

A-1 衛星データ等を活用したオゾン層破壊機構の解明及びモデル化に関する研究  
(6) 中層大気における力学・光化学結合過程に関する観測的研究

研究代表者 国立環境研究所大気圏環境部 E F フェロー

S. Parameswaran Namboothiri

環境庁 国立環境研究所

大気圏環境部 高層大気研究室

杉本 伸夫・松井 一郎

地球環境研究グループ オゾン層研究チーム

中根 英昭

平成8-10年度合計予算額 5,400 千円  
(平成10年度予算額 1,983 千円)

〔要旨〕

温度、密度の摂動のプロファイルは中層大気重力波の重要なトレーサーとなる。ポテンシャルエネルギー密度の鉛直方向の成長はブロードバンドの対流不安定飽和限界の近くで止まることが観測された。また、重力波の上空への伝播における成層圏界面の構造の役割について研究した。中間圏における重力波の活動の長時間の変化は成層圏界面の構造の変化と相関があることが示された。

〔キーワード〕 レイリーライダー、中層大気、気温プロファイル、重力波

1. 序

重力波の研究は中層大気の研究領域においては重要な位置を占める。内部重力波は、中層大気乱流の発生や、エネルギーおよび運動量の収支において大きな効果を持つ。これに関しては、多くの理論的研究や観測的研究がなされている。(Holton, 1982; Matsuno, 1982; Tsuda et al., 1990; Namboothiri et al., 1996) 観測的研究においては、最近までレーダー観測が中心であった。現在では、ライダーも重力波の特性の観測に有効であることが実証されている。ライダーで得られる密度、気温のプロファイルは中層大気重力波の研究に用いられてきた。(Mitchell et al., 1990; Whiteway and Carswell, 1995) ライダーの高い時間、空間分解能は重力波の特性の観測に有効である。中層大気密度と気温のメソスケールの変動は重力波によって誘起されると考えられるが、重力波の場合は、(有効ポテンシャルエネルギー密度と鉛直波数スペクトルとともに) 温度の相対的摂動の振幅の時間・高度変化で特徴付けられる。

つくばの国立環境研究所のオゾンライダーはルーチンベースで運転されている。システムは差分吸収方式によりオゾン測定することを目的としているが、同時にレイリー散乱すなわち大気密度のプロファイルが得られる。このライダーはNetwork for the Detection of Stratospheric Change (NDSC)(Kuryla and Solomon, 1990)でも活躍している。装置については以前の論文で述べられている。(Sugimoto et al., 1989; Nakane et al., 1992; Namboothiri et al., 1999)

この研究では1995年から1996年の冬期に観測した33例の気温プロファイルを用いた。ほとんどの例で重力波が観測され、気温、密度の揺らぎは線形不安定理論で説明される。

2. 結果と考察

気温プロファイルの変動を解析するデータとして1995年12月20日のデータを例にとって、高度30kmから60kmの気温の揺らぎの鉛直構造と時間変化を示す。図1は、33分間平均した気温プロファイルの時系列の変化である。高度方向に1.8kmの平滑化を行っている。図中の両側の線は測定誤差の範囲を示す。

気温摂動比、 $T'(z)/T_0(z)$ において、内部重力波が観測された。摂動、すなわち、 $T'(z)=T(z)-T_0(z)$ は、非摂動状態 $T_0(z)$ を3次の多項式をフィッティングして近似して求め、30分毎に平均した気温プロファイルを用いて導出した。図2(a)は1995年12月20日の夜間平均の気温プロファイルである。図には推定された非摂動状態の気温プロファイルを破線で示した。また、図2には、図1に対応する30分毎の気温摂動比を示した。

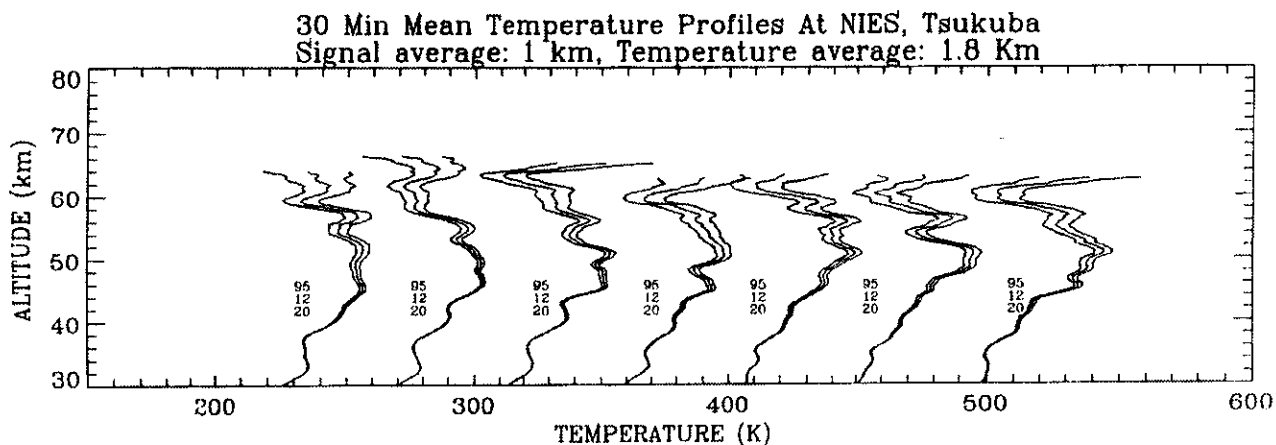


図1 30分毎の平均気温プロファイル。観測日1995年12月20日。気温軸は最初のプロファイルに対するもので、以下は45Kづつシフトして表示。両側の曲線は測定誤差範囲を示す。

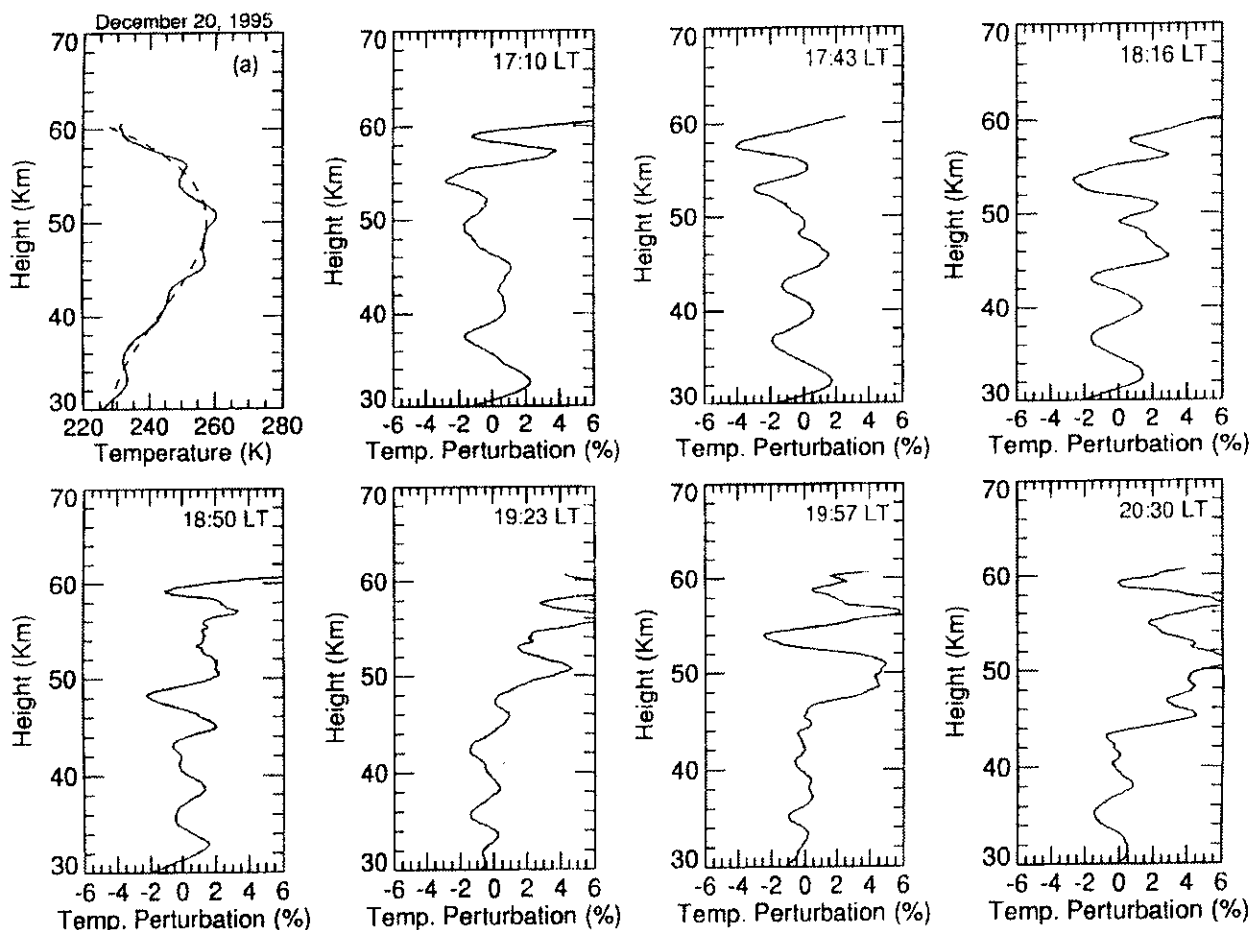


図2 夜間平均気温と推定した摂動を受けていない気温プロファイル。観測日1995年12月20日。また、図1に対応する気温摂動をそれぞれ示す。

これらの図では、高度に従って振幅が増加するような波動が見られる。卓越する鉛直波長がしばしば明確に観測されるが、数時間の期間に顕著な変化がある。全般に鉛直波長10km以下の波動を不規則に重ね合わせた波動が観測されている。また、位相は下方に進行しており、群速度は上方向であることを示している。しかし、位相速度を正確に測定することは不可能である。

夜間平均の鉛直波数ポテンシャルエネルギースペクトルと密度摂動を30-45kmと45-60kmの高度領域で計算したものを図3に示す。最も長い鉛直波長成分を見るには15kmの区間が必要である。図中には、線形

不安定スペクトルモデル (Dewan and Good, 1986; Smith et al., 1987) による理論もプロットした。飽和鉛直波数  $m$  に対するポテンシャルエネルギースペクトル密度は、 $N^2/10m^3$  の形をとる。これは、対流不安定限界に対応する。与えられた波数のスペクトル密度の鉛直方向の成長は、広いスペクトル領域にわたって、この対流不安定限界で制限される。

20 December, 1995

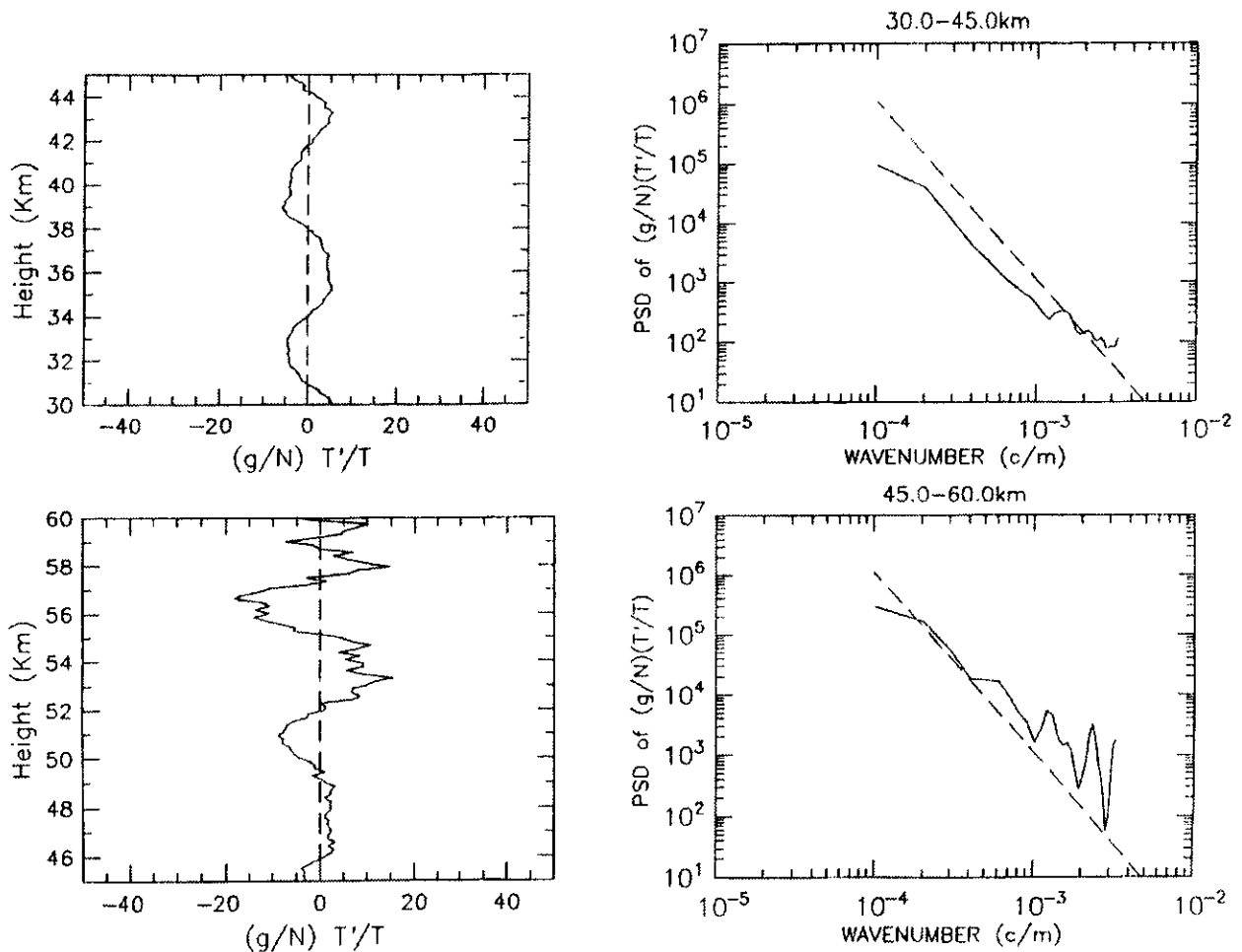


図3 高度領域30-45kmと45-60kmについて求めた密度摂動と夜間平均の鉛直波数ポテンシャルエネルギースペクトル。

図3の左側に示した密度摂動は、高度とともに成長する波動の動きを明瞭に示している。これは、特に高高度で明らかである。また、スペクトルは図1、図2の特徴を反映している。高度方向のスペクトル強度の成長は小さい波数で顕著である。低高度ではスペクトル強度は対流不安定限界以下であるが、高高度では対流不安定限界に達している。例えば、 $m=2 \times 10^{-4} \text{ c/m}$  (鉛直波数 5 km に相当) についてスペクトル強度の成長をみると、低高度領域では  $3 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^2$  であったものが、高高度領域では  $2 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^2$  に成長している。図1に示した平均時間の短いプロファイルデータの解析結果では、一晩の観測時間の中でスペクトルのかなりの変動が見られる。ひとつあるいは複数の顕著な波動成分が見られ、夜間平均のスペクトルが必ずしも瞬間の波動場を表していないようである。また、波動の日々の変化も顕著であることが観測された。他の観測地点でも同様の変動や、季節変化が報告されている (Mitchell et al., 1990; Wilson et al., 1991)。つくばにおいては、冬期のみ十分な数のデータが得られているので、重力波活動の季節変化については解析できなかった。

次に、重力波の上方への伝播における成層圏界面の重要性について考察する。解析対象となるデータを通常の成層圏界面構造を持つ事例と、成層圏界面付近の気温のピークの高い事例にわけて解析した。通常の場合

合、成層圏界面の気温は平均260 Kであるのに対して、ピークの高い事例の平均では275 K程度である。成層圏界面付近の安定性の減少が重力波の上方への伝播に与える影響をみるために密度の分散の鉛直構造を調べた。

図4と図5はそれぞれ通常の成層圏界面構造を持つ事例と、成層圏界面付近の気温のピークの高い事例について、気温(T)、ブルント・バイサラ周波数の二乗( $N^2$ )、密度分散( $(\rho'/\rho)^2$ )を示す。

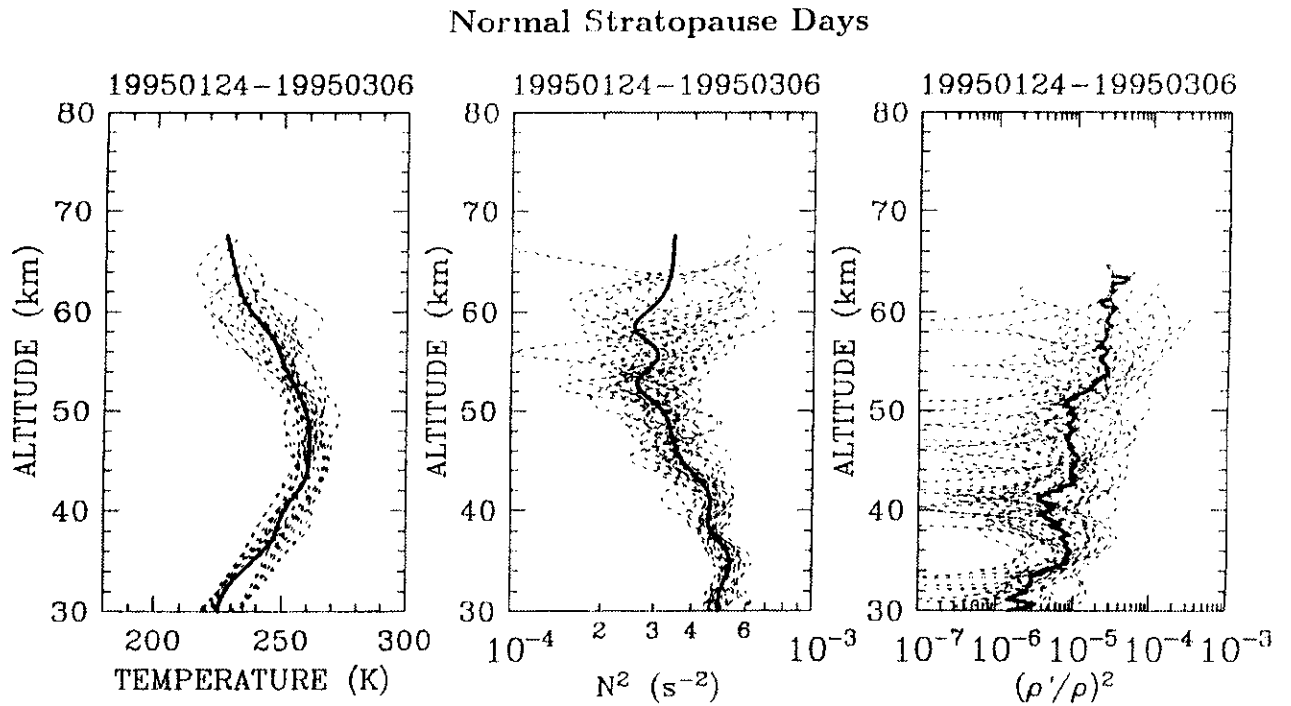


図4 通常の成層圏界面構造を持つ事例に対する、気温(T)、ブルント・バイサラ周波数の二乗( $N^2$ )、および密度分散( $(\rho'/\rho)^2$ )。

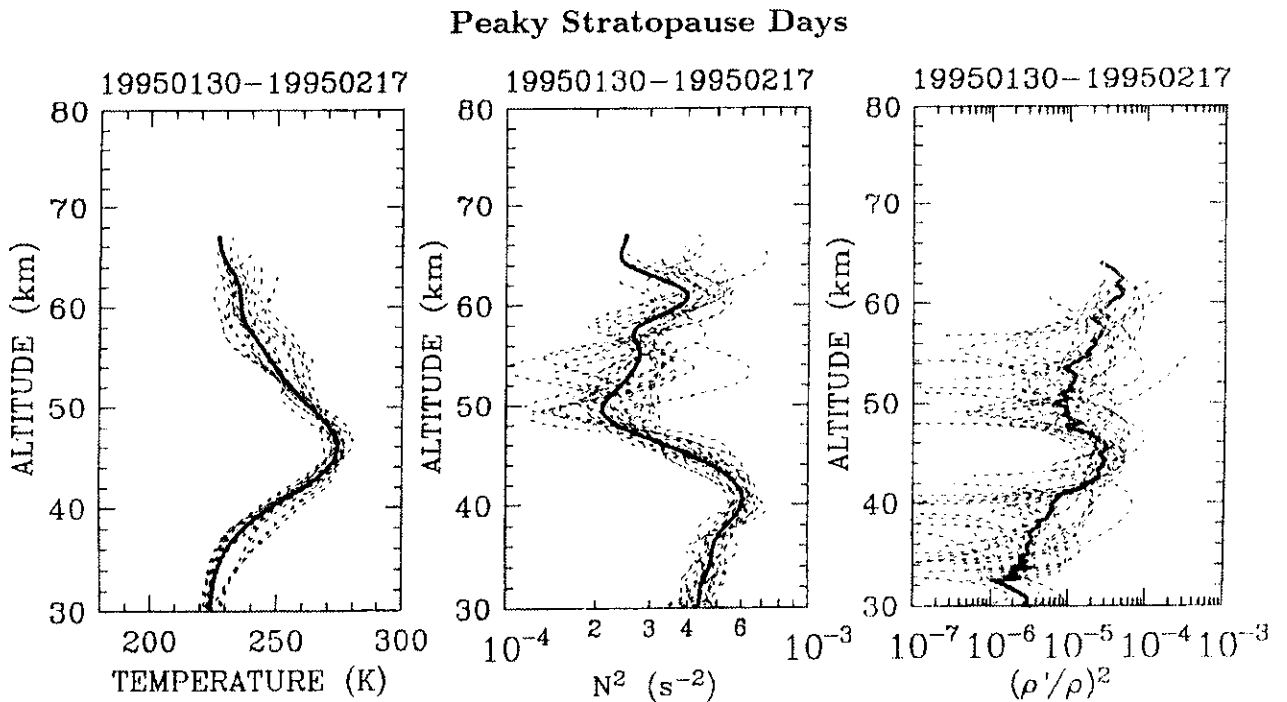


図5 成層圏界面付近の気温のピークの高い事例に対する、気温(T)、ブルント・バイサラ周波数の二乗( $N^2$ )、および密度分散( $(\rho'/\rho)^2$ )。

図において破線は1時間毎の値、実線は中央値である。ブルント・パイサラ周波数は鉛直方向の気温の傾きから求めた。図4と図5を比較して $N^2$ と密度分散に大きな違いがあることがわかる。成層圏界面付近の気温のピークの高い事例では、高度45-46kmで275 Kが観測され、その高度で $N^2$ が急激に減少している。通常の成層圏界面構造を持つ図4では、密度分散は高度とともに増加している。しかし、気温のピークの高い図5では密度分散は30-45kmで増加するが、成層圏界面で急減し、50km以上で再び増加している。これらの特徴をまとめると、重力波の伝播の特性は成層圏界面付近の温度構造、すなわち安定度の鉛直構造に大きく影響される。このことは、成層圏界面を通して、中間圏に輸送される重力波エネルギーは成層圏界面の構造に依存することを意味する。従って、中間圏の重力波活動の長時間の変化は成層圏界面の構造の変化と相関を持つと考えられる。

### 3. 結論

本研究では、成層圏上部および中間圏下部において、内部重力波に特徴的な高度、時間スケールを持つ気温および密度の変動を中心に解析した。解析には、国立環境研究所オゾンレーザーレーダーで得られた1995年と1996年の冬期の33例の気温プロファイルデータを用いた。この結果、重力波の伝播に関する特徴が示された。低高度から高高度への振幅の増加する気温の摂動が観測され、スペクトル解析によって波動の特性が明らかにされた。鉛直波長の短い波動は低高度で飽和することが示された。また、成層圏界面を通して中間圏に輸送される重力波エネルギーは成層圏界面の構造に依存することが示された。

### 引用文献

- Dewan, E. M., and R. E. Good, Saturation and the universal spectrum for vertical profiles of horizontal scalar winds in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 91, 2742-2748, 1986.
- Holton, J. R., The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 40, 2497-2507, 1983.
- Kurylo, M. J., and S. Solomon, Network for the detection of stratospheric change, NASA Rep., Code EEU, 1990.
- Matsuno, T., A quasi one-dimensional model of the middle atmosphere circulation interacting with internal gravity waves, *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 215-226, 1982.
- Mitchell, N. J., L. Thomas, and A.K.P. Marsh, Lidar studies of stratospheric gravity waves: A comparison of analysis techniques, *Ann. Geophys.*, 6, 705-712, 1990.
- Nakane, H., S. Hayashida, Y. Sasano, N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Minato, Vertical profiles of temperature and ozone observed during DYANA campaign with the NIES ozone lidar system at Tsukuba, *J. Geomag. Geoelectr.*, 44, 1071-1083, 1992.
- Namboothiri, S. P., T. Tsuda, M. Tsutsumi, T. Nakamura, C. Nagasawa, and M. Abo, Simultaneous observation of mesospheric gravity waves with the MU radar and a sodium lidar, *J. Geophys. Res.*, 101, 4057-4063, 1996.
- Namboothiri, S. P., N. Sugimoto, H. Nakane, I. Matsui, and Y. Murayama, Rayleigh lidar observations of temperature over Tsukuba: winter thermal structure and comparison studies, *EPS*, In press, 1999.
- Smith, S. A., D.C. Fritts, and T.E. VanZandt, Evidence for a saturated spectrum of atmospheric gravity waves, *J. Atmos. Sci.*, 44, 1404-1410, 1987.
- Sugimoto, N., Y. Sasano, H. Nakane, S. Hayashida-Amano, I. Matsui, and A. Minato, Multiple wavelength laser radar for measuring the stratospheric and tropospheric ozone profiles, Oyobuturi,

56, 1385-1397, 1989.

Tsuda, T., S. Kato, T. Yokoi, T. Inoue, M. Yamamoto, T.E. VanZandt, S. Fukao, and T. Sato, Gravity waves in the mesosphere observed with the middle and upper atmosphere radar. *Radio Science*, 26, 1005-1018, 1990.

Whiteway, J. A., and A. Carswell, Lidar observations of gravity wave activity in the upper stratosphere over Toronto, *J. Geophys. Res.*, 100, 14113-14,124, 1995.

Wilson, R., M.L. Chanin, and A. Hauchecorne, Gravity waves in the middle atmosphere observed by Rayleigh lidar, *J. Geophys. Res.*, 96, 5153-5167, 1991.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

- 1) Namboothiri, S. P., N. Sugimoto, H. Nakane, I. Matsui, and Y. Murayama, Rayleigh lidar observations of temperature over Tsukuba: winter thermal structure and comparison studies, *Earth, Planets and Space*, In press, 1999.
- 2) M. Nishida, T. Tsuda, C. Rocken, R.H. Ware, H. Nakane, N. Sugimoto, and S. P. Namboothiri, Verification of temperature profiles obtained by the GPS occultation technique (GPS/MET) with radiosonde and lidar measurements in tropical and sub-tropical regions, *Communicated, J. Geophys. Res.*, 1998.

(2) 口頭発表

- 1) Namboothiri、松井、宋、杉本、中根、レイリー散乱ライダーによるつくば、陸別における気温の観測、第19回レーザーセンシングシンポジウム、秩父、1998.
- 2) Namboothiri, N. Sugimoto, H. Nakane, I. Matsui, Y. Murayama, Rayleigh Lidar Observations of Temperature and Gravity Waves in the Middle Atmosphere, 19th International Laser Radar Conference, 1998, Annapolis.