

「地球変動のメカニズム」
平成9年度採択研究代表者

福井 康雄

(名古屋大学大学院理学研究科 教授)

「超伝導受信器を用いたオゾン等の大気微量分子の高度分布測定装置の開発」

1. 研究実施の概要

この研究はオゾン及びオゾンの破壊物質である一酸化塩素(CIO)の高度別時間変動を高精度で測定するために低雑音超伝導受信器システムを開発することを目的とする。

これまでに 200GHz 帯超伝導ミクサー、局部発振電力供給システム、小型 4K クライオスタット、小型音響光学型分光計等の開発を行ってきた。1999 年 12 月、観測システムを南米チリのラスカンパナス天文台に設置し、2000 年 10 月に 200GHz 帯での大気 CIO スペクトルの検出に成功した。同検出は、中緯度帯の成層圏高度 40km 付近の CIO スペクトルを検出したものとしては世界初である。また、他の研究機関のこれまでの測定では、CIO スペクトルを検出するためには 24 時間以上の積分が必要であったが、我々のシステムでは数時間の積分で有意な検出ができ、昼夜間の CIO の時間変動の測定が世界で初めて可能となった。さらにオゾン破壊に重要なエアロゾル(極域成層圏雲を含む)の動向についてはライダーによる研究を進める。また、国内に設置されている既存のオゾン観測用ミリ波分光計によって得られたオゾン鉛直分布データの解析を行うと共に、CIO 高度分布の変動を記述することのできるモデルの開発を行う。

2. 研究実施内容

大気微量分子高度分布測定システムの開発グループ

我々は昨年度ラス・カンパナス天文台における観測により、中緯度帯の観測データとしては世界初の成層圏高度 40km 付近の CIO スペクトルを検出した。南極では冬から春にかけて高度 15km 付近の低高度に現われる PSC(極域成層圏雲)表面における不均一反応がオゾンホール形成に大きな役割を果たしていると考えられているが、春から初夏にかけての極渦の崩壊とともに極渦の気塊(フィラメント)がラス・カンパナス天文台のある中緯度帯まで移動する。この気塊中において PSC 起源の低高度の CIO スペクトルの観測を行うことにより、極から中緯度への移動に伴うフィラメント内の低高度 CIO 分子の拡散を定量することが可能となり、オゾンホールにおけるオゾン破壊のメカニズムを解明する上で重要な知見が得られると期待される。CIO 分子の高度分布は圧力幅から計算され、観測可能な高度範囲は分光計の帯域幅と周波数分解能による制約を受ける。特に低高度側は帯域幅により観測可能範囲が決まる。今年度は、音響光学型分光計の帯域幅を従来の 500MHz から 1GHz に広げ、CIO スペクトルの測定可能範囲を高度を 14km にまで下げ、低高度

CIO の観測体制を整えた。

また、温度較正用冷却黒体に使用する液体窒素の液化・自動供給装置およびエレベーションスイッチ観測における誘電体プレートの自動切換えシステムを導入し、観測の無人化・自動化をより一層進めた。また、昨年度より問題となっていたチリ共和国・ラスカンパナス天文台で頻発する停電に備えるためにディーゼル発電機を導入し、電源系統の再整備を行った。停電によるシステムダウンの心配がなくなり、長期連続運転が可能となった。

① 音響光学型分光計の広帯域化

分光計の開発では、周波数帯域を規定している音響光学型回折素子を1GHz 帯域のものに変更するだけでなく、光学設計から見直しを行った。とくに、参照光源であるレーザの安定性は、スイッチング時間に大きく影響する。スイッチング時間を伸ばし、スイッチングによるデッドタイムを軽減できれば、実積分時間が増え、よりS/N比の高いデータが取得可能となる。そこで従来使用していた He-Ne レーザもより高出力で安定なダイオードレーザに参照光源を変更した。また、CCD 受光部前のレンズを通常の凸レンズからf- θ レンズに変更した。これにより CCD 受光部の両端における結像特性が向上し、帯域両端における感度と周波数分解能の劣化を抑えることが可能となった。

ただし、回折素子の変更に伴い中間周波数系の中心周波数を 1.5GHz 帯から 2.1GHz 帯に変更する必要があり、これに伴い新たにスパイク的な外来ノイズの混入という問題が発生した。ノイズ源のシールド等を行い、年度末までにはかなりノイズレベルを抑制できたが、完全には除去できず、外来ノイズの問題は14年度の課題として残された。この問題はノイズ混入箇所と考えられる初段中間周波数アンプの周波数を 2.1GHz 帯から 4-8GHz に変更することにより解決される見通しである。

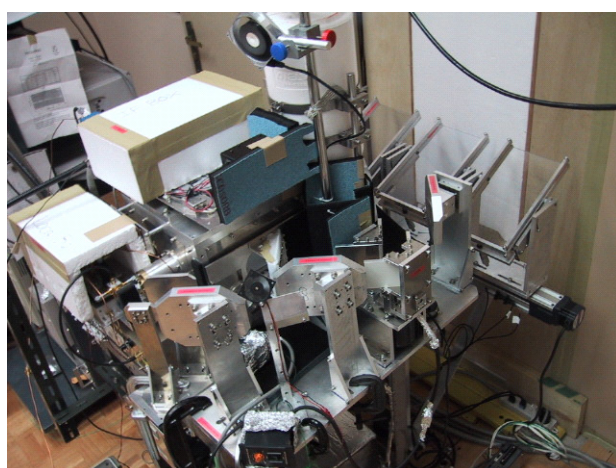
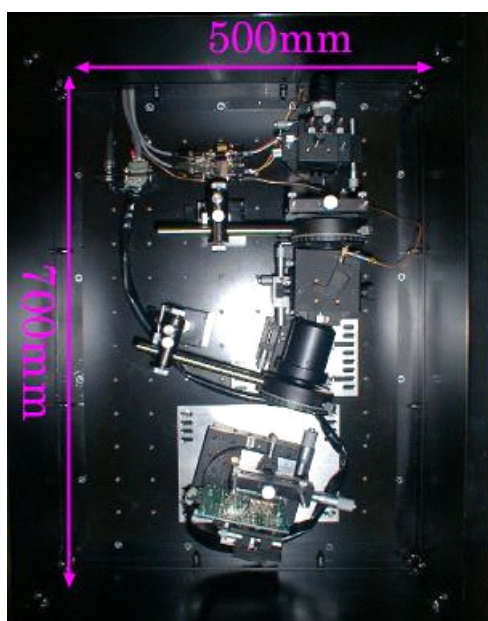
② 自動化・無人化

温度較正用冷却黒体に使用する液体窒素の供給とエレベーションスイッチ観測法における誘電体プレートの交換は、観測者によって数時間に1回の頻度で行われる必要がある。観測は24時間体制で行われており、これらの作業は現地観測者の大きな負担となる。そこで今年度、液面センサーを備えた液体窒素製造装置を導入し、液体窒素の供給を自動化した。同装置は空気中の窒素を取り出し液化する装置である。誘電体プレートに関しても、3種類のプレートをスライド式の電動駆動ステージに設置し、大気吸収の実測値を基に最適なプレートを自動選択するプログラムを観測ソフトウェアに組み込み、交換を自動化した。これらの開発により観測の無人化が実現できた。

③ CIO スペクトルの観測

1GHz 分光計による観測は6月より開始し、極渦フィラメント内のPSC起源のCIOスペクトル受信に万全を期した。しかし13年度は極渦の勢力が強く、長期にわたって安定であったため、フィラメントへの分裂が遅く、また分裂したフィラメントもラスカンパナス上空にまで達しなかった。そのため、結果的に13年度はPSC起源の低高度(高度15km付近)のCIOスペクトルの受信にはいたらなかった。しかし、昨年度検出された高度40km付近のCIOは、6月から12月の試験観測

で有意に検出されている。試験観測では、エレベーションスイッチング観測の観測パラメータを変化させ、最適なスイッチングパラメータを実験的に求めた。また、分光計の光学系調整および中間周波数帯の増幅器の微調整等のノウハウを蓄積するなど、より質の高い観測データを取得するためのシステムの調整・追い込みを行った。その結果、昨年は大気の光学的厚みが 0.1 程度に達すると有意な ClO スペクトルを検出するのが困難であったところが、大気の光学的厚みが 0.15 程度でも有意に高度 40km 付近の ClO を検出が可能となった。これにより、より長期にわたって ClO の連続モニターを行うことが可能となった。



図の説明

(左上) レーザーダイオードを使用した小型 1GHz 音響光学型分光計。(右上) 液体窒素自動供給装置を導入した ClO 計測システム全景。(左下) 誘電体プレートの自動切換え機構を導入した ClO 計測システム。

ライダー観測グループ

ライダー観測グループは、ライダーによって得られる成層圏エアロゾル、極域では特に極域成層圏雲(Polar Stratospheric Clouds, PSC)の濃度分布、偏光特性、散乱の波長依存性などの情報を利用し、オゾン消失過程にかかわる不均一反応速度の律速要因を明らかにすることによって、オゾ

ン消失過程の理解を深めることを目的にしている。

昨年度までの研究で北極域、スピッツベルゲン島・ニーオルスン、および南極ドーム上空における PSC のライダー観測データを得てきた。これらのデータの解析の結果以下の点が明らかとなった：

- ① 北極、南極ともに露点温度より1～2K 高い温度で液滴の PSC が卓越して成長する。北極上空では成層圏温度が露点温度以下まで低下することはまれであるので、最も成長した PSC の形態は液滴 PSC である。が、少量の固体 PSC は、露点温度より5K 程度高い温度以下で常に観測される。この固体 PSC の生成プロセスは不明である。
- ② 北極、2000/2001 年冬季、2000 年 10 月より高度 40km 付近に非球形の粒子(固体粒子)層が現れ徐々に落下、2001 年2月には 20～30km 付近に見られた。この層の起源は同定されていないが、2001 年のライダー観測の結果、この粒子が、通常の固体 PSC の生成に関与した事を示す例が見られた。
- ③ 南極上空では季節の進行とともに成層圏温度がさらに低下する。これに伴い、露点温度を数度下回った時点で一気に氷 PSC に変質する。この変質のきっかけとして対流圏の気圧場の変化が強く関係しているようである。

オゾン・CIO変動の解析とモデル化グループ

三次元的に運動する気塊中の光化学反応を記述するモデル(トラジェクトリーボックスモデル)の検証をオゾンゾンデデータを用いて行うと共に、Reverse Domain Filling (RDF) 手法を用いて、分子種の特定の高度での水平二次元分布を求められるようにした。また、観測を支援するための NCEP 予報データを用いた渦位分布予報システムに RDF を用いた高分解能渦位分布を加えた。

① 光化学トラジェクトリーボックスモデルの検証

本年度は、極渦内と極渦エッジにおけるオゾン鉛直分布データが得られた 1996 年について、トラジェクトリーボックスモデルの検証を行った。図1に等価緯度(Equivalent Latitude)上にプロットした極渦エッジ領域(灰色の線で囲まれた部分)と検証に用いたオゾンゾンデの極渦から見た位置を示した。

極渦内部(コア)部分は等価緯度 70 度以北であったが、3月後半には約5度狭くなる。極渦エッジ領域は等価緯度の北緯 60-70 度にあるが、1-2 月には 3-5 度南下していた。スピッツベルゲン島の

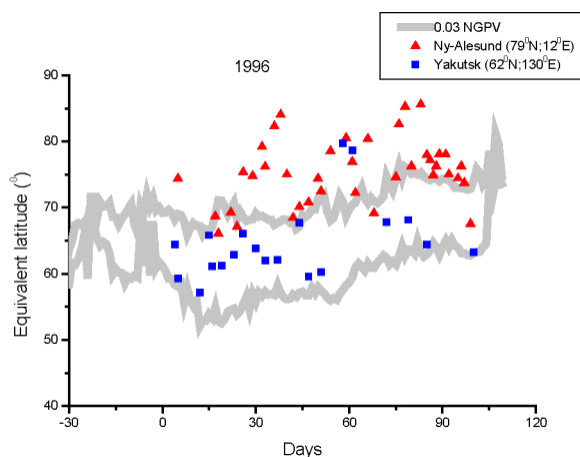


図1.1996 年冬／春季北半球の極渦コア及びエッジ領域とオゾンゾンデ観測地点の関係

Ny-Alesund は概ね極渦コアに位置し、東シベリアヤクーツクは極渦エッジ領域に位置することが多かった。3月 15 日頃に極渦が分裂する現象が起こり極渦コアが縮小した。このとき極渦内外の

空気の混合が起こったことをトラジェクトリーを用いて確認した。極渦の崩壊は4月下旬であった。12月1日に米国 Upper Atmosphere Research Satellite (UARS)のMLS センサーによって得られたオゾン濃度で初期化した光化学トラジェクトリーボックスモデルを極渦内外の各等価緯度(82度、75度、65度、62度)の100点から走らせ、得られたオゾン混合比をオゾンゾンデによって観測されたオゾン混合比と比較した。その結果を図2に示す。

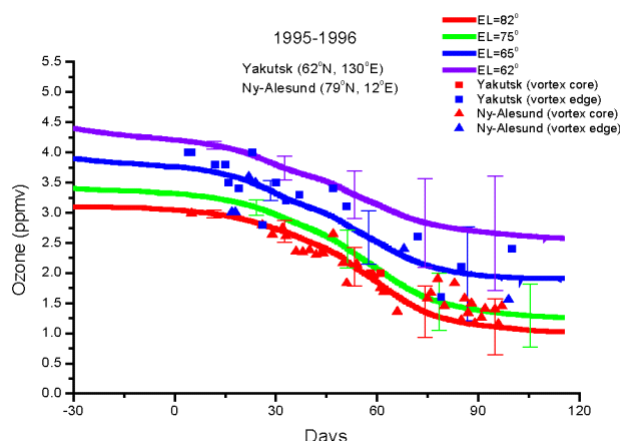


図2. 光化学トラジェクトリーボックスモデルによって計算されたオゾン混合比とオゾンゾンデ観測結果の比較。

極渦のエッジでは極渦コアより早くオゾン破壊が起こるが2月のオゾン破壊は若干少なかった。オゾン混合比の絶対値は極渦コアとエッジで大きく異なるがこれは初期オゾン混合比の違いによるものであり、オゾン混合比の減少についてはほぼ同程度であった。オゾン混合比の減少カーブに着目すると、極渦エッジ領域(等価緯度 62、65 度)、極渦コア(等価緯度 75、82 度)共に観測データと良い一致を示したと言える。ただ、3月後半に極渦コアのオゾン観測データがモデル値から急に乖離して大きくなっており、これは極渦の分裂後に中緯度気塊がフィラメント状に極渦内部に侵入していたことによる可能性がある。北半球では、極渦エッジ付近(特にスカンジナビア半島)に低温部が現れることが多いことが極渦エッジ付近でもコアと同程度のオゾン破壊が得られる原因と考えられる。

② Reverse Domain Filling (RDF) 手法の導入と検証

Reverse Domain Filling (RDF) 手法は、グリッド上の各点からの後方トラジェクトリーを利用した一種の輸送モデルであるが、時間的に蓄積された情報を利用して高い分解能の分布図を得るために利用されている。これを利用して120時間の後方トラジェクトリーを利用したRDF渦位分布を作成した(図3)。南半球の極渦のエッジが南米先端に伸びている様子や熱帯の気塊が南米中部から南大西洋に伸びている様子が通常の渦位分布よりも明瞭に表されている。

RDF手法の妥当性について検討するために、1996年9月に打ち上げられ

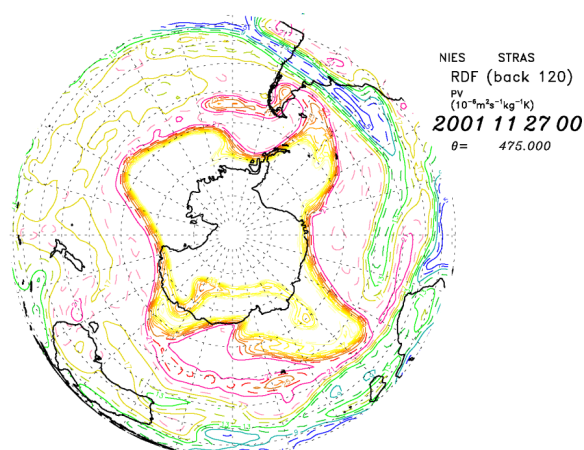


図3. 2001年11月27日のRDF高分解能渦位分布。24時間のNCEP解析データと96時間のNCEP予報データを用いた4日予報図。

1997年6月末まで運用された ADEOS 衛星(「みどり」)に搭載されたセンサー ILAS によって観測された N_2O を利用して渦位分布を N_2O 分布に変換し、これを用いて $RDFN_2O$ 分布を作成して ILAS や三陸大気球による観測値と比較した。その結果、約1カ月に及ぶ $RDFN_2O$ 分布が観測値とかなり良い一致を示していることが明らかになった。

3. 研究実施体制

(1) 大気微量分子高度分布測定システムの開発グループ

研究者名: 福井 康雄 (名古屋大学大学院理学研究科、教授)

研究項目: 超伝導受信器の開発

ミリ波観測システムの開発

観測制御ソフトの開発

音響光学型分光計の開発

チリでの ClO・オゾン観測

(2) ライダー観測グループ

研究者名: 岩坂 泰信 (名古屋大学大学院環境学研究科、教授)

研究項目: ライダーによる大気エアロゾル量、粒径分布、気圧気温の観測

ClO・オゾン濃度・エアロゾル量をもとにオゾン破壊過程の解明

(3) オゾン・ClO 変動の解析とモデル化グループ

研究者名: 中根 英昭 (国立環境研究所、上席研究官)

研究項目: オゾン・ClO 高度分布の変動解析

三次元データを用いた極域・中緯度オゾン層の相互作用に関する気象解析

オゾン・ClO 変動のモデル化

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文発表

- Lukyanov, A. N., H. Nakane, and V. A. Yushkov, " Lagrangian estimations of ozone loss in the core and edge region of the Arctic polar vortex 1995/1996: Model results and observations" , submitted to J. Atmos. Chem., 2002.
- Fukui, Y., A. Mizuno, T. Onishi, T. Nagahama, K.C.Xiao, N. Mizuno, A. Morihira, H. Ogawa, Y. Yonekura and H. Nakane, " Ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric chlorine monoxide in Chili using a superconducting receiver" , Network for the Detection of Stratospheric Change 2001 Symposium, P200, 2001.
- Nakane, H., A. Lukyanov, T. Nagahama, H. Akiyoshi, I. Yamazaki, K. Nakagawa, K. Saigo, N. Furuhashi, J. Kurokawa and I. Ikeuchi, " Variability of polar vortex and its effects on ozone" , Network for the Detection of Stratospheric Change 2001 Symposium, P41, 2001.
- S.Ishii, T. Shibata, T. Sakai, M. Kido, K. Hara, K. Osada, Y. Iwasaka, T. Nagai, K. Mizutani, T. Itabe, T. Fujimoto, O. Uchino, " The source, size and chemical composition of the winter

arctic tropospheric aerosol layer observed by lidar at Eureka, Canada” , Journal of Meteorological Society of Japan, Vol. 79, 61-78, 2001

- T. Murayama, N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z Liu, I. Matsui, T. Sakai, Tetsu, T. Shibata, K. Arao, B-J. Sohn, J-G. Won, S-C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga, Y. Iwasaka, ” Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia” , J. Geophys. Res. Vol. 106 , 18,345-18,360, 2001
 - H. Adachi, T. Shibata, Y. Iwasaka and M. Fujiwara, ” Calibration method for the lidar observed stratospheric depolarization ratio in the presence of liquid aerosol particles” , Applied Optics, Vol. 40, 6587-6595, 2001
 - D. Daneva and T. Shibata, ” Behavior of externally mixed, liquid and solid polar stratospheric particles in a numerical box model under temperature decrease” , Polar Meteorology and Glaciology, No. 15, 32-42, 2001
 - 長浜智夫、福井康雄、小川英夫、中根英昭、森平淳志、南米チリにおける ClO のミリ波観測、研究集会講演集 第 11 回大気化学シンポジウム、27-29、2002.
 - 森平淳志、福井康雄、小川英夫、中根英昭、長浜智生、南米チリにおける 200GHz 帯ミリ波受信器の開発、研究集会講演集 第 11 回大気化学シンポジウム、73-74、2002.
 - 中根英昭、環境問題における大気化学、天気、49、23-28、2002.
- (2) 特許出願
- 国内特許 1件