

Smith, M. D., Badri, K., Atwood, S. A., Edwards, C. S., Christensen,
P. R., Wolff, M. J., et al. (2022).

EMIRS observations of the aphelion-season Mars atmosphere.
Geophysical Research Letters, 49, e2022GL099636.

<https://doi.org/10.1029/2022GL099636>

火星勉強会

2022/11/16

東京大学 M2 黒須玲

目次

1. 要旨

2. 導入

3. 観測結果

- 概要: ダストオパシティ、大気温度
- 概要: 水氷雲、水蒸気量
- ダストオパシティ
- 大気温度
- 水蒸気量

4. まとめ

1. 要旨

- EMIRS(Emirates Mars Infrared Spectrometer)
 - EMMミッションで運用されている赤外分光器
 - 火星の表面温度・温度プロファイル(～40km)、ダストエアロゾル・水氷雲・水蒸気のカラム存在量の観測が目的
 - 多重散乱を含む線形逆解析ルーチンが開発・最適化されて用いられている
- 運用1年目(2021/5/24, MY36 Ls=49° – 2022/2/24, MY36 Ls=180°)の観測データを紹介
 - 遠日点における典型的な水氷雲
 - 夏に典型的な北極域で最大となる水蒸気量分布と赤道方向への水蒸気の輸送
 - 早い時期に起こった、強いローカルダストストームとその熱応答

2. 導入：熱赤外分光法

- 熱赤外分光法は、下層大気の熱構造やエアロゾルのオパシティ、水蒸気量を見積もるのに有効である
- 赤外分光計
 - Mariner 9 (Conrath, 1975 など)
 - MGS (Conrath et al., 2000; Smith, 2002, 2004 など)
 - MER (Smith et al., 2006 など)
 - Mars Express (Fouchet et al., 2007; Giuranna et al., 2021 など)
 - EMTGO (Guerlet et al., 2022 など)
- マルチバンド熱赤外分光計
 - Viking Orbiter (Kieffer et al., 1977; Tamppari et al., 2003 など)
 - Mars Odyssey (Smith, 2009, 2019 など)
 - MRO (Kleinböhl et al., 2009; McCleese et al., 2010 など)

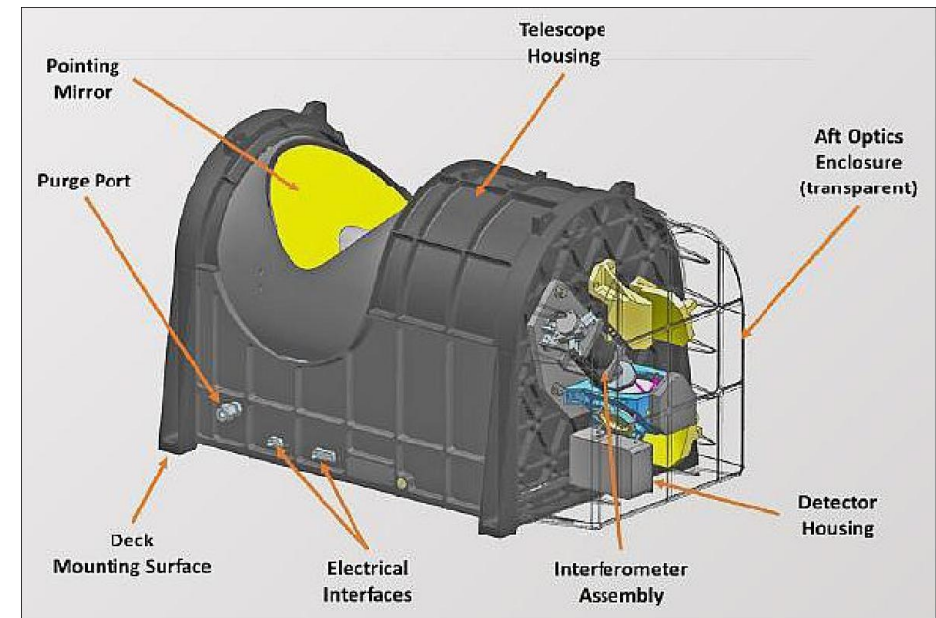
2. 導入: EMIRS

The Emirates Mars Mission (EMM) “Hope” (Amiri et al., 2022):

- 2020年7月にH-IIAにより打ち上げ。アラブ首長国連邦初の惑星探査機ミッション。
 - 高高度軌道（20,000 km x 43,000 km、55時間周期、軌道傾斜角 25° ）からの、火星大気の「全球」「遠隔計測」に特化した3つの機器
1. Emirates eXploration Imager (EXI): UV+VIS, developed by LASP
 2. Emirates Mars Ultraviolet Spectrometer (EMUS): developed by LASP and SSL
 3. **Emirates Mars InfraRed Spectrometer (EMIRS):** developed by ASU
 - 熱赤外スペクトルを観測
 - 2週間未満という短いタイムスケールでの、下層大気の三次元熱状態とその日周変動、下層大気的主要成分の地理分布・日周分布の決定が目的
 - 5cm^{-1} のスペクトルサンプリングで $100\mu\text{m}$ までのデータ取得が可能



UAESA



ASU, MBRSC

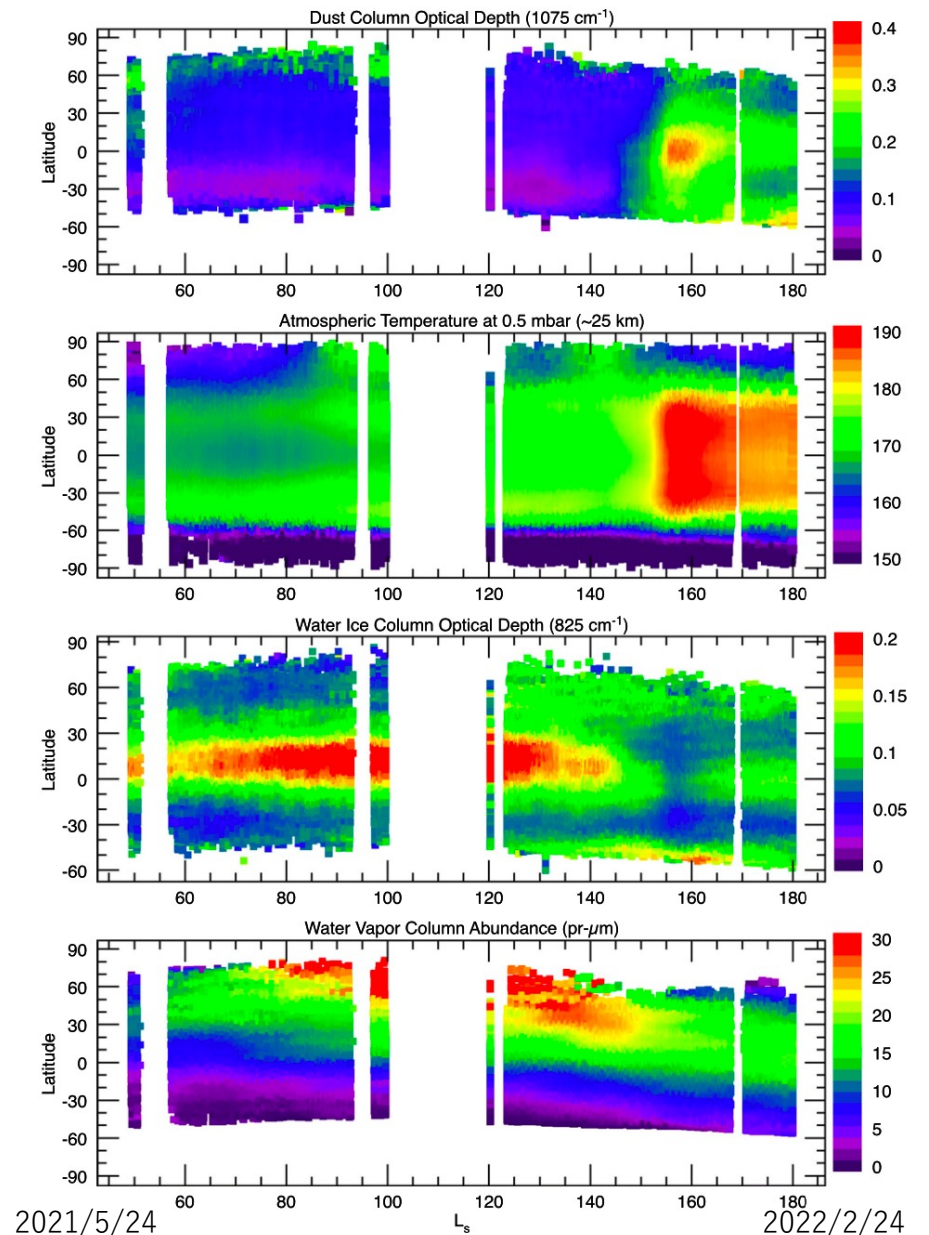
2. 導入: EMIRS

- 各軌道で火星円盤を約20回スキャンし、時間を問わず全球的な図を提供
- 約4周(約10日、Ls=5°)で緯度・経度・ローカルタイムをほぼ網羅
- 最初の1年(2021/5/24, MY36 Ls=49° – 2022/2/24, MY36 Ls=180°)で1500枚のイメージと270000個のデータを取得
- 水氷雲 (Atwood et al., 2022)、熱潮汐 (Fan et al., 2022)についてはすでに報告されている
- ダストオパシティ・水蒸気量の日周変動の解析が進行中

Spectral Range	1666 to 100 cm ⁻¹ , (6-100 μm)
Spectral Sampling	10 cm ⁻¹ & 5 cm ⁻¹
Telescope Aperture	17.78 cm
f/#	f/3.3
Instantaneous Field of View (FWHM)	5.1 mrad (elevation) × 4.6 mrad (azimuth) 5.5 mrad (85% encircled energy)
Field of View (FWHM)	32.5 mrad (elevation) × 32.5 mrad (azimuth)
Scan Field of View	±60 ° around nadir
Detector	uncooled deuterated L-alanine dope triglicine sulfate (DLαTGS) pyroelectric
Detecotor D* (avg for all elements)	9.4 × 10 ⁸ cm Hz ^{1/2} W ⁻¹ at 10 Hz, 22 °C
Detector Responsivity	3606.7 V/W @ 10 Hz, 22°C
NESR	<~2.2 E ⁻⁸ W cm ⁻² sr ⁻¹ /cm ⁻¹ @ 10 cm ⁻¹ sampling
Cycle time per measurment	1.8 s plus 0.2 s scan reversal time (10 cm ⁻¹) 3.6 s plus 0.2 s scan reversal time (5 cm ⁻¹)
Metrology laser self-apodized wavelength (25°C)	0.846 μm
Michelson mirror travel (max)	±0.686 mm
Michelson mirror velocity	0.26 ± 0.013 mm/sec
Sampling Frequency	625 Hz
Number of bits per pixel	16
Number of samples per interferogram	2220±20 (5 cm ⁻¹) 1120±10 (10 cm ⁻¹)
Nominal data volume per collect (2 or 4 seconds)	Housekeeping: 160 bytes Science: 25,874 bytes (9 packets)
In Flight Calibration	2 point calibration, internal v-groove target & spacelooks
Calibration Target Emissivity	0.98±0.005
Thermal requirments	Performance in Specification: +10 °C to +40 °C Allowable Flight Operational Range: -10 °C to +45 °C Nonoperational proto-flight survival range: -20°C to +55°C
Solar protection	Autonomous pointing mirror stowed
Mass	14.715 kg (including interface adapter plate)
Power	Average Operational: 22.24 W Standby: 18.6 W Operational Heater: 5.7 W
Dimensions	52.91 cm × 37.54 cm × 34.57 cm

3. 観測結果: Ls plot

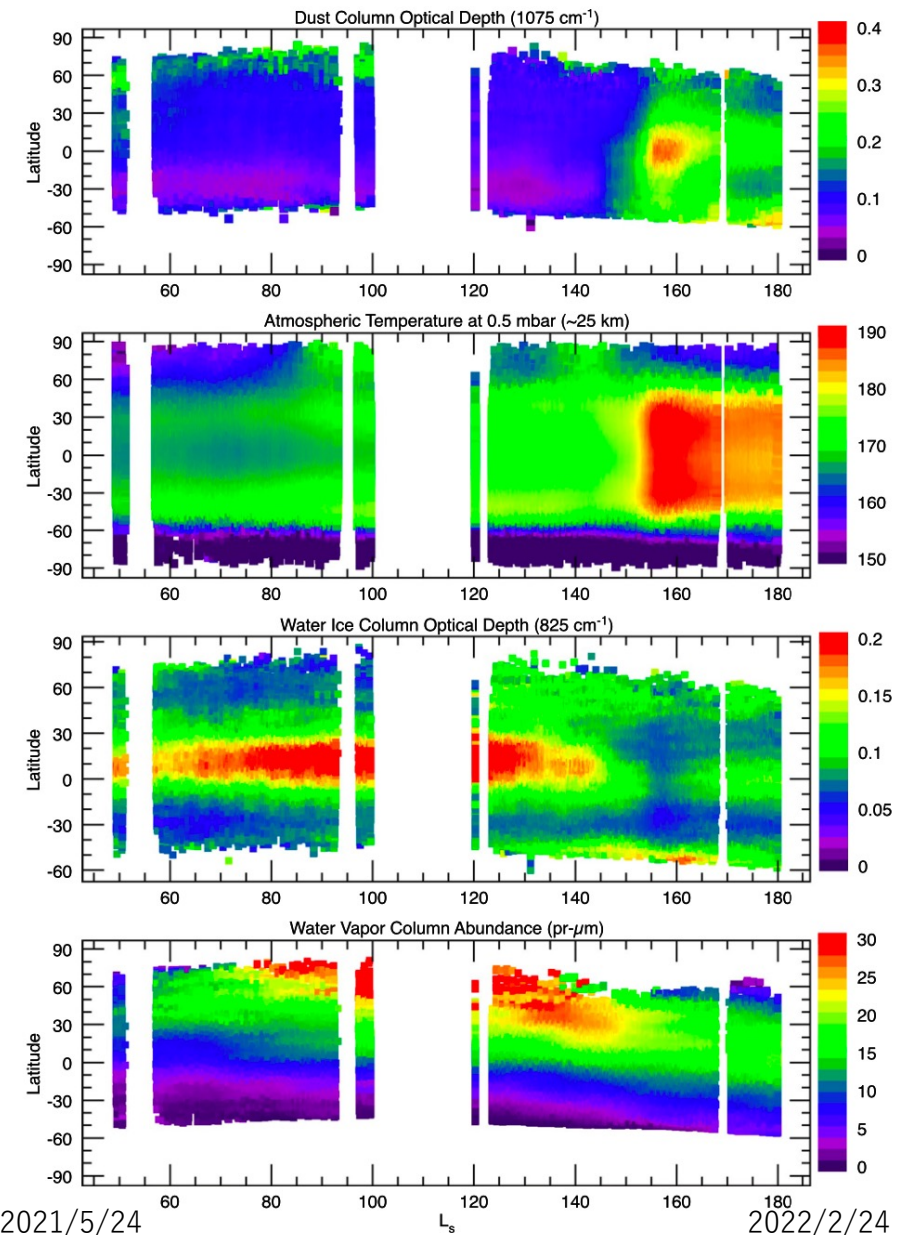
- ダストオパシティ:
 - この時期に年間最小値を記録 (~ 0.1)
 - 北半球高緯度域では $0.2 \sim 0.3 \rightarrow L_s \sim 80^\circ$ にかけての極冠の後退に伴うエッジでのローカルダストストームの発生 (Cantor et al., 2001 など)
 - $L_s 145^\circ$ でダストが増加 $\rightarrow L_s 150^\circ$ からのダストストームの前兆
 - ダストシーズンに向けてダストオパシティが上昇(南部で顕著)
- 大気温度
 - 南半球は低温(冬なので)
 - 遠日点($L_s 71^\circ$)を過ぎると徐々に上昇
 - ローカルダストストームに伴って急速に温暖化 $\rightarrow$ その後ダストの沈降とともに徐々に冷却
 - 中緯度帯で最大 $\rightarrow$ 中緯度で下降する大循環を表している
- $L_s 100 \sim 120$ のデータ欠損は合とセーフモードのタイミングが重なった期間
- 緯度 $2^\circ \times L_s 5^\circ$ のボックスで平滑化



The seasonal and latitudinal variation of (a) dust column-integrated optical depth, (b) atmospheric temperature at 0.5 mbar (~ 25 km), (c) water ice cloud column-integrated optical depth, and (d) water vapor column abundance ($\text{pr-}\mu\text{m}$) as retrieved from EMIRS daytime ($\sim 07:00\text{--}18:00$) observations.

3. 観測結果: Ls plot

- 水氷雲カラムオパシティ:
 - 春～夏にかけては低緯度で雲が発達Ls 100° - 120° で最大、Ls 130° から著しく減少 (Atwood et al., 2022)
 - ローカルダストストームの発生時にはかなり激しく低下し、ダストの沈降とともに回復
 - Ls 120° ～では極域で発達
- 水蒸気カラム存在量
 - 北半球では高緯度域で最大、その後赤道側に輸送
 - ピークは観測できず (データ欠損と、EMMの軌道の傾きに起因する極域観測の困難さから)
 - 水蒸気量は輸送されながら減少
 - ダストストームの影響は確認されず
- Ls 100～120のデータ欠損は合とセーフモードのタイミングが重なった期間
- 緯度2° × Ls5° のボックスで平滑化



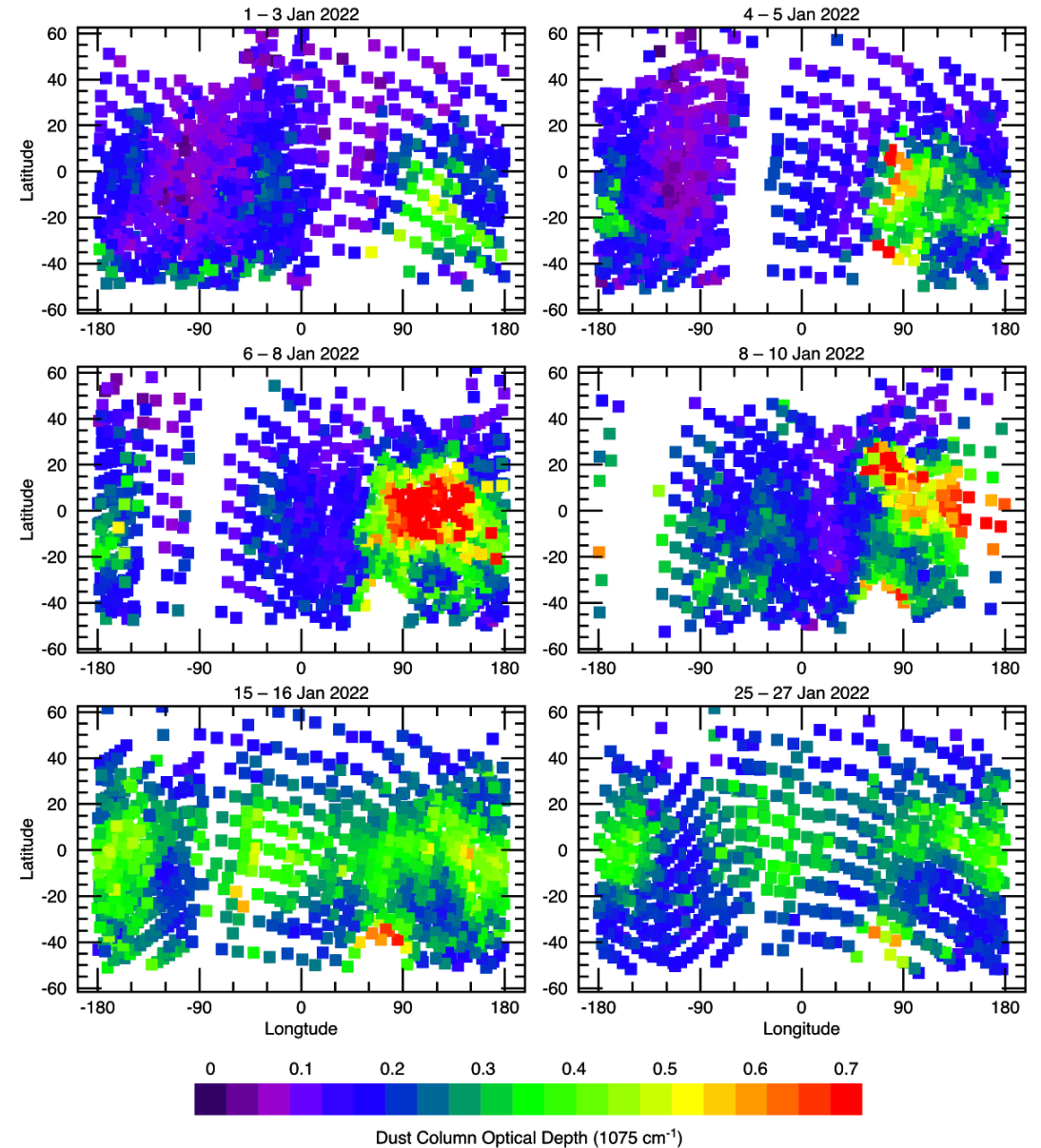
The seasonal and latitudinal variation of (a) dust column-integrated optical depth, (b) atmospheric temperature at 0.5 mbar (~25 km), (c) water ice cloud column-integrated optical depth, and (d) water vapor column abundance (pr- μm) as retrieved from EMIRS daytime (~07:00–18:00) observations.

3. 観測結果: dust opacity

ダストストーム:

- 2022年1月に活発
- 東側中南緯度から数日間で低緯度帯へ北上しながら発達
- ピーク時(Ls 154°)には中心部でダストオパシティが1以上を記録
- 例年に比べ早い発生だが、MY27, 29, 32でも同時期に観測
 - ハドレー循環のreturn branchが南半球で経度方向に非一様 -> 東側では子午面風が強いため、本観測のような規模まで発達しうる
- ダストは約1週間で経度方向に均されたが、1月末 (Ls 164°) になってもダストストーム前の水準までは戻らなかった

- ※平滑化していない

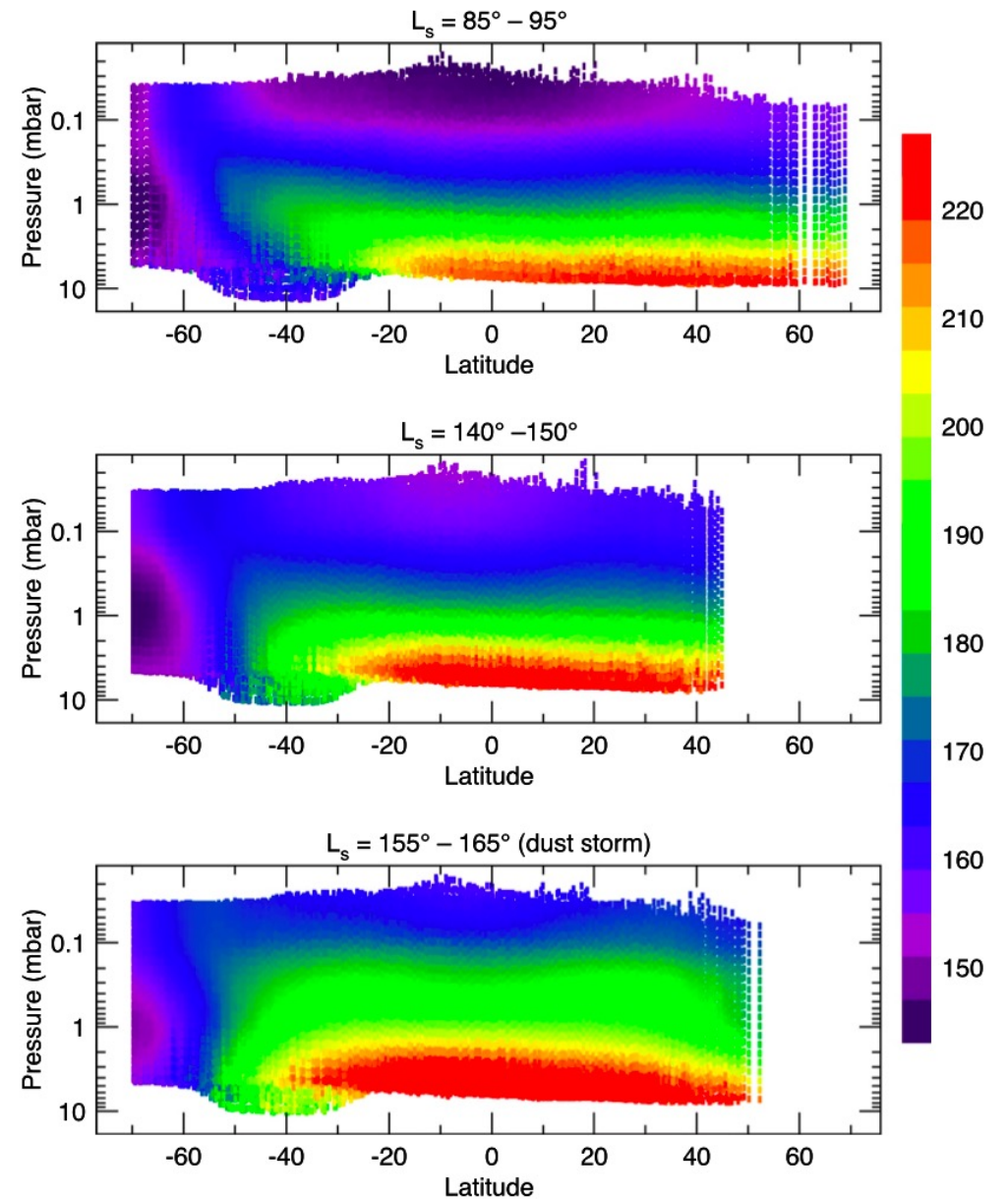


Maps of 9-μm dust optical depth retrieved from EMIRS observations showing the initiation, growth, and decay of a regional dust storm. Each point on the map represents an individual EMIRS retrieval and there is no smoothing or scaling for topography performed. The season covered here is from Ls = 151° -164° .

3. 観測結果: Temperature

大気温度分布: 上から夏至、真夏、ダストストーム中の図

- 上2つは典型的な遠日点での熱構造
 - 北半球は夏なので太陽加熱は最大、緯度方向の温度勾配は小さい
 - 南半球極域は寒く、CO₂の霜点にまで達する
 - 赤道付近のハドレー循環による断熱加熱が極付近上空に暖気を送り込み、前線を形成する
- ダストストームの直前と最中では温度構造に変化が見られた
 - 0.5mbar (25km)以上の高度ではダストによる直接加熱で温度が約20K上昇した
 - 地表付近の大気温度は変化がなく、地表温度は冷却されている -> 過去の研究と一致(Kleinböhl et al., 2020; Smith et al., 2002; Wolkenberg et al., 2020など)

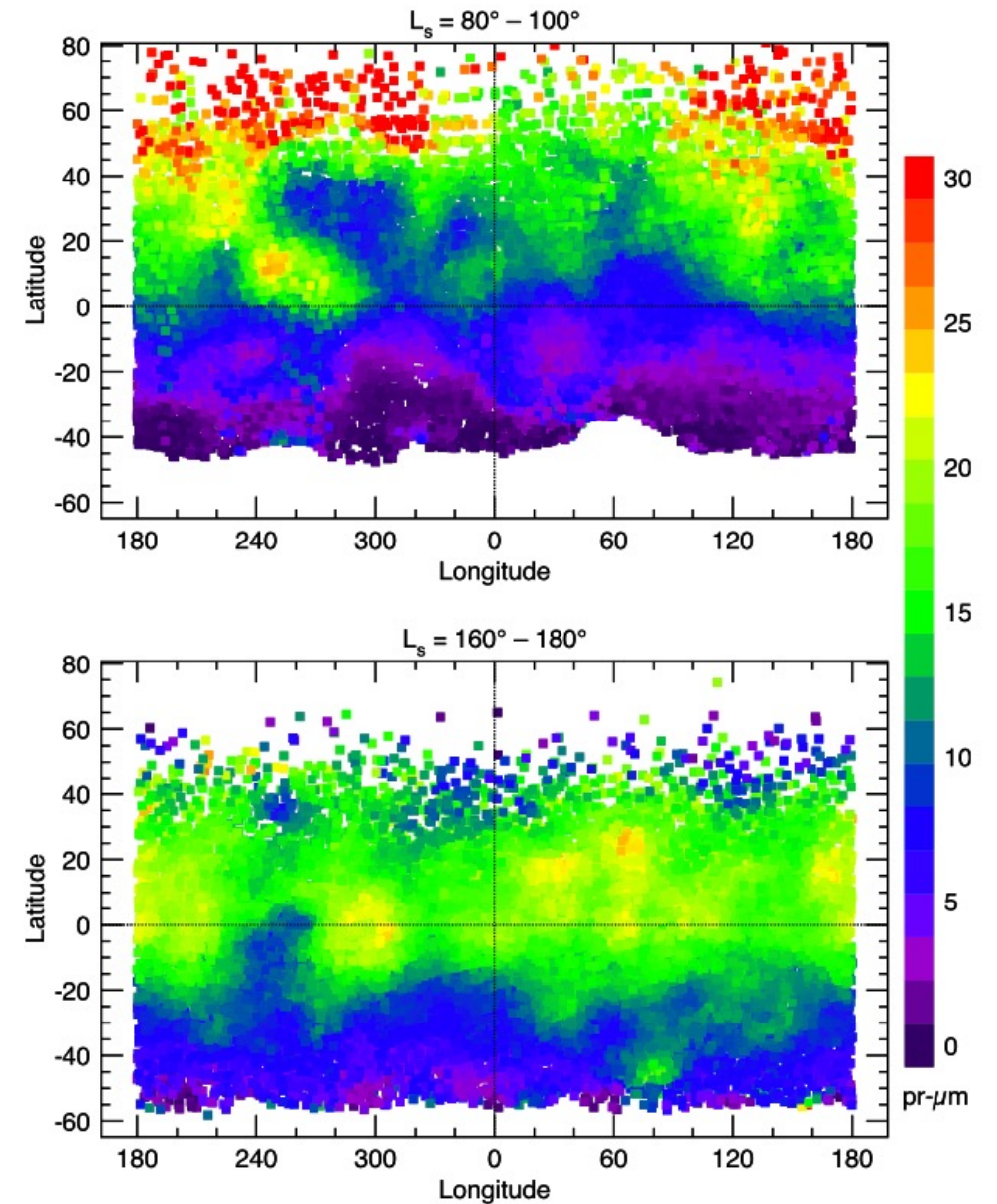


Latitude-pressure cross-sections of daytime (12:00–16:00 LTST) atmospheric temperatures retrieved from EMIRS observations for three different seasons: (a) $L_s = 85^\circ - 95^\circ$ at northern hemisphere solstice, (b) $L_s = 140^\circ - 150^\circ$, just before a regional dust storm, and (c) $L_s = 155^\circ - 165^\circ$ during the regional dust storm.

3. 観測結果: Water vapor

水蒸気のカラム存在量: 緯度 10° × 経度 20° で平滑化

- 上: 夏至の期間
 - この時期に典型的な強い南北勾配 (極冠から昇華した水蒸気)
北極域では $\sim 30 \text{ pr-}\mu\text{m}$ 、南極域では $\sim 5 \text{ pr-}\mu\text{m}$
 - 経度依存性は地形と相関がある
 - 表面アルベドとは弱い正の相関、熱慣性とは負の相関あり -
→ 地表面相互作用が水蒸気分布に作用している可能性
- 下: ダストストーム後
 - 最大点が赤道のすぐ北まで南下し、平均値は $15 \text{ pr-}\mu\text{m}$ 程度
 - 南半球の水蒸気量は増加し、中緯度では $5 \sim 10 \text{ pr-}\mu\text{m}$
 - 経度依存性と地形・アルベド・熱慣性との関係は夏至の期間より小さくみえる



Maps of the column abundance of water vapor retrieved from EMIRS observations for two seasons: (a) $L_s = 80^\circ - 100^\circ$ at northern hemisphere solstice, and (b) $L_s = 160^\circ - 180^\circ$ at the end of northern summer. There has been no scaling for topography performed here.

4. まとめ

- EMIRSの熱赤外スペクトルから、大気温度プロファイル、ダストと水氷のエアロゾルオパシティ、水蒸気のカラム存在量を求めた。
- 熱構造や、エアロゾルと水蒸気の空間変動は、ほぼ予想通りだった。
 - 北半球でダストが多い緯度帯があり、強いローカルダストストームが早い時期(Ls 154° でピーク)に見られた。
 - 大気温度は南半球では低く、遠日点を過ぎると徐々に暖まった。ローカルダストストームに応答して20Kほど上昇した。
 - 水氷雲は低緯度で多く、Ls 120° 以降では高緯度帯でも広範囲に広がっていた。
 - 水蒸気量は夏至の北半球高緯度帯で最大となり、その後赤道方向に輸送されている様子が観測された。
- EXIとEMUSの観測から得られた結果と関連づけて、火星待機に作用する基礎的な物理過程の理解を深め、大循環モデルの検証や調整に役立つはず
- ダストシーズンの観測が楽しみ！

アルゴリズム

- 線形反転アルゴリズム (Conrath et al., 2000 <https://doi.org/10.1029/1999JE001095> and Smith et al., 2006 <https://doi.org/10.1029/2006JE002770>) を用いて以下の大気状態パラメータを取得
 - 地表温度
 - 温度プロファイル (地表面～40km)
 - ダストエアロゾル・水氷エアロゾルのオパシティ
 - 水蒸気のカラム存在量
- 球面形状の影響は無視
- HITRAN2020データベースと相関k近似を用いてCO₂と水蒸気からの吸収を考慮
 1. 15 μ m等の強いCO₂吸収から表面温度と大気温度プロファイルを求める
 2. CO₂バンド以外のスペクトルを用いてエアロゾルのオパシティと表面温度を精緻化する
 3. 29~50 μ mの回転バンドから水蒸気存在比を計算
- ※地表面気圧はLs、緯度、経度、現地時間、EMIRSの地表面視野の大きさを用いてMCDから取得