

No.	MIM計画に期待する観測・探査案(4000字以内)
-----	---------------------------

- 1
- (1) 基地建設のための地盤諸元取得
 - 常時微動計測による地盤構造推定(機材:加速度計, 速度計)
 - 特に、弾性波速度(Vp, Vs)の計測
 - (2) 植物工場建設・最適作物群落デザインのための環境・地盤諸元取得
 - 地盤の熱拡散係数計測(機材:熱源, 温度センサ)
 - 大気圧・大気組成の変動に係る計測(機材:気圧センサ, CO2センサ)
 - PPF(D(光合成有効光量子束密度)の日変動計測(機材:受光センサ)

食料の確保と住環境の構築を可能とするため、数値実験基盤(デジタル火星)の構築が必要と考えている。作物の生育シミュレーションや、地盤・構造物の力学解析に必要な数値モデル・ライブラリを構築しているが、高品質な入力パラメータが不足している。そのため、8.に記載されたデータについて計測・公開がされると嬉しい。

- 2
- MIMIはプロジェクトは水の探査というように制約されているので、以下に述べる観測はできないのだと思いますが、可能ならばというつもりで期待します。
- これまでの火星探査から、火山活動が活発であった37億年前頃の数億年間は、火星の表層環境は温暖で一時的に海も存在したが、その後、火山活動の衰えとともに、表層環境も寒冷・乾燥化したと推定されている。表層の乾燥化は、かつて存在した水がどこかへ行ってしまったことを意味する。リモートセンシングやローバーによる調査などからは、この水の一部は宇宙に散逸したが、大部分は地殻に吸収されたことが示唆されている。しかし、この地殻への吸収量の見積もりには大きな不確定性が存在する。この不確定性を取り除く上で、今日の火星の地殻にどのように水が分布するかを解明することは必須であり、そのためには広範囲での地殻の地震波速度構造探査と、その構造と水分分布の関係を解明することを目的とした代表的な露頭における地質学的調査が重要な意味を持つ。

Insightにより、火星の地殻の地震波速度構造の一旦が垣間見られるようになったが、これをさらに発展させ、広範な地殻の地質学的調査と組み合わせることにより、以下に述べるように火星の進化に対する重要な知見が得られると期待される。

- (1) リモートセンシングによる火星表層の岩石の化学組成の推定と火星隕石の分析により、火星の地殻は火山活動により45億年前に数千万年の時間をかけて形成された「二次地殻」であり、マグマ・オーシャンにおける結晶分化により形成された月の「一次地殻」とは大きく異なると結論されている。この違いは、火山活動を駆動するマントル対流が火星では活発であったが、月では起きたとしてもごく弱いものであったというマントル・ダイナミクスのモデリングからの予想と合致する。しかし、従来のリモートセンシングでは、地殻のほんの表面の化学組成しかわからず、地殻形成過程の全貌を明らかにするには不十分である。より広範の地震探査と露頭の地質学的調査の組み合わせにより火星の地殻の形成・発達史を明らかにし月と比較することは、地球も含め岩石惑星の地殻形成におけるマグマ・オーシャンやマントル対流の果たす役割を解明する上で重要な手がかりとなる。
- (2) 火星では45億年前に地殻が形成されて以降、37億年前頃のタルシスやエリジウムなどの火山活動が開始するまでの数億年間、目立った火山活動がなかったことが示唆されている。火星内部が時代とともに単調に冷却し、内部の活動もこの冷却により減衰したという従来の惑星内部に対する見方からは、この静穏期を(もし本当に存在すれば)理解することは困難である。他方、マントル・ダイナミクスの立場からは、地殻形成期の物質分化の結果、マントルにおいて重力的に安定な組成的成層構造が出現したことの帰結としてこの静穏期を自然に理解することができる。このように、この静穏期の有無は火星内部進化を理解する上で一つの重要な鍵となるが、その確認はリモートセンシングでは非常に難しく、着陸機による地震・地質探査は必須である。同様の静穏期は、よりサイズの大きな地球でも存在したことがモデリングから期待されており、生命が誕生した地球の最初期の姿を解明する上でも、火星での静穏期の検証は重要な意味を持つ。

- 3
- 惑星超高層大気は、太陽からの電磁波・物質エネルギーと地表からのエネルギーがせめぎ合い、複雑な輸送過程を示す。その領域の飛翔観測は困難なため、光学機器によるリモートセンシングが有効な手段である。地球超高層大気においては、オーロラや大気光の2次元撮像により2次元可視化することができる。この光学観測機器によってもたらされる発光の2次元分布は、しかしながら、視線方向に積分されたフォトン数の計測となるため、発光素過程物理過程と、視線方向の重なりを考慮した解析が必要となる。このため、光学機器と衛星搭載の他機器のその場観測や、モデリングなどと組み合わせられた相補的な研究が求められる。これまで、MAVEN衛星などで火星高層大気の紫外分光観測が行われてきているが、2次元撮像の実績はない。分光観測は発光輝線の同定や分子量、温度など定量的な情報を知るには有利であるが、分布を捉えるには別の工夫が必要となる。ここで、MIMでは低軌道において火星高層大気の発光の高空間分解が可能となる。このような高空間分解能の発光分布はこれまで例がない。とくに、太陽フレアなどの突発太陽風イベントなどでオーロラ発光が期待される。また、火星には局所磁場が存在し、その周辺では小規模構造をもつオーロラが報告されているが、その時間・空間変動は明らかでなく、地球のオーロラのように変動しているかもしれない。さらに、近年地球でもっとも一般的な酸素原子緑線(558nm)の発光が火星でも報告された。CCDやCMOSまたは光学系は可視光において最も高い効率・良好な性質をもつため、可視光カメラにより火星の緑線オーロラの微細構造が紫外より高速・高空間分解撮像が期待できる。低軌道衛星であるMIMからの連続撮像は、あたかも地球のISSから宇宙飛行士により撮像されたオーロラや大気光を捉えているものと同じであり、研究者のみならず一般もしくは企業も関心をもつような美しい画像データが取得されるものと期待される。

現在、地上から超高層大気現象を観測している惑星は地球のみである。衛星は周回することで、軌道上の詳細かつ広範囲なデータを取得できるが、時間・空間分解を分けることが難しい。一方で、地上観測は観測地点上空しか捉えることが出来ないが、全天カメラでは直径500km程度の発光分布を一度に撮像し、時間・空間分解ができる。また、地上レーダーでは、レーダー視線にそってプラズマ密度や温度などの分布を詳細にすることができる。近年、この光学・レーダーの多点ネットワーク観測により、地上観測の局所的な観測というデメリットを克服しつつある。地球超高層大気への理解は、地上観測と衛星観測の融合により効果的に進められてきており、地上観測を行っている研究者は数多い。火星では、今後地上からの超高層大気リモートセンシング可能な惑星の筆頭候補である。地上設備によって超高層大気今後の惑星研究において不可欠だと考える。将来、この地上観測が達成できれば、地球の研究者の興味をあつめ、より多くの火星研究者の人材確保にもつながると考える。

No.	MIM計画に期待する観測・探査案(4000字以内)	MIMを含む日本の将来火星探査計画の将来像に対する期待および要望(4000字以内)
4	<p>火星の探査から、火星自身の知見だけでなく、系外の地球型惑星の研究にも示唆が得られることを期待しています。MIMの本筋ではないかもしれませんが、例えばオービターに火星大気の大気散逸についての知見が得られる装置を搭載する、火星から地球を観測する装置を搭載するなどができると、太陽系内と太陽系外の地球型惑星の理解を深める観測ができるように思います。</p>	<p>火星の研究自体もとても面白いものだと思います。それに合わせて、同時期に特徴付けの観測の研究が発展していく系外の地球型惑星の研究ともリンクできると良いと思います。</p>

5	<p>惑星科学・太陽圏物理の研究者コミュニティが前述のMACO計画の枠組みで検討してきた科学課題のうち、特に、「火星の固有磁場が火星の放射線環境と大気散逸に与える影響」に関する観測がMIM計画に受け継がれることを強く期待するのが本提案である。特に火星大気の大気散逸は表層付近の劇的な気候変動をもたらしたと考えられており、その主要メカニズムおよび太陽活動との関係を解明することは太陽系科学の分野における最重要課題の一つである。また、放射線環境の理解は過去の火星のハビタビリティのみならず、将来の火星有人探査に向けても極めて重要な課題である。</p> <p>このように、火星の大気散逸も放射線環境も、火星のハビタビリティを議論するうえで不可欠な要素であるが、そのメカニズムについて十分な理解には至っていない。特に重要と考えられるのが、南半球に強く残留する固有磁場の影響であり、その評価のためには、南北の同時観測が有効である。MACO計画で検討されてきた手法は、太陽高エネルギー粒子イベント時に火星に現れるオーロラを高エネルギー粒子(=放射線)のグローバルモニタとみなし、南北のオーロラを同時撮像することで南半球の残留磁場の影響を評価するというものである。ただし、このオーロラ発光は電子のエネルギーベクトルやその場の磁気トポロジーにも影響されるため、残留磁場の影響を適切に評価するためには、高エネルギー電子(10-400 keV)と磁場の同時観測も不可欠である。さらに低エネルギーイオン分析器による観測も加えることで、大気散逸と残留磁場、放射線の関係も議論することが可能になる。このような高エネルギー電子および磁場の計測については、これまでの磁気圏・電離圏探査(あらせ、BepiColombo、RockSat-XNなど)の技術的レガシーが国内にあり、(必要に応じて)小型・軽量化のうえで)その利用が期待される。</p> <p>また、Mars Ice Mapper計画の文脈においては、高エネルギー電子および磁場の計測については以下のような貢献も期待される。</p> <ul style="list-style-type: none"> * 表層付近の水のマッピングと地盤工学的な特徴づけに対する貢献 水のマッピングを行うSAR観測に対する、電離圏の影響の評価が必要とされる。特に、太陽高エネルギーイベントにおける電離圏変動の空間スケールの評価が重要である。このため、電離圏の密度・温度に影響する高エネルギー電子・磁場の計測が重要である。 * 有人着陸サイト選定に対する貢献 通信システムに対する宇宙天気の影響評価が必要である。特に、太陽高エネルギーイベントにおける電離圏変動の空間スケールの評価が重要である。このため、電離圏の密度・温度に影響する高エネルギー電子・磁場の計測が重要である。 	<p>火星がかつて液体の水を表層周辺に有していた(それが一時的であるにせよ長期的であるにせよ)という事実は、特にハビタビリティの観点から火星を太陽系内でユニークな存在にしておき、火星が太陽系科学の一つのフロンティアであることは今後半世紀以上変わらないであろう。そのフロンティアで科学成果を創出していくためには、それを支える技術が必要である。具体的には、まずは着陸技術の獲得が喫緊の課題である。着陸後のサイエンスの幅を広げるためには、走破性を持ったローバの技術も不可欠である。また、今後、日本がISASの戦略的中型ミッションのような規模の大きなミッションのみならず、小型・超小型ミッション、あるいは海外へのプローブ提供などの複数の枠組みで多様なサイエンスを展開していくためには、大型の推進系を持たずとも軌道投入を可能にするようなエアロブレーキ技術の獲得も必要である。このように火星探査を支えるキー技術はいくつもあるが、それらを実証する機会は極めて限られているのが現状である。これらの技術開発を、宇宙科学の垣根を越えて、宇宙探査全体の枠組みの中で推し進めていくことが強く望まれる。</p>
---	---	--

No.	MIM計画に期待する観測・探査案(4000字以内)	MIMを含む日本の将来火星探査計画の将来像に対する期待および要望(4000字以内)
6	<p>MIM計画では「火星の中緯度域の表面近くの地中に存在する活動的な水環境をSARで探査する」ことが目的とされている。すなわち火星の非極域における水の分布と量を定量化するという点であると理解した。計画では「水」を想定している可能性があるため、「CO2/ハイドレート」が存在している場合に観測結果に修正が必要になるのではないかと考えている。</p> <p>具体的に述べると、SARで地下に1~10mの「水」の存在を調べるということであったが、H2Oの信号が氷かCO2/ハイドレートかによってH2O量の見積もりが変わってしまう。すなわち氷の密度が0.92 g/cm3に対してCO2/ハイドレートのホスト格子の密度は0.80 g/cm3なので、およそ13%も過大評価してしまう可能性がある。そこで、氷とCO2/ハイドレートの区別をつけながらMappingすることを期待する。</p> <p>ガス/ハイドレートの誘電率は、これまであまりきちんと計測されてはいない。格子となるH2Oは氷と同じ水素結合をしているので、物性は氷とかなり似ているが、中に含まれるゲスト分子(CO2/ハイドレートの場合はCO2分子)によって誘電率が異なる可能性は高い。ただしL-bandの周波数で顕著な差が出るかどうかは、検討の余地があるだろう。(現状、L-band SARで氷とCO2/ハイドレートがどのように区別できるのか、という点についての情報を持ち合わせていないので、Just ideaです。個人的には、その基礎研究をやってみたいですが。)</p> <p>(追記)もし3次的にCO2/ハイドレートが氷と区別されてMappingすることができて、氷とCO2/ハイドレート都の上下関係がわかるのであれば、温度・圧力条件からハイドレートの安定性を求められるので、その地域の力学的安定性が推定できるだろう。そうすれば、中緯度域の流水痕の原因も明らかにすることができるかと期待できる。</p> <p>またガス/ハイドレートは、揮発性のガスをトラップすることのできる物質として宇宙空間では重要な役割を果たしている。そのため、火星上のCO2/ハイドレート中にCO2以外の気体が含まれている可能性は高い。MIMIに続くMMX計画において地下のCO2/ハイドレートが採取できれば、火星の過去の大気を分析できるかもしれない。</p>	<p>7.に記載したように、宇宙空間でのガス/ハイドレートの役割について以前から興味を持っているが、残念ながら日本の宇宙計画の話を開く限りにおいてはまだそのワードは聞こえてきていない。近い将来、もっと頻繁にそのワードが聞こえてくることを期待している。</p>
7	<p>大気中の水蒸気量は、季節や緯度、経度、高度により大きく依存することが知られている。この原因としては、地表やレゴリスと大気中の水交換が起きていることが示唆されている。大気中の水蒸気量の日変動や季節変動を明らかにすることで浅部地下と大気の水交換を明らかにすることができる。水蒸気変動を理解するためにはオービター観測による全球観測に加え、浅部地下と大気間の水交換を理解する上で着陸機による地表詳細観測が有効である。</p>	<p>火星の酸化的な大気中で還元的なメタンが地上望遠鏡観測、火星周回機、キュリオシティによる地上観測などの複数の観測手法により検出されている。火星のメタンの起源としては、地下での非生物的地質作用、生物活動、または両者の組み合わせが有力であると考えられている。火星のメタンの起源を明らかにするためには、複数の手法でその存在を確かめることがサイエンスの立場として重要であるともいえる。火星のハビタビリティ研究及び火星生命探査において重要なマイルストーンとなる、大気中の水蒸気やメタンの定期的な連続観測をすることが望まれる。</p>
8	<p>テラヘルツ分光センサの搭載に期待したい。テラヘルツ波長域での大気観測は国際宇宙ステーションから地球成層圏微量物質を観測したSMILESによりその威力が証明され、惑星大気観測においてもHerschel宇宙望遠鏡やALMAにより様々な新しい発見がなされている。テラヘルツ分光センサを用いてH2O、HDO、O2、O3、HO2、CO(同位体13CO、C18Oを含む)の吸収線を観測し、表層から高度約70kmまでのD/H比を含む水と酸素(単体・化合物)の3次元マッピング、またCOとその同位体をリトリバルに用いた高度約130kmまでの温度場・風速場マッピングに期待する。</p> <p>火星の誕生から現在に至るまでの大気環境の変遷については、特にこの10年ほどの間に様々な研究により理解が進んだ。中でもMAVEN探査機による大気散逸率の観測は、これまでの火星の歴史におけるCO2大気及び水の散逸量を制約したが、その一方で新しい謎も浮かび上がった。その中でも注目すべきは、火星における水の散逸率に与える下層大気の影響である。火星気象のとりわけ特徴的な現象として知られる、数年に1度不規則に発生する全球規模のダストストームは、2018年の発生時の観測によると大気中の水蒸気を高度100km以上にまで押し上げ、また火星大気循環モデルによる検証はこの押し上げられた水蒸気的光解離により高度80~130kmの水素原子量(散逸率に関連)が平常時の最大約40倍にまで増加しうるとを示した。より頻繁に起こる局所的なダストストームの発生でも水素原子の散逸率が5~10倍になることが報告されており、これらの結果は大気散逸率の見積もりにもダストストームの影響の考慮が重要であることを示唆する。また地形の効果や地表付近の大気対流活動により生じる重力波も、高度50km以上の大気風速場・温度場に影響を与え、大気組成や散逸率の変化に寄与することが示唆されている。よって高度50~130km領域の温度・風速・大気組成について、さらなる高分解能観測と可能な限り高分解能化した火星大気循環モデルを用いたシミュレーションから理解を深めることが、火星の気候システム解明に向けて求められる。</p> <p>火星探査機にテラヘルツ測器が搭載された前例はまだないものの、地表から高度約130kmまでの大気組成・温度場・風速場(吸収線のドップラーシフトを用いた直接導出)観測や表層の水・酸素マッピングにおいてその有用性は検討されてきた。これまでの火星探査では数多くの赤外測器で大気観測を行ったが、波長が大気中に浮遊するダストの粒径と同程度のため表層大気のマッピングが難しく、また高度80km以上の観測も困難であった。波長の長いテラヘルツ波はダストを透過し、また感度の良い高スペクトル分解能でより高高度の大気観測も行えることから、テラヘルツ分光センサは既存の赤外測器と相補的に表層から下部熱圏までひとつながりの観測データ取得を初めて実現し、MAVENによる熱圏大気観測(高度130km以上が対象)とも直接接続して、大気散逸過程への理解を大きく進めることが期待できる。加えてテラヘルツ分光センサによるH2OとHDOの3次元マッピングは、MIMIによる地下水マッピング観測と連携して火星に存在する水の年代分布と表層~大気間の水の挙動の把握につながり、科学のみならず有人探査計画への活用にも有益な情報となる。</p>	<p>2021年に新たに3つの探査機が火星に到達し、各種観測に加えてヘリコプターの工学実証が行われるなど、火星探査は科学のみならず産業活動を見据えた新しいフェーズに入りつつある。特に産業活動の実現にあたっては火星表層の気象・水環境の理解をさらに深める必要があり、特に新しい技術・手法を活用した高いカバレッジ・モビリティを持つ観測網の構築は急務であると考えられる。</p> <p>この流れの中で、火星探査における超小型探査機や飛行機等の活用推進に期待したい。超小型探査機はこれまで火星に行った大型科学探査機と比べて1~2桁のコストダウンと開発期間の大幅短縮が見込め、それによる打ち上げ機会の大幅な増大が期待できる。着陸探査機(車)の成功例がまだ10件しかない火星探査において、超小型探査機により数多くの探査機を火星に送り込むことでの観測網の構築は、火星の理解に革新的なブレイクスルーをもたらすであろう。加えて火星飛行機は火星に降り立った後の科学探査・産業活動に非常に強力なモビリティをもたらすものとして、その実用化に大いに期待する。火星探査の小型化はJAXA以外の研究機関・大学・民間による既存の概念にはない発想のもとでの参入の促進にもつながり、こうした「火星探査のオープン化」から火星を舞台として社会・経済等を劇的に変化させる破壊的イノベーションの創出に期待したい。</p>

No.	MIM計画に期待する観測・探査案(4000字以内)	MIMを含む日本の将来火星探査計画の将来像に対する期待および要望(4000字以内)
9	<p>我々は火星大気中のネオン存在度・同位体組成の測定を期待する。そのために、MIM計画において検討されている着陸機に搭載する科学機器として、我々が開発を進めてきたネオン分離装置搭載質量分析計(Miura et al. 2020 PSS)を提案する。</p> <p>ネオン測定の科学的意義は火星の水の起源の解明・初期火星環境の制約である。ネオンを含む希ガスは揮発性元素のトレーサーである。地球と彗星や炭素質隕石の希ガス組成の比較は地球の海や大気、生命の起源となった揮発性元素の供給源を解明するための主要なアプローチの一つであったが、こうした手法は火星の水の起源を解明する上でも有効である。</p> <p>しかしながら、火星大気中の希ガス組成は火星の気候大変動を引き起こした大気散逸(惑星大気の宇宙空間への流出)によって初生的な情報を失ってしまっている。そこで、我々はこの問題を逆手に取る。希ガスの中でも質量数の小さい希ガスは大気散逸によって1億年程度の時間で火星大気から失われる。したがって、現在の火星大気中に存在するネオンは地質学的な時間スケールではごく最近の火山活動によって火星内部から供給されたものである。このことを利用し、火星大気中のネオンの存在度・同位体組成の測定から、マントル中のネオンの存在度・同位体組成を制約することで、火星の水の起源に迫ることができる。Viking探査によって制約された火星大気中のネオン存在度から推定されるマントル中のネオン存在度は地球のそれを1桁以上上回り、火星の形成史を理解する上での重要な鍵となる可能性を秘めている。他方、ネオン同位体組成の測定は技術的困難(主に40Ar^{++}と20Ne^{+}の干渉)によりこれまで実現しておらず、火星の揮発性元素の起源を解明するための大きな障壁となっている(詳しくは Kurokawa et al. 2021 Icarus および Swindle et al. 2022 Astrobiology を参照)。</p> <p>前述のようにネオン測定の科学的意義の本質は水や大気の起源の解明であるものの、これは同時に初期火星環境の制約にも大いに資する。火星に揮発性元素をもたらした可能性のある炭素質コンドライト隕石・彗星・原始惑星系円盤ガスでは主要揮発性元素(水素・炭素・窒素など)とネオンの存在比が4桁以上異なる。したがって、マントル中のネオン存在度から推定される初期バルク火星の主要揮発性元素存在度、ひいては初期火星大気組成も全く異なるものとなるため、火星のハビタビリティの変遷や生命の存在可能性を議論する上で大きなインパクトがある(詳しくは Kurokawa et al. 2022 LPSC abstract)。こうした初期火星環境へのアプローチは、欧米が先行してきた地質学的な手法とは一線を画する。しかしながら、「はやぶさ」「はやぶさ2」探査に代表されるような日本の強みである「起源」に立ち返る考え方こそ、日本独自の火星の科学探査を開拓するための筋道となるはずである。</p>	
10	<p>火星に存在する水の存在状態に興味を持っています。この理解は火星における生命の存在可能性の探求や、のちの有人探査にも有効な情報になると考えます。火星上の水の存在状態として、氷、液体の水、鉱物中の構造水、鉱物表面の吸着水、粘土鉱物などに取り込まれる層間水などがあげられます。たとえば粘土鉱物中の吸着水は容易に大気中の水蒸気とやり取りをし、水の保持容量もきわめて大きいため、有人探査における重要な水資源となりうる可能性を秘めていると思います。さらに、粘土鉱物中の吸着水は現在の火星における水循環に重要な役割を果たす可能性もあると考えています。これら水の存在状態の区別は周回衛星によるリモートセンシングでは空間解像度から十分ではありません。そのため、特定の箇所への着陸と何らかの方法(現実的には赤外波長での撮像)による高解像度における火星表面物質の分析を観測案として提案いたします。現在稼働中のNASA探査車Perseveranceにはドローンが付属しており、飛行実験に成功したようです。もしも上述した着陸観測機にドローンを搭載できる場合、定点だけでなく周辺の撮像が可能となり、一度の探査で圧倒的に得られる情報量は増えると思います。探査案としてドローンの搭載を期待いたします。</p>	
11	<p>電子計測器による火星近傍での太陽風及び火星電離圏の電子観測をここに提案する。ハビタブル環境の持続性の理解は系外惑星の理解にも繋がる大きな科学課題であり、前述のMACOワーキンググループでも主たる科学課題として議論されてきた。火星はかつて地表にも水を有して生命を育む可能性を持ち、その後寒冷乾燥化したとされる惑星であるため、ハビタブル環境の研究において恰好の観測対象である。火星周回機による太陽風などの宇宙環境(外的要因)の(著しく大きな)変化にตอบสนองする火星大気の観測は大気(海洋)散逸ダイナミックスの解明に繋がるため、40億年にわたる火星大気進化モデルを大きく制約する。そのためには、太陽風などからのエネルギー輸送の媒体の一つである電子の計測が有効な手段となる。MACOワーキンググループでの検討結果を踏襲して、高エネルギー粒子(放射線)、南北のオーロラ、火星残留磁場の計測・撮像と連携を取るものが包括的な理解に繋がるとを付記する。</p>	

No.	MIM計画に期待する観測・探査案(4000字以内)
12	<p>高分解能質量分析装置HRMSIによる火星超高層大気の高質量同位体分析を提案する。ハビタブル環境の持続性の理解は系外惑星の理解にも繋がる大きな科学課題であり、前述のMAOワーキンググループでも主たる科学課題として議論されてきた。火星はかつて地表にも水を有して生命を育む可能性を持ち、その後寒冷乾燥化したとされる惑星であるため、ハビタブル環境の研究において恰好の観測対象である。火星周回機による火星超高層大気の高質量同位体分析は火星大気散逸そのものの観測であり、その同位体比は大気散逸の物理機構やこれまでの散逸量の直接的な情報となる。HRMSIは宇宙機用の装置としては前例の無い高い分解能と精度を持ち、火星大気的主要元素(C、N、O)に対しても有効な観測成果を期待できる。MAOワーキンググループでの検討結果を踏襲して、火星大気中の水蒸気の鉛直分布や火星大気の温度、速度の観測と連携を取ることで、火星の地表(地下水を含む)から下層大気や上層大気までの相互関係の包括的な解明が期待できることを付記する。</p>

ソビエトのMars 2、3ミッションやPhobosミッションを皮切りに、欧州宇宙機構(ESA)のMars ExpressやNASAのMAVENミッションで明らかにされたように、火星において水分子、もしくは水に起源を持つ酸素原子イオンや分子イオンは、現在も火星から宇宙空間に流出しています。火星に磁気圏がないために太陽風のエネルギーや運動量が火星電離圏で直接電離圏に作用することがこの大気流出散逸は原因だといふ近年まで考えられてきました。しかし地球でも同様の電離層からの酸素イオン流出が起こっていることなどから、現在ではこの解釈には疑問が呈されています。そのため、電離層イオンへ与えられるエネルギーや運動量の起源やそのメカニズム、また、異なる惑星間での類似性や差異は、惑星超高層物理学における大きな未解明の問題となっています。この問題は、火星をはじめ多種多様な惑星の大気進化、水環境の変遷を解明するために解決すべき、重要な問題です。水環境の長期的変遷の理解は、科学的興味はもとより、今後の有人火星探査にも影響する、重要なトピックと言えます。

これまでの火星探査ミッションによるプラズマ観測は、基本的に磁気圏に限られてきました。磁気圏では、電離層からやってきた水関連イオンは十分に(脱出速度を越えるまで)加速されていますので、全球でどの程度のイオンが脱出しているのかを計測するには都合がよかったのです。しかし、ほぼ静止している電離層のイオンがどのように加速され、磁気圏に達するのか、という物理メカニズムを解明するには、磁気圏での観測では不十分で、電離層における観測が欠かせません。電離層における直接観測の最低高度はMars Express衛星では約250km、MAVEN衛星で約130kmですが、両ミッションともに楕円軌道であることから、電離層内での滞在、観測時間は比較的短く、さらには時間的に高度変化を伴います。また、両ミッションとも電離層観測に特化した観測器、例えば、電離層イオンの流れ(速度場)を観測する機器は搭載されていません。電離層におけるイオンは脱出速度を越える上向き速度を得ると、電離層から磁気圏へと上昇し、さらに宇宙空間へと広がっていきます。したがって、電離層のイオンの流れ場は大気流出散逸を知る上でキーパラメータです。どのような物理メカニズムで、ほぼ静止している水起源大気成分イオンが上昇流成分を持ち、脱出速度を越えるまで加速されていくのだろうか? この自然な疑問に対しては、未だに観測的な証拠がないため、私達は答えを持っていません。

MIM衛星で高度200-400kmでイオンの速度場を長時間にわたって連続的に、グローバルに計測すれば、この水関連イオンの散逸メカニズムを明らかにすることが可能となり、エボクメイキングなサイエンスが期待できます。加えて、SARやオービター搭載の議論がされている他機器(例えばテラヘルツ分光器や質量分析器)で観測される、地下の氷、大気の水蒸気の分布観測と連携することで、宇宙空間への散逸を含めた上下結合のメカニズムの議論が可能になります。また、火星でも発見されたオーロラ降下電子や高エネルギー粒子など宇宙空間から来る粒子が運動量、エネルギー源として大気流出にどの程度寄与しているのか、さらには中性大気と電離層イオン間で運動量やエネルギー交換がどの程度行われているかの、など、MIM衛星が計画する高度での観測によって解明されるサイエンストピックには事欠きません。

具体的な観測機器として、地球の電離圏での観測で黎明期から長年開発、運用されてきた実績のある、Retarding Potential Analyzer(RPA)および、Ion Drift Meter(IDM)をパッケージ化し、火星環境に最適化した科学機器、Ion Drift Analyzer(IDA)を提案いたします。RPA/IDMは高ヘリティジ、低リソースな観測器ですが、イオンの3次元速度成分を、精密に(具体的に数10m/sの感度で)計測することが可能です。また、イオン密度やイオン温度といったパラメータも観測でき、電離層中のサイエンスや中性大気との相互作用を理解することにつながります。約300km高度を周回する円軌道、極軌道の人工衛星MIMにIDAを搭載し、これら電離層イオン速度場や温度、密度といったパラメータを長時間にわたり観測し、時間的、空間的にマッピングを行うことで、電離層での加速メカニズムを解明し、大気散逸の本質を理解するのが本提案の科学目標です。

今後の火星探査は複数の宇宙機(着陸機を含む)による国際協力での網羅的な調査に向かうことを想定し、科学観測も含めた探査計画の実行を担う部門の強化を期待する。物理現象を対象とする天文や宇宙プラズマの観測では観測装置の高精度化・高分解能化が都度の観測計画での課題であり、その観測形態はおよそ踏襲的であった。太陽系科学の探査計画では様々な観測装置の組み合わせが可能であり、探査計画毎に様々な観測形態を持つ。よって各探査計画において観測装置の開発だけでなく観測計画の構築でも新規の課題が多く、観測装置の開発チームだけでは対応が困難である。また、天文や宇宙プラズマの観測計画は経験豊富な開発チームで固定化される傾向にあるが、太陽系科学の観測計画は様々な新規観測装置の参入が期待される性質を持つ。シリーズ化した観測装置では担当メーカーに開発体制が維持されるが、新規で単発の可能性がある観測装置の開発ではメーカー共に開発チームの負担が大きく、開発体制の継続性を求めにくい。以上より火星を始めとする太陽系探査を今後安定的に展開するためには、強化された探査計画部門が観測装置開発まで踏み込んで開発チームに参加し観測計画構築までを横断的に主導することの必要性を強く感じている。実績や経験を積み上げた開発チームでこれまで担っていた継続性を、今後は探査計画部門が確保することを要望したい。

火星は、地球の月に人類が到達できる天体であると考えられます。また、NASAのArtemis計画でも、月の次のロードマップとして火星が定義されています。一方で、Artemis計画はtop downのミッションですし、また、継続的で安全な火星探査には莫大なコストがかかること、を考えると、今後の火星探査はtop downで進んでいくと思われず。

一方で、JAXA/ISASや日本の惑星科学コミュニティは長年にわたって、bottom up的な科学探査の文化、経験を蓄積してきました。このbottom up的なアプローチを、うまくtop downな火星探査に組み入れていくことで、「探査」と「科学」の間でwin-winなミッションが期待できると思います。この点から、現在のMIMオービター計画への日本のサイエンス、機器提供提案は大変すばらしい方向性だと感じております。国際情勢、国内情勢など、コントロール不能、予測不能な外部要因が多くあり、今後、どのような将来像を描くのかを予測するのは非常に難しいとは思いますが、是非、top down missionであるMIMへの、bottom upアプローチによる科学探査の機会を諦めず、実現に向けて努力していきたいと思えます。

No.	MIM計画に期待する観測・探査案(4000字以内)	MIMを含む日本の将来火星探査計画の将来像に対する期待および要望(4000字以内)
14	<p>水資源探査を目的とした合成開口レーダー(SAR)観測に主眼を置いたMIMの低高度(約300km)極軌道は、近年発見されたばかりの火星オーロラの近距離からの詳細構造観測、特に局所地殻磁場のある南半球と磁場の無い北半球の違いを準同時観測することができる。これは、上記MACO計画で検討されてきた「太陽高エネルギー粒子イベント時に火星に現れるオーロラを高エネルギー粒子(放射線)の全球モニタのリモセン手段とみなし、南北のオーロラ比較、加えて高エネルギー降り込み粒子・それによる電離大気変動・散逸大気への影響を準同時観測することで局所地殻磁場が放射線環境と大気散逸に与える影響を評価する」という観測シナリオが受け継がれる絶好のチャンスである。</p> <p>MIMがSAR測器に加え、これらの宇宙天気観測を実現できる測器を搭載することができれば、来たる火星有人探査活動に向けて水資源利用のみならず、宇宙放射線被曝という有人活動喫緊の課題解決に一石を投じることができる。加えて、非磁化・希薄惑星である火星における放射線環境の理解は生命環境の決定要素であり、過去および現在の生命前駆体可能性に影響を与えることから、科学的にも重要な新たな知の発見・創出が期待できる。今後の太陽系探査において、生命環境の形成と進化の探究が重要な科学目標となっており、その中で火星は過去に生命環境を保持し進化の過程で失った地球外太陽系天体として、国際的にも重要な探査対象である。MIMが水資源偵察ミッションに閉じず火星における重要な科学目標に貢献できることを期待する。</p> <p>加えて、上記に挙げた宇宙天気観測は、有人探査に向けた通信システムに対する宇宙天気の影響評価が可能なため将来有人着陸サイト選定に貢献できる他、SAR観測自体に対しても電離圏の影響評価を要する可能性があり、その観点においても貢献が期待できる。</p> <p>宇宙天気観測を実現する計測機器開発についても、これまでの磁気圏・大気電離圏探査(あらせ、BepiColombo、あかつき、ISS/IMAP、かぐや)の技術的ヘリテージが国内にあり、その利用において日本コミュニティの貢献が期待される。</p>	<p>世界各国の宇宙機関が協力して進める国際宇宙探査では、月および火星有人活動に向けた探査計画が加速している。我が国も参加するアルテミス計画では2024年までに人類を再び月面へ人を送る計画であり、その中核を担うゲートウェイは火星有人探査をも視野にいたれたブラットフォームとして検討が進められている。この国際宇宙探査は40兆円規模という巨額の新市場として米国等の民間企業の参入を得て、有人による宇宙活動の領域を月を超えて火星へと急速に広げつつある。これまでの有人宇宙活動は、地球周囲軌道において地球磁場の保護の下で行われ、太陽や銀河から到来する高エネルギー粒子(宇宙放射線)から守られていた。この保護から離れた将来の人類活動の場である月そして火星の環境変動の理解は、科学的・工学的・社会的に重要な課題である。火星における持続的な有人活動に向けて、解決しなければならない環境課題の一つとして、宇宙放射線被曝の予報がある。これには太陽面爆発現象(太陽フレア)に伴い大量に放出される光エネルギー粒子の影響がある。月では、周囲軌道の有人モジュールで組み立て可能な放射線防護システムが備えられようとしている。しかし固有磁場を持たない希薄な大気(表層大気密度:地球の約1/100)において宇宙放射線が火星環境に与える影響の理解は黎明期であり、定量的な評価と予測はまさにこれからの喫緊の課題となる。地球とは全く異なる火星環境の観測的的理解が、2040年代に迫る火星有人探査に必須であるという現実を見据え、世界に先駆けて日本の強みを創成する必要がある。太陽-地球間結合研究で日本が独自に構築してきた地球における宇宙放射線予報システム(Kataoka et al., Space Weather, 16, 917-923, 2018)を火星まで演繹し、これまでの探査ミッションで培ってきた観測技術を基軸に必要な計測データを整備することができれば、世界をリードする一躍を担うことが期待される。人類が初経験する火星周囲軌道および表層での長期間活動の実現には、単なる水資源探査とその利用だけでは不十分であり、その安全性確保にかかるハザード情報の提供・発信の実現が中長期的に必須である。そこには日本の役割や強みを提示する機会が見出せる。火星環境計測の基盤技術を世界に先駆けて開拓することで、我が国の国際競争力の強化を図り、国際性を備えた優秀な人材の安定確保や能力強化につなげることが必要である。</p> <p>また上記提案は、JAXAが2019年国際パートナーとして加入したNASA太陽系探査に関する研究バーチャル研究所SSERVIにおいて、水資源利用のみに偏りがちな火星インフラ計画と被害対策を補間し、有人・無人探査のハザード問題解決を担う日本のSSERVI活動を最大化するために日本が貢献できるチャンスである。海外ミッションにも積極的にノミネートし主体的に参画できるだけのシステム技術・測器開発技術を獲得し、ミッション実績を積み、将来火星探査を通じて学会・分野を跨ぐ融合的な横断研究を推進する絶好の機会として捉える必要がある。</p>
15	<p>inSARを用いれば、氷分布の時空間変動、地殻(地盤)変動も調べられるはずである。</p>	<p>SARIは日本の複数メーカーに一定の技術があるので、それを生かす道もある。</p>
16	<p>火星においては、将来的に人間が活動できる惑星としての期待がおおきいと思われます。そのため、MIMで主目的とする水氷の観測というのは、非常に重要で素晴らしいと思います。そのうえで、人間がそこで生活することを考えると、非常に強い砂嵐の発生する火星の気象では、それに対処することは欠かせないのではないかと思われます。</p> <p>地球とは大気の大気条件も大きく異なるとはいえ、気象の大循環モデルは十分に成熟していると考えられると思います。ですので、このような大循環モデルで、大規模な砂嵐が発生することを予報できるかどうかという点についての検証ができるとういのではないかと考えます。</p> <p>大気のリムの観測で東西風の観測ができると思われるので、そうだとするならばそのデータは大変に有用だと思います。また、カメラによる観測から、空中に浮遊しているダストの量が観測できて、また、レーダーを含む何らかの測器で、火星表面の巻き上がるダスト量について、欲を言えば巻き上がりやすさについての情報も取得できたりすると、予報が可能になるのではないかと考えられます。</p> <p>また、上空からの観測は、十分精度よくできるとしても、反対側の端点での、観測を行うことでその信頼性は、けた違いに上昇するだろうと思います。ですので、上空からの測定にはそのペアとなる観測を地上で行うことには、大きな意味があると思います。ですので、可能な限り地上とのカップリングした観測を検討していただけたらよいだろうと思います。</p>	<p>日本も将来的には火星に拠点を築き、地球との往復が行われることを期待しています。そのためにも、一つ一つの探査で日本も必要な技術を獲得していくということが大切だと思います。</p> <p>正直、日本は火星探査という点ではまだ、自力で行ってはいけませんので、他国もちろんとりわけ米国との連携が欠かせませんが、すべての技術を自前でやるということを最終目標にすることが重要だと思います。</p> <p>そのためには、この火星の探査計画はシリーズ化して計画しようとしているところはともよいなと思っています。</p> <p>計画はそれぞれ1つずつ別々に立てられるものなのだと思います。今回はこの部分は我々は持っていないから国際協力で調達しようというのももちろん必要だと理解はするのですが、その部分はいずれ獲得が必要なものではあります。であれば、何らかの開発を進められるような仕組みが必要ではないかと思っています。非常に中核な技術についてはそのようなものになっているのだと思いますが、どのような細かいものであっても宇宙用の物は、勝手にできているということはありませんように思います。ですので、そのような開発も将来を見越して、開発が行えるような体制があるともっと素晴らしいだろうと思います。</p> <p>ですから、例えば2020年代はこれではなくても30年ごろには、自前でやるのだというようなことを見越した開発経費や開発計画の立案などがあるとよいのではないかなと思います。</p>

No. MIM計画に期待する観測・探査案(4000字以内)

MIMを含む日本の将来火星探査計画の将来像に対する期待および要望(4000字以内)

「大気微量成分の時間・空間変動観測を通して明らかにする火星大気化学」

要旨: 火星大気微量成分の観測を通して、地球・金星とは異なる火星大気化学の全貌を解き明かしたい。そのためには、既存の火星探査ミッションでは実現していない、サブミリ波(テラヘルツ波)帯でのヘテロダイン分光測器が重要となる。これは、サブミリ波(テラヘルツ波)帯は火星大気中の浮遊ダストの影響を受けないため、ダストストーム発生時と通常時との大気化学の違いを観測的に制約できるからである。MIMの探査目標とも密接に関係する「火星における水(水蒸気)の出所と行き方」を理解するために、H₂O、HDOの観測だけでは無く、サブミリ波(テラヘルツ波)帯測器を用いたHO_xラジカルやH₂O₂の観測を提案する。

・惑星科学における火星大気研究の重要性

火星は過去に温暖湿潤な気候を有していたと考えられる惑星であり、そうしたハビタブル惑星が現在の寒冷環境に至るまでの大気・表層環境の変遷プロセスを理解することは、惑星科学における本質的な問いの一つである。また、火星は極冠の消長に伴って大気主成分の二酸化炭素の存在量が~30%の幅で変動するが、これは、我々が一般的にイメージする「惑星大気」と、イオや冥王星に見られるような一時的な「希薄大気」との中間に位置するものである。すなわち、宇宙に存在する様々なタイプの惑星を考えた際に、その表層に起きうる物理・化学プロセスを(宇宙空間からの影響も含めて)普遍的に理解するためには、火星大気は極めてユニークな探査対象だと言える。

・火星大気微量成分観測の重要性

惑星表層環境における物理・化学プロセスを理解するには、「大気力学(物質循環・運動量輸送)」、「大気放射(気温分布・エネルギー収支)」、「大気化学(大気微量成分・エアロゾル)」、「大気上下間結合・大気散逸」などは、多岐に亘る視点が要求される。本提案では、特に「大気化学・大気微量成分観測」の視点から火星サイエンスの意義を述べたい。

大気微量成分の存在量およびその空間分布や時間変動は、その惑星における大気化学反応を制約するためには不可欠な情報である。火星では、地球と異なるのは勿論のこと、同じ二酸化炭素大気を持つ金星とも異なる大気化学反応ネットワークが存在しており、近年では「比較惑星大気化学」という文脈からも火星大気化学の詳細理解が重要視されている[e.g. Krasnopolsky (2011); Mills et al. (2021)]. さらに、火星や金星といった二酸化炭素を大気主成分とする惑星では、二酸化炭素大気の大気化学的安定性問題を解決するために、光化学や触媒反応も含めた大気化学反応ネットワークの詳細理解が必要となる[e.g. Zahnle et al. (2008)]. これは火星(や金星)に限った話では無く、JWSTの運用開始とともにこの先の10年間でより一層の深化が得られるであろう地球型系外惑星大気の研究にも通じる問題意識である[Gao et al. (2019)]. また、火星では大気中に浮遊するダスト粒子が摩擦帯電しており、その静電場による電気化学反応の重要性もかねてから指摘されている[Atreya et al. (2006); Delory et al. (2006)].

こうした「大気化学」以外にも、火星大気微量成分観測の重要性は指摘される。ここでは詳述を割愛するが、地表・地下水から大気中に消化してきた水蒸気はどこにどのように輸送され(水循環)、その後、どのようなプロセスで大気散逸するのかという視点[e.g. Aoki et al. (2019); Stone et al. (2021)]や、希ガスをを用いた初期火星からの大気進化の制約[e.g. Kurokawa et al. (2021)]なども大気微量成分観測がキーとなる。

17 MIM計画への観測提案

Mars Ice Mapper探査計画(以下MIM)では、火星表面下の地下水・地下水分布の探査、および将来の火星有人探査に向けた火星表層環境の詳細理解が最重要探査目標として掲げられている。この探査目標に直接的に寄与する大気微量成分観測としては、前述の「水循環」の中でも特に、地面から昇華してくる水蒸気H₂Oおよびその同位体HDOだけを観測すれば十分と思われるかも知れない。しかし、実際はそうではなく、より正しく火星表層における「水循環」を理解するためには(気温場や風速場といった基本的な気象情報の取得は当然として)H₂Oと化学的に深く関係するHO_xラジカル(OH, HO₂)やH₂O₂の観測も併せて非常に重要となる。HO_xラジカルは火星大気における光化学を駆動する重要な分子であり[e.g. Boxe et al. (2014)], また、H₂O₂は火星における主要な酸化剤であると同時に、近年では過去の火星気候における温室効果ガスとしてもその効果(但し、相当な存在量が必要)が議論されている[Itô et al. (2020)]. H₂O₂に関してはダスト粒子の摩擦帯電に絡んだ電気化学プロセスによってその存在量が極めて大きくなるという議論もある[Atreya et al. (2006)]. これらの大気微量成分の空間(緯度、高度)分布や時間(昼夜、季節)変動を、火星大気特有のダストストームの内外において制約する観測が鍵となる。

こうした大気微量成分の観測は過去の欧米の火星周回探査機においても積極的に行われてきた。その最たる例は、今現在も周回軌道上で運用されているExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)である。TGOに搭載されている観測機器の中でも、火星大気を通過してくる太陽紫外光や赤外放射を高分散分光観測するNOMADやACSといった観測測器は、大気微量成分が記す微弱な吸収線スペクトルを高精度で観測(太陽遮蔽観測)することが可能である(TGOの火星大気微量成分観測に関しては、青木ら(2018)が詳しい)。その一方で、太陽遮蔽観測は、基本的には常に日の出・日没時の火星大気を観測することになり、またTGOの軌道は火星ディスク上を空間マッピングするような観測とも相性が悪い。さらに、紫外や赤外といった観測波長では、火星大気中のダストの光学的厚みも無視できず、太陽遮蔽観測のように火星大気中の視線が長くなる観測ジオメトリでは、特に低高度の観測がダストによる不透明さの影響を強く受けてしまう。

MIMでは、TGOが不得手とする守備範囲(例: 低高度での微量成分分布や短時間での二次元マップの取得)や、TGOの観測から新たに見出された科学的な問い(例: TGOで新たに発見されたHClの生成・消滅過程、およびそれに付随するCl系の大気化学反応ネットワーク)に対して、新規観測データを取得し、火星大気微量成分に関する我々の理解をより発展させることが期待される。具体的な観測要求としては、「H₂Oおよび関連する大気微量成分(HDO、HO_x、H₂O₂など)の3次元分布(空間マッピング+地表面から高高度までの高度分布)を、昼夜の日変化を追い掛けた観測する」という一文にまとめられる。このうち、空間マッピングに関しては、SARによる火星地下水のマッピング観測に最適化されたMIMの低高度軌道は非常に都合が良い。地表面から高高度までという要求に関しては、まず、低高度におけるダストの影響を受けない観測が必要となる。これを周回軌道からのリモートセンシングとして実現できる唯一の測器が、サブミリ波(テラヘルツ波)帯・ミリ波帯の放射計である。サブミリ波やミリ波帯の放射計は、電磁波の波長が火星のダストの粒径よりも十分に大きくなり、ダストの光学的厚みがほぼ無視できるようになる。実際、地上のサブミリ波望遠鏡(ALMA望遠鏡)を用いた火星観測で、火星の全球ダストストーム時の火星地表面からの熱放射が観測されている[佐川ら(2019)]. また、同波長域での電波分光観測手法の主流であるヘテロダイン観測では、波長(周波数)分解能が百万以上という非常に高い性能を実現できる。これは、火星大気高高度の低密度の気体中に存在する大気微量成分の微弱なスペクトルを精度良く検出することに長けている。肝心の観測対象分子に対する感度については、本文章でここまで登場した大気微量成分のうちOH以外の分子は一般的な積分時間で十分に検出可能な吸収線がサブミリ波(テラヘルツ波)帯に多数存在し、測器設計の自由度も比較的高い。特にH₂O₂やH₂O₂は赤外領域よりも強い強度のラインが存在する。OHはその吸収線が遠赤外線よりも短い波長に存在しているため、サブミリ波(テラヘルツ波)帯で観測するにはOH専用測器を最適化する必要がある。なお、上記の大気微量成分分子に併せて、12COおよび13COを観測しておくことで気温分布も併せて導出することが可能である。サブミリ波(テラヘルツ波)帯の観測測器が過去の火星探査機には搭載されたことが無いというも、独自の新規観測を世界に先駆けて日本が実現するという意味で重要となる。火星探査機搭載のサブミリ波(テラヘルツ波)測器のデザイン検討自体は、日本のチーム以外にも、欧米でも実施されており、測器開発の実現性も十分に議論されている[e.g. Read et al. (2018)].

日本の将来火星探査の姿としてJAXAで議論されている戦略的ロードマップでは、火星への着陸探査や火星からのサンプルリターンが大きな柱となっている。また、JAXAの国際的な宇宙探査戦略では、月探査と火星探査が密に関連するものとして特に強調されている。これらの探査戦略自体に大きな反論は持たないが、一方で、月・火星探査と火星以外の惑星探査との関連について、JAXA(あるいは惑星科学などの研究者コミュニティ)がどのように考えているのかは気になる所である。ここで敢えて述べるまでも無いが、月・火星探査で培われた技術が、将来の他の惑星探査にも効果的に継承されていくことが重要であろう。

この先の20年、30年といった将来を考えると、木星や土星以遠の惑星を対象とした国際大型惑星探査が(おそらくは欧米主導のもと)必ず実施される[e.g. Fletcher et al. (2020); Beddingfield et al. (2021)]. それらの国際的な大型探査計画に、日本からの観測測器の提供という形で参加できるかどうかは、我が国における惑星科学の振興を左右する重要なポイントとなる。その場合、(当たり前ではあるが)競争力の高い日本独自の観測機器の開発能力や、既存装置の小型化・省電力化の実現が最重要となる。日本の戦略的な火星探査のロードマップで描かれている。20年後、30年後に獲得を目指す着陸探査技術やサンプルリターン技術は、そのさらに先の日本の惑星探査の強力な武器となることは疑う余地は無い。それと同時に、例えば、欧米の10年後の惑星探査ミッションにおいても日本が重要な役割を担えるような技術獲得を、今現在から短期間のうちに(つまり、MMXやMIMIにおいて)実現することも重要であろう。

科学的な面からコメントをすれば、大気微量成分の観測は今後も惑星探査の重要な位置を占めると考えられる。特に、海王星や天王星の惑星大気に関しては大気微量成分について未知のことばかりであり、そういった惑星の探査計画においては、周回軌道から大気微量成分を定量するための分光観測装置が不要とされることは決していない。その際、MIMを含む今後の火星探査において、日本国内でも大気微量成分観測(主に分光器開発)のヘリテージが蓄積されていることが望ましい。既に複数の惑星探査ミッションにおいて大気微量成分観測の実績を持つ欧米に対して、日本はほぼ新規参入の状態ではあるが、将来的にキーとなる開発要素は日本の惑星探査・天文観測の機器開発コミュニティからも着実な成果が出ている。例えば、イメージングレーティングとクロスディスパーザーを利用した、超小型の高分散分光器の開発が挙げられる[Sarugaku et al. (2021)]. これは従来の類似性能の衛星搭載分光器(TGOのNOMADなど)のサイズよりも一回り以上小さく、CubeSatにも搭載可能な寸法が達成されている。観測性能面においても、回折格子によるクロスディスパーザーを用いることで、幅広い観測波長域を一度に取得することができるなど、観測運用上での実効的な利点も多い。

上記の大気微量成分観測というトピックはあくまでも個人的な一意見ではあるが、このトピックに限らず、戦略的なロードマップとして今後の探査計画を(比較的)立案しやすい火星探査には、(火星探査を最終ゴールとするのではなく他の惑星の将来探査にも繋がるような、技術開発ロードマップとの連携を強く期待する。

【参考文献】 Krasnopolsky (2011) PSS 59, 952. / Mills et al. (2021) SSR 217, article id43. / Zahnle et al. (2008) JGR 113, E11004. / Gao et al. (2015) ApJ 806, 249. / Atreya et al. (2006) Astrobiology 6, 439. / Delory et al. (2006) Astrobiology 6, 451. / Aoki et al. (2019) JGR 124, 3482. / Stone et al. (2021) Science 370, 824. / Kurokawa et al. (2021) Icarus 370, 114865. / Boxe et al. (2014) Icarus 242, 97. / Itô et al. (2020) ApJ 893, 168. / 青木ら(2018) 遊星人 27, 224. / 佐川ら(2019) 遊星人 28, 277. / Read et al. (2018) PSS 161, 26. / Fletcher et al. (2020) Phil. Trans. R. Soc. A 378, 20190473. / Beddingfield et al. (2021) Whitepaper #121 submitted to the Planetary Science and Astrobiology Decadal Survey 2023-2032. / Sarugaku et al. (2021) Proc. SPIE 11443, Space Telescopes and Instrumentation 2020: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 114433T.

No.	MIM計画に期待する観測・探査案(4000字以内)	MIMを含む日本の将来火星探査計画の将来像に対する期待および要望(4000字以内)
18	<p>MIM計画は、火星地下浅層における水(H2O分子)の水の存在を確実に把握することで、将来の有人火星地表面着陸探査へ道を開く重要情報を探査するものであり、日本がこの国際共同計画に参画する意義は大変大きい。さらに小型工学着陸実証機EDLIより日本として初めて大気のある重力天体へ着陸機を下ろす計画は工学的にも重要であり、着陸探査によってのみ可能となる地表面での気象観測は、MIMオペータ一周回機による全球SAR遠隔観測との比較のための地上確証を得る意味でも意義が大きい。地下浅層に水気がある場合、季節に依存して大気中へ昇華して水蒸気が発生する可能性があり、これが気象へ与える影響など気象学的な意味での経時変化がみられる可能性が高い。火星地表面の局所や惑星大気全体で重要な事象であるダストペヒルやダストストーム等の火星ダスト現象は、ダスト中で火山雷のような局所放電現象が多くみられる可能性を有しており、さらにダストの巻き上げには静電場の寄与が考えられる。突風などの気象条件や隕石の大気突入では超低周波音や大気重力波が励起される。静電場の観測、電磁波の観測、音響・微気圧観測は、これらの変化を捉える手法となる。南極昭和基地周辺における最近の研究で、差圧観測装置でもある音波計測器は、風速との相関が非常に強いセンシング手段であることが判明しており、MIMのEDLIが超小型軽量なスケールでしか実現できない場合、気象観測用パッケージとして有力な風向風速観測器の搭載が難しい場合に、数10 g程度の質量の簡易な超低周波音マイクロを搭載することで風速の観測が可能となる。一般的に、従来の火星着陸探査提案では火星形成史を理解するために重要な地表面地質観測等に関心が高い傾向にあり、次に生命探査または生存環境探査があり、気象や突発的現象への関心は十分とは言えない。InSightが地震計による初観測を成功させ、火星地震(火震)の存在が明らかとなり、テクトニックに全く静かな火星というイメージは一部更新されることとなった。火星大気中での様々な事象は、場合によって音波を励起し、数100 km〜数1000 kmも大気中を伝搬して観測される。有人活動を将来に見据えた火星着陸観測では、滞在中に遭遇する危険性の察知は重要課題であり、従来からの気象観測に対し時間分解能の高い気圧波を捉える観測や静電場の観測なども行っていくべきと考える。</p>	<p>日本初の火星探査オペータとして火星大気散逸過程の解明などが期待された「のぞみ」は火星周回軌道投入に失敗し、それ以降の日本の探査史には長らく火星は登場して来なかった。現在フォボスからのサンプルリターンを目指して進められているMMX探査計画は「はやぶさ」シリーズで築かれた日本独自技術を重力天体の衛星探査へ生かすものであり、その延長線上に日本の火星探査がシリーズ化されていくべきと考える。MIM国際探査計画は、まさにその流れの中において、日本の惑星探査コミュニティも積極的に参画するべきであろう。地球-火星間の輸送手段としてのスペース・タグのような新たな発想を携えた新時代火星探査を切り拓くプロジェクトとして工学的にも様々な課題があり、日本としての新規技術の獲得や国際共同での新発想の試験・経験の蓄積なども期待される。月ゲートウェイ、アルテミス計画などの月有人探査計画が軌道に乗った先には、火星有人探査が想定されており、大気のある重力天体としての惑星・火星で宇宙飛行士が最初の探査を行うまでに、水をはじめとする現地調達可能な資源をいかに効率的に取得できる目途が得られるかは重要な要素である。また、地球上、宇宙空間、月面とは大きく異なり、全球ダストストームの発生等があり得る火星地表面の環境条件を十分に理解し、安全性を担保したうえで有人探査計画を遂行せねばならない。そのためにはMIMの目的の1つである地下浅層の水の在り処を精密決定することは重要課題であり、EDLIなど大気のある重力天体へのアプローチ手法の試験を経た技術獲得は何より日本として重要なステップとなるはずである。また惑星探査、とくに火星の探査では、時代が進むにつれて地球上での研究調査や技術開発が火星環境下へ応用され、最適な適用条件にて持ち込まれ、やがて高度化のステップが進み、その先に有人探査の時代が到来すると期待される。太陽系探査の独自技術と独自コミュニティを有し、惑星探査を行っていく力を有した国の1つとして、日本は国際火星探査計画へ継続的にコミットしていくべきである。研究開発で得た知見や研究開発に携わった人材を新たな世代へと引き継ぎつつ、長期的スパンで達成しうる大目標を思い描くとともに、現代のキャリア範囲でも実現が見込まれる10年先、20年先の着実な成果を目指してこれらを蓄積し、国民の理解を得て地道に進めていく必要がある。</p>

我々は、これまでミリ/サブミリ/テラヘルツ波の受信機や望遠鏡を自作して天文観測、地球大気環境計測、惑星観測を推進してきた。そこで、MIMサブサイエンスペイロードとしてテラヘルツヘテロダイン分光装置(Terahertz heterodyne spectroscopy Sensor: THSS)の搭載/火星大気環境の観測を提案する。MIMでは、表層/地下の水分布観測を主目的とする国際協力の中型ミッションが検討されている。これと連携して「火星宇宙天気・気候/気象・水環境・大気化学反応ネットワーク」を紐解き、ハビタブル環境の持続性を理解するとともに、将来の着陸探査の事前調査を行うためには、地表近傍から高層へと至る水蒸気分布を測定し、Ice mapperの水分布観測と合わせて現在の火星の水循環の実態に迫ることが必須となる。テラヘルツヘテロダイン分光装置は、こうした火星の表層近傍から高度120km程度までの温度、風速場、水・HOx種など微量分子とその同位体の3次元(緯度、経度、高度)観測を可能とする装置である。火星では初の取り組みとなるが、日本ではサブミリ波の単一鏡望遠鏡や、ミリ波干渉計やALMAなどの地上望遠鏡用技術として高度に確立されており、宇宙機でも国内外においてMLS、SWAS(NASA)、Herschel宇宙望遠鏡(ESA)、地球大気環境観測SMILES(JAXA/NICT)などで実績がある。また現在JUICE/SWIF(ESA)の開発も進められている。ミリ/サブミリ/テラヘルツ波受信機は、これまで地上観測でも4Kの極低温で動作させることが多く、もともと真空やヒートシールドに強いデバイスが多い。また、周波数をダウンコンバートした中間周波帯は民生に至るまで通信などの分野で基本的な技術・ノウハウが広く確立している。

THSSの最大の特色は、火星の高度0-140kmに渡って温度や密度(あるいは気圧)などの基本物理量や、水とその同位体、大気化学反応に関わる微量分子の混合比、ドップラー速度の計測による風速/輸送場などの観測を可能とする点である。その中でも特に以下のような強みをもつ。

✓太陽のような背景光源が不要のため、昼夜あるいは太陽に対する衛星の位置を気にすることなく、あらゆる経度・緯度・LT帯のリムサウンディング観測やナディア観測が可能である。

✓波長が長いことから、広帯域の分光計を用いることで、表層〜境界層の微量分子の観測も可能であり、特に火星特有のダストストーム発生時にも内部の微量分子の動態を見通すことが可能である。

✓周波数高分解能のリムサウンディング計測により、高高度の水蒸気や大気の酸化過程をつかさどるHOxなどの微量分子のスペクトル、子午面循環や東西方向の風にとらぬスペクトルのドップラントを捉えることができる。また、大気重力波の2次元分布の観測も期待されている。

✓ナディア観測により数100mの空間解像度の観測も可能である(ただし衛星の高度やアンテナのサイズ、積分時間による)。このようにTHSSは火星大気物質循環を捉える上で強力なツールである。火星ではかねてより「CO2の安定問題」があり、どのように一酸化炭素がCO2に酸化されて現在のCO2濃度を維持しているのか、まだ解明されていない。また、火星ではメタンの季節変動が観測されているが、メタンの起源もさることながら、メタンがどのように壊れて局所的な分布を形成するのかがまだよくわかっていない。このため、水やHOxなどのラジカルやOxなどの酸化剤やCOの動態の理解は、火星大気の大気化学反応ネットワークを把握する上で不可欠となっている。また、これらの化学的環境を駆動する風速/輸送場すなわちダイナミクスと同様観測がセットで欠かせない。さらにHDOなどの同位体種の時間・季節依存の3次元分布を描き出すことで表層やダストに含まれる水の量や領域(地域や高度)、また火星の水の変遷について重要な知見を得ることができ

近年の衛星観測から、火星の大気流出過程についても深くメスが切りこまれているが、まだ流出・大気損失のメカニズムが十分には分かっていない。最近ではTGOにより、ダストストーム時に80km程度の高高度まで、またそれ以外の時期でも単発的に水が上空へ輸送されている様子が捉えられるようになってきた。さらにHSTからは200km程度上空まで何がプラームが湧昇するよう見える観測例も報告されている。火星の大気の変遷や黄道上のダストの起源を理解する上でも、こうした鉛直輸送・上昇流の実態掌握が一層不可欠となっている。また地球では、ダストやエアロゾル、雲粒子などの微粒子は、表面において不均一反応を促進し、塩化物を介したオゾン層破壊などのように大気化学に影響が及ぼすことがよく知られている。近年は突発的な気象現象や極域成層圏雲などへの大気重力波の寄与も議論されており、今後火星においても気象現象や気候、上空への運動量の輸送/大気損失、大気化学の視点からも大気重力波の影響評価は重要となる。THSSの周波数高分解能のスペクトルスコピーを通して、これら高解像度の情報をGCMのモデル/シミュレーションに提供・同化することで、火星の上下の大気結合、火星大気の高気圧環境(大気化学、ダイナミクス、大気重力波、水、気候・気象)、火星大気の変遷について、いまだかつてない精緻な理解を深めることができると期待される。

火星のテラヘルツ波分光の取り組みは、我が国にとって地球・惑星観測、天文観測衛星や月探査計画、超小型衛星計画、外惑星や衛星観測など、様々な将来ミッションの展開にとどまらず、系外惑星における地球型惑星の大気環境の普遍的性質の理解のためにも重要な試金石となる。

(1) MIMや将来の有人活動を見据えたととき、THSSによる水資源探査や気候・気象環境の調査は重要な役割を果たすと考える。火星のフィールドでの有人活動では、嵐/竜巻やダストストームによる視界不良など、局所的・突発的な気象へのケア/予報も重要になると推察される。また昼夜や太陽風やCMEなどの現象に伴う大気の化学作用についても十分な理解を図る必要がある。また、有人活動で放出された(汚染)物質等がどのように火星に広がるか、あるいはそうした物質が拡がる前に光化学によって浄化されるのか、シミュレーション/予測も今後重要になる可能性がある。このため、THSSによる微量分子の高解像度・時間依存の3次元データをGOMに同化していくことで、火星における高信頼の気象・気候予報などが行えるようになることを期待している。

より詳細な大気上下結合/気象・気候/大気散逸過程の研究を推進するためには、HRMS(高質量分析粒子計測装置)、IDA(イオン速度・温度測定器)とTHSSとの同時連携観測をパッケージにできることが一層望ましい。これにより、世界で初めて表層から高度2km以下の大気の上層境界層における水蒸気分布の観測を実現し、地表・地下の水リザーバーと大気の関連が明らかになると伴い、下層大気や地殻磁場が大気散逸機構に与える影響を実証的・総合的に調べることも可能となる。また、THSSのスペクトルのリドローバル解析に際しては、MIMのサブサイエンスペイロードとして電波掩蔽観測による大気の密度の高度分布のデータがあると、精度の高い較正を行うことができ、望ましい。

(2)火星特有の表層の放射モデルが確立されれば、表層(数cm²数+cm)に含まれる物質や水氷、掘削や基地の建設などに適したの表層環境・場所についても情報が得られる可能性があり、MIM/SARの水資源探査/基地建設候補地のサーベイとのシナジーの展開も期待される。ただし、こうした表層からのテラヘルツの放射の本格観測では、分子のスペクトルを含まない波長域で縦・横の偏波観測を行う必要がある。これは、上で述べてきたTHSSとは測器の仕様が異なり而立が難しい。テラヘルツ波の表層観測モードをTHSSに組み込むことは技術的に可能ではあるが、周波数バンド/偏波を複数追加する必要があり、必然的に重量やサイズ、コスト、消費電力が大幅に増加することになり、衛星やミッションとの成立性が問題となる。そこで別の手法としてビギーバックあるいは他の打ち上げ機会などがあれば、表層観測用に仕様を特化したTHSSを超小型衛星に別途搭載していく可能性なども考えられる。

(3) 衛星による大気環境計測によるビッグデータのための通信網の獲得。 宇宙用の、モーターや高速計算機、温度に対して周波数安定な参照信号の小型発振器(10MHz)など、他の測器・システムと比較的共通要素の高い機器のJAXAによる開発促進・情報/状況の共有・公開システムなどがあると心強い。 自分達が厳格に惑星保護に気をつけても、探査や有人活動で他国や民間が惑星を汚染しては無意味となるため、惑星保護の徹底。 月・火星の探査や活動のための研究開発が、地球環境の理解や改善、インフラなどの改善に資するものとなるなど、一般の方たちの理解を得やすい形で発展させられたらと願う。(実際、大学の理学部の宇宙の授業で学部生に月や火星探査の話をする、感想として意外と”地球の環境破壊をコントロールできない人間が他の惑星に行って大丈夫なのか？”という冷静な意見が主流派であることは真摯に受け止める必要がありそうである。)

No.	MIM計画に期待する観測・探査案(4000字以内)	MIMを含む日本の将来火星探査計画の将来像に対する期待および要望(4000字以内)
20	<p>火星の環境進化の解明のために、水などの揮発性物質の地殻-大気間および大気中の輸送、宇宙空間への散逸がどのようなメカニズムで起こるかを知ることがある。火星の地下水のマッピングを行うMIMミッションにおいて、同時に水を含む揮発性物質の大気中の動態を観測することは、このような科学課題にとって非常に有効である。さらには、地下水が現在の火星気候においてどれほど安定なのかを理解することにもつながり、MIMミッションの主目的をも強化するはずである。地表付近から高層大気までの大気微量成分の3次元分布を観測する必要があるが、火星大気に常時浮遊するダストの不透明さのために、高い高度分解能が得られるリム観測で地表付近を観測することは従来の火星探査で用いられてきた光学的手法では難しかった。サブミリ波帯での分光観測であれば、ダストに邪魔されずに水蒸気などの微量成分とその分布に影響する大気温度を大気全層にわたって計測することが可能であるため、このための観測装置を搭載して地下水探査と連携することは価値が高いと考えられる。火星大気科学において、日本は大気力学の数値モデリングで世界トップレベルにあり、この技術を活かしたデータ同化手法により3次元物質輸送とその環境変遷への寄与を明らかにすることができると期待される。火星でのサブミリ波分光は前例がなく、そもそも惑星探査としてもJUICEに搭載されたのみであるため、今後の日本の惑星探査におけるキー技術になりうるとい意味でもここで実現する意義は大きいと考えられる。</p>	<p>火星は地球の環境進化を理解するうえで(金星と並ぶ)重要なリファレンス天体であり、よく話題になる生命存在の可能性の側面に限らず、天体の成り立ちそのものが長期的に重要な研究対象である。一方で火星は多くの国の宇宙機関がターゲットとする激戦区であり、正攻法で諸外国と似たアプローチを行うだけでは埋没する。ユニークなセンサやユニークな衛星バスによる科学的価値の高い構想を早くからリストアップして、その開発を宇宙科学コミュニティとして長期的に支えることが重要と考える。たとえば、生命関連物質を検出できる蛍光顕微鏡、分散型小型ランダー、超小型衛星による衛星間電波遮蔽などが考えられるだろう。一方で、これまで一度も我が国の技術で火星に着陸したことがないということが将来を不透明にしていることを強調したい。着陸が前提となる多くの火星ミッション構想が研究者コミュニティでは挙げられているが、それらがどこまで現実的なのか、実現可能とするためにさらにどれほどの開発と経験が必要なのかを明確にするために、小型プローブなどによる実証を一刻も早く行うべきである。たとえばMIMIに着陸実証機を搭載できる可能性があるなら、それを追求する価値があるだろう。そのような実証がなされて初めて、本格着陸探査を前提とする長期ロードマップを描くことができる。</p>

火星は、地球と非常に似た惑星形成環境であったと考えられるが、進化の過程で大気が地球と大きく異なってきた。太古の火星は、現在の地球のような温暖湿潤気候で、表層には生命に必要な不可欠な液体の水が存在していた事と考えられている。存在した水の量は、全球で水深約100m超あることが、火星大気の水蒸気同位体比観測[1,2]などから推測されている。しかし、現在の火星は乾燥寒冷気候で、表層に液体の水は存在せず、水は極域に氷としてかつての1/10程度存在するのみである。「太古の火星に存在した大量の水はどのように失われたのか」という問いに答えることは、火星大気進化を明らかにする上で本質的であると同時に、火星地球型惑星において持続的に生命が存在可能である環境を保持する条件を考える上で非常に有意義である。火星における水の消失機構を観測的に理解することができれば、太陽系外惑星を含む地球型惑星全般における、生命に必要な水の維持機構という普遍的理解に繋がり、生命を育む惑星環境の存在条件解明に貢献する。

Mars Ice Mapper探査計画(以下MIM)では、火星表面下の水・氷分布を観測するとともに、水の起源と分布を掌握する科学目標が設定されている。したがって、MIM計画で得られる観測データから、現在の火星における地下から宇宙空間まで水が輸送・消失する物理・化学プロセスが解明され、「太古の火星に存在した大量の水はどのように失われたのか」という問いに対して、理解が進むことが期待されていると認識している。そのためには、想定される主対象である浅部地下水の探査に加えて、(1) 浅部地下・レゴリと大気境界層の水交換、(2) 大気境界層から中層大気への水輸送、を観測する必要がある。

(1) 浅部地下・レゴリと大気境界層の水交換

火星は大気が比較的薄いため、1日周期内の変動が最も振幅が大きい。従って浅部地下・レゴリスと大気境界層の水交換を特徴付けるには、着陸機によるその場観測で水蒸気の地方時変動を計測することが有効である。しかしそのような観測は、火星探査車Curiosity等に搭載された湿度計による日没から日出までの計測[3]に限られ、新たな着陸機によるその場観測、特に浅部地下に氷の存在が期待される着陸地点における水蒸気量の地方時変動観測を行うことが有効になる。気体の高精度その場観測の手法として、レーザー分光計を用いる手段がある。レーザー分光計は、セルに対象となる気体を入れ、レーザーの共振波長を調整することで、気体の吸収線を分光観測する。レーザー、気体セル、検出器、と比較的シンプルな構成且つ軽量な設計で、レーザーの強い光源を用いることで高精度な計測が可能なることから、地球大気観測でも広く用いられている。また、火星探査車Curiosityにも搭載され、メタンの計測を行った実績がある。共振波長を選定することで、レーザー分光計を水蒸気観測に特化すれば、高精度(水蒸気組成比1ppm未満)で着陸地点の水蒸気地方時変動の計測が可能となる。さらに、レーザー分光計で観測する波長に重水素の吸収帯を含めることで、水蒸気中の同位体比(D/H比)を計測し、レゴリス吸着時の同位体分別から、大気循環による変動と地下とのやりとりを区別することが可能である[4]。レーザー分光計は、2022年に打ち上げ予定の、ESA-ROSCOSMOS ExoMars 火星着陸機に搭載予定であったが、2022年2月のロシアによるウクライナ侵攻によって同計画は中断されている(※2022年3月4日現在)。

(2) 大気境界層から高層大気への水輸送

火星の水が失われる過程は、大気下層(高度50km以下)の水蒸気が光離して水素になり大気上層まで運ばれて宇宙空間へと散逸すると従来考えられてきた。しかしその常識は、欧州ExoMars-TGO火星探査機を用いた研究によって変革しつつある。2018年に開始されたExoMars-TGO火星探査機による大気観測は、複数の火星年によるデータが蓄積されている。青木らの研究では、それらのデータを詳しく解析することで水蒸気鉛直分布の季節・緯度変動の全体像を明らかにした[5,6,7,8]。それらの研究から、下層の水蒸気が火星でしばしば発生するダスト(塵)の強い巻き上げを伴う砂嵐や、南半球の夏などの特定の条件下では、大気中層(高度100km程度)まで到達することがわかった。すなわち、大気下層から中層に直接到達した水蒸気が、宇宙空間へ失われる水素原子の変動を統制することが観測的に示された[9]。一方で、TGO火星探査機での観測は赤外線を使うため、ダストに覆われる大気境界層や低緯度領域の水蒸気分布は導出できない。従って、大気境界層から中層大気への水蒸気輸送や赤道行きを跨ぐ水蒸気の南北輸送は未解明である。即ち、ダストに隠される大気が水循環の理解を妨げている。近年、佐川や青木らのALMA望遠鏡による火星観測[10]などで実績を積み、ダストに感度がないサブミリ波帯の分光観測を用いれば、ダスト内部、即ち、大気境界層や低緯度領域の情報を得ることができる。水蒸気の吸収帯を適切に選ぶことで、リム観測から地表面大気境界層から中層大気(高度100-150km)までの水蒸気高度分布を、全ての緯度・経度で三次元的に捉えることが可能となる。さらに、サブミリ波の分光観測を高波長分解能で行うことで、ドップラーシフトから視線方向の風速を導出可能である。火星中層大気の流れ場を直接観測された例はなく、達成されれば、どのような物理・化学過程で水蒸気が大気中層へと運ばれるか、水の輸送プロセスに迫ることが可能である。

MIMの主目的である火星表面下の水・氷分布に、(1) レーザー分光計によるその場観測、(2) サブミリ波の分光リモートセンシング観測、を組み合わせることで、地下から宇宙空間の水輸送プロセスの知見が増え、火星の水に対する理解が深まることを期待する。

[1] Owen et al., (1988). Science, 240, 1767-1770. [2] Aoki et al., (2015). Icarus, 260, 7-22. [3] Savijärvi et al., (2019). Icarus, 326, 170-175. [4] Hu, (2019). Earth and Planetary Science Letters 519, 192-201. [5] Vandaale et al. (2019). Nature, 568, 521-525. [6] Aoki et al., (2019). J. Geophy. Res. Planet, 124, 3482-3497. [7] Fedorova et al., (2020). Science, 367, 297-300. [8] Villanueva et al. (2021). Science Advances , 7, 7, 10.1126/sciadv.abcd8843. [9] Chaffin et al. (2021). Nature Astron. doi.org/10.1038/s41550-021-01425-w. [10] 佐川, 他 (2019). 日本惑星科学会誌遊星人, 28(4) 277-284.

MIMでは、火星表面下の水・氷分布及び、提案する大気を含む水の貯蔵・輸送の理解が進むことが期待される。他方、欧米を中心とする火星サンプルリターンミッションでは、サンプル回収による過去のハビタビリティの研究が加速的に進むと考えられる。ここでは、考えられる日本の火星探査計画の将来像として、「火星に現存する生命の探査」を挙げたい。同目的は、過去のMELOS探査計画検討時に盛んに議論されており、当時の検討内容を基礎とすべきと考える。MELOS生命探査検討では、メタン酸化菌の検出を目的としていた。同探査計画では、メタン放出源へ接近し、土壌の掘削・採取を行い、蛍光顕微鏡観察による生命の検出を目指していた。同内容は、サンプルリターンによる過去のハビタビリティ研究とは一線を画し、依然として魅力的である。一方で、近年のExoMars/TGOなどのリモートセンシング観測からは、ExoMars/TGOが太陽遮蔽観測に特化されていることもあり、メタンの放出源の特定には至っていない。従って今後の探査ではまず、小型ミッションなどの機会を活用し、高分散赤外分光計によるリモートセンシング観測などを用いてメタン等の微量大気成分を空間方向にMappingすることや、ローバーにレーザー分光計などを搭載して移動しながらその場観測を行うことで、メタン濃集地域を調べ、生命探査を行う場所を特定する必要がある。その上で、メタン濃集地域へ生命探査パッケージを搭載したローバーを送り込み、現存生命の探査を行う足掛かりとして欲しい。

No.	MIM計画に期待する観測・探査案 (4000字以内)
	<p>MIMを含む日本の将来火星探査計画の将来像に対する期待および要望 (4000字以内)</p> <p>生命存在可能(ハビタブル)な惑星の成立条件を探ることは、太陽系探査における最重要課題である。約38億年前に海を持ち温暖湿潤な環境であった火星は、地球外生命体の存在した(する)可能性が最も高い惑星であり、NASA・ESAが主導するMars2020・ExoMars計画を始めとして、太古の生命痕跡の発見を主目的とした着陸探査が進んでいる。また火星有人探査に向けたアルテミス計画も進んでおり、その先行探査として火星環境の水氷資源の把握を目的とした火星地下水探査(MIM)ミッションが位置付けられている。</p> <p>このような欧米が主導する火星太古の生命痕跡探査や、有人探査に向けた地下水探査とも協働した上で、日本は独自視点で太陽系におけるハビタブル環境の形成・進化過程を俯瞰的に理解しようとするサイエンス戦略が必要と考えられる。例えば、火星は約38億年前に温暖湿潤な環境を保持した一方で、進化の過程でそれを失った惑星である。太古の火星地層に生命痕跡が存在するかの検証と同時に、現存する生命が存在しうる環境の把握は、日本の戦略的火星探査で目標とする「生命存在可能環境の多様性」の理解の上でも重要である。さらに、MMXに引き続く火星探査として、揮発性元素起源のトレーサーを用いた着陸機のその場観測による惑星・衛星形成過程の検討は、戦略的探査のもう一つの柱である「生命存在可能環境の普遍性」の解明に繋がり、日本の強みを活かしたサイエンスが展開できると期待される。</p> <p>このような戦略的火星探査の枠組みの中で、MIM計画で検討が進められているEDL着陸機の搭載は、「MIM計画に期待する観測・探査案」で詳述したように火星本体へのピンポイント着陸の技術実証という観点は勿論のこと、将来の有人探査に資する地下水分布の把握や、現存する生命の存在可能環境の把握に繋がるサイエンスが展開できるといふ点で極めて重要である。さらに、その次の本格火星探査では、「生命存在可能環境の多様性」の解明に向けて、過去の生命存在痕跡を火星地層から探ること、そして現存生命の存在可能性を探ることの2つを最重要課題として提案したい。</p> <p>過去の生命存在痕跡の探査は、NASAが現在進めているPerseverance探査でも主目的として掲げられているが、火星生命痕跡を発見するための装置設計は、蛍光X線を用いた元素組成分析やレーザー励起分光を用いた有機化合物前駆体、地球型生命に対して用いられる化学的手法に基づいてなされており、「地球と同様な生物物質・代謝機能を持つ生命」であることが前提条件となっている。また40億年前の火星表層に存在した可能性がある生命の化学的な痕跡が、様々な続成過程を経て現在でも保存されているという条件が必要となる。さらに、そのような稀少な条件が揃って生命痕跡が保存されている火星の地層は、分布に限られている可能性があり、ランダムな探索では発見の確率が極めて低い。火星地層から生命痕跡を発見するためには、『生命痕跡が保存されている可能性の高い地層、もしくは生物起源構造物の探査』が必要となる。</p> <p>太古の地球型生命がつくる構造物として、例えば菌落類によるストロマトライトがある。しかし、Curiosityによって詳細な探査がなされているGale craterの湖成層からもストロマトライト構造は発見されておらず、同タイプの生物構造の発見は困難と考えられる。一方で、生命痕跡が保存されている可能性のある別の構造物で、火星でも見つかったというものに球状コンクリーション(Wiens et al., 2017, Icarus; Sun et al., 2019, JGR)がある。コンクリーションは地層中の碎屑粒子の隙間に炭酸塩鉱物で充填され、非常に硬くなった塊のことである。コンクリーションを構成する鉱物はカルサイトやドロマト、シデライトなどの炭酸塩鉱物や、燐灰石、黄鉄鉱なども様々である。その多くは球状を呈しており、数cmから数mの巨大なものも様々なサイズを持つ。球状コンクリーションの内部には硫化石や生痕化石を含むものが多く、生物遺骸有機物の炭素を起源として数週間〜数か月で結晶成長して形成されたと考えられている(Yoshida, et al., 2015, Scientific Reports)。このように速い速度で形成されたため含有化石の保存率が高く、エディアカラ紀の燐灰石コンクリーションからは最古の多細胞動物の胚化石も確認されている(Chen et al., 2000, PNAS)。火星で見つかっている球状コンクリーションのうち、メリディア平原の地層に含まれる数mm大の鉄球状(ブルーベリー)は、風成層中で無機的に形成された炭酸塩コンクリーションを先駆物質とする可能性が示されている(Yoshida et al., 2018, Science Advances)。一方で、ゲールクレーターで見つかった数十cm大の大型球状コンクリーション(Wiens et al., 2017, Icarus)は、地球の湖成層や海成層中で多数見られるものと同様に、生物起源で形成された可能性もある。しかしながら、NASAの探査ローバーCuriosityおよびPerseveranceでは、現状では重要な探査対象となっていない。日本独自のサイエンスとして次期本格火星探査では、球状コンクリーションのような太古生命の存在痕跡を保存する可能性のある生物起源構造物を対象とした探査を期待する。</p> <p>次に現存生命の存在可能性を探るための探査として、MIMの重点観測対象である地下水の発達場や、古塩湖環境で発達するナトリウム塩や過塩素酸塩の鉱物脈。そして季節的な流水が関与したと考えられるRSLの発達場を候補地として提案する。これらの液体水もしくは水が関与する場では、太古に誕生した生命が現存する可能性がある。しかしながら、これら3つを対象の現存生命探査には、技術的な困難もある。例えば地下水中の現存生命の探査には、地下数10cm〜1mほどはドリリング掘削が必要となる。またRSLの発達するクレーター傾斜面は、傾斜角の大きからローパーによる探査が困難である。上述した中では古塩湖環境の鉱物脈が探査対象のアクセスとしては最も難易度は低いが、それでも鉱物脈が発達する場所は限られており、広域的な移動能力が求められる。そのため、日本独自のサイエンスとして現存生命の存在可能性を探る探査を行うために、ヘリコプタによる広範囲探索とサンプリング、そして定点ランダムステーションでの分析を組み合わせた探査を提案する。ヘリコプタによるサンプリングならば、RSL発達部へのアクセスも可能になると期待される。さらに定点ランダにドリリング機構やランダム分光装置などを配置することで、地下水中の現存生命の探索も可能になると期待される。</p> <p>以上のように、日本独自のサイエンスとして、太古の生命痕跡と現存生命の探索を最重要課題として期待したい。これには、アストロバイオロジーのコミュニティは勿論のこと、地質学や地球化学、地球生命科学といった様々な科学コミュニティとの連携、そして地下深部や地層内部へのドリリング技術開発など工学コミュニティとの密接な連携が必要不可欠である。そしてそのような次期本格火星探査に繋げるために、MIMで検討されているEDL着陸機によるピンポイント着陸などの技術実証や、着陸地周辺の地形・地質解析や気象観測などの実現を強く期待する。</p>
22	<p>将来の火星有人探査に向けた先行探査として、火星表層の水氷資源の把握を第一目的とした火星地下水探査(MIM)ミッションのコンセプト検討が進められている。この国際協同によるMIM計画に関わる上で、日本は独自視点で太陽系におけるハビタブル環境の形成・進化過程を理解しようとする戦略的探査の枠組みが重要と考えられる。MIM計画で現在検討が進められているEDL着陸機の搭載は、誤差10km以内のピンポイント着陸の技術実証という観点は勿論のこと、カメラを用いた着陸地の超高解像度地形起伏や地質特徴、堆積物組成のGround Truthが得られる点で極めて重要である。意見者は、地球の地層記録からの表層環境変動の解明や、アナログ地層の検討から火星表層環境史の解明を研究している者の1人として、惑星地質学的な視点でMIM計画および検討されているEDL着陸機に期待する観測・探査案を以下の通り提案する。</p> <p>まずMIM計画や将来の有人探査時の水氷資源把握に関係したサイエンス、すなわち有人探査の対象となる40°よりも低緯度域において、現存する地下水がどの程度分布するか把握は重要である。これは有人探査に資するといふ目的だけではなく、「現存生命の存在可能環境の把握」という戦略的探査の観点でも重要なサイエンス対象といえる。火星の現存する地下水分布の把握を目的として、意見者は永久凍土地帯に発達する多角形土(ポリゴン)地形を観測対象とした探査を提案する。ポリゴン地形は、地球では北極圏(アラスカ、カナダ、ロシア)や南極のなだらかな表層部に発達しており、地球温暖化に伴う永久凍土融解の影響もあり、様々な研究が進んでいる(e.g., Liljedahl et al., 2016, Nature Geoscience)。地球の北半球における永久凍土の南限は45° -50° Nであるが、我々のこれまでの調査の結果、永久凍土分布とポリゴン地形の分布は良く一致すること、さらに緯度および気象条件毎に異なる形状のポリゴンが発達することが明らかになった。</p> <p>ポリゴン地形は火星の中・高緯度にも発達することが知られており、緯度30° -80°の領域で形状毎に異なる分布を示すことが報告されている(Levy, et al., 2009, 2010, Icarus)。また2008年に68° Nの高緯度域への着陸に成功したPhoenix探査機によって、ポリゴン地形の地表下には水氷が存在することが確かめられている(Mellon et al., 2009, JGR)。さらにCRISMデータを用いた赤外スペクトルの解析から、ポリゴン地形場に最近衝突したクレーター内部にも水氷の存在が確認されており(Dundas et al., 2021, JGR)、ポリゴン地形は火星に現存する地下水分布を推定する上で重要な研究対象であると考えられる。最近、MIMに向けた先行探査である火星浅部地下水氷マッピングプロジェクト(SWIM)により、中性子分光計、熱慣性、SHARADデータ、そしてCTX画像による周水河地形の解析を併せて、「現存する地下水」の南限は30° N付近という推定がなされた(Morgan et al., 2021, Nature Astro.)。しかし、MIM計画で合成開口レーダSARによる重点観測領域となっている緯度25° -40°の領域においては、ポリゴン地形分布の詳細な検討が未だ行われていない。これはポリゴン地形が幅10-25mオーダーの地形であり、その観測には約30cmの解像度を持ったHiRISE画像の解析が必要なためである。我々はこれまでに30° -35° N領域で得られている約2000箇所分のHiRISE画像を探索し、ポリゴン地形の分布はSWIM計画により明らかにされた地下水分布領域(ice consistency map)と概ね整合的であるが、地域ごとに差異の見える箇所も多数存在することを明らかにした。この差異は、地質セッティングの違いに起因する表層堆積物組成や基盤岩までの深度の違いを反映している可能性がある。</p> <p>このようにHiRISE画像探索により、MIMのSAR観測がなされる前においても、地下水の存在確度の高い地点の探索が可能であることが分かった。しかしながら、ポリゴン地形は幅10-25mに対して、数十mオーダーの起伏を持ったなだらかな地形であり、その地形構造の正確な把握にはHiRISE以上に高解像度な3D地形情報が必要となる。地球温暖化に伴う永久凍土の融解を支援として、ここ数年でInSARを用いた地球の永久凍土観測は急速に進んでおり(e.g., Abe et al., 2020, EPS)、我々の検討結果も併せて、地球のポリゴン地形の形状と地下水深度との関係性が明らかになりつつある。MIMで火星地下水分布南限付近の30° -35° NでEDL着陸機による探査がなされ、降下中および着陸後の高解像度(7cm以下の水平解像度)の3D地形情報を得られれば、地下水南限域におけるポリゴン形状の正確な把握と、その地下水存在量に関するGround Truthが得られると期待される。さらに重量制限の制約がクリアできれば、地中レーダを用いた地下の誘電率構造の探査を行うことで、より正確な地下水分布の把握が可能となる。そしてそれらが得られれば、ポルネックが解消されるプライクスルとなり、SARによる観測結果と比較することで火星全球に適用した地下水分布の正確な推定が可能となると期待される。</p> <p>EDL着陸機による探査では、地下水分布の把握だけではなく、現存生命の存在可能環境の分布把握も重要である。25° -35° Nの領域には、約38億年前に湖環境であった古塩湖の地形も多数報告されている(Salese et al., 2019, JGR)。古塩湖地形の地層には、硫酸塩や過塩素酸塩といった蒸発作用で形成される鉱物脈が発達していると考えられる。過塩素酸塩は大気中の水蒸気を吸収して液体となる潮解性を持っており(Sizemore et al., 2015)、地球の乾燥地帯の塩湖環境ではこの過塩素酸塩をエネルギー源とする微生物も存在していることから(Logan et al., 2001)、過塩素酸塩の岩脈が発達するような太古の塩湖環境の地層は、現存する火星生命がいる場合の水の供給源およびエネルギー源として働く可能性がある。このような物質化学的な探査を行う上では、ランダム分光装置が有効である。重量制限の制約があり困難な場合は、カメラにLEDライトを利用した近赤外分光撮像機能を加えることにより、塩の組成(Na塩化物、過塩素酸塩、硫酸塩)を識別できる可能性がある。</p> <p>以上の通り、EDL着陸機による探査がなされれば、ポリゴン地形を対象とした地下水分布の探査と共に、塩湖鉱物脈を対象とした現存生命の存在可能環境の探査が可能となる。ただし、検討中のEDL着陸機(ランダー)のカマでは、着陸地周辺の地形情報しか得られない点がネックとなる。ポリゴン地形を対象とした探査や、塩湖鉱物脈の探査、そして広範囲の超高解像度地形情報を得る為にも、なるべく広範囲の3D地形情報が求められる。そこで、NASAの探査ローバーPerseveranceが搭載しているインテリジェントな軽量ヘリコプタ型カメラを用いる観測も提案したい。MIM計画のEDLで軽量ヘリコプタ観測の技術実証が出来れば、将来の本格探査時には、ヘリコプタを用いたサンプリングとランダー型ステーションでの分析という応用も可能になると期待される。</p>
23	<p>約40億年前の火星は海を持ち温暖な気候を経たと推定される一方で、現在の火星は寒冷乾燥した気候を持つ惑星である。このような気候変動を引き起こすには、1気圧程度のCO2大気と多量の水が宇宙空間に流出もしくは地下に貯蔵されて表層環境から取り除かれる必要がある。CO2大気の消失には宇宙空間への大気散逸が重要なプロセスと考えられており、水の消失には地下への貯蔵が重要なプロセスと考えられている。火星を含む地球型惑星のハビタブル環境を持続させるための必要条件を理解するための重要課題として、CO2大気や水を宇宙空間に逃がすことができる物理機構の解明、表層水と地下水を含めた水循環の解明、そして表層から宇宙空間をつなぐ大気上下結合機構の解明がある。</p> <p>MIM計画に期待する観測・探査として、火星大気上下結合観測パッケージを提案する。本パッケージは、THSS(テラヘルツ分光装置)、HRMS(高質量分析粒子計測装置)、IDA(イオン速度・温度測定器)から成り、世界で初めて表層から高度2km以下の大気の影響境界層における水蒸気分布の観測を実現し、地表・地下の水リザーブと大気の相互作用を明らかにするとともに、下層大気や地殻磁場が大気散逸機構に与える影響を定量的に調べるものである。本パッケージによる火星大気上下結合の観測の実現により、水等の地表・地下との相互作用・輸送・散逸を理解するとともに、将来の着陸探査に向けた着陸候補領域の事前調査を行うことができる。</p>

生命存在可能(ハビタブル)惑星成立の条件は何か、人間の根源的な問いに答えるべく、今後の太陽系探査においては、ハビタブル環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となる。火星は、過去にハビタブルな環境を保持し、進化の過程でそれを失った地球が太陽系天体として、ハビタブル環境の持続性を調べるために重要な探査対象である。火星ではプレート運動や風化作用による表層物質の更新の影響が少ないため、過去40億年以上の表層物質を分析可能である。地球では生命誕生に向けた化学進化が起きた時代(約40億年前)の表層物質はほとんど現存しておらず観測による実証は難しいため、火星における観測実証が、生命誕生期を含むハビタブル環境の進化の理解に大きく寄与することが期待される。今後の日本の火星探査においては、過去40億年以上の進化の情報保持し、惑星システムを構成する多面的(地圏・大気圏・水圏・宙空間等)とその間際の結合と共進化を探査可能という火星の特徴を活かした、ハビタブル環境の持続性に関する各科学探査の実現を期待する。

火星は将来の有人探査の候補天体としても重要な位置付けを持つ。月から火星への有人探査を目指すアルテミス計画など国際宇宙探査が活発化する中、火星の水環境、放射線環境、気象などの理解は人類のフロンティア拡大の観点から重要である。上述の学術的価値の高い科学探査に加えて、将来有人活動に資する探査を国際的役割と日本の優位性も考慮しつつバランスよく実現していくことが今後の日本の火星探査に求められる。