

火星着陸生命探査計画 MELOS1 提案書

(ドラフト版：2013 年 8 月 5 日)



この提案書ドラフト版は（ミッション提案時まで）継続的に更新されます。
最新版は下記 URL からダウンロードすることができます。

<http://melos.ted.isas.jaxa.jp/Missions/MELOS/>

MELOS ワーキンググループ

ドラフト版はしがき

本文書は、火星着陸生命探査計画 MELOS1 の提案書に向けたドラフト版である。MELOS ワーキンググループは 2008 年 6 月に JSPEC 宇宙探査委員会と ISAS 宇宙理学委員会の両方にまたがる WG として設立されたが、現在のミッション・プランに落ち着いたのは実はさほど前のことではない。では 5 年間遊んでいたのかとお叱りを受けそうだが、非常に ambitious であった当初計画 (**Mars Exploration with Lander and OrbiterS** が MELOS という名称の元) を出発点に、科学のみならず幾多のことを学びながらいまの形にまで辿り着いた。それは時間はかかったけれど、宇宙科学・探査の過渡期ともいえるこの 5 年に、WG が経験すべき時間だったのではないかと思う。

回想はさておき、我々はいま「火星を舞台に、地球外生命の検出を目指す」ミッションを打ち出すに至った。このようなミッション・プランに対して、「見つかるかどうか分からないギャンブル」「従来の惑星科学コミュニティが参加しにくい」といった批判の声を耳にすることもあった。しかし我々は、このプランは二つの意味で特筆すべきものであり、こうした批判に胸を張って答えられるものと考えている。

見つかるかどうか分からなくとも、火星における生命探査はあるレベルまできっちりと行われなければならない。それは今こそ行うべきで、だからこそヨーロッパのみならず米国まで再び生命（の痕跡）探しへ、2020 年ミッションで参戦の名乗りを上げたのである。火星は広く（その表面積は地球の陸地面積にほぼ等しい）変化に富む惑星である。国際社会が挙げて生命探しに真剣に取り組む、日本もその一翼を担うべきであろう。

従来の惑星科学コミュニティとはやや異なるメンバー構成、それはそうかも知れない。考えると、生物学者が惑星探査から何かを得たことは過去になかったのではないか。しかしこのミッション（と世界の火星生命探査）は、その「何か」をついに与え得るものと期待している。そしてそれは生物学を、物理学や化学と同様に、「宇宙における一般性・普遍性をもつ学問」へと進化させる引き金にすらなり得る。世界中で使われている教科書を書き換え、人類文化、宗教など文明の根源部分に多大な影響を与えるような、エポックメイキングな成果につながる可能性をもつ。そのようなときに従来のコミュニティの枠内で考えるのではなく、我々はコミュニティを拡大し学問を深めることを選択したい。

諸外国が活発に火星探査を実施する中、我が国の限られたリソースでそれに挑むべきかという議論も確かにある。それに対しても我々は、その得られるであろう「果実」の大きさに期待してぜひ推進したいと考えるし、その精神こそが人類の宇宙へのチャレンジを支えるものと信じ、本提案を世に問うものである。

MELOS ワーキンググループ
(主査： 佐藤 毅彦)

本「ドラフト版」の位置づけ

はじめに本書が「ドラフト版」と称している意味を説明する。すなわち本書に記載されているさまざまな「オプション観測機器」について、それらの取扱い方針の説明でもある。火星着陸ミッションを構想するとき、当然ながらさまざまな科学テーマを目指す多くの観測機器提案が出てくる。それらを等分に扱い「一つの探査システム」に押し込むのはミッションの肥大化・スコープの散漫化につながり好ましくない。かといって「さまざまなヴァリエーション」を最初からいくつも検討するマンパワーも足りない。そこで MELOS WG は、最も単純な組合せでかつ、理学的意義も工学的意義も最も高いと考えられる

生命＋気象をローバに乗せるミニмумプランをベースライン

とし、理学・工学の両面で検討を深めてきた。本書から単一の「検討の十分に進んだミッション・プラン」を抽出するならば、このベースラインということになる（理学の記述は多くのオプションを含むが、工学の記述はこのベースラインの検討結果になっている）。このベースラインからは、「二つのヴァリエーション」が考えられよう。一つは、サイエンスの充実を求めて、本書記載のオプションのいくつかを採用してゆく方向性である（中～大型ミッション）。この場合さまざまな工夫をして、探査システムのいたずらな肥大化やそれに伴うコストの増大を、徹底して抑えねばならない。サイエンスの充実や参加メンバーの拡大というメリットに付随してデメリットがあるわけで、そのバランスをいかにとるか WG は日々頭を悩ませ、真剣に議論と検討を行っている。

もう一つのヴァリエーションは、「小型化」の方向性である。ベースラインのエッセンスを守りつつ、より機動的な、イブシロンロケット（増強型が必要）を用いるようなミッションへと変身させられないだろうか。宇宙科学を取り巻く「閉塞感」の打破にはそのようなドラスティックな発想の転換が必要であり、この可能性にも賭けてみたいと願い、工学メンバーが中心に検討を行っている。「小型化」の場合はミニмумの「生命＋気象」が精一杯であろうが、小型で機動的なミッションを早期実現し科学成果を挙げ得ることを示せば、その先に多くの機器を搭載したより大規模なミッションの実現もあろう。

月惑星シンポジウムの機会をとらえ本書「ドラフト版」を公開することの意味は、まさにここにある。WG 外の皆さまも巻き込んだ議論を通して、日本の宇宙科学の進むべき道と併せ、では火星着陸探査をどのヴァリエーションで実施しそして科学成果を十分に引き出すべきか、ぜひご意見をお聞かせ頂きたいと考えるのである。

本書から「ドラフト版」がの文字がとれ正式に「提案書」となるとき、われわれはこれら二つのヴァリエーションのいずれかを選択する。その道を誤らぬよう、広いコミュニティといま十分に議論を深めたい、そのきっかけとしたい、というのが本「ドラフト版」の位置づけなのである。

目次

【第1部】 科学的背景、意義、目標

1.1. MELOS1 のサイエンス：火星を舞台に、地球外生命の検出を目指す

1.1.1. 「太陽系の中で地球外生命を探す」ことの重要性

Are we alone in the universe?

我々＝地球生命が宇宙で唯一の生命かどうか、これは人類の根源的な問いであり、宗教・哲学など、人類文明の根幹に直接的に関わる問題でさえある。これに答えることはまさに、科学研究の最大の目標のひとつといえる。太陽系外に惑星を検出する技術の進展は目覚しく、すでに 3000 を越える系外惑星候補が発見され、「第二の地球」の発見もそう遠くはなさそうである。系外惑星（および候補）の発見が進むにつれ、研究フェーズはすでに系外惑星での生命検出方法の検討と、生命誕生可能性の探求へと進みつつある。

さてしかし、宇宙での生命の起源や別種の生命の可能性を考えた時、我々が生命を一種類（地球生物）しか知らないことが大きな障壁となる。地球とは大きく環境の異なる系外惑星に、どのような生物が生息するのであろうか？そもそも生命の定義とは何か、生命にはどのようなヴァリエーションがあり得るのか、生命科学者の間でさえ意見の一致はまだない。その理由は我々が地球生命しか知らない、という点にある。

こうした障壁を突き破るためには、別種の生命を（それがどのようなものか分からぬまま）発見しそれを調べることが重要という、逆説的な状態を生み出している。仮に系外惑星に生命の「印」が発見されたとしても、そこからサンプルを持ち帰り詳細に調べることは当然ながらできない。「太陽系の中で地球外生命を探す」ことが今もって極めて重要な課題となっているのは、この理由による。

1.1.2. 生命探しの舞台、火星、そしてなぜいまか？

地球以外の太陽系天体で生命存在可能性があるものとして、火星、タイタン、エウロパ、エンセラダスなどが挙げられる。これらの中では火星が最も地球に似ており、生命存在の可能性が最も高い天体といえる（上述のように地球生命しか知らない我々は、そこを出発点として考えるしかない）。かつて夢想された「タコのような姿をした」火星、運河を張り巡らせる高等な知的生命体、それらは

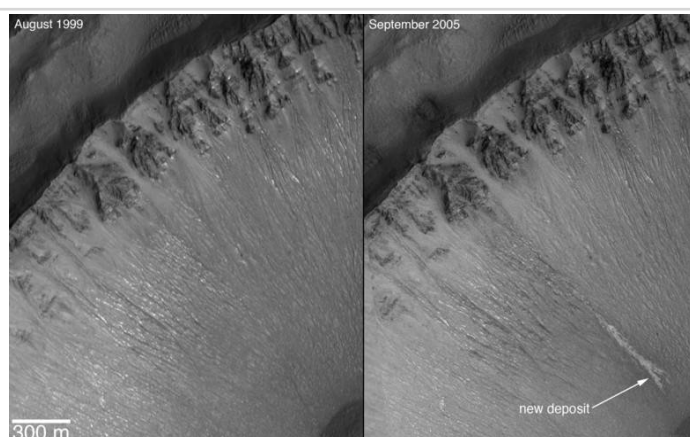


図 1.1-1：MGS 搭載 MOC が捉えた火星面の変化。6 年後の画像（右）に新しく現われた白い条は水が流れ出した痕跡である、と解釈する研究者は多い。（MOC image MOC2-1619, NASA/JPL/MSSS）

火星にはいないようだ。しかし火星誕生の直後には大気と海が存在し「ハビタブルな環境の時代」があったとする考えには、多くの科学者が同意している（それがどのくらいの期間であったかは、人により考えが分かれる）。そして現在も極域のみならず広範囲で地下には氷が存在していて、Phoenix 着陸機は実際に地表で氷の存在を確認した。また最近（ここ十数年間）にも液体の水が流れた跡と推定される場所が複数発見されている。

加えて、近年の火星周回機（Mars Express）および地上望遠鏡（IRTF など）からの観測により、火星大気中にメタンの存在が示唆されている（Formisano et al., 2004; Krasnopolsky et al., 2004; Geminale et al., 2011; Mumma et al., 2009; Fonti and Marzo, 2010）。ただし、周回機観測は波長分解能と感度の不足があり、また地上観測は地球大気中のメタン吸収との干渉により、その結果を疑問視する意見もある

（Zahnle et al., 2011）。火星探査車 Curiosity に搭載された装置でも、まだメタンは検出されていない。このように議論は続いているものの、火星地表のような強い酸化環境下でメタンが存在するとしたら、それは大変に大きな意味をもつ。

メタンは生命活動により発生し得る気体である。またもし非生物学的に発生する場合であっても、それは火星内部における「水を伴う」活動の存在を示唆することにもなる。それ以上に興味をひくのは、メタンと酸化鉄を用い（酸化鉄によりメタンを酸化する）エネルギーを獲得する細菌の生息が考えられることである。さらに、極限環境微生物学の発展から、地球の様々な極限環境にも生命の生存が可能で有ることが明らかとなってきた。火星環境を考慮した場合にも、火星表面であっても紫外線を避けることのできる深度（数 cm 表面下）であれば生命は十分生存可能であることが、実験的にも検証されつつある。これら近年のさまざまな発見や知見により、火星を舞台に地球外生命を探す、そのためのミッションを真剣に再考すべき時期を迎えている。

1.1.3. これまでの「火星生命」探査

確かに、過去の火星着陸探査では「生命」は見つけられていない。しかし、そのことをも

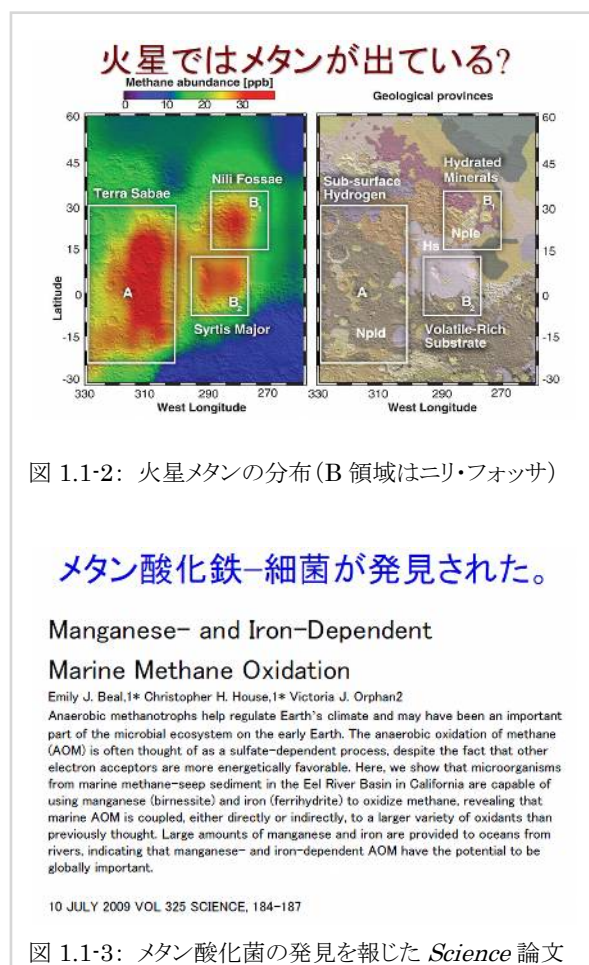


図 1.1-3: メタン酸化菌の発見を報じた *Science* 論文

って「火星に生命はいない」と結論づけることは性急である。なぜならば、本当の意味での生命探しを行ったのは 1976 年の Viking 着陸機だけであり、その実験も感度が十分に高いとはいえないものだったからである。Viking 着陸機の生命検出実験の感度は、1 グラム土壤中に 10^7 個程度の細胞があると検出できるものであったとされる。一方、地球でも微生物濃度の低い地域、たとえば南米チリのアタカマ砂漠あたりでは、1 グラム土壤中に 10^4 個程度の細胞しか存在しない。つまり、Viking がアタカマ砂漠に着陸して同じ実験を行ったとしたら、「地球に生命はいない」という結論になってしまうわけである。

米国の火星着陸ミッションは Viking（の生命検出失敗）以降、生命を直接探すことは避けて"Follow the water"という戦略をとった。その結果として、火星地表において十分に感度の高い生命検出実験はこれ

まで行われたことがない、というのが本当のところなのである。そのため「火星に生命はいる（いた）のではないか」といった疑問は未解決となっており、だからこそ火星隕石 ALH84001 中の「微生物の化石」騒ぎ（1996 年）のようなことがときどき起きるのであろう。人類にとって火星における生命探しは、あるレベル＝「ここまでやって見つからないのなら、やはりいないのかも知れない」と判断できるレベルまで、きっちりと遂行することが必要なミッションなのである。

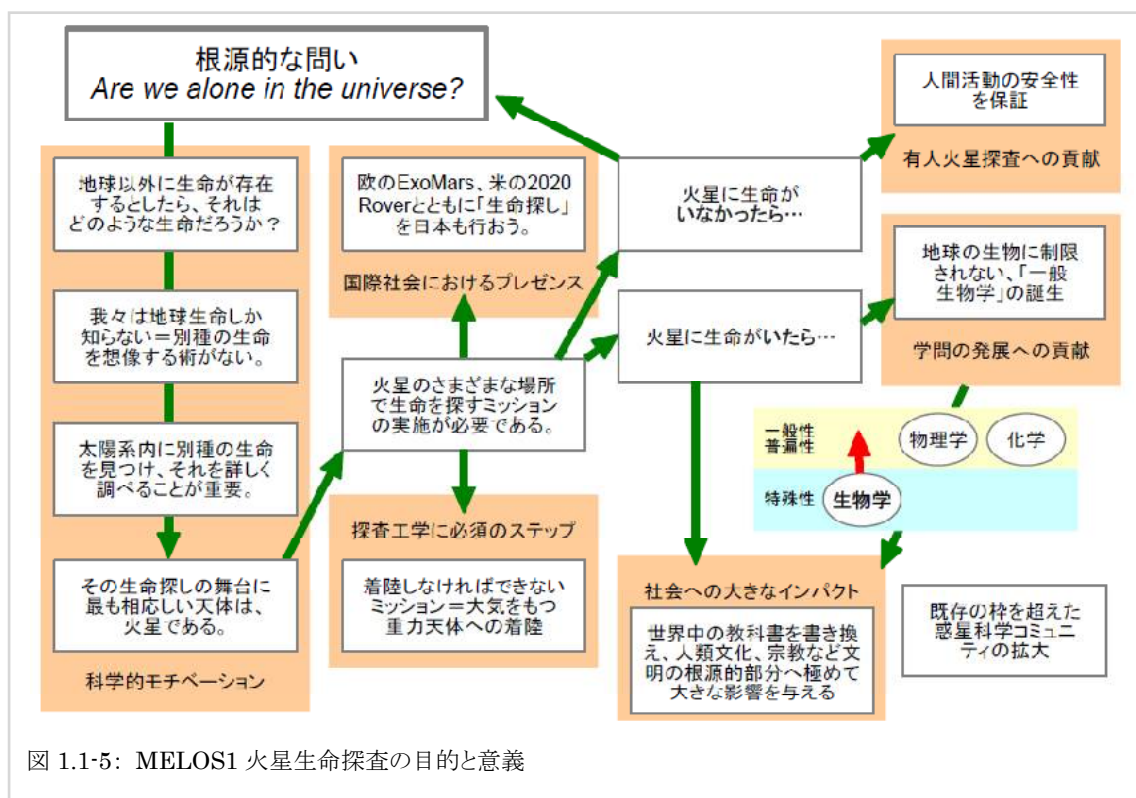
今後に予定されている火星着陸探査計画を見ると、欧州の ExoMars ミッションは「生命」を前面に押し出している（周回機＝Trace Gas Orbiter を 2016 年に、ローバーを 2018 年に打ち上げる計画）。米国の 2020 年ローバー・ミッションは、まだ科学定義チームの検討報告が出された段階であるが、「過去の生命の痕跡」を探すとされている。後述するが、MELOS1 で実施する生命検出実験はこれらの将来ミッションで予定されているものとは異なるアプローチであり、諸外国に比しても存在感のあるユニークなミッション計画となっている。

1.1.4. 火星で生命が見つかったら、または見つからなかったら：高い科学的意義

もし火星に生命が発見され、それが地球生命とは異なる生命であることが明らかになれば、「地球生命とは別種の生命の発見」という歴史的発見となる。そしてそれは、生命とは何か、地球生命の一般性、特殊性（アミノ酸はなぜ 20 種なのか、それは偶然か必然か、遺伝物質が DNA であることは偶然か必然か、遺伝の仕組みは等々）を研究する糸口となり、地球生物学でない一般生物学、真の生物学の誕生となる。ここが重要なところである。物理



図 1.1-4: ESA/ExoMars ローバの想像図（ドリルにより地下の生命を探すことを計画）



学や化学は宇宙のどこへ行っても同じ原理が通用する「普遍的な学問」である、と我々は信じている。太陽系における生命探査はその意味で、これまで一側面でしか探究できなかった生物学を、より一般的で普遍的な学問へと進化させる可能性をもつのである。

もし見つかった火星生命が地球生命と似ていた場合には、遺伝子解析を行い系統樹を作製する必要があるであろう。系統樹の解析によって、

- 地球生命とそっくりであっても地球生命とは独立に誕生した生命である可能性、
- 地球生命がいつの時期か（40 億年前から探査直前まで）に火星に移動した可能性（時期の推定も可能）、
- 火星生命が 40 億年前に地球に到達し地球生命の祖先となった可能性、

これら三つのいずれであるか判定することができる。

微生物が発見されなかった場合にも、Viking 実験に比べて微生物検出感度を 3 桁上げることになる。すなわち、微生物は地球で最も微生物濃度の低い地域（アタカマ砂漠、極砂漠、極域の氷等）よりも低密度であるという結果が得られる。また、微生物が存在しないことの確認は、有人火星探査を実施する以前に、探査者の健康安全の確保と火星微生物環境保全のために、必ず実施しておく必要がある。科学だけでなく「探査」のためにも欠かせない意義をもつミッションなのである。

1.1.5. もうひとつのサイエンス：地表気象とダストの観測

火星地表に降り立つならば、必ずその場所の環境モニターを行わねばならない。着陸機そのものの運用上も必須であるし、気象条件を測定し続けることは将来の着陸ミッションに備えた基礎情報の蓄積でもある。加えて、火星の気象はそれ自体が独特で大変に興味深い対象である。地球のそれよりはるかに大きい気温の日較差、大気中に浮遊するダストが日射を吸収し加熱することにより駆動される気象現象、小さなダストデビルから大きな（全球を覆い尽くす）大砂嵐まで、それらのメカニズムには未知の部分が多い。

「浮遊ダスト」は大気運動の駆動源として、まさに地球における「水」と等価な役割をもっている。しかしそれがどのようにして地面から巻き上げられ、大気へと注入されてゆくのか（あるいは取り除かれてゆくのか）は、まったく分かっていない。一般に地表付近を吹く風は 100 μm オーダーの「砂」を飛ばすことはできても、数 μm の微細なダストを直接には巻き上げない。いったん飛んだ砂が落下する際にダストをはじき飛ばすサルテーションや、ダストデビルのような局所的な低圧による吸い上げ、あるいは静電気による引きつけのようなメカニズムが必要と考えられる。しかしこれら候補の何が、どれだけの割合で浮遊ダストの増減に寄与しているかは不明である。

MELOS1 の環境モニターは、基本的な気象場（気温・気圧・風速）の測定を行う。それに加えてダストデビルの検出と追跡、空の散乱光測定やライダー観測にもとづく浮遊ダスト量およびサイズ測定を継続的に行う。ダストのサイズや形状については過去に、Phoenix 着陸機に搭載された原子間力顕微鏡（AFM）が測定を行っている。しかしわずか一例測定した（図 1.1-6）に過ぎず、情報はまったく不十分なものであるといってもよい。MELOS1 ではそれを、生命探査装置に組み込まれたダスト顕微鏡により直接的に測定することができる。これを補助情報とすることで、空の散乱光の解釈をより高い精度で行えると期待される。

地球の気象の理解が「無数の観測ステーション」や「衛星観測」にもとづいていることを考えれば、火星の一地点での測定はあまりに

非力に感じられるかも知れない。そうであるからこそ、ひとつひとつの着陸探査でそのような基礎的な気象情報の蓄積を行い、国際協力によるなどしてデータを増やしてゆかなければならないのである。

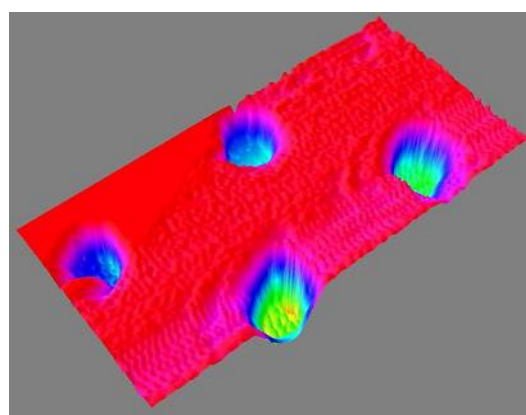


図 1.1-6: Phoenix 搭載の AFM が捉えた唯一のダスト粒子の立体画像。整列した 5 μm ピットのいちばん左に入ったダスト粒子が顔をのぞかせている。

1.2. MELOS1 ミッションのコンセプト： 生命探しへの最適化

1.2.1. 最も感度の高い生命検出装置を搭載

MELOS1 生命探査装置の特徴は、細胞を（あれば）直接に見る＝画像として捉える、「百聞は一見にしかず」の手法で検出しようとするにある。土壌を加熱して出てくるガスを分析し有機物の存在を検出する手法の海外ミッション（Curiosity 搭載の SAM など）とは異なる、MELOS1 のユニークな点である。微小な細胞（1 μm オーダー）を捉えるために顕微鏡は必須であるが、ただ単に土壌試料を拡大撮影しても微生物

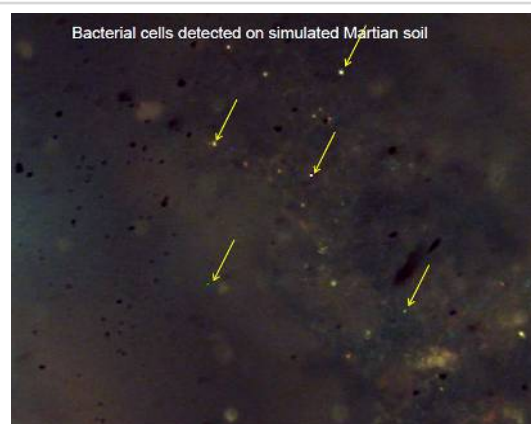


図 1.2-1： 火星模擬土壌中の微生物（矢印）を蛍光顕微鏡観察した様子

と土の粒子の区別はつかない。そこで MELOS1 生命探査装置では、色素による染色と蛍光顕微鏡を用いることによって火星表面で微生物の生細胞、死細胞および有機物を直接観察する。これは地球の実験室で生物科学者が行う手法であり、最も高い感度で生命探しを行うことができる。

蛍光色素の組合せと染色・発光の様子により、生きている細胞と死んでいる細胞を識別し、有機物をも広く検出することができる。

1.2.2. 生命の「環境」を記録する提案機器(オプション選定中)

火星地表のどのような場所であれ、そこに生命が存在する・しないという結果には「その場所の環境」を重要な付帯情報として記載する必要がある。そのための機器が複数提案されており、優先順位をつける選定プロセスが進行中である。提案機器は

- 基本的気象場（気温・地表温度・気圧・風速）を測定するための気象パッケージ（ローバー運用のためにも必須の測器群という位置づけ）
- 火星気象を支配するダストを計測するライダー
- ダストデビル観測（ローバーのバス機器であるナビゲーションカメラを用いるサイエンス提案であり、固有の機器は要求しない）
- 太陽光の減衰から水蒸気量、空の散乱光分布から浮遊ダスト分布を測定する環境モニターカメラ
- 大気中のメタンや水蒸気の量を測定するガス検出器
- 地下の氷や空洞の有無などの構造を見ることができる地中レーダーGPR
- 同じく地中構造を地震波により調べるアクティブ干渉計（着陸機）
- 表層の鉱物を分析するためのレーザー誘起絶縁破壊分光計 LIBS

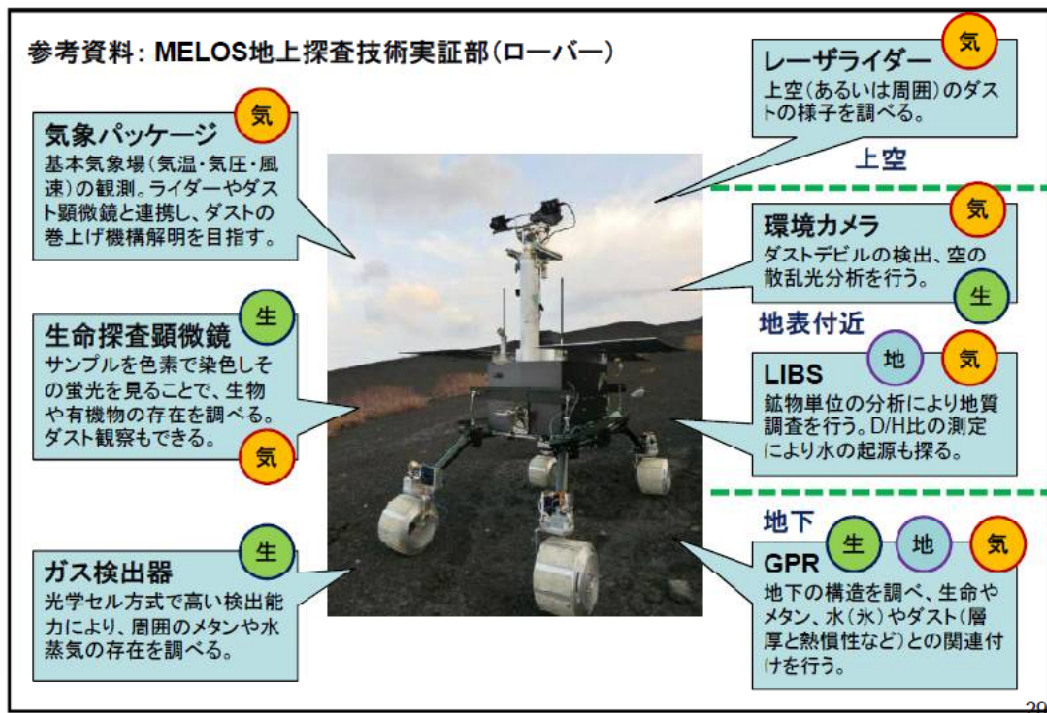


図 1.2-2: 現在提案されている機器群。いずれも他の測器とシナジーをもち、ミッションの科学価値を高める。

- 火星自転の変動から大気と極冠の物質移動を調べる測位機器 (着陸機・周回機) がある。

1.2.3. 移動探査を可能とする探査ローバー

ぶじに着陸し、周囲をながめ、どこへ行けば生命を見つけられそうか考え、そこへ移動してゆく手段が必要である。MELOS1 では探査ローバーでそれを実現する。想定しているローバーの規模は質量 60 kg 程度、Mars Pathfinder (MPF) のソジャーナよりは大きく、Mars Exploration Rover (MER) よりはおぶりのものである。

1.2.4. 高い精度で目標地点に着陸する EDL システム

ローバーが動き回れるとはいっても、その走行可能距離は大きくはない。したがって、着陸そのものの精度を高めて、生命存在の可能性が高そうな場所にローバーを下ろす必要がある。そのための EDL システムは、超音速空力誘導を用い、また着地には Curiosity 同様のスカイクレーンを採用して、ピンポイントに近い着陸を実現させる。

工学の面では、大気を有する重力天体への探査に必要な、深宇宙通信、軌道決定と誘導、大気突入、空力誘導、緩降下、着陸技術、および表層移動探査技術を開発し、これを火星において実証するミッションとなる。

1.2.5. 着陸地点の考え方：生命の存在しそうな条件とは

キュリオシティを含めた近年の着陸探査は、火星上の複数の地点で、現在地球上でみられるような生命体が生存できる環境が、少なくともかつては存在していたことを明らかにした。つまり千年以上にわたり湿潤環境が存在し、生命体を構成するに足る元素が豊富に存在し、生命体を維持するのに十分なエネルギー勾配があったことが確実となった。するとこうした環境で、地球と同様に生命体が発生していても不思議では無い。いったん生命体が発生したとすると、特に微生物の突然変異速度は環境変動に比べるとはるかに急速であるため、低温化や乾燥化などには適応した生命体が生き残る可能性が高い。たとえば過塩素酸塩が Curiosity 着陸地点や Phoenix 着陸地点で報告されていて、これは多くの生命体にとっては消毒液として振る舞う。ところが逆に、過塩素酸の存在を好んで生息する微生物も地球では見つかったことから、火星全体が消毒され微生物が死滅することを意味しない（私たちはむしろ、このように何らかの化学的勾配が存在していた方が生命体の維持には好ましいと考えている）。

なお Curiosity では有機物が今のところ発見されていないが、これは私達にとっては、むしろ好都合であると考えている。というのも、湿潤環境が有機物を破壊しただけであろうと考えられるからだ。逆に有機物が多くみつかってしまっていたら、火星の表層は極めて乾燥度が高いことを意味するので、よほど地下深くに潜らない限り、生命体の検出ができないと考えることが現実的であったかもしれない。

ところで地球では、いかなる塩度においても生命体が検出されている（Naganuma et al., 1993）し、過塩素酸還元バクテリアすら存在している（Salamone and Nerenberg, 2006）。さらに火星の極端な乾燥環境は、生物学的な絶滅を意味しない（凍結乾燥した微生物が再生する例はいくつもみつまっている）。それどころか、水分が少ないことは過酷な環境への耐久性の意味で都合が良い可能性すらある（高い抗放射線耐性を見せる *Deinococcus radiodurans* は、水分量の低下の結果として、この耐性を獲得したといわれている、Battista, 1997）。こうした背景から、「現在も火星に生命体が存在しているとしたら、どこであるか」という視点を持ち、微生物学者らと惑星科学者らで検討したところ、液体の水があるのであればその存在地点、無いとしても自由エネルギーが存在している地点が最も有望であるとの結論を得て、この条件を満たす場を着陸地点候補と考えることにした。

1.2.6. 具体的な着陸地点の候補

こうした考えに立ち火星の探査データを精査したところ、いまのところ RSL（Recurring Slope Lineae）と呼ばれる筋状構造が最も有望な探査地点であると考えられている。これは周期的に表れる暗色の幅 50cm-5m 程度の表層構造である。南半球の中～高緯度帯に見られ、特にニュートンクレーター（41.6S 202.9E, 高度-900～-200 メートル）のものが良く知られている。ここでは春季後期に現れて秋季・冬季に消え失せるという特徴があることから、

なんらかの表層水がその形成に関与している可能性が高いと考えられている。さらにこの RSL の分布をみると、蒸発岩に良く見られる塩化物の分布と類似している。この塩化物の分布は、ノアキアン中期～後期の年代を示す地域に分布していることから、この時期に大量に存在していた海水の残存物である可能性がある。この大量の塩が凝固点降下を引き起こして、本来液体の水が存在し得ない環境の火星においても RSL を形成しているとする見方がある。いずれにせよ、春～夏にかけて何らかの流体が斜面を流下してくることが期待できることは、液体の水および自由エネルギーが存在する場という意味で、いまのところ生命体の存在が最も期待できる場であると検討グループでは考えている。

なおこのほかにも有望な候補が存在する。北部平原や特にイシディス盆地などに広く見られる泥火山のような地形で、これがメタン放出との関連の可能性とも含めて有望な調査地域と考えられている。その中でも、広く泥火山が分布しているイシディス盆地内の 10.5N 85.5W 地点付近は高度もマイナス 4km と着陸の意味でも液体の存在可能性の意味でも、さらにはメタンが濃集していると言われたシルティス・メイジャー (Syrtis Major) への距離という意味でも有望視されている。同様に、メタン濃集との関連でニリ・フォッサ Nili Fossae ; 21.7E 74.6E, -400～-700m) も有望な着陸地点であると考えられる。

現在でも水が流れていることが確認されている、生命探査に最適な場所：
ニュートン・クレーター内部の小クレーター



緯度経度 41.678S, 202.93E

高度 -900m(クレータ底)～-200m(クレーターリム付近)

傾斜(確認中) <~10°

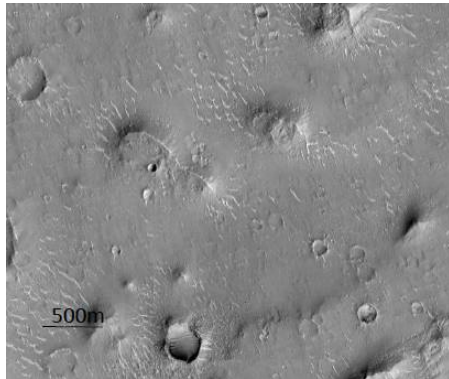
着陸精度

①可能であれば半径500m程度

②これが無理でも半径10kmのクレーター内部

クレーター壁面に春になると周期的に水(恐らく塩水)が流れ出ていることが確認されており、これを狙う。この現象とガリーとの関連は不明。同一地域が繰り返し撮影されているため、詳細な地形データ(ステレオ)が取得されている利点がある(3次元DTMは解析中だが、数メートルの起伏があり傾斜が数度程度はありそう)。比較的急傾斜の部分は岩石質で、緩傾斜の部分は恐らく砂。100m程度の恐らく砂でできた平らな場所もある。上の着陸精度はローバ移動距離を含めたもの。これが長ければ、クレーター内部の比較的平坦な場所に降りるのが良い。

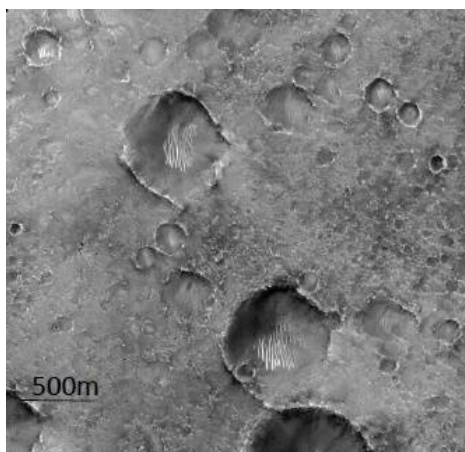
メタンが噴出している可能性のある場所付近にあり、比較的着陸が容易な場所：
イシディス・プラニシア



緯度経度 85.53W, 10.48N
高度 -3900m 土約30mの極めて平らな平原
傾斜(確認中) <~2°
着陸精度 300km

イシディスクレーター内部の巨大な平原。泥火山とも考えられている奇妙な高まりが多数存在していることから、生命探査の意味でも興味深く、地質・気象観測の意味でも、インパクトは薄いが大ランスの取れた着陸候補ともいえるかもしれない。

メタンが噴出している可能性があり、ダストの活動度が比較的高い、生命探査とダスト観測に適した場所： ニリ・フォッサ



緯度経度 41.678S, 74.678W, 21.711N
高度 -400~-700m
傾斜(確認中) <~3°
着陸精度 30km程度

横幅約30km、深さ約500mの深い谷の内部。メタンの噴出またはそれによる変性作用の疑いのある岩石が見つかった。峡谷の形成過程は不明だが、比較的起伏が少ない特徴があり、砂丘も多数みられることからおそらくダストが沢山存在していると考えられる。付近のニリ・パテラでは現在においてもきわめて活動的な砂丘の移動が観察されている。

留意しなければならないのは、着陸「可能な」地点は打ち上げウィンドウに強く依存するということである。つまり、火星へアプローチする軌道が火星赤道面に対してどのような傾斜角であるか、また火星の季節はいつであるかが重要な問題となる。いうまでもなく冬半球の中・高緯度に着陸したのでは、太陽電池で発電して活動できる時間は限られるし、越冬できず目標を達成せぬままミッション終了となってしまう可能性がある。そのため、想定されるいくつかの打ち上げウィンドウに対し、そのひとつひとつに最適な着陸候補地点を探し出して（理学メンバーがそのための研究・情報収集を行う）備えておくことは必須である。

1.3. MELOS1 ミッションのサクセス・クライテリア

MELOS1 ミッションのサクセス・クライテリアはオプション選定が完了した時点でアップデートされるが、現時点での暫定的なものとして以下を設定する。

ミニマムサクセス

- 火星地表面へ地上探査システムを着陸させ、地球局との間で通信が（直接通信あるいはリレー通信によって）成立する。
- 工学実験の基礎データである EDL 中の HK データを、地球局へ送付する。
- 着陸後 1 火星日以上にわたる理学測器の正常な動作（画像や気象など取得データの地球局への送付を含む）が確認できる。

フルサクセス

- 目標に対する着陸点の誤差が目標値（[TBD1]）以下である。
- 地上探査システムが[TBD2] m 以上移動し、[TBD3]火星日以上の間機能する。
- ひとつの火星土壌サンプルに対して生命検出実験ができ、火星生命の有無（「無」の場合は微生物存在密度上限値）をそのサンプルについて判定できる。
- 気象データを[TBD3]日以上継続取得し、地球局へ送付する。

エクストラサクセス

- 複数の火星土壌サンプルに対して生命検出実験ができ、火星生命の有無（「無」の場合は微生物存在密度上限値）を実験を行った範囲について判定できる。
- 地上探査システムが[TBD4] m 以上移動し、[TBD5]火星日以上の間機能する。
- 気象データを[TBD5]日以上継続取得し、地球局へ送付する。

【第2部】 科学ペイロード

2.1. MELOS1 生命探査装置提案(主サイエンス)

生命探査装置の概要

本生命探査装置は、蛍光色素の組合せにより、生きている細胞と死んでいる細胞を識別し、有機物をも広く検出する性能を備える。顕微鏡部は、1 μm オーダーの細胞を捉えることができる解像度を有する。複数のシャーレをもち、その個数だけの異なるサンプル（ローバーで移動しながら、生命の存在しそうな場所を選び）を調査することができる。シャーレの面内（X および Y）および焦点深度方向（Z）のスキャンを実施し、10⁴個/グラム土壌の細胞検出感度を達成する。また、上向きガラスステージに沈降するダストのシルエットを撮像する機能も有する。

生命探査装置の意義

「生命探査」そのものの意義については、本文書の第 1 部で詳しく述べた。本生命探査装置のもうひとつの特徴として、有機物をも広く検出できることが挙げられる。地球では、生命の誕生以前に宇宙由来の有機物が宇宙塵や隕石に含まれ大量に到達したと推定されている。火星にも同様に有機物は飛来したであろう。もし火星に生命が誕生することがなかったのならば、そうした有機物は残存している可能性がある。有機物の火星表面残存量は、宇宙からの有機物飛来速度と分解速度から推定可能である。火星表面の有機物濃度を推定することから、宇宙由来有機物の推定が可能となる。これも本装置の重要な意義といつてよい。

MELOS1 では限られたリソースで細胞検出、MELOS2 ではアミノ酸分析

後述するように、生命探査用蛍光顕微鏡はエレキまで含めて質量 6kg、消費電力 20W と、現在想定されているローバーが許容するリソース内で搭載可能な装置として開発されている。これが火星地表で機能し、微生物あるいは有機物と思われる像の観察に成功した場合、MELOS2 ではアミノ酸分析による「細胞」の由来判定が有意義な探査として浮上する。地球生物の細胞を質量分析したとしても非常に多くの分子種（数万種類）が検出され、そこから情報を得ることは極めて困難である。一方、地球細胞を加水分解することによって 20 種のアミノ酸に分解することが出来る。アミノ酸は分子量 75～205 と低分子量であり小型の質量分析装置で十分分離検出可能である。もし、火星「細胞」が地球生物の持つ 20 種と異なるアミノ酸を持っていた場合、それは火星（地球外）由来である可能性が高い。地球生物と同じ 20 種のアミノ酸を持っていた場合には、地球生物と何らかの関係を持つ生物であるか、あるいは 20 種のアミノ酸は必然的に選択されることを示唆している。隕石由来のアミノ酸は特徴的なアミノ酸種を含むため、隕石（あるいは宇宙塵）由来であるという判定も可能である。

類似の他ミッションとの比較：他計画では有機物探査、我々は「細胞」を探査

Viking 着陸機は、生命に由来するであろう反応を検出する実験を3つ行った。それらの内の一つ、放射性同位元素放出実験では、放射線標識した二酸化炭素の放出が確認され、火星土壤標品を加熱すると放出が低下したことから、生命存在の可能性が示唆された。しかし、質量分析装置による有機物の測定が検出感度以下であったことから、生命の存在は否定されて現在に至っている。しかし、これらの測定は「細胞」を直接観察する装置ではなかった。Phoenix は、火星の氷の検出、土壤中塩類の検出等多くの結果を得ているが有機物の探査は行っていない。

Curiosity は、Viking と同様に火星土壤および岩石標品を加熱し（火星表面温度から 1000℃まで）放出される気体を質量分析する装置（SAM: Sample Analysis on Mars）を搭載して分析を進めている。「有機物が存在する可能性が高い（断定ではない）」という報告（AOGS2013）も伝えられているものの、これで細胞あるいは生命を直接検出する事は困難である。ExoMars では今後、搭載装置の再検討が進む可能性があるが、当初選定された装置の中に、SAM と同様の装置および、生命関連分子を検出する装置がある。しかし、これらも有機物を検出する装置であり、生命あるいは「細胞」を観察する装置ではない。

Viking の質量分析装置の再検討が進み、その感度は大変低く 10⁷細胞/グラム土壤であることが報告されている。それに対して我々の装置は細胞検出感度 10⁴細胞/グラム土壤を実現する設計である。

火星の細胞をどう判定するか：生命の定義

火星にどのような生命がいるかを誰も知らないことが、これまで欧米が直接生命探査に踏み込めていない理由の一つと推定される。日本のアストロバイオロジー研究者は世界に先駆けて、生命の定義の検討を行ってきた。その結果以下の生命の定義を探査に利用可能な生命の定義として共通理解に達している。すなわち、

1) 膜に囲まれている、2) 代謝をしている、3) 複製増殖する、の三つである。これらの定義のうち火星生命探査では定義1を用いる。定義2に関しても実現可能性の検討を行っている。生命探査措置は利用する蛍光色素の詳細な検討の結果以下の性能を実現している。

- 検出能：有機物を広く検出する。
- 検出感度：10⁴細胞/g 土壤
- 識別能：有機物を鉱物から識別。生細胞を死細胞および有機物から識別。
- 空間分解能：1 μm の細胞を検出（0.3 μm 程度の細胞も検出可能）

測器定義（リソース要求）

- エンベロープ：240(W) x 200(D) x 220(H), 6 kg
- 電力最大：20W

- ・ 温度保存：-40℃（TBC）～30℃
- ・ 動作温度：-10℃（TBC）～20℃（ただし、これは色素温度でありローバーとの IF での温度要求は緩和される見込みあり、検討中）
- ・ 撮像時間：200 分/サンプル、ローバー運用期間中に 8 サンプル（シャーレ個数により規定される）
- ・ 上部にサンプル投入口、サンプル採集と投入をローバーが分担。
- ・ 画像の保存 45MB(OBC),
- ・ 地球への転送 200kB/サンプル

ダスト顕微鏡部

生命探査装置と「結像光学系」「CCD 検出器」を共有したダスト顕微鏡機能を組み込む。これは上方へ向けたガラスステージ上に降り積もるダスト微粒子を、そのシルエットとして観察することで投影形状やサイズの分布などを調べるものである。シルエット観察とすることで焦点調整メカを省き、単純・軽量でロバストな装置を目指している。

ダストのシルエットを得るために、最上層は短波長（< 700 nm）透過フィルター、2 層目は量子井戸またはドットを並べた発光層（800 nm 付近を中心）、3 層目は長波長（> 750 nm）透過フィルターの順で積層した蛍光板を製作し用いる。これにより上から入る光はそのままでは透過しないが、中間の発光層を光らせる（または影を作る）ことで降り積もるダスト微粒子を観察するものである。

この蛍光板の光を対物レンズで平行光線として生命探査装置内に導き、ダイクロイックミラー・ホイールの 1 ポジションで折り曲げて結像光学系～CCD 検出器で像を得る。分解能は 2 μm/画素程度とし、浮遊ダストのモータル半径といわれているものより大きな側のサイズ分布を実測することができる。

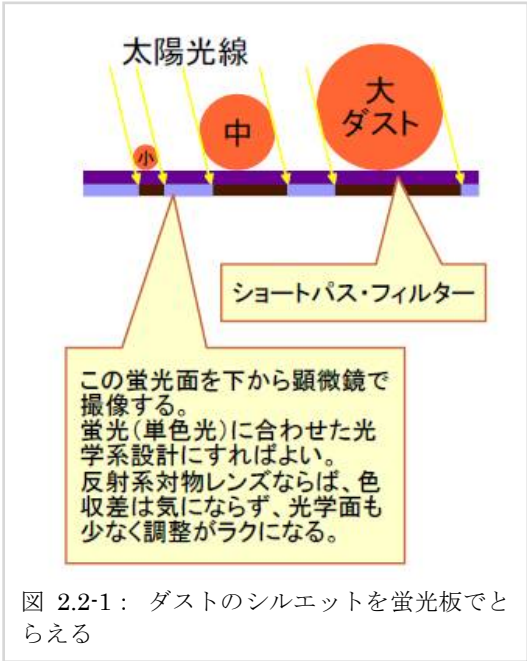


図 2.2-1：ダストのシルエットを蛍光板でとらえる

搭載に向けての開発ストラテジ：ヘリテージとクリティカル要素

要素技術	ヘリテージ	対応済み（見込み）項目	今後の開発要素
蛍光色素	極限環境微生物研究（深海、砂漠）	火星環境耐性（温度、圧力、過酸化物）	温度域拡大（溶媒の最適化）
顕微鏡	水中自動顕微鏡	Z 軸駆動機構、対物レンズ低温耐性（-40℃）、振動耐性	

光源 LD	要調査	低温耐性、放射線耐性	
撮像	あかつき、SPRINT-A	撮像時間（200 分）	時間短縮
サンプル処理		X 軸駆動機構、色素添加機構	Y 駆動、蓋開閉機構
画像処理	既存の蛍光顕微鏡		画像処理

今後の開発要素も、特に大きな問題を持つ要素は識別されていない。

ただし、蓋の開閉機構と気密保持機構の両立、色素の高温変性速度への対応、Y 軸駆動機構は検討中。現時点で 3 軸制御を 2 軸に減らす事でリソースを減らせる可能性がある。さらに、干渉縞をもちいて撮像時間を半分に減らす方法の検討を行う予定。波長可変フィルターの搭載可能性も検討している。

図 2. 1-2. 構造模式図

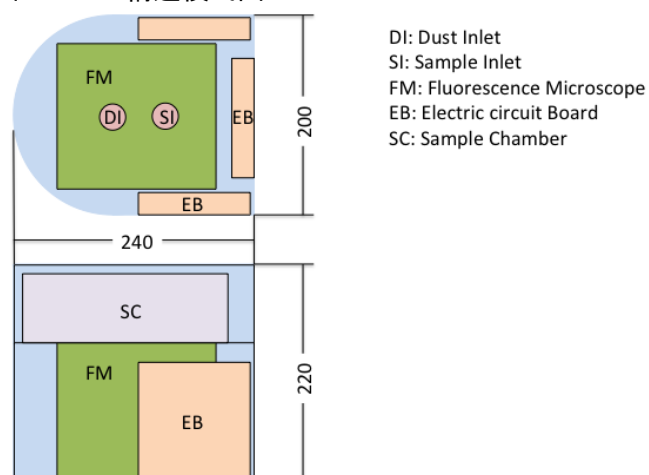


図 2. 1-3. サンプル処理装置 (BBM)

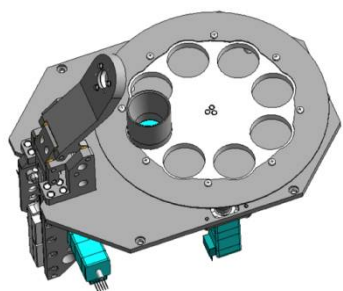
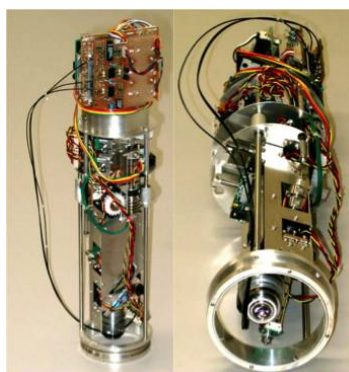


図 2. 1-4. 水中用自動顕微鏡



装置開発およびサイエンス推進体制

	統括	色素 選定	顕微鏡	撮像	サンプル 処理装置	熱設計	画像 処理	着陸地 点検討
山岸明彦（東京薬大）	○							
吉村義隆（玉川大学）		○						
本多元（長岡技大）		○						
宮川厚夫（東京薬大）			○	○				
今井栄一（長岡技大）			○		○			
佐藤毅彦（ISAS）			○	○	○		○	
佐々木聰（東京工科大）					○			
畠中竜太（JAXA/ARD）						○		
出村裕英（会津大）							○	
宮本英明（東大）								サ
佐々木晶（阪大）								サ
長沼毅（広大）								サ

補足：色素による有機物、細胞の識別スキーム

用いる色素の特徴（染色される対象の特徴）			判定
膜透過性でタンパク質様物質を染色	膜不透過性でタンパク質様物質を染色	触媒反応により染色	
染色	染色	染色	死細胞あるいは触媒作用を持つ有機物。
染色	非染色	染色	細胞である可能性が極めて高い。
染色	非染色	非染色	細胞である可能性が高いが、何らかの非生物学的膜構造の可能性もある。
染色	染色	非染色	死細胞あるいは有機物（生物、非生物由来）
非染色	染色	染色	有機の触媒反応（なさそうなパターン）
非染色	非染色	染色	無機の触媒反応

2.2. MELOS1 環境モニター(基本気象観測)パッケージ提案(必須項目)

2.2.1. 気象観測パッケージの概要

現在地の周辺環境を記述するための基礎的な諸量を計測する。基本パッケージでは気温・気圧、風速・地表温度を測定し、オプションの測器（環境監視カメラおよびライダー）やバス機器（ナビゲーションカメラ）を用いた観測で水蒸気量や浮遊ダスト量の測定、浮遊ダストのサイズやダストデビルの活動度の推定をおこなう。

2.2.2. 気象観測パッケージの意義

大きくは二つの意義がある。1つは工学的な観点から、周辺環境がどのような状態にあるのかを記録することが必要というものである。火星地表の環境条件は地域や季節にもよるが、一般に温度が低く日較差も大きい厳しい環境である。こうした厳しい環境においてローバーや固定ステーションなどを安定運用するためには、探査機の周辺環境を把握し、時々刻々と変化する環境に合わせた探査機の運用が必要とされる。あるいは、環境を HK データとして記録しが機器に及ぼす影響を評価することが将来探査への基礎情報となり、周辺環境を測定するセンサー類一式を持つことは必須である。

もうひとつの理学的な観点からは、火星気象/気候を特徴づけるダストに関する知見を得ることに大きな意義がある。地球の気象/気候は水による影響を強く受けているのに対し、火星のそれはダストによって支配されている。大気中を浮遊するダストが太陽光加熱の分布を決定し、そのことが大気大循環を決定し、そしてまた大気大循環が大気に巻き上がるダストの量を決定している。ダストを理解せずして火星の気象/気候を理解することはできない。地表で気象観測をおこなうことでダストの巻き上げ過程を明らかにすることは、火星の気象/気候を規定する最も重要な素過程のひとつを明らかにすることである。

2.2.3. MELOS1 気象観測パッケージの特徴

MELOS1 では周辺環境計測(気温、地表温度、気圧、風速)を一通りおこなって、将来の探査をおこなう上での基本技術を確立する。気温と風速は従来から使用されている型のセンサを使うが、気圧についてはこれまでに使用されてきた気圧計（ヴァイサラ製）に経年劣化の問題が指摘されている。MELOS1 では気圧を測る測器として従来型ではない水晶摩擦真空計を用いる。水晶摩擦真空計は宇宙飛翔体に搭載することを念頭においた開発が進められており、大気球・観測ロケットを用いた性能実証試験も実施済みである。地表温度は放射温度計を用いて非接触で測定をおこなう。

火星の気象/気候においてダストの理解が重要であることは先に述べた通りである。MELOS1 によってダストと風を測ることができたとしても、それは地表の一地点におけるダストと風にすぎないから、それだけで火星の気象/気候の全てが理解できるようになるわ

けではない。火星の気象/気候を理解するためには大気の大循環・ダストの輸送といったマクロな気象場と、地表でおこるダストの巻き上げというミクロな現象をつなぐことが必要である。そうしたマクロとミクロをつなぐ現象を解明するためには、周回機と着陸機を組み合わせた観測が必要である。MELOS1 による観測の意義は、MELOS2 以降に実施されるであろう周回機と着陸機の同時観測においてそれらをどのように組み合わせどのような観測をおこなえばよいか、そのことを検討するための基礎情報を創出することにある。

放射温度計によって地表温度を測定できると、それを太陽電池パネルの発電量から見積もられる日射量と合わせることで測定点における熱慣性の推定をおこなうことができる。火星地表の熱慣性はこれまで周回軌道からのリモートセンシング観測により、その空間分解能で規定される範囲の平均値として推定されてきた。地表のその場観測で熱慣性を測定できれば、これまでのリモセン観測による推定の妥当性を検証することができるし、平均値に対してローカルな地表の特徴に応じた偏差をも得ることができる。地表温度の日変化は火星下層大気の運動を規定する重要な要素のひとつであり、熱慣性を知ることは下層大気の運動とそれによるダストの巻き上げを理解するために欠かすことのできないものである。

2.2.4. 測器定義(リソース要求)

測器名	データ量 (平常時)	データ量(集中観測時)	観測のイメージ	重量 (センサ/エレキ)	電力	サイズ	温度(保存/動作)
温度計	67kB/day		2 秒ごと観測	10g (10g / 0g)	0.1 W	2x0.5x4cm	(-100-200/-100-200)
放射温度計	1kB/day		日に数回	50g	0.1W	4x5x3	(-90-70/-90-70)
圧力計	78kB/day	3kB/1event	ダストイベント時	100g	0.5W	5x2.5x4	(-35-70/-35-60)
風速計	18kB/day (90 分観測するとして)		1 秒ごと観測	40g(20g/20g)	0.25W	1x1x2 + 6x2x2	(-90-70/-90-70)
ロガー			(圧力計のエレキを兼ねる)	250g	0.1W	8x3.5x10	(-35-70/-35-60)

風速計は Beagle2 の値

基本的な観測については、平常時には 2 秒ごとの観測を想定

2.2.5. 開発ストラテジ

- ヘリテージ
 - 温度センサーは、地球高層観測で使用されている。

- 圧力センサーは、ヴァイサラ製が火星実績あり（経年劣化が懸念材料）、明星製、エプソントヨコム製は地上の高層観測では実績あり。
- 放射温度計については、火星使用実績はないと思われる、 -50°C ぐらいまでは測定実績あり。
（機器は暖かいところ設置されている。動作実績ではない）
- 熱線風速計は、海外では実績あり。
- クリティカル
 - 低温動作試験で確かめる必要がある。他メーカーでの実績のあるものが多いので動作は可能と考えている。
 - 熱線風速計は、周辺温度などに依存性が高くキャリブレーションが困難かつ重要で、その問題に対処する必要があると考えられる。
乱流計測まで行わなければ、風速計測は可能かもしれない。
- 今後の作業予定
 - 温度計、圧力計
明星電気（地上測器を開発し宇宙経験もある）が主に開発し、乙部はしもとでテストを行う。圧力計については明星の測器と並行してエプソントヨコムの水晶摩擦圧力計も検討する（最近高層観測用に応用された）。
 - 放射温度計
堀場製作所の物を使う。 -50°C ぐらいは使用実績あり（測器は普通の環境に設置する）
 - 熱線風速計
火星風洞などでキャリブレーションや測定ドリフトの計測を行い、使用可能性について検討する必要がある。

2.2.6. 装置開発およびサイエンス推進体制

	統括	温度計	圧力計	放射温度計	熱線風速計	ライダー	環境監視カメラ	ダストデビル監視	気象シミュレーション	サイエンス推進
はしもと（岡山大）	○	○	○	○	○					○
乙部（福岡大）	○	○	○	○	○					○
村田（東北大）		○	○							○
栗原（北海道大）		○	○							○
内田（九州大）					○					○
玉川（岐阜大）					○					○
椎名（千葉大）						○				○
小林（千葉工大）						○				○
千秋（千葉工大）						○				○
鈴木（JAXA/ISAS）							○	○		○
小郷原（滋賀県大）							○	○		○
眞子（千葉大）							○	○		○
野口（奈良女子大）							○	○		○
森（桜美林大）							○	○		○
杉山（JAXA/ISAS）									○	○
西澤（理研）									○	○
高橋（神戸大）									○	○
小高（北海道大）									○	○
林（神戸大）									○	○
佐藤（JAXA/ISAS）										○
今村（JAXA/ISAS）										○
塩谷（京都大）										○
竹見（京都大）										○
林（京都大）										○

※この体制表は 2.2～2.6（気象関連の諸提案）全体をカバーする共通のものである。

2.3. MELOS1 ライダー提案(オプション選定中)

2.3.1. ライダーの概要

Light Detection And Ranging (LIDAR)は、投光部からパルス状の光を発し、受光部で反射光を捉える事で光路上の反射(散乱)体の存在量を計測する装置である。観測を斜め上の方向(仰角 30° (TBD))におこなうことで、地表付近におけるダストの鉛直および水平分布を測定する。また斜めに打つことで探査機の横を通過するダストデビルの内部構造を測定する。

2.3.2. ライダーの意義

地表面は火星の気象/気候を支配するダストのソースでありかつシンクでもある、しかしこれまでに地表面付近でのダストの存在が測られた事はない。ライダーの観測目標を地表付近のダスト量に設定し、測定したダスト量を気象データと組み合わせることでダストの巻き上がり過程に関する知見を得ることを目指す。

ダストの巻き上げにおいては、砂の巻き上げとダストの巻き上げの二つの過程を区別することが重要である。ダストのような小さい粒子(数 μm 程度)は表面に捉えられており少々風が吹いただけでは巻き上がらない。風によって最初に巻き上がるのはダストよりも大きい 100 μm 程度の大きさを持った砂である(飛砂)。風で巻き上がった砂は大きく重いいため地表に落下するが、その落下時に地表にあるダストを叩いて大気中へと巻き上げる。砂にたたかれて巻き上がったダストは小さいため落下するのに時間がかかり、長い時間大気中にとどまることで大気に大きな影響を及ぼす。ライダーによる観測は、風と飛砂の関係を明らかにし、そこから飛砂とダスト巻き上げの関係を明らかにすることで、火星大気中のダストの供給過程を解明する。

2.3.3. MELOS1 ライダーのユニークな特徴

MELOS1 では投光部に LED を使用した LIDAR を使う。LED はレーザーに比べ省電力でありかつ軽量化も期待できる。また耐放射線の面からもメリットがある。一方で、LED は光量が少なくかつ光線を絞るのが難しいという難点がある。これに対しては、視野角を広がり角よりも狭めることで受光条件を安定化、繰り返し観測を行うことで S/N を稼ぐという対策によって解決を図る。

MELOS1 のライダーは仰角 30° (TBD)の方向を向いて観測をおこなう。斜めの方向を観測することには二つの意味がある。ひとつは地表付近のダスト量を測定することである。これまでの火星探査機で LIDAR を搭載したのは Phoenix のみであるが、その観測は高度 50m から 20km までに限られる。近距離で測定できないのは、投光部と受光部とのアライメント調整の都合である。斜めを向いた MELOS1 のライダーは高度 50m 以下のダスト量を測定する初めての観測となる。

ライダーが斜めを向くもうひとつの理由は、ダストデビルの断面を観測することである。探査機の横を通過するダストデビルがライダーの視線を横切れば、ダストデビルの内部構造を測定することができる。ダストデビルは光学的に厚いため S/N を稼ぐための積算回数を少なくすることができ、1 秒以下の時間分解能を十分に達成することができる。観測においては、ダストデビルの方向にライダーの視線を向けることは困難なため、ダストデビルが通過するであろう方向の観測を 1Hz でおこないダストデビルの通過を待つという方法をとる。ダストデビルの直径は典型的には 15m 程度であり、観測にかかった場合にはダストデビル本体とその周辺のダストの空間分布を世界で初めて観測する事になる。

視線方向の解像度を 2m(TBD)とすると、鉛直方向には 1m、水平方向には 1.7m の分解能となる。このスケールは大気乱流の渦のスケールとも重なる。ライダーによって測られる散乱体の空間分布を見ることで、散乱体を運ぶ風の空間構造が可視化されるかもしれない。ライダーによる測定には散乱体のサイズを直接に測ることができないという弱点がある。生命探査パッケージの顕微鏡を使ったダスト顕微鏡の結果からダストや砂のサイズ・形状に関する情報が得られれば、それはライダー観測の結果の解釈に役立つものとなる。またオプションで提案されている LIBS の顕微カメラによっても地表にある砂粒のサイズや形状に関する情報が得られるし、環境監視カメラによって上空を漂うダストのサイズ分布が推定される。これらの情報を組み合わせることで、ライダー観測の結果の解釈をおこない、サイズに関する不確定の影響を取り除くことを目指す。

2.3.4. 測器定義(リソース要求)

測器名	データ量 (平常時)	データ量(集中観測時)	観測のイメージ	重量 (センサ/エレキ)	電力	サイズ	温度(保存/動作)
Lidar (オプション)	30kB/日	1800kB/時間	通常観測は 10 分に 1 回, 集中観測は 1Hz で 1 時間	1kg (一体型)	2.5W (観測時)	10cm x 10cm x 20cm	(-40-60/-20-50)

2.3.5. 開発ストラテジ

- ・ ヘリテージ
 - ・ ライダーを構成する各要素については宇宙実績あり
- ・ クリティカルな項目は特にない。

2.3.6. 装置開発およびサイエンス推進体制 (2.2.6 の体制表を参照)

2.4. 環境監視カメラによるエアロソル及び気柱水蒸気量観測提案(オプション選定中)

2.4.1. 環境監視カメラの概要

ローバーのバス機器である 2 軸可動なナビゲーションカメラ部に超小型の 4 波長撮像装置を 2 個取り付け(太陽直達光用及び大気散乱光用) 火星エアロソルの光学的厚さ・中心粒径・組成及び気柱水蒸気量の計測を行う。

2.4.2. 環境監視カメラの科学目標

1. 着陸地点でのエアロソルを計測し、着陸地点気象の微物理的な説明を行う。
2. 着陸地点での気柱水蒸気量を計測し、着陸地点気象研究を行う、更に着陸点周囲に温暖化した際に液体の水となりうる表層氷の存在の有無に関する情報を得る。

補助的な利用

3. 疑似カラー画像の取得により、生命探査のための Navigation を容易にする。
4. 疑似カラー画像を広報のために利用する。
5. 太陽方位のデータ列から、着陸機の位置・方位及び傾斜に関する補助情報を得る。

2.4.3. 環境監視カメラの意義

1. 科学的意義

火星の気象及び気候は、現在の寒冷な火星環境においてはエアロソルの効果が支配的であり、光学的厚さ・中心粒径・組成を知ることからエアロソルの気象影響の定量的記述が可能になる。エアロソル量は、着陸点の位置・表層条件に依存する上に季節変化する、更に局所的・短時間のダストデビル現象から始まり各種規模のダストストームなどで様々な空間時間スケールで大きく変化する。これまでの Mars Path Finder などの着陸機でも、同様なエアロソル計測が実施されてきたが、MELOS 着陸点での生命存在性などの議論にはその着陸点の気象・気候の変動可能性「どの程度に温暖湿潤である可能性があったか」の議論が必要であり、今回の MELOS 着陸でも同じようなエアロソル計測を行うべきである。

2. MELOS で実施する意義

火星気象を決定しているエアロソル・水蒸気の計測は、火星気象学・気候学の展開に必須である。

火星生命探査においては着陸点の気象条件、液体の水の現在及び過去における存在の有無が非常に重要なポイントとなる。エアロソル測定と気象測定の組み合わせから着陸点の気象の変動可能性の議論を行うことは、このために必須となる。水蒸気測定は着陸点近傍の液体になり得る水の推定のために非常に有力な手法になる。環境監視カ

メラは、着陸点周辺の疑似カラー画像を取得できるため、Rover のナビゲーションカメラのモノクロ画像では識別が困難な場合に、生命探査実験の実施地点の決定を補助する。

また着陸点の工学的な意味での環境を評価するために、着陸点の気象データ(気温・気圧・風速・日射量など)と同時にエアロソル・水蒸気の計測が行われるべきである。着陸点の疑似カラー画像は、広報教育のため非常に有用であり火星着陸探査の継続に対する国民の関心を高めることが期待できる。

3. 他ミッションと比較して

同様な観測は、MarsPathFinder 以降の米国の着陸機で実施されている。しかし、MELOS1 Rover 着陸点の気象及び過去に温暖化が生じた場合の液体の水の存在可能性は、MELOS1 ミッションにおいて行う必要がある。

2.4.4. 必要なデータ

1. エアロソル計測

3 波長(340or450, 550, 870nm)での太陽直達光、及び 4 波長(340or450, 550, 870, TBDnm)での大気散乱光の測定を、地球大気のエアロソル測定で行われている Sun Photometer (直達光)及び Sky radiometer(散乱光)と同様な方法で行う。機構部を少なくするため、Rover のナビゲーションカメラのヘッドに超小型分光撮像装置を取り付ける。直達光測定

と散乱光測定の幾何学的関係の情報精度がエアロソル推定に大きく影響するため、画像データを取得し、そこから測光値及び幾何位置関係情報を抽出する。測定は、水蒸気観測の補正のためには日出直後の Elevation Angle が 10-30°と低い状態で行う。エアロソル測定は、Elevation Angle は南中時を含む任意の Elevation Angle で可能である。

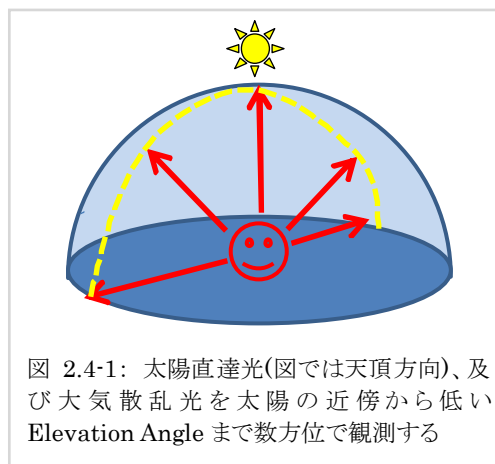


図 2.4-1: 太陽直達光(図では天頂方向)、及び大気散乱光を太陽の近傍から低い Elevation Angle まで数方位で観測する

項目	データ概要	観測波長	観測頻度	データ量
直達光	機上で画像中の最大輝度の値(10bit ADC)からを TBD 時間の平均値(12bit)として得る	340 or 450, 550, 870 + 940 nm (水蒸気)	太陽方位のみ観測日に1回(他に水蒸気観測時の測定がある)	12 bit x 4 及び最大輝度の pixel 座標 (10bit x2 [X,Y] x 4band = 80 bit
散乱光	画像中の 5 x 5	340 or 450, 550,	太陽近傍及び、	12bit x (5 x 5) x

	程度の格子点の値(10bit ADC)を TBD 時間の平均(12bit)として得る	870 + 940 nm (水蒸気)	その他 5 方位、 計 6 方位を観測 日に 1 回(この他に水蒸気観測時の測定がある)	4 band x 6 方位 = 7200 bit
--	--	-----------------------	--	-----------------------------

2. 水蒸気計測

940nm 近傍の水蒸気による太陽直達光の吸収及び、エアロソル ch870nm との比を取りエアロソルによる減衰を補正し気柱水蒸気量を計測する。日出後の早い時間 (Elevation 角 10-30°)に測定を行う。

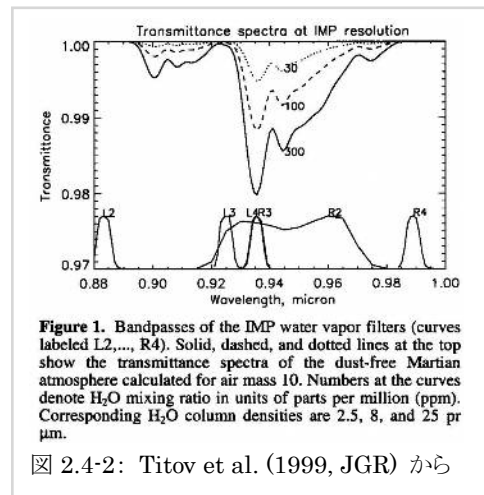


図 2.4-2: Titov et al. (1999, JGR) から

項目	データ概要	観測波長	観測頻度	データ量
直達光	機上で画像中の最大輝度の値(10bit ADC)からを TBD 時間の平均値(12bit)として得る	340 or 450, 550, 870 + 940 nm (水蒸気)	日出直後の低い Elevation Angle で太陽方位のみ。観測日に3-5回	12 bit x 4 及び最大輝度の pixel 座標 (10bit x2 [X,Y] x 4band x (3 or 5) = 240-400 bits/day

3. 疑似カラー画像

340 or 450, 550, 870 nm の 3 波長の画像を機上ないし地上で疑似カラー画像に変換する。(機上で疑似カラー画像にした場合、波長間の相関により画像の圧縮率が一般には高まる)

項目	データ概要	観測波長	観測頻度	データ量
散乱光カメラによる疑似カラー画像	画像を 4 波長すべてダウンリンクする。(10bit ADC) 機上で非可逆画	340 or 450, 550, 870 + 940 nm (水蒸気)	地質判定、広報あるいは気象観測のためリソースが許容する場合	10 bit x 4band x 512x512/画像 x0.1 圧縮率 = 4Mbits/ 画像 (0.1 圧縮率の場合)

	像圧縮(1/2～1/10)を行う。			合)
--	-------------------	--	--	----

4. 太陽方位データ取得

項目	データ概要	観測波長	観測頻度	データ量
直達光	機上で画像中の最大輝度の値(10bit ADC)からをTBD時間の平均値(12bit)として得る	340 or 450, 550, 870 + 940 nm (水蒸気)	日出直後から日没まで 10-20 太陽方位のみ。観測日に1回	12 bit x 4 及び最大輝度の pixel 座標 (10bit x2 [X,Y] x 4 band x(10 or 20)= 800 -1600 bit/day

2.4.5. 測器概要

1. 仕様

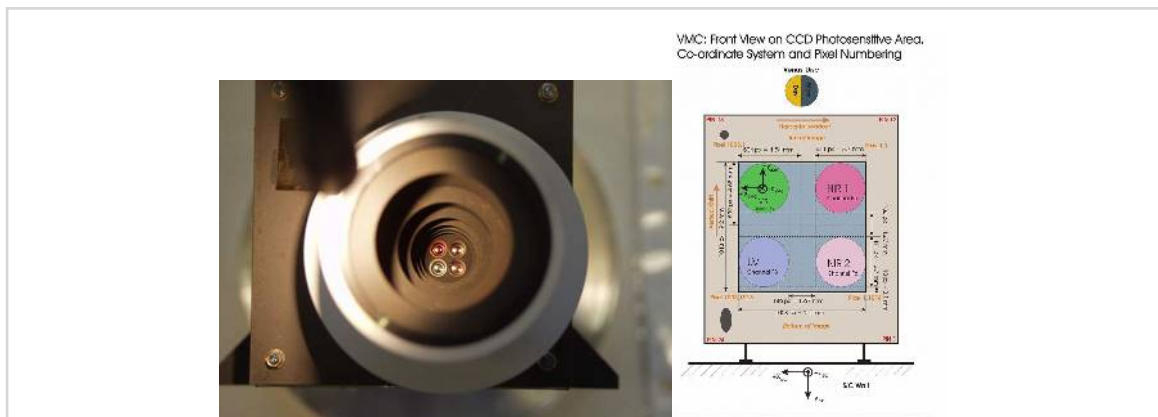


図 2.4-3: 構成の類似する Venus Express/Venus Monitoring Camera (VMC)の検出器ヘッド

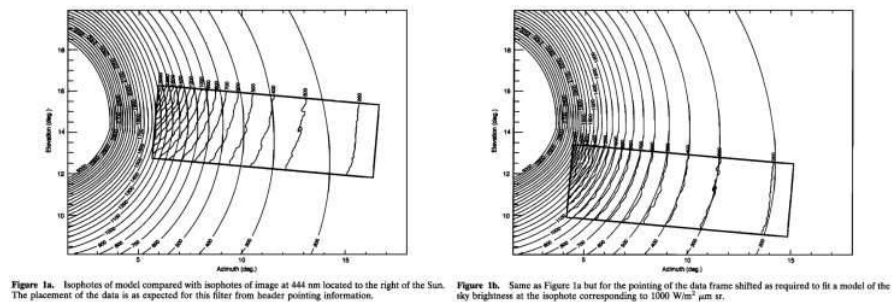


図 2.4-4: 大気散乱光データを画像的に取得しその一部を格子状にダウンリンクし地上でカメラのポインティング情報を補正する。(左: ポインティング情報が誤っていた場合、右:ポインティングが正しい場合)

Venus Express/VMC のような、10mmx10mm あるいは更に小さい 1024x1024 程度の CCD あるいは CMOS 検出器上に、波長バンドパスフィルター及び小型レンズの組み合わせを4組実装した、4波長超小型撮像装置を、太陽直達光用(10E-4 ないし 10E-5 の ND フィルターを必要とする)および大気散乱光用の2セットを、両者の画像の幾何学関係が 0.3 度程度の knowledge で保たれるようにする。それぞれの視野角(IFOV)は 10-15°であり、両者の視野は隣接している。この撮像装置は、Rover のナビゲーションカメラの2軸ジンバル上に実装する。

形状: 80x80x20 の箱に 20mm 径のレンズフード2個がとりつく

質量 TBD (VMC は 1.6 kg であるが、電源部/CPU メモリー部/筐体が除かれ、検出器が CMOS になることで大幅に軽量化される、上記形状が比重 1 として 200g 程度と想定している)

電力 TBD (1W + ヒーター)

今回の仕様は暫定仕様である。直達光観測については、単一レンズ系のグレーティング分光器の可能性について検討中である。

2. 運用

Sun PhotometerとSky Imagerは5~10°光軸が外れている。
Dustが積もらないように十分下を向けることが必要。
4x Lensの最外面は、石英ないしサファイアのwedge板でdustでの傷を防ぐ。

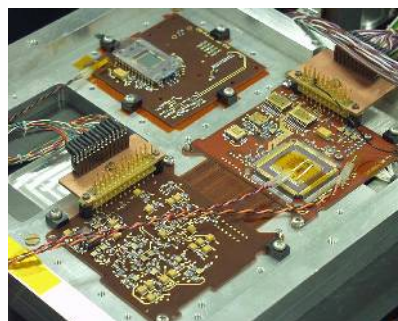
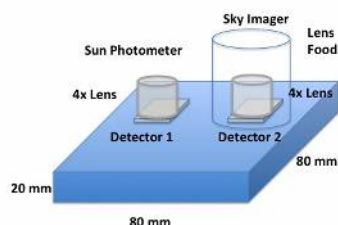


図 2.4-5: 装置の概念図及び Venus Express/VMC の装置展開図(この内で図上方の検出器基板が必要となり、これに SpaceWire インタフェースが加わる)

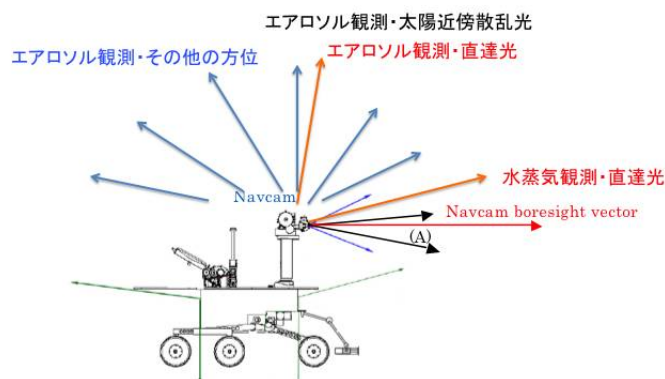


図 2.4-6: Rover の Navigation Camera ヘッドに取り付けられた環境監視カメラの観測方位の関係

エアロソル観測：リソースが許容する日に、Elevation Angle が高い太陽の直達光及びその近傍の散乱光を測定し、その後 Navigation Camera のジンバルを駆動し 5 方位程度のその他の方位の大気散乱光を測定する。

水蒸気観測：リソースが許容する日に、日出直後の低い Elevation Angle で数回、直達光を観測する。あらかじめ Navigation Camera ヘッド駆動せずに、直達光観測の検出器 IFOV 内でそのまま観測できるようポインティングしておく。

疑似カラー画像：リソースが許容する日に MELOS1 ミッションが必要とする場合に画像を取得する。

3. 記憶容量、転送量、CPU 性能について

	記憶容量	転送量	CPU 性能	
エアロソル観測	(7280 bits + 補助データ)/観測日	同左	直達光太陽座標計算, 散乱光格子抽出, 平均演算	リソース要求上観測が可能な日に実施
水蒸気観測	(240-400 bit + 補助データ)/観測日	同左	直達光太陽座標計算, 平均演算	リソース要求上観測が可能な日に実施
疑似カラー画像	40Mbits(非圧縮) 4Mbits(1/10 圧縮)/画像	同左	512x512 画像圧縮 x4 枚/画像あるいは 4 色画像の圧縮	画像取得が必要と判断された場合に観測実施
太陽方位決定	(800bits + 補助データ)/観測日	同左	直達光太陽座標計算, 平均演算	工学側が必要とする場合に観測実施

2.4.6. 実現に向けたストラテジ

1. ヘリテージ

同様な小型光学系は Venus Express/VMC で実現されている。MELOS 気象 orbitor での偏光観測カメラのために少し大きなレンズ設計を実施した。

耐放射線性 CMOS センサ Star1000(1024x1024, on chip 10 bit ADC)は ESA 及び東北大学/北海道大学の小型衛星並びに宇宙研の ISS/MCE/GLIMS など宇宙実証されている。

2. 新規開発またはクリティカル要素

設計検討の初期段階であり、新規開発要素は完全にリストアップされていない。

Navigation Camera との統合

Venus Express/VMC から一段の小型軽量化

レンズフードへのダストの降り積もりへの対策(サファイヤ窓)

十分なヒーターが得られない場合の温度環境への対応

2.4.7. 装置開発およびサイエンス推進体制(2.2.6 の体制表を参照)

2.5. ナビゲーションカメラによるダストデビル観測提案(オプション選定中)

2.5.1. ダストデビル観測の概要

ローバーのバス機器であるナビゲーション用カメラを用いて、ダストデビル(の発生数、規模、持続時間、光学的厚さ、移動方向)をモニタリングする。

2.5.2. ダストデビル観測の科学目標

- a. 着陸地点における、視程とダストデビルによるダスト供給量の日周期変動を把握する (Minimum Success)
- b. 1に加えて、着陸地点における、ダストデビルによるダスト供給量の数十日周期までの変動を把握する (Full Success)
- c. 1火星年に渡って、2と3を行う (Extra Success)

2.5.3. ダストデビル観測の意義

1. 科学的意義

火星に常時浮遊している一定量のダスト(以下、背景ダスト)を供給しているのは、主にダストデビルであると言われている。そのメカニズムゆえ、ダストデビルの発生数や規模、持続時間が大きく日変化することが予想される。火星の中低緯度でもっとも振幅の大きい支配的な変動成分は日周期変動であることから、日変化の重要性は明らかである。したがって、ダストデビルの活動の日変化を観測しなければそれによるダスト供給量を把握することはできない。しかし、過去の周回機(太陽同期軌道)からの高解像度撮像では地方時が固定されてしまい、大きな日変化を捉えることができない。着陸機によってダストデビルの系統的な観測がおこなわれているものの、Spiritのみの1例であり、それも正午から午後2時に観測が集中していて、観測された日変化が有意かどうかは疑問が残る(Greeley et al., 2006)。したがって、今一度ダストデビルの日変化をモニタリングし、ダストデビルによるダスト供給量を正確に見積もる必要がある。

一方で、背景ダストは大きく季節変化することが知られていて、その供給元であるダストデビルの活動と関係していると考えられている(Newman et al., 2002ab; Kahre et al., 2005)。火星の気象気候の季節変化や年々変動、より長周期の変動の理解へと進んでいくためには、各季節ごとのダスト供給量を見積もることが必要になってくる。日周期から数十日周期のダストデビルの活動を継続的に観測することで、ダストデビルによる季節ごとのダスト供給量を正確に把握することができる。

ダストデビルの発生や持続期間、移動方向などは、周辺大気の流れや安定度に大きく影響を受ける。したがって、ダストデビルの発生数や持続時間と、他国の周回機によって得られるその時の大規模温度場とを比べることにより、着陸地点においてどのような大気場のときにどれくらいのダストデビルが発生し、それによってどれくらいの背景ダストが供給されているかを対応付けることができる。この結果から、着陸地点以外の場所におけるダスト供給量を推測することも可能となる。

2. MELOS1 で実施する意義

着陸機によってダストデビルの日変化を系統的長期的に観測した例は **Spirit** の1例のみである。1点で観測したから火星全土のダストデビルの日変化がわかった、とは到底言えず、2点目の観測の意義はまったく減じられない。むしろ、**Spirit** の観測地方時の不均一を解消し、より信頼できる観測結果を得るという意味では、1点目よりも科学的意義はあると言える。世界的にみても火星に着陸する機会は多いとは言えず、数少ないチャンスを使って少しでも観測点を増やす必要がある。

3. 他のミッションと比較して

ナビゲーションカメラはどのローバー(ランダー)にも搭載されているものであるから、観測装置自体に新規性はさほどない。むしろ、(波長や感度の点で)似たような観測装置であるからこそ、他のミッションの観測結果と比べる際、測器ギャップをあまり気にせずに「継続観測」として解析できる。一方で、運用を工夫して観測可能な地方時を均一にカバーすることで、他のミッションの観測よりも信頼できる結果を得ることが可能となる。

2.5.4. 必要なデータ

1. ダストデビルが写った画像

●対応する科学目標: 2.5.2-a

- a. 平均視程が 5km と仮定し、5km 先の直径 5m のダストデビルを解像できる空間分解能
- b. 最長寿命 1900s (Greeley et al., 2006) のダストデビルの一生をモニタできる観測継続時間

(ア) **Spirit** の観測によって求められた最長寿命のダストデビルは、その一生をとらえきれていない。最長寿命を正しく決めるため、より長時間の「集中観測モード」を必要とする。

- c. 最短路寿命 20s (Greeley et al., 2006) のダストデビルを検出できる時間分解能

(ア) **Spirit** の観測によって求められたダストデビルの最短路寿命は、観測間隔 20s で既定されている可能性がある。最短路寿命を正しく決めるためより高時間分解能の「高速モード」を必要とする

- d. 1枚の画像に少なくとも1つダストデビルが写っているような水平視野
- e. カメラ前方~15m 以遠、水平線よりやや上(仰角<数 deg)までの領域がはいる垂直視野
- f. 見通しのよい1方向だけでよいが、常にその方向であること

●対応する科学目標: 2.5.2-b, 2.5.2-c

- g. 観測期間が Ls で 30 度以上で、その期間内で観測地方時、観測日が偏っていないこと (2.5.5-2 参照)

2. 特定のランドマークが写った画像 (2.5.4-1.と兼ねてもよい)

●対応する科学目標: 2.5.2-a

- a. 着陸地点からの距離の異なる複数の地形。着陸後に決定する
 - b. 朝、昼、夕の1日 3 枚を毎日
3. 観測方向の地面の形状や模様が写った画像 (2.5.4-1., 2.5.4-2.と兼ねてもよい)
- 科学目標: 2.5.2-a, 2.5.2-b, 2.5.2-c
- ダストデビルの位置決めに必要 (Greeley et al., 2006)

2.5.5. 測器提案

本来の用途から逸脱しない範囲で、気象学的見地からナビゲーションカメラのスペックを提案する。

1. スペック提案

2.5.4 章で示されたデータを取得するため、ナビゲーションカメラが満たしておくべき条件は表 1 に示されている。結果的に MER/Navcam とほとんど同じスペックになっている (Maki et al., 2003)。また、ナビゲーションカメラの視線と視野、そのうちダストデビルのモニタリングで用いる領域は図 1 において模式的に示されている。水平方向視野、垂直方向視野と角度分解能@FOV center の値から、素子は水平方向には~800 ピクセル、垂直方向には~270 ピクセルあればよいということになる。

表 1. ナビゲーションカメラのスペック提案 (TBD)

	通常モード	高速モード	集中観測モード	2.5.4 章との対応
水平方向視野	>45 deg	>45 deg	>45 deg	2.5.4-1-d
垂直方向視野	>15deg	>15 deg	>15 deg	2.5.4-1-e
角度分解能@FOV center	<1 mrad	<1 mrad	<1 mrad	2.5.4-1-a
観測時間間隔	<20 s	<2s	<20s	2.5.4-1-c
観測継続時間	>30 min	>3 min	>2 h	2.5.4-1-b
観測（視線）方向	固定	固定	固定	2.5.4-1-f, 2.5.4-2, 2.5.4-3 着陸後決定
ADC	>12 bits	>12 bits	>12 bits	

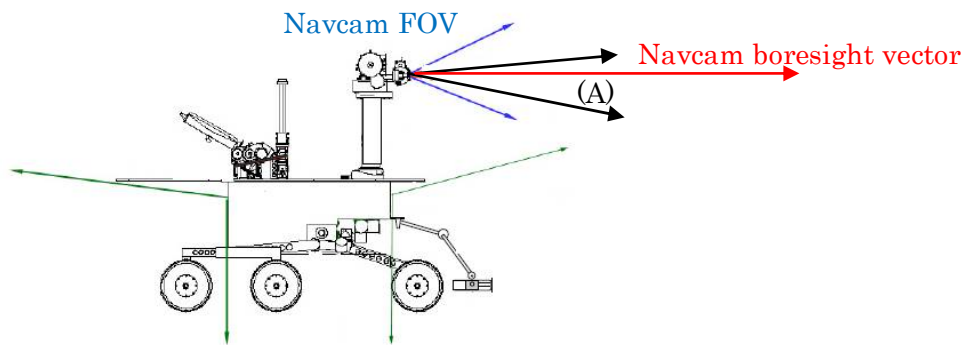


図 2.5-1. Navcam FOV、視線、ダストデビルモニタリングで使用する垂直方向視野(A)の模式図。撮影された画像の中で、(A)に対応する領域だけを用いてダストデビル検出に用いる（他の領域はトリミング）。Navcam FOV の中に(A)が入っていれば、boresight vector の仰角は 0 deg でなくてもよい。

2. ダストデビルモニタリング運用提案(TBD)

大気中には様々な周期の変動が存在している。ダストデビルの発生数や持続時間、規模などの日変化を正しく把握するためには、さまざまな地方時の観測を可能な限り速やかに行わなくてはならない。さらに、可能な限り切れ目なく継続的に観測する必要がある。そこで、1回あたりの観測シーケンスを短くし、それを毎日異なる地方時に行っていく方法をとる。こうすることで、他の活動の合間に入れ込むことができ、長期間の観測欠損を避けられる。火星大気分野では L_s で 30° ごとに時間平均して季節変化を示すことが多い（例えば Banfield 2003, 2004）。南半球の夏が最も進行が早く（ L_s で 30° あたりの日数が少ない）、約 50sols で十分回数の日変化を観測しなくては、季節が変わってしまう（2.5.4-1-g.）。したがって、50sols 程度をひと塊りとし、その中で何度も日変化が観測できる必要がある。

高速モードと集中観測モードを毎日毎週行う必要はなく、1, 2 か月に1度行えばよいと考えられる。以上をもとに、たたき台となる観測シーケンスの一例を図 2 に示している。縦軸は日数で、横軸は各日における地方時である。1マスは 30 分の観測シーケンスを示しており、赤色は通常モード、黄色は集中観測モード、緑色は高速モードをあらわしている。高速モードは 1 マスになっているが、実際は 3 分である。なお、図 2 中に示されていないが、毎日朝、昼、夕の 3 回、各回 1, 2 枚、特定のランドマークを撮影する。また、図 2 に示された時だけダストデビルモニタリングを行うことができればよいというわけではなく、隙間があるなら 2 枚でも 3 枚でも撮影し、ダストデビルを検出した

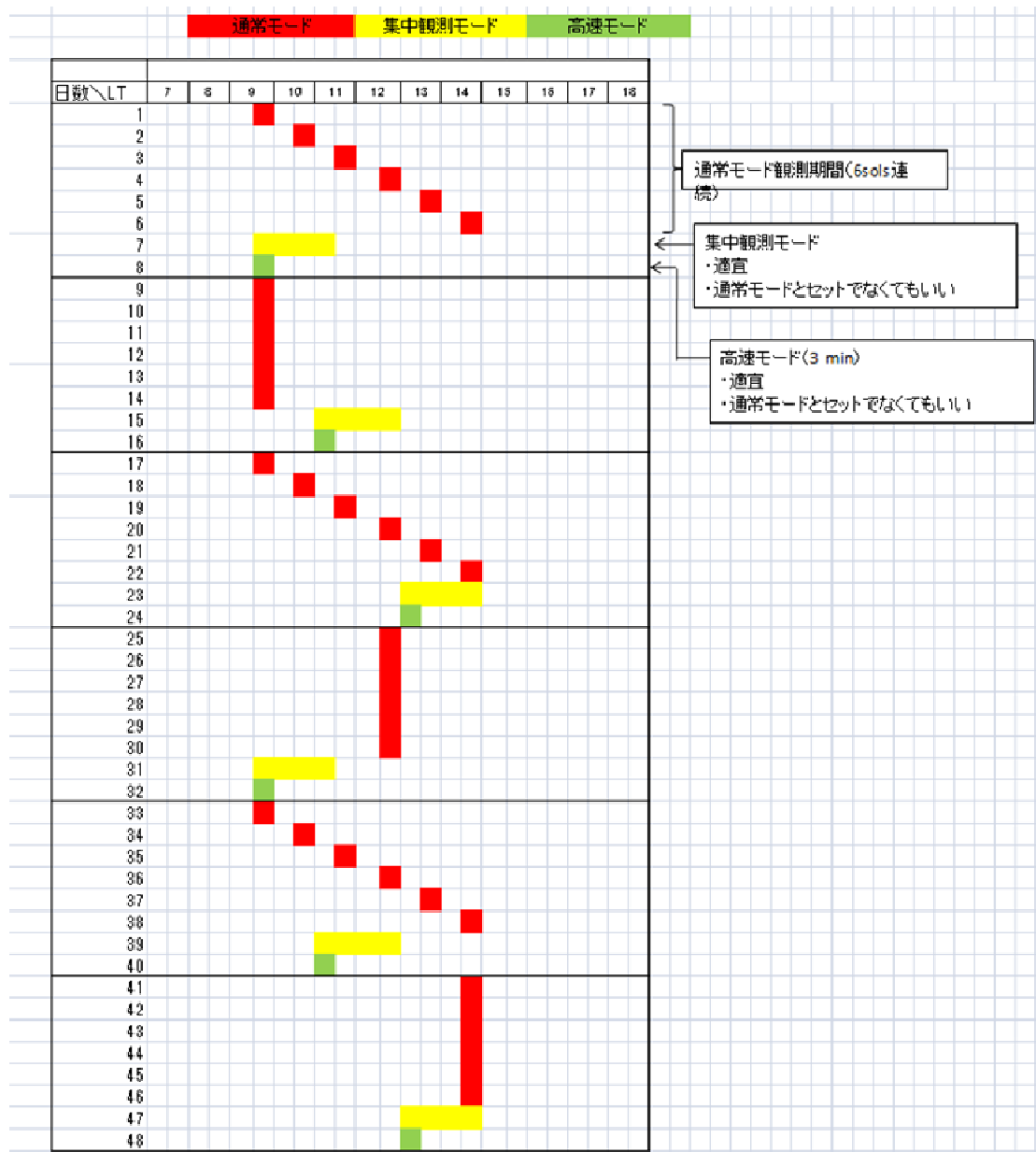


図 2.5-2. ダストデビルの観測シーケンスの 1 例。あくまでイメージ。

3. 記憶容量、転送量、CPU 性能について

2.5.5-2.の観測シーケンスに対応する記憶容量、転送量、CPU 性能を以下のとおり要求する。

(ア) 記憶容量(TBD)

まず、ダストデビル検出手続きを行うには、異なる時刻に撮影された 2 画像を必要とする。垂直方向視野、水平方向視野ともに 1024ピクセルとした場合、 $1024 \times 1024 [\text{pix}] \times 12 [\text{bits}] \times 2 \text{ 画像} = 3.1 \text{ MB}$ の空き領域がある。ただし、ダストデビルが見つからな

ければこの領域は上書きされる。加えて、次の(イ)に示されている転送されるデータを記憶する領域も必要となる。

(イ) 転送量(TBD)

膨大な画像をすべて転送することは不可能であろうから、異なる時刻に撮影された2画像の差分(機上処理)からダストデビルを検出し、ダストデビルの周囲のみ転送対象とすることで、転送データ量を削減する。ダストデビルの位置決めに必要な周囲の画像は、ローバーが異動しない限り1枚でよい。表2に各観測モードで生成される転送すべきデータ量が示されている。1 seasonでは、 $144 \times 6 + 24 + 96 + 0.09 \times 50 = 990$ KB/50solsのデータが生成され、位置決め用画像が変化する長距離移動した場合には、新たに35KB/imageを必要とする。表2の数値はすべて1/10に画像圧縮できることを仮定している。

表 2. 日ごと、週ごと、季節ごとのデータ転送量 (B=Bytes)

	通常モード (4-1.)	高速モード (4-1.)	集中観測モード (4-1.)	ランドマーク画像 (4-2.)	位置決め用画像 (4-3)
/sol	24 KB	24 KB	96 KB	90B(~10x10pix)	35 KB/image
/week	144 KB			630 B	
/season(50sols)	864 KB	24 KB*	96 KB*	4.5 KB	

* 適宜。1 季節に1 回以上。

**1/10 に圧縮できることを仮定

(ウ) CPU 性能(TBD)

撮影された 1024×1024 [pixels]の2画像を用いて、 1024×340 [pixels]の領域を切り出し、それらの差分を計算し、そこからダストデビルを切り出すことを2s 以内に行えること(高速モード)が必要である。記憶容量、down link rate に余裕がある場合は、この限りではない。down link rate が小さい場合には、多くを機上で処理する必要があるため、CPU 性能への要求は高くなる。

2.5.6. 実現に向けて

1. ヘリテージ

① 金星探査機「あかつき」用の画像処理

(ア) 特徴検出、PIV

(イ) 画像圧縮

2. 新規開発

① ナビゲーションプロセスへの挟み込み

- ② ダストデビル検出、必要な部分の画像の切り出しアルゴリズム
→ 模擬データ or 地上観測データ or MER データによる試行

2.5.7. 装置開発およびサイエンス推進体制(2.2.6 の体制表を参照)

2.6. MELOS1 バス機器を用いたサイエンス提案(オプション選定中)

ここには、追加ハードウェアを必要とせず、標準のバス機器による簡単な実験あるいは取得データのみで意義あるサイエンスを達成できるという提案を列挙する（「ナビゲーションカメラによるダストデビル観測」には視野要求や観測モード要求などがあるため、別項にて取り扱った）。

2.6.1. EDL 時の加速度測定

【概要】 EDL 時に加速度の計測をおこない、そこから大気の鉛直構造を決定する。

【意義】 大気を持つ天体に突入するプローブや着陸機がおこなう定番の観測である。時空間的に変動する大気において観測は十分ということは常になく、機会があるごとに観測する意義が常にある。

大気に突入した着陸機は、その速度と抵抗係数と大気密度に応じた抵抗を受ける。そのため加速度を計測することで突入経路に沿った大気密度を知ることができる。静力学平衡を仮定して大気密度を鉛直方向に積分すれば圧力の鉛直構造が得られ、密度と圧力を状態方程式に代入することで温度の鉛直構造が得られる。

【リソース要求】 基本的でない。EDL 時には工学の観点から加速度の計測がおこなわれるはずで、工学の目的で取得されるデータがあれば必要十分である。

2.6.2. 砂山実験

【概要】 生命探査の試料採取に使うロボットアームとスコープで周辺にある砂を集めて砂山をつくる。ナビカメラを使って砂山を撮像して安息角を測る。また、いくらか時間が経過した後に再び砂山の撮像をおこない、砂山の形状の時間変化を見る。

【意義】 火星表面に存在する物質の性質、特に砂やダストの形状やサイズ、そしてそれらに働いている力については、あまり明らかとなっていない。そのため、砂やダストが巻き上がる条件には不確定があり、火星表面での物質の移動や掻き混ぜが生じる機構やその時間スケールについてはほとんどわかっていない。

人工的に砂山を作ることで、まず火星地表に存在する砂の安息角を測定する。安息角から砂の形状や砂同士の間に働く力の大きさなどに関する制約が与えられる。また、砂山の形状の時間変化を見ることで、表層の物質が動かされる条件について調べる。気象パッケージによって測られる量、特に風速との関係を見ることで、移動や掻き混ぜが生じるのはどのような条件の時で、その移動や掻き混ぜのどの程度のものであるのかについて調べる。

このようなことを調べることで、火星地表で地形が形成されたり消失したりするのにかかる時間スケールや、火星表層で物質が掻き混ざる深さやそれにかかる時間スケールについて推定することができるようになるものと期待される。

【リソース要求】 余裕があるときに砂山を作り、ナビカメラで撮像をおこなう。また時間をあけて何度か砂山を撮像する。強い風が吹く前後に撮像して砂山の形状の変化を調べることができるという。砂山を撮像した数枚の画像をダウンリンクする。

2.6.3. 太陽電池パネルを用いた日射量観測

【概要】 ローバの太陽電池パネルの発電量を、火星表面が受け取る日射量として測定する。

【意義】 気象を支配するエネルギー源である、太陽光の入射量を知ることはすべての始まりである。ほとんど雲のない火星では、日射量の変化は主に太陽の高度によるものとして見積もることも可能であるが、直接観測することはもちろん重要である。と同時に、日射量の変化は上空のダスト量の変化と見なすことも出来るので、最も簡便なダスト量観測でもある。また、放射温度計の観測の開始および終了トリガーとして利用することも可能で、火星表面の熱慣性測定の精度向上にもつながると期待される。

【観測方法】 太陽光パネルの発電量モニタを 10 秒ごとサンプリングして保存する。

【リソース要求】 データ量 (12bit ?) 8kB /day

ただし、ダウンリンクとしては通常時は 10 分ごとぐらい (要検討) 0.1kByte/day

ダウンリンクは放射温度計の観測時だけでいいので 100B/1 回

2.6.4. 装置開発およびサイエンス推進体制 (2.2.6 の体制表を参照)

2.7. MELOS1 用ガス検出器提案(オプション選定中)

火星用ガス検出器の概要

本測定機器は大気中のメタン及び水蒸気を観測することを目的とする。火星上のメタン発生地域は MELOS1 の主目的である生命探査の重要なターゲットであり、本装置はそのターゲットへのナビゲーションの役割を担うことができる。そのために 3.3 μm 帯レーザと多重反射ガスセルを用い、メタン検出感度～数 ppb レベルを実現する。水蒸気検出は、環境モニター(気象)とのシナジー、また地表付近の「水の湧出」の可能性を示唆されている現象の解明を行う。

メタン観測の意義

火星の酸化的表層環境ではメタンは安定的に存在できないにも関わらず、火星大気中でメタンが観測されたこと(Formisano et al., 2004; Krasnopolsky et al., 2004; Geminal et al., 2011; Mumma et al., 2009; Fonti and Marzo, 2010)は驚くべき結果として注目を集めたが、実は、その観測の真偽は現段階では明らかではない。これまでの観測に対する批判として、探査機観測のスペクトル解像度の低さや、地上観測で起こりうる地球大気の干渉などが問題とされている(Zahnle et al., 2011)。そのため、火星上でメタンを検出できただけで十分に意義があるといえる。

もし火星にメタンが存在するならば、その起源は地下での非生物の地質作用、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。地球大気に含まれるメタンの大部分が生物起源であるため、火星のメタンが地球同様、生命活動に由来する可能性は十分にあると考えられている(例えば Atreya et al., 2007)。例えばメタン生成菌(代謝反応として一酸化炭素と水、または二酸化炭素と水素からメタンを生成する菌。この代謝に関わるガスは全て火星に存在する)のような現生生物がメタンを生成しているかもしれないし、過去の生命が生成したメタンが地下に保存され(例えばメタンクラスレートとして)最近噴出したのかもしれない。また、過去の生命遺骸がケロジェンとして蓄えられ、何がしかの加熱プロセス(火成活動など)で分解されメタンを放出する可能性もありえる。いずれにせよ、メタンの観測はその観測単体で火星生命の存在を支持しうる、火星生命を探索する上で重要なマイルストーンと考えることができる。

一方で、非生物のプロセスでメタンが生成される場合もある。非生物プロセスで最も有力と考えられているのが、液体の水が関わる岩石・鉱物の化学過程である(Oze and Sharma, 2005 など)。火星生命の存在と比較するとインパクトに欠けると思われるかもしれない。しかしながら、既に熱的活動を停止してしまったかのように見える現在の火星において、明確な地質活動、しかも液体の水の存在にも繋がる証拠が発見できれば惑星科学上非常に重要であるといえる。

メタンのサイエンス的意義は、その起源だけではない。還元型物質であるメタンが存在することは、化学合成生物が酸化還元反応により自由エネルギーを獲得できる場が存在することを意味する。実際に地球上ではメタンを酸化鉄(酸化鉄は火星上に豊富に存在)で酸化して生育できるメタン酸化菌が見つかっており(Beal et al., 2009)、火星でも類似の菌が生育できる可能性がある。

そのため、火星上のメタン発生地域はMELOS1の主目的である生命探査の重要なターゲットであり、ガス検出器はそのターゲットへのナビゲーションの役割を担うことができると考えている。

水蒸気観測の意義

水蒸気量は気象データとして重要である。火星大気中の水蒸気量は緯度や季節により大きく変動することが知られているが、この変動の主な原因の一つとして、地表の氷(極冠、地下氷、霜など)・吸着水と大気の間で起こる水の出入りが挙げられる。そのため、火星の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、特に地表-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。MELOS1 ローバー搭載の気象パッケージにより測定される気象データ(温度・圧力・風速・ダスト量)と合わせることで、火星上の1点ではあるが火星気象の定点直接観測を実現し、火星気象モデルを構築する際のアンカーとして資することが期待できる。

一方、ガス検出器による水蒸気観測は、液体の水が関わりとされる物理プロセスの検証に繋がる可能性がある。例えば、Mars Reconnaissance Orbiter 搭載の高解像度カメラにより発見された Recurring Slope Lineae (RSL) は、斜面に現れる暗色の線状地形であり、暖かい季節に出現し寒い季節に消失する性質から液体の水が流れた証拠だと解釈されている (McEwen et al., 2011)。しかしながら、根拠はカメラ画像のみであり、あくまで仮説の域を出ない。本当に RSL が液体の水を起源とするならば、その出現時にはその周辺で水蒸気が卓越して発生する可能性があり、量次第でガス検出器で観測できるかもしれない。RSL 形成時に期待される水蒸気量については現在検討中である。

類似の他ミッションとの比較

本検出器と同原理のガス検出器が Curiosity に搭載されている。ところが、今のところ Curiosity はメタンを検出できていない。メタンが観測された地域から離れた地点に Curiosity が着陸したことが原因であるかもしれない。それに対して、MELOS1 はメタンが観測された地域を着陸地点として選ぶことができるため、メタンの検出には有利である。

メタン及び水の計測に必要な要件

火星大気中のメタンは複数報告されているが、いずれの観測においても少なくとも 10ppb のメタンが観測されている (Formisano et al., 2004; Krasnopolsky et al., 2004; Geminal et al., 2011; Mumma et al., 2009; Fonti and Marzo, 2010)。従って、計測装置に必要な感度として数 ppb を測定できれば十分である。水については、Mars Express の観測により、火星大気中の水蒸気量が季節や緯度に依存して 10 ~ 800ppm のレンジで変動することが報告されているため (Sindoni et al., 2011)、計測装置に必要な最低感度は約 10ppm で、800ppm 程度までの測定レンジを持つことが必要である。計測は濃度の日変化測定、毎日の定時測定を行う。また、できるだけ消費電力を最小限に止めることが重要になる。

計測装置概要

上述の要件を満たすため、光源を $3.3\ \mu\text{m}$ 帯の DFB レーザーとし、波長変調吸収分光法と小型多重反射セルを組み合わせた装置を考案している。装置の概要図を図 1 に示す。装置は光源、計測セル、信号検出器からなるセンサ部と、レーザーを制御するドライバー、信号検波用のロックインアンプからなるエレキ部で構成される。センサ部のサイズは幅 $300\ \text{mm}$ ×直径 $40\ \text{mm}$ 、重さは $2.5\ \text{kg}$ 以内である。エレキ部のサイズは幅 $220\ \text{mm}$ ×奥行 $160\ \text{mm}$ ×高さ $140\ \text{mm}$ 、重さは $1.5\ \text{kg}$ である(このサイズは地上モデルのサイズである。今後さらなる小型軽量化を目指す)。消費電力は全ての装置を稼働して、Curiosity 搭載 TLS と同程度(約 24W)で運転ができると考えられる。

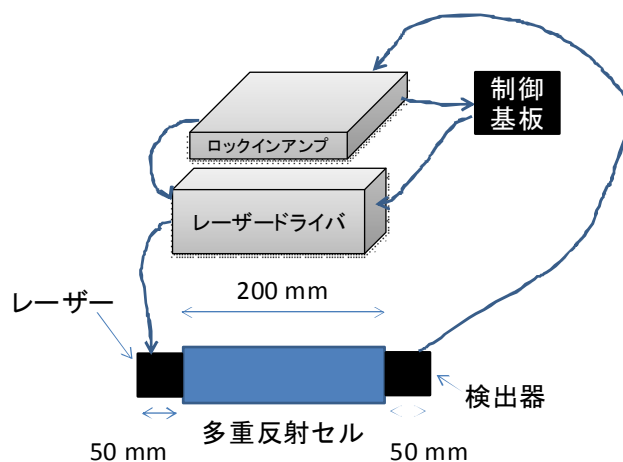


図 2.7-1 メタン、水計測装置概要図

➤ $3.3\ \mu\text{m}$ 帯の DFB レーザーの仕様

発振波数: $3066\ \text{cm}^{-1} \sim 3067.5\ \text{cm}^{-1}$

出力: 数 mW

➤ セル概要

トロイダルミラーを用いた多重反射セル、有効光路長 10m 以上、ミラー間距離 $10\ \text{cm}$

$1.6\ \mu\text{m}$ 帯の DFB レーザーを用いて地球大気の水について、図 2 に示す装置を用いて、計測した実績(図 3)がある。これまでの実績を踏まえると、 $3.3\ \mu\text{m}$ 帯の DFB レーザーを用いた場合、火星大気中のおよその感度見積もりとダイナミックレンジは以下のとおりである。

CH_4 感度: $10\ \text{ppb}$ 程度, ダイナミックレンジ: 1 ケタ

H_2O 感度: 数 ppm 程度 ダイナミックレンジ: 2 ケタ

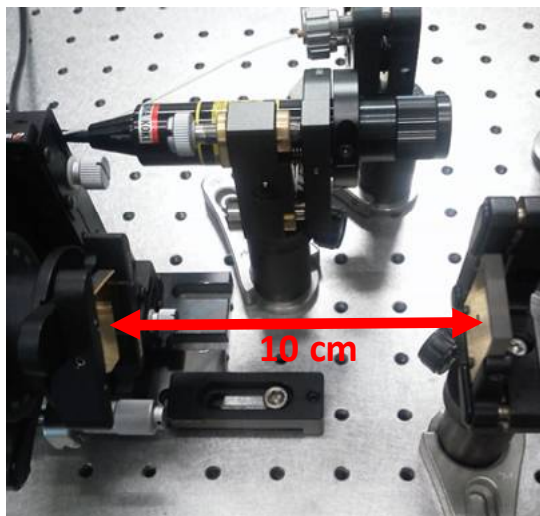


図 2.7-2 小型多重反射セルを構成するトロイダルミラー

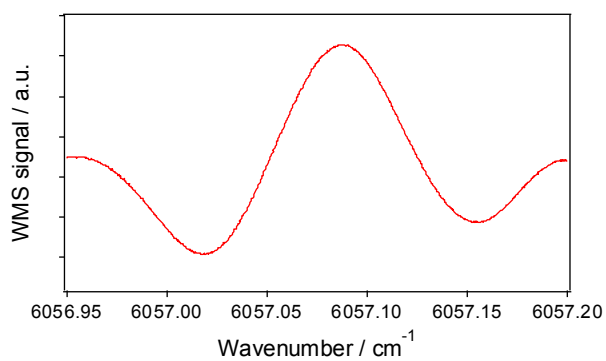


図 2.7-3 1.6 μm 帯において図 2 の小型多重反射セルを用いて計測した地球大気中メタンの波長変調吸収スペクトル

➤ 耐環境性能

保存温度 計測部 $-20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$

エレキ TBD

動作温度 計測部 $-10^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$

エレキ TBD

耐放射線 TBD

・センサ部はローバー内 or ローバー外, エレキ部はローバー内に配置予定

➤ データ量 3.6 kB/day 程度

ヘリテージとクリティカル要素

- ・提案 G で環境中ガス測定の実績有り(ガスセルの設計や装置全体の感度評価等が可能)
- ・計測部の各構成要素(レーザー, 検出器, ガスセル)は地上品あり.
- ・レーザーの環境耐性が不明: 波長 $3.3\ \mu\text{m}$ で発信波長域が狭く小型のものは限られる
上記の保存・動作温度はメーカー公称値で, 試験機購入と耐低温試験が今後必要.
耐放射線は波長違いの姉妹機での検証例有り(問題なし)(Esquivias et al., 2011).
- ・メタン計測の可否が, 着陸地点に非常に強く依存
濃度の低い着陸地点での観測は困難である.
例えばメタン濃度が低い地点に着陸した Curiosity では, 搭載されている TLS は高感度であるがメタンの検出は報告されていない(Mahaffy et al., 2013, Webster et al., 2013).

開発体制

メンバー: 戸野倉(東大), 田中(茨城大), 石丸, 大野, 小松(千葉工大)

【参考文献】

- Atreya, S. K., Mahaffy, P. R., and Wong, A-S., 2007, *Planetary and Space Science*, **55**, 358-369.
- Beal, E. J. et al., 2009, *Science***325**, 184.
- Esquivias, I. et al., 2011, *RADECS proceedings 2011*, 1.
- Fonti, S., and Marzo, G. A., 2010, *Astronomy & Astrophysics*, **512**, A51.
- Formisano, V., Atreya, S., Encrenaz, T., Ignatiev, N., and Giuranna, M., 2004, *Science*, **306**, 1758-1761.
- Geminale, A., Formisano, V., and Sindoni, G., 2011, *Planetary Space Science.*, **59**, 137-158.
- Krasnopolsky, V. A., 1993, *Icarus*, **101**, 313-332.
- Mahaffy, P. R. et al., 2013, *Science*, **341**, 263-266.
- McEwen, A. S. et al., 2011, *Science*, **333**, 740-743.
- Mumma, M. J., Villanueva, G. L., Novak, R. E., Hewagama, T., Bonev, B. P., DiSanti, M. A., Mandell, A. M., and Smith, M. D., 2009, *Science*, **323**, 1041-1045.
- Oze, C., and Sharma, M., 2005, *Geophysical Research Letters*, **32**, L10203.
- Sindoni, G. et al., 2011, *Planet. Space. Sci.*, **59**, 149-152.
- Webster, C. R. et al., 2013, *Science*, **341**, 260-263.
- Zahnle, K., Freedman, R. S., and Catling, D. C., 2011, *Icarus*, **212**, 493-503.

2.8. MELOS1 GPR 地中構造探査提案(オプション選定中)

2.8.1. 地中レーダーGPR の概要

地中レーダー（Ground Penetrating Radar, GPR と略）は、電磁波により地層や埋蔵物などの地下三次元構造を破壊や掘削を行わず可視化する技術である。MELOS1 GPR は着陸地点の周辺で地下構造を探り、生命の有無やその他の観測結果と合わせ、着陸地点の物理化学状態や形成史に関する知見を獲得する。

2.8.2. 地中レーダーGPR の科学的意義

1. 科学の大きな枠の中での意義

これまでの全ての着陸地点で見られたように、火星の地表面は砂に覆われている。このため地質観察に適した露頭がなかなか見つからず、地質調査・地質構造の理解が難しくなっている。これに対し地中レーダーは、電磁波（数十 MHz～数百 MHz）により地層や埋蔵物などの地下構造を破壊や掘削を行わず可視化することを可能にする技術で、地上から地下媒質までの往復時間（深度）に対する反射強度を映像化することで、地下構造の 3 次元情報を容易に得ることができる特徴を持つ。そのため砂層の厚さはどれほどであるのか、その下にどのような地質構造が広がっているのかといった、地下の特徴を明らかにするという目的に都合が良い。そもそも地質調査とは、地下構造を明らかにすることであり、その意味ではこの目的に直接的な機器ということができる。

2. MELOS1 で実施する意義

MELOS1 の目的は生命探査であり、その着陸地点は地質学的ないわば特異点となる。その意味では水が関与していそうな新しそうな地形に向かうこととなると考えられるので、この地形の形成史を同時に理解しておく必要がある。水は岩石と比べると誘電率のコントラストが極めて大きいため、地下の水の状態を知る上では電磁波を利用することは極めて直接的である。

MELOS1 のモデルケースとしてニュートン・クレーター内部の小クレーターに着陸することを検討しているが、この場にみられる **Recurring Slope Lineae (RSL)** と呼ばれる水が関与したと言われている地形の検討には直接的に有用である。ここで生命が見つかったとしても見つからなくても、そもそも RSL を形成した媒体が本当に水なのかどうなのか、水だとして、どこから来ているのか、汚れた水だとしたら、その堆積物はどれほどあるのか、といった疑問に答える上で地下浅部の構造探査を高解像で理解できる点に、地中レーダーの最大のメリットがある。

3. 類似の他ミッションと比した存在感

ローバーや着陸機に搭載した探査例はこれまで存在しない。そのため生命探査に必要な地

表付近の高解像度での探査例は無いといえる。一方で周回機からの計測例は月・火星双方で行われていて、とくに火星に対しては基本的には乾燥・凍結している火星土壌での電磁波探査の有用性は確認済みといえる。

火星で行われた周回探査は、周波数帯は異なるが、Mars Express 搭載の MARSIS と MRO の SHARAD が挙げられる。

火星表面での電磁波探査の提案としては、かつて MSL 用として NASA/JPL による Mars Ground Penetrating High Resolution Radar (GOPHER)があった。これは MSL に向けての試作研究があった（モノパルスレーダ，800MHz，1W，探査深度：5m，分解能：15cm）が、MSL 搭載機器としては不採択となった。

ExoMars 用の WISDOM は類似した方向性の機器で、最大探査深度 3m で分解能数 cm を目指している（送信周波数が高く 500MHz～3GHz）。これは地下掘削前の地下情報を与えることを目的としたもので、現在プロトタイプ（EM 相当）が完成し、PDR に向けたフィールド試験まで完了している。

2.8.3. 測定するデータの必要性(精度・分解能など)

表層の構造を探査対象とし、アンテナ小型化の理由から、比較的浅い探査深度（100m 程度以下）を狙う。レゴリス層や液体層の深さが判別可能なレンジ分解能（～30cm）を目標とする。

2.8.4. そのための測器定義(リソース要求)

大きさ：200mm×150mm×30mm 以下（フライト品の目標）

質量：900g 以下（フライト品の目標） → MMIC 化、専用基板化

本体の機能：レーダ変調波の発生、反射波のパルス圧縮、スタッキング、HK データ、コマンド受付

2.8.5. 搭載に向けての開発ストラテジ(ヘリテージとクリティカル要素)

【ヘリテージ】

2002 年ごろから、ISAS の W/G 活動の下で、惑星探査機（着陸機や探査車を含む）に搭載可能な小型軽量かつ高性能な GPR の開発を目指して検討を開始している。2010 年に GPR のブレッドボードモデルを開発し、等価時間サンプリングを用いた広帯域ダイレクトコンバージョン受信機と直接 RF 変調波を生成する送信機（RF 部以外は全てデジタル）の GPR 機能と性能を確認済みである。現在、観測性能の確認を継続している。

専用アンテナとしてヴィバルディタイプを考案し、アンテナの設計及び試作を行った。FDTD を用いたアンテナ設計解析方法を確立済みである。

「はやぶさ 2」用としてアンテナ搭載性の検討例もある（展開方法を含む）。

【クリティカル要素】

特に無し（搭載化に向けた小型軽量化のみ）

【開発ストラテジ】

宇宙用 EEE 部品による回路の見直し、RF 部の MMIC 化、専用基板による GPR の小型軽量化が必要であるので、これは開発候補メーカーと連携した作業が必要と考えている。

アンテナのさらなる小型軽量化およびアンテナの搭載インタフェースの検討が必要であるが、必要によってアンテナの種類などを見直すこともありうる。

FDTD 法 (Finite-difference time-domain method)による地形データと連携した観測シミュレーションとデータ解析も同時に行う。

2.8.6. 開発体制

「はやぶさ」、「かぐや」、JEM/SMILES の開発経験とヘリテージを活かした体制で開発を行う。また「はやぶさ 2」搭載に向けた検討をベースにして MELOS 搭載品を開発することができると考えている。

GPR 地中構造探査チームコアメンバは以下の通り：

PI ：宮本英昭（東京大学）

Co-I ：西堀俊幸（ISAS/JAXA）

真鍋武嗣（大阪府立大学）

春山純一（ISAS/JAXA）

岡田達明（ISAS/JAXA）

2.9. MELOS1 LIBS 提案(オプション選定中)

LIBS の概要

LIBS は、これまで惑星探査に用いられてきた元素分析装置にはない数々の長所を持つ。具体的には、(1) 遠隔分析可能 (本提案では 1.5m)、(2) 短時間でのデータ取得 (最短で数秒)、(3) 試料の前処理が不要、(4) 軽元素を含むほぼすべての元素を測定可能、(5) 高空間分解能 (元素分析領域~ ϕ 300 μ m、周辺撮像時分解能 30 μ m/pix)といったことが挙げられる。特に、(1) から (3) により他の元素分析器に比べてリソースを抑えつつ、広範囲に渡る多数の試料の迅速な分析が可能である。

LIBS によるサイエンスの意義

科学の大きな枠の中での意義

月・惑星の固体系探査は、段階的にサンプルリターンの時代へと移行してゆくと考えられる。しかしこれまでの探査から、太陽系の各天体が複雑多様な表層組成を示しており、「どこからでも良いからサンプルを持ち帰ればその天体の起源や進化がわかる」式の単純なサンプルリターンはあり得ないことが分かってきた。複数点への着陸によるその場観測の必要性和、着陸地点の地質を理解することの重要性が強く指摘されている。

従って、サンプルリターンの前段階としての着陸地質探査は必須であり、その場合ローバを使った広範囲の移動能力が不可欠である。その際に、個々の試料分析に時間を要してしまってはローバの移動能力を活かせない。ローバの進むべき興味深い地点の選定を迅速に行うために、遠隔分析が可能で効率的な元素分析機器の搭載が望まれる。また、サンプルリターンを行う際にも、採集する適切な試料を短時間で探索する必要があり、やはり効率的な元素分析装置が必須である。レーザ誘起絶縁破壊分光装置 (Laser-Induced Breakdown Spectrometer; LIBS) は、上記のような着陸月・惑星探査に適した元素分析装置である。

火星探査においてLIBSに期待される主な成果は気候進化に関する新たな知見の獲得であり、MELOS1では(生命探査のために)堆積岩地域へ着陸すると思われるので、その場合の意義について以下に述べる。

(1) 火星の気候進化の解明 (堆積岩地域への着陸)

火星の気候進化過程を解明するためには、二酸化炭素や水の行方、および表層の酸化還元状態や酸性度といった表層環境の変遷を明らかにする必要がある。これまでに行われた軌道からのリモートセンシング探査結果によれば、含水鉱物や赤鉄鉱・硫酸塩岩・炭酸塩岩が火星表面に存在することが明らかになっている[Bell, 2008]。そのため、過去には火星表面に大量の水が存在していたはずであり、現在でも地下水(氷)の存在が示唆されている。また、そのような堆積岩の存在から、表層の酸性度や酸化還元状態の変遷についても知見が得られている。硫酸塩岩や炭酸塩岩などの形成地域および形成順序を知ることは、表層環境の酸化還元状態や酸性度の変遷、表層水の行方および大気中の二酸化炭素の行方を知

るうえで欠かせない [Dromart et al., 2007]. LIBS を用いて堆積岩の組成、および分布 (層序) を測定することにより、大気組成進化および水・二酸化炭素の行方への制約を得ることができる。

また、火星大気の D/H 分布の空間非一様分布、時間変動を大気循環モデルで説明する試みが続けられている。MSL ではこのモデルの検証を目的として地表で採取した試料の D/H が測定されている。Webster et al. (2013) によれば、大気 D/H と採取試料中の D/H には有意な差があることが分かっており、緯度経度の異なる地点における D/H の測定を行う事ができれば、水の循環モデルに新たな制約が加わり、空間分布、時間変動の要因に関する新たな情報が得られる。MSL での計測結果や大気 D/H 分布との比較により以下に示す様な成果が期待できる。

1. MELOS-LIBS と MSL-SAM で測定された D/H の比較。表面、表層下に残る氷の年代、あるいは岩石の水質変成の履歴の差 (の有無) を議論することができる。
2. MELOS-LIBS で測定された D/H と大気 D/H の比較。MSL の結果を受けて表層から大気への水の供給や大気の水循環に関するモデルが更新されと考えられ、その新しいモデルを検証することができる。特に、大気 D/H が MSL と異なる地域に着陸した場合には、新たな情報が得られる可能性はより高くなる。
3. 地表付近で移動し、例えば過去に水流があったところ、無さそうなところの D/H の比較。1 と同じ様に年代が議論できる。また、大気 D/H の空間分布や時間変動を説明できるかもしれない。(おそらくはこれから MSL でも試みられると考えられるため、その成果を確認する。) また、将来計画「その場年代測定による月惑星年代学探査」において、LIBS を中心とした測定器が検討されている。この計画を進めるにあたり、その実現より前に進められる着陸探査計画において LIBS の開発を進めることで、将来計画に必要とされる技術の獲得も期待できる。

(2) 火星の気候進化の解明(火山岩地域への着陸)

火星の気候進化過程を理解するためには、表層環境の変遷を明らかにするだけでは不十分である。火星大気は火星内部からの脱ガスによって形成されるであろうし、表層の酸化還元状態と火星内部の酸化還元状態は強く結び付いているはずである。この点に関して、近年、後期ノアキス紀から前期ヘスペリア紀にかけての大規模な火成活動、特に二酸化炭素や二酸化硫黄の脱ガスが火星表層の酸化還元状態を急変させ、気候進化に支配的影響を与えたという仮説が提唱されている [Bibring et al., 2005]. 火星気候進化を解明するためには気候システムそのものの理解に加えて、システムへの流入・流出をコントロールする火成活動と散逸メカニズムの究明も重要である。したがって、火星内部の活動状態とその変遷を理

解することが重要となる。LIBSにより火成岩の元素組成を測定することで、上記のような火星の気候進化上の謎解明への手がかりを得ることができる。まず、火成岩の組成（安山岩か玄武岩か）の測定結果から、地殻あるいはマントルの組成およびその進化・熱史・火山活動史への制約を得ることができる。また、火成岩の組成（揮発性元素の量）の測定結果から、地殻あるいはマントルからの脱ガス過程および大気散逸過程への制約を得ることができる。さらには、火成岩の組成（酸化的か還元的か）の測定結果から、火星内部の酸化還元状態およびその時代変遷・酸化的なのは表面だけなのか、表面は最初から酸化的だったのかといった疑問の解明の手掛かりを得ることができる。

また、将来計画「その場年代測定による月惑星年代学探査」において、LIBSを中心とした測定器が検討されている。この計画を進めるにあたり、その実現より前に進められる着陸探査計画においてLIBSの開発を進めることで、将来計画に必要とされる技術の獲得も期待できる。

MELOS1で実施する意義

生命探査を実施するにあたり、測定回数が限られているため調査地点の選別が必要となる。LIBSでは、ロボットアームによる試料採取なしに、遠方（～1-1.5m）から短時間（～1分）で対象の元素組成を得る事ができる。また、遠方から高い空間分解能（対象表面上で～30um/pix）で撮像することが可能である。これらの特徴を生かし、生命探査装置による測定に向けた事前調査を行い探査計画の効率化を計る。例えば、MSL-ChemCamでは装置の一部である Remote Micro Imager（～50um/pix）を用いて pebble の丸みから水が流れていた時代の流速が推定されており、LIBSによるアルカリ元素の測定から水質変成に関する議論が進められている [Williams et al., 2013]。

類似の他ミッションと比した「存在感」

ChemCam との比較

ChemCam とは、LANL（アメリカ）と CERN（フランス）が共同開発した、火星探査用 LIBS であり火星探査ローバ Mars Science Laboratory (Curiosity) に搭載されている。焦点位置可変の遠隔 LIBS（1.5 から 7 m の遠隔測定が可能）であり、レーザと光学系と望遠顕微カメラをマストユニットに搭載し、分光計と DPU と電源をローバ本体に搭載している。重量は 9.3 kg。遠隔顕微カメラを備え、測定点の観察が可能である。高性能だが重量も大きく、巨大ローバである MSL 以外への搭載は難しい。

MELOS/LIBS では、ChemCam と同型のレーザを使用するが、他の部分を軽量化することで 2.6-3.5kg と大幅な軽量化を達成する。ChemCam に比べて運用には制約が生まれ、測定可能範囲が劣るものの、ChemCam では実施できない観測を行う事ができる。

ChemCam ではマスト上のジンバルを駆動する事によって、空間方向にスキャンをすることができるが、測定箇所が大きさが $\phi 0.3\text{mm}$ 程度であるのに対し、測定箇所には 3-5mm 程度

の間隔ができてしまう。MELOS/LIBSでは光学設計を大きく変更する事により0.3mm間隔で測定を行うことが可能であり、観測視野に対して抜けの無い元素組成分布を得る事が可能となる。

また、ChemCamでは波長分解能が低くD/Hを求めることができない。MELOS/LIBSではファブリペロー干渉計を用いてD/Hを測定することを検討している。地上実験の結果、波長分解自体は可能であることが分かっており、今後含水鉱物などの試料を用いてS/Nを見積もる予定である。MSLには他に質量分析器が搭載されており採取した微粒子のD/Hが求められているが、このような測定を行うためには多くのリソースが必要である。MELOS/LIBSではリソースを抑えて十分な精度で測定を行う様に装置を設計する。

測定するデータの必要性(精度, 分解能など)

単一の鉱物の組成測定を行うため、位置分解能~0.3mmで空間的に連続的に測定を実施する。また、測定箇所周辺を~30um/pixで撮像する。必要となる定量精度は主要元素で1-5wt%程度である。

火星大気のD/Hは~ 10^{-3} 程度であり、地域によって50%の変動があるため、必要な定量精度は~ 10^{-4} である。必要となる波長分解能はH α 線(656nm)で0.04nmとなる。

そのための測器定義(リソース要求)

外寸・質量 (最小構成時)

幅 [13]cm x 奥行 [23]cm x 高さ [7]cm

質量 [2.6]kg エレキ込み

電力

測定時3.5W スタンバイ 1.5W

熱環境

保存温度 -55℃~60℃

動作温度 -30℃~30℃

データ量

16bit x 2000ch * 1000回測定*0.4(圧縮)= 1.6MB

ダウンリンク量に合わせて測定回数, 取得頻度を変更可能。

上記リソースで得られる主要元素の定量精度を表1に示す。

表1 LIBSによる元素組成定量精度

元素	定量精度 (RMSE, wt%)
Al ₂ O ₃	3
CaO	1~1.5
FeO	1.5

K ₂ O	0.35~0.4
MgO	1.5
Na ₂ O	0.5
SiO ₂	4~5

となる。この構成ではローバ胴体に装置を設置し、ローバの下方を測定対象とする。

最小構成では位置分解能0.3mmを達成できるが、空間的に連続した測定を実施するためにはローバ側の移動精度に対する要求が過大となる(精度0.3mm)。この構成を少し変更し、

5 cm x 5 cm x 22.5cm 質量0.9kg(ケーブルなど込み)

の望遠鏡を追加する(図1)事で空間的に連続な測定が可能となり、さらにローバ下方に限らず横方向に存在する対象（露頭など）を測定する事が可能となる(図2)。

また、D/H測定を行うためにはファブリペロー干渉計を追加することになり、300g程度の質量増となる。主要元素測定を行わずD/H測定に特化する場合に必要な総質量は2.6kgから2.3kgまで減少する。

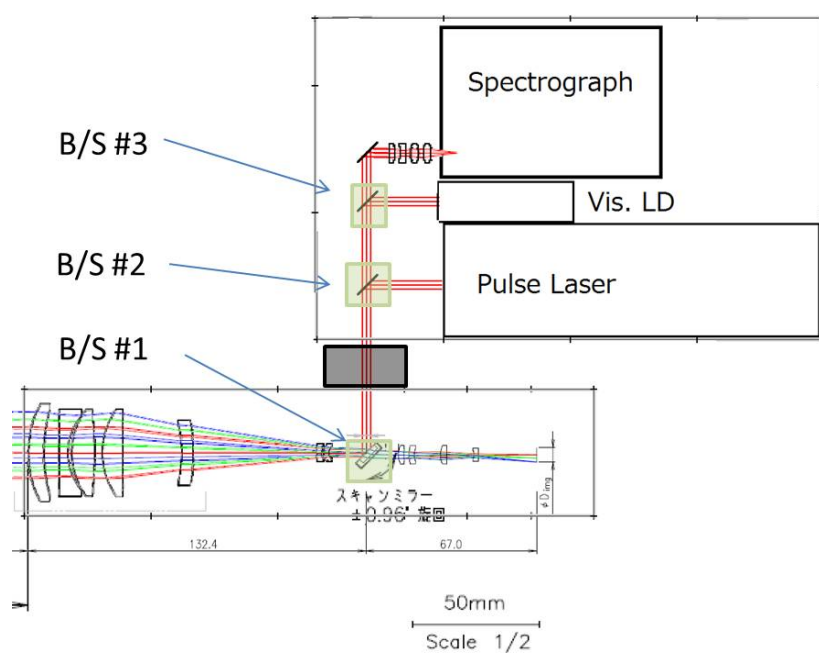


図2.9-1 望遠鏡付きLIBS概念設計

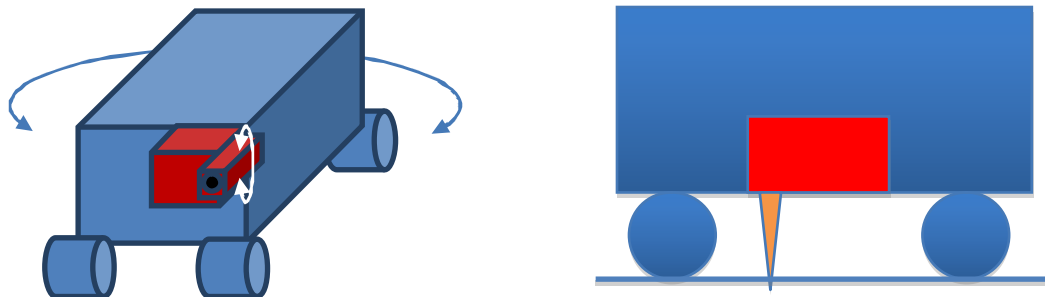


図2.9-2 左 望遠鏡付きLIBSの配置 方位角方向にはローバの動作, 仰角方向はLIBS側で制御する. 右 最小構成LIBSの配置 ローバの胴体に取り付け下方の対象を測定する. 焦点調整機構が不要となる.

搭載に向けての開発ストラテジ

- ヘリテージとクリティカル要素

各要素ごとに記述する.

パルスレーザ

ChemCamに使用したものと同型のものを使用する. 一方で更に開発を加えることはコストの問題から難しく, 温度範囲はこのレーザで決まっている. フランスチームが提供.

分光器

ExoMarsのRaman分光に使われるものを少し設計変更して使う. 光学的な仕様変更であり環境耐性は変化しない. 既にExoMars向けにはFMが製作されている. スペインチームが提供

望遠鏡

焦点調整機構の開発が必要. 既にピエゾステージを用いた軽量の駆動系を試作済みで, これから振動試験の予定. ピエゾステージが使えない場合はステッピングモータ式の直進ステージを使う必要があり, 200g程度の質量増となる. 光学設計は完了しており, レーザアブレーションを起こすのに十分なエネルギー密度が得られることが確認されている.

ファブリペロー干渉計(D/H測定を実施する場合に必要)

BepiColombo/MMOで使われるものと同型のものを使用する. MMOでは波長589nmで0.01nmの波長分解能が達成されており, 656nmで波長分解能0.04nmの方が条件は緩いため,

波長分解能を向上させる技術開発は不要である。一方で, LIBSにおいてファブリペロー干渉計を使った実績がないため, 地上での基礎実験を進める必要がある。

装置開発およびサイエンス推進体制

	統括	組立・性能試験	光学系・FPI	元素組成測定用校正実験	海外とのI/F	パルスレーザー	分光器
亀田真吾（立教大）	○	◎	◎	○	○		
石橋高（千葉工大）		○	○	◎			
小林正規（千葉工大）		○			◎		
並木則行（千葉工大）		○			○		
O. Ganault（IRAP）						◎	
S. Maurice（IRAP）						○	
F. Rull（Centro de Astrobiologia）							◎

上記開発チームは科学成果の検討も行う。

科学成果検討チームには開発チームに加え、臼井寛裕(東工大)、黒田剛史(東北大)が参加

2.10. MELOS1 内部構造探査(回転計測)提案(オプション選定中)

X.2. 回転計測

(1) サイエンスの意義

1-1) 科学の大きな枠の中での意義

一般に固体天体の表層環境の変化や内部構造は、その天体の回転（自転）変動に影響を及ぼし、その変動の振幅や位相は電波航法や VLBI などの宇宙測地学的手法により観測可能である。特に火星は、地球と類似の構成要素を有しながらも、過去から現在に至る進化やダイナミクスの様相は大いに異なっており、その相違を表層環境・内部構造から解き明かすことは比較惑星学的に重要である。火星の回転変動には、主に太陽潮汐等のトルクに起因する歳差・章動と、主に大気・極冠結合系の変動に起因する極運動・自転速度変動（以下 ΔLOD ）がある。本研究では、火星の回転変動の計測から内部構造・表層環境の変化を推定して、過去から現在に至る進化やダイナミクスを解き明して地球と対比させることを目的とする。また、そのために必要な、より高精度な観測手法を確立することにより、深宇宙における惑星測位の新たな手法を獲得する。

1-2) MELOS1 で実施する意義

これまで火星の回転変動は、ランダー（着陸機）の追跡データ（2 ウェイ測距・距離変化率計測：RARR）などを利用して計測されているが、その計測精度は地上の原子時計の精度制約により頭打ちとなっている。

逆 VLBI は、複数の宇宙機からの同期した信号の位相比較を行って、各々の相対位置を測定する新たな手法である（Kawano, et al., J. Geod. Soc. Japan., 45, 181, 1999）。ここで測定精度は周波数の逆数に比例し、地上と対象宇宙機の距離に依存しないことから、特に月より遠い深宇宙での高精度位置決定で威力を発揮する。逆 VLBI が回転計測として最も威力を発揮するのは「オービター + 複数ランダー」の構成が可能となる場合である。これは MELOS2 以降の本格的火星表面探査における実現を目指すこととし、MELOS1 では逆 VLBI 手法の構成要素であるオービター・ランダー間測距の技術実証を行う。将来ミッションにおいて確実に成果が挙げられる計測手法が獲得できるという意義がある。また、InSight とは異なる時期に観測すれば、異なる表層環境にリンクした ΔLOD を観測することになるため、たとえば inter-annual 変動についての理解が深まると期待される。

1-3) 類似の他ミッションと比した「存在感」

これまで火星の回転変動では、Viking 1 および 2 と Mars Pathfinder のデータを用いた解析において、事前の精度解析において検出が予測されていた章動と極運動は検出されず、 ΔLOD の観測精度も予測 7~50mas(ミリ秒角)に対して、実際には 100mas であり劣っていた。

InSight においては、ランダーを従来手法である地球からの 2-way ドップラで長期間追跡することにより、内部構造の解明（流体核のサイズ等）が期待されており、 ΔLOD についても現状の 5 倍程度の精度（ $\sim 20\text{mas}$ ）が見込まれる。MELOS1 で長期間にわたるオービタ・ランダー間測距が実現すれば、さらに数倍の精度向上の可能性がある。大気大循環モデルと比較することにより、 ΔLOD を引き起こす原因（極冠の消長、大気圧変動、zonal な風の応力、グローバルダストストーム）について理解が進むであろう。

（２）測定するデータの必要性（精度、分解能など）

0.1mm/s 精度のオービタ・ランダー間ドップラーを、1 火星年の間、週に数回、それぞれ数時間取得する。オービタの軌道決定のための追跡データも解析に用いる。

（３）そのための測器定義（リソース要求）

機器名相	USO	位相比較器(PHD)	搬送波抽出・同期周波数変換器 (TRP)
搭載箇所	オービタ	オービタ	ランダーまたはローバ
サイズ [cm]	7 x 7 x 5	15 x 15 x 5	TBD x TBD x 5 TBD はバス系受信機サイズ
質量 [kg]	< 0.5	1.0	1.0
最大消費電力 [W]	10.0	3.0	5.0
データ量	HK.ステータス TLM のみ	2.88 MB/week	HK.ステータス TLM のみ

（４）搭載に向けての開発ストラテジ

4-1) ヘリテージとクリティカル要素

- ・ USO は、各観測衛星で実績がある。
- ・ 位相比較器の搬送波位相データサンプリング及び比較は、類似の機能としては宇宙実績があるが、本目的での使用例は無い。BBM 試作試験により検証する。(SELENE-2 での事前実証も試みるが、前提とはしない。)
- ・ 搬送波抽出・同期周波数変換器は、通常の通信系トランスポンダの機能の一部としては実績があるので、バス通信系と統合して共同開発することが望ましい。

4-2) 開発（サイエンス推進）体制

- ・ とりまとめ：岩田（JAXA）
サイエンス：松本（天文台）、佐々木（阪大）、石原（AIST）

機器開発　：菊池、浅利*、鶴田*（天文台）

*は、現在はメンバーでないが、機器開発フェーズで参加が期待できる。

2.11. MELOS1 内部構造探査（地震波計測）提案（オプション選定中）

(1)サイエンスの意義

1-1)科学の大きな枠の中での意義

太陽系天体の歴史（形成過程からその進化、現在の状態）を知ることは太陽系科学の究極の目標の一つであろう。現在の月・惑星のありさまから過去を推測するためには、表面からの観測に加え、内部構造の解明が不可欠である。たとえば、地球を例にとると、地震の観測からおおまかに内部は4層に分かれていることがわかり、現在では稠密な地震観測網により詳細な震源分布や水平内部構造も明らかになっている。これらの知見からマントル対流や外核の運動など内部の活動により、地震・火山の活動、プレート運動、磁場の生成が理解され、また過去にさかのぼって地球の生い立ちを推測することもできる。

地球の内部構造の解明には地震観測が大きな役割を果たしており、それなくしては極めて限定的な情報しか得られなかったであろう。地震観測が行われたもう一つの天体である月についても、地球とは異なる地震の形態や内部構造が明らかになり、地球の構造と関連づけた月の起源についても議論ができるようになってきている。近い将来地震観測できる惑星としては火星以外には考えにくく、もし火星の全球的内部構造が地震観測により明らかにされれば、現在の状態の理解、進化の過程、比較惑星、太陽系起源など地球惑星科学に与える影響は極めて大きい。

1-2)MELOS1 で実施する意義

火星の内部構造を探査するには地震観測をする必要があり、もし深部構造（コア）を含めた探査が実現できれば上述のように第一級の科学的成果となるであろう。このような本格的な深部探査には高感度の広帯域地震計などのリソースを要し、技術的にも一足飛びに実現するのは困難である。MELOS1 では、少ないリソースで実現可能な浅部地震探査に限定し、手法の検証、表面地下構造・環境の実測（生命活動との関連）、火星表面における地震活動の評価を行う。以下に示すように、リソースに応じて3つの探査オプションを設定した。これらいずれのデータや技術も、MELOS1 で探査する火星生命の背景となる環境の理解に有用であり、次期の本格的な地震探査にも不可欠なものである。

1-3)類似の他のミッションと比した存在感

火星の地震探査としては、NASA の InSight ミッション（2016 年打ち上げ）がある。中帯域地震計（0.02Hz〜）を表面に設置し、観測を行う。火星は地震探査がこれまでほとんど実施されていないため、本 MELOS1 の提案（地震探査）は、地震活動の地域差を議論するために有用なデータ、とくに生命にかかわる Wet な地域のデータを提供する。また、これに加えオプション毎では、案 1（定点長期）や案 2（移動探査）はアクティブ探査による浅部地下構造の検出、案 2 は多点のデータや移動観測手法の検証、案 3（ペネトレータ）

は埋設地震計による長期連続データや投下式観測手法の検証が挙げられ、いずれも InSight ミッションではカバーされていない。

(2)測定するデータの必要性（精度、分解能）

短周期の地震波～アクティブ探査波形を検知するため、帯域 0.1Hz～10kHz、精度 24bit が求められる。ただし、アクティブ探査の場合は、10kHz で数秒、連続観測の場合は、10Hz で数時間、など観測対象によって計測周波数と時間が異なる。

(3)測器定義（リソース要求）

各オプションで下記のとおりである。

オプション	案 1（定点長期）	案 2（移動探査）	案 3（ペネトレータ）
目的	アクティブ探査、 長期連続データ、 イベントトリガ	アクティブ探査、 多点探査・手法検証	長期連続データ、 イベントトリガ、 落下式探査手法検証
搭載箇所	センサ：Landing Module 脚（3 本） エレキ：Landing Module 本体	センサ：Rover アーム エレキ：Rover 本体	Landing Module 内よ り放出
センサ構成	ピエゾ加速度計、 ピエゾ actuator	ピエゾ加速度計、 ピエゾ actuator	Moving coil seismometer
サイズ	センサ：φ 100mm x 50mm ×3 脚 エレキ：100mm x 100mm x 100mm	センサ：500mm x 200mm x30mm (アーチ形) エレキ：100mm x 100mm x 50mm	φ 100mm x 400mm
重量	センサ：1.5kg エレキ：2kg	センサ：1kg エレキ：1kg	5kg
電力（最大）	10W	5W	2W
データ量	1MB/week	1MB/week	1MB/week

(4)搭載へ向けての開発ストラテジ

4-1)ヘリテージとクリティカル要素

・ヘリテージ

案 1・2：ピエゾ actuator を用いたアクティブ探査装置は、SESAME ミッションで

CASSE として搭載されている。SELENE2 では月シミュラント上で、アクティブ地下構造探査の原理検証が行われている。

案 3 : LUNA-A でペネトレータ式地震計が開発されている。

- ・クリティカル要素

案 1 : 低温側動作温度 (稼働時間を制限)、電力、通信容量、越夜

案 2 : Rover アームへの搭載可能性、電力、通信容量

案 3 : 電力、通信 (要中継)

4-2)開発 (サイエンス推進体制)

- ・とりまとめ : 新谷 (地震研)

サイエンス・開発 : 小林・白石 (ISAS)、辻 (九大)、石原 (AIST)、千秋 (千葉工大)

データ解析 : 地震学コミュニティ

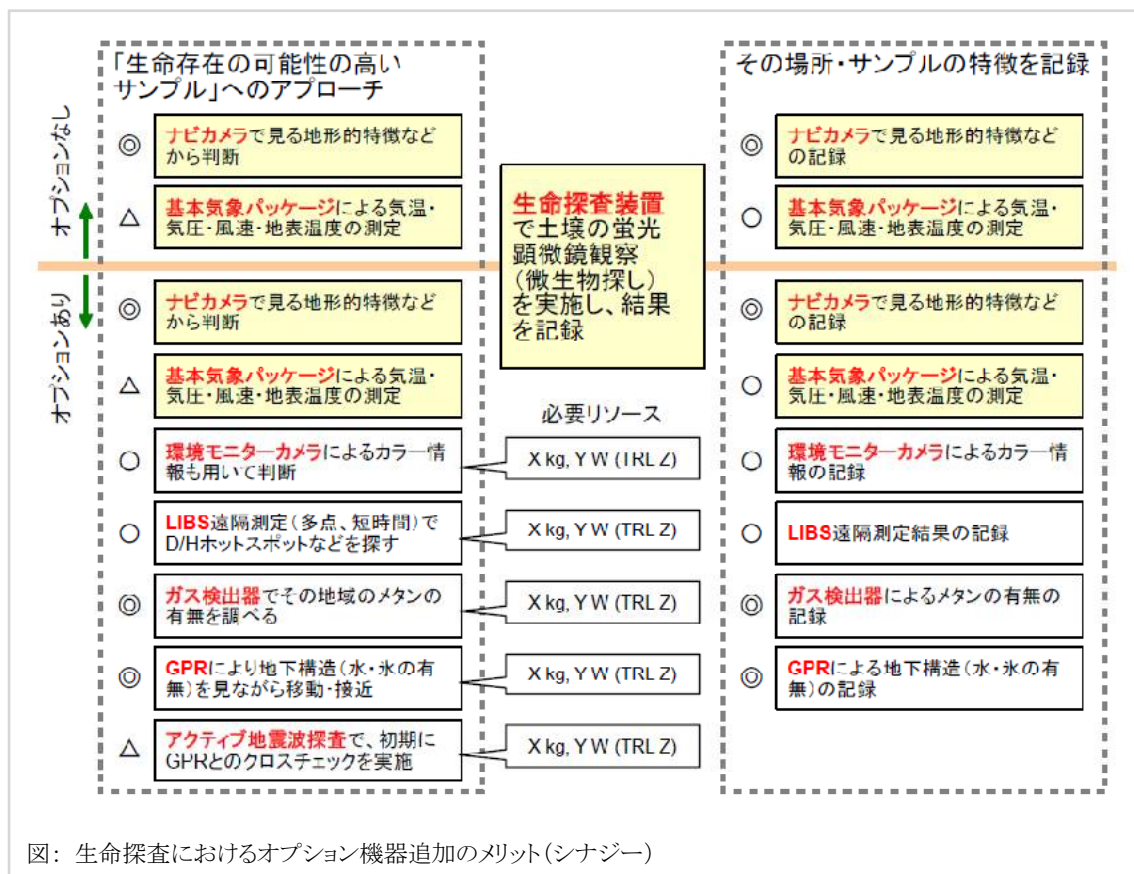
2.12. 科学測器間のシナジー

提案されている測器をすべて搭載することは現実的ではないが、それらを組み合わせたときにどのようなシナジーがあるかを簡単にまとめる。

	生命探査装置	気象(基本)	環境カメラ	ライダー	ガス検出器	GPR	LIBS	回転計測	地震波計測
生命	◎	○	○		◎	◎	○		△
ダスト・水	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○
地質			○		○	◎	◎		△
内部						△		△	◎
気候進化		○	△		○		◎	△	

2.12.1. 生命探査におけるシナジー

生命探査装置はもちろん主装置である。ストラテジーとしては、まず環境モニターカメラによるカラー撮像で興味深いと思われる場所を見つけ、そこへ近づき LIBS で多数の点を測定する。ここでは LIBS の測定時間の短さや、遠隔からの測定、そして空間分解能の高い撮像（対象表面で ～30 μm/pix）の利点が活かることになる。現在活動中の生命があれば、

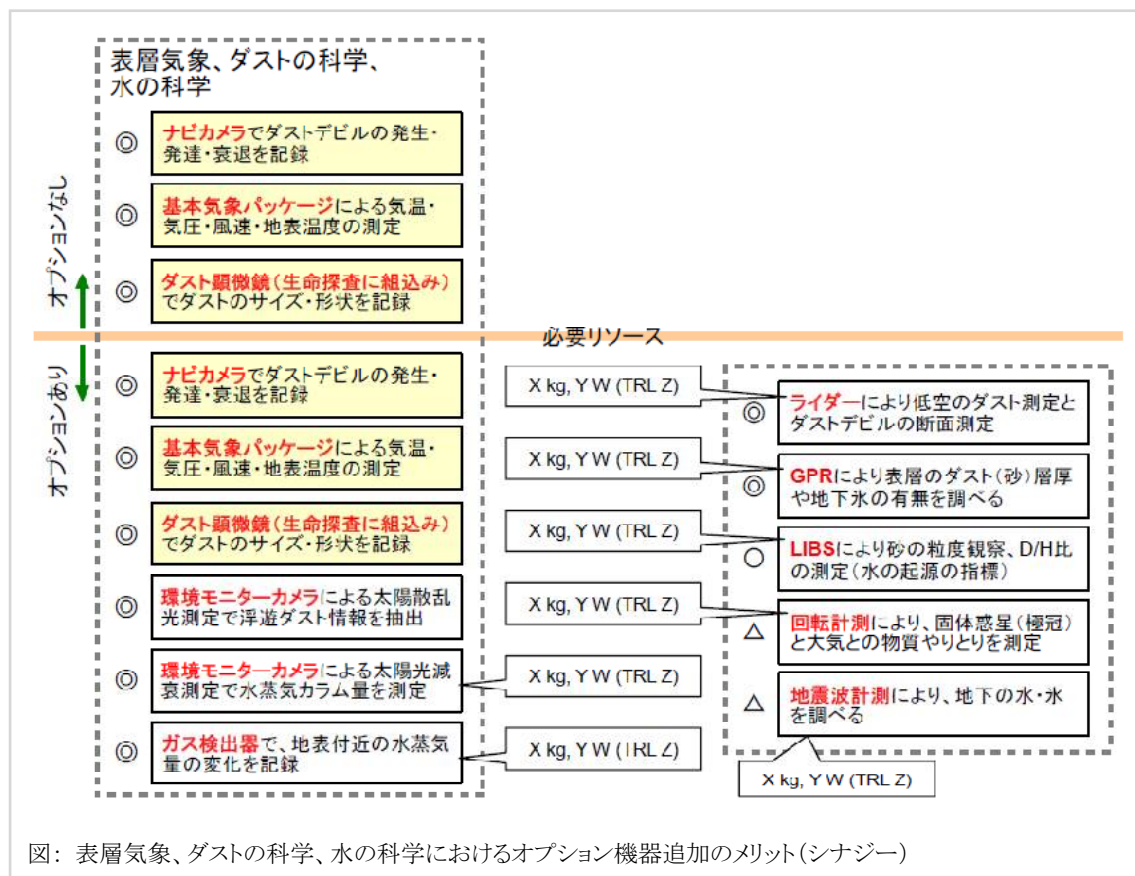


それに含まれる有機物を D/H 比のホットスポットとして捉え、より生命がいそうな場所を特定できる可能性がある。次にガス検出器でその場所のメタンの有無を調べる。ローバー移動中は GPR で地下構造を見て、水や氷の有無を調べる。そしてここぞという場所・ターゲットから試料を取得し、生命探査実験を行うことになるであろう。

地震波計測も地下構造を調べられるという点では GPR と同じであるが、これは固定ステーションへの装備を想定している。したがって、ローバーが移動した先の地下構造を与えるものではない。それでも運用初期、まだローバーが固定ステーション近くにいる間は互いの測定結果を比較することができ、GPR の精度検証に有用と考えられる。

2.12.2. ダスト・水などの気象学におけるシナジー

気象の基本要素のうち、風速は「ダストがいかにかき上げられるか」の指標である。ライダーと組み合わせ、風速と巻き上げ量の間の関係を調べる。またダストデビルによる寄与については、ナビゲーションカメラ（ローバーのバス機器）がダストデビル監視を行う。浮遊ダストのサイズについては、それがガラスステージに沈降したものを撮像する機能が生命探査装置に組み込まれている。こうして得られるサイズ情報は、環境モニターカメラが測定する空の散乱光強度分布の解釈に使われる。GPR で表層のダスト（砂）層厚を調べ、また粒度は LIBS による空間分解能の高い撮像（対象表面で $\sim 30 \mu\text{m}/\text{pix}$ ）で調べる。環境モニターカメラは水蒸気のカラム密度測定（直達太陽光の吸収減衰）も実施し、ガス



検出器による局所的な水蒸気量、GPRによる地下水（氷）の分布、LIBSによるD/H比測定と組み合わせ「水循環」に関する知見を得られる。

地震波計測の地下構造探査、宇宙測地学（長期観測が必要であるが）による極冠と大気との物質循環も、水の関与する気象学に貴重な情報をもたらす。

2.12.3. 地質探査におけるシナジー

着陸地点でまず環境カメラで周囲を見渡し、全体の地表環境を観察する。観察すべき対象の地形、露頭、転石、細粒物質などが同定できれば、ローバーの移動装置を起動し、対象に近づく。その道程で周囲の地質環境を環境カメラで観察しながら、場所に応じてLIBSで化学鉱物成分の分析を行ったり、GPRで地下構造を調べる。対象に十分近づいた後、環境カメラで近接距離から観察する。その後、LIBSで化学鉱物成分の分析や空間分解能の高い撮像（対象表面で $\sim 30\text{ }\mu\text{m/pix}$ ）を行い、現在もアクティブに地質活動中の可能性のあるサイトでは、ガス検出器でメタンや水蒸気の量を測定する。GPRで対象の周辺の地下構造を詳細に調べる。

2.12.4. 内部構造探査におけるシナジー

内部構造探査は、地震波計測と回転計測から構成され、火星というシステムを、核・マントルダイナミクス等の内部構造と、大気・表層ダイナミクス等の表層環境から解き明かすことを目的としている。

MELOS-1の地震波計測では、ペネトレータ地震計、ピエゾ加速度計、MEMS加速度計によって、地震のイベントトリガ検出、連続観測、アクティブ探査を行う。これによって、表層～浅部に存在する境界層を検知して、wetな地域の地下構造を明らかにする。InSightとの協同／相補的な探査が実現できれば、地域差に関する情報も得られる。

また回転計測では、ランダまたはローバとオービタ（オプション）との距離をモニタすることにより、自転速度変動（ ΔLOD 、日長変動）を検出する。自転速度変動は極冠の消長、大気圧変動、ゾーナル（zonal）な風の応力、グローバルダストストームなどが原因と考えられているため、火星グローバル気象学と連携することにより現象のより良い理解が期待される。

2.12.5. 気候進化理解におけるシナジー

LIBSによって得られる着陸点付近のD/HとMSL-SAMやMAVENによって得られるD/Hが異なる場合、着陸地点付近での水の散逸・年代に関する情報が得られる可能性がある。年代と気候進化に関する議論を進めるためには、現在のその場での気象に関する基礎データが重要であり、ガス検出器により時間変動の有無を測定することも有用と考えられる。測定箇所の選定にあたり、LIBSによる $\text{H}\alpha$ 線測定に加え、ガス検出器による水蒸気濃度測定が有効である。

【第3部】 探査機システムとミッション・シナリオ

(工学チーム準備の文書を結合予定)