

MELOS 火星大気オービター構想

今村剛、小郷原一智 (ISAS/JAXA)、MELOS オービターチーム

1. MELOS 計画

火星探査計画 MELOS (Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy)の検討が日本の惑星科学コミュニティにおいて進められている。これは 2020 年頃に周回機と着陸実証機(若干の科学観測機器を含む)を火星に送り込むという構想であり、周回機の主たる目標は火星気象、とくにダスト輸送プロセスの解明である。サブテーマとして水循環と大気化学を掲げる。以下ではこの火星オービターの狙いを簡単に紹介する。

2. 凍結粉塵惑星の気候の理解に向けて

火星の気候はどのような仕組みで決まっているのだろうか。また、どのような変遷を経て現在の姿に至ったのだろうか。そこに地球型惑星の気候の安定性や、ハビタブルゾーンを決める要因を理解するための手がかりがある。

火星では大気中に浮遊する微細な鉱物粒子(ダスト)が太陽放射を吸収することが大気の熱構造や運動を支配する。薄い CO₂ 大気の温室効果は気温を数℃上げるにすぎないが、ダストは数十℃の温度変化をもたらす。ダスト気象学は火星気候理解の鍵である。火星の大気ダスト量がどう決まっているのかという問題は、現在の火星気象の探求にとどまらない広がりを持つ。たとえば、火星のダストは長期的な環境変化においてどのような役割を果たしてきたのだろうか。地球が火星のような dusty な状態を経験したことが無いとしたら(あるいはあるとしたら)それはなぜだろうか。鉱物エアロソルの分布は惑星一般でどのように決まるのだろうか。もともと液体の水を擁した惑星でも、それが一旦全球凍結状態に陥れば、陸地から供給されるダストの放射効果が重要となるかもしれない。これはいわゆるスノーボールプラネットの持続時間に関わる問題でもある。

しかるに火星ダストの輸送過程に関する我々の理解は限られている。傾圧帯の前線活動での巻き上げや小規模なつむじ風(ダストデビル)による巻き上げがあることが分かっているが、ダスト輸送そのものが観測されたことはほとんど無く、様々な気象過程がそれぞれどれほど寄与しているかは明らかでない。半経験的なパラメタリゼーションを採用した数値モデルによりダスト輸送が計算されてきたが、これまでに観測された大規模なダストストームの年々変動や長期的な地表ダストの移動が全く再現されない。上述の問題意識に答えるためには様々な条件下でのダストの挙動を予言できる必要があるが、それを可能にする物理的理解には距離がある。このあと述べるミッション提案はダスト輸送の物理メカニズムに切り込もうとするものである。

地球気象において水の潜熱や放射効果が重要であるのに対し、現在の火星において水の寄与は限定的である。しかし氷雲や極冠や地表の霜はアルベドに影響しており、また水がダスト表面に凝結することがダストの沈降をもたらす可能性がある。水蒸気が光解離して生じる HO_x ラジカルは光化学を駆動する。地下氷床は熱慣性を大きくすることにより地表温度に影響している。過去には自転軸変動などの天体力学強制に伴って水蒸気量が大きく変化し、氷床が低緯度まで発達する時代が繰り返し訪れたと考えられており、長いスパンで見たときの水の重要性は現在の火星とは異なるだろう。

火星大気の水蒸気量には日サイクル、季節サイクル、より長い時間スケールでの変動があることが知られている。しかし水蒸気の輸送そのものが観測されていないために、これらの変動が極冠やレゴリスや地下氷床といった様々なリザーバーとのどのような交換によって生じるのかはほとんど分かっていない。そこでダスト輸送に加えて水蒸気輸送の理解も目標に掲げる。

ダスト気象学と水循環の理解は地質記録の解読にも道を拓くと期待される。極冠の氷の層

構造は氷に含まれるダストの増減によるものと考えられ、極冠と大気との間の水とダストの出入りの歴史を反映する。いつか直接探査が及ぶであろう、地下の氷床や氷河も同様である。気候変化に伴って水とダストの輸送がどう変わるかが分かれば、これらの記録から古気候の再現も可能となるはずである。

3. ブレイクスルーのシナリオ

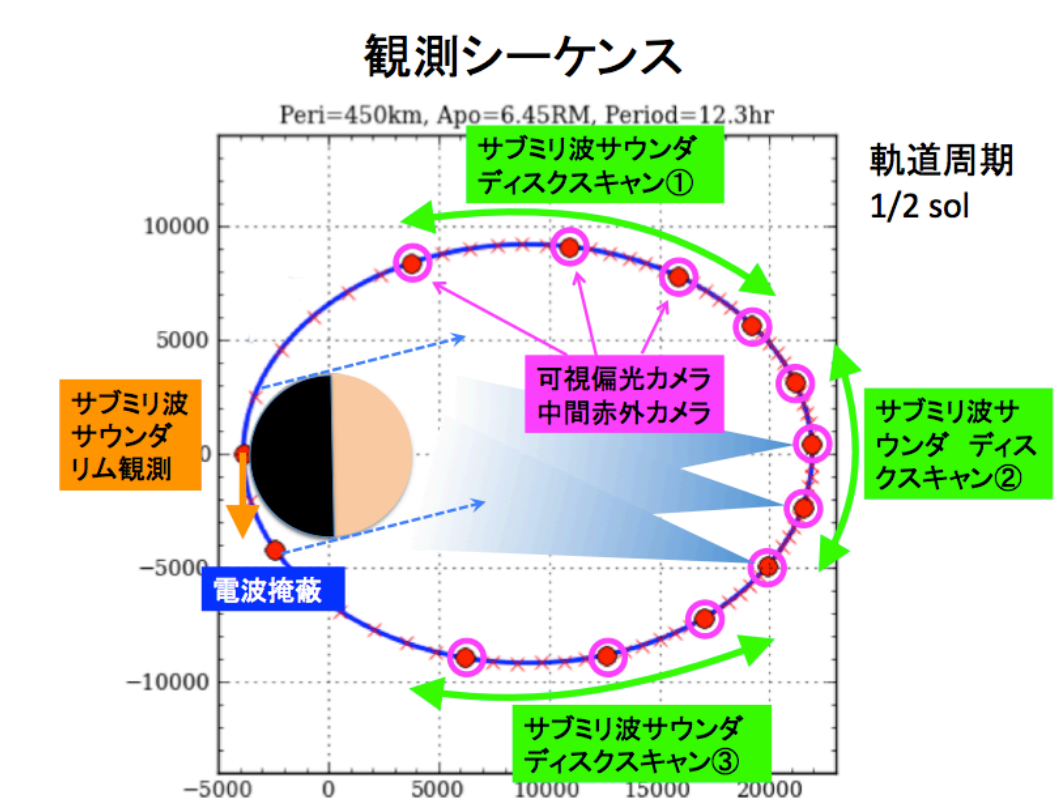
3.1 時間・空間分解能

これまで火星の気象を本格的に観測したミッションとして NASA の Mars Global Surveyor や Mars Reconnaissance Orbiter がある。また ESA は Mars Trace Gas Orbiter を計画している。しかしこれらは低高度の極軌道衛星ゆえに

- ・ 各時刻において衛星直下の狭い範囲しか見ないのでカメラの視野内の気象現象の時間発展を追いかけることができない
- ・ 惑星スケールの現象はまる 1 日のデータをつなぎ合わせて再現できるが、隣り合う軌道が経度にして 30° ほど離れているために、千キロ程度以下の現象はとらえられない

といった制限がある。多くのダストストームは数百～数千キロ（メソ～総観規模）、あるいはそれ以下のスケールを持つため、従来型の観測ではダスト輸送を捉えることができない。水蒸気輸送も同様である。

MELOS 火星オービターは高軌道からのグローバルな連続観測により、火星大気中の物質輸送を可視化する。検討中の軌道は軌道傾斜角 9.97° 、近火点高度 450 km、遠火点 6.45 火星半径、軌道周期 1/2 火星日（12.3 時間）であり、遠火点が昼側に固定されたほぼ赤道周回の軌道である。この軌道からは 1 周回の際に特定の半球内の気象現象の時間発展を半日にわたって追跡可能であり、2 周（1 火星日）で全球をカバーする。1～2 時間おきに取得された画像データからは、個々の気象擾乱が成長しつつあるのか衰退しているのか、どのような背景風があるのかといった、力学過程を特定するための情報も得られる。1 周回のうちに広い太陽位相角をカバーすることになるが、これは後述の偏光観測に有利である。



3.2 偏光撮像と熱赤外リム撮像

従来のダスト観測の別の問題点として、可視カメラ（MGS/MOC、MRO/MARCI など）では原理的に浮遊ダストと地表ダストの区別がつかないことが挙げられる。それでも視認できる縁のはっきりしたダスト雲だけがこれまでは研究対象たりえた。実際にはダストが短時間のうちに局所的に巻き上げられるときのみ明瞭なダスト雲になると思われるので、少なからぬダスト現象を見逃している可能性がある。実際、火星地表の継続的な撮像観測から、明瞭なダストストームの発生が確認されないまま地表ダストが吹き払われるケースが報告されている。赤外分光（MGS/TES など）は浮遊ダストと地面を区別できるが、サンプリングが経度方向に疎らなので、惑星スケールの現象しか見ることができなかった。

我々は可視波長の偏光撮像によって浮遊ダストと地表ダストを区別する。地表・雲・ダストの偏光度が異なる太陽位相角依存性を示すことを利用して、1 周回中の連続撮像により位相曲線を描いてこれらを分離するとともに、ダストの粒径や数密度情報を抽出する。また撮像ごとに、場所による偏光度の違いからこれらを分離できるので、1 周回中の時間変化をとらえることもできる。遠火点から十数 km の解像度を確保する。

一方で偏光観測からは高度情報が得られないので、これを補うべく熱赤外波長でのリム撮像によりダストの高度分布を得る。近年 MRO/MCS により地表から離れたところにダスト混合比極大がよく見られることが明らかになっており、このような高度分布が作られるプロセスは今後の火星気象学における重要テーマである。ダストの 3 次元分布の時々刻々の変化をとらえることにより 3 次元輸送に切り込むことができる。熱赤外撮像はまた、昼夜両方でダストの水平分布を可視化することもできる。

3.3 3次元気温分布と微量気体

物質循環の研究のためには3次元力学場情報を欠かすことができない。従来の火星ミッションでは MGS/TES など赤外分光計により惑星スケールの温度場が得られてきた。しかしここではもっと小さなスケールにまで興味がある。ダスト雲の内外の温度を同じように計測できることも本研究のために重要であるが、赤外ではそうはいかない。そこで我々は、550-620 GHz 帯をカバーするサブミリ波サウンダを、従来型のリム観測に加えて直下視で用いる。この観測により、気温の3次元分布、水蒸気の3次元分布、同位体 (H_2O , CO)、微量気体 (CO , H_2O , H_2O_2 , HO_2 , O_3 など)、地表面温度と物性、ドップラーシフトによる風速（リム観測の場合）を得る。視線方向を走査することにより数百 km の水平分解能を達成する。

サブミリ波サウンダは、水循環の理解の鍵となる数百 km 解像度の水蒸気分布とその変動も初めて可視化する。日変化までとらえることは重要なポイントである。水蒸気の長距離輸送は日変化サイクルの残差であり、日変化サイクルの理解が最初のステップと考えられるからである。

微量気体計測ではダストや雲や気象場の情報が同時に得られることを生かして、粒子表面反応など気象場と結合した大気化学と輸送の理解を目指す。これは微量気体の高感度検出に最適化した ESA の Trace Gas Orbiter とは異なる視点である。

気温計測には電波掩蔽も用いる。この方法では地球から見た火星の縁付近（朝方と夕方）の鉛直気温分布を高い精度で計測する。

3.4 局所気象の高解像モニタ

偏光カメラは遠火点からは十数 km の解像度しか持たず、メソスケール現象の観測には限界がある。そこで、限られた地点を高解像度で撮像する狭視野のカメラの搭載をオプションとして検討している。MELOS ミッションにおいて同時に火星に送り込む予定の着陸機の周辺の局地気象を観測することも考えられる。

3.5 データ同化

ダストや水蒸気の時空間変動を解釈するために、全球的な力学場を観測データと数値モデルから再構築する。データ同化と呼ばれるこのような試みは、地球気象学においては経験が

蓄積されているが、惑星探査分野では火星について初期的な試みがあるのみである。最終的にはダストも力学場と同時にデータ同化することを視野に入れる。

4. まとめ

高高度からのグローバルな連続リモートセンシングを軸とする火星オービターを検討している。従来の火星ミッションでは分からなかった多様な時空間スケールの現象を同時にとらえ、ダストを中心に物質輸送の素過程の解明を目指す目論みである。候補となる搭載観測装置は以下のものである。

- (1) 可視偏光カメラ (ダスト・氷雲・地表)
- (2) サブミリ波サウンダ (気温・水蒸気・同位体比・微量気体・地表温度・風速)
- (3) 中間赤外カメラ (ダスト・気温・地表温度)
- (4) 電波掩蔽用の超高安定発振器 (鉛直気温分布)
- (5) 狭視野カメラ (ダスト・雲) *オプション機器

近年、火星には欧米から多くの探査機が送り込まれ、火星に関する我々の理解は 10 年前と比較にならないレベルにある。これまで惑星探査に関わってこなかった国でも火星探査の機運が盛り上がり、今や世界の注目が火星に集まっていると言える。しかしそれだけに、残されている課題は難問揃いであり、後発の我が国が画期的な成果を挙げるのは容易でない。その中であってこのオービター計画は、金星探査機「あかつき」などの開発実績をベースにした堅実な手法で諸外国にない斬新な視点を火星環境科学に導入しようとする、筋の良いアプローチであると考えられる。