

サブミリ波による成層圏O₃およびHClの観測

入交芳久¹・真鍋武嗣¹・落合啓¹・山上隆正²
斉藤芳隆²・川崎朋実²・井筒直樹²
並木道義²・佐藤薫³・村田功⁴

Observations of stratospheric O₃ and HCl at submillimeter-wave

By

Yoshihisa IRIMAJIRI¹, Takeshi MANABE¹, Satoshi OCHIAI¹, Takamasa YAMAGAMI²,
Yoshitaka SAITO², Tomomi KAWASAKI², Naoki IZUTSU²,
Michiyoshi NAMIKI², Kaoru SATO³, Isao MURATA⁴

Abstract : The second flight of BSMILES (Balloon-borne Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder) was conducted on September 7, 2004 to observe stratospheric O₃, HCl and so on. An offset parabolic antenna with a diameter of 300 mm, a 620 GHz-band SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) mixer cooled by liquid helium, an AOS (Acousto-Optical Spectrometer), and 3-axes fiber-optic gyroscope are carried in BSMILES. The gondola was lifted to an altitude of about 35 km by a balloon of 100,000 m³ in volume. The system operated normally and emission line spectra of O₃, HCl etc. were successfully obtained. The experiment concludes that the retrieved system is reusable.

Keyword : stratospheric ozone, submillimeter-wave, superconducting receiver

概 要

2004年9月7日、成層圏中のO₃、HCl等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)の第二回目の放球実験が行われた。BSMILESには直径300 mmのオフセットパラボラアンテナ、液体ヘリウム冷却の620 GHz帯超伝導受信機(SISミクサ)、音響光学型分光計(AOS)、3軸光ファイバジャイロ等が搭載されている。BSMILESはB100型気球により放球され、高度約35 kmにおいてオゾン、塩化水素等のスペクトルの観測を行い、観測終了後海上回収された。今回の実験で、システムは回収後再利用可能であることが実証された。

重要語 : 成層圏オゾン, サブミリ波, 超伝導受信機

¹情報通信研究機構

²宇宙航空研究開発機構

³国立極地研究所

⁴東北大学

1. はじめに

我々は成層圏中のオゾンやオゾン破壊関連分子のサブミリ波帯における放射電波スペクトルの観測を行うことを目的に、気球搭載型超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(BSMILES: Balloon-borne Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder)の開発を行った。2003年8月に三陸大気球観測所において第一回目の放球実験が行われ[1] O_3 , ClO の高度分布が求められた。得られた高度分布を図1に示す。

2003年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が、いくつかの問題点もあった。即ち、較正系の問題、光学系の定在波、分光計への入力レベルが低い、積分時間が短い、帯域幅が狭い等であるが、今回これらに対して改善を行った。今回の観測分子には620-630GHz帯に存在する O_3 , $H^{35}Cl$, $H^{37}Cl$, O_3 isotope という比較的強度の強い分子と、HOCl, HNO_3 , H_2O_2 , BrO, SO_2 , CH_3CN 等の弱い分子が含まれる。

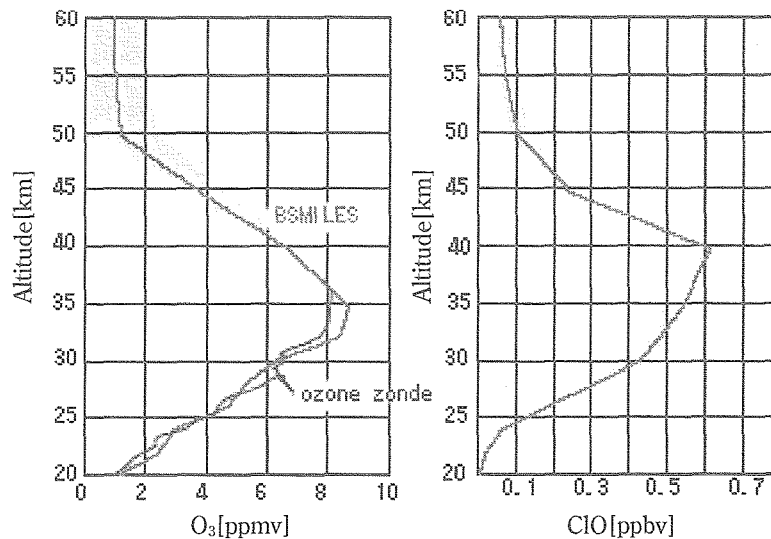


図1 2003年のBSMILESの放球実験の結果得られた O_3 , ClO の高度分布

2. 装置構成

図2 (a)にBSMILESのシステムブロック図を示す。システムは、アンテナ・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530 kg (パラスト150kgを含む)、消費電力は約150 Wである。図2 (b)は、放球時の保温用に発泡スチロールで囲んだゴンドラの外観である。

アンテナ・較正系を図3に示す。較正系にはlimb port と cold sky port の間に観測効率の差があるという問題があったが、今回、光軸を調整することで改善することが出来た。またビームスキャン用平面鏡を改良し、較正用に仰角 $+12^\circ$ まで観測可能とした。観測範囲は $-8^\circ \sim +1^\circ$ である。

光学系を図4に示す。4枚の収束鏡、3枚の平面鏡、LO注入用ビームスプリッタから成る。前回使用した定在波除去鏡(ワイヤグリッドと可動ルーフトップミラーから成る)、マーチン・パレット型SSBフィルタを除去し、平面鏡に置き換えDSB受信とした。結果、光学系内で生じる定在波を取り除くことが出来た。LOの周波数は631.22 GHzとした。観測帯域は、624.22 GHz-626.12 GHz (lsb), 636.32 GHz-638.22 GHz (usb) である。 O_3 , HCl のスペクトルはlsb側に存在する。

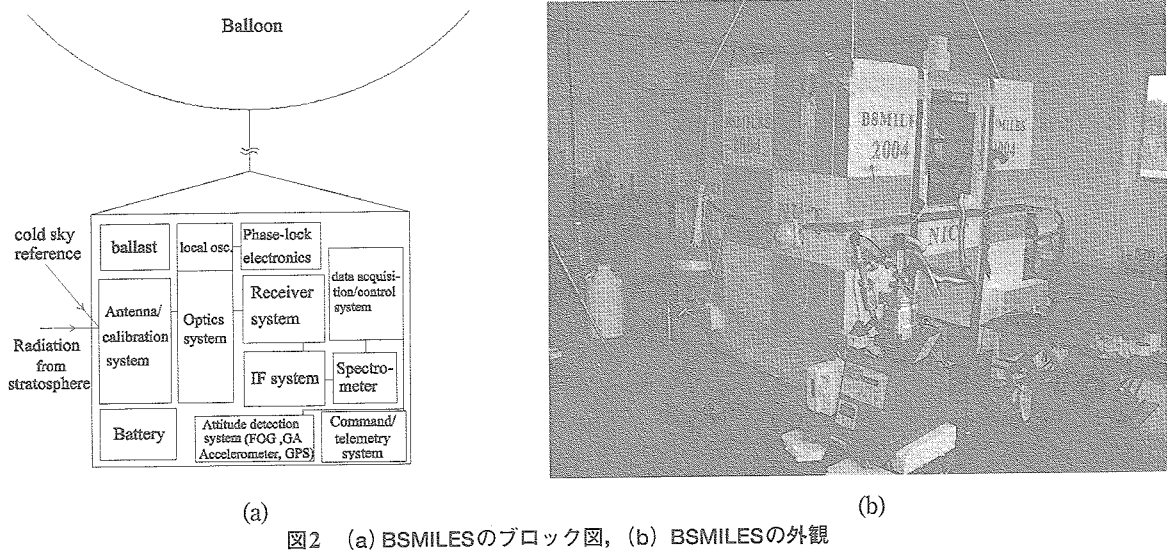


図2 (a) BSMILESのブロック図, (b) BSMILESの外観

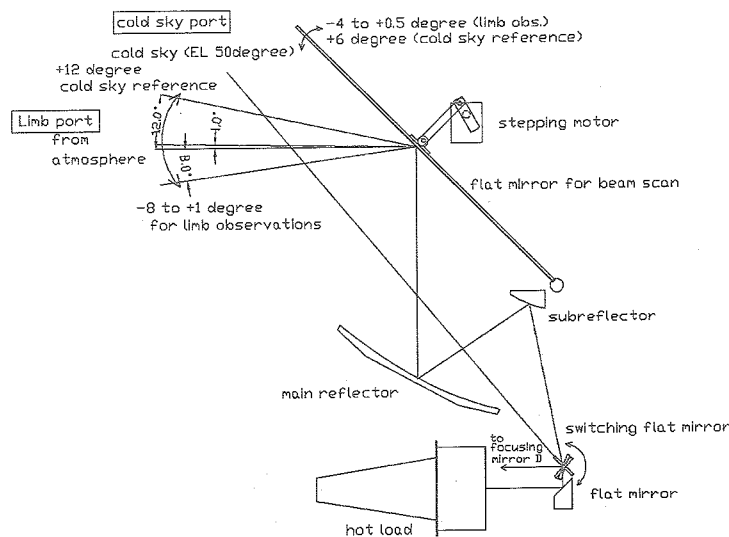


図3 アンテナ・較正系。-8°~+1°を観測のため約23秒でスキャンし、+1°~+12°は約5秒で動き、+12°で約5秒間データを取得する。

受信機にはサブミリ波 (620 GHz) 帯の超伝導受信機 (SIS mixer) を使用した。SISミキサのDSB受信機雑音温度は、620-630 GHz 帯において約 200-250 K である (図5)。DSBシステム雑音温度 (アンテナ入力端での雑音温度) は約340Kである。受信機の冷却には液体ヘリウムが用いられた。液体ヘリウムの容量は 7 L、液体窒素の容量は4 L、液体ヘリウムの保持時間は約14時間である。液体ヘリウムや液体窒素は注入ポートを開放にしておくと、上昇中に減圧されて蒸発が早くなるが、これを防ぐため内圧を約1.2気圧に保つための保圧弁を液体ヘリウム及び液体窒素注入ポートに取り付けた。

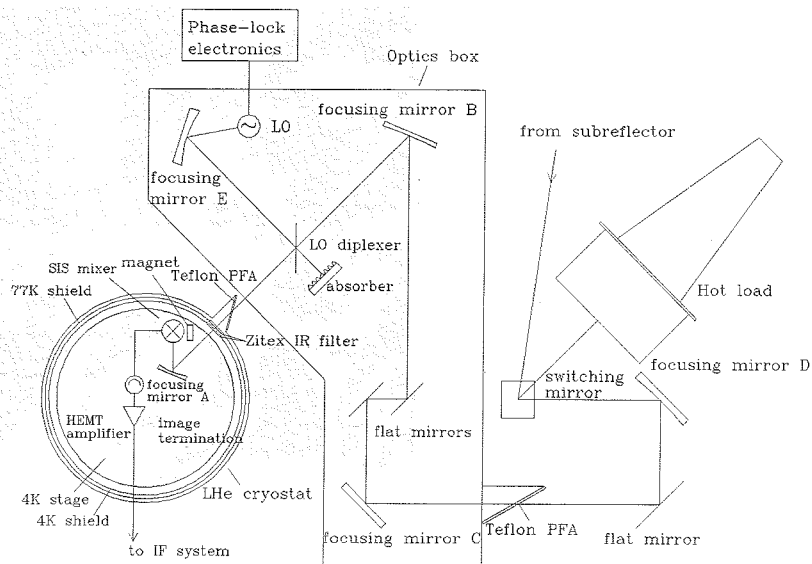


図4 光学系。4枚の収束鏡，3枚の平面鏡，LO注入フィルムから成る。DSB受信を行う。

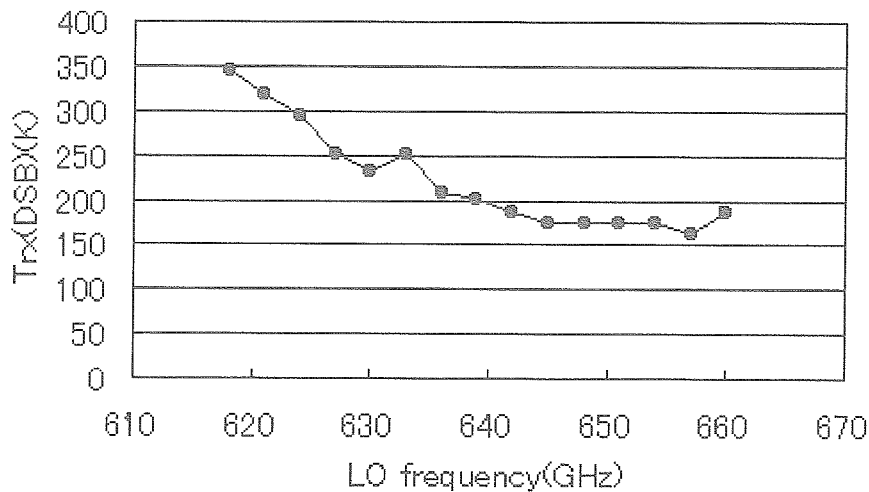


図5 620GHz帯SIS受信機のDSB雑音温度特性。DSB受信機雑音温度は，620-630GHz帯において約200-250Kである。

図6に中間周波系のブロック図を示す。中心周波数が5.6 GHz (帯域1 GHz) と6.5 GHz (帯域1 GHz) の2つの系統をスイッチで切り替えることにより，全観測帯域が1.9 GHzとなるようにした。切り替えは1往復スキャン毎に行われた。分光計には音響光学型分光計 (AOS: Acousto-Optical Spectrometer) が用いられ，帯域は1 GHz，分解能は約1 MHzである。AOSへの入力レベルはADCが飽和するレベルの約1/4のレベルとした (前回の約2.5倍の入力レベル)。また1スペクトルの積分時間を150 msecとし，データの処理・保存時間の短縮により，前回と比較して同じ時間観測した場合，約5倍のデータ取得時間が得られるようにした。データ取得・制御系には3台のCPUを使用し，データは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取するようにした。ゴンドラの姿勢を検出するために3軸光ファイバジャイロ，3軸加速度計，2軸地磁気センサを搭載した。防水やノイズシールド等のため，機器は窒素ガスを封入した与圧容器に入れられた。また，前回の実験時にトラブルを生じた分光計の電源に関しては，3端子レギュレータを介さずに直接電池で駆動するという，前回の放球時と同じ方法を採用した。

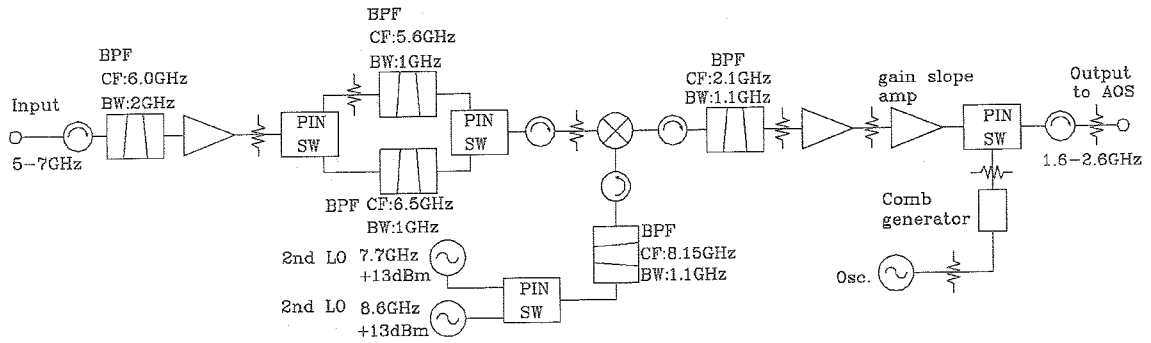


図6 中間周波系のブロック図. 5-7 GHzを2系統に分けてスイッチで切り替えることで, 1.9 GHzの帯域を取得する.

3. 放球実験

2004年9月7日6時31分, B100型気球による放球が行われた. 高度プロフィール, 飛行軌跡を図7に示す. 気球は放球から約3時間20分後にレベル高度35 kmに到達し, 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れた. 19時20分に観測器は海上にパラシュートで緩降下し着水, 約30分後船で回収された.

放球時, 前回の実験時に生じた放球直後の電源のリセットは生じなかった. 加わった加速度は+0.5 Gであった. 機器の温度プロフィールを図8に示す. 上空でもゴンドラの温度は約20°Cに保たれていた. その他の機器も全て動作温度範囲内のほぼ一定温度で動作していた. 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. 液体ヘリウムの保持時間は約8時間であった. 今後調査を行う予定であるが, その原因の一つとして, 液体窒素注入ポートに取り付けた保圧弁用のテフロンシールがシール面より僅かに奥に取り付けられていたことと, コネクタ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が考えられる.

ゴンドラを回転させるために, 前回よりトルクの大きなモータを取り付けた結果, 観測中にゴンドラは約0.7 rpmで回転していた. 図9に地磁気センサの出力を示す.

回収後, 与圧容器内の機器は完全に防水されていた. また落下による衝撃で機器は機能的損傷を受けていなかった.

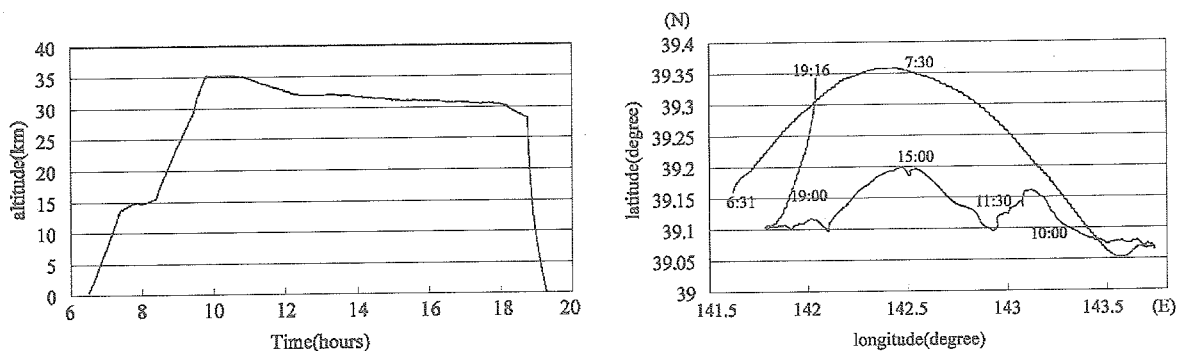


図7 気球高度プロフィール (左), 飛行軌跡 (右). レベル高度約35 kmにおいて9時50分から11時20分の約1時間半観測が行われた.

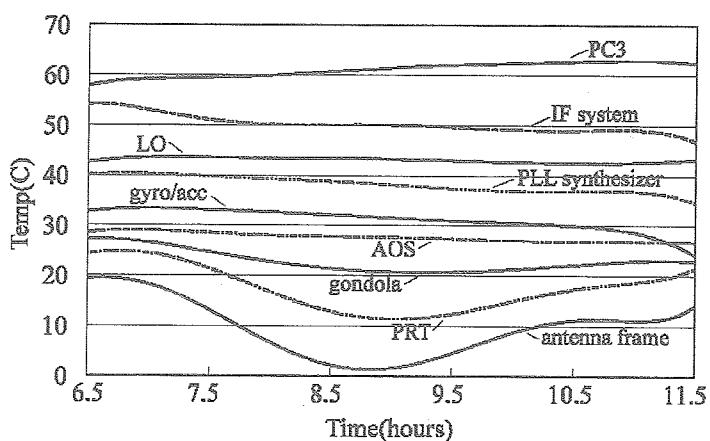


図8 各機器の温度プロフィール。上空でもゴンドラ内の温度は20℃程度に保たれている。

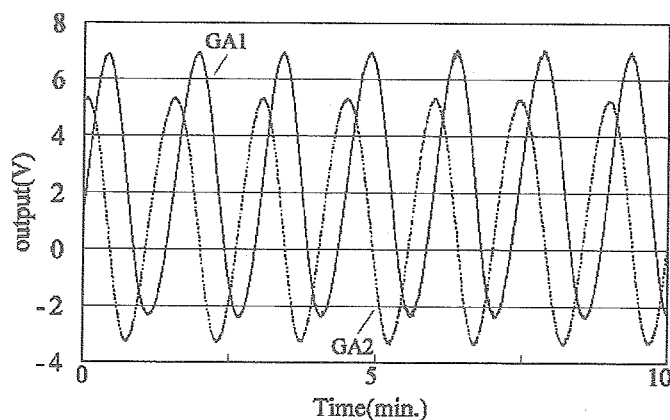


図9 地磁気センサの出力。GA1とGA2は90度ずらして取り付けられている。ゴンドラは約0.7 rpmで回転していた。

4. 観測結果

図10に仰角 -8° \sim $+1^{\circ}$ の範囲をスキャンして得られたスペクトルを示す。これは積分時間150ミリ秒の1スキャン分のスナップショットであるが、 O_3 (625.37 GHz), $H^{35}Cl$ (625.92 GHz), $H^{37}Cl$ (624.98 GHz), O_3 -v1,3 (636.67 GHz) の強度の比較的強いラインは、この短い積分時間のデータからも検出されていることが分かる。今後のデータ処理によってこのスペクトルから高度分布を出し、さらにHOCl, HNO_3 , H_2O_2 , BrO, SO_2 , CH_3CN 等の弱い分子が検出されているかどうかを調べる予定である。

今回検証観測として、ECCオゾンゾンデをゴム気球によりBSMILESと同日に放球した。ゾンデは11時に放球され、約1時間30分の観測を行った。BSMILESとは1時間以内で観測時刻が一致している。また、9月4日に放球が行われたECCオゾンゾンデ、光学式オゾンゾンデ及び9月5日に行われた光学式オゾンゾンデのデータとの比較も行う予定である。

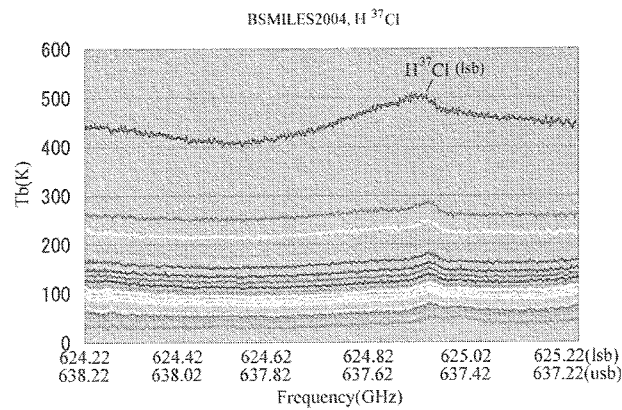
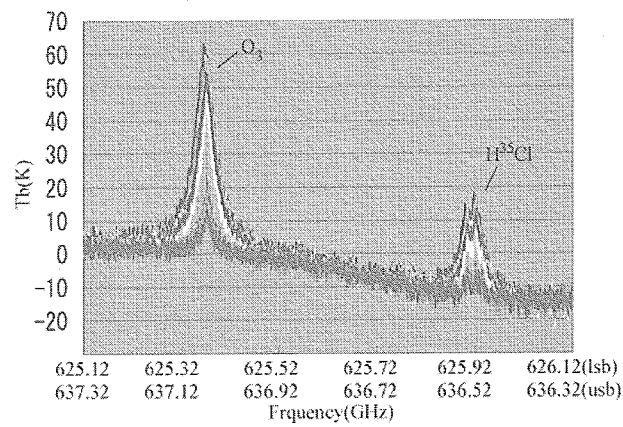
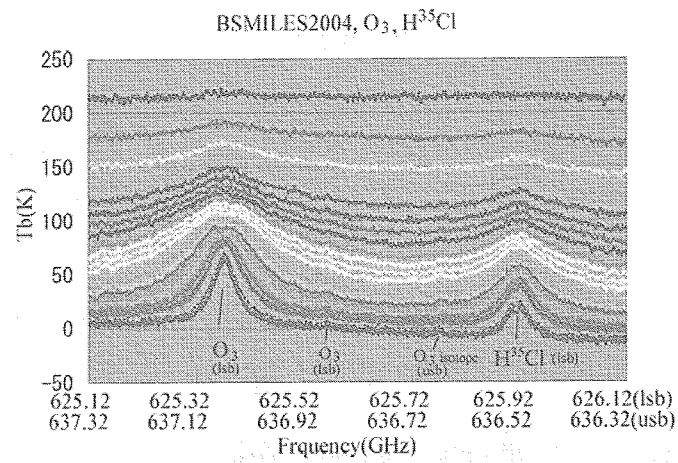


図10 ビームを仰角方向にスキャンして得られた, O₃, H³⁵Cl, O₃ isotope (上, 中), H³⁷Cl (下) のスペクトル.

5. まとめ

前回の実験結果から明らかになったいくつかの問題点に対して改良を加え、2004年に第二回目のBSMILESの放球実験が行われた。システムはほぼ全て正常に動作し、またオゾンゾンデによる同時観測も行われ、さらに質の良いデータの取得に成功した。また、今回の実験により、BSMILESは海上回収して再利用可能であることが実証された。今回の観測は、JEM/SMILES[3]の観測予定分子の約2/3をカバーするもので、データ処理技術開発にも役に立つことが期待される。さらには液体ヘリウムを用いたサブミリ波受信機技術の確立は、将来的にはTHz帯における大気観測や、天体観測のような他分野への波及効果も大きい。

参 考 文 献

- [1] 入交芳久, 真鍋武嗣, 落合啓, 増子治信, 山上隆正, 斉藤芳隆, 井筒直樹, 並木道義, “サブミリ波による成層圏 O₃, ClO の観測”, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 2004年3月
- [2] JEM/SMILES home page <http://smiles.tksc.jaxa.jp/>, or "JEM/SMILES mission plan", http://www2.crl.go.jp/dk/c214/smiles/Mission_Plan/