OMEGA/Mars Express: A new Martian atmospheric dust hunter Leseigneur & Vincendon (2023)

doi: <u>https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115366</u>

2023/10/26 第91回火星勉強会 東北大/東京大 風間 暁

Contents

Abstract

1- Introduction

2- Data

- 2.1- OMEGA
- 2.2- Data filtering

3- Method

- 3.1- Overview
- 3.2- Calculation of CO2 optical depth
- 3.3- Calibration of clear atmosphere CO2 optical depth
- 3.4- Dust optical depth calibration using Mars exploration rovers

4- Result & discussion

- 4.1- Global seasonal map
- 4.2- Comparison with previous thermal IR studies
- 4.3- Particle size variations during MY28 GDS
- 4.4- Search for MY28 GDS precursory signs
- 4.5- Link with RSL

5- Summary & conclusion

Abstract

ABSTRACT

■ OMEGAのNIRデータセットを使用したダストをリトリーバルする手法の開発 → OMEGAのCO₂ 2µm吸収帯から導出

■ MY28のGDS(2007)を含む火星年3年以上のデータをカバー → 2007年GDSの前後を含む3年間のダストを導出

■ 熱赤外線と近赤外のdust optical depth比の平均は1.8 → ダスト粒子サイズに関連して変動する

■北半球におけるダストとRSLの相関関係を示す

1. INTRODUCTION

[General introduction]

- ダストは重要なパラメーター
- ダストは表面の熱反応と大気循環に大きく影響
- ・大気中のダストの粒径分布有効半径は1µmから2µmで構成
- ・ダスト運動には特定の季節性がある

1. INTRODUCTION

【ダストストームについて】

- ・ダストストームは局所的(<2000 km)なものから地域的なものまで発生
- ・いくつかはGDSに成長する
- Ls 0°~150°は晴天の季節
 → いくつかの嵐、北極と南極の縁で発生
- Ls 150°~360°はダストシーズン
 → ほとんどの緯度でダストストームが頻繁に観測される
- ・GDSは不規則な年間変化

→ Ls 180°に発生:2001 GDS (MY25), 2018 GDS(MY34) Ls 260°に発生:2007 GDS (MY28)

1. INTRODUCTION

【ダストとRSLの関連性】

- RSLは火星の急斜面にみられる季節的なdark flows
 →下方に伸びる活動期と段階的に消える消失期が存在
- ・局所的なRSL活動のタイミングは、全球ダストサイクルに関係する可能性
- ・主要なRSLは、南半球の夏に発生、GDS崩壊後に多く存在

1. INTRODUCTION

【これまでのダスト観測】

- 可視カメラ:成長と動き
- ・熱赤外分光器(9µm):ダストの光学的深さを取得
- リム観測:ダストの鉛直分布を制約
- •近赤外線観測:OMEGA/MEx、CRISM/MRO

【この研究】

• OMEGAの観測データからダストのoptical depthを導出



[OMEGA/Mars Express]

- OMEGA/MExは2003年12月から稼働 (2004年から2010年まで観測)
- ・平均的空間分解能:~1km (MExの位置によって0.3-4kmで変動)
- スペクトル範囲:0.38-5.1 μm
 - → C channel(0.93 2.73 µm)とL channel(2.53– 5.1 µm)を使用
- CO₂ 2 μmの吸収を大気中のダスト含有量の関数として導出

2.2. Data filtering

2. DATA

- Artefactsを除去するために以下の閾値と定義を使用
- 2 μmに影響を与える可能性のデータに注意 (H₂O、CO₂のice cloudなど)

Table 1

Description of data filtering criteria. *R* is the reflectance factor: $I/(F \cos(i))$. Data quality is an index (integer between 1 and 5, respectively lowest and highest quality, see OMEGA software "SOFT10" documentation for more details) that evaluates the quality of the OMEGA observations. (Note that before the orbit 1900, the data quality value 3 corresponds to 5 for the rest of the dataset.)

Description	Formulation	Detection threshold	Comments
H ₂ O (1.5 μm)	$1 - R(1.500 \ \mu m) / (R(1.385 \ \mu m)^{0.7})$	0.01	Values > 0.01 present water ice.
Ice clouds index	R(3.400 µm)/R(3.525 µm)	0.70	Values < 0.70 present water ice clouds
Polar cap edge	Kieffer et al. (2000), Kieffer	/	3° latitude margin is added.
	and Titus (2001), Titus (2005)		
Incidence (i)	Data	80°	Pixels with $i < 80^{\circ}$ are considered.
Emergence (e)	Data	10°	Pixels with $e < 10^{\circ}$ are considered.
Data quality	Data	4	Data quality ≥ 4 are considered.

2.2. Data filtering

2. DATA

[filtering factor]

- 季節的な極冠付近、capを除去
 → 熱赤外観測データを使用して、氷の空間的分布を評価
- 1.5 µmと3 µmの水氷バンドを使用して、水氷を識別
 →約1%という閾値
- Nadir観測のみ考慮(EA < 10°、SZA < 80°)

→ジオメトリの制約はほぼなし

3.1. Overview

С

3. METHOD

2μm CO2吸収帯よりダストの識別方法を開発

- クリアスカイだと吸収線は深くなる
 【CO2 optical depthの定量化】
- OMEGAによって観測された光学的深さ: τ_{obs}
- ・理論的なクリアスカイの光学的深さ:
 ^T red
- その差:Δτ = τ_{pred} τ_{obs}
- Mars Exploration roversの較正ツールより与えられる光学的深さ:τ_{dust}
 τ_{dust} = f (Δτ)





PAGE 11

3.2. Calculation of CO₂ optical depths

3. METHOD

• CO₂ optical depthを式3で計算

$$\frac{R(2.01 \,\mu\text{m})}{R_0} = e^{-\tau_{obs}} \quad (3)$$

・クリアスカイ時に予測されるCO2吸収量を使用して、optical depthを計算

$$\tau_{pred} = \alpha P \times \left(1 + \left(\frac{1}{\cos(i)}\right)^d\right) \times f(Alb)$$
 (6)

3. METHOD

式6の校正には、57個のOMEGA観測を使用(表2)

Table 2

OMEGA calibration data used to characterise the three CO_2 optical depth dependencies with the corresponding range widths for each one (\forall : all values are considered).

Dependency	Cubes	Pressure range	Albedo range	Incidence range
Albedo	2133_5,5396_2,5450_2	$\Delta P \leq 10$ Pa	A	$\Delta i \leq 3^{\circ}$
Incidence	0049_0,0097_0,0103_3,0243_3,0248_2,	$\Delta P \leq 10$ Pa	$\Delta Alb \le 0.10$	A
	0308_2,1170_3,1533_2,2432_0,2436_1,			
	2526_1,3639_2,5398_2,5450_2,6486_5,			
	7267_3,7287_3,7287_4,7288_2,7290_3,			
	7290_4,7294_3,7303_3,7306_4,7310_2,			
	7324_3,7327_3,7330_3,7334_3,7365_3,			
	7366_4,7370_3,7393_4,7422_3			
Pressure	0049_0,0097_0,0103_3,0243_3,0248_2,	A	A	A
	0270_3,0286_3,0308_2,1143_3,1150_3,			
	1170_3,1183_3,1238_2,1510_5,1533_2,			
	2133_5,2245_4,2256_4,2432_0,2436_1,			
	2526_1,3198_3,3220_1,3262_2,3345_2,			
	3639_2,3674_2,3685_2,5396_2,5398_2,			
	5450_2,5692_2,5814_2,6486_5,7267_3,			
	7287_3,7287_4,7288_2,7290_3,7290_4,			
	7294_3,7303_3,7306_4,7310_2,7324_3,			
	7327_3,7330_3,7333_3,7334_3,7337_3,			
	7365_3,7366_4,7370_3,7392_4,7393_4,			
	7422_3,7907_3			

3. METHOD

アルベドの計算(3軌道を使用): f(Alb)



●入射角の計算(34軌道を使用): exp(d)



PAGE 14

3. METHOD

 ・ 圧力の計算 (57軌道を使用): α

 圧力はMCD v4.1より評価



3. METHOD

● 式8の導出

$$\tau_{pred} = \alpha P \left(1 + \left(\frac{1}{\cos(i)} \right)^d \right) \times \frac{A_{max}}{1 + \left(\frac{A_{max}}{A_0} - 1 \right) e^{-k \times Alb}} + b (8)$$

Table 3

Parameters values for Eqs. (6), (7) and (8).

Parameters	Values		
α	7.39×10^{-4}		
d	5.29×10^{-1}		
A _{max}	1.03		
A_0	8.44×10^{-1}		
k	1.26×10^{1}		
b	-2.39×10^{-2}		

3.4. Dust optical depth calibration using Mars exploration rovers

3. METHOD

Spirit, Opportunity

Pancam@0.88 µmを使用して、ダストの光学的深さを計算 [Lemmon et al. (2015)]

→ これをground truth τ_{MER} として、 $\Delta \tau_{CO2} / \tau_{pred}$ と比較する

MERに近い場所:OMEGA 38観測データを使用

• Spirit: 173°-177°E、12°-17°S

-2から-1.7kmの高度のみ使用

• Opportunity : 353.5°-355.5°、1.7°-2.7°S

-1.58から1.38 kmの高度のみ使用

3.4. Dust optical depth calibration using Mars exploration rovers

3. METHOD

低い入射角 (< 50°): 青

$$rac{arDelta au_{ ext{CO}_2}}{ au_{ ext{CO}_2, \quad pred}} = \gamma \left(ext{Alb}
ight) \quad \left(au_{MER} - 0.\,05
ight)$$

高い入射角 (> 50°) : オレンジ
$$rac{\Delta au_{ ext{CO}_2}}{ au_{ ext{CO}_2, \quad pred}} = \gamma (ext{Alb}) \quad (au_{MER} - 0.05) \, rac{1 + \left(rac{1}{\cos i}\right)^{eta(au_{MER})}}{1 + \left(rac{1}{\cos 50^\circ}\right)^{eta(au_{MER})}}$$
 $eta(au_{MER}) = m \quad au_{MER} + q$



4. RESULT AND DISCUSSION

Global seasonal maps: MY27, MY28, MY29

空間分解能はlat 5°、longi 6°



4. RESULT AND DISCUSSION

Global seasonal maps: MY26, MY30

MY26はMEx到着したとき、MY30はC-channelがbroken



→ map pixelには中央値を採用, 同様の観測は最大値を採用

4. RESULT AND DISCUSSION

1. 火星のダスト運動の季節性の観測



PAGE 21

4. RESULT AND DISCUSSION

2.季節に依存しないダスト運動 Valles Marineris (315°E, 20°S) →ダストストームが実際に存在



PAGE 22

4. RESULT AND DISCUSSION

3. 特定地域でのダスト運動

Hellas bassin (40°-100°E, 20°-60°S): ダスト源&ダストシンク →正規化されたダスト変動, Tharsis (~245°E, ~0°N) ではダスト増加なし



4. RESULT AND DISCUSSION

4. ダストストームの経路 ダストストームの経路上では、τの増加が観測されている



Battalio and wang (2021), Fig 8より引用



4. RESULT AND DISCUSSION

4. MY28 GDS発生のダスト運動 GDSが始まる直前 (~ Ls 264.4°)で、 Cryse – Noachisでダストの光学的深さが高い → GDS発生前の2つのダストストーム

GDSの始まり (~ Ls 264.9°) → Hellasの東側で少し遅れてで発生





Tdust

4.2. Comparison with previous thermal IR studies

4. RESULT AND DISCUSSION

・基本的にはThermal IRで取られたマップとよく一致





4.2. Comparison with previous thermal IR studies

4. RESULT AND DISCUSSION

- 平均比率分布のピークは1.8
 - Lemmon et al. (2015)と一致
 - 1.25 5 (MER data/Pancam, Mini TES)
 - Montabone et al. (2015)と一致
 2.6 (NIR消散係数/TIR吸収比)
- バイアス問題
- ・2つの観測装置間の観測差
- ・ダストの垂直分布



4.3. Particle size variations during the MY28 GDS

4. RESULT AND DISCUSSION

NIR/TIR比を使用して粒子サイズを決定: OMEGA [0.5, 2.5] → NIR/TIR比: 1~4



Figure 13. Visible-to-IR optical depth ratio for a $k(1075 \text{ cm}^{-1}) = 0.70 \text{ model}$. The image is a map of the extinction cross section ratio of 0.88 μ m to 1075 cm⁻¹. We calculate the cross sections using a gamma distribution [e.g., *Hansen and Travis*, 1974], spherical particles, m_{IR} from *Wolff and Clancy* [2003], and $m_{0.88}$ from *Tomasko et al.* [1999]. Given the importance in the accuracy of $m_{0.88}$, we note that the adopted values are in very good agreement with the recent analysis of Pancam data by *Lemmon et al.* [2004].



PAGE 28

4.3. Particle size variations during the MY28 GDS

4. RESULT AND DISCUSSION

MY28 GDSのピーク: Ls 271°から275°





小さい粒子はGDS発生地域から 遠く離れた場所にも輸送される能力が高い

4.3. Particle size variations during the MY28 GDS

4. RESULT AND DISCUSSION

MY28 GDSのピーク: Ls 271°から275°



- ・ダスト粒子径の増大
 →ダスト粒子の重力沈降+凝集プロセスに
 対流運動+垂直混合が打ち勝つ
- ・有効半径: 1.1 µmから1.5 µmに変化
 → Vincendon et al. (2019)と一致
- ・有効半径2.3 µmがリトリーバルできる最大値

4.4. Search for MY28 GDS precursory signs

4. RESULT AND DISCUSSION

- MY27とMY29のdust seasonに大差なし
- MY28のdust season初期はdust活動が低い

→ dust season初期のダストの不活発性は遅い ダスト活動を引き起こす可能性あり



4.5. Link with RSL

4. RESULT AND DISCUSSION

- RSLはダスト除去するために形成される
- Chryse-Acidaria平原付近で主に報告
 → 低アルベド+高いダスト活動 地域
- ・ 強い風+ダストストーム開始/輸送行う地域
- RSL形成時に高いダスト光学的深さを観測

北半球のRSLは大気中のダストと 時間的・空間的相関あり



PAGE 32

5. Summary and conclusion

5. SUMMARY AND CONCLUSION

- OMEGA NIRデータセットからダスト導出アルゴリズムの開発
 - →2µm CO2吸収帯からクリアスカイ時のτと比較することでダストを導出
- MERを使用して、2 μmから0.9 μmのdust光学的深さに変換
- MY26からMY30までに適用し、主要なダストサイクルをリトリーバル
- MY28 GDS発生前後の年に大差はないが、MY28 のdust season始まりが弱い
- NIR/TIR消散比は1.8で先行研究と一致
- MY28 GDSの平均粒径の緯度・季節変動を観測
- 北半球RSLの大気ダスト運動との相関を確認
- CRISM/MROやMIRS/MMXに適用可能