

R009-31

A 会場 : 11/25 PM1 (13:45-15:45)

14:15~14:30:00

OMEGA/MEx の 2.77 μ m と 2.01 μ m を用いた火星高高度・低高度ダストの分類と広域解析

#風間 暁¹⁾, Leseigneur Yann²⁾, Gautier Thomas^{2,3)}, 青木 翔平⁴⁾, 笠羽 康正¹⁾, 中川 広務¹⁾, 村田 功¹⁾

(¹⁾ 東北大学, (²) LATMOS/IPSL, (³) LIRA, Observatoire de Paris, (⁴) 東京大学

Classification and Global Analysis of High- and Low-Altitude Dust on Mars Using 2.77 μ m and 2.01 μ m from OMEGA/MEx

#Akira KAZAMA¹⁾, Yann Leseigneur²⁾, Thomas Gautier^{2,3)}, Shohei AOKI⁴⁾, Yasumasa KASABA¹⁾, Hiromu NAKAGAWA¹⁾, Isao MURATA¹⁾

(¹) Tohoku University, (²) LATMOS/IPSL, (³) LIRA, Observatoire de Paris, (⁴) The University of Tokyo

Martian dust plays a crucial role in climate and meteorology through horizontal and vertical transport in the atmosphere. Previous nadir observations in the ultraviolet, visible, and infrared wavelengths provided insights into the dust horizontal distribution (e.g., Smith et al., 2001; Montabone et al., 2015; Battalio and Wang, 2021; Leseigneur and Vincendon, 2023). Previous solar occultation and limb observations provided valuable information on dust vertical distribution, but uncertainties persist regarding its spatial variability and transport mechanisms. Conventional limb and solar occultation observations can retrieve dust altitude information directly, but their spatial and temporal coverage is limited. This study aims to obtain new insights into the dust vertical distribution by applying the spectral synergy method to nadir observations.

The spectral synergy method estimates the altitude of atmospheric constituents by leveraging differences in absorption characteristics at multiple wavelengths (Pan et al., 1995; Pan et al., 1998; Edwards et al., 2009). This method is applied in Earth remote sensing for retrieving the vertical distributions of CO₂ (Christi & Stephens, 2004), O₃ (Landgraf & Hasekamp, 2007), and CH₄ (Razavi et al., 2009) and has recently been used to analyze water vapor in the Martian atmosphere (Knutsen et al., 2022). However, no studies have applied this approach to Martian dust yet.

To address this gap, we propose a new method to estimate the vertical distribution of dust using dust optical depth (DOD) data at two wavelengths (2.77 μ m and 2.01 μ m) obtained by the OMEGA near-infrared imaging spectrometer onboard Mars Express. The 2.77 μ m band in the CO₂ saturated absorption region, with sensitivity to altitudes around ~30 km, and its corresponding DOD database is described in Kazama et al. (under review). The 2.01 μ m band is a weaker CO₂ absorption band with a sensitivity peak at 10 – 20 km (Leseigneur & Vincendon, 2023). We calculated a normalized difference index ($\Delta \tau_{\text{norm}}$) between the DOD at the two wavelengths and classified dust clouds with $\tau > 1.5$ into “high-altitude” (≥ 30 km) and “low-altitude” (≤ 20 km) categories. Radiative transfer simulations using the DISORT model (Stamnes et al., 1988) demonstrated that a threshold of $\Delta \tau_{\text{norm}} > 0.6$ effectively distinguishes dust layers with centroid altitudes above and below ~30 km.

Applying this method to ~4,000 observations from MY27 – 29, including the MY28 global dust storm, revealed pronounced seasonal and spatial variations in dust vertical distribution. High-altitude dust was frequently detected over Hellas Basin, Acidalia – Chryse Planitia, and around the Amazonis region, suggesting that these areas are “hotspots” where local circulation and topographic effects promote vertical dust transport. In contrast, low-altitude dust was found to be widely distributed across Mars, indicating the persistent presence of background dust near the surface. Interestingly, in the region south of Elysium, despite being a major dust storm pathway (Battalio & Wang, 2021), high-altitude dust was not detected, and low-altitude dust dominated. This suggests the existence of mechanisms that inhibit dust lofting into the upper atmosphere for certain storms.

Moreover, high-altitude dust tended to appear and disappear within only a few degrees of solar longitude, whereas low-altitude dust exhibited more stable distributions. This implies that high-altitude transport is driven by short-timescale dynamical processes such as thermal convection, while low-altitude background dust remains in the atmosphere for longer periods. During the MY28 global dust storm, high-altitude dust persisted over a broader latitude range (60° S – 60° N) and for a longer duration than in quiescent periods, indicating global-scale vertical transport.

Our method provides a new large-scale diagnostic for dust vertical distribution that is effective even when high-resolution vertical profiles are unavailable, offering valuable constraints for understanding dust transport and its interactions with atmospheric circulation.

火星のダストは、大気中での水平および鉛直方向の輸送を通じて火星の気候に大きな影響を与える重要な要素である。これまでの紫外・可視・赤外の直下視観測によって、ダストの水平分布に関する知見は広く得られている (e.g., Smith et al. 2001; Montabone et al., 2015; Battalio and Wang, 2021; Leseigneur and Vincendon, 2023)。一方で、鉛直方向のダスト分布については、太陽掩蔽観測やリム観測により一定の情報が得られているものの、その水平方向の広がりや輸送メカニズムには依然として不明な点が多い。従来のリム観測や太陽掩蔽観測では、ダストの高度情報を直接取得できるが、時間・空間分解能が限られるという課題があった。本研究では、直下視観測におけるスペクトルシナジー法を活用し、ダストの鉛直分布に関する新たな知見を得ることを目的とする。スペクトルシナジー法とは、異なる波長での吸収特性の違い

を利用することで、直下視観測から大気成分の高度情報を推定する手法である (Pan et al., 1995; Pan et al., 1998; Edwards et al., 2009)。この手法は地球観測において CO₂ (Christi & Stephens, 2004) や O₃ (Landgraf & Hasekamp, 2007)、CH₄ (Razavi et al., 2009) の高度分布推定に活用され、近年では火星大気中の水蒸気分布解析にも適用されている (Knutsen et al., 2022)。しかし、火星のダストに対して適用する試みは未だに行われていない。

本研究ではこの課題を克服するため、Mars Express に搭載された近赤外分光撮像装置 OMEGA によって取得された 2 つの波長帯 (2.77 μ m と 2.01 μ m) のダスト光学的厚さ (DOD) を用いた新しい鉛直分布推定手法を提案する。高度約 30 km に感度を持つ 2.77 μ m の CO₂ 吸収飽和帯を用いた DOD データベース (Kazama et al., under review) と、10 – 20 km に感度ピークを持つ 2.01 μ m の CO₂ 吸収帯を用いた DOD データベース (Leseigneur and Vincendon, 2023) を利用した。2.01 μ m と 2.77 μ m の DOD から規格化差分指標 ($\Delta \tau_{\text{norm}}$) を計算し、 $\tau > 1.5$ のダスト雲を「高高度 (≥ 30 km)」と「低高度 (≤ 20 km)」に分類した。放射伝達モデル DISORT (Stamnes et al., 1988) を用いたシミュレーションにより、 $\Delta \tau_{\text{norm}} > 0.6$ という閾値が、ダスト重心高度が約 30 km を境に高低を分ける有効な指標であることを実証した。

この手法を MY27 – 29 (MY28 全球ダストストームを含む) の約 4000 観測に適用した結果、ダスト鉛直分布の季節的・空間的変動が明らかになった。高高度ダストはヘラス盆地、アシダリア・クリュセ平原、マゾニス周辺に頻繁に検出され、これらの地域が局所的な大気循環や地形効果により鉛直輸送が促進される「ホットスポット」である可能性が示唆された。一方、低高度ダストは火星全球に広く分布しており、背景ダストが常時低高度に存在していることを示している。興味深いことに、エリシウム南側ではダストストーム主要経路 (Battalio and Wang, 2021) にもかかわらず、高高度ダストはほとんど見られず低高度ダストが優勢であった。これは特定のストームが上層大気へダストを輸送しにくいメカニズムの存在を示唆する。さらに、高高度ダストは Ls 数度程度の短期間で出現・消失する傾向があるのに対し、低高度ダストはより安定した分布を示した。これは、高高度輸送が熱対流などの短周期的動的プロセスに駆動される一方、低高度の背景ダストは長期間大気中に滞留することを示す。また、MY28 の全球ダストストーム期間には、高高度ダストが南緯 60° から北緯 60° まで平穏期より広い緯度範囲で長期間持続し、全球規模での輸送が生じていた。

本手法は、高解像度鉛直プロファイルが得られない場合でも、ダスト輸送や大気循環との相互作用の解明に有効な広域指標を提供する可能性がある。