

2 サブミリ波地球環境計測技術

2 SMILES and Submillimeter-wave Band Atmospheric Sounding Techniques

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) の開発と地上試験

Development and Ground Tests of Superconducting Submillimeter-wave Limb-Emission Sounder (SMILES)

落合 啓 笠井康子 入交芳久 瀬田益道 真鍋武嗣

OCHIAI Satoshi, KASAI Yasuko, IRIMAJIRI Yoshihisa, SETA Masumichi, and MANABE Takeshi

要旨

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の日本実験棟 (Japanese Experiment Module, JEM) 「きぼう」の船外実験プラットフォーム (ばく露部) に搭載する地球大気観測センサで、2009 年ごろの打ち上げが計画されている。SMILES では、625 GHz 帯と 650 GHz 帯の二つの超伝導ミキサを持ち、リム放射を分光観測することで、成層圏の化学物質濃度分布を求めることができる。情報通信研究機構と宇宙航空研究開発機構とが共同して開発し、2007 年度に SMILES のサブミリ波受信機を組み立て、受信機性能等を測定する。2008 年にはフライトモデルが完成する予定である。本稿では SMILES プロジェクトと、その中層大気観測性能、フライトモデルについて行われている性能試験について概要を述べる。

Superconducting Submillimeter-wave Limb-Emission Sounder, SMILES is an Earth observation sensor aboard Exposure Facility of Japanese Experiment Module of the international space station. SMILES will be launched in 2009. SMILES has two superconducting receivers in 625 and 650 GHz bands. Height profiles of stratospheric chemical species will be retrieved from limb spectra taken by SMILES. SMILES are developed under cooperation of NICT and JAXA. The submillimeter-wave receiver will be integrated and tested in 2007. The flight model of SMILES will be integrated in 2008.

[キーワード]

サブミリ波, リム放射観測, 大気リモートセンシング, 国際宇宙ステーション, オゾン層
Submillimeter wave, Limb emission observation, Atmospheric remote sensing,
International Space Station, Ozone layer

1 まえがき

サブミリ波の 625 GHz 帯、650 GHz 帯は、成層圏のリム放射観測を行う上で幾つかの利点があ

る。すなわち、オゾン、HCl、ClO などのオゾン層化学において重要な分子の吸収線が多数あること、ミリ波帯などの更に低い周波数に比べて吸収線強度が強く高感度な観測ができること、ミリ波

帯に比べ同口径のアンテナでも空間分解能の良い観測ができること、大気温度程度で放射観測に十分な受信電力が得られること、性能の良いニオブ系の超伝導ミキサを使用可能な上限の周波数であること、などである。SMILES では、624.32-626.32 GHz と 649.12-650.32 GHz の周波数帯を約 1.4 MHz の分解能で分光して、大気のリム方向からの放射を高度方向のスキャンを行いながら受信する。これにより、成層圏から中間圏の O₃, HCl, ClO, HOCl, HO₂, HNO₃, CH₃CN, BrO 等の高度分布を導出することができる。SMILES のミッション目的などについては文献[1]に紹介されている。

SMILES と同様な衛星観測は、1991年に米国の UARS 衛星が打ち上げられ、その MLS [2] が 204 GHz 帯の観測を行った。さらに、2001年にはスウェーデンの Odin 衛星が打ち上げられ SMR [3] で 502 GHz 帯の観測が行われている。2004年に打ち上げられた米国の Aura 衛星の MLS [4] では 118, 190, 240, 640 GHz 帯と 2.5 THz 帯の観測が行われている。従来の衛星観測に対して SMILES の特徴は、超伝導ミキサを宇宙で初めて使用することにより高感度な受信を行うことである。高感度化により、微量分子の濃度分布を精度良く求めたり、従来では全球での平均などでしか求まらなかった分子の濃度の地域分布を求めることができる可能性がある。また、宇宙での低温超伝導技術の実証は将来の高感度センサの利用技術の開発として意義が深い。

2 SMILES の開発

1997年に、通信総合研究所と、宇宙開発事業団が共同で提案した JEM/SMILES プロジェクトは、宇宙における超伝導技術の開発への注目と、オゾン層問題の重要性の認識から、宇宙開発委員会で JEM ばく露部初期利用のミッションの一つとして採択された。以来、SMILES は情報通信研究機構(当時、通信総合研究所)と、宇宙航空研究開発機構(当時、宇宙開発事業団)が共同して構成する SMILES ミッションチームにより開発されてきている。当初、SMILES の打ち上げは 2004年ごろを計画していた。国際宇宙ステーション計画の遅れから打ち上げは再三延期され、現在の計画では、2009年夏ごろに、日本の H-II B ロケッ

トの初号機を使用した宇宙ステーション補給機(H-II Transfer Vehicle, HTV)の初号機に載せて SMILES は打ち上げられる予定である。

SMILES のハードウェア開発は、情報通信研究機構と宇宙航空研究開発機構とで協力して行われてきた。その開発に必要な資金は両者で分担している。打ち上げ時期の延期に伴い開発に必要な資金は増大したものの、情報通信研究機構が資金分担すべきコンポーネントの開発は 2006 年度で終了した(一部複数年度契約として 2007 年度に終了)。SMILES のハードウェア開発については、今後、未完成のコンポーネントの製作と、SMILES 全体システムのインテグレーションとその試験が行われ、打ち上げが待たれる。

SMILES のデータ処理については、通信総合研究所と宇宙開発事業団の地球観測研究センター(EORC)が共同して検討が行われてきたが、現在データ処理施設は宇宙航空研究開発機構で開発されている。

SMILES 開発における情報通信研究機構が資金分担すべき部分は 2006 年度にほぼ終了し、情報通信研究機構の現中期計画では SMILES に関する研究を実施することにはなっていない。ミリ波・サブミリ波大気観測は、これまで高感度化・高周波化を目指して開発が進められてきたものの、大気にかかわる地球環境への興味がオゾン層破壊問題よりも地球温暖化問題に移り、身近な対流圏の観測には困難な最も周波数の高い電波を使って狭帯域の観測を行うことは必ずしも近い将来に期待の大きな技術ではないため、SMILES の次の計画を具体化することがまだできていない。それが中期計画で明文化されない理由である。しかし SMILES の観測は、オゾン層化学についてまだ興味深い事実を明らかにする可能性があることはもちろん、サブミリ波の低雑音スペクトルを中間圏上部まで取得する唯一の機会であるかもしれないことから、サブミリ波の大気観測技術において貴重なデータとなり得る。情報通信研究機構は、これまでのミリ波・サブミリ波観測により得られた技術の成果を最大限活用し、SMILES の観測データを有効利用することが求められている。

2.1 SMILES ハードウェアの概要

SMILES のアンテナと受信機の概要ブロック図

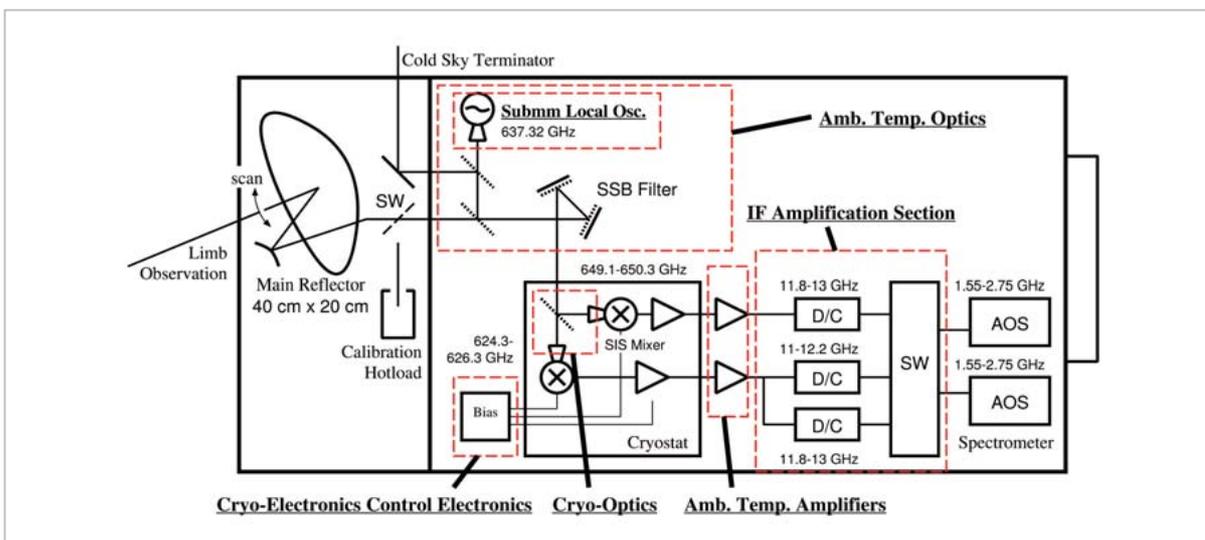


図1 SMILESのブロック図

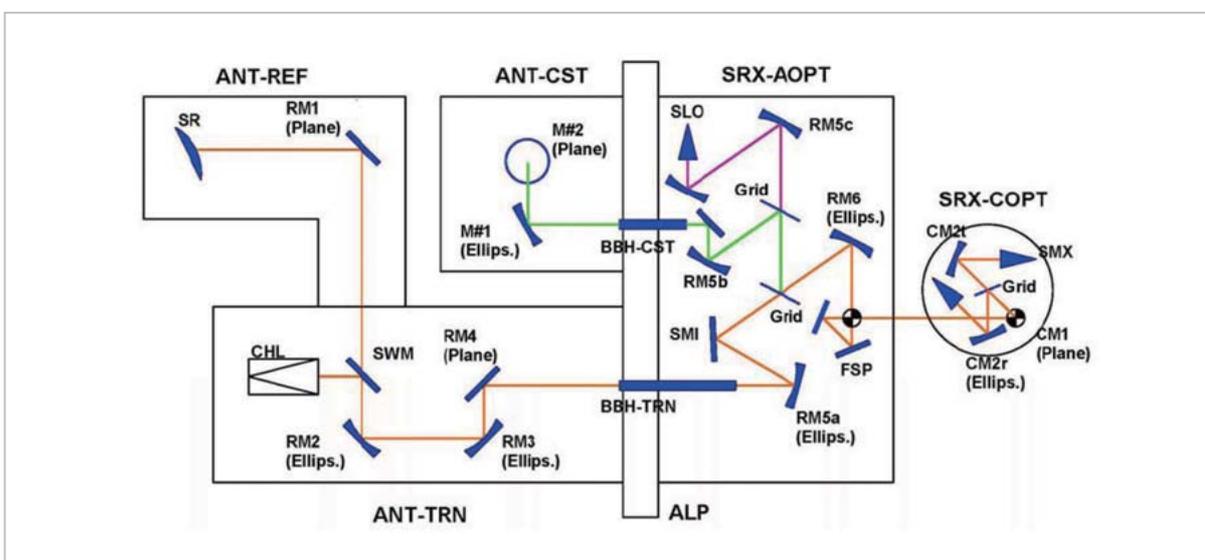


図2 SMILESの光学系

光学系は、アンテナ系(ANT-REF, ANT-TRN, ANT-CST)、常温光学系(SRX-AOPT)、冷却光学系(SRX-COPT)から成る。主鏡(図には表示されていない)からの信号は副鏡(SR)で反射し、アンテナ系の伝送路を通り、back-to-back ホーン(BBH)を介してAOPTへ導かれる。ローカル発振器(SLO)の信号と併せられFSPで構成されるSSBフィルタを通し、COPT内のSISミキサ(SMX)に至る。ローカル系には図に示していないグリッドが追加されている。

を図1に示す。SMILESでは、長径40cm、短径20cmのオフセットカセグレンアンテナで大気のリム方向を観測する。アンテナを上下方向に走査することで、対流圏上部から中間圏の高度のリム放射を観測できる。アンテナを接線高度で160km以上の方向に向け、サブミリ波では受信電力が0に近い宇宙背景放射を受信することで受信機の較正を行う。さらに、アンテナ系に設けたスイッチを切り替えて、 $-20\sim 60\text{C}$ の黒体(Calibration

Hotload, CHL)からの放射を受信して較正することにより、大気からの放射温度をスケールし決定することができる。アンテナからの信号は、SSBフィルタ[6]により下側波帯(LSB)と上側波帯(USB)を分離して、約4.3Kに冷却されたSISミキサでそれぞれ中間周波数(11-13GHz)に変換される。LSBは624.32-626.32GHz、USBは649.12-650.32GHzを受信する。中間周波数の信号は、中間周波変換増幅系を経て、2台の音響光学型



図3 SMILESの常温光学系(AOPT)

右下のホーンがBBH-TRNで、上端にSSBフィルタが配置されている。ローカル発振器(SLO)が、AOPT内の左下部分に見えている。



図5 性能試験中のSMILESサブミリ波受信機

ブロック図の、常温光学系から常温増幅器までのサブミリ波受信機で、写真の中央がクライオスタット、その上部が常温光学系。これらが取り付けられているパネルがアライメントパネルで、この裏側に、主鏡等のアンテナ系が取り付けられる。

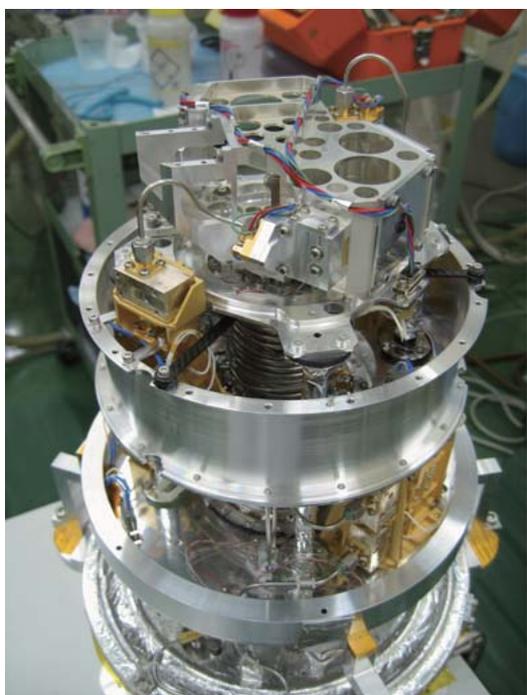


図4 SMILESクライオスタットの内部

上段が4.3Kに冷やされるステージで、冷却光学系に取りつけられたSISミキサのブロックが見える。手前のSISミキサがLSB用で、出力は20Kステージの冷却増幅器へとつながっている。USBのSISミキサは隠れて見えないがIF出力のケーブルの部分が見えている。常温光学系からの信号は上方から、左手の斜めの鏡の位置に入射される。下段の100Kステージにも冷却増幅器が載っているのが見える。

分光計(AOS)で、1.4MHzの周波数分解能、周波数チャンネル間隔0.8MHz、チャンネル数1728×2のスペクトルとして検波される。

SMILESは、図1に示すコンポーネントのほか、姿勢検出を行うスタートラッカ、冷凍機のヘリウムコンプレッサ、冷却系駆動制御回路、データ処理・制御系、電力制御系、排熱系等の機器を備える。SMILESハードウェアの詳細は文献[1][5]に記述されている。

図1で、名称に下線を付した破線で囲まれたコンポーネントは、情報通信研究機構の分担として開発した。光学系の模式図を図2に、常温光学系のフライトモデル、クライオスタット内部のSISミキサ、冷却光学系、冷却増幅器等のフライトモデル、性能試験中のサブミリ波受信機のフライトモデルを、それぞれ図3、図4、図5に示す。

2.2 SMILESの観測データ

SMILESのデータは、処理の段階ごとに、校正輝度温度データ(Level 1B)、軌道に沿った微量分子等の高度分布データ(Level 2)、全球マップ等の高次処理データ(Level 3)に分けられる。Level 1Bまでは、JAXAの施設内に設置するSMILES低次データ処理部で処理される。SMILES低次データ処理部は、外部ネットワークとはオンラインで接続しないので、1日に1、2回の頻度で、Level 1Bデータを外部ネットワークに接続されたサーバにコピーする予定である。

SMILESは、53秒を周期として大気リムをスキャンする。国際宇宙ステーション(ISS)は約

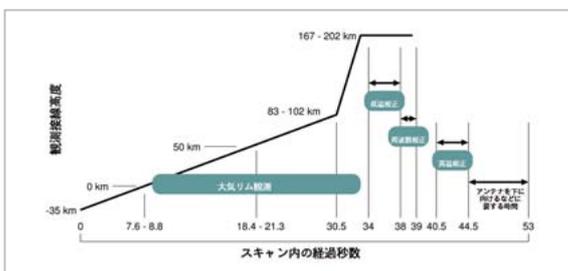


図6 SMILESのアンテナ スキャンパターン

図の53秒が終了した後、次のスキャンが続いて始まる。スキャンの開始時に、主鏡が接線高度 -35 km 方向を向くようにプログラムされ、0.108 deg/s で 29.58 秒間動く。スキャン中の接線高度は、ISS の高度、姿勢により、図中のような値を取る。Level 1B では、53 秒のうち最初の 34 秒までの輝度温度スペクトルを計算して出力する。

90 分で地球を一周するので、一周に約 105 回のスキャンを行う。スキャンの開始時刻は観測緯度等に同期せず、連続して行う予定である。スキャンの開始から次のスキャンの開始までに、ISS は地上の距離で約 380 km を飛ぶ。Level 1B では、53 秒の 1 スキャンを単位として、1 ファイルを出力する。Level 1B のファイルには、時刻、観測位置に関する情報、周波数情報、受信機の状態、較正情報等とともに、53 秒のうち較正等のための期間を除いた 34 秒間の 0.5 秒ずつ積分された、1728×2 チャンネルのリム観測輝度温度が含まれる。

1 スキャンの間に、図 6 のように、大気リム観測、低温較正 (アンテナを上に向けて、宇宙背景放射の観測)、周波数較正 (AOS にコム信号を入れる較正)、高温較正 (スイッチミラーにより CHL を観測) を行う。大気リムの輝度温度は、低温較正と高温較正から内挿することにより求められ、0.5 秒積分のスペクトルが得られる。運用では、1 周回 (90 分) の ISS の位置と姿勢を予測して、スキャン開始の主鏡仰角を、接線高度が -35 km になるようにあらかじめ計算し、各スキャンの開始仰角の値を SMILES へコマンドで送る。仰角と接線高度の関係は、ISS の高度や観測緯度等によって変わる。仰角をスキャンする速度とタイミングは一定としているので、スキャン開始からの経過時間と接線高度の関係は図 6 に示すようになる。

リム観測は、図 7 に示すようなジオメトリの観測である。接点 (視線が地表に一番近づく点) 近くで、高さ方向に 3.1-3.3 km、横方向に 6.5-7 km

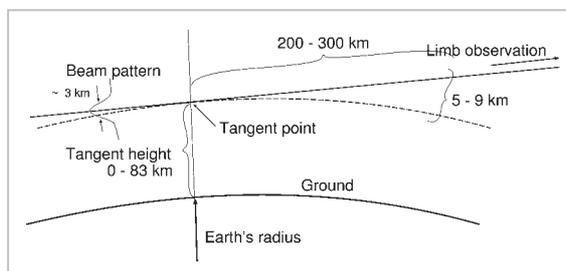


図7 リム観測のジオメトリ

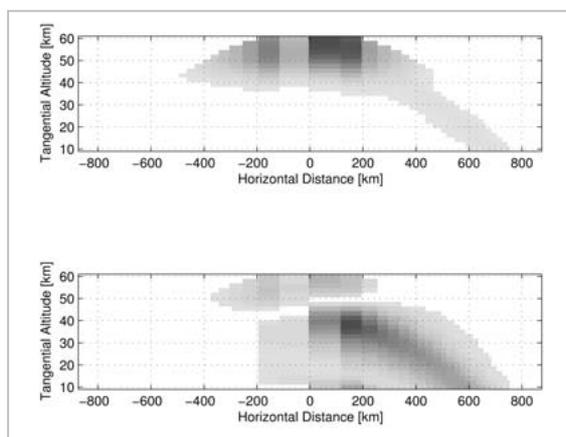


図8 荷重関数の水平分布

観測器は図の右側にあるとする。図上の濃いところが荷重関数大きい。オゾン濃度の周波数の荷重関数を示している。上段はオゾン濃度の荷重関数、下段は温度の荷重関数。

の大きさのビームで、視線方向に 400-600 km の空間を積分した大気放射を観測する。

光学的に薄い大気の観測の場合、観測される大気放射は、図 7 の tangent point の左右に対称なサブミリ波のビームが見ている体積の平均になるが、ライン強度の大きいオゾンの観測では、観測器に近い側に偏った重みのついた積分になる。観測器で受信される放射輝度の、観測している視線上のオゾンなどの濃度変化に対する感度が荷重関数であるが、水平方向に展開して表示すると図 8 のようになる。図 8 では、リム観測の視線を含む大気の断面を表していて、図の水平線が観測の視線になり右側に観測器があるとしている。図 8 で示すように、温度の荷重関数は観測器側で大きくなる。SMILES で観測される大気温度は、接点付近ではなく、それより 200 km 程度観測器寄りの温度を測ったものになる。温度の荷重関数は、濃度の荷重関数よりも、ライン中心に重みが大きいため、図 8 のように違いが現れる。オゾン以外の

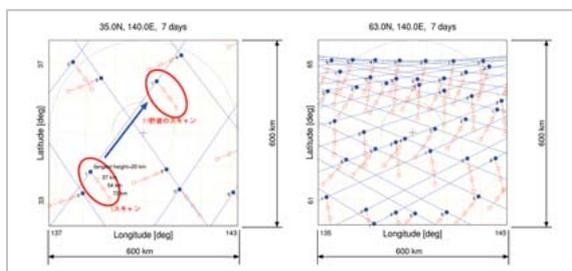


図9 ある7日間のSMILES観測点

左図は北緯35度、右図は北緯63度を中心とした観測の tangent point の地上への投影。青線は、接線高度20 km の tangent point をつないだ線。●の横の数字は、0~6の日付を示す。

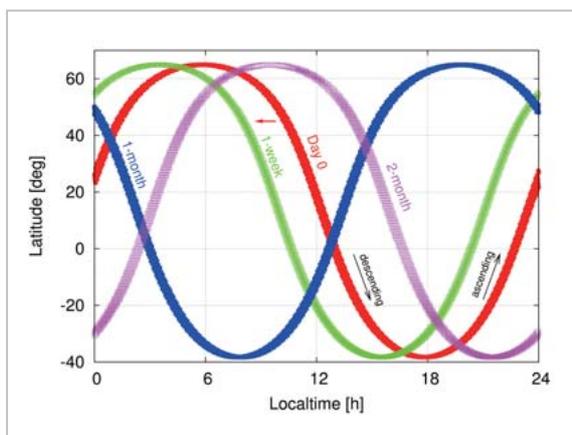


図10 観測緯度とローカルタイムの関係の2か月間での変化

ある日の観測緯度とローカルタイムの関係が Day-0 の曲線と与えられるとき、その1週間後、1か月後、2か月後の、その関係は、それぞれ、1-week、1-month、2-month の曲線で示される。緯度を固定したとき、3日で約1時間ローカルタイムが早くなる。

他の分子のラインの周波数では、光学的に薄いので図8のように偏った荷重関数の分布とはならず、ほぼ左右対称になる。SMILES から得られる分子濃度の分布では、オゾンとその他の分子では、水平方向に観測している位置が違うので注意が必要である。

観測位置の地上への投影点は、図9の例に示されるようになる。SMILES では、進行方向斜め左45度の方向にリムを観測するので、図9で観測体積は、接線高度一定の tangent point の軌跡(図の青線)から、45度傾いた方向に長い楕円筒になる。SMILES の観測緯度範囲は、ISS の高度、姿勢にもよるが、平均して北緯65度から南緯38度の範囲になる。観測緯度範囲の北限と南限では、図9の右側の図に示すように、1日の観測点が多

数となる。

SMILES の観測点のローカルタイムは図10のように、同じ緯度の観測点では毎日少しずつ早くなり、約72日(ISSの高度による)で元に戻る。

2.3 SMILES の観測性能

SMILES で得られる大気分子濃度等の誤差の要因には、Level 1B の輝度温度スペクトルに含まれる誤差、観測視野の位置等の誤差、リトリバルに用いるモデルの誤差、気象値等の外部データの誤差に大別できる。

輝度温度スペクトルに含まれる誤差は、さらに、ランダム誤差、スケーリング誤差、ベースラインレベルの誤差、スペクトルの歪みによる誤差に分けられる。

ランダム誤差は、受信機雑音温度と検波器(分光計)の雑音で決まる。SMILES の受信機雑音温度は500 K 程度以下になる見込みで、従来の同じ周波数のリム放射計に比べ、小さなランダム誤差になることが期待される。SMILES では、分光計入力電力のバンド内偏差は2 dB 程度以内に収まる見込みで、分光計のノイズダイナミックレンジ(9 dB 以上)に比べ十分小さく、分光計による付加雑音は無視できる。

スケーリング誤差、ベースラインレベルの誤差、スペクトルの歪みによる誤差は相互に関係する。スケーリング誤差に影響するものには、アンテナビームパターンの誤差、アンテナの広角サイドローブの見積り、広角サイドローブで見積りものの輝度温度の推定、主鏡系とCHL を見るとき鏡によるロス等の差、CHL 輝度温度の見積り、受信機非線形性、受信機の安定性、SSB 分離特性の誤差、などがある。ベースラインレベルの誤差に影響するものも、スケーリング誤差のものとはほぼ同様である。スペクトルの歪みに影響するものには、CHL の反射係数、受信機特に分光計の非線形性、アンテナの仰角を変えることによる定在波の変化などがある。

例えば、アンテナの広角サイドローブの見積りについては、方向別にアンテナが感度を持つ割合が、おおまかに図11に示す程度になる。アンテナのビームパターン測定により、およそ仰角で-4.2から+4.2度の範囲のパターンが求められる。受信される電力の97.5%は、ビームパターンの分

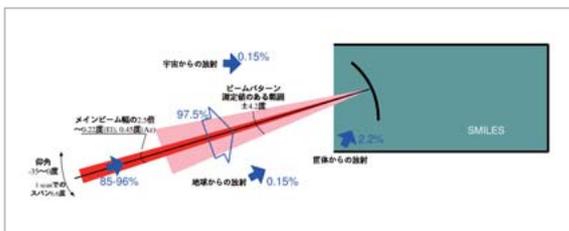


図 11 アンテナビームパターンの方向別積分値

受信電力に 97.5 % の寄与をするメインビームを中心とした領域の放射輝度に換算した値を Level 1B の出力とする。その領域より外側の、構体 2.2 %、地球 0.15 %、宇宙 0.15 % からの放射の合計は Level 1B 処理で推算し補正する。

かっている方向からの輝度温度で決まるが、残りの 2.5 % はビームパターンが測定されない方向からの寄与になる。立体角の比から、図 11 のように、SMILES の構体からの放射と、地球からの放射、宇宙からの放射の比を仮定し、構体からの放射輝度などを推定して、受信輝度温度の較正値を求めるとする。

輝度温度スペクトルに含まれる誤差を、ハードウェアの仕様値等から積み重ねて見積ると、ランダム誤差は 0.5 秒積分で分光計出力 1 チャネル当たり 0.8 K 程度以下、スケール誤差は 10 % 程度以下、ベースラインレベルの誤差は 20 K 程度以下、スペクトルの歪みの誤差は 4 K 程度以下となる。ランダム誤差を除いては、大気観測に必要な精度より大きな値であるが、これらは、ハードウェアの各コンポーネントの仕様範囲から求めたもので、次項に説明する受信機性能試験等地上試験の結果や、軌道上での測定等で、較正を行うことで、現実的な値が得られる予定である。

観測視野の位置等の誤差には、地上で測定したアンテナビームパターンの誤差と、観測時の指向方向(ポインティング)の誤差がある。ポインティングは、SMILES の持つスタートラッカ、または、ISS から配信される姿勢情報等と、ISS の位置情報から、Level 1B 処理で計算される。Level 1B で決定される接線高度のランダム誤差は 0.34 km、バイアス誤差は 5.07 km となっている。

バイアス誤差は、打上げ後の大気観測からバイアスの大きさを求めることで 0.3 km 以下に減らすことが可能である。また、月等が視野に入った場合のデータを使って、アンテナビームパターン、ポインティングの較正を行うことも検討している。

2.4 SMILES 受信機性能試験

SMILES サブミリ波受信機性能試験の範囲とするサブミリ波受信機は、常温光学系 (Amb. Temp. Optics, AOPT) から常温増幅器 (Amb. Temp. Amplifiers, AAMP) までの機器である。受信機性能試験では、電気性能試験、ビーム測定試験、分子検出試験等を行う。さらに、サブミリ波受信機にアンテナを結合して、主鏡からのビーム測定も行う予定である。これらの試験は 2007 年 6 月から 7 月にかけて行われる予定である。

受信機性能試験では、フライトモデルの受信機が所定の性能に達しているかを検証することのほか、観測データの処理に必要な、イメージバンド抑圧比の値、その周波数特性、アンテナのビームパターンとポインティング方向などが測定される。

SMILES のイメージバンド抑圧比は 15 dB 以上であるが、観測時の較正では、サイドバンドの区別のない黒体 (CHL) 放射を用いるところから、イメージバンド抑圧比をあらかじめ知っておく必要がある。AOPT の中に設けられた SSB フィルタの特性は単体で測定されているが、SIS ミキサもサイドバンド比を持つので、それらを組み合わせる特性を求めるとがこの測定の目的である。

ビーム測定は、常温光学系からのビームパターンの測定とともに、主鏡の近傍界測定を行う。近傍界測定は強度パターンのみでの測定からフェーズリトリバル法によって電界ベクトルを求め、遠方界パターンを求める。

受信機の後ろの、中間周波変換増幅系、分光計 (AOS) を結合した試験は、受信機性能試験の中では行われないが、システムに組んだ後、全系での周波数特性、線形性の測定を検討している。

主鏡の仰角を変化したときに、受信機出力の周波数特性が変化しないかを確認する試験が必要である。現在、システムの組立、試験のスケジュールの中で、そのような試験が可能か不明だが、できるだけ実施するように検討している。

3 むすび

SMILES は現在フライトモデルの組立と、試験が実施されていて、2009 年の打ち上げが予定されている。本稿では、SMILES の開発の状況、ハー

ドウェアの概要、輝度温度スペクトルなどの観測データの内容と特徴、輝度温度スペクトルの誤差についての検討の現状、現在実施されている受信機性能試験の概要について述べた。

SMILES は、宇宙航空研究開発機構と情報通信研究機構が共同して開発したものである。また、SIS ミキサの開発には国立天文台野辺山と協力し、

常温光学系の開発にはスイスのベルン大学の協力を得ている。SMILES では、大学等の大気化学研究者によるサイエンスチームを編成して、観測、運用等の検討を行っている。受信機性能試験は、住友重機械工業株式会社新居浜工場内で行われている。関係者全員に謝辞を述べたい。

参考文献

- 1 真鍋, 通信総合研究所季報, 48 (2), 9-19, 2002.
- 2 J. W. Waters, et al., J. Atmos. Sci., 56, 194, 1999.
- 3 D. P. Murtagh, et al., Canadian Journal of Physics, 80, 309, 2002.
- 4 M. R. Schoeberl, et al., IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 44(5), 1066, 2006.
- 5 SMILES Science Team and SMILES Mission Team, JEM/SMILES Mission Plan, Ver.2.1, 2002.
- 6 T. Manabe, et al., IEEE Trans. MTT, 51(6), 1696-1704, 2003.

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

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

真鍋 武嗣

大阪府立大学 工学博士
航空宇宙工学

笠井 康子

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 博士(理学)
テラヘルツ波リモートセンシング

瀬田 益道

筑波大学 理学博士
サブミリ波天文学