

JEM/SMILES(III) リトリーバルアルゴリズムと4K観測性能評価

○笠井康子(NICT/JAXA), Baron Philippe(NICT), Mendrok Jana(NICT), 落合啓(NICT), 村山泰啓(NICT), 菊池健一(JAXA), 西堀俊幸(JAXA), 佐藤亮太(JAXA), 鈴木睦(JAXA), 高柳昌弘(JAXA), 真鍋武嗣(大阪府立大), 尾関博之(東邦大), 塩谷雅人(京大)

1. 序： 超伝導サブミリ波リム放射サウンダ JEM/SMILES (Superconducting Submillimeter - Wave Limb-Emission Sounder) は情報通信研究機構 (NICT) と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の共同開発ミッションである[Masuko et al., 1997; Masuko et al., 2000; SMILES Mission Plan, 2002]。JEM/SMILES の目的は

- 1) 宇宙における機械式冷凍機搭載超伝導受信機の技術実証
- 2) 超高感度な大気観測により地球大気観測の新しい可能性を拓く

の2点である。超伝導受信機による超感度観測は世界でも初めての試みであり、従来の同様の衛星 Aura/MLS(NASA)と比較して10-20倍程度のスペクトル観測感度でサブミリ波放射大気観測が可能である。

ここではSMILES ミッション開発当時(1999)から進めてきたJEM/SMILES アルゴリズム開発の概要を示す。超高感度4K スペクトル観測性能を生かし、高精度な大気存在量分布を導出するものである。

2.SMILES 観測スペクトル： 図1に JEM/SMILES の実測スペクトル(観測バンドC)を示す。低ノイズとリップルがないことから、強度の低い ClO 遷移においてもスペクトル構造が美しくでていることが見て取れる。図2には軌道上において現在も地球大気を観測しているミリ波サブミリ波リム観測衛星、Odin/SMR (スウェーデン) と Aura/MLS(米国) の観測システム温度をシミュレーションしたスペクトルを示す。このシミュレーションでは比較のために SMILES の周波数帯、アンテナパターンを用いており、必ずしもそれぞれの衛星観測を反映している訳ではないが、これにより、ノイズを直接比較することが可能である。図2により、SMILES の観測スペクトルノイズは従来の衛星と比較して10-20倍少なく、それによりシングルスキャンでも ClO スペクトル、HO₂ スペクトルが綺麗に観測される様子が示されている。実際のスペクトル上でもこれらは確認されており、ClO と HO₂ は SMILES が最も得意とする観測分子の一つである。

図1：SMILES 実測スペクトル

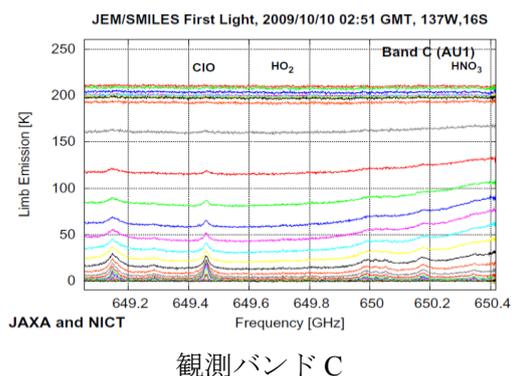
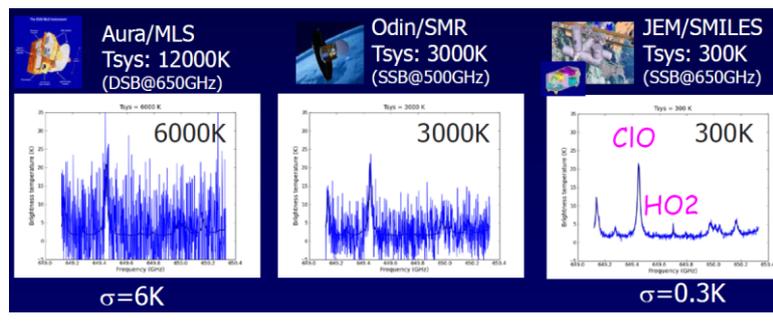


図2：SMILES シミュレーションスペクトル比較



3.SMILES データ処理アルゴリズム開発：

SMILES アルゴリズム開発の特徴： SMILES で得られる美しいスペクトル line-shape 観測の能力を最大限に生かし、精度良く分子高度存在量分布を導出するためには、従来と比較すると精密かつ微細なリトリーバルアルゴリズムが要求される。例えば、自然大気放射

伝達計算の精度をひと桁以上良くすること、アンテナパターンなどの測器関数を精度よく取り入れること、スペクトル較正、高度較正、気温気圧リトリバルを正しく行うこと、などに対して自然界と測器に対してより正確な関数を用意する事が必要になる。数学的にはMLSやOdin/SMRなど従来の測器におけるアルゴリズム同種のものを使用するが、この点

図3：SMILES アルゴリズム開発ストリーム

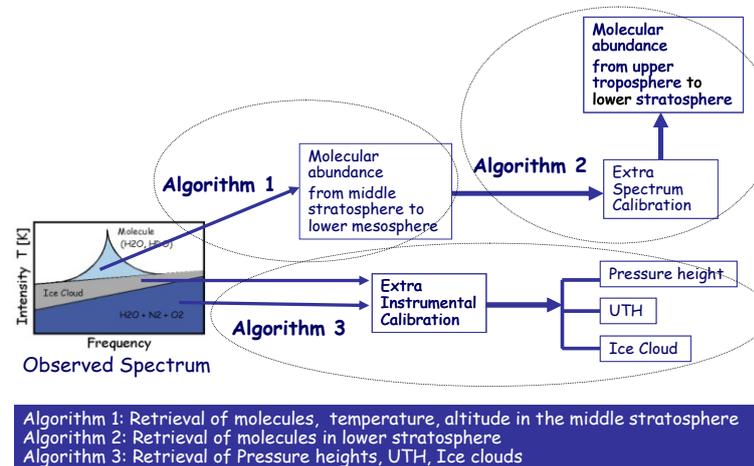
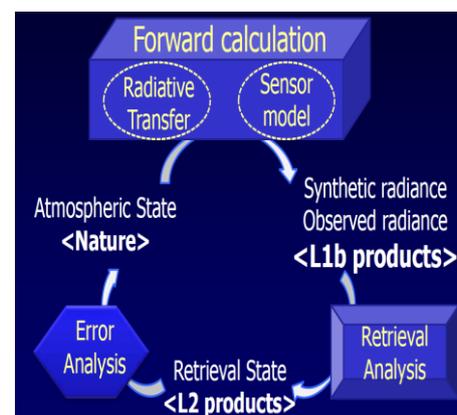


図4：SMILES 解析アルゴリズムのシステムモデル



が他の測器との大きな相違点となる。

アルゴリズム開発状況と予定： 図3に SMILES アルゴリズムストリームを示す。スペクトル反転解析アルゴリズム開発は大きく分けて3つのステップに種別される。

Algorithm1,2 に対しては最大事後確率判定法 (MAP: maximum a posteriori probability sequence estimation)の1つの手法であるロジャーズの最適法[C.D.Rodgers, 2000]を用いている。また、放射伝達計算は Line-by-line 法を用いている。

Algorithm1 は Algorithm1-3 の土台となるもので、1991年に打ち上がった UARS/MLS などで使用され、十分に検証がなされている確実なものである。吸収係数の計算の際のスペクトル線形を表現するために Voigt 関数を用い、サブミリ波領域の Continuum には Liebe89/93 モデルを使用する。Liebe89/93 は ITU-R の勧告にもあるように 350GHz 以下に適用可能なもので、600GHz には対応していない。従って、600GHz 帯においても光学的に浅く、Continuum の影響の少ない低圧な高度領域 (600GHz 帯では中部成層圏から下部中間圏に相当) に対して適用が可能である。観測バンドの輝度温度は (ライン中心を除いて) 0-180K 程度の範囲に相当する。

Algorithm2 はそれに対し、光学的に厚く、また高圧な部分にも対応を可能にしたものである。スペクトル線形は VanVleck and Weisskopf(VVW)関数を用い、下部成層圏などの圧力が増す領域におけるスペクトル裾野をより正確に表現する。Continuum には 600GHz を含んだ 300GHz-1.5THz までの観測から求めた Pardo モデルを用いている。また、スペクトル輝度温度 200K 以上の部分からの情報を用いるため、スペクトル輝度温度較正の非線形性もより正確に補正したものを使用する必要がある。高度範囲では、下部成層圏から上部対流圏に相当する。

Algorithm3 は上部対流圏の氷雲・水蒸気・気温気圧に的を絞ったものである。氷雲リトリバル解析にはニューラルネットワーク法、MAP 法などいくつかの手法が存在し、現在、アルゴリズム開発研究の段階にある。また、水蒸気をより正確に導出する目的で、SMILES オリジナルの Continuum モデルを作成中である。

現在、SMILES の定常処理は Algorithm1 のフェーズにある。Algorithm2 は研究データ処理系に反映、現在、検証作業を進めている。アルゴリズムは検証作業が済み次第、逐次、アルゴリズムを定常データ処理系に反映する予定である。Algorithm3 は研究段階にある。

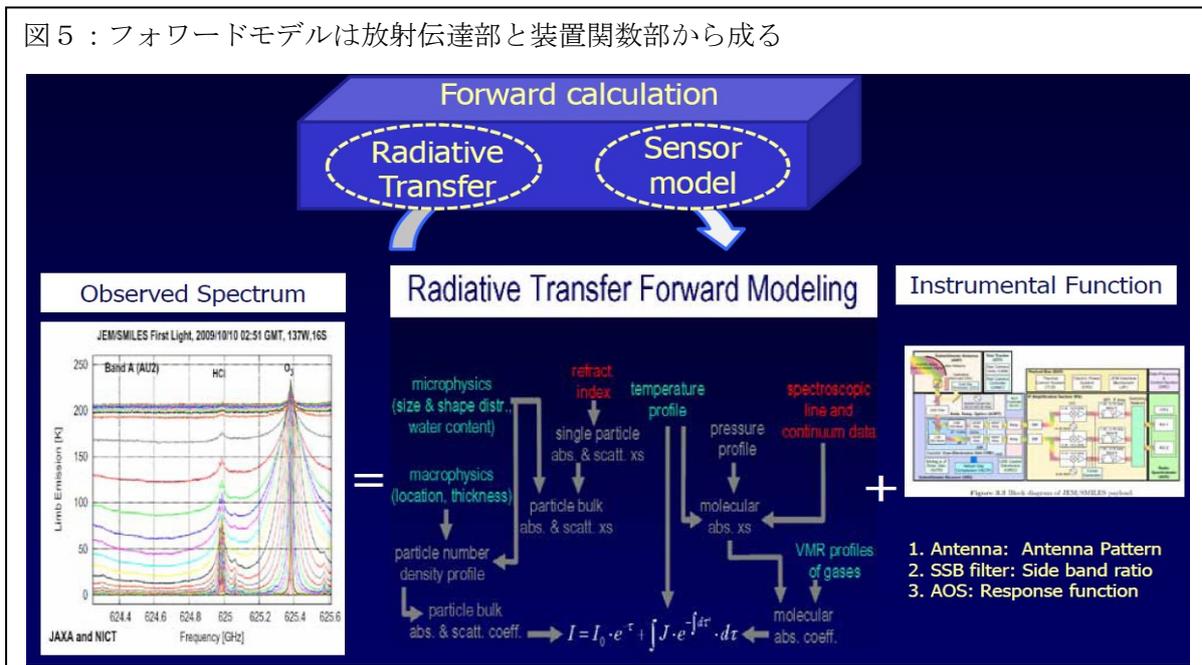
4. SMILES 解析アルゴリズムのシステムモデル：

図 4 に SMILES 解析アルゴリズムのシステムモデルを示す。地球惑星大気を観測し、存在量高度分布を導出するまでには以下の 3 つの状態をそれぞれ経る。1) Atmospheric State, 2) Synthetic (observed) Radiance, 3) Retrieval State。

これらをつなぐのが Forward Model, Retrieval Analysis, Error Analysis となる。真値と SMILES 観測から導出した推定値の差は誤差となる。Error Analysis により解析的に誤差解析を行い、誤差の性質と性能を解析的に知る事が出来る。

フォワードモデル： 図 5 にはフォワードモデルの構成を示す。フォワードモデルは放射伝達式と装置関数部からなる。SMILES の場合、この Synthetic なスペクトルによる観測スペクトルを自然における物理過程（放射伝達計算）とそれを観測する過程（装置関数）を、精度良く再現することが、精度よい分子存在量分布を推定するための重要な鍵となる。

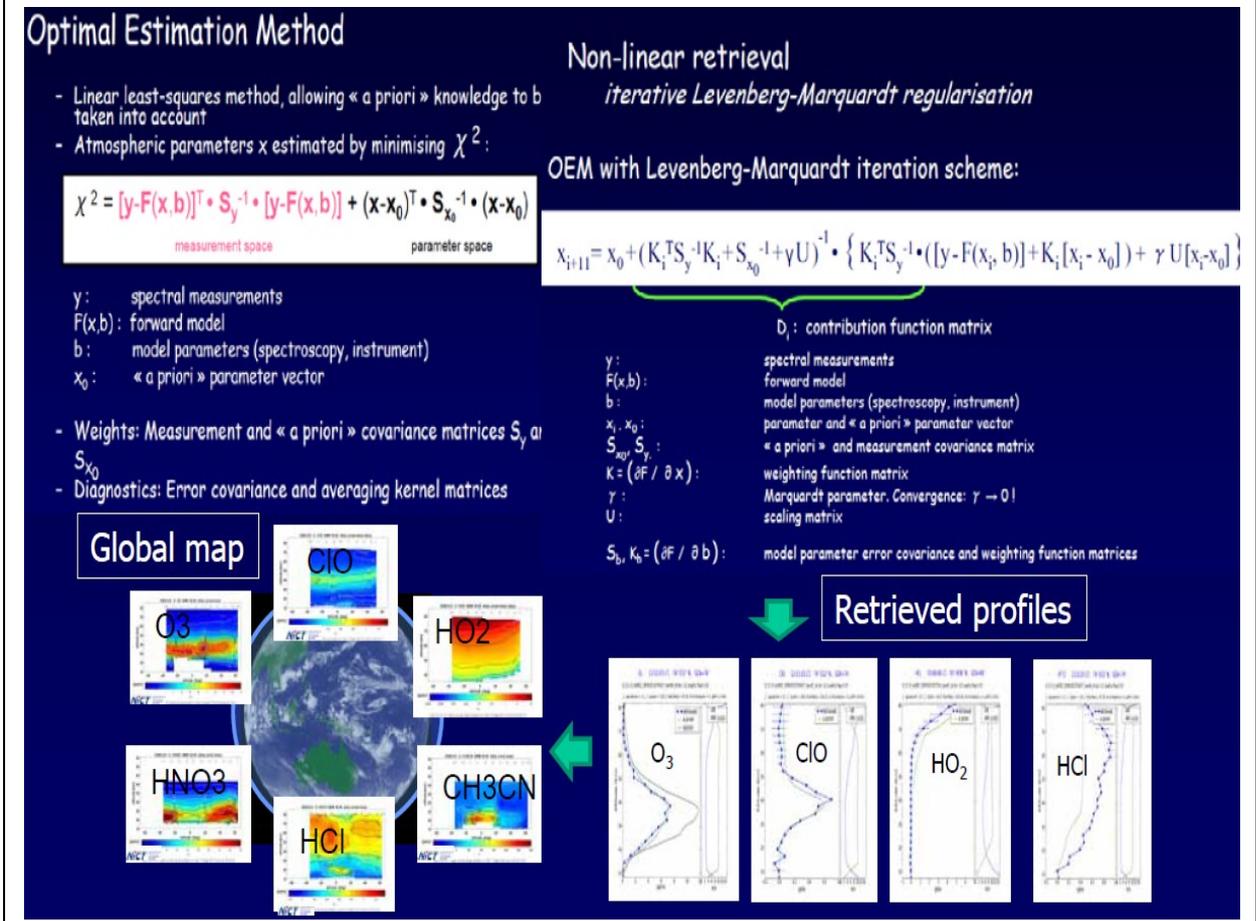
図 5：フォワードモデルは放射伝達部と装置関数部から成る



フォワードモデルのうち、放射伝達計算は、実際にサブミリ波大気観測を行い、実測で検証済みの Odin/SMR チーム（ボルドー大学・チャルマス工科大学）、ブレイメン大学のサブミリ波観測チーム、ベルン大学などのモデルと比較を行い、精度を確認した[Verdes, 2005]。測器関数の中で重要になるのは、1)アンテナパターン、2)SSB フィルタのサイドバンド比、3)分光器の応答関数である。これらは測器チームが測定した実測値/もしくは測器チームと協力してモデル化したパラメータを使用している[例えば T.Manabe, 2010]。

リトリーバル処理： 図 6 にリトリーバルデータ処理概要とフローを示す[Y.Kasai,2000; Y.Kasai, 2006; Y.Kasai, 2008; C.Takahashi 2010]。分子存在量高度分布からスペクトルを計算するのが順問題となり、観測スペクトルから分子存在量高度分布を求めるのは逆問題である。従ってスペクトルから存在量分布を求める作業は数学的に ill-posed であり、安定した解が得られない上、さらに解が一つではない。これらを解決するために、SMILES では図6に示した様に、MAP 解析の一つの方法であるロジャーズの最適法を用いてスペクトル解析を行っている[C.D.Rodgers, 2000]。また、非線形問題に対応するためには、Levenberg-Marquardt iteration スキームを採用している(図 6)。リトリーバルした高度プロファイル(Level2 プロダクト)の例を示す。また、これらの高度プロファイルの zonal mean を取ったもの(L3 プロダクト)が SMILES の最終プロダクトとなる。

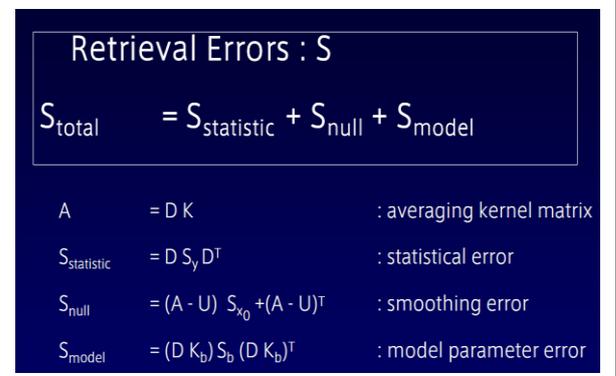
図 6 : リトリバル処理。反転解析により大気中における分子の存在量高度分布を推定する。SMILES ではロジャーズの最適法を採用している。



誤差解析 :

図 7 に誤差解析の詳細を示す。誤差は大きく分類すると、観測スペクトルノイズ $S_{\text{statistic}}$ 、大気中における分子(や気温・気圧・高度情報)の高度存在量のゆらぎなど S_{null} 、Synthetic フォワード計算のモデルの真値からのずれ S_{model} 、の 3 つから成る。このうち $S_{\text{statistic}}$ と S_{null} は精度に寄与し、 S_{model} は精度と確度の両方に寄与をする。

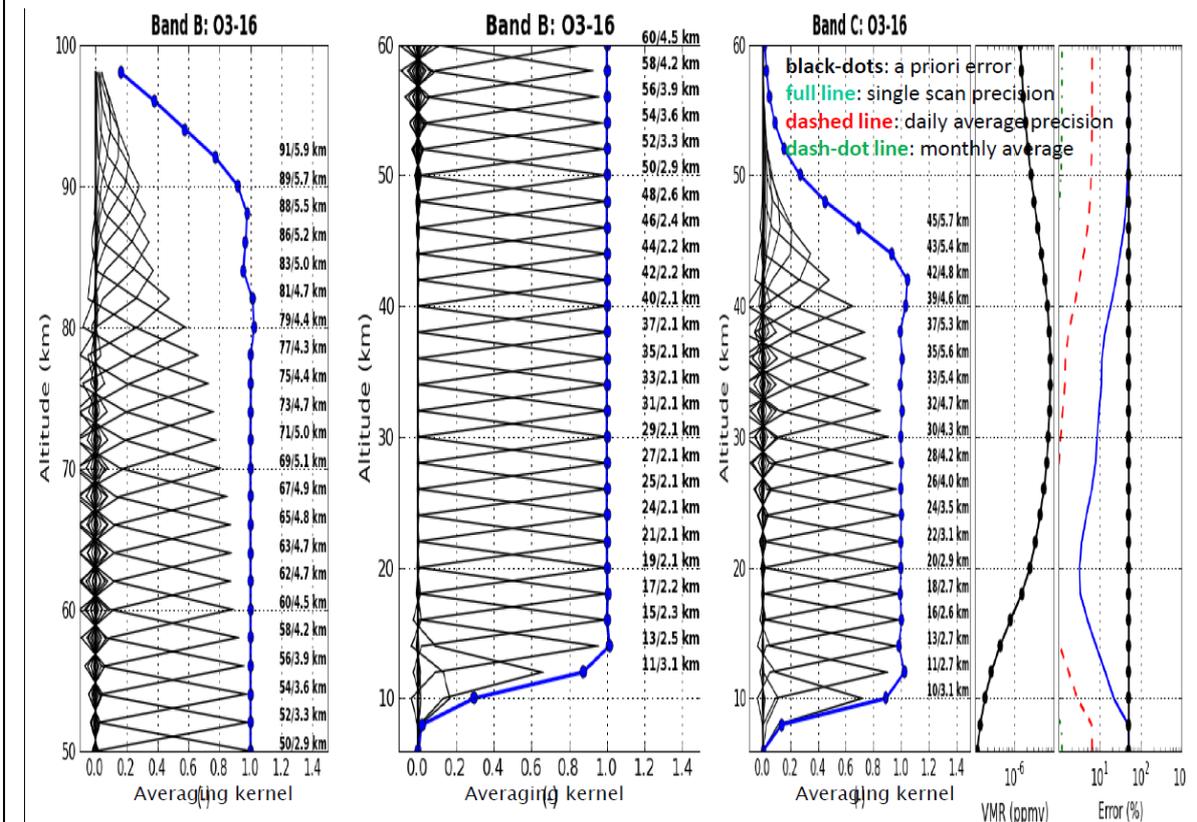
図 7 : 誤差解析 : 誤差は観測スペクトルノイズ、大気分子存在量のゆらぎ、スペクトルフォワード計算のモデル誤差から成る。



5. SMILES の 4K 観測性能評価 :

図8に SMILES の 4K 受信機ノイズを仮定した場合の中緯度オゾン観測の Averaging Kernel を示す。ここでは SMILES の 4K 観測能力を示すために、フォワードモデルは理想的にスペクトルを再現していると仮定し、 $S_{\text{statistic}}$ と S_{null} のみを誤差に入れ、4K スペクトル観測ノイズ評価を行った。Averaging kernel の各高度における積分値(response function)が 0.8 以上において観測情報量が十分であるとみなす事が出来る。オゾンは 10-94km 程度の

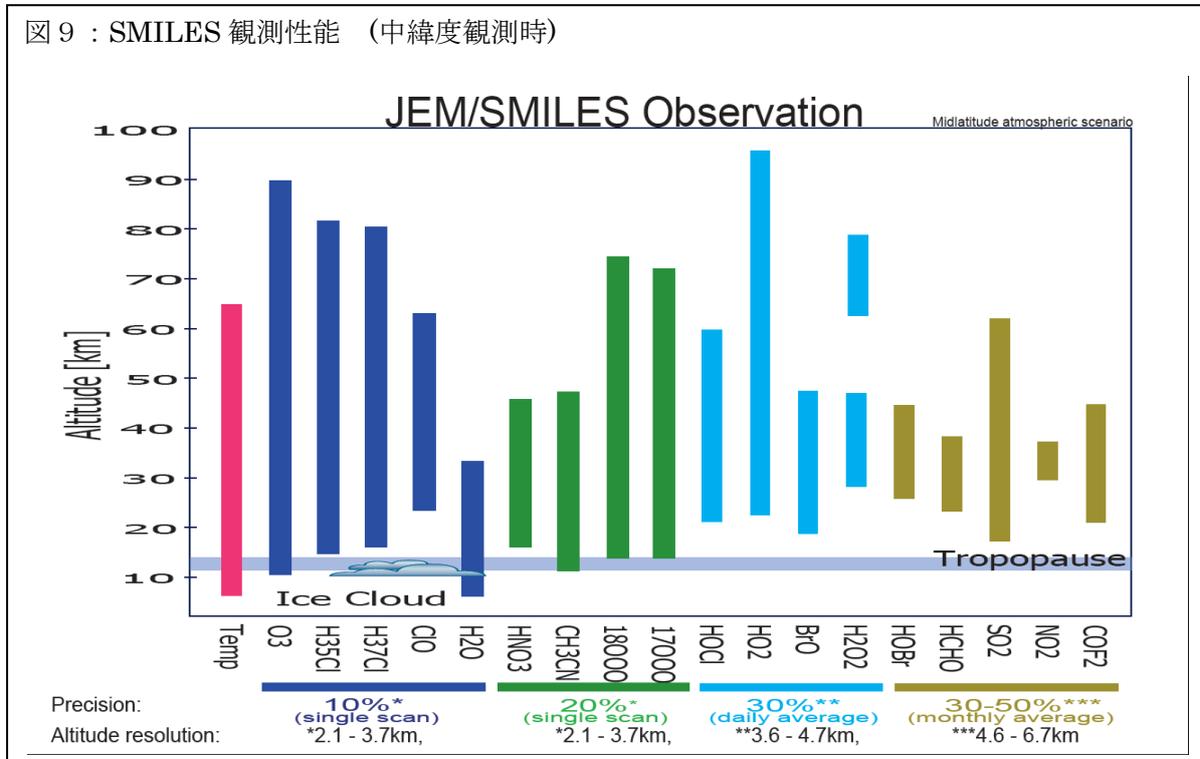
図8：中緯度オゾン観測の Averaging Kernel. (中緯度 US スタンダードプロファイルを使用) Averaging kernel の各高度における積分値(response function)が 0.8 以上のものが観測情報量が十分であるとみなす事が出来る。オゾンは 10-94km 程度の範囲で観測が可能。



範囲で観測が可能である。また、観測高度分解能は高度範囲 20-40km で 2.1km 程度となる。この範囲外(10-20km, 40-94km)では最大で 5.9km 程度まで広がる。例えば高度 80km におけるオゾンは 4.4km 程度の高度分解能を持つ。オゾン観測誤差は理論的には数%以下である。このような性能評価を SMILES 観測分子すべてについて実施した。

図9には観測分子と誤差範囲により、SMILESの超伝導受信機4Kにおける観測性能を示した。観測精度は高度分解能に大きく依存する。高度分解能は図の下部に示した。

図9：SMILES観測性能（中緯度観測時）



リファレンス

Kasai, Y., C. Takahashi, S. Tsujimaru, S. Ochiai, S. Buehler, K. Takahashi, T. Shirai, H. Ozeki, M. Shiotani, (2000), JEM/SMILES limb-sounding of stratospheric trace species II: simulation results for JEM/SMILES observations, Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space, Proc. SPIE 4152, 263-273

Kasai, Y., J. Urban, C. Takahashi, S. Hoshino, K. Takahashi, J. Inatani, M. Shiotani, and H. Masuko (2006), Stratospheric ozone isotope enrichment studied by submillimeter wave heterodyne radiometry: the observation capabilities of SMILES, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44 (3) pp. 676-693.

Y.Kasai and S.Ochiai, (2008), Super-Conductive Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder Onboard International Space Station II: Algorithm Development of for the Data Processing, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 55(1), 97-108.

Manabe, T. T. Nishibori, K. Mizukoshi, F. Ohtsubo, and S. Ochiai (2010), Measurements of the Offset-Cassegrain Antenna of JEM/SMILES Using a Near-Field Phase-Retrieval Method in the 640 GHz Band, 21st International Symposium Space Terahertz Technology, Oxford, UK, March 23-25.

Masuko, H., S. Ochiai, Y. Irimajiri, J. Inatani, T. Noguchi, Y. Iida, N. Ikeda, N. Tanioka (1997), A Superconducting Sub-millimeter Wave Limb Emission Sounder (SMILES) on the Japanese Experimental Module (JEM) of the Space Station for Observing Trace Gases in the Middle Atmosphere, Proceedings of Eighth Int. Symp. on Space Terahertz Tech., Harvard Univ., pp. 505-517.

Masuko, H., T. Manabe, M. Seta, Y. Kasai, S. Ochiai, Y. Irimajiri, J. Inatani, N. Ikeda, T. Nishibori, H. Ozeki, R. Sato, Y. Fujii, T. Nakajima, H. Watanabe, K. Kikuchi, and M. Koyama (2000), Superconducting Submillimeter-wave Limb Emission Sounder (SMILES) Onboard Japanese Experimental Module (JEM) of International Space Station (ISS), Proceedings of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000 vol. 1, pp. 71-73.

Rodgers, C. D. (2000), Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice, Series on atmospheric, oceanic and planetary physics, vol. 2. Singapore, World Scientific.

SMILES Mission Team (2002), JEM/SMILES Mission Plan (version2.1), Available at http://smiles.tksc.jaxa.jp/document/SMILES_MP_ver2.11.pdf

Takahashi, C., S. Ochiai, and M. Suzuki (2010), Operational retrieval algorithms for JEM/SMILES level 2 data processing system, *J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 111, 160–173.

Verdes, C. Melsheimer, S. Böhler, C. Emde, P. Eriksson, S. Ichizawa, V.O. John, Y. Kasai, G. Kopp, N. Koulev, T. Kuhn, O. Lemke, S. Ochiai, F. Schreier, Sreerekha T.R., C. Takahashi, S. Tsujimaru, J. Urban, Inter-comparison of general purpose clear sky atmospheric radiative transfer models for the millimeter/submillimeter spectral range, *Radio Science*, 40, 2004RS003110, (2005)