

(B1)提案タイトル「火星ペネトレータによる表層環境と内部構造探査」

(B2)代表者 白石浩章（宇宙航空研究開発機構）

(B3)共同提案者

小林直樹（宇宙航空研究開発機構）

石原吉明（国立環境研究所）

山田竜平（国立天文台）

鈴木宏二郎（東京大学）

田中智（宇宙航空研究開発機構）

#### (B4)提案するミッションの概要

火星表層環境および内部構造を分散して観測する「ペネトレータミッション」を提案する。火星探査用ペネトレータは表層 2~3m に潜り込むプローブ本体に加えて、表面に残存するアフターボディ構造を有することでそれぞれに科学機器を搭載して「内部構造」と「表層環境」を同時に観測できるシステムとする。貫入する本体には内部構造および表層直下の物理特性・化学組成を観測するために地震計、加速度計、ガンマ線-中性子線分光計・熱伝導率計・温度計を搭載候補とし、アフターボディには圧力計、湿度計、温度計、磁力計、モニタカメラ等を搭載候補として表層環境をモニタする。また、アフターボディ構造には太陽電池パネルと通信用アンテナの他、VLBI 電波源を搭載して周回衛星とのデータリレー中に火星の自轉變動計測を実施する。さらに、火星大気中にエントリー降下中の観測も実施することで大気構造・磁場などに関する情報も取得する。ペネトレータは 4 機構成として火山地形や断層地形が密に存在すると考えられる領域に分散して設置する。特に、比較的最近まで火成活動が起こっていた（クレーター年代学的に若い）と考えられている Elysium 地域や、断層地形の分布から現在も地震活動が起こっていることが予想される Tharsis 地域については、過去の火星軟着陸ミッションでも探査が行われていない高い標高地点にも対応するため有力な設置候補点と考えている。火星大気による減速を充分に利用して低高度地域に軟着陸せざるを得ないランダーに比べて、高速突入で設置できるペネトレータの特色を生かすことができる。そのため、内部構造の探査および固体部分と結合した表層環境の変動を多点で同時モニタできる点も踏まえて過去に例のないミッションを構成することができる。図 1 に火星ペネトレータモジュールの概略図と搭載機器案を示す。

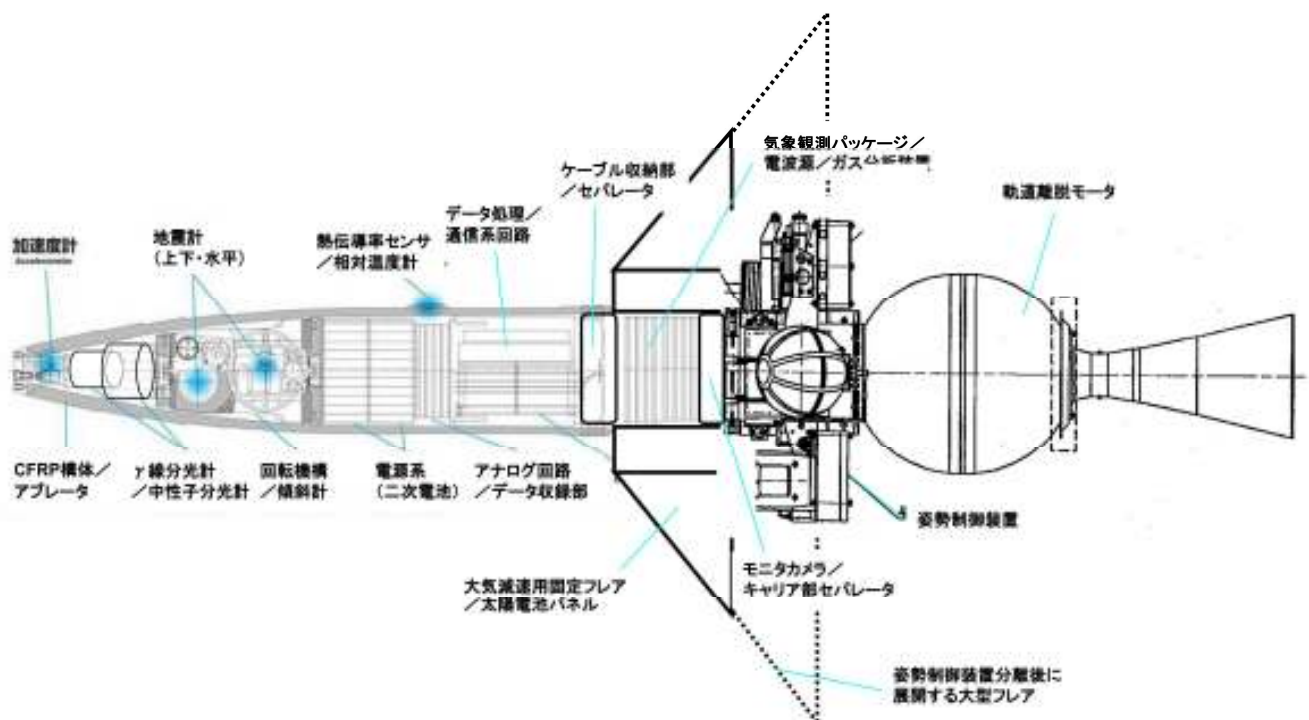


図 1. 火星ペネトレータモジュール案：現行の月探査用ペネトレータの開発技術を活用してサブシステムの構成

と搭載機器を最小改良とした場合（点線部：姿勢制御装置分離後、大気減速効率を上げる展開型大型フレア）

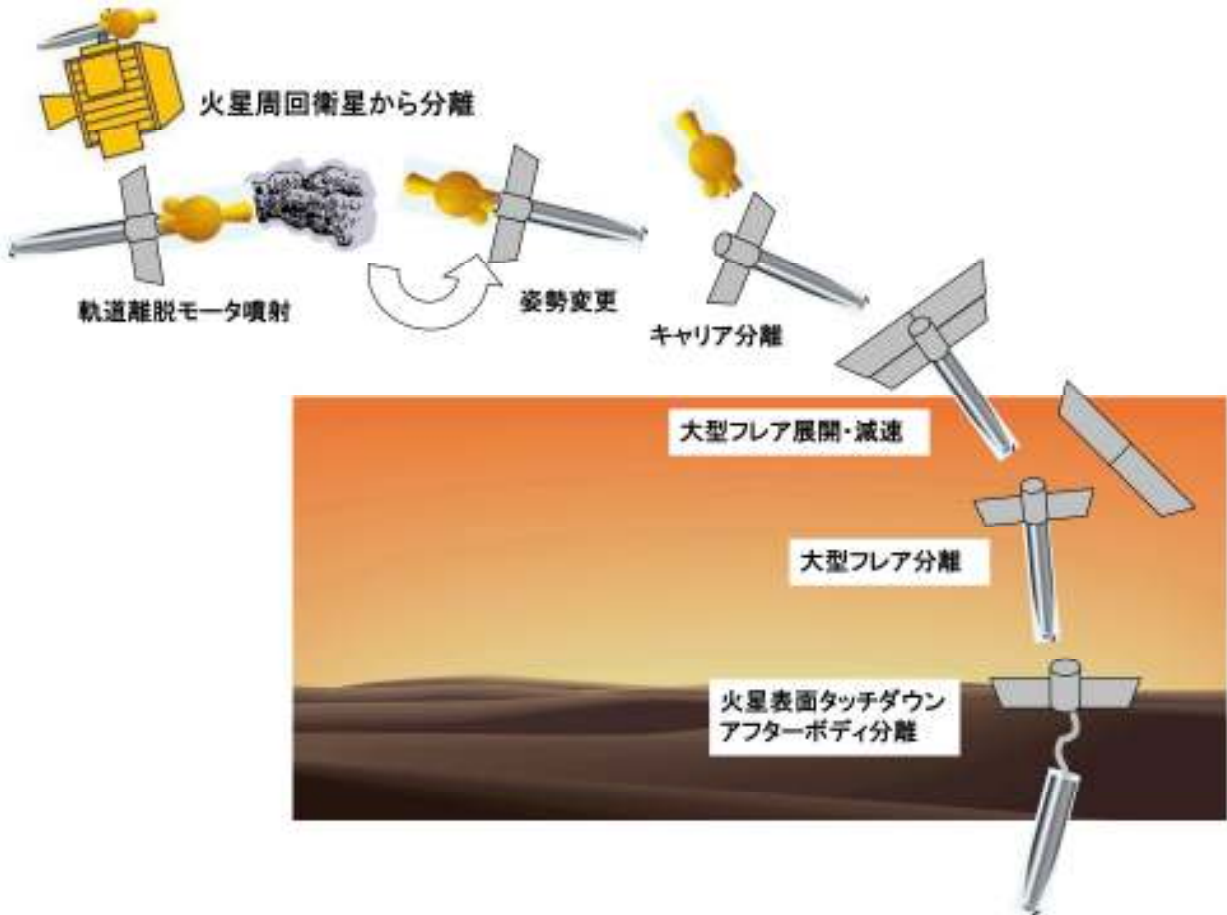


図 2. 火星ペネトレータの投下設置シーケンスの概略

### (B5) ミッションの科学目標および長期的展望における本提案の位置づけ

Elysium 地域のようなクレーター年代が比較的若い地域周辺に 100~300km 間隔でペネトレータを配置し、火星内部の地震活動度（発生頻度・マグニチュード・地域性）を調べる。火星における地震探査の試みはバイキング着陸機による例があるが、観測機器の性能や設置環境の制約によって内部地震を同定するには至っていないため、隕石衝突起源イベントの頻度・サイズ分布と合わせて火星の地震発生状況を知ることが第 1 の目的となる。配置された測線距離および内部地震の規模によって地殻—上部マントルに至る弾性的構造を調べる。特に、浅部の主要な物質境界面となる地殻の厚さ（モホ面）と密度の決定は地球型惑星の分化過程の理解のために重要な物理量である。つまり、第 1 義的に地殻厚さは初期マグマオーシャンの深さとスケールに制約を与えることができる。また、内部地震の発生メカニズムや火山活動の有無を調べることは現在の火星内部のダイナミクスや表層への物質輸送を理解するために必要な情報となる。その際、火山活動に特有なガス成分量や核種を検出することができれば、現在の火山活動を特定できるかもしれない。さらに、衝突起源の地震イベントは、現在の火星への隕石衝突頻度とサイズ分布を把握すると同時に、比較的大きな衝突イベントが検出できれば地殻—上部マントル構造と水平方向の不均質性を知るうえで有力な手段となりうる。

他の領域に比較して最近まで火成活動が起こっていた領域ではスポット的に高い地殻熱流量の値が期待できるため、その上限を抑えるだけでも火成活動の有無や時期についての情報が得られる。より広域的な地質ユニットに対しては、熱流量および地形—重力データから弾性的リソスフェアの厚さと地質学的タイムスケールでの熱史に関する情報を引き出すことができる。また、過去の火星周回衛星による熱慣性・放射特性マップやγ線分光計データの Ground Truth として、表層物質の熱伝導率や貫入減速時の加速度プロファイルはその物理特性を理解する基礎データであり、氷層や凍土の有無やレゴリスの層序を理解することに利用で

きる。さらに、熱流量の長期観測は表層構造の季節変動についての基礎データを与える。

周回衛星との連携観測として、ペネトレータに搭載した電波源によって火星の回転運動を測定してコアのサイズと様態について制約を与える。周回衛星には光学カメラ(分解能 2~3m 程度)を搭載して、地震観測中に隕石が衝突して形成されたクレーターや地すべりの発生位置を検出する。同定されたイベントは既知の震源位置として地震波による内部構造解析に利用することができる。

将来の火星探査ミッションに対する展望として本提案は本格的な多点ネットワークミッション(全球に地球物理観測装置を多点展開)のプレカーサと位置づける。火星内部地震・隕石衝突の発生頻度やマグニチュードの情報はその後の火星探査において最適なネットワーク配置の検討、観測機器の仕様決定や運用計画の策定に重要な情報となる。また、表層の気象観測量(温度・圧力・磁場など)の日周・季節変動データは広帯域地震計にとっての環境ノイズ源でもあることから、波形データの校正に極めて有用であるとともに将来の広帯域地震探査において展開・設置方法を最適化する際の基礎資料にもなる。表 1 にミッションの科学目標と観測に必要となる候補機器、表 2 にサクセスクライテリアを示す。

表 1. ミッションの科学目標と候補搭載機器

課題	観測目標	観測機器の候補
地震活動度	地震発生頻度とマグニチュード、脈動(背景地動雑音)レベル、断層運動・地すべりの有無、隕石衝突頻度とサイズ分布、減衰特性	地震計、圧力計、温度計、光学カメラ(周回衛星搭載)
内部地震の発生機構	地震の発生メカニズム、断層地形・火成活動との関連性、内部ダイナミクス・応力場との関連性	地震計
火成活動	火山性地震の検出、火山ガスの検出・成分同定、マグマの移動・噴出	地震計、磁力計、ガス分析装置
地殻-上部マントル構造	内部地震・隕石衝突イベントによる地殻構造(位相速度解析・水平方向の不均質性)、レシーバー関数による地殻厚さ、上部マントルの速度構造・表面波による位相速度解析、震源位置の決定、マントルトモグラフィ	地震計
深部マントル-コア構造	火星の自転速度変動・章動、季節変動に伴う揮発性物質の移動・循環	VLBI 電波源(周回衛星にも搭載)
表層物質の物理特性	レゴリス構成物質の熱伝導率・力学的強度、レゴリス層温度の日周・季節変動、表層散乱構造と特性、揮発性物質の移動・循環、磁化特性	熱伝導率計、温度計、加速度計、地震計、磁力計
表層物質の化学組成	レゴリス構成物質の元素組成、水・氷・揮発性物質の存在度	ガンマ線-中性子分光計 ガス分析装置
大気と表層環境の特性	設置地点の気象環境・砂嵐のモニタ、設置地点上空の in-situ 観測	圧力計、湿度計、温度計、磁力計、モニタカメラ

表 2. サクセスクライテリア

	ミニマムサクセス	ノミナルサクセス	マキシマムサクセス
火星の地震活動・火成活動・内部構造	① 1 地点以上で地震観測を実施し、内部起源地震もしくは火山性地震の	① 2 地点以上で 10 個以上の火星内部地震もしくは隕石衝突起源のイベントを取得し、	① 3 点以上で 50 個以上の内部地震・隕石衝突イベントを同定して、ト

に関する科学目標	有無と活動度を明らかにする。 ② 表層の散乱構造に関する知見を得る。 (観測期間：1ヶ月程度)	設置地点近傍の地殻厚さと上部マントル(深さ2~300km)の速度構造に関する知見を得る。 ② 内部地震の発生メカニズムに関する知見を得る。 (観測期間：3ヶ月程度)	モグラフィ的手法で地殻-上部マントル構造を明らかにする。 ② 下部マントルの速度構造もしくはコアサイズと熔融状態に関する知見を得る。 (観測期間：1年程度)
火星の地表・気象環境に関する科学目標	① 1機以上で大気降下中の気象観測データを取得する。 ② 1地点以上で気象観測データを取得する。 (観測期間：1週間程度)	① 2地点以上で気象観測データを同時取得して気象変動に関する知見を得る。 ② 地震脈動レベルと温度・気圧データの関連性に関する知見を得る。 (観測期間：3ヶ月程度)	
火星表層の物性と化学組成に関する科学目標	① 1地点以上で熱伝導率・温度・加速度データを取得し、表層物質の物理特性に関する知見を得る。 ② 1地点以上で元素・ガス成分分析データを取得し、設置地点の土壌組成と火成活動に関する知見を得る。 (観測期間：1週間程度)	① 2地点以上で熱伝導率・温度・加速度データを取得し、表層物質の物理特性と季節変動に関する知見を得る。 ② 2地点以上で元素・ガス成分データを取得し、設置地点の土壌組成と火成活動に関する知見を得る。 (観測期間：3ヶ月程度)	

(B6)科学観測機器の候補およびミッション科学目標との関係

(a) 地震計

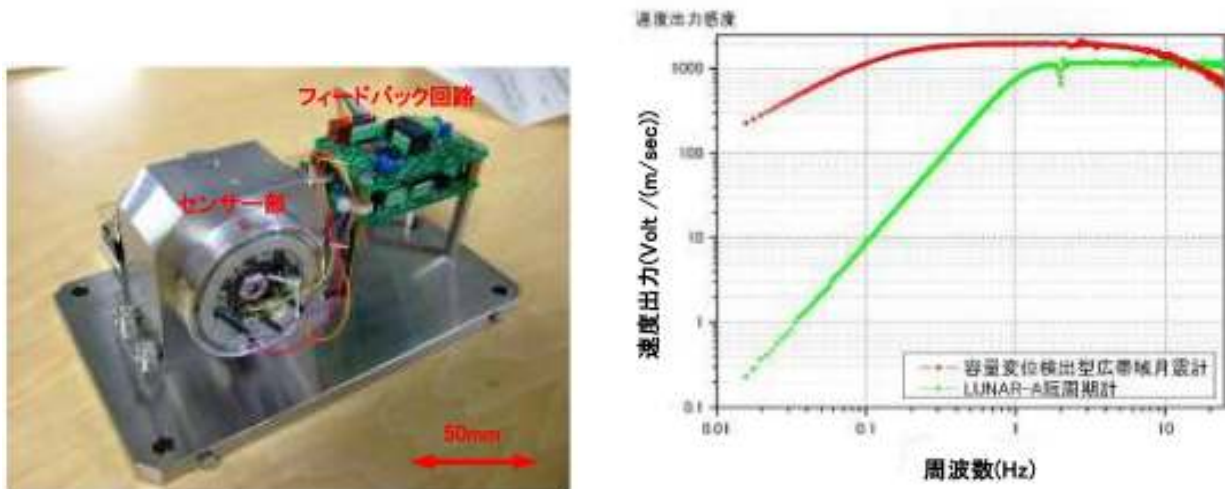


図 3. 広帯域地震計 (現行の短周期計にフォードバック回路を付加して長周期化) の外観と周波数特性

火星ペネトレータに搭載する地震計は開発済みの月探査用地震計をベースとする。つまり、動コイル型電磁出力式、固有周期約 1 秒の短周期計であるが、太陽電池パネルによる継続的な電力供給が期待できる場合にはフィードバック機構・電子回路を付加した長周期モード(低周波数側の帯域目標は 0.05Hz 程度)を付加する改良を検討する。実際の観測では供給電力・火星環境(季節・設置緯度)や地動レベルに応じて短周期モードと長周期モードを切替える。現在のところ固有周期 10 秒程度への長周期化を実現しているが、搭載リソースと科学目標とのトレードオフで観測周波数帯域・ノイズレベル・消費電力の観点で最適化を図る必要がある。

#### (b) 熱流量計 (熱伝導率計+温度計)

火星表層物質の熱伝導率および地殻熱流量を測定することで表層下数 m 程度の物理・化学特性、水-氷物質の有無、火成活動の有無、内部温度構造、放射性元素の存在度とガンマ線分光計データとの関連性などに関する知見を得る。熱伝導率の測定方式としては月探査ペネトレータ用に開発された点接触加熱法による熱伝導率センサーを第 1 候補とするが、ニードルプローブ(貫入設置後に探針を伸展)による測定の可能性も検討する。また、温度計についてはアルメルクロメル熱電対(相対温度計と白金測温抵抗体(絶対温度)の組合せ)を第 1 候補とするが、観測目標によっては、より精度の高い半導体温度計(サーミスタ)の搭載も検討する。

#### (c) 加速度計

ペネトレータが火星表面に潜り込む際の衝撃加速度を計測する。時間積分することでペネトレータの突入速度と潜り込み距離を推定することができる他、表層物質の力学的特性や層構造に関する情報を得られる可能性がある。

#### (d) 元素分析・ガス成分濃度

過去の火星ペネトレータミッションで開発・搭載実績のあるガンマ線-中性子分光計を提案する。地表下数 m に潜り込むことで背景宇宙線の影響を大幅に低減することができ、かつ線源や校正サンプルを必要としないため小型軽量化が期待できる。主要元素の定量には長い積分時間を要するため、放射性元素(U,Th,K)と水-氷の定量を観測目標とする。また、火山活動度の有無と規模を調べるために火山性ガスを定量できる装置の搭載を提案する。測定方式としてはガス吸着に伴う電気伝導度の変化を利用する半導体式、赤外吸収式、定電位電解式が考えられるが、想定されるガス成分ごとに定量するために複数の検出器パッケージとしてアフターボディに搭載する。

#### (e) 気象観測装置 (気圧・温度・湿度・磁場・モニタカメラ)

アフターボディに搭載して大気突入～貫入設置までの鉛直構造と設置地点周辺の気象情報を取得する。温度・気圧・磁場の時間変動は地震計の性能特性に影響を与える因子であると同時に地下の火成活動を反映した変動を伴う可能性があるため、同時記録はデータ解釈・校正用に役立つことができる。また、長期観測になると季節変動や砂嵐によって周辺環境が変化する可能性が高く、観測機器の設置状況にも影響を与えることを考慮して隣接地形の変化や砂塵の集積・飛散状況もモニタカメラによって把握する。

#### (f) VLBI 電波源 (ペネトレータと周回衛星にそれぞれ搭載)

火星の自転速度変動・章動とその季節変動を観測して、コアの構造・物理状態と表層揮発性物質の移動・循環に関する知見を得ることができる。

#### (g) 光学カメラ (周回衛星に搭載)

ペネトレータ搭載地震計の観測期間中に形成された火星表面のクレーターや地すべり地形の位置を光学カメラで特定し、震源位置を既知とした地殻-上部マントル構造探査に利用することで内部構造の推定精度を向上させることができる。また、ペネトレータ搭載カメラとの同時観測で砂嵐の発生状況をモニタする。

(B7) 科学目標の達成に必要な観測精度とカバレッジ

科学目標の達成に必要な観測候補機器の仕様・目標性能の一覧表を示すとともに、ペネトレータ設置地点および運用方法を説明する。

(A)観測機器関連

表 3. 搭載候補機器の一覧表と目標性能・開発搭載実績

搭載機器	目標性能	ペネトレータ搭載機器としての実績
地震計	電磁出力式動コイル型+静電容量変位検出型周波数帯域：0.05~100Hz 測定精度：10 <sup>-9</sup> [m/sec@0.1Hz]	短周期計の開発実績あるが長周期モードのハイブリッド型は試作モデル段階
熱伝導率計●	センサー：K型熱電対 ヒータ抵抗：500Ω、ドライブ電力 50mW 温度計測精度：±0.01℃	点接触加熱法の開発実績はあるが伸展プローブ法は新規開発
温度計（レゴリス用）●	相対温度計：K型熱電対（精度：±0.01℃） 絶対温度計：白金測温抵抗体（精度：±0.02℃）	LUNAR-A(日本)で開発実績
加速度計	測定範囲：±30000G、精度：±10 G	LUNAR-A(日本)で開発実績
傾斜計	測定範囲：±45°、精度：2~3°	LUNAR-A(日本)で開発実績
圧力計	測定範囲：4~12 hPa、精度：±0.1 hPa	Mars-96(ロシア)で搭載実績
温度計（大気観測用）	測定範囲：160~300 K、精度：±0.5 K	Mars-96(ロシア)で搭載実績
湿度計	測定範囲：5~100%（相対）、精度：5%	Mars-96(ロシア)で搭載実績
磁力計	測定範囲：±5000nT、測定精度：0.15 nT	Mars-96(ロシア)で搭載実績
γ線-中性子線分光計●	γ線：0.3~9MeV（H to Fe, Th, U） n線：0.01~1MeV（0.1wt% H <sub>2</sub> O）	Mars-96(ロシア)で搭載実績 CRAF(米国)で開発実績
ガス分析装置●	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , HCl, H <sub>2</sub> をTBDppmレベルで定量すること。赤外吸収、低電位電解式、半導体式の組合せ	新規開発
電波源(+ジンバル機構)●	TBD	新規開発
パノラミックカメラ(+ジンバル機構)	ペネトレータ周辺10m程度の表層地形が全方位で観察できること。	Mars-96(ロシア)で搭載実績あり

●については搭載コンフィギュレーションと観測目標によって必要精度が変更される可能性が高い機器

(B)カバレッジ（ペネトレータの設置案）

Elysium 火山周辺もしくは Tharsis の断層地形が分布する地域に各ペネトレータが 100km~300km の間隔になるように分散して配置する。前者の南部地域には約 2.5 億年前から比較的最近（~2My）まで断続的に低粘性のマグマが噴出してできた楕円状火山地形の存在がクレーター年代学と流水地形の特徴から示唆されて



いる。一方、後者は火星探査機 MGS 搭載レーザー高度計による観測データから作成された Shaded Relief Map とクレーター年代学によると「活断層」と考えられる表面地形が多数確認されているため内部地震発生の「巣」となっている可能性が高いと考えられる。いずれの地域も過去の火星軟着陸機では探査地点として選ばれなかった比較的標高の高い地域に位置している。そのため、元素分析・気象観測装置を搭載した場合には過去の軟着陸ミッションを補間するデータを取得できることが期待される。その他、比較的断層地形が多く存在している Utopia 平原の北部地域や高い熱流量が予想されている Hellas 盆地の南部等が設置点候補となるが、最終的には今後の海外火星ミッションの動向とそれらの観測結果から判断する。

### (C)母船・運用関連

ペネトレータの投下設置は二段階に分けて行なう。まず 1 機目ないし 2 機目のペネトレータを貫入設置させる。その後、先行設置したペネトレータの地震計を短周期モードで運用し地震活動度を短期間（1 週間～10 日）調査する。その結果に応じて 3 機目と 4 機目の投下地点を決定する。ミッション期間は季節変動を含めた 1 火星年程度の常時観測を目標とし、設置地点と余剰電力の状況により稼働させる観測機器の選択やペネトレータ本体を「冬眠モード」にして長寿命化させる運用も検討する。母船はペネトレータ分離後にデータリレーと季節変動を火星周回軌道からモニタする役割を担うために必須である。また、母船－ペネトレータ間の通信中にドップラー回線を介して設置貫入位置を 1～2 km の精度で決定すると同時に各ペネトレータ間の時刻同期に必要な HK 情報を取得する。

### (A6)想定する開発体制

月探査用ペネトレータの開発を担当した研究者と開発・製造を担当したメーカーを中心として体制を構築する。

#### (A)担当研究者

TBD

#### (B)担当メーカー案

（地震計） ミットヨ、東京測振

（ペネトレータモジュール構造・機構系・ジンバルなど） IHI エアロスペース

（ペネトレータ搭載通信機器） NEC、明星電気

（母船通信機器） NEC

（地震計以外の観測センサー） TBD

### (A7)実現に向けて必要となる技術課題

地震計以外の観測機器については科学目標と搭載リソースとの兼ね合いで取舍選択する必要があるため、ペネトレータシステムに関わる主要な技術課題についてのみ TRL 5 相当を達成するために必要な開発期間と経費を以下に示す。

#### (A)母船－ペネトレータ間の分離機構（2 年、5000 万円）

月探査ペネトレータ用にスピン安定型衛星を母船とした開発例はあるが、大気をもつ火星に適用するためには姿勢制御システムと軌道離脱モータを含むペネトレータモジュールのコンフィギュレーションおよび慣性諸元を変更せざるを得ない。本提案では母船は 3 軸安定型を想定し、4 台のペネトレータを搭載して火星周回軌道で投下・分離する機構を前提として新規開発を行う。

#### (B)耐熱シールド・展開型大型フレア構造（3年、3億円）

火星周回軌道を航行する母船（後に通信リレーの役割）からペネトレータが分離された後、火星大気に高速突入する際に被る加熱から保護するための耐熱シールドが必要になる。シールド方式として現行の月探査用ペネトレータ構体の表面全体にアブレータを塗布する方式と、構体先端部に傘形状の耐熱シールドを取り付ける方式が考えられる。前者は高速大気によって発生する熱を直接吸収しながら自己蒸発・気化していく方式、後者は空力加熱終了後に分離・放棄する方式である。展開型大型フレア構造は母船搭載時には収納されているが、軌道離脱モータと姿勢制御機構を分離した後に展開して大気減速の効率化と垂直貫入のために搭載する。

#### (C)アフターボディ構造（3年、3億円）

火星表層の Fe 含有率・凍土・地下水・CO<sub>2</sub> 大気による電波吸収・減衰の影響を考慮すると、ペネトレータ構体の後部アンテナブロックを分離して地表面に残しながら貫入設置することが要求される。その際、ペネトレータ前方構体とアフターボディは有線もしくは無線でデータ送受信を行う。また、アフターボディ構造には地表面の気象観測を行う機器を搭載するプラットフォームや太陽電池パネル搭載面としての役割を持たせる工夫が必要である。さらに、大気突入時の減速・空力安定を得るための固定フレア構造として兼用する役割を持たせる。

#### (D)低温耐性（2年、1億円）

設置緯度および標高により月探査用ペネトレータで設定していた環境温度（250～255Kelvin）よりも低温で稼動することが要求される可能性があり、かつ日周・季節変動の温度サイクルも予想されるため、特にアフターボディ搭載機器と電源部については低温耐性仕様にする必要がある。また、貫入部本体とアフターボディ間のデータ処理系・電源系の結合方式によっては、温度関連データの観測精度に大きな影響を与える可能性があるため開発段階で熱設計と試作試験を行う必要がある。

#### (A8)参考文献

- [1] S. Tanaka et al., *Advances in Space Research*, 23, 1841-1844, 1999.
- [2] R. Yamada et al., *Planetary and Space Sci.* 57, 751-763, 2009.
- [3] K. Suzuki, *Proc. 23<sup>rd</sup> International Symposium on Space Technology and Science*, 2002-e-09, 2002, Matsue.
- [4] W. V. Boynton and R. P. Reinert, *Acta Astronautica*, 35 Suppl., 59-68, 1995.
- [5] Y. A. Surkov and R. S. Kremnev, *Planet. Space Sci.* 46, 1689-1696, 1999.
- [6] S. C. Solomon et al., *Science*, 307, 1214-1219, 2005.
- [7] J. Vaucher et al., *Icarus*, 204, 418-442, 2009.
- [8] M. Knapmeyer et al., *J. Geophys. Res.*, 111, E11006, 2006.