

サブミリ波による成層圏 O_3 , ClOの観測

入交芳久¹・真鍋武嗣¹・落合啓¹・増子治信¹・山上隆正²
斎藤芳隆²・井筒直樹²・並木道義²

Observations of stratospheric O_3 and ClO at submillimeter-wave

By

Yoshihisa IRIMAJIRI¹, Takeshi MANABE¹, Satoshi OCHIAI¹, Harunobu MASUKO¹, Takamasa YAMAGAMI²,
Yoshitaka SAITO², Naoki IZUTSU² and Michiyoshi NAMIKI²

Abstract : A balloon-borne superconducting submillimeter-wave limb-emission sounder (BSMILES) was launched to observe stratospheric O_3 , ClO on August 30, 2003. An antenna with a diameter of 300mm, a 650GHz-band SIS mixer, and an acousto-optical spectrometer are carried in BSMILES. The system operated normally and emission line spectra of O_3 and ClO were obtained. Marine recovery of the system was carried out after the observations.

概 要

2003年8月30日、成層圏中の O_3 , ClOを観測することを目的に、気球搭載型超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (BSMILES) の放球実験が行われた。BSMILESには直径300mmのアンテナ、650GHz超伝導受信機 (SISミキサ)、音響光学型分光計 (AOS) が搭載されている。観測中システムは正常に動作し、 O_3 , ClOの放射電波スペクトルを得ることが出来た。観測終了後、機器は海上回収された。

重要語 : 成層圏オゾン, サブミリ波, 超伝導受信機

1. はじめに

オゾン層は成層圏の高度20km~30kmに存在し、太陽からの有害な紫外線から地上の生命を守っているが、近年ではオゾン層破壊は極域のみならず中緯度帯においても問題になってきている。オゾン層破壊機構を詳細に調べるためには、オゾンのみならず、オゾン破壊に関連する分子も同時に観測することが重要である。オゾンやオゾン破壊関連分子は、その分子固有の周波数を持ったミリ波帯やサブミリ波帯の電磁波を放射している。オゾン破壊関

¹通信総合研究所

²宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

連分子からの放射強度はサブミリ波帯において強くなるため、この周波数帯において観測を行うと効率が良い。しかし、この周波数帯の電磁波は対流圏中の水蒸気によって吸収されるため地上からの観測は困難である。従って今回、気球を使った観測機器、気球搭載型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）の開発を行った。気球搭載機器は航空機に比べて開発の困難があるが、高高度に到達出来るという利点があり、また衛星に比べて観測範囲が狭いが、安価で短期間に開発出来るという利点がある。

気球からの観測はリムサウンディングという方法により行われた。（図1）リムサウンディングとは、大気（リム）からの大気放射を観測する方法で、観測視線方向の体積を大きくすることで、高感度観測を行うことが出来、また垂直方向に観測ビームをスキャンすることで、高い分解能で観測を行うことが出来るという特徴がある。また受信機には低雑音受信機である超伝導受信機（SIS mixer）を用いた。大気中のオゾン（体積比で百万分の一程度）、オゾン破壊関連分子はさらにその千分の一程度しか存在しないため、放射電波強度も大変微弱であるからである。観測分子のスペクトルの中心周波数は O_3 ：650.733 GHz、ClO：649.450 GHz、のサブミリ波帯である。

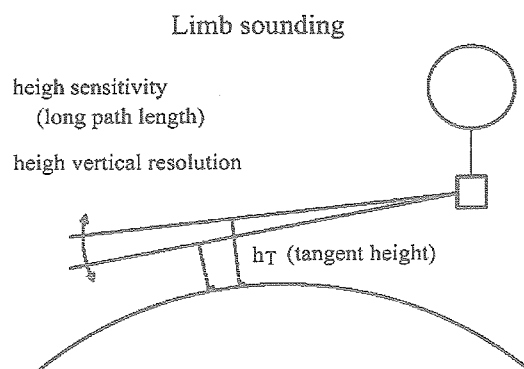


図1 リムサウンディングの概念図

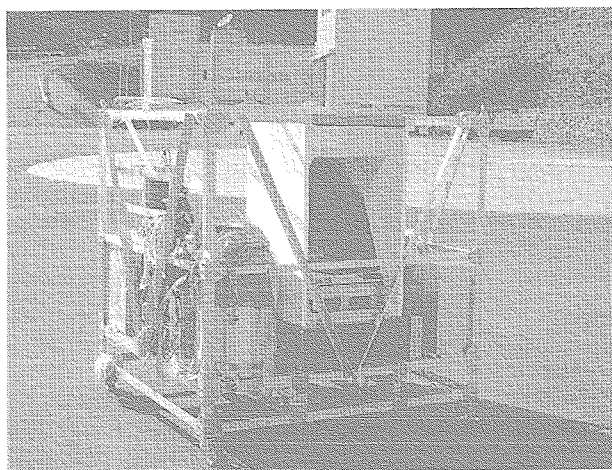
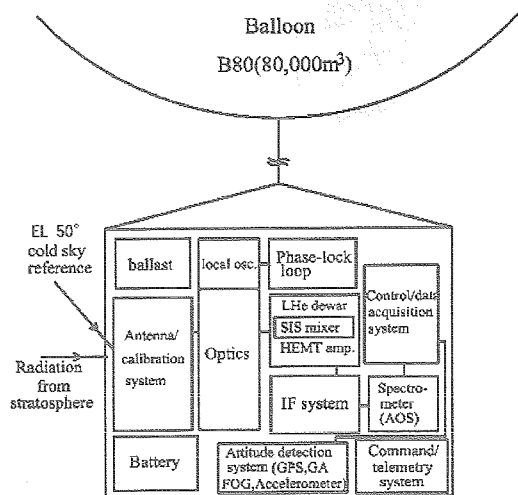
2. 装置構成

図2 (a)にシステムブロック図を示す。システムは、アンテナ系、較正系、光学系、受信機系、中間周波系、分光計、データ取得・制御系、姿勢検出系、電源、気球工学系（コマンド・テレメトリ系等）から成る。ゴンドラサイズは約 $1.35 \times 1.35 \times 1.26$ m、重量は約490 kg（バラスト120 kgを含む）、消費電力は約150 Wである。図2 (b)は完成したゴンドラの外観である。ゴンドラは放球時には全面を厚み約100 mmの硬質発泡スチロールで囲われる。発泡スチロールは断熱と海上落下時の緩衝材および浮きの役割を果たす。

アンテナは観測ビームを仰角方向にスキャンする平面鏡と直径300 mmのオフセットパラボラアンテナ、および副鏡から成る。ビームは半値幅約 0.1° であり、高度分解能約1 kmに相当する。パラボラアンテナは固定し、平面鏡をステッピングモータで動かすことで、ビームをスキャンし高度分布を観測する。スキャン範囲は $-8^\circ \sim +4^\circ$ で、実効的な観測高度範囲は10～35 kmとする。1スキャン毎に較正用平面鏡を回転させることで、ホットロードおよびEl 50° cold skyからの信号を観測し、較正用データを取得する。ミラーを動かすステッピングモータは、ゴンドラを囲う発泡スチロールの外に設置されるので、温度制御できるヒータを取り付け、モータ本体を発泡スチロールで囲い断熱した。

光学系は5枚の収束鏡、定在波除去鏡、マーチン・パレット型（MPI型）SSBフィルタ、サブミリ波局部発振器（LO）、PLL回路等から成る。ビームスキャン用の平面鏡、放物面鏡、副鏡、較正用平面鏡を通った電波は、収束鏡を通して定在波除去鏡に入る。定在波除去鏡は、水平グリッドと 45° に傾けられた可動ルーフミラーから成る。このルーフミラーにより偏波が 90° 回転し、その後収束鏡を通して、MPI SSBフィルタに導入される。MPI SSBフィルタは、 45° グリッド、2つのルーフミラーと、それらの手前（アンテナ側）に置かれた垂直グリッド及び液体ヘリウムクライオスタット内に設置されたコールドロードから成る。サイドバンド分離された信号は、その後さらに収束鏡を通った後、LOダイプレクサを通して、液体ヘリウムクライオスタット内の4 Kステージ上に置かれた収束鏡を経て、SISミキサに導かれる。またLO信号は収束鏡を通してLOダイプレクサに導かれ、観測

信号と共にSISミクサに導入される。LO等光学系の一部は、防水等のために真空シールされた光学系箱（内部には1.2気圧程度の窒素ガスを封入）に設置された。LOには発振出力を安定化させるために温度制御ヒータが取り付けられた。



(a)

(b)

図2 (a) BSMILESのシステムブロック図, (b) BSMILESの外観

受信機にはサブミリ波（650 GHz）帯の超伝導受信機（SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) mixer）を使用した。SIS素子はNb/AlOx/NbのSIS接合を2つ並列に接続したPCTJ [1] [2] と呼ばれるタイプで、ミクサマウントはコルゲートホーンと一体になった導波管型チューナレスマウントを用いた。作成したSIS素子とミクサマウントを図3に示す。SISミクサのDSB受信機雑音温は、O₃やClOの観測に使用する650 GHz帯の周波数において約150–200 Kである [3] (図4)。初段アンプには5–7 GHzの約15 Kに冷却されたHEMT (High Electron Mobility Transistor) アンプが使用された。HEMTアンプの受信機雑音温度は18 Kである。

受信機の冷却には液体ヘリウムクライオスタットが用いられた。液体ヘリウムの容量は7 L、液体窒素の容量は4 Lである。気球が上昇中にクライオスタットの窓に結露が生じると信号損失の原因となるが、その対策として真空窓用フランジの外側を筒で囲い、それを光学系箱と真空シールで接続し、光学系箱内には窒素ガスを封入することで水蒸気を含んだ空気が直接窓には触れないようにし結露を防止することとした。観測中に液体ヘリウムが保持されることは、受信機の動作にとって本質的に重要であるが、測定を行った結果、保持時間は約13時間であり、これは10時間の仕様（放球前の準備時間2時間+観測時間5時間+上昇時間3時間）を満たすことが分かった。また、液体ヘリウムや液体窒素注入ポートは開放にしておくと、上昇中に減圧されて保持時間が短くなるが、これを防ぐため液体ヘリウム注入ポートと液体窒素注入ポートに保圧弁を取り付け、内圧を約1.2気圧に保つこととした。但し一方では、減圧することでSISミクサは2 Kに冷却され、受信機性能、安定度の面では有利ということもある。従って減圧して2 Kでの動作を行うことも今後の検討課題ではある。クライオスタット外に取り出された信号は、中間周波系に導かれ、帯域分割・合成、増幅等が行われ分光計へと出力される。分光計には音響光学型分光計（AOS: Acousto-Optical Spectrometer）が用いられた。帯域は1 GHz、分解能は約1 MHzである。温度安定化のためにペルチェ素子を使用しており、レーザーとAOS箱の温度制御を行う。

データ取得・制御系には3つのCPUを使用した。CPU 1は分光計からの分子スペクトルデータを取得しPCカード（2.0 GB）に記録する。CPU 2はHKデータ（各部の温度、電圧データ、受信機の状態）の取得・地上への送信、アンテナ制御等を行う。CPU 3は姿勢データ、アンテナ位置データを取得する。データはシステムの状態を

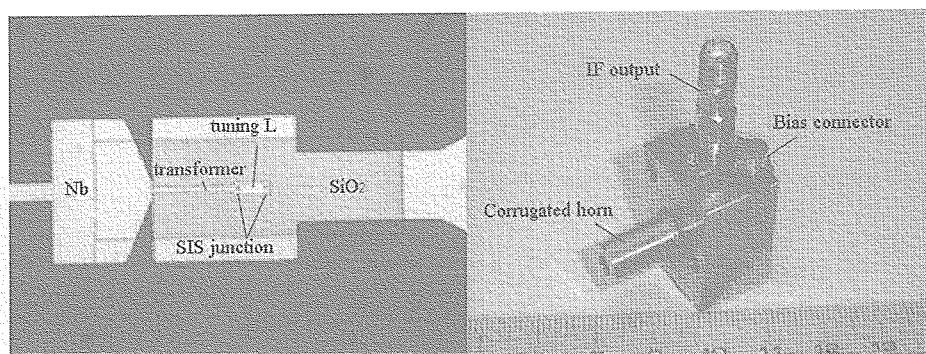


図3 SIS素子の拡大写真(左)とSISミキサマウント(右)

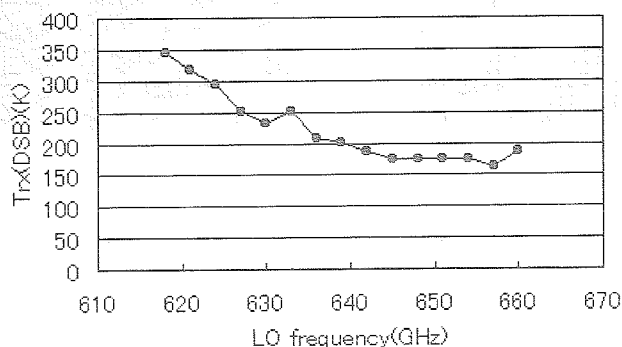


図4 650 GHz帯SIS受信機のDSB雑音温度特性

モニタするHKデータのみ地上に送信し、観測データは全て搭載されているPCカードに記録し海上回収するようにした。データ送信は、送信クロックが出力されるRS 232 Cボードを使って、送信クロックと送信データの排他的論理和 (EXOR) を取ることでバイフェーズ信号とし、気球工学側の送信機に渡した(送信クロック 19.2 kbps, データ送信レート 1200 bps)。地上系としては気球工学側から渡される、復調された信号を取り込むためのPCを用意した。コマンドは気球工学側で用意される 9 ch のリレー接点を使ってPCのリセット、全ての機器の電源の ON/OFF が可能なようにした。

成層圏中微量成分の高度分布を、高度分解能 1 km で観測する(観測ビームの方向を 0.1° の精度で決める)ために、ゴンドラの姿勢を検出する 3 軸光ファイバジャイロ、3 軸加速度計、そして地磁気センサを搭載した。

電源にはリチウム 1 次電池を使用した。電圧の安定化には 3 端子レギュレータを使用した。レギュレータの発熱は与圧容器やゴンドラをヒートシンクとすることで放熱することとした。電池の保持時間は 20 時間で設計された。

機器は観測終了後海上に落下するが、防水のために中間周波系、PLL回路、分光計、データ取得・制御系、姿勢検出系、SIS/HEMT バイアス回路は与圧容器(アルミ製の金属容器)に入れられ、機器への結露を防ぐため 1.2 気圧程度の窒素ガスが封入された。与圧容器は機器の発熱を逃がすことや、CPU や中間周波系、バイアス回路の真空環境での動作のためにも使われる。また、ノイズシールドの役割も(コネクタのシールドと併せて)果たす。

受信機システムは、ジフルオロメタン (CH_2F_2) というサブミリ波帯に放射電波スペクトルを持つ分子からの電磁波を受信することで動作確認が行われた。

3. 噛み合わせ試験

噛み合わせ試験として、コマンド・テレメトリ動作試験、ノイズ試験、真空・低温試験が行われた。コマンド・テレメトリ試験は特に問題なく、ノイズ試験についても、CPUからの高周波ノイズのコマンド系（72.3 MHz）への干渉、テレメトリ信号（1.673 GHz）やトランスポンダ信号の（帯域外であるが出力が強いため）の観測帯域（1.6－2.6 GHz）内への混信を試験したが、特に問題なかった。またシステムを恒温・恒圧槽に設置して冷却・真空試験を行った。ゴンドラはサイズの制限から、フレームのままの状態（周りに発泡スチロールを取り付けない状態で）、恒温・恒圧槽に設置した。受信機バイアス回路、分光計は与圧容器とゴンドラの間、断熱材を敷いたが、その他の与圧容器は直接ゴンドラに固定した。電池は発泡スチロールの箱に入れてゴンドラに固定した。試験行程としては、まず電池で全系を常温、1気圧下で約2時間動作させ（フィールドでの放球待機状態を想定）、その後アンテナフレームが -25°C になるまで冷却し、温度設定はそのまま、200 mmHg、80 mmHg、30 mmHg、15 mmHg、4 mmHgとそれぞれ30分の時間をかけながら減圧していき（上昇中の環境を想定）、その状態で3時間動作させ（レベル高度に到達してからの観測時時間を想定）、機器の温度、電圧、受信機の状態をモニタした。結果、受信機バイアス回路（自己発熱しない機器）についてのみ動作温度範囲を下回った（但し、動作には問題はなかった）が、それ以外の機器は全て動作温度範囲内に入っていた。システムは全て正常に動作していた。電圧や受信機状態にも問題なかった。電池については、冷却すると電圧が落ちることを懸念したが問題なかった。SIS受信機のバイアス値も安定していた。局部発振器のフェーズロックも外れることはなかった。冷却温度を -25°C に設定したが、実際にはゴンドラ全体が発泡スチロールで囲われるため（かつ信号が入るアンテナ部は損失を防ぐため発泡スチロールを切り取った窓を設けていたが、アンテナ台周りも発泡スチロールで囲うこととしたため）、内部温度はもっと高い可能性もあり、上空では機器温度が上がりすぎることも懸念されたが、実際の放球によって確認することとした。

4. 放球実験

2003年8月27日に三陸大気球観測所における最初の放球実験が試みられたが、全てのシステムを動作状態にして、フィールドに出て約1時間30分経過した時に、分光計の $+18\text{V}$ 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ベルチェの冷却回路が働き、電流が1A流れ、結果、 $+18\text{V}$ 用の3端子レギュレータが異常加熱され出力電圧が降下したというものである。レギュレータには加熱板が取り付けられていたが不十分であった。これまでの室内における実験では、主に電源投入時に加熱側の回路が働き（ -18V 側に2.8Aが流れ）、その後は1A以下の定常状態に落ち着き、冷却側（ $+18\text{V}$ 側）の電流値は終始1A以下のままであった。冷却側の回路が動作するという現象はそれまで起こったことがなく、ゴンドラを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ひと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）。対策を行った後、機器を強制的に暖め正常に動作することを確認した。

8月30日午前6時22分、BSMILESはB80型（容積 $80,000\text{m}^3$ ）気球により放球された。高度プロフィール、飛行軌跡を図5に示す。気球は放球約2時間50分後にレベル高度33.8 kmに到達し、高度を31 kmまで下げながら約3時間の観測を行った。機器は放球直後に電源がOFF、ONしたが、その後は順調に動作している様子であった。しかし念のために07時00分にコマンドにより全ての電源のリセットを行った。リセットを行った後も、システムは正常に動作していた。機器の温度プロフィールを図6に示す。6時22分の放球から、対流圏中を上昇していた約1.5時間の間は温度が下がり、その後は温度が若干上昇するという傾向が見られる。試験では -25°C

に設定したフレーム温度は、実際の飛行では最低でも0℃をわずかに下回った程度であった。PC等自己発熱している機器の温度変動は大変少なく、かつ上空で温度が上がりすぎることなかった。レベル高度に到達してからの観測中、フレーム温度が約10℃であったにもかかわらず、機器温度が上昇し過ぎなかったのは、与圧容器による放熱機構が働いたものと思われる。ヒータにより温度制御されているLO、ステッピングモータ、そしてSIS/HEMTバイアス回路の温度も安定していた。宮古湾上空に到達した11時45分に観測を終了、PI機器の電源を落とし、11時57分に地上からの指令で機器を気球から切り離れた。観測機は12時30分、宮古湾沖約40kmの海上にパラシュートで緩降下し着水した。

着水した機器は、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からなかった様子で、また与圧容器に入れた機器は全て無事であることが分かった。液体ヘリウムも、まだ若干残っていたようであった。アンテナも水洗いすると十分再使用可能な状態になった。データの記録されたPCカードも無事回収された。損傷箇所としては、ゴンドラ下部フレームのサポート構造の無い箇所が若干湾曲したこと、低い位置に設置されていた分光計の

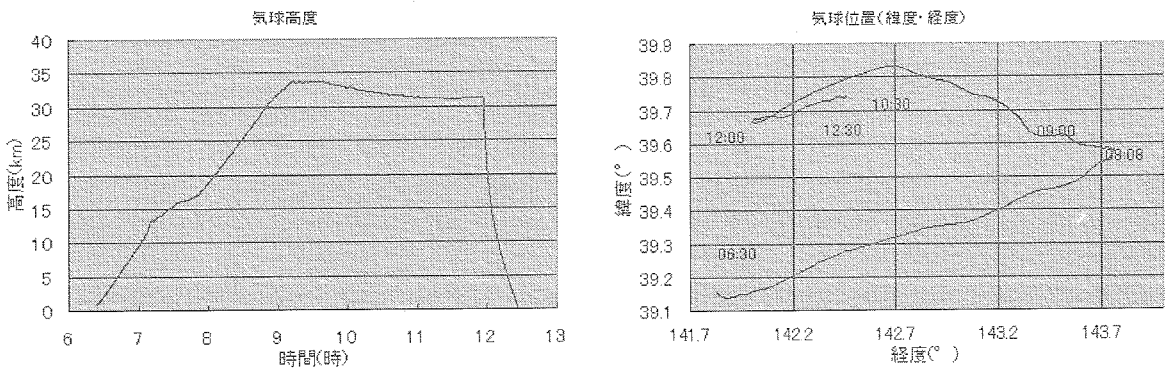


図5 気球高度プロフィール (左), 飛行軌跡 (右)

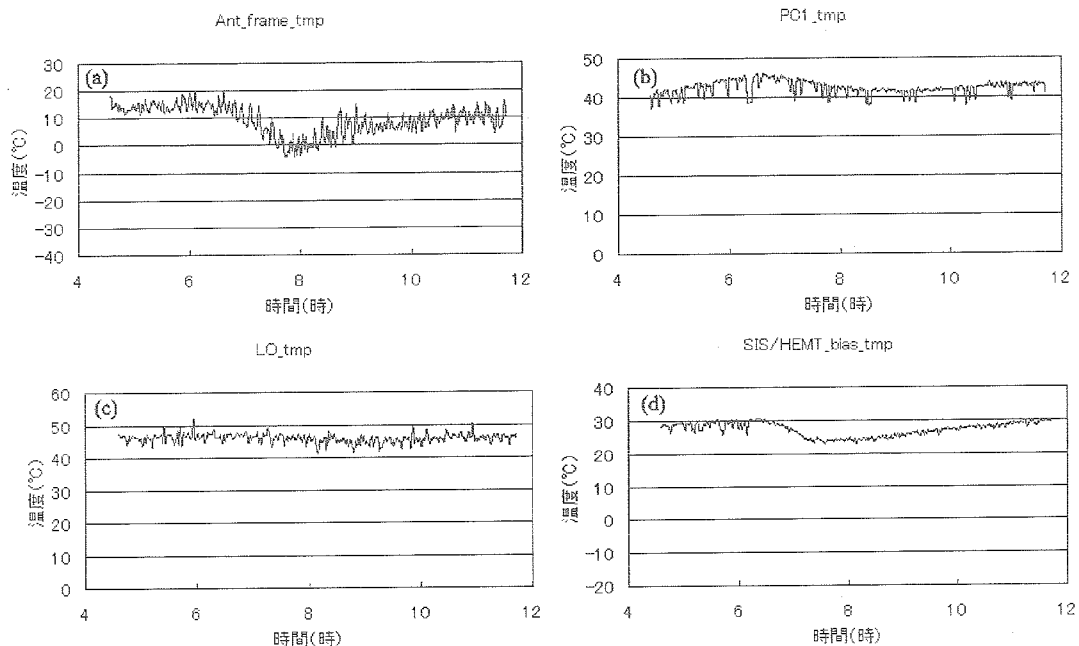


図6 各機器の温度プロフィール。(a) アンテナフレーム, (b) PC1, (c) LO, (d) SIS/HEMTバイアス回路

コネクタが海水に侵食されたこと、防水されていなかったワイヤグリッドのワイヤが切れたこと、ホットロードの温度センサが正常に動作しなくなったこと等がある。回収から数日後に三陸でシステムを組み直して、使用した電池で動作（受信機冷却以外）させてみたが正常に動作したことから、機器は落下による衝撃で、著しい機能的損傷は受けなかったということが言える。

5. 観測結果

観測されたスペクトルを図7、8に示す。図7はCCD積分時間15ミリ秒のスナップショットであり、オゾンスペクトルが検出されていることが分かる。観測仰角が $+3.68^\circ$ 、 -1.45° 、 -3.49° 、 -1.67° のデータが示されているが、観測ビームを仰角方向にスキャンすることによる、スペクトル線幅の圧力拡がりの違いも見られ

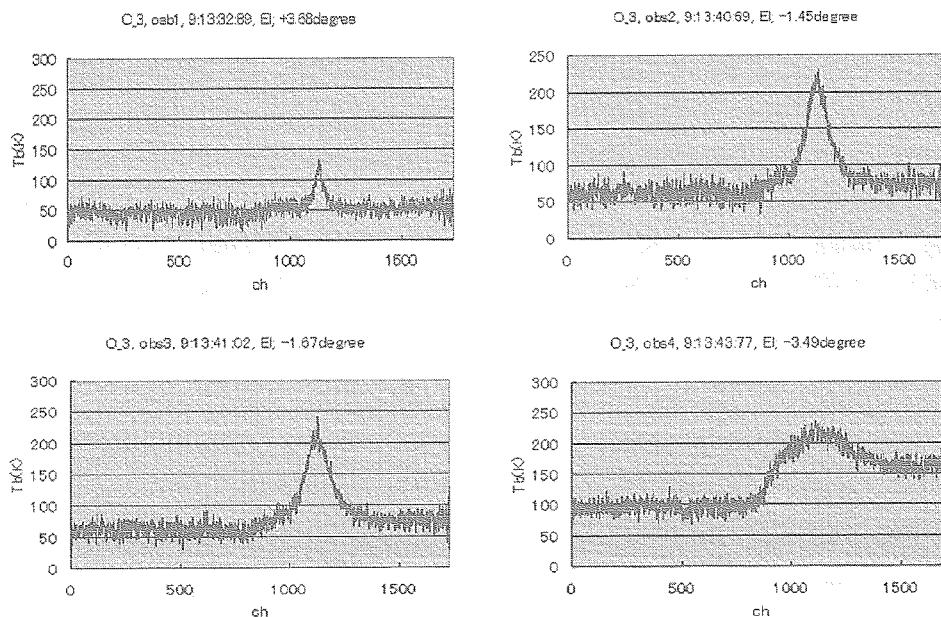


図7 観測されたオゾンのスペクトル。左上から時計回りに仰角 $+3.68^\circ$ 、 -1.45° 、 -3.49° 、 -1.67°

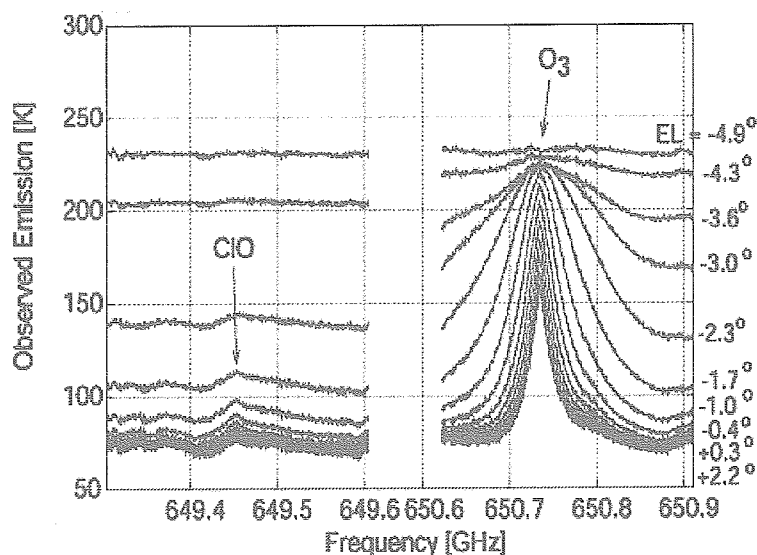


図8 リムサウンディングによって得られた O_3 、 ClO のスペクトル

ることが分かる。図8に O_3 と ClO のスペクトルを示す。これは8時56分から11時45分までの全てのデータの積分データである。同様に線幅の広がりの違いが見られる。今後このスペクトルから高度分布を出す予定である。ゴンドラの roll, pitchは, 0.1度 (pitch) ~ 0.2度 (roll) 程度以下の振幅で, 204秒周期で揺れていたのではないと思われる。またAz方向に2rpmで回転させるよう回転モータを取り付けていたが, 実際にはある方向を向いたまま, わずかに揺れていたようであった。

6. 今後の予定

今回の放球実験では, システムの動作, データ取得, 回収という目的を達成することができた。但し, 積分時間が短い (CCD積分時間 15 ミリ秒), 帯域幅がもっと必要, 較正系に問題あり, 姿勢検出系の較正が不十分等いくつかの課題もある。次回はこれらの問題を出来るだけ解決し, かつ観測分子 (周波数) を変えて2004年に三陸での放球観測を行う予定である。観測分子には O_3 , $H^{35}Cl$, $H^{37}Cl$ という強度の強い分子と, $HOCl$, HNO_3 , H_2O_2 , BrO , SO_2 , CH_3CN という弱い分子が含まれる。分光計の帯域は1GHzであるが, 中間周波系で帯域1GHzの2系統に分け, 時間スイッチすることで全観測帯域を1.9GHzとする。積分時間もCCD積分時間を150ミリ秒とする予定である。較正用に主鏡で仰角 $+12^\circ$ まで見ることが出来るようにアンテナ系を改修する。また, 2005年にはさらに観測分子種を増やし, O_3 , ClO , HNO_3 , HO_2 , BrO , SO_2 (全て2004年とは異なる周波数) を加えることで全帯域を3.8GHzとし, JEM/SMILES [4] の観測予定分子をほぼ全てカバーする予定である。但し2005年の観測のためには局部発振器の周波数を観測中に切り替えるという技術的課題がある。

参 考 文 献

- [1] 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, April 1994.
- [2] T. Noguchi, S. C. Shi, and J. Inatani, 'An SIS mixer using two junctions connected in parallel', *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 5, no. 2, pp. 2228-2231, June 1995.
- [3] 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, April 2000.
- [4] JEM/SMILES home page <http://smiles.tksc.jaxa.jp/>, or "JEM/SMILES mission plan", http://www2.crl.go.jp/dk/c214/smiles/Mission_Plan/