

# 火星複合探査ワーキンググループ終了報告

WG 主査: 佐藤 毅彦

(2014 年 12 月 25 日提出、2015 年 3 月 12 日改訂版提出)

## 1. 宇宙理学委員会から受けた経費

年度	2008 年度	2009 年度	2010 年度	2011 年度	2012 年度	2013 年度	2014 年度	総額
戦略経費配分	秋 WG 設立のためなし	300 万円 (旅費)	370 万円 (旅費)	440 万円 (旅費)	40 万円(その他旅費)	申請なし	申請なし	1150 万円

## 2. WG 活動の概要

本 WG は 2008 年度に JSPEC 宇宙探査委員会と ISAS 宇宙理学委員会にまたがる形で発足し 2014 年度まで (JSPEC では 2013 年度まで)、火星へ複数飛翔体 (周回機・着陸機) を送り、それらが連携することによる「総合科学探査」の実現を目指し活動してきた。複合探査の柱を、(i) 火星気象学、(ii) 大気散逸科学、(iii) 表層環境および内部構造とし、それらを貫く大テーマに「火星はなぜ赤いか」(単純だが答えの難しい問題) を掲げた。諸外国の探査が個別トピックの精密化・詳細化へ向かうのに対し、固体惑星～表層～大気、そして大気～プラズマ圏～太陽系空間と相互に結合し進化する「系としての火星科学」を目指した。利点を有する複合探査であったが、規模などの面で実現困難なことを認識し、2011 年度には「1 オービター+1 ランダー」へ、2012 年度からは「着陸のみ」のミッション形態の模索を続けた。結果として複合探査ではなかったが、着陸し地表を走行する探査ローバーを用いるミッション提案へと収斂させた。

## 3. WG 活動の成果

複合探査として目指すもの・ミッションの形などをコミュニティで議論、その成果を学会誌に特集記事として発表、また東京大学総合研究博物館における展示などを通じて一般へ発信を行った。最終形の「着陸・ローバー」ミッションは、2014 年度から ISAS 宇宙工学委員会「火星着陸探査技術実証」WG に受け継がれ、2015 年 2 月の次期戦略的中型ミッション AO へ提案を行っている。このローバー+生命探査ミッションは、日本惑星科学会「来たる 10 年」将来計画検討において三つ残ったフラグシップミッション・コンセプトのひとつであり、科学的にも高い評価を受けている。途中からドロップはされたものの、火星気象学について科学目標の明確化、そのミッションに最適な軌道解の獲得、科学観測に対する要求の整理と、それを実現し得る搭載機器ラインナップの完成という成果を得ている。火星大気散逸科学についてもやはり、観測項目の整理、搭載機器に対する要求設定とそのフィジビリティ向上などが獲得され、2011 年 12 月からは ISAS 宇宙理学委員会下の独立した WG へと活動が引き継がれている。

## 4. WG 活動の総括

当初目指した大規模な複合探査は実現しなかったものの、ひとつのミッション提案 (着陸) に結実させ、学会やコミュニティにおいては議論を深め認知を得、オービター部は各々の科学目標や機器要求の明確化を獲得して、本 WG は役割を果たして終了する。

## A) 本WGの目指したもの(背景とWG設立経緯)

本WGは、火星に複数の飛翔体(周回機・着陸機)を送り、それらが連携し科学観測を行うことによる「総合科学探査」の実現を目指して活動を行ってきた。火星は、惑星そのものが地球によく似ており(自転軸・自転周期・表面温度など)、その多様な表層環境が研究対象として魅力に富む。さらに、火星発達史(内部・表層・大気およびその周辺)は我が地球の理解と密接につながることで、そして将来の有人活動を見据えた探査のステップとしても重要であることから、複合探査を構想する動機が高まったのである。加えて、米欧などの精力的な火星探査を受けて火星科学は個々のトピックにおいては「精密化・詳細化」してきており、小規模・単発の探査により同じカテゴリで存在感を示すのは難しくなる傾向にある。その一方、異なる領域間、たとえば内部構造と大気の相互作用といった「系としての科学」は未開であり、それへ至る手段としても複合探査の重要性は高いと考えられる。

複合探査のひとつの柱を「地球型惑星の気象学」とした。金星探査機「あかつき」フライトモデル製作が順調に進む中、惑星気象学研究者らが「次の一手」として、同じ地球型惑星である火星の気象解明に挑むべく構想した「次期火星探査(オービター)計画」がそれである(2008年初め頃)。この構想は「あかつき」の基本的な設計や搭載カメラ群をベースとした、500 kg 級周回機による気象ミッションである。従来、火星周回機はバイキングのそれを除けばすべてが低高度の極周回軌道を取り、限定された地方時についてのみ火星気象に関する情報が得られてきた。金星の「あかつき」のように赤道周回ですべての地方時にわたる気象観測を行う衛星は、これまで火星にはなかったのである(C)-i. 気象グループの成果報告を参照)。

もうひとつの柱は「火星大気散逸科学」である。1998年に打ち上げたPLANET-B「のぞみ」は火星周回軌道投入を断念したが、そのサイエンスは海の向こうに引き継がれ、米国でMars Scoutの候補として二つの「火星大気進化」ミッション候補が競っていることが伝わっていた(のちにそのうちのMAVENが勝ち、2014年9月に火星周回軌道に入るわけだが、このことから火星発達史において「大気散逸と進化」が重要な科学であることが分かる)。それらのいずれとも差別化を図り独自の優れた科学成果を挙げるために、「2 オービターによる協調観測」ミッションが構想された(C)-ii. 大気散逸グループの成果報告を参照)。

これら二つのグループは、研究対象とする大気の物理過程に重なる部分もあり(母体とする学会にも共通点あり)、日常的に研究交流を行っている。両者の構想について意見交換をするうちに、2 オービターのひとつを低高度極周回のプラズマ観測専用衛星、もうひとつを長楕円機動をとる気象衛星(太陽風モニターなどのプラズマ機器も搭載する)に割り当てるミッションで両方を満足する解があるのではないかと、両グループの連携・検討が始まった。

そこへさらに、火星へ着陸し表層環境や内部構造の研究を目指すグループが参加した。たとえば大気の進化は、単に宇宙への散逸を考えればよいわけではなく、固体惑星への取り込みや脱ガスによる供給なども含め、その全過程をトレースしなければ全体像を描くことはできな

い。「系としての科学に迫る総合科学探査」の価値は極めて高く、オービターだけでなく着陸も含めたミッション形態は魅力的である。そして火星着陸は、上述したように「探査」の重要対象でもある。JAXA 内ではちょうど、当 WG 立ち上げの前年度に月惑星探査プログラムグループ＝JSPEC が発足しており、それに伴う期待感(科学と探査が手を組むことで、予算面においても規模拡大)が大きく膨らんだ時期である。こうして、2 オービターにランダーも加わった「火星複合探査 WG」という形態が出来上がったのである。そしてこの WG は、JSPEC 宇宙探査委員会を主所属としながら ISAS 宇宙理学委員会にも所属する、両方に籍をもつ WG として活動を開始した(2008 年秋)。両本部にまたがる WG ということで、活動経費使用の透明化のため「着陸探査の部分は JSPEC 宇宙探査委員会経費」で、「周回探査の部分は ISAS 宇宙理学委員会経費」で検討してきた。

## B) WG 活動の概要

以上の経緯をたどって「複合探査」の実現を目指す WG が生まれ、活動を開始した。もちろん、大規模な探査であるからそれに向けた作業量は多くなり、特に「科学目標の先鋭化(発散しないように)」と「コミュニティとの十分な議論を尽くすように」と宇宙理学委員会からの指導を受けつつ、以下のような活動や議論に時間を割いたのである。

- 気象オービター、あるいは大気散逸オービターのみの場合と比べ、2 オービターで両方のサイエンスを実現しようとしたときには、以下の諸課題を解決する必要がある。WG はこれらの議論を行った。
  - 両方のサイエンスにベストであるような周回軌道的设计(2 オービターの相対的位置関係、軌道周期、軌道面の火星ローカルタイムなど)、
  - 両方のサイエンスにベストであるような搭載機器の選定、およびそれらの 2 オービターへの振り分けとリソース配分(重量・電力・通信)、
  - これらを「工学的に」実現するミッション全体計画。
- 着陸機(固定ランダーもしくは移動ローバー)が加わったことによる科学的メリットの最大限の活用。
  - 着陸機ならではの科学テーマを識別しつつ、周回軌道からと着陸地点からの「同時観測によるメリットのある科学テーマ」、そうでなく「別々に観測しても成果の出るテーマ」を識別し、複合探査ならではのメリットを見出す。

それまでは互いにインタラクションすることのあまりなかったコミュニティ(特にオービター側と着陸機側)が共同作業を行い、そして「これまでになかった大規模なミッション」の実現を目指すという課題に WG は取り組んできた。活動の内容(方向性)は徐々に変遷(「発散」ではなく「進化」といえる)し、ちょうど全体を三つの期間に分けると(背景も含めて)とらえやすくなるため、以下それにもとづき時系列にて記述する。

## 第1期：2008年度から10年度

年度	2008年度	2009年度	2010年度
戦略経費配分	秋 WG 設立のため、なし	300 万円(旅費)	370 万円(旅費)

WG 活動の初期、複数回にわたる月惑星探査研究会(神戸大学 CPS にて開催)などを通じて議論を交わし、MELOS という名称のミッションの検討、主に「これから日本が立ちあげる火星探査の主サイエンスはどうあるべきか」の検討を深めていった。複合探査の科学テーマを「火星はなぜ赤いか」に設定し、固体惑星が表層環境を介し大気と相互作用すること、大気が周辺のプラズマ環境を介し太陽風と相互作用することを個別の観測項目としたミッションを組み立てていった。火星が赤いのは「地表にヘマタイトが多くあるから」ではあるが、では「なぜヘマタイトが多くある環境ができたか」は未解明であり、系としての理解なしに答られない「象徴的な疑問」なのである。2009 年春にはそれらの成果を、日本惑星科学会誌「遊星人」に特集記事として執筆・掲載している(Vol. 18, No. 1, p.41-44 および Vol. 18, No. 2, p.66-88)。

2010 年 4 月からはアストロバイオロジーのグループが WG に参加し、MELOS として「火星生命探査」の可能性も検討し始める。同年夏には東京大学総合研究博物館において「火星 ～ウソカラデタマコト」展を開催している(科学解説を主体に総ページ数 175 ページの図録を出版)。博物館の主催展ではあるが、図録の執筆を含めて WG が全面的に協力している。検討してきた複数の科学探査プランを A, B, C, D として来訪者に提示し、それらに対する意見を記入してもらうという活動を行っている。その結果は興味深く、一般人の意見は決して「火星ならば生命探査」と偏ったものではなく、WG 提示の 4 案がほぼ等しく賛意を得たのである。このことから、火星という惑星の多様性(ある程度)認識されており、それへさまざまな角度からアプローチしてゆく科学者の活動は一般の理解を得られるのだと、WG は勇気づけられた。

	時期	活動	規模	備考
a	2008 年 12 月 5 日・6 日	第 1 回 CPS 月惑星探査研究会(神戸大学 CPS)	参加人数 (83 名)	2 日間をかけて、目指すべき火星探査ミッションについて議論した。
b	2009 年 3 月 17 日～19 日	第 10 回惑星圏研究会(東北大学)	48 口頭、33 ポスター	17 日午後セッションを「火星探査」に関する 16 本の発表と議論に充てた。
c	2009 年 10 月 16 日・17 日	第 2 回 CPS 月惑星探査研究会(神戸大学 CPS)	参加人数 (54 名)	火星のみならずさまざまな探査、ロードマップ、国際協力のあり方、工学の視点などについて議論した。
d	2010 年 7 月 24 日～10 月 30 日	火星:ウソカラデタマコト(東京大学総合研究博物館)	来場人数は 公表せず*	MELOS で検討している四つの科学テーマ(気象・大気散逸・内部構造・生命)を紹介し来場者による「投票・意見募集」を行った。

\*博物館方針で来場人数は公表されていない(数万人)が、この展示が契機となり全国 6ヶ所で同様コンテンツによる移動展示が行われより広範囲へと発信することができた。また、2014年7月に水道橋にオープンした宇宙ミュージアム TeNQ もこの火星展が呼び水の役割を果たしている。

ところが 2010 年 12 月、「あかつき」は金星周回軌道入りに失敗してしまう。「のぞみ」「あかつき」と続く失敗、そして惑星周回もいまだ果たせぬ日本、という状況になってしまい、「2 オービター+ランダー」の複合探査という夢はいっきに遠いものとなってしまったと WG は感じたのである。

## 第 2 期：2011 年度および 12 年度

年度	2011 年度	2012 年度
戦略経費配分	440 万円(旅費)	40 万円(戦略以外の旅費)

これまで構想してきた大規模複合探査は到底(近未来に)手の届くものではなく、「1 オービター+ランダー」のミッションに縮小しながらも複合探査のシナジーを発揮し、それを実現しようという方針をWGは決定する。それにしたがって2011年秋に「気象 or 大気散逸」のオービター一部セレクションを行い、気象オービターを選定したのである。

	時期	活動	内容
e	2011 年 2 月	WG 全体会合(便宜的に第 2 機の活動に分類)	ミッションとしての実現性を高めるため、オービターの 2 機構成をやめて「1オービター+ランダー」のミッションとすることを合意。
f	2011 年 4 月 28 日	WG コア会合	オービター部セレクションに向けて、理工のバランスを考えた審査員候補者選びを開始。
g	2011 年 9 月 13 日	オービター(気象・大気散逸)ヒアリング	二つのオービター提案の内容を聞き、質疑応答を行った。審査員は以下のとおり(敬称略)。 気象分野: 松田佳久、倉元圭 大気散逸分野: 向井利典、藤井良一 着陸・工学: 松本幸太郎、西田信一郎、橋本樹明
h	2011 年 9 月 30 日	気象オービター採択の決定	審査員から提出頂いた評価シートをまとめ、(科学評価としては僅差であったが)気象オービターを選定することを決定した。
i	2012 年 2 月 13 日	CPS 研究会「火星研究の現状と将来展望」(神戸大学 CPS)	WG が「一歩踏み出す」一方、火星研究の国際情勢もしつかり把握し将来像を描くことができるよう、コミュニティが集まり議論を行った。

本来ならば、こうして選定された気象オービターのチームはいっきにそのミッション化へ向けた検討を加速するはずであった。しかし、いったん金星周回に失敗した「あかつき」の金星との再会合チャンスが 2015 年末、(首尾よくゆけば)そのあとにサイエンスオペレーション、という予定が見えてくるにつれ、「気象」グループの火星ミッションへの取組みも減速せざるを得なかった。すなわち、「あかつき」で多忙となる傍らで、火星オービターのための機器開発やミッション検討をしていられそうにない、と現実認識したからである(サイエンスを行う周辺メンバーは多くいても、衛星運用を担当する「あかつき」実働メンバーはあまり多くない現状がある)。そのた

め、2012 年度に入る頃から「気象」グループでは、

- 将来、自分たちの「気象」ミッションを実現する夢を捨てたわけではないが、ごく近い未来（数年後）にそれを実施するのはかなり難しい。
- いまは「大気散逸」ミッションに協力し、大気散逸オービターにひとつでもふたつでも気象観測機器を搭載することを目指すのが現実的。

という判断に傾いていった。もうひとつ大きな問題として認識されたのが、ミッションの資金規模である。WG 工学メンバーが見積ったところ気象オービター＋着陸機のミッションでは「中型ミッション」のキャップ(300 億円)に収まりそうもないという結論であった。そのため、「オービターなし、着陸のみのミッション」を検討する必要に迫られ、WG 活動の中心がそちらへシフトしたのである(旅費としての申請・配分額が 2012 年度に大きく落ち込んでいるのは、これらのことを反映している)。

特筆すべき事柄として、当 WG が提案するミッションへのコミュニティの認知度の大きな向上が挙げられる。日本惑星科学会では 2010 年から、学会として将来月惑星探査のロードマップを描く作業「来たる 10 年」を行っていた。火星複合探査 WG 自体は「すでにミッション創出を目指し活動をする WG」フェーズに入っていたので、そのサブグループである生命探査のメンバーが「将来搭載機器」として生命探査測器群を提案していた(「遊星人」, Vol. 21, No. 3, p.276-282)。「来たる 10 年」が第 3 段階を迎える時期と、上述したような「気象グループの減速＝着陸主体のミッションへのシフト」が重なったことを受けて、第 3 段階へは改めて「火星着陸機・ローバー生命探査を主とする複合科学探査計画」として上げてゆくこととした(2012 年初冬)。カテゴリーは「フラグシップミッション」であり、そのミッションコンセプト(MC)のひとつとして、他にトロヤ群小惑星探査、月面年代学探査と競うまでに至ったのである。

### 第 3 期：2013 年度および 14 年度

年度	2013 年度	2014 年度
戦略以外の旅費	申請なし	申請なし

WG 発足時から活動経費使用の透明化のため「着陸探査の部分は JSPEC 経費」で、「周回探査の部分は ISAS 経費」で、という切り分けをしていた。上記のように気象オービター活動が縮小し着陸主体のミッションへのシフトがあったため、2013 年度・2014 年度には、宇宙理学委員会からは開発費・旅費ともに受けていない。

一方、着陸探査の方は JSPEC 宇宙探査委員会のもとで 2013 年度まで WG 活動を継続し、ローバーを火星地表に着陸させ「火星生命の検出実験」を行うミッションの検討を深めてきた。その成果は、上でも述べたように日本惑星科学会「来たる 10 年」へのミッションコンセプト提案のブラシアップとして逐次発信されている(学会の秋季講演会および ISAS 月惑星シンポジウム)。特に 2013 年夏の月惑星シンポジウムにおいては、当時のミッション構想をまとめた

「MELOS1 ミッション提案書(ドラフト版)」をまとめ上げ、会場で配布するとともにネット上でも公表している(<http://melos.ted.isas.jaxa.jp/Missions/MELOS/>)。WG の主所属であった JSPEC では理学研究および WG 活動は行わないという本部方針が決定され(2013 年度)、この頃までには ISAS 宇宙理学委員会の下で活動していた気象オービター部も休眠状態となっていたから、MELOS WG も 2013 年度末で終了した(JSPEC 側)。そしてその活動を引き継ぐ形で、ISAS 宇宙工学委員会の「火星着陸探査技術実証 WG」が立ち上がり、2015 年 2 月に次期戦略的中型ミッション AO へ応募を果たしている(C)-iii. 着陸探査グループの成果報告を参照)。

### 第 1 期～第 3 期を総括して

WG 活動全体を総括して、当初目指した「複合探査」という形態ではミッション提案には至らなかった。諸外国の精力的なミッションを背景に発達し続ける火星科学において、複合探査＝総合科学が必要という動機はいまでも正当性をもつものと思われる。しかし、「あかつき」の金星周回軌道投入失敗が示すように、日本の惑星探査の現実＝経験不足やコミュニティの層の薄さなどはきちんと踏まえ、それにもとづきミッション立案をしてゆくことは重要である。ある意味この数年間は、さまざまな背景で複合探査として出発した WG が、火星サイエンスに関する議論をコミュニティと深めつつ現実を直視し、より適正な規模で良質のミッションを考える、そういう実りのある時間であったといえる。「気象」が(いったんは火星オービターとして内部では選定されながら)活動を減速してしまった理由は上記のとおりで残念なことではあるが、「あかつき」金星探査をぶじに完遂するためには仕方のなかったこと(そうするのがベストであった)ともいえる。一方、「火星着陸探査」は、日本惑星科学会「来たる 10 年」の中で三つのフラグシップミッション・コンセプトとして残ることができたし、ミッション提案にまでこぎつけることができた(2015 年 2 月)。これらのことから、当 WG はそれにふさわしい成果を挙げて、いま終了するタイミングを迎えたと考える。

## C) WG 活動の成果

ここでは三つのグループ各々の成果について述べる。

### i. 気象オービター計画の検討成果

#### 1. 気象オービター検討の経緯

火星気候の支配要因を理解するために周回衛星からのリモートセンシングによる気象探査について検討。研究課題を絞り込み、何をどのような精度で計測する必要があるのか整理、さらに観測機器の仕様を検討して火星気象衛星の一つのモデルを構築している。

現在の火星大気は薄く(主成分は二酸化炭素であるが)温室効果がほとんど働かない。代わって大気中にミクロンサイズの鉱物粒子(ダスト)が常時浮遊し、これが太陽光を吸収することにより加熱源となり、大気構造を支配している。ダストはまた、地表面に降り積もったり吹き払われたりすることによって地表のアルベドや熱慣性を変え、気候に影響している。しかしダストがどのようなプロセスで輸送されて現在見られるような大気中および地表での分布を作っているのかは、ほとんど分かっていない。火星の表層や地下に分布する水は、このようなダスト気象学の帰結としての気温・湿度・地表温度の分布や、氷晶雲の凝結核としてのダストの分布に支配されている。そこで我々は、ダストに支配される火星の気象学と、それが駆動する水や微量大気成分の輸送過程を解明することを主要テーマとした。

この構想は、金星探査機「あかつき」の経験を生かしつつ、火星気象衛星を世界に先駆けて実現することによってこの分野で主導権を握ることを狙っている。大気散逸の観測を行う周回機との2機構成では、気象衛星は「下層大気の変動が大気散逸に与える影響の評価」「散逸する大気種が下層大気から上層大気へどのように輸送されるかを解明」というテーマで大気散逸観測とのシナジーを想定した。このような大気散逸観測との連携は、後述のように火星大気散逸衛星(のぞみ 2)に一部の気象測器を相乗りさせるという構想に部分的に引き継がれている。以下でこれまでの検討結果の概略を述べる。

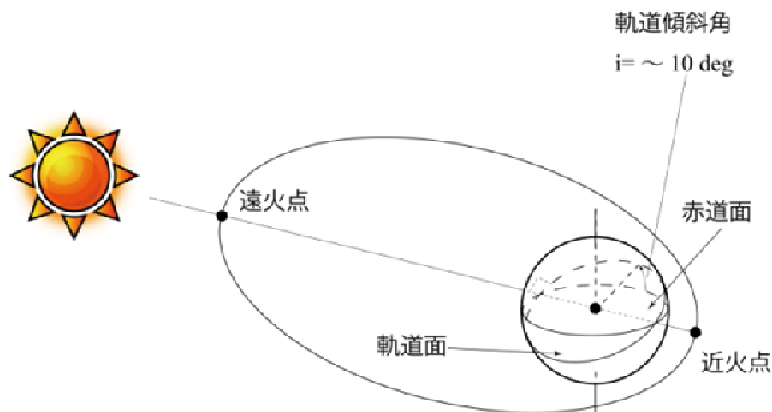
#### 2. 成果その1: 最適な観測軌道の策定

米国の MGS や MRO ミッションの観測により、惑星スケールの大気構造や大気波動、その季節変化の理解が大きく進んだ。しかしこれらは低高度の極軌道衛星ゆえに衛星直下の狭い範囲しか観測することができず、メソスケールから総観スケール(数 km~数千 km)の大気現象の数十分から数日のスケールでの時間発展を追跡できないという、気象学や物質循環の研究にとって致命的な問題がある(ESA の 2016 年オービターも同様)。われわれの構想は、高い軌道からのグローバルな連続観測によってこのスケールを埋めるものである。

モデル軌道として軌道傾斜角  $9.97^\circ$ 、近火点高度 450 km、遠火点 6.45 火星半径、軌道周期  $1/2$  火星日 (12.3 時間)を得た。遠火点が昼側に固定されたほぼ赤道周回の軌道である。J2 摂動による面内の軌道回転速度  $d\omega/dt$ 、軌道面そのものの回転速度  $d\Omega/dt$  をうまく組み合わせることで、遠火点ローカルタイムが正午付近であるような軌道を長期間保持できることが



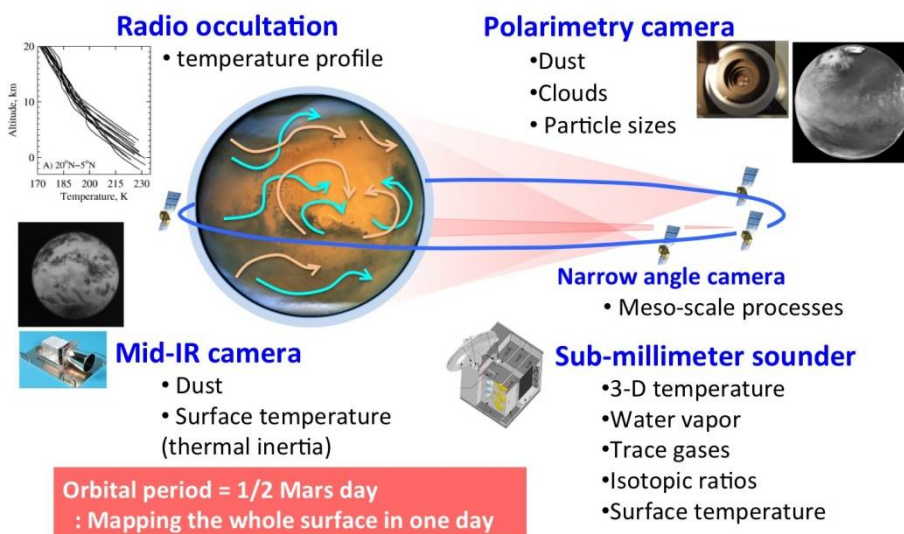
分かった。軌道グループ (JAXA 尾川ほか) が具体的な軌道設計を行い、成立性は確認済みである。この軌道からは1周回の間特定の半球内の気象現象の時間発展を半日にわたって追跡可能であり、日変化をモニターしつつ2周 (1 火星日) で全球をカバーする。偏光観測のために1周回のうち広い太陽位相角をカバーすることも狙っている。



ミッション軌道概略図

衛星重量は燃料含め 500 kg 程度を想定する。主要観測センサは偏光カメラ、サブミリ波サウンダ、中間赤外カメラ、望遠カメラ、電波掩蔽観測用の超高安定発振器である(後述)。発生データ量には偏光カメラが多くを占め、32kbps の通信レートがあれば1日あたり5時間程度のダウンリンクで成立する。通信レートがこれより低い時期には波長によって観測頻度を落とす、より大きなデータ圧縮を行うなどして対処する運用計画を策定した。

**Continuous, high-resolution global mapping of the atmosphere and the surface for understanding dust meteorology and water cycle**



火星気象衛星による観測のイメージ

### 3. 成果その2: 観測機器群の選定

搭載機器の選定にあたっては、気象衛星として広視野の直下視観測に重点を置いた。観測戦略は「あかつき」と共通点があるが、火星と金星の大気の性質の違いや科学目標の違いから、機器構成は大きく異なる。主要機器の観測対象と要求精度を次の表に示す(各観測装置の科学対象・その意味などは巻末に「付録」として示す)。

搭載観測機器の観測対象と要求精度

観測装置	物理量	精度	水平分解能	鉛直分解能
偏光カメラ	輝度	1%	15km	
	ダスト光学的厚さ	0.1	15km	
	ダスト粒径	40%	15km	
	氷雲光学的厚さ			
サブミリ波サウンダ	気温	1-2K@4km	200km	5km
	水蒸気濃度	10%	200km	5km
	地表面温度			
中間赤外カメラ	ダスト・氷雲	1K	15km	2km (limb view)
電波掩蔽	気温	0.1K		1km
望遠カメラ	輝度		1km	

これらの測器を用い取得する観測データが示すであろうダストや水蒸気の時空間変動を解釈するために、全球的な力学場を観測データと数値モデルから再構築する。データ同化と呼ばれるこのような試みは、地球気象学においては経験が蓄積されているが、惑星探査分野ではほとんど前例がない。最終的にはダストや微量気体も力学場と同時にデータ同化し、物質循環の整合的なシナリオを構築することを目指す。このようなモデルツールを実現するために、神戸大CPSの惑星大気グループを中心に課題を抽出し、英Oxfordや仏LMDの惑星気象モデルチームを訪ねて技術的な課題について議論を重ねた。

### 4. 火星気象衛星検討の成果

WGはミッション実現を待たず解消することになったが、検討の過程で、火星気象衛星というアプローチが火星大気科学にユニークな視点を提供する競争力のあるものであることを確認できた。火星表層環境における物質循環という研究課題が、固体惑星科学や大気散逸の科学と多くの接点を持つことも改めて認識した。現在は、(1)火星大気散逸衛星WGに一部メンバーが加わったうえで、この周回機に気象観測用の中間赤外カメラを相乗りさせる案を探っている。ここで中間赤外カメラは、全てのローカルタイムでダスト現象を可視化することによって、大気波動を介して下層大気が上層大気に与える力学的影響を解明し、大気散逸現象における中性大気変動の寄与を評価するという役割を担う。また、(2)MELOS WGで明確化した火星気象学の問題意識をもとに、一部のメンバーは工学実験機としての火星ランダーに搭載する

気象測器の検討やランダー周辺の環境評価を行っている。(3) 火星を対象としたサブミリ波サウンドアの検討結果をもとに、サブミリ波サウンドアを軸とする次期金星探査についても検討し、イプシロン3号機への提案の一つであるDESTINYの将来的な候補ミッションにも挙げた。近年、プログラマ的な火星探査のロードマップの議論が加速しているが、その中において(4) 比較的小型の火星周回機を実現する可能性についてもメンバーは強く意識しており、改めてWGを立ち上げるタイミングを検討している。こうしたさまざまな広がりを持ち得たことは、「複合探査」の一部として火星気象衛星を検討してきた成果として特記できる。

本WGでの火星気象衛星の検討状況を国際学会で繰り返し発表し、また海外の研究機関とも議論してきた結果として、火星大気の探査や科学における国際的なつながりが強化された。これも本WGの成果と言えるだろう。ここ数年、日本の惑星気象コミュニティにおいて数値モデリングやデータ解析による火星気象研究が目立って増えたが、ここでも本WGの火星気象衛星構想が存在したことが少なからず契機となっている。

## ii. 大気散逸オービター計画の検討成果(2011年度まで)

### 1. 大気散逸オービター検討の経緯

2003年12月9日、日本初の惑星探査機「のぞみ」の火星軌道投入断念以後、のぞみを推進してきた科学コミュニティは、のぞみの目指した科学の実現に向け検討を重ねてきた。2004年から2008年にかけては、のぞみ後に成功した米MGSや欧MEXの最新の成果も踏まえて、のぞみ後継ミッションについて検討するとともに、露Phobos Grunt等の海外ミッションへの機器搭載についても検討した。この間、米国では大気散逸科学を目指す2つの計画がMars Scoutミッション選定を通過(2007年1月)し、NASAが火星大気散逸探査計画を打ち上げる可能性が濃厚となった。これを受けて、NASAのさらに先を行く探査計画として、日本の科学コミュニティの中で浮上してきたのが、撮像・太陽モニター衛星とその場観測衛星による同時観測を実現するオービター2機構成案(図1)である。

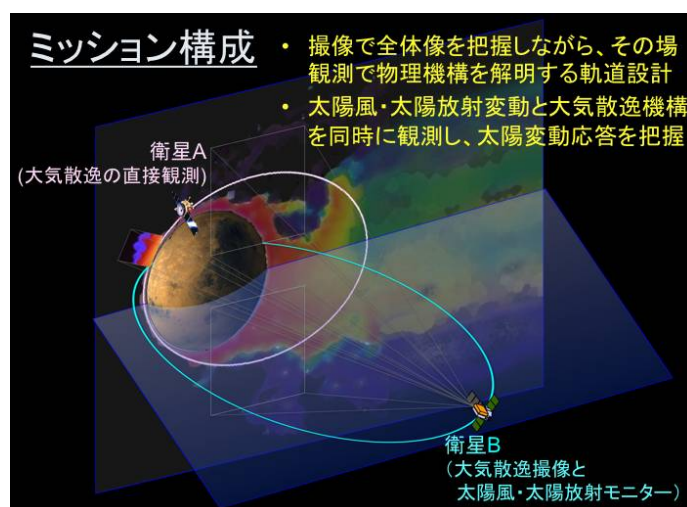


図1：火星大気散逸探査検討チームが検討を進めるオービター2機構成案の概要

## 2. 成果その 1: ミッションの科学的な意義と目標の検討

大気散逸探査計画は、過去 40 億年の間に、火星からの大気散逸が気候変動に与えてきた影響を演繹することで、非磁化惑星のハビタブルゾーンの理解を深めることを目指している。この目標達成のため、次の 3 つの科学目標を設定した。

### 科学目標 1「二酸化炭素と水の散逸の分離」

水の散逸率や二酸化炭素の大気圧は、非磁化惑星のハビタブルゾーンを規定する重要なパラメータであると考えられており、過去に遡って惑星表層環境の変遷を議論するには、二酸化炭素と水の宇宙空間への散逸量を別々に推定することが必須となる。しかし、二酸化炭素と水の散逸を区別して測定することは難しく、弁別できていないのが現状である。

そこで、本ミッションでは、第 1 の科学目標として、二酸化炭素と水の散逸を分離して測定することを目指している。二酸化炭素と水の散逸量を弁別して測定するためには、炭素と酸素の散逸量を分離する必要がある。ここでは、新しい高質量分析器を開発・採用し、ブレイクスルーをもたらしたいと考えており、この科学目標達成のための成功基準は、C, N, O を含む全成分を分離し、水と二酸化炭素の各総流出率（およびその太陽風・太陽放射変動への応答）を明らかにすることである。多様な流出機構を網羅し、C, N, O に関わる粒子種を全て分離する高質量分解能観測を実現すると同時に、一部の粒子種については、撮像による全量観測とその場観測による詳細観測の併用でこの目標を達成する計画である。

### 科学目標 2「謎を解く鍵となる大気散逸機構の理解」

第 2 の科学目標は、謎を解く鍵となる大気散逸機構の理解である。最近の MEX の観測から従来は流出が難しいと考えられていた分子イオンの大量散逸が示された。また、衛星電位による観測の制約上、測定できていない低エネルギーイオンが現在観測されているよりも 1 桁程度大量に散逸しているのではないかという指摘もあるが、こうした低エネルギー粒子の散逸をひきおこす物理機構はわかっておらず、大気進化を考える上で解明せねばならない大きな謎となっている。この謎を解く鍵を握ると考えられている太陽風および太陽放射に誘導された大気散逸には多くの物理機構が提案されており、主なものに、電離圏イオン流出、イオンピックアップ、スパッタリング、ジーンズ流出、光化学反応による流出などがある。この中でも電離圏イオン流出は、有力と考えられている散逸機構である。衛星のポテンシャルコントロールを行っていない従来の探査機 (MEX 含む) では、電離圏イオン流出を測定することは困難であるが、大量の流出を間接的に示唆する観測例もあり、低エネルギーイオンの散逸は、太陽風から電離圏イオンへの運動量輸送の重要性を示唆している。この科学目標達成のための成功基準は、大気散逸の全体像と詳細特性を同時に捉えることによって、惑星起源の低エネルギー粒子の散逸機構を明らかにすることである。このために本探査計画では、イオノポーズ付近のクローズアップ観測を実現する迷光除去機構を持ったカメラを新規開発することを提案している。

### 科学目標 3「太陽変動への応答の理解(過去への演繹)」

現在の太陽活動 11 年周期の間に、EUV 放射強度は平均的に約 3 倍変化する。また、太陽風流束は、CME (コロナ質量放出) や CIR (共回転相互作用領域) 到来時に 1 桁以上変化する。一方で、様々な年代の主系列星の観測により、太陽の平均的な EUV 放射強度は 35 億年前には約 6 倍、40 億年前には約 10 倍強かったと推測されており[Ribas et al., 2005]、太陽風流束については約 20-50 倍強かったと推測されている[Lammer et al., 2003]。火星が劇的な気候変動を経験した時代(35-40 億年前)まで遡って、大気散逸および大気進化の歴史を外挿して評価する事は、現在の火星における大気散逸の観測によって十分に可能と考える。

このようなこれまでの観測を鑑み、本探査計画では、特に重要性が指摘されながらも観測的によくわかっていない電離圏イオン流出、観測的な裏付けのない 7 乗則(大気散逸率 $\propto$ (EUV flux)<sup>7</sup>)が進化の議論によく使われるスパッタリング、および理論予測間に大きな不確定性を持つ光化学反応による流出に注目し、各々のメカニズムの太陽変動への応答を理解することを第 3 の科学目標としている。そのための成功基準としては、火星軌道での常時太陽風・太陽放射モニターと大気散逸との同時観測が必須であり、これを 2 機のオービターで実現する構想である。

以上の 3 つの成功基準を達成するためのミッション構成として、その場観測衛星(衛星 A)と撮像・太陽モニター衛星(衛星 B)の 2 機構成が最適と考える。本ミッション構成の特徴は

- ・ 撮像で全体像を把握しながら、その場観測で物理機構を解明する軌道設計
- ・ 太陽風・太陽放射変動と大気散逸機構を同時に観測し、太陽変動応答を把握の 2 つである(図 1)。なお、ミッション実施時期については、過去への演繹のために、太陽活動の変動が大きい太陽活動極大期(2024 年頃)をミッション期間に含むことが望ましいと考えている。

### 3. 成果その 2: 目標達成に必要な測定器群の整理

火星大気散逸のその場観測を行う衛星(衛星 A)に搭載予定の観測機器は次の通りである。

機器名称	主な目標諸元／観測対象	実績等
超熱的イオン質量分析器 (STIMS)	エネルギー範囲: 1 eV - 100 eV 質量分解能: C, N, O の分離が出来る事	
低エネルギーイオン質量分析器 (MSA)	エネルギー範囲: 5 eV - 40 keV エネルギー分解能: 10% 質量範囲: 1-64 amu 質量分解能: $m/\Delta m = 40$ (<15 keV); $m/\Delta m = 15$ (>15 keV)	MMO MPPE-MSA
熱的イオン質量・速度分布測定器 (IMVS)	イオン密度: $10^2-10^4 /\text{cm}^3$ エネルギー範囲: 0.01 - 数eV	e-POP (カナダの衛星)

イオン質量分析器 (IMS)	TOF型 マルチターン方式 エネルギー範囲: < 1 eV 質量分解能: $m/\Delta m = \sim 4,800$ (11cycles)	大阪大学と協力
中性ガス質量分析器	中性大気の高質量分解観測 (観測対象: H, H <sub>2</sub> , He, C, N, O, Ne, CO, N <sub>2</sub> , NO, O <sub>2</sub> , Ar, CO <sub>2</sub> と同位体)	国際協力により調達? (フランス、スイス、カナダが候補)
ラングミュアプローブ	電子温度: 1000 K - 15000 K 電子密度: $10^3 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$	「あけぼの」TED 「のぞみ」PET
低エネルギー電子計測器	加速電子等	MMO, MMS, SCOPE
磁場計測器	磁場ベクトル	MMO MGF
電場・プラズマ波動観測装置	低周波受信 周波数: DC~50kHz 衛星電位計測: -50V~+50V サウンダー 周波数: 30k~10MHz (掃引) 感度: -190dBW/m <sup>2</sup> Hz (銀河雑音レベル)	MMO PWI 「のぞみ」「かぐや」 (サウンダー)
ポテンシャルコントロール	低エネルギーイオンの観測を可能にするための衛星電位コントロール	ヨーロッパ製 field emission (Geotail、Cluster)

火星大気散逸のリモートセンシングと太陽変動モニターを行う衛星(衛星 B)に搭載予定の観測機器は次の通りである。

機器名称	主な目標諸元/観測対象	実績等
流出大気撮像カメラ	流出する大気・プラズマの全体像の撮像 (EUV: O <sup>+</sup> , N <sup>+</sup> , C <sup>+</sup> , H, O; UV: C, CO, CO <sup>+</sup> , CO <sub>2</sub> <sup>+</sup> ; VIS: O <sub>2</sub> <sup>+</sup> )	「のぞみ」XUV 「かぐや」UPI/TEX
水素吸収セルイメージャー	・散逸大気 D/H 比 ・H の高度分布	「のぞみ」UVS
太陽風モニター	太陽風プラズマ エネルギー範囲: 1 eV - 25 keV 質量分解能: $m/\Delta m=5$ 惑星間空間磁場 ENA (観測対象: H, O)	従来型と同程度
太陽放射モニター	EUV/UV 領域での太陽放射	

#### 4. WG 独立の経緯

2011年9月までの間、火星大気散逸探査検討チームは、MELOS WGのサブグループの一つとして検討を行ってきた。この間、2011年2月のWG全体会合にて、ISASとJSPECの両方にWGを持つMELOS WGとしては、ランダーを必須とする複合探査計画を推進し、主科学目標もランダーと親和性のよいものを選択することを大方針とする、との提示があった。オービター2機構成案を必須とする大気散逸サブグループにとって、科学目的に基づく最適化とは別次元でランダーを前提とするミッション検討をすることは、リソース的に厳しいことは明白であった。そこで、2011年9月のMELOS WGにおけるオービター選定ヒアリングにおいて、「『ミッシ

ン規模の相対的コンパクトさ』『着陸機との親和性のよさ』で評価された気象オービター提案が、MELOS1 オービターにより適している」との結論が出たのを機に、MELOS WG からは分離し、大気散逸の科学目標の実現に最適化したミッションを検討するための WG を、独立して宇宙理学委員会に設立提案することを決定した。

### iii. 火星着陸探査の検討成果(主として JSPEC 宇宙探査委員会経費による活動)

#### 1. 火星着陸生命探査の検討の経緯

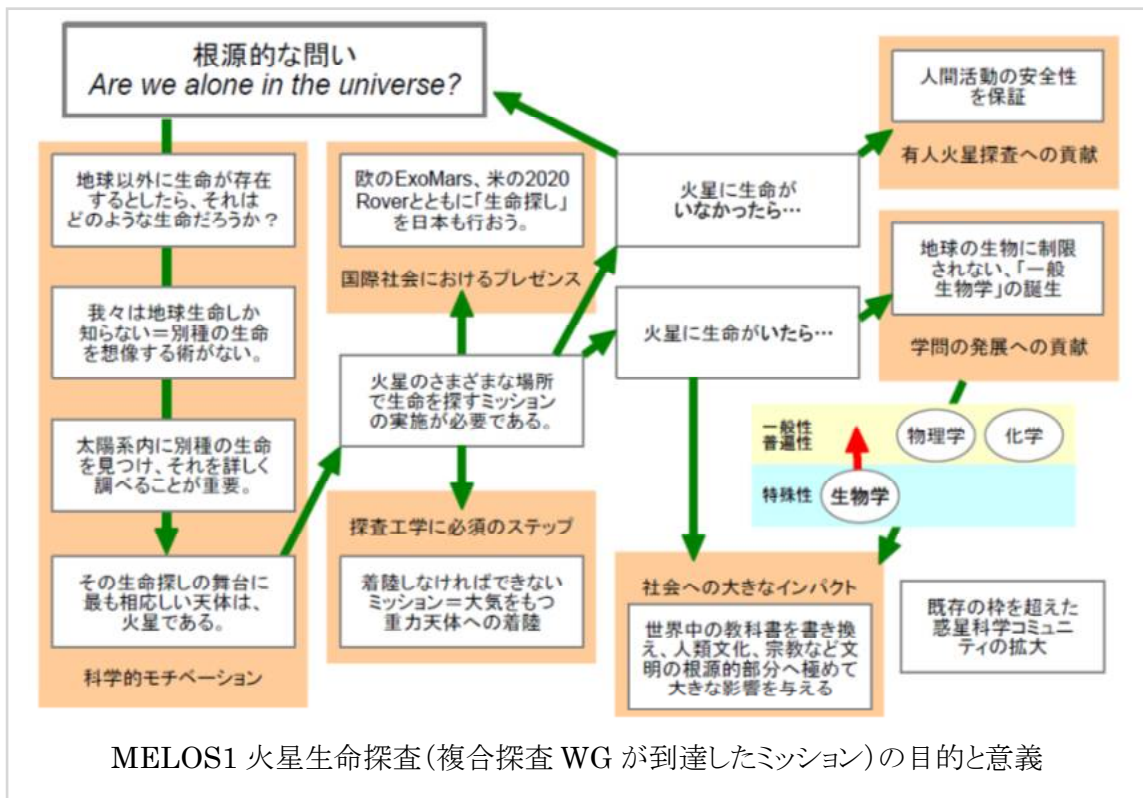
火星複合探査 WG が発足した 2008 年当時、「生命探査」という目標は、実は含まれていなかった。「生命」を無視していたわけではなかったが、有識者の見解が地下数 km 深部を探査する必要性を指摘するなど「極めて実現困難なミッション」に見えたためである。ところが火星大気中におけるメタンの存在が示唆されるようになり、さらに地球において「メタンをエサとする細菌の発見」が報じられた。こうして火星の深部のみならず、地表付近でさえ「不毛の大地ではないのでは」という考えが浮上し、2010 年 4 月にアストロバイオロジーのグループが「火星生命探査サブグループ」として正式参加した。生命探査のグループは極限環境生物学会などのバックボーンをもち、その知見から「地球の微生物であっても、火星環境においてある一定期間生存することができるし、そこに根づくことも可能なはず」と主張している。

WG はいちど「1 オービター+1 ランダー(またはローバ)」計画に気象オービターを選定したのだが、それにもとづく工学メンバーの規模見積もり・粗い資金推算ではそれとて「中型ミッション」のキャップに収まりそうもないという結論であった。そこでさらに、「オービターなし、着陸のみのミッション」とした場合にどのような魅力的な案があり得るか、それを探る中で浮上してきたのが「ローバを用い火星生命探査を行う」案だったのである。

#### 2. 成果その 1: ミッションの科学的な意義と目標の検討

WG では火星着陸「生命」探査の科学的な意義・目標を検討し、明確化してきた。「火星で生命を探す」などという、「バクチのような」とか「一般ウケをねらった」という批判がありがちである。前者については、「いるかいないかをはっきりさせる」のは科学者の任務である、特に 2030 年代に火星有人探査を行おうとするならなおさらである、と主張できる。人類と火星の関わりを考えたとき、「火星に生命がいるかいないか、過去にいたことがあったのか」を明らかにするというのは、火星探査から開発・利用への道筋において避けて通れない課題といえる。また「一般ウケ」批判に対しては、WG が 2010 年に携わった「火星:ウソカラデタマコト」展において、決して生命探査だけが高得票ではなく、提案したすべてのサイエンスがいずれも好意的かつ真剣に受け止めてもらえることがよい反証となるだろう。生命探査はキワモノでも一般ウケするだけのネタでもなく、きちんと、one of sciences として受容されているのだということを、ここで強調しておきたい。





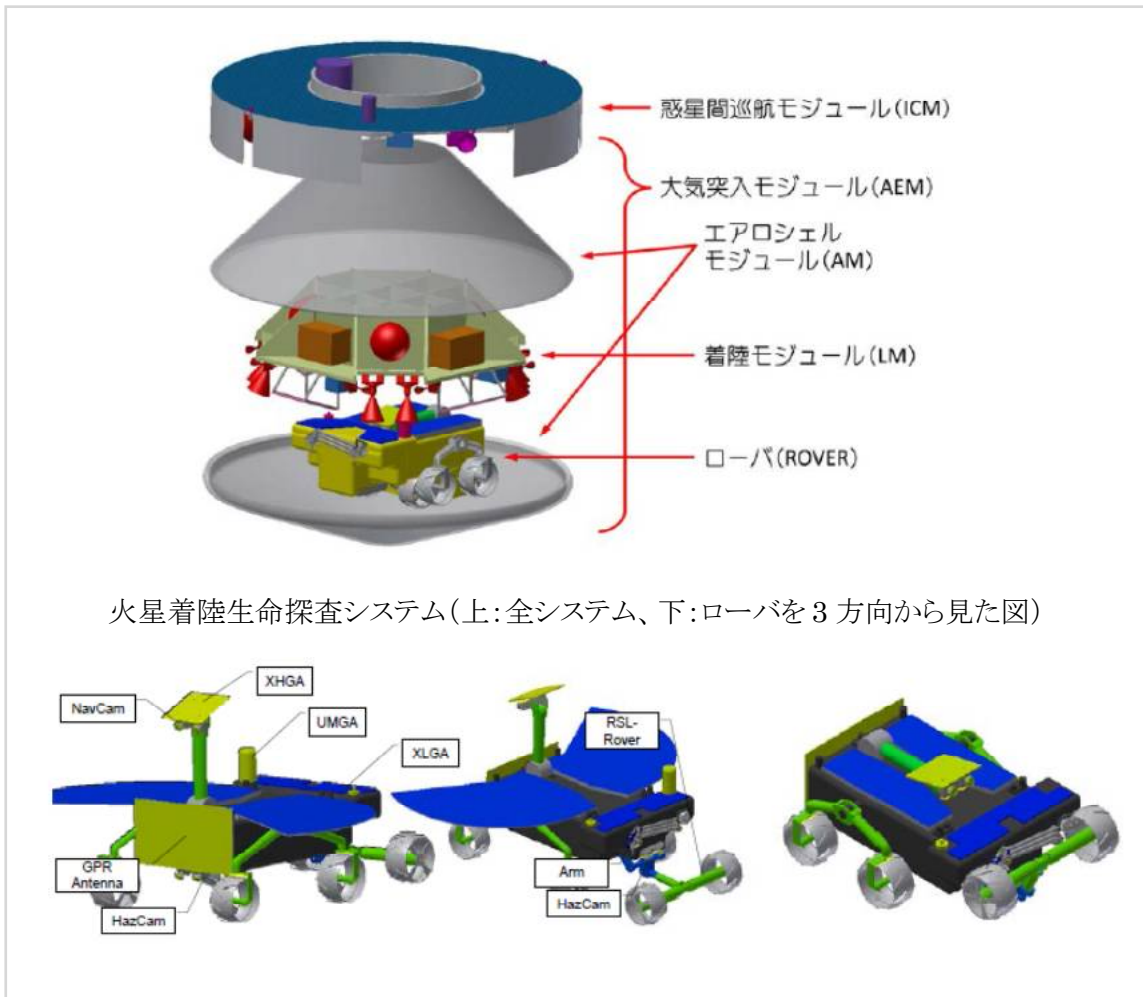
### 科学目標1: 火星生命の「有無」を結論づける

過去の火星着陸探査で「生命」が見つけれられていないことをもって「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。したがって、火星地表の中でもできるだけ生命存在の可能性が高い地点を選びそこに到達し(要求 A)、少なくともアタカマ砂漠で生命を検出できる感度の実験を実施し(要求 B)、それにもとづき結論を得る必要がある。また生命らしきものが見つかった場合に、それが生菌であるか死菌であるか、単なる有機物の塊かを見分ける必要がある(要求 C)。

### 科学目標2: 生命の有無と環境とを関連づける

科学目標1の結果が「あそこでは生命が見つかったが、こちらでは生命が見つからなかった」であった場合、その理由を説明する必要がある。土壌の機械的性質か、水分含有量か、周辺大気微量成分か、気温や日射量か、そうした要因を生命の有無とともにきちんと記載する必要がある(要求 D)。そうした情報にもとづけば、火星生命について(それが見つかった場合)その性質や地球生命との差異を研究するための将来ミッションが、火星のどこへ降り立てばよいのかを考えやすくなる。有人探査のポイントも、当然こうした情報に頼ることとなる。





火星着陸生命探査システム(上:全システム、下:ローバを3方向から見た図)

### 3. 成果その 2: 火星着陸機(ローバ)および搭載機器の検討

要求 A を満たすためには火星地表へ安全に着陸し、周囲をながめ、生命探査に適した地点へと移動してゆく手段が必要である。第 1 のステップである「安全に着陸」のために、図の上半分に示すような探査システムを検討した。ひとたび安全に着陸したあとの移動は探査ローバ(図の ROVER)でそれを実現する。想定しているローバの規模は質量 150 kg 程度、Mars Pathfinder (MPF)のソジャーナよりだいぶ大きく、Mars Exploration Rover (MER)に匹敵する規模のものとなっている。ローバ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を下ろす必要がある。そのためのシステムは、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。探査システム全体として科学目標を達成すると同時に、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(図の ICM)、大気突入、空力誘導、緩降下(図の AEM)、着陸(図の LM)といった工学のキーとなる技術を火星において実証するものと位置づけ検討してきた。

要求 B を満たすためにわれわれは火星用「蛍光顕微鏡」を用いる。この特徴は、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ことに

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  $\mu\text{m}$  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。

要求 C を満たすための蛍光色素の組合せを検討し、SYTO24, PI, CFDA-MA を用いれば 各々による染色・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・区別することができることを見出した。また火星環境では、低圧により溶液の水分が素早く蒸発してしまう・低温により凍結してしまう、という二つの懸念材料がある。溶媒として純水ではなく、グリセロール 66.7 %水溶液を用いると凝固点が $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ となり、ある程度の時間は蒸発も問題とならないことを実験室で確認した。

要求 D を満たすために、以下のオプション機器を検討してきた (各機器の詳細は、MELOS1 火星探査提案書ドラフト版にまとめられている)。

- 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ルカメラ
- 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

#### 4. 成果その 3: 着陸候補地点の検討

WG ではリモートセンシング・データを解析し、その中から生命探査に適した着陸候補地点を探す作業も実施した。そもそも「生命探査に適する=生命が存在し得る場所」とはどういう場所かに立ち戻って、検討を実施したのである。

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生命体でも生存できる環境が、少なくともかつては存在していた (そこに生命体が発生していても不思議ではない) ことを明らかにした。いったん生命体が発生すると、特に微生物の突然変異速度は環境変動に比べはるかに速く、低温化・乾燥化に適応した生命体が生き残る可能性が高い。火星土壌では過塩素酸塩の検出も報告されていて、これは多くの生命体にとっては消毒液として振る舞

う。ところが地球では過塩素酸還元バクテリアすら見つかった( Salamone and Nerenberg, 2006)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のである。さらに火星の極端な乾燥環境さえ、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かった)。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、液体の水があるのならその存在地点、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に至った。

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おこして、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。

この他の有望な候補として、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(メタン放出との関連の可能性が考えられる)が挙げられる。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。

## 5. 火星着陸ミッションの提案へ

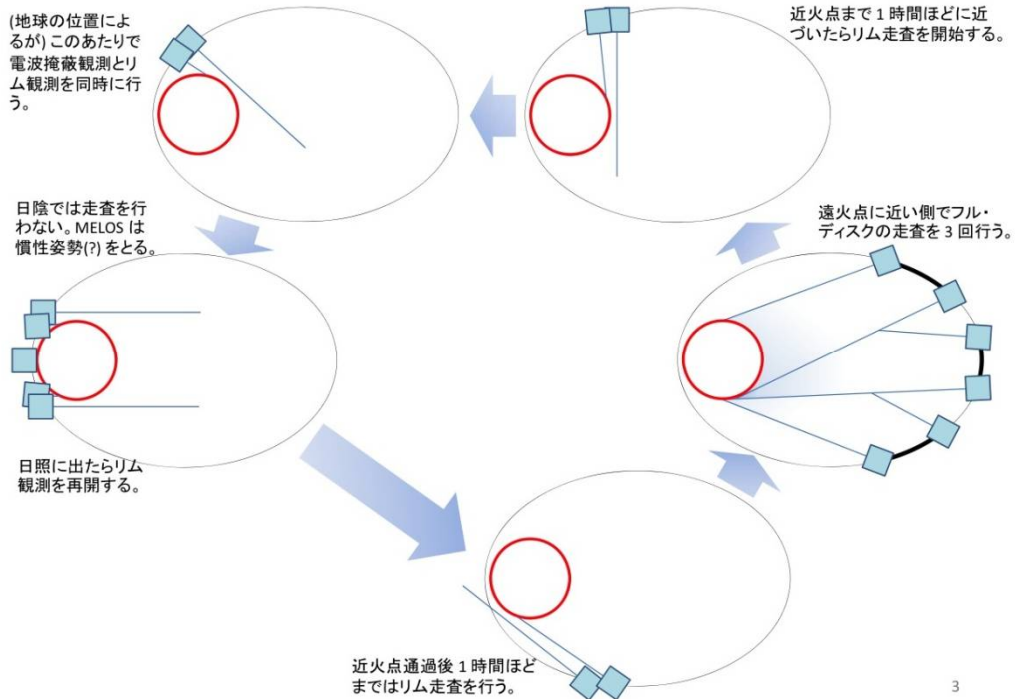
当 WG での活動成果は 2014 年度に ISAS 宇宙工学委員会「火星着陸探査技術実証」WG へと受け継がれ、2015 年 2 月に次期戦略的中型ミッション AO に対してミッション提案応募することができた。紆余曲折はあったものの、理学コミュニティとの十分な議論を下地に、工学チームの精力的な検討が加わって、2 本部にまたがる WG として活動してきた最大の成果といえるものである。

## 付録： 気象オービター搭載機器の検討結果

**偏光カメラ：** 火星ダストの研究においてはこれまで可視カメラ画像が多く用いられてきた。しかし浮遊ダストと地表ダストの区別がつきにくく、縁のはっきりしたダスト雲しか検出できないため、少なからぬダスト現象を見逃してしまうという問題があった。赤外分光は浮遊ダストと地面を区別できるが、サンプリングが空間的に疎らであったため惑星スケールの現象しか見ることができなかった。そこで我々は、可視波長での精細な偏光撮像によって浮遊ダストと地表ダストを区別する戦略をとる。地表・雲・ダストの偏光度がそれぞれ異なる太陽位相角依存性を持つことを利用して、1 周回中の連続撮像により位相曲線を描いてこれらを分離するとともに、ダストの粒径や数密度の情報を抽出する。また1回の撮像ごとに、場所による偏光度の違いからも地表・雲・ダストをある程度分離し、1 周回中の時間変化をとらえる。波長は 400 nm(青)と 600 nm(赤)の 2 波長、画素解像度は 15km×15km 程度とする。1000x1000 画素の 2 次元検出器を 4 象限に分割してそれぞれに異なる方向の偏光板を置き、ストークスパラメータ  $I \pm Q$ 、 $I \pm U$  を同時取得する。エレキと検出器には「あかつき」IR1 カメラと共通のものを使い、実績を活かして開発する。偏向撮像によるエアロゾルパラメータ導出の技術検討の一環として、Hubble 望遠鏡による火星の偏光撮像データを解析したほか、ハワイの望遠鏡に取り付けた偏光撮像装置による惑星観測を科研費で実施している。

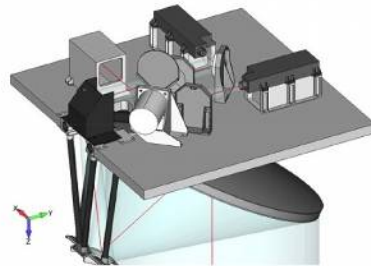
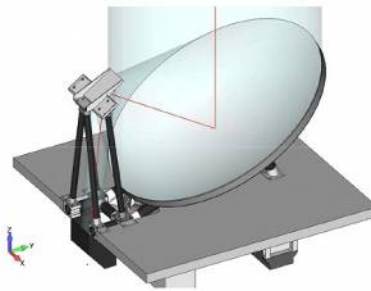
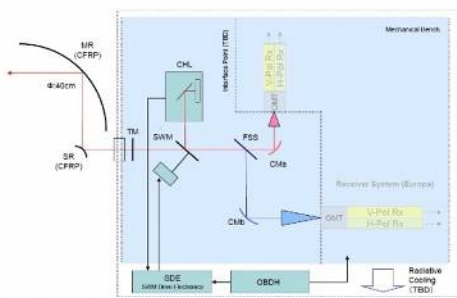
**サブミリ波サウンダ：** 3 次元力学場や微量気体の情報を得る。サブミリ波には赤外分光と違ってダスト雲の内側も外側も同じように計測できるという利点がある。地球観測衛星に搭載されたサブミリ波サウンダが従来行ってきたようなリモ観測に加え、このミッションでは直下視で視線方向を 2 次元走査することにより、数百 km の水平分解能でグローバルな 3 次元情報を得る。観測対象は気温の 3 次元分布、水蒸気の 3 次元分布、同位体 ( $H_2O$ ,  $CO$ )、微量気体 ( $CO$ ,  $H_2O$ ,  $H_2O_2$ ,  $HO_2$ ,  $O_3$  など)、地表面温度と物性、輝線のドップラーシフトを利用した風速である。サブミリ波サウンダで水蒸気の長距離輸送や日変化サイクルを可視化し、これを気象場の情報と組み合わせることにより、水循環を担う気象学の素過程を明らかにすることができる。水以外の微量気体の計測では、ダストや雲の分布、3 次元気温情報が同時に得られることを生かして、粒子表面反応など気象場と結合した大気化学の理解を目指す。直下視スキャンにおける観測シーケンスを検討した結果、3 時間ごとにおよそ  $30 \times 30 = 900$  地点のデータが得られる見込みである。観測周波数は 550-620 GHz を想定するが、観測周波数とバンド幅はなお検討中である。アンテナ直径は 40 cm、ビーム幅は高度 300 km から大気リムを見た場合には 3 km、8 火星半径から直下を見る場合には 30 km 程度である。アンテナのスキャン方式としては、南北方向はアンテナの 1 軸ジンバル、東西方向は衛星の姿勢制御で担う方針である。重量・電力はそれぞれ 18 kg、40 W 程度である。予備的研究として、複合材を用いた軽量リフレクタの鏡面サンプルの試作、走査機構が無い場合の機械・熱解析などを NICT の予算で実施した。開発体制としては、国内のみならずドイツ Max-Planck、スウェーデン Chalmers 大学の研究者などとチーム構築を検討してきた。現在はこの多くのメンバーが木星探査 JUICE 搭載 SWI の開発に携わっている。火星用サブミリ波サウンダの検討結果は査読論文として出版された

(Kasai et al., Overview of the Martian atmospheric submillimetre sounder FIRE, *Planet. Space Sci.*, 63, 62-82, 2012)。



3

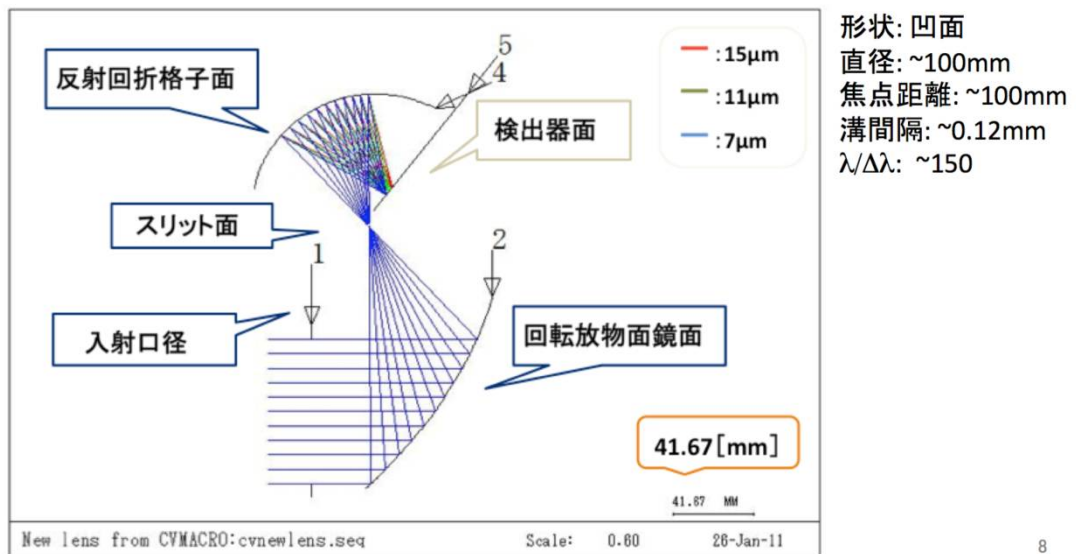
### サブミリ波サウンダの観測シーケンスの例



4

### サブミリ波サウンダ光学系

**中間赤外カメラ：偏光撮像**と相補的な観測として、昼夜区別なくダストや雲の撮像を行うために中間赤外カメラを搭載する。直下視による水平マッピングに加え、赤外ではダストの光学厚みが比較的小さいことを生かして、リム撮像により地表付近の濃いダスト領域まで含めたダストの高度分布を得る。Mars Reconnaissance Orbiter の観測により地表から離れたところにダスト混合比の極大が存在することが報告され、従来想定していなかったダスト輸送プロセスの存在を示唆しているが、中間赤外カメラはこのような高度分布を作り出す 3 次元ダスト輸送の解明のための強力な手段となる。大気観測に加え、全ローカルタイムで地表温度をマッピングすることにより、地表の熱慣性の情報が従来より高い精度と時間分解能で得られる。「あかつき」に搭載された非冷却ボロメータカメラ LIR の実績を生かして開発することを考えているが、シャッターが必要な LIR 製 VOx 検出器に代わって ULIS 製アモルファスシリコン検出器を使うことも検討している。LIR は単色であったが、大気温度導出のために新たに低分散分光の機能を付与することを考え、科研費にて F1.0 の明るい金属製凹面回折格子を製作して分光性能を確認した。また UNIFORM 衛星搭載中間赤外カメラ BOL のプロトモデルを利用し、アモルファスシリコン検出器で火星大気程度の低温物体を撮像した際の温度分解能を確認する実験を行った。



分光機能を付与した中間赤外カメラの光学系の概念図

**電波掩蔽：**電波掩蔽による気温計測は観測地点が地球から見た火星の縁付近(朝方と夕方)に限られるものの、高精度(誤差0.1K)かつ高分解能(1km)という特質がある。境界層対流の指標となる地表付近の大気安定度のモニターや、微細な鉛直伝搬波動の検出が可能となる。サブミリ波サウンダによる気温計測の精度評価にも資する。この観測には「あかつき」の実績を生かす。

**望遠カメラ:** 偏光カメラでは分解できない小規模なダスト現象の観測のために、限られた地点を高解像度で撮像する狭視野の望遠カメラを搭載することも検討している。画素解像度は 150 m で、1000x1000 画素の 2 次元検出器を用いる。赤と青の 2 色のフィルターを切り替えるか、あるいは赤 1 色とする。

**近赤外分光撮像:** オプションとして近赤外分光撮像装置の搭載も検討した。CO<sub>2</sub> コラム量を定量することにより、地表気圧の全球マッピングを初めて実現する。ダストや水蒸気の輸送に関わる地表付近の風を推定するうえで地表気圧は重要である。地表気圧分布はまた、他の方法ではとらえられない地表付近の様々な気象現象を可視化しうる。このような計測は Mars Express 搭載 OMEGA で散発的に行われているが、狭い視野で間欠的に短冊状のマッピングをするのにとどまっており、気象学的な情報は限定的である。放射スペクトルから CO<sub>2</sub> コラム量を十分な導出するにはハードウェア・ソフトウェア両方で様々な課題があるため、これらについて OMEGA チームと意見交換し、実現の折には協力を得る方針となった。近赤外分光撮像はまた、地表付近の水蒸気の詳細なマッピングを可能にし、大気-地表間の水循環の地域性を研究するための強力な情報をもたらす。

**中間赤外分光:** オプションとして、ダストや氷雲や気温の 3 次元分布を計測するための中間赤外分光装置についても検討した。Mars Reconnaissance Orbiter に搭載された Mars Climate Sounder (MCS) の開発チームから MCS 後継機を我々の周回機に搭載したいという提案もあり、実現の折には国際協力の可能性がある。とくにダストの計測精度が向上することには大きなメリットがある。