

気球搭載型超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (BSMILES)

BSMILES - A Balloon-borne Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder

入交芳久 落合 啓 フィリップ バロン

IRIMAJIRI Yoshihisa, OCHIAI Satoshi, and Philippe Baron

要旨

成層圏に存在するオゾン層は、太陽から降り注ぐ、生物に有害な紫外線から地上の生命を守る役割を果たしている。1980年代に南極上空でオゾン層が破壊されていることが発見されて以来、オゾン破壊は人類が作り出した物質が原因である地球環境破壊として深刻な問題となった。その後、国際的な特定フロン等の排出規制により、オゾンは回復傾向にあるとも言われているが、その将来は不確定である。オゾン破壊には成層圏中の微量分子による触媒反応が関連していると言われていたが、その光化学過程は未解明であり、オゾンの将来予測のためには大気中における分子の分布を測定し、光化学過程を解明することが鍵となる。我々は、成層圏中の微量分子を観測することを目的とした、気球搭載型の超伝導を利用した高感度観測装置を開発し、2003年、2004年、2006年に観測実験を行った。実験は成功し、オゾンや地球温暖化にも関連する成層圏中微量分子のデータが取得された。

Stratospheric ozone layer protects life on the Earth from harmful ultraviolet rays from the Sun. Since the antarctic ozone hole was discovered in 1980, ozone destruction became a serious global environmental problem especially because it is caused by human activity. Although it is said that the ozone layer is recovering in recent years by international reduction of ozone-depleting substances such as designated chlorofluorocarbons, ozone recovery rates are still uncertain. Because catalyst reaction with the stratospheric minor constituents is related to the ozone destruction, observations of the molecules and clarifying of the photochemical processes are important in order to predict recovery of ozone concentrations. We have developed a balloon-borne high-sensitive superconductive receiver system in order to measure stratospheric minor gases. Balloon flight experiments were successfully conducted in 2003, 2004, and 2006, and ozone and ozone-depleting substances and greenhouse gases were measured.

[キーワード]

オゾン層, 地球温暖化, 気球搭載システム, 超伝導受信機, サブミリ波
Ozone layer, Global warming, Balloon-borne system, Superconducting receiver, Submillimeter wave

1 まえがき

約 46 億年前に地球が誕生し、それからわずか数億年後に深い海の底で生命が誕生したが、生命はその後長い間海中に生存していた。地表には太陽から、生命にとって有害な紫外線などが降り注いでいたからである。その後、海中の藻類によ

て作り出された酸素が大気中に放出され、太陽の紫外線によってオゾンが発生し、数億年前にはオゾン層が形成された。オゾン層には、太陽から降り注ぐ有害な紫外線を吸収する働きがある。このようにして、長い年月をかけて、生命は陸上に進出することができるようになった。

ところが、このオゾン層が春の南極上空で減少

していることが南極の観測隊によって発見された。1980年代のことである。オゾンの減少は、皮膚の老化を早めたり、皮膚癌や白内障を引き起こしたりする恐れがあること、さらにはその原因が人類の作り出したフロンガスに関連していることが指摘されてから、世界的に深刻な環境問題となった。その後、オゾン破壊の原因となる特定フロン等の国際的な排出規制(モントリオール議定書)により、現在オゾンは回復傾向にあるとも言われているが、2006年の南極オゾンホールは過去最大の大きさとなったことも報告されており、完全な回復には数十年以上かかるとも言われている。オゾン破壊には成層圏中の微量分子(HO_x、NO_x、ClO_x、BrO_x)による触媒反応が関連しているが、成層圏中におけるオゾンや微量分子による光化学過程は未解明であり、オゾンの将来予測のためには大気中における分子の分布を測定し、光化学過程を解明することが重要な鍵の一つとなる[1]。

成層圏分子を観測する有力な手段の一つとして、分子の放射する電波スペクトルを観測する方法があり、リムサウンディング(図1)と呼ばれる大気(リム)を観測する手法と組み合わせることにより、高感度・高高度分解能でこれらの分子の高度分布を測定することができる。これまでに欧米において、このような手法を用いた観測がいくつも行われている。1991年に打ち上げられたMLS(Microwave Limb Sounder)/UARS(Upper Atmospheric Research Satellite)は南極上空のオゾンホールと一酸化塩素増加の相関関係を示し、オゾン破壊に微量分子が関連していることを示した。近年ではEOS(Earth Observing System)-

MLS(Microwave Limb Sounder)/Aura[2]、SMR(Submillimeter Radiometer)(Odin衛星)[3]等の衛星や、航空機[4]、気球[5]による観測が欧米で行われている。また、我が国においても2009年の打ち上げを目指して、サブミリ波帯超伝導受信機(世界初の機械式冷凍機による4K冷却)を搭載した国際宇宙ステーション、日本実験モジュール搭載のJEM(Japanese Experiment Module)/SMILES(Superconducting Submillimeter-wave Limb-emission Sounder)の開発が行われている[6]。

情報通信研究機構においては、大気中微量分子の高度分布の観測を行うことを目的とした、気球搭載型の観測機器(超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(BSMILES: Balloon-borne Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder))を開発し[7]、三陸大気球観測所において観測実験を行った。本稿においては、観測機器の概要と観測実験の結果について紹介する。

2 観測装置

成層圏中に存在するオゾンなどの分子は、自ら、特定の周波数の電波を放射している。その電波を受信して電波強度等を調べることで分子の存在量を知ることができる。大気中分子の存在量は微量(オゾンは体積比で百万分の一程度(数ppmv)、オゾン層破壊分子は、その千分の一程度(数ppbv))で、その放射電波強度も微弱であるが、超伝導を利用した高感度受信機を用いることで、微弱な信号を短時間に捕らえることができるようになる。また、大気分子から放射される電波スペクトルはサブミリ波帯と呼ばれる0.1mm~1mmの波長帯に多く存在し、その放射強度も強いので観測に有利であるが、地上から観測する場合、対流圏中の水蒸気による吸収を受けるため受信が困難となる。したがって、気球を使って観測装置を成層圏まで上げることで、その影響を受けない観測を行うことができるようになる。

我々は、オゾンやオゾン破壊に関連した分子からの放射電波スペクトルを観測し、それらの高度分布を求めることを目的とした、超伝導受信機搭載の気球システムを開発した。このシステムはBSMILES(Balloon-borne Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder)と

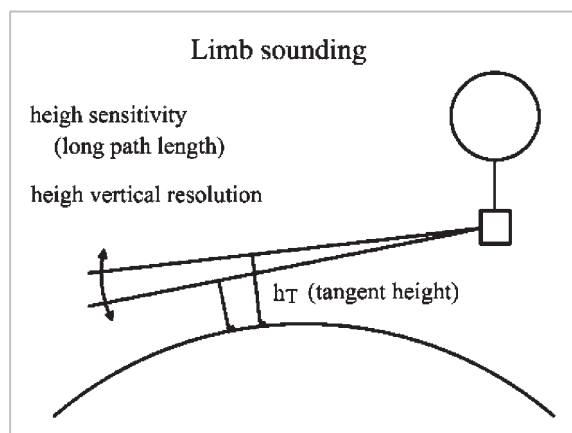


図1 リムサウンディングの概念図

呼ばれる。図2にシステムブロック図を示す。サブミリ波帯(650 GHz帯)の信号を、直径300mmのオフセットパラボラアンテナで受けて、液体ヘリウムで4Kに冷却した超伝導(SIS mixer: Superconductor Insulator Superconductor mixer)受信機[8][9](図3)でヘテロダイン受信し、スペクトルを音響光学型分光計で測定する。観測データは搭載PCのPCカードに記録され、観測終了後に海上回収される。観測は、平面鏡(図2のbeam-scanning mirror)により観測ビームを仰角方向に走査し、高度分布を観測するリムサウンディングにより行われる。

ゴンドラには、姿勢を検出するために3軸光ファイバジャイロと3軸加速度計が搭載される。電源にはリチウム1次電池が用いられる。ゴンドラサイズは約1.35×1.35×1.26m、重量はバラス

トを含んで約500kg、消費電力は約150Wである。図4にゴンドラの外観及び放球時の荷姿を示す。ゴンドラは放球時には断熱のため、全面を厚み約100mmの硬質発泡スチロールで囲われる。発泡スチロールは海上落下時の緩衝材及び浮きの役割も果たす。機器は、着水時の防水、放熱、ノイズシールド等のために、窒素ガスを封入した与圧容器に入れられる。

3 気球観測実験

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA) の三陸大気球観測所(岩手県大船渡市)において、2003、2004、2006年に放球実験が実施された。2003年の実験の主な目的は、第一にシステムの動作実証、そしてデータの

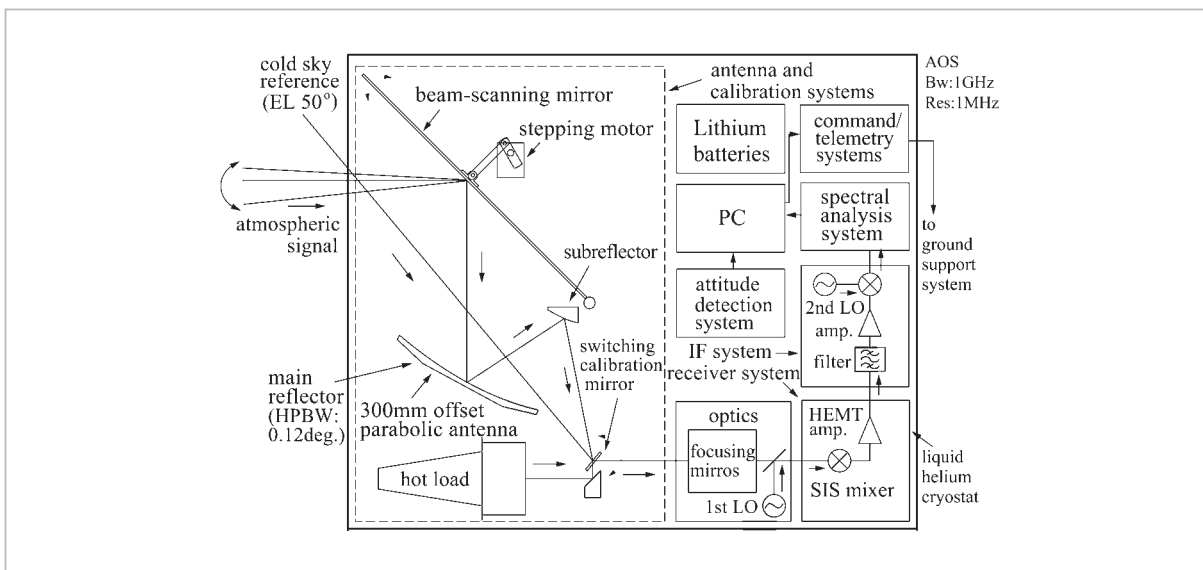


図2 BSMILESのシステムブロック図

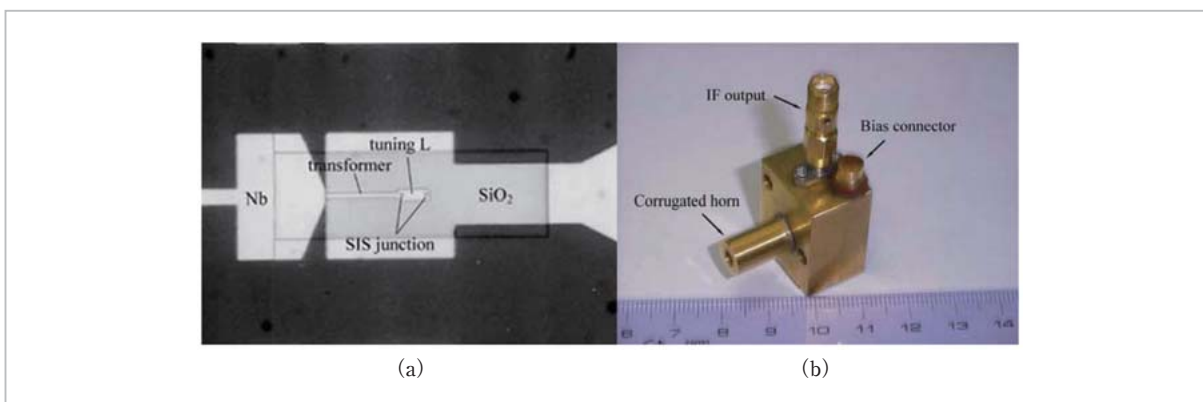


図3 (a) SIS素子の拡大写真、(b) ミキサマウント



図4 (a) BSMILES の外観、(b) 放球時の荷姿



(a)



(b)

(c)

(d)

図5 BSMILES の放球の様子。(a)放球台に設置された観測装置、(b)B 80 型気球、(c)気球の立ち上げ、(d) 放球直後

取得・海上回収であった。翌年の実験は、観測分子種を増やしての観測及び海上回収された装置が

再利用可能であることの実証、3度目は微量分子の日変化に着目した観測となった。3度の実験は

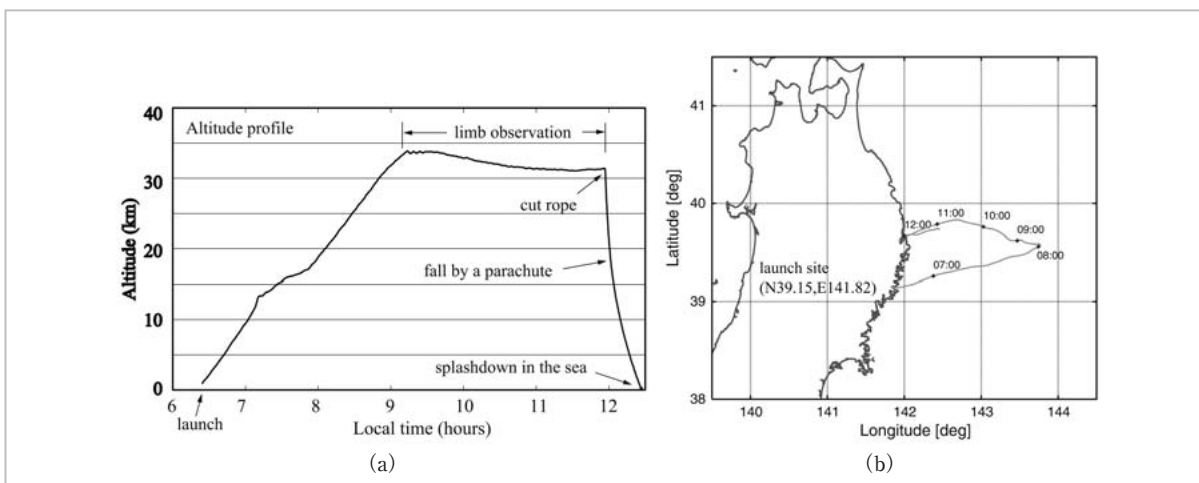


図6 (a) 高度プロファイル、(b) 気球の飛行軌跡

すべて成功し、データ取得に成功した。

3.1 システム動作実証実験(2003年)

2003年8月27日に三陸大気球観測所における放球実験が試みられたが、すべてのシステムを動作状態にして、放球場に出て約1時間30分経過した時に、分光計の電圧が突然落ちた。これはゴンドラが発泡スチロールで保温されていたため分光計温度が上昇し、取り付けられている冷却回路が働き、過電流が流れ、結果、電圧レギュレータが異常加熱され出力電圧が低下したというものである。それまでの室内における実験では、冷却側の回路が動作するという現象は起こったことがなく、ゴンドラを発泡スチロールで保温して長時間経過した時に初めて現れたため、十分な対策が取られていなかった。また、電池電圧の値を、上空で冷却されて仮に80%下降しても動作するように高く設定していたため、入力電圧(入出力電圧差)が大きかったことも原因の一つであると考えられる。対策として3端子レギュレータを介さずに直接電池で駆動するように電池を改造した(分光計内部には電圧を安定化する回路は組み込まれていた)。

8月30日午前6時22分、BSMILESはB80型(容積80,000 m³)気球により放球された。放球の様子を図5に示す。気球は放球後、高度を上げながら偏西風に乗って太平洋上を東に移動し、約2時間50分後に水平浮遊(レベル)高度33.8 kmに到達した。成層圏に到達後、気球は逆向きの風に乗って日本側に向かって戻り始めた。観測は水平

浮遊高度(31 km~33.8 km)に到達してからの約3時間行われた。観測中、ゴンドラの姿勢(ロール、ピッチ)は0.01°以上の精度で安定していた。高度プロファイル、飛行軌跡を図6に、観測範囲を図7に示す。観測範囲は三陸沖を中心に、半径約550 kmの領域となる。上昇中の外気は最低-80℃程度にもなるが、ゴンドラ内の温度は、発泡スチロールで全体を断熱していたため、最低でも0℃をわずかに下回った程度で、レベル高度に到達してからは約10℃程度であった。機器温度もすべて動作温度範囲内であったが、真空中においても高熱にならなかったのは、与圧容器による放熱機構が働いたものと思われる。

観測は気球が宮古湾上空に到達した11時45分に終了し、地上からの指令で機器を気球から切り離した。機器は宮古湾沖約40 kmの海上にパラシュートで緩降下し着水した。着水したゴンドラは、海上では正常な姿勢を保って下半分が海中に潜り、やや傾いた状態で浮いていた。船とヘリコプターにより回収した機器を調べてみると、上半分はほとんど海水に浸らなかった様子で、また与圧容器に入れた機器はすべて防水されていた。観測データの記録されたPCカードも無事回収された。気球本体も回収された。ゴンドラの損傷箇所としては、フレームの一部が湾曲したこと等があるが、下部のフレームと発泡スチロールが破損することで落下時の衝撃を吸収し、ゴンドラ内の機器に著しい機能的損傷を与えなかった。ゴンドラ回収の様子を図8に示す。

観測で得られたオゾンと一酸化塩素のスペクト

ルを図9に示す。観測ビームを仰角方向にスキャンすることにより、異なる高度でのデータが得られている。高度の違いによる、スペクトル線幅の圧力広がりの違いも見られることが分かる。図10に観測されたスペクトルから得られた高度分布を示す。オゾンゾンデにより観測されたオゾン高度分布と一致している[10]。

この観測により、日本上空の中緯度帯においてオゾンと一酸化塩素の高度分布を得ることに成功した。またこのシステムは、超伝導を用いたサブミリ波(650 GHz)帯の高感受信機、SIS mixerを搭載しているが、650 GHz帯の超伝導受信機が気球に搭載されたのはこの実験が世界でも初めてである。

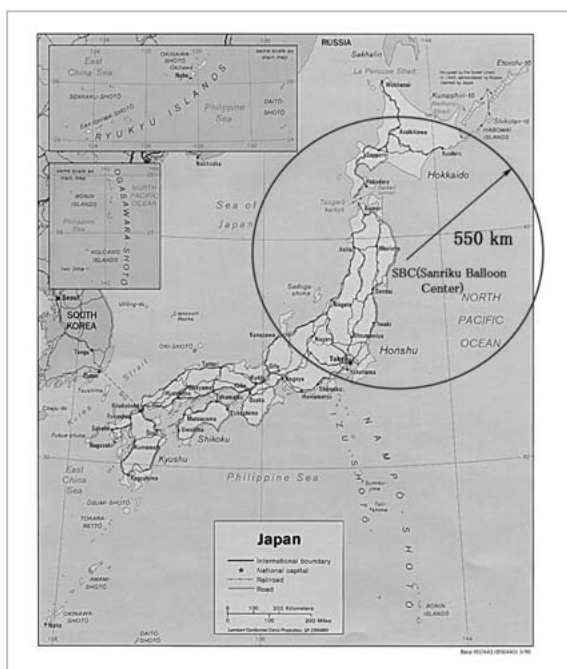


図7 観測範囲(三陸沖を中心とした半径約550 km)

3.2 観測及び再利用実証実験(2004年)

2003年の実験後に海上回収された機器は、観測帯域の拡大、観測分子種の増加、観測効率の向上等の改良が施された後、2004年9月7日の早朝に放球された。機器の改良により若干重量が増したことから、前回よりサイズの大きいB100型(容積100,000 m³)気球が用いられた。気球はレベル高度35 kmに到達し、その後徐々に30 km程度まで高度を下げながら飛行し、18時45分に地上からの指令で機器を気球から切り離し、船で回収された。

放球後システムは正常に動作していたが、レベル高度に到達して約1時間30分後に液体ヘリウムが無くなり、その時点で観測は終了した。液体ヘリウムの早期消失の原因の可能性として、液体窒素注入ポートに取り付けた保圧弁用の締め付けが若干弱かったことによるシール面の接触が不十分であったこと、または、保圧弁の設定圧が前回の実験で低下していたこと等が考えられる。

図11に得られたスペクトルを示す。オゾン、オゾン同位体、HCl、HCl同位体、HO₂等が観測された。この実験で、HO₂という観測が困難と言われている微量分子の短時間観測に成功した。また、2003年の実験で海上回収された装置が再利用可能であることが証明された[11]。

3.3 HO₂の日変化観測(2006年)

HO₂はHO_x(H, OH, HO₂)グループに属するラジカルであり、成層圏オゾン破壊のみならず、上部成層圏の水蒸気量とも大きく関連していることで、対流圏から中間圏における大気化学にとって重要なラジカルである。OHラジカルは高度60 km以上ではH₂Oの光化学分解により生成さ

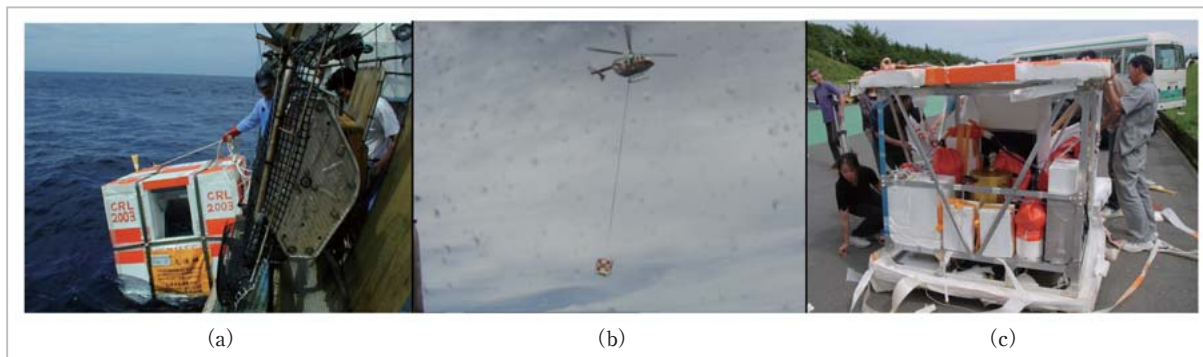


図8 (a)回収船、(b)ヘリコプターによる回収、(c)回収後の機器のチェック

れ、それ以下の高度では、オゾンが太陽の紫外光により光分解した時にできる励起一重項酸素原子(O(¹D))とH₂Oとの反応により生成される。1997年8月に衛星(MAHRSI)から行われたOHの観測から、HO_x ジレンマと呼ばれる問題が提起された[12]。これは、観測されたOHの存在量が従来のモデルより上部成層圏(35-50 km)から中間圏(50-80 km)においては少なく、逆に高度45 km 辺りを境に成層圏においては多く、それがどのようなパラメータを用いても説明できないというものであるが、一方、これより少し前(4月)に行われた気球(FIRS-2[13])によるOH、HO₂、H₂O、O₃の同時観測[13]では、観測はモデルで説明できる範囲内であった。さらに、2004年に行われた衛星(Aura MLS)と気球(BOH、FIRS-2)によるOHとHO₂の観測では、HO_x ジレンマは確認されなかったという報告もされている[14]。HO_x ジレンマが生じる原因として、モデルが不十分である(鍵となるまだ知られていない反応がモデルに含まれて

いない)ことや、MAHRSIはOHのみの観測であること(HO₂との同時観測が重要)等が言われている[15]が、現時点ではHO₂、OH等の観測が少なく、問題が未解明のまま存在している。例えばHO₂の観測が少ない理由として、その存在量が極微量であり、また時間とともに大きく変動する(夜間は昼間の1%以下にまで減少すると言われる)ため、その検出が困難であることがある。しかし、我々の高感度受信機は2004年の観測では昼の1.5時間程度の観測(一つのスペクトルの積分時間は約1分)でS/N~10(rmsノイズレベルは70 mK)でHO₂の検出に成功している。したがって、昼夜にわたる観測により、その存在量の日変化を測定することができる。これまでほとんど行われたことのない中緯度帯でのHO₂の日変化の観測により、HO_x ジレンマやオゾン破壊における水素酸化物ラジカルによる光化学過程が解明され、オゾンの将来予測等のためのデータが得られることが期待される。

2006年9月4日6時28分、BSMILESはB200型(容積200,000 m³)気球により放球された。気球はレベル高度37.9 kmに到達し、約2時間の観測の後、機器は気球から切り離され回収された。

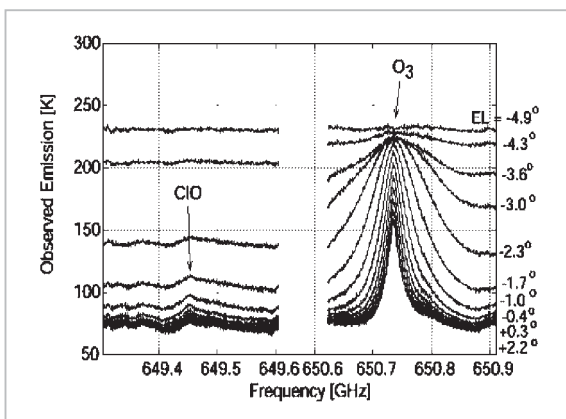


図9 観測によって得られた様々な高度におけるO₃、ClOのスペクトル

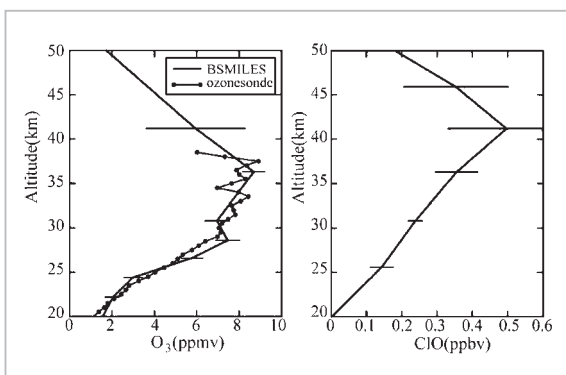


図10 2003年の放球観測の結果得られたO₃(左)、ClO(右)の高度分布

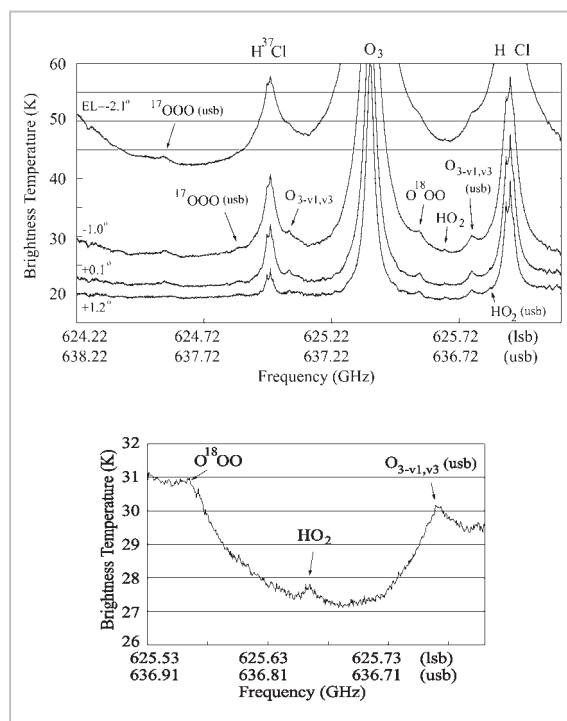


図11 2004年の観測で得られた(a) O₃、HCl³⁵、HCl³⁷等、(b) HO₂のスペクトル(積分時間約1分)

機器はすべて正常に動作し、スペクトルデータが得られたが(図 12)、この観測の主目的であったHO₂の日変化観測は、上空の風の条件や受信機の状態により十分には達成することができなかった。今後の観測が期待される。

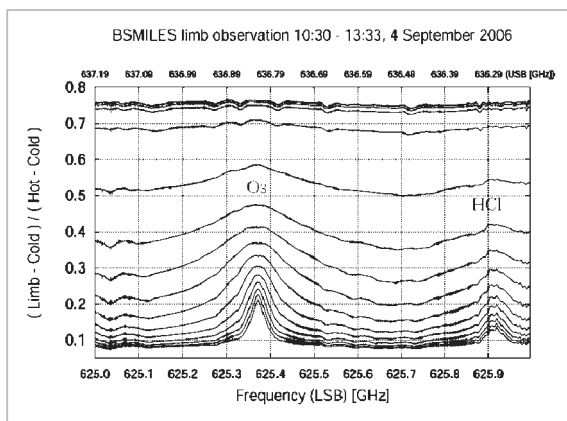


図 12 2006 年の観測で得られた放射電波スペクトル

4 むすび

気球搭載型の超伝導を利用したサブミリ波帯高感度受信機システム (BSMILES) は、オゾンのみならずその破壊に関連した微量分子、または温室効果ガスとの同時観測のできる装置であり、国際的に見ても数少ない有力な大気観測装置の一つである。高感度受信機を搭載していることで、これまで観測が困難であった微量分子の短時間観測が可能になり、未解明であった成層圏における光化学過程の解明等に大きく貢献することが期待できる。さらに将来的にはテラヘルツ帯の受信機を搭載することで、OH ラジカルの観測が可能となり、成層圏HO_x化学にとって有用なデータが得られるようになる。また 2009 年に打ち上げ予定の JEM/SMILES の検証観測としての役割も期待される。また、このシステムを用いることで天体観測を行うことも可能である。

参考文献

- 1 E. C. Weatherhead and S. B. Anderson, "The search for signs of recovery of the ozone layer", Nature 441, pp.39-45, 2006.
- 2 J. W. Waters et al., "The UARS and EOS microwave limb sounder (MLS) experiment", J. Atmos. Sci., Vol.56, No.2, pp.194-218, 1999.
- 3 D. Murtagh et al., "An overview of the Odin atmospheric mission", Can. J. Phys., Vol.80, No.4, pp-309-319, Apr. 2002.
- 4 J. Mees, S. Crewell, H. Nett, G. de Lange, H. van de Stadt, J. J. Kuipers, and R. A. Panhuyzen, "ASUR-an airborne SIS receiver for atmospheric measurements of trace gases at 625 to 760 GHz", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.43, No.11, pp.2543-2548, Nov. 1995.
- 5 B. J. Drouin, and H. M. Pickett, "Laboratory and field studies in rotational spectroscopy at the Jet Propulsion Laboratory", in Proc. Int. Workshop on Critical Evaluation of mm-/submm-wave Spectroscopic Data for Atmospheric Observations, Mito, Japan, pp.10-13, Jan. 2004.
- 6 JEM/SMILES, <http://smiles.tksk.jaxa.jp/index.html>
- 7 入交芳久, "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", 通信総合研究所季報, Vol.48, No.2, pp.21-36, 2002.
- 8 J. Zmuidzinas, H. G. LeDuc, J. A. Stern, and S. R. Cypher, "Two-junction tuning circuits for submillimeter SIS mixers", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.42, No.4, pp.698-706, Apr. 1994.
- 9 Y. Irimajiri, T. Noguchi, S.-C. Shi, T. Manabe, S. Ochiai, and H. Masuko, "A 650-GHz band SIS receiver for balloon-borne limb-emission sounder", Int. J. of Infrared and Millimeter Waves, Vol.21, No.4, pp.519-526, Apr. 2000.

- 10 S. Ochiai, S. Tsujimaru, Y. Irimajiri, T. Manabe, and I. Murata, "Stratospheric ozone and ClO measurements using balloon-borne submillimeter limb sounder", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol.43, No.6, 2005.
- 11 Y. Irimajiri, T. Manabe, S. Ochiai, H. Masuko, T. Yamagami, Y. Saito, N. Izutsu, T. Kawasaki, M. Namiki, and I. Murata, "BSMILES-A Balloon-Borne Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder for Stratospheric Measurements", Geosci. Remote Sensing Lett., Vol.3, No.1, pp.88-92, Jan. 2006.
- 12 R. R. Conway, M. E. Summers, and M. H. Stevens, "Satellite Observations of Upper Stratospheric and Mesospheric OH: The HOx Dilemma", Geophys. Res. Lett., Vol.27, No.17, pp.2613-2616, Sep. 2000.
- 13 D. G. Johnson, K. W. Jucks, W. A. Traub, and K. V. Chance, "Smithsonian stratospheric far-infrared spectrometer and data reduction system", J. Geophys. Res., 100, 3091, 1995.
- 14 T. Canty, H. M. Pickett, R. J. Salawitch, K. W. Jucks, W. A. Traub, and J. W. Waters, "Stratospheric and mesospheric HOx: Results from Aura MLS and FIRS-2", Geophys. Res. Lett., Vol.33, L12802, 2006.
- 15 C. Day, "New measurements of hydroxyl in the middle atmosphere confound chemical models", Physics Today, Nov., pp.17-19, 2000.



いりまじりよしすけ
入交芳久

総合企画部企画戦略室プランニングマネージャー(前環境情報センシング・ネットワークグループ主任研究員)
博士(理学)
ミリ波・サブミリ波受信機、システム開発

おちい さとし
落合 啓

電磁波計測研究センター環境情報センシング・ネットワークグループ主任研究員
マイクロ波リモートセンシング

Philippe Baron

電磁波計測研究センター環境情報センシング・ネットワークグループ特別研究員 Ph.D.
大気リモートセンシングのためのフォワード・リトリーバルモデルの開発