

## 4-3 全大気圏衛星観測 (SMILES-2) 計画の目標と課題

### 4-3 SMILES-2, a Satellite Observation Plan of the Whole Atmosphere — Objectives and Key Technologies

落合 啓

Satoshi OCHIAI

全大気圏衛星観測 (SMILES-2) 計画は、地球大気をサブミリ波 (テラヘルツ波の一部) を使った衛星で観測する計画である。2009 年に実施した SMILES の技術を継承し、SMILES で主に計測した成層圏・中間圏のオゾンなど微量物質も観測対象だが、それだけに限らず、受信機に 2 THz などの新たな周波数を加えるなどによって、成層圏・中間圏・下部熱圏の広い高度範囲にわたって風、温度など大気的主要なパラメータを測ることを計画している。この観測は、大気モデルの精度向上や、大気の上下結合の定量的理解などに大きく貢献すると期待される。SMILES-2 は提案段階であり、超伝導素子を利用するための冷凍機の消費電力が想定する衛星のリソースに対して大きいなどの課題があるため、冷凍機の消費電力を下げるための冷却受信機の検討及びシステムの検討を実施している。

The Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder-2 (SMILES-2) is a planned satellite mission to observe the Earth's whole atmosphere with submillimeter-wave limb sounding. Inheriting the technology of SMILES, which successfully demonstrated atmospheric observation from the International Space Station in 2009, SMILES-2 will make highly-sensitive measurement of the stratospheric and mesospheric ozone and other atmospheric minor constituents. But not only measuring those atmospheric chemistry, SMILES-2 will measure major atmospheric parameters such as wind and temperature in a wide range of altitudes. By adding a new frequency at 2 THz to the receiver, the higher limit of observation altitude range will be extended to the lower thermosphere. The observation is expected to contribute to the improvement of the numerical weather prediction and scientific investigation of vertical connection of the atmosphere. SMILES-2 is currently on an early phase and being propose to the JAXA/ISAS M-class mission. The design of cryogenic receiver and mission system is studied to mitigate the main technological issue of SMILES-2 that large power consumption by cryogenic mechanical cooler is estimated comparing to power resource of M-class satellite.

#### 1 まえがき

衛星からの地球大気観測は半世紀以上の歴史がある。大気の観測データは気象予測や気候の将来予測にも用いられその重要性和需要は近年更に増している。計測される大気のパラメータには、気温、水蒸気、風、降水、雲、化学物質、温室効果ガス、エアロゾルなど種々の対象があり、新たな観測センサの開発では観測対象を広げるとともに空間的な分解能や、観測精度の向上が図られ、また、時間分解能や観測頻度を高める努力がなされている。大気状態の高度に対する変化や分布を知ることは、気象・気候予測のモデルにとって重要

で、衛星から対流圏 (地上から 10 ~ 18 km 程度の高さまでの大気) の気温を測る最近の衛星センサでは、高度方向に 1 km の分解能で測ることのできるものが実用化されている。しかし、そのようなセンサでも大気の上層に行くほど高度分解能は悪くなり、対流圏界面 (対流圏の上端) から上の成層圏 (対流圏界面から約 50 km まで)、中間圏 (約 50 ~ 約 80 km) を測れるとしながらも、その高度域を数層に分解できるだけで高度分解能としては 8 ~ 10 km 程度であり、測定精度もあまり高くない。水蒸気の衛星からの観測では、対流圏においても高度分解能は良くなく、気象観測を目的とした衛星では、成層圏より上空は、対流圏に比べ

水蒸気の濃度が非常に薄いのでそれが測られることはない。また、風を衛星から直接測るのは容易ではなく、雲の動きから、また場合によっては水蒸気分布等の動きから風向・風速を推定したり、海面の状態から界面付近の風を推測したりすることが行われてきている。昨年地上から 30 km までの風の分布をライダーにより測る初めての衛星がヨーロッパにより打ち上げられた [1]。超高層大気の流れについては、大気光を分析することで高度 90 km 付近、昼間では高度 90 ~ 300 km の風を測る衛星がある [2]。成層圏、中間圏と夜間の熱圏 (約 80 km から上の大気) の風を測る衛星は現在存在しない。

観測の少ない場所の観測を増やすことや、観測されてこなかった大気のパラメータを測ることは、大気モデルの精度を効果的に向上させる可能性がある。例えば、成層圏の風は前述のライダーによる下部成層圏までの新たな衛星観測を除けば、ゾンデによる以外に観測方法がない。特に地衡風推定も成り立たない熱帯域では数少ないゾンデによる下部成層圏の観測値がモデルの精度に大きな影響を与えている [3]。熱帯域の成層圏の風が重要なのは、それが地上気象にも影響しているからである。熱帯域の成層圏の変動は成層圏準 2 年周期変動 (QBO) により大きく支配されているが、QBO は極域の春期の極渦の変化のタイミングにも影響を及ぼしており、成層圏の極渦の状態は地上の気象に影響の及ぶことから、熱帯域成層圏の風は地球規模の気象予報に関係していると言われている [4]。気象予報のための数値モデルにおいては、そのような大気の上層の影響も含めることが予報精度向上につながるため、成層圏・中間圏までモデル領域に含めることが一般的になってきている。しかし、高層の気温の観測値については、マイクロ波ラジオメータが前述のように中間圏の高さまで感度を持つが気温推定精度はあまり良くなく、数値モデルに入力される成層圏・中間圏の観測値は不十分な状況にある。成層圏の極渦現象を数日から 1 か月先まで予測できれば、地上気象への影響を精度良く予測することができるが、現在の数値モデルの性能はそれほど良くないと考えられている [5]。そのような中、米国の Aura 衛星に搭載されたマイクロ波リムサウンダ (Aura/MLS) の成層圏・中間圏・下部熱圏 (16 ~ 90 km) の温度・オゾン・水蒸気と、TIMED 衛星の赤外リムサウンディングの SABER による同じような高度領域の温度を観測値として使用した数値モデルでは、中高緯度の高度 70 ~ 95 km の上部中間圏から下部熱圏にあたる高度領域の風がよく再現できているという報告もある [6]。このように成層圏・中間圏の観測を増やすことで予測精度の向上が期待される。

成層圏・中間圏の風、また、更に上空の 100 km から上の大気、風の日変化、温度、密度などの継続した観測データは存在しない。それらは大気の上下結合を詳しく知るのに不可欠なデータである。北極域冬季の成層圏で起こる成層圏突然昇温は、対流圏・成層圏・中間圏に大きな変化をもたらすだけでなく、電離圏にも、しかも南半球を含む広い緯度範囲にわたって影響を及ぼすことが知られている。大気現象が上方に伝播し全球規模で影響するメカニズムは大気モデルによって説明が試みられているが [7]、その全体像と物理過程が十分に解明されているとは言い難い。上部中間圏から下部熱圏にかけての領域 (MLT : 70 ~ 150 km 程度の高度領域) は、そのような大気の上下結合において重要な領域である。宇宙からの高エネルギー粒子の降り込みによる NO<sub>x</sub> 生成など下方のオゾン等に影響のある化学反応が起こるのも MLT である。MLT の上下で、大気運動の変化の時間スケールが異なるのも MLT を特徴づける大きな因子である。成層圏・中間圏の熱的・力学的構造は主に 1 日より長いスケールで変化し日周変化は大きくない。一方、約 150 km から上の中性大気の流れと温度の分布は太陽の方向に従った構造を持ち 1 日の周期性が卓越している。その遷移領域にあたる MLT は、下方の大気から大気重力波を通して伝わるエネルギーと、上方からの太陽を起源とした高エネルギー粒子等によるエネルギーが匹敵するため両者からの影響を強く受け、また、それらの影響を双方へ伝えていくときに MLT の状態に大きく依存する。大気の上下結合を解明するための MLT 観測においては、日周変化の状態が大きく変化する高度領域であることから、どこの緯度経度で観測したかとともに 1 日のどの時刻に観測したかが重要であり、継続した観測で日周変化、全球分布を含めて把握することが必要である。

全大気圏衛星観測 (SMILES-2) 計画では、成層圏・中間圏・下部熱圏の、これまで観測が少なかったり観測精度が十分でなかったりした大気パラメータ、また、これまで観測されていない風やその日変化、下部熱圏の温度・密度等を観測する。成層圏・中間圏・下部熱圏の連続した高度領域で、中性大気を記述する主要な要素である、温度、風、密度、水蒸気、オゾン、さらに塩素化合物、窒素化合物等の微量成分を、日周変化を含めて全て測ることのできる全大気圏観測の画期的なミッションとすることができる。SMILES-2 はサブミリ波 (300 GHz ~ 3 THz の周波数の電波でテラヘルツ波の一部) で大気リム観測を行う。必要な観測精度を得るために観測感度の高い超伝導を利用したセンサを使う必要があり、そのためミッション機器は少し大きな規模になる。SMILES-2 は宇宙航空研究開発機構

(JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS) の募集する公募型小型計画のミッションに応募しているが、今のところミッション探求フェーズでありプリプロジェクト候補に進むことがまだできていない。SMILES-2 は提案段階であるが、それが実現されたときに得られる大気科学への貢献は大きなものになると期待される。

## 2 中層大気の衛星による観測

衛星による中層大気 (成層圏と中間圏) の観測は対流圏の観測に比べて数が少ないが、オゾン層問題が注目された 1990 年代からこれまでに大気のリムを観測するいくつかの衛星が運用されてきている。大気のリム観測は図 1 のように、宇宙を背景にした地球のリム、すなわち周縁に見える大気を衛星等から観測する方法であり、大気の高さ方向の分解能が良いこと、密度の低い大気でも強い信号強度が得られること、ドップラー効果による周波数シフトを測れば水平風の情報が得られることなどの特徴がある。これまでに中層大気のリム観測は、ミリ波サブミリ波や赤外による観測が行われてきた。赤外では、掩蔽 (えんぺい) 観測 (背景に太陽等があるリム観測で大気による吸収量を観測) 等により成層圏の多種の化学物質を測ることなどが行われてきた。現在でも観測の行われている衛星には、Odin、Aura、TIMED が ある [8]-[10]。Odin/SMR と Aura/MLS はミリ波サブミリ波の大気リム観測で中層大気のおゾンなど多くの化学物質や大気の色度を測ってきた。

日本でも 2009 年 10 月から 2010 年 4 月までの短期間ではあるが国際宇宙ステーション (ISS) からサブミリ波による大気リム観測を行った。その観測機器が超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES) である。SMILES では超伝導を利用した SIS ミキサによる 637 GHz 帯の受信機を使用した [11]。Odin/SMR や Aura/MLS との違いは SIS ミキサを使用したことで、SMILES の受信機感度はほかよりも一桁程度高かった [12]。観測精度の高かったことと、ISS が太陽非同期の軌道であったことから、大気の日変化を正確にとらえることができ、成層圏オゾンの日変化では午前と午後とが非対称であることなどを実証する [13] など、中層大気の日変化に関する知見等について多くの成果をあげた。Aura/MLS では中間圏・下部熱圏の風を測定できることが示されてきたが [14]、SMILES では、大気輝線のドップラー観測では低い高度ほど観測が困難になるにもかかわらず、上部成層圏・中間圏で風を比較的良好な精度で測定できることを実証した [15]。

リム観測により中層大気の色度観測を現在行っているのは、米国の 2004 年打ち上げの Aura/MLS、2001

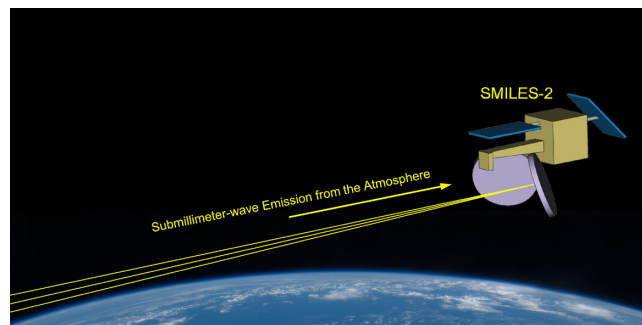


図 1 リム観測の概念図。衛星から見て地球周縁にあたる大気から放射される電波を受信し分光する。SMILES-2 ではアンテナを 2 つ搭載し異なるリムの方向を切り替えて観測する。

年打ち上げの TIMED/SABER だけである。いずれも打ち上げから 14 年以上経過しているが、SABER-II を載せる LATTICE 衛星など後継の検討はなされているものの、次期衛星の計画として進められているものはない。スウェーデンでは中層大気の色を測ることを目的としたものとしては初めての衛星 SIW を 2023 年頃に打ち上げる計画である [16] [17]。SIW は 638 GHz 帯のサブミリ波のリム観測を行う計画としている。これは SMILES-2 で計画している受信機のひとつのチャンネルと同じ周波数で、中層大気の色のほか、温度、水蒸気、オゾン、HCl、ClO、HO<sub>2</sub> など色測る計画になっている。

SMILES-2 は SMILES の経験を基に発展させた衛星として提案している。SMILES では大気リムを地表面付近の高度から約 90 km までスキャンし、637 GHz 帯でオゾン、HCl、ClO、HO<sub>2</sub>、BrO 等の分子を観測した。それら分子の色度プロファイルとともに、成層圏の色度、上部成層圏から中間圏の色、対流圏界面付近の絹雲と水蒸気等も導出された。一方、SMILES-2 は、638 GHz のバンドに加えて 763 GHz と 2 THz のバンドを持つことで、観測高度上限を約 150 km まで伸ばし、観測精度を向上して、中層大気の色度良好な観測を継続するとともに、宇宙気候で代表される空間と中層大気などの大気圏との境界領域の科学を行おうとするものである。

## 3 SMILES-2 計画の目標

SMILES-2 は、中層大気から高層大気にかけての大気上下結合に関係する、大気の色学、化学、エネルギーバランスの統合的な理解を目的としている。それを具体化した次の 4 つが科学目標である。

- (MO.1) 力学・化学・電磁気学過程を通して見た日周変動成分 (大気潮汐) の 4 次元時空間構造の解明

- (MO.2) 太陽非同期潮汐、成層圏突然昇温など中層大気の総観規模・惑星規模の現象から高層大気への鉛直伝播過程の解明
- (MO.3) 磁気嵐や粒子降り込みなどによる磁気圏からのエネルギー注入による大気変動の理解
- (MO.4) 全大気モデル・気候モデルの基準となる背景場の温度構造や風構造、微量成分分布の詳細なデータの提供

地球大気に関するこれらの知見が、さらに他の惑星の大気研究にも活かされ得ることも科学目標の中に含めている。例えば、火星では大気運動が地表から熱圏まで連続しているが、地球大気では成層圏があるため主要な大気の循環などの運動が対流圏に制限されているのは対照的である。SMILES-2により中層大気から下部熱圏にかけての上下結合に知見の得られることは、そのような惑星大気の研究にとっても高い価値がある。

### 4 SMILES-2 衛星の概要

#### 4.1 科学目標達成に必要な衛星観測の条件

科学目標を達成するために、SMILES-2による観測は次の条件を満たす必要がある。

- (1) 日変化を観測することができ、かつ、高緯度を含めた広い緯度範囲を観測できること
- (2) 成層圏・中間圏と約 150 km までの下部熱圏の高度域を連続して観測できること
- (3) 風・温度の日周変化の高度・緯度分布をその変動も検知できる精度で観測できること

このような観測を、SMILES-2ではサブミリ波リム観測で実現する計画である。サブミリ波帯を用いるのは次の理由による。

- サブミリ波では中層大気から下部熱圏に至る広い高度範囲を切れ目なく観測することができる。可視等による大気光観測では上部中間圏より高い高度の風の観測、赤外では中間圏から低い高度の温度や大気微量成分の観測に限られる。特に上部成層圏の風観測に実績があるのはサブミリ波帯だけである。
- サブミリ波では大気からの熱放射を観測に使うので、大気の日周変化を観測することができる。大気光観測では夜間に観測できる高度範囲は上部中間圏などの一部に限られる。大気の熱放射の信号強度は太陽高度に関わらないので、昼夜でほぼ一様な精度での観測が可能である。

- 酸素原子の基底状態の輝線は 2.06 THz と 4.74 THz だけであり、直接、酸素原子を観測できるのはこのいずれかの周波数である。これらのラインはこれまでスペースシャトルからのグレーティング分光計によるなど限られた観測しかなかったが、風の推定もできる精度で観測できるほどの感度を持つ HEB ミキサの受信機が現在では利用できるようになった。

日変化を観測するため、衛星は太陽非同期の軌道をとる。SMILES-2では高度 550 km、軌道傾斜角 66 度の円軌道を想定している。この軌道では、地球に対して約 3 か月で軌道面が 1 周するので、1.5 ~ 3 か月の観測を使うことで日周変化を得ることができ、観測緯度範囲についても、リム観測では観測する大気が衛星から 2,500 km 程度離れているために観測対象は約 80 度の高緯度まで達することができる。

SMILES-2による風・温度・化学物質濃度の観測性能をシミュレーションにより評価している [18] [19]。高度約 100 km から上空の風は酸素原子ラインのドップラーシフトから求められるが、SMILES-2の観測条件での観測精度は 5 ~ 20 m/s 程度と見積もられる。SMILES-2の想定される軌道では 1 日に同じ緯度帯を 15 回観測することができるので、1 日分の観測を平均すれば 1.3 ~ 5 m/s 程度の精度が期待され、MLT での風の日周変化の振幅 30 m/s 程度に対して十分な精度の観測になるはずである。仮に、2 THz の受信機に超伝導素子ではない Schottky ダイオードのミキサを利用すると観測精度は一桁低いと想定されるので、1 日の平均でも風観測精度は 13 ~ 50 m/s と日周変化がやっと検出できる程度の精度になり、大気上下結合の研究に用いるのは困難と予想される。

#### 4.2 科学目標達成に必要な衛星観測の条件

SMILES-2衛星として図 2 に示すような構成を提案している。SMILES-2 ミッション機器としてのサブミリ波リムサウンドと、その他に電子密度等を測定する小規模な追加ミッションを載せた単独衛星である。サブミリ波リムサウンドは、大気リム観測を行うサブミリ波受信機であるが、4 K に冷却した超伝導ミキサを載せた極低温冷凍機のクライオスタットを中心に、2つの開口径 75 cm のアンテナといくつかのエレクトロニクスから構成される。図 2 ではサブミリ波受信機のブロック図とその他の機器についてのサブシステムレベルの構成図を示している。超伝導ミキサには、SMILES で実績のある 638 GHz 帯の SIS ミキサ、763 GHz 帯は ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) の技術を利用した SIS ミキサを

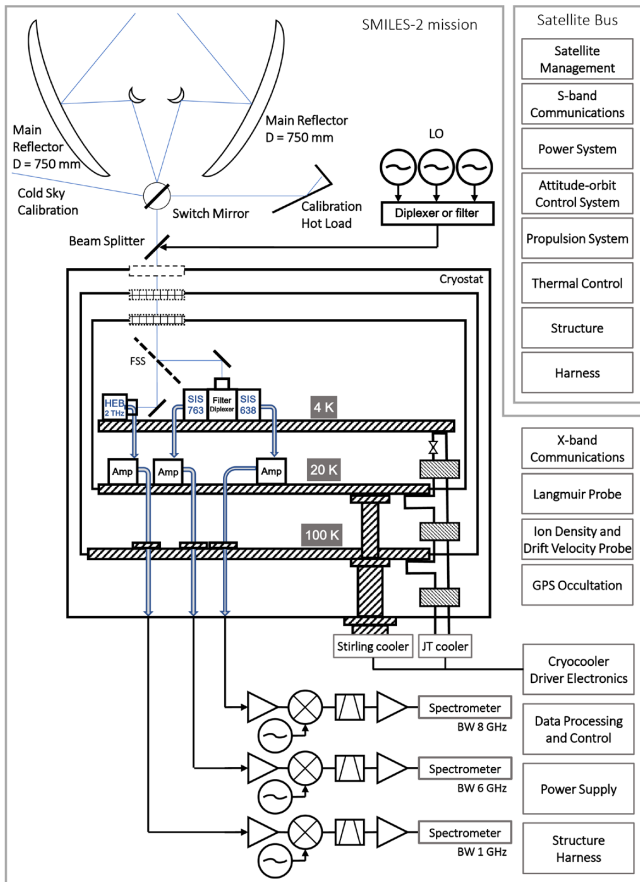


図2 SMILES-2のブロック図。4 Kに冷却するステージの上に638 GHz帯、763 GHz帯のSISミキサと、2 THz帯のHEBミキサを搭載する。

使用する[20]。2 THz帯にはNICT等で開発しているHEB (hot-electron bolometer) ミキサを使用する予定である[21]。638 GHz帯、763 GHz帯、2 THz帯の受信機を同時に使用する構成になっていて、アンテナで集光した大気からの信号は、ローカル信号(LO)を一定の割合(5%程度など)で加えた後、クライオスタットの中でフィルタによりそれぞれの周波数帯のミキサに振り分けられる。ミキサにはそれぞれ分光計等のバックエンドが接続される。638 GHz帯、763 GHz帯、2 THz帯に輝線をもつ主な分子等に、それぞれ、オゾン、水蒸気、酸素原子があり、さらにその他にも20種類程度の分子等の輝線がある。風、温度はいずれの分子等の観測からも導出できるが、成層圏から下部熱圏の間どの高度でも精度良く測ることができるように対象の分子とその輝線を選んだ結果、これら3つの周波数帯が選択された。

SMILES-2衛星の外観は図3のようなものを想定している。衛星の総重量は約520 Kg、高さ約3.2 mである。この重量、大きさは、JAXAの強化型イプシロンロケットで550 km、傾斜角66度の軌道へ打ち上げが可能な範囲に入っている。衛星は図の衛星進行方向(2方向)のどちらかに進み、アンテナのビームは、斜め前と斜め後ろの2方向に向けられる。SMILES-2

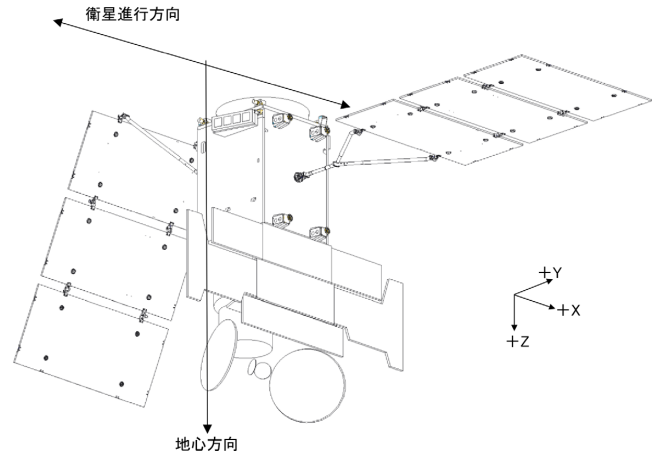


図3 SMILES-2衛星の外観。2つの75 cm開口径のアンテナを持つ。リム観測方向の面には大型の放熱板を設け、この面には太陽光を当てない姿勢を取るよう運用する。

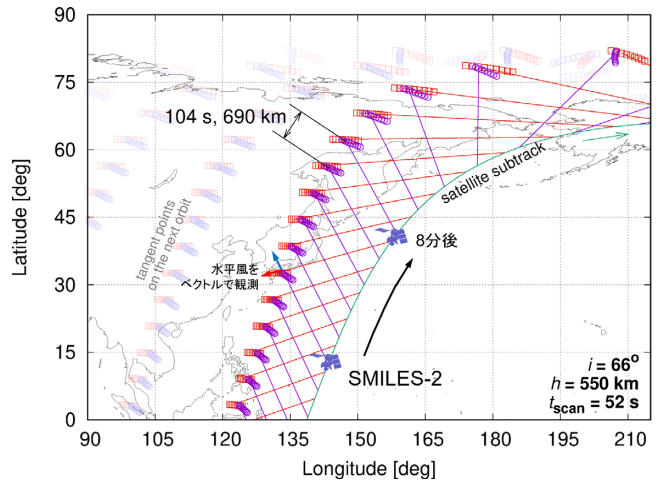


図4 SMILES-2の軌道とリムを観測する大気の水平位置の関係の概念図。

が取る軌道では、軌道面に対する太陽の高度( $\beta$ 角)は、 $-90$ 度から $+90$ 度の全ての範囲を取り得るので、 $+Y$ 面に太陽光が当たらないように、軌道面に対する太陽の方向によって、 $+X$ または $-X$ のどちらかを衛星進行方向にするか選択し姿勢を決定する運用を行う。大気リムの高度スキャンは $0 \sim 200$  kmの範囲を、衛星の姿勢をX軸の周りに約7度の幅で回転することにより行う。下から上へのスキャン時に斜め前方向を観測し、上から下へのスキャン時に斜め後ろ方向を観測することを約2分弱の周期で繰り返すことで、図4のように同じ大気を数分おいて観測し、水平風のベクトル成分を得られるようにする。

## 5 SMILES-2衛星の技術的課題

超伝導受信機はSMILESにより宇宙実証されてきた技術だが、より良い観測を実現するために低雑音化や周波数特性の改善などの開発が必要である。特に2 THzのHEB受信機は世界的にも使用されている例

が少なく、低雑音化、低電力のLOでの動作、ビーム特性の改善などの開発課題がある。さらに、SMILES-2のHEB受信機に他の天体の観測や、638 GHz帯、763 GHz帯の冗長としての利用の可能性を考えれば中間周波(IF)帯域の拡大も重要な開発課題になる。また、638 GHz帯、763 GHz帯のSIS受信機においても、低雑音化、広IF帯域での周波数特性の平坦化は観測性能の向上に不可欠である。冷却ステージへの熱流入を減らすように冷却ステージ上でサブミリ波周波数を分離する(図2)ためのフィルタも開発が必要である。これらについてNICTでは、国立天文台やJAXAと協力しながら開発を進めている。

SMILES-2衛星の実現可能性を大きく左右するのは、そのコストがどれだけ低く抑えられるかと、もうひとつは衛星の電力収支を成立させられるかという点である。SMILES-2はISASの公募型小型計画のミッションに提案したが、その審査で受けた指摘にもこの2点が含まれている。衛星の電力収支の課題について、以下詳述する。

ISASの公募型小型計画のミッションでは、小型科学衛星の標準バスを利用するのが標準となっている。衛星バスはそれに限られないが、コストの点からそれより大型のものは考えにくい状況にある。小型科学衛星標準バスでは、日照時に供給できる最大電力が1,000～1,200 Wに限られる。SMILES-2衛星の軌道では太陽は-Yの半球のいずれの方向も取り得るので、太陽電池パドルは太陽方向に対して常に最適な向きになるわけではなく少し大きなものが必要になるが最大電力は変わらない。軌道周期約96分のうち衛星が地球の陰に入って太陽光が当たらない時間の割合、日陰率は、太陽に対する軌道面の向きによって変わりSMILES-2衛星の場合最大で37.2%に達する。日陰時の消費電力を日照時の充電で賄うとすれば、バスで必要な電力を差し引いて、ミッション部が常時消費できる電力は200～323 Wである。

SMILES-2ミッション部で消費電力の大きいものは冷凍機である。超伝導ミキサに必要な4 K級の機械式冷凍機ではジュールトムソン(JT)冷凍機が、効率が良いと言われている。SMILES-2の冷凍機には、SMILESやASTRO-H(ひとみ)/SXSに使われた4 KのJT冷凍機を使用する予定である。ISSのJEM(きぼう)に搭載されたSMILESの冷凍機は、宇宙で6,088時間運用した後、JEMの循環冷却系のトラブルで運用を中断し、その回復後再冷却を試みたが4 Kに到達できなかった[22]。4 Kに到達しなかった原因は不純ガス(CO<sub>2</sub>)がJT流路で固化したことによると推定されていて、ASTRO-HのJT冷凍機ではアウトガスの軽減対策等がなされた。地上試験ではJT冷凍機の

4年以上の運転実績が示されている[23]。

SMILESでは、JT冷凍機とその予冷とシールド(20 K、100 Kの冷却増幅器を含む)冷却のための2段スターリング冷凍機の組合せで、消費電力は地上試験時に約153 Wであった。機械式冷凍機では運転時間の経過に従って効率が低下するので、それを補償するように入力電力を増大する運用が行われるので、長期間運用する場合に必要な消費電力は運用初期よりも2～3割大きくなる。SMILES-2の冷凍機では、SMILESの冷凍機と同程度かそれ以下の消費電力であることが要求される。SMILES-2では少なくとも3年の寿命が必要であるが、SMILES-2の電力収支が成立するには、3年運用後の消費電力がSMILESの初期の消費電力程度である必要がある。SMILESとSMILES-2の冷却受信機を比較すると、超伝導ミキサの数は2から3に増え、20 K冷却ステージに載せる冷却増幅器の数も2から3に増えているが、冷却増幅器の発熱を小さくし、外槽温度(環境温度)をSMILESの24℃よりも低い温度にするなどにより、消費電力を小さくすることを目指している。2段スターリング冷凍機の負担を減らし予冷温度を下げることでJT冷凍機の高効率化につながることで[22]、100 Kシールドの表面積を小さくし外槽からの流入熱を減らすために、4 K冷却ステージに載せる冷却受信機の容積を小さくすることも必要であり、638 GHz帯、763 GHz帯をひとつの広帯域ホーンで受信して周波数分離する回路を使用し小型化する開発も行っている[24]。NICTでは、冷却受信機の開発とともに、冷凍機を低消費電力で運用することのできるSMILES-2ミッションのシステム構成について検討を進めている。

## 6 むすび

SMILES-2は中層大気と下部熱圏の、温度、風、密度、水蒸気、オゾン、その他多種類の微量成分を、高い高度分解能(2.5 km程度)で測ることができる。軌道傾斜角66度程度の太陽非同期軌道の衛星に搭載することで、約80度の高緯度までの大気について1.5～3か月の観測で日周変化も観測することができる。この観測により大気の上下結合に関する統合的な理解が進み大気科学の発展に大きく貢献すると期待される。また、それが大気モデルの精度向上に寄与し気象予報や気候の将来予測を改善することも期待され、一方、惑星大気への理解への貢献も期待される。

SMILES-2はJAXA/ISASの公募する公募型小型計画のミッションとして提案したが、プリプロジェクト候補に選定されなかった。その理由は、衛星の電力収支が成立する見通しが得られていないことと、推算し

た計画全体のコストが高いことによる。NICT では、SMILES-2 の主要な機器である冷却受信機に関する開発を進めるとともに、電力収支を成立させコストを削減することを目的として、冷却受信機の設計、ミッションシステム的设计について検討を行っている。今年度それらの検討をまとめ、次の JAXA/ISAS の公募に再び応募する SMILES-2 の提案書に反映される予定である。

## 謝辞

SMILES-2 は、京都大学の塩谷雅人教授を PI とする SMILES-2 ワーキンググループにより検討が進められており、本稿の内容はワーキンググループによる検討結果を参考としている。SMILES-2 のシステム検討の一部は JAXA の宇宙理学委員会戦略的開発研究費により実施した。

### 【参考文献】

- 1 A. Witze, "World's first wind-mapping satellite set to launch," *Nature*, 560 (7719), pp.420-421, 2018.
- 2 C. R. Englert, et al., "Michelson Interferometer for Global High-Resolution Thermospheric Imaging (MIGHTI): Instrument Design and Calibration," *Space Science Review*, 212 (1-2), pp.553-584, 2017.
- 3 Y. Kawatani, et al., "Representation of the tropical stratospheric zonal wind in global atmospheric reanalyses," *Atmos. Chem. Phys.*, 16, pp.6681-6699, 2016.
- 4 M. P. Baldwin, et al., "The quasi-biennial oscillation," *Rev. Geophys.*, 39 (2), pp.179-229, 2001.
- 5 O. P. Tripathi, et al., "The predictability of the extratropical stratosphere on monthly time-scales and its impact on the skill of tropospheric forecasts," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 141, pp.987-1003, 2015.
- 6 J. McCormack, et al., "Comparison of mesospheric winds from a high-altitude meteorological analysis system and meteor radar observations during the boreal winters of 2009-2010 and 2012-2013," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, 154, pp.132-166, 2017.
- 7 Y. Miyoshi, et al., "Impacts of sudden stratospheric warming on general circulation of the thermosphere," *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 120, pp.10897-10912, 2015.
- 8 D. Murtagh, et al., "An overview of the Odin atmospheric mission," *Can. J. Phys.*, 80 (4), pp.309-319, 2002.
- 9 M. J. Schwartz, et al., "Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements," *J. Geophys. Res.*, 113, D15S11, 2008.
- 10 E. E. Remsberg, et al., "Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER," *J. Geophys. Res.*, 113, D17101, 2008.
- 11 K. Kikuchi and Y. Fujii, "Flight Model Performance of 640-GHz Superconductor-Insulator-Superconductor Mixers for JEM/SMILES Mission," *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, 31 (10), pp.1205-1211, 2010.
- 12 S. Ochiai, et al., "Receiver Performance of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) on the International Space Station," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51 (7), pp.3791-3802, 2013.
- 13 T. Sakazaki, et al., "Diurnal ozone variations in the stratosphere revealed in observations from the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) on board the International Space Station (ISS)," *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, pp. 2991-3006, 2013.
- 14 D. L. Wu, et al., "Mesospheric doppler wind measurements from Aura Microwave Limb Sounder (MLS)," *Advances in Space Res.*, 42 (7), pp. 1246-1252, 2008.
- 15 P. Baron, et al., "Observation of horizontal winds in the middle-atmo-

sphere between 30S and 55N during the northern winter 2009-2010," *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (13), pp.6049-6064, 2013.

- 16 P. Baron, et al., "Simulation study for the stratospheric inferred winds (SIW) sub-millimeter limb sounder," *Atmos. Meas. Tech.*, 11 (7), pp.4545-4566, 2018.
- 17 D. Murtagh, "Mm and sub-mm spectroscopy in atmospheric science," *Proc. Int. Symp. Space THz Tech.*, 2019, in preparation.
- 18 S. Ochiai, et al., "SMILES-2 mission for temperature, wind, and composition in the whole atmosphere," *SOLA*, 13A, pp.13-18, 2017.
- 19 P. Baron, "AMATERAS (テラヘルツ大気放射伝達モデル) の新機能: SIW と SMILES-2 ミッションのための GPU による多偏波放射伝達計算の高速化," *情報通信研究機構研究報告, 本特集号*, 4-5, pp.107-116, 2019.
- 20 Y. Fujii, et al., "The First Six ALMA Band 10 Receivers," *IEEE Trans. THz Sci. Tech.*, 3 (1), pp.39-49, 2013.
- 21 入交, 川上, 落合, "テラヘルツ波高感度ヘテロダイン受信機の開発," *情報通信研究機構研究報告, 本特集号*, 4-4, pp.93-105, 2019.
- 22 榎崎, "日本の宇宙用小型冷凍機の開発について," *低温工学*, 53 (6), pp.355-362, 2018.
- 23 K. Narasaki, et al., "Lifetime Test and Heritage On-Orbit of SHI Coolers for Space Use," *Cryocoolers*, 19, pp.613-622, 2016.
- 24 長谷川, 他, "SMILES-2 630/770 GHz SIS 受信機のための統合導波管回路の開発," *日本天文学会 2018 年度春季年会*, V117a, 2018.



落合 啓 (おちあい さとし)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
総括研究員  
博士 (工学)  
マイクロ波リモートセンシング