

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

青木翔平¹, 笠羽康正¹, 中川広務¹, 村田功¹

Vittorio Formisano², Marco Giuranna², Anna Geminale²

1. 東北大学. 2. IFSI-INAF, Italy.

1. 序論

近年、火星大気に微量のCH₄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(cf. *Atreya et al.*, 2007)、注目を集めている。最新の研究により、CH₄に時空間変動が存在することが見出された (*Mumma et al.*, 2009; *Geminale et al.*, 2008)。変動の時間スケールから、何らかの短い時間スケールの生成過程だけでなく、低高度での強い酸化剤による酸化反応での消失が示唆されている(*Lefevre and Forget*, 2009)。本研究では、火星大気中のH₂O₂に注目した。H₂O₂は酸化剤の指標となる分子である。また、dust粒子の摩擦帯電に伴う放電を考慮にいれた大気化学反応の数値シミュレーションによって、dust stormやdust devil時には通常の約200倍ものH₂O₂が生成されるという推定結果も得られている(*Atreya et al.*, 2006)。CH₄減少とdust storm発生の時期がおおまかには一致するという観測結果(*Lillis et al.*, 2008)から、H₂O₂の増減に対応してCH₄の変動が起きている可能性も示唆されている。H₂O₂の研究は、CH₄の時間変動においてその消失過程の面で手掛かりを提供しうるものである。火星大気中のH₂O₂の地上観測は過去に数例あり、0-50ppbのmixing ratioが得られている(cf. *Encrenaz et al.*, 2008)。しかし、長期間に渡る継続観測はなく、詳しい時間変動・全球分布の導出にいたっていない。本研究は、Mars Express衛星(MEX)搭載のPlanetary Fourier Spectrometer(PFS)のデータを用いて、H₂O₂の時間変動および空間変動の導出を目指すものである。

2. 観測装置と解析手法

(1) 観測装置

MEXは軌道傾斜角 86.3° 高度 258-11560km で火星を周回する極軌道衛星である。PFSは火星の放射スペクトルをLWC(270-1750 cm⁻¹)とSWC(1800-8200cm⁻¹)、2つのチャンネルで観測する赤外フーリエ変換分光計である(*Formisano et al.*, 2005)。波長分解能は1.3cm⁻¹であり、火星探査衛星の赤外分光計としては比較的高分散である。

(2)データセット

本解析では初期解析として、2004年1月から2007年12月のPFS観測データのうち、以下の条件のものを用いた。

- (1) 緯度-60度から+60度の中低緯度のデータ：有効なSNRを得るため
- (2) スパイクノイズ等の装置起源ノイズが含まれていないデータ
- (3) Nadir観測時のデータ (The elevation angle of MEX > 60 deg.)
- (4) グローバルダストストームが起こっていない時：解析手法が未確立のため

過去のH₂O₂赤外地上観測では、1200-1300cm⁻¹の波長帯を用いているが、PFSの分解能ではCO₂の吸収に埋もれる。本解析では、CO₂の影響が小さくH₂O₂の強い吸収線が存在する300-400cm⁻¹帯を用いた。図1は、300-400cm⁻¹帯におけるスペクトルを、PFSの波長分解能でH₂O₂とH₂O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1aより362cm⁻¹と379cm⁻¹における2つのH₂O₂吸収線が有効であることがわかる。しかし、両吸収帯ともH₂Oの吸収線の影響をうけるので、同時にH₂Oの量を精度よく決定することが求められる。本解析では、最もH₂O₂に感度があり且つ、H₂Oの影響をうけない、362cm⁻¹を用いた。図1bに同波長帯における詳細な計算結果を示す。図1bより、最も有効な362cm⁻¹でもH₂O₂の吸収の深さはそれほど大きくないことがわかる。H₂O₂の組成比が50ppbの時の362cm⁻¹における吸収の深さは ~ 0.1 [erg s⁻¹cm⁻²sr⁻¹cm⁻¹]である(火星地表温度 \sim 230-260 K)。しかし300-400cm⁻¹帯でのNoise equivalent radiance (NER)は ~ 1 [erg s⁻¹cm⁻²sr⁻¹cm⁻¹]である(Giuranna et al., 2005)。したがって、複数のスペクトルを平均することが必要となる。本解析では、時系列順に2000個のスペクトルデータを平均した。その結果、NERが ~ 0.02 [erg s⁻¹cm⁻²sr⁻¹cm⁻¹]まで落とすことが可能であり、50ppbのH₂O₂をSNR=5で検出可能である。

(3)解析手法

データの校正方法の詳細は省略するが、基本的にはGiuranna et al. (2005)に記述されている方法を用いた。PFSを用いた解析では、H₂O₂のような微量大気成分を扱うための手法はこれまで確立されてきておらず、より高精度のデータ校正・解析手法の確立をPIチームと共同で取り組み続けている。本解析では以下の手順でH₂O₂の組成比を導出した。

- (1) 1250 - 1350 cm⁻¹の平均スペクトル(観測データ)をプランク関数で最小二乗フィッティングして、有効火星値表面温度を導出する。

(2) 300 - 400 cm^{-1} の波長帯のうち分子吸収の存在しない波長において、(1)で導出した地表面温度の黒体放射と平均スペクトル(観測データ)を除法することで、各々の点における相対的な Surface emissivity を計算して、「吸収 0 レベル」の放射スペクトルを導出する。

(3) 326 - 330 cm^{-1} において、 H_2O 気柱量を変数に Levenberg-Marquardt 法を用いて最小二乗フィッティングを行い、 H_2O 気柱量を導出する。

(4) 360 - 365 cm^{-1} において、 H_2O_2 気柱量を変数に Levenberg-Marquardt 法を用いて最小二乗フィッティングを行い、 H_2O_2 気柱量を導出する。

図 2 に、 H_2O_2 気柱量を導出した 2 例のフィッティング結果を示す。図 2a は北半球の春における 2000 平均データ(mean Ls = 38.9 deg.)であり、図 2b は北半球の秋における 2000 平均データ(mean Ls = 188.6 deg.)である。 H_2O_2 の組成比は順に、 87 ± 23 ppb、 26 ± 17 ppb であり、優位な違いがみえることは明白である。

3. 季節変動

上記の方法で 2004 年から 2007 年間の H_2O_2 気柱量の季節変動を調べた。計 139 点の、異なる季節における 2000 平均スペクトルデータを得たが、(1)有効地表面温度 220 K 以上 (2) H_2O_2 気柱量をフィッティングした時の χ^2 が 10 未満、という 2 つの条件から淘汰された信頼性の高い 34 点について議論する。図 3 に得られた季節変動結果を示す。(a) H_2O_2 気柱量、(b) H_2O 気柱量、(c)有効火星地表面温度 Surface emissivity、(d)用いたデータの緯度分布、をそれぞれ示している。

図 3b が示す H_2O 気柱量の季節変動は、 H_2O_2 気柱量を導出する過程で得られた副産物的な結果である。まずこの結果について議論する。 H_2O 気柱量は 1.7 pr- μm から 19.9 pr- μm の変動を示し、平均値は 10.7 ± 4.3 pr- μm であった。この値は、数値計算結果である Mars Climate Database(<http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars.html>)の値(図 3b:点線)と Ls = 200 ~ 360 を除いて、良い一致を示している。また、MGS-TES を用いた観測(Smith, 2002)や MEX-PFS を用いた観測(Fouchet et al., 2007; Tschimmel et al., 2008)とも、気柱量のおおよその値や北半球の春夏において増加する傾向などの点において適合している。

図 3a は H_2O_2 気柱量の季節変動を示している。0 ppb(上限値) から約 100 ppb を示し、平均値は 23 ± 29 ppb であった。この結果は、2004 年から 2007 年において、 H_2O_2 の気柱量は 0 から 50 ppb であることを示しており、これは先行化学モデルによる結果と整合する。同時に、図 3a では、 H_2O_2 気柱量が先行化学モデルでは説明できない、50ppb を超える季節が存在することを示している。この要因として、(1)本データセットにも含まれる、小規模なダストストーム

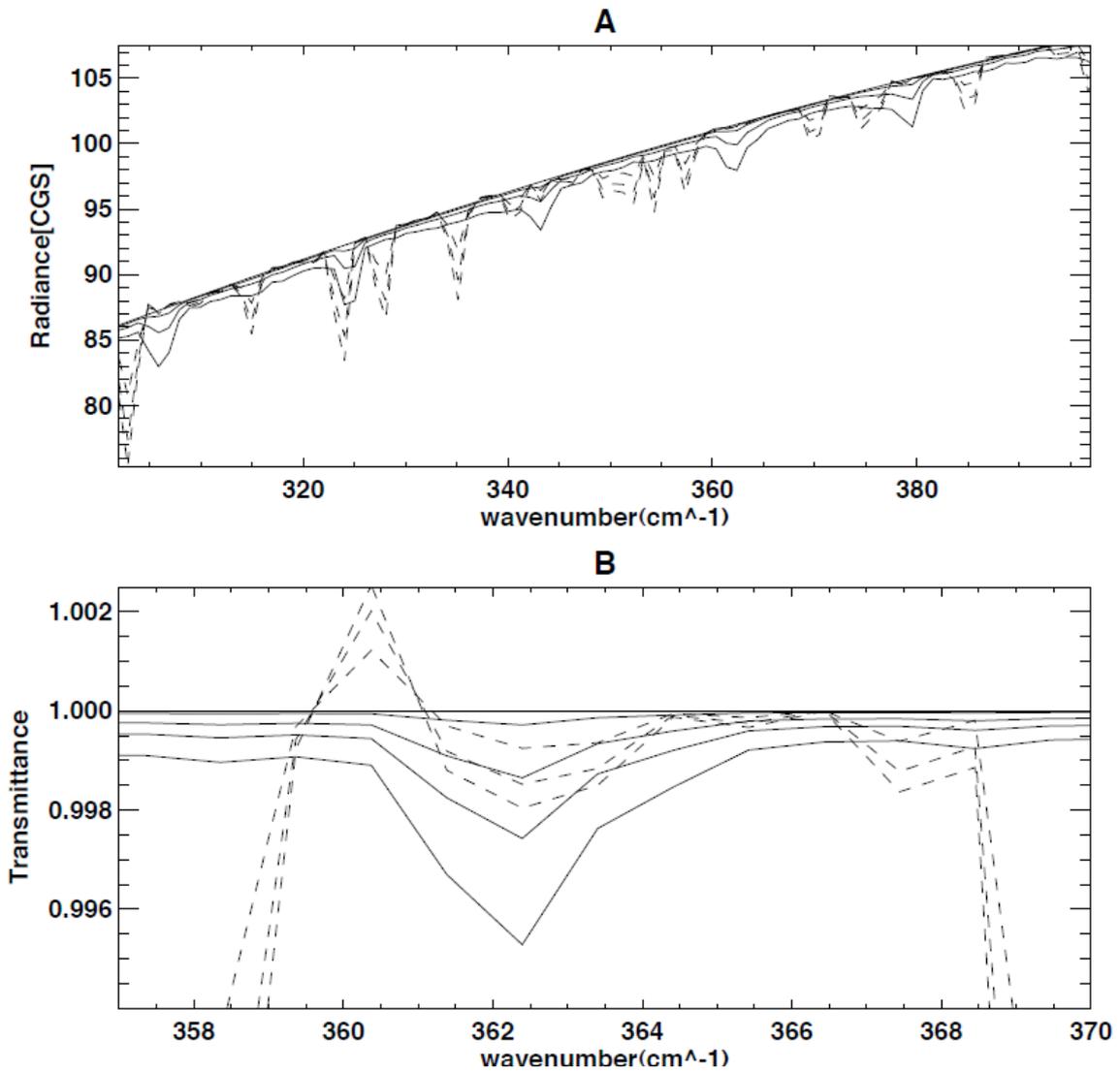
によるダスト帯電に伴う増大、(2)なんらかの理由により蓄積した火星地中の H_2O_2 が大気中に放出している、ことが考えられる。(1)の考察は、2000 平均のうち 50 データにおいて数 ppm まで増大していれば、平均として 50ppb を超える結果となる。この考察に関する詳細なイベント解析を今後行う予定である。(2)の考察は、Viking Life Sciences Experiments (LSE)が示した「反応性の高い地表面」(Mancinelli, 1989)を説明する根拠となり得る。 H_2O_2 のレゴリス中のライフタイムは数年である(Bullock et al., 1994)ことから、 H_2O_2 の空間分布を導出することで、この考察に制約をあたえることができる。

最後に、 CH_4 の季節変動との比較を議論する。本結果では、Geminal et al. (2008)で示された、北半球の春夏から秋冬にかけて減少する CH_4 の年変動と対応した H_2O_2 の年変動はみられなかった。これは、火星大気中の酸化成分は CH_4 の年変動に大きく影響を及ぼさないことを示唆している。今後、両者のより詳しい関連について調べていく。

4. 今後の研究にむけて

本研究は探査機データを用いて、初めて H_2O_2 の全球的かつ連続的な変動を導出した初期報告である。今後、以下に挙げる諸事項を行う予定である。

1. データ校正・解析精度の更なる向上
2. データセットの拡大：高緯度帯の観測データ,ダストストーム時の観測データなど
3. H_2O_2 空間分布の導出、また関連分子($\text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_3, \text{CO}$ など)の空間分布と比較
4. 本解析でみられた H_2O_2 気柱量が 50ppb を超える季節のイベント解析



☒ 1. Synthetic spectra with the spectral resolution of PFS for different mixing ratios of water vapor (dotted line) and hydrogen peroxide (solid line). (A) Synthetic radiance [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{cm}^{-1}$] at 300 - 400 cm^{-1} . The water vapor spectra are with the mixing ratio of 100, 300, and 500 ppm. H_2O_2 spectra are with 200, 1000, and 4000 ppb. (B) Synthetic transmittance at 357 - 370 cm^{-1} . The water vapor is with 100, 300 and 500 ppm. H_2O_2 spectra are with 10, 50, 100, and 200 ppb.

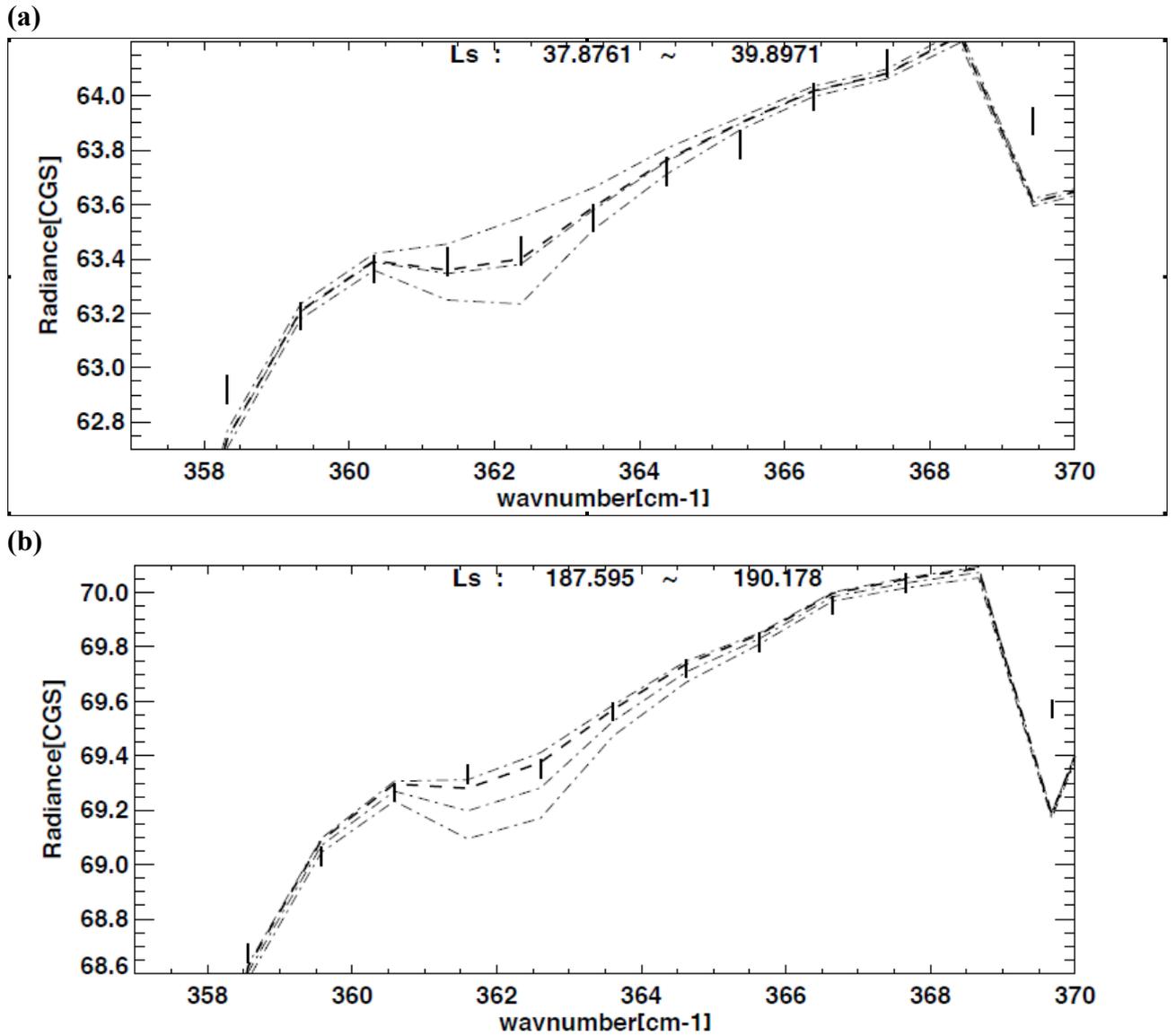
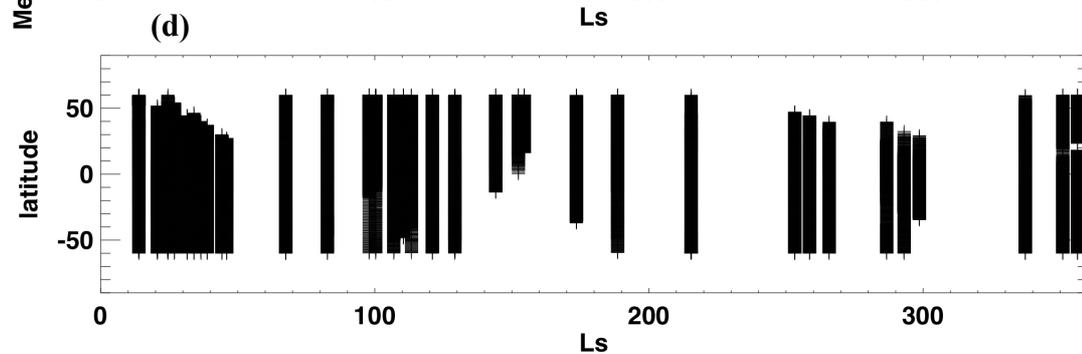
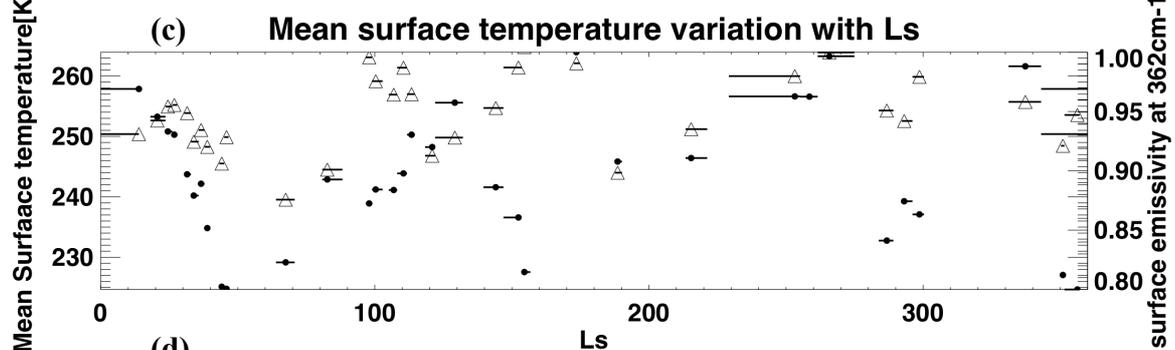
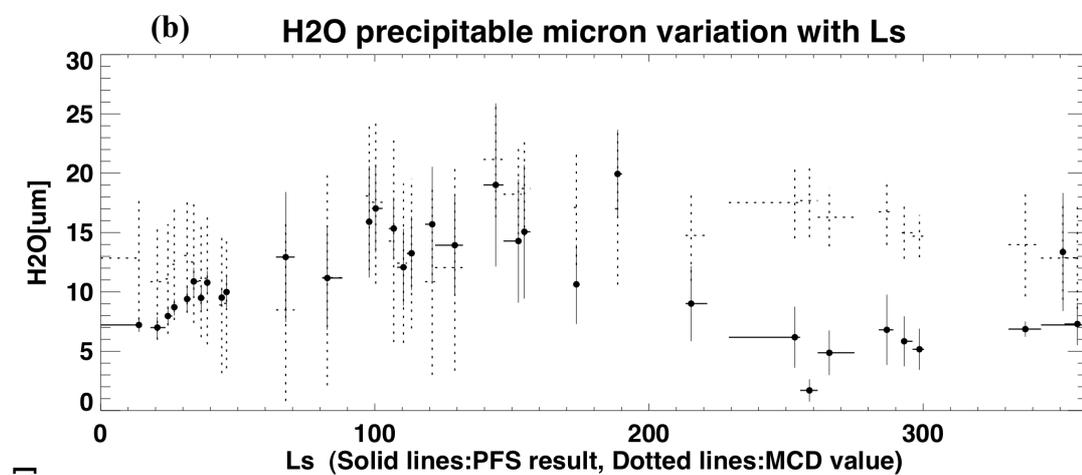
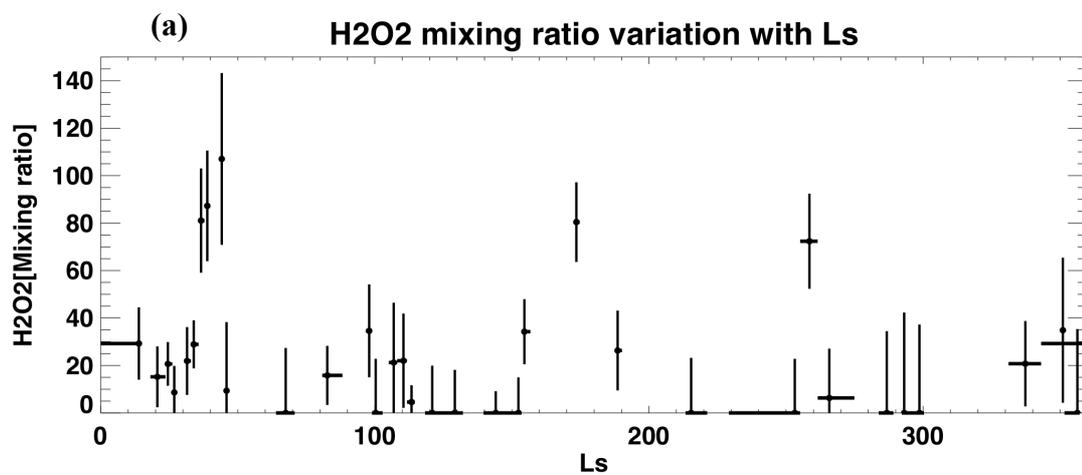


Figure 2. Two examples of averaged spectra with 2000 measurements (a) at northern spring (mean Ls = 38.9 deg.) and (b) at northern autumn (mean Ls = 188.6 deg.). Dashed lines are the synthetic spectra with the H₂O₂ mixing ratio of 0, 100, and 200 ppb. Thick dashed lines are the best fit results, with the H₂O₂ mixing ratio of (a) 87 ± 23 ppb and (b) 26 ± 17 ppb, respectively.



☒ 3. Seasonal variation in 2004 – 2007. X-axis is the solar longitude (L_s). (a) The mixing ratio of H_2O_2 . Y-axis is the mixing ratio [ppb]. The vertical bars are the standard deviation obtained from model fitting. The horizontal bars are the averaged duration. (b) The mixing ratio of H_2O . Solid points are the data associated with the retrieval process. Dotted points are the value from the Mars Climate Database. Y-axis is the mixing ratio [pr- μ m]. The vertical bars are the standard deviation obtained from model fitting. The horizontal bars are the averaged duration. (c) Dots are the mean surface temperature data derived in with the retrieval process. Triangles are the surface emissivity derived in with the retrieval process. (d) Latitudinal distribution of the used data sets.

5.参考文献

- Atreya, S.K., A. Wong, N.O. Renno, W.M. Farrell, G.T. Delory, D.D. Sentman, S.A. Cummer, J.R. Marshall, S.C.R. Rafkin, and D.C. Catling (2006), Oxidant enhancement in Martian dust devils and storms: Implications for life and habitability, *Astrobiology*, 6, 3, 439-450.
- 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.
- Bullock, M.A., C.R. Stoker, C.P. McKay, and A.P. Zent (1994), A coupled soil-atmosphere model of H_2O_2 on Mars, *Icarus*, 107, 142-154.
- 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 H_2O and H_2O_2 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. Saggin, D. Titov, and L. Zasova (2005), The Planetary Fourier Spectrometer (PFS) onboard the European Mars Express mission, *Planet. Space Sci.*, 53, 10, 963-974.
- Fouchet, T., E. Lellouch, N.I. Ignatiev, F. Forget, D.V. Titov, M. Tschimmel, F. Montmessin, V. Formisano, M. Giuranna, A. Maturilli, and T. Encrenaz (2007), Martian water vapor: Mars Express

- PFS/LW observations, *Icarus* 190, 32-49.
- Geminale, A., V. Formisano, and M. Giuranna (2008), Methane in Martian atmosphere: Average spatial, diurnal, and seasonal behaviour, *Planet. Space Sci.*, 56, 9, 1194-1203.
- Giuranna, M., V. Formisano, D. Biondi, A. Ekonomov, S. Fonti, D. Grassi, H. Hirsch, I. Khatuntsev, N. Ignatiev, M. Michalska, A. Mattana, A. Maturilli, E. Mencarelli, F. Nespola, R. Orfei, P. Orleanski, G. Piccioni, M. Rataj, B. Saggin, and L. Zasova (2005), Calibration of the Planetary Fourier Spectrometer long wavelength channel. *Planet. Space Sci.*, 53, 10, 993-1007.
- Lefèvre, F., and F. Forget (2009), Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics, *Nature*, 460, 7256, 720-723.
- Lillis, R., S.W. Bougher, D.L. Mitchell, D.A. Brain, R.P. Lin, and M.H. Acuna (2008), Continuous monitoring of nightside upper thermospheric mass densities in the martian southern hemisphere over 4 martian years using electron reflectometry, *Icarus*, 194, 562-574.
- 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, 1041-1045.
- 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.
- Tschimmel, M., N.I. Ignatiev, D.V. Titov, E. Lellouch, T. Fouchet, M. Giuranna, and V. Formisano (2008), Investigation of the water vapour on Mars with PFS/SW of Mars Express, *Icarus*, 195, 557-575.