

A-1 オゾン層変動の総合的観測及び解析に関する研究

(1) 地上からの総合的観測手法の開発とその評価に関する研究

③赤外ヘテロダイン分光法による微量分子測定手法の開発に関する研究

研究代表者

東北大学

福西 浩

環境庁 国立環境研究所

(委託先)

東北大学

福西 浩・岡野 章一・田口 真

平成5-7年度合計予算額 13,711千円

(7年度当初予算額 4,364千円)

[要旨]

成層圏及び対流圏における大気微量成分の高度分布を地上から測定することを目的として、赤外レーザーヘテロダイン分光計を製作した。赤外レーザーヘテロダイン分光計は、高分解能、高感度、小型軽量等の利点があるが、特に本研究で開発された分光計は、広い分光波数範囲、光軸調整の容易性、ガス吸収セルによるキャリブレーションシステムという特徴を持つ。平成5年度はレーザーヘテロダイン分光計の光学系及び電気系の製作を行った。この分光計は局発として液体窒素冷却型の半導体レーザーを4個搭載し、それぞれ $900\text{cm}^{-1}$ 、 $1100\text{cm}^{-1}$ 、 $1190\text{cm}^{-1}$ 、 $1220\text{cm}^{-1}$ 付近の波数域で発振する。観測の対象となる分子は硝酸、オゾン、一酸化二窒素、メタンである。現在までの試験観測の結果、良好な大気吸収スペクトルが得られている。平成6年度には製作した赤外半導体レーザーヘテロダイン分光計(TDLHS-3)は南極昭和基地においてオゾン、硝酸、メタン、一酸化二窒素の観測に使用され、1994年の南極オゾンホール発達消滅過程における多くのデータが得られた。国内でもTDLHS-2による硝酸の観測を実施する計画であったが、硝酸の吸収帯がある $900\text{cm}^{-1}$ 付近を発振する半導体レーザーが発振なくなり、メーカーでも製造不可能とのことで硝酸観測は断念した。代わりに波数 $1180\text{cm}^{-1}$ 付近で一酸化二窒素の観測を実施した。観測は仙台の東北大学理学部キャンパスにおいて1994年5月から12月までに19回行った。得られた一酸化二窒素吸収線スペクトルからインバージョン法を用いて高度分布を導出するとともにインバージョン法の誤差を数値シミュレーションによって評価した。平成7年度は南極昭和基地から持ち帰ったTDLHS-3を東北大学理学部青葉山キャンパス内に設置し、一酸化二窒素の観測を行った。また南極昭和基地で得られたオゾンホール発達・消滅期のオゾン、一酸化二窒素、硝酸のデータ解析を進めた。その結果オゾンホールが発達している時期に高度20km以上の領域で1時間以下の時間スケールのオゾン密度変動が見つかった。このような速いオゾン密度変動が観測された日は極渦境界が昭和基地の上空に存在していたことが解った。したがって、観測された速いオゾン密度変動は極渦内外の大気交換過程を反映しているものと考えられる。

[キーワード]

大気微量成分、赤外分光、レーザーヘテロダイン分光計、リモートセンシング、オゾンホール

## 1. 序

大気の窓領域の一つである波長  $10 \mu\text{m}$  付近の中赤外領域には大気中の様々な微量気体成分の振動回転遷移にともなう吸収帯がある。それらを構成する個々の吸収線の輪郭はその原因となる微量気体成分の高度分布に依存する。したがって赤外領域の吸収線スペクトルを非常に高分解能で分光観測することによって、大気中の微量気体成分の高度分布の情報を引き出すことが可能となる。赤外レーザーヘテロダイン分光計のように  $10^6$  以上の波数分解能を有する高分解能分光計は、強い吸収線に重なった微量な気体の弱い吸収線の検出に非常に有利である。それに対して成層圏の大気微量成分の直接観測は大型気球や特殊な航空機が必要で頻繁にはできないという問題がある。その点で地上からの分光観測はランニング・コストはほとんどかからないので、天候の許す限り連続したデータを取得できるという利点もある。

東北大学大学院理学研究科では大気微量成分の地上からのリモートセンシングを目的として赤外レーザーヘテロダイン分光計を開発してきた [Taguchi et al., 1994a]。レーザーヘテロダイン分光計は波長  $10 \mu\text{m}$  付近の中赤外領域で動作するものとしては最も高感度かつ高分解能を実現可能な分光計である。これまでに2台のレーザーヘテロダイン分光計 (TDLHS-1 および TDLHS-2) を製作し成層圏オゾンの高度分布を始め、一酸化二窒素やメタンの高度分布の観測に成功している [Koide et al., 1995a]。本研究では  $900\text{cm}^{-1}$  から  $1220\text{cm}^{-1}$  までの異なる4つの波数領域で動作しオゾン、硝酸、一酸化二窒素、メタン、水蒸気などの大気微量成分を包括的に観測可能な赤外半導体レーザーヘテロダイン分光計 (TDLHS-3) を開発する。この分光計は TDLHS-1 および TDLHS-2 の開発時の経験をふまえて、光軸調整の容易性に配慮しガス吸収セルによるキャリブレーションシステムを備えるという特徴を持つ。また同時に TDLHS-2 には波数  $900\text{cm}^{-1}$  付近で発振する半導体レーザーを搭載し硝酸を観測する。

観測された吸収線スペクトルから吸収分子の高度分布を導出する手法は一般にインバージョン (反転) 法と呼ばれる。インバージョン法は手法としてはこれまでの研究で確立されているが、観測対象分子によって吸収線パラメータおよびそれらの温度依存性、おおまかな高度分布の形状、光学的厚さ等が異なるので、それぞれの要因による導出誤差が異なる。したがって観測する分子の個々の吸収線について、高度分布の導出誤差評価を行う必要がある。本研究ではこれまでに詳細な評価を行っていなかった一酸化二窒素について導出誤差評価を行う。

## 2. 装置

平成5年度には、南極オゾンホールの集中観測を目的として、可搬型のレーザーヘテロダイン分光計 (TDLHS-3) を新たに開発した [Taguchi et al., 1994b]。この分光計の本格的な開発は1993年5月頃から行われ、同年9月に最初の試験スペクトルを取得した。TDLHS-3 は基本的にはこれまでに開発したものと同様な光学性能を有するが、以下にあげるような特徴を持つ。

- ① 異なる波数領域で発振する半導体レーザーを4個搭載することにより、分光可能波長範囲が  $900\text{cm}^{-1}$  から  $1220\text{cm}^{-1}$  までと拡大された。

- ② 赤外検出器および局発レーザーが搭載される液体窒素デュワーを別体とし、光軸調整による戻り光対策を容易にした。
  - ③ 硝酸など非常に弱い吸収線を同定するためのガス吸収セルを備える。
- TDLHS-3 のブロック図を図 1 に、また装置の性能諸元を表 1 に示す。

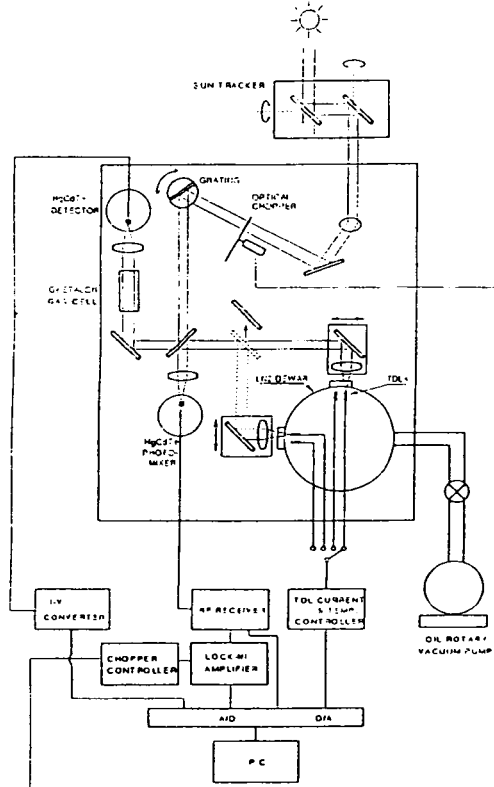


図 1. 開発したレーザーヘテロダイン分光計 (TDLHS-3) のブロック図。

表 1. レーザーヘテロダイン分光計の仕様諸元

Size	W1400mm × D600mm × H500mm
Weight	120kg
Spectral Region	900cm <sup>-1</sup> , 1100cm <sup>-1</sup> , 1190cm <sup>-1</sup> , 1220cm <sup>-1</sup>
Bandwidth	40MHz (0.0013cm <sup>-1</sup> )
Resolving Power	6.9–9.4 × 10 <sup>5</sup>
Temperature Range	65–90K
Temperature Stability	<0.01K
Liquid N <sub>2</sub> Holding Time	>2days
Scan Time	9min/spectrum

局発半導体レーザーは液体窒素温度で動作可能な物を使用している。液体窒素の沸点温度は液体窒素容器内の圧力をポンプで減圧することによって、65K 以下にまで下げられている。そして、レーザーの温度は液体窒素デュワー内に取り付けられた温度センサーとヒーターによるサーボ回路によって 65–90K の範囲で 0.01K 以内の安定度で制御される。このように温度制御するこ

とで、一つの半導体レーザーで  $50\text{cm}^{-1}$  近い波数範囲を利用可能となり、また、外気温変化等に対する発振安定性が高められた。半導体レーザーを搭載した液体窒素デュワーは2個の Ge 真空窓を備え、それぞれにの内側に2個ずつレーザーが内蔵されている。

4個のレーザーのうち局発として使用するものは反射鏡の脱着とコリメーターレンズの水平移動によって選択される。4個のレーザーの発振波数領域は  $900\text{cm}^{-1}$ 、 $1100\text{cm}^{-1}$ 、 $1190\text{cm}^{-1}$ 、 $1220\text{cm}^{-1}$  であり、それぞれ硝酸、オゾン、一酸化二窒素、メタンの吸収帯に対応する。装置帯域幅は  $0.0013\text{cm}^{-1}$  であるので、波数分解能は約  $10^6$  である。

太陽赤外光は太陽光追尾装置によって自動追尾される。分光計に導入された太陽赤外光は光チョッパーによって矩形の変調を受けた後、回折格子によって必要な波数域のみ選択される。太陽赤外光を有効に利用しフォトミキサー系統からの戻り光を減少させるためにビームスプリッターは透過率80%反射率20%のものを使用している。これは半導体レーザーの出力が向上したことによって可能となった。レーザー光のうちビームスプリッターを透過した部分は、Geエタロンまたはガス吸収セルを透過したのち別の検出器で検出され、周波数同定および校正に利用される。

電気系では高周波増幅器に低雑音タイプのを新たに使用した。ヘテロダイン信号、レーザーパワーモニター用光電流出力信号、波数校正システム出力信号はA/D変換された後パソコンに取り込まれる。パソコンは同時にレーザー電流の制御も行う。

レーザーヘテロダイン分光は太陽光とレーザー光の波面結合の効率をいかにして上げるかがポイントとなる。その点でTDLHS-3は今までの経験を元に光軸調整の容易性を念頭に置いて光学部品の配置を設計したため、ヘテロダイン信号が比較的容易に確認された。また、これまでレーザー素子から射出されたレーザー光が検出器面で反射しレーザー素子まで戻ってくる、いわゆる戻り光によるレーザー発振の不安定化に悩まされていたが、反射率の低いビームスプリッターを使用したことが、戻り光の減少に役立っていると考えられる。

以上のように、観測はおおむね順調に行われたが、問題も皆無ではなかった。レーザーヘテロダイン分光計は原理的に電気ノイズの影響を受けやすいため、TDLHS-3の開発に際してはこの点に配慮した。しかし、国内での試験観測時には問題なかったものの、観測機器の密集/乾燥/接地不完全という悪条件が揃った昭和基地での使用には不十分であった。今回は、各機器の配置や各種配線の取り回しを試行錯誤を繰り返して決定し、一応十分なレベルまで改善できたが、それでも湿度が低いときにはノイズが目立ち、静電気が原因と思われるレーザー保護回路の誤動作も多かった。対策としては、機器のシールドをさらに強化することが第一に挙げられる。ノイズ源となる電源のシールド、ノイズを受けやすいRFレシーバーのシールド等は特に考慮の必要がある。

レーザーの置かれた温度とレーザーに流す電流を共に一定に保っているにもかかわらず、発振波数が異なることがあった。この現象は10月以降に問題となったもので、観測開始後1~2時間で顕著になった。この現象のためオゾン用のレーザーが使用不能となり、一酸化二窒素用のレーザーも11月以降長時間の観測には使用できなくなった。原因としては、レーザーの劣化に伴いその発熱量が大きくなり、温度が維持できなくなったことが考えられる。この解決としては、デュワー内部の熱設計（温度センサーの位置、ヒートブロックの熱伝導度）を変更することも考えられるが、もともと半導体レーザーの寿命が短いことが大きな問題である。

### 3. 観測

#### (1) 国内観測

国内では仙台において TDLHS-2 を用いて一酸化二窒素の観測を実施した。当初の計画では硝酸の観測を試みる予定であったが、硝酸の吸収帯がある波数  $900\text{cm}^{-1}$  付近で発振する半導体レーザーが予備も含めて 2 個とも発振しなくなり、半導体レーザーのメーカーでも  $1000\text{cm}^{-1}$  以下の波数領域では性能の保証できるレーザーを供給できないという状況であったので硝酸の観測は断念した。代わりに波数  $1180\text{cm}^{-1}$  付近で発振するレーザーを用いて一酸化二窒素の観測を実施した。一酸化二窒素は地表に発生源がある 1 次分子（親分子）であり、オゾン層破壊に関連する成層圏窒素酸化物の主なソースとなるとともに地球温暖化の原因となる温室効果気体でもある。

表 2. 各観測日に取得された一酸化二窒素吸収線スペクトル数 (N)

Date	May. 18	May. 28	Máy. 31	Jun. 2	Aug. 17	Aug. 29	Sep. 3	Sep. 5	Sep. 26	Oct. 24
N	3	23	3	11	4	10	19	8	18	11
Date	Oct. 27	Nov. 2	Nov. 16	Nov. 22	Nov. 24	Nov. 29	Nov. 30	Dec. 3	Dec. 6	
N	14	4	10	6	24	6	25	2	10	

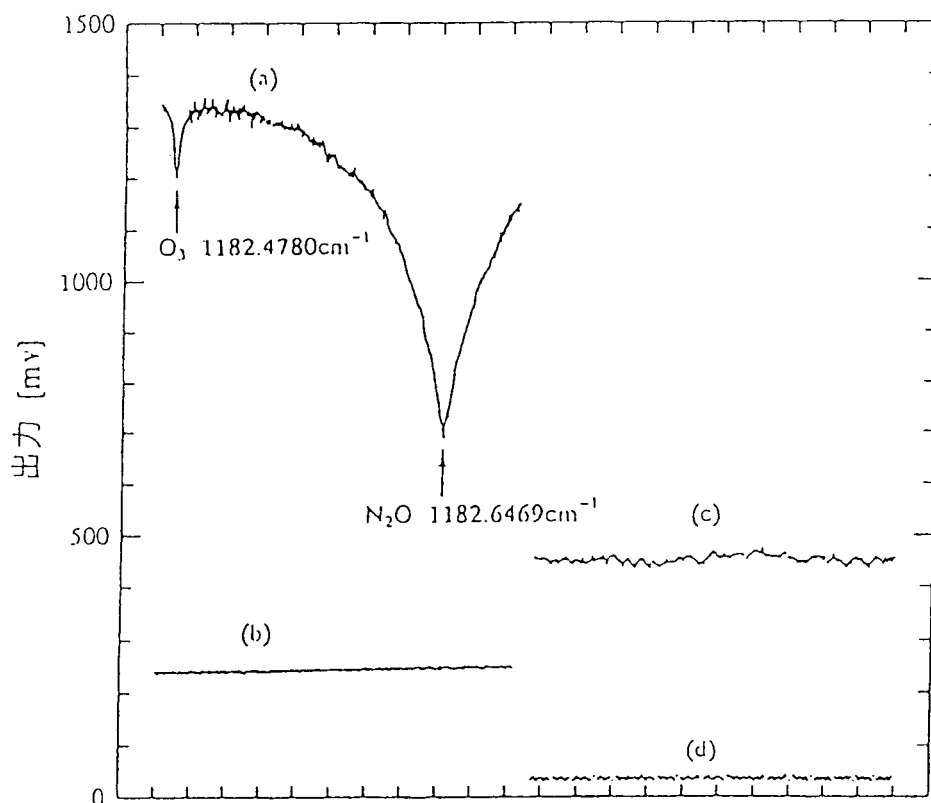


図 2. 1994 年 5 月 18 日に仙台においてレーザーヘテロダイン分光計を用いて観測された一酸化二窒素とオゾンの吸収線の例。(a)ヘテロダイン信号+信号光ショットノイズ、(b)信号光ショットノイズ(局発レーザー OFF)、(c)光電流直流成分(局発レーザー光+信号光)、(d)光電流直流成分(信号光のみ)。

観測は仙台の東北大学理学部青葉山キャンパスにおいて1994年5月から12月までの晴天日に行った。各観測日に取得されたスペクトル数は表2に示す通りである。観測した一酸化二窒素吸収線の中心波数は $1182.6469\text{cm}^{-1}$ である。相対波数の決定のために $1182.4780\text{cm}^{-1}$ に中心波数をもつオゾンの吸収線も同じ掃引に含まれるようにスペクトルを取得した。1回の局発レーザー周波数掃引で得られるスペクトルのS/Nは60から700の範囲にあったがS/Nが100以下のスペクトルは解析時に除外した。

図2に1994年5月18日に実際に観測した生スペクトルの例を示す。図2(a)にはヘテロダイン信号成分のほかに(c)で示される信号光ショットノイズ成分が含まれる。(b)は局発レーザーパワーの補正用の光電流直流成分であるが、これにも(d)で示される信号光による直流成分が含まれる。従って $[(a)-(c)]/[(b)-(d)]$ が実際の大气吸収線スペクトルである。

## (2) 国外観測

TDLHS-3は第35次南極地域観測隊によって1994年1月に南極昭和基地に持ち込まれた。図3に昭和基地の観測棟内に設置されたTDLHS-3の写真を示す。同年3月の天候不順などのため、極夜前は試験スペクトルの取得にとどまったが、極夜明け後の8月末からはほぼ順調にデータを取得した。観測の方針として、極夜明け後早い時期はオゾンの観測を最優先とし、一酸化二窒素の観測も適宜行った。また、快晴が長い期間持続した場合には硝酸の観測も行った。11月にオゾン用のレーザーが不調となった後はメタンの観測を重点的にを行い、一酸化二窒素と硝酸の観測も継続した。TDLHS-3はそれぞれ波数 $900\text{cm}^{-1}$ ,  $1100\text{cm}^{-1}$ ,  $1190\text{cm}^{-1}$ ,  $1220\text{cm}^{-1}$ で発振する4個の局発レーザーを搭載し、それぞれ硝酸、オゾン、一酸化二窒素、メタンの観測に用いられる。

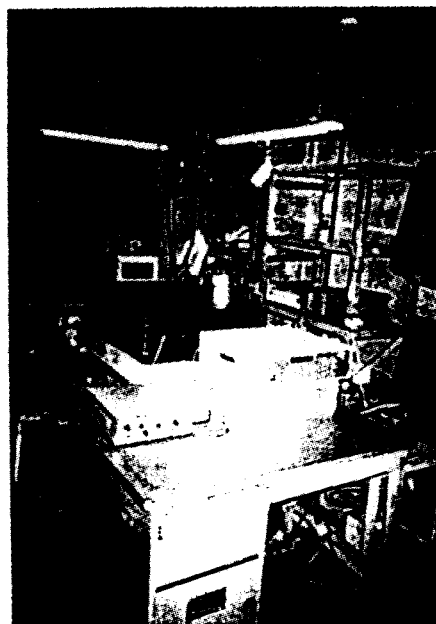


図3. 南極昭和基地に設置されたTDLHS-3の写真。奥の黒い箱がTDLHS-3光学系、手前の机の上にあるのがRFアンプ、ロックインアンプ、レーザーコントローラー等の電気系である。太陽光追尾装置は観測棟の屋上にあり、太陽光は天井から吊り下がっている黒い筒状のエアシャッターから下方の光学系に導かれる。

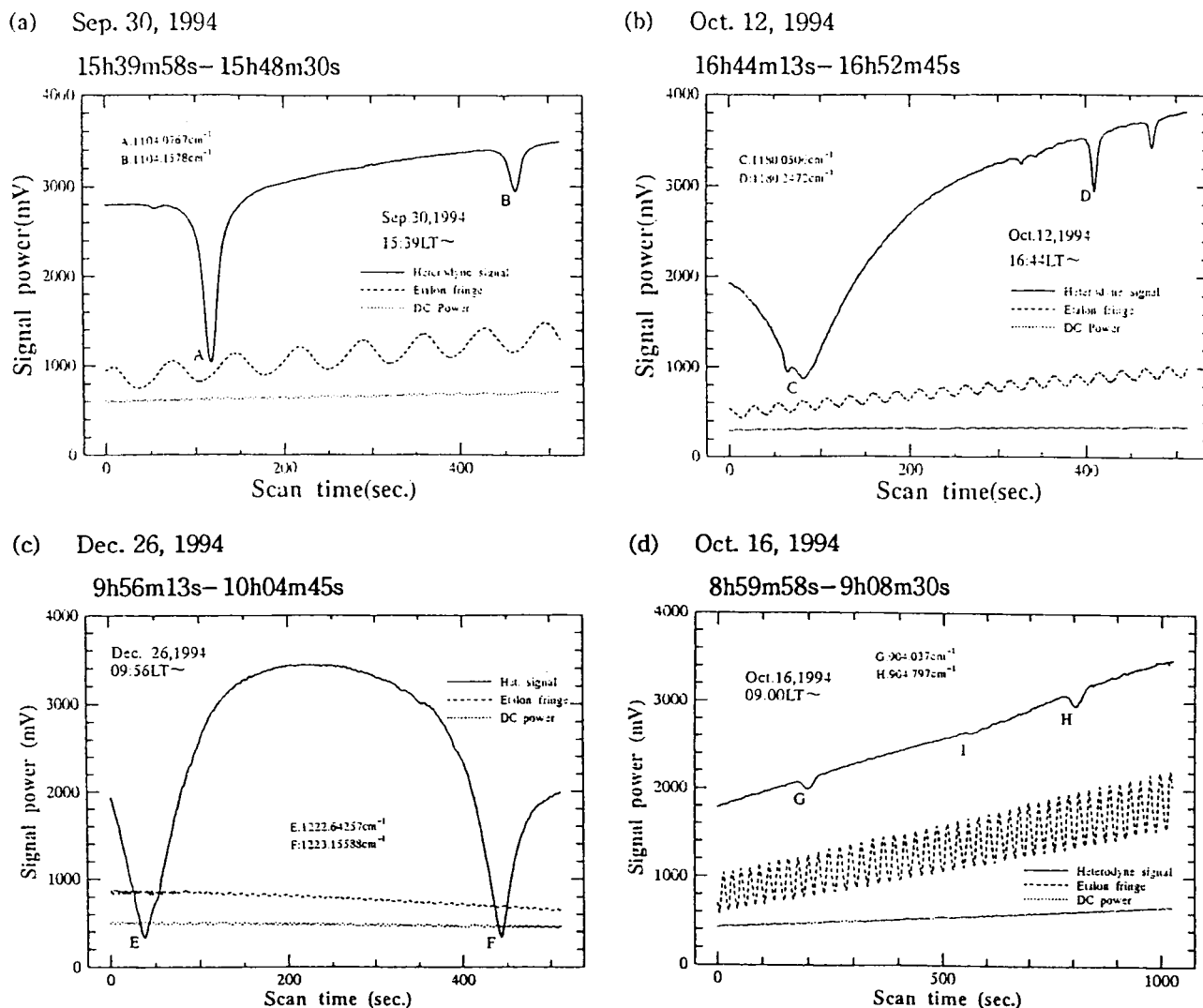


図4. 南極昭和基地において観測された (a) オゾン、(b) 一酸化二窒素、(c) メタン、(d) 硝酸の吸収線スペクトルの例。時刻は地方標準時 (LT=UT+3h)。

以下に各気体ごとの観測状況を詳しく述べる。

・オゾン

オゾンの観測は最優先と考えて作業を進め、1994年2月13日にはヘテロダイン信号を確認した。その後ノイズ対策を施し、3月8日に試験スペクトルを得た。ここで得られたスペクトルは  $1100.0 \sim 1100.5 \text{ cm}^{-1}$  付近のもので、弱い水の吸収が重なっている領域であった。このためさらに別のモードを探し、4月4日に日本で観測していた  $1104 \text{ cm}^{-1}$  付近のスペクトルを確認した。8月30日から本観測に入り、11月16日まで述べ12日間観測した。図4 (a)に観測されたオゾンの分光データの例を示す。観測を11月16日で打ち切ったのは、後で述べるレーザーの劣化のためである。なお、オゾン用には予備のレーザーも搭載しており、3月14日には予備のレーザーを用いて試験スペクトルも取得したが、11月には発振しなくなっていた。

・一酸化二窒素

一酸化二窒素の観測は、冬開け後の9月9日から開始した。9日に吸収線を確認し、18日に

は日本で観測を予定してきた  $1160.6\text{cm}^{-1}$  付近の吸収線を解析可能なレベルで観測した。図 4 (b) に得られたスペクトルの例を示す。実際に観測してみると一酸化二窒素の吸収線の中心付近に他の弱い吸収線が重なっていることがわかった。このためこの領域は解析に不相当と判断して別なモードを調べ、27日に  $1180\text{cm}^{-1}$  付近のスペクトルを得た。こちらの方がより解析に適していると考え、この日以降1月4日まで、のべ9日間観測した。

#### ・メタン

1994年2月13日にメタン用レーザー発振を確認した。3月12日には試験スペクトルを取得し、22日の試験観測で波数を特定した。その後しばらくは、他の気体の観測を優先させたため観測を休止した。11月16日から本観測を開始し、12月26日まで継続した。図 4 (c) に観測されたメタンによる吸収スペクトルの例を示す。

#### ・硝酸

1994年2月14日に硝酸用レーザーの発振を確認した。その後3月30日にヘテロダイン信号を確認、その後も試験観測を行ったが、はっきりした吸収線はしばらく観測できなかった。7月には発振波数同定のために、ガスセルを用いてアルコールによるリファレンススペクトルを取得した。9月1日に始めて複数の吸収線を確認、以後1995年1月11日まで、のべ13日間観測を行った。観測は3本の吸収線について、始めの2本を観測する方法と、後の2本を観測する方法をとった。最後まで発振波数確定作業を継続し、12月11日にはアンモニアによる有力なリファレンススペクトルを得た。帰国後、このスペクトルをもとに観測波数を決定した。図 4 (d) に観測された硝酸による吸収スペクトルの例を示す。硝酸については国内でのレーザーヘテロダイン分光計観測はまだ成功しておらず、レーザーヘテロダイン分光計を用いた観測としてはこれが初めての試みとなる。硝酸は極夜中に極成層圏雲 (PSC) 上での脱窒反応によって生成され、極夜明けに PSC の昇華とともに大気中に放出されると考えられている。本観測でオゾンホール形成過程の硝酸量の変遷が導出できれば貴重なデータとなるであろう。

## 4. 解析結果

### (1) 国内観測の解析結果

国内観測で得られた一酸化二窒素の吸収線スペクトルからインバージョン法により高度 5km から 30km までの一酸化二窒素混合比の高度分布を導出した [Shigematsu et al., 1995]。得られた一酸化二窒素高度分布の例を図 5 に示す。導出に際しては気象庁の気象ゾンデ観測による仙台上空での過去 30 年間の月別平均気温と気圧を用いた。また吸収線パラメータは HITRAN database 1992 [Rothman et al., 1992] の値を用いた。得られた一酸化二窒素高度分布は過去の航空機および気球によるサンプリング観測や人工衛星によるリモートセンシングの結果と良い一致を示した。

この方法による誤差を数値シミュレーションにより評価した。まず系統誤差についてはインバージョンの際に使用した一酸化二窒素高度分布の初期条件による誤差は高度 25km で  $\pm 3.0\%$  以内、気温モデルによる誤差は高度 30km で  $\pm 1.0\%$  以内、気圧モデルによる誤差は高度 30km で  $\pm 1.9\%$  以内、吸収線パラメータに含まれる誤差は線強度、衝突幅、中心波長のずれについて高度 30km でそれぞれ  $\pm 0.9\%$ 、 $\pm 9.2\%$ 、 $\pm 2.1\%$  以内であった。一方、ランダムノイズによる誤差は、 $\text{SN}=100$  を仮定した場合、高度 30km で最大  $\pm 16.9\%$  の誤差が見積もられるが  $\text{SN}=500$  では同じ高度で  $\pm 3.4\%$  にまで減少する。



Nov.16,1994 12h17m - 14h16m JST

Total = 0.238 cm atm

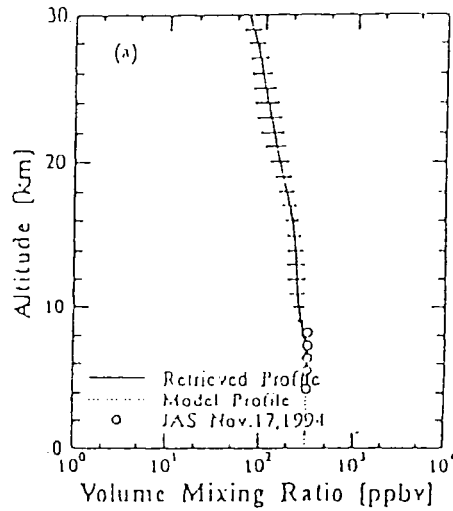


図5. 1994年11月16日に仙台において観測された一酸化二窒素混合比の高度分布。比較のために1994年11月17日に仙台上空で行った航空機観測の結果(○) [Nakazawa, private communication] を同時に示す。

(2) 国外観測の解析結果

現在までに、オゾンに関する解析を進め、1994年の9月15日から10月にかけての8日間、約10分の時間分解能で、高度10kmから30kmまでのオゾンの高度分布を導出した [Koide et al., 1995b]。この期間中の大部分において、得られた高度分布にはオゾンホールが明確に現われていた。また、長時間観測できた日のデータを比較すると、日変動の程度にかなりの差があることがわかった。変動の激しい場合の一例として、1994年9月26日におけるオゾン高度分

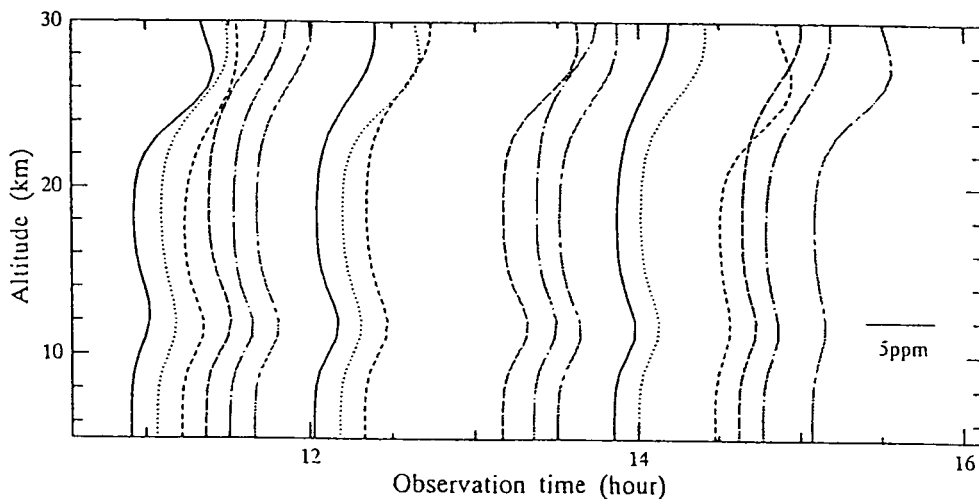


図6. 1994年9月26日に南極昭和基地において観測されたオゾン混合比高度分布の時間変化。高度14-22kmはオゾンホール領域である。高度20kmより上空で顕著な時間変動が見られる。

布の時間変動を図6に示す。この図を見ると、高度約20m以上の領域において、オゾン濃度が短い時間スケールで変動していることがわかる。この原因を調べるため、気象庁客観解析データを用いて渦位を計算し、極渦の状態を調べた。その結果、変動が激しい日には、昭和基地上空付近に極渦境界が存在し、そこに水平スケール500km程度の渦状構造が発生していた。他方、オゾンの変動が少ない日には、昭和基地上空にこのような構造は見られなかった。これらのことから、観測されたオゾン高度分布の激しい変動は、局所的渦構造による、極渦境界付近での大気の交換の結果ではないかと考えている。また、高度12km付近にオゾン量が多い領域が見られるが、これについては、非常に微弱な吸収線が解析対象の吸収線に重なっているために生じた解析上の問題と見られ、現在対策を講じている。

その他の微量気体成分の観測データについては現在解析を進めているがまだ結果は得られていない。特に硝酸に関しては吸収量が少ないので、高度情報の導出は困難である。したがって非線形最小自乗スペクトルフィッティングによる気柱全量の導出法を新たに開発する必要がある。

## 5. 結論

国内においては一酸化二窒素の連続観測を実施し、高度分布の導出および誤差評価までひとおりの成果を上げた。しかし当初の目標であった硝酸の観測は半導体レーザーの不調によって断念せざるを得なかった。新規開発したTDLHS-3による南極での観測によって、オゾン、一酸化二窒素、硝酸、メタンの高品質な吸収スペクトルが得られた。オゾンのスペクトルからは、約10分という高時間分解能で、オゾンホール卓越期間の激しいオゾン変動が導出されている。TDLHS-3には未だ改良の余地は残されているものの、観測条件の厳しい南極で良好な観測を実施できたことから、今後の気球/衛星搭載等の可能性が示されたと考える。

## 引用文献

- Koide, M., M. Taguchi, H. Fukunishi, and S. Okano (1995a): Ground-based remote sensing of methane height profiles with a tunable diode laser heterodyne spectrometer, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 401–404.
- Koide, M., M. Taguchi, H. Fukunishi, and S. Okano (1995b): 南極昭和基地におけるレーザーヘテロダイナ分光計を用いたオゾン・メタン・一酸化二窒素・硝酸の観測、地球電磁気・地球惑星圏学会1995年秋季大会予稿集、B22–08.
- Rothman et al. (1992): The HITRAN molecular database: Editions of 1991 and 1992, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **48**, 469–507.
- Shigematsu, N., M. Taguchi, S. Okano, H. Fukunishi (1995): レーザーヘテロダイナ分光計を用いた成層圏N<sub>2</sub>Oの高度分布の観測、地球惑星科学関連学会1995年合同大会予稿集、559.
- Taguchi, M., S. Okano, M. Koide, N. Shigematsu, and H. Fukunishi (1994a): Remote sensing of atmospheric minor constituents by the infrared laser heterodyne spectroscopy, *Proceedings of 8th International Symposium on Solar Terrestrial Physics Part I*, 206.
- Taguchi, M., S. Okano, M. Koide, N. Shigematsu, and H. Fukunishi (1994b): Development of tunable diode laser heterodyne spectrometers for remote sensing of atmospheric minor constituents (Abstract), *17th International Laser Radar Conference*, 259–260.

## 研究発表の状況

### 誌上発表(○印は査読誌)

○ Koide, M., M.Taguchi, H.Fukunishi and S.Okano(1995a), "Ground-based remote sensing of methane height profile with a tunable diode laser heterodyne spectrometer", *Geophys. Res. Lett.*, 22, 401-404

### 口頭発表

Taguchi,M., S.Okano, M.Koide, N.Shigematsu and H.Fukunishi(1994),  
"Remote sensing of atmospheric minor constituents by the infrared laser heterodyne spectroscopy",  
*Proceedings of Eighth international Symposium on Solar Terrestrial Physics ( Sendai )*, 206.

Taguchi,M., S.Okano, M.Koide, N.Shigematsu and H.Fukunishi(1994),  
"Development of tunable diode laser heterodyne spectrometer for remote sensing of atmospheric minor constituents", 17th international Laser Radar Conference. Abstracts of Papers ( Sendai ), 259-260.

Fukunishi,H., S.Okano, M.Taguchi, M.Koide, N.Shigematsu and T.Abe(1994),  
"Development of a laser heterodyne spectrometer for observation of the Antarctic ozone hole",  
17th international Laser Radar Conference, Abstracts of Papers ( Sendai ), 261-262.

重松直子、田口 真、岡野章一、福西 浩 (1994)、レーザーヘテロダイン分光計によるN<sub>2</sub>O高度分布の観測、第5回大気化学シンポジウム講演集(名古屋大学太陽地球環境研究所)、91-94.

重松直子、田口 真、岡野章一、福西 浩 (1995)、レーザーヘテロダイン分光計を用いた成層圏N<sub>2</sub>Oの高度分布の観測、地球惑星科学関連学会1995年合同大会予稿集、559.

小出理史、田口 真、福西 浩、阿部利弘、岡野章一 (1995)、可搬型半導体レーザーヘテロダイン分光計を用いた南極オゾンホール赤外分光観測、第17回レーザーセンシングシンポジウム予稿集(蒲郡)、187-190.

小出理史、田口 真、福西 浩、岡野章一 (1995)、南極昭和基地におけるレーザーヘテロダイン分光計を用いたオゾン・メタン・一酸化二窒素・硝酸の観測、地球電磁気・地球惑星圏学会1995年秋季大会予稿集、B22-08.