

特集「月惑星探査の来たる10年：第二段階のまとめ」

火星ペネトレータによるネットワーク観測

白石 浩章¹，山田 竜平²，石原 吉明³，小林 直樹¹，
鈴木 宏二郎⁴，田中 智¹

2012年7月2日受領，2012年7月31日受理。

(要旨) 多点ネットワークを構成して火星表層環境および内部構造を観測するペネトレータミッションを提案する。現在の火星内部で生じているダイナミクスを反映する地震活動度と熱的状态を調査するとともに、地球型惑星の分化過程を反映する地殻-上部マントル構造と固体内部から表層および大気層への物質輸送過程に関する知見を得ることを目的とする。ペネトレータモジュールは突入速度300 m/sec で火星表層下2~3 mに潜り込むプローブ本体に、耐熱シールドと空力減速機構の役割をする膜面展開型柔構造エアロシェルを統合することで小型軽量のシステムを構成する。周回衛星から分離された4機のペネトレータは、火成活動の可能性が指摘されるElysium 地域に最大300 km 間隔のネットワークを構成して地震観測や熱流量観測を行う。一方、柔構造エアロシェルには圧力計、温度計、磁力計、カメラを搭載して大気突入時のモニタリングを行う。

1. 科学目標と観測概要

科学目標は地球物理学的手法により地震活動度と火成活動の規模を調べることで、現在の火星内部で生じているダイナミクスと固体内部から表層および大気層への物質輸送過程を明らかにすることである。また、地球型惑星にとって最も大規模な分化過程の結果の1つである地殻および上部マントルの構造を明らかにすることである。この観測が実現すれば、これまで主として火星隕石の組成分析と測地学的観測データに依存してきた火星のバルク組成と表層地殻の形成史に関する新たな制約を与えることができる。一方、ペネトレータは小型軽量の宇宙機システムで1度の打ち上げで多点ネットワーク観測を実現するために有効なツールである。ペネトレータ技術については我が国が独自開発で先行していることから、早期に惑星探査ミッションにおいて実証することも重要である。

ペネトレータは4機構成としてクレータ累積年代が

若い領域や地震活動が指摘されている地域に設置する。特に、約2.5億年前から比較的最近(~2 My)まで断続的に低粘性のマグマが噴出してできた楕状火山地形の存在が示唆されているElysium火山南部地域[1]を最も有力の設置候補地点とする。一方、火星探査機Mars Global Surveyorのレーザ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ことで地震発生の「巣」であることが予想されるTharsis地域[2]も興味深い候補点である。両地点ともに過去の軟着陸ミッションで探査が行われていない標高が高い地域に対応する。大気による空力減速を十分に利用して終端速度に到達し、なおかつ着陸直前の減速に多くの燃料を使って低高度地域に着陸せざるを得なかった軟着陸機ミッションに比べて、高速度のまま観測機器を設置できるペネトレータシステムの特徴を生かすことができる。さらに、掘削装置を使用せずに地下2~3 mに潜り込んで科学観測ができることも過去の惑星探査では例のない試みである。観測方法として100~300 km間隔でネットワークを配置し、地震の発生頻度とマグニチュードを調べる。火星における地震観測の試みはバイキング着陸機の例があるが、

1. 宇宙航空研究開発機構

2. 国立天文台

3. 国立環境研究所

4. 東京大学

siraisi@planeta.sci.isas.jaxa.jp

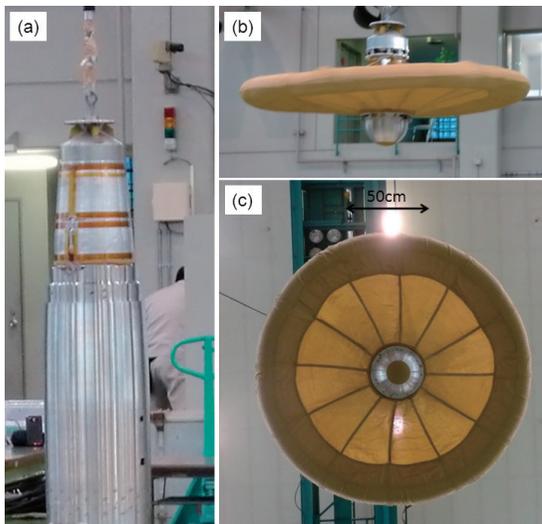


図1：観測ロケット実験用膜面エアロシエルの展開写真。(a)ロケット結合時、(b)展開切り離し後(側面から)、(c)平面形状(頭部から)。

観測機器の性能や設置環境の制約によって地震を明確に同定するには至っていない[3]。隕石衝突起源のイベントも含めて火星の地震発生状況を観測し、深さ200 km程度までの地殻から上部マンツルの構造を解明することが重要な目標である。特に、浅部の主要な物質境界面である地殻の厚さ分布と密度を地震学的に決定することができれば、測地学データと統合することで地球型惑星の初期分化過程を規定するマグマオーシャンの深さとスケールに制約を与えるという意味で科学的価値が高い[4]。また、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内部ダイナミクスやマンツルから地殻および表層環境への物質輸送を理解するために重要な情報となる。一方、他の領域に比較して最近まで火成活動が起こっていた地点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、その上限を把握するだけでもマグマ活動の有無や継続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、地殻熱流量および地形・重力データからリソスフェアの弾性的厚さと地質学的タイムスケールでの熱史[5]だけでなく、これまでの火星周回衛星による全球マッピングデータとの関連性についての情報も得られるであろう。さらに、表層物質の熱伝導率や貫入時の加速度プロファイルはその物理特性や層構造を理解するための基礎データであり、気象観測パッケ

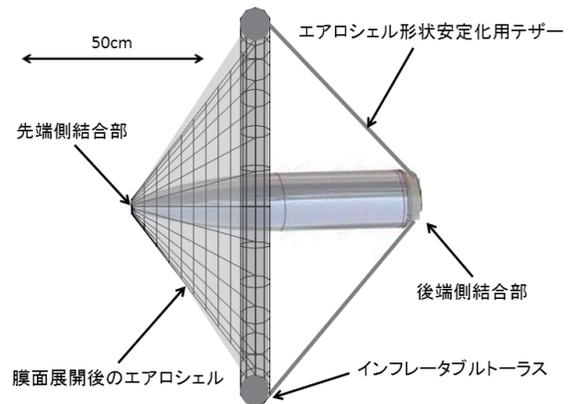


図2：火星ペネトレータモジュールの概念図。

ージを含めた長期観測が実施できれば表層環境およびレゴリス層の季節変動についての知見が得られる可能性がある。

2. ペネトレータモジュール

月探査用に開発したペネトレータモジュール(全長145 cm, 全備重量45 kg)は表層約2 mの深度に潜り込むプローブ本体(全長76 cm, 重量14 kg)に加えて、軌道離脱モータ($\Delta V = 1.7$ km/sec)と姿勢制御機構から構成される[6]。月と火星の環境で最も大きな違いは大気の有無であり、(a)大気を利用した減速機構、(b)空力加熱に対する熱防御材、(c)大気突入から貫入までの姿勢制御方法については火星用に新規開発を行う必要がある。海外で開発実績のある火星用ペネトレータについてはパラシュートと固定尾翼を採用したり[7]、相乗りする軟着陸機に上記の要素技術を依存したりすることでシステムを構成していた[8]。既存の月探査用モジュールに(a)~(c)の機構システムをそのまま付与する場合、宇宙機システムの大型化と多くの開発課題に伴うコスト増加が懸念される。そこで、本提案では表層に潜り込むペネトレータ本体については既存のプローブ外套と内部搭載機器を極力継承して開発コストと製造期間を短縮する。一方、(a)~(c)の役割

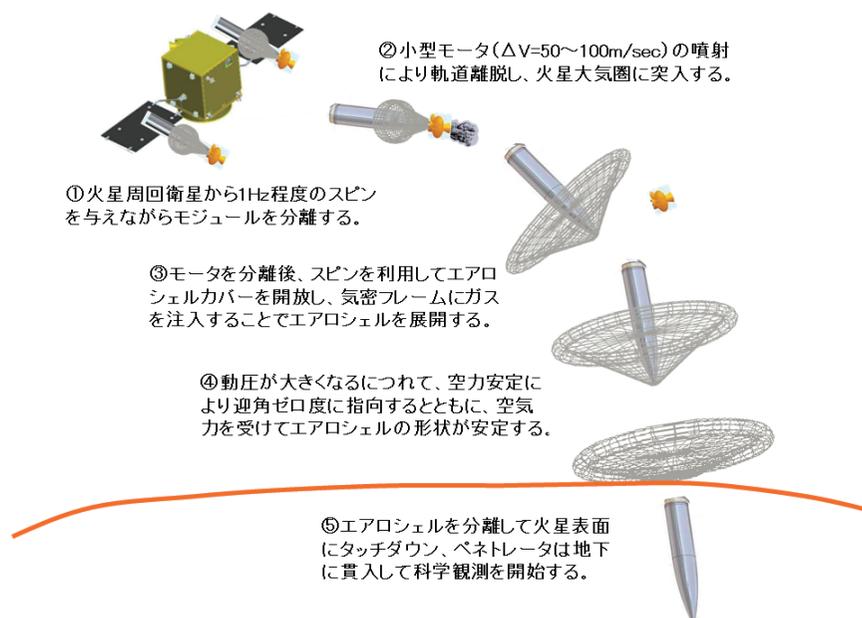


図3：モジュール分離から火星表面突入までのシーケンス概略。

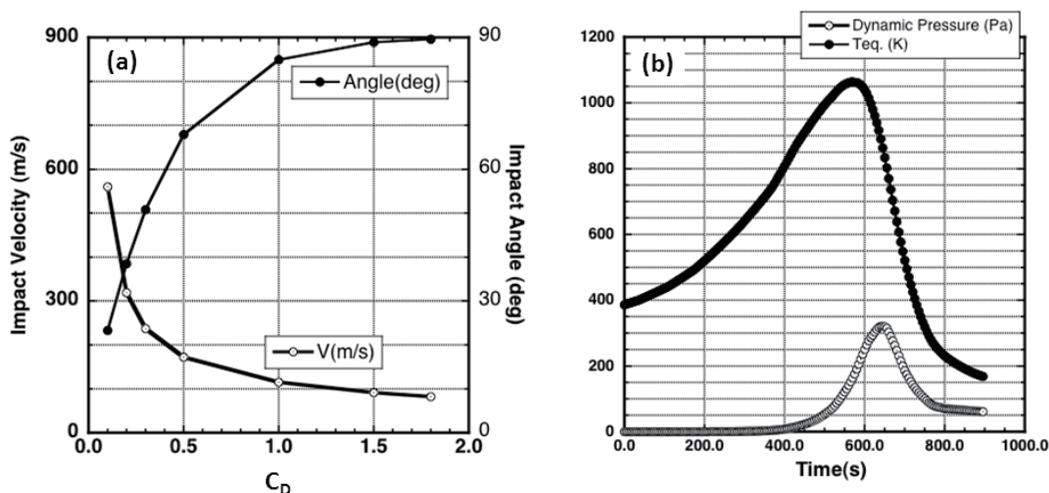


図4：飛行履歴の解析結果。(a)エアロシェルの空気抵抗係数 C_D に対する突入角と突入速度の関係。(b)エアロシェル先端部が受ける空力荷重(動圧)と機体表面温度の時間履歴解析例(軌道高度300km, $C_D=1.5$, 軌道離脱時減速量50m/sのケース)。

を果たす機構システムとして近年開発が進んでいる膜面展開型柔構造エアロシェルを採用することを検討した(図1)。膜面展開型柔構造エアロシェルとは柔らかな膜材料でシェルを作って折り畳み傘のように収納しておき、大気圏突入時に展開して低い弾道係数の飛翔体にするものである[9]。膜の展開は周囲に取り付け

たトラス状(浮き輪型)の気密フレーム内に気体を充填するインフレータブル方式で行う。展開型柔構造による大気突入システムについては、2003年頃からコンセプトスタディを開始し、耐熱性膜材料と展開システムの開発、空力特性の取得などの要素技術の研究から、極超音速風洞試験装置や大気球フライト試験によ

る実証を経てJAXA宇宙科学研究所の観測ロケットS-310を利用した大気圏突入実証試験が本年度に計画されている[10]。ここでは、製造実績のある月探査用ペネトレータと観測ロケットで採用されるものと同一仕様である直径1200 mmのエアロシェルをモジュール化(図2)した場合について、高度300 km、傾斜角30°の円軌道をもつ火星周回機から分離後のシーケンスと飛翔履歴を解析した結果を図3と図4にそれぞれ示した。図4(a)によると、空気抵抗係数 C_D の値を大きくするほど突入角度が火星表面に対して垂直に近くなるが、逆に突入速度が小さくなる傾向が分かる。月ペネトレータと同様に突入速度を270~300 m/secとするため、上空でエアロシェルを切り離してこれ以上の空力減速を抑制するか、気密フレームの充填ガス圧を適切に調整することで所定の高度に達したときにエアロシェルが潰れて抵抗係数を実効的に下げる、などの工夫が必要である。一方、機体表面温度は半径10 cmの半球の先端部における輻射平衡温度で評価したが、最大で1100 K以下であり、先端側結合部(図2)において特殊な耐熱材料を必要としない。本体のまわりにスカート状に広がるエアロシェル部ではこれより空力加熱が下がるため、既存の耐熱性膜材料を使用することができる。また、動圧についても最大で400 Pa以下であり、エアロシェルにかかる空力荷重は地球での観測ロケット実験と同等レベルである。

膜面仕様の最適化は観測ロケット実験の結果等によって今後詳細検討を行う必要があるものの、エアロシェルを採用することでペネトレータ本体には耐熱対策を新たに施す必要がなく、空力誘導のみでモジュールの減速(終端速度300 m/sec以下)と姿勢変更(突入角度に換算して70°~90°)を達成できる見通しを得ることができた。さらに、傘状のエアロシェルがもつ強い空力安定性を利用してペネトレータの貫入特性と衝撃荷重に最も影響を与える要因である迎角(機体軸と速度ベクトルのなす角度)をゼロにして火星表面に突入させることができる。そのため、構体と内部機器が受ける荷重に対する構造設計上のマージンが月の場合よりも増加するとともに、停止姿勢もより垂直に近づくことで熱流量観測や周回衛星とのデータ通信にも適した観測環境を実現できる。この解析結果と各部の現状仕様をもとに概算すると、火星ペネトレータモジュールの総重量は1機あたり25 kg以下(周回衛星の把持・

分離機構部とエアロシェル部搭載機器分は含まない)となる。

3. 観測機器の概要

3.1 地震計

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[11]。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、エアロシェル背面に太陽電池パネルを取り付ける等の対策を施してタッチダウン後にも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に改良することを検討する。

3.2 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、火成活動の有無と継続時期および内部温度構造に対する制約を得るとともに、過去の火星周回衛星による熱慣性[12]およびガンマ線分光計データ[13]との関連性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センサー[14]を第1候補とするが、観測精度を向上させるためニードルプローブ(貫入設置後に細い探針を伸展する)方式の実現可能性も検討する。

3.3 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ほか、表層物質の力学的特性や層構造に関する情報が得られる可能性がある。

3.4 気象観測パッケージ(気圧・温度・磁場・モニタカメラ)

柔構造エアロシエルの背面に搭載して大気突入から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。ペネトレータが火星表面に突入する前までにエアロシェルを分離する予定であるが、タッチダウン後もペネトレータ近傍の気象観測を継続できれば有用である。つまり、温度・気圧・磁場の時間変動データ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、もし現在も火成活動が起こっている場合に同時記録できればデータ解釈と校正用に役立てることができるからである。モニタカメラについても観測機器の設置状況、隣接地形の変化と砂塵の集積・飛散状況を把握することができる。そのため、分離されたエアロシエル部が着地後でも気象観測を継続できるように薄膜太陽電池パネルによる電力供給やペネトレータとの近距離データ通信系もあわせて検討する。

3.5 光学カメラ(周回衛星に搭載)

周回衛星には光学カメラ(分解能2~3 m)を搭載して、ペネトレータの観測運用中に隕石が衝突して形成されたクレータや地滑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。また、周回衛星の軌道とペネトレータ設置地点を決定するため、火星表面に設けられたコントロールポイントも合わせて撮像する。

4. 観測運用の概略

4機のペネトレータを搭載した火星周回機は高度300~400 km、軌道傾斜角30°の軌道からネットワークを構成するように各機の投下設置を1か月程度かけて実施する。ペネトレータ各機は分離直後から大気中降下時の気象観測、火星表面突入時の加速度計測および貫入直後に熱流量観測を実施し、地震計の姿勢制御を経て地震観測を開始する。一方、すべてのペネトレータを分離した周回衛星は各機の観測データを受信し、運用コマンドを送信するために約1火星年間軌道を維持しながら、光学カメラでネットワーク周辺に形成されたクレータや地滑り地形を撮像観測する。また、母船-ペネトレータ間通信中にドップラ計測を行って設置位置を1~2 kmの精度で決定するとともに各ペネトレータ間の時刻同期に必要なハウスキーピング情報を取得する。消費電力と通信量の制約から、地震観測については連続波形記録をすべて送信することが不可能なため、イベントトリガモードを主体とした観測運用を実施し、連続記録モードはオプション観測とする。一方、熱流量観測については貫入直後に実施するほか、季節変動の可能性も考慮して1~2か月間隔で定期的な観測を行うこととする。

安定な温度環境と通信の成立性の観点から、月探査用ペネトレータの最適深度は2 m程度であることが分かっている。火星に転用する場合、H₂O成分による電波の吸収が懸念されるが、Mars Express搭載電波サウンダMARSISによる誘電率の観測結果から設置候補地点となるElysium火山地域は水氷を含まない火山性物質の堆積層で覆われていると予想される[15]。したがって、月探査用ペネトレータと同様にレゴリス層に2 m程度潜り込むことが望ましい。これまでの地上試験での実績から、火星表面への突入速度を250~300 m/secに制御することで適切な深度に埋設設置できると考えている。その他、比較的断層地形が多く存在しているTharsisおよびUtopia平原の北部地域や高い熱流量が予想されているHellas盆地の南部等も設置候補となるが、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および周回衛星の軌道計画から設置点を決定する。

5. 開発課題

5.1 低温耐性

設置緯度と標高によるものの月探査用ペネトレータで設定していた環境温度(250~255 K)よりも低温での稼働が要求される見通しであり、日周・季節起因の温度変動も予想される。そのため、電源部と電力仕様についてはヒータによる保温も考慮した設計にだけでなく、観測運用の効率化で消費電力を一層低減する必要がある。

5.2 ペネトレーターエアロシエル間の結合・分離機構部

ペネトレータとエアロシエル部は周回衛星搭載時から火星表面に突入する直前まで結合状態とするが、タッチダウン直前のペネトレータ本体に姿勢擾乱を与えずに貫入設置後の科学観測とデータ通信等にも影響を及ぼさないように分離させる機構が必要になる。一方、エアロシエル部に搭載を予定する機器が火星表面到達までに取得するデータをリアルタイムで周回衛星に送信することができない場合には、ペネトレータとの間に通信回線を設け、貫入設置後にペネトレータ経由でデータ送信することを検討する。

5.3 地上貫入試験設備

月探査用ペネトレータの認定試験には米国サンディア研究所の設備を借用したため、輸出入の手続きや現地での試験運用に諸々の制約が課せられていた。国内で同様の設備は現存していないが、同研究所の試験設備と同等仕様の射出装置および周辺設備について既に設計と経費見積もりを終えており、新規プロジェクト立ち上げ時の予算措置によって自前の試験環境を調達することが可能である。

6. まとめ

多点ペネトレータによる火星の内部構造探査を提案した。開発完成した月探査用ペネトレータと柔構造エアロシェルを統合することで開発期間とコストを大幅に低減できる小型軽量な宇宙機システムが実現可能である。月以外ではいまだ実現していない地球物理観測網を構築することで現在の火星における様々な活動状態を浮かび上がらせるだけでなく、初期進化に関する重要な情報も得られることが期待される。

参考文献

- [1] Vaucher, J. et al., 2009, *Icarus* 204, 418.
- [2] Knapmeyer, M. et al., 2006, *J. Geophys. Res.* 111, E11006.
- [3] Anderson, D. L. et al., 1977, *J. Geophys. Res.* 82, 4524.
- [4] Wieczorek, M. A. and Zuber, M. T., 2004, *J. Geophys. Res.* 109, E01009.
- [5] Solomon, S. C. et al., 2005, *Science* 307, 1214.
- [6] Shiraishi, H. et al., 2008, *Adv. Space Res.* 42, 386.
- [7] Surkov, Y. A. and Kremnev, R. S., 1999, *Planet. Space Sci.* 46, 1689.
- [8] Smrekar, S. et al., 1999, *J. Geophys. Res.* 104, 27013.
- [9] 山田和彦ほか, 2011, *日本宇宙航空学会誌* 59, 389.
- [10] Yamada, K. et al., 2011, *AIAA-Paper* 2011-2521.
- [11] Yamada, R. et al., 2009, *Planet. Space Sci.* 57, 751.
- [12] Taylor, G. J. et al., 2007, *J. Geophys. Res.* 111, E03S06.
- [13] Jakosky, B. M. et al., 2000, *J. Geophys. Res.* 105, 9643.
- [14] Tanaka, S. et al., 1999, *Adv. Space Res.* 23, 1841.
- [15] Mougnot, J. et al., 2011, *Geophys. Res. Lett.* 39, L02202.