

## A-1(2) ミリ波望遠鏡による上部成層圏のオゾン層の挙動解明

研究代表者

名古屋大学 藤本光昭

名古屋大学 藤本光昭  
河端公昭  
小川英夫  
水野 亮

研究期間 平成2～4年度

平成2～4年度合計予算額 20,419千円

[要旨] 本研究では平成2～3年度に於いて循環型ヘリウム冷凍機によって4K迄冷却した超伝導受信機並びに2048チャンネルの音響光学型電波分光器を使用した成層圏・中間圏オゾン観測用のミリ波電波分光器を試作し、平成3年度よりその観測を開始した。観測開始当初は、40 km以上70 km以下の領域のオゾン量が測定出来たに過ぎず、又受信機が両サイドバンドであった為に、その絶対量に関して因子2以上の不確かと安定性に問題があった。平成3～4年度には周波数の安定性の改良・受信機の片サイドバンド化・吸収体とホーンの間の定在波の削減・周波数スイッチ幅の増大等本装置の改良を進め、現在では地上30 kmから中間圏上端迄のデータが得られるようになった。

本装置による観測から、成層圏・中間圏のオゾン量の日変化が従来に無い高精度で測定され、中間圏上部の夜間を除くと既存の理論と良く一致していることが確かめられた。中間圏上部では理論的には予測されていない変化があり、その様子が日毎に異なっていることが知られた。日の出・日の入りの時のオゾン量の急激な変化が時間的に分解されて得られた。従来の成層圏・中間圏オゾンの研究は月平均など平均量に関する議論に限られていたが、本装置の開発によって短時間の変化に関する研究への路が開けた。

[キーワード]

ミリ波オゾン センサー、成層圏微量分子、超伝導受信機、音響光学型電波分光器

## 1 序

近年ミリ波帯でのスペクトル分光による地球大気中のオゾン等の微量分子の観測がアメリカ・スイス・フランス・ドイツ・スウェーデン・ロシア等で活発の観測されるようになってきた (Wilson and Schwartz, 1981; Lobsiger and Künzi, 1986; Allen, Lunine, and Yung 1984; Zommerfelds *et al.* 1989; Ricaud *et al.*, 1991; Solomonov *et al.*, 1991; Kawabata *et al.*, 1992; Parrish *et al.*, 1992)。ミリ波帯でのスペクトル分光による地球大気微量分子観測の利点は次の点にある。

1. 高度 20 km から 80 km にわたって、高度分布の測定が可能である。特に 45 km 以上は他の方法では地上観測が不可能である。
2. 輝線を観測するので他の方法のように太陽などの光源を必要としないので、昼夜を問わずに観測出来る。
3. エアロゾルの影響を受けず、多少の曇天でも観測可能である。このため、連続観測が容易である。

これらの利点からミリ波分光観測による微量大気成分の地上観測は中間圏・成層圏の研究にとって極めて重要である。

それにも関わらず、わが国には大気中微量分子観測用のミリ波分光観測専用装置が無く、天文観測用電波望遠鏡を用いた観測が僅かに行われたに過ぎなかった (Kawabata *et al.* 1992)。天文学用の電波望遠鏡は地球大気中の微量分子の観測には必ずしも適しておらず、特に成層圏微量分子の観測には信頼性に乏しい。又マシンタイムの点からも充分な観測時間が得られていない。これらの問題点から、わが国に於ける地球大気微量分子測定用の電波分光装置の早急な開発・設置・研究体制の充実が望まれる。

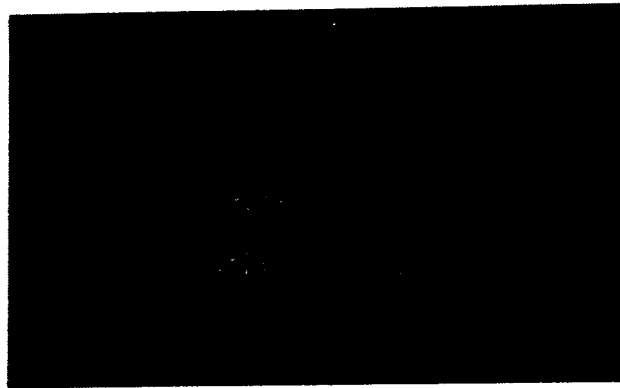


図 1: 8 素子シリーズの SIS 素子。一つの素子の直径は約 2.5 ミクロン

本研究は名古屋大学理学部と富士通研究所で協同開発した 110 GHz 帯超伝導 SIS ミクサ (Ogawa *et al.* 1990, Ogawa 1991) を用いた成層圏・中間圏オゾン観測用のミリ波分光観測装置を開発し、成層圏・中間圏オゾンの日変化・季節変化・長期変化の解明に資することを目標とする。図 1 はこのミクサで用いられている 8 素子シリーズの SIS 素子の写真である。

本研究で使用する SIS ミクサの特徴をまとめると次のようになる。

1. 量子限界  $h\nu/k$  ( $h$  はプランクの定数、 $\nu$  は周波数、 $k$  はボルツマン定数) に近い低雑音が得られる。110 GHz での量子限界は約 5 K、に対し、本研究に使用したミクサの雑音は 34 K となっている。
2. ミクサの変換損が小さく、変換利得も期待出来る。
3. ミクサを駆動するのに必要な局部発振電力が小さい (半導体ミクサの場合には約 1mW、SIS ミクサの場合には約 100 nW)。

現在世界で使われているオゾン観測専用電波分光観測装置の雑音温度は約 400 K 以上である。われわれの装置では受信機雑音が 34 K、これに大気雑音約 70 K が付け加わって、総合して雑音温度 100 K 程度である。この為、従来の観測と比べて 1/10 以下の積分時間で同じ S/N 比のデータが得られる。電波分光には周波数分解 35 kHz の音響光学型電波分光器を用いているので、スペクトル線中心のドップラー部も十分に分解出来る。本装置のミリ波受信機・電波分光器は名古屋大学理学部の 4メートル電波望遠鏡で使用しているものと同じである。従って、これらの装置の安定性・再現性など長期的使用に関連して起こり得る問題点に就いては、4メートル鏡での実績から問題無い。

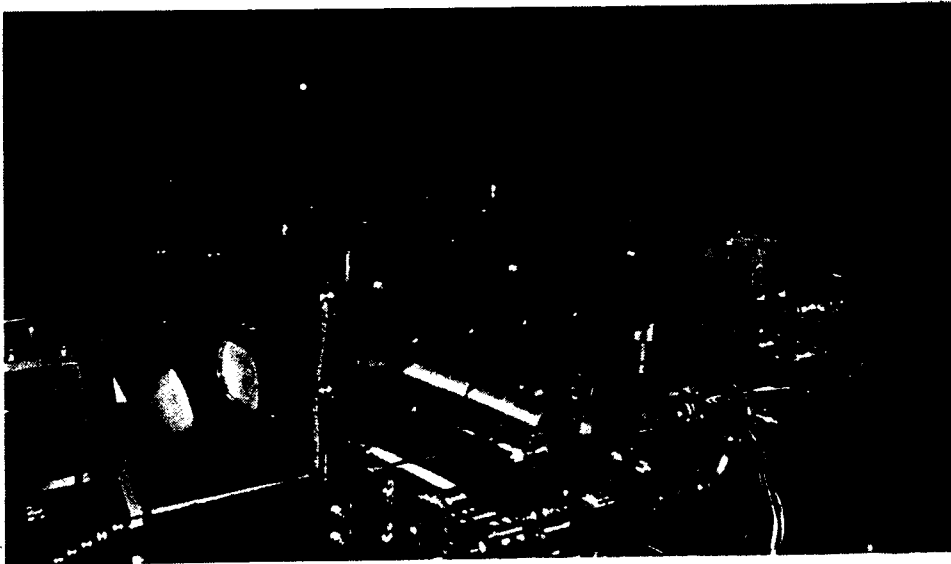


図 2: オゾン観測装置の外観

## 2 観測装置

ミリ波オゾン観測装置はアンテナ・ミリ波受信機・電波分光器・制御用計算機からなる。図 2 は本装置のアンテナ部分と SIS ミクサを内装したクライオスタットの外観である。アンテナは直径 10 cm のオフセットパラボラで、ステッピングモータを用いて回転させることによって、任意の高度、室温の電波吸収体、低温の電波吸収体に向けることが出来る。低温電波吸収体はその中心部は 20 K 迄ヘリウム冷却された電波吸収体、その周りの室温の吸収体から構成されており、アンテナの回転によって 20 K 部分と室温部分の照射の割合を変えることによって、総合して任意の輝度温度が得られるようになっている。ロードスイッチング方式による観測に際しては、低温電波吸収体の輝度温度を空の輝度温度とほぼ等しくして観測する。

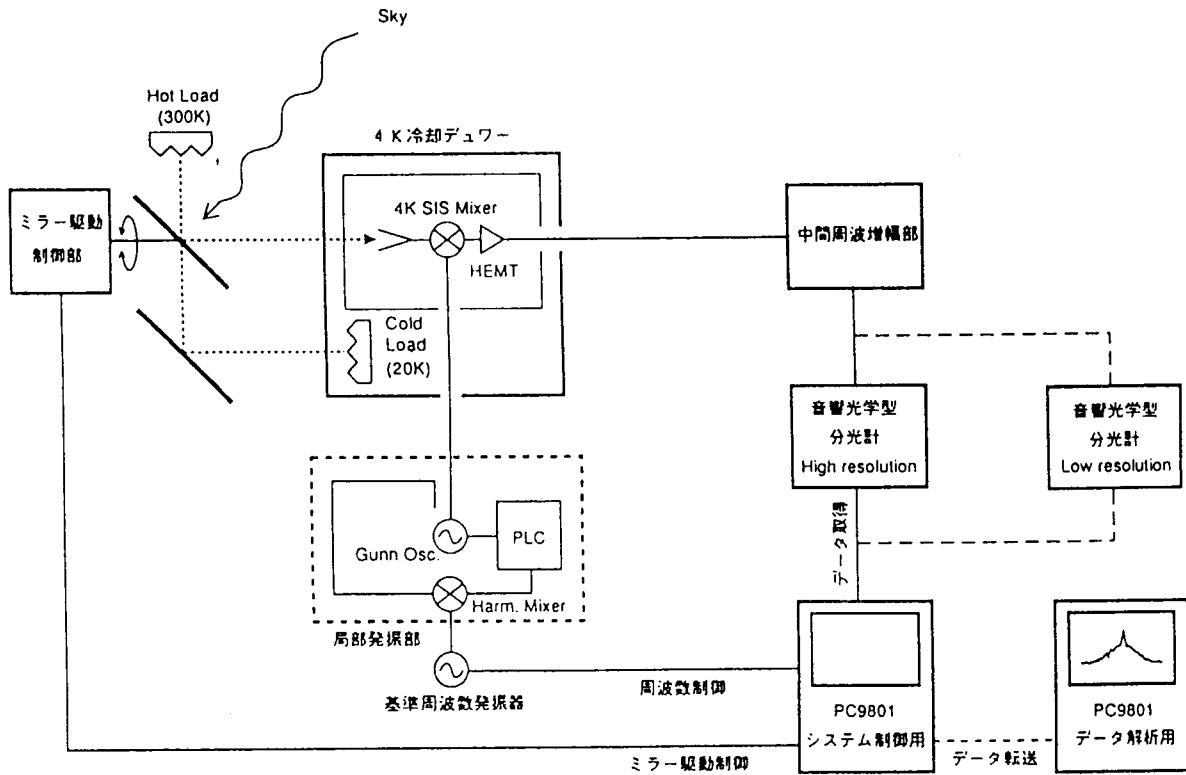


図 3: オゾン観測装置の構成

図 3 は本装置の構成を表す。大気中のオゾンからの輝線はアンテナからホーンを通して SIS ミキサへ導かれる。このミキサは二つのバックショートを持ち、これによって整合を取ると共に受信機に片サイドバンド特性を持たしている。SIS ミキサによってこの電波は 1.55 GHz の中間周波に変換され、20 K に冷却された雑音温度 15 K の HEMT 前置増幅器により増幅され、主増幅器によって更に増幅されて、375 MHz の第 2 中間周波に変換される。ここで更に増幅して、周波数 65 MHz の第 3 中間周波に変換・増幅して、音響光学型電波分光器に導く。

音響光学型電波分光器では先ず第 3 中間周波を圧電素子によって、超音波に変換して、二酸化テルルの結晶に入射させる。この結晶にレーザー光を照射して、その異常ブラッグ回折光を CCD 上に結像させる。使用している分光素子は 35 kHz の分解能を持ち、帯域幅は 60 MHz である。用いている CCD は 2048 素子からなり、数値化してパソコンに送る。

パソコンでは CCD からの信号を積分し、Kawabata *et al.* 1992 の方法で大気吸収の補正をリアルタイムで行って、観測に使用した諸定数と共にディスク ファイルに格納する。このパソコンはデータの取捨と共に、アンテナ・局部発振器・CCD の制御も行っており、観測は完全に自動化されている。

### 3 観測

観測しているオゾン スペクトル線は  $6_{1,5}-6_{0,6}$  の遷位による周波数 110.832592 GHz の回転スペクトル線である。アンテナを空に向けた時に受かる電波は受信機雑音による成分約 34 K、宇宙放射 3 K、対流圏からの放射約 70 K の上に弱いオゾン回転スペクトル線が乗っている。従って直接これを観測しても信頼性のあるデータは得られない。それでスイッチング方式による観測が行われる。この方法としては次の二つの方法がある。

#### 1. 周波数スイッチング方式

この方法では局部発振周波数を交互に切り替えて電波強度の差を測定する方法である。

#### 2. ロード スwitching方式

この方法は本研究の為に我々が開発した方式で、バックグラウンドとなる大気雑音と同じ雑音をヘリウム冷却によって用意し、これとの差し引きによって観測する方法である。この方法で巧く観測が行えることは周波数スイッチング方式による観測結果との比較から示された。

周波数スイッチング方式は積分時間にデッドタイムが無いので、他の方法と比べて同じ時間で S/N 比が  $\sqrt{2}$  だけ良いデータが取得されると云うメリットがある。この方法は星間分子観測に多く用いられている方法であり、測定法も確立しているので最も問題の無い方法である。然しながら周波数を振れる範囲は高々 30 MHz 程度に過ぎないので、広い周波数帯域のデータが得られない為、これで測定出来るのは高度約 30 km 以上である。

現在のところロード スwitching方式で観測出来るのは 30 km 以上の領域に限られているが、これは現在使用している電波分光器の帯域幅に因る。広帯域の電波分光器を用いて観測すれば 20-25 km 迄観測高度を下げる事が可能と思われる。

1993 年 2 月迄は高度 45° で観測したが、同年 3 月からは高度 25° で行うようになった。高度 25° では天頂方向を観測する場合と比べて大気層を通過する長さが約 2.4 倍に増える為、オゾンスペクトル線の強度がそれだけ増加する。一方対流圏での吸収も増加するが対流圏での吸収増加の影響の方が小さいのでこの方が有利である。更に高度を下げると吸収量が増加することと、データの質に大きく影響する雲にかかる可能性が増加するので、わが国の気象条件からはこの程度の高度が最も具合が良いと思われる。

積分時間は 2.5 分から 10 分程度で観測を行った。

### 4 観測結果

#### 4.1 オゾン高度分布

オゾン量の高度分布を求めるには圧力によるスペクトル線の広がりを使う。従って、ミリ波観測から得られるのは圧力変化の高度スケール程度の広がりについて平均的オゾン密度である。ここで使用した方法は基本的には Kawabata *et al.* 1992 に述べられている方法

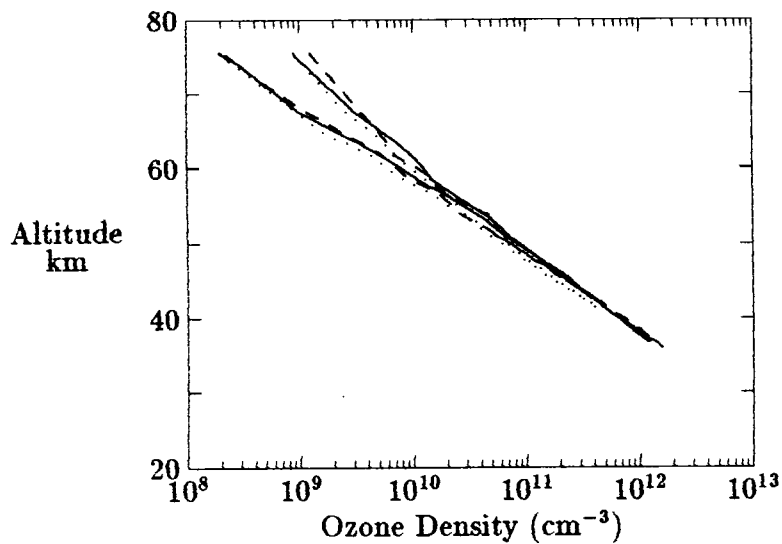


図 4: オゾン密度の高度分布

26 March 1993 1100-1300(JST)

Integ. time=95<sup>m</sup> 0<sup>s</sup>

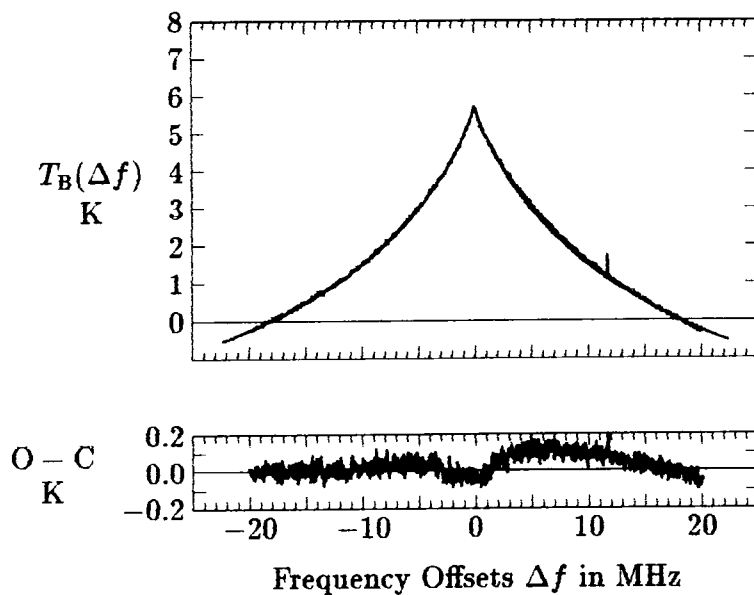


図 5: オゾン スペクトル線の観測値・計算値・O-C

と同じである。但しロードスイッチング方式による観測の解析には、それに対応して重み関数の変更が行われている。

図4は1993年3月11日、同年3月26日及び同年12月9日に行われた観測から求めた正午±1時間及び正子±1時間の平均のオゾン密度の高度分布を示したものである。図で実線は12月9日、破線は3月26日、点線は3月11日の高度分布を表す。中間圏で大きい方が正子、小さい方が正午前後の分布である。1993年3月11日は周波数スイッチング方式(周波数スイッチング幅18MHz)、同年3月26日の観測はロードスイッチング方式、同年12月9日の観測は周波数スイッチング方式(周波数スイッチング幅30MHz)で行われた。この図から高度55km付近より下層では全ての線がほぼ重なっており、これより上では正午と正子の間に大きい差が見られるが、正午・正子それぞれに於いて日による差はそれ程大きくない。

図5は1993年3月26日正午±1時間の観測から求めたオゾンスペクトル線の観測値と、これから求めた図4オゾン密度高度分布から計算したスペクトル線の計算値の比較を示したものである。周波数オフセット $\Delta f$ での輝度 $T_B(\Delta f)$ は周波数オフセット $\Delta f = 18$  MHzの点での輝度をバックグラウンドレベルに取って差し引いた値が取られている。図から知られるように測定値と計算値は非常に良く一致しており、図からはその差が見えない。下図はO-Cを拡大してプロットしたものである。O-Cの図を見ると若干の非対称性が見られるが、おおむねr.m.s.誤差程度でゼロとなっている。計算値並びにオゾン輝線は対称的であるから、この非対称性はホーンと低温吸収体の間の定在波によるバックグラウンドレベルの曲がりによるものと考えられる。この点装置の改良が望まれるが、バックグラウンドに対し1/1000以下の問題であることを考慮すると現状ではほぼ限界に近い。

## 4.2 日の出前・日の入り後のオゾン混合比の時間変化

日の出前・日の入り後に中間圏のオゾン量が光化学反応によって急激に変化することは既に良く知られていることであるが、その変化が余りに急激な為に、その変化の様子は従来の観測からは得られていなかった。そこで、平成4年3月～4月の約10日間積分時間3分で観測を実施した。積分時間が3分程度ではいかにSIS受信機であってもS/N比からその時間変化の様子を定量的に求めることは困難である。そこで、地上での日の出・日の入り時刻を基準にしてこれらの観測をまとめたのが図6及び図7である。

図6では日の出前1時間から2時間の平均値を1に規格化したオゾン混合比を、図7では日の入り後2時間から3時間の平均値を1に規格化したオゾン混合比を縦軸に取っている。横軸の原点はそれぞれ地上での日の出・日の入り時刻である。

これらの図から高度76kmでは地上の日の出30分前からオゾン量の減少が始まり、地上の日の出時刻に昼型の分布に移ることが判る。オゾン量減少の始まりは高度が下がるに従って遅くなるが減少の終わりは何れも地上での日の出に近い。高度76kmでは地上の日の入り後約20分でオゾン量の増加が始まり、日の入り後約1時間で夜間の分布に変わる。高度が下がるに従って、オゾン量増加の始まりが早くなると同時に変化も急になっている。

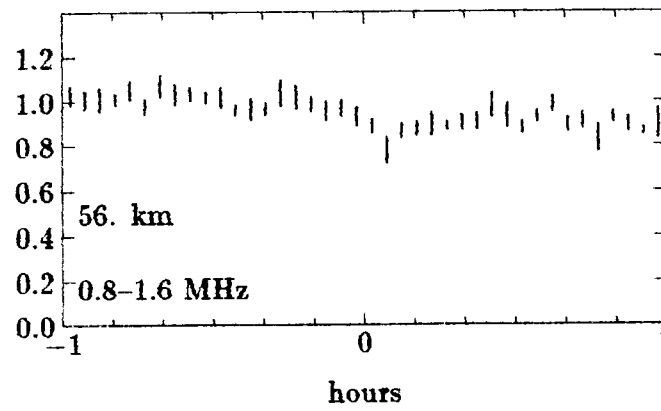
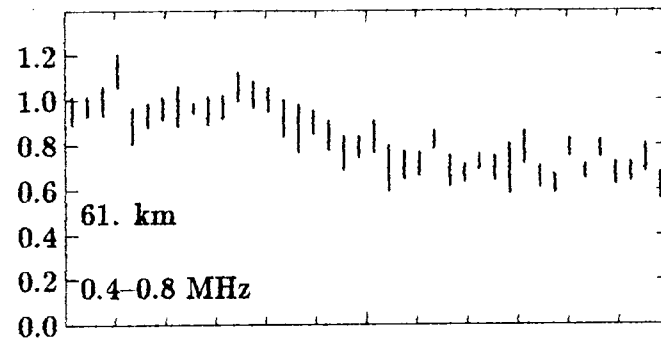
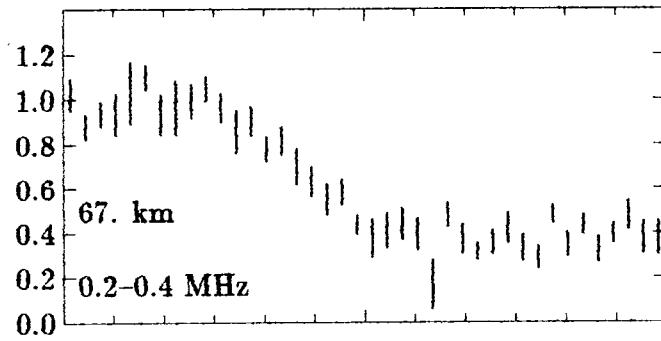
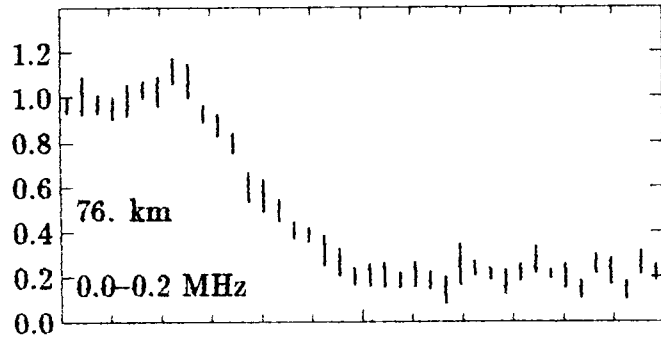


図 6: 日の出前後のオゾン混合比の相対変化



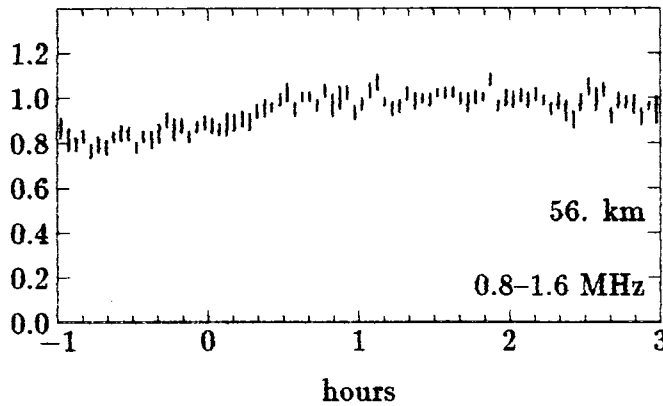
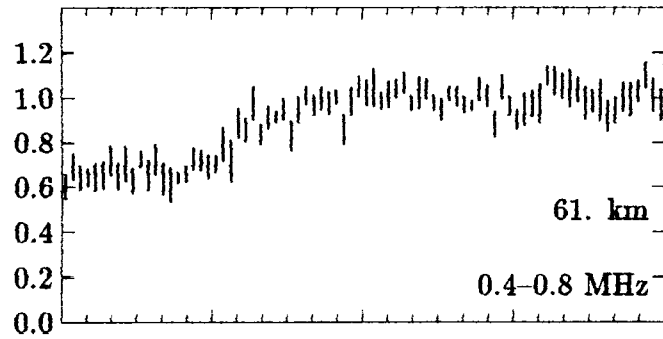
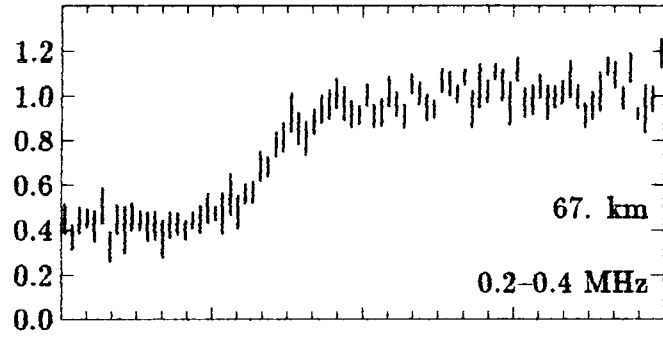
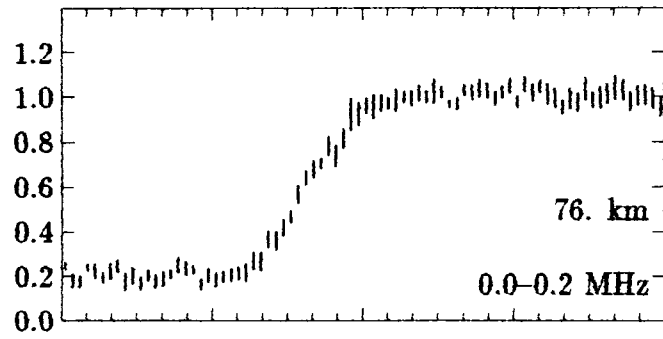


図 7: 日の入り前後のオゾン混合比の相対変化

12 - 17 April 1993

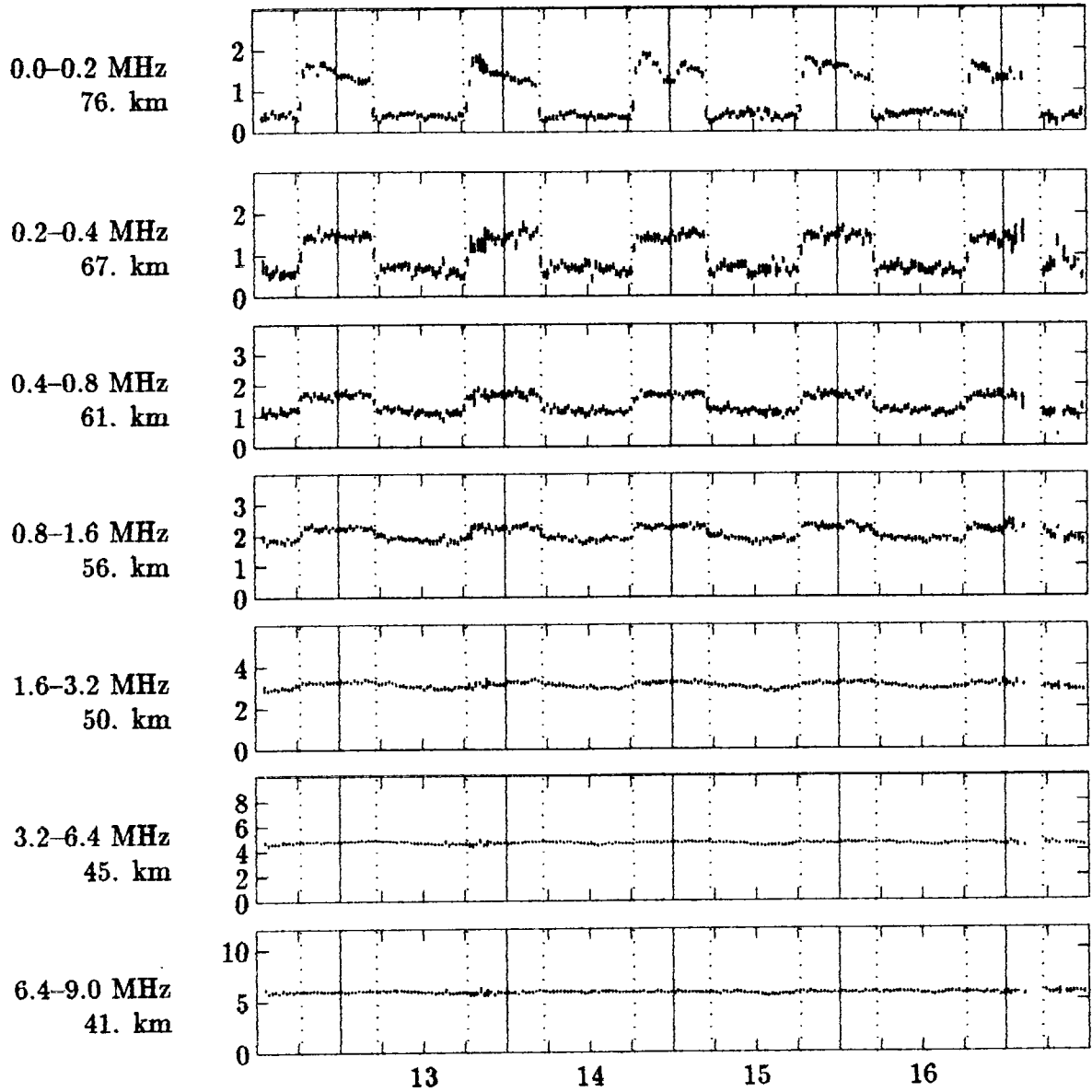


図 8: オゾン混合比の日変化

### 4.3 オゾン混合比の日変化

図8は1993年4月12日から同月17日の間の日変化の様子を示したものである。この期間はスイッチング幅18 MHzの周波数スイッチング方式によって観測を行った。図から高度76 kmで最も日変化が大きく、高度50 km以下では殆ど日変化が見られないことが示される。この変化は理論的予測と定性的には良く合っている。高度76 kmでは夜間のオゾン混合比に時間的変化が見られ、その様子は日毎に異なっている。

オゾン混合比の日変化に就いては月平均の変化に関しては既に多く論じられており、夜間に理論的には予測されていない変化があることはLobsiger and Künzi 1986やZommerfelds *et al.* 1989で論じられているが、今回の観測で見出されたような日毎の変化に就いては従来の観測からは知られていなかった。その起因に就いては今後の問題である。

### REFERENCES

- Brillet, J., A theoretical study of ozone measurements made with ground-based microwave sensors, *J. Geophys. Res.*, **94(D10)**, 12833–12850, 1989.
- Connor, B. J., J. W. Barrett, A. Parrish, P. M. Solomon, R. L. de Zafra. and M. Jamarillo, Ozone over McMurdo station, antarctica, austral spring 1986; altitude profiles for the middle and upper stratosphere, *J. Geophys. Res.*, **92(D11)**, 13221–13230, 1987.
- Kawabata, K., Fukui, Y., Ogawa, H., Mizuno, A., Fujimoto, M., Nozawa, S., Nakane, H., Hoko, H., and Ji Yang, Observations of ozone mixing ratio by Nagoya 4 m millimeterwave telescope, *J. Geomag. Geoelectr.*, **44**, 1085–1096, 1992.
- Lobsiger, E., and K. F. Künzi, Nighttime increase of mesospheric ozone measured with ground-based microwave radiometry, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **48**, 1153–1158, 1986.
- Ogawa, H., A. Mizuno, H. Hoko, H. Ishikawa, and Y. Fukui, A 110 GHz SIS receiver for radio astronomy, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **11**, 717–726, 1990.
- Ogawa, H., A 100–115 GHz SIS receiver for radio astronomy, *Conference Digest, 16th International Conference on Infrared and Submillimeter Waves, 26–30 August 1991, Lausanne, Switzerland*, eds. M. R. Siegrist, M. Q. Tran, and T. M. Tran, 133–134, 1991.
- Ricaud, Ph., J. Brillet, J. de La Noe and J. P. Parisot, Diurnal and seasonal variations of strato-mesospheric ozone: analysis of ground-based microwave measurements in Bordeaux, France, submitted to *J. Geophys. Res.*, 1991.
- Solomonov, S. V., E. P. Kropotkina, A. N. Lukin N. I. Ponomarenko, S. B. Rozanov, and J. Elder, Some features of vertical ozone distribution from millimeter wave measurements at Puschino and Onsala Observatories, *P. N. Lebedev Physical Institute Preprint*, N 101, 1991a.
- Solomonov, S. V., E. P. Kropotkina, A. N. Lukin, N. I. Ponomarenko, and S. B. Rozanov, Vertical profiles of the ozone content retrieved from millimeter-wave observations in LPI on the DYANA Program. *P. N. Lebedev Physical Institute Preprint*, N 192, 1991b.

- Wilson, W. J. and P. R. Schwartz, Diurnal variations of mesospheric ozone using millimeterwave measurements, *J. of Geophys. Res.*, **86(C8)**, 7385–7388, 1981.
- Zommerfelds, W. C., K. F. Künzi, M. E. Summers, R. M. Bevilacqua, D. F. Strobel, M. Allen, and W. J. Sawchuck, Diurnal variations of mesospheric ozone obtained by ground-based microwave radiometry, *J. of Geophys. Res.*, **94(D10)**, 12819–12832, 1989.

研究発表の状況

- Ogawa, H., A. Mizuno, H. Hoko, H. Ishikawa, and Y. Fukui, A 110 GHz SIS receiver for radio astronomy, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **11**, 717–726, 1990.
- Ogawa, H., A 100–115 GHz SIS receiver for radio astronomy, *Conference Digest, 16th International Conference on Infrared and Submillimeter Waves, 26–30 August 1991, Lausanne, Switzerland*, eds. M. R. Siegrist, M. Q. Tran, and T. M. Tran, 133–134, 1991.
- Kawabata, K., Fukui, Y., Ogawa, H., Mizuno, A., Fujimoto, M., Nozawa, S., Nakane, H., Hoko, H., and Ji Yang, Observations of ozone mixing ratio by Nagoya 4 m millimeterwave telescope, *J. Geomag. Geoelectr.*, **44**, 1085–1096, 1992.
- Ogawa, H., Kawabata, K., and Yonekura, Y., Development of millimeterwave ozone sensor employing SIS mixer receiver, *Solar Terrestrial Environmental Res. in Japan*, in press.