

JEM/SMILES観測データ解析アルゴリズムの開発 とL2研究処理

○笠井¹、Baron¹、落合¹、Mendrok¹、Dupuy¹、瀬田¹、入交¹、Urban²、Murtoogh²、
佐野³、菊池³、西堀³、真鍋⁴、塩谷⁵、Wu⁶、SMILESミッションチーム^{1,3}
¹情報通信研究機構、²チャルマス大学、³JAXA ⁴大阪府立大、⁵京都大学、⁶NASA/JPL

1 序：SMILES は超高感度サブミリ波センサ SMILES (Superconducting Submillimeter-wave Limb- emission Sounder) 測器は、国際宇宙ステーション日本モジュールの船外プラットフォームに搭載する実験として 1997 年に選定された宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、情報通信研究機構 (NICT) の共同開発ミッションである。打ち上げは 2009 年 9 月を予定している。

JEM/SMILES は地球の中層大気に存在する微量成分などからのサブミリ波領域の放射をリモジオメトリで観測する。類似の衛星測器として MLS (米国) や Odin/SMR (欧州) が存在するが、ショットキーダイオード受信機を搭載した過去のセンサに対し SMILES は超伝導受信機を搭載し「上部対流圏・成層圏・中間圏に存在するラジカル種をはじめとした大気成分の短時間日変化を感度よく観測」する。超伝導受信機を用いた大気観測は世界でも初めての試みで、同じ周波数帯を観測する米国 MLS の 10 倍以上の感度を実現することが可能である。表 1 に JEM/SMILES 主要スペックを示す。また、図 1 には JEM/SMILES の観測バンドと観測分子種を示す。

2. SMILES 観測の特徴を引き出すデータ処理アルゴリズム開発

2-1: SMILES 観測の特徴

SMILES は同様の観測手法である Odin/SMR や MLS と比較し、観測 Precision が 5-10 倍良い。これはすなわち、オゾン観測 10% 誤差程度を得るための積分時間は従来の 3 倍程度以下である、ということを示す。すなわち、短時間の変動を見ることに優れている。

理論的には、オゾンの 1 観測点あたりのリトリバーブル観測誤差 (スペクトル SN だけを考慮した場合) は高度 32km で 0.5% 程度となるが、実際には種々の誤差 (フォワードモデルに由来する誤差が誤差の主要な部分を占める上、大気放射伝達モデル計算のうちのコンティナム部に起因する誤差、測器誤差 (温度校正誤差)、アンテナパターンに由来する誤差、ISS による各種の誤差、大気ゆらぎ、など) が重なる。従って、オゾンの観測精度は 10% 程度を目安としている。(図 2)

SMILES の超高感度スペクトル観測性能を生かした物理量導出 (オゾンの鉛直分布など) を行うためには、L1 処理アルゴリズム (輝度温度スペクトル導出)、L2 処理アルゴリズム (各観測点における大気物理量鉛直分布の導出) に対して、従来と比較し Precision で一桁程度良い精密なアルゴリズム開発が要求される。特に L2 処理におけるフォワードモデル (放射伝達モデル部と装置関数モデル部) の精度向上が非常に重要であるのは従来から強く指摘している通りである。図 2 に SMILES 観測性能を示す。

表 1 JEM/SMILES 観測の主要スペック

Observation geometry	limb
Platform	ISS
Platform altitude	400km (nominal)
Frequency Range	624.32-625.52 GHz (Band A) 625.12-626.32 GHz (Band B) 649.12-650.32 GHz (Band C)
Obs Species	オゾン、HCl, ClO, BrO, HOCl, HO ₂ , HNO ₃ , CH ₃ CN, オゾン同位体種 UT/LS 水蒸気、CirrusCloud, など
Receiver	SIS mixer Single Sideband (SSB)
System Noise Temperature	less than 700K
Spectrometer	Acousto Optical Spectrometer (AOS)
Spectral Resolution	1.4MHz (FWHM)
Effective antenna beam-width	0.096° (HPBW, elevation)
Observation range	11-120km (in Equator region)
Altitude resolution	3km

図 1: JEM/SMILES 観測バンドと分子種

The Level 2 research products

Processing modes	Band A	Band B	Band C
Stratospheric high SNR 10-60 km	O ₃ , H ³⁷ Cl, H ₂ O, Temp, Pointing offset	O ₃ , H ³⁵ Cl, H ₂ O, Temp, Pointing offset	H ₂ O, ClO
Stratospheric medium/low SNR 10-60 km	wind, HOCl, CH ₃ CN, OOO ¹⁸ , HNO ₃ , BrO, H ₂ O ₂ , SO ₂	wind, N ₂ O, OOO ¹⁸ , HO ₂ , HNO ₃ , SO ₂	O ₃ , OOO ¹⁸ , OOO ¹⁷ , HO ₂ , HNO ₃ , BrO
Mesospheric medium/low SNR 50-90 km	O ₃ , H ³⁷ Cl, wind, OOO ¹⁸ , H ₂ O ₂	O ₃ , H ³⁷ Cl, wind, OOO ¹⁸ , HO ₂ , SO ₂	HO ₂ , OOO ¹⁸ , OOO ¹⁷ , ClO
UT/LS	H ₂ O, Ice water content, O ₃		
Extremely Low SNR	H ₂ CO, HOBr, ClONO ₂ , OClO, ClOOCl, H ₂ SO ₄	CH ₃ Cl, H ₂ CO, HOBr, ClONO ₂ , OClO, ClOOCl	COF ₂ , ClONO ₂ , NO ₂ , OClO, ClOOCl

blue: single scan, red: daily average, green: monthly average, black: very challenging

2-2: アルゴリズム開発スキーム :

SMILES ミッションチームでは、JAXA と NICT の協力体制の下、1999 年から L1 データ処理アルゴリズムと L2 データ処理アルゴリズムを開発し改良を重ねている。L2 データ処理アルゴリズムは落合らが開発した maes アルゴリズム^[1]をベースに 1999 年から SMILES に特化した SMOCO_L2 データ処理アルゴリズム開発を開始した^[2]。現在では SMOCO アルゴリズムに加えて Odin/SMR 観測の 7 年間の蓄積と経験をアルゴリズムに反映し、AMATERAS アルゴリズムを構築中である^[3,4]。定常処理システムは SMOCO アルゴリズムをベースに、計算プログラムを再コードし、高速化と最適化を行ったものである。詳細は本シンポジウムの光田らの要旨を参考にされたい^[5]。図 3 にアルゴリズム開発の流れを示す。

図 3: SMILES 観測物理量導出アルゴリズム開発スキーム

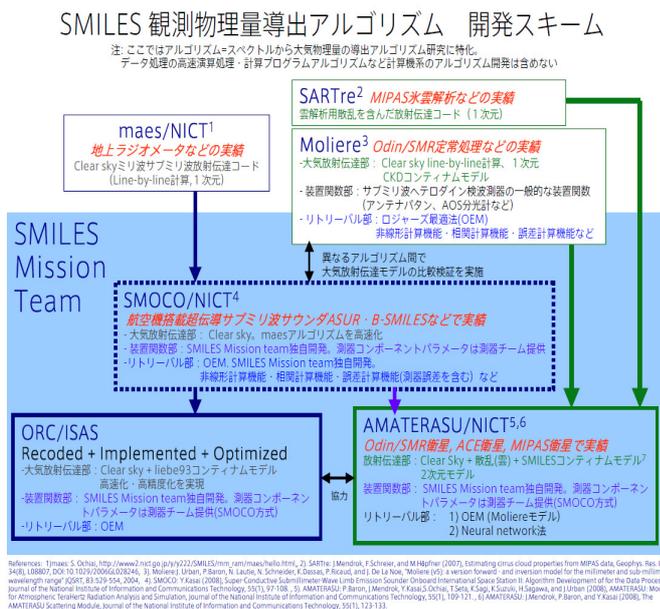


図 4: 解析システムの概念図

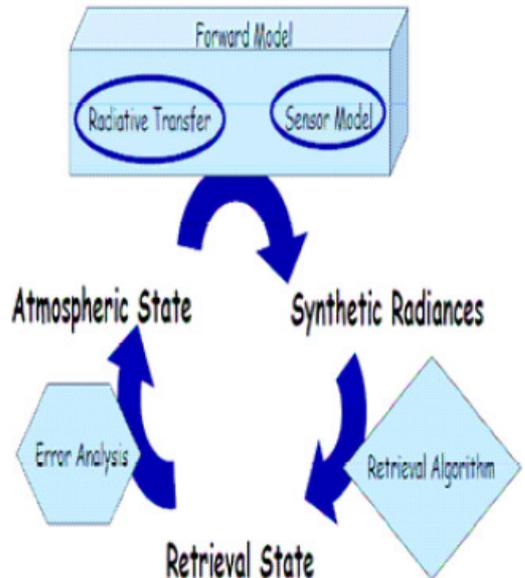


図 5: リトリールアルゴリズム

3: SMILES L2 データ処理アルゴリズム

3-1: SMILES L2 リトリール解析アルゴリズム

図 4 にリトリール解析におけるシステム概念図を示す。システムはフォワードモデル、リトリール、誤差解析の 3 つの部分から成り立つ。リトリールに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を用いた^[6]。図 5 に OEM リトリールアルゴリズムを示す。また、光学的厚みが大きい物質 (水蒸気・オゾン・HCl・ClO) に対する非線形分子リトリールアルゴリズムを示す。

3-2: フォワードモデルの構築

フォワードモデルとは SMILES 観測輝度温度スペクトルをシミュレーションするモデルである。これは大気放射伝達部と装置関数モデル部の二つから構成される。

3-2-1: 大気放射伝達部

図 6 に大気放射伝達部の計算手法を示す。AMATERASU では吸収と発光のみを考慮する晴天部と氷雲などの影響による散乱・吸収・発光を計算する。また、リトリールを行う際には重み関数 **K** を用い、スペクトルライン線形が重要であるため、放射伝達計算には周波数グリッドを細かくとる line-by-line 法を用いるのが一般的である。また、サブミリ波領域にはコンティナムとよばれる固有の連続吸収帯が存在する。サブミリ波帯では適切

Retrieval

Optimal Estimation Method

- Linear least-squares method, allowing « a priori » knowledge to be taken into account
- Atmospheric parameters x estimated by minimising χ^2 :

$$\chi^2 = [y - F(x, b)]^T \cdot S_y^{-1} \cdot [y - F(x, b)] + (x - x_0)^T \cdot S_{x_0}^{-1} \cdot (x - x_0)$$

measurement space parameter space

y : spectral measurements
 $F(x, b)$: forward model
 b : model parameters (spectroscopy, instrument)
 x_0 : « a priori » parameter vector

- Weights: Measurement and « a priori » covariance matrices S_y and S_{x_0}
- Diagnostics: Error covariance and averaging kernel matrices

NICT JAXA

Non-linear retrieval

Non-linear retrieval
iterative Levenberg-Marquardt regularisation

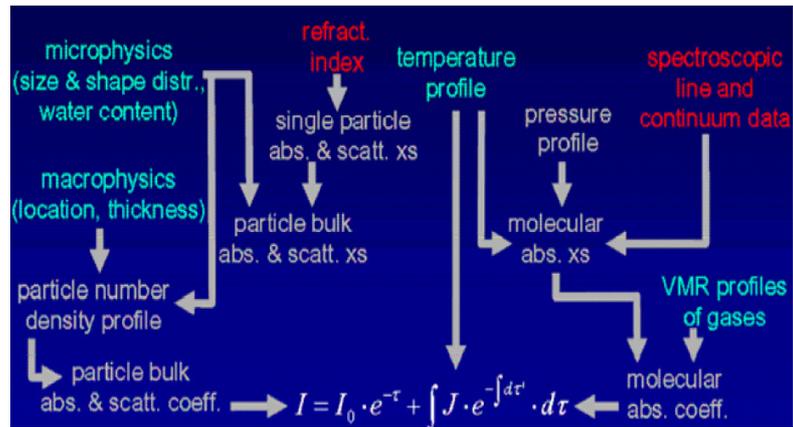
OEM with Levenberg-Marquardt iteration scheme:

$$x_{i+1} = x_0 + (K_i^T S_y^{-1} K_i + S_{x_0}^{-1} + \gamma U)^{-1} \cdot \{ K_i^T S_y^{-1} \cdot [y - F(x_i, b)] + K_i [x_i - x_0] + \gamma U [x_i - x_0] \}$$

D_i : contribution function matrix
 y : spectral measurements
 $F(x, b)$: forward model
 b : model parameters (spectroscopy, instrument)
 x_i, x_0 : parameter and « a priori » parameter vector
 S_y, S_{x_0} : « a priori » and measurement covariance matrix
 $K = (\partial F / \partial x)$: weighting function matrix
 γ : Marquardt parameter. Convergence: $\gamma \rightarrow 0$
 U : scaling matrix
 $S_{x_0}, K_0 = (\partial F / \partial b)$: model parameter error covariance and weighting function matrices

NICT JAXA

図6： 放射伝達計算



なコンティナムモデルは存在しない。定常処理では UARS/MLS (1991 年打ち上げ) で実績のある Liebe モデルを使用している。SMILES ミッションチームでは NICT における実験室分光の値を元に独自に SMILES コンティナムモデルを作成しており^[6]、AMATERAS では試験的に SMILES コンティナムを使用する。

3-2-2: 装置関数モデル部

装置関数モデル部は

SMOCO アルゴリズム開発の中で 2000 年より検討をはじめた。気球 SMILES 観測実験、航空機搭載超伝導サブミリ波サウンダ ASUR、ショットキーダイオード搭載サブミリ波衛星 Odin/SMR の 3 つの経験を反映し、SMOCO アルゴリズムの中では以下のモデルパラメータを取り込むこととした^[2]。これらは SMILES の測器チームとの連携により進めている。測器開発チームの中で独自にこれらの関数のパラメータライズを進めており、SMILES フライトモデルを用いた各種パラメータの実測により、測器パラメータのおおよそが明確になった。各関数についての詳細は SMILES ミッションプランの測器関数部分や SMILES ステータスレポートを参照されたい^[7]。

1. Calibration knowledge
2. Side Band knowledge
3. Antenna Pattern knowledge
4. Pointing knowledge
5. Spectroscopic parameter knowledge
6. AOS response function knowledge

これらの関数は、現在、定常処理、研究処理の両者に反映され、詳細な検討が進んでいる。

4. SMILES 観測誤差解析と観測精度

図7に誤差の計算手法を示す。観測誤差は $S_{statics}$, S_{null} , S_{model} の 3 種類から成る。今回の計算は

$S_{null} + S_{statics}$ (リトリーバル誤差) のみを考慮した。すなわち、理論的な SMILES 観測精度である。この値を基準値として、実際の観測では(大気中オゾンなど観測分子存在量の変動、水蒸気の変動、ミキサ温度変化、較正温度変化、磁場、測器誤差、リトリーバル技術、リトリーバルパラメータ設定により) その精度は悪化したり、向上したりする。しかし、実際に観測するまで精度は不明なところがあり、SMILES 観測の「スタンダード値」(目安) としてはこの値が適切である。ただし、高強度分子 (O_3 , HCl , Temp, pointing) に対してはこの限りではない。 $S_{model} \gg S_{null} + S_{statics}$ であるため、

$S_{null} + S_{statics}$ は「代表値」にはな

らない。 S_{model} で精度が悪化すること、大気物質の変動、分光パラメータ精度の限界などを考慮し、経験的に 10% を目標値(安全値) として示す。過去の観測 (B-SMILES, ASUR, TELIS, Odin/SMR, MLS, SWAS, など) を考慮すると妥当な値だと思われる。

これらを考慮して得られた SMILES 観測性能を図8に示す。

図7: SMILES 誤差解析

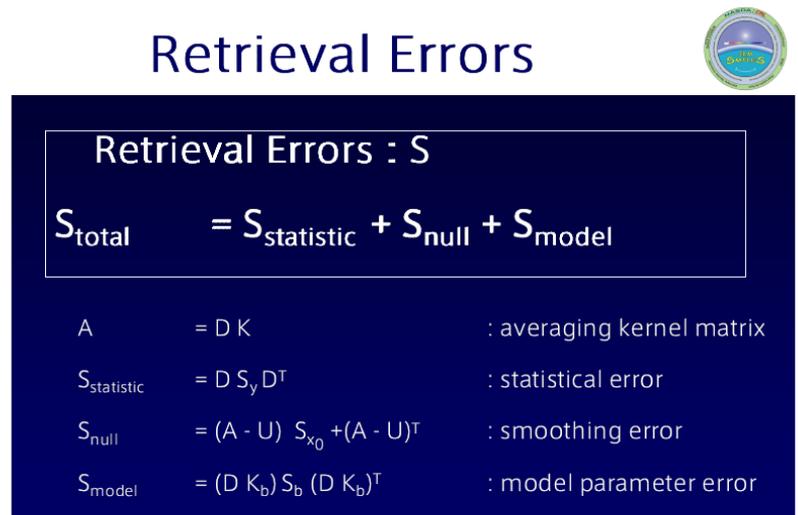
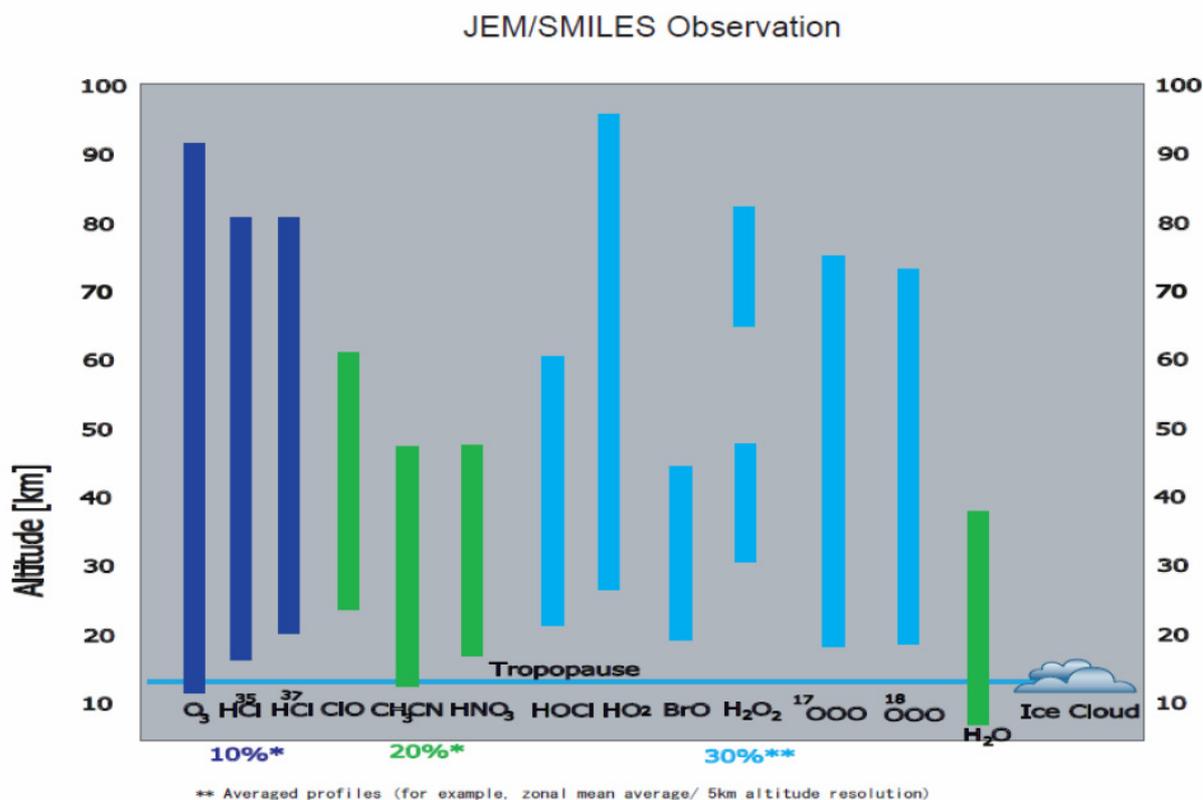


図8 : JEM/SMILES 観測性能



5. さいごに

SMILES の観測下限高度は理論的には 11km 程度であるが、条件により上部対流圏も観測が可能である。SMILES で観測する 600GHz 帯は上部対流圏水蒸気や氷雲を導出するのにベストの周波数の一つであることが指摘されている。現在、アルゴリズムチームでは上部対流圏・下部成層圏 (UT/LS) 観測物理量導出に向けて研究開発を進めている。なお、アルゴリズム開発チームには Odin/SMR と MLS のアルゴリズム研究者も参加しており、世界のサブミリ波放射サウンダ観測の知識と経験を集結した SMILES 研究データ処理開発を目指す。

[1]maes: S. Ochiai, http://www2.nict.go.jp/y/y222/SMILES/mm_ram/maes/hello.html,

[2]SARTre: J.Mendrok, F.Schreier, and M.Höpfner (2007), Estimating cirrus cloud properties from MIPAS data, Geophys. Res. Lett., 34(8), L08807, DOI:10.1029/2006GL028246,

[3] Moliere:J. Urban, P.Baron, N. Lautie, N. Schneider, K.Dassas, P.Ricaud, and J. De La Noe, "Moliere (v5): a version forward - and inversion model for the millimeter and sub-millimeter wavelength range" JQSRT, 83:529-554, 2004,

[4] SMOCO: Y.Kasai (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. ,

[5] AMATERASU: P.Baron, J.Mendrok, Y.Kasai,S.Ochiai, T.Seta, K.Sagi, K.Suzuki, H.Sagawa, and J.Urban (2008), AMATERASU: Model for Atmospheric TeraHertz Radiation Analysis and Simulation, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 55(1), 109-121. ,

[6] AMATERASU: J.Mendrok, P.Baron, and Y.Kasai (2008), The AMATERASU Scattering Module, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 55(1), 123-133.

[5]光田ら、JEM 搭載型サブミリ波リム放射サウンダ(JEM/SMILES)の Level2 データ処理システム開発、大気圏シンポジウム 2009 年 2 月

[6] T.Seta, H.Hoshina, Y.Kasai, I.Hosako, C.Otani, S.Loßow, J.Urban, M.Ekström, P.Eriksson, and D.Murtagh (2008), Pressure broadening coefficients of the water vapor lines at 556.936 and 752.033 GHz, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 109(1), 144-150, DOI:10.1016/j.jqsrt.2007.06.004.

[6"] H.Hoshina, T. Seta, T. Iwamoto, I. Hosako, C. Otani, Y. Kasai (2008), Precise measurement of pressure broadening parameters for water vapor with a terahertz time-domain spectrometer, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 109(12-13), 2303-2314, DOI:10.1016/j.jqsrt.2008.03.005.

[7] JEM/SMILES Mission Plan, SMILES homepage