

戦略的創造研究推進事業
発展研究（SORST）

研究終了報告書

研究課題「可搬型超伝導ミリ波大気分子
測定装置の開発」

研究期間：平成 14 年 11 月 1 日～
平成 20 年 3 月 31 日

福井康雄
(名古屋大学、教授)

1. 研究課題名

「可搬型超伝導ミリ波大気分子測定装置の開発」

2. 研究実施の概要

●背景と目的

地球大気中には混合比が 1%以下の微量分子が多数存在している。これら微量分子の中には、今日生命が存在する地球の環境を形成する上で本質的な役割を果たしているものがある。たとえば、オゾンは大気中に百万分の 1 程度の割合しか存在しないが、太陽からの有害な紫外線を吸収して熱に変換することで、陸上生命の繁栄をもたらすと同時に、発生する熱によって他の太陽系惑星には見られない大気構造である成層圏を形成している。そして人類が造りだしたさらに微量（十億分の 1 程度）のフロンガスの放出が、大規模なオゾン層破壊を引き起こした。このように、微量分子のわずかな組成変動が生態系を維持するのに必要な地球環境に大きなインパクトを与えることがある。温室効果ガスの増加により、放射バランスが変化する地球温暖化もまた同様である。

本研究は、1980 年代より技術開発が始められたミリ波（＝波長が数ミリの電波）分光法により大気微量分子の測定を行うための小型で消費電力の小さい高感度観測装置を開発すること、および南米チリ共和国の標高 4,800 メートルのアタカマ高地において高感度のミリ波観測装置を用いた極微量の大気分子の測定を行い、中層大気中のオゾン光化学でフロンと同様に重要な役割を果たす水蒸気およびその同位体分子の高度別時間変動を明らかにすることを目的としたものである。

ミリ波分光法による地上観測は、熱的に励起された分子からの「放射」を直接観測する受動的な観測法である。紫外線分光法や赤外線分光法のように、太陽を背景光源とした「吸収」を観測しないため、昼夜に関わらず 24 時間連続して観測可能な点が大きな特長である。また、人工衛星からの太陽掩蔽法やリムサウンディング法に比べると高度分解能はやや劣るものの、微量分子の鉛直分布を導出できる点もミリ波観測法の重要な特長のひとつである。しかし、当然のことながらミリ波の地上観測では、1 台の観測装置は地球上の 1 点の上空しか観測できない。そこで、地球全体の状態を把握するためには地球上のさまざまな場所に観測装置を設置し、全球的な観測ネットワークを形成することが重要となり、実際に NDACC(大気組成変動検出のためのネットワーク)など国際的な協力体制が確立されている。しかし、最先端技術が投入されたミリ波大気観測装置の多くは中緯度地域と北半球に偏っており、必ずしも全球的にまんべんなく行きわたっているとは言い難い。その大きな要因は、ミリ波観測装置の調整の複雑さ、そして装置の重さと大きさである。そこで本研究では、全球的な観測ネットワーク構築の途を切り開くことを目指し、重機を使用せずに運搬でき、調整の容易な小型ミリ波観測装置を世界に先駆けて開発することとした。

我々は平成 10 年から 14 年までの戦略的基礎研究推進事業(CREST)「地球変動のメカニズム」の「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」において、非常に感度の高い超伝導受信器を搭載した大気観測用ミリ波分子スペクトル観測装置を開発した。同装置によりオゾン破壊のメカニズムを解明する上で重要な鍵を握る一酸化塩素(ClO)スペクトルの南半球中緯度帯での初観測に成功した。我々の開発した装置により、それまで 24 時間以上の積分が必要とされていたスペクトルの受信が、たった数時間の積分で可能となった。本研究はこの CREST の成果を受け、先の CREST で達成できなかった測定システムの小型化・省電力化を実現すること、さらに既事業で開始した南半球中緯度帯における ClO、オゾンおよび水蒸気のモニター観測を継続することを柱とした研究計画を立案した。

●実施概要（可搬型超伝導ミリ波大気分子測定装置開発グループ）

・小型大気観測装置の開発

遠隔地、とくに電力事情が厳しい南極昭和基地のような場所では、消費電力が小さく小型軽量で輸送・設置が容易で、かつ現地での調整が簡便な計測装置が望まれる。しかし、

超伝導受信器を使用するミリ波装置では、10kW 以上の電力を消費し、そのなかでも極低温冷凍機が半分以上を占めていた。そこで、我々は、消費電力が小さい GM(ギフォード・マクマフオン)型冷凍機に着目し、同冷凍機を使用した大気観測用の極低温冷却システムを追求した。GM 冷凍機は、先の CREST で我々が使用した GM-JT(ギフォード・マクマフオン-ジュール・トムソン)冷凍機に比べ極低温到達時の温度ゆらぎが大きく、超伝導受信器のゲイン変動の要因となっていたが、住友重機械工業で開発され、その後同社やアルバッククライオ社で実用化された He ポットと呼ばれる熱溜を使うことにより、温度ゆらぎを許容範囲内に抑えることが可能となった。ただし消費電力を抑えると冷却能力も低下する。省電力化を図るためには、外部からの熱流入を可能な限り抑えたクライオスタット(真空断熱容器)を設計・製作しなければならない。本研究ではアルバッククライオ社の 0.3W の GM 冷凍機を使用し、熱流入量の試算を丹念に行い、クライオスタット内部に楕円鏡を設置することによりクライオスタット壁面の電波入力窓の大きさを従来の 1/4 に小さくし、窓からの放射による熱流入を抑えることにより、絶対温度で 4 K の極低温状態を安定して保持できるクライオスタットの開発に成功した。冷却時の温度ゆらぎは超伝導受信器を搭載し動作させた状態で 20mK(peak-to-peak)以下であり、GM-JT 冷凍機の際の 50mK よりさらに小さく抑えられた。また、このクライオスタットは単なる真空容器だけではなく、観測装置本体の力学的な構造体も兼ねており、従来機では水平な定盤上に展開していたビーム伝送光学系をクライオスタット側面の鉛直方向に抱いた形となっている。他にも超伝導受信器を動作させるのに必要な局部発振器信号系、バイアス制御電源系、中間周波出力系を 4 つの側面にそれぞれ抱かせることにより省スペース化＝小型化も図っている。ビーム伝送系での損失も 0.2-0.3dB 程度と従来機とほぼ同程度で、110GHz 帯の固定バックショート型の超伝導受信器を搭載した状態で光学系込みの受信機雑音温度 70K(DSB)と世界トップクラスの値が得られている。極低温冷凍機の消費電力は 11kW から 2.1kW へと 1/5 以下の低減、重量も冷凍機単体で 250kg から 50kg へ、観測装置全体の総重量でも 1,350kg 程度が 450kg 程度まで軽量化することができた。

また、今回開発した観測装置では、先の CREST で開発した音響光学分光計をデジタル高速フーリエ変換機を用いたデジタル分光計に変更した。音響光学型分光計はその動作原理から外部からの振動を極端に嫌う。そこで、音響光学型分光計は安定な除震台の上に置かれた光学定盤上に構成されるが、重さは 200kg 程度、大きさも 1 平米程度と、音響光学型分光計は観測装置の総重量、占有面積でかなり大きな割合を占めていた。これがデジタル分光計を用いることにより、パソコン 1 台程度の重量と体積に縮小することができた。さらにデジタル分光計は、音響光学分光計に比べ、周波数分解能が 16 倍高く、周囲温度の変化の影響も受けにくく安定している。また、光学部品の調整が難しく、最適化のために経験と熟練が必要だった音響光学分光計を、入力レベル以外はほとんど調整が不要なデジタル分光計に置き換えることにより、フィールドでの操作性を著しく向上させることができた。

・チリ共和国アタカマ高地における大気微量分子観測

本研究ではチリ共和国のアタカマ高地に新たな観測拠点を開拓し、水蒸気を中心とした大気微量分子の連続観測を行った。アタカマ高地は標高 4,800 メートルの高地で、大気吸収量が小さく、ミリ波での中層大気観測には世界的にも 1, 2 を争う好条件を誇っている。同地での観測は、これまで連続観測が実質的に不可能であった水蒸気の稀少同位体分子である H_2^{18}O などのスペクトル強度が非常に弱い大気分子の連続観測を可能にした。2004 年より発電施設や衛星通信施設などのインフラ整備を含む観測サイトの開拓を開始し、当初は気圧低下に伴う発熱により電子機器や動力機器の故障に見舞われたが、適宜観測機器に改良を加え、2005 年末には 183GHz 帯の水蒸気(H_2^{18}O)観測を実現させ、観測システムとしての完成度を高めた。また、あわせてステータスマニターシステムを開発し、Web を通して山麓宿舎や日本から装置の動作状態や観測条件のモニタ、遠隔操作を可能にした。また 2006 年には 9 月から 12 月末までのほぼ 4 か月間にわたり水蒸気同位体のひとつである 204GHz 帯の H_2^{18}O スペクトルの長期連続観測を実施した。 H_2^{18}O スペクトルは約 45MHz しか離れていな

い周波数にある強いオゾンスpekトルの裾に位置し、鉛直分布を求める際には H_2^{18}O とオゾンの両方の逆問題を同時に解かなければならない。さらに周波数軸ドリフトの較正やベースラインのうねりの除去、NCEP の気象データの活用など解析・モデル化グループの協力を得て、リトリパルのアルゴリズムに改良を加え、解析の精度の向上を図った。解析の結果、9月から4か月間の高度40kmから60kmまでの H_2^{18}O の鉛直分布の時間変動の実態を明らかにした。南半球の春から夏にかけて、高度40km付近の H_2^{18}O が $\sim 4\%$ /月程度の増加傾向を示すことが初めて明らかになった。

●他サブグループの実施概要

・オゾン・C10・水蒸気変動の解析とモデル化グループ

本グループでは、(1)オゾンおよびC10の予報システムの開発と、(2)全球化学気候モデルによる大気微量成分の分布変動解析を行った。「チリ共和国における大気観測・機器開発グループ」がアタカマの限られた時間空間で得たオゾン、一酸化塩素(C10)、水蒸気の観測データを、時間空間的に拡張した観点から理解し、現在および将来実施される観測に対して大気科学的な意義を探ることが本グループの目的である。

(1)オゾン全量およびC10の予報システムの開発では、Reverse Domain Filling(RDF)という手法を使って、オゾン全量及びC10濃度の予測システムを確立した。これによって、1日から数日先のこれらの量の予測が全球的に可能になり、アタカマ観測点における予報も可能となった。これによって、アタカマでのオゾン観測計画をより大気科学的な視点から立てられるようになった。(2)全球化学気候モデルによる大気微量成分の分布変動解析では、水蒸気、オゾン、亜酸化窒素(N_2O)の過去から将来にわたる長期間の連続計算とその解析を行い、アタカマ近辺の低緯度および中緯度におけるこれらの微量成分の季節変動および長期変動をそのグローバルな分布と関連づけて考察した。その結果、アタカマ近辺の成層圏オゾン、水蒸気、亜酸化窒素濃度が将来変化することが示唆された。特に亜酸化窒素濃度とオゾン濃度の季節変動の振幅の変化は、地球温暖化に伴う熱帯対流圏の緯度幅の拡張の影響を示唆していて興味深い。アタカマはその位置が熱帯と中緯度大気の境目に位置することから、将来にわたって観測を持続すれば、地球温暖化の大気微量成分への影響をいち早く検知できる可能性がある。

・チリ共和国における大気観測・機器開発グループ

チリ共和国アタカマ高地における大気観測は、水蒸気の変動メカニズムの解明やオゾン層破壊の多角的解明といった科学的な意義のみならず、日本国内では大気ノイズに埋もれて判別な困難な微弱なレベルの定在波の影響など、装置の微妙な問題点が顕在化し、観測装置の完成度を高める上で装置開発の観点からも非常に有意義である。アタカマ高地における作業効率の向上、スペイン語で交わされる関連業者との折衝、そしてミリ波技術がまだ十分成熟していないチリ共和国への技術移入といったことを目的として、2005年から2006年にかけての1年半ほどの間、チリ大学のBronfman教授のグループの協力を得た。ドイツ・ケルン大学でサブミリ波工学を習得したR. Salazar氏が常駐に近い形でアタカマでの観測と機器保守に当たり、水蒸気観測の実現に大きく貢献した。ただし、Salazar氏が2006年9月に別な仕事に就職が決まり、グループから離脱した。その後、後任者を探したが適当な人材が見つからず、同グループは2006年末で解消した。

3. 研究構想

●研究開始時に設定した目標と研究計画、進め方

(1) 超伝導大気観測装置の小型・省電力化

小型 GM 冷凍機を用い、安定動作する超伝導検出素子を搭載した大気観測システムを開発する。そのためにまず、既存のクライオスタットを用いて GM 冷凍機の評価を行い、その結果をもとに観測装置実機に用いるクライオスタットの設計・製作を行う。またこれと並行して、ビーム伝送光学系の再設計を行い、既存のシステムとは異なる新たな観測システムを構築する。また、システム全体のみならず、以下の要素開発にも力を注ぎ、総合的な質の向上を目指す。超伝導ミキサのサイドバンド分離化、広帯域化により複数のスペクトル線の同時観測を実現する。音響光学型分光計に変わる自己相関型分光計やチャープ変換型分光計等の新たな分光計を開発する。

(2) 標高 5000 メートルにおける水蒸気観測

研究開始当初、1980 年代からの成層圏水蒸気の増加が指摘されていた。水蒸気は H_2O のソースとして成層圏上部から中間圏のオゾン化学で主要な役割を果たし、また、水蒸気の増加は成層圏の寒冷化と相まって、極域における極域成層圏雲 (PSC) によるオゾン破壊を促進する可能性が指摘されている。そこで、成層圏水蒸気変動の実態と要因に迫るべく、成層圏水蒸気のミリ波観測を立案した。180GHz 帯の水蒸気スペクトルの地上観測が可能な場所は極めて限られており、標高 4,800m の共和国北部のアタカマ高地は世界中でも最適な場所である。ここに観測装置を移設し、水蒸気をはじめとする大気分子の観測拠点を開拓し、水蒸気分子のモニター観測を行う。

(3) C_{10} 分子の長期モニター観測

先の CREST 事業で検出し、他機関では実施困難な C_{10} 分子の長期モニター観測より中緯度帯の C_{10} の季節変動を明らかにすることを立案した。しかし、上記のアタカマ高地における拠点開発に時間をとられ、既 CREST からの観測が中断したことで水蒸気観測の重要性が増したことから、プライオリティーをさげ、水蒸気の観測を優先させることとした。

(4) 観測データの解析アルゴリズムの整備

先の CREST 事業を通してオゾンや C_{10} などのスペクトル 1 本 1 本について逆問題を解き、分子の高度分布を導出するアルゴリズムを完成させた。本研究では、(1) で述べたように受信器の広帯域化を図り複数のスペクトルの同時検出を目指すため、同時に複数のスペクトルの逆問題を解く必要がある。強度が異なる複数のスペクトルを解くため、解析アルゴリズムの改良を行う。また、解析の際の境界条件である、気温や圧力の高度分布に他機関の再解析データを用い、導出する結果の信頼性を高める。そのためのデータベース化を行う。

(5) モデルと実測データの比較に基づき大気組成変動のメカニズム解明に迫る

先の CREST で進めた化学輸送モデルを発展させ、アタカマ観測点を含む広範囲のオゾン、 C_{10} 等の濃度予測を可能にし、機器開発・観測グループの観測を支援する。また、アタカマにおける限られた期間に観測されたオゾン、一酸化塩素 (C_{10})、水蒸気の変動のメカニズムを、グローバルな大気の変動とそれに伴う大気組成分布変動とに基づいて明らかにする。

●その後の新展開から生まれた目標

(6) 水蒸気同位体の連続観測

安定同位体分子の存在比は、その分子が形成された環境やその分子が輸送されてきた環境の情報を内包している。アタカマ高地の好条件のもとでは、存在量が小さい水蒸気の稀少同位体からの非常に微弱なスペクトルを十分な S/N で取得可能である。そこで、水蒸気変動の実態をより深く明らかにするため、チリ共和国アタカマ高地において水蒸気同位体分子のひとつである H_2^{18}O スペクトルの連続観測を行うこととした。

(7) 化学気候モデルを用いたアタカマ上空における大気微量成分の将来変動予測

化学気候モデルを用いた将来予測実験によって、アタカマ上空のオゾン、一酸化塩素(ClO)、水蒸気、亜酸化窒素(N₂O)の濃度変動予測が可能となった。アタカマでの観測を継続することによって、化学気候モデルで予測されたような将来の地球温暖化に伴う大気と大気微量成分濃度変動を検出できる可能性を追求する。

●役割分担

可搬型超伝導ミリ波大気分子測定装置開発グループは主として(1)から(3)および(6)を分担し、オゾン・ClO・水蒸気変動の解析とモデル化グループは(4)、(5)および(7)を分担した。

4. 研究実施内容

4. 1 小型超伝導大気観測装置の開発とチリ・アタカマ高地における大気微量分子観測 (可搬型超伝導ミリ波大気分子測定装置開発グループ)

(1)実施の内容

本グループの研究は、大気微量分子から放射されるミリ波スペクトルの小型観測装置の機器開発に関する研究と CREST で開発した超伝導ミリ波観測装置を用いチリ共和国アタカマ高地で行なう観測的研究の2本柱である。

時系列で見た大まかな研究の流れは以下のとおりである。研究を開始した2002年および2003年は、本研究の始動準備的な研究を行った。観測装置はまだチリ共和国中部のラス・カンパナス天文台にあり、CREST で検出した C10 スペクトルの観測に加え、水蒸気同位体 H_2^{18}O の試験観測を行ない、より観測条件のよい標高4,800mのアタカマ高地での観測のための準備をおこなった。また装置開発としては、外部調整機構を持たない固定バックショート型の超伝導ミキサや100GHz帯の導波管フィルタによるサイドバンド分離型ミキサの開発等、観測システム小型化のための要素開発を行った。

2004年よりアタカマ高地のサイト開発と観測装置の設置調整を開始した。サイト開発は、発電機、通信設備および観測用コンテナハウスの設置からケーブルの敷設まで一から整備し、安定した観測体制を整備するのに1年半あまりの期間を要した。2004年から2005年の2年間は、多くの労力と時間をアタカマ高地での観測拠点開発に注ぐこととなったが、2005年12月には、対流圏水蒸気による吸収のため平地では観測できない183GHz帯の水蒸気スペクトルの観測に成功した。装置開発としては、電磁界シミュレータを用い180GHzから230GHz帯で性能が発揮できるPCTJ型の超伝導ミキサ素子の新たな設計製作や冷却中間周波増幅系の最適化評価などの要素開発を進めるとともに、小型装置のためのビーム伝送系の検討および0.1W冷凍機と汎用クライオスタットを用いた冷却特性測定を開始した。

2006年および2007年は、小型観測装置の実機の最終設計製作に重点をおいて研究を進めた。2005年末に開発された0.3Wの冷凍機を用いたクライオスタットを採用し、縦置きビーム伝送系を側面に配置した全く新しい小型ミリ波観測装置を製作した。また、分光計部としては近年発展が著しいFPGA(Field Programmable Gate Array)技術を用いた高速フーリエ変換機が開発され、これを用いたデジタル分光計の開発評価を行った。アタカマ高地の観測では水蒸気同位体 H_2^{18}O スペクトルの連続観測を行い、春から夏にかけて H_2^{18}O が選択的に増加する傾向を初めて明らかにした。また観測と並行して遠隔モニター・制御系の整備を行なった。これは小型装置を用いた将来の観測モニターシステムのひな形となる。

以下では、小型観測装置の開発とアタカマ高地に置く観測拠点の開発とそこでの観測成果について詳細に述べる。

A. 超伝導大気観測装置の小型・省電力化

A-1 背景

大気中の微量分子を測定する方法には、気球や航空機を用いて直接空気をサンプリングして測定する直接法から、分子による電磁波の吸収あるいは放射、散乱を測定することにより定量を行うリモートセンシングまで種々の方法がある。また、リモートセンシングについても大きくわけて、地上観測と衛星(飛翔体)観測がある。直接法は、測定精度および鉛直分布の高度分解能などの特長があるが、観測高度に上限があり、また気球や航空機のスケジュールに伴い観測は散発的にならざるを得ない。リモートセンシングは、紫外線、赤外線、ミリ波など観測に用いる電磁波の波長によりさまざまな手法があり、それぞれに長所短所があるが、直接観測に比べ長期にわたり連続的にデータを取得することが可能である。しかし、太陽光を光源とし、赤外線や紫外線の吸収を地上観測する場合は、観測は太陽が出ている晴天昼間時に限られ、また同吸収線を衛星から太陽掩蔽法で観測する場合は、日の出、日没時に限られるなど、1日の中での観測可能時間帯に制限が加わる場合が多い。また、リモートセンシングによる地上観測と衛星観測では、地上観測では長期にわたり定点における連続的なデータが取得できる反面、1台では緯度経度方向の空間的な

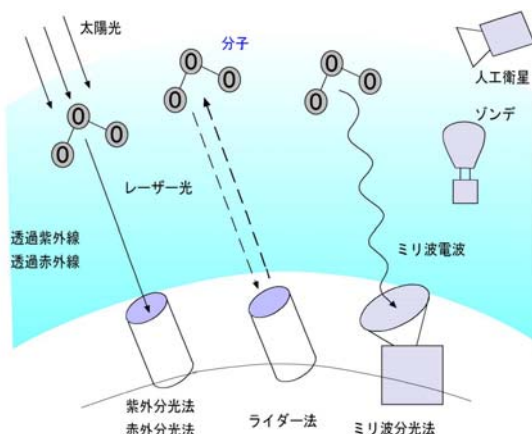


図1. ミリ波地上観測の特長。太陽光を背景とする分光測定法(昼)やライダー法(夜)と異なり、昼夜を通して24時間連続観測が可能である。

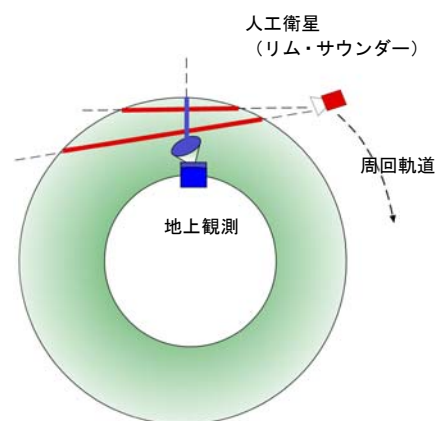


図2. ミリ波大気観測の方法。地上観測と衛星(リム・サウンダー)による観測。周回軌道によって観測する衛星は、全球的な分布を調べることができるが、定点上の変化を連続的に追うことはできない。

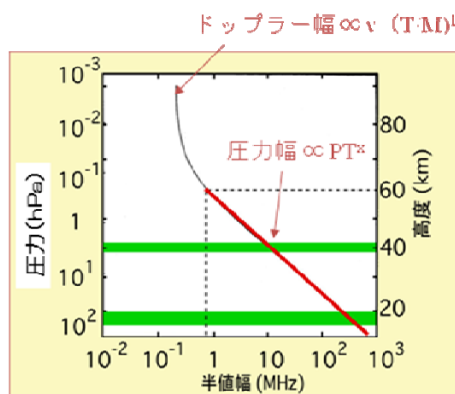
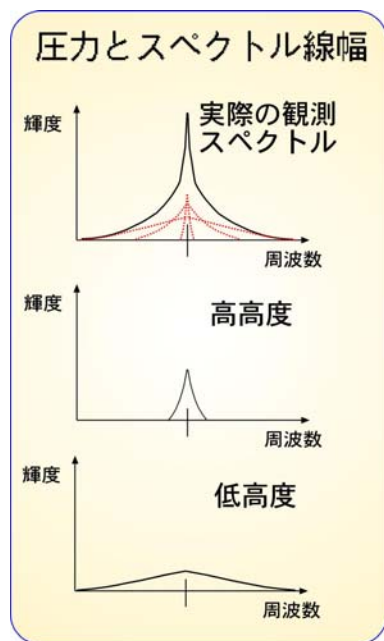


図3. 観測されるスペクトルデータの概念図。スペクトル線の幅(圧力幅)は圧力により広がりがあり、高高度の分子からのスペクトル線幅は狭く、低高度のものは太い。実際に取得されるデータはそれらの重ね合わせであり、異なる幅のスペクトルに分解することにより、高度分布を求めることができる。右側はC10スペクトルの圧力(高度)と線幅の関係を示す。緑色の部分はオゾンが破壊される高度域を示す。

変化を調べられないという短所がある。一方衛星観測では、全球的なイメージが観測できる特長があるものの、衛星の寿命による観測期間の制限や周回軌道により観測点が時々刻々変化するため、定点上のデータの連続性が乏しくなるなどの短所がある。このように地上観測と衛星観測では互いに長所短所があり、相補的な役割を果たしている。

本研究で開発を進めたミリ波スペクトルによる地上観測は、熱的に励起された分子からの「放射」を直接観測する受動的な観測法である。背景光源を必要としないため、昼夜に関わらず24時間連続して観測可能な点が他の手法を大きく異なる特長であり、充分に感度が高い測定装置を用いれば一日の中の変化、すなわち昼夜変化も測定することが可能である。また、衛星による太陽掩蔽法や周縁部放射法による観測に比べると分解能はやや劣るものの、微量分子の鉛直分布を導出できるという点も大きな特長である。

超伝導ミクサ(SIS ミクサ)受信器を用いたミリ波検出器は、従来の冷却半導体(ショットキーバリアダイオード)ミクサ受信器に比べて雑音温度が1/3から1桁程度低い。同じ

S/N 比のデータを取得するための積分時間は雑音温度の 2 乗に反比例するため、感度としては超伝導ミキサの方が 1 桁から 2 桁近く高い。視線が長い衛星からのリモサウンディングでは、現在でも扱いの容易な半導体ミキサが使われることもあるが、極微量成分の観測や視線方向の長さが短い地上観測では、超伝導ミキサを用いる観測が圧倒的に有利である。しかしながら、超伝導ミキサは、文字通り超伝導状態にしなければ動作しないため、極低温の冷却システムが必要となる。1980 年代よりヘリウムガスを用いた閉サイクル型の機械式 (GM-JT) 冷凍機が実用化されたが、200-300kg ほどのコンプレッサやコンプレッサを冷却するための冷却水循環機等を必要とした。消費電力も 10kW 程度とほぼ普通の家庭 1 件分ぐらいの電力を消費する。そのため、電力消費量が制限される南極昭和基地のような場所や道路事情の芳しくない遠隔地に観測装置を設置するのは困難であり、全球的な観測ネットワークを構築する上で大きな障害となっていた。

1990 年代に入り、従来の GM-JT 冷凍機よりも軽量（ただし軽量の物は冷却能力も低くなる）の GM 冷凍機が開発されたが、極低温冷却時の温度振幅が GM-JT 冷凍機よりも大きく、超伝導受信器のゲイン変動の原因となるため、大気観測装置として使用するのには適さなかった。しかしながら、本研究が開始される直前ごろより、ヘリウムポットと呼ばれる熱溜を GM 冷凍機に付ける事により温度振幅を大気観測に支障のないレベルまで抑えることが可能となった。そこで、本研究は、この軽量で消費電力の少ない GM 冷凍機を用いた小型の大気観測装置の開発を行う事とした。



図 4. 先の CREST により開発し、チリ共和国ラス・カンパナス天文台内に設置したミリ波超伝導大気微量分子観測装置。右側の白い 2 つの筐体は液体窒素自動供給装置。冷凍機の圧縮機および音響光学型分光計は別室にあり、ここには写っていない。

A-2 0.3W GM 冷凍機を用いた小型観測装置の開発

冷凍機はアルバッククライオ社製の 0.3W GM 極低温冷凍機を使用した。表 1 に先の CREST で開発した観測装置に使用したダイキン社製の GM-JT 冷凍機と今回導入を検討した小型 GM 冷凍機との比較を示す。大きさおよび消費電力の観点からは、住友重機械工業製が最も優れているが、4K ステージの冷却能力が 0.1W と小さく、後述のクライオスタットの熱設計値より、アルバッククライオ社製の冷凍機が本研究に最も適していると判断した。水冷機（チラー）まで含めると従来の GM-JT 冷凍機の消費電力が 11kW、今回のものが 2.1kW と 1/5 以下に抑えられ、重量も 1/6 以下まで軽量化されている。ただし、冷却能力は 1/10 以下となっており、この冷却能力で十分に安定した超伝導状態を維持できるクライオスタットシステムを製作する事が本研究の一つのポイントである。

	従来 GM-JT 冷凍機	小型 GM 冷凍機	
		アルバッククライオ製	住友重機械工業製
消費電力	6.4kW	2.1 kW	1.3 kW
冷却能力	初段 20W@60K 二段 3.5W@4.2K	初段 7 W @60 K 二段 0.3 W @4.2 K	初段 5 W @60 K 二段 0.1 W @4.2 K
圧縮機の冷却方法	水冷式	空冷式	空冷式
圧縮機の質量	250kg	50 kg	42 kg
圧縮機の大きさ (mm)	700×520×1095	380×453×451	385×450×400
水冷機の消費電力	4.6kW	なし	なし

表 1. 極低温冷凍機の仕様比較（冷却能力は電源周波数が 60Hz の場合の値）

安定した極低温状態を維持するためには、外部からの熱流入が冷凍機の冷却能力より十分小さくしなければならない。外部からの熱は、伝導と放射により流入するがクライオスタット内を0.1mtorr以下の高真空にすることにより空気分子による熱伝導は無視できるまで抑えられる。検討すべきは、導波管やケーブル等による熱伝導、冷凍機内のアンプ等の受信器コンポーネントによる発熱、および放射による熱流入である。

熱伝導に関しては、まず、局部発振器からの信号を導波管を用いることなくレンズを用いて準光学的に導入することにより、導波管による熱流入をゼロとした。次に同軸ケーブルの材質として熱伝導係数の小さいキュプロニッケルを用い、また、超伝導ミキサや冷却アンプのバイアスケابلとして直径約100ミクロンのリン青銅細線を用いることにより流入量の低減を図った。さらに冷凍機の初段ステージである60Kステージに熱アンカーを取ることで熱伝導による4Kステージへの熱流入を0.13Wまで抑えた。

また冷却アンプ等の4Kステージに設置される受信器コンポーネントによる発熱量は0.01W以下と見積もられた。

放射による熱流入に対しては、60Kステージに固定したアルミとニッケルメッキを施した無酸素銅でできた箱型の2重放射シールドによりクライオスタット壁面からの300Kの熱放射を反射させ、4Kステージへの熱流入を0.002W以下まで抑えた。ただし、電波が入射する電波窓は、この放射シールドで覆うことができず、外界の300Kの熱放射が直接4Kステージに到達する。放射による熱流入の大きさは温度の4乗に比例するため、一部の電波窓からの流入といえども300Kからの直接の熱流入は無視できない。従来と同じ形状の電波窓では0.15Wの熱が流入することがわかった。そこで、クライオスタット内に楕円鏡を設置し、電波のビームをクライオスタット壁の窓面で小さく絞り込むことにより、電波窓の大きさを1/4程度に縮小し、熱流入を0.04Wまで下げた。

これらの熱設計により0.3Wの冷却能力でも十分安定に4Kの極低温状態を維持する事が可能となった。

観測装置に用いるクライオスタットは、単に極低温を維持できるだけでは不十分であり、超伝導ミキサや冷却アンプ等をクライオスタット内に脱着するための操作性も考慮した設計を行わなければならない。物性実験などで用いるクライオスタットは円筒形のものが多いが、円筒形では側面からのアクセスが困難である。そこで、本観測装置のクライオスタットは図5に示すように直方体のリブ構造にパネルを貼る形状とした。これにより側面からクライオスタット内にアクセスするのが非常に容易となる。また図6に示したように直方体の側面の角の部分削り、

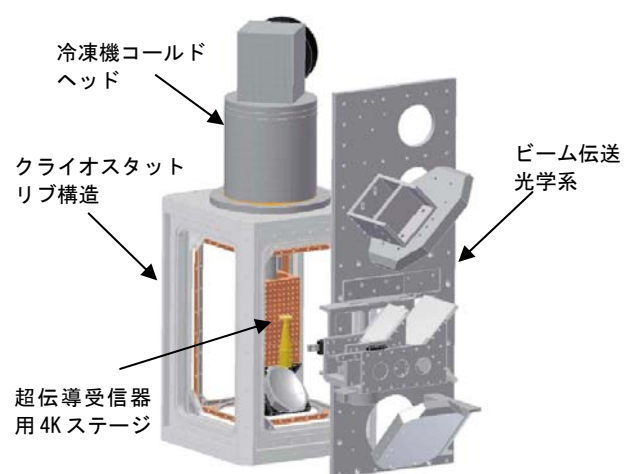


図5. 小型ミリ波大気観測装置用クライオスタット

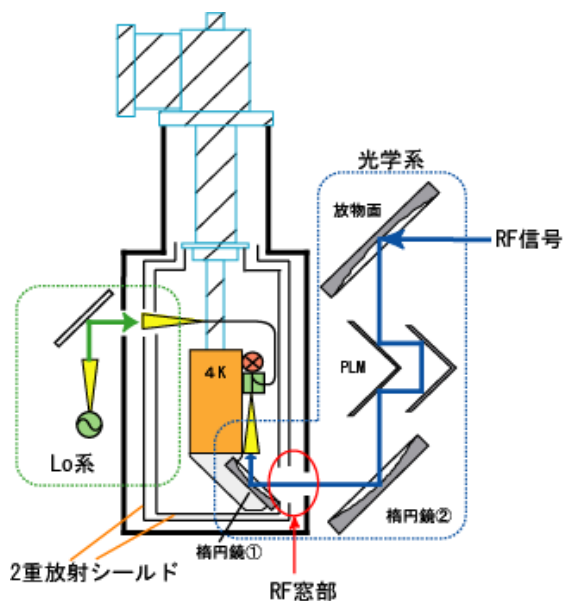


図6. 小型ミリ波大気観測装置全体の概念図

ここに容易に着脱できる支持脚を固定することにより可搬性を高めた。またクライオスタットは、この支持脚を保持する観測装置の構造体でもあり、4つの側面をそれぞれビーム伝送系入力部、局部発信器信号系入力部、バイアス制御部、中間周波数信号系出力部として使用することにより全体のコンパクト化に貢献している。

また従来のミリ波受信器のクライオスタットの多くが冷凍機を上向きに置いていたのに対し、冷凍機を下向きに置いているのも本観測装置の特徴のひとつである。これは、GM 冷凍機は、下向きに置いた場合が He にかかる重力のため冷却効率が最も高く安定するためであり、冷凍機の潜在能力を最大限に引き出すためである。このため 4K ステージは下側に位置し、大気分子からの電波の入力窓も下側に作られる。そこで、従来の観測機では、光学定盤上に平面に配置されていた楕円鏡や放物面鏡などで構成されるビーム伝送系を鉛直方向に展開し、放物面鏡の高さを従来機と同程度の高さにまで持ち上げる設計とした。これにより、従来機と同程度の高さの実験室の窓から屋外の大気を見る事ができ、さらに、平面にビーム伝送系を配置していた場合に比べて、占有床面積を小さくする設計が可能となった。

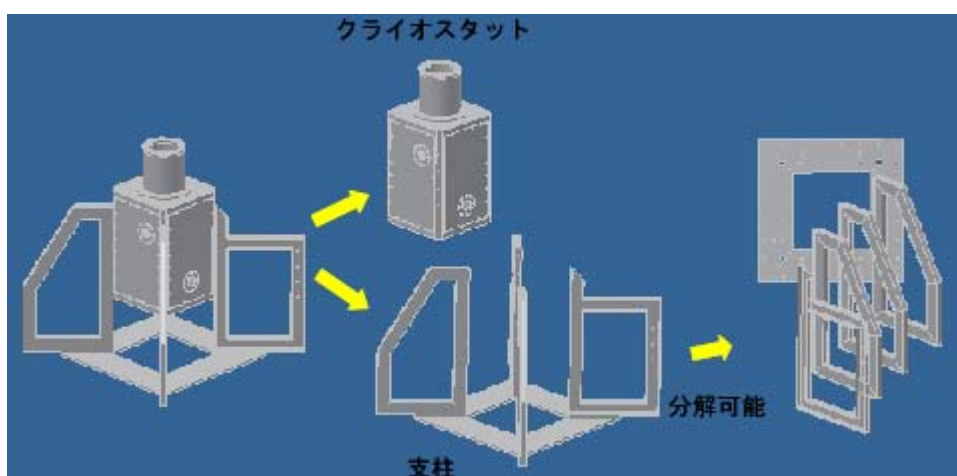


図 7. 容易に分解組み立てが可能な可搬型構造

図 8, 9 に、クライオスタット内に超伝導ミキサおよび冷却アンプ等の実際の受信器をセットアップし、動作時と同じ熱負荷を与えた状態での冷却特性および最低温度到達時の温度振幅を示す。従来の CREST で開発した観測装置の温度振幅は $\pm 50\text{mK}$ (peak-peak) 以下に抑えられ、超伝導受信器の安定動作のためには、同レベル以下の温度振幅に抑えなければならない。本クライオスタットは 7.5 時間程度でほぼ 4K まで達した後ゆっくり冷え、冷却開始から 13.5 時間程度で最低到達温度に達する。最低到達温度達成後の温度振幅は 20mK 以下と、GM-JT 冷凍機より振幅が小さい安定した状態が達成できている。

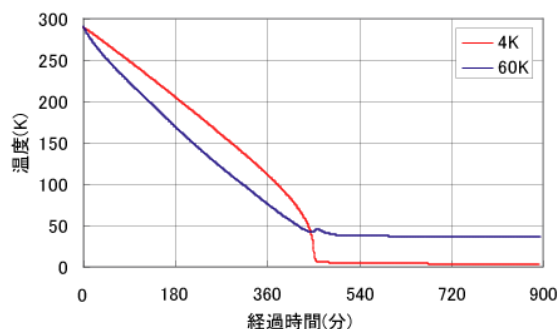


図 8. 冷却時間と各ステージの温度。実際の受信器コンポーネントを搭載した状態での実負荷特性。

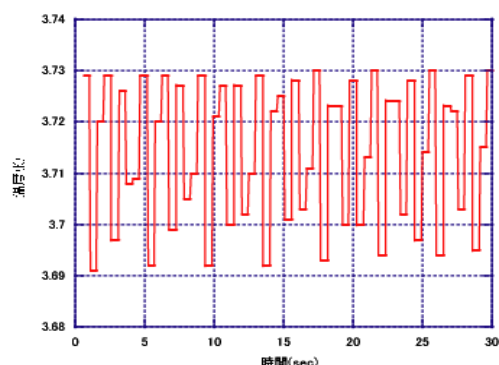


図 9. 実際の受信器コンポーネントを搭載した状態での 4K ステージの温度振幅。

完成したクライオスタット内に100GHz帯の超伝導受信器を、さらに局部発振器信号計、ビーム伝送光学系、バイアス制御ボックスをクライオスタット側面に搭載し、評価を行った。図10-13に組み上げた小型ミリ波大気観測装置全体および各コンポーネントの写真を示す。また図14に超伝導受信器の電流-電圧特性と電圧-中間周波出力特性を示す。これらの特性からも超伝導受信器が約4Kの超伝導状態に達し、正常に動作していることが確認できた。また図15にオゾンスペクトルの周波数である110GHz帯におけるビーム伝送系の放射パターンの測定値を示す。現時点では、設計値と若干の差が見られ、さらなる最適化調整が必要だが、半値幅で2.3度程度のビームが得られている。途中の光路長変調器部分での損失が0.2-0.3dB程度と見つめられた。放物面鏡の位置で常温黒体と液体窒素温度の冷却黒体の出力値から求めた受信機雑音温度は70K(DSB)で世界トップクラスの非常に良い値が得られている。

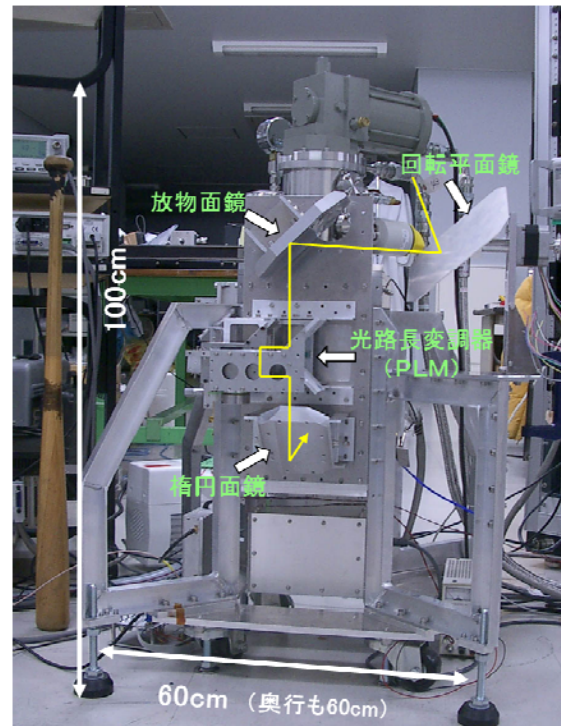


図10. 全体が組上がった小型ミリ波大気観測装置。黄色の矢印は、大気からのミリ波の信号の伝搬経路を表す。

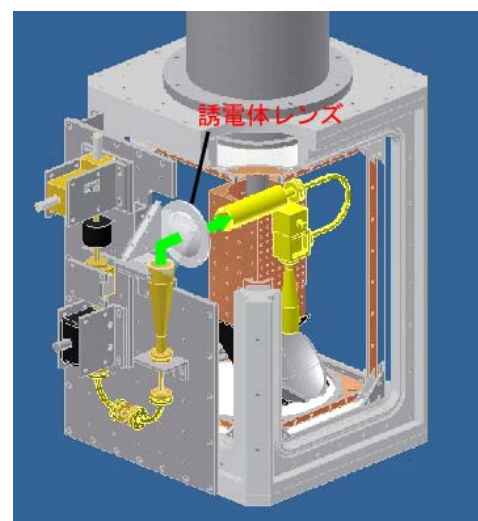
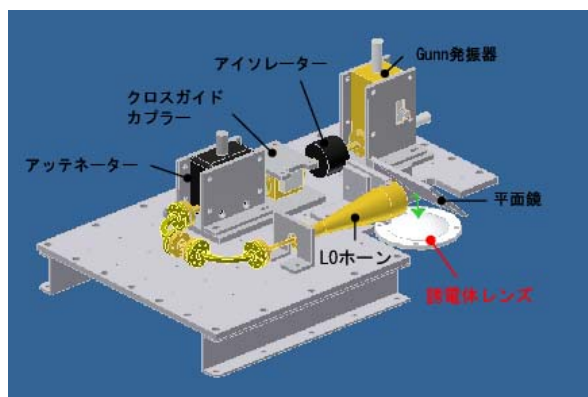


図11. 準光学的にクライオスタット内に基準信号を導入する局部発振器信号系の概念図（上2枚）と実際に小型ミリ波大気観測装置に設置された局部発振器信号系（左）。

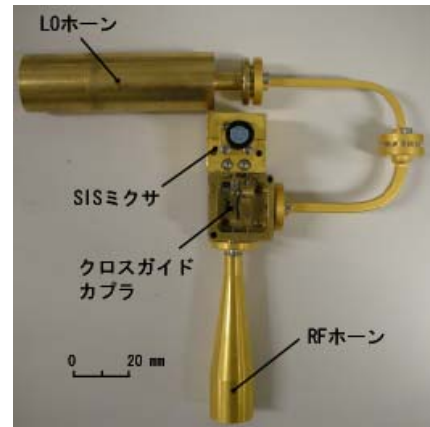
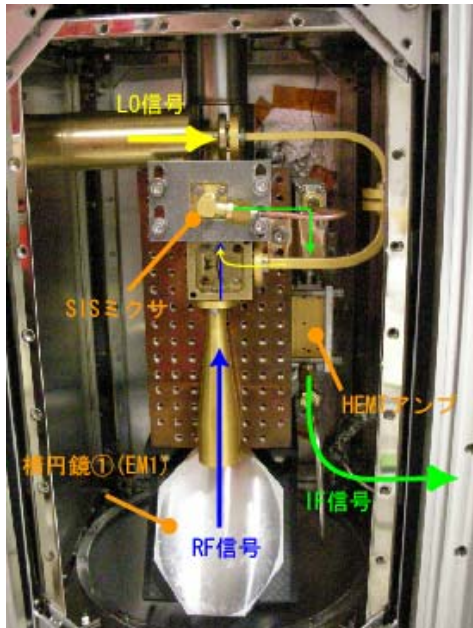


図 12. (左) クライオスタット内にセットアップした超伝導受信器 (SIS ミクサ)、冷却 HEMT アンプと第 1 楕円鏡。側面の 60K 放射シールドを取り外したところ。(上) 超伝導受信器と大気からの信号入力部の RF ホーンと局部発振器信号入力部の L0 ホーン。

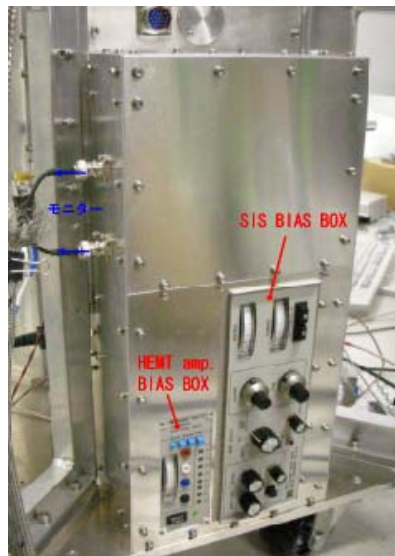


図 13. ビーム伝送系の反対側の側面に取り付けられた SIS ミクサおよび冷却 HEMT 受信器のバイアスボックス。外来ノイズの混入を妨げるため電磁シールド箱内に収納している。

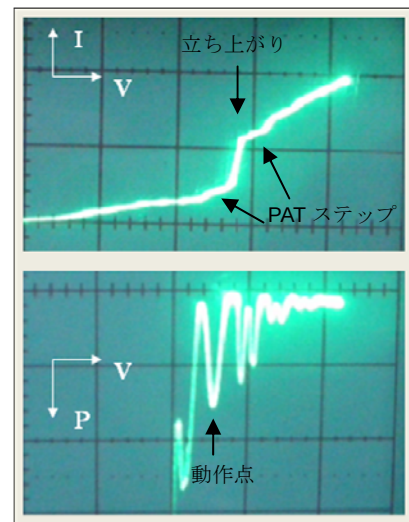


図 14. (上) 局部発振器信号を入れた際の SIS ミクサの電圧－電流特性。SIS ミクサに特有の強い非線形性 (中央付近の立ち上がり) とフォトンアシステッドトンネリング (PAT) ステップ (矢印) が見られる。(下) SIS ミクサの電圧－IF 出力特性。電流の立ち上がり電圧の直前の動作点バイアスできれいな出力が見られる。

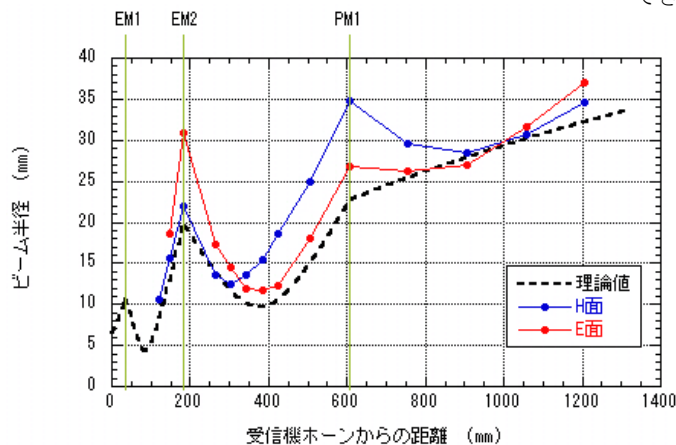


図 15. RF ホーンからの距離とビーム半径 (電波強度が $1/e^2$ に落ちる半径) の関係。E 面, H 面は超伝導ミクサの矩形導波管の方向で定義される向きで、H 面はクライオスタット電波窓の場所では水平方向、E 面は鉛直方向に対応する。EM1, EM2 は第 1, 第 2 楕円鏡の位置、PM1 は放物面鏡の位置をあらわす。

A-3 分光計のデジタル化

分光計も小型化を進める上で重要なポイントである。背景の部分でも述べたように、ミリ波大気観測ではスペクトル線の線幅は微量分子の存在する高度によって異なり、この性質を用いて微量分子の高度分布を求める。高度 15km 程度の下部成層圏の分子を定量するためには 1GHz 程度の周波数帯域をカバーする必要があり、また高度 70km 程度の中間圏の分子を定量するためには数百 kHz の周波数分解能が必要とされる。これがミリ波大気観測に用いられる分光計の条件となる。

従来使用していた音響光学型分光計は、超伝導受信器からの出力信号を圧電素子で機械的な振動に変換し、音響光学偏向素子(ブラッグセル)内に疎密波をたたせ、この疎密波が回折格子の役割を果たし、偏向素子に入射するレーザー光の回折光の回折角と強度から入力電波のスペクトル情報を得るものである。レーザー光のわずかな回折角と強度を測定するため、音響光学型分光計は除震台の上に設置された光学定盤上に構成され、スペースとしては最低でも 1m² 程度、重量としては 250kg 程度を占めていた。また、音響光学型分光計はレンズ光学系の微妙な調整を必要とし、最適化調整には専門的な熟練を要する。これもミリ波観測装置の遠隔地への設置に対する大きな障壁の一つであった。

上述のようなアナログ的な分光計を用いずにデジタル的に信号処理ができれば、スペースと重量の大幅なダウンサイジングが期待できるが、1GHz の周波数帯域をカバーするためには、2GHz 以上の高速の A/D 変換や高速フーリエ変換が必要となる。最近のデジタル技術の進歩により、ここ 1、2 年の間にこのような高速サンプリングが可能な A/D 変換機や高速フーリエ変換機が市場に出回るようになってきた。そこで、我々はアキリス社（現在はアジレント社に吸収された）の高速フーリエ変換機を導入し、デジタル分光計として本観測装置に組み込んだ。超伝導受信器からの出力信号を中心周波数 500MHz の信号に変換し、高速フーリエ変換機への入力レベルを変化させ、入出力の線形性を調べ、大気観測の分光計として必要な線形性を保証する最適な入力レベルを実験的に導出した。また、高速フーリエ変換機の制御・データ読み出し・積分を行うプログラムを開発した。デジタル分光計はデスクトップ PC 1 台とほぼ同程度の大きさで重量をもち、音響光学型分光計と比較して大幅な省スペースと軽量化を実現した。

電波的な性能においてもデジタル分光計は、音響光学型分光計と同じ 1GHz の広い周波数帯域をカバーしつつ、周波数分解能は約 60kHz と同じ帯域幅をもつ音響光学型分光計の分解能(約 1MHz)よりも 16 倍高い。出力ドリフト等による時間変動を示す尺度であるアラン分散最下点までの到達時間が 1000 秒以上と音響光学型分光計の数十秒という典型値よりも長く安定している。これにより、高度角スイッチング観測などのスイッチング時間を 100 秒オーダーまで延ばすことができ、スイッチングに伴う観測のデッドタイムを減らし観測効率を向上させることが可能となる。また、入出力の線形性も音響光学型分光計よりも優れ、実際の電波信号を入力し分光計の線形性を評価したところ、デジタル分光計の入力レベルで -40dBm から -20dBm の範囲で全チャンネルにわたって高い線形性が得られていることを確認した。しかしながら、アキリス社の高速フーリエ変換機は、内部の FPGA 素子の発熱が大きく、気圧が 700hPa(標高 3 千メートル程度)では FPGA 素子の動作保証温度である 55 度に到達し、正常に動作しないことが我々の減圧チャンバーを用いた評価実験より明らかになった。ミリ波観測装置は大気吸収の少ない高地に設置するケースが少なくない。我々は、デジタル分光計内部のボードに放熱フィンを取り付け、外部にシロ



図 16. デスクトップ PC サイズのデジタル分光計。

ッコファンを増設することにより、周囲気圧が 385hPa、周囲温度が 30 度の測定条件のもとで、FPGA 温度が 54 度を上回らないように放熱系の改良をおこなった。これにより、標高 4,800m のアタカマ高地 (560hPa 程度) でも問題なく使用可能な分光計として完成させた。

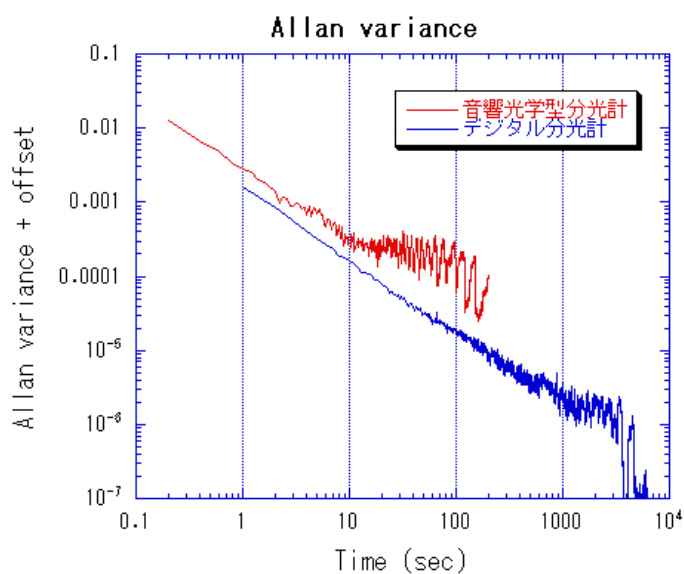


図 17. デジタル分光計と音響光学型分光計のアラン分散測定結果。音響光学分光計が 10 秒程度で極小値を取るのに対し、デジタル分光計は 1000 秒程度まで単調減少し、高い安定性を有していることがわかる。

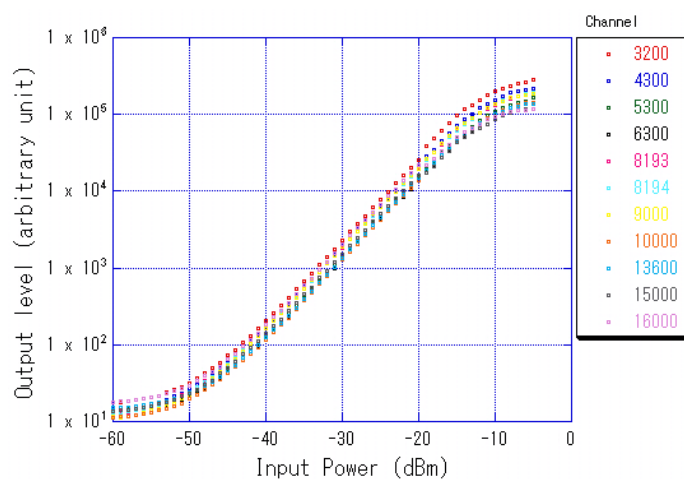


図 18. デジタル分光計のいくつかの代表的な周波数チャンネルにおける入力レベルー出力レベル特性。ホワイトノイズを入力した時の測定値。全帯域にわたり、入力パワーが-40dBm から-20dBm の範囲内で線形性が良いことがわかる。

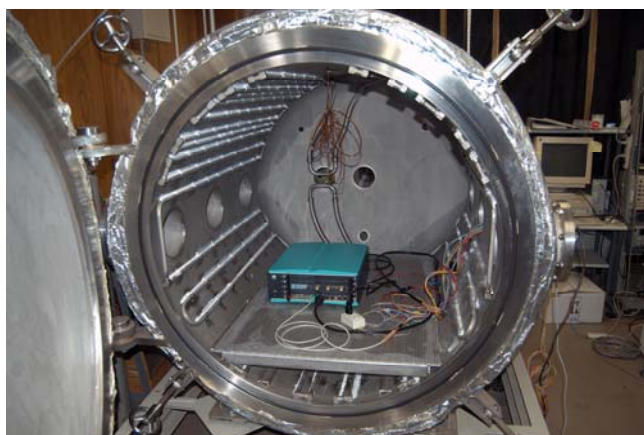


図 19. 減圧チャンバーを用いたデジタル分光計の環境試験。

B. チリ共和国アタカマ高地での大気微量分子観測

B-1 背景

先の CREST において我々はチリ共和国の中緯度帯に位置するラス・カンパナス天文台において人為起源のフロンによるオゾン破壊過程を調べる上で重要な一酸化塩素(C10) スペクトルを南半球中緯度帯で初検出した。標高 2,500m のラス・カンパナス天文台は、下層大気の透明度が高く 200GHz 帯の観測条件が良好で、国内では実際の試験観測を行うのが困難な同周波数帯の観測装置の評価を効率的に行うことができた。

図 20 に大気微量成分の世界的な観測ネットワークである NDACC(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change:大気組成変動検出のためのネットワーク)のミリ波・マイクロ波測定拠点のマップを示す。図からもわかるようにミリ波・マイクロ波観測点の多くは北半球に集まっており、南半球は測定点が少ない。我々の観測点は南米に位置する唯一の観測点としてユニークな位置を占めており、南米チリでの観測を継続することが重要である。ラスカンパナス天文台において観測室として使用していた名古屋大学なんてん望遠鏡がサブミリ波天文観測のために、2004 年にチリ北部のアタカマ高地に移転することが決まり、ミリ波大気観測装置も併せてアタカマ高地に移設することとなった。

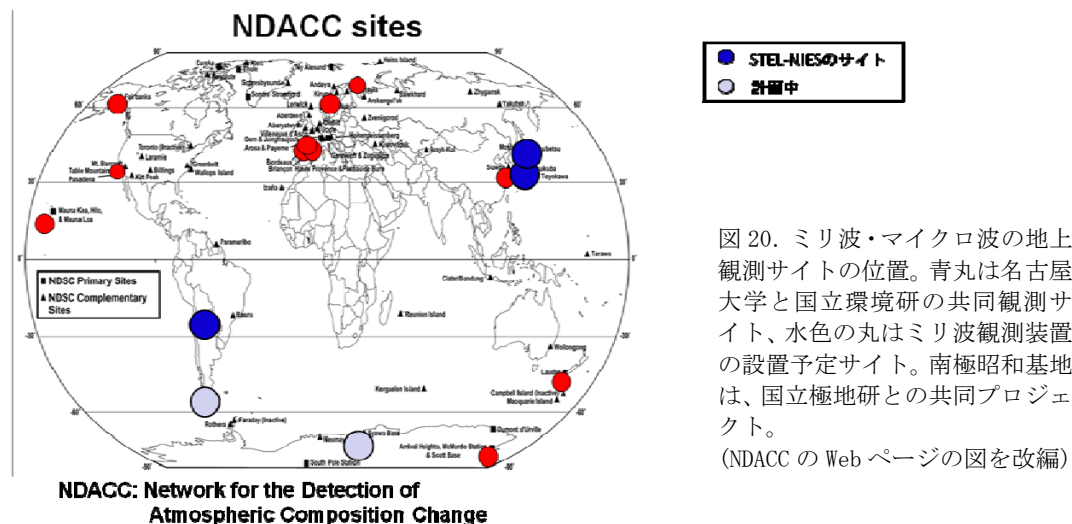


図 20. ミリ波・マイクロ波の地上観測サイトの位置。青丸は名古屋大学と国立環境研の共同観測サイト、水色の丸はミリ波観測装置の設置予定サイト。南極昭和基地は、国立極地研との共同プロジェクト。
(NDACC の Web ページの図を改編)

アタカマ高地は、標高 4,800m の高地で気圧が平地の半分程度であり、ミリ波帯の電波を吸収する下層大気中の水蒸気量も同様に少ないため、中層大気のミリ波観測に非常に適した場所である。さらに、アタカマ高地はアタカマ砂漠の南に位置し、高い晴天率を誇っている。世界的にもミリ波観測サイトとして 1, 2 を争う好条件を有しており、スペクトル強度の弱い稀少微量分子のミリ波観測を行う最適地と言える。また、南緯 23 度の亜熱帯域に位置し、南半球の中緯度帯でかつ赤道帯からの影響も受けやすい場所として他に類を見ないユニークな観測点でもある。また、ブラジル磁気異常帯にも極めて近く、磁気嵐などに伴い降り注ぐ高エネルギー電子が窒素分子や酸素分子を電離して生成される NO_x や HO_x が大気組成に与える影響を観測的に調べることができる可能性も秘めている。

このような世界的に見てもユニークな場所であるアタカマ高地に我々は新たな観測拠点を整備し、成層圏水蒸気を柱とした観測計画を立案した。成層圏水蒸気は、HO_x のソースとして成層圏上部および中間圏のオゾン化学で重要な役割を果たし、また温室効果ガスとして放射バランスにも影響を与える。また、成層圏の寒冷化に伴い、成層圏水蒸気が増加すると極域成層圏雲(PSC)の形成が促進され、PSC 表面の不均一反応に起因する南極オゾンホールで起きているオゾン破壊が南極のみならず北極でも起きる可能性が指摘されている。このように破壊されたオゾン層の回復は、オゾン自身とその根源であるフロンから放出された塩素化合物のみならず、水蒸気のふるまいも併せて観測し、総合的に理解する必要がある。

成層圏水蒸気量の観測は、観測の難しさから十分なデータが集められているという状況

ではまだないが、現在人類が手にしているデータから、1990年代半ばまでの20年あまりの間、年率1%程度で増加を続け、1990年代末ごろから減少傾向に転じたと見られている。成層圏水蒸気は、熱帯対流圏界面からの成層圏への流入と成層圏におけるメタンの酸化が、2つの主たる起源であると考えられているが、このような長期的な増加・減少傾向がどのようにして引き起こされているのかはまだ十分に解明されていない。そこで、我々はミリ波観測の最高の観測条件を誇るチリ共和国のアタカマ高地において、成層圏水蒸気の観測を柱に据えて観測を行うこととした。

B-2. アタカマ高地における観測拠点の整備

アタカマ高地への観測装置の移転は当初2003年度の後半を予定していたが、チリ政府およびCONYKIT（チリの文科省に相当）との行政上の手続きに時間を要し、2004年度になってから具体的な作業を開始した。アタカマ高地は、電波天文の日米欧共同プロジェクトであるALMA計画（アタカマ大ミリ波サブミリ波干渉計計画）の建設サイトでもある。我々はALMA望遠鏡建設予定地のチャナントール地区から10kmほど離れたパンパ・ラ・ボラ地区（標高4,800m）に観測装置を設置することとした。同地区には、2002年に国立天文台と大学の共同開発施設である、ASTE10メートルサブミリ波望遠鏡施設も設置されている。パンパ・ラ・ボラ地区は、チリと隣国アルゼンチンとの陸上交易道である国道から2km程度奥にはいった地域であり、車でのアクセスには恵まれた場所に位置している。最寄りの町（サンペドロ・デ・アタカマ）より車で1時間から1時間半ほどで観測サイトに登ることができる。しかし、標高4,800mで宿泊するのは危険であるため、観測サイトでの作業時間は1日あたり8時間までとし、宿泊地のサンペドロ・デ・アタカマとの間を毎日往復する必要があった。

アタカマ高地には、商用電線・通信ケーブル等は届いておらず、発電施設や通信施設などのインフラを自前で整備する必要があった。2004年度より、観測装置を設置するためのコンテナハウスの製作と設置、電源・通信ケーブルのコンテナハウスへの敷設、ラス・カンパナス天文台からアタカマ高地への観測装置の輸送、コンテナハウス内への観測装置の搬入、観測装置の再立ち上げ、試験観測を行った。電力施設は、発電機と軽油タンクをそれぞれ2機ずつ用意し、片側がメンテナンス等で停止しても、もう1台を運転することにより間断なく電力を供給できるようにした。また、アタカマ高地は極度に乾燥しているため、良好な接地を確保するのが困難であった。40m四方の銅のワイヤ線を地中に埋設し、さらに接地抵抗低減剤を用いることにより、接地環境の向上を図った。アタカマ高地は昼夜の温度差が20度程度あり、また冬季夜間には-20度程度まで気温が下がり、年に数回の1メートル前後の積雪があるため、日本国内では屋外に設置するチラーをそのまま屋外に放置することはできない。観測棟は20フィートと40フィートのコンテナハウスを並べ、20フィートコンテナ側を機械室とし、専用の放熱排気ダクトを取り付け、チラー等の屋外に設置する機器を収納している。



図 21. 上からアタカマ高地の大気観測棟、観測棟内、発電施設、通信施設の

観測機器設置当初は気圧の低下に伴い、電子機器や機械動力部の冷却効率が低下し、機器の故障や誤動作が発生したり、電波強度較正用の冷却黒体に使用する液体窒素の蒸発量が当時使用していた液体窒素製造装置の製造量をわずかに上回り連続観測途中で液体窒素が枯渇したりするなどの問題が見られたが、こまめに放熱ファンを取り付けたり、冷却機を増設して窒素液化装置の製造量を増やすなどの対策を施し、経験を積んだ。また、Webカメラや自作の機器制御インターフェイスボックスを介して観測装置の稼働状況や天候・大気の状態をモニターするためのプログラムを開発し、山麓のサンペドロ・デ・アタカマや日本から遠隔モニターおよび制御が可能なるようにした。ここで得たノウハウは、今後様々な環境の場所に設置することを念頭に置いている小型ミリ波観測装置の開発に役立っている。

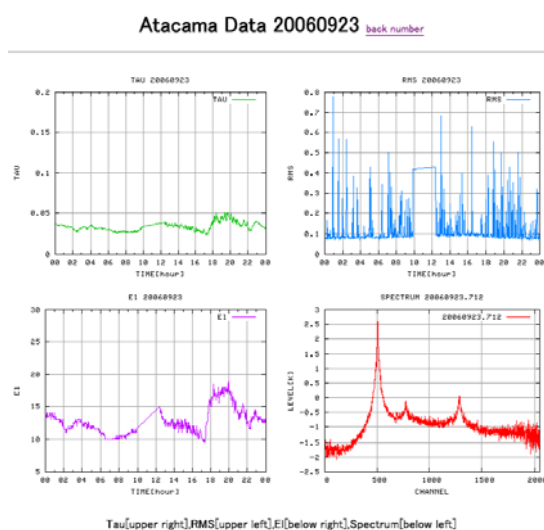


図 22. インターネット Web ページを用いた遠隔モニタ。大気吸収量（～光学的厚み）、観測高度角、観測データの rms ノイズの時間変化と最新の観測スペクトルをどこからでも常時モニタすることができる。

B-3. 183GHz 帯水蒸気 (H₂O) の観測

水蒸気は地表付近では数%から数分の1%と空気中に比較的多く含まれているが、高度12km程度までの対流圏では高度とともに急激に減少し、成層圏では数ppm程度の混合比でゆっくりと増加する。その後、高度50kmから80kmまでの中間圏では、水蒸気は徐々に減少していく。対流圏では高度とともに気温が減少して露点温度以下となるため、気温減少に伴って飽和水蒸気量が下がり、水蒸気混合比が急激に小さくなる。気温は対流圏界面でもっとも低くなるため、そこでの水蒸気混合比も最も小さくなる。対流圏の水蒸気は、積雲対流活動などの対流圏から成層圏への大気循環によって成層圏へ輸送されるが、このときの輸送される水蒸気量はもっとも小さい値となる対流圏界面での水蒸気混合比によって決まる。水蒸気混合比は気温に依存するため、輸送される水蒸気量は対流圏界面の気温の変化の影響を受けることが知られている。一方、成層圏では高度とともに水蒸気は増加する。これはメタンの酸化により水蒸気が生成されるためである。1つのメタン分子の酸化により2つの水蒸気分子が生成される。

地上からの成層圏水蒸気の測定法としては、気球に搭載した光学式の露点温度計による直接観測とミリ波・マイクロ波によるリモートセンシングが2つの方法がある。このうち、気球による直接測定は気球高度の限界から高度35km程度が上限となる。また、気球を用いるため、毎日連続的にデータを取り続けることは容易ではなく、観測はどうしても断片的にならざるを得ない。大気中の微量分子測定として多くの観測機関で使用されている赤外線フーリエ変換型分光計 (FTIR) は、対流圏水蒸気による吸収が大きいため地上からの観測は難しく、FTIRを用いて成層圏水蒸気の観測を行うためにはFTIRを気球に搭載して吸収が問題にならない高度まで測定装置を持ち上げなければならない。そこで、ミリ波・マイクロ波による観測は、地上から水蒸気を毎日連続的に観測するほとんど唯一の手段となっている。

現在、他機関で観測されている水蒸気のスペクトルは22GHz帯のマイクロ波のH₂Oスペクトルである。H₂Oスペクトルとしては他に183GHz帯に強いスペクトルがあり、22GHz帯のスペクトルに比べ、その強度は2～3桁強い。ただし、183GHz帯のH₂Oスペクトルは自分自身による吸収を強く受けるため、標高が低い平地での観測は事実上不可能であり、22GHz帯のスペクトル線が広く観測されている。しかし標高4,800mのアタカマ高地では、

下層大気による吸収が少ないため、この 183GHz 帯の H_2O スペクトルの連続観測が可能と期待される。そこで、我々は、この可能性を評価するために、アタカマ高地における 183GHz 帯 H_2O スペクトルの観測を行った。

先の CREST の観測のメインターゲットであったオゾンや一酸化塩素 (ClO) の観測には高度角スイッチング法が最も有効な観測法であった。低い高度角では大気の視線方向の光路長が長くなり、高い高度角にくらべて光路長が長い分だけスペクトル強度が強くなる。高度角スイッチング法は 2 つの異なる高度角のデータを差し引きすることにより、この光路長差に対応するスペクトル成分を検出する方法である。成層圏に多く存在し対流圏での吸収がほとんど問題にならないオゾンや ClO では低高度角でのスペクトル強度は光路長にほぼ比例するが、水蒸気のように対流圏に多量に存在し対流圏成分の自己吸収が大きいスペクトルの場合、低高度角では対流圏での吸収量も同じように光路長に比例して増加するため、オゾンや ClO の場合とは逆にスペクトル強度は弱くなる。そのため、対流圏に多量に存在する水蒸気に対して高度角スイッチング法は有効な観測法とは言えない。そこで、種々の高度角で観測されると期待される水蒸気スペクトルをフォワードモデルで計算し、その結果を基に観測法に改良を加えた。その結果、高度角 70 度以上の信号と冷却黒体の信号を差し引きする冷却黒体スイッチング法が 183GHz 帯水蒸気の観測には最も有効であることが明らかになった。

図 23 に冷却黒体スイッチング法により取得したスペクトルとそのスペクトルのリトリバル解析により求めた水蒸気の鉛直分布を示す。この観測には新設計の PCTJ-SIS 素子を用いた固定バックショート型の両サイドバンド受信器を用いた。スペクトル線の強度を見積もる際に下層大気による吸収量の補正を行う必要があるが、大気の吸収量（～光学的厚み）が水蒸気サイドバンドとイメージサイドバンドで大きく異なりイメージバンドからの寄与により実際の吸収量よりも小さめに観測される。そこで今回はスイスアルプスにおける 183GHz 水蒸気の観測結果である Siegenthaler et al. (2001) のスペクトル強度と比較することにより、大気の光学的厚みが 1.0 から 1.2 程度として鉛直分布を求めた。より精確な鉛直分布の導出のためには、片サイドバンド受信器を用いて水蒸気サイドバンドのみの大気吸収量を測定する必要がある。我々は 110GHz 帯で受信機の片サイドバンド化に成功したが、これを 183GHz 帯において実用化することが今後の課題である。また、今回の試験観測から 200GHz 付近の光学的厚みが 0.2 程度の比較的悪い（通常的光学的厚みは 0.1 以下）観測条件のもとでも H_2O スペクトルが観測でき、鉛直分布の導出ができたことから、200GHz 付近の光学的厚みが 0.2 を大きく超える夏場の 1 か月程度を除いて 183GHz の H_2O スペクトルの連続観測が十分可能であることが明らかになった。

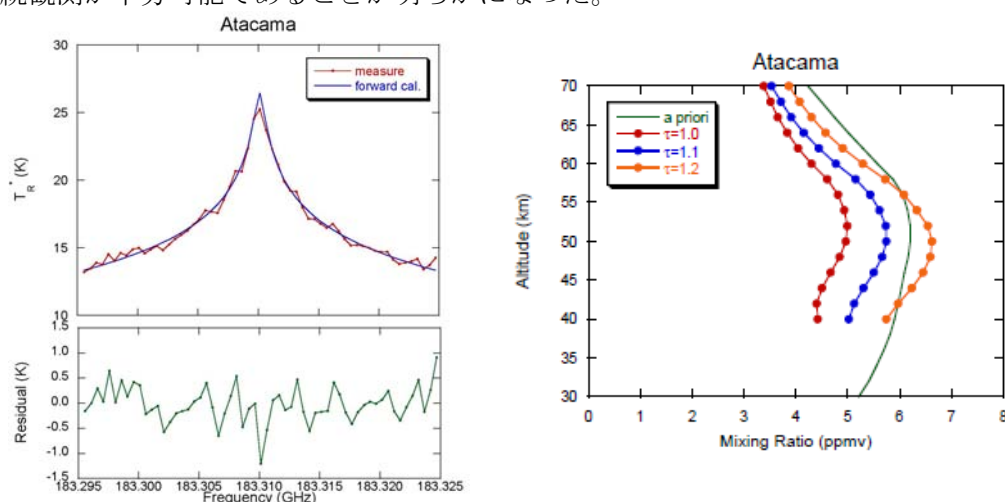


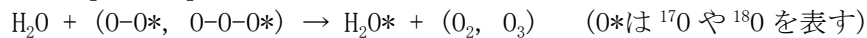
図 23. (左) 2005 年 12 月 7 日に冷却黒体スイッチング法によって取得された 183GHz 帯水蒸気スペクトルに対してリトリバルを行った例。下は測定データとフィッティングした結果の残差を示す。(右) 解析の結果得られた成層圏水蒸気の高度分布。大気の光学的厚みが 1.0, 1.1, 1.2 に対応する場合をそれぞれ示している。実線は初期推定値。

B-4. 水蒸気同位体 H_2^{18}O の観測

自然界の分子・原子には、構成する原子の原子核内の中性子数が異なる同位体が存在する。同位体には、固有のタイムスケールで放射線を出し崩壊して別の原子に変化する放射性同位体と、崩壊せずに安定して存在する安定同位体がある。水蒸気を構成する水素には、質量数 1 の水素 H と質量数 2 の重水素 D がある。そして酸素には自然界に最も多く存在する質量数 16 の ^{16}O 、存在量が最も少ない(^{16}O の 0.04%程度)質量数 17 の ^{17}O 、存在量が ^{16}O の 0.2%程度の質量数 18 の ^{18}O が安定同位体として存在している。水蒸気の安定同位体としてはこれらの組み合わせが存在する。

水蒸気同位体は化学的に同じ性質、すなわち水としての性質(物性)を持つが、各々の質量の違いによりわずかではあるが異なった振る舞いを示すことがある。たとえば、質量が違ふと動きやすさ(慣性)が異なるため、軽い同位体は重い同位体よりも並進運動の速度が大きくなり、液体の表面から離脱しやすくなる。すなわち、軽い水蒸気同位体ほど蒸気圧が大きくなり、軽い水の方が蒸発しやすい(=凝結しにくい)。蒸発あるいは凝結した水蒸気だけを取り出すと、蒸発(あるいは凝結)前の水蒸気と異なる同位体比を持つようになる。このような過程はレーリー分別と呼ばれ、アイスコアなどの $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 同位体比から過去の気温変動を推定する場合にも用いられている。また、同位体の質量比が異なることにより、分子を構成する原子間の結合ポテンシャルも若干変化する。これは、紫外線などによる分子の光解離過程を考えた場合、解離を引き起こす紫外線の閾値となる波長が同位体により異なることを意味し、光解離過程でも同位体の分別が起きることを示している。

安定同位体は、放射性同位体のように時間が経過しても別の原子に変化することがないため、水蒸気分子単体では同位体の変化は起こらない。しかし、他の分子との化学反応により同位体比が変化することがある。たとえば、メタンの酸化により水蒸気が生成されるときに、メタン分子が重水素 D を含んでいる場合に生成される重水 HDO や、周囲のオゾンや酸素分子が ^{17}O や ^{18}O を含んでいる場合に、 H_2^{16}O 分子がオゾンや酸素分子との交換反応を通して H_2^{17}O や H_2^{18}O に置換される。



安定同位体分子の存在比(同位体比)は、このような同位体分別や化学反応を通して変化する。

成層圏水蒸気の主要な起源は、対流圏からの流入と成層圏でのメタン酸化による生成のふたつである。対流圏界面から成層圏に流入する際、レーリー分別により、軽い水蒸気は圏界面を通りやすく、一方重い水蒸気は凝結して対流圏にとどまりやすい傾向を持つ。そのため、対流圏から流入する水蒸気は軽い水蒸気の存在比が大きくなる。一方、成層圏で酸化され生成された水蒸気同位体比は、成層圏に元々存在するメタンの同位体比や酸素同位体の交換反応の相手であるオゾンや酸素分子の同位体比に近づくと考えられる。このように、水蒸気同位体比は、水蒸気がどのような輸送経路をたどってきたか、またどこで生成されたかによって異なると考えられる。そこで、水蒸気分子の同位体対比の高度別時間変動は、成層圏水蒸気の生成メカニズムをより深く理解する知見を与えてくれると期待される。

H_2^{18}O の回転遷 ($3_{13}-2_{20}$) スペクトル(周波数 203.40752GHz)の観測を 2006 年 9 月から 12 月にかけて行った。図 24 に観測スペクトルの生データの典型例を示す。観測は H_2O 観測と同じ PCTJ-SIS 素子を用いた固定バックショ

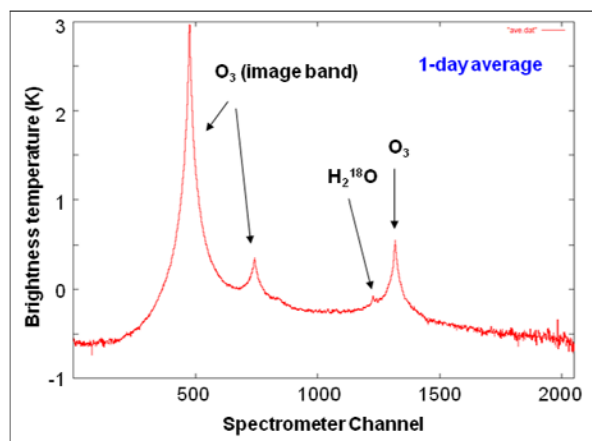


図 24. 典型的な H_2^{18}O の観測生データ。1 日分のデータを積分したもの。オゾンスペクトルに比べ、 H_2^{18}O スペクトルの強度が弱いことがわかる。

ート型の両サイドバンド受信器を用いた。4本のスペクトルのうち3本はオゾンのスペクトルで左側2本はイメージサイドバンドからはいっているものである。図からもわかるように、 H_2^{18}O スペクトルの強度は 50mK 程度と非常に弱い。1日分のデータを積分し、鉛直分布の解析を行った。また、 H_2^{18}O は右側のオゾンスペクトルのローレンツプロファイルの裾に位置しており、両者の周波数は 45.639MHz しか周波数が離れていないため、 H_2^{18}O とオゾンの両方の鉛直分布を同時にリトリーバルするアルゴリズムを開発した。まず、両者の周波数差が量子力学的に厳密に決まることを利用し、観測データの周波数軸の再較正を行った。これにより、音響光学型分光計の周波数ドリフトを精確に補正することができた。また、解析を通して、観測スペクトルとリトリーバル結果からフォワードモデルにより計算したスペクトルの残差を調べていくことにより、周波数ベースラインに観測装置起源(光学系の定在波および受信機・分光計の非線形性成分による)と考えられる「うねり」の成分($\sim 20\text{mK}/270\text{MHz}$ peak-to-peak)が見られたため、このうねりの成分を三次関数フィッティングし除去したのちにリトリーバルを行うこととした。なお、鉛直分布をリトリーバルするのに必要な気温および圧力のデータは、高度 30km までについてはアタカマ高地の測定点におけるそれぞれの観測日のデータを NCEP(National Centers for Environmental Prediction)の再解析データから求め、それを CIRA86 により 30km 以上まで外挿したものをを用いた。

図 25 にリトリーバル解析をした観測スペクトルとリトリーバル結果からフォワードモデルにより計算したスペクトル、および両者の残差を示す。また、図 26 に、15 日分の鉛直分布のリトリーバル結果を示す。40km より下で解析結果が乱れているのがわかるが、この高度域は線幅が 10MHz から数十 MHz に対応し、約 45MHz 離れたオゾンスペクトルの裾の影響を完全に除去できていないためだと考えられる。そこで今回は 40km 以上の解析結果を用いることとした。高度分解能は高度 40km で 20 km、高度 50km で 20km、高度 60km で 29km である。

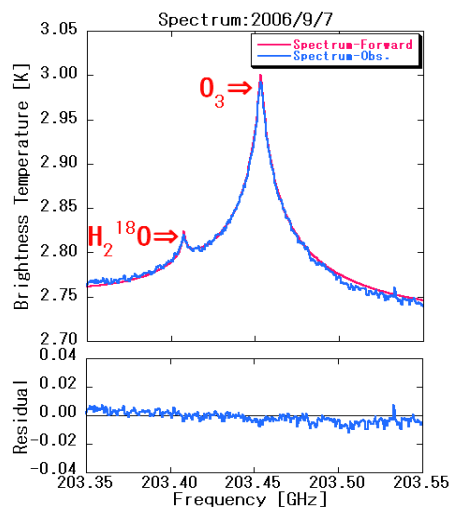


図 25. H_2^{18}O とオゾンスペクトルのリトリーバル解析例。上のグラフの青線が実際の観測スペクトル、赤い曲線は解析結果をもとにフォワードモデルで計算したスペクトル。下は両者の残差。

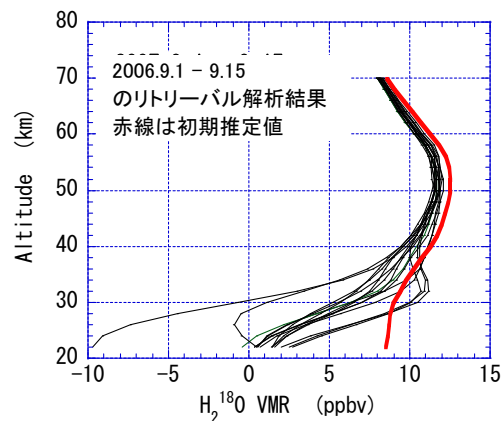


図 26. リトリーバル解析で求めた 2006 年 9 月 1 日から 9 月 15 日の間の H_2^{18}O の鉛直分布。

図 27 に 2006 年 9 月から 12 月末までの 4 か月間の H_2^{18}O の高度別時間変動と 40km, 50km, 60km の高度ごとの H_2^{18}O と H_2O 混合比の時間変化を示す。 H_2O のデータは Aura-MLS のデータ (Ver1.5) より、アタカマ高地上空のデータを抽出し、我々のリトリーバル解析の高度分解能でスムージングをかけたものである。50km, 60km では、 H_2O および H_2^{18}O ともに 9 月初めから 12 月末の 4 ヶ月の間に大きな変化はなく、ほぼ一定で推移しているのに対し、高度 40km では H_2^{18}O は $\sim 4\%$ /月程度の増加傾向、一方 H_2O は $\sim 0.9\%$ 程度の減少傾向を示しているのが大きな特徴である。これは 2003 年にラスカンパナス天文台の観測で得られた結果と基

本的には同じ傾向である。同位体比を考えたとき H_2^{18}O の混合比は H_2O より 3 桁あまり小さく、 H_2O が高度 40km で減少していることは、春から夏にかけて水蒸気のソースが減少していることを示しており、この場合 H_2^{18}O も同様に減少すると考えられる。しかしながら、実際は H_2^{18}O 混合比は増加している。これは春から夏にかけて H_2O を H_2^{18}O に置換するような酸素同位体の交換反応が高度 40km 付近で選択的に起きていることを示唆する初めてのデータである。

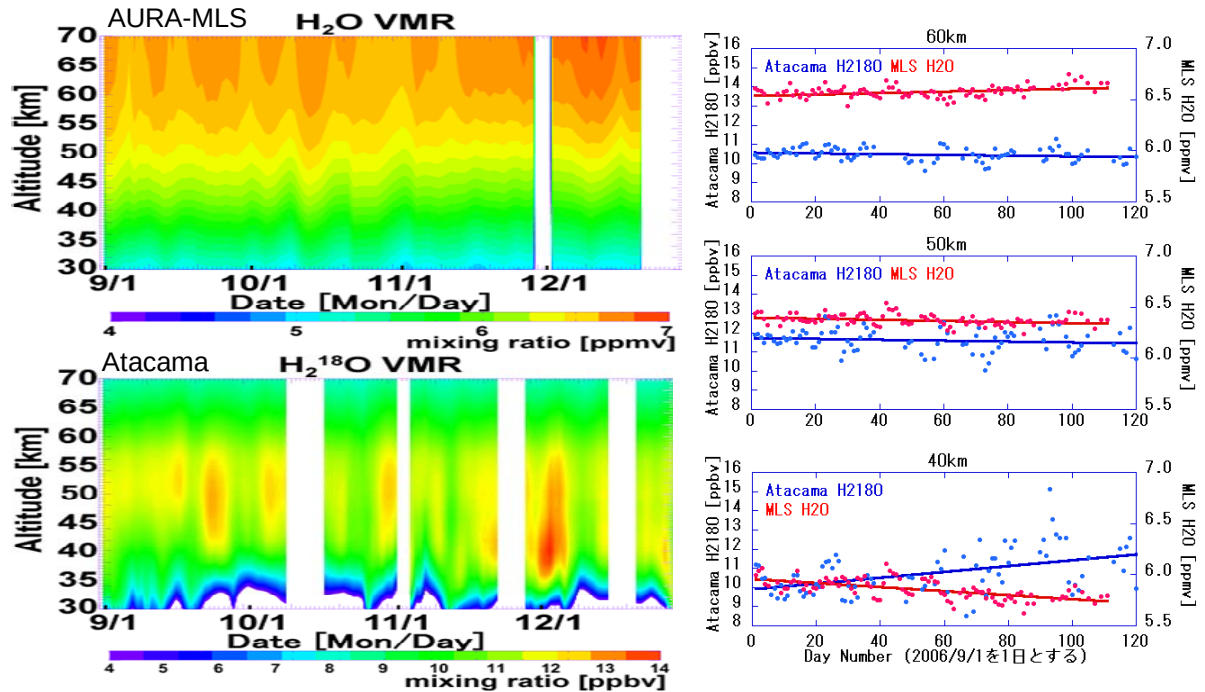


図 27. Aura-MLS の H_2O 鉛直分布 (Ver1.5) を我々の観測と同じ高度分解能でスムージングし 3 日間移動平均を取った鉛直分布の時系列変化 (上) と我々のアタカマ高地での H_2^{18}O の結果を 3 日間移動平均した鉛直分布の時系列変化 (下)。右の 3 枚の図は、高度 40km, 50km, 60km における H_2O と H_2^{18}O の混合比の時系列変化をそれぞれプロットしたもの。2006 年 9 月から 12 月のデータ。

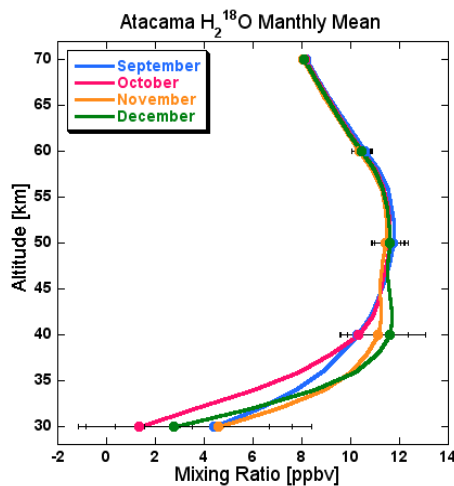


図 28. 2006 年の 9 月から 12 月のアタカマ高地での H_2^{18}O 混合比の鉛直分布の月別平均。9 月から 12 月にかけて 40km 付近の H_2^{18}O 混合比が増加していることがわかる。

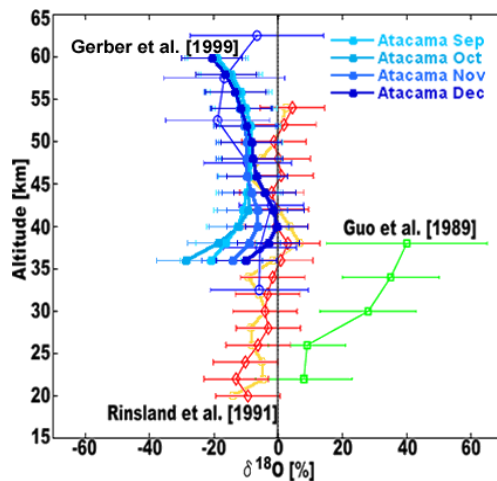


図 29. ^{18}O 同位体偏重度 ($\delta^{18}\text{O}$) の過去の観測データとの比較。Guo et al. は最も初期の観測で気球に搭載した遠赤外線干渉計によるデータ。Rinsland et al. はスペースシャトルからの赤外線観測。我々のアタカマの観測に近い Gerber et al. の観測は標高 3500m ほどのスイスアルプスで 取得されたミリ波の観測である。

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

先の CREST からの継続課題であった、観測装置の小型化省電力化、そして分光計の小型化、稼働調整機構を取り除いた広帯域固定バックショートミキサの開発を実現し、贅肉を落とした測定システムを完成させることができた。また実験・評価を通して、ビーム形状の測定法やミリ波曲面鏡の3次元形状測定など先の CREST では十分詰めることができなかった部分の測定法のノウハウを確立することができた。また、アタカマ高地における観測拠点開発では、遠隔地において観測装置を立ち上げる際に遭遇すると考えられる種々の問題を実際に体験することができ、開発を進める上で非常に役に立った。

アタカマ高地の観測で得られた春から夏にかけての H_2^{18}O の増加という新たな知見をどう解釈すべきか、まだ十分な答えが得られていない。水蒸気の ^{18}O 同位体の交換反応は、光解離や $\text{O}(^1\text{D})$ との反応で水蒸気が OH に分解された後に再び水蒸気に戻る際に ^{18}O を含んだ ^{18}OH によって水蒸気が作られることにより ^{16}O から ^{18}O への交換がなされる。そのため、成層圏における ^{18}OH の量を何が決めているかが重要になる。Kaye (1990) などによれば、酸素分子 O_2 と H との反応の方がオゾン O_3 と H との反応よりも反応レートが高く、酸素分子の ^{18}O 同位体比が支配的と考えられているが、 O_2 と O_3 の ^{18}O 同位体偏重度 $\delta^{18}\text{O}$ は O_2 が 2-3%、 O_3 が 10%以上と O_3 の方が大きいことが観測的にも知られている。なんらかの原因により O_3 から OH が形成される経路のレートが上がれば H_2^{18}O が増加する可能性があるかもしれない。また、 HOx と NOx の間で同位体の交換が起き、 NOx の量によっても ^{18}OH の量が増加するという可能性も示唆されており、我々がまだ知らない同位体交換反応が成層圏で起きている可能性もありうる。いずれにしても、今後も水蒸気同位体の観測を続け、季節変化の再現性と定量的な信頼性を高めるとともに、ODIN などのサブミリ波観測衛星のデータなどと比較し、また化学モデルの研究者との議論を通して、水蒸気同位体比のふるまいの理解を深めることが重要である。

また、SORST の研究を進めていくのと並行して、南極昭和基地におけるミリ波観測が国立極地研との議論の中で深まり、2009 年の 51 次隊で現実のものとなろうとしている。南極昭和基地は、アタカマ高地同様自家発電で基地全体の電力をまかなっている。そのため、電力使用量に対する制限も厳しく、従来の GM-JT 冷凍機の消費電力では昭和基地での運用は難しいと言われていた。昭和基地での観測を実現させるという目標は、本研究の小型省電力化開発における具体的な装置スペックを設定する上で非常によい指針となった。

極域は冬季には大気大循環の収束点になり、全球的な大気循環が大気組成に与える影響を観測的に調べることができる。極域の冬季は夜が続く極夜となる。また反対に夏期は昼が続くことになるが、放射スペクトルを観測するミリ波観測は、太陽を背景とする吸収スペクトルを観測法と異なり、昼夜を問わず同じ観測法・同じ観測装置で連続して観測をすることができる。衛星観測においても太陽掩蔽法を用いるリモートセンシングでは極夜のデータが十分取得できないという問題がある。南極昭和基地でのミリ波観測により、極夜における中層大気組成データの不足部分を補完することができると期待される。

また、これから太陽の活動期に向かうにつれて、極域で太陽陽子や磁気嵐に伴う電子などの高エネルギー粒子の振り込みが増えると予想される。高エネルギー粒子が降り込むと、中間圏や熱圏において酸素分子や窒素分子が電離し、 HOx や NOx が増加しこれに伴う HOx , NOx 反応が起きる。実際に先の太陽活動極大期に起きた太陽陽子イベントで中間圏のオゾンが 1 日に 70%ほど、上部成層圏で数日のタイムスケールで 10%程度減少したことが SBUV や HALOE などの衛星測器により観測されている (Jackman et al. 2001)。衛星測器は周回軌道による制限を受けるため、2次元的なイメージを取得できるものの、数日のタイムスケールの比較的短い現象の時間変動を得る場合は、異なる観測点のデータを補完してやらなければならない。高エネルギー粒子の振り込みの影響を理解する上で2次元的な影響の広がりとそのタイムスケールは重要であるが、ある定点上空でこういった時間変動を示すかを時間的に密なサンプリングで（すなわち連続的に）知ることは、熱圏から中間圏、成層圏へと上下間結合を物質組成の変化をプローブとして理解するする道を開くと考えられ、これまでに取得されていないユニークな観測結果を取得できると期待される。

ぜひ本研究で作り上げた小型省電力型のミリ波大気観測装置を今後の1年半で使い込み、

問題点を洗い出し、2009 年からの昭和基地での観測に使用するミリ波装置へと収束させ、新たな大気科学の進展へと通じるデータの取得を目指したい。

参考文献

Gerber, D., O. Lezeaux and N. Kämpfer, “Ground based microwave measurements of midlatitude, Stratospheric H_2^{18}O and derivation of the isotopic ratio”, Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium, 399-400., 2000.

Guo, J., Abbas, M. M. and Nolt, I. G., “Stratospheric H_2^{18}O distribution from far infrared observations”, Geophys. Res. Lett., 16(11), 1277–1280, 1989.

Jackman, C. H., McPeters, R. D., Labow, G. J., Fleming, E. L., Praderas, C. J., and Russell, J. M., “Northern hemisphere atmospheric effects due to the July 2000 solar proton event”, Geophys. Res. Lett., 28, 2883-2886, 2001.

Kaye, J. A., “Analysis of the Origins and Implications of the ^{18}O Content of Stratospheric Water Vapor”, J. Atmos. Chem., 10, 39-57, 1990.

NDACC ホームページ <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>

Rees, D., Barnett, J.J., Labitzke, K. (eds.), CIRA 1986, Part II Middle Atmosphere Models, Advances in Space Research (COSPAR), 10, 1990.

Rinsland, C. P., Gunson, M. R., Foster, J. C., Toth, R. A., Farmer, C. B., “Stratospheric Profiles of Heavy Water Isotopes and CH_3D From Analysis of the ATMOS Spacelab 3 Infrared Solar Spectra”, J. Geophys. Res., 96(D1), 1057–1068, 1991.

Siegenthaler, A., Lezeaux, O., Feist, D.G., and N. Kämpfer, “First water vapor measurements at 183 GHz from the high Alpine station Jungfraujoch”, IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 39, 2084-2086, 2001.

4. 2 モデル計算に基づく観測およびデータ解析支援と観測計画への示唆 (オゾン・C10 変動の解析とモデル化グループ)

(1) 実施の内容

本グループの研究は、「チリ共和国における大気観測・機器開発グループ」との連携によって、アタカマで観測されたオゾン、一酸化塩素(C10)、水蒸気のデータの変動をグローバルな観点から考察できるようにするために、(1) オゾンおよびC10の予報システムの開発と、(2) 全球化学気候モデルによる大気微量成分の分布変動解析を行った。

この2つのテーマは研究期間中、ほぼ平行して実施された。(1) オゾン全量およびC10の予報システムの開発では、Reverse Domain Filling (RDF) という手法を使って、オゾン全量及びC10濃度の予測システムを確立した。これによって、1日から数日先のこれらの量の予測が全球的に可能になり、アタカマ観測点における予報もある程度可能となった。(2) 全球化学気候モデルによる大気微量成分の分布変動解析では、水蒸気、オゾン、亜酸化窒素(N2O)の過去から未来にわたる長期間の連続計算とその解析を行い、アタカマ近辺の低緯度および中緯度におけるこれらの微量成分の季節変動および長期変動をそのグローバルな分布と関連づけて考察した。

以上のように、本グループでは、アタカマでの限られた時間空間で得られた観測データを、時間空間的に拡張した観点から理解し、現在および将来実施される観測に対して大気科学的な意義を探るものである。

A. 背景

近年の計算機の発達によって、多種類の大気微量成分の分布を三次元的に計算したり表示したりすることが可能になった。大まかに言って2000年以前までは、大気を経度方向に平均し、緯度－高度断面で微量成分の分布を表現するいわゆる2次元モデルが主流であったが、2次元モデルでは変動の激しくオゾン破壊が顕著な極渦周辺の大気を正確に表現できないうえ、特定の地点で観測された微量成分の鉛直分布およびその変動の比較も困難であった。今世紀に入ってから3次元化学モデルの開発が世界中で盛んに行われ、現在では、3次元大気大循環モデルに化学反応を組み込んだ化学輸送モデルおよび化学気候モデルが、化学モデルの主流になりつつある。オゾン・C10変動の解析とモデル化グループの目的は、アタカマで観測されるオゾン、水蒸気、C10濃度とこれらのグローバルな分布、気象との関係を探ることである。

(参考)

化学輸送モデルと化学気候モデルについて

どちらのモデルも外部境界条件として、海水面温度、太陽放射量、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素の地表面濃度、フロン・ハロンの地表面濃度が、与えられる。

化学輸送モデル：大気中の化学反応過程を取り扱う輸送モデルという意味。上記外部境界条件の他に、過去の気温、風速分布などの気象データを使ってモデルの輸送場を決め、化学物質の輸送と化学反応を計算する。例えば、過去のある日のオゾン分布を出力すれば、それがその日の実際の観測データに対応する。将来予測には使えない。

化学気候モデル：化学反応を取り扱う気候モデルという意味。上記外部境界条件のみで化学物質の輸送と化学反応計算を行う。気温や風速などの気象場もモデルの内部で計算する。従って、ある日のオゾン分布の出力は、その日の実際の観測データに対応するわけではない。数年から10年くらいの平均をとると、過去から現在への気候と化学物質分布の変化が再現される。計算を将来にわたって延長すれば、地球大気の気候と化学物質分布の将来予測として使える。

以下のB節は化学輸送モデルに、C節は化学気候モデルに関係している。

B. オゾン全量およびC10の予報システムの開発

B.1. 成層圏気象データ鉛直分布表示システムの開発

予報システムの開発のために、まず、システムの入力となるグローバルな気象データを表示するシステムを開発した。このシステムは、任意の観測点の風速や気温の鉛直分布を調べるのに役立ち、ミリ波観測データのリトリバブル解析に必要な境界条件である気温、気圧などの気象パラメタを提供する。

開発したシステムにおいては、三次元客観解析データを読み込み、指定した日時、指定した場所(緯度経度)における、指定した気象項目の値を鉛直方向にグラフ表示する。システムはUnix上で動作し、システムの一部として、グラフ表示ツール(IDL)を使用する。

鉛直方向(Y軸)の種類は、気圧、温位、ジオポテンシャルハイト、ジオメトリックハイトの4種類より選択が可能である。また、鉛直分布画面表示、鉛直分布画像ファイル、鉛直分布テキストファイルでの出力が可能である。

表示可能な気象データは以下のとおりである。

- ECMWF 2.5 advanced operational
- ECMWF 0.5
- ERA40
- NCEP reanalysis
- NCEP forecast
- UKMO

これらのデータに収納されている、

- 気温
- 東西、南北、鉛直風
- 気圧、温位、ジオポテンシャルハイト

を表示することができる。

高度軸として、以下の4種類から選択可能である。

- 気圧
- 温位
- ジオポテンシャルハイト (GPH)
- ジオメトリックハイト (GMH)

気象データは0.5度～2.5度の緯度・経度グリッド上の6時間～24時間間隔のデータであるため、空間方向、時間方向に線形補完を行った。出力例を下記に示す。

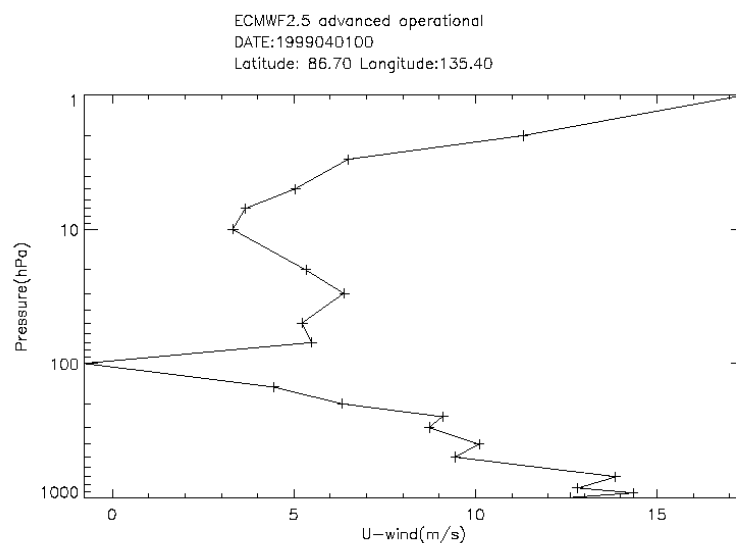


図 30. 気象データ鉛直分布の出力例。圧力軸に対して東西風速をプロットした。

B.2 オゾン全量予測システムの開発

次に、オゾン全量予測システムの開発について述べる。オゾンホールを含む南半球のオゾン全量分布の詳細が数日間の風によってどのように変化するかについて検討を行った。データとしては、衛星センサーTOMS のオゾン全量を用い、手法としては、Reverse Domain Filling (RDF)を用い、数日後のオゾン全量を予測して、実際に得られる TOMS によるオゾン全量分布と比較することを基本的に用いた。気象データとしては米国の環境予測センター (NCEP) の 6 時間毎の解析値を用い、流跡線計算モデルには、国立環境研究所で開発された等温位面流跡線モデル(nies_trj)、オゾンデータは 2005 年 Earth Probe TOMS(ver. 8)を用いた。計算期間は、2005 年の各月 15 日から後方へ 2 日間、温位高度として、375 K, 475 K, 575 K, 675 K を用いた。トラジェクトリを経度 0- 355 度まで 5 度間隔、緯度-85- -30 度まで 5 度間隔に置いて計算を行った。結果の一例を示す。図 31 (左) は過去 1 時間から 24 時間 (2005 年 10 月 14 日 0 時(UTC)から 10 月 14 日 23 時(UTC)) の TOMS データを基に 2005 年 10 月 15 日 0 時(UTC)のオゾン全量マップを再現した結果である。温位は 475K を用いた。RDF を用いた 2005 年 10 月 15 日のオゾンは南極上空において 100- 200 DU の小さな値を示し、南緯 50 度から 75 度、経度約 120 度から 270 度の範囲では 400- 450DU の大きな値を示した。この結果を図 31(右)の 2005 年 10 月 15 日の TOMS オゾン全量と比較すると、RDF を用いたオゾン全量はこの日に観測されたオゾンホールの傾向とほぼ一致した。また、C10 の予測も同時に可能となった。

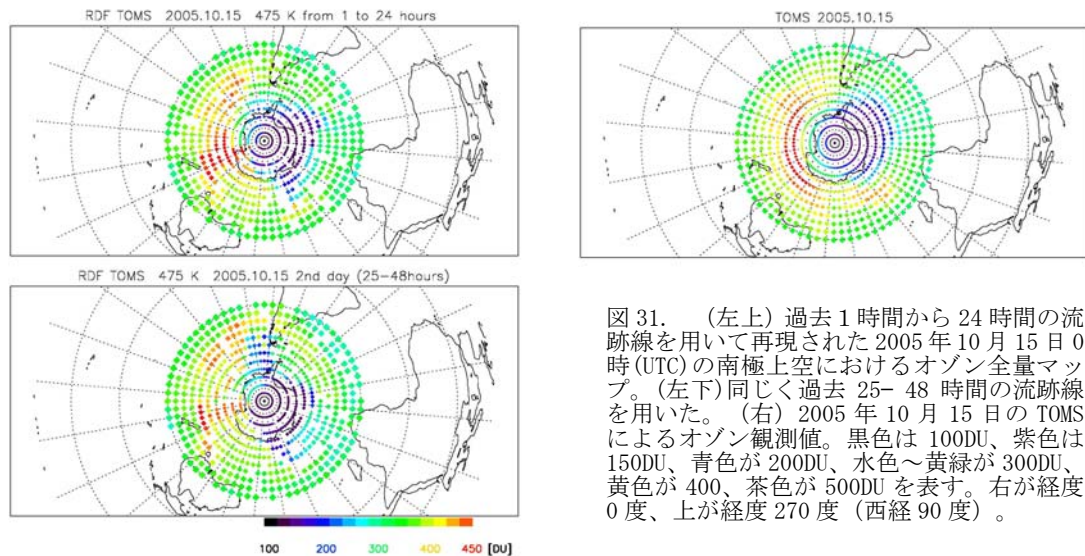


図 31. (左上) 過去 1 時間から 24 時間の流跡線を用いて再現された 2005 年 10 月 15 日 0 時(UTC)の南極上空におけるオゾン全量マップ。(左下)同じく過去 25- 48 時間の流跡線を用いた。(右) 2005 年 10 月 15 日の TOMS によるオゾン観測値。黒色は 100DU、紫色は 150DU、青色が 200DU、水色～黄緑が 300DU、黄色が 400、茶色が 500DU を表す。右が経度 0 度、上が経度 270 度 (西経 90 度)。

C. 全球化学気候モデルによる大気微量成分の分布変動解析

国立環境研究所(NIES)と東京大学気候システム研究センター(CCSR)では全球化学気候モデルの開発を行ってきた(Nagashima et al., 2002; Akiyoshi et al, 2004; Kurokawa et al, 2005)。化学気候モデルは、3次元大気大循環モデルに化学反応を組み込み (主に成層圏光化学反応)、放射過程や輸送力学過程と相互作用するようにしたもので、気温や風速の過去から将来にわたる全球分布を計算できるのみならず、オゾンなど大気微量成分の全球分布も同時に計算することができる数値モデルである。

近年、国連環境計画/世界気象機関 (UNEP/WMO)傘下で化学気候モデル検証プロジェクト (CCMVal)が発足し、世界中で13の化学気候モデルが共通のフロン、ハロン、温室効果ガス排出シナリオを用いて過去の気候、微量成分分布の再現とその将来予測を行っている。我々の化学気候モデルもCCSR/NIESモデルとしてこのプロジェクトに参加し、過去の化学気候再現実験 (REF1実験)と将来予測実験 (REF2実験)を行った (WMO2006; Eyring et al., 2005; Eyring et al., 2006; Eyring et al., 2007)。この実験では、温室効果気体 (二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素)の将来濃度としてIPCC (2000)のA1Bシナリオ、オゾン破壊物質 (フロン、ハロンなど)の将来濃度としてWMO (2003)のAbシナリオを使っている。以下には、この数値実験で得られた結果のうち、本課題のミリ波測定装置で測定可能な水蒸気、亜酸化窒素、オゾンについて、熱帯とアタカマ近辺での長期変動解析の結果を報告する。

C.1 熱帯の水蒸気濃度の長期変動の再現

まず、化学気候モデルの熱帯成層圏への物質の流入状態の検証を行った。成層圏に分布する物質の長期変動には、対流活動が盛んな熱帯対流圏からの物質の流入が重要な役割を果たす。というのも、地球大気では、大きな流れとして、熱帯対流圏から熱帯成層圏へ空気が入り、そこから空気塊は南北両半球の中・高緯度成層圏へ流れ、やがて対流圏へ戻る、といういわゆる大気大循環が成立しているからである。熱帯下部成層圏は地球上で最も対流圏からの空気が流入する場所である。そこで、下部成層圏での水蒸気の輸送過程を調べた。熱帯域の対流圏上部には、気温が 190~195K 位の非常に低温な領域があり、対流圏から上昇してきてこの領域を通過し成層圏へ流入する空気塊に含まれる水蒸気は、ここで過飽和となり凝結して乾燥する。成層圏の水蒸気量はこの領域の気温によってある程度決まっている。熱帯の下部成層圏では、その水蒸気量がこの気温の季節変動に依存して変動し、その変動した水蒸気を含む空気塊は徐々に成層圏の上の方へと運ばれる。横軸に時間、縦軸に高度をとると、あたかも成層圏空気の水蒸気量がその流入時の気温を記録しているような挙動を示すので、この現象はテープレコーダ効果と呼ばれている（図 32）。モデルによるこのテープレコーダ効果の再現は、モデルの上部対流圏気温の変動による水蒸気の対流圏からの流入と、流入後の成層圏内での水平拡散の検証となる。このような物質輸送に着目したモデルの検証は、オゾン破壊の原因であるハロゲンガスとそれから生じる塩素化合物・臭素化合物の成層圏における輸送の検証にもつながる。

図 33 に化学気候モデルで再現された水蒸気のテープレコーダ効果を示す。図 32 の HALOE による観測と同様な水蒸気の変動と上方への輸送が再現されている。ただし、上方へ輸送される速度が観測より少し速いのがわかる。この点は今後のモデルの改良に関する課題である。

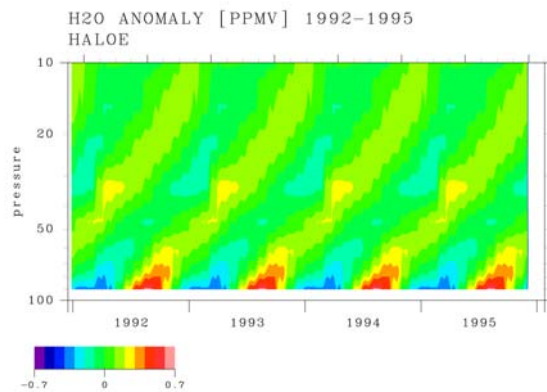


図 32. HALOE によって観測された 10°N-10°S における水蒸気体積混合比の各高度の平均値からの偏差の時間変動。縦軸は高度（圧力レベル）、横軸は時間。暖色は正偏差、寒色は負偏差を表す。1992 年のデータを繰り返してつなぎ合わせていることに注意。

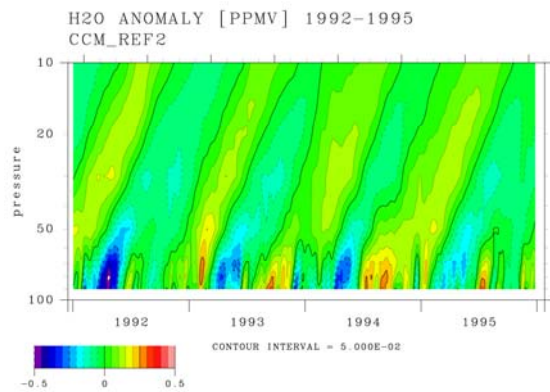


図 33. 図 32 と同じ、ただし、CCSRNIES 化学気候モデルによる計算結果。1992 年から 1995 年のデータを使った。

C.2 アタカマにおける亜酸化窒素、オゾン、水蒸気の変動

この節では、ミリ波観測のおこなわれているアタカマ上空（西経 67 度、南緯 23 度）に一番近い化学気候モデルのグリッド（西経 67.5 度、南緯 23.7 度）のデータを示す。図 34 には、このモデルで計算された 1980–1989 年平均の経度平均した亜酸化窒素濃度の 3 月と 9 月の分布を示す。

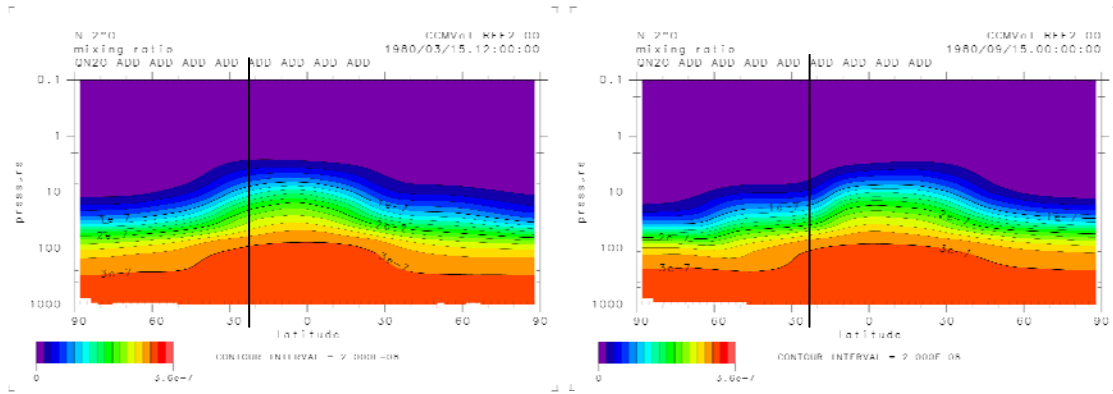


図 34. 化学気候モデルで計算された 3 月（左）および 9 月（右）の経度平均亜酸化窒素濃度の緯度－高度断面図。赤い色は高濃度、青から紫は低濃度を表す。1980 年から 1989 年までの 10 年間の平均値。アタカマの緯度（南緯 23.7 度）を縦実線で表す。

図で、亜酸化窒素濃度の等混合比線が盛り上がっている部分が熱帯性の大気を表しており、盛んな熱帯対流による強い上昇流のため、地表起源の高濃度亜酸化窒素を上へ持ち上げている。図から、アタカマのある緯度帯（図中の黒縦実線）は、3 月には熱帯性の大気に覆われているのに対し、9 月では中緯度性の大気に覆われていることがわかる。このように、アタカマ上空は、熱帯と中緯度との境目に位置し、季節によってその両方の大気を観測できる興味深い観測地点である。

図 35 には、化学気候モデルで計算されたアタカマ上空におけるオゾン全量、オゾンの体積混合比、亜酸化窒素の体積混合比、水蒸気の体積混合比の 10 年間で平均した季節変動を示す。2000–2009 年、2040–2049 年、2090–2099 年の平均値が示されている。図から、10hPa の高度（約 30km）では、水蒸気混合比はこの 100 年間に徐々に増加していることがわかる。また、亜酸化窒素濃度の絶対値も徐々に増加している。これは、地表の亜酸化窒素濃度が将来にわたり徐々に増加するというシナリオになっているからである。注目すべきは亜酸化窒素濃度の季節変動の振幅がだんだん大きくなっていることである。これは先の図で述べた、アタカマ近辺が季節によって熱帯と中緯度の両方の空気塊を観測できる地点であることと、将来の温室効果気体の増加による地球温暖化によって、熱帯対流域の緯度幅が増加することに関係している可能性がある。最後にオゾン全量の値と季節変動は将来 100 年間にわたりあまり変動していないが、10hPa のオゾン濃度の絶対値と季節変動の振幅は増加していることがわかる。絶対値が増加するのは温室効果気体の増加によって成層圏温度が寒冷化し、それによって化学的なオゾン生成速度が増加するためであると解釈できるが、季節変動の振幅の増加は化学的な影響と亜酸化窒素濃度の季節変動に現れた輸送的なものと両方受けている可能性があり、簡単ではない。亜酸化窒素濃度の季節変動振幅の増加と併せて、今後大気の大気力学場および化学場の詳しい解析を行う必要がある。

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

アタカマでの観測が限られた季節で行われたため、そこで観測されたオゾンや水蒸気のデータと、「オゾン・C10 変動の解析とモデル化グループ」で開発を行ったオゾン全量予測システムおよび化学気候モデルのアウトプットとの直接の比較・解析は、本課題期間中に実現しなかった。が、将来アタカマのデータを用いて大気微量成分の変動と気候変動との関連をグローバルな視点から検討できる基礎部分は確立された。オゾン全量予測システムでは、気象データの予測値が得られれば数日先のオゾン全量を予測できるようになった。これによって、アタカマでのオゾン観測計画をより大気科学的な視点から立てられるようになった。化学気候モデルでは、時間的に拡張した将来予測計算から、アタカマ近辺の成層圏オゾン、水蒸気、亜酸化窒素濃度が将来変化することが示唆された。特に亜酸化窒素濃度とオゾン濃度の季節変動の振幅の変化は、地球温暖化に伴う熱帯帯流域の緯度幅の拡張の影響 (Seidel et al, 2008) を示唆していて興味深い。アタカマはその位置が熱帯と中緯度大気の境目に位置することから、将来にわたって観測を持続すれば、地球温暖化の大気微量成分への影響をいち早く検知できる可能性がある。CCMVal による化学気候モデルを使った新たな将来予測実験も計画されている (Eyring et al., 2008)。

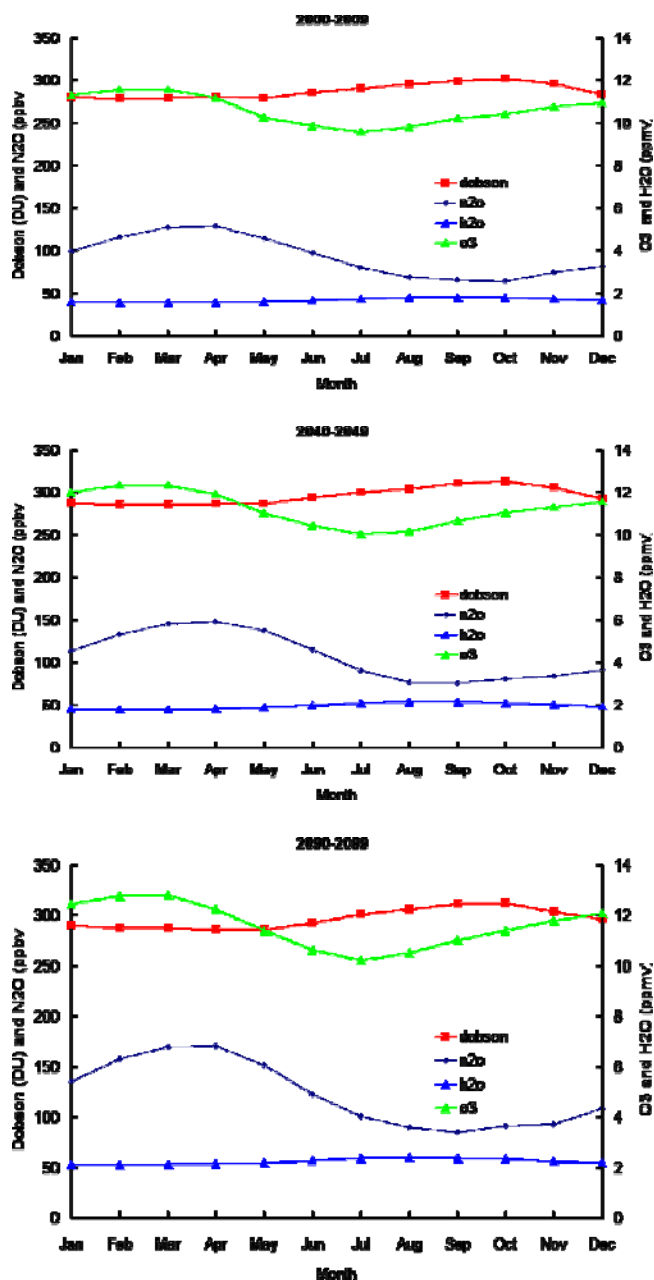


図 35. 化学気候モデルの西経 67.5 度、南緯 23.7 度におけるオゾン全量(dobson、赤)、10hPa (高度 30km 付近)における亜酸化窒素(N2O、紺)体積混合比、水蒸気(H2O、青)体積混合比、オゾン(O3、黄緑)体積混合比の季節変動。2000-2009 年の平均値 (上)、2040-2049 年の平均値 (中)、2090-2099 年の平均値 (下)。オゾン全量と亜酸化窒素の目盛りは左側の縦軸、オゾンと水蒸気の目盛りは右側の縦軸に表されている。

参考文献

Akiyoshi, H., T. Sugita, H. Kanzawa, and N. Kawamoto (2004), Ozone perturbations in the Arctic summer lower stratosphere as a reflection of NO_x chemistry and planetary scale wave activity, *J. Geophys. Res.*, **109**, D03304, doi:10.1029/2003JD003632.

Eyring, V., N. R. P. Harris, M. Rex, T. G. Shepherd, D. W. Fahey, G. T. Amanatidis, J. Austin, M. P. Chipperfield, M. Dameris, P. M. De F. Forster, A. Gettelman, H. F. Graf, T. Nagashima, P. A. Newman, S. Pawson, M. J. Prather, J. A. Pyle, R. J. Salawitch, B. D. Santer, and D. W. Waugh (2005), A strategy for process-oriented validation of coupled chemistry-climate models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **86**, 1117-1133.

Eyring, V., N. Butchart, D. W. Waugh, H. Akiyoshi, J. Austin, S. Bekki, G. E. Bodeker, B. A. Boville, C. Brühl, M. P. Chipperfield, E. Cordero, M. Dameris, M. Deushi, V. E. Fioletov, S. M. Frith, R. R. Garcia, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, V. Grewe, L. Jourdain, D. E. Kinnison, E. Mancini, E. Manzini, M. Marchand, D. R. Marsh, T. Nagashima, P. A. Newman, J. E. Nielsen, S. Pawson, G. Pitari, D. A. Plummer, E. Rozanov, M. Schraner, T. G. Shepherd, K. Shibata, R. S. Stolarski, H. Struthers, W. Tian, and M. Yoshiki (2006), Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past, *J. Geophys. Res.*, **111**, D22308, doi:10.1029/2006JD007327.

Eyring, V., D. W. Waugh, G. E. Bodeker, E. Cordero, H. Akiyoshi, J. Austin, S. R. Beagley, B. A. Boville, P. Braesicke, C. Brühl, N. Butchart, M. P. Chipperfield, M. Dameris, R. Deckert, M. Deushi, S. M. Frith, R. R. Garcia, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, D. E. Kinnison, E. Mancini, E. Manzini, D. R. Marsh, S. Matthes, T. Nagashima, P. A. Newman, J. E. Nielsen, S. Pawson, D. A. Plummer, G. Pitari, E. Rozanov, M. Schraner, J. F. Scinocca, K. Semeniuk, T. G. Shepherd, K. Shibata, B. Steil, R. S. Stolarski, W. Tian, and M. Yoshiki (2007), Multi-model projections of ozone recovery in the 21st century, *J. Geophys. Res.*, **112**, D16303, doi:10.1029/2006JD008332.

Eyring, V., Gettelman, A., Harris, N. R. P., Pawson, S., Shepherd, T. G., Waugh, D. W., Akiyoshi, H., Butchart, N., Chipperfield, M. P., Dameris, M., Fahey, D. W., Forster, P. M. F., Newman, P. A., Rex, M., Salawitch, R. J., Santer, B. D. (2008), Report on the 3rd SPARC CCMVal Workshop, 26-28 June 2007, University of Leeds, United Kingdom, SPARC Newsletter, 30, 17-19

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2000), *Special report on emissions scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 599pp., Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Kurokawa, J., H. Akiyoshi, T. Nagashima, H. Masunaga, T. Nagajima, M. Takahashi, and H. Nakane (2005), Effects of atmospheric sphericity on stratospheric chemistry and dynamics over Antarctica, *J. Geophys. Res.*, **110**, D21305, doi:10.1029/2005JD005798.

Nagashima, T., M. Takahashi, M. Takigawa, and H. Akiyoshi (2002), Future development of the ozone layer calculated by a general circulation model with fully interactive chemistry, *Geophys. Res. Lett.*, **29**(8), doi:10.1029/2001GL014026.

Seidel, D. J., Q. Fu, W. J. Randel, T. J. Reichler (2008), Widening of the tropical belt in a changing climate, *Nature Geoscience*, **1**, 21-24.

World Meteorological Organization (WMO) (2007), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, *Global Ozone Res., Monit. Proj. Rep. 50*, Geneva, Switzerland.

5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

大気微量分子測定用ミリ波分光計の開発は1980年代から始まった。1990年代ごろから飛躍的に感度を向上させた超伝導 SIS ミクサを用いたミリ波分光計の開発が世界的に進められたが、実用化に成功し定常的な観測をおこなっているグループはほとんどなく、冷却ダイオード受信器で観測しているグループがほとんどである。そのような中で我々は1995年から国立環境研究所つくばで、1999年から北海道の陸別で超伝導受信器を用いた定常的な110GHz帯のオゾンモニタリングを続けている実績をもつ。さらに、先のCRESTでは200GHz帯の超伝導受信器を実用化し、オゾンよりも2桁近く強度が弱いC10スペクトルを5時間程度の積分で検出した。オゾンのようなスペクトル強度の強い分子に対しては従来のダイオード受信器でも十分観測可能だが、C10や水蒸気同位体の H_2^{18}O 、 HDO など強度が弱い分子の意味のある観測データを地上観測で取得することは冷却ダイオード受信器では難しい。

しかし、大気観測用の超伝導受信器の開発を継続しているグループは世界的にもほとんど残っていないのが現状である。他機関において超伝導受信器が実用化に至らず途中で多く挫折していったのは、自前で超伝導ミクサを設計し製作するノウハウを持っていなかったことも要因であるが、受信機フロントエンド（ミクサ）の調整・最適化の難しさ、クライオジェニックスの面倒さ、バックエンド分光計の調整・最適化の困難さがあり、仮に出来上がった超伝導受信器を購入しても、それを最適の状態で維持することが困難であったためと考えられる。

広く大気科学の研究機関で使用される、すなわち全球的な観測ネットワークを構築するためには性能を追及するだけでは不十分で、いかに使い勝手をよいか重要なポイントとなる。地球科学、大気化学を専門とする研究者は必ずしもエレクトロニクスに精通しているわけではない。オゾンの鉛直分布が導出できるミリ波観測装置が十分普及せず、コラム全量しか測定できないブリュワー分光計やドブソン分光計がオゾン観測の主流を占めているのは、ミリ波が高価ということもあるが、専門家にしか使いこなすことができず、大気観測屋にとって使いにくかったことが最も大きな要因であると考えられる。実際、現時点でもミリ波観測装置を用いて大気観測を行っているグループは工学系あるいは電波天文系のグループのいずれかである場合がほとんどである。

我々は、先のCRESTでミリ波観測装置の感度と安定性、すなわち「性能」を徹底的に追及した。そして、CRESTで培われた技術は、つくばおよび陸別のミリ波観測装置に適用され、同観測装置の性能向上に寄与した。

今回のSORSTでは、工学系の専門家でなくても「使える」観測装置を目指して開発を進めた。まず、超伝導受信器の調整機構である稼働型バックショートをなくし、簡単な調整で十分高い性能が発揮できるようにした。また、冷却系もGM-JTタイプからGMタイプに変更することにより、JT弁を調整することなしに、スイッチを入れるだけで4Kの超伝導状態が実現できるようにした。また、光学系調整が複雑で設置環境の室温管理の条件が厳しい音響光学型分光計をデジタル分光計に置き換えることにより、分光計を単に置いてつなぐだけのプラグアンドプレイ機器にすることができた。

本研究により、我々は超伝導受信器の使い勝手を冷却ダイオード受信器と同程度まで高めることができたと考えている。

本研究のメインテーマであるミリ波超伝導観測装置の省電力化・小型化は、将来、全球的な観測ネットワークを構築していく上で重要なポイントである。超伝導観測装置の省電力化・小型化の開発が最も進んでいるのは、実は我が国のSMILESグループである。SMILES計画では宇宙ステーションに超伝導受信器を搭載するため、消費電力と重量に極めて厳しい要求が課せられている。SMILESグループは国内メーカーとともに専用の冷凍機を開発したが、特殊な用途に限られたもので、価格・冷却能力ともに地上観測装置として実用化するのには適していない。我々は汎用の極低温冷凍機に改良を加え、リーズナブルな金額で省電力化・小型化を図ろうとしている点がユニークである。アルバッククライオや住友重機械工業といった国内の極低温冷凍機メーカーの協力も受け、CREST開始当初の目的であった、可搬型の小型ミリ波観測装置がここに完成した。これによって世界的なミリ波観測網

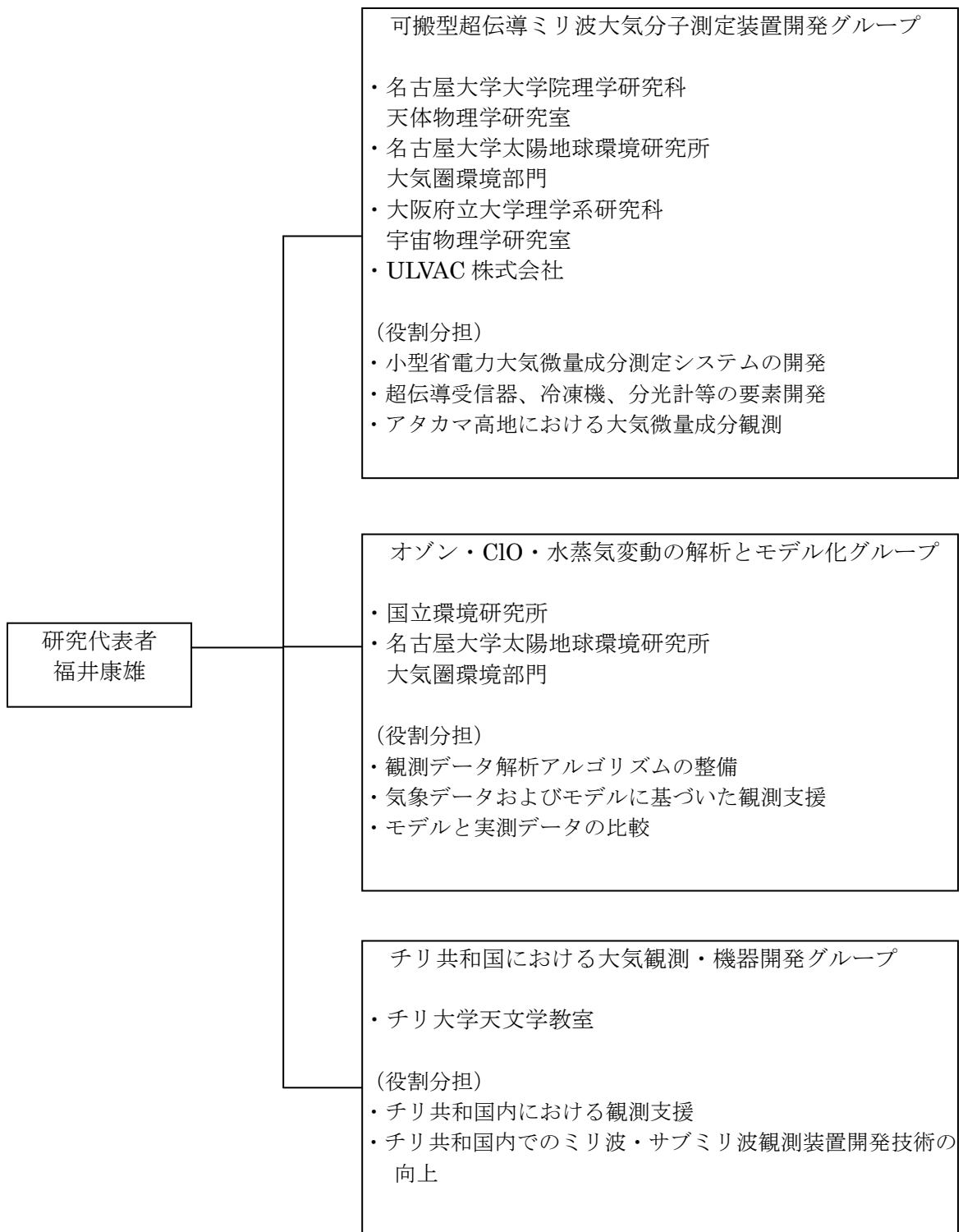
を構築するための第一歩を踏み出すことができたと考えている。

一方観測面においては、近年、オゾン破壊に関して人為起源のフロンだけでなく、 H_2O のソースである水蒸気の変動に対する関心が高まっている。成層圏水蒸気は対流圏水蒸気による吸収のため、赤外線分光計 (FTIR) を用いた地上観測は難しい。気球高度以上の上部成層圏の水蒸気量は電波スペクトルによる観測が地上からの唯一の観測手法となっている。水蒸気の観測では準ミリ波帯の 22GHz のスペクトル観測が主流で、米国海軍研究所が 1992 年より米国西海岸、ニュージーランド、ハワイ (1996 年より) の 3 カ所で定常的な観測を行っており、ユニークなデータベースを提供している。さらに最近では、2001 年の冬よりスイス・ベルン大学が常温の準ミリ波帯の観測を開始した。またベネズエラのドイツ・カールスルーエ大学の観測施設にドイツ・ブレーメン大学が準ミリ波帯の水蒸気放射計を設置して観測を行おうとしており、スウェーデンのオンサラ電波天文台のグループも準ミリ波帯の水蒸気放射計を開発している。世界的には準ミリ波帯の 22GHz 帯観測が圧倒的に主流となっている。今日、HEMT トランジスタ開発の進展に伴い、22GHz 帯の受信機は常温で十分な感度が達成できるようになった。22GHz 帯は 183GHz 帯に比べ大気透過度が高いため、22GHz 帯は平地でも観測が可能である。そのため、全球的な観測ネットワークという観点からは 22GHz 帯での水蒸気観測に主体を置くという戦略は正しいと考えられる。実際我々も、SORST の研究開発と並行して、22GHz 帯の準ミリ波水蒸気放射計の開発を進めている。

しかし、準ミリ波帯の観測は水蒸気の主たる同位体である H_2O に関しては有効であるものの、水蒸気変動の機構解明で重要な意味を持つ微量の水蒸気同位体 H_2^{18}O 、 HDO 等の測定はミリ波帯でないと観測できない。 H_2^{18}O 、 HDO の水蒸気同位体に関する観測は、気球や航空機を用いた赤外線 (FTIR) 観測 (Johnson et al. 2001 (H_2^{18}O 、 HDO 、 H_2^{17}O) など)、米国の国立電波天文台 (HDO) やスイス・ユングフラウヨッホ (H_2^{18}O 、ベルン大学) 等の地上ミリ波観測などの単発的な観測が数例あるものの、数ヶ月にわたる連続的な観測はまったく行われていない。我々は、ラス・カンパナス天文台とアタカマ高地において微弱な H_2^{18}O スペクトルの連続観測を実現している。また、アタカマ高地では 183GHz 帯 H_2O スペクトルの検出にも成功しており、複数同位体の同時観測に基づく水蒸気同位対比の連続観測の第一歩を踏み出した。地上からの水蒸気同位対比の連続観測は、他のグループではまったく試みられていないものであり、本研究で観測拠点として設備の充実を図ったアタカマ高地での定常的な観測を今後も継続することにより、全く新しいデータベースを世界に発信できると考えている。

6. 研究実施体制

(1) 体制



(2) メンバー表

①可搬型超伝導ミリ波大気分子測定装置開発グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加期間
福井 康雄	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	教授	総括	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
大西 利和	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	准教授	観測制御ソフトの開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
水野 範和	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	助教	超伝導受信器の開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
森口 義明	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	研究員	観測制御ソフトの開発	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
青山 紘子	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	大学院生	観測制御ソフトの開発	平成 14 年 11 月～ 平成 15 年 3 月
山本 宏明	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	研究員	音響光学型分光計の開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
中川 眞規	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	大学院生	観測制御ソフトの開発	平成 14 年 11 月～ 平成 18 年 3 月
笹子 宏史	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	大学院生	観測制御ソフトの開発	平成 16 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
南谷 哲宏	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	大学院生	超伝導受信器の開発	平成 16 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
竹内 友岳	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	大学院生	超伝導受信器の開発	平成 17 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
樋口 奈美	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	SORST 研究補 助員	事務処理	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
阿部 玲子	名古屋大学大学院 理学研究科素粒子 宇宙物理学専攻	SORST 研究補 助員	実験データ解析	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
水野 亮	名古屋大学太陽地 球環境研究所	教授	ミリ波観測システムの開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
長濱 智生	名古屋大学太陽地 球環境研究所	准教授	ミリ波観測システムの開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
前澤 裕之	名古屋大学太陽地 球環境研究所	助教	ミリ波観測システムの開発	平成 16 年 3 月～ 平成 20 年 3 月
桑原 利尚	名古屋大学太陽地 球環境研究所	大学院生	ミリ波観測システムの開発	平成 16 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
松浦 真人	名古屋大学太陽地 球環境研究所	大学院生	ミリ波観測システムの開発	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 8 月
村山 智史	名古屋大学太陽地 球環境研究所	大学院生	ミリ波観測システムの開発	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
土岐 一貴	名古屋大学太陽地 球環境研究所	大学院生	ミリ波観測システムの開発	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
小川 英夫	大阪府立大学大学 院理学系研究科物 理科学専攻	特命教授	超伝導受信器の開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
米倉 覚則	大阪府立大学大学 院理学系研究科物 理科学専攻	講師	音響光学型分光計の開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
丸本 洋子	大阪府立大学大学 院理学系研究科物 理科学専攻	SORST 研究補 助員	実験データ解析	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
浅山信一郎	国立天文台 ALMA 準 備室	上級研究院	超伝導受信器の開発	平成 15 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
森平 淳志	株式会社アルパッ ク F P D 事業本部	主事	ミリ波観測システムの開発	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月

②オゾン・ClO・水蒸気変動の解析とモデル化グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加期間
中根 英昭	国立環境研究所アジア自然共生研究グループ	グループ長	変動解析、解析研究	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
秋吉 英治	国立環境研究所大気圏環境研究領域	主任研究員	モデル研究の総合化	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
長濱 智生	名古屋大学太陽地球環境研究所	准教授	データ解析、変動解析	平成 14 年 11 月～ 平成 20 年 3 月
杉本 朋世	名古屋大学太陽地球環境研究所	大学院生	データ解析、変動解析	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
松浦 真人	名古屋大学太陽地球環境研究所	大学院生	データ解析、変動解析	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 8 月

③チリ共和国における大気観測・機器開発グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加期間
Leonardo Bronfman	チリ大学天文学教室	教授	ミリ波観測システムの開発・実験	平成 17 年 5 月～ 平成 19 年 3 月
Jorge May	チリ大学天文学教室	教授	ミリ波観測システムの開発・実験	平成 17 年 5 月～ 平成 19 年 3 月
Roberto Salazar	チリ大学天文学教室	研究員	ミリ波観測システムの開発・実験	平成 17 年 5 月～ 平成 18 年 9 月

7. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2004年3月10日 -11日	ミリ波・サブミリ波受信機に関するワークショップ	名古屋大学	52名	国内のミリ波・サブミリ波受信器開発に携わる研究者による唯一の研究会。産官学の枠を超えて、最新の研究成果を持ち寄り、情報交換を行ない、わが国の超伝導受信器開発技術基盤の向上を目指す。
2005年3月7日 -8日	ミリ波・サブミリ波受信機に関するワークショップ	国立天文台	72名	国内のミリ波・サブミリ波受信器開発に携わる研究者による唯一の研究会。新しいマテリアルを用いたSIS検出器の開発や未開拓波長領域のための次世代のセンサーについて議論。
2006年3月6日 -9日	ミリ波・サブミリ波受信機に関するワークショップ	大阪府立大学	85名	国内のミリ波・サブミリ波受信器開発に携わる研究者による唯一の研究会。冷却HEMT開発、南極での観測計画等、大学レベルでの新たな展開について議論。
2007年1月17日 -19日	ミリ波・テラヘルツ波領域における受信機開発に関するワークショップ	大阪府立大学	74名	国内のミリ波・サブミリ波受信器開発に携わる研究者による唯一の研究会。台湾、韓国、中国の研究者も参加し、アジア諸国の最先端技術が報告された。
2008年1月24日 -25日	ミリ波・サブミリ波受信機に関するワークショップ	大阪府立大学	63名	国内のミリ波・サブミリ波受信器開発に携わる研究者による唯一の研究会。大学レベルでの冷凍機の開発、企業でのテラヘルツ/サブミリ波帯コンポーネントの開発などについて議論。

(2) 招聘した研究者等

なし

8. 発展研究による主な研究成果

(1) 論文発表（英文論文 24 件 邦文論文 3 件）

○“Ground-based millimeter-wave observations of water vapor emission (183 GHz) at Atacama, Chile”

T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, A. Morihira, N. Toriyama, S. Murayama, M. Matsuura, T. Sugimoto, S. Asayama, N. Mizuno, T. Onishi and Y. Fukui, Adv. Space, Res., doi:10.1016/j.asr.2007.11.030, in press, 2008

○“Ground-Based Millimeter-Wave Radiometer for Measuring the Stratospheric Ozone over Rikubetsu, Japan”,

T. Nagahama, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, A. Mizuno, H. Ogawa, and Y. Fukui, J. Meteor. Soc. Japan, 85, 495-509, 2008.

○“Multi-model projections of ozone recovery in the 21st century”,

Eyring, V., D. W. Waugh, G. E. Bodeker, E. Cordero, H. Akiyoshi, J. Austin, S. R. Beagley, B. A. Boville, P. Braesicke, C. Brühl, N. Butchart, M. P. Chipperfield, M. Dameris, R. Deckert, M. Deushi, S. M. Frith, R. R. Garcia, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, D. E. Kinnison, E. Mancini, E. Manzini, D. R. Marsh, S. Matthes, T. Nagashima, P. A. Newman, J. E. Nielsen, S. Pawson, D. A. Plummer, G. Pitari, E. Rozanov, M. Schraner, J. F. Scinocca, K. Semeniuk, T. G. Shepherd, K. Shibata, B. Steil, R. S. Stolarski, W. Tian, and M. Yoshiki, J. Geophys. Res., 112, D16303, doi:10.1029/2006JD008332., 2007

“Record-breaking chemical destruction of ozone in the arctic during the winter of 2004/2005”, Tsuvetkova, N.D., V. A. Yushkov, A. N. Lukyanov, V. M. Dorokhov and H. Nakane, Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics, 43 (5), 592-598, 2007.

“Midlatitude and high-latitude N₂O distributions in the Northern Hemisphere in early and late Arctic polar vortex breakup years”,
Akiyoshi, H. and L. B. Zhou, *J. Geophys. Res.*, 112, D18305, doi:10.1029/2007JD008491, 2007.

○“Continuous Measurements of the Stratospheric and Mesospheric Ozone by Using Ground-based Millimeter-wave Radiometers”

T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, H. Ogawa, and Y. Fukui, *Proceedings of the International Conference on Submillimeter Science Technology (ICSST 04)*, 2006

“Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past”

Eyring, V., N. Butchart, D. W. Waugh, H. Akiyoshi, J. Austin, S. Bekki, G. E. Bodeker, B. A. Boville, C. Brühl, M. P. Chipperfield, E. Cordero, M. Dameris, M. Deushi, V. E. Fioletov, S. M. Frith, R. R. Garcia, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, V. Grewe, L. Jourdain, D. E. Kinnison, E. Mancini, E. Manzini, M. Marchand, D. R. Marsh, T. Nagashima, P. A. Newman, J. E. Nielsen, S. Pawson, G. Pitari, D. A. Plummer, E. Rozanov, M. Schraner, T. G. Shepherd, K. Shibata, R. S. Stolarski, H. Struthers, W. Tian, and M. Yoshiki, *J. Geophys. Res.*, 111, D22308, doi:10.1029/2006JD007327, 2006.

“Ozone decrease outside Arctic polar vortex due to polar vortex processing in 1997”

Akiyoshi, H., S. Sugata, M. Yoshiki, and T. Sugita, *J. Geophys. Res.*, 111, D22311, doi:10.1029/2005JD006540, 2006.

“Effects of atmospheric sphericity on the stratospheric chemistry and dynamics over Antarctica”

J. Kurokawa, H. Akiyoshi, T. Nagashima, H. Nakane, H. Masunaga, T. Nakajima, M. Takahashi, , *J. Geophys. Res.*, 110(D21), D21305, doi:10.1029/2005JD005798, 2005

“Process Simulation of Reactive DC Magnetron Sputtering for Thin Film Deposition of Niobium-Titanium Nitride”

H. Maezawa, T. Sato, and T. Noguchi, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Volume 15, Issue 2, Part 3, 3520 – 3523, 2005

○“Ozone perturbations in the Arctic summer lower stratosphere as a reflection of NO_x chemistry and wave activity”,

Akiyoshi, H., T. Sugita, H. Kanzawa, and N. Kawamoto, *J. Geophys. Res.*, 109, D03304, 2004.

“Measurements of stratospheric water vapor isotopomers by using a millimeter-wave radiometer with a superconductive receiver”

A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, Y. Fukui, N. Mizuno, H. Nakane, H. Ogawa, Y. Yonekura, S. Asayama, and A. Morihira, *Proceedings of the 20th Quadrennial Ozone symposium*, Ed. C. Zerefos, 583-584, 2004.

“Short-term variations of the stratospheric Ozone measured with the ground-based millimeter-wave radiometer at Rikubetsu, Japan”

T. Nagahama, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, H. Ogawa, A. Mizuno, and Y. Fukui, *Proceedings of the 20th Quadrennial Ozone symposium*, Ed. C. Zerefos, 408-409, 2004.

“Lider and millimeter-wave observation of vertical profiles of ozone at Tsukuba (36N, 140E) and seasonal variations”

H. Nakane, C. B. Park, N. Sugimoto, I. Matsui, T. Nagahama, A. Mizuno, Y. Fukui, A. Morihira, and Y. Fujinuma, *Proceedings of the 20th Quadrennial Ozone symposium*, Ed. C. Zerefos, 47-48, 2004.

“A semiannual variation of ozone in the middle mesosphere observed with the millimeter-wave radiometer at Tsukuba, Japan”.

Nagahama, T., Nakane, H., Fujinuma, Y., Ogawa, H., Mizuno, A., and Fukui, Y., *J. Geophys. Res.*, 108, ACH12-1 – ACH12-6, 2003

“Numerical Matrix Analysis for Performances of Wideband 100GHz Branch-Line Couplers”,
Andoh, H., Asayama, S., Ogawa, H., Mizuno, N., Mizuno, A., Tsukamoto, T., Sugiura, T., and Fukui, Y.,
Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 24, 773 – 788, 2003

“A Fixed-Tuned W-Band Waveguide SIS Mixer with 4.0-7.5 GHz IF”,
Asayama, S., Noguchi, T., Ogawa, H., Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 24, 1091 – 1099, 2003

“A Waveguide Band-Stop Filter as an Image Rejection Filter for Measurement of Stratospheric Ozone”,
Asayama, S., Ogawa, H., Yonekura, Y., Suzuki, K., Mizuno, A., Iwashita, H., and Noguchi, T., Int. J.
Infrared and Millimeter Waves, 24, 1833 – 1839, 2003

“An Integrated Sideband-Separating SIS Mixer Based on Waveguide Split Block for 100 GHz Band with
4.0–8.0 GHz IF”,
Asayama, S., Ogawa, H., Noguchi, T., Suzuki, K., Andoh, H., and Mizuno, A., Int. J. Infrared and
Millimeter Waves, 25, 107 – 117, 2004

“An Integrated Sideband-Separating SIS mixer Based on Waveguide Split Block for 100GHz Band”
Asayama, S., Ogawa, H., Noguchi, T., Suzuki, K., Andoh, H., and Mizuno, A., ALMA Memo, #453,
2003

“Designs of Wideband 3dB Branch-line Couplers for ALMA Bands 3 to 10”,
Andoh, H., Minamidani, T., Mizuno, N., Mizuno, A., Fukui, Y., Asayama, S., Yonekura, Y., and Ogawa,
H., ALMA Memo, #468, 2003

“An Experimental Study of Harmonic SIS Mixing at 205-235 GHz”,
Xiao, K., Ogawa, H., and Fukui, Y., IEEE Trans. Appl. Supercond., 13, 3856 - 3861, 2003

“Analysis of year-to-year ozone variation over the subtropical western Pacific region using EP_TOMS
data and CCSR/NIES nudging CTM”
Zhou, L. B., H. Akiyoshi, and K. Kawahira (2003), J. Geophys. Res., 108(D20), 4627, ACL3-1 –
ACL3-11, 2003

“Lagrangian Estimations of Ozone Loss in the Core and Edge Region of the Arctic Polar Vortex
1995/1996: Model Results and Observations”,
Lukyanov, A. N., Nakane, H., and Yushkov, V. A., J. Atmos. Chem., 44, 191-210, 2003

「極成層圏雲が関与する不均一反応の化学輸送モデルへの導入と臭素化合物を介した北極域オ
ゾン層への影響 (Modeling of the heterogeneous reaction processes on the polar
stratospheric clouds in chemical transport models and the effects on the Arctic ozone layer
through bromine species)」
秋吉英治、エアロゾル研究、22(3)、196-203、2007.

「オゾンホールと成層圏化学研究の進展」
中根英昭、パリティ、20(11)、6-8、2005.

「オゾン層の現状とオゾン層研究」
中根英昭、科学技術動向、No.43、21-31、2004.

(2) 口頭発表

①学会

国内 23 件、 海外 13 件

“Ground-based Millimeter-wave Measurements of Vertical Distribution of H₂18O in Upper Stratosphere
and Mesosphere over Atacama, Chile”, T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, T. Kuwahara, T.
Sugimoto, M. Matsuura, S. Murayama, K. Toki, N. Toriyama, A. Morihira, and Y. Fukui, AOGS 2007 4th
Annual Meeting, 30 July–4 August 2007, Bangkok.

“A New Development of Uncooled 22 GHz Band Spectroscopic Radiometer for Observations of Stratospheric Water Vapor”, T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Mezawa, N. Toriyama, T. Sugimoto, and M. Matsuura, AOGS 2007 4th Annual Meeting, 30 July–4 August 2007, Bangkok.

“Ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric H₂18O in a subtropical region in the southern hemisphere, Atacama highland in Chile”,

A. Mizuno, T. Sugimoto, T. Nagahama, H. Maezawa, T. Kuwahara, M. Matsuura, N. Toriyama, Y. Fukui, N. Mizuno, T. Onishi, H. Nakane, and A. Morihira, IUGG 24th General Assembly, 2–13 July, 2007, Perugia.

“Ozone variation in the years 1980-2100 calculated by the CCSR/NIES CCM in the CCMVal REF2 scenario”,

Akiyoshi, H., K. Sakamoto, T. Nagashima, and T. Imamura, IUGG 24th general assembly, July 2-13, 2007, Perugia.

“Solar cycle QBO effect to the stratosphere and troposphere”,

Yamashita Y., K. Sakamoto, H. Akiyoshi, L. B. Zhou, T. Nagashima, M. Takahashi, AGU Annual spring meeting, Acapulco, May 2007.

“Ground-based Millimeter-wave Observations of Water Vapor Emission (183 GHz) at Atacama, Chile”

T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Mezawa, A. Morihira, N. Toriyama, S. Murayama, M. Matsuura, T. Sugimoto, and S. Asayama, AOGS 2006 Third Annual Meeting, 10–14 July 2006, Singapore.

“A New mm-wave Spectroscopic Radiometer for the Measurements of Stratospheric and Mesospheric Water Vapor Isotopomers”

A. Mizuno, T. Nagahama, H. Mezawa, T. Kuwahara, A. Morihira, N. Toriyama, S. Murayama, M. Matsuura, T. Sugimoto, and S. Asayama, 36th COSPAR Scientific Assembly, 16–23 July 2006, Beijing.

“Simultaneous observations of stratospheric water vapor isotopomers with a ground-based superconductive radiometer”

A. Mizuno, 1st Asia Oceania Geosciences Society Annual Meeting, Singapore, July 5-9, 2004

“Long-term monitoring of the stratospheric and mesospheric ozone with the two ground-based millimeter-wave radiometers in NIES, Japan”

T. Nagahama, H. Nakane, H. Ogawa, A. Mizuno, Y. Fujinuma, A. Morihira, and Y. Fukui, 1st Asia Oceania Geosciences Society Annual Meeting, Singapore, July 5-9, 2004

“Ground-based Millimeter-wave Observations of Stratospheric ClO in the Mid-latitude Region in the Southern Hemisphere and a Plan of the Simultaneous Measurements of Isotopic Water Vapor Lines”

Mizuno, A., Nagahama, T., Fukui, Y., Mizuno, N., Nakane, H., Ogawa, H., Yonekura, Y., Asayama, S., and Morihira, A., the XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG2003), Sapporo, Japan, June 30 – July 11, 2003

“Variation and diffusion of low-N₂O air masses after the breakdown of the Arctic polar vortex in 1997 simulated by CCSR/NIES nudging CTM”,

H. Akiyoshi, S. Sugita, T. Sugita, H. Nakajima, H. Hayashi, J. Kurokawa, M. Takahashi, the XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG2003), Sapporo, Japan, June 30 – July 11, 2003

“Ozone perturbations in the Arctic summer lower stratosphere as a reflection of NO_x chemistry and planetary-scale wave activity”,

H. Akiyoshi, T. Sugita, H. Kanzawa, N. Kawamoto, the XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG2003), Sapporo, Japan, June 30 – July 11, 2003

“Analysis of year-to-year ozone variation over the subtropical western Pacific region using EP_TOMS data and CCSR/NIES nudging CTM”,

L. B. Zhou, H. Akiyoshi, K. Kawahira, the XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG2003), Sapporo, Japan, June 30 – July 11, 2003

「下部成層圏の等価有効塩素濃度とオゾン全量の回復時期」、
秋吉英治、今村隆史、永島達也、山下陽介、高橋正明、日本気象学会秋季大会、札幌、2007 年
10 月 14-16 日

「CCSR/NIES 化学気候モデルを用いたオゾン層の将来予測実験」、
秋吉英治、坂本圭、永島達也、高橋正明、今村隆史、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、千葉
（幕張メッセ国際会議場）、2007 年 5 月 19 日-24 日

「チリ・アタカマ高地における成層圏・中間圏 $H_2^{18}O$ の 時間変動観測」、
水野亮、杉本朋世、長浜智生、前澤裕之、桑原利尚、松浦真人、村山智史、水野範和、福井康
雄、中根英昭、笠井康子、森平淳志、日本気象学会春季大会、東京、2007 年 5 月 13- 16 日

「北半球中高緯度および北極渦内下部成層圏 NO_2 濃度と北極渦崩壊時期」、
秋吉英治、L. B. Zhou、日本気象学会、東京、2007 年 5 月 13-16 日

「2THz 帯 HEB ミクサ素子の開発」
前澤裕之、水野亮、長濱智生、山本智、新保謙、芝祥一、森田将、山倉鉄矢、中井直正、日本
天文学会 2007 年春季年会、東海大学、2007 年 3 月 28 日～30 日

「チリ共和国アタカマ高地における成層圏・中間圏水蒸気のミリ波 (183GHz) テスト観測」
水野亮、長浜智生、前澤裕之、桑原利尚、松浦真人、村山智史、杉本朋世、福井康雄、水野範
和、大西利和、小川英夫、森平淳志、日本地球惑星科学連合 2006 年大会、千葉（幕張メッセ国
際会議場）2006 年 5 月 14- 18 日

「オゾン層将来予測実験で得られたオゾンホール小さい年についての解析」
秋吉英治、坂本圭、日本気象学会秋季大会、名古屋、2006 年 10 月 25-27 日

「CCSR/NIES 化学気候モデルを用いたオゾン層の将来予測実験」
秋吉英治、吉識宗佳、永島達也、L. B. Zhou、今村隆史、高橋正明、黒川純一、滝川雅之、日
本気象学会春季大会、東京、2006 年 5 月 21-24 日

「太陽活動に対する熱帯下部成層圏のオゾンの変動」
坂本圭、秋吉英治、永島達也、L. B. Zhou、高橋正明、日本気象学会秋季大会、名古屋、2006
年 10 月 25-27 日

「Time threshold diagnostics (TTD) を用いた成層圏極渦内の下降流の解析」
菅田誠治、秋吉英治、神沢博、日本気象学会秋季大会、神戸、2005 年 11 月 20-22 日

「1997年北極渦のPolar Processor効果」
秋吉英治、菅田誠治、吉識宗佳、杉田考史、日本気象学会秋季大会、神戸、2005年11月20-22
日

「化学輸送モデルを用いた94/95 95/96 96/97年冬の北半球中高緯度域オゾン破壊の緯度別解
析」
秋吉英治、菅田誠治、黒川純一、滝川雅之、今村隆史、中根英昭、日本気象学会春季大会、東
京、2005年5月15-18日

「SAGE IIデータを用いた成層圏エアロゾルの解析～季節変動および準2年周期振動～」
庭野将徳、古屋望、秋吉英治、林田佐智子、日本気象学会春季大会、東京、2005年5月15-18日

「地上ミリ波放射計による成層圏・中間圏の水蒸気観測 — H_2^{18}O 観測結果と H_2O , H_2^{18}O 同時観測計画—」

水野亮、長浜智生、前澤裕之、福井康雄、中根英昭、笠井康子、森平淳志、日本気象学会春季大会、気象庁、2004 年 5 月 16-19 日

「火星大気のコミリ波・サブミリ波観測」

水野 亮、長浜 智生、前澤 裕之、福井 康雄、大西 利和、水野 範和、笹子 宏史、関口 朋彦、川辺 良平、阪本 成一、横川 創造、惑星科学関連学会 2004 年合同大会、幕張メッセ、2004 年 5 月 9-13 日

「ミリ波帯導波管型サイドバンドセパレーティング SIS ミクサの開発」

浅山信一郎、木村公洋、米倉覚則、小川英夫、水野亮、水野範和、福井康雄、岩下浩幸、高橋敏一、野口卓、日本天文学会 2004 年春季年会、名古屋大学、2004 年 3 月 22 日-24 日

「地上 FTIR を用いた太陽光吸収スペクトル観測による CO_2 カラム平均濃度の解析」

長浜智生、中根英昭、井上元、日本気象学会秋季大会、仙台、2003 年 10 月 15-17 日

「ILAS と CCSR/NIES ナッジング CTM を用いた 1997 年の北極域成層圏に関する研究」

秋吉英治、杉田考史、河本望、神沢博、菅田誠治、周立波、中島英彰、黒川純一、滝川雅之、永島達也、高橋正明、中根英昭、今村隆史、日本気象学会秋季大会、仙台、2003 年 10 月 15-17 日

「大気球面状の考慮が南極域成層圏化学過程及び気象場に与える影響—ナッジング化学輸送モデル及び化学気候モデルを用いた考察—」

黒川純一、秋吉英治、永島達也、中根英昭、増永浩彦、中島映至、高橋正明、日本気象学会秋季大会、仙台、2003 年 10 月 15-17 日

「Comparison of vortex remnant decay between the early and late Arctic vortex breakdown years obtained by potential vorticity and N_2O 」

L. B. Zhou and H. Akiyoshi, 日本気象学会秋季大会、仙台、2003 年 10 月 15-17 日

「南米チリにおける成層圏 ClO のミリ波観測と水蒸気同位体の同時観測計画」

水野亮、福井康雄、水野範和、長濱智生、中根英昭、小川英夫、米倉覚則、浅山信一郎、森平淳志、地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会、幕張メッセ、2003 年 5 月 26 日-29 日

「名古屋大学 STE 研でのミリ波地球大気観測と ALMA による惑星大気科学」

水野亮、地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会、幕張メッセ、2003 年 5 月 26 日-29 日

「臭素系不均一反応の北極域オゾン破壊への影響と極渦崩壊時期との関連」、

秋吉英治、今村隆史、黒川純一、中根英昭、高橋正明、日本気象学会春季大会、つくば、2003 年 5 月 21-23 日

②その他

国内 23 件、海外 21 件

“JEM/SMILES Experiment: A Validation Plan”,

T. Nagahama, and Validation Group in SMILES Science Team, SMILES International Workshop, March 17-19, 2008, Kyoto.

“Interannual variation in the BrO-ClO ozone destruction cycle in the northern high latitude lower stratosphere associated with the Arctic polar vortex variation in 1995-97”,

H. Akiyoshi, S. Sugata, T. Imamura, and H. Nakane, SMILES International Workshop, March 17-19, 2008, Kyoto.

“Reports on Complementary Japanese Measurements”,
H. Nakane and A. Mizuno, NDACC Steering Committee Meeting, Waikoloa, Hawaii, December 1-5, 2007.

“Site report on Moshiri and Rikubetsu FTIRs”
T. Nagahama, A. Mizuno and Y. Matsumi, 2007 NDACC IRWG meeting, Tenerife, May 1-3, 2007.

“SOLAR Project: Stratospheric ozone monitoring at Argentina subpolar region”,
E. Quel, E. Wolfram, J. Salvador, L. Otero, J. Pallotta, R. D’Elia, S. Godin-Beckmann, A. Pazmio, H. Nakane, M. Ono, A. Mizuno and T. Nagahama, The International Symposium, Asian Collaboration in IPY 2007-2008, Tokyo, 1 March, 2007

“SOLAR campaign: First results of ozone profile measurements at Rio Gallegos (51°55', 69°14'W), Argentina”
Wolfram, E., Salvador, J., Pallota, J., D’Elia, R., Otero, L., Godin-Beekmann, S., Pazmino, A., Nakane, H. and Quel, E., 23rd Int. Laser Radar Conf., Nara, July 2006,.

“Reports on Complementary Japanese Measurements”,
H. Nakane and A. Mizuno, NDACC Steering Committee Meeting, Observatoire de Haute-Provence, September 25-29, 2006.

“Site report on Moshiri and Rikubetsu FTIRs”
T. Nagahama, A. Mizuno and Y. Matsumi, 2006 NDACC IRWG meeting, Tsukuba, May 8-10, 2006.

“Submillimeter-wave Band Observation of Planetary Atmosphere”,
H. Maezawa, A. Mizuno, T. Nagahama, and ASTE group, NRO Workshop on Perspective of Submillimeter Astronomy with Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE), Mitaka, March 16-17, 2006

“Millimeter and Submillimeter-Wave Band Observations of Planetary Atmosphere”,
Mizuno, A., 3rd Workshop of ALMA Science Working Group, Mitaka, March 2-3, 2006.

“Reports on Complementary Japanese Measurements”,
H. Nakane and A. Mizuno, NDSC Steering Committee Meeting, Puerto de la Cus, Tenerife, November 8-11, 2005.

“Ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric water vapor and its isotopes in Chile”,
T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, T. Kuwahara, M. Matsuura, S. Murayama, T. Sugimoto, A. Morihira, H. Nakane, Y. Fukui, The international Workshop on Submillimeter Wave Earth Observation, Kyoto, November 14-15, 2005.

“Site report on Moshiri and Rikubetsu FTIRs”
T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa and Y. Matsumi, 2005 NDSC IRWG meeting, Toronto, June 13-15, 2005.

“Continuous Measurements of the Stratospheric and Mesospheric Ozone by Using Ground-based Millimeter-wave Radiometers”
T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, H. Ogawa and Y. Fukui, 1st International Conference on Submillimeter Science and Technology (ICSST 04), India, October 13-15, 2004

“Site report on Moshiri and Rikubetsu FTIRs”
T. Nagahama, J. Kadoguchi, A. Mizuno, H. Maezawa and Y. Matsumi, 2004 NDSC IRWG meeting, New Zealand, November 8-12, 2004

“Reports on Complementary Japanese Measurements”,
H. Nakane and A. Mizuno, NDSC Steering Committee Meeting, Andøya Rocket Range, Norway, September 14-17, 2004.

“Japanese Complementary Measurements – Microwave Measurements in Chile”,
Mizuno, A., NDSC Steering Committee Meeting 2003, Wellington, New Zealand, December 2 – 5, 2003

“Japanese Complementary Measurements”,
Nakane, H., NDSC Steering Committee Meeting 2003, Wellington, New Zealand, December 2 – 5, 2003

“Receivers for ALMA Band 3 and 4”
Ogawa, H., 3rd Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Mitaka, Dec. 5-6, 2002.

“SIS for NANTEN”
Mizuno, N., 3rd receivers Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Mitaka, Dec. 5-6, 2002.

“A study on transport and chemistry in the summer lower stratosphere using CCSR/NIES nudging CTM and the ILAS observation”,
H. Akiyoshi, S. Sugata, T. Sugita, H. Nakajima, H. Hayashi, H. Kanzawa, J. Kurokawa, N. Kawamoto, and M. Takahashi, International Symposium on Stratospheric Variations and Climate, Fukuoka, November 2002.

「昭和基地からのミリ波地上観測による中間圏の組成変動観測」、
水野亮、長濱智生、前澤裕之、桑原利尚、福井康雄、水野範和、森平淳志、小川英夫、中根英昭、第 31 回極域宙空圏シンポジウム、国立極地研究所、2007 年 7 月 23- 24 日

「ミリ波・サブミリ波帯における惑星観測」
前澤裕之、水野亮、長濱智生、大西利和、水野亮、福井康雄、ASTE グループ、第 8 回惑星圏研究会、東北大学青葉記念会館、2007 年 3 月 22 日～23 日

「オゾン層の破壊と回復のメカニズム」
秋吉英治、太陽紫外線防御研究委員会第 17 回シンポジウム「生物環境としての太陽紫外線」、東京、2007 年 3 月 16 日

「陸別ミリ波放射計で観測された成層圏オゾンの短期変動解析」
松浦真人、長濱智生、水野亮、中根英昭、藤沢康実、森平淳志、小川英夫、福井康雄、第 17 回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2007 年 1 月 10- 12 日

「チリアタカマにおける H2180 の地上ミリ波観測」
杉本朋世、水野亮、長濱智生、前澤裕之、桑原利尚、松浦真人、森平淳志、水野範和、大西利和、福井康雄、小川英夫、米倉覚則、第 17 回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2007 年 1 月 10- 12 日

「2100 年までのオゾン層将来予測実験」
秋吉英治、坂本圭、永島達也、今村隆史、第 17 回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2007 年 1 月 10 日－12 日

「11 年周期変動に対応する熱帯下部成層圏オゾンの変動に関する解析」
坂本圭、秋吉英治、永島達也、L. B. Zhou、高橋正明、第 17 回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2007 年 1 月 10 日－12 日

「オゾン層破壊問題－今後の予測と紫外線影響－」
秋吉英治、オゾンホールは回復するのか推進費一般講演会、名古屋、2006 年 10 月 28 日

「チリ・アタカマ高地の水蒸気観測の進捗と22GHz常温ラジオメータによる水蒸気観測計画」
水野亮、長濱智生、前澤裕之、桑原利尚、杉本朋世、松浦真人、村山智史、鳥山哲司、森平
淳志、水野範和、中根英昭、第16回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2006年1月11日
－13日

「化学気候モデルバリデーション(CCMVal)シナリオに基づいたオゾン層変動の数値実験」
秋吉英治、吉識宗佳、永島達也、今村隆史、L. B. Zhou、高橋正明、黒川純一、滝川雅之、第
16回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2006年1月11日－13日

「時間閾値解析法(TTD)を用いた成層圏極渦の孤立性と鉛直流の解析」
菅田誠治、秋吉英治、神沢博、第16回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2006年1月11
日－13日

「南米チリにおける水蒸気同位体観測とマイクロ波放射計を用いた水蒸気観測網計画」
水野亮、長濱智生、前澤裕之、桑原尚久、森平淳志、第15回大気化学シンポジウム、豊川市民
プラザ、2005年1月5－7日

「アルマによる惑星科学：太陽系天体から惑星形成」
前澤裕之、水野亮、長濱智生、NRO ワークショップ、国立天文台、2005年3月3日－4日

「地上ミリ波分光計によるオゾン等の中間圏微量分子の変動観測」
長濱智生、水野 亮、前澤裕之、森平淳志、中根英昭、水野範和、大西利和、米倉覚則、小川英
夫、福井康雄、CAWSES キックオフ会議、伊良湖ガーデンホテル、2004年6月16－18日

「ミリ波大気観測装置の開発とチリアタカマでの観測計画」、
水野亮、ミリ波・サブミリ波受信技術に関するワークショップ、名古屋大学、2004年3月10
日－11日

「THz Band の SIS/HEB ミクサーの開発の現況」
前澤裕之、ミリ波・サブミリ波受信技術に関するワークショップ、名古屋大学、2004年3月10
日－11日

「ミリ波導波管型サイドバンドセパレーティング SIS ミクサの開発」
浅山信一郎、ミリ波・サブミリ波受信技術に関するワークショップ、名古屋大学、2004年3月
10日－11日

「オゾンホールを予測する手立て」
秋吉英治、第18回「大学と科学」公開シンポジウム ―オゾンのゆくえ―、東京、2003年12
月1-2日

「ミリ波観測による中間圏オゾンの時間変動」
長濱智生、第4回宇宙天気・気候シンポジウム、陸別町タウンホール、2003年11月28日－29
日

「超伝導ミリ波放射計による極域成層圏中間圏の組成変動観測計画」
水野亮、福井康雄、長濱智生、中根英昭、小川英夫、米倉覚則、第27回極域における電離圏
磁気圏総合観測シンポジウム、国立極地研究所、2003年7月31日－8月1日

「ミリ波・サブミリ波スペクトルによる地球および惑星大気の観測」
水野亮、惑星電磁圏・大気圏研究会、東北大学、2003年3月19日－20日

「名古屋大学におけるミリ波地球大気観測と ALMA での惑星大気観測」
水野亮、NRO ワークショップ「アルマで惑星科学」、北海道大学、2003 年 1 月 24 日—25 日

「ミリ波スペクトル多周波同時測定装置の開発と水蒸気同位体分子の長期モニタ観測計画」
水野亮、第 13 回大気化学シンポジウム、豊川市民プラザ、2003 年 1 月 8 日—10 日

(3) 特許出願 (SORST 研究の成果に関わる特許 (出願人が JST 以外のものを含む))
なし

(4) その他特記事項
特になし

9. 結び

我々は先の CREST において観測装置の性能を追求した。その結果、他の追従を許さぬ高感度な地球大気微量分子測定装置の開発に成功し、非常に微弱な中緯度帯での一酸化塩素分子(C10)ミリ波スペクトル観測を成功させた。しかし、それは反面、同装置を他には例のない特殊な装置と位置付けることに他ならなかった。また、性能を追求したあまり、装置の調整に関してもユーザーフレンドリーとは言い難いものであった。

地球大気環境の地上観測では、世界各国に広がる観測網を構築することがきわめて重要である。観測装置を広く普及させるためには、様々な技術レベルにあるユーザーが同じように使え、精度のそろったデータが取得できる必要がある。

本研究は、先の CREST の開発で獲得した技術をさらに発展させ、「使い勝手のよい」測定装置、すなわち誰もが簡単に使え、当たりまえのことだが同じ結果が得られる装置にまとめあげてを念頭において開発を進めた。「小型化」、「省電力化」、「操作性の向上」といった基本的な目標は十分に達成されたと考えている。本研究で確立した小型ミリ波観測装置の技術をぜひ南極昭和基地での観測研究に結実させたい。

また、アタカマ高地における観測の立ち上げは、他の場所では観測が困難な極微量の分子の観測を可能にした。亜熱帯域に位置し、熱帯と中緯度帯の両方の空気塊を観測できること、ブラジル磁気異常帯にも近く今後の太陽活動期に向かって高エネルギー電子の降り込みに伴う大気組成変動の研究が可能となること、など世界的にもユニークな観測サイトとして、今後も観測を継続させ、コミュニティーにデータを提供していきたい。

アタカマ高地はフィールド観測装置としての完成度を高めるためのよいテストベンチでもあった。標高 4,800m という極端な環境で観測装置の不具合に遭遇し、原因を解明し、改良を加え、同様の障害が再発しないよう事前の対策を施す、こうした経験の蓄積により、不具合の発生頻度は抑えられ、観測装置の完成度は高まっていった。しかし、それでも標高 4,800m における観測装置の維持管理は容易なものではなかった。このような状況の中で、中途よりチリ大学の研究グループから協力を得られる幸運に恵まれた。その際、JST 事務局のご理解により、非常に円滑かつ迅速にチリ大グループを本研究に加えることができた。最も重要な時期に大きなサポート得ることができ、現地での観測を軌道に載せることができた。

今後は、モデル化グループをはじめとする関連研究者との議論を通し、本研究で開発した観測装置および開拓したアタカマ高地での観測結果を科学的な成果に結びつけるように努力していきたい。

最後に、研究統括、そして事務参事の三上氏をはじめとする JST 事務所の方々には言葉では尽くせない親身のお世話を頂いた。深く感謝の気持ちを表したい。