

4-7 ミリ波ラジオメータの開発と成層圏観測

4-7 Development of millimeter-wave radiometers and stratospheric observation

落合 啓
OCHIAI Satoshi

要旨

成層圏のラジカル等の濃度分布を地上から観測するためのミリ波ラジオメータを開発した。ミリ波ラジオメータは、200GHz、270GHz帯の周波数を用い、オゾン、ClOなどの観測を目的としている。アラスカのフェアバンクス近郊と、カナダの高緯度の観測所の2か所で成層圏の観測を始めつつある。これらの装置は、リモートでの操作と自動観測が可能になっている。観測したオゾン濃度はこれまでにオゾンゾンデの観測値と比較された。その他の分子の観測と解析は今後に期待される。

Ground-based millimeter-wave radiometers have been developed and are used for observations of height profiles of stratospheric molecules and radicals. The radiometers have receivers in frequency bands of 200 or 270 GHz. The main target molecules of the stratospheric observation are ozone and ClO. We are starting observations in a suburb of Fairbanks, Alaska and a high latitudinal station in Canada. These instruments have capability of remote and automatic operations. The ozone profiles measured by the radiometer are compared with the measurements by ozonesonde. The observations of various molecules other than ozone are in progress.

[キーワード]

マイクロ波分光観測, 地上設置, オゾン層, 一酸化塩素, SISミキサ
Microwave spectroscopy, Ground-based, Ozone layer, Chlorine monoxide, SIS mixer

1 はじめに

成層圏大気の化学組成を知るためのリモートセンシングとしては、様々な波長の電磁波を使用した手段があるが、ミリ波はその中でも最も波長の長いものに属する。ミリ波で観測できる分子は、水蒸気、酸素、オゾン、一酸化炭素、亜酸化窒素(N_2O)、一酸化塩素(ClO)、硝酸(HNO_3)、シアン化水素(HCN)などである。分子の吸収線を利用した大気組成の観測は、ミリ波より長い波長では、強度の十分な吸収線がなく困難である。より短い波長を利用した大気のリモートセンシングに対して、ミリ波リモートセンシングは次のような特徴がある。すなわち、大気温度程度の熱放射が観測できるので、太陽

光などの吸収による観測より自由度が増えること、吸収線の圧力広がりを利用した高度分布観測が可能な高度が、赤外などを利用した観測より高く中間圏くらいまでの高さであること、ClOなどにおいて観測に適した吸収線がミリ波にあることなどである。

オゾン層の変動に関して、塩素系の化学や、成層圏の不均一化学の中で、重要な分子であるものの幾つかは、ミリ波による観測が最も適当な手段と考えられるため、極域でのミリ波観測が注目を集めてきた。ClOは、塩素原子による触媒的な連鎖反応の進行量を評価するのに最も直接的な指標になる。 N_2O は、大気運動のトレーサとして重要であり、また、大気中の活性な窒素化合物の量を見積もる指標となる。 HNO_3 は、極

成層圏雲の生成などによる脱窒過程を知る良い指標になり、また、中間圏からの窒素化合物の流入を見積もる指標にもなる[1]。

これまで、100GHz帯のオゾン、200GHz帯、270GHz帯のClO、250-270GHz帯で、N₂O、HNO₃、HCNなどが測られてきた[2]。また、22GHz帯の水蒸気吸収線の間圏の観測も多く行われている[3]。観測場所も、中緯度、南極点、北極域などでの観測が行われてきた。北極域では、観測に適した場所が少ないこともあって、継続した観測は多くない。通信総合研究所では、多分子を同時に継続して自動観測を行う、高感度な超伝導受信機(SIS受信機)を開発して、北極域での観測を開始している。

2 通信総合研究所におけるミリ波ラジオメータ開発

通信総合研究所では、国立天文台と共同して、200GHz帯、270GHz帯及び640GHz帯のSISミキサを開発した。これを用いて、地上設置型のミリ波ラジオメータとして、200GHz帯と270GHz帯の2周波を持つミリ波ラジオメータと、270GHz帯のみのミリ波ラジオメータの2台を開発してきた。それぞれの装置では、アンテナ設計、ミリ波光学系設計と組立て調整、SIS受信機の設計、製作、調整、中間周波数系の設計と組立て調整、システム制御系の設計、一部製作、調整、観測制御プログラムの開発、観測データ解析プログラムの開発と、全体設計、装置運用を通信総合研究所で行ってきた。200GHz帯と270GHz帯の2周波ミリ波ラジオメータは、1997年にノルウェーのスピッツベルゲン(北緯79度)で、ドイツと米国のグループと比較同時観測を行った[4]。そのミリ波ラジオメータは、1998年以降、米国アラスカ州のポーカーフラット(北緯65度)で観測を行っている。270GHz帯ミリ波ラジオメータは、2000年に北極圏カナダのエルズミア島ユーレカ(北緯80度)に設置し、観測を始めつつある。

また、通信総合研究所では、高高度気球搭載のサブミリ波リム放射サウンダ[5]及び国際宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES)[6]の開発を進めている。これ

らは、観測装置の構成などについては、地上設置ミリ波ラジオメータと同一であり、同様の技術を利用して開発されている。ただし、リム放射サウンダでは、観測の高度分解能がアンテナ口径に大きくよるが、地上設置ラジオメータでは、アンテナ口径は高度分解能に関係しない。

3 ラジオメータの構成、概要

ミリ波ラジオメータは、アンテナ、スイッチ機構やフィルタ機能を有した入力光学系、ミリ波ヘテロダイン受信機、マイクロ波帯の信号をスペクトル分解する分光計から構成される。

地上設置ミリ波ラジオメータでは、ある一つの仰角を観測して、その視線上の大気の放射の積分量を受信することによって、観測分子の高度分布を求める。成層圏では水平方向の不均一性が大きくはないので、仰角を変えて観測しても、いずれの高度でも同じように積分距離が変化するだけなので、高度分解能には関係しない。しかし、観測方法と対流圏の不透明度によってS/Nが最適になる仰角の値があり[7]、普通はその仰角に近い値で観測する。アンテナの口径は、受信強度にも関係しない。それは、ビームの太さによる仰角の変化が無視できる程度であれば、大気が一様であるならば、放射強度はアンテナからの立体角に比例しているからである。

分子の吸収線の空気による圧力広がり、分子の種類、温度によって変わるが、およそ20から30kHz/Paくらいである。ドップラーブロードニングは、分子量48、温度240Kとすると、200GHzで192kHzくらいであるので、気圧が数Paになる、高度およそ70kmまでを高度分解する観測対象とすることができる。分光計の周波数分解能も、吸収線の幅を分解できる程度である必要がある。分光計の帯域幅は、観測できる下限の高度を決めることになる。およそ1GHzの帯域幅で下限は15km程度となる。帯域幅が1/2になると観測できる下限の気圧は1/2、すなわち5kmほど高い高度となる。受信機の帯域幅は、一つの分子を観測する場合は、上記の分光計の帯域幅が良いが、帯域幅をもっと広げて複数の分子の観測を目指すこともある。

3.1 アンテナ、光学系

発泡スチロールのレドームを通して入ってきた信号は、準光学導波系を用いた光学系によって導かれ、4K程度に冷却されたSISミキサで検出される。この光学系には、信号をクライオスタット内に導くことのほかに、単側波帯分離、ミリ波局部発振信号の注入、参照信号との切替え、参照信号の生成、更に光学系内で発生する定在波の除去などの機能がある。通信総合研究所の2周波ミリ波ラジオメータと、270GHz帯ミリ波ラジオメータでは、これらの機能の実現方法が異なっている。図1、図2にそれぞれの光学系の構成図を示す。参照信号とは、観測している大気からの放射輝度温度とほぼ等しい輝度温度を持つ成層圏からの信号によるスペクトル構造を持たない、またはその構造が小さい信号で

ある。この参照信号の方式が二つのラジオメータで異なっていて、図1の2周波ミリ波ラジオメータでは、参照信号との切替えにビームスイッチを使用した方法[8]を用いている。すなわち、チョッパ(chopper)によって、主ビームと、天頂近くからの信号から減衰板(lossy dielectric)を通して得られる参照信号とを切り替えている。図2の270GHz帯ミリ波ラジオメータでは、内部参照信号による参照信号の切替え方法を用いている。高温(reference hot)と低温(reference cold)の参照信号からワイヤグリッドと平面鏡の組合せ(reference adjustment)で必要な輝度温度の参照信号を得る方法[7]である。ビームスイッチによる方法には、光学系内で定在波が起きにくいという特徴があるが、観測時に仰角を自由に選べないこと、内部参照信号の方法に比べて信号対

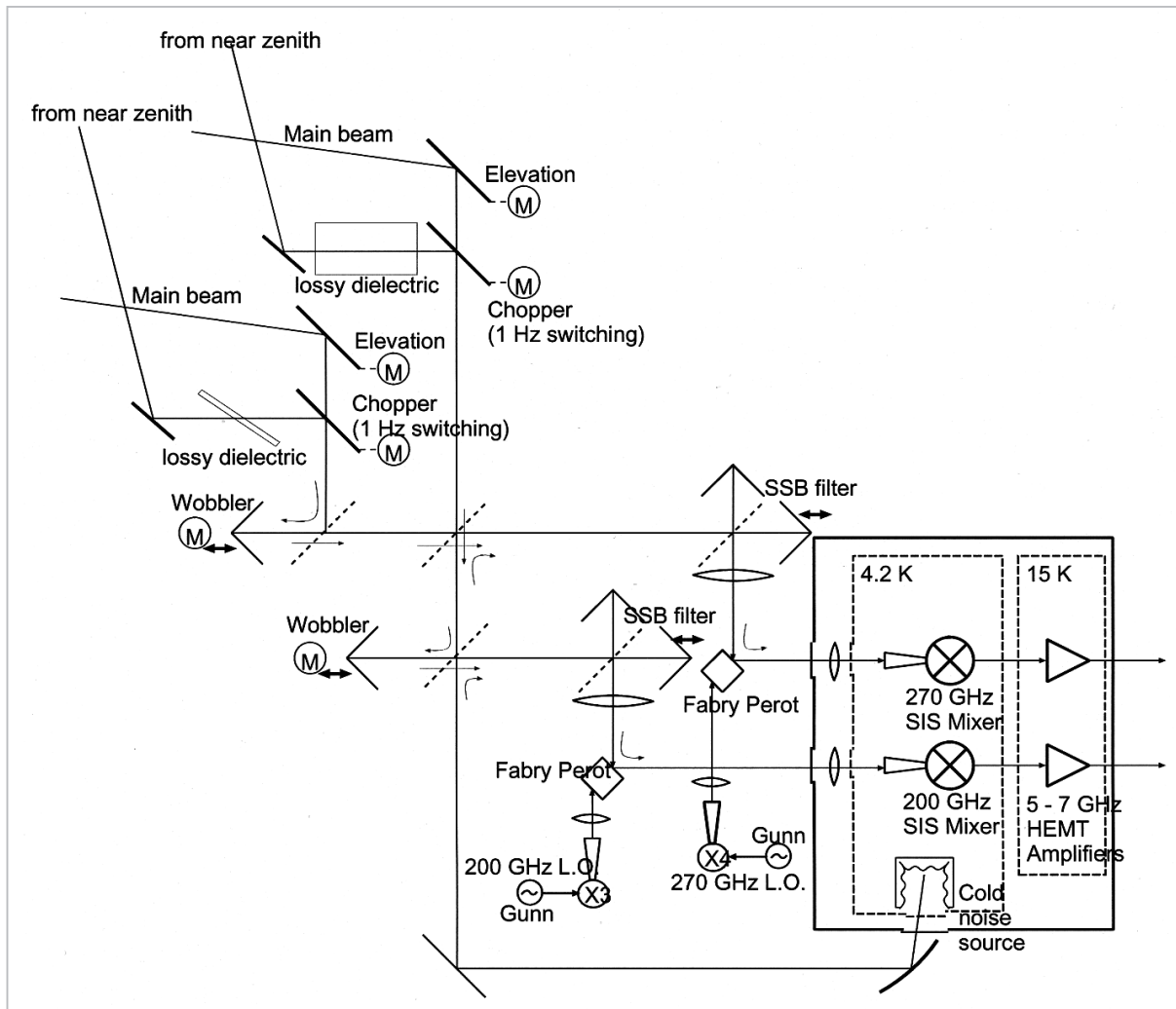


図1 2周波ミリ波ラジオメータ(ポーカーフラット)の光学系

ビームスイッチによる参照信号切替え方法を用いている。

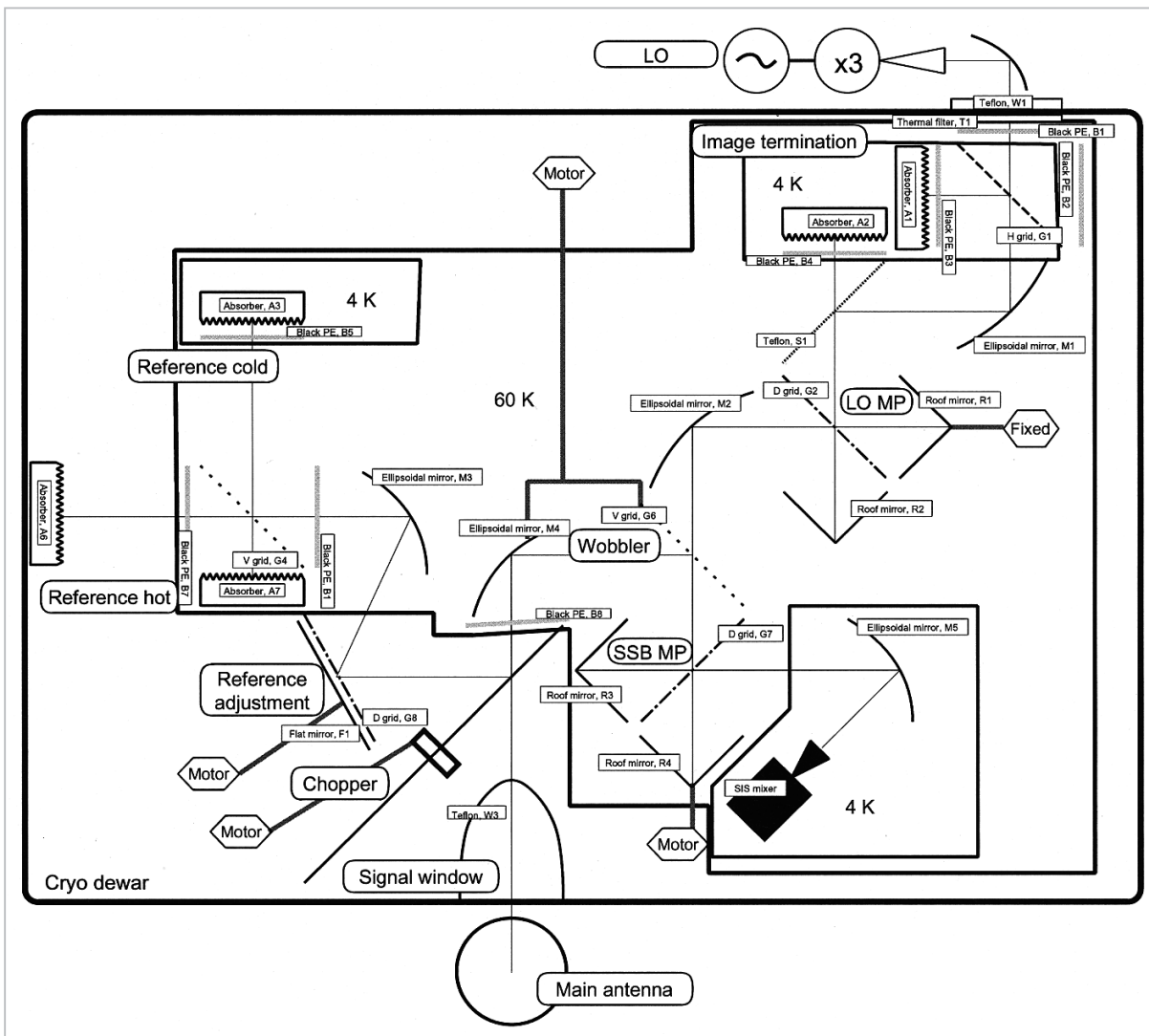


図2 270GHz帯ミリ波ラジオメータ(ユーレカ)の光学系

内部参照信号による参照信号切替え方法を用いている。

雑音比が劣ることなどの欠点がある。また、2周波ミリ波ラジオメータと、270GHz帯ミリ波ラジオメータでは、光学系の物理的な大きさが異なり、2周波ミリ波ラジオメータでは、大気からの信号を最初に受ける鏡からSISミキサまでの導波路の長さが約2mだが、270GHz帯ミリ波ラジオメータでは、約0.4mである。長い導波路で生じる定在波が存在すると、観測スペクトルから分子の高度分布を求めるときの誤差が大きいが、周波数軸上では短い周期のうねりとなるので、同定しやすい。2周波ミリ波ラジオメータでは、参照信号と切り替えるチョッパをミキサから遠くすることにより、スペクトル上で同定が難しい、短い導波路での定在波を起こらないようにしている。270GHz帯ミリ波ラジオメータでは、

ミリ波の導波路を可能な限り短くすることで、定在波パターンを安定化し、影響を少なくする方法をとっている。

3.2 受信機、分光計

準光学導波系を通じた大気からの放射は、ミリ波局部発振信号と共に、ホーンを通して、導波管型SISミキサに導かれ、マイクロ波帯の中間周波数へと変換される。中間周波数帯の信号は冷却HEMT増幅器によって増幅され、常温の中間周波数帯増幅系への入力となる。ミリ波受信機雑音温度は、270GHz帯ミリ波ラジオメータで500K程度の値で使用している。放射強度の絶対値較正のために受信帯域中で受信機雑音温度の値を知る必要がある。そのために、高温と低温

の二つの温度の黒体放射を使用した受信機雑音温度の測定を、頻繁に行う必要がある。ビームスイッチの方法では、低温の黒体放射を作るために液体窒素を使用しているため、受信機雑音温度の測定は数日から数週間に一度程度となる。受信機雑音温度を一定にするために、ミリ波局部発振信号の安定化が必要となる。

中間周波数帯増幅系では、信号増幅、音響光学型分光計(AOS)の入力周波数への周波数変換、さらに、参照信号とのバランスを取るためなどの目的で広帯域の検波出力を得ることなどの機能がある。AOSの周波数帯域幅は、受信機の帯域幅より狭く、また、ミリ波局部発振周波数よりも、2段目以降の局部発振周波数を変更する方が容易なので、観測分子の選択、吸収線の形状を取得する範囲を、変更するための周波数切替えも、中間周波数帯増幅系で行う。

分光計には、現在、AOSを使用している。2周波ミリ波ラジオメータで使用している広帯域のAOSでは、周波数分解能は1.2MHz程度なので、主に成層圏から下方の観測を主目的としている。吸収線幅の狭い中間圏の観測を行うためには、AOSでは、周波数分解能が固定されていること、広帯域AOSでは相対的に周波数安定度に問題があるなどのために、困難が多いので、デジタル相関器を使用した分光計の導入などを検討している。

現在、通信総合研究所で観測に使用している、2台の観測器の主要諸元を表1に示す。2周波ミリ波ラジオメータでは、目的観測分子が5種類あるが、同時に観測できるのは、一つの周波数帯

で1分子ずつの2種類の分子だけで、観測分子を変更するには、手動での周波数変更が必要になる。一方、270GHz帯ミリ波ラジオメータでは、自動で観測分子を表1の4種類の中から選択することができる。

3.3 制御、データ収集、ネットワーク

ビームスイッチ又は内部参照信号との切替えは、チョッパにより1から2Hz程度で行っている。チョッパに同期して、AOSでの積分、ビームスイッチ方式では仰角の調節、内部参照信号の場合は参照信号の輝度温度の調節を行う。これらの制御は、制御用の計算機により行う。内部参照信号を用いている270GHz帯ミリ波ラジオメータでは、制御用の計算機にRealtime Linuxを用いて計算機の発生する等間隔のパルスにチョッパのモータが同期するようにしている。制御用の計算機では、観測時刻、観測方向、検波器出力、各ミラー等の位置、温度等のデータ解析に必要な情報を、観測ログとして出力する。AOSで取得されるデータは、別の計算機で読み込まれ、スペクトルデータとして保存される。観測ログと、スペクトルデータは、それぞれ保存されて、データ解析時に同じ時刻のものが照合される。

ポーカーフラットでの観測データは、ミリ波ラジオメータの計算機内に蓄えられ、さらに、Salmonシステム[9]によってftpを使用して取得され、通信総合研究所内へ転送される。ユーレカのミリ波ラジオメータでは、観測データは、定期的に電子メール又はrsyncなどによって、自

表1 CRLミリ波ラジオメータの主要性能

	2周波ミリ波ラジオメータ	270 GHz帯ミリ波ラジオメータ
設置場所	米国ポーカーフラット	カナダ ユーレカ
周波数帯	200 GHz帯および270 GHz帯	270 GHz帯
ミリ波局部発振周波数	196 - 231 GHz および 248 - 284 GHz (ただし手動による切り替え)	268.13 GHz
第1中間周波数	5 - 7 GHz	7 - 11 GHz
受信機雑音温度	500 - 1,500 K	500 - 2,000 K
AOS帯域幅	1 GHz	0.5 GHz
AOS周波数分解能	1.3 MHz	0.4 MHz
観測仰角範囲	5 - 35 degree	5 - 55 degree
観測方位角	南北の2方向	3方向
スイッチング方式	ビームスイッチ	内部参照信号
目的観測分子	O ₃ , ClO, HNO ₃ , N ₂ O, HCN	O ₃ , ClO, N ₂ O, HNO ₃

動的に通信総合研究所内へ転送されることになっている。

3.4 データ処理

観測時間のほとんどは、大気からの信号と、参照信号の二つを、交互に取得している。較正のために、ビームスイッチの方式では、減衰板の不透明度と受信機雑音温度を求めるために、常温黒体(ホットロード)からの信号、参照信号のパスで減衰板を取り除いた場合の信号、それと、液体窒素温度の黒体(コールドロード)からの信号を得る。内部参照信号の方式では、内部で高温低温の黒体信号を作れるので、受信機雑音温度を内部参照信号で測定する。さらに内部の高温低温信号源の輝度温度を較正するために、ホットロード、液体窒素のコールドロードからの信号を取得する。そのほかに、受信機の直線性を確認するためや、ベースラインのうねりの大きさを求めるために、中間周波数系にアッテナータを挿入したり、アンテナ仰角を変えながら大気を受信したデータを得ている。

ミリ波ラジオメータのデータ処理は、2段階で行われる。すなわち、観測生データから、成層圏分子放射のスペクトル強度を求め、次に、目的分子濃度の高度分布を求めるためのインバージョンを行う。

成層圏分子放射のスペクトル強度は、地上で観測したデータを、対流圏上部から天頂方向を見た場合を仮定した値に変換して表す。すなわち、対流圏での水蒸気等による減衰の補正と、観測時の仰角に対して放射の積分距離を規格化する操作を行う。ラジオメータより得られる信号は、大気の放射輝度と受信機雑音温度の和に、受信機利得を乗じた値であるので、スペクトル強度を求めるためには、対流圏の不透明度とともに、受信機雑音温度、受信機利得を知らなければならない。

スペクトル強度を求めるためには、大気観測信号Sのほかに、参照信号R、ホットロードの信号H、コールドロードの信号Cのいずれか一つ又は複数が必要となる。対流圏の不透明度は、SとRのバランスがとれている状態では、その条件(アンテナの仰角又はRの輝度温度)より推定できる。また、受信機利得の時間変動はあるが、

受信機雑音温度の変動は小さいので、あらかじめ、受信機雑音温度を求めておくことにより、受信機利得の効果を打ち消したS/Rの値よりスペクトルの値が得られる。大気観測では、通常SとRのみを使用する。そのことにより、定常的にHやCを使用する方法に比べて、観測時間の効率が高くなる。

スペクトル強度から高度分布を求めるためのインバージョンでは、optimal estimation method (OEM)^[10]を用いている。OEMでは、先験的な濃度の高度分布の値と分散を用いる。分散の先験値の与え方により、解に予想される分散の大きさや高度分解能が変わるが、分散の先験値は必ずしも信頼できる値があるわけでないので、むしろ得られる高度分布の使い方に応じて、分散の先験値を変えて、高度分解能などを調節するようにしている。

4 成層圏観測

通信総合研究所では、北極域のポーカークラットとユーレカの2点で観測を始めつつある。この2点は、極域春先のオゾン減少が顕著にみられる成層圏の極渦の、それぞれ、外と中に位置することが多く、2点の連続観測によって、極域のオゾン減少の様相をとらえられることが期待される。

ポーカークラットの2周波ミリ波ラジオメータは、1998年に現地に設置して、断続的に観測を行っている。ユーレカの270GHz帯ミリ波ラジオメータは、2000年に現地に設置を行った。

4.1 オゾンゾンデとの比較

ポーカークラットのミリ波ラジオメータでは、オゾンゾンデとの同時観測を行って、測定したオゾン濃度の比較を行った。図3に、その比較の一例を示す。この観測では、スペクトルのベースラインのうねりの成分が、図3(b)のように0.4K程度あるために、オゾンゾンデの観測値と低い高度のところで一致が良くない。その後の観測では、ベースラインのうねりを減らすために、受信機系の線形性を測定してその補正を施し、また、ミリ波光学系の定在波低減器の再調整などの対策を行っている。

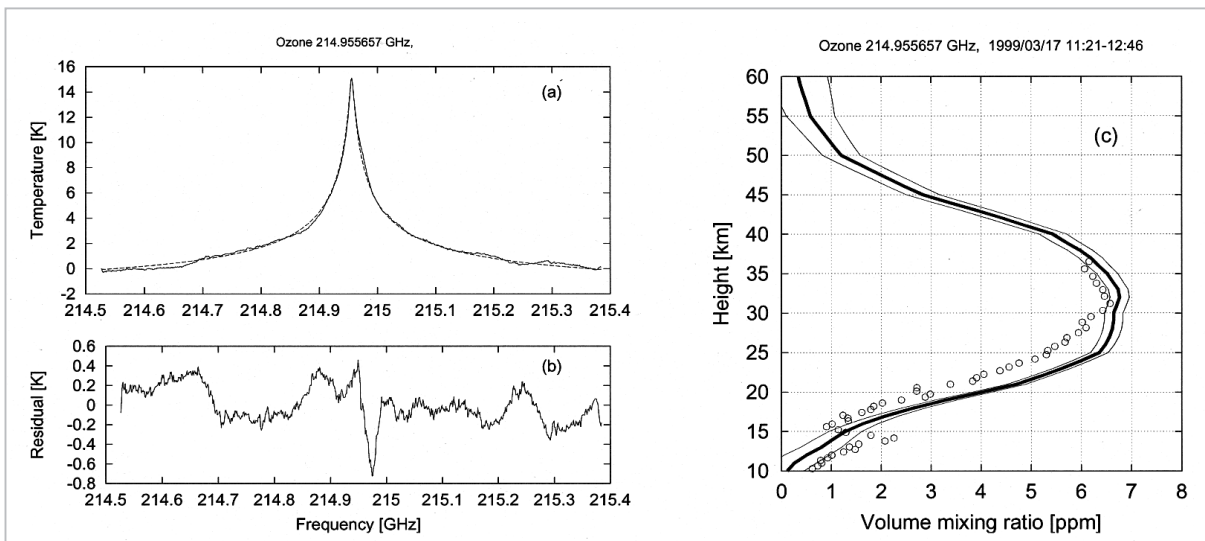


図3 オゾンゾンデ観測とミリ波ラジオメータ観測の比較

1999年3月17日のオゾンゾンデとの同時観測

(a)ミリ波ラジオメータの観測スペクトル(実線)、インバージョンを行い求めた濃度から計算したスペクトル(破線)

(b)観測スペクトルと計算スペクトルの差

(c)インバージョンで得られたオゾン濃度高度分布(実線)、オゾンゾンデによる観測値(白丸)

4.2 観測計画

2地点でのミリ波ラジオメータによる観測は、今後継続して行っていく計画である。ポーカーフラットでは、2種の分子の同時観測、ユーレカでは、オゾン、ClO、N₂O及びHNO₃の同時観測が可能である。

これらのラジオメータのアンテナでは、水平方向に180度異なる方向の観測も可能である。観測では10から20度程度の低い仰角の観測を行うので、観測している成層圏の大気は、観測装置の位置から水平方向に100km近く離れた場所になる。通常成層圏では水平方向の分布は一様に近いが、特に極渦の縁などでは、水平方向の非一様性も考慮されなければならない。また、異なった視線方向の吸収線の周波数から、オゾンなどの量の多い高度での風の情報を引き出すこともできる。ポーカーフラットでは、他の観測機器との共同観測も期待される。極域のオゾン層変動を目的としたもの以外に、ポーカーフラットにある他の観測機器による中間圏の熱圏の観測と、オゾン、HNO₃やHCNの上部成層圏から中間圏の観測との組合せなどが期待される。

5 結論と今後の計画

通信総合研究所では、地上設置の成層圏観測ミリ波ラジオメータを開発し、アラスカのポーカーフラットと、カナダのユーレカに設置し、観測を始めている。これらのラジオメータは、超伝導を使った高感度受信機であること、極域の環境で長期間自動観測が行えるように設計されていて、ラジオメータの運用を遠隔操作できること、データの取得が行えることなどの特徴がある。今後、ラジオメータによる観測を継続し、成層圏化学、成層圏中間圏の相互作用などについて、検討を行っていく予定となっている。また、オゾンゾンデとの観測データの比較、データ解析アルゴリズムの改良などによる、取得データの精度向上が検討されている。

謝辞

この研究は、通信総合研究所のプロジェクトのほかに、一部旧科学技術庁の総合研究からも支援を受けた。極域での観測について、アラスカ大学との共同研究、カナダ環境省との共同研究を行っている。受信機開発について、国立天文台野辺山と共同研究を行った。

参考文献

- 1 R. L. de Zafra, S. P. Smyshlyaev, "On the formation of HNO₃ in the Antarctic mid to upper stratosphere in winter", JGR, vol. 106, No. D19, pp. 23115-23125, 2001.
- 2 R. T. Clancy and D. O. Muhleman, "Ground-based microwave spectroscopy of the Earth's stratosphere and mesosphere" in Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry, ed. by M. A. Janssen, Chap. 7, John Wiley and Sons, Inc., 1993.
- 3 C. Seele, P. Hartogh, "A case study on middle atmospheric water vapor transport during the February 1998 stratospheric warming", GRL, Vol. 27, No. 20, pp. 3309-3312, 2000.
- 4 U. Klein et al., "Chlorine monoxide radiometer intercomparison in Ny-Ålesund, 1997", The Fourth European Symposium on Ozone Research, Schliersee, Germany, Sep. 1997.
- 5 入交, "中層大気観測用気球搭載型超伝導サブミリ波リム放射サウンダの開発", 本特集.
- 6 真鍋, "国際宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(JEM/SMILES)の開発", 本特集.
- 7 S. Ochiai, Y. Irimajiri, and H. Masuko, "270 GHz SIS radiometer for stratospheric ClO observation", Proc. of SPIE, vol. 4152, Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment II, pp. 372-379, 2000.
- 8 A. Parrish, R. L. de Zafra, P. M. Solomon, and J. W. Barrett, "A Ground-based technique for millimeter wave spectroscopic observations of stratospheric trace constituents", Radio Sci., Vol. 23, No. 2, pp. 106-118, 1988.
- 9 村山他, "アラスカ・プロジェクト -アラスカにおける北極域大気環境観測の国際共同研究-", 本特集.
- 10 C. D. Rodgers, "Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and practice", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000.

落合 啓

電磁波計測部門 SMILES グループ主
任研究員
成層圏の観測的研究