

MEX/PFS データ解析による火星大気中 H_2O_2 の検出

青木翔平¹, 笠羽康正¹, Marco Giuranna², Anna Geminale², Giuseppe Sindoni²

中川広務¹, 村田功¹, Vittorio Formisano²,

1. 東北大学. 2. IFSI-INAF, Italy.

1. 序論

近年、火星大気中に微量の CH_4 が発見された(cf. *Formisano et al.*, 2004)。その起源として生命活動起源説や地殻起源説など諸説あり、注目を集めている(cf. *Atreya et al.*, 2007)。最近の地上観測及び衛星観測により、 CH_4 量が数日から数ヶ月スケールで変動している事が示された(cf. *Mumma et al.*, 2009)。その時間変動スケールは非常に早く、従来の光化学反応モデルより約600倍早い消失過程を必要としており(*Lefevre and Forget*, 2009)、 CH_4 を消失しうる強い酸化成分の存在が示唆される。本研究では、火星大気中の H_2O_2 に着目した。 H_2O_2 は火星酸化成分の指標となる分子である。1970年代に行われたViking着陸機のLife Science Experimentでは、反応性が高い地表面が示唆され、地表面に1 - 250 ppmの H_2O_2 が存在することが推測された(*Mancielli*, 1989)。 H_2O_2 の地上観測及び宇宙望遠鏡観測は過去に数例あり、0 - 40 ppbの気柱量が得られている(cf. *Encrenaz et al.*, 2008)。これらは、Viking着陸機から推測される値に比べて非常に少ない値であるが、長期間に渡る継続観測はない。本研究では、Mars Express衛星(MEX)搭載の赤外フーリエ分光計(PFS)のデータを用いて、 H_2O_2 の連続モニターを試みた。

2. 観測装置と解析手法

火星大気中の H_2O_2 を衛星から観測するためには、 H_2O 等大気主成分の吸収線と H_2O_2 吸収線を分離する必要があるため、高波長分解能分光観測が必須である。本研究では MEX 衛星搭載の PFS による観測データを用いた。PFS は、2004 年より火星を 7 年以上にわたって約 100 万スペクトルを観測しており、豊富なデータセットを有する。また、観測波長域 1.2 - 45 μm 、波長分解能 1.3 cm^{-1} であり、衛星搭載中間赤外域分光計では最高分解能である(*Formisano et al.*, 2005)。しかし同波長分解能でも、 H_2O_2 の吸収線を H_2O の吸収線から完全に分離する事はできない。そのため、 H_2O の量を精度よく同時に決定することが求められる。

過去の H_2O_2 赤外地上観測では、1200 - 1300 cm^{-1} の波長帯を用いているが、PFS の分解能では CO_2 の吸収に埋もれる。本解析では、360 - 385 cm^{-1} (26.0 μm - 27.8 μm)を初めて用いた。同波長域は CO_2 の吸収線は存在せず、 H_2O 及び H_2O_2 の吸収線が豊富に存在する波長領域である。衛星観測の利点は、地上観測では問題になる地球大気吸収線との分離を考慮する必要がない点

である。同波長域は、同理由から地上観測では困難な波長領域である。図 1 は、 $360 - 385 \text{ cm}^{-1}$ における PFS 観測模擬スペクトルを、 H_2O と H_2O_2 の気柱量を変化させて計算したものである。詳細は省略するが、散乱を含まない放射伝達方程式を用いて計算を行った。図 1 より、 362 cm^{-1} と 379 cm^{-1} における 2 つの H_2O_2 吸収線帯が H_2O の影響が少なく、 H_2O_2 検出可能であることがわかる。初期解析では、 362 cm^{-1} のみを用いたが(Aoki *et al.*, 2010)、本研究では、信頼性を高めるため 362 cm^{-1} と 379 cm^{-1} の独立した複数吸収線帯から H_2O_2 量の導出を試みた。 H_2O_2 の組成比が 50ppb の時の 362 cm^{-1} 及び 379 cm^{-1} における吸収の深さは、 $\sim 0.1\%$ である。それに対して、同波長域での雑音等価放射輝度は $\sim 4\%$ である(Giuranna *et al.*, Private communication)。したがって、数千のスペクトルを平均することが必要となる。例えば、2000 スペクトル平均することで、雑音等価放射輝度は H_2O_2 50ppb の吸収と等価である $\sim 0.1\%$ となる。

本解析では、2004 年 1 月から 2009 年 12 月の PFS 観測データ(3 火星年)のうち、以下の条件の観測データを用いた。

(1)Nadir 観測データ

(2)緯度-50 度から+50 度の中低緯度観測データ (十分な背景強度を得るため)

(3)10 時から 16 時の昼間観測データ (十分な背景強度を得るため)

(4)火星放射温度 250K から 270K の観測データ (微弱の装置起源雑音を定量的に評価するため)

(5)フーリエ分光計の可動鏡順方向と逆方向を区別 (スペクトルの雑音特性が違うため)

以上の条件から、39,226 スペクトル(順方向)、32,681 スペクトル(逆方向)のデータ数が得られた。

図 2 は、本解析で行ったデータ手順を示したものである。詳細は省略するが、背景火星放射の 0.1% 程度の H_2O_2 吸収を検出するため、厳密なデータ校正を行った。特に、背景強度の約 0.1% 程度の微弱な装置起源雑音を定量的に評価・除去を行った(図 2-C7)。また、数千の観測スペクトルを平均することで、SN 向上を達成した(図 2-C5)。これと、開発した火星大気放射伝達モデルから得られた計算スペクトルを、 $360 - 385 \text{ cm}^{-1}$ において Levenberg-Marquardt 法を用いて最小二乗フィッティングを行い、 H_2O 気柱量、 H_2O_2 気柱量、地表面 Emissivity を導出した。同解析手法により、 H_2O_2 気柱量を数十 ppb の精度で導出することが可能になった。

3. 結果と考察

上記の手法を用いて、(1) 3 火星年全平均量、(2)年平均量、(3)季節変動を導出した。

図 3a は可動鏡向き順方向の全平均スペクトルである。図 3b は図 3a にフィッティングした結果を示しており、赤線が H_2O_2 を考慮した best-fit スペクトル、青線が H_2O_2 を考慮していない best-fit スペクトルである。 H_2O_2 を考慮すると、 362 cm^{-1} 及び 379 cm^{-1} おいて観測データと計算データが

より整合することから、 H_2O_2 検出は明白である。誤差を考慮に入れると、導出された H_2O_2 気柱量は 45 ± 21 ppb であった。また同様に、可動鏡向き逆方向の場合の H_2O_2 気柱量は 25 ± 18 ppb であった。この結果は、先行観測の値($0 - 40$ ppb) (cf. *Encrenaz et al.*, 2008)と一致している。

表 1 に H_2O_2 気柱量年平均結果を示した。MY27 においては 50 ± 27 ppb (可動鏡向き順方向)及び 43 ± 26 ppb(可動鏡向き逆方向)、MY28 においては、 0 ± 89 ppb (可動鏡向き順方向) 及び 0 ± 74 ppb(可動鏡向き逆方向)、 MY29 においては 46 ± 21 ppb (可動鏡向き順方向)及び 28 ± 20 ppb(可動鏡向き逆方向)であった。このように、年ごとに大きな変動は確認されなかった。また、全平均結果と同様に先行観測の値($0 - 40$ ppb) (cf. *Encrenaz et al.*, 2008)と一致している。

より細かな変動を調査するために、3 火星年中で 20 点の季節変動の導出を行った。図 4 にその結果を示す。図 4a は H_2O_2 量、図 4b は H_2O 量をそれぞれ示している。まず、導出された H_2O 季節変動導出について議論する。 H_2O 量は $1.5 - 11.0$ pr- μm の変動を示し、平均値は 4.94 pr- μm であった。この値は、MGS/TES 等による先行観測研究と一致している(cf. *Smith* , 2002)。また、 H_2O 量は北半球の夏にかけて優位な増大を示している。これは、極冠の氷が昇華した影響と考える事ができ、MGS/TES 等による先行観測研究と一致している(cf. *Smith* , 2002)。最後に、導出された H_2O_2 季節変動導出について議論する。 H_2O_2 量は $0 - 120$ ppb の変動を示し、平均値は 39 ppb であった。これらの値は、先行観測の値($0 - 40$ ppb) (cf. *Encrenaz et al.*, 2008)と一致している。即ち、3 火星年の H_2O_2 量は数 10ppb であり、近年観測された CH_4 の早い消失を説明する数 ppm の量は観測されなかった。しかし、 H_2O_2 の寿命は数日ととても短いため、短期間での H_2O_2 量の急激な増大の可能性を完全に否定でない。今後、より短期間での変動を検証する必要がある。

4. まとめ

火星大気中の H_2O_2 の詳細な時空間変動を導出することで、酸化成分について理解を深め、近年観測された CH_4 の消失過程に制約を与えることができる。それには高波長分解能・高感度分光による H_2O_2 の継続観測が必要である。本研究では、高波長分解能、豊富なデータセットを有するMEX/PFSデータを用いて、 H_2O_2 の検出を試みた。火星放射伝達モデルの開発と厳密なデータ校正により、微量な H_2O_2 吸収を数十ppbの精度で検出する手法を確立した。火星3年分のデータから全平均で 45 ± 21 ppb, 25 ± 18 ppbの H_2O_2 が検出され、 $0 - 120$ ppbで季節変動していることを示した。得られた値は、モデル計算値と一致しており、 CH_4 を早い消失しうる数 ppmの量は観測されなかった。今後、より短期間での急激な増大の有無を検証する必要がある。

表 1. 年平均結果

MY	Pendulum direction	The number of spectra	$\chi^2_{\min}$	H ₂ O(ppm-μm)	H ₂ O ₂ (ppb)
27	Forward	8,853	2.379	7.59 (± 1.91)	50 (± 27)
27	Reverse	8,491	2.854	7.89 (± 2.01)	43 (± 26)
28	Forward	2,272	1.795	6.32 (± 2.00)	43 (± 46)
28	Reverse	2,174	1.367	8.33 (± 2.64)	30 (± 44)
29	Forward	16,379	11.817	2.54(± 0.66)	46 (± 21)
29	Reverse	13,194	7.493	4.91(± 1.31)	28 (± 20)

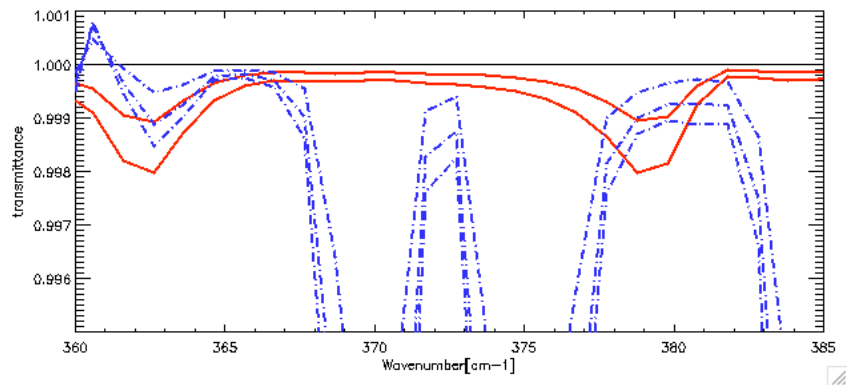


図 1. 360 - 385 cm⁻¹における PFS 波長分解能での火星放射伝達モデルによる計算スペクトル(赤線:H₂O₂ 50ppb, 100ppb 青線:H₂O 100ppm, 300ppm, 500ppm)。

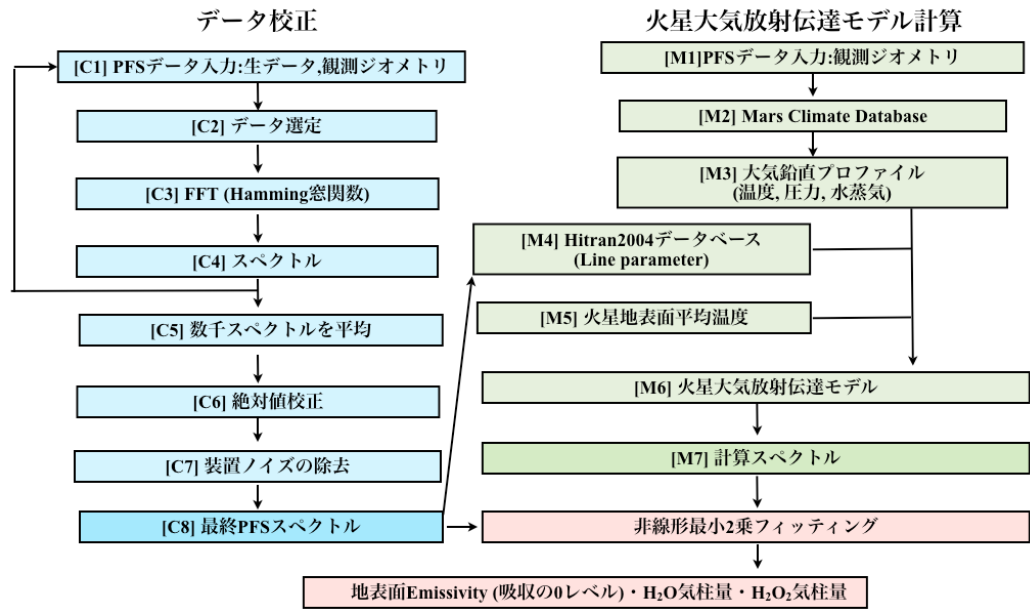


図 2. データ解析手順ブロック図。

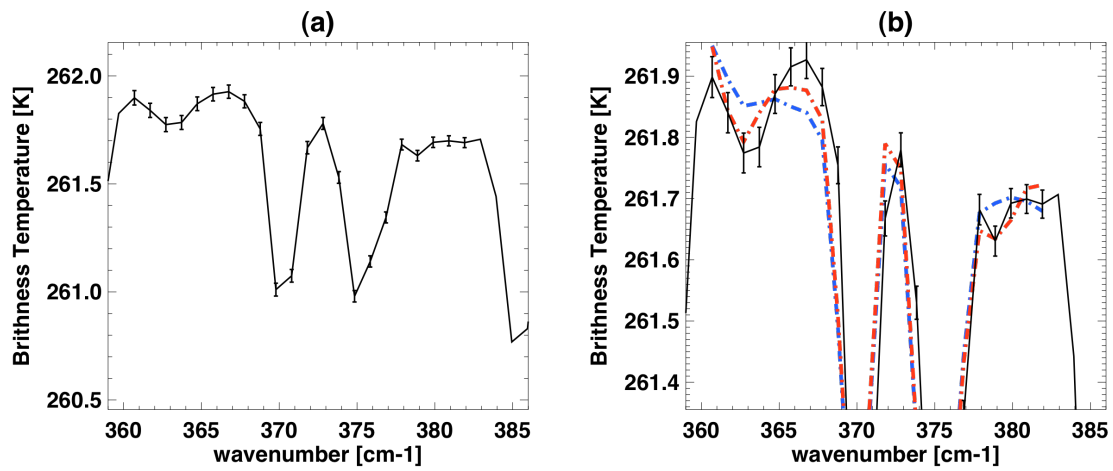


図 3. 3 火星年全平均スペクトル(可動鏡向き順方向)：(a)PFS 平均データ、(b) Fitting 結果 (赤:H₂O₂ 45ppb, 青:H₂O₂ 0ppb)。

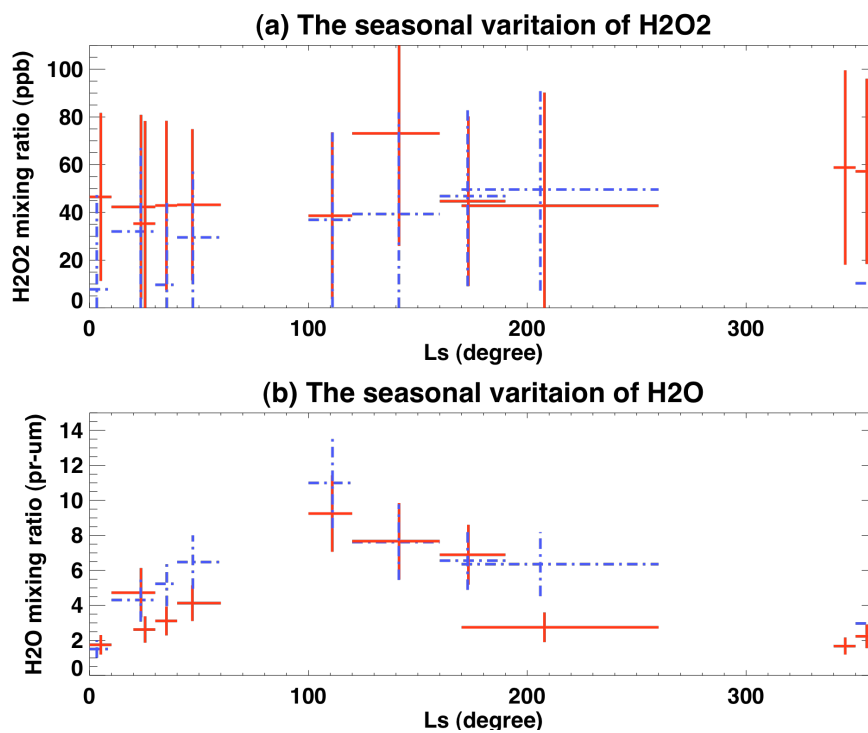


図 4.(a) H₂O₂ 季節変動結果(b)H₂O 季節変動結果(赤:可動鏡向き順方向、青:可動鏡向き逆方向)。

5.参考文献

- Aoki, S., Y. Kasaba, H. Nakagawa, I. Murata, V. Formisano, M. Giuranna, A. Geminale. (2010), MEX/PFS データ解析による火星大気内微量酸化成分の時間変動, 第24回大気圏シンポジウム集録.
- Atreya, S.K., P.R. Mahaffy, A. Wong. (2007), Methane and related trace species on Mars: Origin, loss, implications for life, and habitability, *Planet. Space Sci.*, 55, 358-369.
- Encrenaz, T., T.K. Greathouse, M.J. Richter, B. Bézard, T. Fouchet, F. Lefèvre, F. Montmessin, F. Forget, S. Lebonnois, and S.K. Atreya (2008), Simultaneous mapping of H₂O and H₂O₂ on Mars from infrared high-resolution imaging spectroscopy, *Icarus*, 195, 547-556.
- Formisano, V., S. Atreya, T. Encrenaz, N. Ignatiev, M. Giuranna (2004), Detection of methane in the atmosphere of Mars, *Science*, 306, 5702, 1758-1761.
- Formisano, V., F. Angrilli, G. Arnold, S. Atreya, G. Bianchini, D. Biondi, A. Blanco, M.I. Blecka, A. Coradini, L. Colangeli, A. Ekonomov, F. Esposito, S. Fonti, M. Giuranna, D. Grassi, V. Gnedykh, A. Grigoriev, G. Hansen, H. Hirsh, I. Khatuntsev, A. Kiselev, N. Ignatiev, A. Jurewicz, E. Lellouch, J. Lopez Moreno, A. Marten, A. Mattana, A. Maturilli, E. Mencarelli, M. Michalska, V. Moroz, B. Moshkin, F. Nespoli, Y. Nikolsky, R. Orfei, P. Orleanski, V. Orofino, E. Palomba, D. Patsaev, G. Piccioni, M. Rataj, R. Rodrigo, J. Rodriguez, M. Rossi, B. Saggini, D. Titov, and L. Zasova (2005), The Planetary Fourier Spectrometer (PFS) onboard the European Mars Express mission, *Planet. Space Sci.*, 53, 10, 963-974.
- Lefèvre, F., and F. Forget (2009), Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics, *Nature*, 460, 7256, 720-723.
- Mancinelli, R. (1989), Peroxides and the survivability of microorganisms on the surface of Mars, *Adv. Space Res.*, 9, 6, 191-195.
- Mumma, M.J., G.L. Villanueva, R.E. Novak, T. Hewagama, B.P. Bonev, M.A. DiSanti, A.M. Mandell, and M.D. Smith (2009), Strong release of methane on Mars in northern summer 2003, *Science*, 323, 5917, 041-1045.
- Smith, M.D. (2002), The annual cycle of water vapor on Mars as observed by the Thermal Emission Spectrometer, *J. Geophys. Res.*, 107, E11, doi:10.1029/2001JE001522.