サブミリ波による大気環境リモートセンシング 一 超伝導サブミリ波リムサウンダー SMILES がひらく 高感度観測 —

佐川英夫

New Era in the Atmospheric Remote Sensing by Using the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder, SMILES

Hideo SAGAWA

In the remote sensing of atmosphere, submillimeter/terahertz-wave has several advantages over other conventional optical and near-infrared wavelengths: such as the capability of resolving the spectral line shape of roto-vibrational transition of atmospheric molecules, and measuring the atmospheric emission without requiring a background sunlight emission. In this paper, we describe the effectiveness of submillimeter/terahertz-wave remote sensing of the atmosphere by means of introducing new observational results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES). SMILES is a passive atmospheric limb emission sounder onboard the International Space Station (ISS), and it has realized super high-sensitivity observations of stratospheric trace gases such as O_3 with its isotopomers, HCl, ClO, H O_2 , HOCl, H O_2 and BrO. Owing to the non-sun synchronous orbit of ISS, SMILES provides the monitoring capability in local time, which is essential information to understand the diurnal change on the stratospheric photochemistry.

Key words: submillimeter, remote sensing, atmosphere, limb sounder, SMILES

サブミリ波とは、一般的に、波長 100 mm~1 mm 帯の電磁波を指す(テラヘルツ波ともよばれる)。宇宙空間からの地球大気環境リモートセンシングにおいて、この領域はその検出技術の困難さから、長らく未開の波長域とされてきた。一方で、サブミリ波領域には、大気を構成する主要な微量成分の振動回転遷移が多数存在し、大気組成を観測するには最適の領域である。また、大気そのものからの放射を観測するために、背景光(太陽直達/散乱光)を必要とする紫外・可視や近赤外領域での観測と比較して、昼夜を問わない連続的観測が可能となるという気象学的独自性や有用性が見いだされる。

観測技術的な面に目を向けると、サブミリ波の受信信号は電波信号として取り扱うことができ、ヘテロダイン技術を利用した非常に高い周波数分解能 $(v/\Delta v > 10^6)$ が達成される。大気分子の吸収線スペクトルは、大気圧によって

広がった線幅をもつ. 分子スペクトルの形状をヘテロダイン技術による高い周波数分解能を利用して正確に測定すると,その圧力依存性から,観測視線内での異なる光学的深さにおける情報を解析的に抽出することが可能になる. これは,地球大気を鉛直方向に分解した観測を実現するのに非常に重要な点であり,サブミリ波/テラヘルツ帯を利用した大気リモートセンシングへの期待を大きく高めている要因のひとつとなっている.

1990年代に入り、サブミリ波検出技術の進展およびデバイスの改良によって、地球周回軌道からの地球大気サブミリ波放射観測が実現されるようになった。周回軌道から地球大気を観測する方式としては、衛星の直下方向を観測する方法と、地球大気の縁部分を見るリム観測の手法がある。静止気象衛星などは前者の方式をとり、サブミリ波へテロダイン測器は一般的に後者である。リム観測では、地

(独)情報通信研究機構(〒184-8795 小金井市貫井北 4-2-1) E-mail: sagawa@nict.go.jp

41 巻 1 号 (2012) **15** (15)

球大気中で長い視線長を確保することが可能となり、これは微量成分の観測に際して非常に大きな利点となる.

1991 年に打ち上げられた米国の上層大気観測科学衛星 UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) には 183 GHz 帯および 204 GHz 帯を含む大気リムサウンダー MLS (Microwave Limb Sounder) が搭載され、南極上空のオゾンホール生成関連微量成分の観測を行うなど、地球大気化学における新たな観測的知見を多数もたらしている¹⁾.この UARS/MLS の後継機として、640 GHz 帯および 2.5 THz 帯にも観測周波数を拡大した測器 ²⁾ が EOS-Aura 衛星で打ち上げられ(2004 年)、現在も観測継続中である。また、2001 年にはスウェーデン、フランス、カナダ等により共同開発された Sub-Millimetre Radiometer (SMR、119 GHz および 480~580 GHz 帯で観測)を搭載した Odin 衛星が打ち上げられている³⁾

こうしたサブミリ波観測の新たな扉を開いたのが、日本が国際宇宙ステーションに搭載した超伝導サブミリ波放射計 SMILES (Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder)である。SMILES は超伝導技術を応用することで、前述のAura/MLSやOdin/SMRに対して1桁以上高い測定感度を達成している。

本稿では、SMILESによってもたらされる地球大気成層 圏の精緻観測の結果を紹介し、現在新たな展開をみせてい るサブミリ波帯大気環境リモートセンシングへの期待を述 べる。

1. SMILES 測器および地球大気観測の概要

SMILES は宇宙航空研究開発機構(JAXA)と情報通信研究開発機構(NICT)によって共同開発された 4-K級機械式冷凍機をもつ高感度サブミリ波超伝導受信機である。 SMILES ミッションの目的は,(1)4-K級機械式冷凍機と超伝導技術の宇宙における技術実証,および(2)成層圏オゾン破壊化学に関連する大気微量物質の超高感度測定を実現することで成層圏大気化学の理解を推し進めることである。SMILES は,2009 年 9 月に国際宇宙ステーション(International Space Station, ISS)「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォームに搭載された(図1)。その後,10月12日から2010年4月21日までの約半年の間,宇宙からの地球大気のリム観測を実行した4)。

SMILES は鉛直方向 40 cm×水平方向 20 cm の楕円開口をもつオフセットカセグレン系で大気からの信号を集光する. 受信機部分は 624 GHz 帯と 649 GHz 帯の 2 つの超伝導 (superconductor-insulator-superconductor; SIS) ミキサーで構成される. 大気からのサブミリ波信号は, SIS ミキ



図1 ISS/JEM に搭載された SMILES (矢印部分) のイメージ図 (引用元: JAXA).

サーにおいて局部発振器からの信号(637.320 GHz)とともに 11~13 GHz の中間周波数信号に変換される。その後、さらなる周波数変換を経た後、1.55~2.75 GHz の周波数信号として音響光学型分光器(acousto-optical spectrometer; AOS)に出力される。最終的に取得される観測データは、AOS によって約 0.8~1.2 MHz の周波数分解能をもつ輝度温度スペクトルである。この観測スペクトルは、ベースラインにおけるリップルがほぼ存在しないという、きわめて良質なデータとなっている。

観測精度の目安となるシステム雑音温度は、冷却システムとSIS 受信機により 300~400 Kというきわめて低い値が実現された。Aura/MLS やOdin/SMRの感度と比較を行うと、SMILES と同じ受信方式に換算した場合でそれぞれ8000 K (MLS 640 GHz 帯受信機)と 3300 K (SMR 541~581 GHz 帯受信機)であり、SMILES とは依然 1 桁の差がある。この高感度は SMILES の運用期間を通じて安定したものであった。SMILES 測器のより詳細な説明は、Ochiaiらの論文50 などに述べられている。

SMILES は、ISS から地球大気のリム放射を観測する際に、測器の視線方向を変化させていくことで、対流圏から中間圏にかけての異なる接線高度での大気リムスペクトルを取得する。各接線高度で1つのスペクトルを観測する際の積算時間は約0.5秒であり、約30秒間をかけて接線高度0km以下から60km以上までのリム高度領域をスキャンしている。図2に、SMILESによる地球大気サブミリ波帯放射の観測例として、3つ存在するSMILES 観測バンドのうちバンドA(624.3~625.5 GHz)での観測スペクトルを示す。625.371 GHz に存在する O_3 や 624.9 GHz の H^{37} Cl といった強い分子スペクトル以外にも、 O_3 の同位体や HOCl、 H_2O_2 、BrO、 HNO_3 といった大気微量成分のシグナルが有意に観測されている。残りの観測バンド(B、C)では、それぞれ 625.1~626.3 GHz、649.1~650.3 GHz のスペクトルを観測しており、バンド A に含まれる分子以外では、

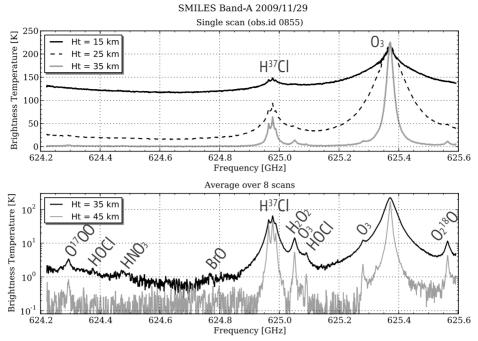


図2 SMILES によって観測された地球大気リム放射スペクトルの例. 接線高度 15, 25, 35, 45 km での観測スペクトルを示す. 上図は一度のリム走査 (シングルスキャン) で得られたスペクトルで、下図は連続した8スキャン分を平均したもの、観測されている分子種を併記した.

H³⁵Cl および HO₂や ClO などが高感度で測定されている.

SIS 受信機による高感度観測以外に、SMILES による大気観測の特徴として特記すべき点は、搭載された ISS が太陽非同期軌道をとっていることである。昼夜を問わない観測が可能なサブミリ波受信機ではあるが、Aura/MLS やOdin/SMR では搭載された衛星が太陽同期軌道を選択しているために、限られた現地時間(local time)でのデータしか取得されない。赤道域を例にみると、Aura/MLS が赤道上空を通過するのは常に午前/午後1時過ぎであり、Odin/SMR は午前/午後6時である。太陽非同期軌道をとる SMILES の場合、おおよそ2か月程度のデータを積算することで24時間の日変化を連続的に追う観測が(2か月分の季節変化も内包されてしまうものの)実現される。この特徴は、光化学が重要な役割を果たしている成層圏オゾン破壊化学を定量的に理解する上では不可欠な要素であり、SMILES の独自性を際立たせるものである。

2. 大気物理量の導出

SMILESで観測される大気放射の輝度温度スペクトルを 反転解析(リトリーバル解析)することによって、観測し た地点の気温構造や大気微量成分布を推定することが可能 となる。反転解析とは放射伝達方程式および観測測器の特 性を数値モデル化した forward model の逆問題を解くこと であるが、SMILES も他の一般的な大気リモートセンシン

グ測器同様に不良設定の逆問題(求めるべき物理量パラ メーターの数が観測から得られる独立した条件式の数よ りも大きい)となっており、適切な解を得るためには何 らかの最適化や正則化処理が必要となる。本稿で述べる SMILES データ解析では、解く物理量(微量成分混合比や 気温など) の先験値 (ア・プリオリ) 情報を観測データに 付け加え、観測量とア・プリオリ両方の制約から逆問題を 解く Optimal Estimation Method (OEM)^{6,7)} を使用してい る。OEM 以外の手法としては、解が滑らかとなるように 正則化行列を用いて制約を課す Tikhonov Regularization 8) や、情報エントロピーを最大にするような制約を設定する Maximum Entropy Method (MEM) などがある. 各手法 の詳細は本稿では省略するが、いずれも地球大気のリモー トセンシングで実績をもつアルゴリズムであり、各手法間 の長所短所の比較等は、例えば Eriksson の研究⁹⁾ などに みられる

SMILES 観測データのリトリーバル解析では,定常運用処理として JAXA が行っている解析(Level 2 データとよばれる) $^{10)}$ のほか,NICT が SMILES リトリーバルアルゴリズムの最適化等の研究を目的として開発を行っている Level 2-research(L2r)データ $^{11)}$ が存在する.本論文では L2r 解析によって得られた結果の一部を示す.

2.1 冬期極渦内でのオゾン破壊

図3は、SMILESによって観測された冬半球高度25km

41 巻 1 号 (2012) **17** (17)

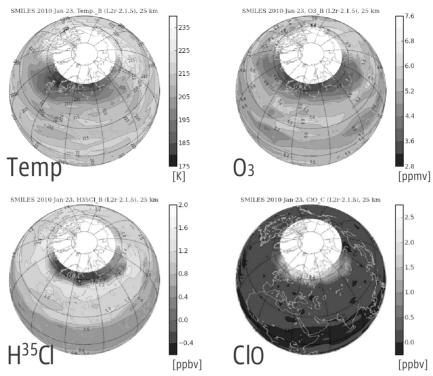


図3 2010年1月23日の観測データから導出された大気微量成分分布(L2r version 2.1 解析)。実際の観測で得られた離散的な空間分布に適当な補間・スムージングを施したデータをコンター表示している。極上空の空白は SMILES の観測データがない緯度域である。

における気温、 O_3 、 H^{35} Cl および ClO の空間分布(1 日分の観測データを利用)である。気温は O_3 吸収線の光学的に厚い周波数チャネルから導出されている。SMILES は ISS の軌道傾斜角の制限(51.6 度)ゆえに極域上空を完全に観測することはできないが、それでも極渦が SMILES 観測緯度域まで大きく発達した時期には、その観測データから極上空大気の挙動を探ることが可能である。図の例では、ヨーロッパ高緯度帯にかけて気温が大きく低下する極渦の一部を観測しており、それに対応する領域で O_3 、HCl の著しい減少と ClO の急増が起きていることがわかる。これは、極渦内の気温低下に伴い極成層圏雲(polar stratospheric cloud; PSC)が生成され、その表面不均質反応によって Cl のリザーバー分子である HCl がオゾン破壊物質である活性塩素 ClO_x に変換されていることを明瞭に示している。

Cl が塩素化合物(Cl_y)においてどのように分配(partitioning)されているかは,極域のみならず,中緯度帯においてもオゾン破壊化学を定量的に理解するためには不可欠な情報である。SMILES では, H^{35} Cl, H^{37} Cl,ClO,HOCl,さらには ClO_x 化学と密接な関係がある HO_2 を同時に観測しており,全球的な塩素化合物の分配に新たな観測的知見をもたらすと期待される.

2.2 HO₂高度分布の日変化

SMILES による大気微量成分日変化観測の例として、低 緯度帯における HO。高度分布の日変化を図4に示す。HO。 は成層圏大気化学において重要な役割を担う水酸化物 (HO_x)の主ラジカルのひとつであるが、その存在量の少 なさゆえに、これまでの観測例は限定されている。今回は 2010年1~2月の観測データを積算し、1時間ごとの平均 高度分布を時刻-高度のコンター図として表示した。この 図からは、昼夜でのHO2の振る舞いの変化が高度により 異なっていることがわかる。HO、は高度60km以上の中間 圏における H₂O の光解離によって生成されるが、上部成 層圏 (高度 ~50 km 以下) では、ClO_x、BrO_x や NO_x との 反応によって夜間になると大気から取り除かれる. 一方 で、上部中間圏 (高度80km付近)ではOHやOとの反応 が生じ、成層圏とは逆の傾向の日変化を示している。こう した SMILES による成層圏 / 中間圏大気成分の日変化の観 測結果は、中層大気光化学モデルの改良・検証に大きな役 割を果たすと考えられる.

3. 新たな観測成果へ

前章で示した観測事例は、いわばSMILESの主観測対象であり、現在、Level 2 プロダクトの改良や、その観測精

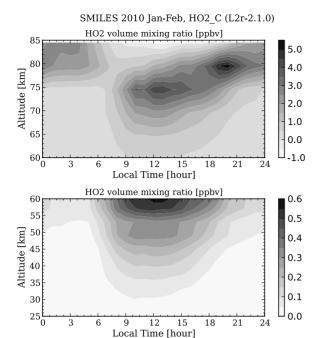


図 4 SMILES のバンド C (649.7 GHz) で観測されている HO_2 分布の日変化. HO_2 は鉛直方向に混合比が大きく変化するため、成層圏と中間圏を別々のコンターで示した.

度・確度の定量化(他の観測測器による測定結果との比較 検証など)といった詳細な解析が行われている最中であ る. さらには、SMILES の超高感度・太陽非同期観測の利 点を最大限に活用すべく、新しい科学ターゲットの研究も さかんに行われている。そのうちのひとつは、上部対流 圈·下部成層圈 (upper troposphere/lower stratosphere; UT/LS 領域) における水蒸気・氷雲分布の日変化の導出 である。UT/LS 領域の水蒸気や氷雲分布は、地球大気の 熱収支に強い影響を与える要素であると気候変動に関する 政府間パネル (IPCC) 評価報告書などでも指摘されてい るが, その観測的情報, 特に全球にわたる空間分布の観測 データはきわめて乏しい状況である. SMILES の観測周波 数帯域内部には H₂O の吸収線は含まれていない。しか し、観測帯域近傍である 556.9 GHz や 620.7 GHz に存在す る強い H₂O 吸収線の裾野が、SMILES 観測帯域における大 気の光学的厚みに影響を及ぼしている。また、氷雲(巻 雲) が観測視線中に存在した場合にも,観測スペクトル全 体の輝度温度に変化が現れる(図5). こうした連続波的な 影響は、O₃や他の微量成分のスペクトルを解析する際に はベースラインとして誤差要因となる厄介者ではあるが、 適切な解析を施すことで, 意味のある物理量(水蒸気濃度 や氷雲微物理量)を抽出することが可能である。SMILES データを利用した最新の研究では,大陸上空と海洋上空と で熱帯 UT/LS 領域の氷雲や水蒸気分布の日変化傾向に差 があるなどといった興味深い結果が得られつつある.

SMILES 2010 Mar 15, UTC 13:32:05, 173.8W, 15.2S (ScanId 908)

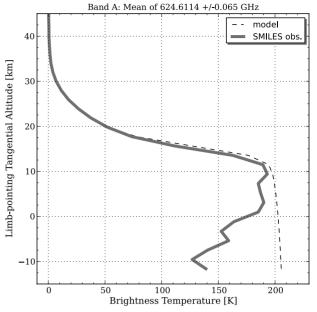


図5 SMILES によって観測された各接線高度におけるバンド A のベースライン (分子のラインがない周波数域) 輝度温度. 点線は氷雲を考慮しないフォワードモデルによる計算結果である. SMILES の観測周波数帯では対流圏が光学的に非常に厚くなるために, 観測接線高度が 15 km 付近よりも下方になると上部対流圏からの放射を観測するようになる (点線のプロットで輝度温度が 200 K でほぼ一定となっている). その際, 視線内に氷雲があると, その散乱効果によって輝度温度が低く観測されている (実線)

4. サブミリ波 / テラヘルツ波による大気観測の今後

本稿では、超伝導サブミリ波リムサウンダー SMILES の 観測データを通して、サブミリ波による地球大気リモート センシングの最前線を紹介した。不運にも SMILES は半年 間のみの運用となったが、その観測感度は、過去および現 行の他の同種測器よりも 1 桁以上高いレベルを達成してい る。サブミリ波観測の特性でもある大気微量成分の日変化 を連続的に追った観測によって、オゾン破壊化学をはじめ とする成層圏大気化学に深く迫ることが可能となった。

近年、次期サブミリ波地球観測ミッションとして、新たに氷雲の観測を主題とするものが複数提案されている(欧州 Earth Explorer 8 に提案された CloudIce ミッションなど)。これは、地球大気の氷雲を構成する雲粒のサイズが100~800 μm 程度であることから、氷雲がサブミリ波帯の光を強く散乱することに着目したものである。このサブミリ波帯氷雲観測は、従来の雲レーダーや可視赤外観測では観測が不十分であった領域を埋めるものであり、地球気候システムの理解に大きな進歩をもたらすであろう。

より広い科学分野に目を向けると、サブミリ波/テラヘルツ波による大気リモートセンシングは、地球以外の太陽系惑星の研究へも本格的に利用され始めている。SMILES

41 巻 1 号 (2012) **19** (19)

打ち上げの同年に打ち上げられた欧州のハーシェル宇宙天文台(ラグランジュ点から深宇宙を観測)にはサブミリ波帯SIS受信機HIFIが搭載されており,天文観測的成果はもとより,その高感度を生かした太陽系惑星の大気組成に関する新発見を次々ともたらしている。日本内外の将来の惑星探査計画においてもサブミリ波大気観測装置の搭載が検討されている状況であり(欧州の木星圏探査計画 JUICE,日本の火星探査計画 MELOS など),サブミリ波/テラヘルツ波による大気環境観測は,今後の受信機素子技術のさらなる進歩とともに,より大きな科学的展開が期待されている。

本稿の執筆に際しては、NICTの笠井康子氏、落合啓氏、菊池健一氏からの助言を受けた。また、本文中の図に利用したL2rデータは、NICTのPhilippe Baron氏、ルーレア工科大学 Jana Mendrok 氏をはじめとする SMILES L2rデータ開発チーム(NICT ほか)で解析を行ったものである。最後に、長年の尽力の末に貴重な観測データの取得を達成した SMILES ミッション関係者に謝意を述べる。

文 献

- J. W. Waters, L. Froidevaux, W. G. Read, G. L. Manney, L. S. Elson, D. A. Flower, R. F. Jarnot and R. S. Harwood: "Stratospheric ClO and ozone from the Microwave Limb Sounder on the Upper Atmosphere Research Satellite," Nature, 362 (1993) 597–602.
- 2) J. W. Waters, L. Froidevaux, R. S. Harwood, R. F. Jarnot, H. M. Pickett, W. G. Read, P. H. Siegel, R. E. Cofield, M. J. Filipiak, D. A. Flower, J. R. Holden, G. K. Lau, N. J. Livesey, G. L. Manney, H. C. Pumphrey, M. L. Santee, D. L. Wu, D. T. Cuddy, R. R. Lay, M. S. Loo, V. S. Perun, M. J. Schwartz, P. C. Stek, R. P. Thurstans, M. A. Boyles, S. Chandra, M. C. Chavez, G.-S. Chen, B. V. Chudasama, R. Dodge, R. A. Fuller, M. A. Girard, J. H. Jiang, Y. Jiang, B. W. Knosp, R. C. LaBelle, J. C. Lam, K. A. Lee, D. Miller, J. E. Oswald, N. C. Patel, D. M. Pukala, O. Quintero, D. M. Scaff, W. V. Snyder, M. C. Tope, P. A. Wagner and M. J. Walch: "The Earth Observing System Microwave Limb

- Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 44 (2006) 1075–1092.
- 3) D. Murtagh, U. Frisk, F. Merino, M. Ridal, A. Jonsson, J. Stegman, G. Witt, P. Eriksson, C. Jimenez, G. Mégie, J. de La Noëë, P. Ricaud, P. Baron, J.-R. Pardo, A. Hauchecorne, E. J. Llewellyn, D. A. Degenstein, R. L. Gattinger, N. D. Lloyd, W. F. J. Evans, I. C. McDade, C. Haley, C. Sioris, C. von Savigny, B. H. Solheim, J. C. McConnell, K. Strong, E. H. Richardson, G. W. Leppelmeier, E. Kyrölä, H. Auvinen and L. Oikarinen: "An overview of the Odin atmospheric mission," Can. J. Phys., 80 (2002) 309–319.
- 4) 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: "Overview and early results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES)," J. Geophys. Res., 115 (2010) D23306.
- S. Ochiai, K. Kikuchi, T. Nishibori, T. Manabe, H. Ozeki, K. Mizukoshi, F. Ohtsubo, K. Tsubosaka, Y. Irimajiri, R. Sato and M. Shiotani: "Performance of JEM/SMILES in orbit," 21st Int. Symposium on Space THz Tech. (2010) p. 179.
- C. D. Rodgers: "Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation," Rev. Geophys. Space Phys., 14 (1976) 609–624.
- C. D. Rodgers: "Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements," J. Geophys. Res., 95 (1990) 5587–5595.
- A. N. Tikhonov: "On the solution of incorrectly stated problems and a method of regularization," Dokl. Acad. Nauk. SSSR, 151 (1963) 501–504.
- P. Eriksson: "Analysis and comparison of two linear regularization methods for passive atmospheric observations," J. Geophys. Res., 105 (2000) 18157–18167.
- C. Takahashi, S. Ochiai and M. Suzuki: "Operational retrieval algorithms for JEM/SMILES level 2 data processing system," J. Quant. Spec. Radiative Trans., 111 (2010) 160–173.
- 11) P. Baron, J. Urban, H. Sagawa, J. Moller, D. P. Murtagh, J. Mendrok, E. Dupuy, T. O. Sato, S. Ochiai, K. Suzuki, T. Manabe, T. Nishibori, K. Kikuchi, R. Sato, M. Takayanagi, Y. Murayama, M. Shiotani and Y. Kasai: "The Level 2 research product algorithms for the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES)," Atmos. Meas. Tech., 4 (2011) 2105–2124.

(2011年9月27日受理)