

昭和基地における一酸化窒素分子密度分布の
ロケット観測および 5200 Å 放射の地上観測

岩上直幹*・小川利紘*・近藤 豊**

Rocket Observation of Nitric Oxide Density Profile
and Ground Observations of the 5200 Å Emission
at Syowa Station, Antarctica

Naomoto IWAGAMI*, Toshihiro OGAWA* and Yutaka KONDO**

Abstract: The nitric oxide density profile between 72 and 120 km was measured with a specially designed ultraviolet radiometer making use of the resonant fluorescence in the $\gamma(1, 0)$ band near 2150 Å aboard a sounding rocket launched at Syowa Station (69°S, 39.6°E) under geomagnetically quiet conditions. The observed nitric oxide density was found to be much larger than those obtained at middle and low latitudes. It can be attributed to the after-effect of particle precipitations during the previous night.

The 5200 Å emission from metastable atomic nitrogen, $N(^2D)$, was measured at Syowa Station by the tilting filter method. The characteristic of observed 5200 Å emission seems to show the dominance of particle impact excitations rather than dissociative recombination excitation.

要旨: 昭和基地から打ち上げられた S-210JA-27 号機によって、高度 72–120 km の NO 分子密度分布が、 $\gamma(1, 0)$ バンドの共鳴蛍光放射率の測定から求められた。得られた NO 分子密度分布は静穏時であったにもかかわらず、これまで中低緯度で測定されたものに比べ、高度 100 km 以上で 5 倍程度、100 km 以下ではひと桁以上大きい。この大きな NO 分子密度は、前夜あるいはそれ以前にあったじょう乱の影響によるものであると思われる。

また昭和基地において、準安定窒素原子 $N(^2D)$ の放出する波長 5200 Å 輝線の放射率が、ティルティングフィルタ方式を用いた地上観測によって測定された。観測された 5200 Å 放射の特性は、中緯度夜間の主励起機構である解離再結合よりも降下粒子による直接励起が卓越していることを示している。

* 東京大学理学部地球物理研究施設. Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, 3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

** Institute for Atmospheric Environmental Research, D-8100 Garmisch-Partenkirchen Kreuzteckbahn-Strasse 19, West Germany.

1. 序 説

極域超高層大気中の NO, N(²D) などの窒素族微量成分の分布および存在量が, 降下粒子によって大きな影響をうけるであろうことは KONDO and OGAWA (1976) などの数値モデル計算によって予言され, NO については現在までに, RUSCH and BARTH (1975), GERARD and BARTH (1977), CRAVENS and STEWART (1978) による衛星を用いた NO の全量観測によってその一部が確認されつつある. しかし極域における NO 分子密度の高度分布の観測は, これまでほとんど報告されていない. また N(²D) の放出する 5200 Å 放射についても GERARD (1974) による磁気嵐に伴うオーロラのもとでの観測, FREDERICK and HAYS (1978) による衛星を用いた観測などが報告されているが, 今だに極域だけでなく中緯度においてさえもその特性には不明な点が少なくない.

2. 昭和基地における NO 分子密度分布のロケット観測

2.1. 装置および実験

今回, NO 分子密度分布の測定に用いられた装置は, 我々がこれまで内之浦などで行ってきた実験で用いてきたものと同型の放射計であり, NO 分子によって共鳴的に散乱された太陽紫外光のうちから波長 2150 Å 付近にある $\gamma(1,0)$ バンドの放射のみを選び出し, その放射率の高度変化から NO 分子密度分布を求めようとするものである. 特にこの放射計では, 圧力 200 torr の NO ガス入りおよび空の 2 つの石英セルを交互に放射計光路上に置くことによって, $\gamma(1,0)$ バンド放射成分とレーリー散乱光などの背景光成分を分離している. 装置の詳細は, TOHMATSU and IWAGAMI (1975, 1976) に述べられている.

実験は1977年8月10日 1247 UT, 昭和基地 (69°S, 39.6°E) から打ち上げられた S-210JA-27号機によって行われた. 実験時の太陽天頂角は平均 91.8°, また昭和基地における地上観測によれば, 地磁気および 30 MHz リオメーターはほぼ静穏な状態を示していたが, アイオノグラムには異常吸収のため正常なエコーがみられなかった. ロケットの姿勢は非常によく, 上昇時の高度 72–120 km, 下降時の 120–83 km にわたって良質のデータを得ることができた.

2.2. 解析

図1に, NO ガス入りセルが光路上にある時得られた出力信号 (NC) と, 空セルが光路上にある時得られた出力信号 (BC) を天頂方向の放射率に換算したもの, および最小自乗法に

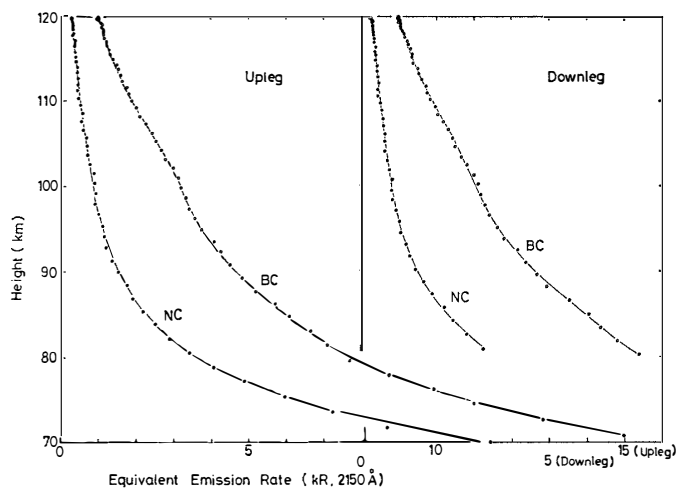


図 1 NO ガス入りセルが光路上にある時 (NC), および空セルが光路上にある時 (BC) の天頂方向に補正された放射計出力信号.

Fig. 1. Output signal of the radiometer with NO filled cell (NC) and with blank cell (BC) corrected in the zenith direction.

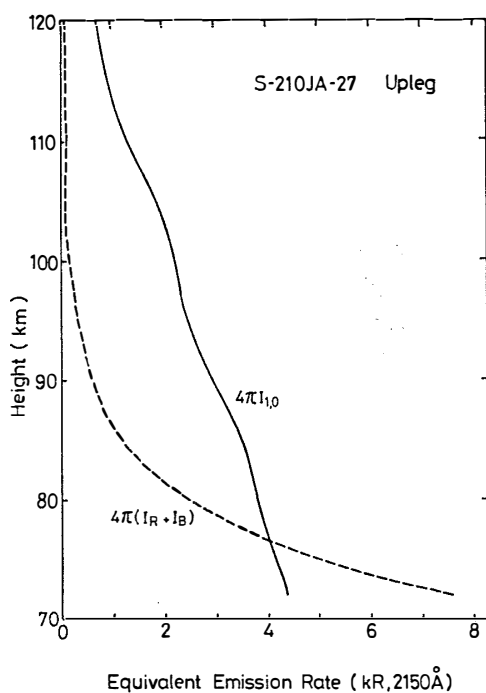


図 2 観測された $\gamma(1, 0)$ バンド放射率 ($4\pi I_{1,0}$) およびレーリー散乱光放射率 ($4\pi I_R$) と他の背景光放射率 ($4\pi I_B$) の和.

Fig. 2. Observed $\gamma(1, 0)$ band emission rate ($4\pi I_{1,0}$) and the sum of the emission rate of Rayleigh scattering of sunlight ($4\pi I_R$) and that of background ($4\pi I_B$).

よって求めたそれらの平滑化曲線を示す。粗い近似では BC と NC の差が $\gamma(1,0)$ バンド放射率を、また NC はレーリー散乱光その他の放射率の和を示すと考えられるが、実際の解析にあたってはいくつかの補正がなされている。

図2に図1に示した平滑化曲線から算出した $\gamma(1,0)$ バンドの放射率 ($4\pi I_{10}$)、およびレーリー散乱光の放射率 ($4\pi I_R$) と他の背景光の放射率 ($4\pi I_B$) の和を上昇時のもののみ示す。ここで得られたレーリー散乱光の放射率を、モデル大気 (CIRA 1972: February 1, 70°N) から計算した放射率と比較することによって各放射率の絶対値が与えられている。解析についての詳細は、ふたたび TOHMATSU and IWAGAMI (1976) を参照されたい。

2.3. 結果

図2に示した $\gamma(1,0)$ バンドの放射率から、その比蛍光率として $7.88 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ を用い、自己吸収および NO 以外の大気分子による太陽紫外光の減衰を考慮して算出した NO 分子密度分布を図3に示す。上昇時の結果上に示したエラーバーは、30%の絶対値誤差と図1に示したデータ点のばらつきから生じる誤差の和を表している。高度 75, 90, 105 km 付近に 10^8 cm^{-3} 程度の極大を持つ奇妙な NO 分子密度分布が得られた。

図4に我々がこれまで同型の放射計を用いて、内之浦 (31°N)、インドのツンバ (9°N) および S-210JA-22 号機によって昭和基地において測定した NO 分子密度分布と今回の結果との比較を示す。S-210JA-22 号機の実験は、1976年1月26日の日の出時に、やはり地磁氣的に静穏な状況のもとに行われたものであるが、ロケットの姿勢の変化により太陽直接光が混入し

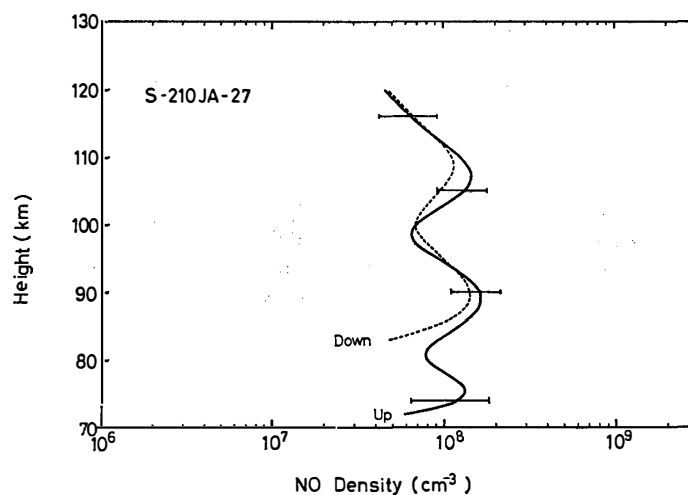


図3 上昇時および下降時に観測された NO 分子密度分布
Fig. 3. Observed NO density profiles on upleg and downleg.

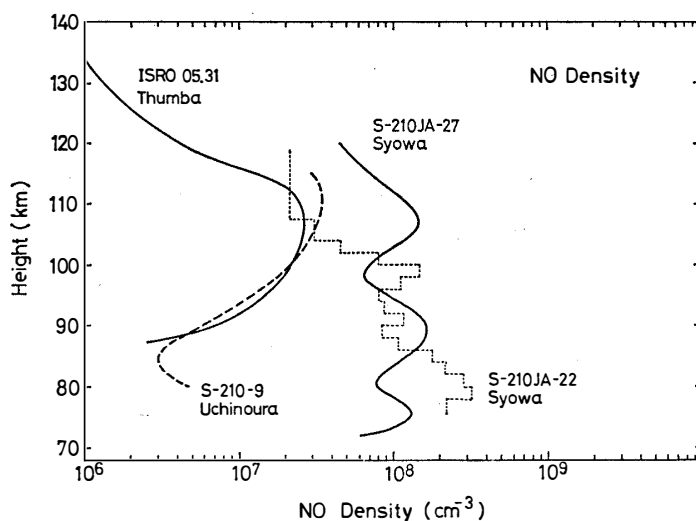


図 4 昭和基地で得られた NO 分子密度分布と中低緯度で得られた密度分布の比較
 Fig. 4. Comparison of the NO density profiles observed at Syowa Station with those at middle and low latitudes.

たためデータの質はよくない。しかし小規模の構造は別として、10 km 程度のスケールでは正しく NO 分子密度分布を表していると考えられる。今回の実験で得られた NO 分子密度分布は内之浦、ツンバなど中低緯度で得られたものに比べ、高度 100 km 以上では 5 倍程度、100 km 以下ではひと桁あるいはそれ以上も大きな値を示している。この差異は、KONDO and OGAWA (1976), GERARD and BARTH (1977) の数値モデル計算によって示されたように降下粒子による影響と考えられる。たとえば、KONDO and OGAWA (1976) の結果によれば、5 keV の特性エネルギーを持った IBC II クラスのオーロラ現象に相当する降下粒子束の 30 分間の継続によって高度 105 km 付近に $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ の NO 分子密度の極大が形成される。また 40 keV の特性エネルギーを持った粒子束は、高度 85 km 付近に極大を形成することができる。しかし実験時の地上観測によれば、地磁気、リオメーター、VLF 自然電波放射のいずれもが静穏な状態を示しており、実験時にそのような大きな粒子流入があったとは考えにくい。むしろ、今回の測定高度領域における NO 分子の化学的な寿命が、1 日あるいはそれ以上と長いことを考えれば、観測された大きな NO 分子密度は KONDO and OGAWA (1976) にも示されているように、前夜あるいはそれ以前のじょう乱時に形成されたものの生き残りと考えたほうが正しいと思われる。事実この実験の前夜には中規模の地磁気じょう乱が、約 3 時間前には -2 dB に達する吸収がリオメーターに記録されており、これらのじょう乱がそれぞれ数 keV、および数十 keV の降下粒子によって生じたとすると、高度 110 km および 90

km 付近にみられる NO 分子密度のピークを説明することができる。またこの高度域においては、拡散および混合の時定数も数日程度の大きさを持つため、今回の結果にみられる程度の NO 分子の密度勾配も数日間は痕跡をとどめることが期待できる。S-210JA-22 号機によって観測された高度 100 km 以下の大きな NO 分子密度も同様に解釈できると思われる。

3. 昭和基地における 5200 Å 輝線放射率の地上観測

3.1. 装置

観測に用いられた測光器は、N(²D) の放出する 5200 Å 輝線成分と背景光成分を分離するため、ティルティングフィルタ方式を採用している。使用した非金属干渉フィルタは透過中心波長 5212 Å、透過半値幅 4.6 Å のもので、0° から 15° のティルティングにより測光器は約 45 秒間で波長 5212 Å から 5130 Å の間を波長掃引する。また雑音低減のため光電受光部は -30°C に冷却して使用された。観測方向は天頂に固定、視野は全角 2.5° の円形である。測光器の絶対感度は EOA101 標準光源を用いて校正した。

3.2. 観測結果

観測は、1977年2月から11月の晴天の夜間および薄明時、145夜にわたって行われた。図 5a, b にその典型的な例として5月16/17日および7月12/13日の観測結果を示す。図中には N₂⁺ 1st. negative (0, 1) バンド、4278 Å の天頂方向の放射率の観測値も示されている。図 5a の5月16/17日には、2030 LST 頃から無定形オーロラが全天に出現し、0000 LST 頃天頂にバンドが現れ、その後ふたたび無定形となり、0500 LST 頃からはパルセーティングオーロラが記録されている。図 5b の7月12/13日には日没後からまったくオーロラの認められない状態が続き、0230 LST 頃はじめてバンドが現れ、0400 LST 頃から無定形オーロラとなり、0730 LST 頃からパルセーティングオーロラが出現している。5月16/17日および7月12/13日の月令はそれぞれ29および27、天候は快晴だった。

3.3. 昭和基地で観測された 5200 Å 放射の特性

月が新月に比較的近く、天候も良かった13夜の観測結果を検討した結果、次のような5200 Å 放射の特性が見出された。(1) おおむね 5200 Å 放射率は 4278 Å 放射率と同様の動向を示す。(2) 図 5 b の 0230 LST 以前の例のように、まったくじょう乱が認められない場合でも 5200 Å の放射率は 2 レーリー程度以下にはならない。(3) 図 5a の 2030-0000 LST にみられるように無定形オーロラの中では、5200 Å 放射率の 4278 Å 放射率に対する比が大きい。

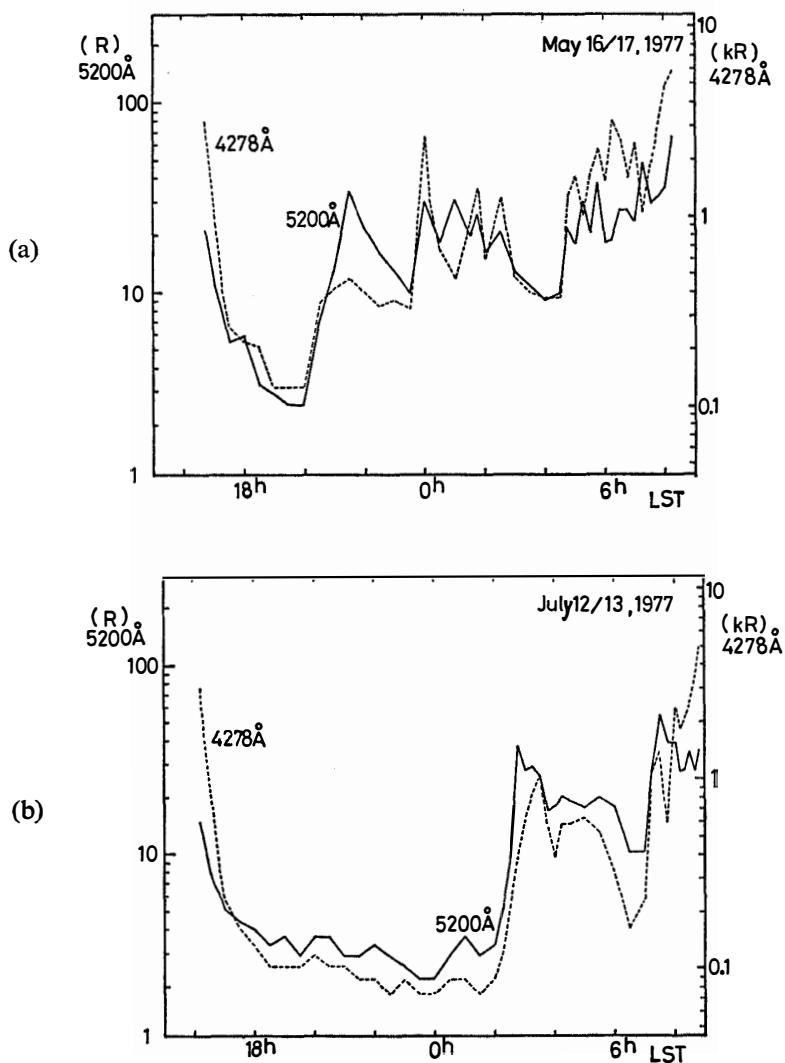


図 5 昭和基地で観測された 5200 Å と 4278 Å の放射率, LST=UT+3 時間

Fig. 5. The 5200 Å and 4278 Å emission rates observed at Syowa Station, LST=UT+3 hours.

4278 Å 放射率は, 降下粒子によるエネルギー流入をほぼそのまま反映していると考えられることができるので (ただし 4278 Å は, 固定フィルタによって測光しているため, 星野光および大気光連続成分の混入が 40-70 レーリーある), 特性 (1) は, 昭和基地で観測された 5200 Å 放射が, 中緯度夜間の主な励起反応である解離再結合



よりむしろ



などの反応で降下粒子によって直接励起されていることを示している (e^* は高エネルギー電

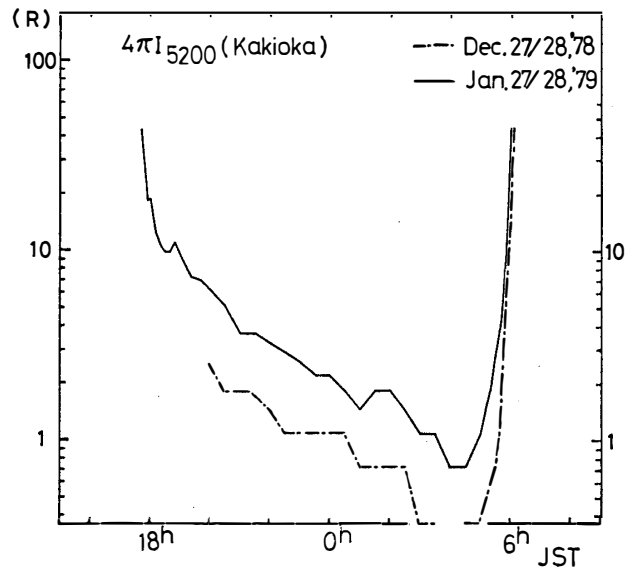


図 6 柿岡で観測された 5200 Å 放射率

Fig. 6. The 5200 Å emission rate observed at Kakioka (36°N), JST=UT+9 hours.

子を示す)。また、特性 (2) が何によるものかを確認するために、同じ測光器を用いて茨城県柿岡 (36°N) において比較観測を行った。その結果を図 6 に示す。柿岡における夜間の 5200 Å 放射率は約 4 時間の時定数で減少してゆき、1 レーリー以下にまで達する。またこのころみに国分寺で得られた f_0F_2 , $h'F$ を用いて、6300 Å 放射の研究にしばしば用いられてきたバルビエの実験式を柿岡での結果に適用すると、放射率の時間変化をほぼ再現することができるが、昭和基地における静穏時の結果に対しては、観測値よりひと桁あまり小さな値を与える。このことは柿岡で得られた 5200 Å 放射が、ほぼ式 (1) の反応によって励起されているのに対し、昭和基地でのそれは静穏時の夜間においても式 (2) などの反応で降下粒子によって直接励起されていることを示している。

特性 (3) については、無定形オーロラに対応する降下粒子束の特性エネルギーが、ディスクリートなオーロラに対応するそれに比べて低いためと考えることができる。つまり降下粒子束の特性エネルギーが大きく、したがって生成層高度が低い場合には、放射寿命の長い $N(^2D)$ は O , O_2 などによって消光されるため、降下粒子束の特性エネルギーが小さい場合に比べて発光効率が低下するためと考えられる。

4. NO 分子密度と 5200 Å 放射率の関係

超高層大気中における NO 分子の生成は、高度 130 km 以上では



高度 130 km 以下では



によって行われており，降下粒子がある場合には



によって生成された $\text{N}(^2\text{D})$ が，反応式 (4) を通して極域超高層大気中の NO 密度の増大に寄与することが，KONDO and OGAWA (1976), ROBLE and REES (1977) などのモデル計算によって主張されている。5200 Å 輝線は，



によって放出されるが，上記のモデルによるとそれ以外の $\text{N}(^2\text{D})$ がすべて NO に変換されるのではなく，高度 130 km 程度以上では，



によって消光されてしまう。しかも高度 200 km においてさえ式 (6) の反応は式 (5) に比べ 10^3 倍程度も速い。式 (6) および式 (2) で生成された N は，式 (3) によって NO を生成するが，



によって NO をこわしもするため， N の生成は NO 密度の増大を結果しない。つまり， NO 密度が増すためには，高度 130 km 以下に $\text{N}(^2\text{D})$ が生成される必要があるが，このような低高度では式 (4)，(5) の反応が速いため 5200 Å 輝線放出の効率は非常に悪くなる。逆の場合，5200 Å 輝線放出の効率はよくなるが， NO 密度はほとんど増えない。したがって 3 節に示した 5200 Å 放射率のふるまいは反応式 (2) によって $\text{N}(^2\text{D})$ が生成され，反応式 (4) によって NO に変換されていることを示してはいるが，5200 Å 放射率の観測値から， NO 分子の生成を定量的に論ずることはあまり意味がないといえる。

最後に上記の観測にあたって多大な協力をいただいた第18次南極地域観測隊の隊員諸氏に深く感謝の意を表します。

文 献

- CRAVENS, T. E. and STEWART, A. I. (1978): Global morphology of nitric oxide in the lower *E* region. *J. Geophys. Res.*, **83**, 2446–2452.
- FREDERICK, J. E. and HAYS, P. B. (1978): Magnetic ordering of the polar airglow. *Planet. Space Sci.*, **26**, 339–345.

- GERARD, J. C. (1974): Ground-based photometric observations of the type A aurora of 17–18 December 1971. *Ann. Geophys.*, **30**, 387–396.
- GERARD, J. C. and BARTH, C. A. (1977): High-latitude nitric oxide in the lower thermosphere. *J. Geophys. Res.*, **82**, 674–680.
- KONDO, Y. and OGAWA, T. (1976): Odd nitrogen in the lower thermosphere under auroral perturbations. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **28**, 253–282.
- ROBLE, R. G. and REES, M. H. (1977): Time-dependent studies of the aurora: Effects of particle precipitation on the dynamic morphology of ionospheric and atmospheric properties. *Planet. Space Sci.*, **25**, 991–1010.
- RUSCH, D. W. and BARTH, C. A. (1975): Satellite measurements of nitric oxide in the polar region. *J. Geophys. Res.*, **80**, 3719–3721.
- TOHMATSU, T. and IWAGAMI, N. (1975): Measurement of nitric oxide distribution in the upper atmosphere. *Space Res.*, **15**, 241–245.
- TOHMATSU, T. and IWAGAMI, N. (1976): Measurement of nitric oxide abundance in equatorial upper atmosphere. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **28**, 343–358.

(1979年4月19日受理)