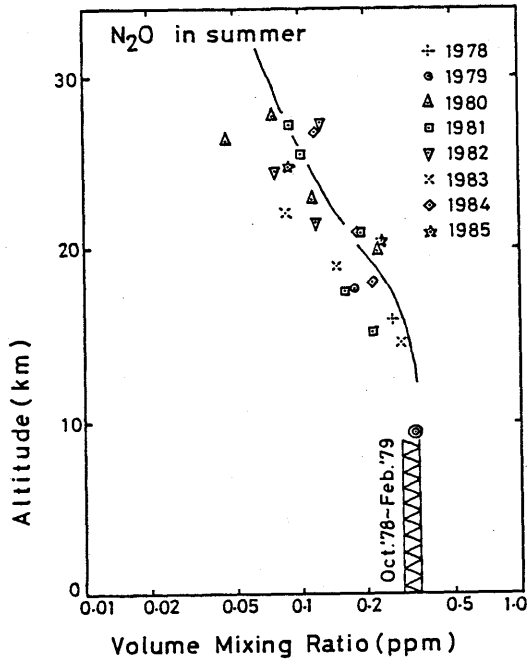


図 1.5 成層圏における N₂O の鉛直分布

1978年はマイラー袋に空気を採集した。

⊗: 航空機で採集した試料の測定値の範囲

◎: 福岡発羽田行 DC-9 (TDA) の換気孔から空気をテドラーバッグに採集した。

—: 一次元モデルによる鉛直分布 (村松他、1982)

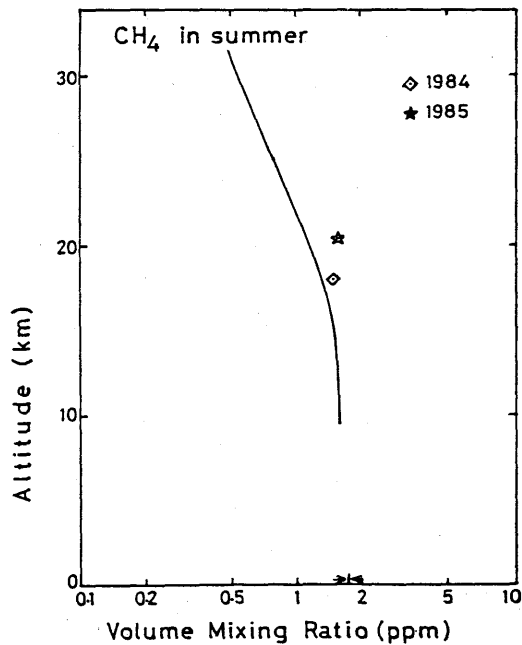


図 1.6 成層圏における CH₄ の鉛直分布

→←: 筑波における地上の平均値 (1985年6月~11月)

—: 一次元モデルによる鉛直分布 (村松他、1982)

1.4 まとめ

成層圏オゾンの消長に深く関与している大気微量成分 (CF_2Cl_2 、 CFCI_3 、 N_2O 、 CH_4) の分布の測定を 1978 年以来継続してきたが、その結果以下に示すようなことが明らかになった。

1. CF_2Cl_2 、 CFCI_3 および N_2O は対流圏では均一に混合している。ただし工業製品である CF_2Cl_2 や CFCI_3 は人口密集地の上空約 2 km までは高い混合比が観測されることもあった。
2. 対流圏における CF_2Cl_2 や CFCI_3 の増加率は 1980 年代に入って小さくなったが、それでも年 4 ~ 6 % で増加し続けている。又 N_2O は、研究途中で参照用ガスの作り方を改めたが、それ以後はほとんど一定の混合比を示している。
3. 成層圏では CF_2Cl_2 、 CFCI_3 および N_2O は共に高度が増すとともに混合比が急激に減少したが、この傾向は一次元モデルの結果とほぼ一致した。 CH_4 は、測定例が少ないが、地上における平均値よりは明らかに低い値を示した。

以上の測定結果だけから、成層圏オゾンの消長を予測することは大変難しいが、ここで得られた CF_2Cl_2 および CFCI_3 の増加傾向に近いシナリオを用いて二次元モデルによる推定が行われた (佐々木・村松、1985)。

謝 辞

「試料採集ゾンデ」の飛揚に際しては、高層气象台、特に榎本盛泰前課長、中村匡善課長を初め観測二課の方々に全面的な協力を戴きました。又航空機による試料採集に際しては昭和航空 (株) の方々に協力を戴きました。深く感謝します。

研究期間中、オゾン層に関する多くの文献を送って戴いた日本フロンガス協会の鈴木熙氏に感謝します。

なお、1983 年 2 月 3 日 ~ 5 日のフライトは、文部省「環境科学」特別研究 R11-1 「エーロゾルの滞留時間」(代表者：大喜多敏一) の観測として行われた。

参 考 文 献

- Cunnold, D.M., R.G.Prinn, R.A.Rasmussen, P.G. Simmonds, F.N.Alyea, C.A.Cardelino, A.J. Crawford, P.J.Fraser, and R.D.Rosen, 1983a, "The atmospheric lifetime experiment. 3. Lifetime methodology and application to three years of CFCI_3 data." J.Geophys. Res., **88**, 8379-8400.
- Cunnold, D. M., R. G. Rrinn, R. A. Rasmussen, P. G. Simmonds, F. N. Alyea, C. A. Cardelino, and A. J. Crawford, 1983 b, "The atmospheric lifetime experiment. 4. Results for CF_2Cl_2 bassd on three years data," J Geophys, Res., **88**, 8401-8414.
- Hirota, M., H. Muramatsu, Y. Makino, T. Sasaki, and Y. Toyama, 1984a, "The vertical distributions

- of atmospheric CF_2Cl_2 , CFCl_3 and N_2O over Japan," J. Meteorol. Soc. Jpn., **62**, 158–164.
- Hirota, M., H. Muramatsu, F. Fukui, F. Muromatsu, M. Hashimoto, M. Kuwashima, and T. Koike, 1984b, "Measurement of CF_2Cl_2 at Memanbetsu over the period between October 1980 and March 1983," Pap. Meteorol. Geophys., **35**, 63–69.
- Khalil, M.A.K. and R.A. Rasmussen, 1983, "Increase and seasonal cycles of nitrous oxide in the earth's atmosphere," Tellus, **35B**, 161–169.
- Muramatsu, H., M. Hirota, and Y. Makino, 1982, "Gas-chromatographic measurements of dinitrogen oxide in air," Bull. Chem. Soc. Jpn., **55**, 117–120.
- Rasmussen, R.A., M.A.K. Khalil, and R.W. Dalluge, 1981, "Atmospheric trace gases in Antarctica," Sci **211**, 285–287.
- Rasmussen, R.A. and J.E. Lovelock, 1983, "The atmospheric lifetime experiment. 2. Calibration," J. Geophys. Res., **88**, 8369–8378.
- Schmidt, M., 1982, "The influence of large-scale advection on the vertical distribution of stratospheric source gases in 44° and 41° north," J. Geophys. Res., **87**, 11239–11246.
- 佐々木徹・村松久史 1985, "2次元光化学モデルによる成層圏オゾンの変化の予測", 昭和60年度気象研究所研究発表会誌, p 32–41。
- 広田道夫・村松久史・牧野行雄・外山芳男・佐々木徹, 1982, "ガスクロマトグラフ法による対流圏および成層圏微量化学成分の分布の測定", 気象研究所技術報告, 第6号, 第1章, p 5–41。
- 村松久史・牧野行雄・広田道夫, 1982, "数値モデル", 気象研究所技術報告, 第6号, 第5章, p 155–227。

第2章 オゾンゾンデ観測*

2.1 はじめに

人間活動の結果大気中に放出されるクロロフルオロメタン（特に CF_2Cl_2 、 CFC_3 ）は成層圏で太陽紫外線により分解し、その分解生成物がオゾンと反応し、オゾンを減少することが懸念されている。オゾン密度の減少率の最大の高度は約40kmであると推定されている（村松他、1982；佐々木・村松、1985）。これ等の結果によると減少率は冬季に大きく、また高緯度ほど大きくなっている。減少率の大きさは1980年時点で高度40kmで最大7%であるが、オゾン全量では約1%と推定される。現在までにオゾン全量がクロロフルオロメタンのために減少したという確実な観測事実は示されていないが、これはオゾン全量の測定精度の不十分さもあるが、オゾンの変動の自然的要因と人為的要因の分離の困難さもある。

クロロフルオロメタンによるオゾンの変化を測定から実証するには、オゾン全量より高度分布の測定が有利である。これは上述のごとく減少率は高度40kmでは全量よりはるかに大きいことと、全量観測では成層圏下部—対流圏での気象による大きな変動が関係するからである。

我々は化学的オゾンゾンデによる高度40kmをめざしたオゾン測定を試みた。それには現用のオゾンゾンデを改良して、気圧2mbまで確実に測定できることが必要であり、このためには、気球、気圧計、反応管、ポンプ等が問題となった。本報告ではゾンデに関する基礎的実験と、オゾン高度分布の測定結果を述べる。

2.2 ゾンデの試験

2.2.1 気圧計

高度40kmの気圧は約3mbである。この気圧をゾンデによって測定するには空盒か沸点が簡便であるが我々は最も実績のある空盒を利用することとした。空盒気圧計を使用したときの測定誤差はどのくらいになるか検討した。

空盒はルーチン観測で使用されているRS2-80型を選んだ。まず空盒に対する温度の影響を調べた。温度を -40°C から $+20^{\circ}\text{C}$ まで変化させて温度変化に対する気圧計の変化を実験で求めた。図2.1(a)–(b)はその結果を示す。温度変化は、

$$P = aT + b$$

で近似できる。ただし P は気圧 (mb)、 T は温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 a は温度係数、 b は $T = 0$ のときの気圧である。図中No.は接点の番号である。温度係数 a の気圧に対する変化を図2.2に示す。飛揚したとき

* 村松久史、旭 満、広田道夫、牧野行雄、佐々木徹：高層物理研究部

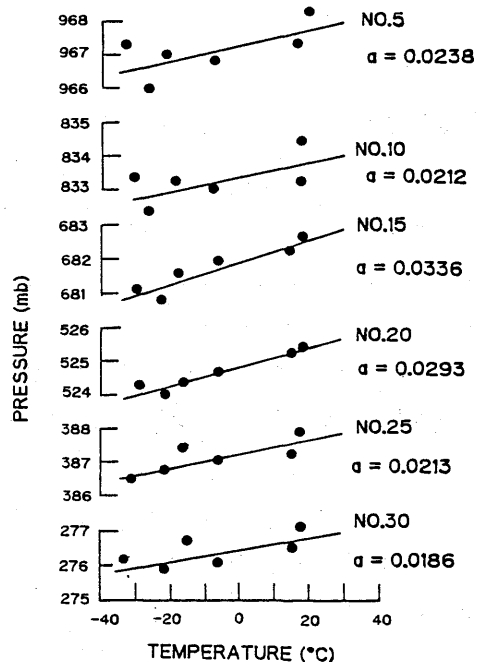


図 2.1(a) 空盒気圧計の温度変化、 α は温度係数 (mb/°C)、Noは接点番号

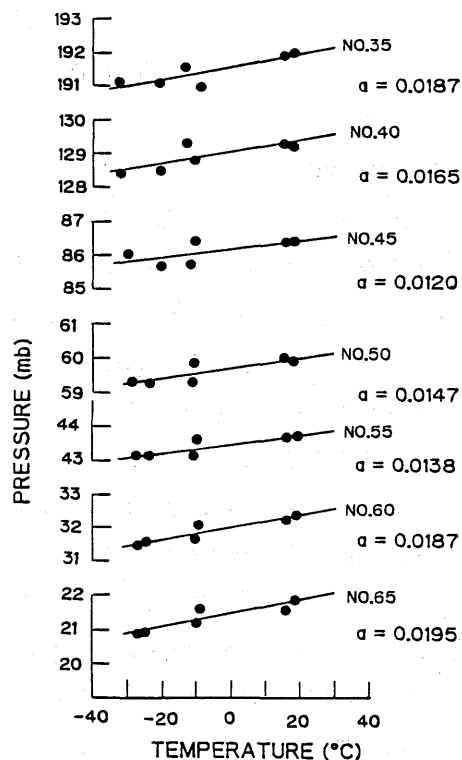


図 2.1(b) 空盒気圧計の温度変化、 α は温度係数 (mb/°C)、Noは接点番号

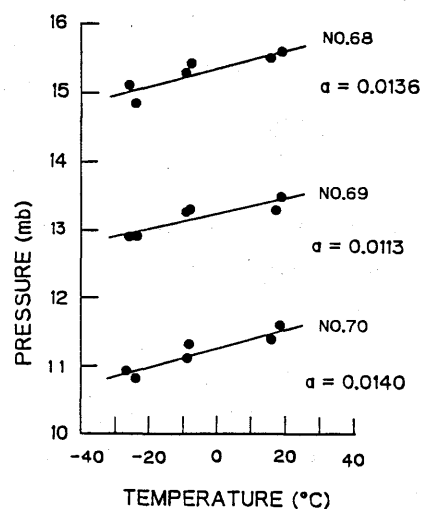


図 2.1(c) 空盒気圧計の温度変化、 α は温度係数 (mb/°C)、Noは接点番号

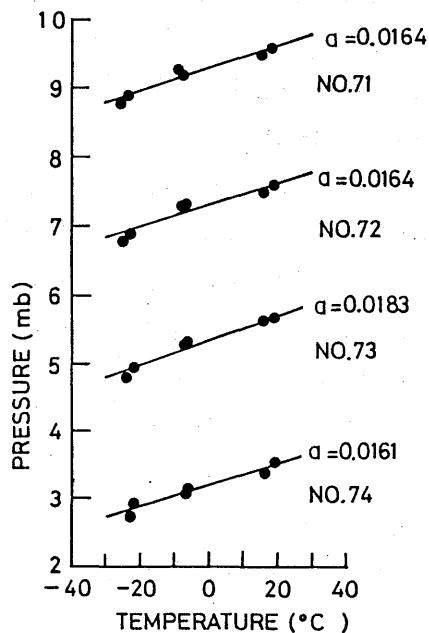


図 2.1(d) 空盒気圧計の温度変化、 α は温度係数 (mb/°C)、Noは接点番号

のゾンデ内部の温度を何回か測定し、地上での校正時の温度との差を見積り気圧計の温度補正を実施したが、この大きさは3 mb 付近では0.2 ~ 0.4 mb であった。

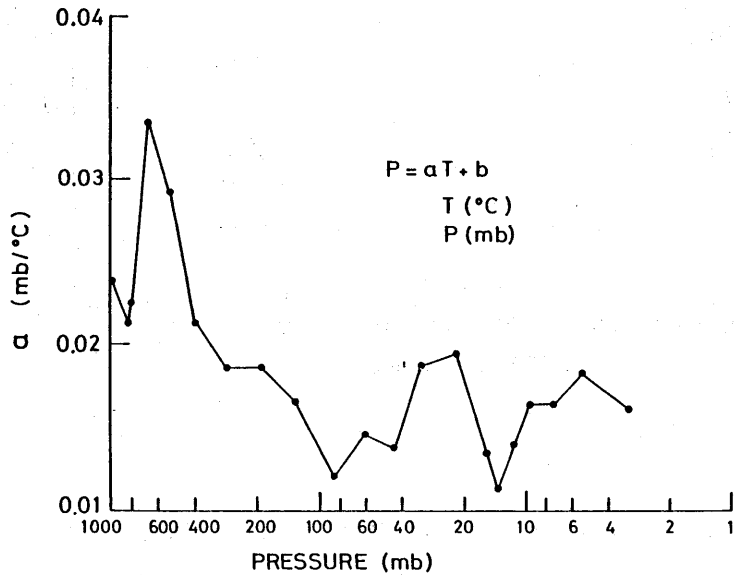


図 2.2 空盒気圧計の温度係数

次に気圧計のばらつきの誤差であるが、同一接点の3回の常温での測定結果を図 2.3 に示す。3個の気圧計に対する標準偏差を示すが60mb以下の気圧では0.2 mb以下であることが分かる。

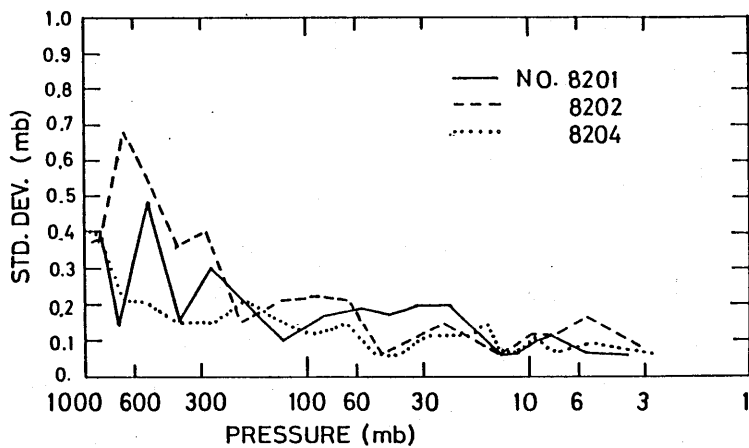


図 2.3 空盒気圧計(3個)のくり返し測定のばらつき
たて軸は標準偏差を示す。

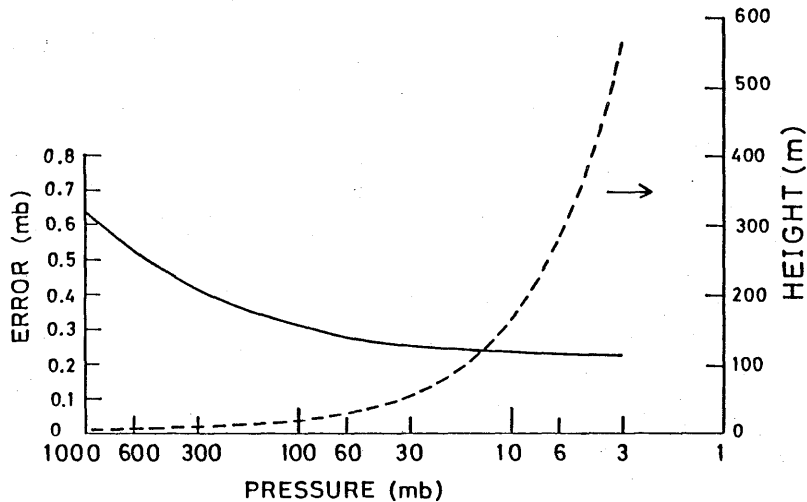


図 2.4 空盒気圧計の誤差(実線)とそれに対応する高度の測定誤差(破線)

このばらつきの平均的な値に、較正のときの気圧計の読取誤差 0.1 mb を加えたものを空盒気圧計の誤差と考えて示したのが図 2.4 である(温度補正はほどこしたとして)。3 mb (約 40 km の高度) では気圧の測定誤差(実線)は約 0.23 mb であり、これに対応する高度の誤差(破線)は約 550 m となる。10 mb (高度約 31 km) では測定誤差は約 160 m となる。

2.2.2 ポンプ

現用のオゾンゾンデ(RSII-KC79型)及び以前の型(RSII-KC68型)に使用されているポンプの流量は次式で表わされる(Kobayashi and Toyama, 1966)

$$V_P = V_S^* \left(1 - \frac{K}{P}\right) \quad (2.1)$$

$$\text{ただし } V_S^* = f N V_S$$

$$K = \Delta P \cdot \frac{V_D}{V_S^*} = \frac{1}{f N} \frac{V_D}{V_S} \cdot \Delta P$$

ここで V_P は一定気圧 P (mb) でのポンプの流量、 V_S 、 V_D は図 2.5 に示すように、1 ストロークの容積及びデッドスペース容積を示す。 N はストローク数 (r.p.m.)、 f はロスファクター、 ΔP は外気を注入する管が反応液に浸っている深さ Δh に依存する負荷の気圧 (mb) である。(2.1) 式で分るように K はバブリングがストップする気圧であり、これは ΔP 、 V_D/V_S 、 f により決まるが個々のポンプに対して実験で決定されるべき値である。

我々の目標は 3 mb までオゾン进行測定することでありそのためには少なくとも 2 mb 以下の気圧まで確実にバブリングが必要である。

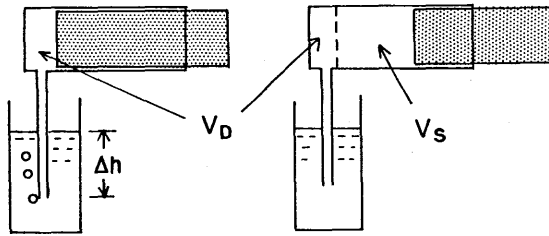


図 2.5 ポンプの模式図

V_S はポンプの1ストロークの容積、 V_D はデッドスペース容積を、 Δh は反応液の深さを示す。

バブリングが止まる気圧、 K の基本的性質を調べるため、反応液のほかに飽和蒸気圧の異なるグリセリン、シリコンオイルを用いて K の値を実験的に決定した結果、(2.2)の実験式で表されることが分った。

$$K = \sqrt{aP_{sol} + b\Delta P} \cdot \sqrt{\frac{V_D}{V_S}} \quad (2.2)$$

ただし a 、 b は定数、 P_{sol} は溶液の飽和蒸気圧 (mb) で、現用ポンプでは $a = 1.07$ (mb)、 $b = 0.11$ (mb) でありまた $V_D/V_S = 1.25$ である。

ここで新たに分ったことは、溶液の飽和蒸気圧が関係すること、したがって温度が K に関係する

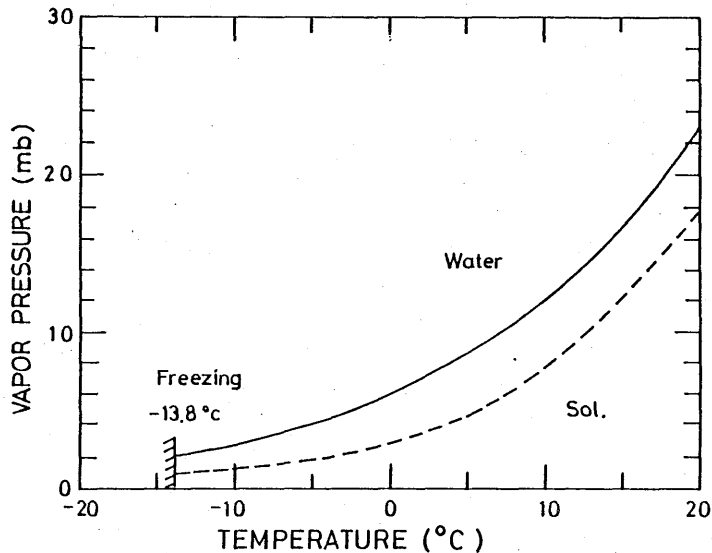


図 2.6 オゾン反応溶液(破線)と水(実線)の飽和蒸気圧

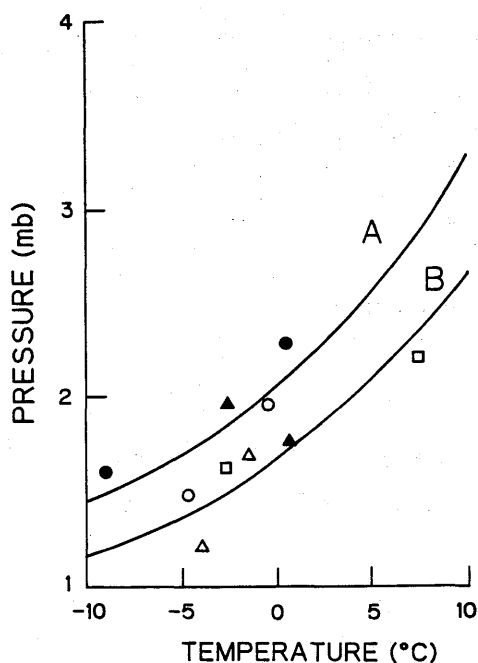


図 2.7 バブリングの止まる気圧

実線Aはルーチンのポンプ ($V_D/V_S = 1.25$)、実線Bは改良したポンプ ($V_D/V_S = 0.82$)
 に対して (2.2) 式から求めた曲線 ($\Delta P = 3.0$ mb とした)。
 丸、三角形等の記号は60年度に試験した 5 個のポンプの値を示す。

ことである。オゾン反応溶液の飽和蒸気圧を実験で求め図 2.6 に示す (破線)。この飽和蒸気圧を用いて (2.2) 式から計算した K の値の温度依存性を図 2.7 に示す。ただし ΔP は 3.0 mb とした。曲線 A は現用ルーチンで使用しているポンプに対するもので ($V_D/V_S = 1.25$) ある。温度は反応管の値である。冬期の飛揚実験では反応管の温度は 0 ~ -5 °C である。したがって現用ルーチンのポンプでは K は約 2 mb 前後である。この K の値はできるかぎり小さい方が望ましい。このためには V_D/V_S を小さくするか、 P_{sol} を小さくするかである。 P_{sol} を小さくするためには反応管を低温にすればよいがこれは実行上制御がむずかしく、また -13.8 °C では凍結する。 ΔP は溶液の深さを浅くすれば小さくなるが、白金網の電極が露出してはいけないうので限度がある。したがって最も妥当なのは V_D/V_S を小さくすることである。今回の実験では V_S を約 50% 大きくして (流量約 600 cc/min) $V_D/V_S = 0.82$ とした。(流量を大きくすると反応が完全に行われなくなる危険がある)。図 2.7 で曲線 B がこの改良形ポンプに対するものである。この曲線によると、バブリングが止まる気圧は 5 °C で約 2 mb、0 °C で 1.7 mb、-5 °C で約 1.3 mb である。同図に示した、丸、三角形等の記号は60年度に試験した 5 個のポンプに対する実験値で、各 2 点の異なる温度で K を求めた。ポンプの個々の加工精度が異なるためと思われるが、ばらつきが見られる。しかし 1 個を除くと 0 °C 以下では K は 2 mb 以下となっている。

2.2.3 反応管

現用ルーチンの反応管は単管式である（広田、村松、1986）。高度40kmまで気球が上昇するのに110—120分かかるため長時間のバブリングが必要であることと、流量を50%増したためバブリングが激しくなり、単管式の反応管では溶液がバブリングのため排気管に直接的に逃げるおそれがある。このような理由で反応管に側管を付けた（図2.8で側管STを示す）。

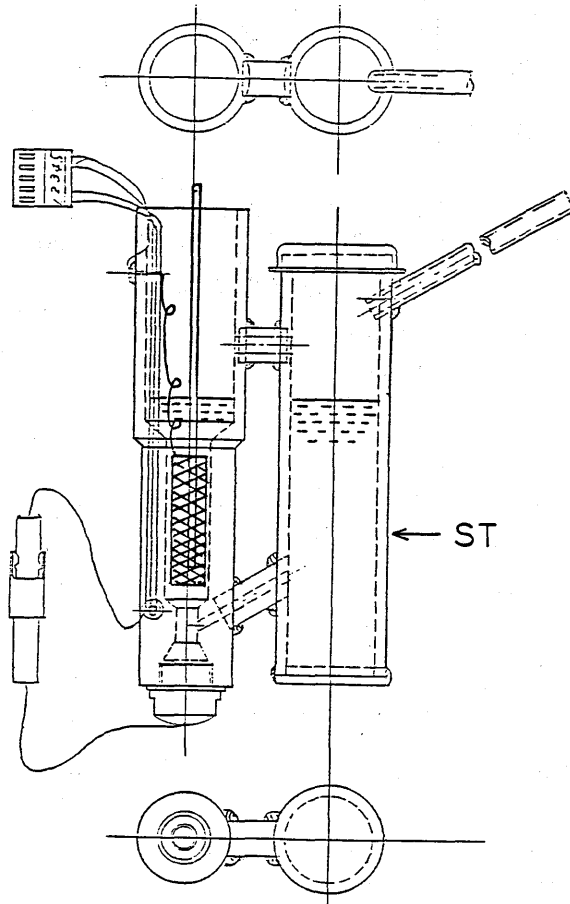


図2.8 反応管の構造
STは付加した側管を示す。

側管を付けたため、反応液の減少の大きさ、応答速度、オゾンの反応割合（反応効率）のチェックを行った。

まず反応液の減少であるが、飛揚実験と同じ上昇速度で気圧を減少して3 mb までの連続バブリングでは（反応管の温度は3℃～4℃の範囲）、反応液の減少はほとんど認められなかった（す

なわち 1 mm以下)。

次に応答速度であるが、オゾン濃度を階段状に増加、または減少させたとき、最終平衡値の63%まで変化するに要する時間を測定した。結果を図2.9に示す。オゾンを増加させたときの方が、減少させたときより数秒大きいのが平均的に約30秒である。

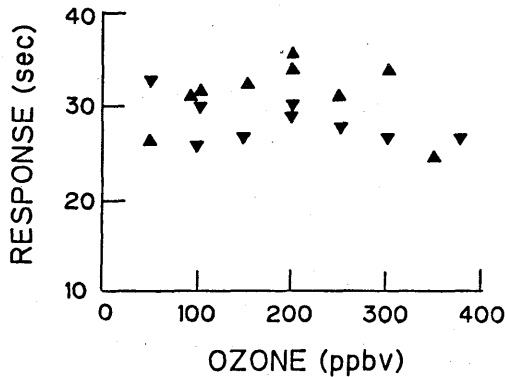


図2.9 応答時間
▲はオゾンを階段状に増加したとき、
▼は減少したときを示す。

ポンプの流量を増したためオゾンが完全に反応するかどうかの実験を行った。試験方法は2本の反応管を直列に結び、地上気圧で第1の反応管に濃度既知のオゾンを吸入させ、第2の反応管は第1の反応管の排気を吸入させた。

表2.1に結果を示す。

表2.1 反応管のオゾン反応効率

オゾン混合比 (ppbV)	50	100	200	250	300	380	498
反 応 効 率 (%)	100	100	100	98	98	92	91

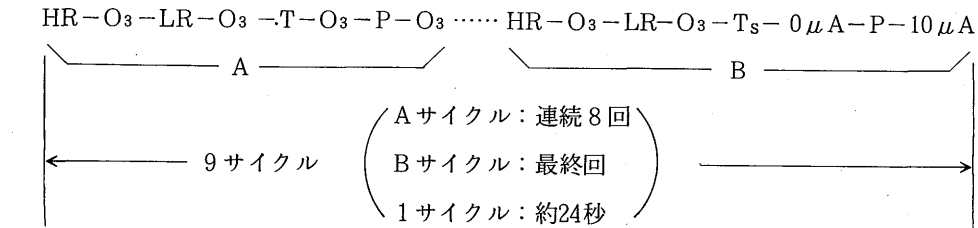
表2.1から分るように0.3 ppmV以下のオゾン濃度では98%が反応する。実際の大気中のオゾン濃度は30mbで約6 ppmVである。反応管に吸入されるオゾン量は1,000 mbに換算すると0.18ppmVに相当する。また50mbで6 ppmVのオゾン濃度を仮定すると(ほとんど観測されない高濃度だが)、1,000 mbでは0.3 ppmVに相当する。

したがって、この反応管はオゾンの98%はつかまえていることが分る。

2.2.4 信号切換及び資料整理

オゾンの反応電流、0及び10 μ A標準信号、さらに気温、液温、HR（ハイレハレンス）、LR（ローレハレンス）、気圧信号を切換器により切換え低周波発振器へ接続する。順次切換えられる各要素（電圧変化）に応じてV-f変換を行い低周波パルスが発生し、搬送波発振器をON、OFFして、100～1,000 Hz間の変調をかける。

信号の切換順序及び標準信号の変調周波数は次のとおりである。



但し、

HR: ハイレハレンス (950 Hz)	0 μ A: 標準 0 μ A 信号 (270 Hz)
LR: ローレハレンス (150 Hz)	10 μ A: 標準 10 μ A 信号 (640 Hz)
O ₃ : オゾン信号	T: 気温信号
P: 気圧信号	T _s : 液温信号

オゾン量、気温の算出は、特殊ゾンデ観測実施要領（観測資料整理編、1974）に従った。

2.3 飛揚実験及び結果

オゾンゾンデの重量は約 1.30 kg であるが、パラシュート、ナイロン糸、注水（注水電池用）を加えると、ペイロードは約 1.90 kg となる。この測器を 40 km まで上昇させるためには、約 5 kg のゴム気球が必要である。気球の材質としては天然ゴムと人造ゴムがある。この両者の小切片の地上での性能試験では、人造ゴムが天然ゴムにまさっているが、気球に成形しての飛揚結果では破裂高度に関して両者の差は、はっきりしなかった（または天然ゴムの方がむしろ破裂高度は高かった）。

純浮力（フリーリフト）3.50 kg としたときのゾンデの上昇曲線の例を図 2.10 に示す。この例は代表的なもので、ペイロード 1.9 kg、純浮力 3.5 kg、気球 5.2 kg である。約 110 分間で高度 40 km まで達していて、平均の上昇速度は約 360 m/min である。5 km 区間の上昇速度を表 2.2 に示す。

表 2.2 気球の上昇速度

高 度 区 間 (km)	0—5	5—10	10—15	15—20	20—25	25—30	30—35	35—40
上昇速度 (m/min)	234	308	306	366	393	447	479	543

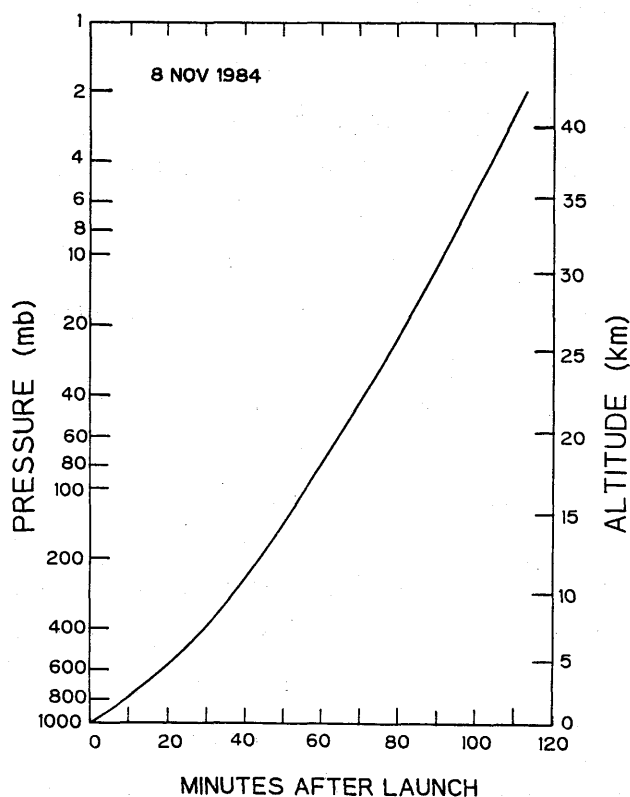


図 2.10 オゾンゾンデの上昇曲線
ペイロード 1.9 kg、純浮力 3.5 kg
気球 5.2 kg である。

飛揚実験は1983年の2月から1985年12月までの間で主として冬期を中心に実施した。表 2.3 に飛揚実験の日付、気球の到達高度、気圧、時間等を示す。

個々の飛揚実験から得られたオゾン、気温、風等の高度分布を図 2.11(a)、(b)～図 2.27(a)、(b)に示す。

図中(a)の左側はオゾン分圧の高度分布を、右側は温度の高度分布を示す。 T_A は外気温、 T_S は反応管の温度を示す。 T_{IN} はゾンデ内部の温度を示すが、これは外気温測定用のサーミスタを用いた。この場合には外気温としては09 JSTのルーチン観測の気温 T_{AR} を示してある。(b)図は風速 (左側)、風向 (右側) を示す。

図 2.28(a)、(b)、(c)には10mb (高度約 31 km)、6 mb (高度約 34.5 km)、4 mb (高度約 37.5 km) におけるオゾン質量混合比、気温、風速の東西成分 V_x と南北成分 V_y を示す。

表 2.3 気球の到達高度等

日 付	最 高 点			ペイロード (kg)	純 浮 力 (kg)	気 球 (kg)	
	高度 (km)	気圧 (mb)	時 間 (分)				
4 FEB 1983	37.50	4.1	122	1.68	1.50	4.23	
25 MAR 1983	36.34	5.0	140	1.77	1.73	4.05	
3 DEC 1983	38.54	3.5	122	2.01	2.00	5.10	
5 DEC 1983	42.38	2.2	135.5	1.99	2.30	5.06	
10 JAN 1984	38.55	3.3	116	1.89	2.50	4.92	○
12 JAN 1984	40.71	2.7	116.5	1.89	2.30	4.90	
2 FEB 1984	39.06	3.2	135	1.94	2.50	4.95	○
7 MAR 1984	39.52	3.1	104	1.95	3.55	5.04	
8 NOV 1984	43.71	1.7	115	1.90	3.50	5.20	
5 DEC 1984	37.48	4.2	101	1.71	3.50	5.20	
9 JAN 1985	38.41	3.2	96.5	1.65	3.00	5.25	
6 FEB 1985	39.43	3.0	105.5	1.94	3.00	5.20	
7 FEB 1985	43.05	1.8	124	1.91	3.00	5.25	○
18 OCT 1985	37.40	4.1	105	1.85	3.05	5.10	
12 NOV 1985	40.55	2.7	112	1.88	3.12	5.14	
19 NOV 1985	35.61	5.6	98	1.88	3.12	5.15	
2 DEC 1985	37.88	3.8	104	1.91	3.29	5.15	○

○印はゾンデ内部温度測定

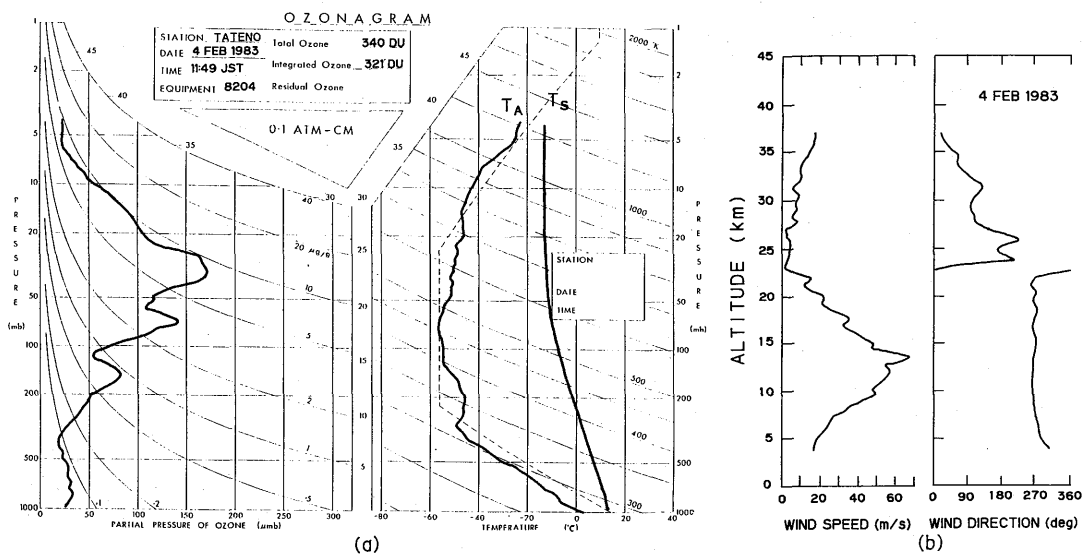


図 2.11(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1983年2月4日
T_A: 気温、T_S: 反応管温度

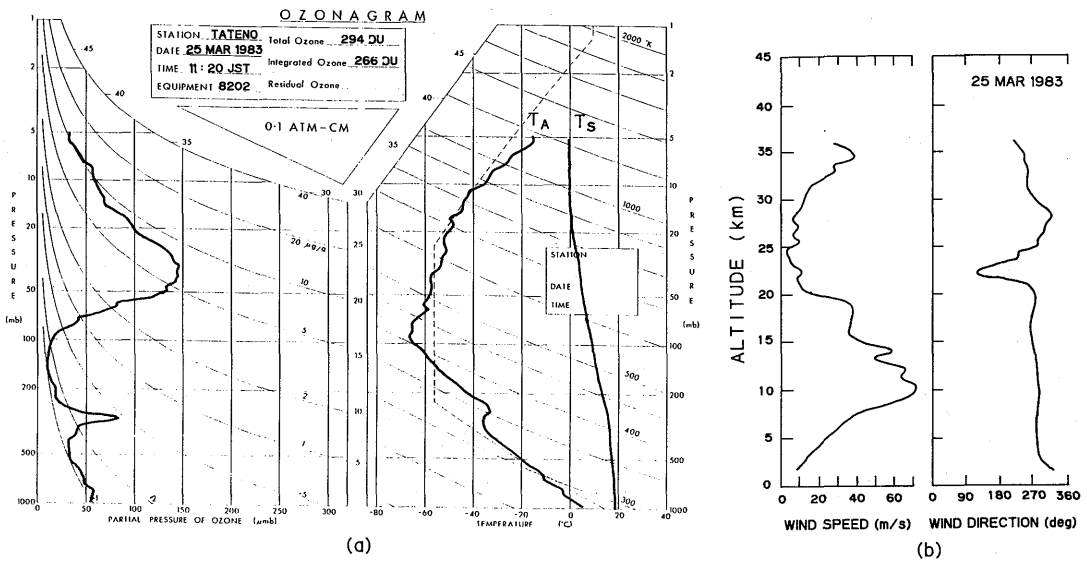


図 2.12(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1983 年 3 月 25 日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

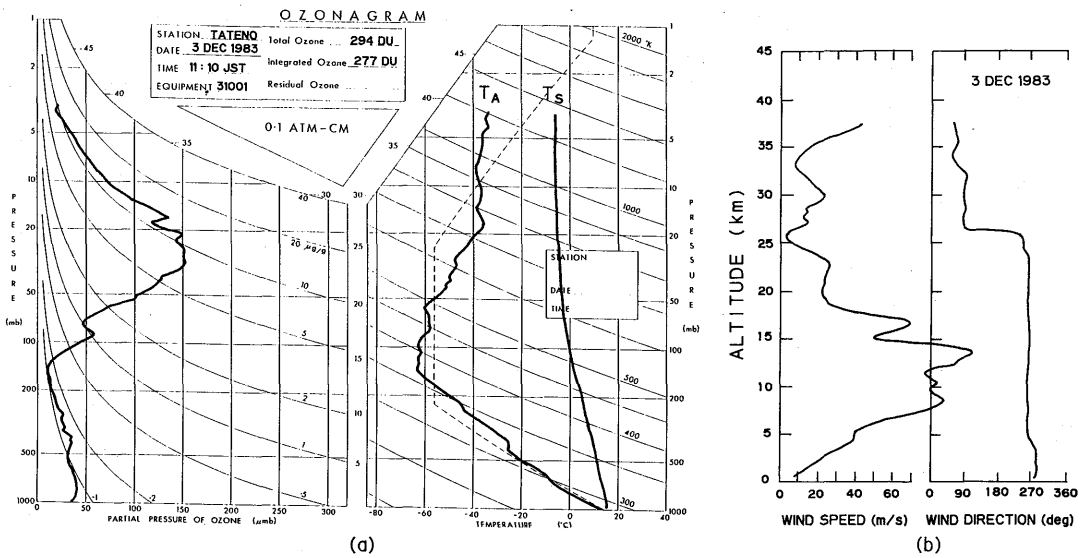


図 2.13(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1983 年 12 月 3 日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

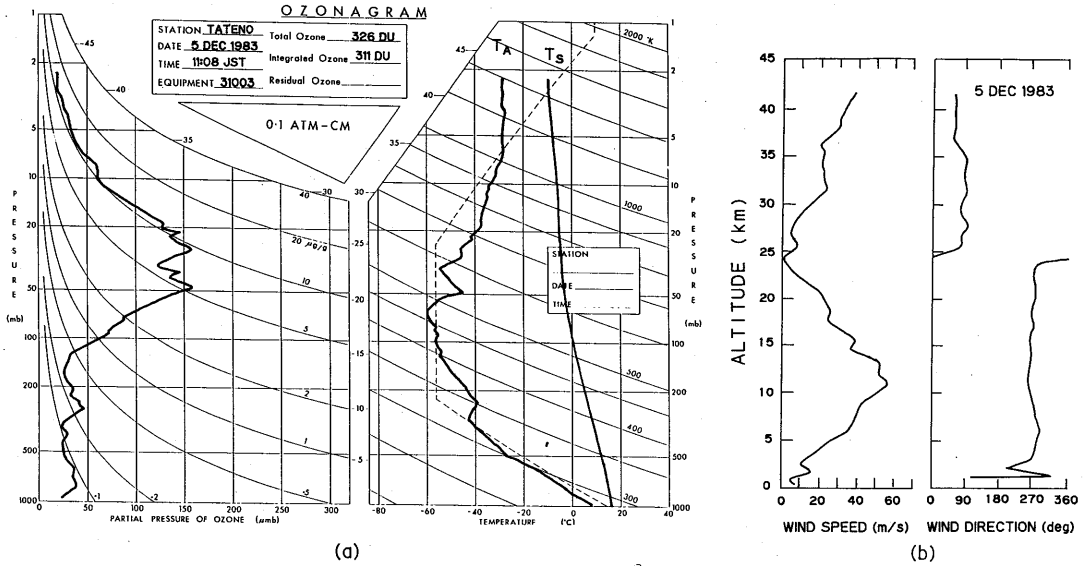


図 2.14(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1983年12月5日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

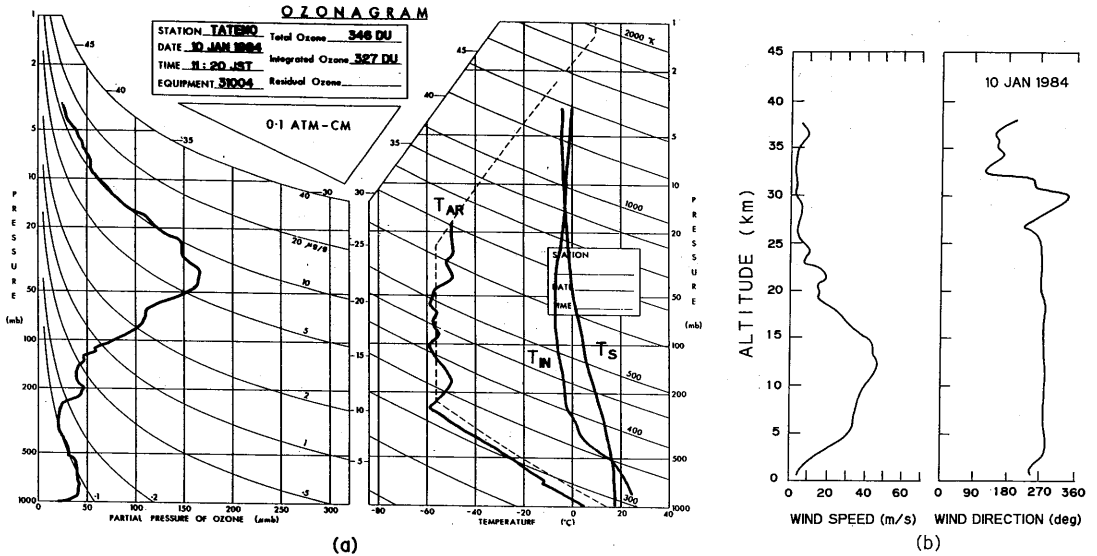


図 2.15(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1984年1月10日
 T_{IN} : ゾンデ内部温度、 T_{AR} : 09 JSTの観測、 T_S : 反応管温度

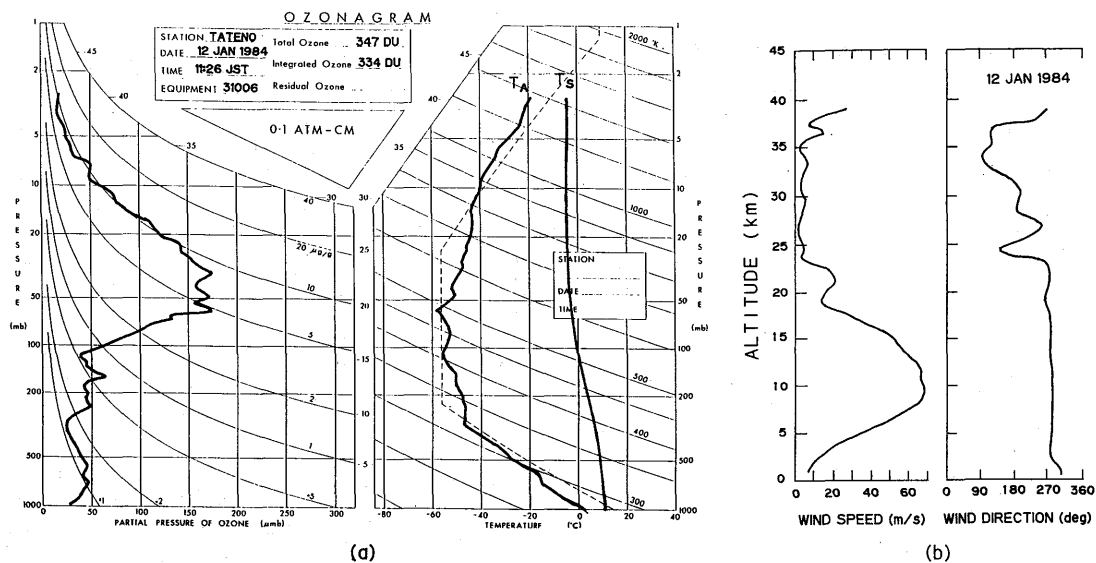


図 2.16(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1984 年 1 月 12 日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

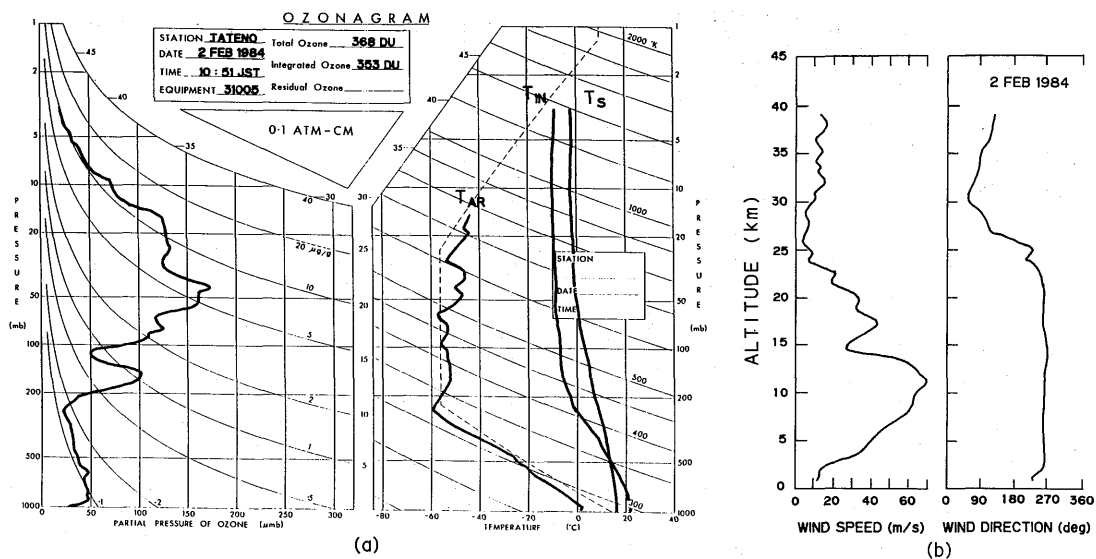


図 2.17(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1984 年 2 月 2 日
 T_{IN} : ゾンデ内部温度、 T_{AR} : 09 JST の観測、 T_S : 反応管温度

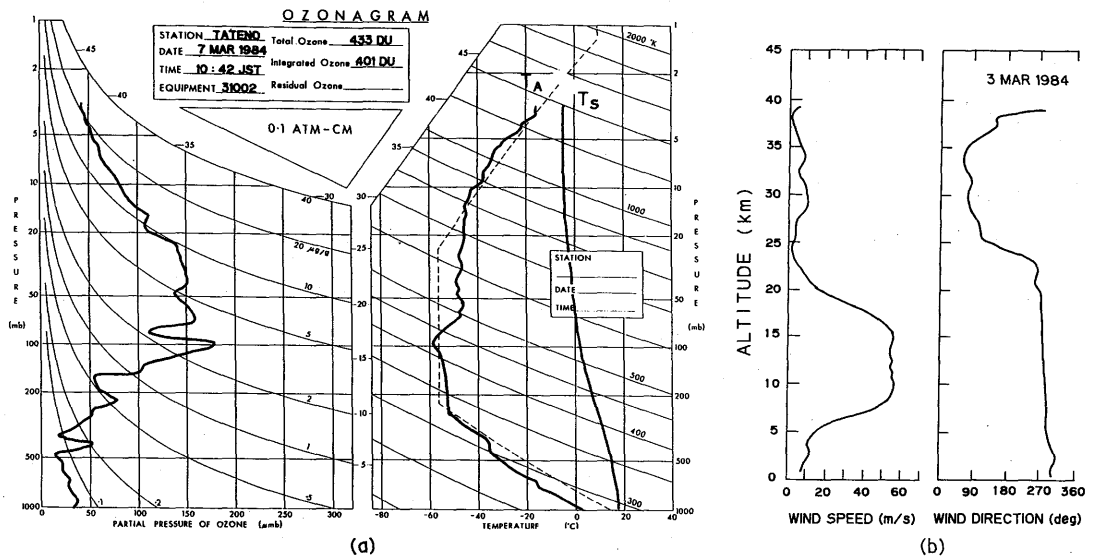


図 2.18(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1984年3月7日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

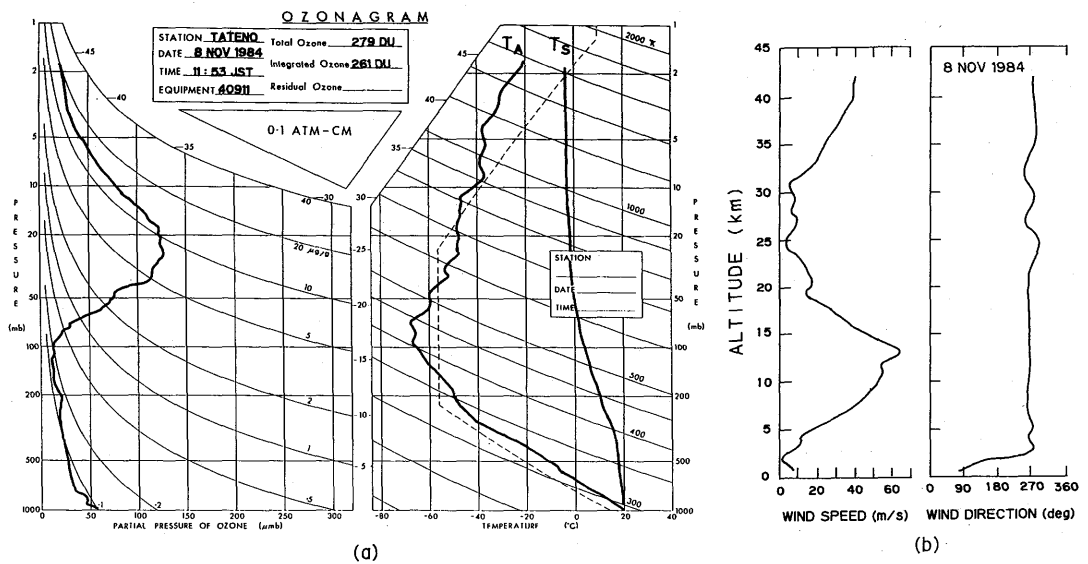


図 2.19(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1984年11月8日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

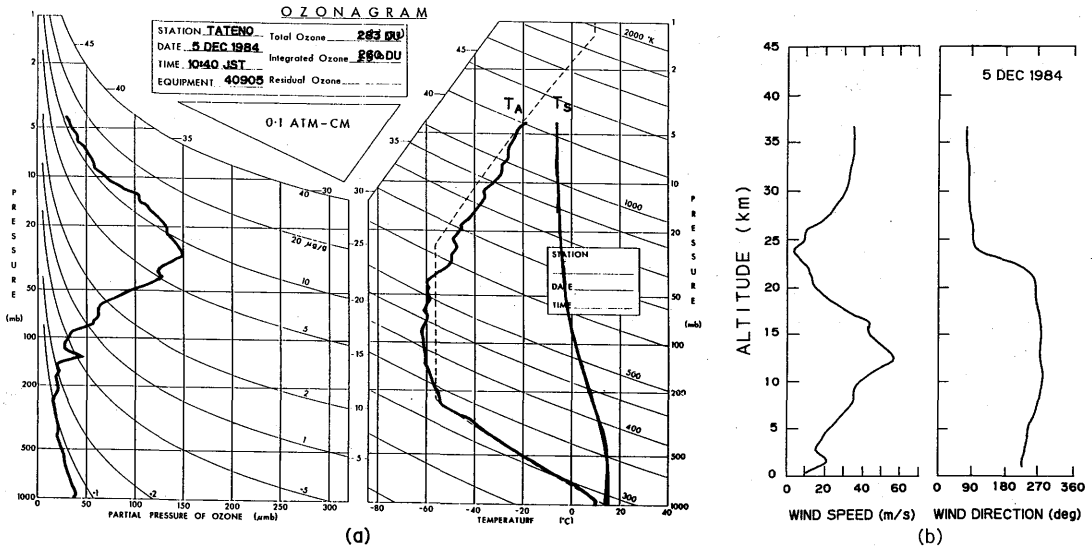


図 2.20(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1984年12月5日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

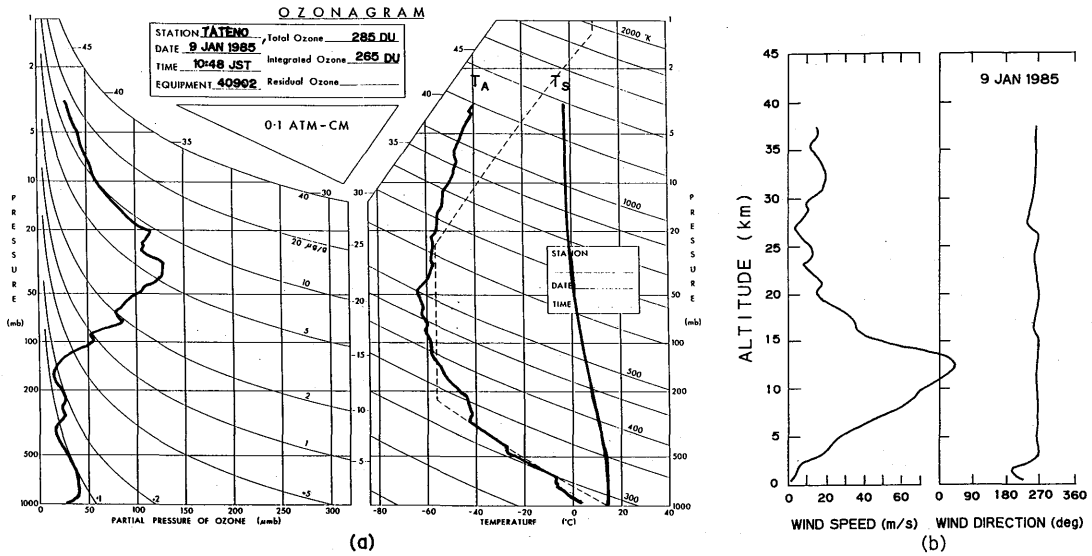


図 2.21(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1985年1月9日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

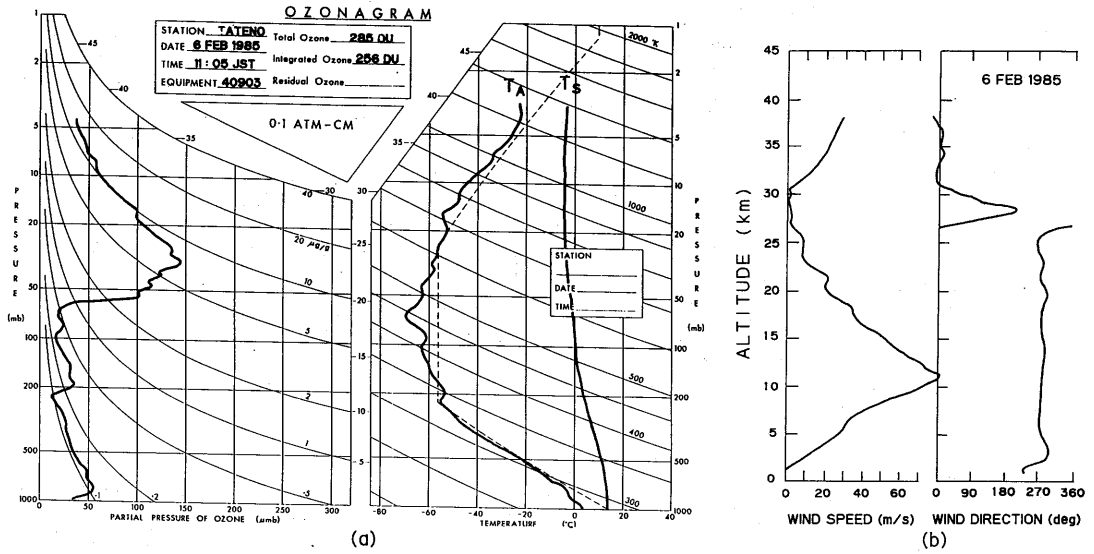


図 2.22 (a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1985 年 2 月 6 日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

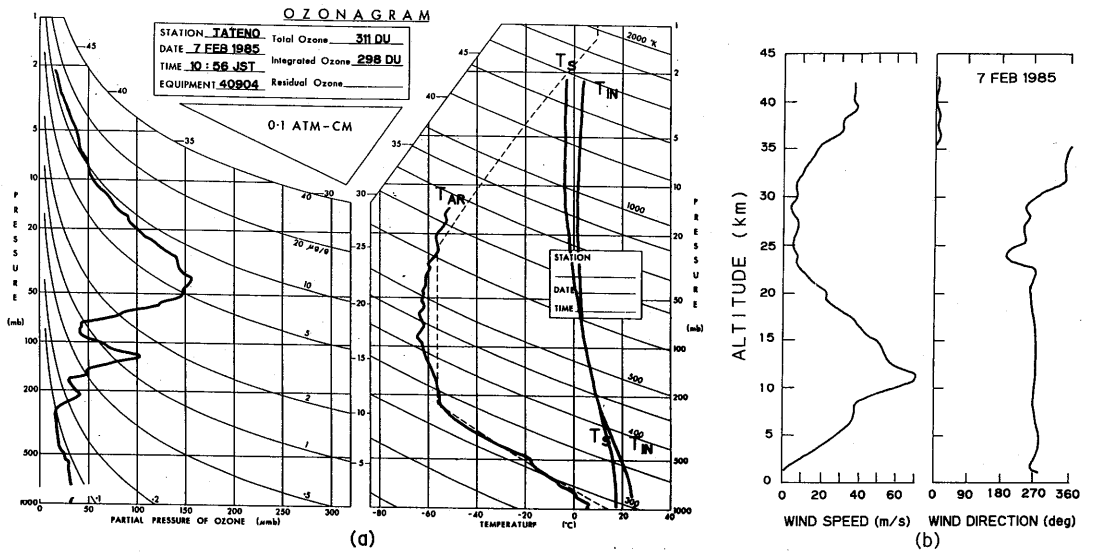


図 2.23 (a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1985 年 2 月 7 日
 T_{IN} : ゾンデ内部温度、 T_{AR} : 09 JST の観測、 T_S : 反応管温度

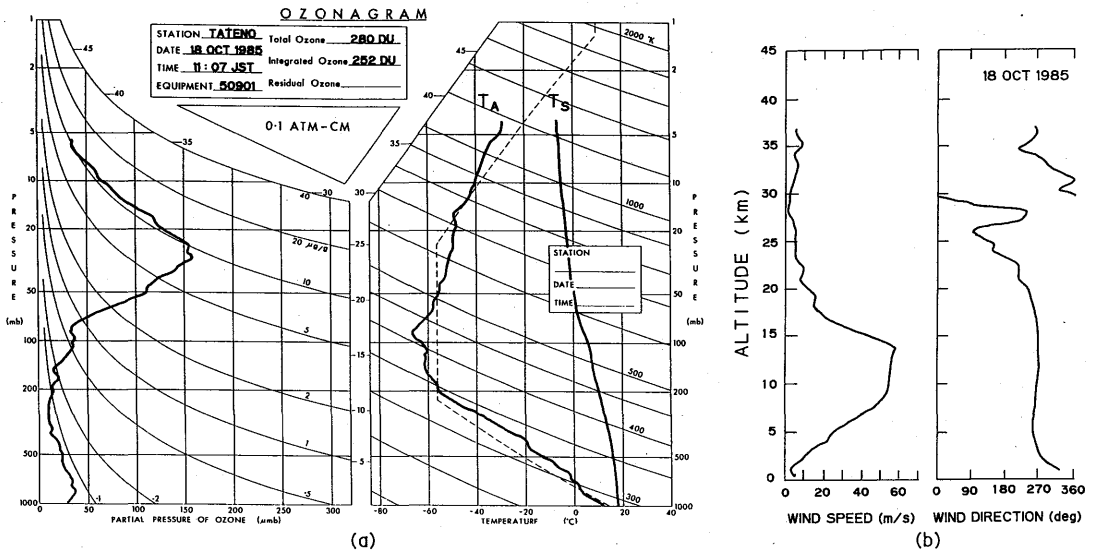


図 2.24(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1985年10月18日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

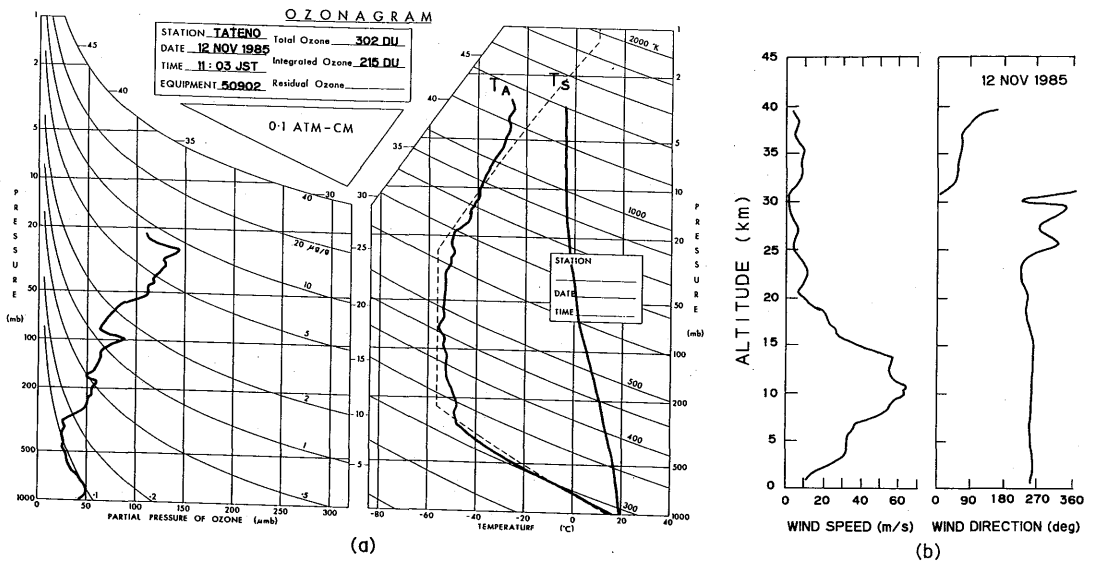


図 2.25(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1985年11月12日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管温度

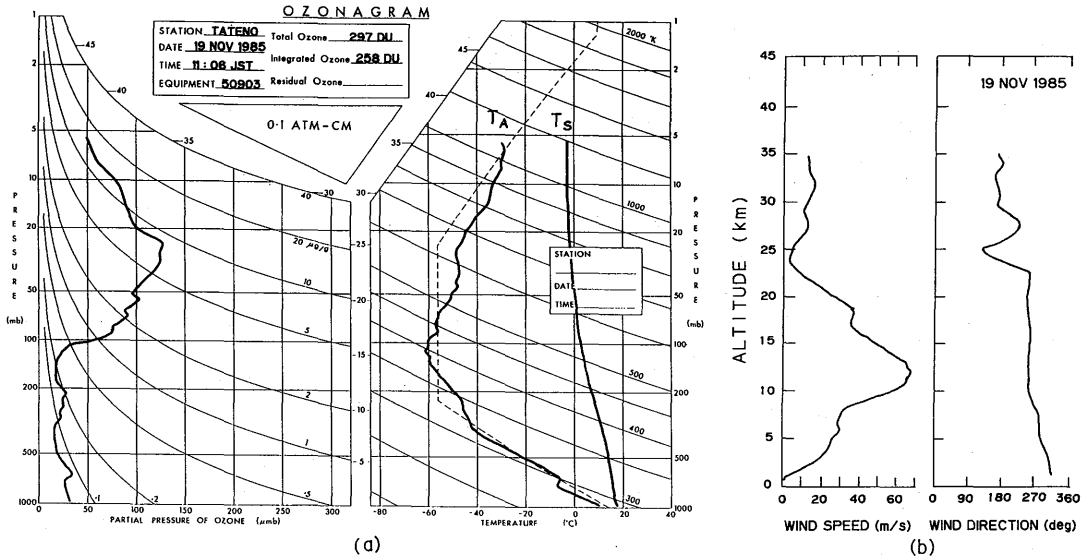


図 2.26(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1985年11月19日
 T_A : 気温、 T_S : 反応管気温

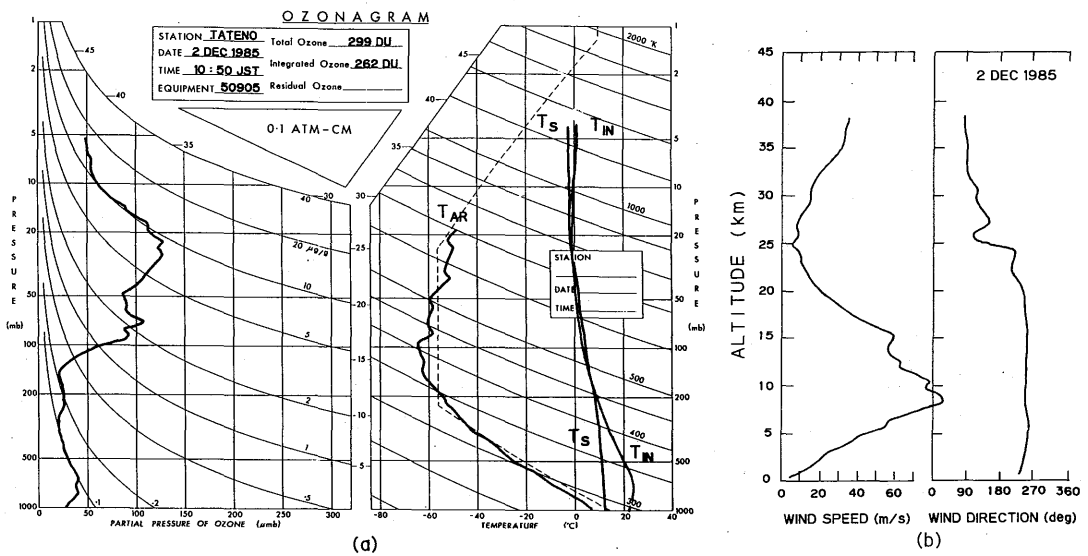


図 2.27(a), (b) オゾン、気温、反応管温度、風向、風速の高度分布、1985年12月2日
 T_A : ゾンデ内部温度、 T_{AR} : 09 JSTの観測、 T_S : 反応管温度

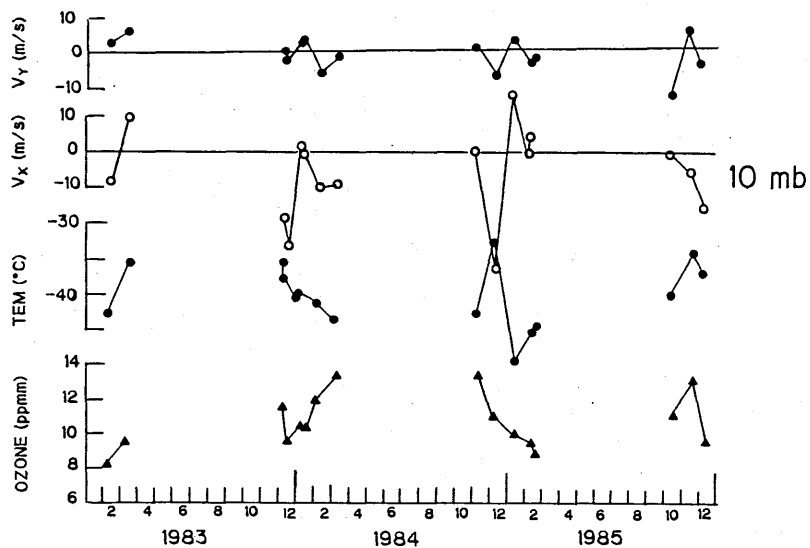


図 2.28(a) 10mb面におけるオゾン質量混合比、気温、風
 TEM (°C) は気温、 V_x 及び V_y は各々風速の西風及び南風成分を示す。

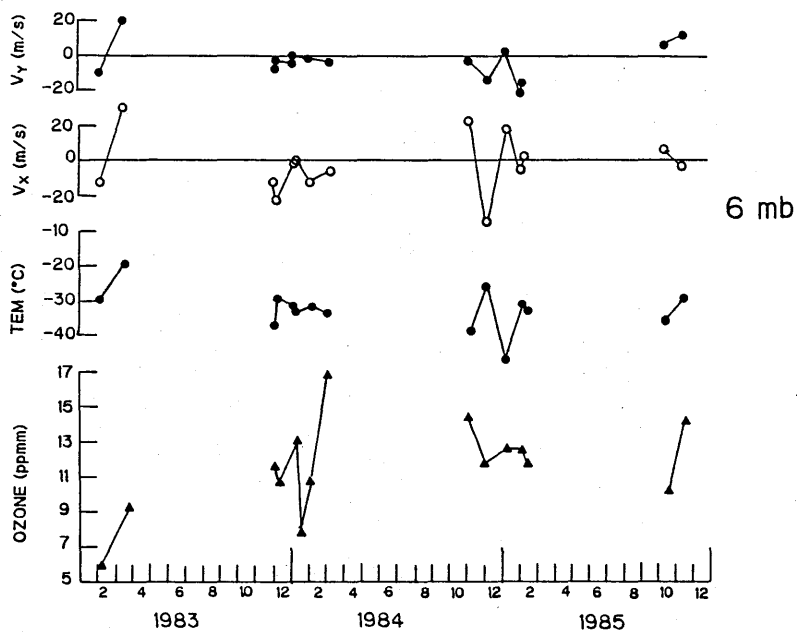


図 2.28(b) 6 mb面におけるオゾン質量混合比、気温、風
 TEM (°C) は気温、 V_x 及び V_y は各々風速の西風及び南風成分を示す。

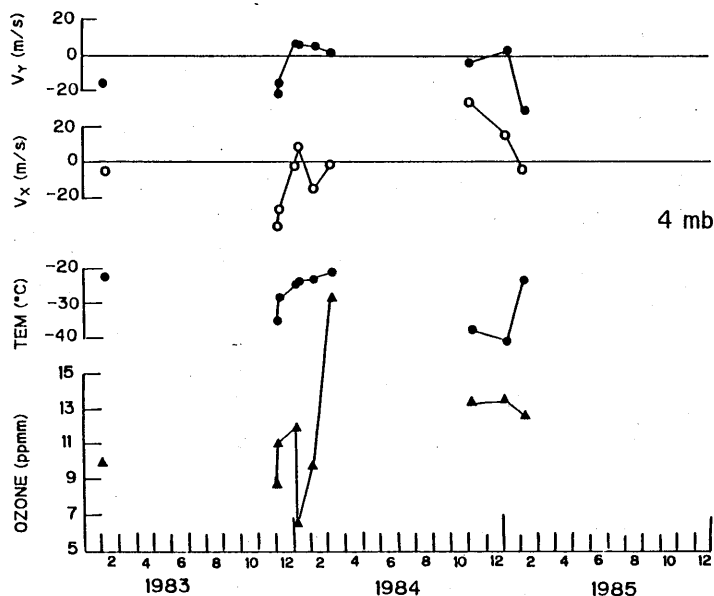


図 2.28(c) 4 mb 面におけるオゾン質量混合比、気温、風
 $TEM (^{\circ}C)$ は気温、 V_x 及び V_y は各々風速の西風及び南風成分を示す。

2.4 解析

オゾン混合比と気温、風向、風速等の関係について10mb、6 mb、4 mbの各気圧面での若干の解析結果を次に示す。

オゾン混合比と気温との関係は、気温が上昇するとオゾン混合比が減少する傾向が認められる。図 2.29 に 4 mb における関係を示す。ばらつきが大きい、相関が認められる。6 mb、10mb でも同様の関係が弱いながらも認められる。

風速とオゾン混合比の関係については、4 mb について図 2.30 に示すようにはっきりしない。6 mb、10mb に関しても同様である。

風の東西成分との関係は、4 mb で西風が強くなるとオゾン混合比が増加する傾向があるがこれを図 2.31 に示す (ただし非常にとび離れた測定点が2点あるがこれは測定に何らかの異常があったためであろう)。

一方風の南北成分との関連は、図 2.32 に10mbの例を示す。 V_y の大きいときの1点を除外すると、南風成分が増すとオゾン混合比は減少するよう見える。この関係は6 mb でも認められるが4 mb でははっきりしなくなる。

オゾン混合比の経年変化については、測定期間が短いため確定的なことは言えないが、約4年間

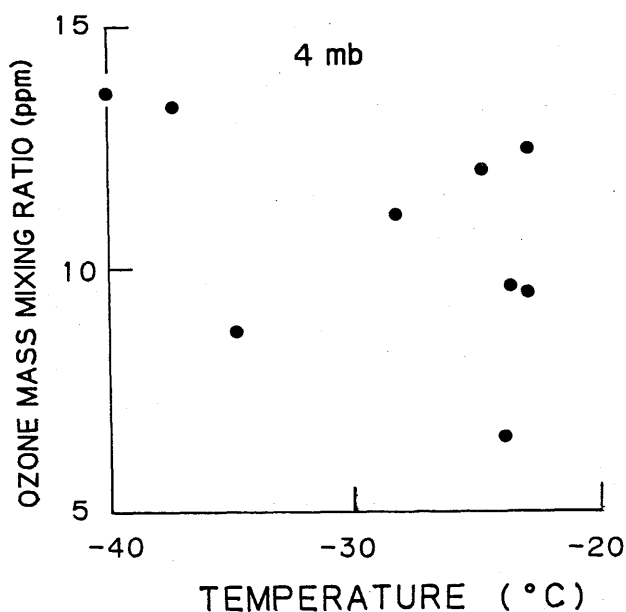


図 2.29 オゾン質量混合比と気温との関係、4 mb。

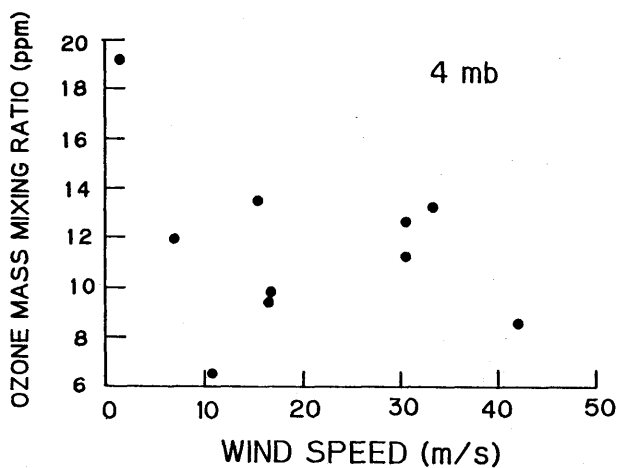


図 2.30 オゾン質量混合比と風速との関係、4 mb。

の冬期の値の変動を、比較のため反転観測とともに図 2.33 に示す。図中黒丸は反転観測による値で1月の平均値を示す。白丸はオゾンゾンデによる値で冬期の平均的値と見なせる。矢印は1982年のエルチチョンの噴火を示す。

反転観測は天頂方向の太陽の散乱光を利用してオゾンの高度分布を出す方法であるから、成層圏内のエアロゾルの影響を受ける。火山噴火によるエアロゾルは第6層以上で見掛け上オゾン濃度が

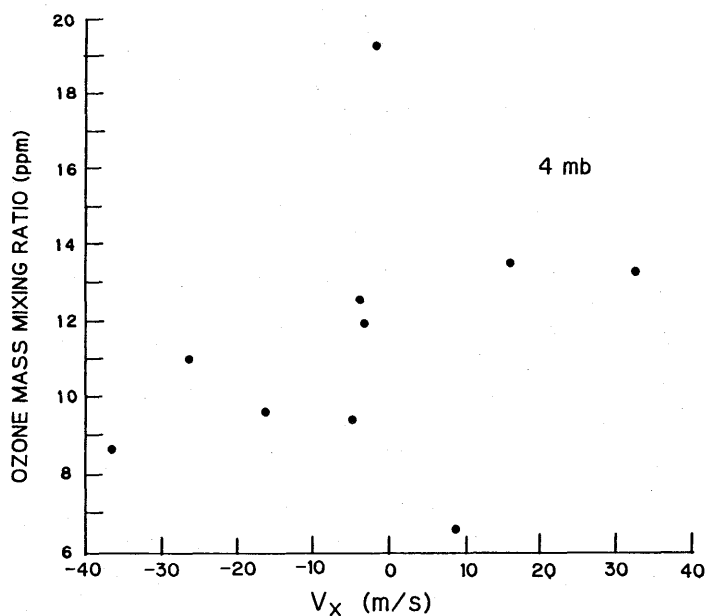


図 2.31 オゾン質量混合比と風の東西成分 V_x との関係、4 mb。

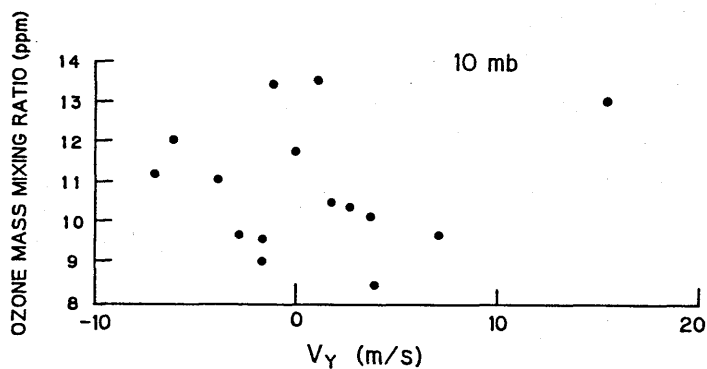


図 2.32 オゾン質量混合比と風の南北成分 V_y との関係、10mb。

減少したような効果を与える。

我々のオゾンゾンデの測定値は、反転観測の値と似た経年変化をしている。すなわち 1982—1983 年の冬期のオゾン濃度が小さくその後の年に回復しているように見える。1982 年以前の資料がないので確定的なことは言えないが、1982—83 年の冬期に極小があった可能性がある。

火山噴火による成層圏エーロゾルのオゾンに対する化学的效果は現在はっきりしない。1982—83 年のオゾンの減少がエーロゾルの直接的効果によるか、大気の循環による効果によるか、今

後の課題である。

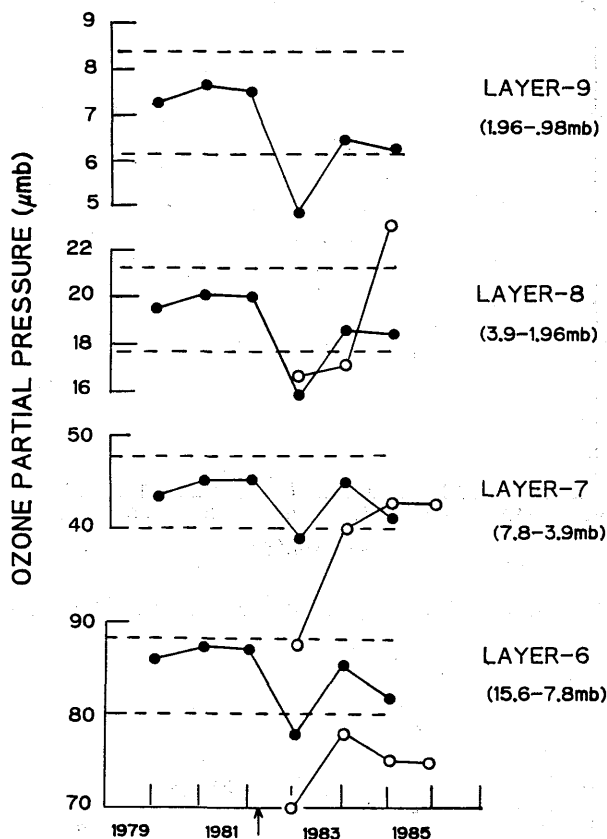


図 2.33 反転観測とオゾンデの結果の比較

黒丸は反転観測（館野）、白丸はオゾンゾンデによる。破線は反転観測によるオゾン分圧の1982年以前の2 standard deviationsの範囲を示す。矢印は1982年のエルチチヨンの噴火の時点を示す。

2.5 まとめ

高度40kmまでのオゾンの高度分布を測定するために、オゾンゾンデ、気球の開発・改良の研究を実施した。気球はゴム気球で5 kgのものを使用すればよいことが分った。表2.3に示した17回の飛揚の平均到達高度は 39.2 ± 2.1 kmでありばらつきがやや大きい。

気圧測定には空盒気圧計を用い、温度補正を行えば、3 mbで0.23 mb位の誤差で測定でき、高度40kmでの高度測定誤差は約550 mとなる。

外気吸入のためのポンプの流量は、気圧が低いところでは、液温と負荷（外気注入管の反応液に浸っている深さ）により決まることが分った。またバブリングがストップする気圧を小さくするためにストロークの容積を大きくし、流量を約600 cc/minとした。

飛揚実験ではオゾン濃度、気温、液温、風向、風速を測定した。また何回かの飛揚では気温のかわりにゾンデ内部の温度を測定し、気圧計の温度補正に使用した。

1983年2月から1985年12月までの期間で冬期に観測を実施した。1982—1983年の冬期に10 mbより上層でオゾン濃度の低下がみられた。これはエルチチョンの噴火の影響かどうか今後の解析を必要とする。

謝 辞

5 kg ゴム気球の作製にあたっては、トーテックス株式会社に、オゾンゾンデの作製には明星電気株式会社の方々のご協力をいただき感謝します。

またオゾンゾンデの飛揚に際しては高層気象台観測第2課の方々にご協力いただき、またオゾン全量観測値は観測第3課から速報値をいただき感謝します。

参 考 文 献

Kobayashi, J. and Y. Toyama, 1966 : On Various Methods of Measuring the Vertical Distribution of Atmospheric Ozone (II).

Pap. Met. Geophys., 17, 97—112.

広田道夫、村松久史、1986 : KC79型オゾンゾンデ用オゾンセンサーの性能試験、研究時報（投稿中）。

村松久史、牧野行雄、広田道夫、1982 : 数値モデル、気象研究所技術報告、第6号、155—227。

佐々木徹、村松久史、1985 : 2次元モデルによる成層圏オゾンの変化の予測、昭和60年度発表会誌、気象研究所、32—41。

特殊ゾンデ観測実施要領・観測資料整理編、1974 : 気象庁観測部1—59。

第3章 航空機搭載赤外分光装置による微量成分測定*

3.1 はじめに

対流圏から成層圏までにわたって分布する大気中の微量気体成分を測定する方法には大別して in-situ 測定と遠隔測定がある。第1章での空気採集や、第2章のオゾン濃度測定等は前者の例で測定器付近の資料を得るのに適している。一方遠隔測定で、赤外・可視などの放射を利用すると光源と測定器の間の微量気体成分の全量または分布が得られる。

CFCI_3 、 CF_2Cl_2 、 N_2O の高度分布は、第1章に述べたように夏期にのみ空気試料サンプリングの方法で求めることが出来るがそれ以外の季節では得られない。

微量気体成分の冬期の試料を得るために、太陽を光源とした赤外分光測定を行った。地上観測のほかに水蒸気等の妨害を小さくするため、分光装置を航空機に搭載して測定を実施した。

3.2 分光装置

赤外分光装置にはマイケルソン干渉計 IF-3 (Idealab 社製) を使用した。全体の構成・仕様等は牧野他 (1982) に述べられたものと大体同じである。

装置の構成を図 3.1 に示す。マイケルソン干渉計に入射した光はビームスプリッタ BS (KBr に Ge 蒸着) により固定ミラー M1 と可動ミラー M2 方向へ分割され反射光は重ねられて検出器上に集光される。可動鏡の移動により得られる干渉光信号は、増巾器、アクティブフィルターを経由し AD

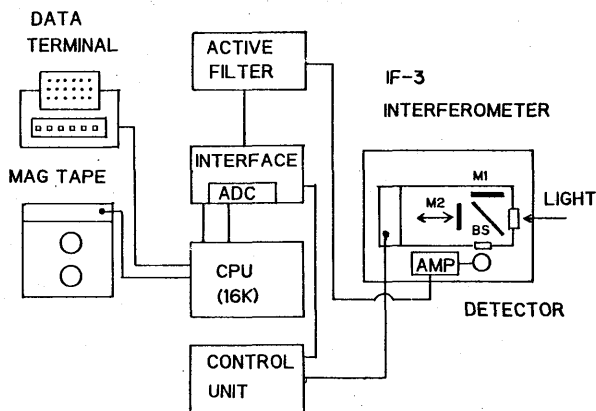


図 3.1 赤外分光装置の構成

* 村松久史、牧野行雄、広田道夫、佐々木徹：高層物理研究部

変換されCPUを介して磁気テープに記録される。磁気テープに記録された干渉図形（インタフェログラム）は補助メモリを使用してフーリエ変換されスペクトルが得られる。

今回使用した検出器はHgCdTe検出器で液体窒素冷却（77 K）して使用する。この検出器の相対的な波長感度曲線を図3.2に示す。最高感度は $11\mu\text{m}$ （ 900 cm^{-1} ）付近にあり窓領域の赤外放射の測定に適している。我々の測定では太陽を光源としているので短波長側は $1\mu\text{m}$ まで、長波長側は約 750 cm^{-1} までのスペクトルが得られる。

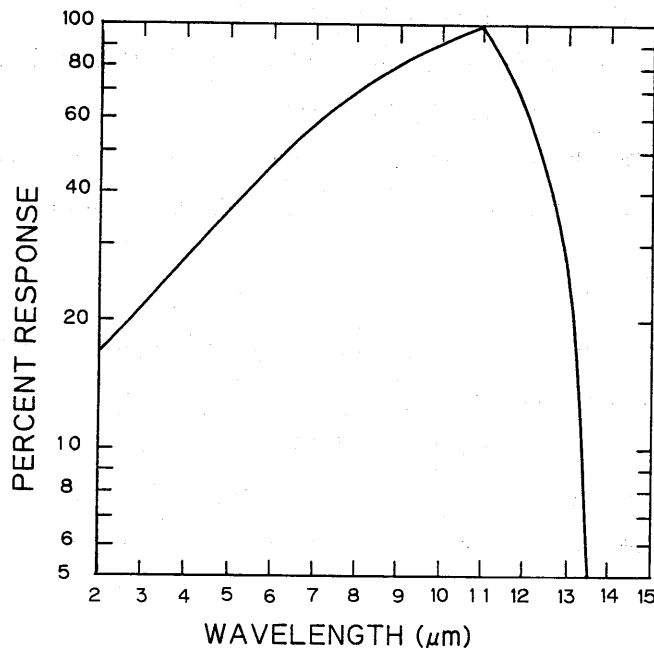


図3.2 検出器の波長感度曲線

測定スペクトルのS/N比に関連する雑音には、検出器・増巾回路を含む信号系に起因するものと太陽自動追跡装置や分光装置の振動に起因するものがある。航空機に搭載した場合は振動の影響が大きい。

航空機（Cessna 404）の高度7 kmくらいで水平飛行しているときの加速度は、測定によると0.2～0.3 gであった。この加速度が分光装置に伝わらないようにするための種々の実験を実施したが、ダンパーとして、真空用の肉厚のゴム管を分光器固定台の底に利用すれば好結果が得られることが分かった。これにより太陽自動追跡装置、分光装置ともに加速度は0.02～0.03 gとすることができた。

3.3 観測

太陽を光源とした赤外吸収スペクトルから光路中の微量気体成分の濃度を求める場合、地上からの観測では対流圏下部に多い水蒸気の吸収線の影響を大きく受ける。このため分光装置を航空機（Cessna 404）に搭載し、高度4～8 kmで観測を行った。

太陽光の追跡には、太陽自動追跡装置を使用した。この装置の仕様は牧野他（1982）に述べられている。前述のごとく雑音の原因となる振動の影響を極力小さくすることを試みた。

地上における観測から求めた N_2O の積分量、対流圏の平均濃度についてはすでに報告してある（Muramatsu et al. 1984）ので今回は航空機観測による結果を報告する。

航空機観測は6回実施した。飛行コースを図3.3に示す。太陽光の入射口を機体後部左側の窓に設け、観測は日没時に行った。したがって飛行コースは北向きとなり飛行方向に対しだいたい90°の方向が日没の方向となる。観測は太陽天頂角が75°～92°の範囲で行った。

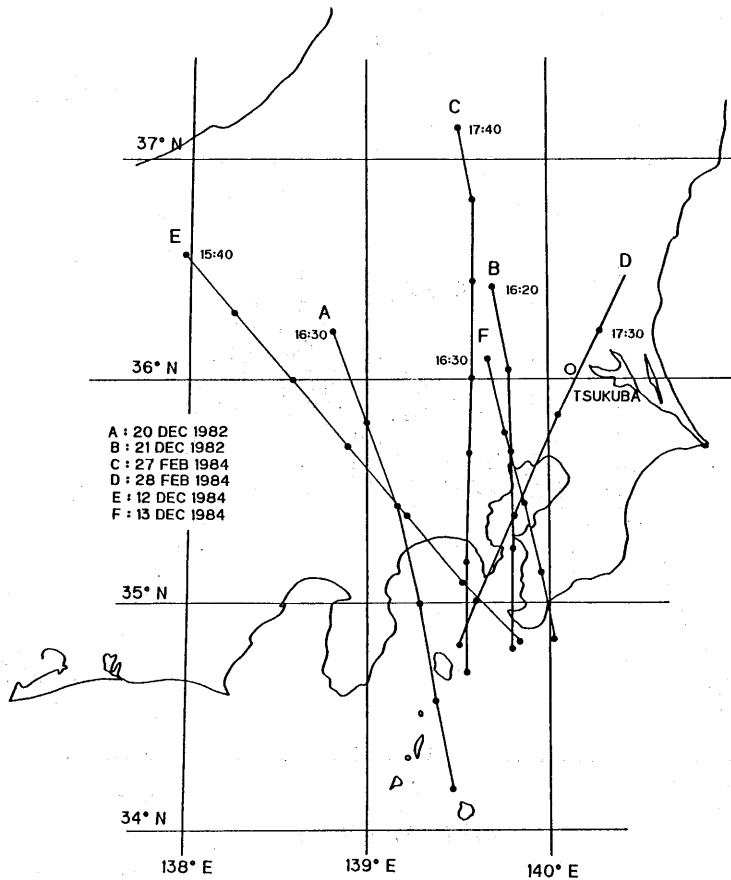


図 3.3 飛行コース

黒丸は10分毎の場所を示す。

航空機上から得られたインタフェログラムとそれから計算されたスペクトルの例のいくつかを次に示す。図3.4(a)は1984年2月27日、高度7.47 kmから得られた日没時近く太陽天頂角 91.19° (17:31:50 JST) のインタフェログラムである。このインタフェログラムは50個のインタフェログラムを重ね合せたものである。1回のスキャン(1インタフェログラム)に約2秒間要する。インタフェログラムの最大値は、スペクトルを計算するためのサンプリング点の656点目である、その右側で振巾が再び大きくなっているのは、サンプリング点の801点目から増巾度をそれ以前の4.26倍としたためである。

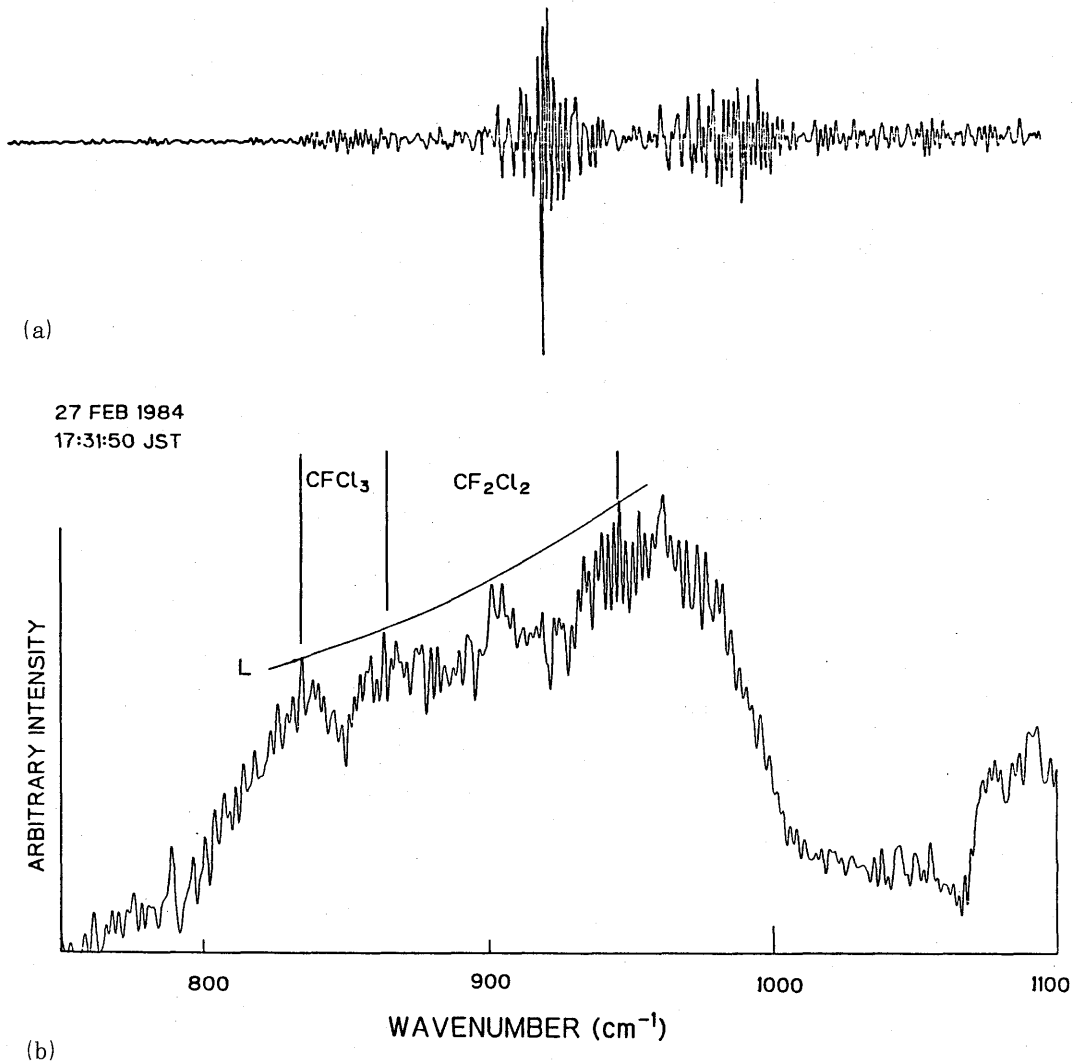
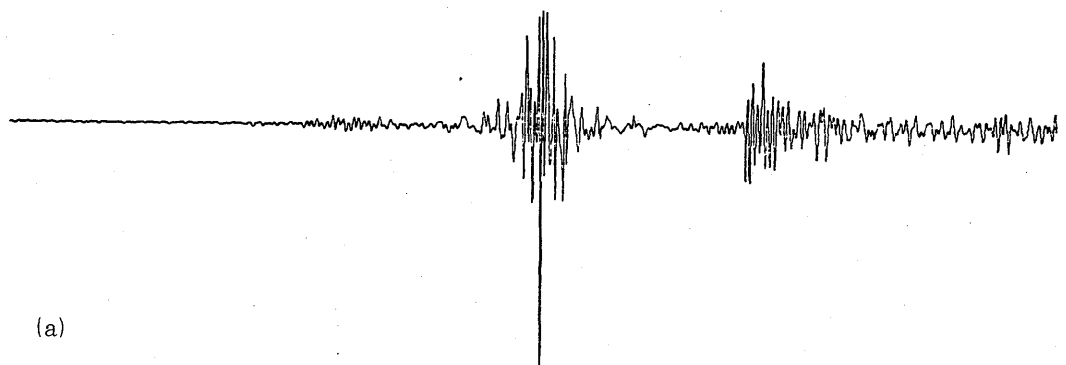


図3.4(a)、(b) インタフェログラム(a)、と窓領域のスペクトル(b)

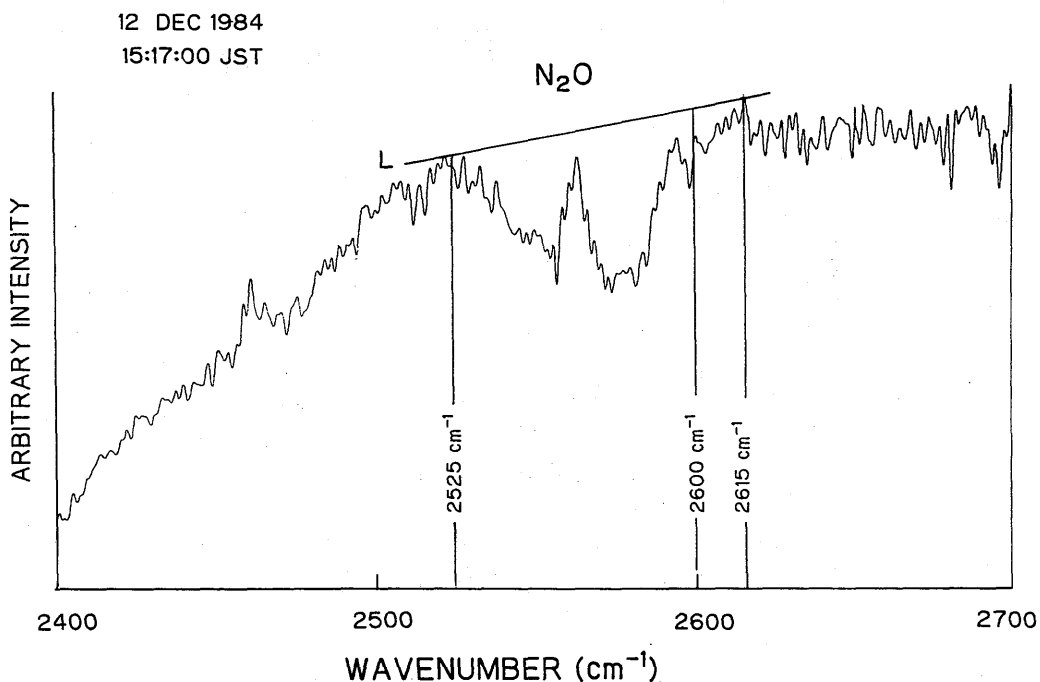
CFCl₃ (835—865 cm⁻¹) と CF₂Cl₂ (865—945 cm⁻¹) の吸収帯が見られる。
曲線Lは透過率1.0を示す。太陽天頂角 91.19° 、高度7.47 kmで得られた。

図3.4(b)は(a)から計算された窓領域のスペクトルを示す。この波数域には CFCI_3 ($835 - 865 \text{ cm}^{-1}$) と、 CF_2Cl_2 ($865 - 945 \text{ cm}^{-1}$) の吸収帯がみられる。 $980 - 1,070 \text{ cm}^{-1}$ にはオゾンの吸収帯がみられる。

図3.5(a)は1984年12月12日、高度3.8 kmで太陽天頂角が 78.80° のときのインタフェログラムである。振巾の最大値はサンプリング点の650点目で、901点目から増巾度を8.35倍上げてある。重ね合せは59回である。計算された N_2O の $3.9 \mu\text{m}$ の吸収帯を含むスペクトルを図3.5(b)に示す。



(a)



(b)

図3.5(a)、(b) インタフェログラム(a)、と N_2O の吸収帯を含むスペクトル(b) 太陽天頂角 78.80° 、高度3.8 kmで得られた。L は透過率1.0を示す。

吸収帯の中心は $2,563.3 \text{ cm}^{-1}$ であるが $2,525 \text{ cm}^{-1} - 2,615 \text{ cm}^{-1}$ に吸収がみられる。

図 3.6(a) は 1984 年 12 月 12 日、高度 3.8 km、太陽天頂角 79.95° のときの、50 回のスキャンの重ね合せによるインタフェログラムである。振巾の最大値の位置と増巾度の切換えは図 3.5(a) と同じである。 $6,004.3 \text{ cm}^{-1}$ に中心をもつ CH_4 の吸収帯を含むスペクトルを図 3.6(b) に示す。

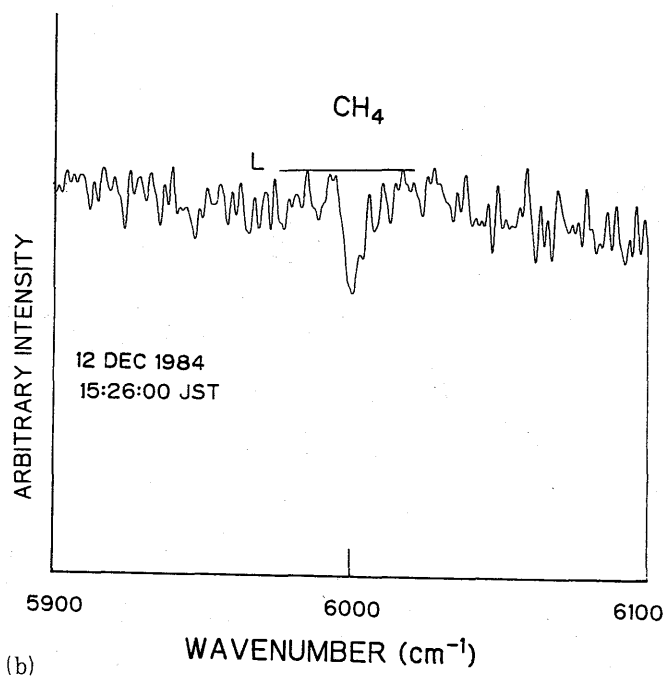
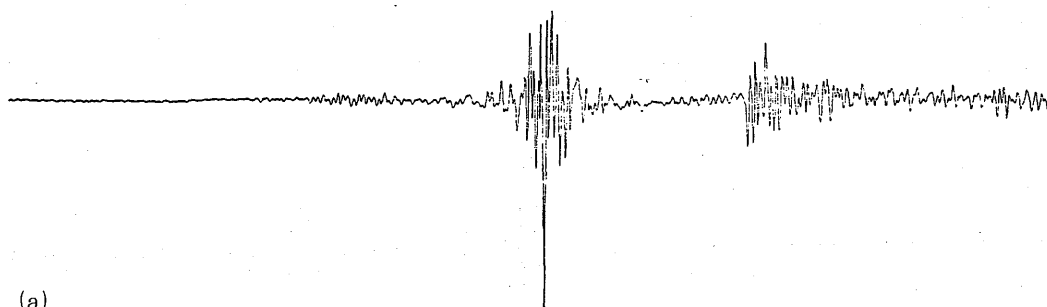


図 3.6(a)、(b) インタフェログラム(a)、と CH_4 の吸収帯を含むスペクトル(b)
L は透過率 1.0 を示す。太陽天頂角 79.95° 、高度 3.8 km で得られた。

検出器に入射する光には太陽光のほかバックグラウンドをなす赤外光が含まれている。これは大気からの放射と分光器の窓や壁からの放射から成っているが、前者は後者より非常に弱い。このバックグラウンドは日没直後のインタフェログラムからスペクトルを計算して得たがその例を図 3.7 に

示す。バックグラウンド光は $2,000\text{ cm}^{-1}$ 以上の波数域では無視できるが、図 3.4 に示した CFCl_3 、 CF_2Cl_2 を含む波数域では考慮しなければならないことが分る。

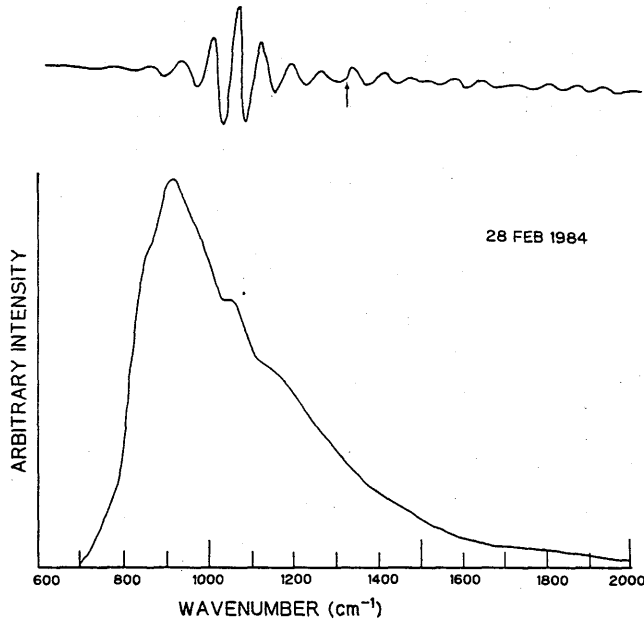


図 3.7 バックグラウンドのインタフェログラム (上) とスペクトル (下)
インタフェログラムの矢印は増巾度を 4.26 倍大きくした点を示す。

3.4 解析・結果

3.4.1 N_2O

光路中の N_2O の全分子数を測定された太陽赤外スペクトルから求めるには次の方法を用いた。
 N_2O の吸収帯は図 3.5(b) に示した、波数 $2,525 - 2,600\text{ cm}^{-1}$ を利用した。

まず、 N_2O の分子数 (光路中の N_2O 積算量) の関数として、上記波数帯の透過率を計算し、Equivalent width を求める。この場合分子の line parameters (吸収線強度、半値巾、共鳴中心波数、遷移準位の下位エネルギー) は McClatchey et al. (1973) の編集した値を使った。吸収線の形は Lorentz 形とし、半値巾 α の温度依存性は

$$\alpha(T)/\alpha(T_s) = (T/T_s)^{-0.5}$$

とした。ただし、 $\alpha(T)$ 、 $\alpha(T_s)$ は温度 T (K)、及び $T_s (= 296\text{ K})$ における半値巾である。

線強度の温度依存性の計算に必要な振動及び回転の分配関数の温度依存性は McClatchey et al. (1973) の Table 2 の値を利用した。

透過率の計算は 1 層モデルを用い Curtis-Godson 近似を仮定した (Goody, 1964)。このときの

有効気圧は観測高度の気圧の $1/2$ となる。有効気温は観測高度より上方の気温の平均値を用いた。資料の解析を行った日の気温の高度分布を1984年の2月と12月の4例について図3.8に示した。気温の目盛の数值は27 Feb. に対するもので他は 10°C ずつ右側にずらしてあり、気温の曲線上の縦線は -20°C を示し、短い横線は観測高度を示す。

有効気圧 P_e は27 Feb., 28 Feb., 13 Dec. の平均が $187 \pm 7 \text{ mb}$ (Case A) で、12 Dec. では 318 mb (Case B) である。有効気温 T_e は Case A では $227 \pm 3 \text{ K}$ 、Case B では 244 K である。

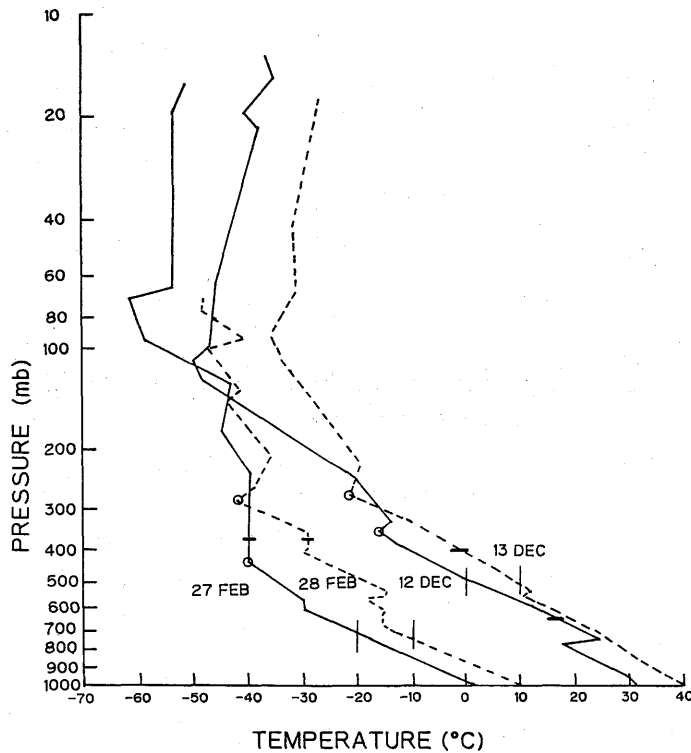


図3.8 気温の高度分布

気温軸の数值は27 FEB に対するもので、他は 10°C ずつずらしてあり -20°C の点を縦の線で示した。短い横線は観測高度を示す。○印は圈界面を示す。

Case A、Case B に対して、 N_2O 量の関数として Equivalent width を計算したものを図3.9に示す。

測定されたスペクトル (図3.5(b)) から Equivalent width を計算し、図3.9から光路中の N_2O 量を求めた。 N_2O の高度分布 (夏期、筑波で測定された分布、Hirota et al. 1984) を考慮して鉛直積分量を求めたものを表3.1—表3.4に示す。また図3.10には太陽天頂角の関数として N_2O 鉛直積分量を示してある。この図から分るように、28 Feb. 1984 の値は太陽天頂角とともに減少傾向が

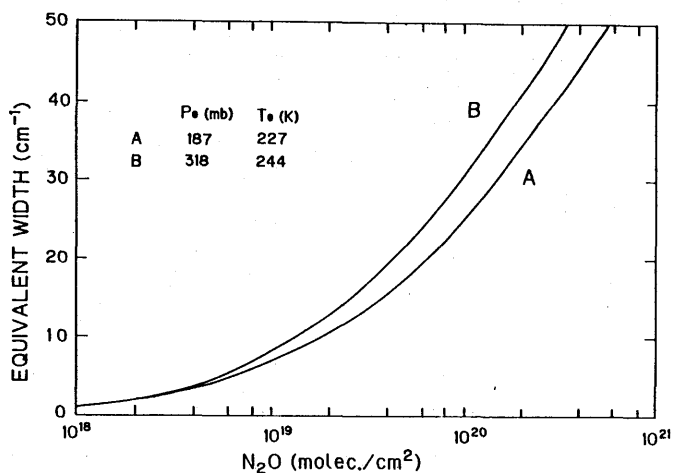


図 3.9 N_2O の equivalent width

表 3.1 N_2O の鉛直積分量——(1) 27 Feb. 1984

測定高度 7.47 km (360 mb)

太陽天頂角 (度)	N_2O (分子/ cm^2)
85.60	$3.96 + 18$ *
87.59	$3.59 + 18$
88.75	$2.76 + 18$
90.02	$3.25 + 18$
91.19	$3.29 + 18$

* $3.96 + 18$ は 3.96×10^{18} を示す。

表 3.2 N_2O の鉛直積分量——(2) 28 Feb. 1984

測定高度 7.47 km (360 mb)

太陽天頂角 (度)	N_2O (分子/ cm^2)
83.67	$4.13 + 18$
84.80	$3.67 + 18$
86.03	$3.82 + 18$
88.20	$2.86 + 18$
89.30	$2.74 + 18$
90.55	$2.75 + 18$

表 3.3 N₂O の鉛直積分量——(3) 12 Dec. 1984

測定高度 3.81 km (636 mb)

太陽天頂角 (度)	N ₂ O (分子/cm ²)
75.73	5.11 + 18
76.10	5.77 + 18
78.80	4.95 + 18
79.13	5.48 + 18
79.54	4.93 + 18
79.95	4.90 + 18
80.40	5.06 + 18
81.61	5.03 + 18
82.05	4.57 + 18

表 3.4 N₂O の鉛直積分量——(4) 13 Dec. 1984

測定高度 7.47 km (387 mb)

太陽天頂角 (度)	N ₂ O (分子/cm ²)
83.26	3.48 + 18
84.05	3.03 + 18
84.48	2.77 + 18
85.00	2.67 + 18
85.47	2.76 + 18
85.92	2.37 + 18
86.60	2.04 + 18
87.78	2.87 + 18
88.25	2.96 + 18
88.85	2.25 + 18
89.30	2.08 + 18

認められる。7.47 kmから測定された他の例でも多少その傾向がみられる。

表 3.5 に平均の鉛直積分量と体積混合比を示してある。圏界面は 27 Feb は 428 mb にあり (図 3.8 参照)、28 Feb. は 277 mb、12 Dec. は 344 mb、13 Dec. は 290 mb にある。したがって 27 Feb. の測定は圏界面のすぐ上方で、28 Feb. はすぐ下方で行われたため、この両者の体積混合比は対流圏上

部——成層圏下部の値としてよい。同様に 12 Dec. の値は対流圏中部以上の、また 13 Dec. は対流圏上部のものと考えてよい。

広田他(1986)の空気サンプリング試料のガスクロマトグラフ分析の値は1984年には対流圏の平均値として0.303 ppmである。12 Dec.、13 Dec. の値はガスクロマトグラフ分析の値とよく一致しているが、27 Feb.、28 Feb. の値はかなり大きい。

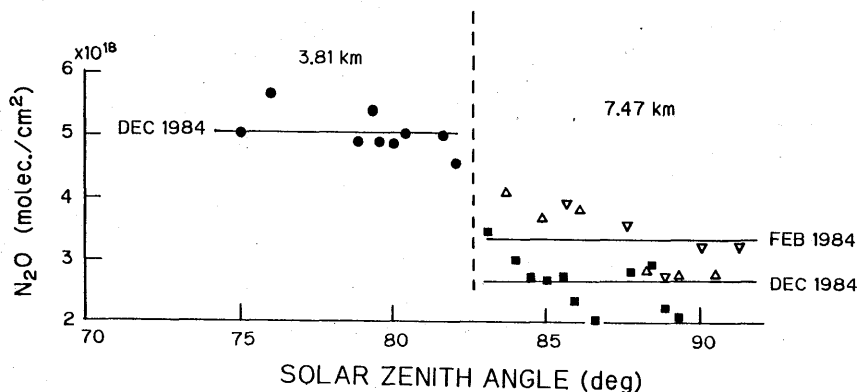


図 3.10 N_2O の鉛直積分量

▽ : 27 FEB 1984、△ : 28 FEB 1984、● : 12 DEC 1984、■ : 13 DEC 1984。
FEB 1984、DEC 1984 の平均値を直線で示した。

表 3.5 N_2O の体積混合比

日 付 (1984年)	資料数	測定高度 (mb)	鉛直積分量 * (分子/cm²)	体積混合比 * (ppm)
27 Feb	5	360	3.37 (0.40) + 18	0.429 (0.051)
28 Feb	6	360	3.37 (0.56) + 18	0.420 (0.071)
12 Dec	9	636	5.09 (0.33) + 18	0.310 (0.020)
13 Dec	11	387	2.66 (0.42) + 18	0.292 (0.046)

* () 内の数値は標準偏差を示す。また 3.37 + 18 は 3.37×10^{18} を示す。

3.4.2 CH_4

CH_4 の光路中の積分量の算出には図 3.6(b) に示した $6,004.3 \text{ cm}^{-1}$ の吸収帯を利用した。観測されたスペクトルで透過率 1.0 の線を直線 L で近似し、 $6,004.3 \text{ cm}^{-1}$ での透過率をよみとる。一方 CH_4 の量の関数として $6,004.3 \text{ cm}^{-1}$ の透過率を N_2O と同様の方法で計算しておく。(図 3.11)。line parameters 等については N_2O 同様 McClatchey et al. (1973) を用いた。透過率の計算で monochromatic transmittance に半値巾 A の三角形のスリット関数をコンボリューションさせて出力す

るが、この A を 0.80 cm^{-1} とした。この A の選び方は測定されたスペクトルと計算されたスペクトルの分解能が一致するように選んだ。

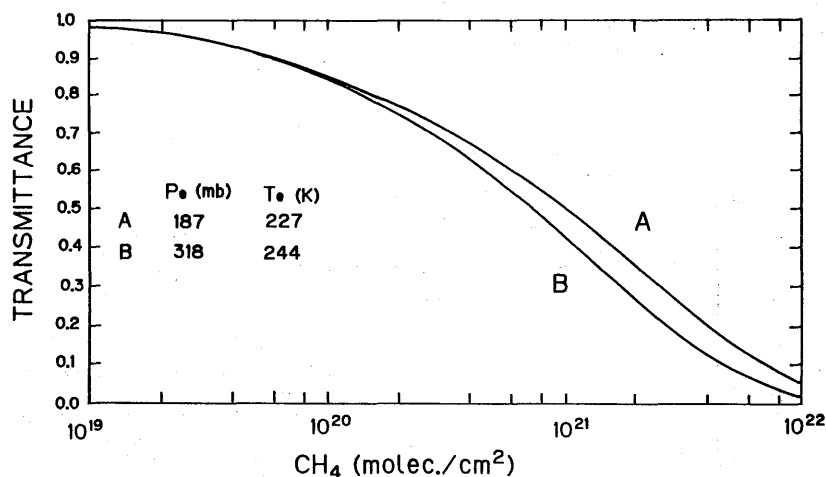


図 3.11 CH_4 の $6,004.3 \text{ cm}^{-1}$ の透過率

得られた CH_4 の鉛直積分量を表 3.6 — 表 3.9 に示す。体積混合比を計算すると 27 Feb. は 13.2 ppm 、28 Feb. が 7.60 ppm 、12 Dec. が 2.69 ppm 、13 Dec. が 2.23 ppm となる。広田・村松 (1986) による 1985 年の筑波での地表大気中の CH_4 の体積混合比は 1.74 ppm である。また夏期の成層圏下部の混合比は $1.50 - 1.58 \text{ ppm}$ である (広田・村松, 1986)。これ等ガスクロマトグラフ分析による値に比べると、分光法による値は明らかに大きい。この原因にはラインパラメーターの不確かさ、水蒸気の影響等が考えられ検討中である。

表 3.6 CH_4 の鉛直積分量——(1) 27 Feb. 1984
測定高度 7.47 km (360 mb)

太陽天頂角 (度)	CH_4 (分子/ cm^2)
84.46	$1.06 + 20$
85.60	$1.55 + 20$
87.59	$9.77 + 19$
88.75	$1.02 + 20$
90.02	$6.82 + 19$
91.19	$9.29 + 19$

$1.06 + 20$ は 1.06×10^{20} を示す。

表 3.7 CH₄ の鉛直積分量——(2) 28 Feb. 1984

測定高度 7.47 km (360 mb)

太陽天頂角 (度)	CH ₄ (分子/cm ²)
84.80	4.90 + 19
86.03	7.85 + 19
88.20	6.35 + 19
89.30	5.03 + 19

表 3.8 CH₄ の鉛直積分量——(3) 12 Dec. 1984

測定高度 3.81 km (636 mb)

太陽天頂角 (度)	CH ₄ (分子/cm ²)
78.80	4.24 + 19
79.13	4.53 + 19
79.54	5.03 + 19
79.95	4.97 + 19
80.40	4.01 + 19
81.61	4.02 + 19
82.05	4.20 + 19

表 3.9 CH₄ の鉛直積分量——(4) 13 Dec. 1984

測定高度 7.47 km (387 mb)

太陽天頂角 (度)	CH ₄ (分子/cm ²)
83.26	2.18 + 19
84.05	2.30 + 19
84.48	2.81 + 19
85.47	2.66 + 19
85.92	2.36 + 19
86.60	1.63 + 19
87.78	1.95 + 19
88.25	1.76 + 19
88.85	1.55 + 19
89.30	1.16 + 19

3.4.3 CF₂Cl₂

CF₂Cl₂の吸収スペクトルは図3.4(b)に示されるように865—945 cm⁻¹にわたってみられる。この吸収バンドに関する実験室でのスペクトルの資料はGoldman et al. (1976 a) が示している。CF₂Cl₂のスペクトルの微細構造は我々の使用している分光器の分解能0.5 cm⁻¹程度では、測定できないのでstatistical-band-modelにより解析する。

吸収線の分布はrandomで、線の形はLorentz形、線強度は指数分布とすると、波数 ν (cm⁻¹)での平均透過率 $\bar{T}(\nu)$ は次式で表わされる (Goody, 1964)。

$$\bar{T}(\nu) = \exp \left\{ - \frac{\alpha(\nu) \beta^0(\nu) P l}{\sqrt{1 + 2\alpha(\nu) l}} \right\} \quad (3.1)$$

ここで、パラメーター α (cm⁻¹)、 β^0 (atm⁻¹) は

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{S^0}{2\pi r^0} \\ \beta^0 &= \frac{2\pi r^0}{d} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

である。ただし S^0 (cm⁻² atm⁻¹)、 r^0 (cm⁻¹ atm⁻¹) は単位圧力での平均線強度と単位圧力での平均半値巾であり、 d (cm⁻¹) は吸収線間の平均距離である。 P (atm) は気圧、 l (cm) は単位気圧での気体柱の長さである。

CF₂Cl₂の吸収の最大は $\nu = 923$ cm⁻¹にあり、この波数での $\bar{T}(\nu)$ から l を決定する。Goldman et al. (1976 a) によると、 $\alpha(923 \text{ cm}^{-1}) = 2.55 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ 、 $\beta^0(923 \text{ cm}^{-1}) = 2.04 \times 10^3 \text{ atm}^{-1}$ である。

高度7 kmくらいから太陽天頂角90°近くで測定する場合 l は約 5×10^{-3} cmくらいであるしたがって $2\alpha l = 1.3 \times 10^{-4}$ であり(3.1)式で $2\alpha l \ll 1$ となる。したがって(3.1)式は次式で近似できる。

$$\begin{aligned} \bar{T}(\nu) &= \exp \left\{ - \alpha(\nu) \beta^0(\nu) P l \right\} \\ &= \exp \left\{ - \frac{S^0}{d} P l \right\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Goldman et al. (1976 a) によると $\nu = 923$ cm⁻¹で $S^0/d = 52.0 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ である。

CF₂Cl₂の濃度は小さく、吸収スペクトルからCF₂Cl₂の量を求めるには太陽天頂角が90°付近である。まず太陽のスペクトル(図3.4(b))からbackgroundのスペクトル(図3.7)を差し引く。この場合オゾンの吸収の最大波数(～1,050 cm⁻¹)での太陽光とbackgroundのスペクトル強度が一致するようにbackgroundのスペクトル強度を調整する。これはline-by-lineの計算から、この波数での太陽光スペクトルの強度がゼロになることが確かめられているからである。しかるのち923 cm⁻¹

での transmittance を読みとり、(3.3) 式から PI を算出する。

表 3.10 に得られた結果を示す。Tangential height は 27 Feb. では 7.0 km、28 Feb. では 7.5 km であり、両者とも対流圏上部（圏界面のすぐ下）の高さである。したがって、27 Feb.、28 Feb. の体積混合比は圏界面付近の平均的混合比とみなせる。両者の差は大きいが平均した値 301 ppt が圏界面付近の体積混合比となる。

13 Dec. の測定は対流圏上部でなされ、太陽天頂角も 90° より小さいので得られた体積混合比 365 ppt は対流圏上部の値とみなせる。

表 3.10 CF_2Cl_2 の測定値

日 付	測 定 高 度 (mb)	太陽天頂角 (度)	光路中積分量 (分子/cm ²)	体積混合比 (ppt)
27 Feb. 1984	360	91.19	1.47×10^{17}	322
28 Feb. 1984	360	90.55	9.93×10^{16}	279
13 Dec. 1984	387	88.85	8.16×10^{16}	365

広田他 (1986) のサンプリング法による対流圏の CF_2Cl_2 の体積混合比は 1984 年 2 月には 349 ppt であり、1984 年 12 月—1985 年 1 月には 361 ppt である。また夏期の成層圏では、圏界面の上方では混合比は高度とともに急激に減少しており、またばらつきが大きい。成層圏内の CF_2Cl_2 の混合比は経年変化があるかどうか現在までの測定では確定できないが、上記サンプリング法による夏期の圏界面高度（約 15 km）の体積混合比は 1978—1985 で約 300 ppt である。以上の比較から、赤外分光法による測定値と空気サンプリング法による測定値はだいたい一致していると言える。

3.4.4 $CFCI_3$

$CFCI_3$ の吸収スペクトルは図 3.4(b) に見られるように $835 - 865 \text{ cm}^{-1}$ にわたる。 $CFCI_3$ の光路中の積分量や体積混合比を求めるのに CF_2Cl_2 と同様の方法を適用した。吸収が最大の波数 847 cm^{-1} のパラメータ α 、 β^0 ((3.2) 式) は Golman et al. (1976 b) によると、

$$\alpha = 1.71 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

$$\beta^0 = 6.17 \times 10^3 \text{ atm}^{-1}$$

である。

我々の観測においては $l < 10^{-2} \text{ cm}$ であるので、 CF_2Cl_2 の場合と同様、近似式 (3.3) が使える。ただし

$$\frac{S^0}{d} = 1.05 \times 10^2 \text{ cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$$

である。解析には CF_2Cl_2 の解析に利用したのと同じの太陽赤外スペクトルを使った。

得られた結果を表 3.11 に示す。27 Feb. と 28 Feb. の体積混合比は圏界面付近の平均混合比とみなせる。27 Feb. と 28 Feb. の平均値は 196 ppt となる。13 Dec. の測定値 200 ppt は対流圏上部に対するものと見なせる。

表 3.11 CFCl_3 の測定値

日 付	測 定 高 度 (mb)	太陽天頂角 (度)	光路中積分量 (分子/cm ²)	体積混合比 (ppt)
27 Feb. 1984	360	91.19	9.49×10^{16}	208
28 Feb. 1984	360	90.55	6.53×10^{16}	183
13 Dec. 1984	387	88.85	4.47×10^{16}	200

広田他(1986)のサンプリング法による対流圏の CFCl_3 の体積混合比は1984年2月には209pptであり、1984年12月—1985年1月には218pptである。また夏期の圏界面高度付近(約15km)の混合比は約200pptである(1978—1985の測定値)。

赤外分光法による値とサンプリング法による値を比較すると、対流圏の値では赤外分光法の方がやや小さいが圏界面高度付近ではほとんど同じである。

3.5 まとめ

赤外干渉分光装置を航空機に搭載して、日没時の太陽を光源とした分光観測を行った。得られた吸収スペクトルから N_2O 、 CH_4 、 CF_2Cl_2 及び CFCl_3 についての冬期の対流圏上部から成層圏にかけての光路中の積分量あるいは平均体積混合比を得た。

N_2O の混合比は対流圏では0.292ppmと0.310ppmでサンプリング法による値0.303ppmとよく一致している。1984年2月の対流圏上部—成層圏下部では0.429ppmと0.420ppmでかなり大きな値を示した。

CH_4 の対流圏中部以上の平均体積混合比は2.23ppm～13.2ppmとなり、地上付近のサンプリング法による値1.74ppmより大きな値を示したが、今後さらに解析法の検討が必要と思われる。

CF_2Cl_2 の圏界面高度付近の体積混合比として301ppt、対流圏上部については365pptが得られたが、これ等の値はサンプリング法による値とよく一致している。

CFCl_3 の圏界面高度付近の体積混合比として196ppt、対流圏上部については200pptが得られたが、これ等の値はサンプリング法による値に比べて、わずかに小さい。

赤外分光法の特長は、光路中の積分量が得られることであり、地上で観測する場合には水蒸気、二酸化炭素の妨害を除去するならば、比較的簡単に多量の資料が得られ、微量気体の季節変化、経

年変化等の研究に利用できる。

謝 辞

赤外分光装置を航空機に搭載して観測するにあたっては、昭和航空（株）の方々の御協力を、また赤外分光装置の調整等には日本インダストリアル（株）の御協力をいただき深く感謝します。

参 考 文 献

- Goldman, A., F.S. Bonomo and D.G. Murcray, 1976 a : Statistical-Band-Model Analysis and Integrated Intensity for the $10.8 \mu\text{m}$ Band of CF_2Cl_2 .
Geophys. Res. Lett. **3**, 309—312.
- Goldman, A., F.S. Bonomo and D.G. Murcray, 1976 b : Statistical Band Model Analysis and Integrated Intensity for the $11.8 - \mu\text{m}$ Band of CFCl_3 .
Appl. Optics, **15**, 2305—2307.
- Goody, R.M. 1964 : Atmospheric Radiation, I ; Theoretical Basis. New York, Oxford University Press, 233—243, and 122.
- Hirota, M., H. Muramatsu, Y. Makino, T. Sasaki, Y. Toyama, 1984 : The Vertical Distributions of Atmospheric CF_2Cl_2 , CFCl_3 and N_2O over Japan. J. Meteor. Soc. Japan, **62**, 158—164.
- McClatchey, R. A., W.S. Benedict, S. A. Clough, D. E. Burch, R. F. Calfee, K. Fox., L. S. Rothman and J. S. Garing, 1973 : AFCRL Atmospheric Absorption Line Parameters Compilation. AFCRL-TR-73-0096, 76 p.
- Muramatsu, H., Y. Makino, M. Hirota and T. Sasaki, 1984 : Infrared Measurements of Total Nitrous Oxide at Tsukuba. Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue. **34**, 28—36.
- 広田道夫、村松久史、佐々木徹、牧野行雄、旭満、1986 : ガスクロマトグラフ法による対流圏および成層圏微量化学成分の分布の測定、気象研究所技術報告、第18号、第1章、P11—28。
- 広田道夫、村松久史、1986 : 筑波における地表大気中の CH_4 濃度、日本化学会春季大会予稿集。
- 牧野行雄、村松久史、広田道夫、1982 : 赤外分光法による微量成分の観測、気象研究所技術報告第6号、43—74。

第4章 成層圏におけるイオン生成率の測定*

4.1 はじめに

中層大気研究の一環として、粒子線による成層圏イオン生成率の測定が行われた。この研究は、中層大気の物理的性質の一つの側面を明らかにするだけでなく、次のような重要な意味をも持っている。

それは、太陽活動が気候変動に及ぼす影響に関する問題である。太陽活動が気候変動に影響を及ぼす過程として、2つのことが考えられる。即ち、

- ① 太陽活動に支配される粒子線が、中層大気中においてイオン生成と同時にNOを生成し、それがオゾンを破壊する過程
- ② 中層大気中で生成されたイオンが、クラスター・イオンを形成し、それらがエアロゾルに成長する過程

である。これらの議論において重要な意味をもつ基礎的資料の一つが、中層大気におけるイオン生成率である。

このように、中層大気におけるイオン生成率の測定は中層大気物性の研究のみならず、気候変動——特に太陽活動と気候変動との関係——の研究においても重要な問題である。

1984年5月25日、壁厚の異なる3個の電離函を宇宙科学研究所三陸大気球観測所の大気球に搭載して、飛揚観測が行われた。以下、その結果について報告する。

4.2 電離函の諸元と観測方法

観測には壁厚の異なる3箇の電離函が用いられ、同一のゴンドラ内に設置された。その諸元を表4.1に示す。表に示すように、電離函の壁は何れもアルミニウムで、それらの厚さは各々0.4、0.8及び3.0mmとなっている。以後、簡単のために、これらを各々電離函No.1、No.2及びNo.3と呼ぶことにする。

これらの電離函は、飛揚観測前に、何れも γ -線を用いて検定し、電離函内の電離電流が線源からの距離の自乗に反比例することを測定し、電離函は正常に作動することを確めた（北村、森田、1984）。

実際の観測時には、他の測定器と一緒に同じゴンドラ内に設置し、宇宙科学研究所三陸大気球観測所の大気球に搭載し、成層圏飛揚を行って観測した。観測値はテレメーターで送信し、地上で受信したものは、一つは磁気テープに記録して後日電算機処理を行う方式をとり、他の一つは、モニ

* 北村正亟：元高層物理研究部

表4.1 電離函の諸元

No.	1	2	3	備 考
壁 物 質	Al	Al	Al	
壁 厚 d (mm)	0.4	0.8	3.0	
有効壁厚 t (gcm^{-2})	0.13	0.26	0.94	$t = 1.2 \rho d$ ($\rho = 2.6$) ^(#)
封入気体	空 気	空 気	空 気	
封入気圧 P (気圧, 0°C)	0.936	0.935	0.889	
内 径 r_0 (cm)	19.5	19.5	19.5	
内容積 V (cm^3)	31.0×10^3	31.0×10^3	31.0×10^3	針線の体積を補正してある
抵 抗 R (Ω)	0.940×10^{12}	0.962×10^{12}	0.944×10^{12}	
発泡スチロール厚 d' (gcm^{-2})	0.18	0.18	0.18	$5\text{ cm} \times 2\text{ 枚}$, ^(*) 密度 $\rho' = 0.018$
t_s (観測中) (gcm^{-2})	0.22	0.22	0.22	$t_s = 1.2 d'$ ^(#)
t_s (校正中) (gcm^{-2})	0.11	0.11	0.11	$5\text{ cm} \times 1\text{ 枚}$
総壁厚				
観測中 $t' = t + t_s$ (gcm^{-2})	0.35	0.48	1.16	
校正中 $t'' = t + t_s'$ (gcm^{-2})	0.24	0.37	1.05	

(*) 電離函は発泡スチロールの容器内に収められており、その厚さは5 cmであるが、観測中は更に同じ発泡スチロールのゴンドラの壁(5 cm)が加わるので、結局発泡スチロールの厚さ(d)は観測中は10 cm、校正中は5 cmとなる。その密度 $\rho' = 0.018$ 、有効壁厚は $1.2 d'$ として計算した。

(#) J.A.De Campo et al.(1972)により、垂直壁厚の1.2倍をもって有効壁厚とする。

ター用として、ペン・レコーダーによる記録を併行して行った。ここに示すのは電算機処理を施して作製した図である。

観測には二つのチャンネルが与えられたので、電離函No.1とNo.2は切換え方式で同一のチャンネルを用い、No.3は独立で他のチャンネルを用いた、図4.1に記録の一例を示す。(a)は電離函No.1及びNo.2の記録。(b)はNo.3の記録の例である。図(a)において、1-i、1-0、及び1-250はそれぞれ電離函No.1における電離電流による電圧、ゼロ点及び250 mVに対する値で校正のための値である。No.2についても同様である。又図中Tは気温を示す。図(b)におけるNo.3の記号も他と同様である。図中Pは気圧を示す。図から分る様に、No.1とNo.2は各々毎分18秒間電離電流を記録し、ゼロ点及び250 mVレベルは2分おきに6秒間ずつ記録する。これに対して、No.3は毎分48秒間電離電流を記録する。ゼロ点と250 mVレベルは他と同様2分おきに6秒ずつ記録している。

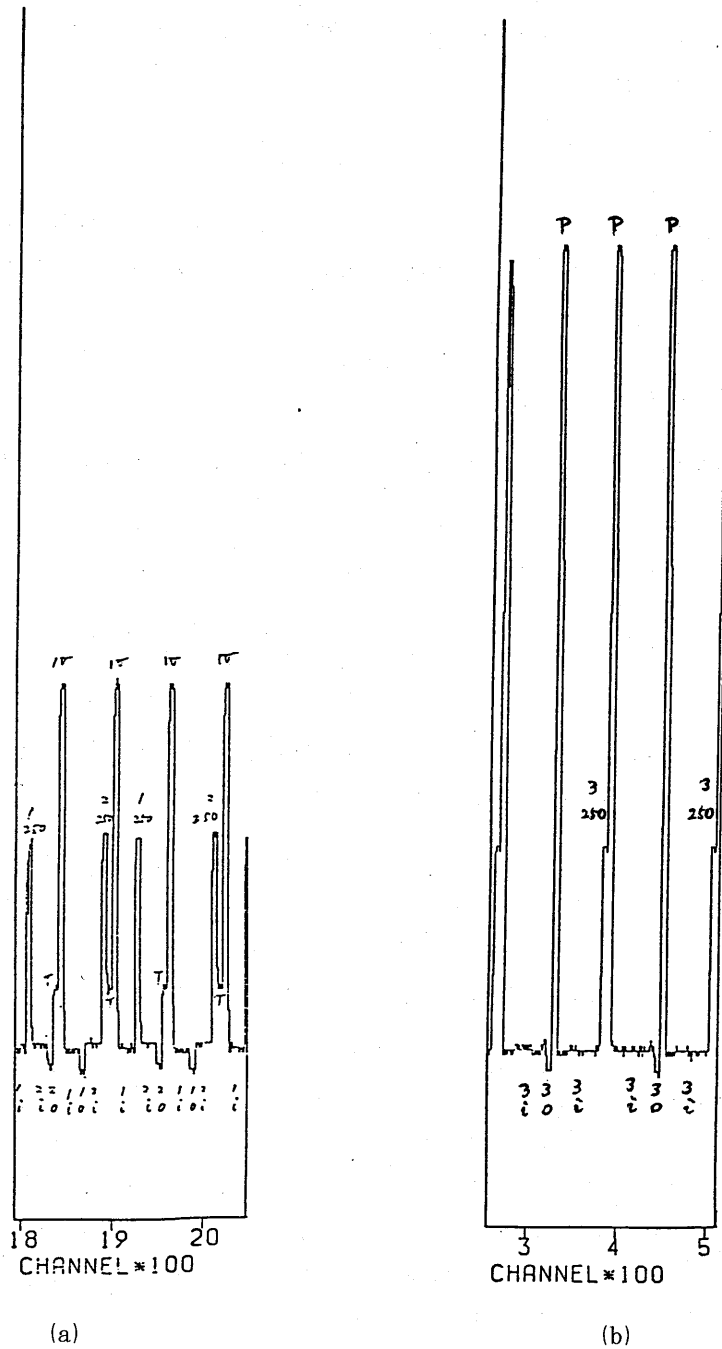


図 4.1 電離層による観測記録の一例
 (a): 電離層No. 1 及びNo. 2 の記録
 (b): 電離層No. 3 の記録

4.3 電離電流の算出

電離函内の電流によって生じる電圧 v_i とゼロ点 v_o 及び校正用既知電圧 v_1 とから、電離函内の電離電流 I_c は次式で与えられる。

$$I_c = (v_1 - v_o) \left(\frac{v_i - v_o}{v_1 - v_o} \right) / R \quad (4.1)$$

ここで R は抵抗で、表 4.1 に与えられる。又ここでは $v_1 = 250 \text{ mV}$ 、 $v_o = 0 \text{ mV}$ である。実際の測定に当っては、電圧 v と電波周波数 f の直線性を利用し、 v_o 、 v_1 及び v_i に対する f_o 、 f_1 及び f_i を測定して I_c を求める。即ち、

$$I_c = (v_1 - v_o) \left(\frac{f_i - f_o}{f_1 - f_o} \right) / R \quad (4.2)$$

ところで、電離函内の電離電流 I_c と自由大気中のイオン対生成率 J_c との関係を

$$J_c = I_c / K_c \quad (4.3)$$

とすると、係数 K_c は次式で与えられる：

$$K_c = (PV)_{STP} \cdot \left(\frac{1.602 \times 10^{-19} \text{ amp}}{\text{ion pair}} \right) = (P_1 V) \left(\frac{273}{273 + T_1} \right) \left(\frac{1.62 \times 10^{-19} \text{ amp}}{\text{ion pair}} \right) \quad (4.4)$$

ここで V は電離函の内容積、 P_1 及び T_1 は電離函に空気を封入した時のその場所の気圧及び気温を表わす。従って (4.3) 式は次の様に表わされる：

$$J_c = (v_1 - v_o) \left(\frac{f_i - f_o}{f_1 - f_o} \right) / \left[R \cdot (P_1 V) \cdot \left(\frac{273}{273 + T_1} \right) \times 1.602 \times 10^{-19} \right] (\text{ion pair}) \quad (4.5)$$

これが一般に用いられる式であり、以下この式によって算出した値について述べることにする。

4.4 飛揚観測結果

1984 年 5 月 25 日、宇宙科学研究所三陸大気球観測所の大気球に、前記 3 個の電離函を他の測定器と一緒に搭載し、同時飛揚観測を行った。図 4.2、4.3 及び 4.4 はそれぞれ電離函 No. 1、No. 2 及び No. 3 によるイオン対生成率の高度変化を示したものである。これらの値をそれぞれ J 1、J 2 及び J 3 とする。これは大気球上昇時の観測結果で、下降時は落下時間が短いため、この種の解析には適していないので、ここでは用いなかった。結果として次のようなことが明らかになった。

① Pfozter Maximum (二次宇宙線の発生のため、100 mb 付近の層で宇宙線強度が最大となる) 付近でノイズが発生し、観測値が得られなかったが、17~18km 付近が最大であることが判る。

図 4.2 ~ 4.4 の比較から、② 三者の値の間には大きな差は見られず、特に Pfozter Maximum より上方においては三者は殆ど一致している。③ Pfozter Maximum より下方、特に 4 ~ 15km で電離

函No 2 の値が他に比してやや大きい値を示している。

次に、図 4.5 において、1982 年 9 月 1 日、同地点において電離函No 2 を用いて行った予備観測の結果と 1984 年の J 2 とを比較するこれによると、④ Pfozter Maximum 付近において、1984 年の方が約 1 % 増加していることが分る。これはこの期間における地上の宇宙線中性子強度の変化と大体一致している。

最後に、⑤ Brasseur and Nicolet (1973) によって求められた極地方におけるイオン対生成率高度分布との比較を図 4.6 において示す。図中、3 つの高度分布曲線の中、左が今回の我々の結果、中央と右はそれぞれ極地方の太陽活動極大期及び極小期に対応するものである。

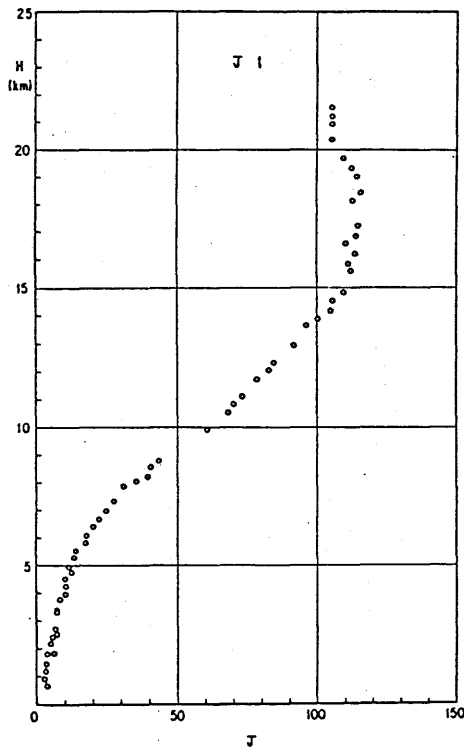


図 4.2 0.4 mm Al (空気) 電離函による観測結果 (1984 年 5 月 25 日)

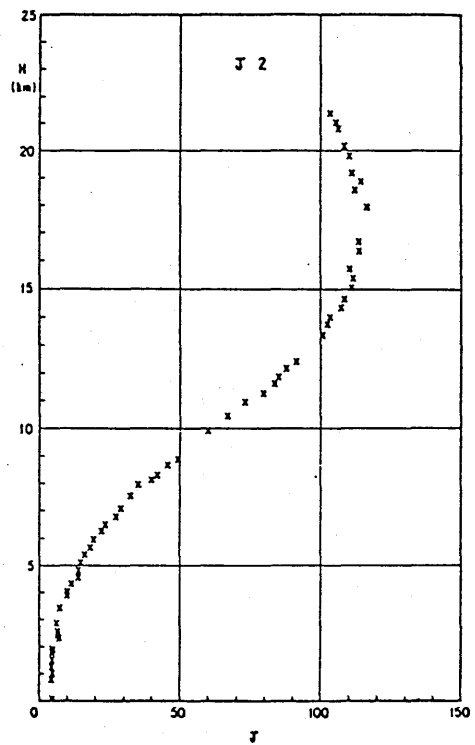


図 4.3 0.8 mm Al (空気) 電離函による観測結果 (1984 年 5 月 25 日)

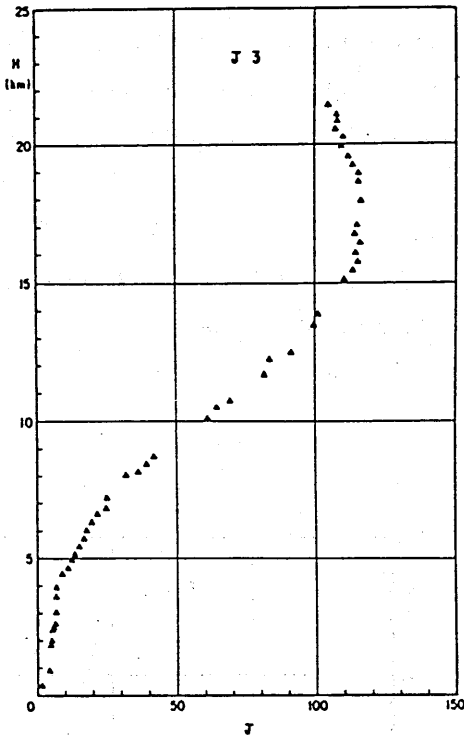


図 4.4 3.0 mm Al (空気) 電離函による観測結果 (1984 年 5 月 25 日)

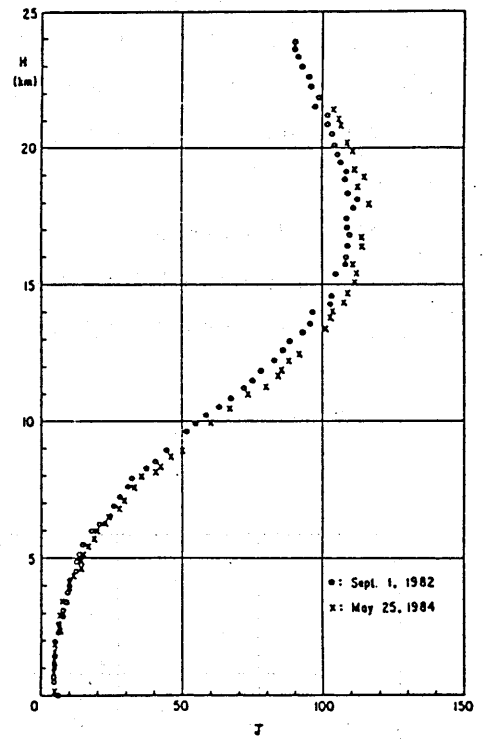


図 4.5 0.8 mm Al (空気) 電離函による 1982 年 9 月 1 日と 1984 年 5 月 25 日の観測結果

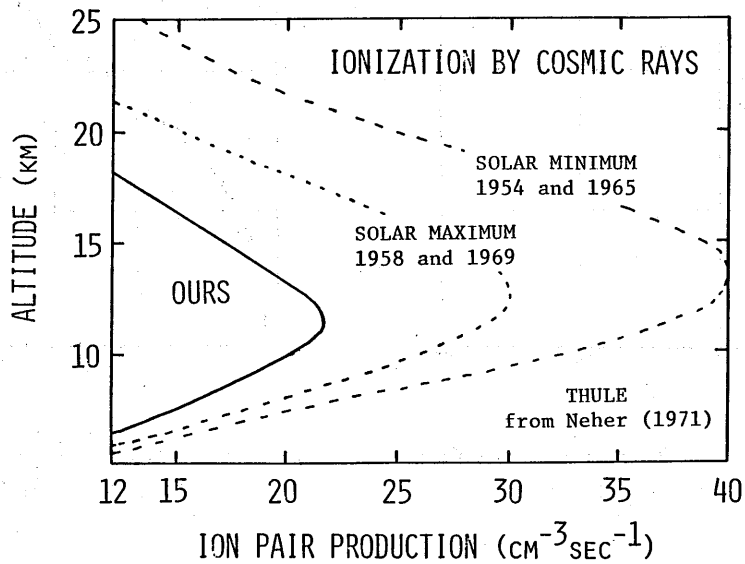


図 4.6 自由大気中の電離生成率

左の線が今回の結果、中と右は極地の例で太陽活動極大と極小期に対応する (Brasseur and Nicolet, 1973)。

4.5 検討

本観測で得られた結果の中、前節において指摘した点について検討を行う。

- ① 観測当日、9時 JST の秋田におけるゾンデ観測によれば100 mb及び70 mb高度は、それぞれ16,373 m及び18,594 mであり、Pfortzer Maximumの位置17~18kmと一致する。
- ② Pfortzer Maximum より上方においては、~10 Gev 以上の高エネルギー一次宇宙線（陽子）が殆どであるので、今回用いた電離函の壁厚の差は殆ど無視され、三者の値が一致することが期待される。
- ③ Pfortzer Maximum 以下においては、二次宇宙線の組成とエネルギー分布によって複雑に影響されるので、三者の間の詳細な比較検討が今後必要である。
- ④ 1984 年の Pfortzer Maximum における値が、1982 年の値より約1%増加していることは、この期間の地上の宇宙線変化と大体一致しており、上の変化が太陽活動に支配される宇宙線粒子によるものであることを示している。
- ⑤ 今回の我々の値は、日本付近の緯度における値で、極地方の値の約 $1/1.5$ で宇宙線強度の緯度分布と一致している、日本付近においても太陽活動極大及び極小期にわたる同種の観測が望まれる。

4.6 おわりに

この観測は、特別研究「中層大気の研究」の一環として行われた。然し、この期間中に行われた観測は、予備観測、本観測各1回で、決定的結論を出すには余りに観測回数の少ないことを痛感する。然し、それにも拘らず、本報告中で指摘したいくつかの特徴的な成果が得られた。今後は観測の回数を重ねると共に、観測方法の改良によって今回の成果が更に補強されることを期待する。

特に、(1)太陽活動極大期、極小期を含む長期の観測によって、日本付近におけるイオン生成率分布図の確立、(2)低エネルギー（~1 Mev 以下）の粒子線によるイオン生成率の測定が望まれる（電子では~100 ev 付近で電離効果は最も大きい）。これらは、粒子線によるイオン生成反応を介して太陽活動が気候変動に及ぼす影響の議論において、極めて重要な資料となるであろう。

謝 辞

本研究を行うに当たり、理化学研究所和田雅美主任研究員・岡野真治副主任研究員始め、同所宇宙線研究室及び放射線研究室の各位、並びに山梨医科大学小玉正弘教授には、観測・討論等全般にわたり、貴重な御指導と御援助を頂き、大気球飛揚観測に際しては、宇宙科学研究所西村研究室の各位に一方ならぬお世話を頂いた。又、電離函の製作に当っては、名古屋大学空電研究所森田恭弘助教授に終始多大の御援助と御協力を頂いた。尚、気象研究所高層物理研究部村松部長及び広田道夫主任研究官には予備観測から本観測に至るまで一貫して色々と御援助を賜わった。ここに深甚の謝

意を表するものである。

参 考 文 献

Brasseur, G. and Nicolet, M. (1973), Planet. Space Sci. **21**, 939.

De Campo, J.A., Beck, H.L. and Raft, P.D. (1972): High pressure argon ionization chamber system for the measurement of environmental radiation exposure rates, HASL-260, NY. USA.

北村正亟、森田恭弘 (1984): 空気封入電離函によるイオン対生成率の測定、理研シンポジウム講演集 (第21回、航空機内における放射線測定)、19-26.

第5章 ライダー観測*

5.1 まえがき

昭和57年3月末から4月始めにメキシコのエル・チチョン火山が噴火して成層圏に多量のダストを注入したため、ライダーによる高々度エーロゾル観測は主としてこのダストの消長の追跡となった。解析結果については既に田端、高橋(1984)、Uchino et al. (1984)、Uchino (1985)に報告されているので本章では観測された代表的な資料を示す。

成層圏エーロゾルの観測では受信波が微弱なため雲のない夜間に光電子計数方式で行われる。従って、梅雨のように曇天の続く季節には観測資料が殆んどないことが多い。

5.2 使用したライダーの特性

使用したライダーの特性は次の通りである。

レーザー：ルビー

波 長：694.3 nm

出 力：最大6 J、通常1～2 J/pulses

パルス幅：30 ns

繰返 し：2 PPM

高度分解能：1 km

5.3 観測資料の処理

ライダーによるエーロゾルの観測値（光電子計数値）は大気中のすべての分子・粒子からの後方散乱の時・空間的相対値であり、ライダー方程式から直接物理量を求めることは殆んど不可能である。Grams その他(1967)はラジオゾンデ等から計算した大気分子の後方散乱の鉛直分布と、ライダーで得られた後方散乱の鉛直分布の中でエーロゾルが殆んど存在しない層で両者を一致させて基準点とし、他の高度の物理量を求める方法を用いた。この方法は一般にマッチングと呼ばれている。（国内参考文献 内藤(1981)、岩坂(1983)がある。）その後 Russell・その他(1979)はこの方法を改良したとも云える加重平均法を発表した。この章に示す資料は主として後者によった。観測値から必要とする物理量を用いるために用いた定数・気象要素等は次の通りである。

z : 高さ

$\beta(z)$: 大気分子とエーロゾルの後方散乱係数

* 田端功、岡田芳隆、内野修、穂田巖、内藤恵吉：気象衛星研究部

$\beta_M(z)$: 大気分子による後方散乱係数

$\beta_A(z)$: エロゾルによる後方散乱係数

σ_M : レーリー後方散乱断面積 ($1.771 \times 10^{-27} \text{ cm}^2$)

$N(z)$: 大気分子密度

$R(z)$: 散乱比

$\sigma(R(z))$: 散乱比の標準偏差

$\sigma(\beta_A(z))$: エロゾルによる後方散乱係数の標準偏差

$\tau_A(z)$: エロゾルに対するレーザー光の消散係数

$\tau_M(z)$: 大気分子に対するレーザー光の消散係数

B : 高度 Z_1 から Z_2 までの $\beta_A(z)$ の積分値

$$\beta(z) = \beta_A(z) + \beta_M(z)$$

$$\beta_M(z) = \sigma_M \cdot N(z)$$

$$R(z) = \frac{\beta_A(z) + \beta_M(z)}{\beta_M(z)} = 1 + \frac{\beta_A(z)}{\beta_M(z)}$$

この中で $N(z)$ の計算には高層気象台のその日のレーウィンゾンデの値と、ゾンデの到達高度より上層には綾里 ($39^\circ 02' \text{N}$, $141^\circ 50' \text{E}$) の気象ロケットゾンデの10年間平均値を用いた。 $\tau_A(z)$ の計算にはエロゾルの粒径分布・屈折率等が既知であることが必要であるが便宜的に Swissler その他(1983)の提出した関係を参考に

$$\tau_A(z) = 50 \beta_A(z)$$

とした。オゾンによる吸収は一定鉛直モデルを使用した。 $R(z)$ 、 $\sigma(R(z))$ 、 $\beta_A(z)$ 、 $\sigma(\beta_A(z))$ 等は Russel ら(1979)の加重平均法を用いて計算し、逐次近似を行って10回目の値を採用した。

以上の方法で計算した $R(z)$ の中には不適当なマッチングその他の原因で明らかに誤りと思われる $R(z) < 1$ の場合も見られるが、観測装置、データ処理法の両面から今後の検討課題である。

5.4 資料について

5.1 表に示すライダーによる高々度エロゾル資料の計算において、記号は 5.3 で定義したもの、 $\beta_A(z)$ の単位は $\text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 、 B の計算における積分範囲は $16.5 \sim 30.5 \text{ km}$ 、 $R(z) < 1$ の時には $R(z) = 1$ と仮定して積分した。数値の表示は例えば 1.23×10^{-4} は $1.23 - 4$ と表示した。地上気象要素と圏界面高度は高層気象台の21時のレーウィンゾンデ観測による。

5.1 図に B の変化を示す。

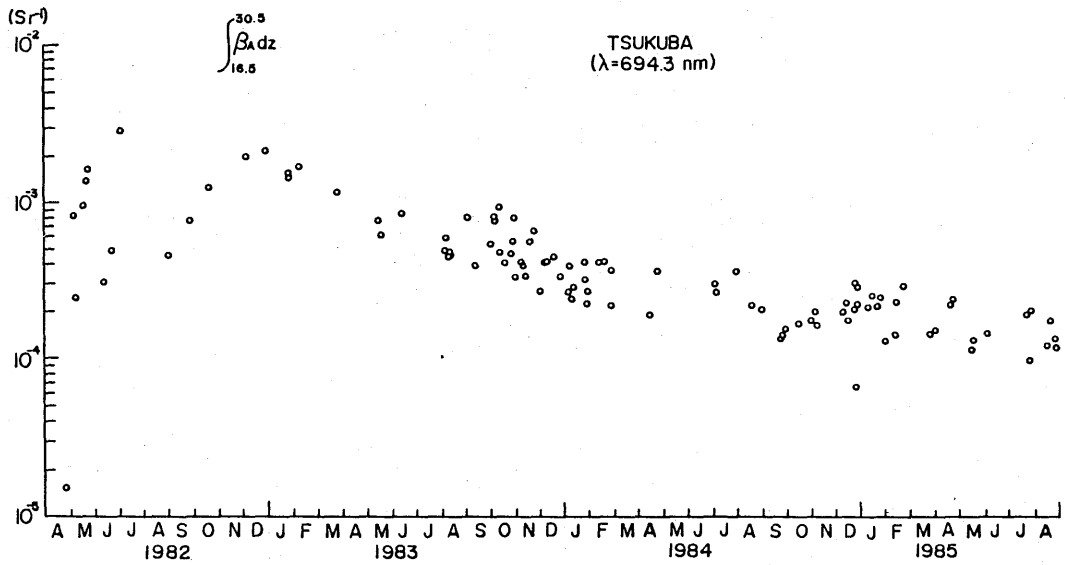


図5.1 高度16.5 kmから30.5 kmまで $\beta_A(z)$ を z について積分した B の変化

year 1982 month 4 day 25
time 19: 47
weather 6, St, ①
tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 12.2
number of shots 150

$B1.5 \times 10^{-5}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5	1.14	3.51	- 2	1.56	-10	3.88	-11
1 4.5	1.57	4.85	- 2	5.48	-10	4.50	-11
1 5.5	1.57	4.98	- 2	4.67	-10	3.99	-11
1 6.5	0.99	3.45	- 2	-6.61	-12	2.41	-11
1 7.5	0.97	3.60	- 2	-1.65	-11	2.13	-11
1 8.5	0.97	3.82	- 2	-1.36	-11	1.94	-11
1 9.5	1.08	4.44	- 2	3.24	-11	1.88	-11
2 0.5	1.00	4.57	- 2	-7.28	-13	1.65	-11
2 1.5	1.07	5.21	- 2	2.04	-11	1.61	-11
2 2.5	1.10	5.90	- 2	2.48	-11	1.54	-11
2 3.5	1.11	6.56	- 2	2.39	-11	1.47	-11
2 4.5	1.03	6.97	- 2	6.23	-12	1.35	-11
2 5.5	1.12	8.16	- 2	1.90	-11	1.34	-11
2 6.5	1.01	8.71	- 2	1.88	-12	1.23	-11
2 7.5	1.09	1.02	- 1	1.03	-11	1.22	-11
2 8.5	0.98	1.08	- 1	-2.16	-12	1.11	-11
2 9.5	1.14	1.33	- 1	1.24	-11	1.17	-11
3 0.5	0.90	1.31	- 1	-7.70	-12	9.93	-12
3 1.5	1.37	1.85	- 1	2.40	-11	1.20	-11

year 1982 month 5 day 5
time 20: 56
weather 0, -, ①
tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 11.2
number of shots 50

$B8.4 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.33	1.36	- 1	4.30	-10	1.76	-10
1 3.5	1.58	1.62	- 1	6.46	-10	1.80	-10
1 4.5	1.69	1.74	- 1	6.64	-10	1.67	-10
1 5.5	1.72	1.78	- 1	5.98	-10	1.47	-10
1 6.5	1.77	1.85	- 1	5.48	-10	1.32	-10
1 7.5	1.79	1.89	- 1	4.77	-10	1.14	-10
1 8.5	2.08	2.22	- 1	5.50	-10	1.13	-10
1 9.5	2.19	2.37	- 1	5.23	-10	1.04	-10
2 0.5	5.37	5.76	- 1	1.62	- 9	2.12	-10
2 1.5	7.15	7.85	- 1	1.94	- 9	2.47	-10
2 2.5	8.67	9.86	- 1	2.06	- 9	2.64	-10
2 3.5	4.32	5.25	- 1	7.56	-10	1.19	-10
2 4.5	1.13	1.69	- 1	2.48	-11	3.29	-11
2 5.5	1.30	2.00	- 1	4.95	-11	3.30	-11
2 6.5	1.37	2.23	- 1	5.14	-11	3.12	-11
2 7.5	1.13	2.11	- 1	1.51	-11	2.46	-11
2 8.5	0.82	1.87	- 1	-1.78	-11	1.87	-11
2 9.5	1.41	2.91	- 1	3.50	-11	2.49	-11
3 0.5	1.16	2.80	- 1	1.16	-11	2.06	-11
3 1.5	1.15	3.10	- 1	9.66	-12	1.94	-11

year 1982 month 5 day 8

time 22 : 08

weather 3, Cu, ①

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 12.9

number of shots 50

$B 2.48 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.30	1.40	- 1	3.89	-10	1.84	-10
1 3.5	1.77	1.92	- 1	8.51	-10	2.12	-10
1 4.5	1.52	1.67	- 1	4.86	-10	1.57	-10
1 5.5	1.70	1.91	- 1	5.64	-10	1.52	-10
1 6.5	2.30	2.61	- 1	7.93	-10	1.58	-10
1 7.5	1.96	2.30	- 1	5.43	-10	1.30	-10
1 8.5	1.45	1.83	- 1	2.26	-10	9.11	-11
1 9.5	1.66	2.12	- 1	2.97	-10	9.56	-11
2 0.5	2.96	3.67	- 1	7.56	-10	1.41	-10
2 1.5	0.86	1.47	- 1	-4.66	-11	4.82	-11
2 2.5	1.13	1.94	- 1	3.54	-11	5.49	-11
2 3.5	1.13	2.16	- 1	2.97	-11	4.99	-11
2 4.5	0.92	2.20	- 1	-1.43	-11	3.84	-11
2 5.5	1.45	3.19	- 1	6.83	-11	4.87	-11
2 6.5	1.19	3.15	- 1	2.48	-11	4.18	-11
2 7.5	1.34	3.74	- 1	3.89	-11	4.31	-11
2 8.5	0.90	3.32	- 1	-1.02	-11	3.35	-11
2 9.5	1.71	5.27	- 1	6.35	-11	4.71	-11
3 0.5	0.72	3.70	- 1	-2.13	-11	2.84	-11
3 1.5	1.63	6.42	- 1	4.15	-11	4.21	-11

year 1982 month 5 day 17

time 19 : 57

weather 3, Ac, ①

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 10.9

number of shots 150

$B 9.6 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5							
1 5.5	1.01	4.47	- 2	9.00	-12	3.67	-11
1 6.5	1.40	6.21	- 2	2.87	-10	4.36	-11
1 7.5	1.43	6.42	- 2	2.65	-10	3.88	-11
1 8.5	1.07	5.00	- 2	3.78	-11	2.54	-11
1 9.5	1.16	5.50	- 2	6.92	-11	2.37	-11
2 0.5	1.56	7.45	- 2	2.05	-10	2.68	-11
2 1.5	4.88	2.22	- 1	1.20	- 9	6.71	-11
2 2.5	9.88	4.65	- 1	2.33	- 9	1.19	-10
2 3.5	11.32	5.94	- 1	2.31	- 9	1.31	-10
2 4.5	14.61	8.76	- 1	2.64	- 9	1.67	-10
2 5.5	3.57	2.51	- 1	4.26	-10	4.12	-11
2 6.5	1.00	9.01	- 2	-6.14	-13	1.28	-11
2 7.5	1.06	1.01	- 1	6.76	-12	1.22	-11
2 8.5	0.97	1.02	- 1	-3.04	-12	1.06	-11
2 9.5	1.06	1.18	- 1	4.94	-12	1.04	-11
3 0.5	0.94	1.19	- 1	-4.24	-12	9.05	-12
3 1.5	1.01	1.36	- 1	3.67	-13	8.86	-12

year 1982 month 5 day 23time 19: 47weather 3, St, ①tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 10.6number of shots 100 $B1.6 \times 10^{-3}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5							
1 5.5	0.95	7.70	- 2	-4.36	-11	6.49	-11
1 6.5	1.55	1.26	- 1	3.98	-10	9.06	-11
1 7.5	1.91	1.55	- 1	5.55	-10	9.44	-11
1 8.5	1.17	9.69	- 2	8.88	-11	5.04	-11
1 9.5	1.26	1.05	- 1	1.14	-10	4.58	-11
2 0.5	2.57	2.13	- 1	5.79	-10	7.78	-11
2 1.5	8.47	6.97	- 1	2.35	- 9	2.17	-10
2 2.5	12.88	1.11	0	3.18	- 9	2.94	-10
2 3.5	28.76	2.76	0	6.39	- 9	6.33	-10
2 4.5	12.72	1.40	0	2.30	- 9	2.74	-10
2 5.5	2.16	2.63	- 1	1.95	-10	4.41	-11
2 6.5	1.34	1.75	- 1	4.83	-11	2.52	-11
2 7.5	1.51	2.02	- 1	6.31	-11	2.48	-11
2 8.5	1.17	1.70	- 1	1.78	-11	1.79	-11
2 9.5	1.12	1.74	- 1	1.09	-11	1.57	-11
3 0.5	0.95	1.64	- 1	-3.99	-12	1.26	-11
3 1.5	0.92	1.72	- 1	-5.46	-12	1.14	-11

year 1982 month 6 day 12time 19: 55weather 0, -, ①tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 14.3number of shots 100 $B3.1 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5	0.95	4.06	- 2	-5.82	-11	4.78	-11
1 4.5	1.18	5.07	- 2	1.85	-10	5.12	-11
1 5.5	1.39	6.03	- 2	3.39	-10	5.14	-11
1 6.5	1.75	7.67	- 2	5.55	-10	5.55	-11
1 7.5	2.18	9.71	- 2	7.24	-10	5.84	-11
1 8.5	1.83	8.57	- 2	4.35	-10	4.42	-11
1 9.5	1.39	7.02	- 2	1.73	-10	3.07	-11
2 0.5	2.00	1.01	- 1	3.73	-10	3.72	-11
2 1.5	4.10	2.01	- 1	9.96	-10	6.34	-11
2 2.5	1.22	7.84	- 2	5.94	-11	2.13	-11
2 3.5	0.99	7.32	- 2	-1.70	-12	1.71	-11
2 4.5	1.01	8.11	- 2	1.80	-12	1.60	-11
2 5.5	0.91	8.39	- 2	-1.52	-11	1.40	-11
2 6.5	1.11	1.06	- 1	1.58	-11	1.51	-11
2 7.5	1.26	1.26	- 1	3.15	-11	1.54	-11
2 8.5	1.02	1.24	- 1	2.41	-12	1.30	-11
2 9.5	1.04	1.41	- 1	3.12	-12	1.26	-11
3 0.5	1.21	1.70	- 1	1.59	-11	1.31	-11
3 1.5	1.17	1.88	- 1	1.09	-11	1.24	-11

year 1982 month 6 day 22

time 20 : 22

weather 4, Ci, ①

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 14.7

number of shots 50

$B4.9 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5							
1 5.5							
1 6.5	1.00	2.01	- 2	0.00	0	1.50	-11
1 7.5	1.38	2.78	- 2	2.38	-10	1.66	-11
1 8.5	1.58	3.28	- 2	3.09	-10	1.63	-11
1 9.5	1.89	4.06	- 2	3.96	-10	1.66	-11
2 0.5	2.64	5.82	- 2	6.20	-10	2.00	-11
2 1.5	2.14	5.34	- 2	3.66	-10	1.60	-11
2 2.5	5.80	1.41	- 1	1.30	- 9	3.51	-11
2 3.5	2.90	8.85	- 2	4.40	-10	1.95	-11
2 4.5	2.48	8.51	- 2	2.92	-10	1.62	-11
2 5.5	2.39	8.97	- 2	2.35	-10	1.47	-11
2 6.5	2.42	9.89	- 2	2.06	-10	1.39	-11
2 7.5	2.39	1.07	- 1	1.72	-10	1.29	-11
2 8.5	2.40	1.17	- 1	1.49	-10	1.22	-11
2 9.5	2.25	1.23	- 1	1.14	-10	1.11	-11
3 0.5	2.04	1.27	- 1	8.09	-11	9.79	-12
3 1.5	1.85	1.33	- 1	5.67	-11	8.80	-12
3 2.5	2.04	1.56	- 1	5.96	-11	8.89	-12

year 1982 month 7 day 2

time 20 : 10

weather 0, -, ①

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 13.5

number of shots 50

$B2.8 \times 10^{-3}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	0.92	1.68	- 1	-1.10	-10	2.24	-10
1 3.5	1.29	2.37	- 1	3.40	-10	2.76	-10
1 4.5	1.49	2.74	- 1	4.91	-10	2.74	-10
1 5.5	1.92	3.53	- 1	7.90	-10	3.03	-10
1 6.5	2.15	3.96	- 1	8.42	-10	2.91	-10
1 7.5	2.68	4.95	- 1	1.06	- 9	3.12	-10
1 8.5	2.58	4.79	- 1	8.32	-10	2.53	-10
1 9.5	1.65	3.11	- 1	2.90	-10	1.40	-10
2 0.5	1.61	3.07	- 1	2.30	-10	1.16	-10
2 1.5	2.60	4.94	- 1	5.15	-10	1.59	-10
2 2.5	2.243	4.23	0	5.88	- 9	1.16	- 9
2 3.5	4.406	8.85	0	1.01	- 8	2.07	- 9
2 4.5	3.956	8.82	0	7.73	- 9	1.77	- 9
2 5.5	5.57	1.36	0	7.78	-10	2.30	-10
2 6.5	1.86	4.98	- 1	1.26	-10	7.27	-11
2 7.5	1.90	5.23	- 1	1.14	-10	6.61	-11
2 8.5	1.90	5.43	- 1	9.62	-11	5.81	-11
2 9.5	0.89	3.19	- 1	-9.74	-12	2.93	-11
3 0.5	0.89	3.41	- 1	-8.71	-12	2.69	-11
3 1.5	1.97	6.51	- 1	6.59	-11	4.41	-11
3 2.5	1.47	5.63	- 1	2.71	-11	3.27	-11

year 1982 month 9 day 1

time 19: 25

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 16.0

number of shots 100

$B4.6 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5							
1 5.5							
1 6.5	100	3.17	- 2	-224	-12	2.53	-11
1 7.5	1.54	4.83	- 2	3.64	-10	3.16	-11
1 8.5	1.86	6.05	- 2	4.84	-10	3.27	-11
1 9.5	1.33	5.12	- 2	1.51	-10	2.34	-11
2 0.5	2.20	8.11	- 2	4.71	-10	3.10	-11
2 1.5	6.45	2.12	- 1	1.81	- 9	6.70	-11
2 2.5	2.31	1.08	- 1	3.68	-10	2.99	-11
2 3.5	1.33	8.38	- 2	7.90	-11	1.98	-11
2 4.5	1.21	8.85	- 2	4.33	-11	1.79	-11
2 5.5	1.45	1.11	- 1	7.72	-11	1.88	-11
2 6.5	2.72	1.81	- 1	2.51	-10	2.62	-11
2 7.5	2.17	1.76	- 1	1.47	-10	2.20	-11
2 8.5	2.47	2.12	- 1	1.57	-10	2.26	-11
2 9.5	1.95	2.10	- 1	8.68	-11	1.92	-11
3 0.5	3.57	3.27	- 1	2.02	-10	2.56	-11
3 1.5	2.69	3.14	- 1	1.14	-10	2.11	-11
3 2.5	2.20	3.17	- 1	6.94	-11	1.83	-11

year 1982 month 9 day 27

time 18: 49

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 16.1

number of shots 150

$B7.7 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5							
1 5.5							
1 6.5	1.19	1.65	- 1	1.43	-10	1.27	-10
1 7.5	1.55	2.15	- 1	3.56	-10	1.40	-10
1 8.5	1.65	2.30	- 1	3.59	-10	1.26	-10
1 9.5	1.49	2.08	- 1	2.26	-10	9.65	-11
2 0.5	2.45	3.42	- 1	5.56	-10	1.31	-10
2 1.5	8.96	1.25	0	2.60	- 9	4.07	-10
2 2.5	8.18	1.16	0	1.98	- 9	3.19	-10
2 3.5	2.82	4.10	- 1	4.23	-10	9.52	-11
2 4.5	3.41	4.99	- 1	4.73	-10	9.77	-11
2 5.5	2.06	3.12	- 1	1.78	-10	5.22	-11
2 6.5	2.31	3.54	- 1	1.87	-10	5.04	-11
2 7.5	2.17	3.41	- 1	1.44	-10	4.20	-11
2 8.5	1.73	2.87	- 1	7.73	-11	3.03	-11
2 9.5	1.65	2.86	- 1	5.90	-11	2.60	-11
3 0.5	1.67	3.02	- 1	5.23	-11	2.35	-11
3 1.5	0.96	2.10	- 1	-2.62	-12	1.40	-11
3 2.5	1.43	3.00	- 1	2.47	-11	1.71	-11

year 1982 month 10 day 20

time 18 : 37

weather 0, -, ○

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 16.7

number of shots 100

$B 1.2 \times 10^{-3}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5							
1 5.5	0.95	9.23	- 2	-4.10	-11	8.05	-11
1 6.5	1.24	1.20	- 1	1.75	-10	8.91	-11
1 7.5	1.63	1.58	- 1	3.97	-10	9.95	-11
1 8.5	1.91	1.87	- 1	4.81	-10	9.78	-11
1 9.5	2.55	2.49	- 1	6.81	-10	1.09	-10
2 0.5	4.77	4.67	- 1	1.39	- 9	1.71	-10
2 1.5	4.79	4.75	- 1	1.21	- 9	1.50	-10
2 2.5	9.40	9.47	- 1	2.25	- 9	2.52	-10
2 3.5	15.08	1.59	0	3.26	- 9	3.65	-10
2 4.5	11.11	1.24	0	1.97	- 9	2.41	-10
2 5.5	3.37	4.04	- 1	3.99	-10	6.78	-11
2 6.5	2.84	3.53	- 1	2.65	-10	5.08	-11
2 7.5	1.40	1.97	- 1	4.91	-11	2.41	-11
2 8.5	1.15	1.77	- 1	1.60	-11	1.85	-11
2 9.5	1.13	1.87	- 1	1.18	-11	1.67	-11
3 0.5	0.89	1.69	- 1	-8.43	-12	1.29	-11
3 1.5	1.23	2.27	- 1	1.48	-11	1.49	-11
3 2.5	1.01	2.17	- 1	2.76	-13	1.22	-11

year 1982 month 12 day 8

time 20 : 24

weather 1, Ac, ○

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 14.3

number of shots 200

$B 2.0 \times 10^{-3}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5	1.01	1.24	- 1	7.98	-12	1.21	-10
1 5.5	1.35	1.66	- 1	2.88	-10	1.37	-10
1 6.5	2.15	2.65	- 1	8.01	-10	1.84	-10
1 7.5	3.56	4.39	- 1	1.51	- 9	2.59	-10
1 8.5	5.63	6.99	- 1	2.30	- 9	3.47	-10
1 9.5	7.46	9.46	- 1	2.73	- 9	3.99	-10
2 0.5	9.17	1.20	0	2.95	- 9	4.33	-10
2 1.5	12.13	1.67	0	3.45	- 9	5.16	-10
2 2.5	12.89	1.88	0	3.13	- 9	4.95	-10
2 3.5	8.66	1.34	0	1.69	- 9	2.94	-10
2 4.5	6.15	9.85	- 1	9.73	-10	1.86	-10
2 5.5	4.16	6.93	- 1	5.06	-10	1.11	-10
2 6.5	1.92	3.50	- 1	1.26	-10	4.79	-11
2 7.5	1.50	2.95	- 1	5.89	-11	3.47	-11
2 8.5	1.11	2.44	- 1	1.08	-11	2.46	-11
2 9.5	0.92	2.31	- 1	-6.46	-12	1.97	-11
3 0.5	0.95	2.54	- 1	-3.48	-12	1.86	-11
3 1.5							

year 1982 month 12 day 28
 time 17: 51
 weather 9, Ac, ☉
 tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 12.0, 16.7
 number of shots 150

$B \ 2.1 \times 10^{-3}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5	1.08	133	- 1	9.20	-11	1.45	-10
1 4.5	1.43	1.76	- 1	4.05	-10	1.64	-10
1 5.5	2.02	2.48	- 1	8.14	-10	1.97	-10
1 6.5	3.20	3.93	- 1	1.50	- 9	2.68	-10
1 7.5	5.02	6.22	- 1	2.34	- 9	3.61	-10
1 8.5	7.08	8.98	- 1	3.04	- 9	4.48	-10
1 9.5	8.35	1.10	0	3.03	- 9	4.52	-10
2 0.5	9.62	1.33	0	3.04	- 9	4.68	-10
2 1.5	11.84	1.73	0	3.28	- 9	5.22	-10
2 2.5	9.96	1.54	0	2.26	- 9	3.87	-10
2 3.5	8.04	1.30	0	1.57	- 9	2.89	-10
2 4.5	5.93	9.90	- 1	9.31	-10	1.87	-10
2 5.5	4.75	8.15	- 1	6.05	-10	1.31	-10
2 6.5	2.83	5.08	- 1	2.55	-10	7.06	-11
2 7.5	1.61	3.12	- 1	7.39	-11	3.75	-11
2 8.5	1.18	2.47	- 1	1.82	-11	2.56	-11
2 9.5	1.00	2.30	- 1	2.31	-13	2.04	-11
3 0.5	1.36	3.08	- 1	2.76	-11	2.35	-11
3 1.5							

year 1983 month 1 day 27
 time 18: 21
 weather 0, -, ☉
 tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 9.1, 18.7
 number of shots 100

$B \ 1.4 \times 10^{-3}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.44	2.71	- 1	5.42	-10	3.33	-10
1 3.5	2.24	4.21	- 1	1.31	- 9	4.44	-10
1 4.5	3.48	6.54	- 1	2.27	- 9	5.97	-10
1 5.5	4.96	9.39	- 1	3.09	- 9	7.32	-10
1 6.5	6.55	1.26	0	3.71	- 9	8.43	-10
1 7.5	7.53	1.50	0	3.70	- 9	8.46	-10
1 8.5	8.59	1.77	0	3.69	- 9	8.58	-10
1 9.5	6.71	1.44	0	2.37	- 9	5.99	-10
2 0.5	4.02	9.11	- 1	1.07	- 9	3.23	-10
2 1.5	3.74	8.77	- 1	8.39	-10	2.68	-10
2 2.5	2.28	5.88	- 1	3.31	-10	1.52	-10
2 3.5	1.54	4.51	- 1	1.19	-10	9.96	-11
2 4.5	1.32	4.29	- 1	6.00	-11	8.13	-11
2 5.5	1.03	3.94	- 1	4.15	-12	6.31	-11
2 6.5	0.96	4.17	- 1	-6.15	-12	5.68	-11
2 7.5	1.77	6.80	- 1	8.99	-11	7.93	-11
2 8.5	0.91	4.97	- 1	-8.91	-12	4.97	-11
2 9.5	0.90	5.54	- 1	-8.83	-12	4.74	-11
3 0.5	0.76	5.61	- 1	-1.78	-11	4.12	-11
3 1.5	0.98	7.23	- 1	-1.45	-12	4.55	-11
3 2.5	1.26	9.29	- 1	1.38	-11	5.01	-11

year 1983 month 2 day 8
 time 19: 30
 weather 0, -, O
 tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 8.8, 15.9
 number of shots 50

$B 1.6 \times 10^{-3}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma (\beta_A(z))$	
1 2.5	2.02	4.32	- 1	1.20	- 9	5.12	-10
1 3.5	2.55	5.47	- 1	1.60	- 9	5.65	-10
1 4.5	3.48	7.48	- 1	2.20	- 9	6.63	-10
1 5.5	4.54	9.84	- 1	2.73	- 9	7.59	-10
1 6.5	6.68	1.47	0	3.70	- 9	9.52	-10
1 7.5	8.08	1.81	0	4.02	- 9	1.03	- 9
1 8.5	9.00	2.08	0	3.85	- 9	9.98	-10
1 9.5	7.30	1.74	0	2.58	- 9	7.11	-10
2 0.5	6.28	1.54	0	1.83	- 9	5.31	-10
2 1.5	4.87	1.22	0	1.15	- 9	3.62	-10
2 2.5	2.53	6.63	- 1	3.86	-10	1.67	-10
2 3.5	2.37	6.38	- 1	2.95	-10	1.37	-10
2 4.5	1.64	4.74	- 1	1.19	-10	8.73	-11
2 5.5	1.97	5.75	- 1	1.53	-10	9.05	-11
2 6.5	1.47	4.72	- 1	6.41	-11	6.45	-11
2 7.5	2.17	6.83	- 1	1.35	-10	7.88	-11
2 8.5	1.04	4.17	- 1	3.66	-12	4.12	-11
2 9.5	1.63	6.23	- 1	5.36	-11	5.26	-11
3 0.5	1.21	5.48	- 1	1.53	-11	3.97	-11
3 1.5							

year 1983 month 3 day 25
 time 19: 09
 weather 10, Sc, ©
 tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 10.4
 number of shots 50

$B 1.2 \times 10^{-3}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma (\beta_A(z))$	
1 2.5	1.06	2.65	- 1	6.81	-11	3.29	-10
1 3.5	0.99	2.50	- 1	-1.56	-11	2.73	-10
1 4.5	1.21	3.09	- 1	2.04	-10	2.95	-10
1 5.5	1.41	3.60	- 1	3.37	-10	2.98	-10
1 6.5	2.19	5.59	- 1	8.51	-10	3.99	-10
1 7.5	4.75	1.20	0	2.30	- 9	7.35	-10
1 8.5	7.02	1.78	0	3.14	- 9	9.27	-10
1 9.5	7.04	1.81	0	2.63	- 9	7.89	-10
2 0.5	5.00	1.33	0	1.47	- 9	4.89	-10
2 1.5	3.28	9.24	- 1	7.07	-10	2.86	-10
2 2.5	3.07	9.05	- 1	5.44	-10	2.38	-10
2 3.5	1.11	4.26	- 1	2.43	-11	9.58	-11
2 4.5	0.60	3.11	- 1	-7.62	-11	5.98	-11
2 5.5	1.13	5.14	- 1	2.08	-11	8.30	-11
2 6.5	1.27	6.12	- 1	3.79	-11	8.51	-11
2 7.5	1.93	8.78	- 1	1.10	-10	1.04	-10
2 8.5	1.78	9.14	- 1	7.90	-11	9.30	-11
2 9.5	2.33	1.20	0	1.16	-10	1.05	-10
3 0.5	1.18	8.90	- 1	1.38	-11	6.65	-11
3 1.5							

year 1983 month 5 day 17

time 19 : 32

weather 1, Cu, O

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 12.2

number of shots 50

B 6.2 $\times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.97	2.59	- 1	1.26	- 9	3.37	-10
1 3.5	2.28	3.02	- 1	1.42	- 9	3.33	-10
1 4.5	2.03	2.73	- 1	9.63	-10	2.56	-10
1 5.5	2.15	2.93	- 1	9.50	-10	2.42	-10
1 6.5	2.60	3.60	- 1	1.15	- 9	2.58	-10
1 7.5	3.69	5.17	- 1	1.65	- 9	3.17	-10
1 8.5	4.19	6.03	- 1	1.66	- 9	3.12	-10
1 9.5	3.04	4.61	- 1	8.96	-10	2.02	-10
2 0.5	2.95	4.67	- 1	7.19	-10	1.72	-10
2 1.5	2.08	3.60	- 1	3.43	-10	1.14	-10
2 2.5	1.58	3.08	- 1	1.57	-10	8.28	-11
2 3.5	1.03	2.44	- 1	6.56	-12	5.59	-11
2 4.5	0.87	2.40	- 1	-2.55	-11	4.69	-11
2 5.5	1.71	4.10	- 1	1.19	-10	6.84	-11
2 6.5	1.18	3.56	- 1	2.50	-11	5.09	-11
2 7.5	1.09	3.78	- 1	1.09	-11	4.62	-11
2 8.5	0.84	3.64	- 1	-1.65	-11	3.81	-11
2 9.5	1.10	4.78	- 1	9.31	-12	4.28	-11
3 0.5	0.93	4.86	- 1	-5.07	-12	3.73	-11
3 1.5	0.90	5.38	- 1	-6.33	-12	3.53	-11

year 1983 month 6 day 14

time 19 : 36

weather 0, -, O

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 12.3

number of shots 50

B 8.5 $\times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	3.36	2.47	- 1	3.11	- 9	3.24	-10
1 3.5	3.16	2.37	- 1	2.45	- 9	2.67	-10
1 4.5	3.73	2.93	- 1	2.66	- 9	2.83	-10
1 5.5	3.78	3.16	- 1	2.33	- 9	2.63	-10
1 6.5	3.76	3.36	- 1	1.97	- 9	2.39	-10
1 7.5	3.79	3.60	- 1	1.70	- 9	2.19	-10
1 8.5	3.96	3.98	- 1	1.53	- 9	2.05	-10
1 9.5	4.46	4.72	- 1	1.52	- 9	2.07	-10
2 0.5	3.87	4.31	- 1	1.07	- 9	1.59	-10
2 1.5	3.61	4.17	- 1	8.31	-10	1.32	-10
2 2.5	2.53	3.04	- 1	4.18	-10	8.28	-11
2 3.5	2.06	2.56	- 1	2.49	-10	5.98	-11
2 4.5	1.51	1.96	- 1	1.02	-10	3.95	-11
2 5.5	1.06	1.50	- 1	1.09	-11	2.55	-11
2 6.5	1.16	1.68	- 1	2.29	-11	2.45	-11
2 7.5	1.18	1.80	- 1	2.29	-11	2.24	-11
2 8.5	0.99	1.66	- 1	-8.85	-13	1.77	-11
2 9.5	0.86	1.61	- 1	-1.29	-11	1.48	-11
3 0.5	1.14	2.11	- 1	1.09	-11	1.66	-11
3 1.5	1.20	2.36	- 1	1.33	-11	1.59	-11
3 2.5	0.96	2.23	- 1	-2.38	-12	1.29	-11

year 1983 month 8 day 7

time 21 : 39

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 15.4

number of shots 50

$B 5.9 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5	0.98	2.19	- 1	-1.98	-11	2.70	-10
1 4.5	1.06	2.37	- 1	6.66	-11	2.53	-10
1 5.5	1.35	3.01	- 1	3.24	-10	2.81	-10
1 6.5	1.52	3.41	- 1	4.08	-10	2.68	-10
1 7.5	2.77	6.19	- 1	1.18	- 9	4.12	-10
1 8.5	3.79	8.49	- 1	1.55	- 9	4.70	-10
1 9.5	3.22	7.31	- 1	1.02	- 9	3.37	-10
2 0.5	2.59	6.01	- 1	6.21	-10	2.35	-10
2 1.5	2.40	5.70	- 1	4.68	-10	1.91	-10
2 2.5	2.08	5.15	- 1	3.06	-10	1.46	-10
2 3.5	1.28	3.54	- 1	6.78	-11	8.46	-11
2 4.5	1.50	4.21	- 1	1.02	-10	8.65	-11
2 5.5	1.19	3.74	- 1	3.31	-11	6.56	-11
2 6.5	1.67	5.20	- 1	9.97	-11	7.71	-11
2 7.5	1.47	5.10	- 1	5.86	-11	6.37	-11
2 8.5	1.75	6.22	- 1	8.08	-11	6.68	-11
2 9.5	1.59	6.37	- 1	5.44	-11	5.86	-11
3 0.5	1.34	6.24	- 1	2.72	-11	4.93	-11
3 1.5							

year 1983 month 8 day 13

time 19 : 06

weather 3, Ci, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 14.4

number of shots 100

$B 4.5 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	0.93	6.70	- 2	-9.73	-11	9.24	-11
1 3.5	1.26	9.12	- 2	3.23	-10	1.11	-10
1 4.5	1.42	1.03	- 1	4.49	-10	1.10	-10
1 5.5	1.73	1.26	- 1	6.66	-10	1.15	-10
1 6.5	2.21	1.63	- 1	9.47	-10	1.27	-10
1 7.5	2.93	2.20	- 1	1.27	- 9	1.44	-10
1 8.5	2.98	2.31	- 1	1.11	- 9	1.28	-10
1 9.5	2.38	1.94	- 1	6.48	-10	9.07	-11
2 0.5	2.01	1.74	- 1	3.89	-10	6.71	-11
2 1.5	2.05	1.85	- 1	3.47	-10	6.12	-11
2 2.5	1.76	1.74	- 1	2.16	-10	4.89	-11
2 3.5	1.14	1.34	- 1	3.29	-11	3.19	-11
2 4.5	1.12	1.44	- 1	2.52	-11	2.94	-11
2 5.5	0.94	1.40	- 1	-1.13	-11	2.44	-11
2 6.5	1.02	1.64	- 1	2.28	-12	2.44	-11
2 7.5	1.06	1.86	- 1	7.00	-12	2.37	-11
2 8.5	0.95	1.94	- 1	-5.37	-12	2.12	-11
2 9.5	0.98	2.22	- 1	-2.00	-12	2.08	-11
3 0.5	1.01	2.52	- 1	1.14	-12	2.02	-11
3 1.5	1.02	2.83	- 1	1.16	-12	1.95	-11
3 2.5	1.02	3.19	- 1	1.45	-12	1.89	-11

year 1983 month 9 day 3

time 20: 56

weather 6, Cu, ①

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 16.2

number of shots 50

$B 8.1 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.72	4.41	- 1	1.01	- 9	6.18	-10
1 3.5	1.66	4.28	- 1	8.21	-10	5.30	-10
1 4.5	1.59	4.10	- 1	6.39	-10	4.46	-10
1 5.5	1.64	4.26	- 1	5.98	-10	3.98	-10
1 6.5	2.95	7.65	- 1	1.55	- 9	6.08	-10
1 7.5	3.82	9.94	- 1	1.86	- 9	6.55	-10
1 8.5	4.42	1.16	0	1.91	- 9	6.46	-10
1 9.5	3.25	8.72	- 1	1.04	- 9	4.02	-10
2 0.5	3.21	8.77	- 1	8.47	-10	3.37	-10
2 1.5	2.60	7.38	- 1	5.20	-10	2.39	-10
2 2.5	2.45	7.22	- 1	4.01	-10	1.99	-10
2 3.5	1.81	5.80	- 1	1.91	-10	1.36	-10
2 4.5	1.72	5.85	- 1	1.46	-10	1.18	-10
2 5.5	1.62	5.92	- 1	1.06	-10	1.02	-10
2 6.5	1.43	5.85	- 1	6.27	-11	8.60	-11
2 7.5	0.93	4.80	- 1	-9.14	-12	6.03	-11
2 8.5	2.40	9.82	- 1	1.50	-10	1.05	-10
2 9.5	1.26	7.09	- 1	2.36	-11	6.52	-11
3 0.5	2.00	1.03	0	7.84	-11	8.14	-11
3 1.5							

year 1983 month 9 day 13

time 20: 30

weather 3, Sc, ①

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 15.7

number of shots 75

$B 3.9 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	0.91	9.95	- 2	-1.26	-10	1.37	-10
1 3.5	0.96	1.06	- 1	-5.41	-11	1.27	-10
1 4.5	1.06	1.18	- 1	6.31	-11	1.23	-10
1 5.5	1.61	1.78	- 1	5.49	-10	1.61	-10
1 6.5	1.81	2.03	- 1	6.17	-10	1.55	-10
1 7.5	2.72	3.05	- 1	1.12	- 9	1.97	-10
1 8.5	2.54	2.92	- 1	8.46	-10	1.60	-10
1 9.5	2.30	2.74	- 1	5.97	-10	1.25	-10
2 0.5	2.08	2.60	- 1	4.16	-10	9.97	-11
2 1.5	1.71	2.30	- 1	2.31	-10	7.48	-11
2 2.5	1.23	1.89	- 1	6.26	-11	5.23	-11
2 3.5	1.46	2.32	- 1	1.08	-10	5.43	-11
2 4.5	0.87	1.78	- 1	-2.51	-11	3.53	-11
2 5.5	0.84	1.91	- 1	-2.74	-11	3.26	-11
2 6.5	1.38	2.91	- 1	5.56	-11	4.22	-11
2 7.5	1.68	3.62	- 1	8.42	-11	4.49	-11
2 8.5	1.41	3.59	- 1	4.41	-11	3.83	-11
2 9.5	1.07	3.44	- 1	6.66	-12	3.14	-11
3 0.5	1.24	4.14	- 1	1.86	-11	3.24	-11
3 1.5	0.80	3.67	- 1	-1.36	-11	2.47	-11

year 1983 month 10 day 5
time 22: 03
weather 5, Ac, ⊕
tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 14.1
number of shots 50

$B 8.0 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$	$\beta_A [z]$	$\sigma [\beta_A(z)]$
1 2.5	1.78	2.68 - 1	1.06 - 9	3.64 -10
1 3.5	2.04	3.09 - 1	1.22 - 9	3.61 -10
1 4.5	1.87	2.85 - 1	8.92 -10	2.92 -10
1 5.5	2.55	3.92 - 1	1.35 - 9	3.39 -10
1 6.5	3.16	4.91 - 1	1.63 - 9	3.69 -10
1 7.5	4.23	6.68 - 1	2.06 - 9	4.25 -10
1 8.5	3.83	6.19 - 1	1.51 - 9	3.29 -10
1 9.5	3.44	5.70 - 1	1.10 - 9	2.56 -10
2 0.5	2.86	4.89 - 1	6.93 -10	1.82 -10
2 1.5	2.76	4.86 - 1	5.50 -10	1.51 -10
2 2.5	3.11	5.58 - 1	5.68 -10	1.50 -10
2 3.5	2.32	4.41 - 1	3.01 -10	1.01 -10
2 4.5	1.44	3.09 - 1	8.58 -11	6.04 -11
2 5.5	2.08	4.38 - 1	1.82 -10	7.38 -11
2 6.5	0.88	2.51 - 1	-1.66 -11	3.56 -11
2 7.5	1.37	3.66 - 1	4.55 -11	4.50 -11
2 8.5	1.23	3.70 - 1	2.41 -11	3.89 -11
2 9.5	1.72	5.05 - 1	6.45 -11	4.55 -11
3 0.5	0.77	3.39 - 1	-1.79 -11	2.62 -11
3 1.5	1.16	4.78 - 1	1.04 -11	3.16 -11
3 2.5	0.85	4.47 - 1	-8.58 -12	2.54 -11

year 1983 month 10 day 11
time 18: 26
weather 0⁺, Ac, ⊙
tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 16.7
number of shots 200

$B 9.2 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$	$\beta_A [z]$	$\sigma [\beta_A(z)]$
1 2.5	1.29	2.63 - 2	3.91 -10	3.36 -11
1 3.5	1.41	2.98 - 2	4.89 -10	3.35 -11
1 4.5	1.49	3.31 - 2	5.09 -10	3.27 -11
1 5.5	1.58	3.76 - 2	5.26 -10	3.24 -11
1 6.5	2.43	6.20 - 2	1.13 - 9	4.58 -11
1 7.5	4.31	1.31 - 1	2.14 - 9	8.05 -11
1 8.5	4.95	1.94 - 1	2.14 - 9	1.02 -10
1 9.5	4.89	2.35 - 1	1.76 - 9	1.04 -10
2 0.5	3.80	2.12 - 1	1.07 - 9	7.94 -11
2 1.5	2.93	1.80 - 1	6.10 -10	5.62 -11
2 2.5	1.91	1.30 - 1	2.48 -10	3.52 -11
2 3.5	1.99	1.42 - 1	2.27 -10	3.22 -11
2 4.5	1.62	1.27 - 1	1.21 -10	2.46 -11
2 5.5	1.62	1.35 - 1	1.03 -10	2.24 -11
2 6.5	1.45	1.34 - 1	6.42 -11	1.91 -11
2 7.5	1.50	1.48 - 1	6.05 -11	1.81 -11
2 8.5	1.40	1.53 - 1	4.31 -11	1.63 -11
2 9.5	1.80	2.01 - 1	7.13 -11	1.78 -11
3 0.5	1.59	2.02 - 1	4.50 -11	1.54 -11
3 1.5	1.35	2.03 - 1	2.29 -11	1.32 -11
3 2.5	1.25	2.16 - 1	1.42 -11	1.21 -11

year 1983 month 10 day 25time 17 : 11weather 3, Cu, ☉tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 11.9, 16.9number of shots 250B 4.6×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.42	422	- 2	5.41	-10	5.35	-11
1 3.5	1.81	556	- 2	9.00	-10	5.91	-11
1 4.5	1.78	5.76	- 2	7.45	-10	5.33	-11
1 5.5	1.91	6.57	- 2	7.55	-10	5.27	-11
1 6.5	2.59	9.53	- 2	1.14	- 9	6.58	-11
1 7.5	2.28	9.33	- 2	7.73	-10	5.50	-11
1 8.5	2.73	1.20	- 1	8.78	-10	5.97	-11
1 9.5	2.18	1.07	- 1	5.16	-10	4.59	-11
2 0.5	1.89	1.02	- 1	3.22	-10	3.65	-11
2 1.5	2.65	1.45	- 1	5.12	-10	4.44	-11
2 2.5	2.39	1.44	- 1	3.68	-10	3.78	-11
2 3.5	2.23	1.48	- 1	2.73	-10	3.27	-11
2 4.5	1.52	1.21	- 1	1.00	-10	2.33	-11
2 5.5	1.69	1.42	- 1	1.14	-10	2.34	-11
2 6.5	1.32	1.34	- 1	4.46	-11	1.88	-11
2 7.5	1.69	1.73	- 1	8.39	-11	2.08	-11
2 8.5	1.29	1.63	- 1	3.01	-11	1.68	-11
2 9.5	1.18	1.74	- 1	1.56	-11	1.53	-11
3 0.5	1.55	2.25	- 1	4.17	-11	1.70	-11
3 1.5	1.45	2.43	- 1	2.88	-11	1.57	-11
3 2.5	1.48	2.76	- 1	2.64	-11	1.53	-11

year 1983 month 11 day 11time 17 : 21weather 7, Cu, ☉tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 8.7, 15.2number of shots 100B 3.9×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	0.90	6.76	- 2	-1.30	-10	8.51	-11
1 3.5	1.08	8.21	- 2	8.77	-11	9.09	-11
1 4.5	1.48	1.13	- 1	4.67	-10	1.09	-10
1 5.5	1.96	1.50	- 1	7.94	-10	1.24	-10
1 6.5	2.38	1.85	- 1	9.60	-10	1.28	-10
1 7.5	3.10	2.46	- 1	1.25	- 9	1.45	-10
1 8.5	2.61	2.20	- 1	8.27	-10	1.12	-10
1 9.5	2.32	2.08	- 1	5.76	-10	9.06	-11
2 0.5	2.07	2.03	- 1	3.90	-10	7.36	-11
2 1.5	1.28	1.52	- 1	8.71	-11	4.72	-11
2 2.5	1.12	1.54	- 1	3.27	-11	4.06	-11
2 3.5	1.43	1.99	- 1	9.66	-11	4.46	-11
2 4.5	1.17	1.94	- 1	3.22	-11	3.72	-11
2 5.5	1.03	2.02	- 1	5.62	-12	3.30	-11
2 6.5	1.19	2.47	- 1	2.69	-11	3.45	-11
2 7.5	1.38	3.01	- 1	4.53	-11	3.58	-11
2 8.5	1.26	3.21	- 1	2.67	-11	3.26	-11
2 9.5	1.46	3.93	- 1	4.01	-11	3.43	-11
3 0.5	0.74	3.08	- 1	-1.94	-11	2.30	-11
3 1.5	1.27	4.60	- 1	1.74	-11	2.95	-11

year 1983 month 11 day 24

time 18: 01

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 15.0

number of shots 93

$B 6.4 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$	$\beta_A [z]$	$\sigma [\beta_A(z)]$
1 2.5	0.93	1.17 - 1	-8.95 -11	1.51 -10
1 3.5	1.06	1.33 - 1	6.37 -11	1.51 -10
1 4.5	1.32	1.67 - 1	3.17 -10	1.65 -10
1 5.5	1.99	2.50 - 1	8.41 -10	2.13 -10
1 6.5	2.60	3.30 - 1	1.15 - 9	2.36 -10
1 7.5	3.32	4.25 - 1	1.40 - 9	2.56 -10
1 8.5	3.36	4.37 - 1	1.22 - 9	2.25 -10
1 9.5	3.10	4.14 - 1	9.11 -10	1.79 -10
2 0.5	1.97	2.82 - 1	3.52 -10	1.02 -10
2 1.5	2.31	3.36 - 1	3.97 -10	1.02 -10
2 2.5	2.56	3.84 - 1	4.04 -10	9.95 -11
2 3.5	2.81	4.36 - 1	3.96 -10	9.53 -11
2 4.5	2.39	4.02 - 1	2.64 -10	7.61 -11
2 5.5	1.95	3.65 - 1	1.55 -10	5.99 -11
2 6.5	1.38	3.12 - 1	5.35 -11	4.40 -11
2 7.5	2.38	4.90 - 1	1.69 -10	5.97 -11
2 8.5	1.50	3.95 - 1	5.20 -11	4.11 -11
2 9.5	1.76	4.84 - 1	6.77 -11	4.32 -11
3 0.5	1.18	4.22 - 1	1.38 -11	3.24 -11
3 1.5	1.18	4.73 - 1	1.20 -11	3.11 -11

year 1983 month 12 day 1

time 18: 08

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 94, 16.2

number of shots 120

$B 2.7 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$	$\beta_A [z]$	$\sigma [\beta_A(z)]$
1 2.5	1.11	7.85 - 2	1.29 -10	9.63 -11
1 3.5	1.05	7.55 - 2	4.69 -11	8.06 -11
1 4.5	1.00	7.41 - 2	2.83 -12	6.89 -11
1 5.5	1.15	8.59 - 2	1.20 -10	6.99 -11
1 6.5	1.88	1.39 - 1	6.17 -10	9.73 -11
1 7.5	2.47	1.85 - 1	8.73 -10	1.09 -10
1 8.5	2.11	1.67 - 1	5.47 -10	8.17 -11
1 9.5	2.06	1.71 - 1	4.45 -10	7.14 -11
2 0.5	1.69	1.53 - 1	2.51 -10	5.57 -11
2 1.5	1.35	1.38 - 1	1.07 -10	4.25 -11
2 2.5	1.19	1.40 - 1	4.96 -11	3.58 -11
2 3.5	1.17	1.51 - 1	3.60 -11	3.30 -11
2 4.5	1.12	1.65 - 1	2.15 -11	2.99 -11
2 5.5	0.85	1.56 - 1	-2.33 -11	2.43 -11
2 6.5	0.87	1.78 - 1	-1.77 -11	2.38 -11
2 7.5	1.08	2.26 - 1	9.55 -12	2.58 -11
2 8.5	1.29	2.78 - 1	2.80 -11	2.72 -11
2 9.5	0.98	2.71 - 1	-1.53 -12	2.29 -11
3 0.5	1.42	3.69 - 1	3.04 -11	2.67 -11
3 1.5	1.14	3.70 - 1	8.87 -12	2.30 -11
3 2.5	1.32	4.48 - 1	1.69 11	2.40 -11

year 1983 month 12 day 9

time 17: 08

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 109, 132

number of shots 300

 $B 4.2 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	184	142	- 1	1.04	- 9	1.74	-10
1 3.5	232	181	- 1	1.41	- 9	1.92	-10
1 4.5	238	190	- 1	1.27	- 9	1.73	-10
1 5.5	246	202	- 1	1.15	- 9	1.59	-10
1 6.5	276	234	- 1	1.19	- 9	1.57	-10
1 7.5	312	274	- 1	1.23	- 9	1.59	-10
1 8.5	325	297	- 1	1.12	- 9	1.48	-10
1 9.5	225	220	- 1	5.20	-10	9.14	-11
2 0.5	176	185	- 1	2.68	-10	6.50	-11
2 1.5	129	150	- 1	8.71	-11	4.51	-11
2 2.5	131	162	- 1	7.82	-11	4.16	-11
2 3.5	151	194	- 1	1.11	-10	4.25	-11
2 4.5	141	199	- 1	7.61	-11	3.73	-11
2 5.5	105	178	- 1	7.48	-12	2.86	-11
2 6.5	110	203	- 1	1.41	-11	2.80	-11
2 7.5	121	238	- 1	2.48	-11	2.80	-11
2 8.5	132	277	- 1	3.23	-11	2.80	-11
2 9.5	105	272	- 1	4.28	-12	2.36	-11
3 0.5	109	309	- 1	6.95	-12	2.30	-11
3 1.5	121	366	- 1	1.32	-11	2.34	-11

year 1983 month 12 day 19

time 17: 36

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 100, 158

number of shots 150

 $B 4.5 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	131	260	- 1	3.63	-10	3.04	-10
1 3.5	158	315	- 1	5.97	-10	3.23	-10
1 4.5	197	392	- 1	8.68	-10	3.52	-10
1 5.5	249	498	- 1	1.17	- 9	3.89	-10
1 6.5	297	597	- 1	1.31	- 9	3.97	-10
1 7.5	336	680	- 1	1.36	- 9	3.93	-10
1 8.5	280	577	- 1	8.84	-10	2.83	-10
1 9.5	195	414	- 1	4.03	-10	1.75	-10
2 0.5	167	365	- 1	2.42	-10	1.33	-10
2 1.5	162	366	- 1	1.88	-10	1.11	-10
2 2.5	150	357	- 1	1.27	-10	9.09	-11
2 3.5	131	334	- 1	6.90	-11	7.37	-11
2 4.5	162	418	- 1	1.15	-10	7.77	-11
2 5.5	196	515	- 1	1.52	-10	8.17	-11
2 6.5	183	520	- 1	1.14	-10	7.14	-11
2 7.5	200	594	- 1	1.17	-10	6.97	-11
2 8.5	159	545	- 1	5.96	-11	5.50	-11
2 9.5	064	346	- 1	-3.10	-11	2.99	-11
3 0.5	122	554	- 1	1.62	-11	4.12	-11
3 1.5	183	784	- 1	5.29	-11	5.00	-11
3 2.5	100	614	- 1	1.75	-13	3.37	-11

year 1983 month 12 day 26

time 17 : 18

weather 0, -, ○

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 8.5, 21.4

number of shots 191

$B 3.3 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	159	1.30	- 1	6.85	-10	1.51	-10
1 3.5	177	1.47	- 1	7.75	-10	1.47	-10
1 4.5	199	1.67	- 1	8.64	-10	1.45	-10
1 5.5	206	1.77	- 1	8.00	-10	1.32	-10
1 6.5	207	1.83	- 1	6.88	-10	1.16	-10
1 7.5	225	2.03	- 1	6.87	-10	1.11	-10
1 8.5	226	2.11	- 1	5.99	-10	9.97	-11
1 9.5	252	2.41	- 1	6.08	-10	9.65	-11
2 0.5	277	2.75	- 1	6.12	-10	9.46	-11
2 1.5	220	2.34	- 1	3.61	-10	7.03	-11
2 2.5	127	1.62	- 1	6.80	-11	4.12	-11
2 3.5	105	1.52	- 1	1.02	-11	3.34	-11
2 4.5	0.98	1.60	- 1	-3.29	-12	2.98	-11
2 5.5	1.16	1.95	- 1	2.55	-11	3.13	-11
2 6.5	0.85	1.80	- 1	-2.05	-11	2.46	-11
2 7.5	1.10	2.33	- 1	1.15	-11	2.73	-11
2 8.5	0.99	2.45	- 1	-7.17	-13	2.45	-11
2 9.5	0.96	2.70	- 1	-3.60	-12	2.33	-11
3 0.5	1.56	3.93	- 1	4.14	-11	2.91	-11
3 1.5							

year 1984 month 1 day 6

time 17 : 26

weather 4, Ci, ⊙

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 8.6

number of shots 110

$B 2.7 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	199	2.00	- 1	1.18	- 9	2.36	-10
1 3.5	241	2.44	- 1	1.43	- 9	2.48	-10
1 4.5	266	2.74	- 1	1.45	- 9	2.39	-10
1 5.5	248	2.62	- 1	1.10	- 9	1.95	-10
1 6.5	208	2.27	- 1	6.92	-10	1.45	-10
1 7.5	212	2.38	- 1	6.11	-10	1.30	-10
1 8.5	239	2.75	- 1	6.51	-10	1.28	-10
1 9.5	240	2.85	- 1	5.66	-10	1.15	-10
2 0.5	1.61	2.09	- 1	2.08	-10	7.11	-11
2 1.5	1.24	1.78	- 1	7.05	-11	5.20	-11
2 2.5	1.06	1.70	- 1	1.42	-11	4.24	-11
2 3.5	1.31	2.14	- 1	6.59	-11	4.59	-11
2 4.5	1.36	2.38	- 1	6.52	-11	4.36	-11
2 5.5	0.96	2.06	- 1	-6.86	-12	3.29	-11
2 6.5	0.87	2.17	- 1	-1.76	-11	2.96	-11
2 7.5	0.90	2.47	- 1	-1.13	-11	2.88	-11
2 8.5	1.09	3.05	- 1	8.98	-12	3.06	-11
2 9.5	1.34	3.86	- 1	2.88	-11	3.31	-11
3 0.5	1.82	5.09	- 1	6.00	-11	3.74	-11
3 1.5	0.94	3.96	- 1	-4.06	-12	2.49	-11

year 1984 month 1 day 12

time 20 : 01

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 8.8, 14.9

number of shots 190

$B 2.9 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.40	133	- 1	4.75	-10	1.59	-10
1 3.5	1.62	155	- 1	6.46	-10	1.62	-10
1 4.5	2.03	196	- 1	9.33	-10	1.77	-10
1 5.5	2.36	230	- 1	1.05	- 9	1.77	-10
1 6.5	2.60	258	- 1	1.06	- 9	1.70	-10
1 7.5	2.37	2.41	- 1	7.73	-10	1.35	-10
1 8.5	2.11	2.21	- 1	5.35	-10	1.06	-10
1 9.5	1.86	2.01	- 1	3.57	-10	8.30	-11
2 0.5	1.53	1.73	- 1	1.88	-10	6.16	-11
2 1.5	1.46	1.73	- 1	1.39	-10	5.20	-11
2 2.5	1.28	1.63	- 1	7.09	-11	4.20	-11
2 3.5	1.37	1.84	- 1	7.98	-11	3.95	-11
2 4.5	1.22	1.80	- 1	4.04	-11	3.32	-11
2 5.5	1.54	2.30	- 1	8.55	-11	3.62	-11
2 6.5	0.85	1.68	- 1	-2.01	-11	2.29	-11
2 7.5	0.95	1.98	- 1	-6.04	-12	2.30	-11
2 8.5	1.46	2.85	- 1	4.61	-11	2.85	-11
2 9.5	1.28	2.91	- 1	2.39	-11	2.49	-11
3 0.5	1.08	2.92	- 1	5.98	-12	2.14	-11
3 1.5	1.13	3.34	- 1	8.32	-12	2.10	-11
3 2.5	1.12	3.72	- 1	6.42	-12	2.00	-11

year 1984 month 1 day 26

time 17 : 32

weather 4, Ac, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 8.5, 14.4

number of shots 340

$B 3.1 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.70	155	- 1	8.37	-10	1.85	-10
1 3.5	1.78	1.64	- 1	8.10	-10	1.70	-10
1 4.5	1.86	1.73	- 1	7.80	-10	1.56	-10
1 5.5	2.42	2.28	- 1	1.08	- 9	1.73	-10
1 6.5	2.54	2.44	- 1	1.00	- 9	1.58	-10
1 7.5	2.63	2.57	- 1	9.23	-10	1.45	-10
1 8.5	2.21	2.22	- 1	5.88	-10	1.07	-10
1 9.5	1.79	1.85	- 1	3.32	-10	7.74	-11
2 0.5	1.73	1.84	- 1	2.54	-10	6.41	-11
2 1.5	1.54	1.71	- 1	1.62	-10	5.08	-11
2 2.5	1.38	1.61	- 1	9.78	-11	4.11	-11
2 3.5	1.49	1.80	- 1	1.06	-10	3.87	-11
2 4.5	1.30	1.68	- 1	5.64	-11	3.18	-11
2 5.5	1.31	1.81	- 1	4.85	-11	2.85	-11
2 6.5	1.18	1.80	- 1	2.48	-11	2.46	-11
2 7.5	1.09	1.86	- 1	1.08	-11	2.14	-11
2 8.5	0.86	1.73	- 1	-1.37	-11	1.74	-11
2 9.5	1.17	2.32	- 1	1.45	-11	1.99	-11
3 0.5	1.00	2.32	- 1	1.65	-13	1.71	-11
3 1.5							

year 1984 month 2 day 19
 time 18: 16
 weather 6, Ac, Ci
 tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 9.3, 13.0, 15.4
 number of shots 144

$B 4.2 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	167	266	- 1	7.92	-10	3.16	-10
1 3.5	173	277	- 1	7.47	-10	2.85	-10
1 4.5	175	282	- 1	6.67	-10	2.52	-10
1 5.5	212	345	- 1	8.71	-10	2.68	-10
1 6.5	289	474	- 1	1.26	- 9	3.14	-10
1 7.5	262	437	- 1	9.29	-10	2.51	-10
1 8.5	230	394	- 1	6.43	-10	1.94	-10
1 9.5	281	486	- 1	7.45	-10	2.00	-10
2 0.5	158	297	- 1	2.01	-10	1.04	-10
2 1.5	267	491	- 1	4.98	-10	1.46	-10
2 2.5	154	322	- 1	1.37	-10	8.21	-11
2 3.5	188	398	- 1	1.93	-10	8.77	-11
2 4.5	148	353	- 1	8.97	-11	6.65	-11
2 5.5	112	314	- 1	1.85	-11	5.06	-11
2 6.5	101	326	- 1	1.37	-12	4.48	-11
2 7.5	132	425	- 1	3.72	-11	4.97	-11
2 8.5	0.90	3.72	- 1	-9.91	-12	3.78	-11
2 9.5	1.52	5.66	- 1	4.55	-11	4.92	-11
3 0.5	0.65	3.87	- 1	-2.64	-11	2.88	-11
3 1.5							

year 1984 month 2 day 27
 time 18: 00
 weather 0, -, O
 tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 6.3, 17.0
 number of shots 65

$B 2.2 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	136	2.11	- 1	4.15	-10	2.43	-10
1 3.5	140	2.21	- 1	4.00	-10	2.19	-10
1 4.5	162	2.57	- 1	5.25	-10	2.19	-10
1 5.5	178	2.87	- 1	5.88	-10	2.16	-10
1 6.5	182	3.02	- 1	5.52	-10	2.03	-10
1 7.5	2.29	3.85	- 1	7.49	-10	2.22	-10
1 8.5	1.88	3.36	- 1	4.31	-10	1.65	-10
1 9.5	1.62	3.15	- 1	2.54	-10	1.29	-10
2 0.5	1.46	3.11	- 1	1.60	-10	1.09	-10
2 1.5	1.18	2.88	- 1	5.36	-11	8.69	-11
2 2.5	1.31	3.42	- 1	7.94	-11	8.83	-11
2 3.5	0.94	3.08	- 1	-1.24	-11	6.77	-11
2 4.5	0.72	2.93	- 1	-5.27	-11	5.53	-11
2 5.5	1.21	4.42	- 1	3.35	-11	7.16	-11
2 6.5	0.89	4.18	- 1	-1.59	-11	5.81	-11
2 7.5	0.92	4.82	- 1	-9.26	-12	5.70	-11
2 8.5	1.78	7.76	- 1	7.93	-11	7.86	-11
2 9.5	1.56	8.15	- 1	4.86	-11	7.07	-11
3 0.5	0.50	5.01	- 1	-3.75	-11	3.72	-11
3 1.5							

year 1984 month 4 day 14
time 19: 05
weather 3, Ac, ⊕
tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 10.6, 16.0
number of shots 361

B 1.9×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	193	2.01	- 1	1.14	- 9	2.45	-10
1 3.5	193	2.03	- 1	9.84	-10	2.13	-10
1 4.5	186	1.97	- 1	7.85	-10	1.79	-10
1 5.5	179	1.92	- 1	6.25	-10	1.51	-10
1 6.5	182	1.97	- 1	5.58	-10	1.34	-10
1 7.5	200	2.20	- 1	5.86	-10	1.28	-10
1 8.5	160	1.80	- 1	3.00	-10	8.90	-11
1 9.5	130	1.49	- 1	1.24	-10	6.18	-11
2 0.5	140	1.63	- 1	1.40	-10	5.78	-11
2 1.5	122	1.47	- 1	6.57	-11	4.45	-11
2 2.5	129	1.60	- 1	7.41	-11	4.13	-11
2 3.5	149	1.89	- 1	1.07	-10	4.14	-11
2 4.5	125	1.70	- 1	4.70	-11	3.20	-11
2 5.5	129	1.83	- 1	4.61	-11	2.95	-11
2 6.5	124	1.89	- 1	3.31	-11	2.61	-11
2 7.5	134	2.14	- 1	3.96	-11	2.52	-11
2 8.5	0.87	1.72	- 1	-1.29	-11	1.74	-11
2 9.5	1.58	2.81	- 1	4.99	-11	2.42	-11
3 0.5	1.14	2.46	- 1	1.03	-11	1.82	-11
3 1.5							

year 1984 month 7 day 3
time 21: 15
weather 0, -, ⊙
tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 15.0
number of shots 70

B 3.0×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.77	1.95	- 1	1.06	- 9	2.69	-10
1 3.5	1.18	1.32	- 1	2.21	-10	1.62	-10
1 4.5	3.97	4.41	- 1	3.22	- 9	4.76	-10
1 5.5	1.25	1.45	- 1	2.62	-10	1.49	-10
1 6.5	1.58	1.84	- 1	4.59	-10	1.45	-10
1 7.5	1.97	2.32	- 1	6.46	-10	1.54	-10
1 8.5	2.28	2.72	- 1	7.12	-10	1.52	-10
1 9.5	1.91	2.36	- 1	4.19	-10	1.09	-10
2 0.5	1.92	2.46	- 1	3.54	-10	9.46	-11
2 1.5	1.52	2.08	- 1	1.71	-10	6.77	-11
2 2.5	1.74	2.45	- 1	2.02	-10	6.71	-11
2 3.5	1.23	1.96	- 1	5.25	-11	4.55	-11
2 4.5	1.46	2.39	- 1	9.02	-11	4.72	-11
2 5.5	1.20	2.23	- 1	3.32	-11	3.78	-11
2 6.5	1.39	2.70	- 1	5.56	-11	3.89	-11
2 7.5	0.79	2.08	- 1	-2.55	-11	2.56	-11
2 8.5	1.31	3.12	- 1	3.20	-11	3.28	-11
2 9.5	0.97	2.92	- 1	-2.77	-12	2.62	-11
3 0.5	1.80	4.62	- 1	6.13	-11	3.57	-11
3 1.5							

year 1984 month 7 day 30

time 20 : 42

weather 5, Sc. ①

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 15.1

number of shots 50

$B 3.6 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.27	2.55	- 1	3.71	-10	3.56	-10
1 3.5	1.36	2.76	- 1	4.45	-10	3.39	-10
1 4.5	1.39	2.82	- 1	4.13	-10	3.02	-10
1 5.5	1.45	2.96	- 1	4.11	-10	2.72	-10
1 6.5	1.81	3.71	- 1	6.35	-10	2.93	-10
1 7.5	2.04	4.23	- 1	6.84	-10	2.79	-10
1 8.5	2.24	4.69	- 1	6.88	-10	2.61	-10
1 9.5	1.83	3.95	- 1	3.82	-10	1.83	-10
2 0.5	1.86	4.13	- 1	3.37	-10	1.61	-10
2 1.5	1.74	4.00	- 1	2.44	-10	1.33	-10
2 2.5	1.91	4.54	- 1	2.57	-10	1.28	-10
2 3.5	1.37	3.62	- 1	8.85	-11	8.66	-11
2 4.5	1.80	4.76	- 1	1.63	-10	9.71	-11
2 5.5	1.54	4.53	- 1	9.39	-11	7.82	-11
2 6.5	1.59	5.00	- 1	8.63	-11	7.36	-11
2 7.5	1.96	6.28	- 1	1.19	-10	7.83	-11
2 8.5	2.56	8.21	- 1	1.64	-10	8.65	-11
2 9.5	0.63	3.84	- 1	-3.35	-11	3.47	-11
3 0.5	1.06	5.72	- 1	4.77	-12	4.44	-11
3 1.5							

year 1984 month 8 day 17

time 19 : 00

weather 0, -, ①

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 15.9

number of shots 50

$B 2.1 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.00	9.31	- 2	2.71	-12	1.31	-10
1 3.5	1.04	9.78	- 2	5.35	-11	1.20	-10
1 4.5	0.83	7.95	- 2	-1.83	-10	8.51	-11
1 5.5	1.20	1.15	- 1	1.89	-10	1.07	-10
1 6.5	1.35	1.31	- 1	2.79	-10	1.04	-10
1 7.5	1.80	1.75	- 1	5.34	-10	1.17	-10
1 8.5	1.82	1.83	- 1	4.61	-10	1.02	-10
1 9.5	1.54	1.63	- 1	2.50	-10	7.58	-11
2 0.5	1.54	1.71	- 1	2.15	-10	6.77	-11
2 1.5	1.33	1.61	- 1	1.11	-10	5.37	-11
2 2.5	1.18	1.59	- 1	4.91	-11	4.45	-11
2 3.5	1.35	1.89	- 1	8.23	-11	4.51	-11
2 4.5	1.18	1.89	- 1	3.69	-11	3.83	-11
2 5.5	1.20	2.10	- 1	3.45	-11	3.64	-11
2 6.5	1.45	2.63	- 1	6.69	-11	3.88	-11
2 7.5	1.34	2.76	- 1	4.23	-11	3.49	-11
2 8.5	1.31	3.03	- 1	3.29	-11	3.27	-11
2 9.5	1.71	3.97	- 1	6.58	-11	3.67	-11
3 0.5	1.28	3.74	- 1	2.23	-11	2.98	-11
3 1.5	1.14	3.95	- 1	9.73	-12	2.69	-11

year 1984 month 8 day 31

time 21: 33

weather 5, Cu, O

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 14.9

number of shots 170

$B 2.0 \times 10^{-4}$

year 1984 month 9 day 22

time 19: 50

weather 1, Ci, O

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 10.6, 16.1

number of shots 200

$B 1.1 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	0.98	7.17	- 2	-2.24	-11	9.94	-11
1 3.5	1.06	7.76	- 2	7.33	-11	9.43	-11
1 4.5	1.04	7.64	- 2	3.99	-11	8.23	-11
1 5.5	1.11	8.26	- 2	1.05	-10	7.67	-11
1 6.5	1.31	9.80	- 2	2.45	-10	7.68	-11
1 7.5	1.64	1.23	- 1	4.17	-10	8.01	-11
1 8.5	1.71	1.31	- 1	3.87	-10	7.07	-11
1 9.5	1.47	1.17	- 1	2.16	-10	5.29	-11
2 0.5	1.69	1.36	- 1	2.64	-10	5.19	-11
2 1.5	1.53	1.29	- 1	1.73	-10	4.19	-11
2 2.5	1.41	1.26	- 1	1.13	-10	3.50	-11
2 3.5	1.39	1.32	- 1	9.20	-11	3.12	-11
2 4.5	1.35	1.38	- 1	7.10	-11	2.76	-11
2 5.5	1.33	1.46	- 1	5.67	-11	2.50	-11
2 6.5	1.32	1.58	- 1	4.65	-11	2.30	-11
2 7.5	1.16	1.60	- 1	2.01	-11	1.96	-11
2 8.5	1.44	2.00	- 1	4.59	-11	2.11	-11
2 9.5	1.14	1.93	- 1	1.26	-11	1.74	-11
3 0.5	1.24	2.23	- 1	1.88	-11	1.73	-11
3 1.5	0.99	2.20	- 1	-3.46	-13	1.46	-11
3 2.5	0.94	2.39	- 1	-3.27	-12	1.37	-11

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.08	4.94	- 2	1.02	-10	6.45	-11
1 3.5	1.07	4.98	- 2	7.69	-11	5.71	-11
1 4.5	1.08	5.14	- 2	7.86	-11	5.13	-11
1 5.5	1.28	6.18	- 2	2.43	-10	5.31	-11
1 6.5	1.44	7.13	- 2	3.24	-10	5.21	-11
1 7.5	1.61	8.24	- 2	3.86	-10	5.13	-11
1 8.5	1.67	8.96	- 2	3.55	-10	4.67	-11
1 9.5	1.58	9.03	- 2	2.56	-10	3.98	-11
2 0.5	1.22	8.00	- 2	8.19	-11	3.01	-11
2 1.5	1.18	8.54	- 2	5.84	-11	2.71	-11
2 2.5	1.16	9.38	- 2	4.33	-11	2.51	-11
2 3.5	1.01	9.54	- 2	2.90	-12	2.18	-11
2 4.5	1.00	1.06	- 1	7.96	-13	2.07	-11
2 5.5	0.96	1.15	- 1	-7.54	-12	1.94	-11
2 6.5	0.92	1.28	- 1	-1.18	-11	1.84	-11
2 7.5	1.01	1.52	- 1	1.36	-12	1.87	-11
2 8.5	1.07	1.77	- 1	7.73	-12	1.86	-11
2 9.5	1.00	1.94	- 1	-1.45	-13	1.75	-11
3 0.5	0.92	2.10	- 1	-6.09	-12	1.62	-11
3 1.5	1.19	2.71	- 1	1.24	-11	1.79	-11
3 2.5	1.02	2.87	- 1	1.27	-12	1.63	-11

year 1984 month 9 day 28

time 18: 20

weather 0, -, O

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 16.4

number of shots 450

B 1.5×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.05	2.84	- 2	6.68	-11	3.83	-11
1 3.5	1.09	2.99	- 2	1.04	-10	3.53	-11
1 4.5	1.12	3.15	- 2	1.28	-10	3.23	-11
1 5.5	1.24	3.55	- 2	2.19	-10	3.12	-11
1 6.5	1.41	4.13	- 2	3.15	-10	3.11	-11
1 7.5	1.68	5.08	- 2	4.41	-10	3.18	-11
1 8.5	1.67	5.35	- 2	3.60	-10	2.80	-11
1 9.5	1.57	5.44	- 2	2.56	-10	2.38	-11
2 0.5	1.41	5.38	- 2	1.53	-10	2.00	-11
2 1.5	1.37	5.70	- 2	1.17	-10	1.81	-11
2 2.5	1.02	5.16	- 2	4.78	-12	1.40	-11
2 3.5	1.07	5.92	- 2	1.67	-11	1.36	-11
2 4.5	1.01	6.35	- 2	1.08	-12	1.25	-11
2 5.5	0.98	7.01	- 2	-4.18	-12	1.17	-11
2 6.5	0.93	7.76	- 2	-9.34	-12	1.11	-11
2 7.5	1.04	9.22	- 2	4.35	-12	1.14	-11
2 8.5	1.00	1.02	- 1	-1.13	-13	1.08	-11
2 9.5	1.19	1.28	- 1	1.74	-11	1.16	-11
3 0.5	1.13	1.41	- 1	9.80	-12	1.09	-11
3 1.5	1.11	1.60	- 1	7.05	-12	1.06	-11
3 2.5	1.17	1.88	- 1	9.85	-12	1.07	-11

year 1984 month 10 day 15

time 18: 39

weather 4, Sc, Ci

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 14.1

number of shots 181

B 1.66×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.10	1.04	- 1	1.29	-10	1.36	-10
1 3.5	1.12	1.06	- 1	1.31	-10	1.21	-10
1 4.5	1.20	1.16	- 1	2.00	-10	1.14	-10
1 5.5	1.39	1.35	- 1	3.29	-10	1.14	-10
1 6.5	1.40	1.39	- 1	2.91	-10	1.01	-10
1 7.5	1.66	1.68	- 1	4.00	-10	1.02	-10
1 8.5	1.64	1.72	- 1	3.33	-10	8.87	-11
1 9.5	1.66	1.80	- 1	2.91	-10	7.92	-11
2 0.5	1.12	1.38	- 1	4.27	-11	5.10	-11
2 1.5	1.53	1.88	- 1	1.67	-10	5.91	-11
2 2.5	1.15	1.64	- 1	3.92	-11	4.43	-11
2 3.5	1.60	2.25	- 1	1.37	-10	5.16	-11
2 4.5	1.16	1.99	- 1	3.16	-11	3.88	-11
2 5.5	1.10	2.14	- 1	1.64	-11	3.54	-11
2 6.5	0.80	2.02	- 1	-2.81	-11	2.84	-11
2 7.5	1.31	2.97	- 1	3.70	-11	3.58	-11
2 8.5	1.00	2.88	- 1	-4.25	-13	2.97	-11
2 9.5	0.85	3.06	- 1	-1.29	-11	2.70	-11
3 0.5	1.43	4.45	- 1	3.24	-11	3.36	-11
3 1.5	1.70	5.51	- 1	4.50	-11	3.56	-11
3 2.5	0.84	4.59	- 1	-8.85	-12	2.54	-11

year 1984 month 10 day 30

time 18 : 09

weather 0, -, ○

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 158

number of shots 207

$B 1.7 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.21	8.28	- 2	2.57	-10	1.02	-10
1 3.5	1.27	8.75	- 2	2.94	-10	9.55	-11
1 4.5	1.34	9.32	- 2	3.29	-10	8.93	-11
1 5.5	1.49	1.05	- 1	4.14	-10	8.73	-11
1 6.5	1.77	1.25	- 1	5.54	-10	8.94	-11
1 7.5	1.87	1.35	- 1	5.27	-10	8.10	-11
1 8.5	1.69	1.25	- 1	3.64	-10	6.53	-11
1 9.5	1.49	1.14	- 1	2.08	-10	4.87	-11
2 0.5	1.27	1.03	- 1	9.83	-11	3.80	-11
2 1.5	1.20	1.03	- 1	6.26	-11	3.19	-11
2 2.5	1.32	1.18	- 1	8.34	-11	3.09	-11
2 3.5	1.22	1.18	- 1	4.91	-11	2.61	-11
2 4.5	1.10	1.17	- 1	1.85	-11	2.24	-11
2 5.5	1.10	1.27	- 1	1.70	-11	2.09	-11
2 6.5	0.91	1.24	- 1	-1.25	-11	1.73	-11
2 7.5	1.15	1.57	- 1	1.77	-11	1.89	-11
2 8.5	1.26	1.83	- 1	2.61	-11	1.87	-11
2 9.5	1.00	1.79	- 1	-3.09	-14	1.57	-11
3 0.5	0.96	1.94	- 1	-2.97	-12	1.45	-11
3 1.5							

year 1984 month 11 day 7

time 17 : 27

weather 0, -, ○

tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 165

number of shots 450

$B 1.6 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.17	9.72	- 2	2.25	-10	1.27	-10
1 3.5	1.16	9.66	- 2	1.83	-10	1.10	-10
1 4.5	1.16	9.69	- 2	1.58	-10	9.65	-11
1 5.5	1.25	1.05	- 1	2.18	-10	9.07	-11
1 6.5	1.43	1.21	- 1	3.20	-10	9.00	-11
1 7.5	1.72	1.47	- 1	4.55	-10	9.19	-11
1 8.5	1.60	1.38	- 1	3.14	-10	7.24	-11
1 9.5	1.43	1.27	- 1	1.93	-10	5.63	-11
2 0.5	1.16	1.07	- 1	5.85	-11	4.00	-11
2 1.5	1.25	1.18	- 1	8.07	-11	3.75	-11
2 2.5	1.30	1.28	- 1	8.02	-11	3.39	-11
2 3.5	1.31	1.35	- 1	6.97	-11	3.00	-11
2 4.5	1.27	1.39	- 1	5.08	-11	2.62	-11
2 5.5	1.43	1.62	- 1	6.94	-11	2.63	-11
2 6.5	1.12	1.47	- 1	1.62	-11	2.04	-11
2 7.5	1.40	1.87	- 1	4.82	-11	2.22	-11
2 8.5	1.11	1.76	- 1	1.12	-11	1.80	-11
2 9.5	0.92	1.79	- 1	-7.11	-12	1.57	-11
3 0.5	0.87	1.97	- 1	-9.80	-12	1.48	-11
3 1.5							

year 1984 month 12 day 13
time 19 : 10
weather 10, Ac, ☉
tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 9.9, 15.9
number of shots 50

$B 2.3 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5	1.30	3.37	- 1	2.88	-10	3.22	-10
1 5.5	1.45	3.79	- 1	3.71	-10	3.12	-10
1 6.5	1.71	4.51	- 1	5.06	-10	3.20	-10
1 7.5	1.62	4.36	- 1	3.68	-10	2.61	-10
1 8.5	1.75	4.81	- 1	3.83	-10	2.45	-10
1 9.5	1.82	5.12	- 1	3.50	-10	2.19	-10
2 0.5	1.71	5.03	- 1	2.58	-10	1.84	-10
2 1.5	0.94	3.25	- 1	-2.01	-11	1.02	-10
2 2.5	1.95	6.19	- 1	2.50	-10	1.64	-10
2 3.5	1.91	6.48	- 1	2.05	-10	1.46	-10
2 4.5	1.50	5.84	- 1	9.60	-11	1.12	-10
2 5.5	0.47	3.21	- 1	-8.72	-11	5.25	-11
2 6.5	1.07	5.73	- 1	9.20	-12	7.98	-11
2 7.5	1.10	6.52	- 1	1.13	-11	7.76	-11
2 8.5	1.41	8.38	- 1	4.16	-11	8.56	-11
2 9.5	1.36	9.33	- 1	3.14	-11	8.17	-11
3 0.5	1.11	9.52	- 1	7.89	-12	7.17	-11
3 1.5							

year 1984 month 12 day 26
time 17 : 16
weather 2, Ac, ☉
tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 10.9, 14.3, 21.1
number of shots 108

$B 2.3 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.43	1.69	- 1	5.32	-10	2.07	-10
1 3.5	1.52	1.80	- 1	5.49	-10	1.91	-10
1 4.5	1.65	1.97	- 1	5.98	-10	1.82	-10
1 5.5	1.69	2.05	- 1	5.49	-10	1.62	-10
1 6.5	1.62	2.00	- 1	4.07	-10	1.33	-10
1 7.5	2.00	2.51	- 1	5.63	-10	1.41	-10
1 8.5	2.09	2.69	- 1	5.24	-10	1.29	-10
1 9.5	2.01	2.68	- 1	4.17	-10	1.10	-10
2 0.5	1.75	2.48	- 1	2.70	-10	8.89	-11
2 1.5	1.71	2.57	- 1	2.16	-10	7.76	-11
2 2.5	0.95	1.79	- 1	-1.41	-11	4.61	-11
2 3.5	0.97	1.99	- 1	-6.76	-12	4.43	-11
2 4.5	1.07	2.35	- 1	1.37	-11	4.44	-11
2 5.5	0.93	2.42	- 1	-1.18	-11	3.83	-11
2 6.5	1.17	3.12	- 1	2.28	-11	4.21	-11
2 7.5	1.28	3.69	- 1	3.23	-11	4.26	-11
2 8.5	1.03	3.73	- 1	3.11	-12	3.69	-11
2 9.5	1.08	4.40	- 1	7.09	-12	3.74	-11
3 0.5	0.69	4.19	- 1	-2.24	-11	3.06	-11
3 1.5	1.33	6.32	- 1	2.06	-11	3.96	-11

year 1985 month 1 day 9time 17 : 35weather 0, -, ○tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 8.7, 16.7number of shots 189 $B 2.1 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.36	1.49	- 1	4.47	-10	1.83	-10
1 3.5	1.45	1.59	- 1	4.83	-10	1.71	-10
1 4.5	1.56	1.72	- 1	5.15	-10	1.59	-10
1 5.5	1.62	1.81	- 1	5.02	-10	1.46	-10
1 6.5	1.85	2.09	- 1	5.93	-10	1.45	-10
1 7.5	2.03	2.33	- 1	6.13	-10	1.38	-10
1 8.5	1.75	2.07	- 1	3.76	-10	1.04	-10
1 9.5	1.86	2.26	- 1	3.65	-10	9.61	-11
2 0.5	1.30	1.73	- 1	1.10	-10	6.30	-11
2 1.5	1.48	2.03	- 1	1.48	-10	6.24	-11
2 2.5	1.24	1.89	- 1	6.17	-11	4.92	-11
2 3.5	1.27	2.09	- 1	5.97	-11	4.56	-11
2 4.5	1.30	2.30	- 1	5.56	-11	4.30	-11
2 5.5	0.99	2.12	- 1	-9.83	-13	3.41	-11
2 6.5	1.12	2.57	- 1	1.64	-11	3.48	-11
2 7.5	0.90	2.54	- 1	-1.17	-11	2.94	-11
2 8.5	0.94	2.93	- 1	-5.74	-12	2.91	-11
2 9.5	0.96	3.39	- 1	-3.76	-12	2.88	-11
3 0.5	0.97	3.87	- 1	-1.86	-12	2.82	-11
3 1.5	0.95	4.40	- 1	-3.17	-12	2.75	-11

year 1985 month 1 day 21time 18 : 05weather 0, -, ○tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 10.6, 18.7number of shots 131 $B 2.2 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.96	3.04	- 1	1.17	- 9	3.71	-10
1 3.5	2.02	3.15	- 1	1.07	- 9	3.29	-10
1 4.5	1.99	3.13	- 1	8.90	-10	2.80	-10
1 5.5	2.05	3.26	- 1	8.02	-10	2.48	-10
1 6.5	1.94	3.13	- 1	6.16	-10	2.05	-10
1 7.5	1.94	3.20	- 1	5.32	-10	1.80	-10
1 8.5	1.85	3.12	- 1	4.19	-10	1.53	-10
1 9.5	1.78	3.10	- 1	3.26	-10	1.30	-10
2 0.5	1.43	2.68	- 1	1.51	-10	9.39	-11
2 1.5	1.45	2.85	- 1	1.36	-10	8.55	-11
2 2.5	1.54	3.17	- 1	1.40	-10	8.21	-11
2 3.5	1.30	3.00	- 1	6.51	-11	6.58	-11
2 4.5	0.86	2.51	- 1	-2.66	-11	4.67	-11
2 5.5	1.13	3.31	- 1	2.02	-11	5.23	-11
2 6.5	0.91	3.30	- 1	-1.24	-11	4.48	-11
2 7.5	0.75	3.42	- 1	-2.91	-11	3.97	-11
2 8.5	1.52	5.50	- 1	5.14	-11	5.48	-11
2 9.5	1.27	5.78	- 1	2.27	-11	4.92	-11
3 0.5	0.92	5.80	- 1	-5.98	-12	4.24	-11
3 1.5							

year 1985 month 1 day 31
 time 18 : 58
 weather 0, -, ○
 tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 98, 148
 number of shots 50

$B 1.3 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	148	2.16	- 1	5.70	-10	2.56	-10
1 3.5	153	2.25	- 1	5.41	-10	2.31	-10
1 4.5	165	2.46	- 1	5.78	-10	2.18	-10
1 5.5	168	2.55	- 1	5.20	-10	1.94	-10
1 6.5	166	2.59	- 1	4.33	-10	1.69	-10
1 7.5	170	2.74	- 1	3.89	-10	1.51	-10
1 8.5	153	2.59	- 1	2.50	-10	1.22	-10
1 9.5	162	2.86	- 1	2.49	-10	1.15	-10
2 0.5	0.94	2.01	- 1	-2.10	-11	6.85	-11
2 1.5	1.10	2.46	- 1	2.93	-11	7.04	-11
2 2.5	0.99	2.55	- 1	-1.56	-12	6.17	-11
2 3.5	1.08	2.96	- 1	1.60	-11	6.15	-11
2 4.5	1.06	3.29	- 1	1.02	-11	5.71	-11
2 5.5	1.15	3.82	- 1	2.30	-11	5.83	-11
2 6.5	1.66	5.32	- 1	8.56	-11	6.93	-11
2 7.5	0.97	4.48	- 1	-3.59	-12	4.98	-11
2 8.5	1.22	5.67	- 1	2.17	-11	5.49	-11
2 9.5	0.76	5.24	- 1	-1.98	-11	4.31	-11
3 0.5	0.61	5.49	- 1	-2.79	-11	3.91	-11
3 1.5							

year 1985 month 2 day 11
 time 17 : 47
 weather 0, -, ○
 tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 9.1, 17.7
 number of shots 401

$B 1.4 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.84	1.99	- 1	1.00	- 9	2.36	-10
1 3.5	1.79	1.94	- 1	8.00	-10	1.97	-10
1 4.5	1.71	1.87	- 1	6.23	-10	1.64	-10
1 5.5	1.81	2.00	- 1	6.26	-10	1.53	-10
1 6.5	1.73	1.93	- 1	4.87	-10	1.29	-10
1 7.5	1.74	1.97	- 1	4.31	-10	1.15	-10
1 8.5	1.42	1.66	- 1	2.06	-10	8.12	-11
1 9.5	1.38	1.65	- 1	1.59	-10	6.91	-11
2 0.5	1.17	1.48	- 1	6.04	-11	5.29	-11
2 1.5	1.16	1.53	- 1	4.86	-11	4.66	-11
2 2.5	1.14	1.60	- 1	3.47	-11	4.12	-11
2 3.5	1.33	1.93	- 1	7.29	-11	4.23	-11
2 4.5	1.25	1.97	- 1	4.64	-11	3.68	-11
2 5.5	1.20	2.09	- 1	3.24	-11	3.33	-11
2 6.5	1.11	2.20	- 1	1.49	-11	2.98	-11
2 7.5	1.39	2.81	- 1	4.46	-11	3.22	-11
2 8.5	0.95	2.58	- 1	-4.87	-12	2.53	-11
2 9.5	1.19	3.31	- 1	1.59	-11	2.78	-11
3 0.5	0.85	3.30	- 1	-1.10	-11	2.37	-11
3 1.5							

year 1985 month 2 day 22

time 18: 16

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 9.1, 14.1, 17.2

number of shots 212

B 3.0×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	2.06	3.05	- 1	1.25	- 9	3.59	-10
1 3.5	2.15	3.19	- 1	1.18	- 9	3.27	-10
1 4.5	2.07	3.09	- 1	9.57	-10	2.76	-10
1 5.5	2.11	3.17	- 1	8.52	-10	2.43	-10
1 6.5	2.22	3.36	- 1	8.14	-10	2.25	-10
1 7.5	2.25	3.45	- 1	7.28	-10	2.01	-10
1 8.5	2.18	3.40	- 1	5.86	-10	1.69	-10
1 9.5	2.07	3.30	- 1	4.49	-10	1.38	-10
2 0.5	1.52	2.55	- 1	1.84	-10	9.01	-11
2 1.5	1.46	2.54	- 1	1.40	-10	7.71	-11
2 2.5	1.82	3.20	- 1	2.11	-10	8.27	-11
2 3.5	0.94	2.01	- 1	-1.31	-11	4.44	-11
2 4.5	1.31	2.75	- 1	5.85	-11	5.19	-11
2 5.5	1.75	3.66	- 1	1.21	-10	5.90	-11
2 6.5	1.11	2.94	- 1	1.51	-11	4.11	-11
2 7.5	1.40	3.77	- 1	4.71	-11	4.45	-11
2 8.5	0.92	3.39	- 1	-8.54	-12	3.43	-11
2 9.5	1.30	4.62	- 1	2.59	-11	4.00	-11
3 0.5	0.66	4.13	- 1	-2.49	-11	3.07	-11
3 1.5							

year 1985 month 3 day 24

time 18: 30

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 10.6, 21.3

number of shots 276

B 1.4×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	1.42	2.51	- 1	4.55	-10	2.70	-10
1 3.5	1.35	2.39	- 1	3.28	-10	2.23	-10
1 4.5	1.31	2.33	- 1	2.45	-10	1.85	-10
1 5.5	1.51	2.70	- 1	3.46	-10	1.82	-10
1 6.5	1.57	2.82	- 1	3.24	-10	1.62	-10
1 7.5	1.50	2.74	- 1	2.44	-10	1.35	-10
1 8.5	1.43	2.68	- 1	1.79	-10	1.11	-10
1 9.5	1.69	3.18	- 1	2.46	-10	1.14	-10
2 0.5	1.56	3.04	- 1	1.77	-10	9.53	-11
2 1.5	1.49	3.01	- 1	1.29	-10	7.96	-11
2 2.5	1.47	3.14	- 1	1.05	-10	6.96	-11
2 3.5	1.29	2.98	- 1	5.50	-11	5.65	-11
2 4.5	1.06	2.77	- 1	9.31	-12	4.46	-11
2 5.5	0.72	2.39	- 1	-3.87	-11	3.31	-11
2 6.5	1.14	3.52	- 1	1.63	-11	4.16	-11
2 7.5	1.40	4.41	- 1	4.01	-11	4.46	-11
2 8.5	1.49	5.09	- 1	4.22	-11	4.40	-11
2 9.5	1.41	5.62	- 1	3.01	-11	4.16	-11
3 0.5	0.92	5.36	- 1	-5.20	-12	3.40	-11
3 1.5							

year 1985 month 4 day 1
 time 21: 15
 weather 0, -, ○
 tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 8.9, 15.1
 number of shots 224

B 1.5×10^{-4}

Z [km]	R [z]	σ [R(z)]	β_A [z]	σ [β_A (z)]
1.2.5	0.99	1.09 - 1	-1.04 -11	1.31 -10
1 3.5	0.97	1.08 - 1	-2.71 -11	1.12 -10
1 4.5	1.06	1.18 - 1	5.67 -11	1.06 -10
1 5.5	1.19	1.33 - 1	1.52 -10	1.06 -10
1 6.5	1.30	1.47 - 1	2.01 -10	9.96 -11
1 7.5	1.56	1.78 - 1	3.27 -10	1.04 -10
1 8.5	1.52	1.77 - 1	2.61 -10	8.86 -11
1 9.5	1.52	1.82 - 1	2.21 -10	7.67 -11
2 0.5	1.60	1.96 - 1	2.14 -10	7.04 -11
2 1.5	1.56	2.00 - 1	1.71 -10	6.05 -11
2 2.5	1.23	1.73 - 1	5.81 -11	4.44 -11
2 3.5	1.20	1.81 - 1	4.31 -11	3.98 -11
2 4.5	1.12	1.86 - 1	2.34 -11	3.50 -11
2 5.5	1.29	2.23 - 1	4.74 -11	3.59 -11
2 6.5	0.89	1.93 - 1	-1.58 -11	2.66 -11
2 7.5	0.92	2.19 - 1	-9.45 -12	2.59 -11
2 8.5	1.18	2.83 - 1	1.86 -11	2.85 -11
2 9.5	0.71	2.46 - 1	-2.48 -11	2.13 -11
3 0.5	1.56	4.13 - 1	4.17 -11	3.06 -11
3 1.5	1.27	4.20 - 1	1.73 -11	2.66 -11
3 2.5	0.95	4.21 - 1	-2.58 -12	2.29 -11

year 1985 month 4 day 24
 time 18: 50
 weather 0, -, ○
 tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 9.3, 17.1
 number of shots 339

B 2.4×10^{-4}

Z [km]	R [z]	σ [R(z)]	β_A [z]	σ [β_A (z)]
1 2.5	1.94	2.49 - 1	1.15 - 9	3.02 -10
1 3.5	1.76	2.27 - 1	8.21 -10	2.43 -10
1 4.5	1.62	2.10 - 1	5.91 -10	1.98 -10
1 5.5	1.49	1.94 - 1	4.06 -10	1.61 -10
1 6.5	1.62	2.12 - 1	4.51 -10	1.54 -10
1 7.5	1.91	2.53 - 1	5.60 -10	1.55 -10
1 8.5	1.69	2.28 - 1	3.59 -10	1.18 -10
1 9.5	1.93	2.61 - 1	4.12 -10	1.16 -10
2 0.5	1.41	2.01 - 1	1.52 -10	7.44 -11
2 1.5	1.52	2.21 - 1	1.63 -10	6.92 -11
2 2.5	1.48	2.25 - 1	1.25 -10	5.87 -11
2 3.5	1.63	2.56 - 1	1.41 -10	5.68 -11
2 4.5	1.51	2.51 - 1	9.59 -11	4.77 -11
2 5.5	1.67	2.89 - 1	1.09 -10	4.69 -11
2 6.5	1.41	2.74 - 1	5.69 -11	3.80 -11
2 7.5	1.27	2.77 - 1	3.26 -11	3.29 -11
2 8.5	0.92	2.48 - 1	-7.80 -12	2.53 -11
2 9.5	0.84	2.64 - 1	-1.44 -11	2.30 -11
3 0.5	1.14	3.49 - 1	1.05 -11	2.60 -11
3 1.5				

year 1985 month 5 day 16
time 19: 16
weather 0, -, ○
tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 10.6, 12.2, 16.2
number of shots 290

$B 1.1 \times 10^{-4}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5	15 2	128	- 1	6.72	-10	1.66	-10
1 3.5	15 0	128	- 1	5.55	-10	1.42	-10
1 4.5	13 5	118	- 1	3.39	-10	1.13	-10
1 5.5	13 0	116	- 1	2.53	-10	9.69	-11
1 6.5	13 6	125	- 1	2.59	-10	8.95	-11
1 7.5	14 6	138	- 1	2.80	-10	8.45	-11
1 8.5	13 7	137	- 1	1.95	-10	7.17	-11
1 9.5	14 5	150	- 1	2.01	-10	6.75	-11
2 0.5	10 8	128	- 1	2.94	-11	4.85	-11
2 1.5	15 2	179	- 1	1.63	-10	5.66	-11
2 2.5	10 4	151	- 1	1.02	-11	4.04	-11
2 3.5	09 6	158	- 1	-8.94	-12	3.65	-11
2 4.5	10 1	181	- 1	1.97	-12	3.57	-11
2 5.5	08 7	187	- 1	-2.16	-11	3.13	-11
2 6.5	11 1	242	- 1	1.56	-11	3.47	-11
2 7.5	13 3	301	- 1	4.01	-11	3.67	-11
2 8.5	07 7	257	- 1	-2.39	-11	2.67	-11
2 9.5	15 9	423	- 1	5.22	-11	3.77	-11
3 0.5	11 6	407	- 1	1.21	-11	3.11	-11
3 1.5	16 5	552	- 1	4.27	-11	3.60	-11

year 1985 month 7 day 26
time 19: 44
weather 0, -, ○
tropopause altitude ($\times 10^3$ gpm) 15.9
number of shots 276

$B 9.65 \times 10^{-5}$

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5							
1 5.5	10 1	9.68	- 2	1.26	-11	9.10	-11
1 6.5	09 4	9.46	- 2	-4.48	-11	7.60	-11
1 7.5	11 6	1.19	- 1	1.07	-10	7.96	-11
1 8.5	14 0	1.46	- 1	2.25	-10	8.24	-11
1 9.5	15 3	1.67	- 1	2.50	-10	7.84	-11
2 0.5	13 0	1.58	- 1	1.21	-10	6.27	-11
2 1.5	09 6	1.38	- 1	-1.27	-11	4.58	-11
2 2.5	11 9	1.78	- 1	5.17	-11	4.91	-11
2 3.5	08 4	1.59	- 1	-3.74	-11	3.74	-11
2 4.5	11 0	2.07	- 1	2.00	-11	4.19	-11
2 5.5	11 6	2.38	- 1	2.75	-11	4.12	-11
2 6.5	14 4	3.06	- 1	6.47	-11	4.48	-11
2 7.5	13 2	3.27	- 1	4.03	-11	4.07	-11
2 8.5	07 2	2.68	- 1	-2.92	-11	2.82	-11
2 9.5	14 3	4.35	- 1	3.84	-11	3.92	-11
3 0.5	15 0	5.00	- 1	3.90	-11	3.87	-11
3 1.5							

year 1985 month 8 day 17

time 19 : 58

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 16.0

number of shots 210

B 1.2×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5	0.98	1.10	- 1	-3.05	-11	1.36	-10
1 4.5	1.01	1.15	- 1	7.63	-12	1.25	-10
1 5.5	1.10	1.28	- 1	9.65	-11	1.21	-10
1 6.5	1.05	1.25	- 1	3.83	-11	1.00	-10
1 7.5	1.34	1.62	- 1	2.29	-10	1.09	-10
1 8.5	1.52	1.88	- 1	2.92	-10	1.06	-10
1 9.5	1.18	1.59	- 1	8.53	-11	7.49	-11
2 0.5	1.42	1.96	- 1	1.64	-10	7.71	-11
2 1.5	1.36	2.03	- 1	1.20	-10	6.74	-11
2 2.5	1.04	1.83	- 1	1.10	-11	5.14	-11
2 3.5	1.39	2.44	- 1	9.17	-11	5.79	-11
2 4.5	1.54	2.87	- 1	1.11	-10	5.83	-11
2 5.5	1.28	2.82	- 1	4.75	-11	4.86	-11
2 6.5	1.10	2.91	- 1	1.40	-11	4.28	-11
2 7.5	0.88	2.93	- 1	-1.54	-11	3.68	-11
2 8.5	1.04	3.62	- 1	3.95	-12	3.87	-11
2 9.5	1.10	4.28	- 1	8.67	-12	3.92	-11
3 0.5	0.72	4.06	- 1	-2.22	-11	3.20	-11
3 1.5							

year 1985 month 8 day 28

time 19 : 32

weather 0, -, ○

tropopause altitude [$\times 10^3$ gpm] 15.5

number of shots 370

B 1.18×10^{-4}

Z [km]	R [z]	$\sigma [R(z)]$		$\beta_A [z]$		$\sigma [\beta_A(z)]$	
1 2.5							
1 3.5							
1 4.5							
1 5.5	0.98	1.09	- 1	-1.72	-11	1.03	-10
1 6.5	1.15	1.29	- 1	1.14	-10	1.01	-10
1 7.5	1.19	1.37	- 1	1.27	-10	9.19	-11
1 8.5	1.67	1.92	- 1	3.77	-10	1.07	-10
1 9.5	1.36	1.66	- 1	1.67	-10	7.71	-11
2 0.5	1.26	1.64	- 1	1.02	-10	6.39	-11
2 1.5	1.13	1.60	- 1	4.25	-11	5.18	-11
2 2.5	1.33	1.95	- 1	9.03	-11	5.37	-11
2 3.5	1.36	2.15	- 1	8.46	-11	5.00	-11
2 4.5	1.02	1.93	- 1	4.66	-12	3.87	-11
2 5.5	0.96	2.06	- 1	-6.71	-12	3.52	-11
2 6.5	1.62	3.16	- 1	8.98	-11	4.60	-11
2 7.5	1.12	2.83	- 1	1.45	-12	3.51	-11
2 8.5	1.23	3.34	- 1	2.38	-11	3.54	-11
2 9.5	0.95	3.36	- 1	-4.39	-12	3.05	-11
3 0.5	0.73	3.39	- 1	-2.09	-11	2.64	-11
3 1.5							

参 考 文 献

- Grams, G. and G. Fiocco, 1967: Stratospheric aerosol layer during 1964 and 1965. *J. Geophys. Res.*, **72**, 3523 ~ 3542.
- Russel, P. B., T. J. Swissler, and M. P. McCormick, 1979: Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements. *Appl. Opt.*, **18**, 3783 ~ 3797.
- Swissler, T. J., M. P. McCormick, and J. D. Spinhire, 1983: El Chichon eruption cloud: comparison of lidar and optical thickness measurements for October 1982. *Geophys. Lett.*, **10**, 885 ~ 888.
- Uchino, O., K. Takahashi, I. Tabata, I. Akita, Y. Okada, and K. Naito, 1984: Ruby lidar observations of the El Chichon dust clouds at Tsukuba (36.1°N) and comparisons with UV lidar measurements at Fukuoka (33.6°N). *J. Meteor. Soc. Japan*, **62**, 679 ~ 687.
- Uchino, O., 1985: On dispersion processes of the El Chichon dust particles in the lower stratosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 288 ~ 293.
- 岩坂泰信, 1983: 成層圏エアロゾルの観測, 気象研究ノート. **146**, 115 ~ 184.
- 内藤恵吉, 1981: エアロゾルの測定法(2): 気象研究ノート, **142**, 135 ~ 153.
- 田端功, 高橋克己, 1984: エル・チチョン火山噴火後のライダー観測結果について. 測候時報, **51**, 173 ~ 175.

第6章 日射ゾンデ*

気象研究所における「中層大気の研究」の一環として、中層大気の放射収支を把握する目的で、次章に述べる放射ゾンデによる赤外放射フラックスの高度分布の測定とともに、日射フラックスの高度分布の測定を昭和57年度から昭和59年度にかけての3年間おこなった。以下でその結果をのべる。最初に日射ゾンデの構造および、その器械常数の決定について述べる。

6.1 日射ゾンデの構造および器械定数の決定

日射ゾンデの外観図を図6.1に示す。日射ゾンデは上向きおよび下向き水平面日射フラックスを

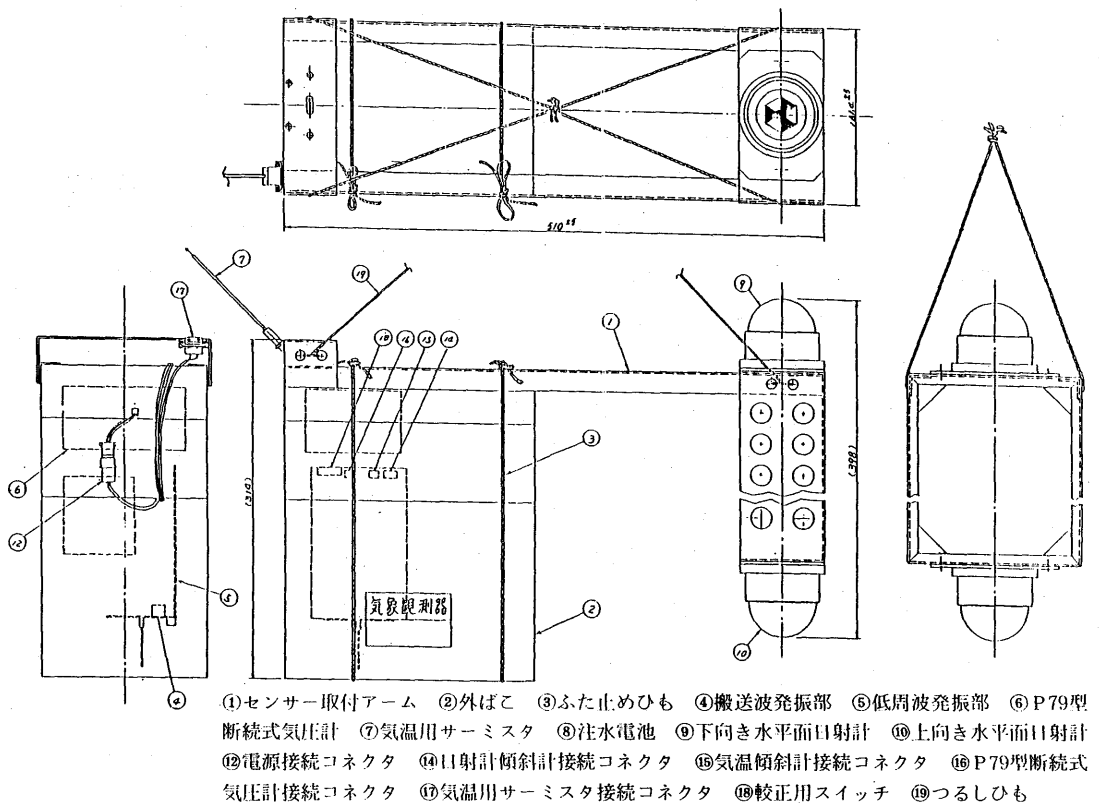


図6.1 日射ゾンデの構造

測定するセンサー部、送信部および気温センサー等付属センサーより成る。センサーは、英弘精機製のネオ日射計を軽量化したものを用了。各センサーの受感面は黒および白の面から成り、その

* 嘉納宗靖、柴田裕司、鈴木正：元高層物理研究部、宮内正厚：気象庁海洋気象部、八尾孝、青木忠生、水野芳成、青木輝夫：高層物理研究部

大きさは直径約5 cmである(図6.1参照)。入射した日射によって、黒白の面の間に熱起電力が発生し、これによる電圧が周波数に変換されて地上へ送信される。このようにして送信された周波数は、地上でF-V変換器によって電圧に変換される。更に、この電圧に器械定数を乗ずることによって、各高度の上向きおよび下向き日射フラックスが得られる。

上述の日射ゾンデ受感面に発生した電圧を日射量に変換する変換係数すなわち器械定数は、水平面日射計の検定と同様にして次のようにおこなう。雲のない快晴の日を選び、直達日射計による直達日射の測定と、日射ゾンデによる水平面日射の測定を同時におこなう。直達日射の測定値を I_0 、そのときの太陽高度を h 、日射ゾンデに生じた電圧を V 、さらに日射ゾンデに直達日射が当たらないようにしたときの電圧を V' とすると、器械定数 k は次式で与えられる。

$$I_0 \sin(h) = k(V - V') \quad (6.1)$$

このようにして各日射ゾンデの器械定数を決定した。

6.2 日射ゾンデの揺れの補正

日射ゾンデの測定で最も厄介な問題は、日射ゾンデの揺れに基づく誤差である(嘉納他1973、1978)。下向き日射フラックスはその大部分が直達日射に基づくものである。このため、太陽光の方向と日射ゾンデ受感面の法線とのなす角がゾンデの揺れによって変化すると、それに伴って、下向き日射フラックスの測定値がかなり変動する。そこで、この揺れによる変動を補正することが測定上非常に重要となる。一方、上向き日射フラックスは、次章で述べる放射ゾンデの場合と同様に、快晴の場合にはあらゆる方向からほぼ同程度で入射するので、ゾンデの揺れの影響は殆どない。それ故、ゾンデの揺れの影響は下向き日射フラックスの測定の場合に限られる。次にこの揺れによる下向き日射フラックス測定値の変動を補正する方法を述べる。

バルーンから吊り下げられたセンサーは緩かに円を描きながら上昇する。バルーンからセンサーまでの吊り糸の長さは約50mで、円運動の周期は平均して12~16秒くらいである。実験は冬期に行われたのでバルーンが日射をさえぎり、センサーがバルーンの陰に入ることはまず起こらない。

(i) バルーンが水平面内を等速円運動をしていると仮定したとき

バルーンと太陽の位置関係等を図6.2のように定める。1回転したときの日射の計測値の最大を I_{max} 、最小を I_{min} とし、これからセンサーの傾きを求める。太陽、およびセンサーの法線の方位角を ϕ 、 ϕ' 両者のなす角度を θ' とすれば、センサー面での日射量 I は

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cos \theta' \\ &= I_0 (\sin \theta \sin \phi \sin \zeta \sin \phi' + \sin \theta \cos \phi \sin \zeta \cos \phi' + \cos \theta \cos \zeta) \\ &= I_0 (\sin \theta \sin \zeta \cos(\phi - \phi') + \cos \theta \cos \zeta) \end{aligned} \quad (6.1)$$

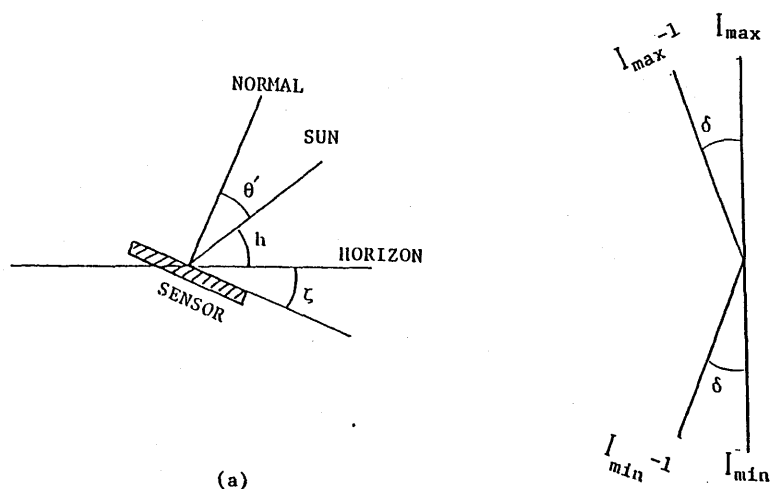


図 6.2 センサー面と太陽の位置関係 (b)

で与えられる。ここで θ は太陽の天頂距離 ($=\frac{1}{2}\pi - h$), ζ はセンサー面の水平面から傾きである。 I が最大になるのは $\phi = \phi'$ のときだから

$$\begin{aligned} I_{max} &= I_0 \cos \theta \cos \zeta + \sin \theta \sin \zeta \\ &= I_0 \cos (\theta - \zeta) \end{aligned} \quad (6.2)$$

逆に I が最小になるのは $\phi = \phi' \pm \pi$ のときでこのとき

$$I_{min} = I_0 \cos (\theta + \zeta) \quad (6.3)$$

(6.1)、(6.2) から

$$\tan \zeta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \frac{1}{\tan \theta} \quad (6.4)$$

このように求めた ζ を使って、水平面日射量は

$$I_h = I_0 \cos \theta = \frac{I_{max} + I_{min}}{2 \cos \zeta} \quad (6.5)$$

として計算できる。

実は、その値は I_{max} 、 I_{min} でなくても (6.1) を使って任意の観測値から計算できる。等速円運動を仮定し、半周するのに要する時間、すなわち I_{max} から I_{min} を観測するのに要する時

間を T_0 秒とする。1 秒間に10回の観測を行うので

$$\delta = \frac{\pi}{10 T_0} \quad (6.6)$$

なる角度毎に観測を行っていることになる。 T_0 は8秒くらいのオーダーなので、 I_{max} と I_{min} は図6-2 (b) のようにはば直線上の方向にあると近似できる。すると I_{max} から n 番目の観測、 I_{max+n} と I_{min} より n 番前の観測、 I_{min-n} を使うと

$$\begin{aligned} I_{max+n} + I_{min-n} &= 2 I_0 \cos \theta \cos \zeta \quad \equiv P_n \\ I_{max+n} + I_{min-n} &= 2 I_0 \cos \theta \cos \zeta \cos n \delta \equiv Q_n \end{aligned} \quad (6.7)$$

より

$$\tan \zeta_n = \frac{Q_n}{P_n} \frac{1}{\tan \theta \cos n \delta} \quad (6.8)$$

として別な ζ の値が得られる。

実際にはこのようにして計5 T_0 個の n に対して求めた水平面日射量の平均値を採用した。なおこのとき ζ の平均や分散も計算した。

これらの高度別水平面日射量を図6.3に示す。なおこのときのバルーンの高度は、半回転すると

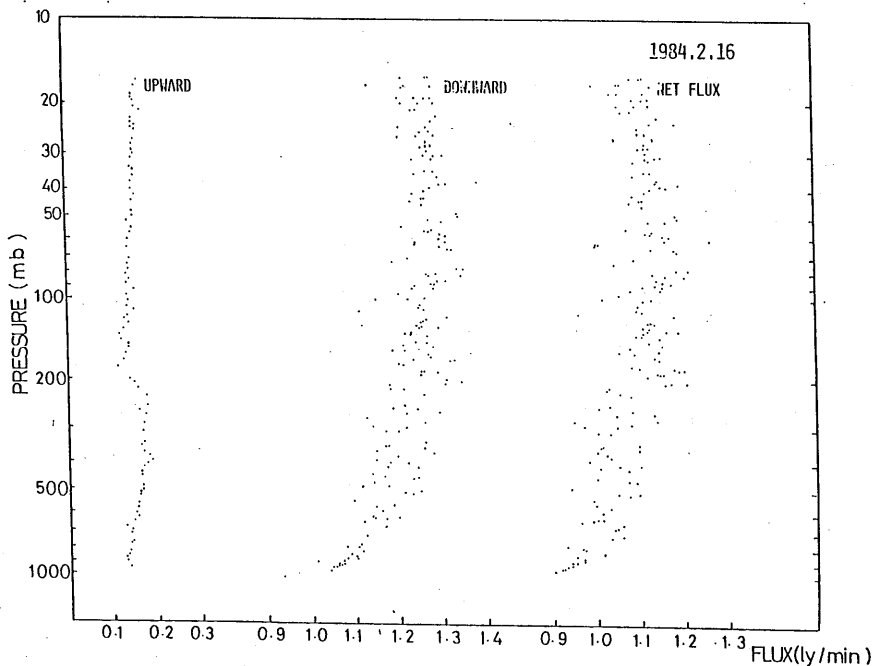


図 6.3 日射計が水平面内を円運動していると仮定して補正した水平面日射量。1984. 2月16日

きの中央の時刻の気圧を採用した。個々の観測値のばらつきは非常に大きい。しかし地上から700 mb くらいまでは、日射量は急速に増加し、以後500 mbまで、次第に増加はゆるやかとなり、更に100 mbまで増加傾向は続いている。しかしそれ以後は反対に減少の傾向さえ見える。

(ii) 以上はセンサーが水平に回転していることを前提として計算を行った。実際はバルーンは風に流され、センサーはバルーンに引張られながら回転している。バルーンが水平に回転しているかどうか判定し、回転が水平に近いものを選択した。その方法を以下に述べる。

① 水平面日射量の標準偏差 (σ) による方法

1回の観測は5 T_0 組の観測値からなる。これらの標準偏差をとり、 σ が0.005 ly 以下のものをとる。

② センサー面の水平からの傾き ζ のばらつきの程度による方法

①と同様5 T_0 組の ζ の最大と最小の差 $\Delta\zeta$ をとり、 $\Delta\zeta$ が 0.5° 以下のものをとる。

③ 受信周波数の波形による方法

バルーンが水平に回転しているとき、 I_{max} のときの周波数を F_1 とすると、これから δ だけ回転したときの周波数 F_2 は次の式により求められる。

$$F_2 = \frac{I_0 \sin \theta \cdot \sin \zeta (\cos \pi - \cos (\pi + \delta))}{F_k \cdot v_s / (HR - LR)} + F_1$$

HR = High Reference

LR = Low Reference

v_s = 発信器の標準電圧

F_k = 日射計の定数

θ = 天頂角

こうして求めた F_2 と実際の周波数を較べたものを図6-4に示す。判定に当って、実際の計算は I_{max} から、 I_{min} までの半回転について計算値 (F_{cal}) と観測値 (F_{obs}) の差の平均が2.0 Hz 以下、差の最大が4 Hz以下のものをとった。①~③の方法により観測値を選びプロットしたものを図6.5と図6.6に示す。最初の図6.3のばらつきより小さいが、まだ大きい。

(iii) 以上の選択方法で、更に条件を厳しくすると、残った観測値は極端に少なくなる。バルーンが上昇するにつれ、日射量は減少することはまずないという仮定を入れて、プロットしたものが図6.7から図6.12である。

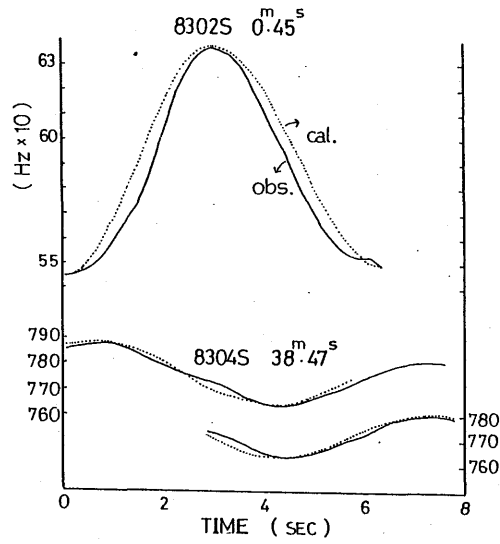


図 6.4 受信周波数の時間変化の観測値と計算値

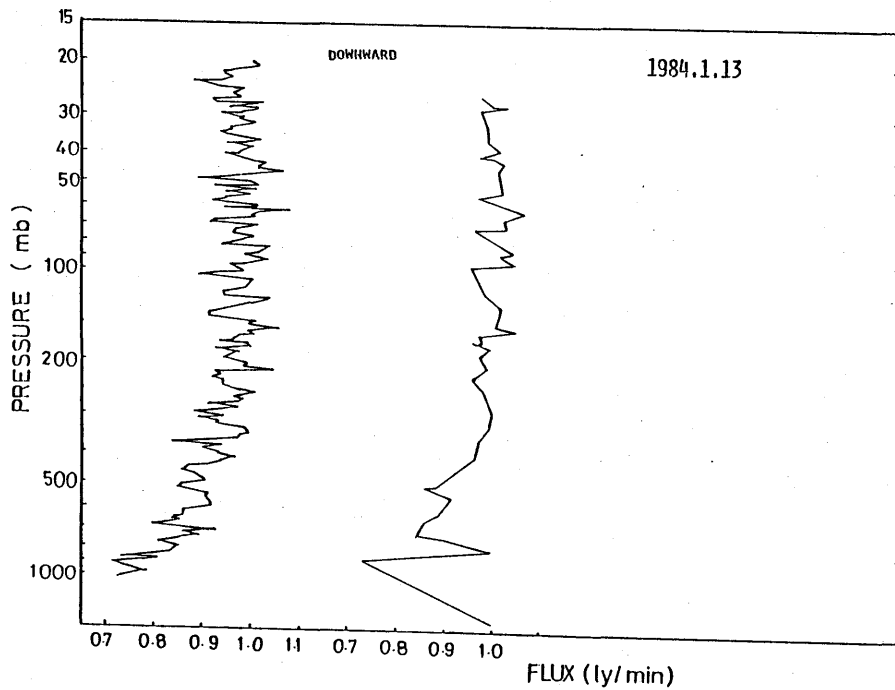


図 6.5 $|F_{cal} - F_{obs}| < 2.0 \text{ Hz}$ 、 $|\Delta F|_{max} < 4.0 \text{ Hz}$ 、左は $\sigma < 0.01$ 、 $|\Delta \zeta| < 1.0^\circ$ 右は $\sigma < 0.005$ 、 $|\Delta \zeta| < 0.5^\circ$ の条件を満たすデータだけのプロット (ただし σ は下向き日射量の標準偏差) 1984 年 1 月 13 日 10 時 37 分。

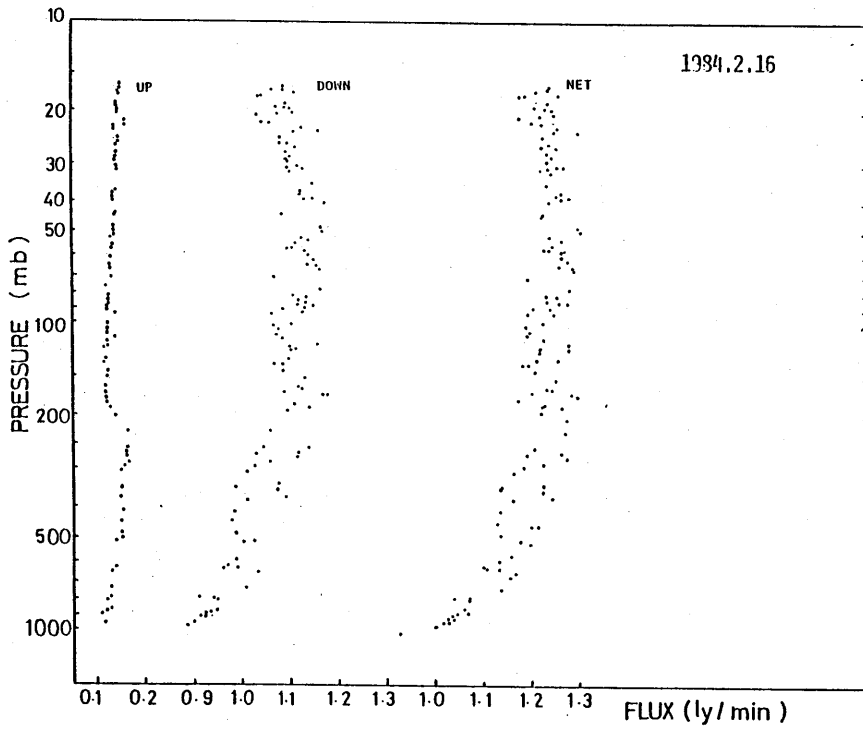


図 6.6 F 曲線がスムーズで $\sigma < 0.01$ 、 $\zeta_{\max} - \zeta_{\min} < 1^\circ$ (σ は下向き日射量に対するもの)。1984年2月16日

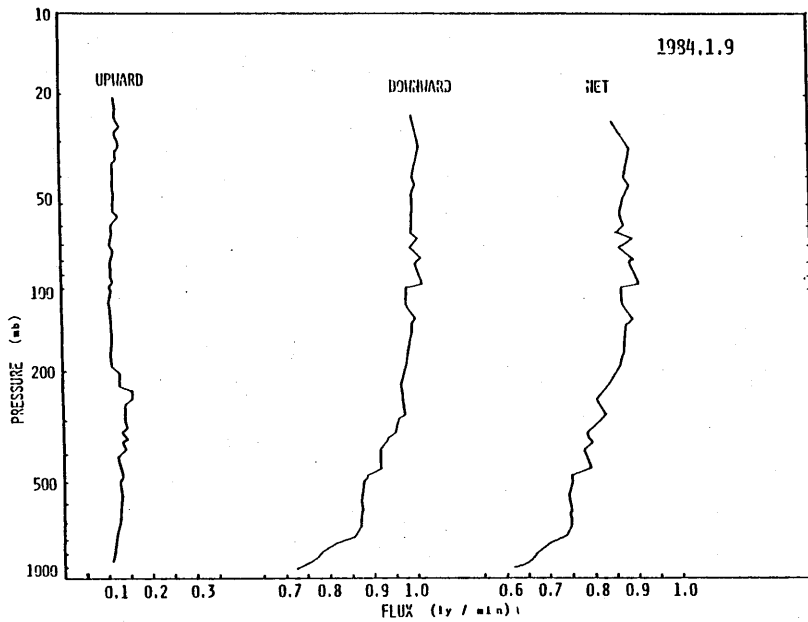


図 6.7 図 6.5 - 6.6 より厳しい条件でデータを選択したもの。1984年1月9日10時55分から79分間

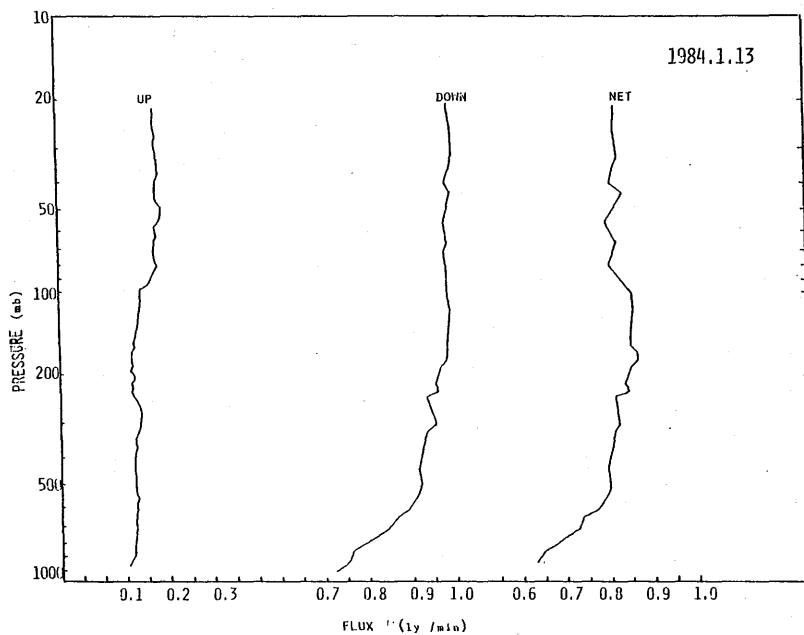


図 6.8 図 6.7 に同じ。ただし1984年1月13日10時55分から83分間。

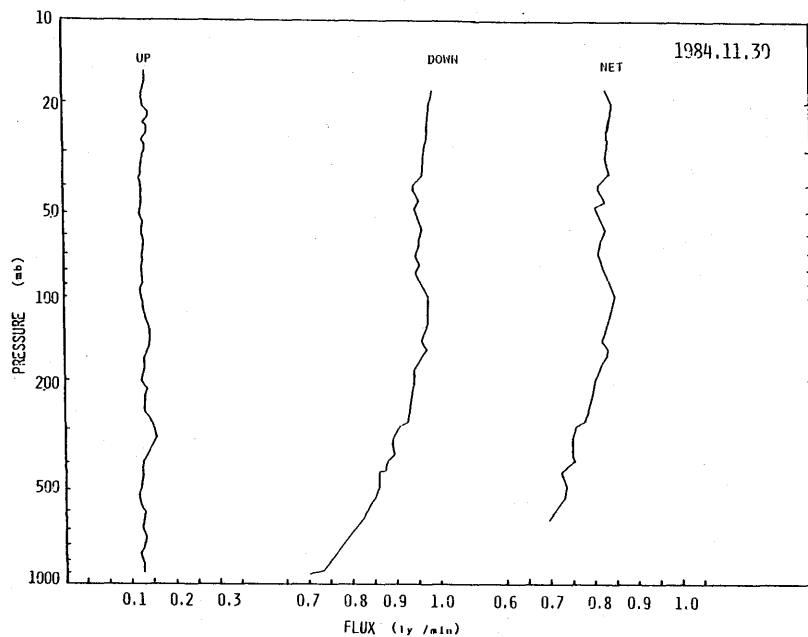


図 6.9 図 6.7 に同じ。ただし1984年11月30日10時35分

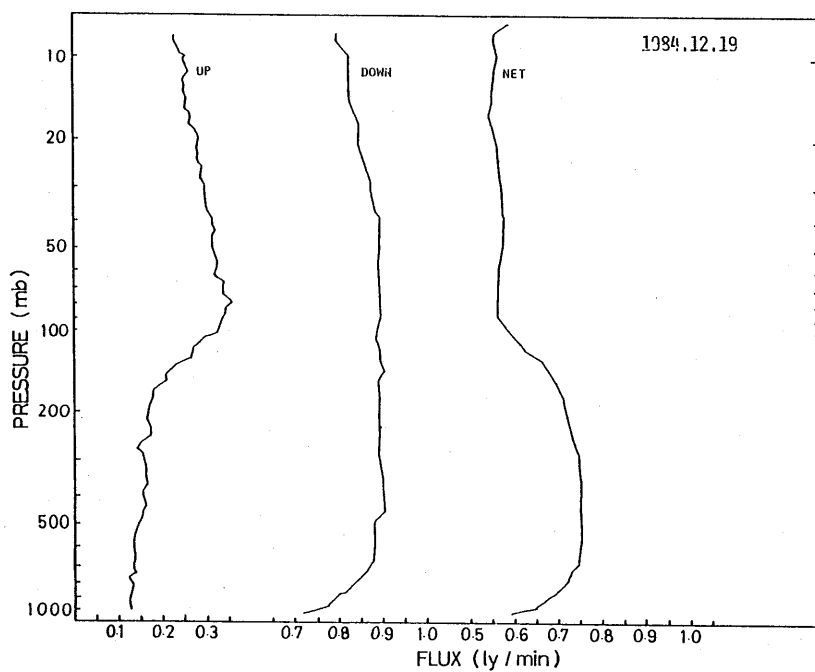


図 6.10 図 6.7 に同じ。ただし1984年12月19日11時15分から 106 分間。

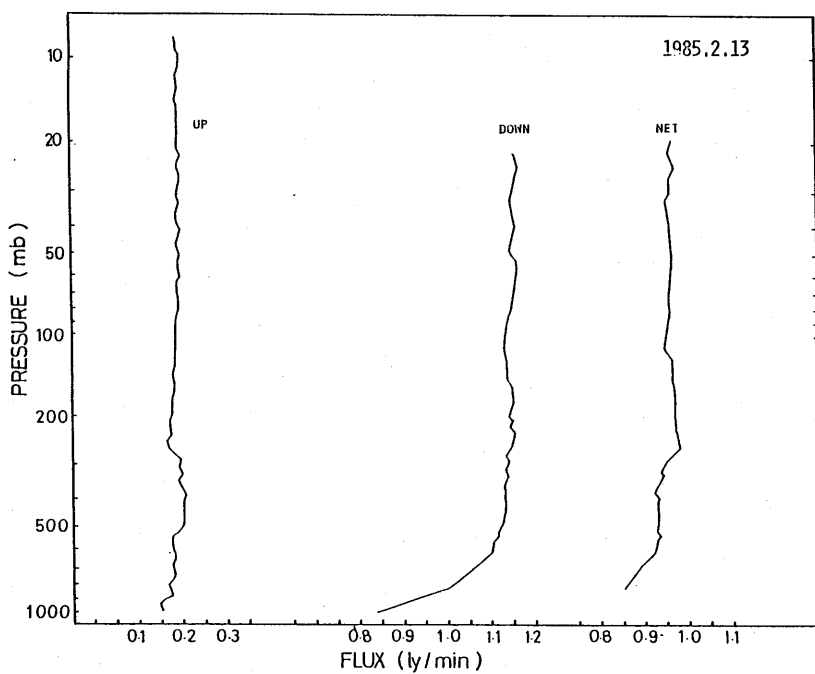


図 6.11 図 6.7 に同じ。ただし1985年 2 月13日11時30分。

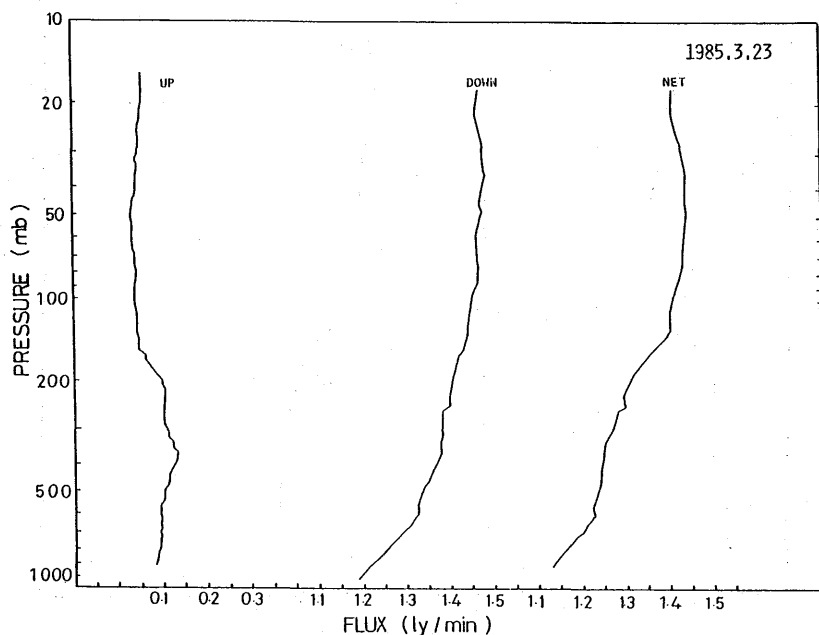


図 6.12 図 6.7 に同じ。ただし 1985 年 3 月 23 日

6.3 観測結果

この章の始めに述べた期間中に飛揚した日射ゾンデ10台のうち、第1年度のもは、ゾンデの揺れ測定センサーの精度が悪く、揺れを補正することが困難となり、日射フラックスの高度分布を知るには不適当なものとなった。そこで第2年度からは揺れ測定センサーをゾンデに設置することを止めて、前節に述べた方法でゾンデの揺れを補正する方法に改め、このため下向き日射フラックスを測定する時間を延ばすように、ゾンデの信号切換の改良をおこなった。これによって、第2年度以降の観測値に前記のような補正をほどこすことができた。その結果が前記の図 6.7 から図 6.12 に示される。

図 6.10 を除くこれらの図から分るように、下向き日射フラックスは、高度が増すとともに増加し、この増加率は当然のことながら下層大気程大きく、高度とともに小さくなっている。すなわち、下層大気程空気や水蒸気およびエアロゾルのような日射を減衰（散乱および吸収）させる要因物質が多いことを示す。

次に、上向き日射フラックスを見ると、下向き日射フラックスに比較して高度による変化が小さいことがわかる。さらに詳細にみると、上向き日射フラックスはある高度（200～300 mb）で不連続的に小さくなっている。これはゾンデがこの高度付近で海洋上に出たためと思われる。すなわち、陸地表面の日射に対する反射率はおよそ10～30%程度で、一方海面のそれは数%程度で、かなり

小さい。そのため、同一条件下では海洋上の上向き日射フラックスは陸地上のそれに比較して小さくなることによる。上向きフラックスのその他の細い変動は、ゾンデ飛揚時で快晴とは言え、海洋上その他で幾らかの雲（日射反射率40～70%）の存在および複雑な地形の霞ヶ浦（日射反射率～5%）の存在等に主としてよると思われる。

下向き日射フラックスから上向き日射フラックスを差引いた日射のネットフラックスは下向き日射フラックスとほぼ同様な高度変化をしていることがわかる。すなわち、日射のネット・フラックスは高度の増加とともに増加している。これは日射が大気中で吸収されていることを示す。そこで、上記の日射ネット・フラックスの観測値から20～100 mbおよび20～1,000 mbの大気層で吸収された日射量およびこの吸収による大気加熱率を表6.1に示す。この表の日射の吸収量およびそれによる大気加熱率がやや大きく、特に1985年3月23日の場合は大きすぎると思われる。今後は、地表アルベドの変化の影響等を考慮することが必要であろう。

表6.1 吸収日射量 (ΔF_N) とそれによる大気加熱率

Time	20～100 mb		20～1,000 mb	
	ΔF_N (ly/min)	dT/dt (°C/day)	ΔF_N (ly/min)	dT/dt (°C/day)
Jan. 9, '84	0.035	2.6	0.295	1.8
Jan. 11, '84	0.025	1.8	0.250	1.5
Nov. 30, '84	0.020	1.5	0.275	1.7
Feb. 13, '85	0.015	1.1	0.295	1.8
Mar. 23, '85	0.045	3.3	0.400	2.4

図6.10をみると、上向き日射フラックスが200 mbの高度を超えると、急激に増加していることがわかる。この原因はよく分らないが、多分海洋上でゾンデがこの高度に達した頃、その下の高度に発生した多量の雲かあるいは既に発生している雲の影響によると思われる。

一方、下向き日射フラックスは40 mb以上の高度で減少しているが、この原因についてはよく分らない。

参考文献

- 嘉納宗靖・広田道夫(1978)：輻射ゾンデ・日射ゾンデの問題点、気象庁技術報告第93号、361～363。
- 嘉納宗靖・鈴木正(1973)：日射ゾンデ、天気 20, 609～612。

第7章 放射ゾンデ*

気象研究所における「中層大気の研究」の一環として、中層大気の放射収支を把握する目的で、前章で述べた日射ゾンデによる日射フラックスの測定とともに、放射ゾンデによる赤外放射フラックスの高度分布の測定を昭和57年度から昭和59年度にかけての3ケ年間おこなった。以下でその結果を述べる。最初に放射ゾンデの構造、器械定数およびその風速依存性の決定法を述べる。

7.1 放射ゾンデの構造

放射ゾンデの外観の模式図を図7.1に示す。放射ゾンデは上向きおよび下向き赤外放射フラックスを測定するセンサー送信部および気温センサー等付属センサーよりなる。センサーは円形のマイ

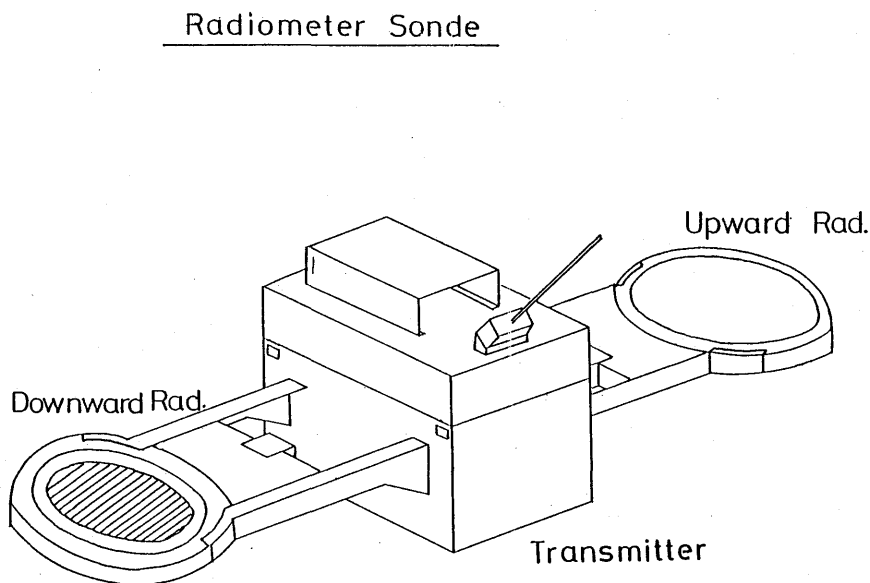


図7.1 放射ゾンデの構造

ラー膜（直径約10cmで、その表面の中心付近にサーミスタ接着）の表面にくまなく黒色塗料が塗られ、その裏面がアルミ蒸着されている受感膜およびその受感膜から上下両側に数mm離れて位置するポリエチレン膜やマイラー膜（内面の中心付近にサーミスタが接着され、外面はアルミ蒸着）より

* 嘉納宗靖、柴田裕司、鈴木正 元高層物理研究部、宮内正厚：気象庁海洋気象部

八尾孝、青木忠生、水野芳成、青木輝夫：高層物理研究部

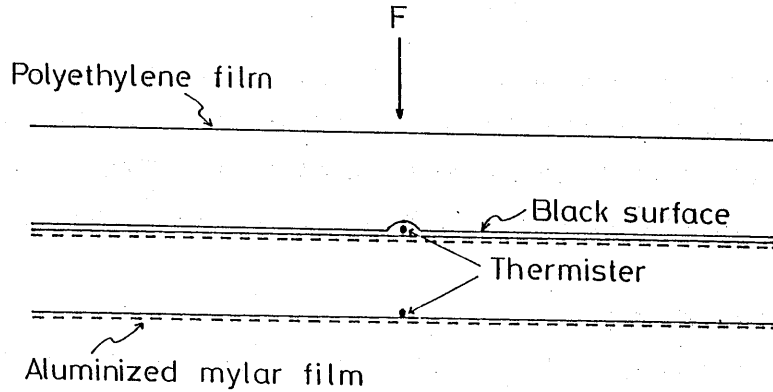


図7.2 放射計の受感部の構造

なる(図7.2参照)。各高度の放射場等によって受感膜の温度やマイラー膜の温度が変化する。そして、これらの温度変化に対応して、各々のサーミスタの抵抗値に変化を生じ、これが周波数に変換されて地上へ送信される。送信される要素およびその送信順序は次のとおりである。すなわち、ハイレファレンス→上向き受感膜温度→ローレファレンス→下向きマイラー膜温度→ハイレファレンス→上向きマイラー膜温度→気温→下向き受感面温度。ハイレファレンスおよびローレファレンスはサーミスタの抵抗値の基準となるものである。このようにして送信された信号(周波数)をサーミスタの抵抗値に変換し、さらにそれを温度に変換する。このようにして受感膜やマイラー膜の温度 T_s および T_m が得られ、それ等を基にしてセンサーへ入射する赤外放射のフラックス F が次式(7.1)によって与えられる。(Shimizu et al., 1972)

$$F = \sigma T_s^4 + K_1(T_s^2 - T_m^2) + K_2 \frac{dT_s}{dt} \quad (7.1)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数、 K_1 および K_2 は空気の分子熱伝導率や受感膜の熱容量等に関係する器械定数である。これらの定数は放射ゾンデ(センサー)毎に異なり、また予備実験で、これらの定数が風速に依存することが分ったので各センサーの定数およびその風速依存性を決定する実験をおこなった。次にその方法の概要および結果の1例を示す。

7.2 器械定数およびその風速依存性の決定

(i) K_1 の決定

実験室内で電熱器を光源とし、それから約1.2 mのところに放射ゾンデのセンサーを設置する。電熱器の電圧を変化させることによって光源からの放射量を変えることができる。各電圧に従って、

前節で述べた T_s および T_m が一定の値をとる。従って、この場合、(7.1) 式の右辺第3項は零となる。すなわち、次のようになる。

$$F = \sigma T_s^4 + K_1(T_s^2 - T_m^2) \quad (7.1, a)$$

次に、器械定数既知の英弘型の赤外放射計をゾンデ・センサーの位置において、光源からの放射量を測定する。すなわち、(7.1) 式の左辺の F を得る。但し、この場合、放射ゾンデの受感面と放射計の受感面の大きさが異なるので、次に示す有効角度を考慮して、放射計で測定される放射量 F_r から、次式によってゾンデ・センサーに入射した放射量 F を求める。

$$F = (\varphi / \varphi_r) \cdot F_r \quad (7.2)$$

ここで、 φ は放射ゾンデ受感面の有効角度、 φ_r は放射計受感面の有効角度である。この有効角度 φ は (7.3) 式で与えられる。

$$\varphi = \frac{1}{4r^2} \left[2(l^2 + R^2 + r^2) - 2\sqrt{(l^2 + R^2 + r^2) - 4r^2 R^2} \right] \quad (7.3)$$

ここで、 l 、 R および r はそれぞれ、光源と放射計との距離、光源の半径および放射計受感面の半径である。上述の電熱器の電圧を種々変化させることによって、(T_s 、 T_m) の値およびそれに対応する F が得られ、(7.1 a) 式から K_1 の値が決定される。この K_1 は予備実験で風速によって異なることが分かったので、 K_1 の風速依存性の実験をおこなった。そこで小型風洞（物理気象研究部所有）の中に放射ゾンデのセンサーを設置し、光源（電熱器）を風洞の外に置き、電熱器近傍の風洞の壁（窓）をポリエチレン膜に置きかえた。これは光源からの放射がよく透過し、従って窓が光源によって温まることを避けるためである（光源による温度上昇は殆どなかった）。また風洞の内壁にアルミ膜を張り付けて、壁の内面、特にゾンデセンサーの後の部分の壁が光源からの放射の吸収によって温度が上昇することを避けた。このようにして風速 0 ~ 6 m/sec 範囲で実験をおこなった。一定電圧の光源の下では同一風速に対しては上述の T_s および T_m が一定となる。このようにして求めた T_s および T_m を用いて各風速に対応する K_1 が次のようにして求められる。すなわち、風速 v に対応する (7.1 a) 式の諸量を $F(v)$ 、 $T_s(v)$ 、 $T_m(v)$ および $K_1(v)$ で示すと、(7.1 a) から

$$F(v) = \sigma T_s^4(v) + K_1(v) \left[T_s^2(v) - T_m^2(v) \right] \quad (7.4 a)$$

が得られ、風速 0 の場合に対応する諸量を添字 0 で示すと、次式が得られる。

$$F_0 = (\sigma T_s^4)_0 + (K_1)_0 \left[(T_s^2)_0 - (T_m^2)_0 \right] \quad (7.4 b)$$

この場合、光源の強さ（電圧）は同じであるから $F(v) = F_0$ でなくてはならない。このことから、任意の風速のときの $K_1(v)$ は (7.4 a) および (7.4 b) 式から、次のように与えられる。

$$K_1(v) = \frac{(\sigma T_s^4)_0 - \sigma T_s^4(v)}{T_s^2(v) - T_m^2(v)} + \frac{(T_s^2(v) - T_m^2(v))_0}{T_s^2(v) - T_m^2(v)} (K_1)_0 \quad (7.5)$$

ここで $(K_1)_0$ は、上述の室内実験で得られた値である。

このようにして得られた $K_1(v)$ の風速による変化の1例を図7.3に示す。この図から分かるように、 $K_1(v)$ は風速0の場合に値から風速が増加するにつれて最初、急速に増加するが、風速がおよそ 1 m/sec を超えると、この増加は緩やかになることが分る。また風速による変化の大きさは、

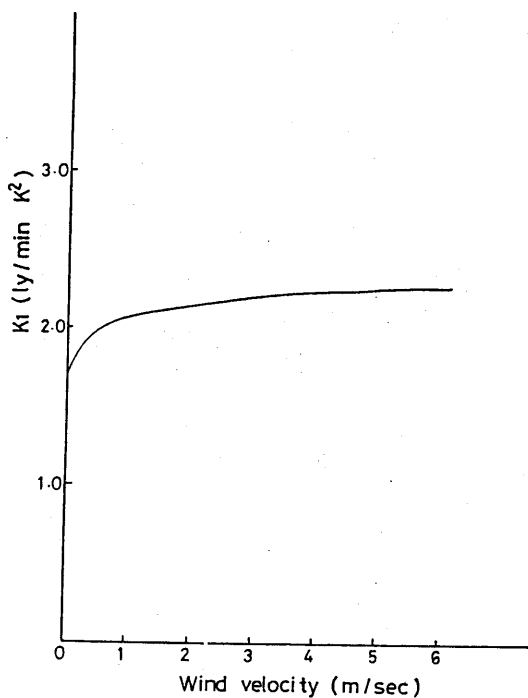


図7.3 a 下向き放射に対する K_1 の風速依存

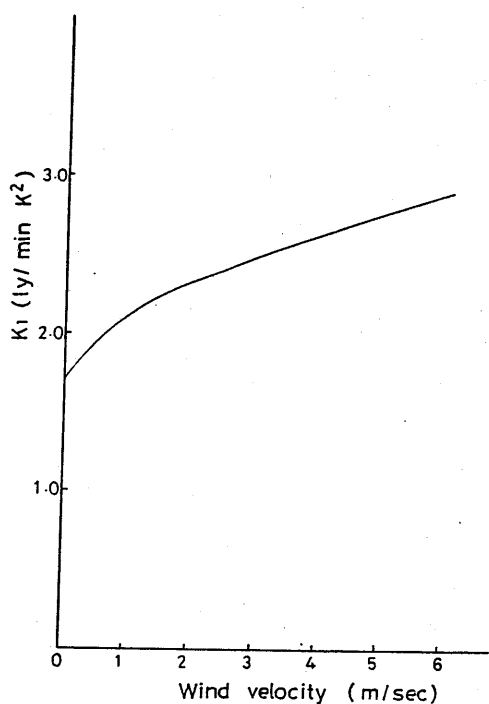


図7.3 b 上向き放射に対する K_1 の風速依存

センサーの背面に風を受ける場合（上向きフラックスを測定するセンサーの場合）がセンサーの正面に風を受ける場合（下向きフラックス・センサーの場合）よりも大きいことが分る。放射ゾンデの熱バランスに影響するのは風速で定まる流量によるものと考えられる。ゾンデが飛揚する際、ゾンデは第1近似として様な上昇速度をもつと考えられるので、センサーの受ける流量は気圧に比例して変化すると考えられる。それ故、ゾンデは上昇するにつれて、そのセンサーの受ける等価的な風速は、気圧に比例して小さくなると考えられる。放射ゾンデの信号（ T_s 、 T_m ）から放射量を求める場合、このことを考慮する必要がある（嘉納他1978）。

(ii) K_2 の決定

次に K_2 の決定法を述べる。放射ゾンデのセンサー面を上述の室内実験と同じく、光源（一定電圧の電熱器）に向ける。次に、遮へい板で交互に光源からの放射を遮えぎることによって受感面の温度 T_s の変化 $\frac{dT_s}{dt}$ が求められる。この場合、あらかじめ放射計で同一光源の放射を測定して放射ゾンデの受ける放射量を、前述の実験と同様な方法で求めておく。すると、(7.1)式から分るように、(i)の実験で K_1 の既知となった放射ゾンデでは、(7.1)式の K_2 以外の値はすべて既知となる。従って K_2 が求められる。このようにして求めた K_2 は、この研究で用いた放射計については殆ど一定の値で、その大きさは $0.01 \text{ ly} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。

7.3 観測結果

放射ゾンデのデータを解析して、中層大気を含む大気上層の放射収支を把握するためには、大気条件の一定な場合を選ぶことが必要となる。それ故、放射ゾンデ飛揚は快晴の日を選んでおこなわれた。このため、飛揚場所の南関東（高層気象台）で快晴日が多い冬季に主として飛揚がおこなわれる結果となった。この章の冒頭で述べた期間中に飛揚した放射ゾンデ10台のうち、2台はその出力（デジタルおよびアナログ信号）に原因不明の信号が入り、読み取り困難となり、また1台は放球後間もなく気球が破裂したため、データの取得が不可能となった。従って実際にデータとして取得されたものは7例である。そこで、この7例の観測値（ T_s 、 T_m ）に、気球の上昇速度を 360 m/min と仮定し、各高度で気圧に比例する等価的な速度（地上の速度を 6 m/sec とした速度）を求め、次にこの速度に対応する前節で述べた K_1 と K_2 を適用して求めた下向き、上向き赤外放射フラックスおよびネット・フラックスのうち4例を表7.1 a～7.1 dに示し、残りの3例は次節で示す。参考のため、上記4例のときに取得されたラジオゾンデによる各高度の風向・風速のデータから求められた放射ゾンデの航跡図を図7.4 a～7.4 dに示す。

7.4 中層大気における赤外放射の分布の解析例

放射ゾンデの観測に基づいて赤外放射による大気の加熱・冷却状態等を求める場合、雲等大気の状態や地表面の状態が一定であることが望ましい。第1条件の大気状態については快晴の日を選べ

表 7.1 a 上(U)、下向き(D)、およびネット(N)の赤外放射フラックス。1984年2月21日
18時39分放球 (単位: ly/min)

P (mb)	F_D	F_U	F_N	P (mb)	F_D	F_U	F_N
807	0.2511	0.4485	0.1974	123	0.0266	0.4993	0.4727
778	0.2304	0.4480	0.2176	108	0.0204	0.4981	0.4777
750	0.2137	0.4475	0.2338	95	0.0212	0.5006	0.4794
725	0.2026	0.4476	0.2450	85	0.0248	0.4987	0.4739
698	0.1914	0.4461	0.2547	76	0.0355	0.4907	0.4552
663	0.1822	0.4474	0.2652	68	0.0361	0.4881	0.4520
638	0.1726	0.4481	0.2755	59.5	0.0305	0.4857	0.4552
613	0.1668	0.4457	0.2789	54.7	0.0264	0.4793	0.4529
590	0.1598	0.4404	0.2806	49.2	0.0308	0.4733	0.4425
567	0.1531	0.4415	0.2884	43.5	0.0378	0.4672	0.4294
545	0.1423	0.4465	0.3042	39.3	0.0377	0.4623	0.4246
523	0.1305	0.4549	0.3244	35.6	0.0356	0.4568	0.4212
473	0.1154	0.4575	0.3421	32.1	0.0333	0.4526	0.4193
433	0.0997	0.4621	0.3624	28.5	0.0366	0.4487	0.4121
395	0.0848	0.4696	0.3848	25.9	0.0396	0.4453	0.4057
357	0.0672	0.4810	0.4138	23.4	0.0401	0.4430	0.4029
313	0.0517	0.4948	0.4431	21.2	0.0411	0.4442	0.4031
280	0.0355	0.5067	0.4712	19.2	0.0395	0.4417	0.4022
247	0.0339	0.5141	0.4802	17.6	0.0438	0.4404	0.3966
220	0.0354	0.5153	0.4799	16.2	0.0454	0.4344	0.3890
194	0.0408	0.5127	0.4719	14.7	0.0496	0.4312	0.3816
174	0.0378	0.5090	0.4712	13.6	0.0519	0.4232	0.3713
159	0.0353	0.5097	0.4744	(11.1)	0.0544	0.4177	0.3633
141	0.0296	0.5033	0.4737				

表 7.1 b 表 7.1 a に同じ。ただし1984年11月30日17時08分放球

(単位: ly/min)

P (mb)	F_D	F_U	F_N	P (mb)	F_D	F_U	F_N
695	0.2043	0.4813	0.2770	124	0.0161	0.3949	0.3788
672	0.1903	0.4721	0.2818	109	0.0137	0.3983	0.3846
648	0.1774	0.4629	0.2855	97	0.0116	0.3976	0.3860
626	0.1675	0.4588	0.2913	87.5	0.0089	0.4073	0.3984
605	0.1510	0.4665	0.3155	77.3	0.0101	0.3994	0.3893
583	0.1396	0.4674	0.3278	68.3	0.0155	0.3973	0.3818
562	0.1272	0.4656	0.3384	62.5	0.0255	0.3922	0.3667
542	0.1211	0.4522	0.3311	57.3	0.0277	0.3943	0.3666
523	0.1110	0.4470	0.3360	51.4	0.0292	0.3944	0.3652
503	0.1015	0.4453	0.3438	47.2	0.0283	0.3931	0.3648
484	0.0929	0.4416	0.3487	43.3	0.0321	0.3917	0.3596
465	0.0850	0.4353	0.3503	39.9	0.0312	0.3928	0.3616
430	0.0782	0.4312	0.3530	36.7	0.0325	0.3881	0.3556
411	0.0717	0.4284	0.3567	33.1	0.0352	0.3925	0.3573
392	0.0656	0.4283	0.3627	30.6	0.0368	0.3896	0.3528
374	0.0588	0.4276	0.3688	28.1	0.0508	0.3888	0.3380
357	0.0479	0.4184	0.3705	24.8	0.0514	0.3823	0.3309
302	0.0382	0.4153	0.3771	22.3	0.0520	0.3817	0.3297
274	0.0301	0.4113	0.3812	21.2	0.0385	0.3820	0.3435
234	0.0250	0.4104	0.3854	19.4	0.0416	0.3835	0.3419
210	0.0186	0.4101	0.3915	17.5	0.0440	0.3806	0.3366
178	0.0135	0.4128	0.3993	16.3	0.0431	0.3842	0.3411
160	0.0126	0.4132	0.4006	15.0	0.0471	0.3790	0.3319
139	0.0157	0.4090	0.3933	(14.3)			

表7.1 c 表7.1 aに同じ。ただし1984年12月25日17時30分放球

(単位: ly / min)

P (mb)	F_D	F_U	F_N	P (mb)	F_D	F_U	F_N
958	0.2415	0.4615	0.2200	111	0.0301	0.3704	0.3403
922	0.2274	0.4519	0.2245	101	0.0286	0.3625	0.3338
897	0.2132	0.4458	0.2326	92	0.0268	0.3638	0.3370
865	0.1994	0.4418	0.2424	84.5	0.0266	0.3607	0.3341
833	0.1824	0.4368	0.2544	76.0	0.0258	0.3589	0.3331
787	0.1636	0.4320	0.2685	68.5	0.0230	0.3563	0.3333
758	0.1441	0.4273	0.2832	62.0	0.0326	0.3464	0.3138
730	0.1286	0.4220	0.2933	56.5	0.0318	0.3500	0.3182
702	0.1169	0.4156	0.2987	51.3	0.0293	0.3428	0.3135
673	0.1084	0.4099	0.3015	46.5	0.0251	0.3471	0.3220
645	0.1005	0.4092	0.3088	41.9	0.0355	0.3355	0.3000
619	0.0916	0.4087	0.3171	38.3	0.0442	0.3389	0.2947
595	0.0824	0.4102	0.3278	35.0	0.0456	0.3296	0.2841
575	0.0764	0.4048	0.3283	31.8	0.0391	0.3363	0.2972
555	0.0749	0.4043	0.3293	28.6	0.0356	0.3297	0.2940
535	0.0713	0.4002	0.3289	26.2	0.0312	0.3338	0.3026
514	0.0668	0.4050	0.3381	23.6	0.0377	0.3302	0.2925
473	0.0590	0.4008	0.3417	21.7	0.0426	0.3301	0.2875
433	0.0510	0.3980	0.3469	19.2	0.0431	0.3326	0.2894
384	0.0455	0.3863	0.3408	17.5	0.0438	0.3273	0.2835
348	0.0397	0.3836	0.3439	16.0	0.0423	0.3272	0.2849
296	0.0365	0.3895	0.3530	14.6	0.0482	0.3251	0.2769
265	0.0329	0.3953	0.3624	13.0	0.0480	0.3247	0.2766
237	0.0284	0.3985	0.3701	11.8	0.0494	0.3221	0.2727
201	0.0262	0.3958	0.3699	10.9	0.0497	0.3235	0.2737
184	0.0245	0.4000	0.3754	10.4	0.0477	0.3177	0.2702
165	0.0291	0.3954	0.3662	9.7	0.0476	0.3241	0.2765
150	0.0302	0.3901	0.3600	9.0	0.0484	0.3217	0.2735
136	0.0297	0.3815	0.3518	8.3	0.0505	0.3301	0.2796
123	0.0306	0.3755	0.3448	7.7	0.0501	0.3283	0.2782

表7.1 d 表7.1 aに同じ。ただし1985年1月7日17時10分放球

(単位: ly/min)

P (mb)	F_D	F_U	F_N	P (mb)	F_D	F_U	F_N
972	0.2568	0.4801	0.2233	98	0.0183	0.3577	0.3394
942	0.2247	0.4491	0.2244	84.7	0.0193	0.3560	0.3367
835	0.1936	0.4261	0.2325	76.5	0.0182	0.3516	0.3335
790	0.1643	0.4132	0.2490	69.0	0.0178	0.3549	0.3372
755	0.1462	0.4093	0.2631	59.0	0.0166	0.3527	0.3361
732	0.1298	0.4028	0.2730	53.0	0.0184	0.3487	0.3302
705	0.1203	0.3879	0.2675	47.3	0.0227	0.3453	0.3226
663	0.1242	0.3808	0.2566	42.2	0.0315	0.3493	0.3177
638	0.1260	0.3805	0.2545	39.0	0.0305	0.3508	0.3203
612	0.1254	0.3871	0.2617	35.5	0.0297	0.3521	0.3223
563	0.1177	0.3869	0.2693	32.3	0.0260	0.3516	0.3256
540	0.1114	0.3884	0.2771	29.1	0.0282	0.3460	0.3177
507	0.0997	0.3910	0.2914	26.4	0.0263	0.3454	0.3191
482	0.0887	0.3910	0.3023	24.1	0.0262	0.3433	0.3171
464	0.0817	0.3886	0.3069	21.8	0.0272	0.3464	0.3192
443	0.0752	0.4016	0.3264	19.3	0.0289	0.3453	0.3164
413	0.0600	0.3911	0.3310	17.5	0.0310	0.3460	0.3150
366	0.0395	0.3840	0.3445	15.9	0.0352	0.3456	0.3104
320	0.0226	0.3550	0.3325	14.5	0.0384	0.3443	0.3059
277	0.0234	0.3693	0.3459	12.8	0.0414	0.3421	0.3008
244	0.0200	0.3738	0.3537	11.6	0.0429	0.3402	0.2972
218	0.0199	0.3830	0.3631	10.6	0.0470	0.3349	0.2878
195	0.0062	0.3751	0.3692	9.7	0.0472	0.3345	0.2873
176	0.0049	0.3699	0.3652	8.7	0.0481	0.3357	0.2876
154	0.0035	0.3627	0.3594	8.1	0.0491	0.3412	0.2921
137	0.0068	0.3482	0.3414	7.5	0.0525	0.3424	0.2899
120	0.0100	0.3447	0.3347	6.9	0.0576	0.3367	0.2791
108	0.0145	0.3518	0.3372	6.5	0.0519	0.3380	0.2862

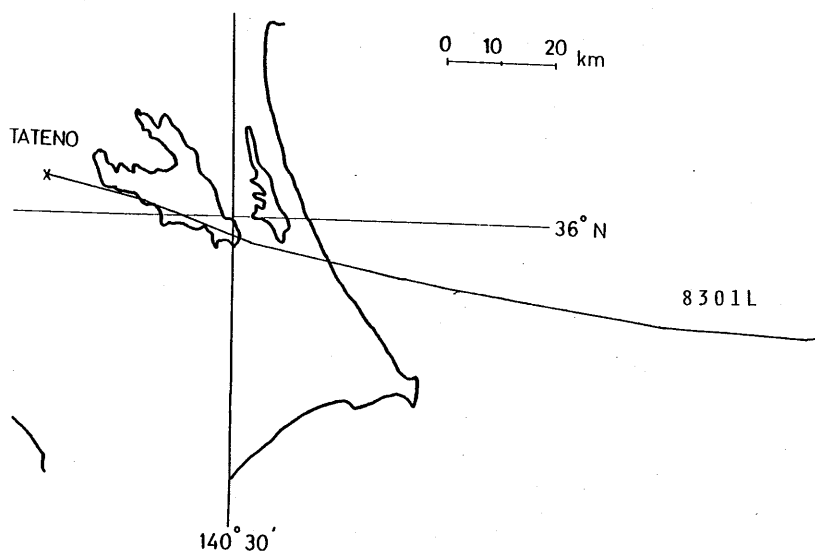


図 7.4 a 放射ゾンデの航跡図。1984年2月21日

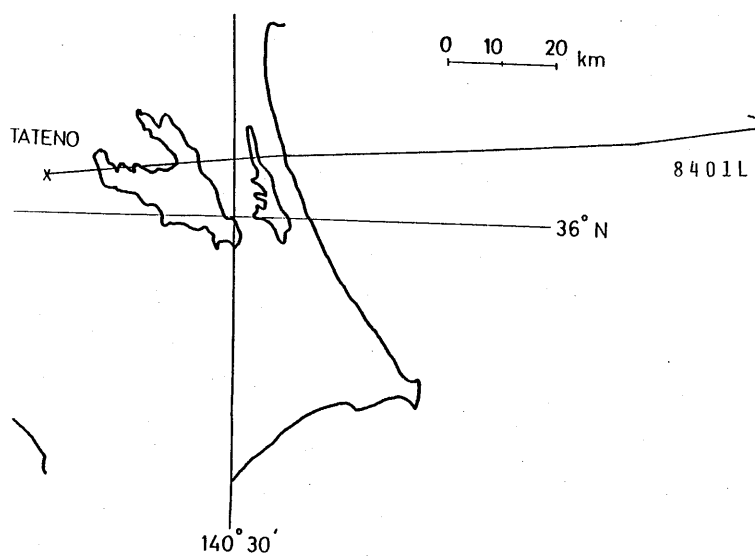


図 7.4 b 放射ゾンデの航跡図。1984年11月30日

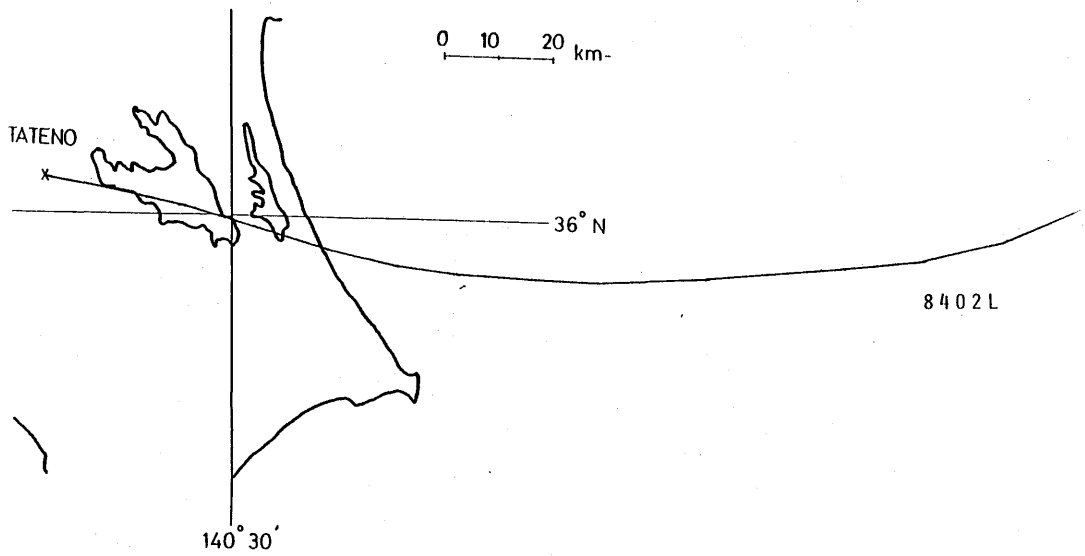


図 7.4 c 放射ゾンデの航跡図。1984年12月25日

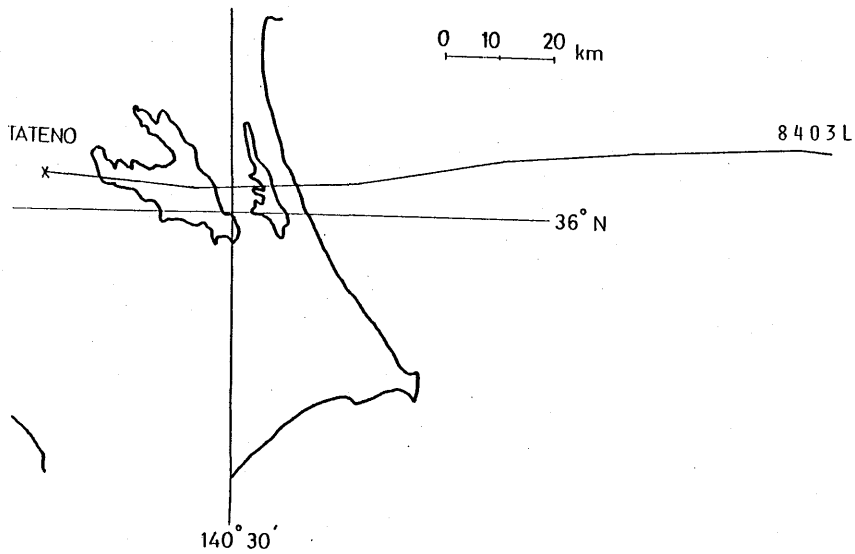


図 7.4 d 放射ゾンデの航跡図。1985年1月7日

ばよいが、第2の地表面の状態は快晴の多い冬季の南関東では満足されない。すなわち、前節の航跡図に示されるように、ゾンデはこの時期、通常、放球後約30分で海洋上に出る。この時期におけるこの地域の海面温度は図7.5に示されるように11°Cを超える。一方、日没後のこの地域（高層

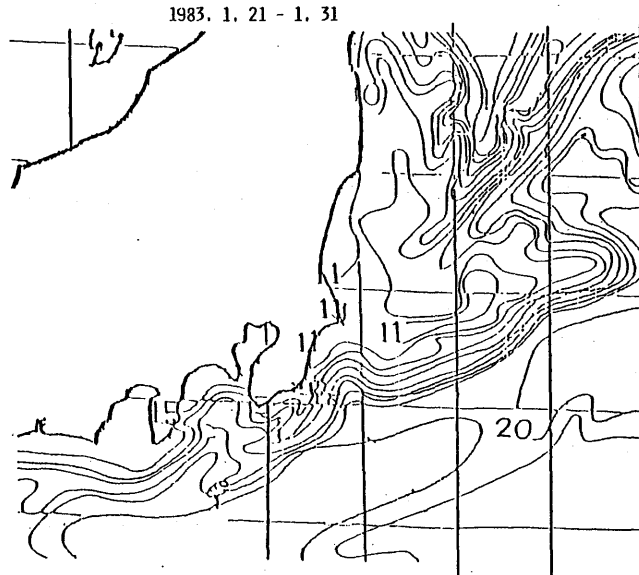


図7.5 1983年1月21日から1月31日の平均海面水温（漁海況速報による）。

気象台)の地表面温度は氷点近い、またはそれ以下である。すなわち、陸地と海洋の表面温度差は10°~11°Cに達するので、上向き放射はこの表面温度差を補正することが必要となる。そこで、この補正を次のようにおこなった。すなわち、観測のおこなわれた場所および日時の近傍でなされた気温や湿度の高度分布の観測値を用い、陸地および海洋上での上向き赤外放射 $F_l(Z)$ および $F_o(Z)$ を計算する。この場合、地表面温度としては、地上気温より3°C低い値を採用し、海面温度は同時期は於けるゾンデ飛揚海域の海面温度の平均値を使用した。また各高度における上向き放射への陸地の部分からの寄与の割合を Q_l とする。これらの $F_l(Z)$ 、 $F_o(Z)$ および $Q_l(Z)$ から得られる次の因子

$$F_l(Z) / [F_l(Z) Q_l(Z) + F_o(Z) \{ 1 - Q_l(Z) \}]$$

を前節で述べた風速補正のなされた観測値 $F_{obs}(Z)$ に乗じて、これを陸地上の値に変換した。

このようにして、観測値に風速や地表面温度差の補正をほどこした結果を図7.6 a~7.6 cに示す。補正前の値は表7.2 a~cに示した。しかし、霞ヶ浦等もあり、このような補正は必ずしも十分ではない。これらの図で、・印は観測値で、実線はエーロゾルのない晴澄大気の場合の計算であ

表7.2 a 上、下向き、およびネットの赤外
放射フラックス。1983年1月28日

(単位: ly/min)

P (mb)	F_D	F_U	F_N
943.0	0.3381	0.4632	0.1251
911.0	0.3100	0.4713	0.1613
845.0	0.2798	0.4779	0.1981
813.0	0.2670	0.4500	0.1830
750.0	0.2552	0.4210	0.1658
691.0	0.2150	0.4140	0.1990
611.0	0.1653	0.4041	0.2388
490.0	0.1136	0.3736	0.2600
381.0	0.0782	0.3609	0.2827
340.0	0.0804	0.3500	0.2696
303.5	0.0683	0.3439	0.2756
254.0	0.0683	0.3422	0.2739
201.0	0.0670	0.3299	0.2629
151.0	0.0663	0.3328	0.2665
101.0	0.0622	0.3287	0.2665
80.2	0.0455	0.3216	0.2761
71.5	0.0506	0.3297	0.2791
60.3	0.0455	0.3331	0.2876
51.0	0.0533	0.3286	0.2753
40.4	0.0557	0.3307	0.2750
35.9	0.0547	0.3341	0.2794
30.3	0.0641	0.3286	0.2645
24.5	0.0703	0.3257	0.2554
19.7	0.0638	0.3238	0.2600
17.6	0.0621	0.3248	0.2627
15.7	0.0741	0.3333	0.2592
14.1	0.0690	0.3301	0.2611
11.8	0.0793	0.3223	0.2430
10.1	0.0902	0.3313	0.2411

表7.2 b 表7.2 aに同じ。
ただし1983年1月31日

(単位: ly/min)

P (mb)	F_D	F_U	F_N
983	0.3428	0.4738	0.1310
950	0.3148	0.4709	0.1561
884	0.2873	0.4703	0.1830
853	0.2678	0.4510	0.1832
795	0.2538	0.4440	0.1902
743	0.2316	0.4385	0.2069
692	0.2196	0.4275	0.2079
593	0.1753	0.4222	0.2469
502	0.1231	0.4010	0.2779
398	0.0941	0.3674	0.2733
343	0.0705	0.3581	0.2876
308	0.0651	0.3370	0.2719
258	0.0501	0.3293	0.2792
202	0.0534	0.3415	0.2881
150	0.0432	0.3333	0.2901
99	0.0381	0.3368	0.2987
80.7	0.0389	0.3355	0.2966
69.4	0.0396	0.3391	0.2995
59.8	0.0398	0.3358	0.2960
49.0	0.0347	0.3556	0.3209
40.1	0.0406	0.3382	0.2976
34.6	0.0341	0.3447	0.3106
25.5	0.0458	0.3468	0.3010
20.4	0.0478	0.3475	0.2997
17.6	0.0441	0.3508	0.3067
15.9	0.0480	0.3541	0.3061
14.3	0.0409	0.3543	0.3134
12.2	0.0483	0.3478	0.2995
10.1	0.0457	0.3485	0.3028

表7.2 c 表7.2 aに同じ。

ただし、1983年3月11日

(単位: ly/min)

$P(mb)$	F_D	F_U	F_N
977	0.3784	0.5289	0.1505
943	0.3428	0.5098	0.1670
911	0.3416	0.4884	0.1468
848	0.2881	0.4712	0.1831
788	0.2424	0.4744	0.2320
760	0.2434	0.4697	0.2263
704	0.2161	0.4444	0.2283
600	0.1537	0.4201	0.2664
508	0.1214	0.4058	0.2844
408	0.0845	0.3685	0.2840
353	0.0742	0.3581	0.2839
303	0.0529	0.3464	0.2935
244.2	0.0328	0.3684	0.3356
199.8	0.0423	0.3533	0.3110
146.5	0.0426	0.3418	0.2992
99.8	0.0424	0.3490	0.3066
80.7	0.0477	0.3431	0.2954
69.0	0.0211	0.3430	0.3219
58.8	0.0296	0.3401	0.3105
50.1	0.0115	0.3531	0.3416
40.3	0.0401	0.3568	0.3167
34.4	0.0404	0.3508	0.3104
24.5	0.0349	0.3498	0.3149
19.6	0.0414	0.3540	0.3126
18.6	0.0417	0.3568	0.3151
16.0	0.0462	0.3573	0.3111
13.8	0.0472	0.3578	0.3106
11.8	0.0483	0.3601	0.3118
10.5	0.0566	0.3568	0.3002

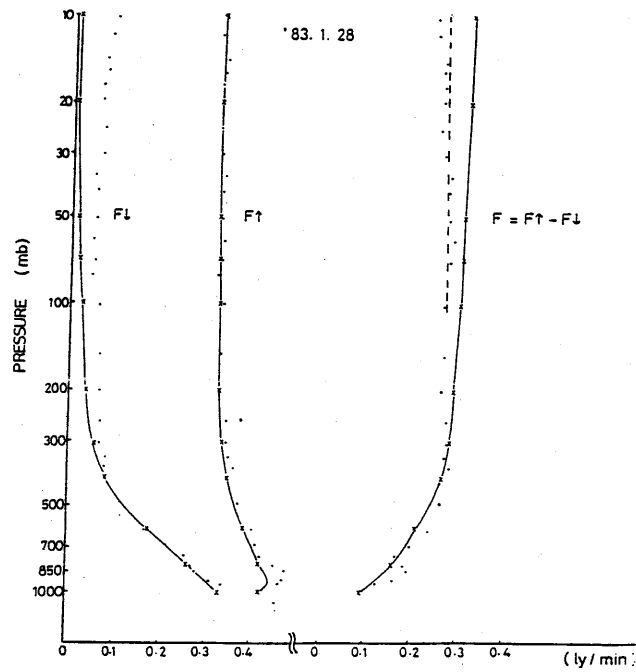


図 7.6 a 風速および地表面温度差効果を補正した放射フラックス。1983年1月28日

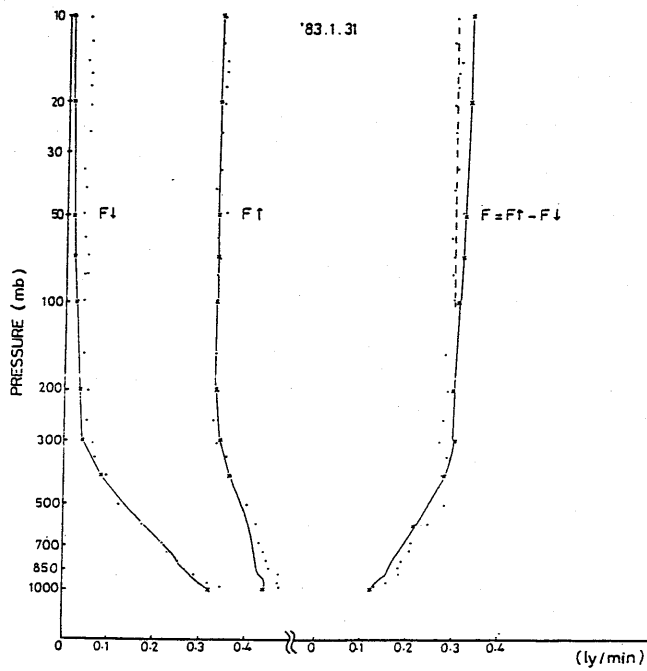


図 7.6 b 図 8.6 a に同じ。ただし、1983年1月31日

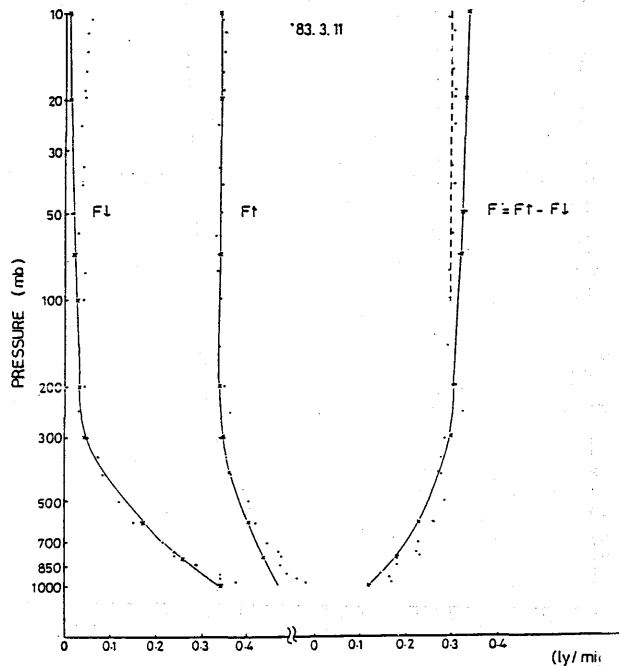


図 7.6 c 図 7.6 a に同じ。ただし、1983 年 3 月 11 日

る。これらの図から、高度 200mb 以上の中層大気領域をみると、下向き放射フラックスの観測値は計算値に較べてかなり大きく、一方上向き放射フラックスは両者はほぼ等しい。その結果、上向きフラックスと下向きフラックスとの差、すなわち放射のネットフラックスは観測値の方が計算値より小さくなっている。すなわち、宇宙空間への赤外放射エネルギーの流出量は、清澄大気の場合に比較して小さくなっている。この差異の原因としてはエアロゾル等の効果が考えられるがまだはっきりしたことは言えない。ここでは、ネット・フラックスの観測値の平均が図の点線で表わされるとし、100～10mb の層の赤外放射による大気の加熱冷却率を次の (7.6) 式によって計算した。

$$dT/dt = +(g/C_p) dF_N / dp \quad (7.6)$$

ここで g は重力加速度、 C_p は空気の定圧比熱、 T は気温で、 F_N は放射のネット・フラックスで、 P は気圧である。この計算結果と、上述のエーロゾルのない清澄大気の場合の赤外放射による大気の加熱・冷却率と比較したのが表 7.3 である。この表から分るように、清澄大気の場合、大気はおよそ $1.35^\circ\text{C}/\text{day}$ で冷却しているが、観測値（実際の大気の場合）では、大気は逆に $0.2 \sim 0.4^\circ\text{C}/\text{day}$ の加熱になっていることが分る。

表 7.3 ネット・フラックスおよび冷却率に対する観測
と計算（エアロゾル無しとした場合）の比較

Time	Procedure	10~30mb		10~100 mb	
		ΔF_N (ly/min)	dT/dt (°C/day)	ΔF_N (ly/min)	dT/dt (°C/day)
Jan. 28 1983	Obs.	0.0013	0.38	0.0060	0.39
	Cal.	-0.0078	-2.30	-0.0207	-1.35
Jan. 31 1983	Obs.	0.0011	0.32	0.0049	0.32
	Cal.	-0.0078	-2.30	-0.0207	-1.35
Mar. 11 1983	Obs.	0.0007	0.21	0.0030	0.20
	Cal.	-0.0079	-2.33	-0.0208	-1.36

参 考 文 献

Shimizu, M., A.Yata and Y. Sekiguchi (1972): The International Radiometersonde Intercomparison Program (1970~1971). IAMAP, p57~65

嘉納宗靖・広田道夫(1978): 輻射ゾンデ・日射ゾンデの問題点 気象庁技術報告第93号、361~363

第 8 章 航空機による放射観測*

8.1 はじめに

この章では、太陽放射を日射、赤外波長域の地球放射を赤外放射と呼び、両方を含めた総称を放射とする。

成層圏大気の放射収支を直接測定する方法として、前章で述べた日射ゾンデ・赤外放射ゾンデによる測定があるが、測定精度・解析方法等になお問題が残る。また赤外放射ゾンデによる測定では、日射の影響をさけるため夜間しか観測できない。航空機による放射測定の目的は、対流圏上端部における放射収支量をおさえ、放射ゾンデ観測の比較基準値を得るとともに、地表面に到達する放射に対する対流圏大気の影響を評価することにより、地上での放射観測から成層圏における放射収支の推定を可能ならしめようとするものである。もちろん直接的には、対流圏内での放射収支に及ぼす対流圏エーロゾルや水蒸気・二酸化炭素等の効果を測定し、対流圏内のエネルギー収支における放射の役割を明らかにする。

本章では、航空機を用いて行った、放射フラックス、エーロゾル等の高度分布の測定について述べる。

8.2 測定要素及び測器

この観測では、日射と赤外放射の水平面フラックス、エーロゾルの粒径別数密度、及び気温・湿度の高度分布測定に重点をおいた。用いた測器及び測定要素は表 8.1 にまとめている。それ以外に飛行高度、飛行位置（緯度・経度）、飛行速度、方位及び航空機の動揺（ピッチ角、ロール角、ヨー角）等のフライトデータについては、使用した航空機（セスナ 404）に装備されている高度計、ロラン航法装置、オメガ航法装置及び動揺測定装置による測定値を記録した。これ等のフライト・データは、後述の下向き日射フラックス測定における日射計受光面の傾きに対する補正に利用される。また、飛行地点の確認と、状況モニターのために家庭用 VTR を搭載した。昭和 58・59 年度に使用した家庭用 VTR は高高度ではうまく作動しない例もあった。

8.3 観測要領

日射・赤外放射の下向き及び上向き水平面フラックスを測定するための日射計・赤外放射計は、

* 浅野正二，忠鉢 繁，塩原匡貴，藤木明光：高層物理研究部

村井潔三，小林正治，神子敏朗：元高層物理研究部

関根正幸：気象庁観測部

表 8.1 測器及び測定要素

測 器	個数	特 性	要 素 及 び 備 考
1. 放射測器			
(I) 全波長域全日射計 (EKO, MS-42型)	2台	$0.28\mu\text{m} < \lambda < 2.9\mu\text{m}$	上・下向き太陽放射フラックス
(II) 近赤外域全日射計 (EKO, MS-800型)	2台	$0.715\mu\text{m} < \lambda < 2.9\mu\text{m}$	上・下向き太陽放射フラックス
(III) 赤外放射計 (EPPLEY, PIR)	2台	$4\mu\text{m} < \lambda < 50\mu\text{m}$	上・下向き赤外放射フラックス
2. エーロゾル測器			
(I) パーティクル・カウンター (RION, KC-01型)	1台	粒径 $0.3\mu\text{m}$ 以上 5段階	エーロゾルの粒径別数密度 昭和57年度観測のみ
(II) ダスト・カウンター (DIC, PM 730-S 16P)	1台	粒径 $0.3\mu\text{m}$ 以上 15段階	エーロゾルの粒径別数密度 昭和58・59年度観測
3. 気温・湿度測器			
(I) 白金抵抗温度計 (MAKINO)	1台	$-65^{\circ}\text{C} < T < 35^{\circ}\text{C}$	気温 航空機用温度計シェルタ付
(II) 露点温度計 (EG&G, Model 137-C3)	1台	$-100^{\circ}\text{C} < T_d < 100^{\circ}\text{C}$	露点温度・航空機用 昭和57・59年度観測
(III) ライマン- α 湿度計 (ERC, Model BLR)	1台	高速応答	絶対湿度 昭和58年度観測のみ
(IV) 赤外放射温度計 (BARNES, IT-4)	1台	$-40^{\circ}\text{C} < T < 100^{\circ}\text{C}$	$10\mu\text{m}$ 赤外窓領域の放射輝度温度 昭和59年度観測のみ

それぞれの受光面が水平で、視野（半球）をさまたげる障害物がない様に、航空機胴体の外側上部及び下部に平行に取り付ける（図 8.1）。エーロゾル測定用の試料空気は航空機排気に汚染されない様に、機体前部の窓からマニホールドとパイプを通して採取し、カウンターに導びいた。

放射収支に及ぼすエーロゾルや大気成分の効果を調べるためには、観測は雲一つない快晴日に、太陽高度の変化の少ない南中時間をはさんで、地表面の放射特性（日射反射率、赤外放射射出率等）



図 8.1 観測に使用したセスナ 404 型航空機
機体上面及び底面に日射計・赤外放射計が平行に取り付けてある。

が均一な地域の上空で、それ等の成分の高度分布を測定することが望ましい。本研究の観測では、この条件をほぼ満し、かつ、高層気象のラジオゾンデ・データや他の地上観測データが得やすい観測地域として、筑波地域上空と鹿島灘上空を選んだ。高度分布を得るために、地上 300 m（海面上 150 m）から約 6 km の間に 7～8 の高度を選び、各高度で約 4 分間（水平距離で約 20 km）のレベル・フライトを行い、その間の平均値と分散をとった。現実には、観測時間を通して一片の雲もない観測日を選定することは困難であり、観測途中で雲が発現した場合は、データの選別により極力、雲の影響を除いた。

8.4 測定誤差

航空機観測において水平面放射フラックスの測定精度に及ぼす影響としては、上述の雲以外に航空機の動揺等による放射計受光面の水平面からの傾きや、太陽高度変化、放射測器の温度特性などの要素がある。

(1) 日射計受光面傾斜に対する補正

航空機はレベル・フライトの場合でも、機体を完全に水平に保って飛行することは困難で、一般には機首を数度程上に傾けて飛行する（ピッチング）。更に機体中心軸を回転軸として左右にはば周期的に揺れる（ローリング）。これ等の動揺の度合は、その時の航空機に相対的な風向・風速によって変わってくるが、いずれにしても機体に平行に取り付けられた日射計の受光面と水平面との成す角は、機体の動揺によって絶えず変化する。通常、たかだか数度の傾斜であるが、この傾きは、特に太陽高度が低い場合の下向き日射フラックスの測定には深刻な影響を及ぼす。例えば、太陽高度が 30°

の場合、受光面の 5° の傾きは、直達日射成分に対して約 $\pm 15\%$ の違いをもたらす。

本研究では、日射計受光面の傾きに対する補正は、下向き日射フラックスの直達成分に対してのみ施した。下向きフラックスの散乱成分及び上向き日射フラックス（反射フラックス）に対しては受光面の数度の傾きに対する影響は小さいとして無視した。但し、上向き反射フラックスに対するこの仮定は、穏やかな水面上での観測の様に、太陽光の整反射がある場合には誤差を大きくする。以下、下向き水平面日射フラックス測定における日射計受光面傾斜の影響補正について概説する。

今、真の（水平な受光面で測った）下向き日射フラックス G を、直達成分 I と散乱成分 D とに分けて

$$G = I \cdot \cos \theta_0 + D \quad (8.1)$$

と表わす。ここに θ_0 は、太陽天頂角であり、太陽高度角 h_0 とは $h_0 = 90^\circ - \theta_0$ の関係がある。

次に、実際の受光面の法線方向と太陽光の入射方向との成す角を i とすると（図8.2）、この受光面で測定される日射フラックスは、

$$G' = I \cdot \cos i + D' \quad (8.2)$$

ここでは、 $D' = D$ と仮定する。更に、水平面日射フラックスに対する散乱日射成分の割合、

$$r = D/G \quad (8.3)$$

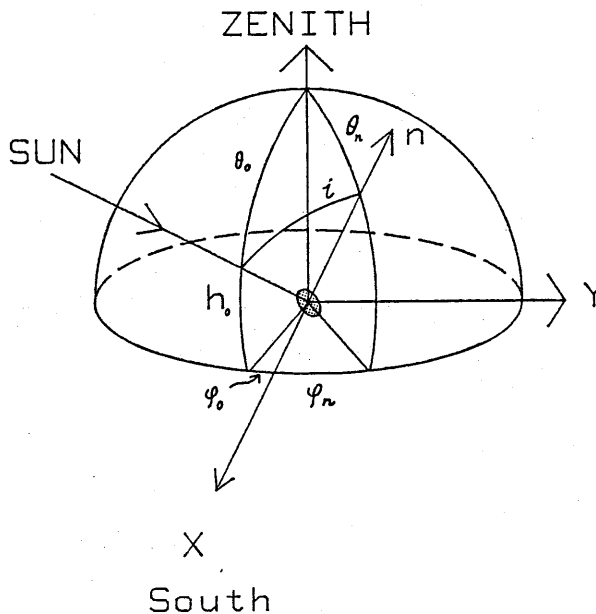


図8.2 入射太陽光線と傾斜受光面の幾何学関係、
 n は、受光面の法線方向を示す

が、各高度毎に既知であるとする、式(8.1)、(8.2)及び(8.3)より、求める水平面日射フラックス G は、観測値 G' を用いて

$$G = G' \cdot \eta / (1 + r(\eta - 1)) \quad (8.4)$$

と表わせる。ここに、 η は、受光面傾斜に対する補正係数であり、

$$\eta = \cos \theta_o / \cos i \quad (8.5)$$

で定義される。

角度 i は、太陽方向及び受光面の法線方向の天頂角と方位角を用いて

$$\cos i = \cos \theta_n \cdot \cos \theta_o + \sin \theta_n \cdot \sin \theta_o \cdot \cos \varphi \quad (8.6)$$

但し、

$$\varphi = |\varphi_n - \varphi_o|$$

と表わせる(図8.2参照、Kondratyev, 1977)。

従って、問題は、ピッチング、ローリング、ヨーイング等の航空機の動揺角を使って、角度 i を評価することに帰する。観測に使用した航空機・セスナ404(昭和航空K.K)に装備されている動揺測定装置(ジャイロ)は、鉛直ジャイロと方向ジャイロを組合せたものである。ピッチ角 θ_p 、及びロール角 θ_R は、鉛直ジャイロで測定されるが、この場合基準は鉛直(重力)方向となる。ヨー角 θ_Y は、方向ジャイロで測られ、初期設定された方位が基準となる。受光面の法線の天頂角 θ_n は、ピッチ角 θ_p とロール角 θ_R の関数として、

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{\tan |\theta_p|}{\cos \varepsilon} \right) \quad (8.8)$$

但し、

$$\tan \varepsilon = \frac{\tan |\theta_R|}{\tan |\theta_p|} \quad (8.9)$$

と表わせる。

他方、法線の方位 φ_n は、初期設定方位と角 ε 及びヨー角 θ_Y の和として与えられる。以上の様に、動揺計出力(θ_p 、 θ_R 及び θ_Y)から、補正係数 η が求まり、比 r が既知であれば、下向き水平面日射フラックスは(8.4)式により評価できる。比 r は、同時に測定されたエーロゾルの高度分布(後述)と地上での直達及び水平面日射フラックス観測値とを参考にしたモデル計算により、各高度毎に予め設定したが、この値の多少の不確かさは、 G の評価にそれ程敏感ではない。

航空機動揺に対する補正の一例を図8.3に示す。図中、○及び△は、全波長域の下向き日射フラックスをそれぞれ北向き及び南向きに飛行して測った値の平均値を示す。これ等の測定値に、日射計受光面の傾斜に対する補正、及び次項(2)と(3)で述べる太陽高度変化と日射計温度特性に対する補正を施した値が●及び▲で印で示されている。

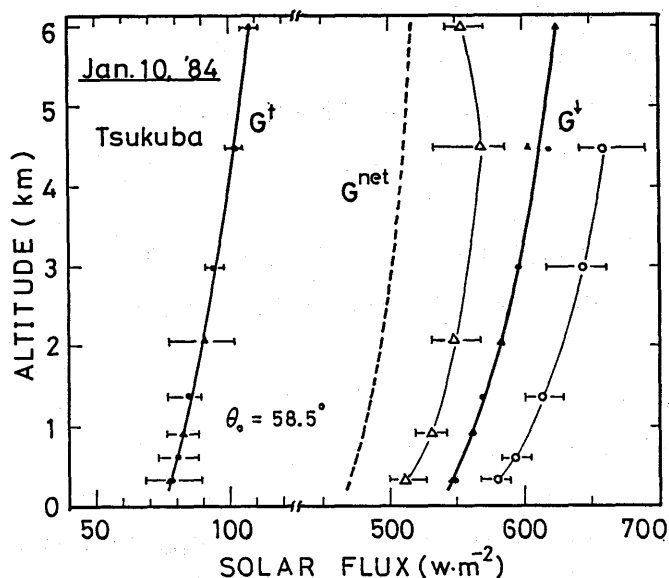


図 8.3 全波長域の上向き $G^{\uparrow}$ 、下向き $G^{\downarrow}$ 及び正味 $G^{net} (= G^{\downarrow} - G^{\uparrow})$ 日射フラックスの高度分布。下向きフラックスの測定値 (○：北向き飛行、△：南向き飛行) に対して航空機動揺、太陽高度変化及び日射計温度特性の補正を施した値を●、▲で示す。誤差バーは、測定値の最大・最小の範囲を示す。1984年1月10日、筑波上空

(2) 太陽高度変化に対する補正

大気における放射収支を見積るためには、高度の異なる、従って、測定時間の異なる放射フラックスの観測データを、ある同一の太陽高度に対する値に直して比較する必要がある。本研究における観測は、太陽高度変化の少ない南中時前後に行なわれたが、それでも一回の観測に要する約1時間半の内に、太陽高度は3～4°変化する。各測定時刻における太陽高度は、「惑星位置略算式」(海上保安庁水路部、1982)により算出し、全データを平均太陽高度での値に規格化した。規格化は、大気の放射伝達特性が、太陽高度角の2～3°の違いに依らないという仮定のもとに、大気に入射する太陽放射フラックスの量を、実際の太陽高度との違いに応じて変化させることにより行なった。この単純な方法は、太陽高度が更に低い ($h_0 \leq 20^\circ$) 場合には誤差を大きくする恐れがある。

(3) 放射測器温度特性

機体外に取りつけられた放射測器は、高度を変えての観測の間、幅広い範囲の温度変化を受ける。日射計は個体毎に異なる温度特性を持つので、この温度変化に伴う出力変化に対する補正を施す必要がある。観測に用いた全波長域全天日射計と近赤外域全天日射計の温度特性を、図 8.4 に示した。

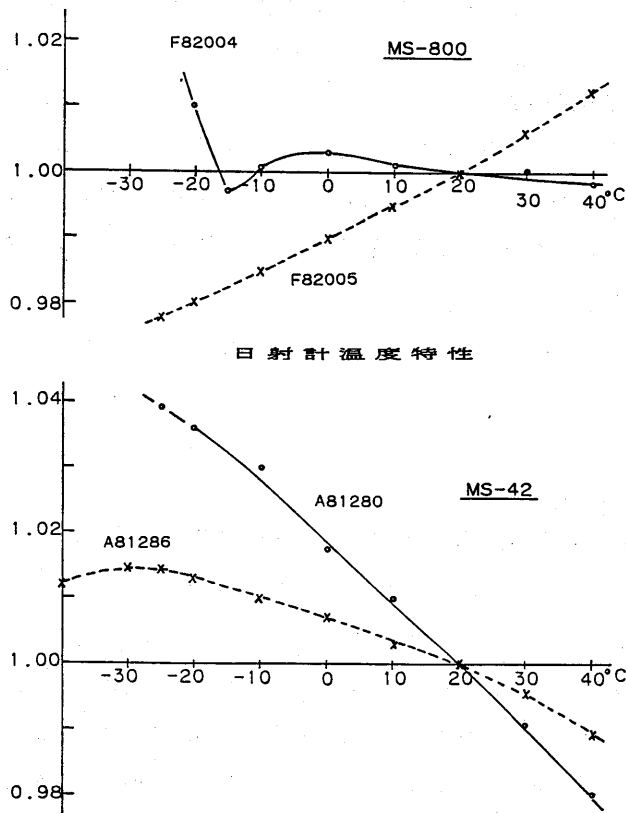


図 8.4 全波長域全天日射計 (MS-42 型) 及び近赤
外域全天日射計 (MS-800) の温度特性

個体によっては、低温で急に特性の変るものもある。この原因は、受光板と熱電堆の間の接着剤の特性変化によるものと考えられている。これ等の日射計は、元来地上観測用のもので、航空機観測用に特別調整されたものではないので、使用に問題が残る。

一方、赤外放射フラックスを測定する PIR 赤外放射計は、それ自体温度補償回路を有しているが、カバーする温度範囲は、 -20°C から 40°C の間であり、この範囲を越えた更に低温に対しては、内蔵されている水銀電池の性能低下などにより温度補償が正常に機能しない恐れがある。この PIR には、日射を反射し、波長 $4 \sim 50 \mu\text{m}$ の赤外放射のみを透過する様に、干渉フィルターをコーティングしたシリコンドームが付いている。このドームは完全に太陽放射を反射することなく、一部日射を吸収し、ドームが暖たまることにより日中の赤外放射の測定に 10% 前後の誤差をもたらす (Enz et al. 1975, Weiss 1981, Ryzner 1982)。

但し、航空機使用の場合には、高速で流れる空気によりドームが冷され、放射計本体との温度差が小さくなるために誤差は小さいとする試験結果がある (Albrecht et al, 1974, 1977)。

本研究では、これ等の試験結果を考慮して、赤外放射フラックス測定に対する日射の影響は無視した。

(4) 気温測定に対する動熱効果

機外に突き出した温度計により指示される温度は、高速で温度計にぶつかる空気のもつ動圧、即ち運動エネルギーが熱に変換されるために、実際の気温より幾分高目になる。空気を非圧縮完全流体と見なせば理論的には動熱効果の大きさを見積ることができる。即ち、気圧 p 、空気密度 ρ 、航空機の対空速度 v とすれば、総圧 P は、

$$P = p + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (8.10)$$

となる。

真の気温 T_a と温度計の出力温度 T_r との間には断熱過程の仮定により、

$$T_a \cdot p^{-(\gamma-1)/\gamma} = T_r \cdot P^{-(\gamma-1)/\gamma} \quad (8.11)$$

なる関係が成り立つ。ここに指数 γ は、空気の定圧比熱と定積比熱の比である。

式(8.10)のうち $\frac{1}{2} \rho v^2$ の項が動熱効果をもたらす項であるが、実際にこの項の寄与のどれ程の割合が、温度計出力に温度として交換されるかは、温度計の構造や機体への取り付け方等により異なる。この変換係数を決定する一つの方法は、同一高度(気圧)で航空機の飛行速度を変えて、温度計の出力変化を見ることが考えられる。本研究で用いた白金抵抗温度計に対しては、変換係数の信頼できる値が、未だ決定されていないので、本報告では温度計の出力値をそのまま掲載した。なお、航空機観測と同日のラジオゾンデ・データと比較すると、動熱効果により白金抵抗温度計による値は、2～4℃高めに出自している。

8.5 観測概況

昭和57年度観測

- ① 1983年1月13日、12:15～13:45 筑波上空 冬型の気圧配置 快晴
観測途中で片積雲発現(雲量1、雲底高度～2km、雲厚～200m)、エーロゾル濃度欠測
- ② 1983年1月14日、11:00～12:35 筑波上空 冬型の気圧配置 快晴

昭和58年度観測

- ① 1984年1月10日、11:24～12:51 筑波上空 弱い冬型、快晴、明け方気温の強い接地逆転、観測時にも、約500mの高度まで、ヘイズが覆っており、地上視程悪し。
- ② 1984年1月11日、10:00～11:23 筑波上空 冬型強まる、快晴
観測後半に、片積雲発現(雲量～1、雲頂高度～2km)

- ③ 1984年1月11日、11:35~13:10 鹿島灘上空 ②に引続いての観測、南方九十九里沖及び東方数十km沖に層積雲、観測区域はほぼ快晴、但し時々片積雲（雲量1~2）。

昭和59年度観測

- ① 1984年12月19日、10:00~11:10、鹿島灘上空 移動性高気圧張出し、接地混合層（高度~1.5 km）発達。観測後半に片積雲発現（雲量~1）。日射ゾンデ同時観測。
- ② 1984年12月19日、11:30~12:45、筑波上空 ①に引続いての観測、片積雲増える（雲量2~3）、高度約6 kmで、粒径~2 μ m附近のエーロゾル濃度の急増。観測終了後、絹雲広がる。

8.6 測定結果

(1) 放射フラックス高度分布

航空機観測によって得られた、気温、湿度、上向き及び下向きの水平面放射フラックスの高度分布を、前節で述べた各観測毎に表8.2~表8.8に示す。表中の値は、各高度での約4分間（水平距離約20km）のレベル・フライト測定の平均値を表わす。但し、雲の影響があると思われるデータは、選別し除いた。全波長域及び近赤外域の下向き日射フラックスには、8.4節で述べた各種の補正済みであるが、気温は、白金抵抗温度計の出力温度そのままである。

(2) エーロゾルの粒径別濃度の高度分布

放射と同時に測定されたエーロゾル粒径別濃度の高度分布を、放射フラックスの観測に対応して表8.9~表8.14に示す。但し、1983年1月10日（筑波）の観測では、パーティクル・カウンター不

表8.2 1983年1月13日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 (km)	気温* [°C]	露点温度 [°C]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤 外 放 射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.32	7.3	-2.7	454	66	247	49	235	357	観測時間 12:15~13:45
0.61	4.3	-3.6	480	69	252	50	221	345	
0.91	2.2	-33.2	484	73	267	49	208	341	
1.37	-0.8	-35.0	495	78	272	49	190	333	平均太陽高度 h ₀ = 28.5°
2.29	-7.6	-38.5	516	81	284	50	150	305	
3.17	-10.2	-45.2	535	89	300	49	132	303	
4.97	-21.5	-51.0	550	95	301	49	93	291	雲量 Cu 1
5.83	-27.3	-55.5	556	97	302	49	87	290	

* 気温：動熱効果の補正なし

表 8.3 1983年1月14日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温 * [°C]	露点温度 [°C]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤 外 放 射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.32	4.5	- 9.0	533	73	291	55	215	340	観測時間 11:00~12:35 平均太陽高度 h ₀ = 31.0° 雲量 0
0.61	1.7	- 9.2	534	75	294	54	198	327	
0.90	- 0.9	-10.6	543	77	300	55	196	318	
1.33	- 4.9	-12.9	553	79	312	53	168	307	
2.20	-11.7	-19.7	583	82	322	52	130	285	
3.08	-15.5	-41.3	600	89	334	52	106	283	
4.94	-21.2	-49.0	621	105	341	57	77	279	
5.87	-26.2	-53.4	634	108	349	58	74	267	

* 気温：動熱効果の補正なし

表 8.4 1984年1月10日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温 * [°C]	絶対湿度 [g/m ³]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤 外 放 射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.31	-	2.9	547	77	267	52	222	344	観測時間 11:24~12:51 平均太陽高度 h ₀ = 31.5° 雲量 0
0.61	-	1.8	555	80	272	53	212	337	
0.90	-	1.4	562	82	277	53	204	333	
1.35	-	1.1	570	84	282	53	188	322	
2.07	-	0.9	584	90	290	54	165	308	
2.96	-	-	597	95	297	53	144	295	
4.51	-	-	612	102	303	53	117	287	
6.00	-	-	626	108	307	52	88	274	

* 気温：欠測

表 8.5 1984年1月11日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温 * [°C]	絶対湿度 [g/m³]	全波長域日射 [W/m²]		近赤外域日射 [W/m²]		赤 外 放 射 [W/m²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.31	5.1	2.3	499	71	251	50	217	329	観測時間 10:00~11:23
0.61	2.6	1.7	505	72	259	51	204	319	
0.92	- 0.3	1.5	530	73	265	49	191	313	平均太陽高度 h ₀ = 29.5°
1.38	- 3.2	1.1	531	76	267	50	173	303	
2.10	- 8.6	0.9	546	80	276	49	153	293	雲量 Cu 1
3.07	-14.9	-	565	87	288	51	120	282	
4.61	-22.5	-	592	98	300	52	91	279	
6.15	-28.5	-	594	102	303	53	78	275	

* 気温：動熱効果補正なし

表 8.6 1984年1月11日 鹿島灘上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温 * [°C]	絶対湿度 [g/m³]	全波長域日射 [W/m²]		近赤外域日射 [W/m²]		赤 外 放 射 [W/m²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.16	7.3	2.3	531	44	261	18	225	364	観測時間 11:35~13:10
0.31	5.9	2.2	536	43	264	17	218	355	
0.61	2.9	1.9	546	43	271	17	203	344	平均太陽高度 h ₀ = 31.0°
0.90	- 0.2	1.7	556	45	276	16	197	341	
1.34	- 3.8	1.3	567	48	282	16	178	326	雲量 Cu 2
2.09	- 9.7	0.9	584	52	293	16	157	317	
3.01	-16.1	-	602	57	305	17	126	299	
4.52	-22.4	-	624	66	318	20	87	291	

* 気温：動熱効果補正なし

表 8.7 1984年12月19日 鹿島灘上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温 * [°C]	露点温度 [°C]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤 外 放 射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.15	9.6	- 7.4	496	38	232	16	224	356	観測時間 10:00~11:10
0.29	8.1	- 8.1	506	39	239	17	217	349	
0.59	5.7	- 8.3	519	39	250	17	204	341	平均太陽高度 h ₀ = 28.5°
1.35	- 2.0	-11.3	541	43	264	18	166	311	
1.95	- 5.8	-23.5	554	48	272	18	141	306	雲量 Cu 1
3.16	- 9.7	-35.8	571	57	281	20	114	300	
4.38	-18.2	-47.2	583	65	286	22	87	292	

* 気温：動熱効果の補正なし

表 8.8 1984年12月19日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温 * [°C]	露点温度 [°C]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤 外 放 射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.58	5.9	- 6.7	523	64	244	42	228	353	観測時間 11:30~12:45
0.88	3.1	- 7.0	540	72	253	44	217	344	
1.34	- 0.9	- 8.8	556	78	264	46	194	332	平均太陽高度 h ₀ = 30.0°
1.94	- 6.2	-14.2	573	84	275	48	159	310	
3.15	- 9.8	-35.2	594	89	289	50	125	302	雲量 Cu 2
4.37	-16.3	-48.8	606	93	296	51	104	293	
5.90	-21.8	-48.2	616	97	300	52	101	297	

* 動熱効果補正なし

表 8.9 1983年1月14日 筑波上空でのエアロゾルの粒径別濃度*の高度分布

高度(km) 粒径(μm)	0.32	0.61	0.90	1.33	2.20	3.08	4.94	5.87
0.3	1,881.5	1,737.7	1,458.8	822.4	97.2	79.8	134.3	114.1
0.5	326.1	269.3	241.4	158.0	21.1	15.9	22.3	19.4
1.0	82.7	71.8	69.3	33.2	5.2	3.2	0.9	3.0
2.0	30.4	25.3	25.8	11.7	4.7	0.4	0.2	0.4
5.0	3.3	3.2	3.4	2.5	1.8	0.1	0.1	0

* 空気100 cm^3 中に含まれる平均個数

** パーティクル・カウンター (RION, KC-01) による測定

表 8.10 1984年1月10日 筑波上空でのエアロゾルの粒径別濃度*高度分布

高度(km) 粒径(μm)	0.31	0.61	0.90	1.35	2.07	2.96	4.51	6.0
0.3	5,643.6	943.2	411.7	265.0	223.1	111.3	22.2	19.0
0.5	2,507.4	197.8	54.0	43.8	28.9	3.0	2.2	1.4
0.6	360.9	32.6	15.9	7.7	8.0	3.3	3.5	3.6
0.8	63.9	8.0	3.0	1.0	2.7	1.2	1.8	0.4
1.0	36.0	4.6	3.0	2.2	1.1	1.3	1.7	0.6
1.2	26.3	2.8	1.3	1.7	0.7	1.3	0.9	0.4
1.5	16.6	1.4	1.1	0.7	1.0	0.2	0.3	
2.0	7.1	1.2	0.6	0.7				
3.0	1.6	0.2						
4.0	0.5							
5.0	0.4							
6.0	0							
8.0								
10.0								

* 空気100 cm^3 中に含まれる平均個数

表 8.11 1984年1月11日 筑波上空でのエアロゾルの粒径別濃度*の高度分布

高度(km) 粒径(μm)	0.31	0.61	0.92	1.38	2.10	3.07	4.61	6.15
0.3	4,075.3	2,290.3	1,902.0	1,036.9	825.7	635.7	304.6	12.0
0.5	1,779.1	785.3	611.2	285.6	225.0	162.5	43.1	3.1
0.6	406.6	142.0	106.2	45.7	33.6	29.2	5.8	2.9
0.8	61.0	29.0	20.8	10.7	7.4	6.5	1.5	1.3
1.0	49.4	23.4	13.6	5.0	5.7	6.2	2.1	1.6
1.2	50.8	26.6	17.6	6.0	5.6	5.2	4.1	0.9
1.5	32.7	19.6	12.4	4.3	2.9	4.5	1.0	0.8
2.0	16.7	11.0	7.0	1.3	0.3	1.7	0.1	
3.0	4.7	3.1	1.8	0.1	0.7	0.7		
4.0	1.3	0.6	0.8		0.1	0.2		
5.0	0.5	0.6	0.2					
6.0	0.4							
8.0								
10.0								

* 空気 100 cm^3 に含まれる平均個数

表 8.12 1984年1月11日 鹿島灘上空でのエアロゾル粒径別濃度*の高度分布

高度(km) 粒径(μm)	0.16	0.31	0.61	0.90	1.34	2.09	3.01	4.52
0.3	1,631.9	2,134.7	2,056.0	1,930.4	1,707.7	848.9	677.1	39.3
0.5	475.8	729.4	701.9	642.0	566.4	252.9	181.3	18.4
0.6	87.1	120.9	116.5	103.0	90.0	37.0	44.1	4.5
0.8	20.8	26.3	23.6	26.0	20.9	7.4	28.3	2.1
1.0	16.4	21.4	19.9	16.9	14.7	7.8	8.9	2.4
1.2	15.1	20.3	23.3	18.4	16.3	6.0	4.5	3.1
1.5	11.9	13.7	15.0	13.8	11.6	2.8	5.1	0.5
2.0	9.0	8.3	8.1	8.8	6.1	1.3	4.3	0
3.0	3.1	2.7	2.5	2.8	2.0	0.3	1.9	0.1
4.0	0.4	0	0.9	0.4	0.2	0.1	0.1	
5.0		0.3	0.5	0.4	0.1		0.3	
6.0								
8.0								
10.0								

* 空気 100 cm^3 に含まれる平均個数

表 8.13 1984年12月19日 鹿島灘上空でのエアロゾルの粒径別濃度*の高度分布

高度[km] 粒径[μm]	0.15	0.29	0.59	1.35	1.95	3.16	4.38	
0.3	2,303.7	2,196.0	2,023.0	1,806.0	840.5	336.4	52.0	
0.4	749.0	728.5	622.5	570.2	231.0	66.5	10.6	
0.5	313.3	305.7	276.5	231.8	98.8	28.5	4.2	
0.6	328.7	315.8	285.8	262.2	89.5	43.3	3.4	
0.8	69.7	67.8	57.2	51.3	16.5	19.5	0.8	
1.0	62.3	64.7	55.8	48.8	21.5	31.3	1.0	
1.2	35.0	36.0	39.5	27.8	12.3	24.3	0.6	
1.5	48.3	44.7	42.2	35.5	12.0	33.3	0.2	
2.0	33.3	50.7	48.8	40.0	13.5	50.4	0.6	
3.0	20.0	28.8	26.8	21.2	12.0	35.5	0.2	
4.0	18.0	14.8	16.7	11.5	4.3	17.6	0.2	
5.0	3.7	2.3	2.5	2.0	1.3	3.3	0	
6.0	2.3	2.0	1.8	3.3	0	5.0		
8.0		0.2	0.2	0.2	0	0.3		
10.0		0.2	0	0.5	0.3	0		

* 空気 100 cm^3 に含まれる平均個数

表 8.14 1984年12月19日 筑波上空でのエアロゾルの粒径別濃度*の高度分布

高度[km] 粒径[μm]	0.30	0.58	0.88	1.34	1.94	3.15	4.37	5.90
0.3	4,547.2	4,465.0	4,213.5	3,965.2	1,331.3	334.3	253.4	78.8
0.4	1,506.4	1,487.2	1,336.0	1,127.5	360.7	56.0	83.0	31.5
0.5	693.4	666.4	573.8	463.7	162.3	21.2	27.4	20.5
0.6	742.2	741.8	609.3	468.8	181.2	28.0	18.9	47.8
0.8	181.6	198.4	155.2	115.3	54.7	16.5	3.4	29.8
1.0	234.2	257.4	194.8	129.8	69.5	23.5	4.6	48.0
1.2	144.4	144.2	123.3	82.7	51.8	16.7	2.6	42.0
1.5	147.4	145.2	133.0	85.3	51.2	24.5	2.5	58.5
2.0	177.6	177.2	147.7	112.5	69.2	34.5	2.5	109.3
3.0	100.0	79.8	72.5	56.0	36.3	25.0	0.8	98.3
4.0	62.4	38.8	38.0	35.8	27.8	15.7	0.8	66.8
5.0	14.6	9.2	9.7	7.0	6.0	2.3	0.1	16.3
6.0	32.0	10.8	11.2	8.2	5.8	2.0		22.8
8.0	5.6	1.6	1.2	0.2	0.7	0.2		1.5
10.0	4.4	1.0	0.2	0.2	0.3			0.3

* 空気 100 cm^3 に含まれる平均個数

調のため、エアロゾル観測は欠測した。表中の濃度値は、各高度での5～12回の測定の平均値で、そのサイズが対応する粒径レンジと次の粒径レンジの間に入るエアロゾルの空気 100 cm³当りの個数である。なお、使用したRIONパーティクル・カウンター及びDICダスト・カウンター共に設定された粒径レンジは、可視光に対する屈折率が1.60であるラテックス試料粒子を用いての検定による値である。表中には、これ等カウンターによる測定値をそのまま載せてあるが、屈折率が1.60より小さいと思われる実際のエアロゾルの粒径分布に引直すには実際の屈折率に応じた補正を加える必要がある。同一高度内でのエアロゾル濃度の水平分布の分散は、放射量に比べて概して大きく、粒径によっては最大値と最小値で数倍異なることもある。

(3) 大気加熱・冷却率及び反射率

放射フラックスとエアロゾル等の高度分布の同時観測から、大気の放射熱収支の高度分布と、それに及ぼすエアロゾル等の効果を評価することが可能となる。上記観測結果にもとづく詳細な解析結果の報告は、紙面の制限もあり他にゆずることとして、ここでは、上記観測から直ちに導びかれる大気の加熱・冷却率及びフラックス反射率についての若干の解析事例を紹介するに止める。

図8.5は、1984年1月10日筑波上空及び翌11日鹿島灘上空での放射観測データ(図8.3、表8.4及び8.6参照)から得られた日射の吸収による大気加熱率の高度分布である。実線は、全波長域の日射フラックスの収束量から求めた加熱率、破線は、近赤外域日射フラックスの収束量から求めた加熱率で、両者ともエアロゾルによる吸収と水蒸気による吸収の両方の効果を含む。水蒸気によ

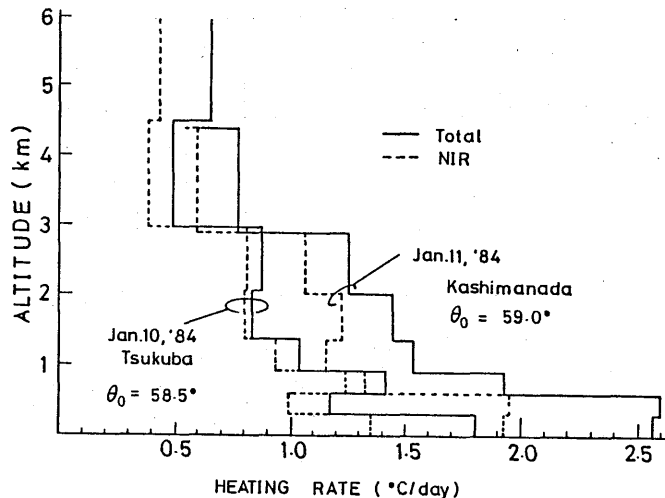


図8.5 日射吸収による大気加熱率の高度分布、
実線は全波長域日射による加熱率、破線
は近赤外域日射による加熱率。
1984年1月10日 筑波上空 及び
1984年1月11日 鹿島灘上空

る日射の吸収は近赤外域に限られているので、実線と破線の差は、エアロゾルによる可視光吸収の効果を表わす。観測日の気温・湿度分布から推算した水蒸気のための加熱率は、3 km附近で約 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 、大気下層で $0.6^{\circ}\text{C}/\text{day}$ と見積られる。エアロゾルのみによる日射吸収効果は、高度3 km以下の下層でより顕著で、1月10日（筑波）では、水蒸気のための寄与の1～3倍、1月11日（鹿島灘）では2～3倍の大きさになっている。加熱率の高度分布は、エアロゾル濃度の高度分布（表8.10及び8.12）と対応している。

図8.6は、前図に対応する日射フラックスの反射率（アルベード）の高度分布を表わす。実線は、全波長域日射計に対する反射率、破線は近赤外域日射に対する反射率を表わす。筑波上空では、この時期の地表面反射の特性を反映して、近赤外域での反射率が全波長域そして可視域での反射率より大きくなっている。他方、海上（鹿島灘）では、地表面に比べて海面の小さな反射率の反映として、全体として筑波上空よりも反射率が小さく、海面が青く見えることから分るように、可視域での反射率が近赤外域の反射率より大きくなる。近赤外域の反射率が高度に対してほぼ一定、又はやや減少気味なのは、水蒸気及びエアロゾルによる吸収の効果がエアロゾル大気による散乱の効果とほぼ打ち消し合うか、又は、前者が少し勝っていることの表われである。

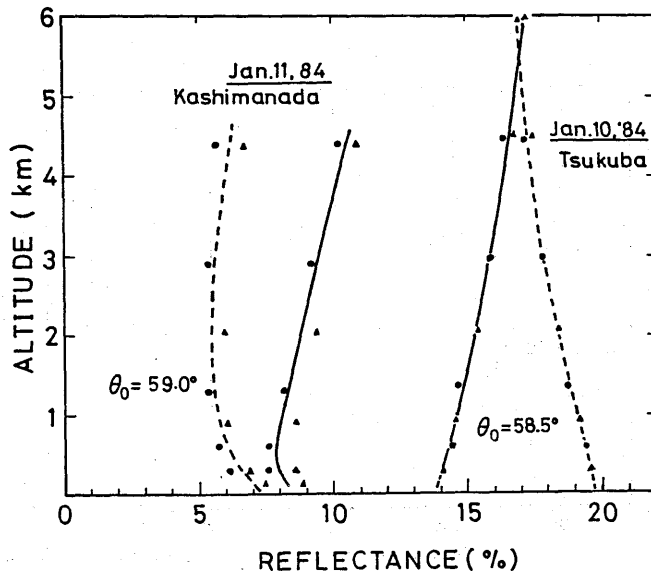


図8.6 日射フラックス反射率の高度分布、
実線は全波長域日射に対する反射率、
破線は近赤外域日射に対する反射率、
1984年1月10日 筑波上空 及び
1984年1月11日 鹿島灘上空

図 8.7 は、1984年12月19日筑波上空での観測による赤外放射及びそれによる大気冷却率の高度分布を示す。この日の特徴は露点温度分布等(表 8.8)に表われている様に、地上約 1.5 km の高さまで混合層が発達しており、この内でエアロゾル濃度がほぼ一様で大きくなっている(表 8.14)。更に高度 6 km 附近で再び湿度が高くなり、また比較的大きな粒径のエアロゾル濃度が急増している。混合層内では、上向きフラックス $F_{IR}^{\uparrow}$ が高度と共に急激に減少しているが、下向きフラックス $F_{IR}^{\downarrow}$ もほぼ同様の割合で変化しているので、正味フラックス F_{IR}^{net} の高度変化は小さく、従って冷却率も小さな値となっている。このエアロゾルの濃い混合層内で、赤外放射冷却率が、エアロゾルが存在しないとした場合よりも若干小さくなるという今回の観測例は、エアロゾルの附加が大気下層の赤外冷却を強めるという従来のモデルによる理論研究(例えば、Ackerman et al. 1976, Harshvardhan and Cess, 1978)と反する。この点に関しては、今後更に詳細に分析する予定である。

下向きフラックスが、高度約 4.5 km から 6 km にかけて減少することなく、ほぼ一定の値となっているのは、上空に何か赤外放射を強く吸収・射出する物質が存在することを示唆しており、前述の粒径約 $2 \mu\text{m}$ のエアロゾル(雲粒?)の急増と良く対応している。ただし、この上層のエアロゾル層の存在は、目視では認知出来なかったし、日射に対するはっきりした影響は認められなかった(表 8.8 参照)。

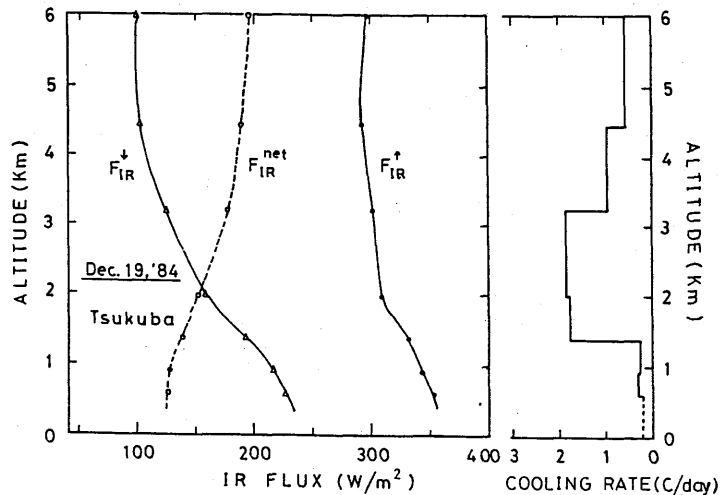


図 8.7 赤外放射フラックス及び赤外放射冷却率の高度分布。

上向きフラックス $F_{IR}^{\uparrow}$ 、下向きフラックス $F_{IR}^{\downarrow}$ 、及び正味フラックス F_{IR}^{net} 、
 1984年12月19日 筑波上空

8.7 まとめ

本章では、航空機による日射及び赤外放射の水平面フラックス、エアロゾル濃度等の測定・解析法を詳述し、測定結果を記載した。放射とエアロゾル、気温・湿度の同時観測により、冬季対流圏の放射収支に及ぼすエアロゾルや水蒸気等の効果を解明するための基礎資料が蓄積された。解析の結果、エアロゾルの日射吸収による大気加熱の効果は、水蒸気による効果の2～3倍大きいこと、放射加熱・冷却の高度分布はエアロゾル濃度の高度分布等と密接に関連していること、更にエアロゾル濃度の高度分布は接地逆転や混合層など気温・湿度分布と関係が深いこと等が分った。

謝 辞

航空機観測に際し、昭和航空K. Kの方々に御協力を戴きました。資料の一部の整理・解析に宮田 洋氏（現松山地方气象台）の御協力を得ました。日射計の温度特性の検定には、気象庁日射検定室の方々に御助力を得ました。また、エアロゾル測器等の使用に当っては、気象研究所の多くの方々に便宜をはかっていただきました。関係された皆様の御厚情に感謝します。

参 考 文 献

- Ackerman T. P., K-N Lion and C. B. Leovy, 1976 : Infrared radiative transfer in polluted atmosphere. *J. Appl. Meteor.* **15**, 28 - 35.
- Albrecht, B. and S. K. Cox, 1977 : Procedure for improving pyrgeometer performance. *J. Appl. Meteor.* **16**, 188 - 197.
- Albrecht, B., M. Poellot, and S. K. Cox, 1974 : Pyrgeometer measurements from aircraft. *Rev. Sci. Instrum.* **45**, 33 - 38.
- Enz, J. W., J. C. Klink, and D. G. Baker, 1975 : Solar radiation effects on pyrgeometer performance. *J. Appl. Meteor.* **14**, 1297 - 1302.
- Harshvardhan and R. D. Cess, 1978 : Effects of tropospheric aerosols upon atmospheric infrared cooling rates. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **19**, 621 - 632.
- 海上保安庁水路部, 1982 : 惑星位置略算式
天測暦（昭和57年度版）

Kondratyev, K. Ya, 1977 : Radiation regime of inclined surfaces.

WMO, Tech. Note No 152.

Ryznar, E and M. R. Weber, 1982 : Comments "On the performance of pyrgeometer with silicon domes "

J. Appl. Meteor. **21**, 1208 - 1210

Weiss, A., 1981 : On the performance of pyrgeometer with silicon domes.

J. Appl. Meteor. **20**, 962 - 965.

第9章 データ解析

9.1 中層大気擾乱と地磁気変動*

9.1.1 はじめに

地磁気変動には、地球内部起源のもの、地球外部に原因があるもの等種々のものがあり、それぞれが何らかの形で中層大気に関連しているらしいと考えられてきた。

日本のような中低緯度において観測される定常的な地磁気変動である地磁気静穏日日変化(Sq)は、下部電離層での中性大気の運動と直接かかわりあっているが、これには中層大気の風系、密度等の擾乱の影響がおよんでいる可能性がある。また、代表的な地磁気擾乱である磁気嵐は、太陽風と磁気圏の相互作用の結果生ずるものであり、その意味で太陽活動の一指標として位置づけられるが、他方、中層大気の温度場やオゾン濃度等と太陽活動との相関が近年注目されつつあり、従って、一次的な相互作用ではないにしても、磁気嵐と中層大気擾乱との間に有意な関連のあることは十分に考えられる。更には、地磁気の原因である核起源の地球主磁場の永年変化が、中層大気や気候の変動に影響しているという考えもある。

このように、地磁気変動は非常に広範囲の周期帯にわたって中層大気と関連していることが示唆される。本研究では、地磁気資料、電離層資料、高層気象資料、地上気象資料をもとにデータ解析を行い、短周期から長周期にわたる地磁気変動と中層大気擾乱及び気候変動との関連についての研究を進めてきた。その結果、直接的ではないにしても、地磁気変動と中層大気擾乱との間に有意な関連性が存在することを示唆する観測事実をいくつか見いだすことができたので、以下にそれらを報告する。

9.1.2 Sq 電流系の日々変動と中層大気擾乱

Sq は電離層大気の潮汐運動によるダイナモ作用によって生ずる。その基本式は次の形で表現される。

$$J = \Sigma \cdot (E + V \times B) \quad (9.1)$$

ここで、 J 、 Σ 、 E 、 V 及び B はそれぞれ電離層（主としてE層）の電流密度、電気伝導度、静電場、中性風の速度及び地球主磁場を表す。

この電離層電流によって地上に生ずる磁場変化が Sq である。電離層電気伝導度の日変化のため、

* 桑島正幸、角村 悟、原田 朗：地磁気観測所

下道正則：気象庁観測部・白木正規：予報研究部

中島只一：元地磁気観測所・河村 譜：気象庁地震火山部

この電流は夜間にはほぼゼロになり昼間には南北各半球の赤道から中緯度まで至る渦電流系で近似されることは良く知られている。日本では、正午ごろ上空付近に渦の中心が来ることになっており、従って日本の観測点の日変化の形を比較することによって Sq 電流系の中心緯度が推定できる。というのは、Sq 電流系中心を挟んで高緯度側と低緯度側とで南北 (H) 成分の日変化が逆向きになるからである。

Sq 電流系は何らかの原因により常にゆらいでおり、その中心緯度も日々変動している。図 9.1.1 は 1971 年 5 月 11 日～13 日にかけて見られた Sq 電流系の日々変動の典型的な例を示している。5 月 11 日の H 成分の日変化を見ると、女満別と柿岡では昼間に減少し、父島では逆に増加しているのので、Sq 電流系の中心は女満別や柿岡よりも低緯度側、父島よりも高緯度側に位置していると推定され、更に、鹿屋での変化が増加とも減少ともはっきりしないことから鹿屋付近の緯度にあると考えられる。5 月 12 日には、その中心が鹿屋から一挙に柿岡の上空を通り越して女満別の上空近くまで移動したことが読み取れ、そして 5 月 13 日には、再び鹿屋の上空付近に戻っていると推定される。

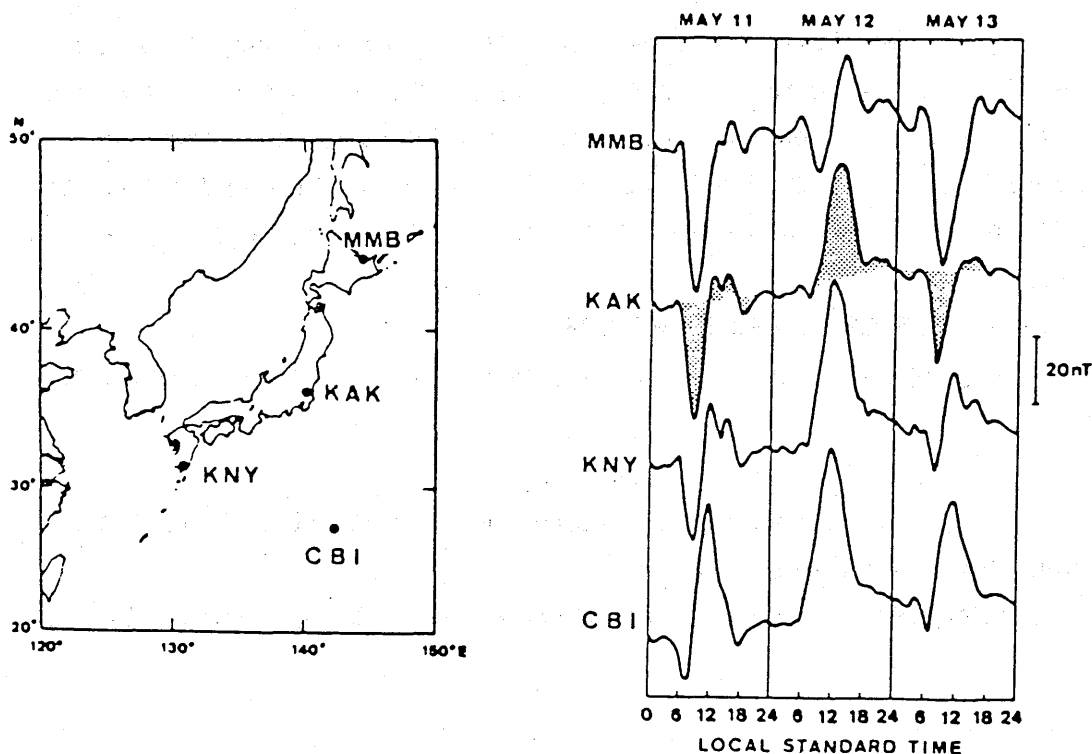


図 9.1.1 : 1971 年 5 月 11 日～13 日に日本で観測された
地磁気静穏日日変化 (Sq) の日々変動

このような Sq 電流系の日日変動の原因として、次の三つが考えられる。

- (1) 電離層電子密度（(9.1) 式の Σ に相当）の日日変動
- (2) 電離層風（(9.1) 式の V に相当）の日日変動
- (3) 電離層電場（(9.1) 式の E に相当）の日日変動

このうち、(1)と(3)については Sq 電流系の中心緯度の日日変動を説明できるような観測例はないが、(2)については、流星風レーダーによる電離層風の直接観測で、2日周期程度の変動が確認されており（Ito et al, 1984）、従って、Sq 電流系の中心緯度の日日変動の原因として電離層風の日日変動が最も有力な要因であると考えられる。電離層風のゆらぎについては、京都大学の MU レーダーによる観測を初め MAP 期間中の多くの観測によって解明されることが期待される。一方、Sq の解析から電離層風のゆらぎを逆に検出することは難しい問題であるが、中層大気の風と関連するものとしての Sq の日日変動を詳細に調べ、何らかの系統性を見いだしておくことは重要である。

地磁気観測所の観測点、女満別、柿岡、鹿屋の3地点の1958～75年の18年間のH成分の日変化から推定した Sq 電流系の中心緯度の変動を調べる。各観測点毎に、赤道環電流の影響を取り除くために、緯度補正した Dst 成分を差し引いた H 成分について、昼間（10～14時 JST）と夜間（22～02時 JST）の差 ΔH を求め、 ΔH が0になる所が中心緯度であるとして、それを最小二乗法により求める。図 9.1.2 は太陽活動の極大期（1958年）と極小期（1964年）における Sq 電流系の中心緯度の日日変化を ΣKp とともに示したものである。中心緯度が 10° 程度の幅で日日変動して

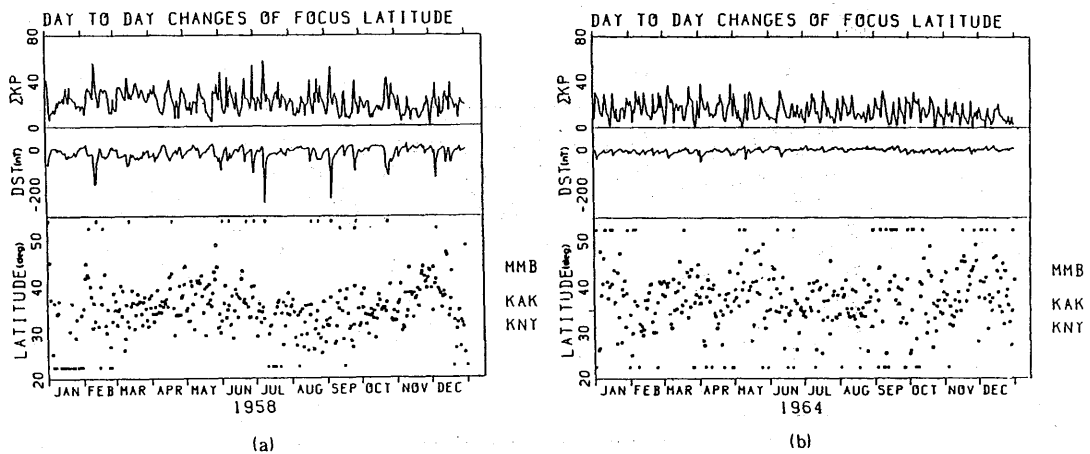
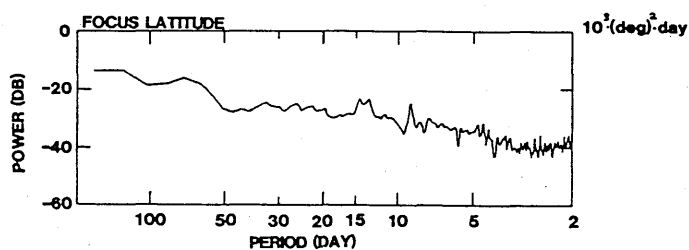


図 9.1.2 太陽活動極大期（1958年）および太陽活動極小期（1964年）における地磁気活動度 ΣKp (上)、Dst (中)および Sq 電流系の中心緯度の日々変動 (下)

いることがわかる。極小期の方がばらつきが大きいのは、極大期に比べて S_q の振幅が小さく、中心緯度を推定する際の誤差が大きくなるためと考えられる。

こうして得られた S_q 電流系の中心緯度の日々変動に規則性があるかどうかを調べるために、上記期間についてスペクトル解析を行った。結果を図 9.1.3(a)に示す。スペクトル解析の結果、60日、15日、8日付近にスペクトルのピークが見られる。一方、磁気嵐等の地磁気擾乱に関連する27日周期に対応するピークは明らかでない。このことから S_q 電流系の中心緯度の日々変動を引き起こす原因は磁気圏内よりもむしろ電離層内にあることが示唆される。図 9.1.3(b)では、スペクトルピークの時間変化を見るために1972～75年の4年間についてダイナミックパワースペクトルを求め、その卓越成分（周期）のみを示した。卓越周期に季節変化が認められて、冬期間には10～15日周期が卓越し、冬期間以外の季節では30～60日周期の変動が卓越している。10～15日周期の変動に

(a)



(b)

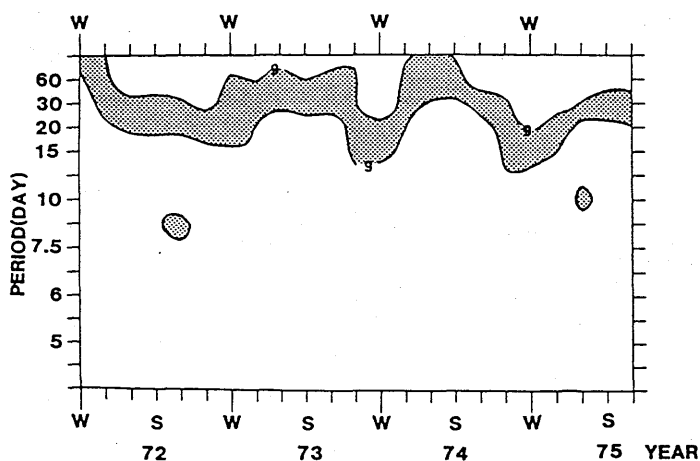


図 9.1.3 S_q 電流系の中心緯度の日々変動のスペクトル解析結果(a)およびスペクトル解析結果による卓越成分（周期）の時間変化(b)

については、冬期間にこれに対応する周期のプラネタリー波動が対流圏、成層圏から中層大気を経て下部電離層まで上方伝播することが知られており (Salby, 1984)、Sq 電流系の中心緯度の変動の原因として注目される。冬期間以外に見られる30~60日の変動については、今のところ発生原因は不明である。

9.1.3 sfeに伴う変動と中層大気擾乱

sfeは、太陽面爆発に伴って太陽から到来するX線が中層大気分子を電離する結果、Sq が強められたような地磁気変化として出現する現象 (solar flare effect) で、継続時間は数10分~1時間である。よって、sfe電流系の消長過程は1日周期で起こるSq電流系の構造を短時間で具現しているといえる。但し、Sq電流系が電離層E層 (~100km) に主に存在するのに対し、sfe電流系はE層とD層 (~70km) の両方に分布し、むしろD層を流れる電流の方がE層を流れるものより大きいということがこれまでに報告されている (Veldkamp and Sabben, 1960; Sabben, 1968)。この意味でsfe現象はまさに中層大気擾乱の一部であると考えることができる。また、sfeに重なって更に短い周期の振動が見られることがしばしばある。これはPsfeとよばれ、周期は約60秒~100秒程度である。このような短い周期に対応する変動が中層大気擾乱の中に存在するかどうかを調べることも、中層大気の様子を探る上で重要なことと考えられる。

sfeは太陽面爆発に伴ってのみ出現するので、Sqに比較して出現数も少なく、従ってSqのように統計的な調査をすることは難しい。ここでは、1984年4月に日本で観測された顕著なsfe現象についての調査結果と中層大気擾乱との関連について報告する。

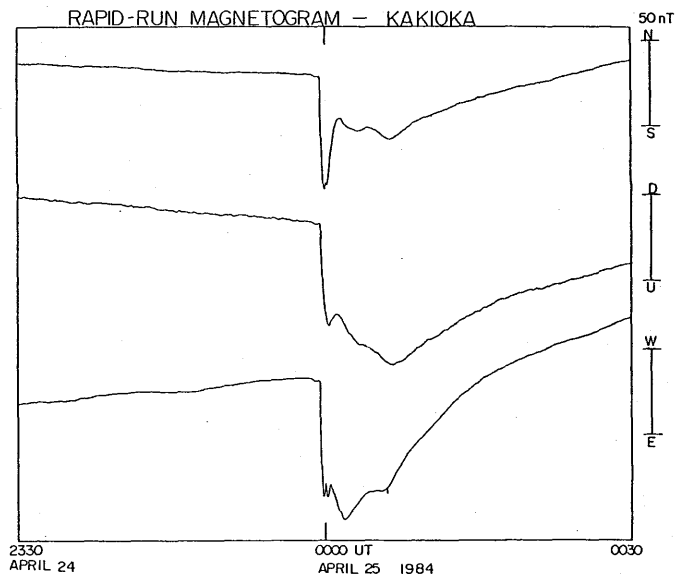


図 9.1.4 1984年4月24日23時59分開始のsfeの柿岡における変化

図 9.1.4 は柿岡で 1985 年 4 月 24～25 日に観測された sfe に伴う地磁気変動を示している。この図は光ポンピング磁力計による毎秒計測値を利用して作成された。4 月 24 日の 23 時 59 分 U T に sfe の開始が見られ、引き続いて Sq 変動を増大させる傾向での sfe 変動が数 10 分続いているのがわかる。この sfe 変動に伴って周期 70 秒程度の変動が存在しており、特に東西 (D) 成分の sfe 開始時に顕著に見られる。これが Psfe とよばれる現象である。

Psfe が中層大気擾乱とどのような関係を持つのかを探るため、sfe 或いは Psfe が関連していると考えられる電離層 D 層 (～70 km) の情報を与えるものとして、オーストラリアから送信される V L F 信号 (NWC, 2.23 KHz) の変調の様子を調べた。V L F は地面と電離層 D 層の間を反射しながら伝播するので、電離層の情報に加えて地下の電気構造の情報も含んでいる。しかし、地下の電気構造の時間変化は Psfe のような早い変動と比較すると極めてゆっくりであり、ほぼ一定とみなしてよいので、V L F の時間変動は中層大気すなわち電離層 D 層における大気状態の変動に起因すると考えることが許される。図 9.1.5 に、電波研究所の犬吠出張所で受信された V L F と柿岡における Psfe とをあわせて示した。Psfe は脈動性を強調するために微分波形で示してある。23 時 59 分 U T の sfe 開始と同時に周期約 70 秒の Psfe が見られるが、V L F でも Psfe に対応する脈動が存在することがわかる。この結果は sfe に伴って周期 70 秒程度の変動が電離層 D 層において存在していることを意味する。

このように脈動性の現象となる理由としてまず考えられるのは、地球磁力線の磁気流体的共鳴振動である。磁気流体的共鳴振動の周期 (T) は次式で示される。

$$T = 2 \int_s \frac{(\mu_0 B)^{\frac{1}{2}}}{\rho} ds \quad (9.2)$$

ここで μ_0 は真空における透磁率、 ρ はプラズマ密度、 B は磁場の強さで s は磁力線の線分である。柿岡 (磁気緯度 26.2°) 付近で予測される磁気流体的共鳴振動の周期は、実在するプラズマモデルと磁場モデルによって計算すると 10～15 秒となる。従って図 9.1.5 にあるような周期 70 秒の Psfe を磁力線の磁気流体的共鳴振動で説明することはできない。残る可能性としては、sfe に伴って到来する X 線の中に周期 70 秒程度の振動成分が含まれているということである。実際、太陽電波の観測や静止衛星軌道における X 線の観測でもこれを裏付ける報告がある (菊池他、1984)。

太陽面爆発に伴って発生した X 線が電離層下部或いは中層大気で短周期の脈動性擾乱を引き起こすことは、中性大気と電離大気の相互作用を研究する上で興味あることであり、今後の研究の発展が期待される。

9.1.4 Sq の振幅の準 2 年周期振動

気象学的には、大気大循環に関連して赤道域東西風の準 2 年周期振動 (QBO) が、近年注目をあびている。また、オゾン全量にも準 2 年、準 4 年周期振動のあることが報告されている (長谷部

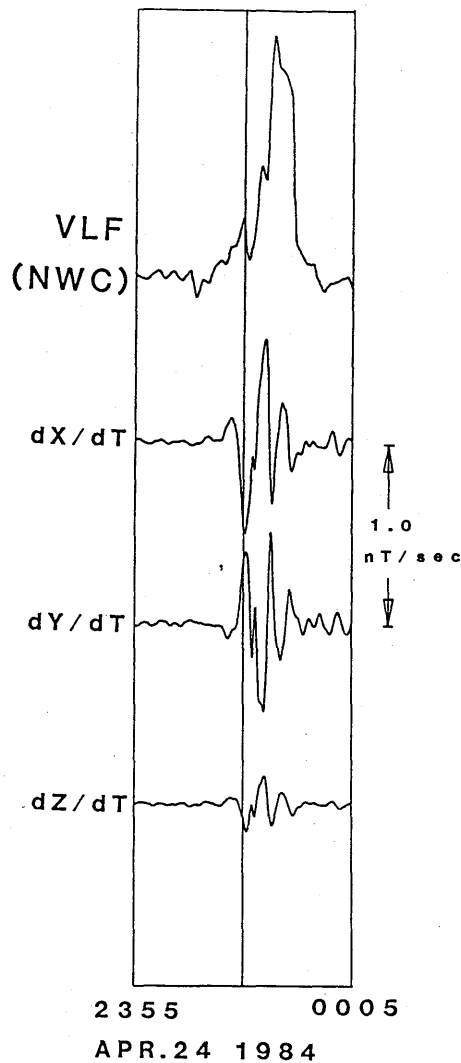


図 9.1.5 1984年4月24日23時59分開始の sfeに伴う
VLF (2.23 KHz)と地磁気短周期変動。

他、1983：長谷部、1984)。一方、Sugiura et al. (1977)はDst指数や太陽黒点数にQBOがあると報告している。これらを総合すると、太陽面から地表近くの対流圏にいたるまで到るところに準2年周期振動(QBO)が存在することになる。そこで、中層大気と関連のあるSqについても準2年周期があるのか、あるとすればどういう形で存在するのかを調査してみた。解析に当たっては、約2年の周期帯を取り出すため、各物理量の月平均値を12か月移動平均したものに4年以上の長周期成分を除去するようなフィルターをかけた。

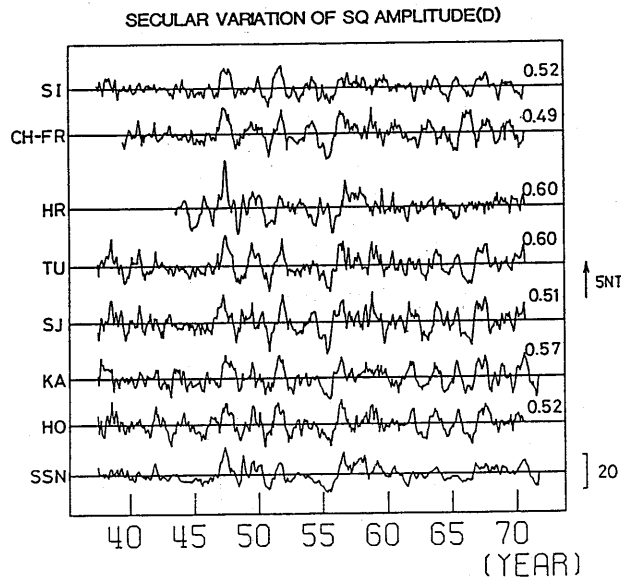


図 9.1.6 : Sitka (SI), Cheltenham(CH), Fredericksburg (FR), Hermanus (HR), Tucson (TU), San-Juan (SJ), Kakioka (KA), Honolulu (HO), における国際地磁気静穏日での Sq (D-成分) の振幅と太陽黒点数(SSN)の経年変化

図 9.1.6 に、世界 7 地点での国際地磁気静穏日における Sq の D 成分及び太陽黒点数について得られた結果を示す。国際地磁気静穏日に限定したのは、地磁気擾乱の影響を除去するためである。右端の数字は各地点での変動の太陽黒点数変動に対する相関係数である。波形は一定していないが、2 年ぐらいの周期の変動が全地点にわたって見られている。ここに現れている QBO は Dst のそれと直接には関連していないが、太陽黒点数との相関から見て、太陽活動の影響は何らかの形で受けていると思われる。太陽活動（太陽黒点数）に伴って太陽電波放射にも QBO が認められており、(Sugiura et al, 1977)、ここでもし太陽紫外線強度にもそのような変化があるとすれば、電離層状態に影響し更に Sq の QBO を引き起こすということは十分考えられるが、太陽紫外線についてのこの様な観測例はまだなく、衛星等による観測データの蓄積を待つばかりである。

図 9.1.7 は、地磁気擾乱 (Ap 指数)、foE、オゾン全量の Sq (D 成分) に対する時間ずらし相関を示したものである。foE、オゾン全量とも、時間差 0 のところで相関が有意なピークを持つが、Ap 指数はむしろ無相関であることがわかる。このことは、Sq と電離層とは QBO においても密接なかかわりを持つが、地磁気擾乱はそれ程 Sq の QBO に影響していないことを示唆する。オゾン全量と電離層状態及び Sq については、両者が直接に影響しあっているのか、それとも共に太陽活動の影響を受けるため、見掛け上相関があるだけなのかは不明である。

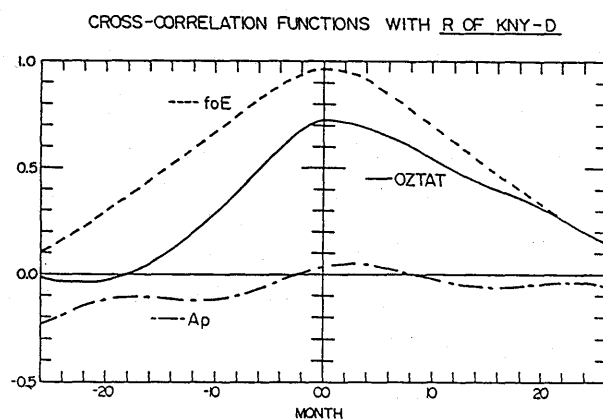


図 9.1.7 : 東京 (国分寺) における電離層 E 層の臨界周波数 (f_oE)、館野におけるオゾン全量 ($OZTAT$)、地磁気活動度 (A_p) と柿岡における S_q (D -成分) の振幅との相互相関関数

9.1.5 地磁気経年変化と地表気温の相関

長期の気候変動は、太陽活動や地磁気変化によって引き起こされているのではないかと古くから考えられてきた。近年、諸種の連続観測データの蓄積量が充実し、太陽活動気候変動相互関係

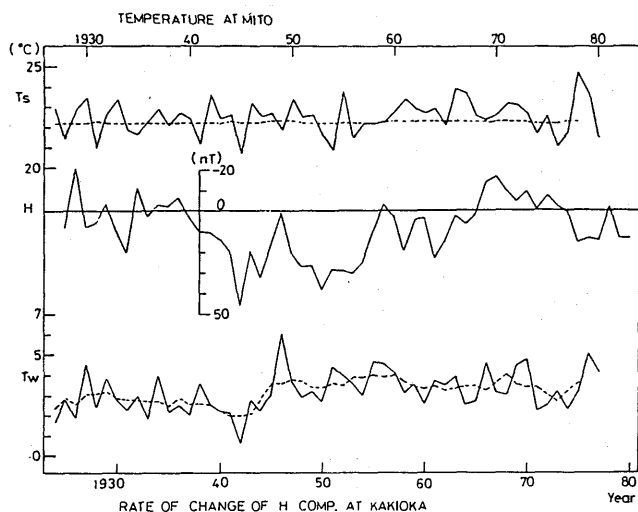


図 9.1.8 : 柿岡の地磁気水平成分年変化量 (ΔH) と水戸の夏 (T_s)、冬 (T_w) 各平均気温の経年変化

(Solar-Weather Relation) についての解析が盛んに進められているが、それらについて言えることは、時間的、空間的に相関の良い部分、悪い部分がまちまちに分布していることである。

相関の仕方が時間的に変動する例として、図 9.1.8 に柿岡の地磁気H成分の年変化量(年平均値-前年平均値)と水戸の夏、冬各平均気温の経年変化を示す。地磁気と冬気温とが時間差を持った相関を示すため、地磁気の方を3年遅らせ、すなわち地磁気変動が気温変化に先行する形で書いてある。冬気温が地磁気年変化量と一時期良く平行しているように見え、全体の相関係数も -0.46 と低くない値を持っているが、これでは地磁気と気温との間に有意な相関があるとは言い切れない。

一方、地表気温と地磁気とが相関を持つとすれば、高層気象と地磁気はより高い相関を示すと考えられる。

図 9.1.9 は、20、50、100、500 mb 高度における気温とオゾン全量の夏、冬各平均値及び柿岡における地磁気H成分の月間擾乱日平均と月間静穏日平均の差($Md-Mq$)の経年変化を示したものである。地磁気についてこのような差を取ったのは、地磁気永年変化分を除去し、かつ、純粋な擾乱分を取り出すためである。夏平均には、系統性は特に見られないが、冬平均については、長期的

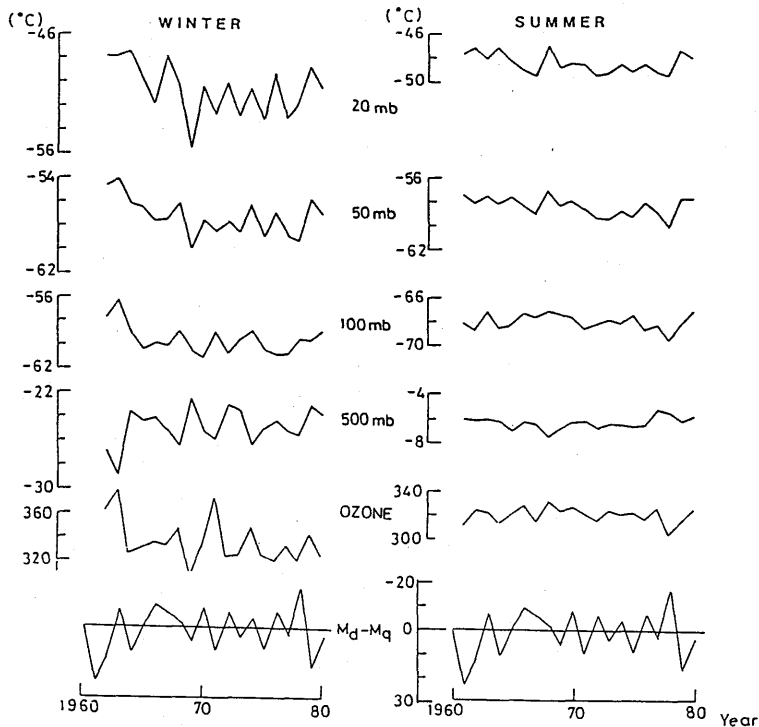


図 9.1.9 : 館野における20mb、50mb、100mb、500mb 高度の気温とオゾン全量の夏、冬各平均値および柿岡における地磁気擾乱度($Md-Mq$)の経年変化

に見て、20、50、100mbの気温とオゾン全量が正、500mbの気温と地磁気が負の2次曲線的な変化をしているように見え、何らかの関係を持っているように見える。オゾン全量が100mb気温と良い相関を持つことは良く知られており（関原他、1978）、この結果はそれと調和しつつ、しかも成層圏界面を越えて下層（500mb）で、逆相関になることを示唆している。但し、地磁気変動、オゾン全量はそれぞれ太陽活動に影響されており、オゾン全量が高層気温に関係しているとすれば、ここで見られる相関には太陽活動の影響が間接的に出ている可能性があることを忘れてはならない。

このように物理的に直接的な結びつきを持たない地磁気と気象要素の関係を探るには、今後、例えば両者の相関の良い時期と悪い時期を分離して系統性を探る等、方法を工夫しながら、時間的、空間的に範囲を広げて解析を行う必要がある。

9.1.6 まとめ

以上、いろいろな周期帯で太陽活動、地磁気、気象要素の相互関係について調べた結果を述べた。全体について言えることは、これらの変動の仕方にはある程度の相関が見られるが、現象の周期が長くなるにつれて物理的因果関係がはっきりしなくなっていくということである。

各周期帯の現象の理解を深めるとともに、あらゆる周期帯での太陽地球気象相互関係を物理的に体系付けることができる様に、総合的な視野を持って研究を進めて行くことがこれからとるべき方向であろう。

参 考 文 献

- 長谷部文雄、山元龍三郎 1983; "オゾン全量経年変化の全球的解析" MAPシンポジウム第3回、286-290.
- 長谷部文雄 1984; "オゾン全量の4年周期振動" MAPシンポジウム第4回、p. 121-122.
- Ito R., Tsuda T., Aso T. and Kato S. 1984; "Long-Period Oscillations in the Meteor Winds Observed over Kyoto during 1978-1983" J. Geomag. Geoelectr., **36**, 173-188.
- 菊地崇、大塩光夫、大谷晃、貝沼昭司、1984; "1984年4月24日の脈動性電離圏突然擾乱" 地球電磁気学会第76回講演会予稿集、p. 17.
- Sabben D. Van 1968; "Solar flare effects and simultaneous magnetic daily variation" J. atmos. terr. Phys., **30**, 1641-1648.
- Salby L. Murry 1984; "Survey of Planetary-Scale Traveling Waves: The State of Theorey and Observations" Reviews of Geophys. and Space Phys., **22**, 209-236.

関原疆、池田弘、菊地直次郎、田村竹男 1978 ; “成層圏気温の長期変動について”高層気象台彙報、
39, 21—28.

白木正規、下道正則、河村 謙 1980 ; “中層大気擾乱に関連した地磁気日変化の解析” MAP シン
ポジウム第1回., p. 286—290.

9.2 地磁気擾乱の地球大気の循環におよぼす影響について *

9.2.1 はじめに

太陽活動・地磁気擾乱などが地球大気におよぼす影響については実に様々な報告がある（例えば SCOSTEP ワーキング ドキュメント II, 1977）。また、その機構についても同様に色々な説がある。しかし、昔考えられたようには太陽活動の影響は直接対流圏に与えられるのではなく、中層大気の循環の変化を通して対流圏に影響がおよぶという考え方が近年強くなってきた。この場合、まず最初にどのレベルに太陽活動の影響が現われるかによって二つの考え方がある。ひとつは、Angell and Korshover (1976), Geller and Alpart (1980) 等の人々のように、成層圏のオゾン濃度や温度場の変化に太陽黒点周期も同様の変動があることから、太陽活動による UV の変化で成層圏の循環がまず変わるという見方である。もう一方は、Hines (1974) のように、もっと上の下部熱圏・中間圏上部の変化が伝わって来るのだという考えである。

さて、太陽活動と気象・気候等の関係は古くより議論されている。太陽黒点周期に関連した約 11 年周期のような長い時間スケールの現象だけでなく、地磁気擾乱や惑星空間磁場のセクターの地球通過のあった数日以内に起る短い時間スケールの現象も近年報告されている。Roberts and Olson (1973) は磁気嵐の後でアラスカ湾付近でトラフが発達することを V A I (Vorticity Area Index) という指数をもちいて示した。これに引続いて Wilcox et al. (1973, 1975) は解析の範囲を北半球全体に広げ、惑星空間磁場のセクター通過後、1 日後に V A I が極小になると、また、この現象は冬季にのみ現われることを示した。さらに、Larsen and Kelley (1977) は Roberts and Olson (1973) と Wilcox et al. (1973) の仕事を統一的に解釈すべき解析を行ない、また、北アメリカ域の Fine Mesh Model による数値予報の 12 時間、24 時間予報値をもとに計算した V A I の予報精度がセクターの通過後悪くなることを示した。

こういった指数をもちいた解析の他に、磁気嵐の後で対流圏の循環パターンがどう変化するかを直接調べる方法もある (Bucha, 1980; Mustel et al. 1980)。これは現象の全体像の把握という観点から重要である。本研究では、まず地磁気擾乱の後、対流圏の循環がどのように変化するか

* 小寺邦彦：高層物理研究部

全般的な様相を各気圧高度で調べ、さらに、その変動が対流圏の内的な要因によるものでないかの吟味を数値予報の資料をもちいて行なった。

9.2.2 データ・解析法

気象データは気象庁により編集された北半球客観解析資料データ・セット ANALMON の12Zの値をもちいた。解析期間は1976年11月から1981年2月までの5冬期とした。この冬季の選択は、太陽活動等の影響は冬期間に明白にあらわれるという報告 (Wilcox, 1975) によったものである。地磁気擾乱後の平均的な対流圏の応答を調べる為、地磁気擾乱のあった日をキイ・デイ (key day) として重ね合わせ平均 (superposed mean) を取った。

$$\bar{Z}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M Z(n + k_m)$$

ここで Z : 気圧高度および地上気圧

$\sim$: 重ね合わせ平均

k_m : m 番目のキイ・デイ

M : キイ・デイの総数

n : キイ・デイから数えた日数

キイ・デイとしての地磁気擾乱日の選択は、Roberts and Olson (1973) によって用いられた選択基準——日平均Ap指数が15以上で、前日の日平均値より少なくとも月平均以上増加した日——を用いて決定した。そして、さらに、前の擾乱日より4日以上離れているもの32の地磁気擾乱日をキイ・デイとした。

数値予報資料は気象庁編集によるデータ・セット NHPMONの12Z時の値をもちいた。ところで、気象庁で用いている数値予報モデルは期間によって異なるので同一のモデル (北半球4層グリッド・モデル) による期間1979年11月から1981年2月の2冬期間についてのみ解析を行なった。500 mb高度のイニシャル、24時間及び48時間予報値について、客観解析データと同じく重ね合わせ平均をとって解析を行なった。ただし、予報データの場合は期間が短いためキイ・デイとして用いた地磁気擾乱日は全部で14である。

9.2.3 気圧高度変化

地磁気擾乱の前と後で地上気圧の変動に違いがあるかどうかをまず調べた。図9.2.1に地磁気擾乱日前の地上気圧変化分 (ΔP_S^-) と、地磁気擾乱後の変化分 (ΔP_S^+) を示す。変化分は2日間の差をとり以下のように定めた：

$$\Delta P_S^- = \bar{P}_S(0) - \bar{P}_S(-2)$$

$$\Delta P_S^+ = \bar{P}_S(2) - \bar{P}_S(0)$$

ここで、 $\bar{P}_S(n)$ は重ね合わせ平均をとった地上気圧、 n はキイ・デイから数えた日数である。

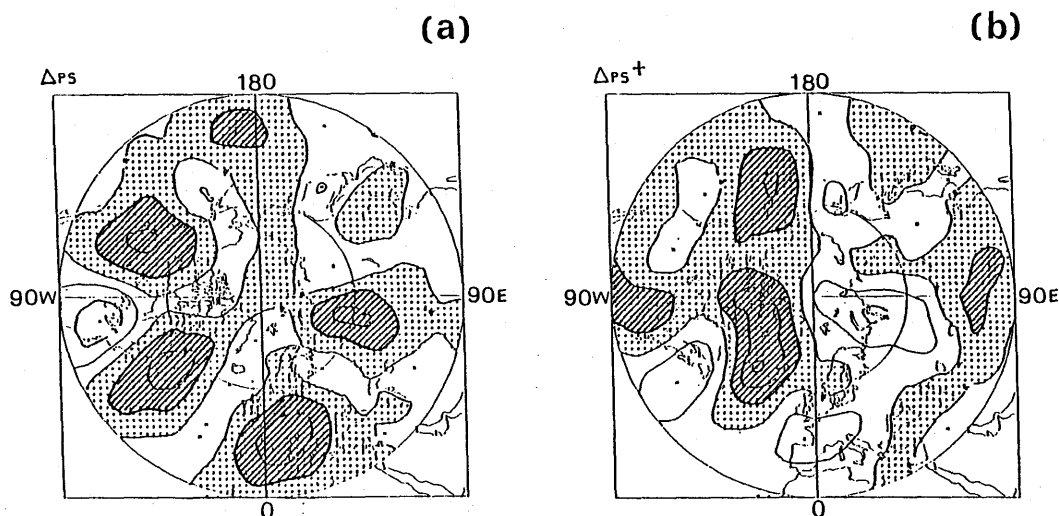


図 9.2.1 (a)地磁気擾乱日とその2日前の平均地上気圧差。
等圧線は2 mb 間隔、影は負値、斜線は-2 mb
以下の値を示す。
(b){a)に同じ。ただし、地磁気擾乱日とその2日
後の平均地上気圧差。

等圧線は2 mb おき、負値は影をつけ、斜線は-2 mb 以下の値を示す。地磁気擾乱の前と後では現われる気圧変化のパターンに大きな違いが見られる。前には、中緯度 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ にかけて波数5～6の波のパターンがきれいに見える。それに反し、地磁気擾乱後にはより高緯度に波数1～3のパターンが現われている。図9.2.1は2日間の変化分を示したが、1日ごとの変化分のパターンを調べると、前の場合には、波数5～6のパターンは約 15° 経度/日で西から東へ流れていく。一方、擾乱後の高緯度のパターンは、ほぼ同じ場所にとどまっているのがわかる。このことにより、磁気擾乱の前に見える変動は低高気圧システムの空間的な移動にともなう変化で特に意味はないと思われる。それに反し、擾乱後に見られるパターンは、定在波の活動の変化と関連していると考えられる。図9.2.2にキイ・デイにおける地上気圧、 $P_s(0)$ を示す。等値線の間隔は5 mb、Hは高压部、Lは低压部を示している。冬季の定在波のパターンであるアリューシャン・アラスカ湾及びグリーンランド、アイスランドの低压帯とシベリアの高压帯がはっきりと見えている。図9.2.1(b)の地磁気擾乱後の気圧変化のパターンと、図9.2.2の定在波のパターンを比べてみると、大ざっぱに言って、気圧低下部と低压部とが対応しているのがわかる。

次に、地磁気擾乱後の変動の鉛直構造を調べてみる。図9.2.3に、地上気圧の変化分(ΔP_s^+)と同様に計算した500 mb 高度の地磁気擾乱後の高度変化分(ΔZ_{500}^+)を示す。等高線は20 m おき、影は負値、斜線は-20 m 以下の値を示す。500 mb 高度の変化も地上気圧の変化とほぼ同一の

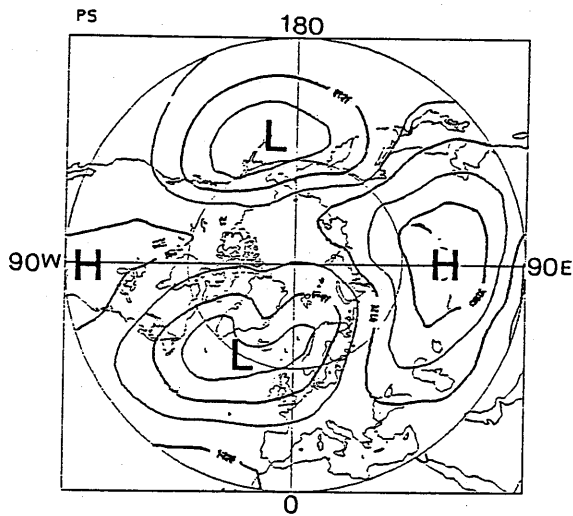


図 9.2.2 地磁気擾乱日の地上気圧。等圧線は 5 mb 間隔、L は低圧部、H は高圧部を表わしている。

パターンが見られる。さらに、各気圧高度で磁気擾乱後の高度変化がどうなっているか、70°N の緯度における高度変化分を図 9.2.4(a)に示す。上から順に 100 mb、300 mb、500 mb、700 mb の高度変化分であり、スケールは右端に記してある。なお横軸は経度（東経）を示す。対流圏全体をと

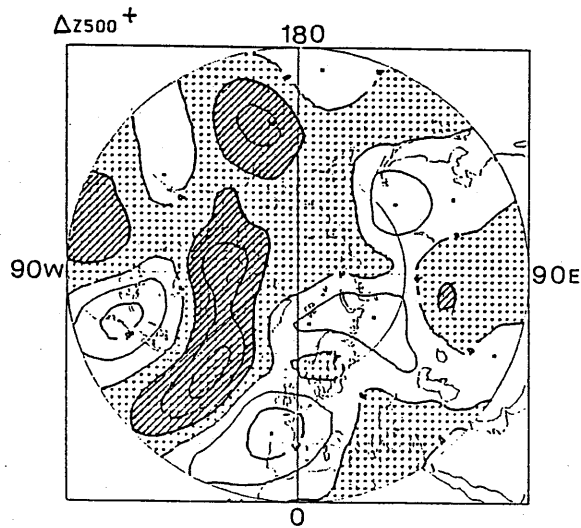


図 9.2.3 地磁気擾乱日とその 2 日後の平均 500 mb 高度差。等高線は 20 m 間隔、影は負値、斜線は -20 m 以下の値を示す。

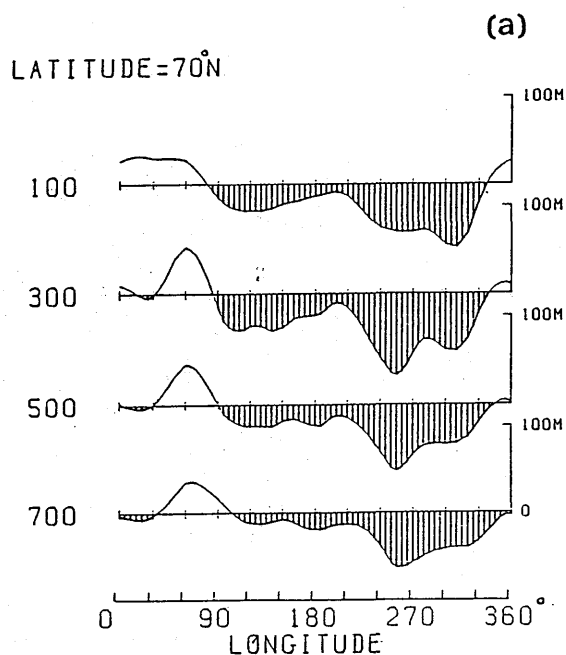
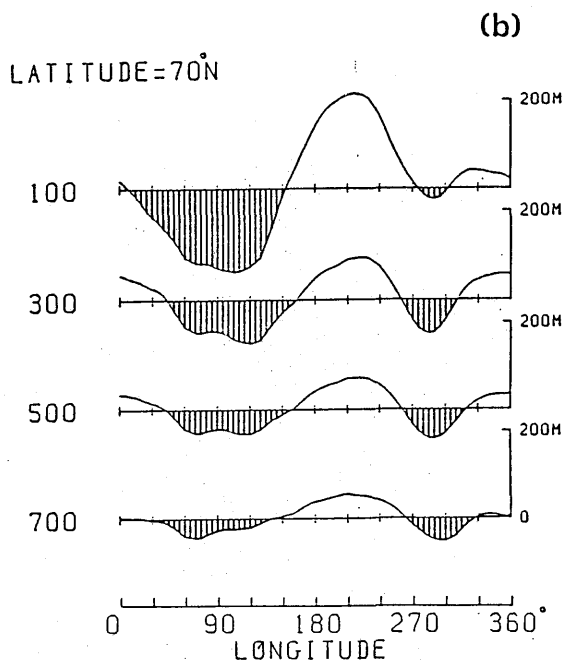


図9.2.4 (a) 北緯70度における、地磁気擾乱日とその2日後の平均気圧高度差。上から順に、100、300、500、700mbの各レベルでの値。スケールは右端に示し、負値は線で影をほどこしてある。



(b) (a)に同じ。ただし、地磁気擾乱日当日における気圧高度の帯状平均からの偏差。

おしてはほぼ同じ変動が見られる。特に対流圏上層では、 150°W の両側で高度の低下が著しい。この経度はちょうど定在波のリッジに位置している。図9.2.4(b)に図9.2.4(a)と同じく 70°N にそった、キイ・デイにおける各気圧高度場の帯状平均からの偏差を示す。すでに地上気圧の変動のところで述べたように、磁気擾乱後の気圧高度変化にも対流圏全体を通して定在波のパターンとの対応が見られる。

9.2.4 予報誤差

前節において磁気擾乱日のあとで、プラネタリー波の定在波の構造との関連を示唆するような変動が対流圏全体で見られることがわかった。こういった変動が対流圏以外の要因によって引き起こされているのなら、その変化は対流圏予報モデルでは予報しえないものであるから予報誤差の増加として現われてくるはずである。従って、地磁気擾乱の後に予報精度がどう変化するかの解析を行った。

図9.2.5に、A) カナダ北部 (70°N , 130°W) と B) 北太平洋 (45°N , 180°W) の2地点のまわり約 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ で平均した 500 mb 高度の平均 48 時間予報誤差 (ϵ_{48}) を示す。横軸はキイ・デイから数えた日数である。エラー・バーは $\sigma/\sqrt{M}$ を表わし、 σ は標準偏差、 M は重ね合わせの数

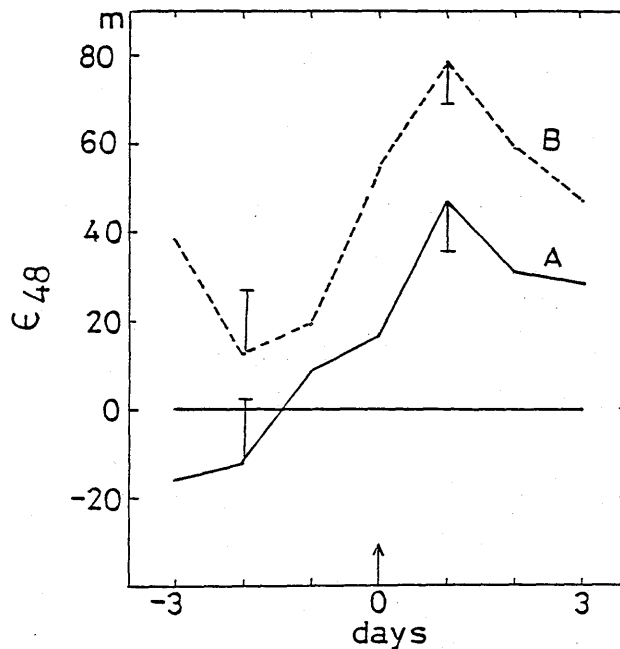


図 9.2.5 500 mb 高度の平均 48 時間予報誤差。横軸は地磁気擾乱日から数えた日数。A) はカナダ北部 (70°N , 130°W)、B) は北太平洋 (45°N , 180°W) における値

で今の場合14である。両地点ともキイ・デイの1日後に予報誤差の明白な増加が見られる。この地磁気擾乱後に予報誤差の増大する二地点は、前節で示した磁気擾乱の後に高度の減少する150°W付近のリッジの両側の地域に対応しており、地磁気擾乱後の気圧高度の変動を数値予報モデルはうまく予報できていないと考えられる。

次に磁気擾乱の後での予報誤差の増大が全球的規模でどのようなになっているかについて調べてみる。ところで図9.2.5から明らかなように、B点の予報誤差はA点より常に約30m大きい。こういった時間的にあまり変化しない、明らかにモデル自身に由来する誤差を除くため気圧高度そのものではなくその時間変化分($\Delta Z / \Delta t$)とその予報値($\Delta Z_F / \Delta t$)をまず次のように求めた。

$$\Delta Z / \Delta t = \{ \tilde{Z}_0(n) - \tilde{Z}_0(n-1) \} / \Delta t$$

$$\Delta Z_F / \Delta t = \{ Z_{48}(n-2) - Z_{24}(n-2) \} / \Delta t$$

ここで $\tilde{Z}(n)$ は重ね合わせ平均をとった500mb高度、添え字、0、24、48はそれぞれ、イニシャル、24時間予報、48時間予報値を示す。

こうして得た500mb高度の時間変化分とその予報値の相互相関係数を北緯30°N以北の範囲について計算した。図9.2.6。キイ・デイの前では相関係数はおよそ0.5であるが、キイ・デイの1日後には0.17と大きな減少を示している。このことにより、地磁気擾乱の後で全球的規模で数値予報精度が悪くなっているといえる。

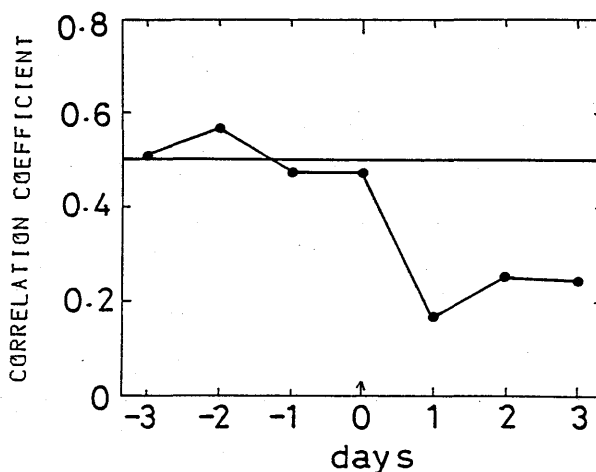


図9.2.6 平均500mb高度の時間変化分とその予報値の相互相関係数。相関係数は北緯30度以北について積分。横軸は地磁気擾乱日から数えた日数。

9.2.5 議論およびまとめ

地磁気擾乱などで引き起こされた中層大気の擾乱が対流圏まで影響をおよぼしているかどうかを5年の冬のデータをもちいて調べた。地磁気擾乱のあった日をキイ・デイとしてデータを重ね合わせて解析を行ない、その結果、地磁気擾乱の後、2日以内にアラスカ湾・カナダ北部・グリーンランド・アイスランド付近で地上気圧の低下（～5 mb）が認められた。この結果は、今回とは別の期間（1880－1974）を同様な方法で解析したMustel et al. (1980)の結果とよい対応を示している。このような磁気擾乱後の気圧変化のパターンが冬期の気圧配置の定在波のパターンと良い対応を示すことから、磁気擾乱後の気圧変化は直接的にはプラネタリー波の構造の変化から引き起こされていると推察できる。また、この変動の鉛直構造を調べた結果も今回解析した100 mb 高度まで対流圏全体で地上気圧の変化と同様な変化が認められた。こうした磁気擾乱後の変化が対流圏の外からの原因によって引き起こされているのであれば、当然、対流圏数値予報モデルでは予報できないので予報誤差の増大という形で現われてくるはずである。北半球4層モデルによる24時間、48時間予報値をもちいて解析を行なった結果、磁気擾乱の後で気圧高度の低下する北太平洋、カナダ北部で磁気擾乱のあった1日後に予報誤差の増大が認められた。また、気圧高度の時間変化分とその予報値について北緯30°以北の範囲で相関係数を調べた結果からも、地磁気擾乱から1日後に予報精度が悪くなることが見い出された。

以上の結果より、地磁気擾乱の後、中層大気に起こった変化によりプラネタリー波の伝播特性が変化し、その結果、対流圏においてもプラネタリー波の構造が変化し、それが今回解析したような気圧変化や高度変化として現われると考えることができよう。

今回は、主に、磁気擾乱の後にどのような形でその信号が対流圏に現われるのか、その全体像の把握に重点をおいて解析を行なった。今後は、さらに、どのような機構を通して影響が伝播していくのか調べていく必要がある。

参 考 文 献

- Angell, J. K., and J. Korshover, 1976 : Global analysis of recent total ozone fluctuations, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 63－75.
- Bucha, V., 1980 : Mechanism of the relations between the changes of geomagnetic field, solar corpuscular radiation, atmospheric circulation and climate, *J. Geomag. Geoelectr.*, **32**, 217－264.
- Geller, M. A., and J. C. Alpert, 1980 : Planetary wave coupling between the troposphere and the middle atmosphere as a possible sun－weather mechanism, *J. Atm. Sci.*, **37**, 1197－1215.

- Hines, C. O., 1974 : A possible mechanism for the production of sun-weather correlations. *J. Atm. Sci.*, **31**, 589-591.
- Larsen, M. F., and M. C. Kelley, 1977 : A study of an observed and forecasted meteorological index and its relation to the interplanetary magnetic field. *Geophys. Res. Lets.*, **4**, 337-340.
- Mustel, E. R., V. E. Chertoprud and N. B. Moulukova, 1980 : The reality of solar-weather relations and the changes of atmospheric circulation of solar origin. *Proceedings in Sun and climate, Toulouse, C. N. E. S.*, 151-161
- Roberts, W. O., and R. H. Olson, 1973 : Geomagnetic storms and wintertime 300-mb trough in the North Pacific-North America area. *J. Atm. Sci.*, **30**, 135-140.
- SCOSTEP, 1977 : Solar-terrestrial physics and meteorology : Working document, I I. Spec. Comm. for Solar-Terr. Phys., Nat. Acad. of Sci., Washington D.C.
- Wilcox, J. M., P. H. Scherrer, L. Svalgaard, W. O. Roberts and R. H. Olson, 1973 : Solar magnetic sector structure : Relation to circulation of earth's atmosphere. *Science*, **180**, 185-186.
- , L. Svalgaard and P. H. Scherrer, 1975 : Seasonal variation and magnitude of the solar sector structure-atmospheric vorticity effect. *Nature*, **255**, 539-540.

第10章 モデリング*

10.1 序—中層大気のモデリング

中層大気の力学過程や微量組成の分布は対流圏の気候に少なからずの影響を与えていると考えられている。従って、中層大気の力学および微量組成に関する知識を深める必要があるわけであるが、そのための一つの方法として、数値モデルに基づく研究がある。とり分け、仮想実験を行なうためには、数値モデルが不可欠である。この章でいう「モデリング」とは、中層大気の総合的な過程が表現できるような数値モデルを開発することを指す。

中層大気の数値モデル（以後略してモデルとのみ言う）の開発は、対流圏のモデル開発の延長として行なわれてきた経路とその他に中層大気独自のモデル開発という経路との2つの経路がこれまでであった。そして最近になってそれらが一つに合流するだけの基礎ができてきたようである。

世界的にみて、中層大気を含む全中性大気モデルが開発され実際に研究に活用されているものは決して多くない。それには、研究面における2つの問題点の解決に時間がかかったことが特に関係していると思われる。すなわち、力学過程における小規模擾乱の役割についての理解不足、もう一つは、放射過程における赤外放射の簡略な計算の難しいこと、などである。その他にも、太陽放射に関わるオゾン光化学の未完成、および水蒸気の分布やその光化学の知識不足などもある。

モデル開発が遅滞していたもう一つの現実的背景は、そのモデルの計算に用いる計算機的能力不足である。つまり、中層大気大循環モデルは、対流圏のみのモデルに比べて、ずっと計算規模が大きい。しかし、このような問題は現在の計算機の急速な発展の前にやがてそれほど深刻なものにならなくなる可能性がある。従って、本質的には、前述の物理過程の研究こそ今もっとも我々に必要である。

今回のMAPに関連するモデリングとしては、主に、中層大気モデルの開発にとって必要不可欠の基礎的問題に重点をおいて研究が進められた。特に、最大の問題でもある小規模擾乱の役割について数値実験的に研究され、本格的なモデルへの有力な基礎を得るに至った。

本章では、大よそ研究の経過に沿って、初期の問題点の認識から始め、その理解のための基礎実験、そして、一つの解決法の提案という順で記述される。

10.2 経度平均モデル

一般に、地球大気の大循環は、経度方向つまり東西方向の一様性を特徴としている。たとえ渦が

* 木田秀次; 予報研究部

あったとしても、それは大むね東西方向に移動するので、結局、東西方向の一様性と矛盾するものではない。そのような性質は、中層大気においては一そう著しく、従って、その大循環の基本構造として、経度平均値でもって代表することができる。

これまでの中層大気大循環の多くの研究もやはりそうした東西方向の一様性を基礎にして、経度平均モデルを用いている。大気大循環の第1近似としてはそれで十分なわけで、我々としても、先ず、経度平均モデルによって、どれだけ中層大気の大循環が理解できるかを検討する必要がある。

それで、プリミティブ方程式系を用い、それに経度平均をほどし、擾乱にかかわる部分をレーリー摩擦およびニュートン冷却によってパラメタライズすることにする。

すなわち、支配方程式は慣用記号を用い、

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{\omega} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} = f \bar{v} - k \bar{u}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{\omega} \frac{\partial \bar{v}}{\partial p} = -f \bar{u} - k \bar{v} - \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial p} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + \bar{\omega} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial p} - \frac{R \bar{T}}{C_p p} \right) = Q$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \ln p} = -R \bar{T}$$

のように表わせる。ここに k は Rayleigh 摩擦係数であり、このモデルの Key point である。

言うまでもなく、レーリー摩擦は、大気大循環に比べてずっと小規模な擾乱による大循環の減速効果を表現している。しかしながら、この時点では、その効果の程度つまり係数の大きさについては全く知識がないとすべきである。

Leovy (1964) は、幾つかの係数を選んで、その仮定の基に大循環の結果がどのように再現されるかを検討したが、その結果、係数の大きさは時定数で表わして (k の逆数)、大よそ10日ぐらいが妥当であると推定した。それと同時に、そういうレーリー摩擦の存在が中層大気の大循環にとって不可欠の要素であることも指摘した。我々のモデル研究は、彼のそういう研究を土台にしたものであると言える。

k については、Leovy (1964) 以後いろいろな試みがなされたが、中層大気全体で一定になるのではなく、どうも中間圏とくに中間圏界面あたりで急激に大きくなると考えた方が良いという有力な研究が為された。それで、今回の研究においても、 k の分布をどのように与えると一層実際のな

大循環が再現できるかを検討した。

それで、高度80km付近で $k^{-1} = 1.5$ 日の極値をもち、それより±30km高度で $k^{-1} = 5$ 日程度になり、それ以下では $k^{-1} = 10 \sim 20$ 日になるような特徴的分布を仮定した。

放射加熱については、大よそLeovy (1964) にならって、夏至条件を仮定し、夏半球側で加熱、冬半球側で冷却を与えた（大よそ第11.8図に同じ）。

経度平均モデルの上端は0.0001mb (約100km) にとり下端は200mb (約10km) である。

静止大気から始めて、約30日ではほぼ平衡に達した。その状態を図示したものが図10.1～図10.4である（その左半分が夏半球側）。

図10.1は、東西風の高度緯度分布を表わす。これから、夏半球側の東風と冬半球側の西風という基本的構造が再現されていること、そして高度約70kmあたりに各々風速の極大が出現しているところなども良く再現されているのが分かる。しかしながら、観測事実と最も異なるところは、高度90～100km付近に存在すべき逆風（夏半球側の西風、冬半球側の東風）が全く再現されていないことであろう。図10.2を参照。

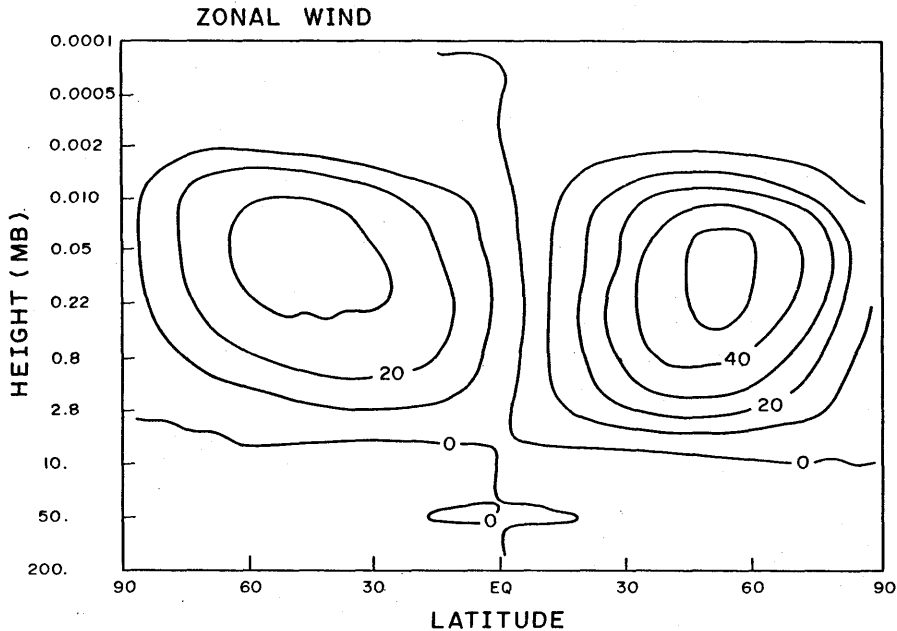


図10.1 東西風 (m/s) の緯度高度分布。上端が約100km、下端が約20km。経度平均モデルの結果。左半分が夏半球、右半分が冬半球。

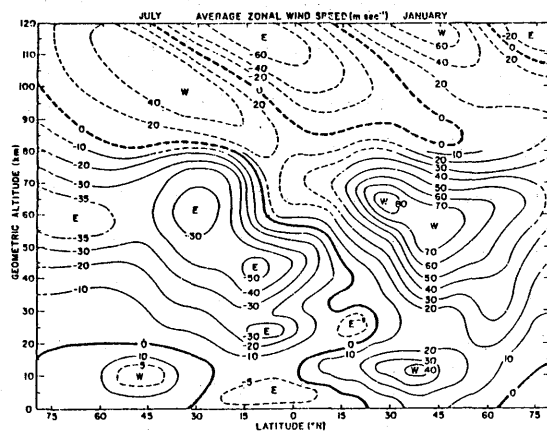


図10.2 東西風の観測値 (CIRAモデル)

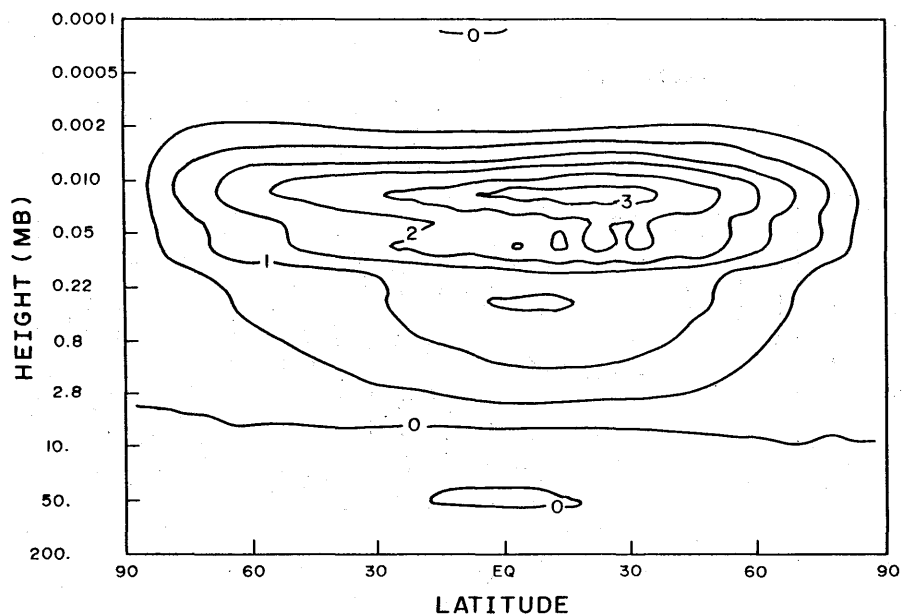


図10.3 南北風 (m/s) の緯度高度分布。

次に図10.3は南北風の分布を示す。中間圏の上部に約3 m/s の極値をもつ著しい子午面流が現われている。

さて気温については、図10.4に示されている通りであるが、観測で見られる気温分布の基本的特徴は良く再現されている。

以上に見られる如く、レーリー摩擦というものを導入することで、中層大気の経度平均の大循環の基本構造は再現できたわけだが、先に指摘した様に、下部熱圏の90~100 km付近に出現する筈の逆風が再現できていない。レーリー摩擦の原理からして、弱風層をつくることは可能であるが(事実今回の実験でも弱風層ができています)、逆風をつくることは無理である。

従って、下部熱圏を含む全中層大気の大循環を再現するには、単純なレーリー摩擦のパラメタリゼーションでは済まないと結論することができる。それでは、レーリー摩擦に代るものとして一体どのような機構が考えるだろうか、ということが次の課題になる。

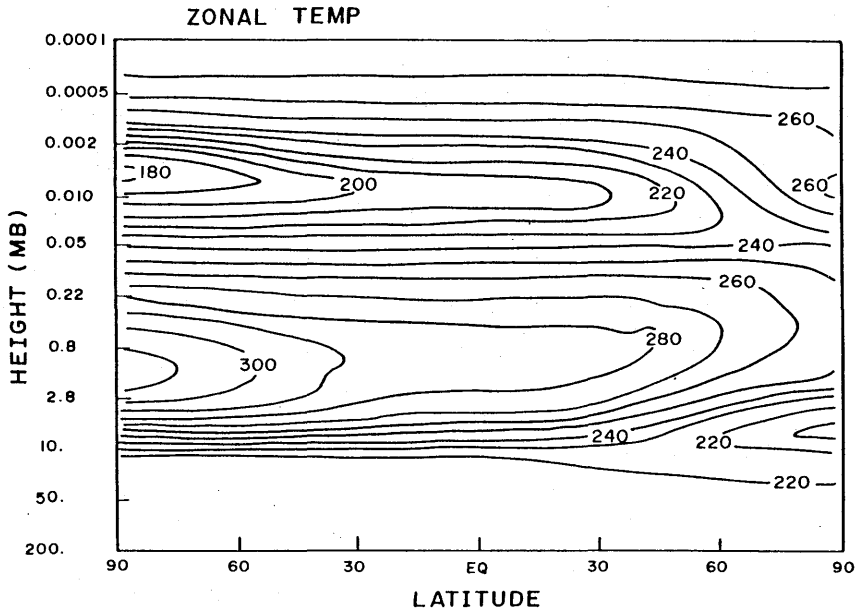


図10.4 気温(K)の緯度高度分布。
経度平均モデルの結果。

10.3 内部重力波の数値実験

前節で述べたように、中層大気大循環にとっては特に中間圏上部から下部熱圏にかけての高度の大循環にとってはレーリー摩擦のようなパラメタリゼーションは有効でないことが分かった。それは、如何なる力学過程が中間圏界面付近の弱風層やその上の逆風層をつくるのであろうか。これについては、1980年代の初期に、Lindzen (1981)やMatsuno (1982)によって、内部重力波説が極めて有力になり、対流圏で発生した内部重力波が上方に伝播しそれが中間圏高度に達したときに砕波もしくは散逸する効果がこれまで知られていたレーリー摩擦としての効果として具現する。と

いう解釈がほぼ確かになった。そして、内部重力波と大循環の相互作用を表現するパラメタリゼーションが彼らによって各々独立に提案され、それらを採用した経度平均モデルが実際に計算された。その結果は、先述の弱風層と逆風層を再現する見事なものであった。

今回の我々の研究では、そういう内部重力波のパラメタリゼーションを用いず、実際に大気中で内部重力波がどのような力学的振舞いをしているかを検討した。そのために、内部重力波が表現できる数値モデルを用いて、波の鉛直伝播とその砕波や散逸を再現し、その結果、大循環とどのような相互作用を起こすかについての数値実験を行なった。

モデルは、水平と鉛直の2次元で、高度は15kmから135kmである。用いた支配方程式系は、後の3次元モデルを念頭において、プリミティブ方程式系である。ただしコリオリの力は無視した。前節の経度平均モデルにおける平均記号を取除き、 $f=0$ 、 $k=0$ 、 $u=0$ としたときの方程式系と同じである。

モデルの水平領域としては500kmをとり、それを10km間隔のグリッドで表現する。鉛直方向には0.8kmの分解能のグリッドをとる。すなわち、先ず最初の実験として、水平波長500kmの波を考え、モデルの最下端の強制条件として与える。一般流としては、最下端の高度15kmで風速0と仮定し、それより上方70kmまでは一定のシアがあって、70km以上では風速100 m/s で一定であるとした。気温についてはほぼ標準大気のを与えた。

初期には、上述のような風速と気温が一般場として存在するが、最下端の強制として、波長500km、周期4時間の定在波を仮定する。この結果、強制によって励起された内部重力波が上方に伝播する。そういう波がモデルの上部に達して砕波する模様が図10.5に示されている。等値線は温位である。不安定層がつくられ、小規模で不規則な乱れが発生しているのが認められるだろう。

次に、以上のような特定のモードの内部重力波に限定せず、もっと实际的に、種々のモードが混在する場合の数値実験を行なった。すなわち、モデルの最下端の強制をランダムな乱れが発生するように変えた。その結果、運動の場は図10.6のようになった。先の場合の規則的な場と異なり、非常に乱れていることが分かるが、高度75km付近から上方では特にその乱れが著しい。これらの乱れは、内部重力波およびその砕波を表わしているものと思われる。

さて、そういう一見大へん複雑な乱れの場にもかかわらず、水平方向の平均値としての一般流は極めて整然としている。図10.7はそういう一般流の鉛直分布の時間変化を示している。初期には70km以上の高度では100 m/s の風速であったが、それらが時間とともに著しく変化し、特に斜線をほどこした領域では逆風が起こっている。すなわち、モデルの最下端でランダムなモードの内部重力波が発生したと想定した場合でも、中間圏界面付近で一般風とは逆向きの風が吹くようになることが示された。これは言うまでもなく、内部重力波の上方伝播において、モードの選択が生じていることを物語っている。

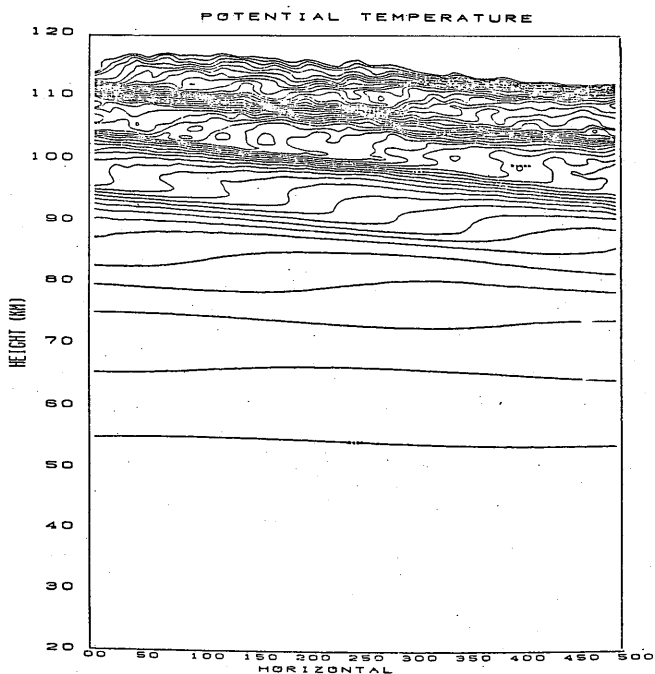


図10.5 波長500km、周期4hの内部重力波の上方伝播。横軸が水平スケール(km)。等値線は温位。

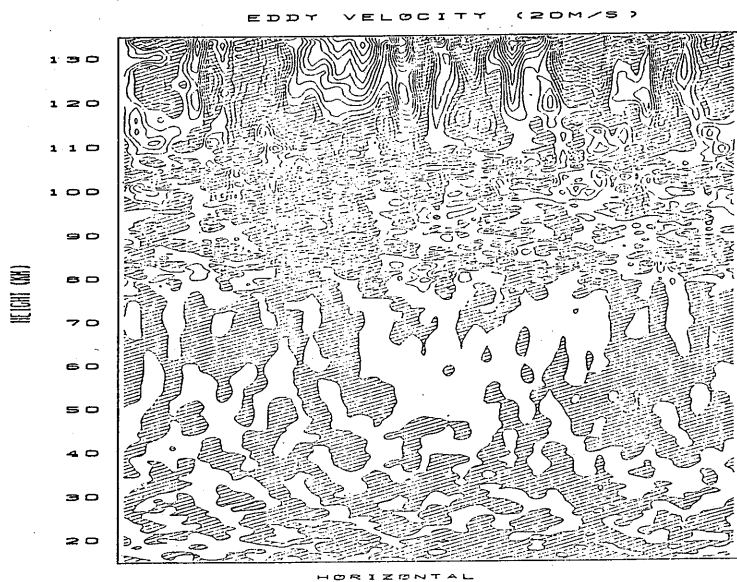


図10.6 ランダム条件の渦風速(20 m/s)の鉛直水平分布。

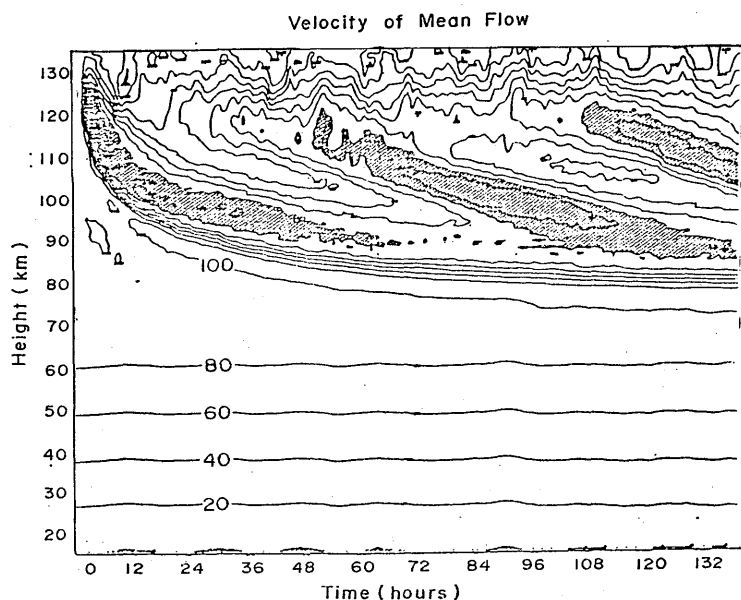


図10.7 水平平均の風速 (m/s) の高度分布の時間変化。
斜線領域は 0 m/s 以下。

10.4 中層大気大循環の数値実験

中層大気の大循環をシミュレートしようとするとき、前述のとおり内部重力波の諸効果をモデルの中に導入する必要がある。これまで、このような効果を表現する方法として、鉛直1次元のパラメタリゼーションが提案 (Lindzen, 1981; Matsuno, 1982) されてきたわけであるが、それらを3次元の大循環モデルに直接導入することは必ずしも適当でない。例えば、波長の長い内部重力波は鉛直方向にまっすぐではなく斜め上方に伝播する。その他、内部重力波が砕波するとき、新しく内部重力波が発生し、それらが上方および下方に伝播しうる。また、一般に種々のモードの内部重力波が合わさることによって生じる静力学的不安定性や乱流の元になるK-H不安定性などは、単一波又は線型的な内部重力波のパラメタリゼーションでは表現が不可能であると思われる。

従って、内部重力波を含む力学過程に関しては、上述のような鉛直1次元のパラメタリゼーションではなく、3次元モデルによる内部重力波の直接表現こそが重要であり、且つそれが最も有効である。

いわゆる大気大循環モデルで中層大気の力学的研究がこれまでも為されてきたが (例えば最近のものとして、Fels et al., 1980; Hunt, 1981; Mahlman and Umscheid, 1984)、それらはいずれも、分解能の点で波長数 100 km 程度の内部重力波の直接表現ができない。

そこで、ここに新しく、少なくとも波長数 100 km 以上の内部重力波を直接陽に表現できるだけの分

解能をもつモデルによって、中層大気の大循環を再現する。

(a) モデルの構成

モデルで扱う領域は、中層大気の全体すなわち高度約15-135 kmで、南北には南極から北極までの全球、ただし、東西には経度にして10度の幅のみをとり、その東西の境界は周期性条件が与えられる。従って、東西方向についてはプラネタリー波のような超長波は表現されず、経度平均運動と波長1,000 km以下の擾乱とのみが含まれていると考えてよい。

このモデルに用いる支配方程式は、いわゆるプリミティブ方程式系である。ただし、鉛直座標として気圧をとる。この方程式系は慣例のものであるので、ここには改めて書き下さないが、現在のモデルに特有の部分のみを示すと、

水平運動 V に関して、

$$\frac{\partial}{\partial t} V + \dots = \dots + D_m(V) + D_i(V)$$

気温 T に関して、

$$\frac{\partial}{\partial t} T + \dots = \dots + D_m(T)$$

である。ここにおいて D_m は分子拡散による効果、 D_i はイオン抗力である。いわゆる渦拡散は、モデル自身が陽に表現するので、そのパラメタリゼーションは除去されている。しかしサブグリッド・スケールの渦拡散については無視されていると言える。

境界条件は、モデルの上端 (0.0001 mb ~ 135 km) において鉛直 P 速度 (ω) を0とし、またモデルの下端 (100 mb ~ 15 km) においても $\omega = 0$ とした。従ってモデルの下端は剛体面である。

用いたグリッド系および差分スキームは、Kida (1977) と同じであるが、グリッドの分解能は、鉛直には約1.6 km、水平には $1^\circ \times 5^\circ$ (経度 $\times$ 緯度) である。このグリッドによって、東西方向に2 ~ 300 km以上の波長の波はほぼ陽に表現できる。ただし、その計算精度については粗い。

エネルギー源としての放射過程についてもごく単純な仮定が用いられる。すなわち、正味の放射加熱率を Q とすれば、

$$Q = H + C$$

ここに、 H は、Leovy (1964) が external heating rate と呼んだもので、水平方向に一様な気温でしかもそれが水平平均としての放射平衡にある場合に起こりうる加熱率である。つまり H は南北に平均すると0になる。もう一つの C は、水平平均としての放射平衡気温 $T_0(z)$ に対して、偏差がある場合に陽に表われる加熱率で、いわゆるニュートン冷却である。 H および C は各々、図10.8および次式で与えられた。

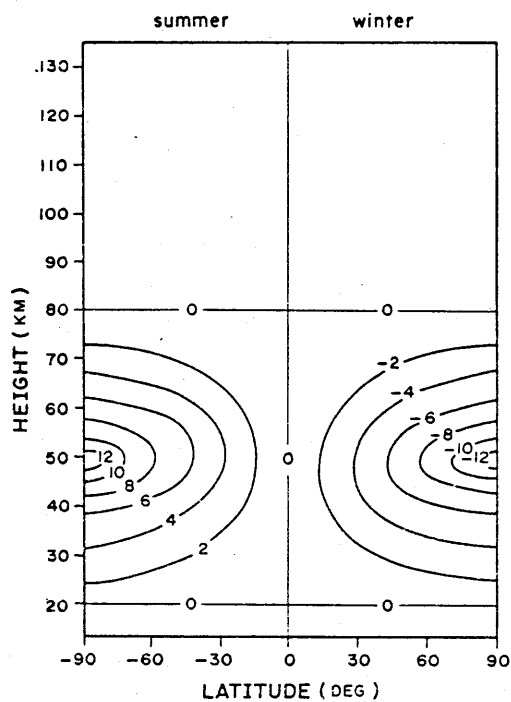


図10.8 外的強制放射加熱冷却率の緯度高度分布。単位は degree/day。

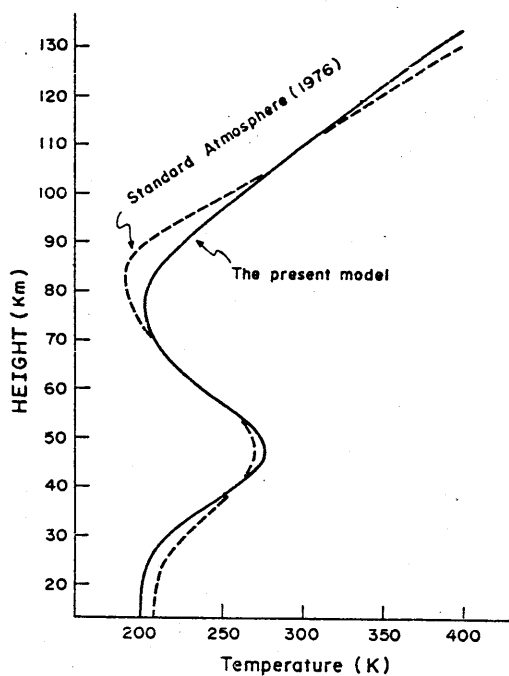


図10.9 南北平均気温 $T_0(z)$ の高度分布。

$$C = -k_c [T - T_0(z)]$$

なお、 $T_0(z)$ の分布は、図10.9のように仮定された。

その他、 D_m および D_i については、標準大気のもより幾分大きめのものが採用された。

(Matsuno, 1982)。

(b) 実験

モデル大気の初期の状態として、気温の鉛直分布は $T_0(z)$ で水平一様、運動は0つまり静止大気などを仮定した。そのような初期条件のもとに、30秒毎の時間積分を行なったが、約3週間後にほぼ平衡に達した。

大気の運動の中に内部重力波を導入するために、次のような方法をとった。すなわち、モデルの最下層において、人為的に、ランダムな u' を与えた。その場合、最下層の u を5分毎（つまり10ステップ毎）に異なる値におきかえた。さらに、その u' の絶対値が約1時間の周期で変化するという仮定も導入した。この仮定は必ずしも結果に大きな影響を与えるものではない。

以上のような方法で、モデル大気の下層でランダムなモードの内部重力波を発生させたわけだが、これは Plumb・McEwan (1978) の室内実験とよく似た方法と言えよう。

(c) 結果

モデルは約30日分積分された。その結果、経度平均の運動および気温の分布は、約3週間後にはほぼ平衡に達した。ここでは特に、時間および経度について平均した状態のみを示す。時間平均をとるための時間の長さは5日であるが、その長さは、モデル内の不規則運動の時間スケールよりも十分に長いものである。

以下の図は、鉛直方向に高度 (km) がとられているが、モデルは気圧座標でありしかも高度補正されていないので、図における高度には±3 km ぐらいの表示誤差があることを含んでおく必要がある。

図10.10は、経度平均の東西風の分布を表わす。比較のために観測モデル (CIRA, 1972) は先の図10.2に示されている。

今回の計算結果では、成層圏・中間圏の風系つまり夏半球側の東風と冬半球側の西風が良く再現されており、特に西風の極大などは観測値に近い。ただし一方では東風が観測に比べて大よそ2倍ほど大きく出ている。この過剰な東風は、モデルの設定に関係していそうで、例えば、下部成層圏の西風の存在を扱わなかったり、放射のHにおける対称成分を完全に無視したことなどが影響しているのかも知れない。従って、より現実に近い大循環の再現には、この辺りの事情を考慮する必要があることを示唆している。

夏半球側から広がっている東風が赤道上成層圏にまで及んでいるが、赤道上の中間圏では西風になっている。この赤道中間圏の西風は冬半球側の西風とつながっているように見えるが、さらに、夏半球側の東風系の上にある西風ともつながっている。こういう西風の分布の形態的特徴はおもしろい。

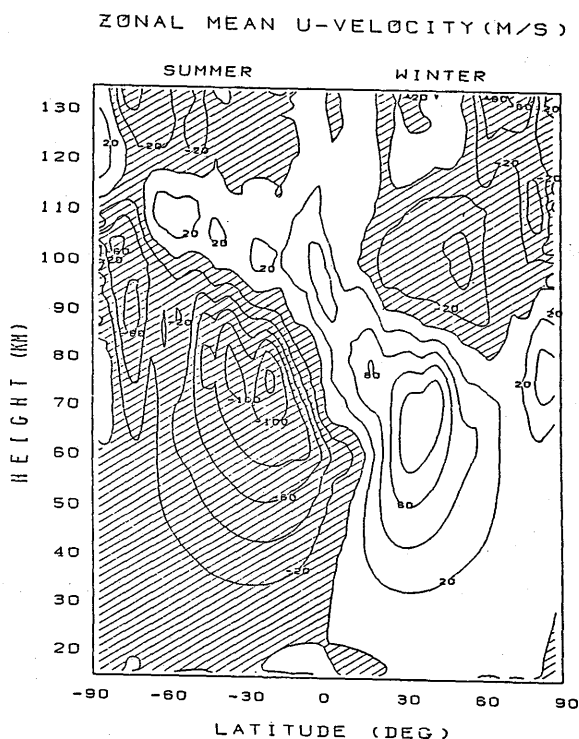


図10.10 経度平均の東西風 (m/s) の緯度高度分布。
斜線領域は東風。

ろいことにCIRAモデルにも見受けられる。モデルにおける赤道中間圏の西風は、赤道成層圏の東風の存在と関係しているのかも知れない。現実の大気においては、準2年周期振動や半年周期振動が顕著であることを考えると、上述のような赤道中層大気の風系の再現はたまたまのものと理解すべきであろう。

高緯度においては、東西風の分布がかなり複雑でノイズ的である。これらは、モデルの種々の問題点が表面化していると受けとれよう。例えば、今回のモデルは東西方向に制約のあるセクター・モデルであることが最も強く影響しているようである。

高度110km以上では、実際より大き目の分子拡散効果が仮定されたことや、酸素による太陽光加熱効果が無視されたことなどにもなって、実際的な状況の再現は全く期待されていない。

次に、風の子午面運動を見ることにする。図10.11は、経度平均の南北風の分布が描かれている。直ぐに気が付く点は、冬極に向かう子午面流が80—110kmの領域で顕著であることである。詳しく見るとその流れには2つの極大がそれぞれの半球の中緯度の90km辺りにある。それらの値は10～15 m/s に達する。最近、Holton (1983) は改良されたパラメタリゼーションを用いて経度平均モデルの数値実験を行なったが、やはり今回の結果に近い子午面流を得ている。さらにMiyahara

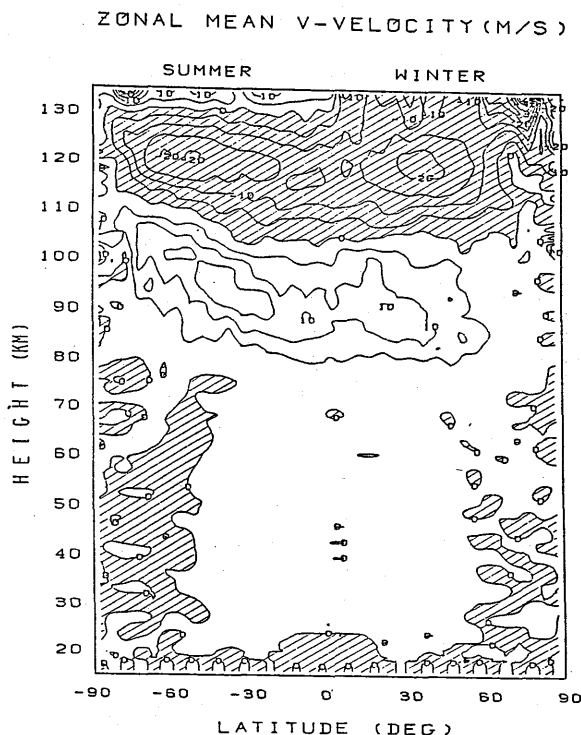


図10.11 経度平均の南北風 (m/s) の緯度高度分布。
斜線は冬極から夏極に向う風。

(1984)の場合も同様の結果を得ている。また、観測においても、10~20 m/s の強い子午面流が認められている。

勿論、以上のような子午面流は、下部熱圏における逆風（中間圏の東西風と逆向きの東西風）の形成と機を一にしたものであることは言うまでもない。

子午面循環のもう一方の成分である鉛直運動の分布は、図10.12に示されている。この図においては、鉛直運動 W (cm/s) は鉛直 P 速度から静力学平衡の仮定に基づいて変換されたものが描かれている。

先の南北風の分布から予想されるように、夏半球側に上昇流が、冬半球側に下降流が見られ、総合すると、子午面循環は全球で1つの循環を形成している。鉛直速度の極大は両半球の各々の90kmあたりの高度に位置し、その大きさは約2 cm/s である。これは、先のMiyahara (1984) の結果とも良く一致している。

注目すべきは、鉛直速度が最大になるのは放射加熱率 H の最大になる高度ではなく、それよりかはるか上方にあるということである。従って、中間圏界面付近の内部重力波による逆風層形成と気圧面を横切る南北風形成とが以上のような鉛直運動を強制しているものと解釈できる。

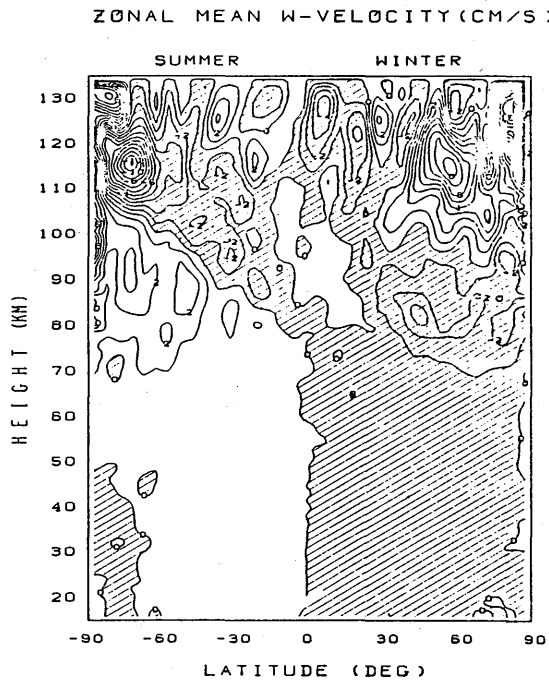


図10.12 経度平均の鉛直流 (cm/s) の緯度高度分布。
斜線は下降流。

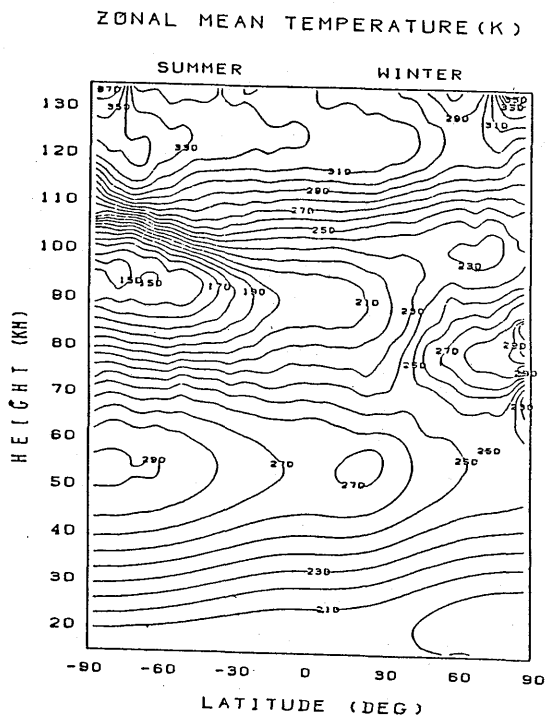


図10.13 経度平均の気温 (K) の緯度高度分布。

さて最後に経度平均の気温分布を見てみよう。それについては図10.13に示されている。成層圏・中間圏においては、放射加熱の分布から期待できるように、高度50km付近で最高になるとともに南北方向に関しては冬極から夏極に向って気温は上昇する。気温の絶対値は多少低めに出ているようだが、気温分布の概況は良く観測結果を再現している。

中層大気の気温分布の著しい特徴である中間圏界面付近の冬極の高温と夏極の低温という分布は、今回のモデルにおいても良く現われている。ただし、冬極の高温の出現はやや過剰である。

このような気温の南北傾度の逆転は、先の鉛直運動の分布によって説明することが可能である。すなわち、上昇運動にともなう断熱膨張および下降運動にともなう断熱圧縮が著しい気温の低下および昇温をもたらす。もちろん、これらの鉛直運動による気温変化は、放射のニュートン冷却（又は加熱）効果と釣り合うところで平衡状態が実現する。（ただし渦運動による熱輸送効果は無視するものとする）従って、気温の南北傾度の逆転は、力学的強制によるものだと結論することができる。

(d) 3次元モデルのまとめ

内部重力波が表現できるだけの分解能をもつ大循環モデルは、中層大気大循環の基本的特徴を再現する上で極めて有効であることが示された。この結果は、東西方向に領域を制約しない全球モデルへとモデリングを発展させる可能性を示唆している。

10.5 モデリングのまとめ

中層大気の力学過程を中心にしたモデリング研究は、中層大気の小規模擾乱の役割を認識することによって飛躍的に進歩したと言える。そして、その小規模擾乱の起源が対流圏にあることは、対流圏モデルとの結合の仕方の一つの方法を見い出したとも言える。すなわち、これまで、対流圏で発生する不規則な乱れは中層大気のモデリングに害をもたらす可能性が恐れられていたが、その恐れは危惧にすぎず、それどころか逆に、そういう不規則な乱れの存在こそがとり分け中間圏から熱圏にかけての大循環そして気温分布に重要であるというわけである。このような知見は、一層の厳密な検討を要することは当然としても、今後の本格的な全大気の大循環モデルへ向けて楽観的な見通しを与える上で有効である。

References

- CIRA (1972), COSPAR International Reference Atmosphere
- Fels, S. B., Mahlman, J. D., Schwarzkopf, M. D., and Sinclair, R. W., 1980 :
Stratospheric Sensitivity to Perturbations in Ozone and Carbon Dioxide,
J. Atmos. Sci., **37**, 2265 - 2297.
- Holton, J. R., 1983 : The Influence of Gravity Wave Breaking on the General
Circulation of the Middle Atmosphere, J. Atmos. Sci. **40**, 2497 - 2507
- Hunt, B. G., 1981 : The Maintenance of the Zonal Mean State of the Upper
Atmosphere as Represented in a Three-dimensional General Circulation
Model Extending to 100km, J. Atmos. Sci., **38**, 2172 - 2186
- Kida, H., 1977 : A Numerical Investigation of the Atmospheric General
Circulation and Stratospheric Tropospheric Mass Exchange : I. Long term
Integration of a Simplified General Circulation Model, J. Met. Soc. Japan,
55, 52 - 70.
- Leovy, C., 1964 : Simple Models of Thermally driven Mesospheric Circulation,
J. Atmos. Sci., **21**, 327 - 341.
- Lindzen, R. S., 1981 : Turbulence and Stress due to Gravity Wave and Tidal
Breakdown, J. Geophys. Res., **86**, 9707 - 9714.
- Mahlman, J. D., and Umscheid, L. T., 1984; Dynamics of the Middle Atmosphere :
Successes and Problems of the GFDL "SKYHI" General Circulation Model
Dynamics of the Middle atmosphere (ed. by Holton and Matsuno), Terra Sci.
Publ., Tokyo, 501 - 525
- Matsuno, T., 1982 : A Quasi One-dimensional Model of the Middle Atmosphere
Circulation Interacting with Internal Gravity waves, J. Met. Soc. Japan,
60, 215 - 226.
- Miyahara, S., 1984 : A Numerical Simulation of the Zonal Mean Circulation of
the Middle Atmosphere Including Effects of Solar Diurnal Tidal Waves and
Internal Gravity Waves : Solstice Condition, Dynamics of the Middle
Atmosphere (eds. by Holton and Matsuno), Terra, Sci. Puble. Tokyo, 271 - 287.
- Plumb, R. A., and McEwan, A. D., 1978 : The Instability of a Forced Steady
Wave in a Viscous Stratified : A Laboratory Analogue of the Quasi-biennial
Oscillation, J. Atmos. Sci., **35**, 1827 - 1839.

参 考 資 料

I. 高緯度地方におけるオゾンの季節変化*

I. 1 はじめに

南半球高緯度におけるオゾンの変動については、種々の観測上の困難及び基地数が少ないことなどの理由により、データの蓄積が充分ではない。MAP観測の一環として、1982年2月から1983年1月まで南極昭和基地において、オゾンの特別観測が実施されたのでその結果について報告する。

I. 2 研究の背景

昭和基地におけるオゾン観測は、1961年第5次南極観測隊において最初に実施された(清野他、1963)。しかし、昭和基地の閉鎖により、1962年～1965年は観測が中止された。オゾンゾンデ観測を含む本格的なオゾン観測は、1966年第7次南極観測隊により実施された。清水(1969)は、この観測結果の整理を行い、昭和基地において、春季にオゾンが急増する現象が観測されたこと、9～11月において、オゾン全量の変化と50mbの気温の変化の対応が良いことを報告している。昭和基地におけるオゾン全量観測は、1973年に測器のオーバーホールのため中断した以外は現在まで継続されている。特に第10次隊における極夜期間の月光によるオゾン全量観測は、これまで唯一の昭和基地における極夜期間を含むオゾン全量観測であり、昭和基地のオゾン全量の一年間の平均値を算出する重要な根拠となっている(石田等、1971; 酒井、1979)。現在、昭和基地は南極点にあるAmundsen-Scott基地と共にオゾン観測を実施している数少ない観測点の一つであり、南半球高緯度のオゾンの研究の重要な拠点となっている(Chubachi, 1984)。

I. 3 観測項目、測器及び回数

今回の観測で従来の観測に加え実施された項目は以下の通りである。

(1) 月光による極夜期間のオゾン全量観測

ドブソン分光光度計Beck 122が使用された。補正手続き一覧表を表I.1に示す。

(2) オゾンゾンデ観測

KC-79型オゾンゾンデが使用された。観測回数35回。観測一覧表を表I.2に示す。

(3) オゾン反転観測

ドブソン分光光度計Beck 122に反転自動観測装置を取り付けて観測が実施された。観測回数28回。

* 忠鉢 繁：高層物理研究部

表 I. 1. 月光観測、反転観測に対する補正手続一覧

月光観測、反転観測に対する R 対 N 表補正手続 (Beck 122, 南極昭和基地)

		2 月		3 月		4 月		5 月		6 月		7 月	
		10日	20日	10日	20日	10日	20日	10日	20日	10日	20日	10日	20日
△No. 2		- 6.3											
2ランブ 点検 実施日	A												
	C												
	D												
2ランブ点検結果		正 常				異 常		正 常		異 常		正 常	
R対N表		ShN-83-1				ShN-82-4月下旬 5月中旬(暫定)		ShN-83-1		ShN-82-6月下旬-7月下旬		ShN-83-1	
R対N表 A の補正 D						内挿による 補 正				ShN-83-1を使用する。(A,D共) (誤差が許容範囲内である)			
		ウエッジクリーニング				ウエッジクリーニング				ウエッジクリーニング			

		8 月		9 月		10 月		11 月		12 月		1 月	
		10日	20日	10日	20日	10日	20日	10日	20日	10日	20日	10日	20日
△No. 2		- 6.3		- 5.9									
2ランブ 点検 実施日	A												
	C												
	D												
2ランブ点検結果		異 常		正 常									
R対N表		ShN-82 8月中旬		ShN-83-1									
R対N表 A の補正 D		内挿 補正なし											
		ウエッジクリーニング											

(4) 地上オゾン濃度観測

ダシビ地上オゾンモニター 1003-AH 型により測定が実施された。

I. 4 観測成果

I. 4. 1 オゾン全量観測

図 I. 1 に、1982 年 2 月～1983 年 1 月までの昭和基地におけるオゾン全量を示す。白丸が太陽直射光観測、四角が天頂光観測、黒丸が月光観測であることを示している。ここに示された値は、日代表値（オゾン観測指針参照）である。月光観測は、月出から月没までの夜間を 1 単位として行われるため、この中で最も大気路程 μ が小さな時（月の高度角が一番大きい時）の観測を夜間代表値として示している。この中で 9 月 4 日以降実施された 9 夜間については、太陽光による観測との比較が可能であり、夜間代表値を、太陽光による日代表値と共に示してある。図 I. 1 に示されている通り、この期間の月光観測と太陽光観測との間には大きな違いは見られない。

I. 4. 2 オゾンゾンデ観測

表 I. 2 オゾンゾンデ観測一覧表

日 付	飛 機	時刻	気 球				中止理由	発信器部		空ごう気圧計		サーミスタ 温 度 計	電 池		懸 吊 物						浮力 (100g) 単 位	備 考
			型					番号	型	番号	型 番号		B80 I R S	B79 I R S	バラ シ ュ	雨 天 シ ュ バ ラ ト	追 跡 電 灯	巻 下 器	特殊 巻下			
			K	T	600 g	2000														KC 79		
1982 年	2 / 9	11:00		○		○		B.B	○	M-1	○	P-1	M 41784		○	×	×	×		○	3400	T 2000 不良, 巻下げし不良
	2 / 16	17:39		○		○		B.B	○	M-2	○	P-2	M 41785		○	×	×	×		○	3400	
	2 / 27	16:54	○					B.B	○	M-3	○	P-3	M 41802		○	×	×	×		○	3400	
	3 / 11	12:09	○			○		B.B	○	M-4	○	P-4	M 41805		○	×	×	×		○	3400	
	3 / 21	11:34		○		○		B.B	○	M-5	○	P-5	M 41807		○	×	×	×		○	3400	
	3 / 29	10:03		○		○		B.B	○	M-6	○	P-6	M 41808		○	×	×	×		○	3500	
	4 / 13	10:04		○		○		B.B	○	M-7	○	P-7	M 41809		○	×	×	×		○	3400	
	4 / 14	10:43		○		○		B.B	○	M-8	○	P-8	M 41810		○	×	×	×		○	3400	
	4 / 25	16:34		○		○		B.B	○	M-9	○	P-9	M 41813		○	×	×	×		○	3400	
	5 / 8	21:00		○		○		B.B	○	M-10	○	P-10	M 41817		○	×	×	×		○	3400	
	5 / 24	11:11		○		○		B.B	○	M-11	○	P-11	M 47880		○	×	×	×		○	3300	
	6 / 7	04:17		○		○		B.B	○	M-12	○	P-12	M 47885		○	×	×	×		○	3400	
	6 / 13	22:02		○		○		B.B	○	M-13	○	P-13	M 47888		○	×	×	×		○	3400	
	6 / 22	09:56		○		○		B.B	○	M-14	○	P-14	M 47889		○	×	×	×		○	3400	
	6 / 29	17:42		○		○		B.B	○	M-16	○	P-15	M 48660		○	×	×	×		○	3400	
	7 / 6	23:39		○		○		B.B	○	M-17	○	P-17	M 48662		○	×	×	×		○	3400	
	7 / 20	10:56		○		○		B.B	○	M-15	○	P-16	M 47890		○	×	×	×		○	3200	
	7 / 31	17:44		○		○		B.B	○	M-18	○	P-18	M 48663		○	×	×	×		○	2900	
	8 / 6	16:56		○		○		B.B	○	M-19	○	P-19	M 48665		○	×	×	×		○	3400	
	8 / 15	23:36		○		○		B.B	○	M-20	○	P-20			○	×	×	×		○	3400	
	8 / 29	16:37		○		○		B.B	○	M-21	○	P-21	M 48668		○	×	×	×		○	3400	
	8 / 31	16:31		○		○		B.B	○	M-22	○	P-22	M 48671		○	×	×	×		○	2900	
	9 / 17	10:30		○		○		B.B	○	M-23	○	P-23	M 48672		○	×	×	×		○	2900	
	9 / 23	11:52	○			○		B.B	○	M-24	○	P-24	M 48673		○	×	×	×		○	2900	
	10 / 5	11:13		○		○		B.B	○	M-25	○	P-25	M 48674		○	×	×	×		○	3300	
	10 / 14	10:50		○		○		B.B	○	M-26	○	P-26	M 48675		○	×	×	×		○	3300	
	10 / 27	10:58		○		○		B.B	○	M-27	○	P-27	M 48676		○	×	×	×		○	3300	
	10 / 28	17:07		○		○		B.B	○	M-28	○	P-28	M 48677		○	×	×	×		○	3300	
	11 / 5	10:42		○		○		B.B	○	M-29	○	P-29	M 48679		○	×	×	×		○	2900	
	11 / 21	17:45		○		○		B.B	○	M-30	○	P-30	M 48680		○	×	×	×		○	3300	
	11 / 26	10:52		○		○		B.B	○	M-31	○	P-31	M 48682		○	×	×	×		○	3300	
	12 / 5	12:03		○		○		B.B	○	M-32	○	P-32	M 48683		○	×	×	×		○	2900	
	12 / 17	10:55		○		○		B.B	○	M-33	○	P-33	M 48685		○	×	×	×		○	3300	
	1983 年	1 / 5	09:35		○		○		B.B	○	M-34	○	P-34	M 48686		○	×	×	×		○	3300
		1 / 12	11:41		○		○		B.B	○	M-35	○	P-35	M 48687		○	×	×	×		○	3300

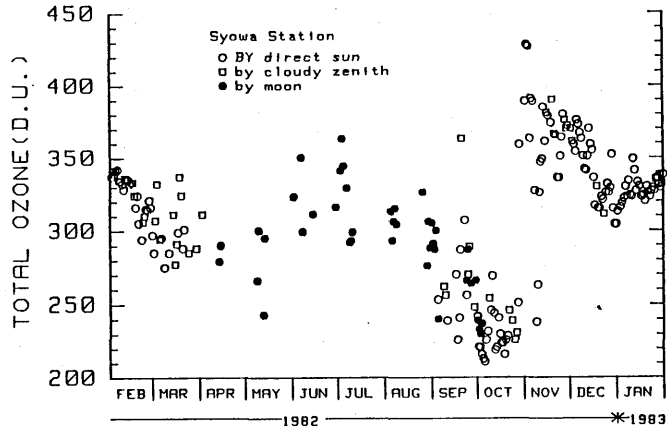


図 I. 1 昭和基地におけるオゾン全量の日代表値
(月光観測については、夜間代表値)。期
間は 1982 年 2 月～1983 年 1 月。

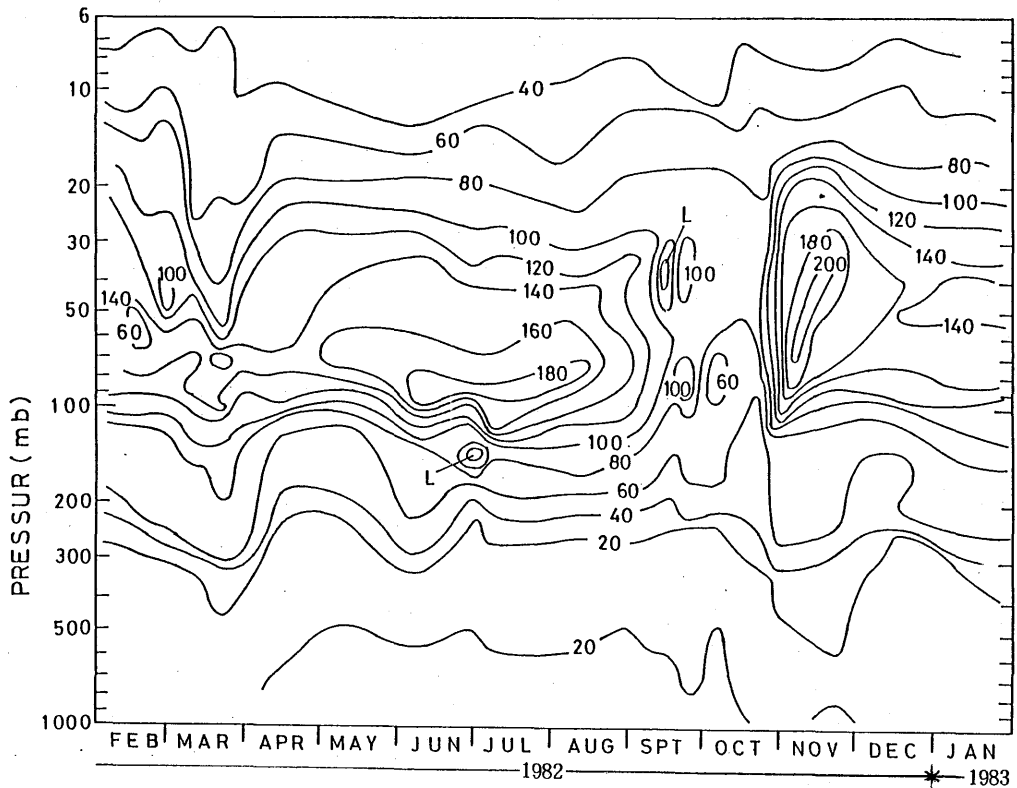


図 I. 2 昭和基地におけるオゾン分圧の垂直分布の季節変化
(単位 μ mb)

図 I. 2 にオゾンゾンデ観測によるオゾン全量の観測結果を示す。観測期間は図 I. 1 と対応しており、オゾン全量の変化に対応するオゾン分圧の高度分布を知ることができる。例えば図 I. 1 に見られるオゾン全量の冬期極大は、100 mb 付近の高度の分圧の極大に対応していることがわかる。

I. 4. 3 反転観測

昭和基地において1982年2月～1983年1月に、オゾン反転観測を実施した。観測結果はカナダのオゾンセンターに送られ、オゾン垂直分布の計算が行われた。図 I. 3. (a) に第3層 (125～62.5 mb)、(b) に第4層 (62.5 mb～31.2 mb) のオゾン反転観測から得られたオゾン分圧をオゾンゾンデ観測から得られた同じ高度のオゾン分圧と比較して示す。○はオゾンゾンデから得られた分圧を、×は反転観測から得られた分圧を示す。ここに示された第3層及び第4層については、反転観測か

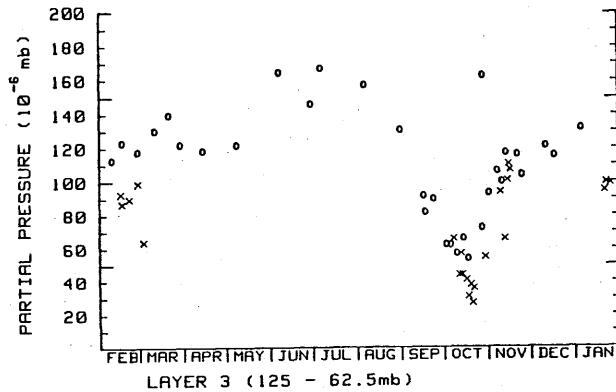
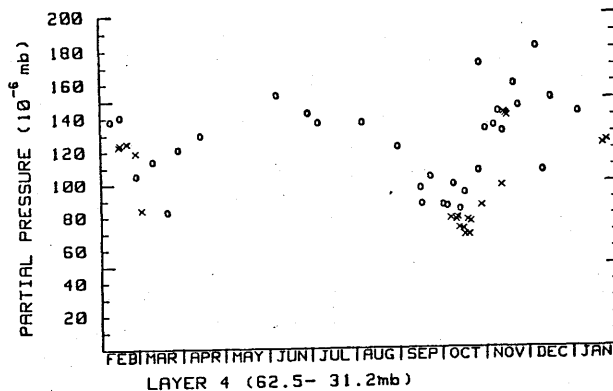


図 I. 3 a) 第3層(125～62.5mb) における反転観測から得られたオゾン分圧(○)と、オゾンゾンデから得られたオゾン分圧(×)。
(昭和基地、1982年2月～1983年1月)



b) 第4層(62.5 mb～32.5mb) における反転観測から得られたオゾン分圧(○)と、オゾンゾンデから得られたオゾン分圧(×)。
(昭和基地、1982年2月～1983年1月)

ら得られたオゾン分圧がオゾンゾンデ観測から得られたオゾンゾンデ分圧より一般的には小さく、その変化傾向は良く一致していることがわかる。

I. 4. 4 地上オゾン濃度観測

図 I. 4 に、1982年2月～1983年1月に昭和基地において観測された地上オゾン濃度を示す。たて軸は体積混合比 (ppbv) で目盛られている。図上に示された値は1時間平均値の日平均値である。期間は前出の図と対応しており、比較が可能である。例えば、オゾン全量の冬期極大の時期と、地上オゾン濃度の冬期極大の時期とが一致していること、10月28日に起こったオゾン全量の急増現象に対応する変化が地上オゾン観測には見られないことなどがわかる。観測期間の平均値は28ppbv である。

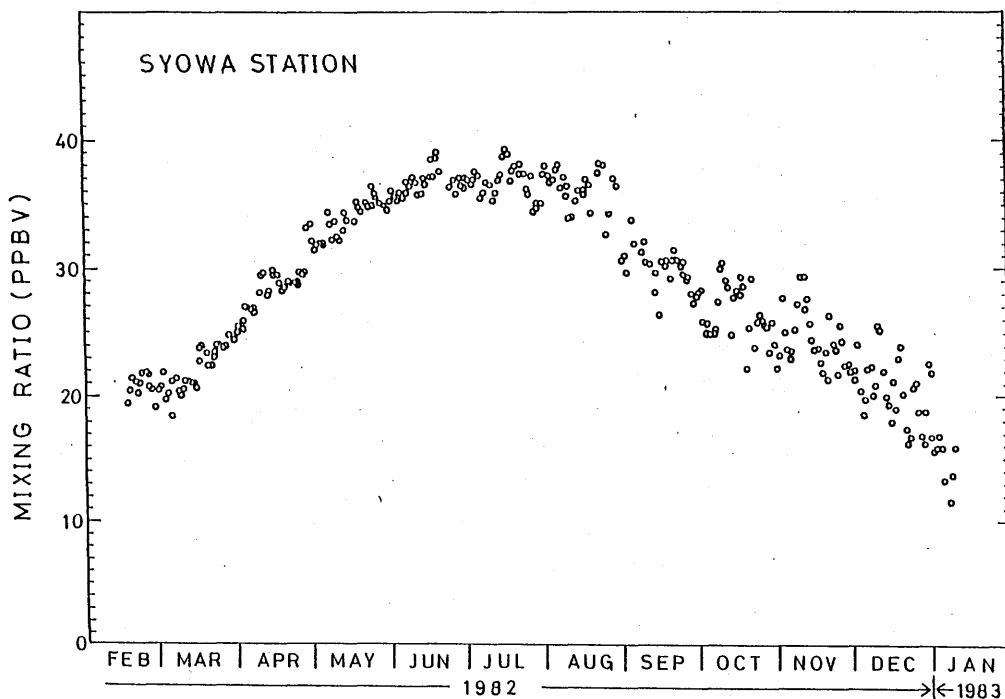


図 I. 4 昭和基地における地上オゾン濃度 (1982年2月～1983年1月)

I. 5 まとめ

以上、1982年2月～1983年1月に昭和基地で実施したオゾン総合観測の結果を示した。この観測から次の結果が得られた。

1. 1982年の冬期にオゾン全量の極大が観測された。又、突然昇温にともなうオゾン全量の急増が観測された。

2. オゾンゾンデ観測から、1982年冬期のオゾン全量の極大は、100mb付近のオゾン分圧の増加に対応している。
3. オゾン反転観測と、オゾンゾンデ観測の比較から、第3層、第4層においては、反転観測から得られたオゾン分圧はオゾンゾンデから得られたオゾン分圧より小さく、これらの変化傾向は良く一致している。
4. 地上オゾン濃度は、冬期極大、夏期極小の顕著な1年周期を示している。観測期間の平均は、28 ppb である。

I. 6 謝 辞

本研究を実施するにあたり第23次南極観測隊気象定常部門、吉平保、首藤康雄、梶原良一、佐々木正彦の各隊員の助力があったことを述べると共にお礼申し上げます。又、データの整理、解析を実施するにあたって助言頂いた、気象研究所高層物理研究部長村松久史、高層気象台前台長清水正義、同観測第3課長大越延夫の各氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Chubachi, S. 1984; Preliminary Result of Ozone Observations at Syowa Station From February 1982 to January 1983, Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **34**, 13-19.
- 2) 清野善兵衛・三枝隆次・鈴木信雄 1963: 第5次南極地域観測隊越冬気象部門概報、南極資料、**17**、1-17。
- 3) Shimizu, M. 1969: Vertical Ozone Distribution at Syowa Station, Antarctica in 1966. JARE Sci. Rep., Ser. B(Meteorol)
- 4) 石田恭市・鈴木剛彦・酒井重典 1971: 昭和基地における1969年のオゾン観測、南極資料、**39**, 32-38.
- 5) 酒井重典 1979: 昭和基地におけるオゾン全量、南極資料、**67**, 115-123.
- 6) 気 象 庁 1980: オゾン観測指針(1980年版)、気象庁、pp 123.

II. 赤外分光法による N_2O 全量の定量*

II. 1. はじめに

第3章で述べたように赤外分光観測では、 N_2O 、 CH_4 、 $CFCl_3$ 、 CF_2Cl_2 、 HNO_3 等の微量成分の大気中全量を測定することを目的としている。これらの微量成分は、中層大気の熱的構造をきめるオゾン層に関する光化学物質 (NO_x 、 HO_x 、 ClO_x) の供給源あるいは生成物と考えられている (WMO、1982; Wuebbles, 1983 等)。さらに近年これらの微量成分が人間活動によって顕著な増加傾向を示していることが指摘され、その温室効果による気候変化も懸念されるようになった。

(Ramanathan et al., 1985 等)。これらの物質は主として生物活動あるいは人間活動によって生成されており、その地球大気中における動向を把握するために地球規模での理解をすることが必要であり、発生源から最も離れた地域である南極域での観測は重要である。ここでは、第24次および第25次南極地域観測隊において実施された赤外分光観測の観測方法および現在得られた N_2O についての結果を報告する。

II. 2. 装 置

観測に用いた分光装置はフーリエ変換型赤外分光器 (JIR-40X: 日本電子株式会社製) で、南極昭和基地 (69°00' S, 39°35' E) の観測棟内に設置された (牧野他、1985)。太陽追尾装置は屋上に取付けられ、室内に太陽光が導かれ分光器の外部光源用入射孔より入射された。図 II.1 に

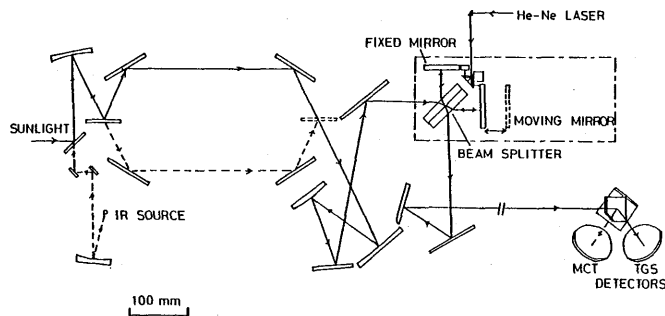
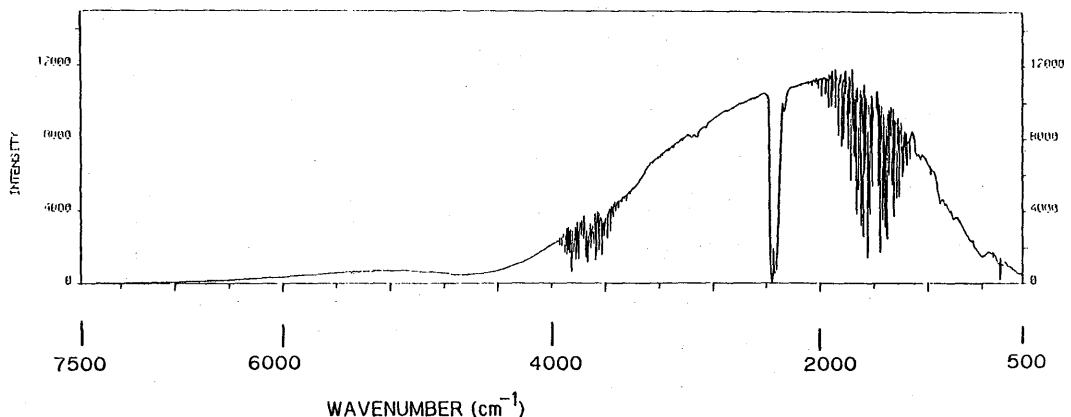


図 II. 1 分光器の光学系。光源は太陽光以外に内部にグローバー光源を有する。分析用には2経路を切り替え測定する。Michelson型干渉計より出た光はTGS検知器によりインタフェログラムとして検出される。

* 牧野行雄、村松久史、塩原匡貴

分光装置の光学系を示した。分光器は元々室内分析用に設計されたもので内部光源としてグローバールンプを有するが、代りに外部の太陽光が光源として入射されそのスペクトルが測定された。分光器の光路中には、分析試料用とレファレンス用の2つの光路があり、通常の分析測定では切替えながら使用しているが、太陽光の場合には片側の光路のみが使用された。分光器の波長（ここではその逆数の波数を用いる）による応答特性を校正するために、標準黒体炉が使用された。校正スペクトルを図Ⅱ.2に示した。分光器内の光学素子はアルミ蒸着の鏡及びGe蒸着のKBr半透鏡よりなっている。検知器はTGS焦電型検知器が用いられた。分光器以外の太陽追尾装置を含む外部光学



図Ⅱ.2 分光器の校正関数。縦軸は任意の単位。

系は全て金蒸着鏡よりなる。表Ⅱ.1に分光装置と太陽追尾装置の主な仕様を掲げた。通年観測では、分解能は 1.0 cm^{-1} に設定された。スキャンは50回を重ねたものが主体である。インタフェログラムよりスペクトルを計算する際にアボダイゼーション操作が行われるが、その結果としてのスリット関数（装置関数）を図Ⅱ.3に示す。

Ⅱ. 3 観測結果

南極MAPにおける観測は、1983年3月24日より可能となり1984年12月29日まで続けられた。この間のべ111日間観測し487個の太陽スペクトルが得られた。得られたスペクトルの日付と観測時の太陽天頂角を図Ⅱ.4に示す。観測地点が高緯度にあるために極夜期が存在し、その前後の観測は太陽天頂角が 90° に近い時に行われている。図Ⅱ.5に1983年5月8日に得られたスペクトルの波数 $2420 - 2650\text{ cm}^{-1}$ の部分为例として示す。図で縦軸は太陽放射の単位波数あたりの強度を示すものであるが、図の出力は絶対値ではなく任意の単位となっている。図の中心部に $\text{N}_2\text{O}(2\nu_1)$ 吸収帯が存在している。以下この吸収帯から N_2O 全量を求めた。

一般に、大気中での散乱を無視できる場合に強度 $I_0(\nu)$ (ν は波数： cm^{-1})の光源からの放射

表 II. 1 分光器および太陽追尾装置の仕様

1. 分光器	
測定波数域：	400 - 4000 cm^{-1} (グローバー光源)
分 解 能：	0.12 - 8 cm^{-1}
波 数 精 度：	0.01 cm^{-1} (但し 4000 cm^{-1} にて)
迷 光：	0.01 % 以下
検 知 精 度：	0.2 % (但し 2000 cm^{-1} における透過率)
(太陽光観測; 南極MAP)	
測定波数域：	500 - 7500 cm^{-1}
分 解 能：	0.7 cm^{-1} (apodized)
スキャン回数：	50回 (約5分間)
検 知 器：	TGS焦電型
2. 太陽追尾装置	
追 尾 精 度：	3分 (角度)
有 効 口 径：	150 mm ϕ
鏡	：金蒸着 (2枚)

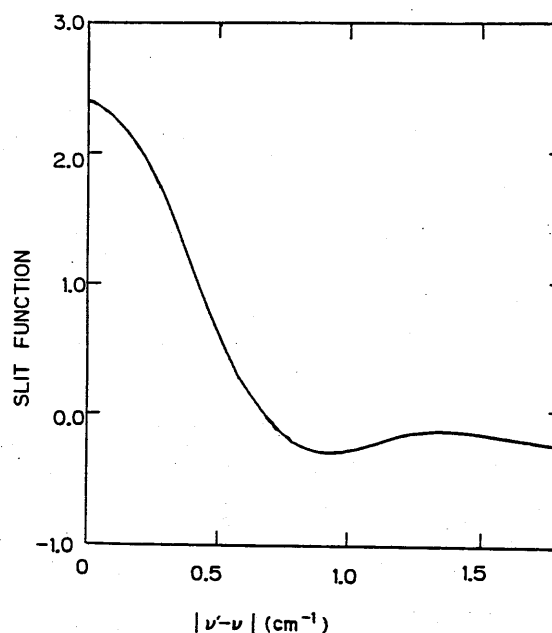


図 II. 3 装置 (スリット) 関数。アポダイゼーション操作を行ったもの。分解能設定は 1.0 cm^{-1} 。半値幅 0.7 cm^{-1} の三角形関数に近い。

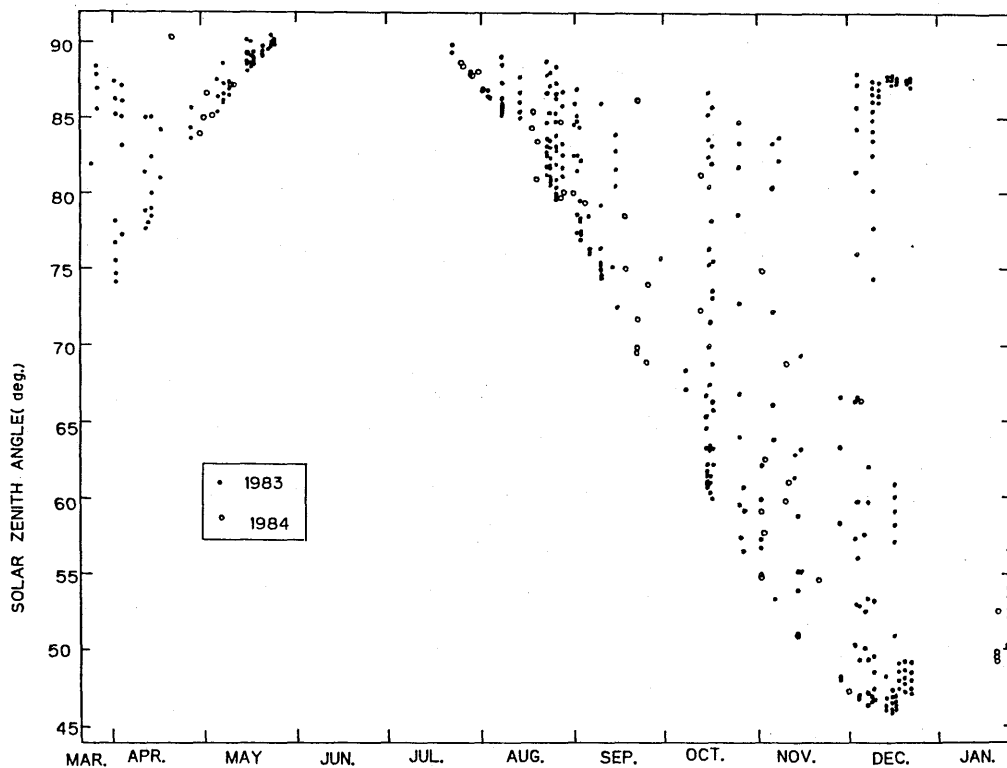


図 II. 4 南極MAPにおける観測実施日とその時の太陽天頂角。TGS検知器を用い、分解能設定値が 1.0 cm^{-1} で、解析可能なスペクトルのみを選んだ。但し、重複は一点となっている。

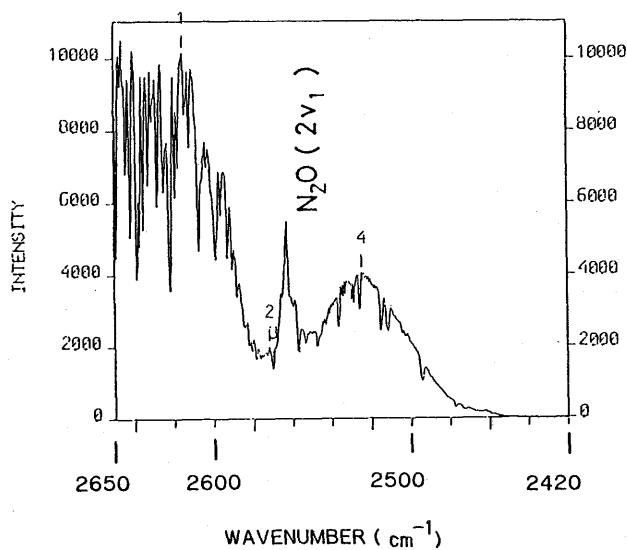


図 II. 5 1983年5月8日13時40分(LT)観測のスペクトルの一部。
($2420 - 2650\text{ cm}^{-1}$)。

は他の場所で

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp \left[- \int_0^\infty \sum_{i=1}^M n_{abs}^{(i)}(s) k^{(i)}(\nu, s) ds \right] \quad \text{..... (II. 1)}$$

と表現される。ここで、 $n_{abs}^{(i)}(s)$ は i 番目の吸収体の個数密度 (molecule/cm³)、 $k^{(i)}(\nu, s)$ は波数 ν における i 番目の吸収体の単色光吸収係数 (cm²/molecule) を表わし、 s は光路に沿って測った幾何学的距離 (cm) を示す。また吸収体は M 種類の分子よりなるものとする。積分は光路に沿って光源から考えている場所まで行う。実際の分光器による測定では、

$$I'(\nu') = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu) w(\nu', \nu) d\nu \quad \text{..... (II. 2)}$$

が測定される。ここで $w(\nu', \nu)$ は分光器による応答を示す。なお、TGS検知器(室温)を使っているため太陽光以外の放射は無視している。 $w(\nu', \nu)$ はゆるやかな変化をする部分 $w_1(\nu')$ (図 II. 2 参照) ($\nu' - \nu$) の関数の部分 $w_2(\nu' - \nu)$ (図 II. 3 参照) とに分けられる。光源(太陽)の波数に対する変化はゆるやかなので、(II. 1) 式および (II. 2) 式より、

$$I'(\nu') = I_0(\nu') w_1(\nu') \int_{-\infty}^{\infty} w_2(\nu' - \nu) \exp \left[- \sum_{i=1}^M \int_0^\infty n_{abs}^{(i)}(s) k^{(i)}(\nu, s) ds \right] d\nu \quad \text{..... (II. 3)}$$

と表わされる。(II. 3) 式の [] の中の負号をとったものは光学的厚さと呼ばれ、実際の解析では光路についての積分を差分

$$\sum_{l=1}^{43} \{ n_c(l) k_c(l) + \sum_{i=1}^M n_{abs}^{(i)}(l) k^{(i)}(\nu, l) \} \Delta s_l \quad \text{..... (II. 4)}$$

で置きかえる。ここで l は大気を43層の等質層に分けた時の層の番号を表わす。 Δs_l は l 番目の層の中の光路長、 n_c と k_c は連続吸収の分子個数密度とその吸収係数を表わす。連続吸収は N_2 、 H_2O 、 CO_2 、エーロゾルが考えられる。(II. 4) 式の中の第2項は AFGL Atmospheric Absorption Line Parameters Compilation (McClatchey et al. 1973; Rothmen et al., 1983) による line-by-line 計算で求める。大気モデルは図 II. 6 に示した。ここでの解析では1983年5月8日昭和基地における気象ゾンデデータを用いた(気象庁、1985)。ゾンデ到達高度以上は U. S. Standard Atmosphere 1976 を用いた。このうち気温はゾンデ到達高度と35kmの間は内挿し、気圧はゾンデ到達高度で一致するように U. S. Standard Atmosphere 1976 を比例シフトさせた。各成分の濃度の高度分布は前回の報告(気象研究所; 1982)と同様のものを用いた。但し、 N_2O については対流圏混合比を 300 ppbv としたものを基準とした。Ray Tracing についても前回と同様である。

連続吸収について LOWTRAN 5 (20cm⁻¹ づつの間隔で平均値を求めたもの (Selby and McClatchey, 1975) で計算した例を図 II. 7 に示した。

実測されたスペクトルから大気中 N_2O 全量の導出を行う方法として、 N_2O 吸収の小さい 2521 cm⁻¹ と 2611.2 cm⁻¹ とを結ぶ直線を基準として、 N_2O 吸収の大きな 2576 cm⁻¹ でのスペクトル強度

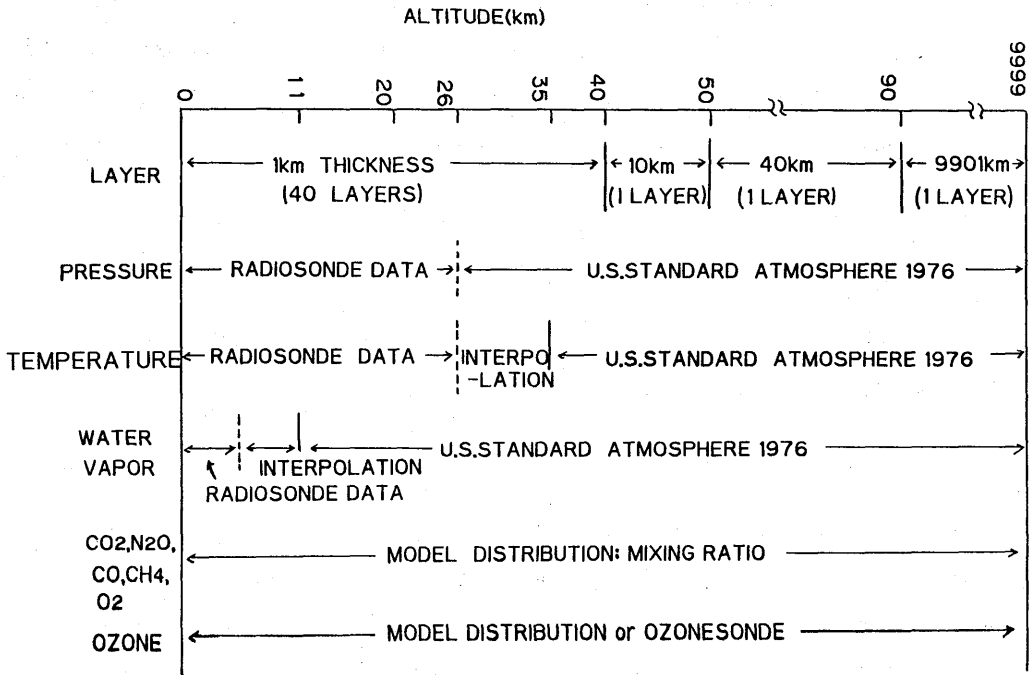


図 II. 6 解析に用いた大気モデル。大気を43層の均質層に分け、下層では気象ゾンデのデータを用い、上層ではU. S. Standard Atmosphere, 1976を用いた。

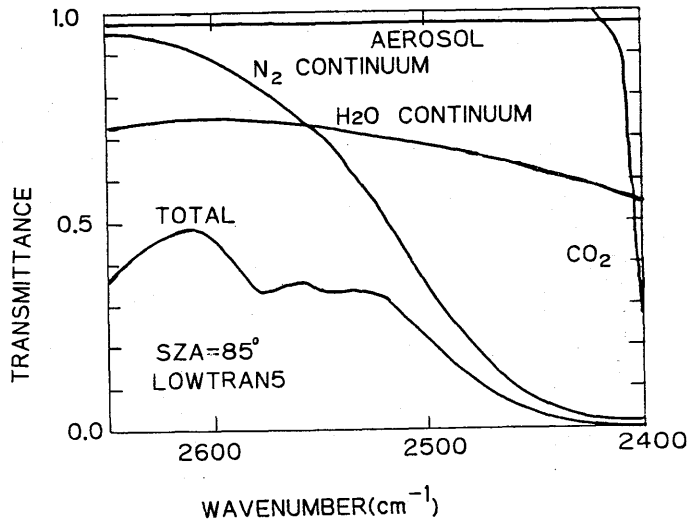


図 II. 7 2400 - 2650 cm^{-1} 域における大気中連続吸収による透過率の計算例。LOWTRAN5において、太陽天頂角 85° 、視程50km、成層圏バックグラウンドエアロゾルモデル、極地方モデルを用いたもの。図中TOTALは連続吸収と線吸収とを総合したものによる透過率。

の割合（みかけの透過率）を求め、(II. 1) 式～(II. 4) 式のモデル計算（N₂Oの濃度を色々変えたもの）と一致させるという方法を用いた(Makino et al, 1985)。考えている波数間で最も大きく変化しているのは図 II. 7 より分るようにN₂連続吸収であるので、以下の計算ではN₂のみを考慮した。N₂の連続吸収の吸収係数はBurch et al. (1971)の結果を用いて、均質大気中で

$$k_c(\nu, T) = \left\{ \frac{203.0}{(\nu - 2427)^2 + a(T)} - 0.004 \right\} \exp \{-\beta(\nu - 2600)\} \quad \dots\dots\dots (II. 5)$$

$$a(T) = 0.02232 (T + 105.87)^2 - 1911.8$$

という形で近似した。ここで T は気温 (K)、 β は実測スペクトルと合うように導入したパラメータである。連続吸収による透過率は

$$\exp \left[- \sum_{l=1}^{43} 0.97 C_N k_c(\nu, l) P^2(l) \Delta s_l \right] \quad \dots\dots\dots (II. 6)$$

より求められる。(II. 6) 式で0.97は衝突相手の分子としてN₂とO₂を考えるための補正值で、 $k_c(\nu, l)$ はN₂分子のみによる大気での吸収係数である。又、 C_N は実際の大気におけるN₂分子の混合比0.79を用いる(Susskind and Searl, 1977)。 $P^2(l)$ は気圧である。1983年5月8日、8月26日および10月16日に得られた実測スペクトルより2521cm⁻¹と2616.5 cm⁻¹におけるそれぞれの強度比が(II. 1)～(II. 6)式の計算によってよく表現されるように β を求めた結果を図II. 8に示す。太陽天頂角が75°以上の時の β は0.002に近い。 β が0でない理由としては、Burchらの測定結

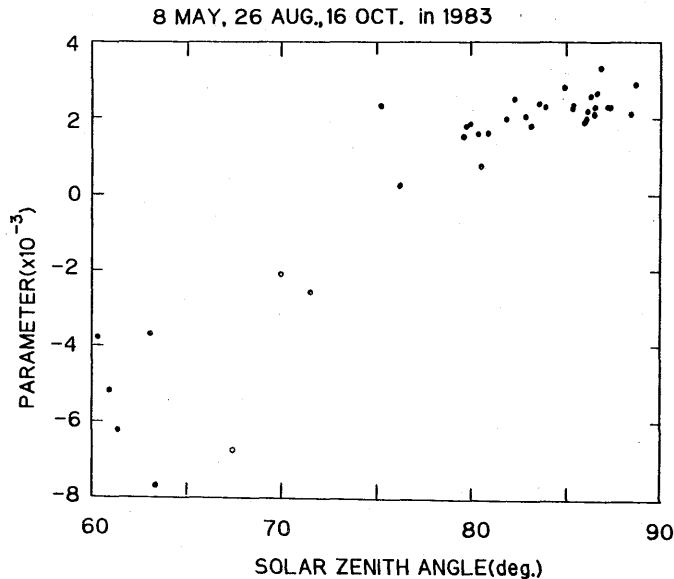
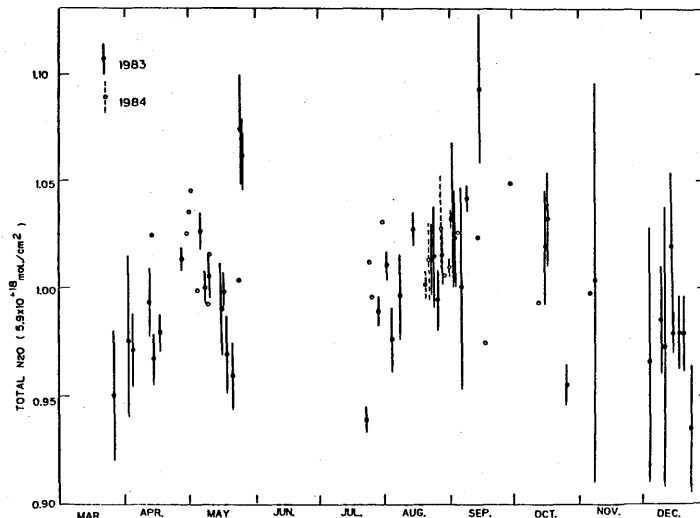


図 II. 8 N₂連続吸収係数(II. 5)式におけるパラメータ
- β を実測スペクトルに合うように求めた結果。

果の中で吸収の小さい波数域の吸収係数が正確に表現されていない可能性や、 N_2 分子以外の H_2O 等による連続吸収の影響、スペクトルチャートへの変換の歪みなどが考えられるがこれらは今後解決すべき点である。以下の計算は β を0.002として太陽天頂角 75° 以上の場合について行った。

以上に述べた方法で大気中 N_2O 全量を求めた結果は表Ⅱ. 2および図Ⅱ. 9のようになった。ここでは N_2O 全量の値はモデル分布（鉛直カラム量が 5.9×10^{18} molecule/cm²）の場合を単位としその倍数で表わしている。なお N_2O 混合比の高度分布は不変であるとしている。図Ⅱ. 9によれば、南極昭和基地における大気中 N_2O 全量は、4月から5月にかけて増加、冬期（7月）は減少、9月にかけて増加、9月から12月にかけて再び減少という形になっている。ここでの解析は1983年5月8日の気象ゾンデの気温・気圧データをもとに作った大気モデルによって行ったが、今後それぞれの観測時に最も近い時の気象ゾンデ記録値の導入を行いたい。



図Ⅱ. 9 南極昭和基地で測定された大気中 N_2O 全量。鉛直カラム量が 5.9×10^{18} molecule/cm²を基準としてその倍数で示した。棒線は標準偏差で、棒線のついていないものは単一のスペクトルによる。

Ⅱ. 4 まとめ

南極MAPにおいて赤外分光観測は比較的順調に実行できた。極地での越冬観測という特殊な事情のために、分光装置の製作段階より観測者が工場に入り細部にわたる研修を行った。又、データ処理部を含む中枢部は万一の故障に備え予備器を用意した。これらが観測の遂行に効果的であった。データの解析については、ここで報告したものは簡単な方法でありルーチン業務向きの方法と考え

表 II. 2 南極昭和基地で測定されたスペクトルより求めたみかけの透過率 (2576 cm^{-1}) と大気中 N_2O 全量。太陽天頂角が 75° 以上のものより求めた。 N_2O 全量は N_2O 混合比の高度分布としてモデル分布 (鉛直カラム全量から 5.9×10^{18} 分子/ cm^2) を仮定しそれを単位として表わしている。

年・月・日	時刻 (L T)	太陽天頂 角 (度)	みかけの 透 過 率 (2575.98 $/\text{cm}^{-1}$)	N_2O 全量 (5.9×10^{18} 分子/ cm^2)	日平均値	標準偏差
1983・3・24	8:15	81.9	0.4847	0.943	0.943	—
3・26	7:08	88.3	0.1860	0.943	0.950	0.03
	7:13	87.8	0.2092	0.990		
	7:23	86.9	0.2868	0.915		
	7:37	85.6	0.3566	0.950		
4・2	7:47	87.3	0.2607	0.913	0.975	0.04
	8:00	86.2	0.3162	0.953		
	8:12	85.2	0.3585	0.977		
	9:55	78.1	0.5554	1.000		
	10:22	76.7	0.5809	0.991		
	10:51	75.5	0.5934	1.018		
4・4	8:10	86.0	0.3243	0.962	0.971	0.017
	8:48	83.1	0.4456	0.955		
	14:21	77.2	0.5713	0.998		
	16:25	85.0	0.3684	0.974		
	16:51	87.1	0.2602	0.967		
4・12	9:00	85.0	0.3672	0.979	0.993	0.016
	10:00	81.3	0.4855	1.001		
	11:02	78.8	0.5469	0.981		
	12:02	77.6	0.5616	1.012		
4・13	11:55	78.0	0.5520	1.024	1.024	—
4・14	10:50	80.0	0.5275	0.958	0.967	0.012
	11:58	78.4	0.5537	0.983		
	13:20	78.9	0.5517	0.953		
	14:49	82.4	0.4628	0.973		
	15:33	85.0	0.3694	0.970		
4・17	13:54	81.0	0.4972	0.985	0.979	0.009
	15:02	84.2	0.4022	0.972		
4・27	13:30	83.7	0.4101	1.012	1.013	0.006
	13:57	84.4	0.3806	1.020		
	14:25	85.7	0.3263	1.008		
5・6	10:31	87.5	0.2171	1.035	1.026	0.009

年・月・日	時刻 (L T)	太陽天頂 角 (度)	みかけの 透 過 率 (2575.98 $/\text{cm}^{-1}$)	N ₂ O全量 (5.9×10^{18} 分子/ cm^3)	日平均値	標準偏差
5・8	11:10	86.3	0.2907	1.025	1.000	0.008
	12:20	85.4	0.3385	1.017		
	10:17	88.6	0.1474	1.009		
	11:29	86.4	0.2919	1.003		
	12:03	86.0	0.3162	0.991		
	12:16	86.0	0.3154	0.994		
	12:48	86.1	0.3068	1.006		
	13:13	86.5	0.2842	1.007		
5・10	13:40	87.2	0.2475	0.991	1.005	0.010
	11:10	87.3	0.2386	1.000		
	11:34	86.9	0.2646	0.999		
	12:08	86.5	0.2813	1.016		
5・16	11:27	88.5	0.1639	0.963	0.990	0.022
	11:51	88.1	0.1852	1.009		
	12:38	88.1	0.1849	1.009		
	13:17	88.7	0.1490	0.971		
5・17	13:43	89.3	0.0988	0.997	0.998	0.009
	12:37	88.3	0.1695	1.006		
	13:02	88.6	0.1519	0.988		
	13:28	89.1	0.1142	1.000		
5・18	11:04	89.4	0.0922	0.989	0.969	0.018
	11:29	88.9	0.1351	0.977		
	11:53	88.6	0.1580	0.961		
	12:52	88.7	0.1532	0.953		
5・21	13:27	89.3	0.1070	0.946	0.959	0.016
	13:51	90.0	0.0599	0.987		
	11:15	89.8	0.0705	0.976		
	11:55	89.2	0.1151	0.949		
5・23	12:25	89.1	0.1236	0.968	1.003	—
	12:49	89.3	0.1077	0.942		
5・24	12:42	89.6	0.0773	1.003	1.074	0.026
	11:37	90.0	0.0462	1.104		
5・25	12:35	89.7	0.0637	1.063	1.062	0.017
	12:46	89.8	0.0599	1.056		
	11:53	90.0	0.0493	1.076		
	12:23	89.9	0.0564	1.049		

年・月・日	時刻 (L T)	太陽天頂 角 (度)	みかけの 透 過 率 (2575.98 $/\text{cm}^{-1}$)	N ₂ O全量 (5.9×10^{18} 分子/cm ²)	日平均値	標準偏差
7・23	12:33	89.9	0.0568	1.046	0.939	0.006
	12:44	90.0	0.0492	1.078		
	13:05	89.4	0.1006	0.935		
	13:33	89.9	0.0703	0.943		
7・29	12:18	87.9	0.2032	0.994	0.989	0.007
	12:30	87.9	0.2018	0.995		
	12:41	87.9	0.2047	0.983		
	12:52	88.0	0.1986	0.983		
8・2	12:02	87.0	0.2546	1.016	1.010	0.007
	12:13	86.9	0.2614	1.011		
	12:23	86.9	0.2633	1.003		
8・4	11:43	86.7	0.2767	0.993	0.976	0.015
	12:26	86.4	0.3008	0.963		
	12:37	86.4	0.2985	0.973		
8・8	11:12	86.3	0.3021	0.981	0.996	0.020
	11:24	86.0	0.3143	0.997		
	11:35	85.8	0.3192	1.017		
	12:36	85.3	0.3495	0.993		
	12:47	85.3	0.3507	0.987		
	12:57	85.4	0.3423	1.001		
	13:07	85.6	0.3363	0.987		
	13:35	86.1	0.2951	1.051		
	13:46	86.4	0.2954	0.986		
	14:12	87.3	0.2426	0.983		
	14:41	88.5	0.1593	0.985		
	14:52	89.1	0.1189	0.978		
8・14	9:56	87.7	0.2044	1.035	1.027	0.008
	10:14	86.7	0.2682	1.029		
	10:29	86.1	0.3009	1.029		
	10:43	85.5	0.3306	1.029		
8・23	11:34	84.0	0.3989	1.013	1.012	0.017
	9:57	84.7	0.3676	1.024		
	10:18	83.6	0.4105	1.023		
	10:41	82.7	0.4400	1.010		
	11:07	81.8	0.4657	1.029		
	11:28	81.2	0.4825	1.024		

年・月・日	時刻 (L T)	太陽天頂 角 (度)	みかけの 透 過 率 (2575.98 cm^{-1})	N ₂ O全量 (5.9×10^{18} 分子/cm ²)	日平均値	標準偏差
8・24	13:45	81.8	0.4677	1.021	1.014	0.024
	14:06	82.5	0.4482	1.016		
	14:21	83.1	0.4295	1.016		
	15:28	86.7	0.2774	0.991		
	15:45	87.8	0.2042	1.011		
	15:59	88.8	0.1426	0.972		
	8:55	88.1	0.1779	1.040		
	9:11	87.1	0.2498	1.009		
	9:37	85.4	0.3394	1.012		
	10:23	83.0	0.4351	1.006		
	10:42	82.3	0.4584	1.000		
	10:59	81.7	0.4735	1.007		
	11:19	81.1	0.4868	1.018		
	11:33	80.8	0.4957	1.013		
	11:48	80.5	0.4883	1.074		
8・26	13:24	80.9	0.4950	1.006	0.994	0.014
	13:59	81.9	0.4692	1.003		
	14:37	83.5	0.4265	0.974		
	9:08	86.6	0.2824	0.993		
	9:36	84.8	0.3672	1.010		
	9:52	83.9	0.4062	0.999		
	10:13	82.8	0.4444	0.995		
	10:33	81.9	0.4674	1.011		
	11:02	80.9	0.4977	0.994		
	11:20	80.4	0.5092	0.995		
	11:35	80.0	0.5184	0.995		
	11:49	79.8	0.5202	1.006		
	12:27	79.6	0.5287	0.988		
	12:42	79.6	0.5247	1.004		
	14:42	83.1	0.4321	1.007		
8・28	15:23	85.4	0.3470	0.984	1.015	0.014
	15:37	86.3	0.3022	0.978		
	15:51	87.3	0.2422	0.987		
	16:06	88.4	0.1736	0.956		
	14:14	81.2	0.4839	1.019		
	14:29	81.8	0.4645	1.033		

年・月・日	時刻 (L T)	太陽天頂 角 (度)	みかけの 透 過 率 (2575.98 $/\text{cm}^{-1}$)	N ₂ O全量 (5.9×10^{18} 分子/ cm^3)	日平均値	標準偏差
9・1	14:43	82.5	0.4466	1.023	1.032	0.005
	14:57	83.3	0.4230	1.016		
	15:38	85.8	0.3254	0.993		
	15:53	86.8	0.2683	1.005		
	8:45	86.0	0.3042	1.037		
	9:05	84.6	0.3710	1.027		
9・2	9:39	82.5	0.4445	1.033	1.033	0.034
	8:51	85.2	0.3439	1.023		
	9:32	82.5	0.4468	1.023		
	9:49	81.5	0.4647	1.067		
	10:53	78.6	0.5266	1.087		
	11:49	77.3	0.5622	1.032		
9・3	15:47	84.8	0.3670	1.011	1.023	0.023
	16:17	87.0	0.2627	0.985		
	8:58	84.4	0.3719	1.056		
	9:31	82.2	0.4548	1.029		
	10:22	79.5	0.5234	1.019		
	10:52	78.3	0.5523	0.999		
	11:24	77.4	0.5609	1.031		
	11:56	76.8	0.5699	1.034		
	12:44	76.8	0.5676	1.046		
	13:16	77.3	0.5727	0.986		
9・6	13:50	78.2	0.5529	1.003	1.000	0.047
	10:19	78.5	0.5438	1.020		
	11:26	76.2	0.5791	1.034		
	11:40	75.9	0.6033	0.946		
9・10	8:00	86.1	0.2977	1.043	1.042	0.006
	9:35	79.3	0.5222	1.044		
	10:34	76.3	0.5763	1.041		
	10:58	75.4	0.5918	1.032		
	13:38	75.3	0.5898	1.048		
9・14	14:11	75.1	0.5981	1.023	1.023	—
9・15	8:01	84.0	0.3919	1.041	1.093	0.035
	8:17	82.8	0.4175	1.105		
	8:32	81.6	0.4504	1.112		
	8:47	80.5	0.4800	1.113		

年・月・日	時刻 (L T)	太陽天頂 角 (度)	みかけの 透過率 (2575.98 $/\text{cm}^{-1}$)	N ₂ O全量 (5.9×10^{18} 分子/cm ²)	日平均値	標準偏差
9・30	15:54	75.7	0.5840	1.049	1.049	—
10・16	5:13	86.8	0.2696	1.001	1.019	0.027
	5:29	85.3	0.3496	0.992		
	5:48	83.6	0.4125	1.016		
	6:04	82.3	0.4550	1.013		
	6:24	80.5	0.5062	0.998		
	7:11	76.2	0.5764	1.049		
	16:53	75.2	0.5879	1.064		
10・17	5:20	85.8	0.3237	1.000	1.032	0.022
	5:50	83.2	0.4204	1.040		
	6:03	82.0	0.4607	1.027		
	17:00	75.5	0.5850	1.059		
	17:31	78.2	0.5458	1.036		
10・26	4:55	84.8	0.3856	0.942	0.955	0.010
	5:11	83.4	0.4329	0.963		
	5:29	81.8	0.4820	0.963		
	6:05	78.6	0.5578	0.952		
11・6	4:30	83.4	0.4237	0.997	0.997	0.000
	5:05	80.5	0.5066	0.997		
11・8	4:18	83.8	0.3927	1.068	1.003	0.093
	4:39	82.2	0.4774	0.937		
12・4	1:23	88.0	0.2173	0.906	0.966	0.057
	1:48	87.2	0.2378	1.030		
	2:26	85.7	0.3529	0.911		
	2:54	84.3	0.4058	0.941		
	3:42	81.4	0.4907	0.969		
	4:55	76.0	0.5818	1.037		
12・9	1:19	87.5	0.2217	1.016	0.985	0.025
	1:37	87.0	0.2711	0.953		
	1:51	86.6	0.2851	0.983		
	2:05	86.1	0.3118	0.986		
	2:19	85.5	0.3442	0.975		
	2:32	84.9	0.3704	0.983		
	2:46	84.2	0.4131	0.930		
	2:59	83.5	0.4208	0.996		
	3:16	82.5	0.4528	0.999		

年・月・日	時刻 (L T)	太陽天頂 角 (度)	みかけの 透過率 (2575.98 $/\text{cm}^{-1}$)	N ₂ O 全量 (5.9×10^{18} 分子/ cm^3)	日平均値	標準偏差
12・11	3:53	80.2	0.5099	1.011	0.973	0.065
	4:27	77.7	0.5629	0.999		
	1:17	87.4	0.2506	0.926		
	1:34	86.9	0.2817	0.933		
	1:48	86.5	0.2698	1.066		
12・14	2:02	86.0	0.3232	0.965	1.019	0.036
	0:02	87.8	0.1939	1.053		
	0:19	87.8	0.1957	1.047		
	0:33	87.8	0.2116	0.980		
	0:47	87.7	0.2137	0.997		
12・15	0:04	87.8	0.2130	0.974	0.979	0.009
	0:22	87.8	0.2079	0.994		
	0:35	87.7	0.2196	0.973		
	0:49	87.6	0.2251	0.975		
	1:14	87.2	0.2502	0.981		
12・18	0:06	87.6	0.2277	0.963	0.979	0.017
	0:22	87.6	0.2213	0.990		
	0:36	87.6	0.2285	0.962		
	0:50	87.4	0.2315	1.001		
	1:04	87.3	0.2434	0.979		
12・20	0:04	87.5	0.2239	1.006	0.979	0.017
	0:19	87.6	0.2263	0.970		
	0:33	87.5	0.2317	0.974		
	0:47	87.4	0.2362	0.983		
	1:01	87.3	0.2486	0.961		
12・23	0:07	87.5	0.2345	0.963	0.935	0.030
	0:23	87.6	0.2371	0.927		
	0:40	87.5	0.2478	0.913		
	0:53	87.4	0.2569	0.903		
	1:14	87.0	0.2662	0.971		
1984・4・30	11:51	83.9	0.3992	1.026	1.026	—
5・1	11:10	84.9	0.3564	1.036	1.036	—
5・2	10:59	85.5	0.3710	1.046	1.046	—
5・4	11:51	85.1	0.3574	0.999	0.999	—
5・10	13:12	87.1	0.2542	0.993	0.993	—
5・11	13:01	87.2	0.2414	1.016	1.016	—

年・月・日	時刻 (L T)	太陽天頂 角 (度)	みかけの 透 過 率 (2575.98 $/\text{cm}^{-1}$)	N ₂ O 全量 (5.9×10^{18} 分子/ cm^3)	日平均値	標準偏差
7・25	12:16	88.7	0.1405	1.012	1.012	—
7・26	12:11	88.5	0.1570	0.996	0.996	—
7・31	11:21	88.1	0.1792	1.031	1.031	—
8・21	14:35	84.3	0.3911	0.997	1.002	0.007
	14:58	85.5	0.3362	1.007		
8・22	12:40	80.9	0.4901	1.026	1.013	0.019
	14:23	83.5	0.4203	0.999		
8・28	13:34	79.7	0.5132	1.046	1.029	0.025
	15:25	84.8	0.3668	1.011		
8・29	13:57	80.1	0.5133	1.006	1.006	—
9・ 1	14:19	80.0	0.5140	1.013	1.010	0.004
	15:40	84.5	0.3807	1.007		
9・ 5	14:36	79.4	0.5243	1.026	1.026	—
9・18	15:34	78.3	0.5462	0.975	0.975	—
10・13	17:51	81.2	0.4908	0.993	0.993	—

平均値

1983. 3. 24 ~ 12. 23 ; 0.999 ± 0.037

1984. 4. 30 ~ 10. 13 ; 1.012 ± 0.019

全期間 (263件) ; 1.000 ± 0.036

られる。すなわち、 N_2O の $2\ \mu\text{m}$ 吸収帯の中からひとつの波数 2576 cm^{-1} を選んで吸収帯両端の吸収の少い2つの波数を基準とした時の透過率を計算し、大気中 N_2O 全量を求めた。この際 N_2 連続吸収の効果を考慮した。この結果、1983年については、南極昭和基地において春と秋に極大がみられた。又、1983年3月24日から12月23日までの平均値は 0.999 ± 0.037 、1984年4月30日から10月13日までの平均値は 1.012 ± 0.019 、これらの全期間の平均値(263件)は 1.000 ± 0.036 であった(但し対流圏混合比を 300 ppbv とした場合を 1.000 としている)。

今後、吸収帯全体を考慮したより正確な計算でも解析を行う予定である。

なお、この研究は国立極地研究所の川口貞男教授、山内恭助教授、東北大学理学部田中正之教授、東京大学理学部小川利紘助教授の御指導と助言を受け進められている。

参 考 文 献

気象研究所、1982：成層圏オゾンの破壊につながる大気成分および紫外日射の観測、気象研究所技術報告、第6号。

Burch, D. E., Gryvnak, D. A., and Pembroke, J. A., 1971 : Investigation of the Absorption of Infrared Radiation by Atmospheric Gases : Water, Nitrogen, and Nitrous Oxide, Aeronutronic Report U4897, Contract No F 19628-69-C-0263, Philco-Ford Corp., Newport Beach, Calif., Jan. 1971.

Japan Meteorological Agency, 1985 : Antarctic Meteorological Data Obtained by the Japanese Antarctic Research Expedition, vol. 24. Meteorological Data at the Syowa Station in 1983.

Makino, Y., Muramatsu, H., Kawaguchi, S., Yamanouchi, T., Tanaka, M., and Ogawa, T., 1985 : Spectroscopic Measurements of Atmospheric N_2O at Syowa Station, Antarctica ; Preliminary Results, Memoirs of National Institute of Polar Research, Spec. Issue, No 39, 40-51.

McClatchey, R. A., Benedict, W. S., Clough, S. A., Burch, D. E., Calfee, R. F., Fox, K., Rothman, L. S., and Garing, J. S., 1973 : AFCRL Atmospheric Absorption Line Parameters Compilation, AFCRL - TR - 73-0096.

Ramanathan, V., Cicerone, R. J., Singh, H. B., and Kiehl, J. T., 1985 : Trace Gas Trends and Their Potential Role in Climatic Change, J. Geophys. Res., **90**, 5547-5566.

Rothman, L. S., Gamache, R. R., Barbe, A., Goldman, A., Gillis, J. R., Brown, L. R., Toth, R. A., Flaud, J. -M., and Camy-Reyret, C., 1983 : AFGL Atmospheric

- Absorption Line Parameters Compilation : 1982 edition, Appl. Opt., **22**, 2247 - 2256.
- Selby, J. E. A. and McClatchey, R. A., 1975 : Atmospheric Transmittance from 0.25 to $28.5\mu\text{m}$: Computer Code LOWTRAN 3, AFCRL-TR-75-0.255.
- Susskind, J. and Searl, J. E., 1977 : Atmospheric Absorption Near 2400cm^{-1} , J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **18**, 581 - 587.
- WMO, 1982 : The Stratosphere 1981, Theory and Measurements, Geneva, WMO, 503 p.
- Wuebbles, D. J., 1983 : Effects of Coupled Anthropogenic Perturbations on Stratospheric Ozone, J. Geophys. Res., **88**, 1444 - 1456.

Ⅲ. 大気微量成分濃度の広域分布*

Ⅲ. 1 はじめに

成層圏の ClO_x や NO_x の主要な源として大気中の CF_2Cl_2 、 CFCl_3 および N_2O は成層圏オゾンの消長に深く関与している。これらの化合物のうち CF_2Cl_2 と CFCl_3 は完全な工業製品であって、第二次大戦後急速にその使用量が增大してきた。そして ClO_x の天然の源として存在する CH_3Cl に匹敵する量が既に対流圏に蓄積されている。Molina & Rowland (1974) が初めてその成層圏オゾンに対する危険性を指摘して以来既に10年以上経過しているが、その大気中濃度は依然として年4～6%の割合で増加し続けている。A L E (Atmospheric Lifetime Experiment) の実験によればそれらの大気中での寿命は当初の推定(CF_2Cl_2 で110年、 CFCl_3 で70年; NAS, 1979) とほぼ一致しており、光化学反応の速度定数に大幅な変更がない限り成層圏オゾンへの影響は長期に渡ると考えられる。最近ではそれらの大気中への全放出量の見積りがソ連および東欧圏のデータがないため困難になってきており、それだけ大気中濃度の監視を継続して行くことの重要性が増していると考えられる。

また N_2O は窒素肥料の大量使用および燃焼等によって増加傾向にあるとされており、既に数ppb/年程度の増加が報告されている(Khalil & Rasmussen, 1983)。 N_2O の大気中への放出は雨量の多い地域で大きいと推定されているが(Keller et al., 1983)、その分布における緯度変化は大変小さい(Khalil & Rasmussen, 1983)。これと反対に CF_2Cl_2 や CFCl_3 は製造および使用が先進工業国に偏っているため緯度変化が大きい。

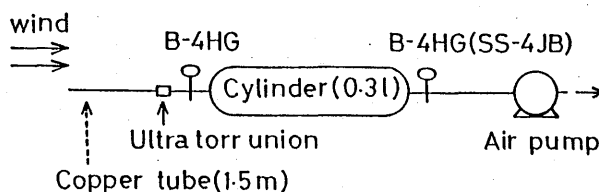
従って南半球、しかもその放出がほとんど無視できる南極地域も含めてこれらの分布を観測できれば、北半球におけるデータと併せてそれらの化合物の大気中の総量、その増加傾向等に関する情報が得られ、 ClO_x や NO_x の分布の推定から最終的に成層圏オゾンの消長に関する情報が得られる筈である。この目的の為に、我々は1982年(23次隊)から南極・昭和基地または基地までの洋上で空気の採集を開始した。持ち帰られた試料はガスクロマトグラフ法によって分析し、 CF_2Cl_2 、 CFCl_3 および N_2O の定量を行った。

Ⅲ. 2 実 験

Ⅲ. 2. 1 空気採集

空気採集法の模式図を図Ⅲ. 1に示す。洋上では砕氷艦の艦橋上部において採集を行ったが、航

* 広田道夫, 牧野行雄, 忠鉢繁, 塩原匡貴, 村松久史:高層物理研究部, 村山治太:横浜国立大学



図Ⅲ. 1 空気採集法

バルブ：B-4HGまたはSS-4JB (Nupro)。

ユニオン：Ultra Torr Union (Cajon)。

ポンプ：DOA-101 (GAST)、排気量30ℓ/分

海中は実際の風向によらずほとんどの場合進行方向から風を受けた。また昭和基地では通年北東～東風が卓越しているので「観測棟」の北東側において採集を行った。航空機（ピタラスPC-6）による採集（24次隊）では高度7kmまでの空気を主翼の支持棒に取り付けた銅パイプからシリンダーに導入したが、動圧を利用できるのでエアポンプは使用しなかった。

23次隊ではエアポンプをシリンダーの前に置いて4～5 kg/cm²まで空気を充填する方式を採用したが、ポンプのダイヤフラム等から汚染の可能性があるので、24次隊からは図Ⅲ. 1の方式へ改めた。

シリンダーはステンレススチール製で、減圧加熱（10⁻³mmHg, 350℃）処理したものを使用した。バルブは銅製チップを付けた真鍮製のもの（B-4HG, Nupro）を使用した。

Ⅲ. 2. 2 ガスクロマトグラフ分析

島津製作所製GC-6AMを使用した。試料は六方コック（Carle 2021）を利用して、真空排気した試料管に移し、カラムへ導入した。分析条件は前報（広田他、1982）表1.6と同じである。

CF₂Cl₂とCFCl₃の1次標準には三種混合ガス（CF₂Cl₂ 20 ppm, CFCl₃ 20 ppm, ベースガス N₂）（日本酸素または製鉄化学）を使用した。実際の標準ガスは測定日当日に1次標準200 μlを超高純度窒素（99.9995%）で10ℓに希釈したものを使用した。N₂Oの標準ガスにはいくつかの方法を試みたが、最終的に1次標準には二種混合ガス（N₂O 970 ppm, ベースガス 空気）（高千穂化学工業）を採用し、これを標準ガス発生機SGGU-72AC3（Standard Technology）で0.3 ppmに希釈して使用した。測定の検出限界・誤差等は第1章表1.3と同じである。濃度は第1章と同じで、すべて体積混合比で示してある。

Ⅲ. 3 結果

昭和基地における観測結果を表Ⅲ. 1に、東京から昭和基地までの観測結果を表Ⅲ. 2～Ⅲ. 4に、また昭和基地上空における観測結果を表Ⅲ. 5に示す。気象データは空気採集時刻に近い正時のデータである。

表Ⅲ.1 昭和基地における空気採集

月 日	時 刻 (LT)	容 器	場 所	気 圧 (mb)	気 温 (℃)	湿 度 (%)	風 向	風 速 (m/S)	雲 量	測 定 結 果		
										CF ₂ Cl ₂ (ppt)	CFCI ₃ (ppt)	N ₂ O (ppb)
1982												
2. 6	0:09	No.1	環境棟から岩島へ向か って 50 m				E	9.6		298	166	-
2. 10	16:30	2	観測棟から岩島へ向か って 170 m				NNE	4.0		-	-	-
3. 19	14:09	3	"	981.8	- 8.3	51	ENE	8.9		301	172	297
4. 20	15:00	4	"							304	176	299
5. 23	16:03	5	"							304	177	303
6. 19	12:02	6								300	183	299
7. 20	17:06	7	観測棟から岩島へ向か って 170 m							316	179	-
8. 30	11:52	9	" 130 m						0	(334)	181	299
9. 26	19:50	10	" 170 m							-	-	-
10. 23	14:52	8	" 170 m					10		-	-	-
11. 19	11:01	11	" 170 m					10		-	-	-
12. 22	22:00	12	" 170 m							-	-	-
1983												
2. 28	17:45	63	観測棟北側	981.6	- 7.8	56	ENE	8.3	8	323	190	306
4. 11	14:30	30	とつつき岬 *1	976.9	- 7.4	48	E	14.1	0	324	182	306
5. 17	17:24	31	観測棟内							3150	380	300
5. 21	14:30	32	観測棟北側	980.4	-17.0	44	E	3.8	0	327	185	308
6. 27	15:00	33	"	989.7	- 8.3	69	E	10.2	10	312	177	298
7. 7	13:20	34	"	973.6	-12.2	67	ENE	10.7	10	319	181	316
7. 16	15:00	35	"	981.6	-12.4	71	NE	5.5	10	320	185	309
7. 25	13:20	36	"	978.6	-23.2	66	E	4.3	9	321	186	305
8. 16	22:00	37	"	972.2	-11.5	65	E	11.9	10-	329	191	295
8. 23	9:20	46	"	984.2	-18.3	45	NNE	6.9	9	-	-	-
8. 23	16:15	39	観測棟内	984.6	-19.2	44	NNE	1.4	0+	2530	440	293
9. 9	8:39	47	観測棟北側	972.1	-17.2	71	NNE	3.4	10	325	184	291
9. 19	16:20	48	"	987.2	-13.7	88	NNE	4.4	10	331	185	305
10. 2	10:29	51	ぬるめ池 *1	968.3	-11.8	63	-	0	0	338	190	315
10. 2	14:24	50	"	970.4	-15.0	78	NW	4.0	5	336	192	306
10. 9	10:20	49	観測棟北側							334	185	293
10. 15	8:40	42	"	993.2	-13.8	67	ENE	10.0	6	334	192	304
10. 30	12:37	81	"	977.7	-15.2	74	NNE	7.8	10	339	189	314
11. 6	5:00	67	観測棟内	973.3	-14.8	76	E	0.5	3	6360	550	309
11. 7	9:48	68	観測棟北側	980.8	-11.4	77	NNE	3.8	10-	332	188	300
11. 16	9:25	54	"	977.9	- 7.9	72	NNE	13.4	10	337	188	307
11. 30	9:18	71	"	984.7	- 6.4	84	NE	9.3	10	324	193	311
12. 4	1:04	70	"	978.7	- 8.5	60	ENE	10.8	0+	330	199	292
12. 4	5:15	57	観測棟内							4770	450	307
12. 20	1:30	77	観測棟北側	983.5	- 7.7	59	ENE	10.3	9	329	192	292
1984												
1. 23	9:07	75	観測棟北側	988.8	- 7.3	54	NE	6.1	4	350	202	308

1 ; 気象データは昭和基地のもの。

表Ⅲ. 2 「ふじ」艦上における空気採集(24次隊往路)

月 日	時 刻 (JST)	容 器	場 所	気 圧 (mb)	気 温 (℃)	湿 度 (%)	風 向	風 速 (m/S)	雲 量 (8分量)	測 定 結 果		
										CF ₂ Cl ₂ (ppt)	CFC1 ₃ (ppt)	N ₂ O (ppb)
1982												
11. 26	15:45	No.1	30°47'N, 138°24'E	1020.9	17.3	51	NNW	3.6	6	354	-	-
11. 27	15:00	2	25°33'N, 136°36'E	1021.0	23.0	66	NE	9.3	6	(378)	-	-
11. 28	17:45	3	20°08'N, 133°40'E	1012.6	24.9	90	ENE	12.3	7	(450)	-	-
11. 29	18:10	4	15°28'N, 130°37'E	1009.9	27.3	77	SSE	6.2	1	(600)	-	-
11. 30	15:45	5	10°52'N, 128°31'E	1007.0	28.0	85	NE	6.2	7	354	-	-
12. 1	9:00	6	7°31'N, 127°16'E	1008.6	27.1	89	NW	5.7	7	359	-	-
12. 1	17:30	7	5°43'N, 126°05'E	1005.6	28.3	83	NW	2.1	6	363	-	-
12. 2	9:00	8	3°23'N, 123°08'E	1008.6	28.0	83	S	1.5	5	347	-	-
12. 3	7:45	9	0°36'N, 119°38'E	1007.9	26.8	89	S	10.3	8	356	-	-
12. 4	13:30	10	5°08'S, 117°22'E	1008.9	30.1	73	E	1.0	5	346	-	-
12. 5	13:00	11	10°08'S, 115°19'E	1008.0	30.0	68	ENE	2.1	1	338	-	-
12. 6	13:40	12	14°51'S, 114°26'E	1008.2	29.8	68	WSW	1.5	2	328	-	-
12. 7	13:30	13	19°12'S, 113°40'E	1007.2	28.3	72	W	2.6	0	340	-	-
12. 8	13:20	14	23°50'S, 112°47'E	1007.3	25.8	84	WNW	3.1	1	325	-	-
12. 9	13:00	15	28°25'S, 113°09'E	1009.8	22.0	65	WSW	9.8	3	330	-	-
12. 17	8:00	16	34°06'S, 112°36'E	1023.0	16.1	68	SE	7.2	7	322	-	-
12. 18	18:30	17	39°42'S, 110°00'E	1021.2	15.3	87	NNW	5.1	0	324	-	-
12. 19	19:00	18	44°42'S, 110°00'E	1007.4	12.0	97	NW	11.3	8	325	-	-
12. 20	18:40	19	49°25'S, 110°06'E	995.5	6.4	88	WNW	9.3	7	309	-	-
12. 21	19:00	20	53°48'S, 110°17'E	987.1	3.0	86	WNW	10.8	8	313	-	-
12. 23	10:00	21	58°22'S, 104°10'E	1003.4	1.2	75	NNE	3.6	8	316	-	-
12. 25	20:30	22	60°30'S, 82°54'E	969.8	0.7	82	NNW	1.0	8	318	-	-
12. 28	14:00	23	64°54'S, 55°08'E	997.9	0.5	90	E	5.7	7	318	181	-
1983												
1. 1	0:44	24	68°33'S, 38°43'E	991.1	0.5	73	SSE	5.7	3	322	184	-

表Ⅲ.3 「しらせ」艦上における空気採集(25次隊往路、24次隊復路)

月 日	時 刻 (JST)	容 器	場 所	気 圧 (mb)	気 温 (℃)	湿 度 (%)	風 向	風 速 (m/S)	雲 量	測 定 結 果		
										CF ₂ Cl ₂ (ppt)	CFCI ₃ (ppt)	N ₂ O (ppb)
1983												
11. 15	15:24	Na 1	29°23'N, 136°35'E	1017.3	20.4	47	WNW	8	4	369	221	303
11. 16	10:05	2	24°53'N, 134°05'E	1017.6	24.5	68	NE	1	5	369	229	301
11. 17	10:15	3	18°52'N, 131°25'E	1013.7	27.3	72	NE	13	10	361	224	311
11. 19	8:25	4	7°23'N, 127°16'E	1008.1	28.4	78	SW	4	10	363	212	323
11. 20	10:35	5	3°23'N, 123°04'E	1010.1	28.2	88	W	12	10	348	207	304
11. 21	11:15	6	0°17'N, 119°24'E	1011.0	26.8	84	SSW	12	10	348	212	291
11. 23	13:27	7	10°13'S, 115°26'E	1010.0	24.7	86	N	6	10	345	199	309
11. 24	10:50	8	15°43'S, 114°22'E	1011.7	26.7	79	SSW	8	4	342	201	318
11. 25	12:10	9	21°05'S, 113°15'E	1010.1	23.9	87	SSW	11	5	343	203	309
11. 26	13:41	10	26°19'S, 112°41'E	1010.5	22.2	83	S	15	1	336	199	310
11. 27	12:44	11	31°05'S, 114°47'E	1008.9	20.0	83	S	11	0	342	210	292
11. 28	7:05	12	32°01'S, 115°41'E	1011.7	17.7	74	SSW	13	7	338	196	306
12. 3	15:45	13	32°38'S, 114°53'E	1014.8	20.1	69	SSE	10	4	346	198	295
12. 4	13:36	14	36°50'S, 111°42'E	1019.6	15.8	84	S	8	10	336	201	293
12. 5	13:55	15	42°22'S, 109°58'E	1024.5	10.1	68	SSW	10	9	332	192	300
12. 6	14:20	16	47°24'S, 109°57'E	1020.4	7.7	74	WSW	11	10	335	202	301
12. 7	15:03	17	52°42'S, 110°01'E	1000.2	3.8	92	N	6	10	339	196	289
12. 9	13:55	18	58°26'S, 96°29'E	970.5	2.4	80	N	9	1	337	200	299
12. 14	22:00	19	63°51'S, 44°39'E	992.5	- 1.1	71	W	6	10	332	192	301
12. 20	14:55	20	68°22'S, 38°40'E	984.2	- 5.5	73	ENE	10	10	335	190	302
1984												
2. 24	3:10	84	70°07'S, 23°51'E	988.8	- 7.9	67	SE	11.5	-	343	196	299
2. 26	2:10	85	64°51'S, 20°26'E	991.3	0.0	64	WNW	10.3	-	334	198	306
2. 29	19:40	23	45°49'S, 20°09'E	999.4	8.9	83	NW	12.3	-	347	193	305
3. 1	20:10	59	40°26'S, 19°17'E	1001.9	18.3	58	WSW	10.3	-	343	193	308
3. 2	19:10	61	36°24'S, 18°06'E	1010.7	20.1	71	WNW	14.4	-	338	202	305
3. 3	16:15	82	33°51'S, 18°16'E	1016.2	15.8	94	N	4.1	-	374	240	316
3. 7	23:50	22	33°49'S, 31°18'E	1017.1	21.9	60	SSW	10.3	-	345	202	297
3. 8	19:00	60	31°52'S, 36°47'E	1018.1	22.1	57	SSW	13.4	-	343	203	285
3. 9	18:50	56	29°09'S, 43°23'E	1015.8	21.2	60	S	11.3	-	336	207	304
3. 10	19:05	21	26°28'S, 49°00'E	1014.9	23.8	52	S	8.2	-	343	198	299
3. 11	21:00	62	23°59'S, 52°33'E	1015.3	25.5	55	ENE	7.2	-	333	206	300
3. 13	15:55	24	20°07'S, 57°08'E	1014.7	28.1	71	E	9.3	-	346	212	306

表Ⅲ.4 「しらせ」艦上における空気採集(26次隊往路)

月 日	時 刻 (JST)	容 器	場 所	気 圧 (mb)	気 温 (℃)	湿 度 (%)	風 向	風 速 (m/S)	雲 量 (8分量)	測 定 結 果		
										CF ₂ Cl ₂ (ppt)	CFCI ₃ (ppt)	N ₂ O (ppb)
1984												
11. 15	11:05	No.78	30°02'N, 138°10'E	1017.2	23.5	79	S	8.2	4	371	(244)	
11. 16	5:50	92	24°24'N, 137°56'E	1015.3	24.1	93	E	6.7	6	(354)	219	
11. 17	0:30	93	19°51'N, 136°35'E	1011.9	26.0	88	ENE	11.3	0	371	219	
11. 17	23:05	94	14°55'N, 132°21'E	1004.4	26.9	95	N	9.3	8	366	213	
11. 18	19:45	95	10°07'N, 129°18'E	1005.1	28.0	84	W	11.8	8	371	213	
11. 19	19:50	2	5°02'S, 125°29'E	1007.1	28.1	81	W	9.3	4	370	211	
11. 21	4:05	4	0°02'S, 119°23'E	1007.3	26.7	88	E	6.7	7	359	209	
11. 22	2:00	6	5°02'S, 117°27'E	1007.9	27.7	81	S	2.1	5	361	211	
11. 23	0:00	8	10°02'S, 115°24'E	1005.5	27.2	84	ESE	5.1	7	359	215	
11. 24	0:00	10	15°00'S, 114°21'E	1011.6	26.0	83	SE	4.1	4	-	-	-
11. 25	0:00	31	19°59'S, 113°14'E	1011.3	23.9	84	SSW	11.8	2	359	204	
11. 26	1:15	59	24°57'S, 112°04'E	1016.7	20.2	63	S	15.4	1	-	-	-
11. 27	4:05	60	30°01'S, 114°00'E	1020.8	17.0	59	SSE	10.8	3	-	-	-
12. 4	10:50	67	35°03'S, 112°47'E	1014.4	16.2	83	S	9.3	3	355	206	
12. 5	9:50	76	40°01'S, 109°57'E	1007.8	12.0	71	WNW	6.7	7	364	210	
12. 6	13:25	15	45°06'S, 109°45'E	995.1	5.4	70	SW	16.5	8	361	208	
12. 7	17:50	17	50°01'S, 108°59'E	1002.0	2.0	81	SSW	10.3	8	360	206	
12. 8	21:25	21	55°00'S, 106°21'E	1006.3	- 0.6	78	WSW	11.3	8	353	206	
12. 11	11:20	24	60°01'S, 84°35'E	988.2	0.0	98	NNE	10.3	8	353	206	311
12. 15	9:10	39	66°20'S, 42°42'E	989.8	- 1.5	94	E	12.3	8	351	208	313

表Ⅲ.5 昭和基地上空における空気採集(24次隊、1983年)

月日	時刻	容器	場 所	高度 (km)	気温 (℃)	測 定 結 果		
						CF ₂ Cl ₂ (ppt)	CFC1 ₃ (ppt)	N ₂ O (ppb)
第1回								
1. 24	16:03	No. 56	68°54'S, 39°26'E	6.4	-37	322	179	300
	16:30	59	69°02'S, 39°29'E	5.5	-32	320	177	298
	16:51	60	69°01'S, 39°38'E	3.7	-22	321	179	295
	17:11	61	68°59'S, 39°27'E	1.8	-11	324	183	299
	17:29	62	68°54'S, 39°25'E	0.09	0	316	192	299
第2回								
4. 5	14:47	No. 26	69°00'S, 39°49'E	7.3	-48	321	179	307
	14:58	25	68°58'S, 39°54'E	5.5	-36	320	186	302
	15:04	27	69°02'S, 40°10'E	4.6	-32	322	184	303
	15:10	28	69°01'S, 39°58'E	3.7	-26	320	186	307
	15:16	29	69°02'S, 40°07'E	2.7	-20	321	190	303
	15:20	66	69°03'S, 39°57'E	1.8	-15	322	182	298
	15:27	64	69°11'S, 40°01'E	0.9	-13	323	188	297
	15:32	65	69°03'S, 40°08'E	0.09	-10	319	220	304
第3回								
10. 18	11:45	No. 53	69°00'S, 39°24'E	7.3	-35	322	189	302
	11:51	52	68°59'S, 39°22'E	6.4	-29	324	194	303
	11:56	38	69°03'S, 39°32'E	5.5	-24	327	193	304
	12:02	41	68°58'S, 39°24'E	4.6	-19	328	194	-
	12:07	43	69°02'S, 39°33'E	3.7	-14	326	193	-
	12:14	44	68°59'S, 39°27'E	2.7	-11	327	194	304
	12:21	40	68°58'S, 39°33'E	1.8	- 8.5	325	202	303
	12:28	45	68°52'S, 39°23'E	0.9	- 6.5	-	-	-
第4回								
12. 12	14:42	No. 55	69°07'S, 39°52'E	7.3	-38	-	-	-
	14:50	58	68°58'S, 39°40'E	6.4	-34	322	199	309
	14:56	73	68°55'S, 40°17'E	5.5	-29	330	202	291
	15:05	74	68°52'S, 39°56'E	4.6	-24	331	203	298
	15:16	69	69°05'S, 39°30'E	3.7	-20	329	202	296
	15:22	72	69°15'S, 39°34'E	2.7	-17.5	330	199	304
	15:28	80	69°25'S, 39°34'E	1.8	-12	331	199	299
	15:30	79	69°22'S, 39°39'E	0.9	- 6	331	216	307

昭和基地における観測結果で、測定値が示されていないのはバルブの緩みによる汚染か、または試料量が少なく良好なシグナルが得られなかった場合（1982年2月6日）である。観測棟内の空気は CF_2Cl_2 、 CFCl_3 共に高い値を示したが、特に CF_2Cl_2 は外気に対し約1桁高い値を示した。1982年8月30日の試料で CF_2Cl_2 の値が高いのは基地内の汚染された空気が採集時に若干混入したためではないかと思われる。

洋上での試料は緯度方向に約5°の間隔で採集を行った。表Ⅲ.2において11月27～29日の試料には艦内の汚染空気が多少混入したようである。また CFCl_3 と N_2O の値が示されていないのは、ガスクロマトグラフ検出器の汚染により再現性のある結果が得られなかった為である。表Ⅲ.3において1984年3月3日の CF_2Cl_2 と CFCl_3 の値が高い試料は、ケープタウン入港前に採集したものである。表Ⅲ.4において N_2O のデータは整理中なので2点を除いて割愛した。括弧内の値については測定に問題があったように思われる。また11月24日、26日、27日の試料には艦内の汚染空気が多少混入したようで高い値が得られた。いずれの航海においても北半球側で測定値のバラツキが大きかった。これがサンプリング操作の不慣れによるのか、日本や大陸又は近くの島からの汚染空気によるのか、目下検討中である。

昭和基地上空における観測で測定値が示されていないのは、表Ⅲ.1同様バルブの緩みによる汚染（10月18日0.9 km、12月12日7.3 km）か、または試料量が少なく良好なシグナルが得られなかった場合である。低い高度で CFCl_3 の値が高いのはサンプリング用配管に吸着されていた CFCl_3 の脱着によるものと考えられる。

以上、全試料143本に対してバルブのゆるみから試料が汚染されてしまったのは8本（5.6%）であったが、そのうち1～2例についてはバルブのステムチップに砂などの硬い物が付いてしまった可能性がある。また艦上のサンプリングにおいて艦内空気が混入したらしい試料は76本中約6本（7.9%）であった。

Ⅲ. 4 まとめ

1. 昭和基地における CF_2Cl_2 と CFCl_3 は1982年から1984年にかけて年5～6%ずつ増加している。この結果は1970年代における増加率（Rasmussen et al., 1981）には及ばないが、その大気への放出がここ数年ほぼ一定であることを示している。
2. 昭和基地と日本上空の結果（第1章）を比較してみると、両者の比は1970年代のそれ、（Rasmussen et al., 1981）より小さくなっている。
3. 昭和基地上空における CF_2Cl_2 と CFCl_3 は高度7 kmまではほぼ均一に混合されている。

以上の結果は、1) CF_2Cl_2 と CFCl_3 が共に90%以上北半球で放出されている。2) それらの放出が1970年代の後半以後規制されている。3) それらが大気中で数10年以上の寿命を持っているということに拠ると考えられる。

4. 昭和基地における N_2O は1982年から1984年にかけてほぼ一定で、上空7 kmまで均一に混合されている。また南北両半球における差も見出されなかった。

(この節は1部Hirota et al. (1984, 1985)によっている)

謝 辞

空気採集に際してご協力を戴いた第23次、24次、25次および26次南極地域観測隊の方々に深く感謝します。また、観測の計画段階から色々ご助言を戴いた極地研究所の川口貞男教授、山内恭助教授に深く感謝します。

参 考 文 献

- Hirota, M., S. Chubachi, Y. Makino, and H. Muramatsu, 1984, "Gas-chromatographic measurements of atmospheric CF_2Cl_2 , CFCl_3 and N_2O in Antarctica", Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue, **34**, 20-27.
- Hirota, M., Y. Makino, M. Shiobara, S. Chubachi, and H. Muramatsu, 1985, "Gas-chromatographic measurements of atmospheric CF_2Cl_2 , CFCl_3 and N_2O from Tokyo to Syowa Station late in 1983, and at Syowa Station between February 1982 and January 1984," Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue, **39**, 57-62.
- Keller, M., T. J. Goreau, S. C. Wofsy, W. A. Kaplan, and M. B. McElroy, 1983, "Production of nitrous oxide and consumption of methane by forest soils," Geophys. Res. Lett., **10**, 1156-1159.
- Khalil, M. A. K., and R. A. Rasmussen, 1985, "Increase and seasonal cycles of nitrous oxide in the earth's atmosphere," Tellus, **35 B**, 161-169.
- Molina, M. J., and F. S. Rowland, 1974, "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone," Nature, **249**, 810-812.
- National Academy of Sciences, 1979, "Stratospheric ozone depletion by halocarbons: Chemistry and transport," Washington, D. C., 238 p.
- Rasmussen, R. A., M. A. K. Khalil, and R. W. Dalluge, 1981, "Atmospheric trace gases in Antarctica," Sci., **211**, 285-287.

広田道夫・村松久史・牧野行雄・外山芳男・佐々木徹, 1982, "ガスクロマトグラフ法による対流圏および成層圏微量化学成分の分布の測定," 気象研究所技術報告, 第6号, 第1章, p 5 — 41。

研究成果の発表リスト

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲 載 刊 行 物
(論文) 日本上空における N_2O の測定	広 田 道 夫	58年8月	環境技術研究会	環境技術 12巻8号
Preliminary result of Ozone observation at Syowa Station from February 1982 to January 1983	S. Chubachi	59年12月	国立極地研究所	Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue, No. 34
Gas-chromatographic measurements of atmospheric CF_2Cl_2 , $CFCl_3$, and N_2O in Antarctica	M. Hirota S. Chubachi Y. Makino H. Muramatsu	59年12月	同 上	同 上
Infrared measurements of total nitrous oxide at Tsukuba	H. Muramatsu Y. Makino M. Hirota T. Sasaki	59年12月	同 上	同 上
A special ozone observation at Syowa Station, Antarctica from February 1982 to January 1983	S. Chubachi		Quadrennial Ozone Symposium • Greece	Atmospheric ozone
Ruby Lidar Observation of the El Chichon Dust Clouds at Tsukuba ($36.1^\circ N$) and Comparisons with UV Lidar Measurements at Fukuoka ($33.6^\circ N$)	O. Uchino K. Takahashi I. Tabata I. Akita Y. Okada K. Naito	59年8月	日本気象学会	J. Meteor. Soc. Japan 62 , No. 4
レーザーレーダーによるエル・チチョン火山噴煙流観測の結果について	田 端 功 内 野 修	59年5月	URSI F 小委員会	第 285 回 URSI F 小委員会資料

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲 載 刊 行 物
エル・チチョン火山噴火後のライダー観測結果について	田 端 功 高 橋 克 己	59年	気象庁	測候時報 51, 173-175
Solar flare effects on the magnetic variations	Kuwashima, M and Uwai, T	60年1月	地磁気観測所	Memoirs of the Kakioka Magnetic Ob- servatory 21巻
On dispersion processes of the El Chichon dust particles in the lower stratosphere.	Uchino, O	60年	日本気象学会	J. Meteor. Soc. Japan, 63, 288-293
Spectroscopic Measurements of Atmospheric N ₂ O at Syowa Station, Antarctica : Preliminary Results	牧 野 行 雄 村 松 久 史 (川口貞男) (山内 恭) 田中正之 小川利紘	60年12月	国立極地研究所	Mem. Natl. Inst. Pol. Res. 39, 40-51
太陽光の赤外分光観測に基づく大気中微量成分の定量	牧 野 行 雄 村 松 久 史 (川口貞男) (山内 恭) 田中正之 小川利紘	60年12月	国立極地研究所	南極資料第87号, 1-32
A Numerical Experiment on the General Circulation of the Middle Atmosphere with a Three-Dimensional Model Explicitly Representing Internal Gravity Waves and Their Breaking	H. Kida	60年		Pure and Applied Geophysics. 122

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲 載 刊 行 物
(講演) 中層大気擾乱に関連した地磁気 日変化の解析	白 木 正 規 下 道 正 則 河 村 謙	55年12月	MAP シンポジ ウム (第1回)	
中層大気擾乱に関連する地磁気 日変化等価電流系の変動	下 道 正 則 河 村 謙	57年1月	MAP シンポジ ウム (第2回)	
赤外分光器による水蒸気量の測 定	村 松 久 史 牧 野 行 雄 広 田 道 夫 佐々木 徹 他	57年12月	国立極地研究所	Proc. 4th Symp on Polar Met and Glac
高度40kmまでのオゾン観測(I)	村 松 久 史 広 田 道 夫 佐々木 徹	58年5月	日本気象学会	58年春季大会 予稿集
ライダーによる成層圏エーロゾ ルの観測	田 端 功 己 高 橋 克 己 穂 田 巖 岡 田 芳 隆 内 藤 恵 吉	57年5月	日本気象学会	57年春季大会 予稿集
気象研におけるライダー高々度 観測	田 端 功 己 高 橋 克 己 内 藤 恵 吉	57年7月	第8回ライダー シンポジウム	予稿集
ライダーによる成層圏エーロゾ ルの観測(3)	高 橋 克 己 田 端 功 己 穂 田 巖 岡 田 芳 隆 内 藤 恵 吉	57年10月	日本気象学会	57年春季大会 予稿集
航空機による日射の分光測定	村 井 潔 三 小 林 正 治 関 根 正 幸 浅 野 正 二	58年5月	日本気象学会	58年春季大会 予稿集

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲 載 刊 行 物
エーロゾルと放射 (Review)	嘉 納 宗 靖	58年1月	宇宙科学研究所	MAP シンポジウム (第3回)
中層大気的一般風形式に貢献する内部重力波に関する数値実験	木 田 秀 次	58年5月	日本気象学会	58年春季大会 予稿集
地磁気経年変化と地上気温の関係	角 村 悟 諧 河 村	58年1月	宇宙科学研究所	MAP シンポジウム (第3回)
航空機によるオゾン・フロン ・亜酸化窒素の観測	村 松 久 史 広 田 道 夫 佐々木 徹	58年12月	宇宙科学研究所	MAP シンポジウム (第4回)
自由大気中の電離強度一異なる 検出器を用いた気球観測結果	北 村 正 亟 他	同 上	同 上	同 上
南極における大気微量成分濃度の測定	広 田 道 夫 忠 鉢 繁 牧 野 行 雄 村 松 久 史	58年12月	国立極地研究所	第6回極域気水 圏シンポジウム
赤外分光器による大気中微量成分の観測 (その2)	村 松 久 史 牧 野 行 雄 広 田 道 夫 佐々木 徹	同 上	同 上	同 上
粒子線および大気微量成分の同時観測 (4)	北 村 正 亟 他	58年12月	宇宙科学研究所	大気球シンポジウム
最近一年間におけるライダー観測の結果—成層圏エーロゾル	高 橋 克 己 田 端 巖 亀 田 隆 岡 田 吉 内 藤 恵	58年5月	日本気象学会	58年春季予稿集
紫外線ライダーによる成層圏エーロゾル層観測(Ⅱ)—筑波におけるライダー観測とその比較	内 野 修 己 高 橋 克 己 田 端 巖 亀 田 隆 岡 田 吉 九 州 大 学	58年10月	日本気象学会	58年秋季予稿集

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲 載 刊 行 物
ルビーレーザーレーダーによる 成層圏エーロゾル観測	田 端 功 内 野 修 内 藤 恵 吉 穂 田 巖 岡 田 芳 隆	58年11月	レーザーレーダ ー研究会	第9回レーザー レーダーシンポ ジウム予稿集
気象研究所における成層圏エー ロゾルのライダー観測	内 野 修 田 端 功	58年12月	宇宙科学研究所	MAP シンポジ ウム (第4回)
Lidar Measurement of Strato- spheric Transmission at a Wavelength of 340nm After the Eruption of EL. Chichon	O. Uchino, M. Maeda K. Naito	58年5月	日本気象学会	J. Atmos. Terr. Phys. vol. 45, No. 2
赤外放射フラックスの高度分布 の測定	嘉 納 宗 靖 鈴 木 正 八 尾 孝 宮 内 正 厚	58年12月	宇宙科学研究所	MAP シンポジ ウム (第4回)
中層大気的一般風形成に貢献す る内部重力波の数値実験(2)	木 田 秀 次	58年10月	日本気象学会	予稿集
中層大気大循環と内部重力波の 相互作用の数値シミュレーショ ン	木 田 秀 次	58年12月	宇宙科学研究所	MAP シンポジ ウム (第4回)
中層大気擾乱に関連する地磁気 日変化変動	桑 島 正 幸 原 田 朗	58年12月	宇宙科学研究所	MAP シンポジ ウム (第4回)
昭和基地におけるオゾン特別観 測	忠 鉢 繁	58年10月	日本気象学会	日本気象学会 予稿集No. 44
昭和基地におけるオゾン特別観 測について	忠 鉢 繁	58年12月	国立極地研究所	第6回極域気水 圏シンポジウム
昭和基地におけるオゾン特別観 測(観測成果の概要)	忠 鉢 繁	58年12月	宇宙科学研究所	MAP シンポジ ウム (第4回)

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲 載 刊 行 物
昭和基地におけるオゾン特別観測 (1982年1月～1983年2月)	忠 鉢 繁	58年2月	国立極地研究所	第7回極域電離圏磁気圏総合シンポジウム
昭和基地におけるオゾン特別観測 (第2報) (地上オゾン濃度観測)	忠 鉢 繁	59年5月	日本気象学会	予稿集
電離箱による測定(空気電離箱)	北 村 正 亟	59年10月	理研シンポジウム (理化学研究所)	
南極昭和基地における赤外分光観測 (第1報)	牧野・村松他	59年10月	日本気象学会	予稿集
昭和基地におけるオゾン特別観測 (第3報) (オゾン反転観測)	忠 鉢 繁	59年10月	日本気象学会	予稿集
Gas-chromatographic measurements of atmospheric CF_2Cl_2 , CFCl_3 and N_2O in the Antarctica	M. Hirota Y. Makino S. Chubachi H. Muramatsu M. Shiobara	59年11月	International MAP Symposium • Kyoto	
Intrusion process of stratospheric ozone into the troposphere over Japan	H. Muramatsu Y. Makino M. Hirota T. Sasaki	同 上	同 上	
Observation of atmospheric minor constituents by FTIR at Syowa Station Antarctica	Y. Makino et al.	同 上	同 上	
A special ozone observation at Syowa Station, Antarctica From February 1982 to January 1983	S. Chubachi	同 上	同 上	

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲 載 刊 行 物
南極昭和基地における地上オゾン濃度観測	忠 鉢 繁	59年11月	大気汚染学会	
南極における大気微量成分濃度の測定—Ⅱ	広田・牧野・忠鉢・村松・塩原	59年12月	国立極地研究所	第7回極域気水圏シンポジウム
昭和基地における赤外分光観測	牧野・村松他	59年12月	国立極地研究所	第7回極域気水圏シンポジウム
南極昭和基地における地上オゾン観測	忠 鉢 繁	同 上	同 上	同 上
粒子線および大気微量成分の同時観測(5) 電離強度の高度変化	北 村 正 亟 他	59年12月	宇宙科学研究所	大気球シンポジウム
オゾン観測の動向	忠 鉢 繁	59年12月	宇宙科学研究所	
高度40kmまでのオゾン測定(Ⅱ)	村松・広田・牧野・佐々木	60年5月	日本気象学会	
昭和基地における N_2O 全量観測——その2: 4 μm 域連続吸収の効果について——	牧 野 他	同 上	同 上	
1982年エル・チチョン火山噴火雲の北半球での拡散について	内 野 修	59年5月	日本気象学会	59年春季大会 予稿集
Ruby Lidar Observations and Trajectory Analysis of Stratospheric Aerosols Injected by the Volcanic Eruptions of EL Chichon	O. Uchino I. Tabata I. Akita Y. Okada K. Naito	59年11月	International Map Symposium・Kyoto	
UV Lidar Measurements of Stratospheric Aerosol Layer and Comparison with Other Optical Data	O. Uchino	同 上	同 上	

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲 載 刊 行 物
Excimer Lidar Measurements of Ozone	T. Shibata O. Uchino M. Maeda	59年11月	International Map Symposium • Kyoto	
Comaprison between Observational Results of EL Chichon Dust Layers by Ruby Lidar at Tsukuba(36.1°N) and Those by UVLidar at Fukuoka(33.6°N)	O. Uchino	59年6月	The Japan U.S.Seminar	
A numerical study of nonlinear interactions between mean flow and breaking internal gravity waves	H. Kida	59年11月	International MAP Symposium • Kyoto	
Sfeに伴う地磁気擾乱	桑島・上井, 原田	59年9月	STE-MAP研究会	
Influence of geomagnetic disturbance on atmospheric circulation	K. Kodera	59年11月	International MAP Symposium • Kyoto	
粒子線および大気微量成分の同時観測(6)	北 村 正 亟 他	59年12月	大気球シンポジウム	
ライダーによる雲の特性に関する測定(1) 偏光解消度	内 野 修 岡 田 芳 隆 田 端 功 穂 田 巖 内 藤 恵 吉	60年5月	日本気象学会	60年春季大会 予稿集
エル・チチョン火山爆発後の筑波における成層圏エーロゾル層のライダー観測	田 端 功 内 野 修 岡 田 芳 隆 穂 田 巖 内 藤 恵 吉	60年5月	日本気象学会	60年春季大会 予稿集

発 表 項 目	発 表 者	発表年月	発 表 機 関	掲 載 刊 行 物
エル・チチョンダストが気象要素に及ぼした影響について	田 端 功 岡 田 芳 隆 穂 田 巖 内 野 修 内 藤 恵 吉	60年10月	日本気象学会	60年秋季大会 予稿集
Gas-chromatographic measurements of atmospheric CF_2Cl_2 , CFCI_3 and N_2O in Antarctica	M. Hirota Y. Makino S. Chubachi H. Muramatsu M. Shiobara	60年 8 月	IAMAP/IAPS O Joint Assembly	
南極における大気微量成分濃度の測定—Ⅲ	広 田 道 夫 牧 野 行 雄 忠 鉢 繁 塩 原 匡 貴 村 松 久 史 他	60年12月	第8回極域気水 圏シンポジウム	
昭和基地における N_2O 全量観測	牧 野 行 雄 村 松 久 史 (川口貞男) (山内 恭) (田中正之) (小川利紘)	60年 5 月	気象学会	予稿集
Observation of Atmospheric Minor Constituents by FTIR at Syowa Station, Antarctica.	同 上	60年 8 月	IAMAP/IAPS O Joint Assembly, Honolulu, Hawaii, USA (Aag. 7-15, 1985)	同 上
地磁気静穏日日変化の準2年周期振動	角 村 悟 桑 島 正 幸 原 田 朗	60年10月	第78回地球電磁 気学会	講演集
中層大気と地磁気変動	同 上	61年 1 月	MAP シンポジ ウム (第5回)	

気 象 研 究 所

1946（昭和21年）設立

所長：理博 柳 原 一 夫

予 報 研 究 部	部 長：理 博	相 原 正 彦
台 風 研 究 部	部 長：	正 村 敬 三
物 理 気 象 研 究 部	部 長：	植 村 八 郎
応 用 気 象 研 究 部	部 長：	真 島 恒 裕
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	市 川 政 治
海 洋 研 究 部	部 長：理 博	飯 田 隼 人
高 層 物 理 研 究 部	部 長：理 博	村 松 久 史
地 球 化 学 研 究 部	部 長：理 博	朝 岡 治

気 象 研 究 所 研 究 報 告

編集委員長：真 島 恒 裕

編 集 委 員：	山 崎 孝 治	大 西 晴 夫	伊 藤 朋 之
	吉 川 友 章	高 島 勉	岡 田 正 實
	遠 藤 昌 宏	牧 野 行 雄	廣 瀬 勝 己
事 務 局：	西 田 圭 子	湯 原 有 哉	

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61年3月31日発行 I S S N 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 茨城県稲敷郡牛久町柏田3269

株式会社 エ リ ー ト 印 刷