

もう一つの月世界へ： 火星衛星探査計画MMX その9 ～CMDMが拓く、火星圏ダスト環境への第一歩～

小林 正規¹

(要旨) 火星周辺には、黄道光ダストに代表される惑星間ダストのみならず、フォボス・ダイモスや火星自体に由来する微小粒子が存在する可能性が以前から指摘されてきました。しかし、その存在はこれまで間接的な証拠にとどまり、実態は明らかではありませんでした。日本のMMX探査機に搭載されるCMDMは、こうしたダストを初めて直接・定量的に観測し、火星圏ダスト環境の実態解明に大きく貢献することが期待されています。

1. はじめに

火星は長いあいだ、多くの探査機によって調べられてきました。大気、磁場、衛星、地下水、岩石……。その一方で、火星の周辺をどのような微小な固体粒子(ダスト粒子)が飛び交っているのかについて、これまであまり詳しく調べられてきませんでした。

もちろん、太陽系全体には惑星間ダストと呼ばれる細かな粒子が広く分布していて、これらは黄道光の正体でもあること、火星のまわりにも存在していることはよく知られています。しかし、火星の周辺には、そのようなよそから来たダストだけでなく、火星自身やその衛星フォボス・ダイモスに由来するダストが存在するかもしれないと考えられています。たとえば、フォボスやダイモスの表面に小さなメテオロイドが衝突してイジェクタとして舞い上がった粒子が火星を周回する軌道上にリング状あるいはトラス状に分布しているかもしれない、あるいは火星の砂嵐で高層大気まで巻き上げられた細かなダストが、大気圏外にまで到達しているかもしれない――1970年代以降、そのような理論的な研究が報告されています。ただし、そのような火星圏を起源とするダスト粒

子について、はっきりとした観測結果はなく、依然としてモデルの仮説の域を出ていません。これまで火星を訪れた多くの探査機は、大気や地表を調べることはあっても、ダストを直接観測する専用装置は搭載していませんでした。唯一、日本の火星探査機「のぞみ」にはMDC(Mars Dust Counter)というダストカウンターが搭載されていましたが、残念ながら探査機は火星周回軌道投入に失敗し、十分な観測はできませんでした。

近年、火星の周辺空間に火星圏由来のダストがあるらしいというヒントが、ようやく出てきています。たとえば、NASAのMAVEN探査機は、火星周回軌道で観測した電場のわずかな変化から、火星周辺でのダスト粒子の存在を示しています(Ijaz et al. (2024))。また、Juno探査機も木星へ向かう途中、火星付近で微小粒子らしき衝突を検出したと報告されています(Benn et al. (2017))。しかし、いずれもダスト観測用の装置ではなく、観測データの解釈には慎重さが求められています。

つまり、火星のまわりにどんなダストが、どれくらい、どのように分布しているのか――その実態は今もわかっていないのです。火星周辺のダスト環境を調べることは、惑星間ダストや衛星ダストの循環、さらには将来の探査機運用にとっても重要な手がかり

1. 千葉工業大学惑星探査研究センター
kobayashi.masanori@it-chiba.ac.jp

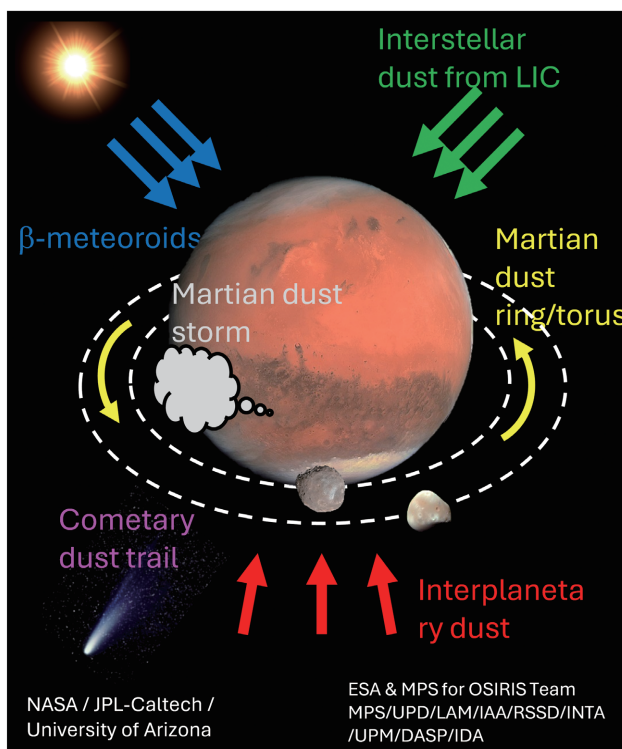


図1: 火星周辺に存在すると考えられているダスト種。

になります。

次の章では、そんな火星のまわりに存在していると考えられている、様々な種類のダストについて紹介します。

2. 火星周辺に存在する多様なダスト環境

火星のまわりには、その起源がはっきりしない細かな塵——ダスト粒子が漂っています。その動き方や由来にはさまざまな可能性があり、いまだ分かっていないことも多くあります。一口に「火星周辺ダスト」と言っても、それは単一の源から生じるものではなく、異なる由来や性質を持つ粒子が共存しているのです。

まず代表的なものが、太陽系全体に広がる黄道光ダスト、いわゆる惑星間ダストです。これは彗星や小惑星が生み出した微粒子がケプラー運動をしつつ、太陽光の放射圧によるポインティングーロバートソン

効果で太陽に引き寄せられ、らせんを描くように内側へ落ち込んでいくものです。火星軌道付近にも、こうした粒子は絶えず飛び交っており、「外から来たダスト」として、火星圏のバックグラウンド成分を構成しています。

一方、火星特有の環境が生み出す固有のダストも存在するかもしれません。たとえば火星では、大規模なダストストームによって微細な粒子が大気圏を越え、数千kmの高度まで到達する可能性が指摘されています。実際、NASAのMAVEN探査機が搭載するLPW(Langmuir Probe and Waves)は、そうした粒子が宇宙空間にまで達している可能性を示唆する観測結果を報告しています。

また、火星の小さな衛星フォボスとダイモスでは、小さなメテオロイド衝突によってダストが宇宙へ舞い上がっていると考えられています。放出された粒子の一部は、一時的に火星周回軌道にとどまることもあるでしょう。

このように火星周辺には、次のように多様なダスト

が存在すると考えられています。

- 太陽系外縁から飛来する星間ダスト
- 太陽光の放射圧で外向きに押し出される β メテオロイド
- 彗星が残したダストトレイルの粒子
- 火星やフォボス・ダイモスが生み出す、ごく局所的で寿命の短いダスト

こうした多様なダストの存在を裏付ける手がかりも少しずつ得られています。たとえば、Juno探査機は太陽電池パネルに微小粒子が衝突した際の発光現象(STE)を検出しています。また、MAVEN探査機のLPWは、火星外へと拡散するダストの存在を電場変動として捉えています。

これらの火星周辺ダスト環境を、本格的かつ直接的に調べようとしているのが、MMX探査機に搭載されるCMDM(Circum-Martian Dust Monitor)です。CMDMは、こうした多様なダスト成分を火星周回軌道から直接とらえ、その頻度や性質

を統計的に明らかにしようとしています。これまで間接的な手がかりしか得られていなかった火星圏ダスト環境について、CMDMは初めて確かなデータをもたらすことが期待されています。

もっとも、これまでも火星周辺でダストの存在を示唆する観測は行われています。次にご紹介するのは、Juno探査機やMAVEN探査機が捉えた、火星近傍における興味深い観測例です。これらは、火星圏ダスト環境解明への最初の手がかりとなったものでした。

3. これまでに捉えられた火星周辺のダストたち

火星のまわりを漂う微小なダスト。これまでご紹介してきたように、その存在は理論的には予想されてきました。しかし、その姿を直接とらえた例は、そう多くはありません。ここでは、最近捉えられた観測結果をご紹介します。

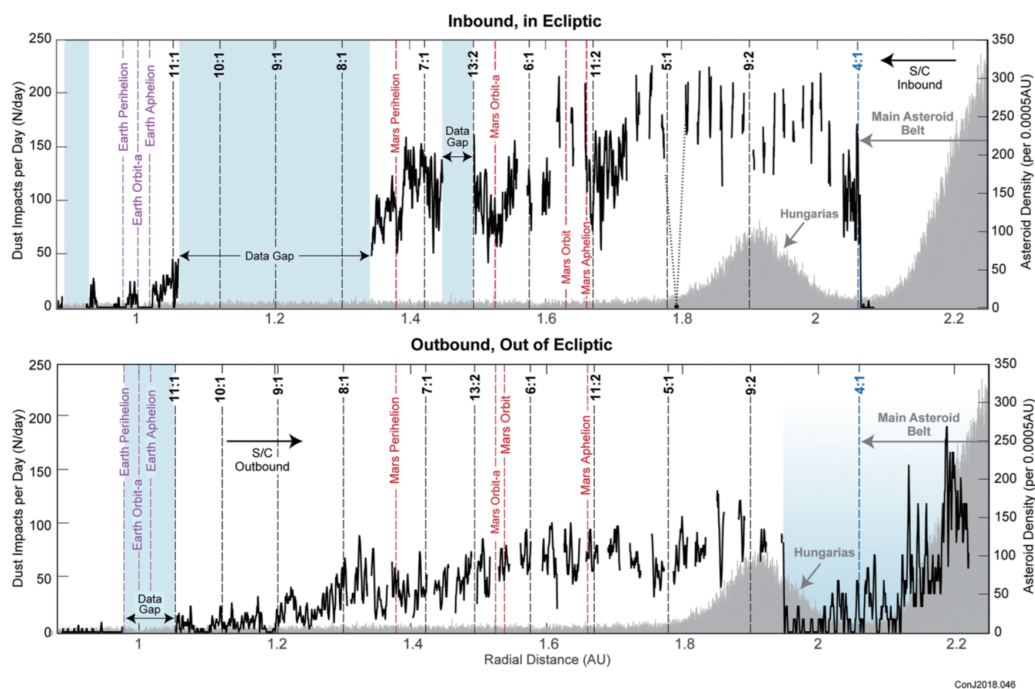


図2: Junoのスターカメラによってクルージング中に観測された1日あたりのダスト衝突イベントの個数(黒線)と小惑星密度(灰色線)を太陽からの距離の関数で示している。Junoがクルージング軌道にある期間のうち、黄道面内を地球に向かっていている時の観測データが上図、黄道面外を木星に向かっていている期間のデータが下の図に示されている。Jorgensen et al.(2021)のFigure 3を転載。

3.1 Juno探査機が捉えたダスト衝突の痕跡

NASAの木星探査機Junoは、木星へ向かう旅の途中、意外な観測結果を残しています。探査機の太陽電池パネルに微小なダストが衝突した際、その衝突で飛び散った微粒子(イジェクタ)を、搭載されていたスターカメラがとらえたのです。この観測データを詳しく解析した結果、火星軌道付近(およそ1.5天文単位=AU)では、ほかの軌道領域と比べてダスト衝突頻度が明らかに高いことが示されました。

近年、惑星間空間におけるダスト分布の理解は進んでいますが、Junoによるこの観測は、火星近傍のダスト環境に新たな手がかりを与えるものでした。Jorgensen et al.(2021)の研究では、Junoの太陽電池パネルに当たったダストが生み出す発光現象を、スターカメラで追跡し、1~100マイクロメートルほどの微粒子の分布を統計的に解析しました。その結果、ダストは火星の軌道傾斜角(約1.85度)に沿った軌道に多く分布していることがわかりました。図2にその様子が示されています。さらに興味深いことに、これらの粒子は木星との重力的な関係(共鳴効果)によって、軌道傾斜角がより大きく(最大 ± 7.4 度まで)拡散されていくというメカニズムもJorgensen et al.(2021)に提唱されました。こうした分布は、かつてIRAS衛星が観測した黄道光の緯度分布(± 1.4 度と ± 9.5 度にピーク)とよく一致しており、火星周辺のダストが黄道光形成に関わっているという新たな視点を提供しています。これまで主に小惑星帯や彗星起源とされてきた黄道光ダストに、火星圏起源という選択肢が加わったのです。

3.2 Juno観測のその後——その解釈は本当に正しいのか?

しかし、このJunoの観測結果については、新たな視点からの再検討も行われています。Junoのスタートラッカー(姿勢決定用カメラ)が捉えた発光現象(STE=Star Tracker Events)は、直径10マイクロメートル以上の微小メテオロイドが太陽電池パネルに衝突した結果と考えられています。そして、Junoによって観測された微小メテオロイドの一部は、火星圏ダストの影響かもしれない——Jorgensen et al.はそのように主張しています。

これに対し、Pokorný et al.(2022)は黄道光ダス

トモデルを用い、観測されたSTEが本当にダスト衝突によるものかを検証しました。彼らは、小惑星帯や彗星といった主要な惑星間ダスト源に基づくダスト分布モデルを用い、Junoの軌道や太陽電池パネルの向きまで考慮して、理論的な衝突頻度を計算しました。

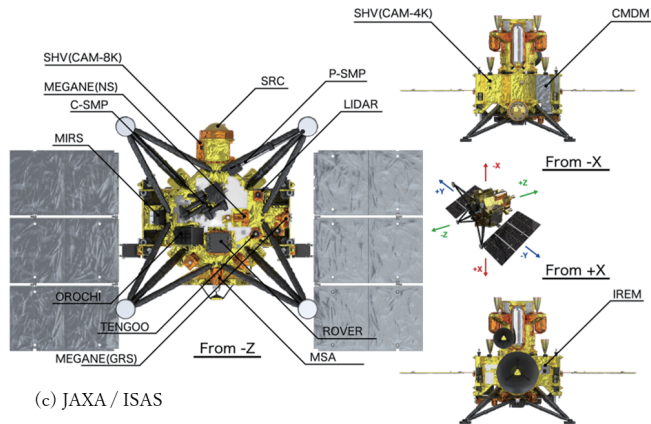
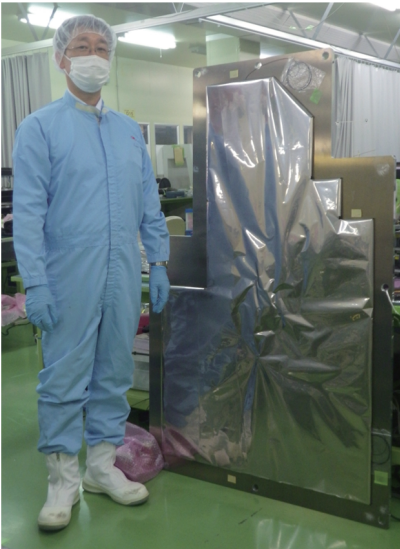
その結果、予測される衝突頻度は観測値より2~3桁も少なく、また時間変化のパターンも一致しないことが明らかとなりました。さらに、火星やその衛星から放出されたダストがJunoに届くかどうかもしミュレーションで検討されましたが、観測と合致するダストフラックスは得られませんでした。

こうした結果から、著者らはJunoのSTEが必ずしも個別のダスト衝突によるとは限らず、材料劣化による微粒子の断続的放出や、別の複雑な現象の可能性もあると指摘しています。しかしながらこの研究は、火星周辺ダストの起源に関する議論に一石を投じる重要な知見となっています。

3.3 MAVEN探査機が捉えた電場変動——ダストの間接的な手がかり

もうひとつ、火星周辺のダスト環境をめぐる注目すべき研究報告があります。それはNASAのMAVEN探査機によるダスト粒子の観測です。MAVENには、Langmuir Probe and Waves(LPW)という電場やプラズマ波動を測る装置が搭載されています。この装置が、探査機表面に高速で衝突した微小粒子が引き起こす電場の変化を捉えることで、間接的にダスト衝突を検出できることがわかっています。

最近の研究(Ye et al.(2025))では、2014年から2022年にかけて収集された膨大なデータに、AIによる分類技術を導入し、約8万6000件にもおよぶ衝突イベントが抽出されました。解析の結果、フォボスの軌道高度(約6100km)付近では、ダストフラックスが顕著に増加していることがわかり、フォボス由来のダストリング構造が存在する可能性が示唆されています。また、2018年に発生した火星の全球ダストストームでは、地表から巻き上げられたダストが1000km以上の高さまで到達していた可能性もあり、新たに静電場による加速といった未知の輸送メカニズムまで議論されています。



(c) JAXA / ISAS

図3: CMDMのPFMセンサー(左写真)とMMX探査機上のCMDMセンサーの位置(右イラスト, 右上のFrom-Xの図)。

表1: CMDMの仕様。

Item		Value
Size	Sensor	1445mm x 885mm
	Electronics	205mm x 132mm x 65mm
Mass	Sensor	0.27 kg
	Electronics	1.30 kg
Power (CMDM-E only)	Stand-by	10.3 W (Max)
	Operation	10.9 W (Max)
Data	Mission	1,024byte/min
	HK	128byte/10sec
Temperature	Operational	S:-175～+115°C E:-20～+60°C
	Nonoperation	S:-175～+115°C E:-30～+65°C
	Storage	S:-20～+52°C E:-20～+52°C

これらの成果は、火星圏に存在するダストの供給源や分布の時間変動を理解するうえで貴重な手がかりとなっています。そして、こうした先行研究をふまえ、MMXに搭載されるCMDMが、これまで間接的にし

か捉えられなかった火星周辺ダストを、いよいよ直接・定量的にとらえる時代が来ようとしているのです。

4. 火星ダスト環境に挑むCMDM ——その意義と期待

これまで火星のまわりには、さまざまな起源をもつ微小なダストが存在しているかもしれない——そんな話をしてきました。しかし、それらを直接捉えた探査機は、いまだありません。そこで注目されるのが、日本のMMX探査機に搭載されるCMDM(Circum-Martian Dust Monitor)です。

CMDMは、火星圏を漂う微小粒子が探査機表面に衝突した際、その衝突で生じる電気信号を捉えるダスト観測装置です。図3にCMDMセンサーの写真とMMX探査機の搭載位置、表1に装置の仕様を示します。センサーは、ポリイミドフィルムに、4つの圧電素子が貼り付けてあるだけのとてもシンプルな構造です。探査機本体に取り付けられた有感面積が1 m²のセンサーを有していて、10μm以上の粒径のダスト粒子がセンサーフィルムに衝突したときの衝撃がフィルム中を伝わり、圧電素子で電気信号に変換されたものを検出します。前の章でJunoやMAVENのダスト観測のことについて説明しましたがダスト観測装置によるものではなく、実は、ダスト観測専

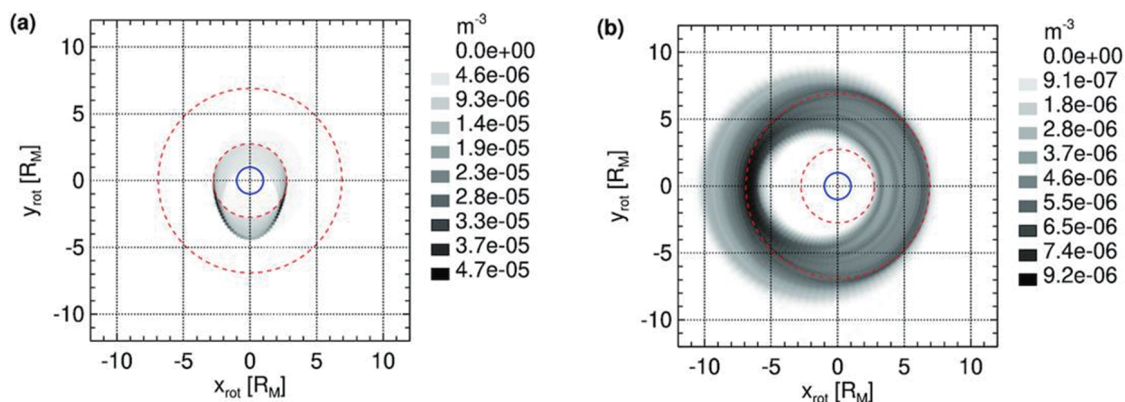


図4: Liu & Schmidt(2021)によるフォボスおよびデイモスを起源とするダスト粒子の数密度を火星の赤道面に投影して太陽に対して固定された向きに保つ座標系内で垂直方向に平均化したもの(それぞれフォボスとデイモスを左図と右図に示す). x_{rot} 軸の正方向が太陽方向を示す. (Liu & Schmidt(2021)のFigure 6を転載)

用の装置を搭載して火星圏でダスト観測をした探査機はこれまでにありません. 1998年に打ち上げられた火星探査機「のぞみ」にはMDCというダスト観測装置が搭載されていましたが、残念ながら「のぞみ」は火星周回軌道に入ることができませんでした(Sasaki et al.(2007)). 今の計画では、CMDMが初めて火星圏でダスト観測専用の装置となつて、火星周回軌道上でのダスト環境を「その場で」「直接的に」「定量的に」「連続的に」観測する最初の試みとなります.

では、CMDMはどんなダストを捉えるのでしょうか. 予想されるいくつかの観測例を紹介します.

■ フォボス・ダイモスが生む火星ダストリング

フォボスやダイモスに微小メテオロイドが衝突すると、細かなダスト粒子が舞い上がります. これらは火星の重力圏内を周回し、「火星ダストリング」と呼ばれる極薄い帯状構造を形成すると考えられています. 1971年にSoter (1971)が最初に提唱して以来、多くの研究者がフォボスとデイモスを起源とするダスト粒子が火星の周りにリングあるいはトーラスを形成すると予想してきました(例えば、石元(1996), Krivov & Hamilton (1997)).

最近の例ではLiu & Schmidt(2021)が、フォボス・デイモスにメテオロイドが衝突して放出された一つ一つのイジェクタ粒子(ダスト粒子)の運動を計算する数値シミュレーションを行いました. 図4にその

結果の一例を示します. シミュレーション結果によると、フォボスリングを起源とするイジェクタ粒子は $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度の粒子が中心、デイモスリングは $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度の粒子が優勢であり、それぞれ粒子数密度は最大でも1立方メートルあたり数万分の1個レベルとされています. ただし、それらのイジェクタ粒子のうち、 $10 \mu\text{m}$ 未満のものは1年も経たずに軌道上から無くなるのに対して、 $10 \mu\text{m}$ 以上のダスト粒子はフォボス起源のもので数十年以上は軌道上に残り、準定常軌道上にあるMMXに対して約 100 m/s の相対速度で衝突してくる、これがCMDMによって観測される、という結果を得ました(Schmidt et al.(2025)). そして、CMDMは火星周回中にこれらのリングの中にあり、フォボスリングおよびデイモスリング由来のダスト粒子を最大で1日当たり200個前後の衝突を検出すると予測されています. ひょっとすると少し楽観的すぎる値かもしれませんが、CMDMによる観測は、これまでモデルでしか描かれてこなかった火星ダストリングの存在を確かめる貴重なデータとなるでしょう.

■ 彗星由来ダストストリームの通過観測

火星付近を流れるダストは、フォボス・ダイモス由来だけではなく、太陽系内を巡る彗星が残す微小なダストストリームが、たまたま火星軌道付近を横切ることがあります. Krüger et al.(2021)の研究では、MMXのCMDMは火星周回中に彗星114P/

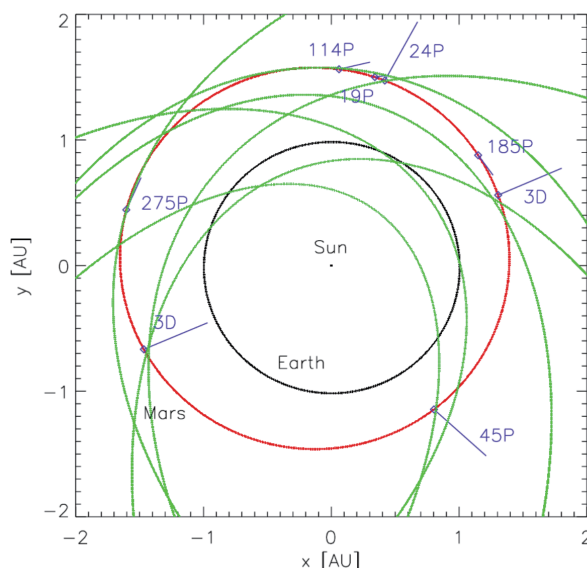


図5: Krüger et al.(2021)が行ったIMEXモデルによる火星軌道(赤い線)と交差する彗星ダストトレイルのうち、ダストの放出量が比較的大きいものの軌道(緑色の線)を黄道面上に投影して図示したもの(X-Y面は春分点が+X方向を向いた黄道面)。火星軌道上のひし形のプロットは予測される $100\text{ }\mu\text{m}$ 以上のダストフラックスが $10^{-3}\text{ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ で観測される位置を示していて、そこから伸びる線はMMXに対するダストトレイル粒子の速度ベクトルを示している。(Krüger et al.(2021)のFig.4を転載)

Wiseman-Skiffが残したダスト流と遭遇する可能性が示されています。このとき、粒径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以上の比較的大きなダストが、1日あたり $0.15\text{ 個}/\text{m}^2$ ほどの衝突する予測が出ています。小さな粒子を含めれば、数10個～100個程度の検出も期待できます。こうした観測は、惑星間ダストや彗星起源ダストの分布を、火星近傍で捉える貴重な手がかりになります。

実は、観測3例目の恒星間天体で彗星である3I/ATLASの予想軌道が火星の公転軌道と2025年10月初旬に交差すると予想されていて、また推定で毎秒 4 kg もの物質が放出されるような活動があるともいわれているため、火星軌道上に十分なダストトレイルが残る可能性があります。ただ、MMXが2026年に打ちあがって火星に到達する2027年にはダストトレイルに含まれるメテオロイド粒子は残っていないかもしれません。しかしながら、それらの粒子がフォボスおよびデイモスに衝突することで、両衛星からのイジェクタ放出量を増やし、それまでの火星リング・トーラスの粒子密度が増える可能性があります。

■ 黄道光ダストとの識別

火星周辺には、太陽系全体を漂う黄道光ダスト(惑星間ダスト)も存在しています。CMDMは、衝突する粒子の衝撃力だけを測定して、その速度や方向、粒径などを分離して測定することはできません。火星を周回する軌道上では、主なダスト種として惑星間ダストと(もしあれば)火星リング・トーラス粒子が混在することになります。CMDMの場合、検出したダスト粒子の到来方向は分かりませんが、図6が示すように、MMXが火星を周回する軌道上の位置によって、CMDMのセンサーが向いている方向が変化します。火星リング・トーラス粒子は、火星を周回する方向から到来することが予想されているため、CMDMのセンサーがその周回方向を向いているときと、そうでないときのフラックスの差から、火星リング・トーラス粒子の有無を調べることができると考えています。

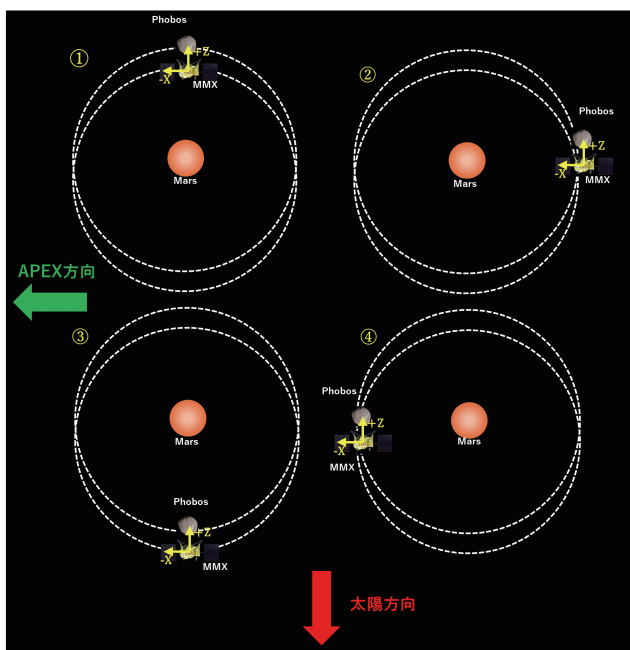


図6:MMXが、Phobosが火星を周回する軌道から少しずれた軌道(QSO)上の異なる位相位置にあることを示す図。MMXの+Z面は常にPhobosを向いていて、CMDMが取り付けられている-X面は常にAPEX方向(火星が公転運動をする方向)を向いている。上の図の①と③の位置にある場合は、-X面のCMDMのセンサーには惑星間ダストと火星を周回するリング粒子が衝突して、②と④の位置でCMDMセンサーに衝突してくるのは惑星間ダストがほとんどだと予想される。つまり、MMXが①あるいは③付近にあるときのCMDMのダスト検出数と②あるいは④付近にある場合のものとを比較することで、火星リングダストの有無を示すことができる。

5. おわりに

これまで火星のまわりを漂うダストは、その存在すら間接的な議論にとどまってきました。CMDMは、こうした環境を直接観測し、フォボス軌道付近に限られるものの、その分布の実データを初めて提供することになるでしょう。火星圏のダスト環境の知見は、惑星間ダスト循環、衛星表層進化、将来探査機設計といった分野に広く関わる重要な情報になるかもしれません。MMXに搭載されるCMDMの成果は、私たちが火星という惑星を取り巻くダスト環境をより深く理解する、一歩となるでしょう。

参考文献

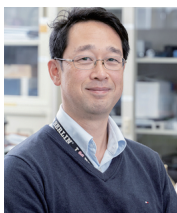
- [1] Ijaz, S. et al., 2024, ApJ 970, 175.
- [2] Benn, M. et al., 2017, GRL 44, 4701.
- [3] Jorgensen, J. L. et al., 2021, JGR Planets 126,

e2020JE006509.

- [4] Pokorný, P. et al., 2022, PSJ 3, 14.
- [5] Ye, S. et al., 2025, Dusty Visions 2025, June 16-18, 2025, Princeton University, Princeton, NJ.
- [6] Sasaki, S. et al., 2007, ASR 393, 485.
- [7] 石元裕史, 1996, 日本惑星科学会学会誌 5, 61.
- [8] Krivov, A. V. and Hamilton, D. P., 1997, Icarus 128, 335.
- [9] Liu, X. and Schmidt, J., 2021, MNRAS 500, 2979.
- [10] Schmidt, J. et al., 2025, Dusty Visions 2025, June 16-18, 2025, Princeton University, Princeton, NJ.
- [11] Krüger, H. et al., 2021, EPS 73, 93.

著者紹介

小林 正規



小林 正規(こばやし・まさのり)は、愛媛大学理学部物理学科(1990-1994)・同大学院理学研究科(1994-1996)で物理学を専攻し、続いて早稲田大学大学院理工学研究科にて博士(理学)を取得(1996-1999)。その後、JAXA宇宙科学研究所招聘研究員(2005-2006)、日本医科大学基礎科学物理学

教室講師(2006-2009)を経て、2009年より千葉工業大学惑星探査研究センターにて研究に従事、2023年5月からは同センター副所長を務めている。惑星間ダスト観測装置の専門家であり、ベピコロンのダストカウンター開発に主要な役割を果たし、現在はMMX搭載CMDMの開発責任者として、火星圏のダスト環境解明を牽引している。