# 2 宇宙からの地球環境計測技術

2 Satellite-borne Measurement Technologies

## 2-1 国際宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波 リム放射サウンダ(JEM/SMILES)の開発

## 2-1 Development of Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (JEM/SMILES) aboard the International Space Station

真鍋武嗣

MANABE Takeshi

## 要旨

成層圏におけるオゾン層破壊が深刻な環境問題となっている。この成層圏におけるオゾン破壊の大気 化学反応過程において、成層圏中に存在する塩素酸化物(CIOx)や臭素酸化物(BrOx)等は成層圏大気中で の存在量がppbのオーダーであるにも関わらず、それらが関与する触媒反応によりオゾンの破壊に非常 に重要な役割を果たしていることが知られている。通信総合研究所は宇宙開発事業団と共同で、成層圏 中のオゾン及びオゾン層破壊に関与する微量成分分子の地球規模での3次元的な分布をマッピングするた めのセンサーとして、超伝導サブミリ波放射サウンダ(JEM/SMILES)を国際宇宙ステーション日本実験 棟 (JEM)曝露部に搭載すべく開発を進めている。本稿ではJEM/SMILES プロジェクトの搭載システムの 概要について述べる。

In recent years, stratospheric ozone depletion is one of the most significant global environmental issues. It is well known that stratospheric trace gases, which include chlorine oxides and bromine oxides, play a crucial role in the process of stratospheric ozone destruction. Although the abundances of these trace gases are as low as in the order of parts par billion or less, they are quite efficient to destroy stratospheric ozone by catalytic reactions. In order to establish the techniques to monitor stratospheric Ozone and Ozone depleting molecules, CRL and NASDA are collaborating to develop Superconducting Submillimeter-Limb Emission Sounder (JEM/SMILES) to be aboard the Japanese Experiment Module (JEM) of the International Space Station. In this paper, the outline of the JEM/SMILS project and the payload instrument is introduced.

[キーワード]

サブミリ波,オゾン破壊,リム放射サウンディング,国際宇宙ステーション,大気のリモートセンシ ング

Submillimeter wave, Ozone depletion, Limb-emission sounding, International Space Station, Remote sensing of atmosphere

9\_9

## 1 はじめに

近年、人類の活動に起因する地球規模の環境 破壊が深刻な社会問題となっている。とくに、 成層圏のオゾン層破壊や地球温暖化及びこれら と結びついた気候変動には、対流圏上部から成 層圏にかけて存在する微量成分気体の化学反応 過程と大気力学過程が密接に関与していること が知られているが、その詳細については未解明 な点が多い。このため、オゾン層破壊等の機構 を解明しこのような環境問題に適切に対処する ためには、中層大気中でのこれらの微量気体成 分の化学反応過程の研究や、地球規模での大気 の力学過程とこれら気体成分の化学反応過程の 間の相互作用等を明らかにするための研究が重 要である。

このようなオゾン層破壊に関与する微量気体 成分の監視や反応プロセスの研究解明のために、 対流圏上部から成層圏にかけての大気中におけ るこれらの微量気体成分の3次元的分布とその変 動を全地球規模で観測することが要求されてい る。しかしながら、成層圏大気中のこれらの微 量成分気体の量は体積比で数百万分の一(ppmv) から数十億分の一(ppbv)程度以下と極めて微量 であるため、全地球規模で定量的に観測するこ とはこれまで非常に困難であった。

このような目的にかなった観測手段として、 これらの微量成分気体分子が放射する極微弱な サブミリ波帯電磁波を、軌道上を周回する衛星 等のプラットフォームに搭載した高感度な受信 機により分光観測する、サブミリ波リム放射分 光計が近年有力視されている[1]。しかしながら、 宇宙からのサブミリ波帯におけるこのような観 測技術を実用化するためには、宇宙搭載用の高 感度・低雑音サブミリ波受信技術やそれを実現 するための宇宙搭載用の超伝導及び極低温技術 などの克服すべき技術課題が多い。

そこで通信総合研究所は宇宙開発事業団と共同で、これら宇宙からのサブミリ波帯による中 層大気観測技術の軌道上における実証を目的と して、国際宇宙ステーションの日本実験棟 (Japanese Experiment Module: JEM)「きぼう」 の曝露部を利用した、超伝導サブミリ波リム放 射サウンダ (superconducting submillimeter-wave limb-emission sounder: JEM/SMILES)を使用し た成層圏微量成分気体の観測実験を宇宙開発委 員会に提案した。この提案は1997年に「新たな 宇宙利用の創出に向けた利用ミッションの実証」 にあたるテーマとして、JEM曝露部初期利用の4 ミッションの内の一つとして採択され、通信総 合研究所と宇宙開発事業団の共同で JEM/SMILESミッションチームを作り、2006年 頃予定の搭載を目指してシステムの開発に着手 した。本稿ではJEM/SMILESミッションの概要 とシステム開発について述べる。

## 2 ミッションの目的

成層圏オゾン層破壊は、塩素酸化物 (ClOx)、 窒素酸化物 (NOx)、水素酸化物 (HOx)、や臭素 酸化物 (BrOx) 等の関与した触媒反応によって引 き起こされることが知られている。これらのう ちClOxは工業生産物であるフロン(chlorofluorocarbon) に、BrOx は殺菌・薫蒸剤として用いら ている臭化メチルや、消火剤として用いられる ハロン (bromofluorocarbon) に由来し、特に後者 はClOxの関与した触媒反応を更に促進させるこ とによりオゾン破壊を促進させるといわれてい る[2]。フロンやハロンについては既に国際的な 議定書等によりその生産の廃止や削減、代替物 への移行等の規制措置がとられているが、臭化 メチルについては途上国の反対等によって依然 生産が続けられている[3]。また、フロンやハロ ンは化学的に非常に安定な物質であり、現時点 でその排出を全廃したとしても、これまでに大 気中に排出されたものが長期間にわたって大気 中に残留しオゾン層の破壊を続けるため、破壊 をくい止め復旧するためには今後数十年以上期 間が必要であるといわれている[2]。NOxやHOx は元々自然界にも存在しているが、これらも近 年の人類の活動によって急速に増加している[2]。 オゾン層破壊には、これらの物質が関与する大 気中での複雑な化学反応過程と大気動力学過程 が絡み合い複雑な様相を呈している。

このようなオゾン層破壊は、1980年代中頃に 南極上空で発見されて以来、南極のみならず北 極も含めた極域に発生するオゾンホールとして 最も顕著に現れているが、近年、極域以外の中 緯度地域においてもオゾン層破壊が着実に進行 しつつあることが分かっている。

IEM/SMILES は、オゾン層破壊や地球温暖化 に関連した大気化学過程及び大気動力学過程の 研究や解明のために、これらの微量分子の対流 圏上部から中間圏に至る範囲における3次元的分 布を、宇宙から全地球規模で高い空間分解能と 精度で定量的に観測する技術を確立し軌道上で 運用実証するとともに、これら微量成分気体の グローバルな3次元分布を提供することを目的と している。JEM/SMILESでは、この目的のため に、軌道上を周回するプラットフォームからこ れらの微量分子の放射する極微弱なサブミリ波 帯電波を高感度で分光検出する必要がある。そ のためには、超伝導エレクトロニクス技術の利 用による高感度サブミリ波受信技術とそれに必 要な宇宙用極低温冷凍機の開発が不可欠であり、 これら技術の宇宙での実証が JEM/SMILESの第 2の目的となっている。

## 3 JEM/SMILES システムの概要

大気微量成分気体分子にはサブミリ波帯にス ペクトル線を有しているものが多く、 JEM/SMILESは、これらの分子が放射する微弱 なサブミリ波帯熱放射を地球大気の接線方向か ら鋭い指向性のアンテナにより受信し分光放射 計測するリム放射サウンディング方式により、 高度分布を高い分解能で測定する。図1に国際宇 宙ステーションに搭載された JEM/SMILESによ るリム放射サウンディングの概念図を示す。



#### 3.1 SMILESの観測分子と観測周波数帯

観測周波数帯としては、限られた周波数帯の 中でできるだけ多くの分子を同時観測するとい う観点から、サブミリ波帯の中で640GHz帯の 624.32GHz - 626.32GHz \ge 649.12GHz - 650.32GHz の二つの周波数帯「それぞれ後述の下側波帯 (LSB) と上側波帯 (USB) に相当] を選んだ。後 述する分光系の帯域の制限から、下側波帯につ いては、624.32GHz - 625.52 (Band-A) 及び 625.12GHz - 626.32GHz (Band-B) の二つのオーバ ーラップするバンドに区分し、上側波帯の 649.12GHz - 650.32GHz (Band-C) と合わせて、そ れぞれ1.2 GHz幅の三つのバンドのうち、任意の 二つのバンドを同時観測できることとした。表1 に、JEM/SMILESの観測対象分子と観測スペク トル中心周波数を示す。高度20kmから60kmの 成層圏のオゾン層を構成するオゾン(O<sub>3</sub>)は、太 陽光に含まれる有害な紫外線を吸収することに より地上の生物を守っているため「地球の宇宙 服」に例えられるとともに、地表面や大気から の赤外放射を吸収することにより地球温暖化に も少なからぬ影響を与えていることが知られて いる。ClO、BrO、HO<sub>2</sub>等は成層圏大気中にppbv (体積混合比)のオーダ以下しか存在しないにも かかわらず、オゾン層破壊反応において触媒的 に作用するため、オゾン層破壊に決定的な影響 を及ぼす分子種である。HCIやHOCI、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、 HNO<sub>3</sub>等は貯留分子として上記の触媒分子種の消 滅及び発生源として、これらの触媒分子種の消 長に大きな役割を果たしている。SO<sub>2</sub>は火山噴火 により放出されるガスであり、成層圏中で水と 反応することによりエアロゾルを形成し、その 表面での不均一反応がオゾン破壊に大きく関与 しているといわれている[4]。

さらに、オゾンに関しては、ノーマル種のオ ゾン(16O<sub>3</sub>)のほか、16O<sup>18</sup>O<sup>16</sup>O、<sup>18</sup>O<sup>16</sup>O<sup>16</sup>O、<sup>17</sup>O<sup>16</sup>O<sup>16</sup>O、 16O<sup>17</sup>O<sup>16</sup>O 等のオゾン同位体の遷移周波数が、 SMILESの観測周波数帯に含まれている。成層圏 大気中のオゾンの同位体組成については自然同 位体比に比べて、質量数の大きい同位体の比率 が若干高いといういわゆる同位体偏重という未 解明の現象があることが知られている[5]。従来 の大気サンプルの質量分析では質量数が同一で 対称性の異なる同位体を分離して測定すること

表1 JEM/SMILESの観測	周波数バンドと観測対象分子の観測	スペクトル中心周波数
$\begin{array}{c} BAND \ A \ [\mathrm{GHz}] \\ 624.32 \ \mathrm{GHz} - 625.52 \ \mathrm{GHz} \end{array}$	$\begin{array}{c} BAND B  [\mathrm{GHz}] \\ 625.12  \mathrm{GHz} - 626.32  \mathrm{GHz} \end{array}$	$\begin{array}{c} BAND \ C \ [\mathrm{GHz}] \\ 649.12 \ \mathrm{GHz} - 650.32 \ \mathrm{GHz} \end{array}$
$\begin{array}{ccccc} HNO_3 & 624.48, 624.78 \\ {}^{81}BrO & 624.77 \\ O^{18}OO & 624.83 \\ ClONO_2 & 624.83 \\ H_2O_2 & 625.04 \\ O_3 & (v_3) & 625.05 \\ HO^{35}Cl & 625.07 \\ {}^{18}OOO & 625.09 \\ O_3 & (v_2) & 625.28, 625.32 \\ SO_2 & 624.89 \\ \end{array}$	$\begin{array}{cccc} O_3 \ (v_2) & 625.28, \ 625.32 \\ HNO_3 & 625.34 \\ O_3 & 625.37 \\ ^{18}OOO & 625.39, \ 625.56 \\ O_3 \ (v_2) & 625.61, \ 625.79 \\ HO_2 & 625.66 \\ O_3 \ (v_3) & 625.80 \\ O^{17}OO & 625.87, \ 625.09, \ 625.20 \\ H^{35}Cl & 625.92 \\ SO_2 & 625.84, \ 626.17 \end{array}$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

ができなかったが、質量数が同じでも対称性が 異なると遷移周波数が異なるため、SMILESによ るスペクトル観測ではこれらの対称性の異なる オゾン同位体を区別して測定することができる 可能性がある<sup>[6]</sup>。このようなオゾン同位体偏重 に関する詳細な知見が得られれば、下部成層圈 と上部対流圏の間のオゾンの輸送に関して定量 的な評価ができる可能性があると期待されてい る。

#### 3.2 リム放射サウンディング

地球大気の科学研究においては、これらの分 子種の存在量を、高度分布とその時間的変化と して、地域ごとに、全地球的に測定することが 期待されている。この要求に応えるためには、 これらの分子から熱的に放射されているサブミ リ波帯電磁波を、地球を周回するプラットフォ ームから観測するのが有効である。この手法で は、分子からの熱放射を観測するため、太陽等 を背景とした吸収観測に比べて、周回軌道上の 位置や太陽の有無に依存しない。そのため、昼 夜や地域によらず観測でき、地域ごとの日周変 動等を観測できるという利点を有している。

他方、表1に示した分子種のうち、オゾン以外 はいずれも、10ppbv程度以下の極微量成分であ り、そのサブミリ波熱放射の強度も極めて弱い。 しかも周回プラットフォームからの観測では、 一地点に留まることができないため、観測積分 時間を無制限に長くすることにより受信感度を 高めるという手法をとることができない。そこ で、JEM/SMILESでは、図2のように、地球の 周縁を接線方向から観測するリム放射サウンデ ィング法により信号強度を稼いでいる[1]。高度 400kmの軌道上から成層圏大気層の接線方向に 垂直ビーム幅約0.08度という鋭いアンテナビーム を指向させ視線上に分布する分子の総量を増や し信号強度を強めるとともに、このアンテナビ ームを53秒周期で走査することにより、接線高



度を10kmから60kmの範囲で4km~3.5kmという高い高度分解能での観測を実現できる。

実際には、図2から分かるように、大気層が地 球表面に沿って球面的に成層しているために受 信信号には視線上にある接線高度以上の高度の 分子からの寄与が積分されて観測される。そこ で、接線高度を走査することにより得られるス ペクトルの圧力拡がりの変化に関する情報を含 んだデータから、逆変換法 (retrieval method)[7] を用いることにより各分子種の高度分布を求め る。図3に、JEM/SMILESで観測が想定される リム放射スペクトルを計算機シミュレーション によって求めた結果の一例を示す。

#### 3.3 超伝導サブミリ波受信機 [8] [9]

図3から分かるようにJEM/SMILESにおいて 微量分子を観測するためには受信機の検出感度 を0.5 K程度にまで高くする必要があり、検出等 価雑音帯域幅2.5MHz、観測積分時間を0.5秒程度 とした場合、受信機のシステム雑音温度は600K 程度以下に抑える必要がある。サブミリ波帯低 雑音受信技術については、電波天文分野等にお ける近年の著しい進歩により、極低温(約4K)で 動作する超伝導トンネル接合を用いたSIS(superconductor-insulator-superconductor)ミキサが地 上の電波天文台等で広く使われているが、いま だに宇宙の軌道上で使用された実績はない。

JEM/SMILESでは、世界に先駆けて超伝導技術を利用したSISミキサを宇宙軌道上のプラット

フォームに搭載し、宇宙からの成層圏微量成分 気体分子の高感度なヘテロダイン分光観測を実 現する事を目指している。SISミキサとしては、 国立天文台野辺山宇宙電波観測所の協力により 開発されたPCTJ型のSISミキサ(9)を用いる。ま た IEM/SMILES の開発では、この SIS ミキサを 4.5Kという極低温で動作させるために必要な、 宇宙用の小型クライオスタットと機械式冷凍機 の開発を進めている。機械式冷凍機は液体ヘリ ウム冷却方式に比べて小型軽量化が可能であり、 かつ宇宙での長期運用に適している。 IEM/SMILESでは、2段式スターリング冷凍機 とジュール・トムソン回路を組み合わせた宇宙 用冷凍機により、宇宙用クライオスタットの中 で4.5Kの極低温を実現する。このSMILES 搭載 用クライオスタット及び冷凍機については、既 に試作モデルによる振動試験及び長期連続運転 試験により、打上げ環境に耐え、かつ1年以上の 長期間にわたって所望の冷却性能を実現できる ことを確認している[10]。4.5K レベルの機械式冷 凍機の宇宙での運用は世界でも初めての試みで あり、これが成功すれば、今後の宇宙でのサブ ミリ波や赤外での観測に大きなインパクトを与 えるものと考えられる。

#### 3.4 SMILESの観測緯度カバレージ

国際宇宙ステーションは平均高度420kmの円 軌道を周回し、その軌道傾斜角は51.6度である。 このため、アンテナを進行方向に向けた場合、



南北51.6度の緯度範囲が観測範囲となる。しかし これでは極域のオゾン層観測には緯度が低すぎ る。そこで、アンテナを進行方向から45度北側 に向けることにより、北緯65度から南緯38度の 範囲を観測する。これにより、オゾン破壊が活 発であるといわれている極渦周縁部の観測が期 待できる。アンテナの偏向角を45度より大きく すれば高緯度観測領域は若干増大するが、ステ ーションの両側には巨大な太陽電池パドルが回 転しており、IEM曝露部からの観測視線方向と の干渉が起こり、データ欠測時間が急激に増加 する。アンテナ偏向角45度の場合でも、平均 5%、最大10%程度の欠測期間が想定されるが、 この程度の欠測はサイエンスチームからは許容 できるものとされている。このほか、アンテナ 視線方向に太陽が入る場合にも、受信機の保護 のために欠測を生じるが、これは地方時の朝方 に集中し、最大2%程度である。図4に、ISSの軌 道(青線)とSMILEが観測する大気接線高度の地 上射影(赤い線分)を示す。各赤い線分がアンテ ナの10km~60kmの一走 <br />
本による 観測に <br />
対応し ている。

このほか国際宇宙ステーションに固有な問題 として、姿勢変動の問題がある。国際宇宙ステ ーションでは、微少重力(microgravity)実験が重 要なミッションとなっているため、通常の運用 期間はスラスタ噴射等による積極的な高度・姿勢の制御を行わないことになっている。その上、 巨大な太陽電池パドルの回転による姿勢変動も 予想され、最大、±40km程度の軌道高度変動 と、±15~20度程度の姿勢変動が想定されてい る。このため、JEM/SMILES独自で恒星センサ ーを装備し、0.02度程度以下の精度でアンテナ指 向方向を決定する必要がある。

## 4 JEM/SMILESの基本仕様と構成

SMILESペイロードの概観図を図5に、システ ムのブロック図と信号の流れを図6に示す。アン テナ系(ANT)、常温光学系(AOPT)、冷却受信 機系(CRE)、冷凍機系(HECP、SJTD)、中間周 波数帯変換増幅系(IFA)、電波分光系(AOS)、 データ処理・制御系(DPC)、電源系(EPS)、 JEM インタフェース部(JIF)、熱制御系(TCS)、 姿勢検出系(STT)等から構成され、図5に示す ように、高さ1m、幅0.8m、長さ1.85mのペイロ ード構体に収容されてJEM曝露部に取り付けら れる。

アンテナ系 (ANT) は、長径 (仰角方向) 40cm、 短径 (方位方向) 20cm の楕円オフセットパラボラ 主鏡と、副鏡、第3鏡及びアンテナ走査のための 駆動系、ビーム伝送系、受信機の常温較正のた







め雑音源との切替機構等から構成される。この アンテナ系が形成する仰角方向半値幅0.08度の楕 円ビームを53秒周期で走査することにより、接 線高度10kmから60kmの範囲をリムサウンディ ングする。

常温光学系(AOPT)では、アンテナで受信さ れた信号を準光学導波系によりクライオスタッ ト内の冷却受信機系に導く。その際、冷却受信

#### ● 特集 ● 地球環境計測特集

系でのヘテロダイン受信に備えて、信号にサブ ミリ波局部発信信号を注入し、SMILES 搭載用に 開発した新しいタイプの Martin-Puplett 型干渉計 [8]を用いた SSB フィルタにより上側波帯 (USB) と下側波帯 (LSB) に分離する、冷却受信系で二 つの側波帯の信号を同時に観測するために、上 側波帯及び下側波帯に分離された信号をそれぞ れ、クライオスタット内の絶対温度 4.5K に冷却 されたステージ上の2台の SIS ミキサでそれぞれ SSB検出し、11~13GHz帯の第1中間周波数帯 に変換したのち、20K ステージ及び100K ステー ジ上の2系列の低雑音冷却 HEMT 増幅器系列に よって増幅する。

成層圏大気からの1K以下の微弱な信号を検出 する超高感度なSISミキサ及び冷却HEMT 増幅 器から構成される冷却受信機系は、外部からの 電磁干渉に非常に敏感である。一方、国際宇宙 ステーションでは、SMILES 観測中間周波数帯付 近のマイクロ波帯の複数の周波数が通信等のた めに飛び交っている。SMILESでは宇宙ステーシ ョンのこの劣悪な電磁環境から冷却受信機系を 保護するために、冷却受信機系を収容するクラ イオスタットと常温光学系を一体としたシール ド構造とし、さらにアンテナビーム伝送系から 常温光学系へのサブミリ波ビーム導入口を 40GHz以下を遮断する円筒コルゲート導波管 (back-to-back horn)とすることにより、SMILES 外部の電磁環境に対して54dB以上の電磁シール ドを確保する。冷却受信系(CRE)を構成するク ライオスタット、冷凍機系、常温光学系(AOPT) 等から構成されるサブミリ波受信機系の概観の 模式図を図6、常温光学系のエンジニアリングモ デルを図7に示す。

中間周波数帯変換増幅系(IFA)では、後段の 分光計(AOS)の帯域幅が限られていることから、 LSBのBand-A、USBのBand-B、Band-Cの三つ の観測バンドをそれぞれ周波数変換器により 1.55GHz~2.75GHzの第2中間周波数帯に変換し





十分に電力増幅した後、観測モード応じて三つ の観測バンドのうちから二つの観測バンドをス イッチ回路により選択し、スペクトル解析のた めの音響光学型分光計(AOS)[11]へ導く。2台の AOSはそれぞれ、1.2GHzの分光帯域幅を有して おり、第2中間周波数帯の信号を、周波数分解能 1.8MHz、周波数チャネル間隔0.8MHz、等価雑音 帯域幅2.5MHzで分光して、リム放射スペクトル に対応した雑音スペクトルのディジタルデータ を出力する[11]。

## 5 SMILES による各分子の高度分 布観測能力

SMILESのシステム雑音温度を500Kとした場 合、観測対象分子の体積混合比がそれぞれどの ような高度範囲についてどの程度の誤差で測定 できるかを、北緯45度の標準的な大気モデルを 仮定してシミュレーションにより推定した結果 を図8に示す[11]。

オゾン及びHClについては、53秒周期の一回 の走査(1-scan)で5%以内の誤差で、ClOについ ても10%以内の誤差で主要部分の高度分布が測定 できることが分かる。一方、BrOやHO<sub>2</sub>などの 極微量成分についてはスペクトルの輝度温度が



オゾンやCIOに比べて低いため、SMILESの観測 感度をもってしても53秒周期の一回の走査で高 度分布を充分な精度で求めることは非常に困難 である。このような分子種については、5度緯度 範囲内で取得されたデータについて積分を行い 緯度帯における平均値(zonal mean)とすること により、空間的分解能を犠牲にして実効的に積 分時間を長くして検出感度を稼ぐという手法を 取らざるを得ない。図9より、これらの分子種に ついても、半日の5度緯度帯平均を取れば、有意 な高度範囲で誤差を50%以内に抑えることがで きるものと期待できる。



## 6 データ処理と利用

AOSから出力された大気からのリム放射スペ クトルのディジタルデータは、機器の状態等を 監視するハウスキーピングデータと併せて、デ ータ中継衛星 (DRTS)を介して筑波宇宙センター の地上運用システムに転送される。地上運用シ ステムにおいて SMILESのデータは、分離抽出 され SMILES地上データ処理システムに転送さ れる。SMILES地上データ処理システムに転送さ れる。SMILES地上データ処理システムでは、配 信された Raw データにデパケット処理、オーバ ーラップ処理、時系列編集等の Level 0処理を施 した後、工学値変換を施し、較正データを用い て輝度温度スペクトルデータ(Level 1データ)に 変換する。Level 2処理ではこのようにして得ら れた Level 1データに逆変換 (retrieval) アルゴリ ズムを施すことにより、各分子成分の高度分布

データを得る。これらのデータ処理アルゴリズ ム開発及びデータ解析と検証は、通信総合研究 所と宇宙開発事業団地球観測データ解析研究セ ンター(EORC)が、外部の研究機関や大学の研 究者からなるサイエンスチームと協力して遂行 する。またこれらの研究機関は、期間ごとの緯 度・経度で平均化したグリッドデータセットか らなるLevel 3データを作成する。さらに、Level 1以降のデータについては、海外の共同研究機関 であるドイツのブレーメン大学にも転送され、 そこで別途独自に開発されたアルゴリズムによ る解析が行われることも想定している。また、 Level 2及びLevel 3データについては、登録した ユーザに対して、インターネット上のWeb等か らアクセスできるようにする予定である。デー タ処理のフローを図8に示す。

## 7 終わりに

本稿では、JEM/SMILES ミッションとシステ ムの概要について述べた。ミッションプランの 詳細については文献<sup>[12]</sup>を参照されたい。

現在のスケジュールでは、JEM/SMILESは、 2006年頃に、種子島宇宙センターからH-II輸送 機(HTV)に格納されて打ち上げられ、JEM曝露 部に取り付けられる。観測期間は1年間を予定し ているが、SMILESに不具合がなく、後続のミッ ションの予定がすぐにない場合は、観測期間の 延長も可能である。ミッション終了後は、再び HTVに格納されて大気圏に投棄される予定であ る。

システムの開発に当たって、通信総合研究所 は、受信機常温光学系及び冷却受信機系を含む サブミリ波受信機サブシステム並びに中間周波 変換増幅系の開発を担当し、宇宙開発事業団は SISミキサ、冷却HEMT増幅器等の要素部品と、 アンテナ系、4K冷凍機系、中間周波数帯変換増 幅系、音響光学分光計の開発及び全システムの インテグレーションと試験を担当している。ま た、SISミキサの開発等については国立天文台野 辺山観測所、サブミリ波光学系の開発及び評価 試験にはスイスのベルン大学の協力を得ている。

また、センサシステムの開発チームのほかに、 大学や研究機関の大気科学研究者を中心とした サイエンスチームを編成し、システム開発に大 気科学者側からの要求を反映させるほか、観測 運用、アルゴリズム開発、実証実験の計画実行 支援を行うとともに、国際ワークショップの開 催、国際協力等を行うこととしている。

また、ドイツのブレーメン大学環境物理学研 究所は、国際共同研究機関として、独自アルゴ リズムの開発、独自施設による地上データ処理 の分担などを行う計画である。

以上で述べたように、JEM/SMILESには、こ れまで宇宙実績のない先端技術や新規開発技術 が多く、打ち上げまでの期間も短いため、今後 多くの困難も予想されるが、これらを一つひと つ克服してミッションを成功に導き、サブミリ 波領域における地球観測技術の確立と実用化へ 貢献していきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1 J. W. Waters, "Microwave Limb Sounding", in Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry, ed. by M. A. Janssen, Chap. 8, John Wiley and Sons, Inc., 1993.
- 2 World Meteorological Organization, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 44, Geneva, 1999.
- **3** United Nations Environmental Programme, The 1987 Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, as adjusted by the seventh Meeting of the Parties (Vienna, 5-7, Dec. 1995), available at http://www.unep.org/unep/secretar/
- 4 S. Solomon, S. Borrowmann, R. R. Garcia, R. Portmann, L. Thompson, L. R. Poole, D. Winker, and M. P. McCormick, "Heterogeneous chlorine chemistry in tropopause region", J. Geophys. Res., Vol. 102, pp. 21411-21429, 1997.
- 5 D. G. Johnson, K. W. Jucks, W. A. Traub, and K. V. Chance, "Isotope composition of stratospheric ozone",

J. Geophys. Res., Vol. 105, pp. 9025-9031, 2000.

- 6 K. Takahashi, T. Shirai, H. Ozeki, Y. Kasai, M. Shiotani, and SMILES Mission Team, "Observation of the stratospheric O<sub>3</sub> isotopes by SMILES", First International Symposium on Isotopomers (ISI2001), Yokohama, Japan, July 23-26, 2001.
- 7 C. D. Rodgers, "Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation", Rev. Geophys. Space Sci., Vol. 14, No. 4, pp. 609-624, Nov. 1976.
- 8 M. Seta, H. Masuko, T. Manabe, S. Ochiai, Y. Irimajiri, J. Inatani, H. Harada, T. Noguchi, S.-C. Shi, K. Narasaki, and Y. Abe, "Submillimeter-wave SIS receiver for JEM/SMILES", Adv. Space Res., Vol. 26, No. 6, pp. 1021-1024, 2000.
- 9 Y. Fujii, K. Kikuchi, J. Inatani, Y. Irimajiri, M. Seta, S. Ochiai, T. Manabe, H. Masuko, T. Noguchi, K. Narasaki, S. Tsunematsu, and T. Shirota, "Space-borne 640-GHz receiver based on 4-K mechanical cooler", Astronomical Telescopes and Instrumentation, Proc. SPIE, Vol. 4013, pp. 90-99, 2000.
- 10 J. Inatani, K. Narasaki, S. Tsunematsu, M. Kyoya, T. Manabe, M. Seta, T. Iida, and R. Satoh, "Mechanical cooler and cryostat for submillimeter SIS mixer receiver in space", Proc. SPIE, Vol. 4540, pp. 197-208, 2001.
- 11 H. Ozeki, Y. Kasai, S. Ochiai, S. Tsujimaru, J. Inatani, H. Masuko, C. Takahashi, L. Mazuray, and C. Rosolen, "Submillimeter wave spectroscopy performance of JEM/SMILES", SPIE's Second International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment and Space, Sendai, Japan, Oct. 9-12, 2000, Proc. SPIE, Vol. 4152, pp. 255-262, 2000.
- 12 SMILES Mission Team, JEM/SMILES Mission Plan, Committee for Earth Observation Systems, Earth Science and Technology Forum, February 2001. Available at http://www.crl.go.jp/dk/c214/smiles/Mission\_Plan/



## まなたけし

電磁波計測部門SMILES グループリ ーダー 工学博士 マイクロ波及びミリ波帯の電波伝搬並 びにリモートセンシング