

||||| 特集 2 : JEM「きぼう」船外実験プラットフォームを利用した科学 |||||
(解説)

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) のミッション概要

塩谷 雅人¹・菊池 健一²・佐野 琢己²

Mission Overview of the Superconducting Submillimeter-wave Limb-Emission Sounder (SMILES)

Masato SHIOTANI¹, Ken'ichi KIKUCHI² and Takuki SANO²

Abstract

The Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) has been doing observations in the Earth's atmosphere from the Japanese Experiment Module (JEM) since October 12, 2009 with the aid of 4-K mechanical cooler and super-conductive mixer for the submillimeter limb-emission sounding. The outline of SMILES instrument and its operation on board are introduced.

1. はじめに

1.1 ミッション目的

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder: SMILES) は、国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟 (JEM) に搭載され、地球大気から放射される微弱なサブミリ波帯の電磁波を測定する装置である。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 及び情報通信研究機構 (NICT) が共同で開発に携わった。

このミッションの目的は大きく分けて二つあり、(1) 機械式冷凍機で絶対温度 4K に冷却した超伝導ミキサの宇宙実証 (技術的側面) と (2) 中層大気微量成分の観測 (科学的側面) とが挙げられる。

1.2 科学的目標

SMILES ミッションの主な科学的目標は、地球大気成層圏オゾン (いわゆる「オゾン層」) の回復傾向を把握することである。大気の数値モデル計算によると、「オゾンホール」の出現した 1980 年代以前の水準にまでオゾン層が回復するのは、21 世紀後半になると予測されている。しかし、この予測結果にはまだ解明すべき不確定性が残っている。オゾンの化学反応に関連する臭素化合物や無

機塩素化合物の振舞いや、温室効果気体の増加に伴う成層圏の寒冷化などがそれに当たる。SMILES は、これらの不確定な部分を明らかにするため、大気微量成分の分布について精密な観測データを提供することを目指している。

1.3 運用の概要

SMILES は宇宙ステーション補給機 (HTV) の 1 号機に格納され、H-II/B ロケットで打ち上げられた。HTV が ISS にドッキングしたあと、SMILES は JEM の船外実験プラットフォームの 3 番ポートに、JEM のロボットアームによって取り付けられた。取り付け後ただちに SMILES の主電源が投入され、約 2 週間にわたる初期機能確認を行なった。ここでは、すべてのサブシステムをはじめ冷凍機やスタートラッカ・アンテナ駆動機構・データ通信系などの動作確認が行われた。初期機能確認の終了後は、ISS 及び JEM の運用により制約を受ける時間帯以外は、常時 大気観測を実施した。

2. 装置概要

SMILES 装置のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。装置全体は 4 つのサブシステムに大別でき、それぞれサブミリ波アンテナ系 (ANT)・サブミリ波受信機系

1 京都大学 生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University. Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

2 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 ISS 科学プロジェクト室 〒305-8505 つくば市千現 2-1-1

ISS Science Project Office, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency. 2-1-1 Sengen, Tsukuba 305-8505, Japan

(E-mail: shiorani@rish.kyoto-u.ac.jp)

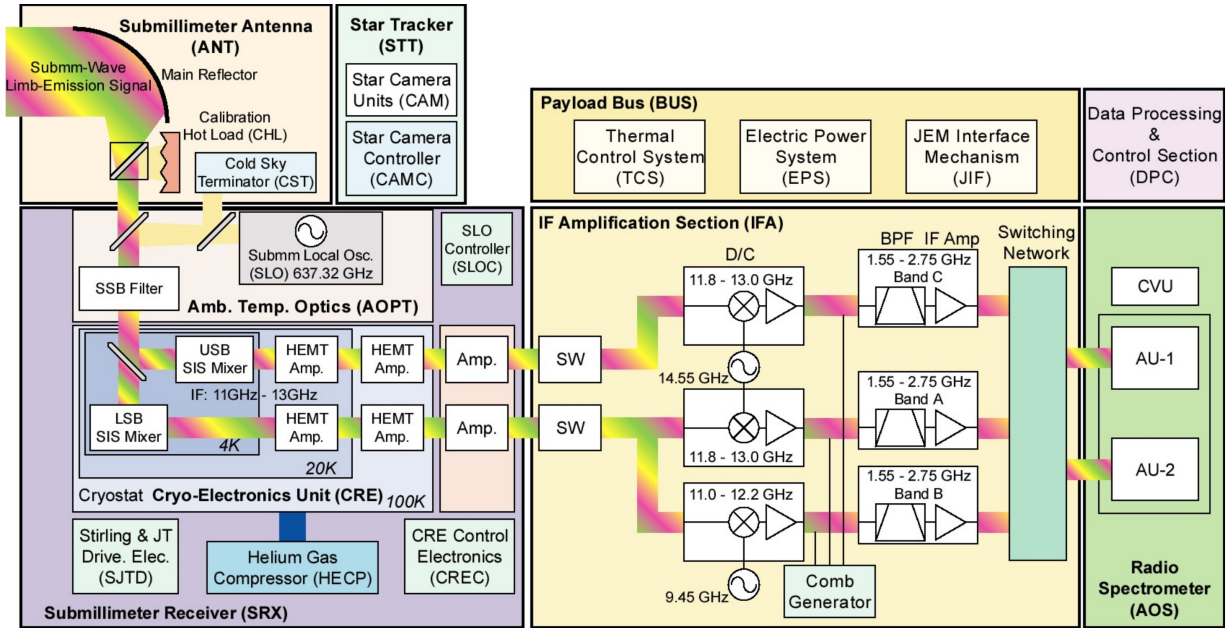


Fig. 1 Block diagram of SMILES instrument

(SRX)・中間周波変換増幅系 (IFA)・電波分光系 (AOS) と称する。設計仕様のあらましを Table 1 に示す。以下に、それぞれの構成要素を簡単に説明する。なお、詳細については SMILES のミッション計画書にまとめられている¹⁾。

2.1 サブミリ波アンテナ系 (ANT)

オフセットカセグレン型と呼ばれるアンテナで、大きさ 40 cm (長径) × 20 cm (短径) 程度の楕円形主鏡を使用している。アンテナの瞬時視野は鉛直方向に 0.09° であり、標的とする地球大気での高度方向に換算すると 3 km 程度に相当する。

2.2 サブミリ波受信機系 (SRX)

超伝導技術を応用した低雑音のサブミリ波受信機は、SMILES 装置システムの特徴の一つである。二つの SIS (超伝導体・絶縁体・超伝導体) ミクサは、サブミリ波局部発振器からの出力を利用して、受信した 640 GHz 付近の信号を 11~13 GHz の中間周波信号に変換する。極低温の SIS ミクサで周波数変換を行い、冷却した HEMT (高電子移動度トランジスタ) アンプで増幅する手法は、従来の半導体ダイオードミクサを用いた受信機と比べると 1/20 程度に受信機の雑音を抑えることができる。

2.3 中間周波変換増幅系 (IFA)

IFA は、SRX から出力される一次中間周波を更に低い二次中間周波 (1.55~2.75GHz) に変換・増幅して、後段の分光系へ送る役割を担う。また、二次中間周波の出力レベルの調整と分光系における周波数ズレの較正のため、コム発振器と呼ばれる参照信号の発振器の出力を使

用する。さらに、分光系で検出できる周波数帯域が 1.2 GHz に限られているため、2 系統の一次中間周波の一方を分割して、最終的に 3 つの周波数帯を選択して分光系で検出できるように変換も行なっている。なお、分光系は 2 系統であるため、切換回路によって 3 つのうち 2 つの周波数帯のみが選択されて分光系へ送られることになる。

2.4 電波分光系 (AOS)

AOS は AU1, AU2 と呼ばれる 2 系統の分析器ユニットをもち、それぞれが二次中間周波を周波数スペクトルに変換して 1728 チャンネルの CCD アレイにより 1.8MHz (半値全幅) の分解能で検出する。AU1, AU2 は独立して動作するので、ある種の冗長系になっていると言える。

2.5 4 K 機械式冷凍機

前述の SRX の一部ではあるが、4 K 機械式冷凍機もまた SMILES の重要な構成部品の一つである。この冷凍機は、2 段階の Stirling 冷凍機と Joule-Thomson 回路とを用いて、SIS ミクサ及び周辺の部品を冷却する。最終的には、SIS ミクサは 4.5 K 程度にまで冷却される。冷却系の装置類は冷凍機として周辺の環境温度からは絶縁されている。冷凍機内部の冷媒としては、高圧の印加されたヘリウムガスを使用している。

2.6 恒星追尾装置 (STT)

JEM 及び ISS 自体が、さまざまな要因で姿勢の変動を起こしていると考えられることから、SMILES 装置自身の正確な姿勢情報を得るために二つの STT が搭載されて

Table 1 Design specification of SMILES instrument.

Frequency coverage	Band A (624.32 – 625.52 GHz) Band B (625.12 – 626.32 GHz) Band C (649.12 – 650.32 GHz)
Freq. sampling	0.8 MHz
Freq. resolution	1.8 MHz (FWHM)
System noise temp.	< 500 K
Integration time	0.5 s for each observation tangent point
Noise level in brightness temp.	< 0.7 K
Calibration accuracy	< 1.0 K
Obs. cycle	53 seconds
Obs. alt. range	10 - 60 km (<i>nominal</i>)
Vertical sampling	~2 km (<i>nominal</i>)
Instrumental height resolution	3.5 - 4.1 km (<i>nominal</i>)
Global coverage	38°S – 65°N (<i>nominal</i>)
Obs. azimuth angle	-10 – 95 degree (0=north)

いる。STT のカメラは、視野角 30° 以内に太陽が入らない条件で常時動作する。カメラの画像から、STT は恒星の慣性座標系に対する SMILES 装置構体の姿勢を算出する。ここで求めた SMILES の姿勢と地球固定の座標系とから、SMILES の視線方向の接線高度を求めることができる。

3. 軌道上運用

3.1 SMILES の観測運用

アンテナは一周期 53 秒で高度方向にスキャンする。このうち 29.5 秒が大気のリム観測(接線高度で 10~60 km の高度分布の観測)に当てられる。その後、4 秒間の低温較正、1 秒間の周波数較正、4 秒間の高温較正の順で行われる。低温較正は、光学系内の反射鏡を深宇宙側(実際は高度 160km 以上の地球大気)に向けて行い、高温較正はスイッチングミラーの切換えで装置内の常温較正源に対して行われる。

宇宙ステーションは傾斜角 51.6° の円軌道であるので、SMILES が宇宙ステーションの進行方向を観測したとすると、カバーできる緯度帯は南北それぞれ 52° 程度までとなる。これに対して、北半球側のなるべく高緯度側も視野に入るようにするため、アンテナの視線方向を進行方向に対して左側に 45° 傾けた設計としている。このことにより、SMILES は北緯 65 度から南緯 38 度までのリ

ムサウンディング観測を実現することが出来ている。

また、SMILES では一度の軌道周回でおよそ 100 スキャン、一日ではおよそ 1600 スキャンのデータを取得することができる。しかしこれは JEM や ISS 自体の運用制約が全くない理想的な条件での想定であるので、実際には太陽電池パドルによる SMILES の観測視野の妨害など、いくつかの制約要因があり、その場合には観測可能なスキャン数はこれより少なくなってしまう。

3.2 観測バンドの選択

第2章で述べたような装置の設計からくる制約により、IFA の信号は 3 系統のうち 2 系統しか AOS 分光系へ導入することができない。観測バンドを選択するスイッチング回路には下記の 4 通りの設定が用意されている。

- (1) 設定 1: バンド B (AU2)・バンド C (AU1)
- (2) 設定 2: バンド A (AU2)・バンド C (AU1)
- (3) 設定 3: バンド B (AU2)・バンド A (AU1)
- (4) 設定 4: バンド C (AU2)

ここで注意すべきことは、バンド A は AU1 (設定 3) と AU2 (設定 2) の両方の分析器ユニットで検出されうるため、AU1, AU2 の分光特性の差異を考慮する必要があることである。なお、バンド C にも同様のことが言えるが(設定 1,2 と設定 4)、設定 4 自体は通常の観測モードでは使用しないため、こちらはあまり問題にならない。

3.3 初期機能確認の結果

初期機能確認の第一関門は、前述の機械式冷凍機が想定温度まで冷却できるかという点であった。結果として、地上での最終確認試験より長時間を要しはしたが、冷却開始後 約 80 時間で、4 K ステージの温度は 4.15 K にまで到達した。Fig. 2 は、冷凍機のそれぞれのステージにおける温度の時間変化を示したものである。

冷却が地上試験よりも長時間にわたった理由は不明で

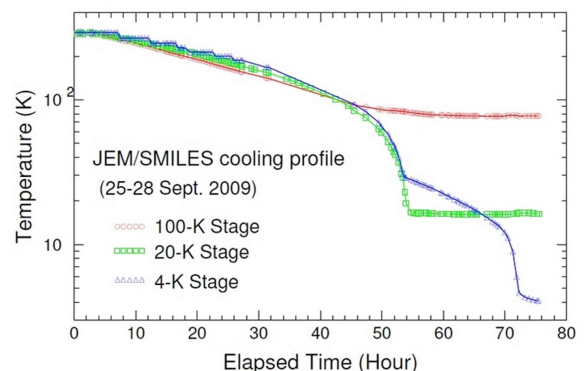


Fig. 2 Cooling profile of the cryocooler during initial-check phase.

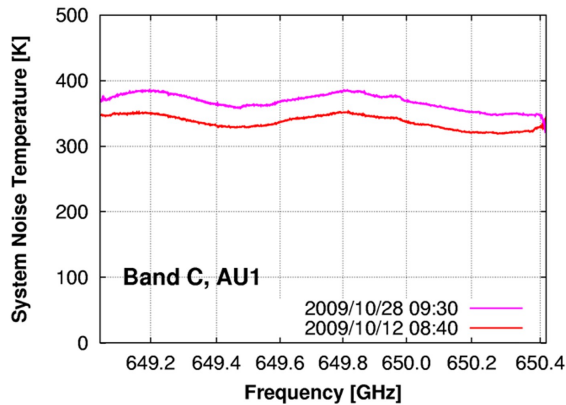


Fig. 3 System noise temperature calculated for each frequency channel of submillimeter-wave measurement.

あるが、何らかの要因で冷媒の流量が低下したことが推測される。しかし、時間はかかったがともかくも 4 K 付近にまで達し、その後 冷凍機は (2010 年 6 月に JEM 運用トラブルによる止むを得ない運転停止まで) 継続的に動作した。

装置の総合的な性能を確認するには、各チャンネルにおけるシステム雑音温度を参照するとわかりやすい。例として Fig. 3 に示すとおり、平均値は 400 K を若干下回り、設計値の 700 K よりかなり低い (つまり感度が良い)。この値は、類似の測定原理を用いた従来の大気観測センサで最も高性能な、米国 NASA の開発した EOS-Aura 搭載 MLS センサよりも SMILES が更に一桁高い感度を持つことを示す。

3.4 大気観測結果

バンド A の観測データを用いた、いくつかの高度における輝度温度スペクトルの例を Fig. 4 に示す。この観測は 2009 年 10 月 12 日に北緯 23.30°・東経 173.83°付近の

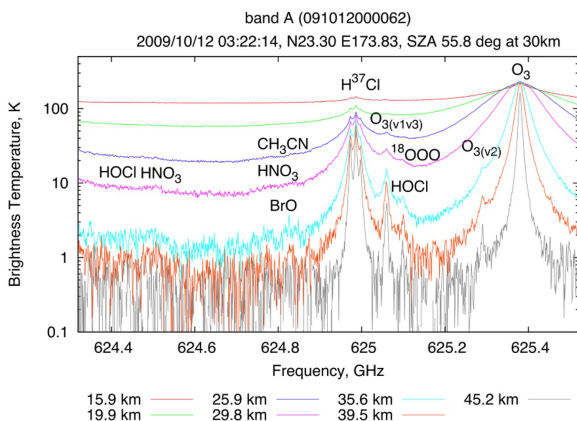


Fig. 4 Observed spectra at several altitudes for Band A.

Table 2 Weekly schedule of switching of observation band selection.

Day	Setting	Band
1 (Sunday)	1	B / C
2 (Monday)	2	A / C
3 (Tuesday)	1	B / C
4 (Wednesday)	3	A / B
5 (Thursday)	2	A / C
6 (Friday)	1	B / C
7 (Saturday)	2	A / C

上空でのものであり、JAXA が公表した「初観測データ」にも使用された²⁾。

バンド A の周波数帯には、オゾンや HCl(塩酸)の強い吸収線のほか、HOCl (次亜塩素酸), HNO₃ (硝酸), BrO (一酸化臭素) などの吸収線も弱いながら存在する。また、この結果から、スペクトルにおける雑音温度は 1 K 程度と設計値よりも低くなっていることがわかる。さらに、各分子種の吸収線の位置とこれらの周波数の文献値を比較したところ、その誤差は 100 kHz 以内 (ただし、ISS の移動速度と地球自転を考慮したドップラー効果の補正を施したあとの値) であることがわかる。初期的な解析の結果、スペクトルの較正は長期にわたって安定して行えると考えられる³⁾。

3.5 定常運用

初期機能確認において、計画書に定義された全ての確認試験が問題なく終了し、開発仕様要求を全て満たしていることが確認されたあと、2009 年 11 月 6 日より SMILES の運用は定常段階へと移行した。

定常運用では、Table 2 に示す一週間単位のバンド切換えスケジュールに従い、一日ごとに観測バンドを切換える運用を継続した。ただしこのスケジュールは 2010 年 2 月に策定し使用を開始したもので、それまでは各切換え設定の安定性などを確認するため、一つの設定で 1~2 週間程度観測を継続した。また、2009 年 11 月下旬から 12 月中旬にわたり、ISS の太陽電池パネルが SMILES の観測視野を妨害したまま停止するという事故が発生したため、この期間中の観測データは欠損してしまった。

4. まとめ

SMILES の打上げは無事に成功し、初期機能確認において、軌道上の装置性能は開発仕様を満たしており問題のないことが確認できたため、2009 年 10 月から大気観測を開始した。ただし、サブミリ波局発振系が故障したことにより、2010 年 4 月以降観測は中断している。

4K 機械式冷凍機と超伝導ミクサによって, SMILES は大気サブミリ波放射スペクトルを非常に低雑音(高感度)で測定できることが確認された。定常運用において取得できた約 6 ヶ月分の大気観測データは, 現在も度重なる再解析を行い, 科学的信頼度を上げることが試み続けられている。このデータにより, 地球中層大気の化学過程のさらなる解明が期待される。

- 2) http://www.jaxa.jp/press/2009/10/20091019_smiles_j.html
- 3) K. Kikuchi, T. Nishibori, S. Ochiai, H. Ozeki, Y. Irimajiri, Y. Kasai, M. Koike, T. Manabe, K. Mizukoshi, Y. Murayama, T. Nagahama, T. Sano, R. Sato, M. Seta, C. Takahashi, M. Takayanagi, H. Masuko, J. Inatani, M. Suzuki, and M. Shiotani: *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JD014379, in press (2010).

(2010 年 12 月 14 日受理)

参考文献

- 1) SMILES Science Team and SMILES Mission Team: JEM/SMILES Mission Plan Version 2.1, 2002.