# 特集「月惑星探査の来たる10年:第二段階のまとめ」 超高感度広帯域地震計による惑星内部モニタ

新谷 昌人<sup>1</sup>, 西川 泰弘<sup>1</sup>, 堀 輝人<sup>1</sup>, 小林 直樹<sup>2</sup>, 白石 浩章<sup>2</sup>, 鹿熊 英昭<sup>3</sup>, 石原 吉明<sup>4</sup>

2012年7月4日受領, 2012年7月30日受理,

(**要旨**) 地震観測は地球や惑星の内部構造を高い分解能で探査できる手段である。本稿は地下深部の高温環境や惑星表面の低温・高放射線環境など、極限環境における観測をめざした地震計開発について述べる。レーザ干渉計測を用いることにより、高い精度を維持したまま極限環境において動作できることが特徴である。プロトタイプを用いた性能評価では、1 mHz ~5 Hz の帯域で地上のLow Noise Modelの振動レベルが検知できる雑音性能であることを確認した。仮に火星表面に設置できれば、火星大気によって励起される常時自由振動の予想レベルを検知可能で、その固有周波数から火星のコアに対する制約が得られるかもしれない。

### 1. はじめに

地震観測は地球の内部構造を調べる強力な手法であ り、現在では世界規模で展開された地震観測網の記録 を用いて、地殼から内核までのさまざまな深度におけ る内部構造が明らかにされている。 内部構造の情報は 地球の生成過程やその組成・分化を議論するうえで欠 かせない. 地震観測およびそれから得られる内部構造 の情報は地球以外の天体においても天体の形成や進化 を問ううえで重要である. 月・惑星探査においても過 去に地震観測が試みられた。 アポロ計画で月の表面の 5か所に地震計が設置され、月震の観測により、月の 地震活動や内部構造に関する知見が得られている[1]. 月震の観測は1970年代で終了しているが、そのデー タは地震学の最先端の手法を用いて現在でも再解析が 行われている. 火星探査では、バイキングの着陸機内 部に地震計が搭載され観測が試みられたが、表層風の 影響で十分な精度の観測ができず、地震活動に関する 情報も限定的なものであった[2].

月・惑星における地震探査は近年実現されていないが、その間の地震計測技術や解析手法の進歩、内部構

造探査から得られる成果のインパクトのためこれまで も各国で地震探査計画が立案され検討されてきた. と くに、地震国である我が国はこれまで地震学に多くの 貢献があり、そのような計画を主導する役割があると さえ思える。従来の月・惑星探査の地震観測は、搭載 機器の制限から、0.1 Hz ~数十Hzまでの比較的短周 期の観測帯域の地震計が用いられた、地球の場合、地 震波の減衰のため、中心部を含む全球的な構造を決定 するためには0.1 Hz以下の長周期地震波を観測でき る, いわゆる広帯域地震計による観測が必要である. 月・惑星における減衰の様子は地球と同じではないが. 同様の広帯域地震観測が望ましい. 実際に. 月や火星 の地震探査で短周期地震計とともに広帯域地震計を搭 載する計画が立案されている.しかし.既存の広帯域 地震計の方式では性能面の限界や極限環境における動 作に未知の部分がある. そこで本稿では独自に開発し ている極限環境に耐性をもつレーザ干渉型広帯域地震 計を用いた地震探査を検討し、期待される成果や開発 状況を紹介する.

# 2. 期待される成果

本稿で想定している対象天体は月と火星である。それぞれについて多くの成果が期待されるが,本節では 広帯域地震計単独で期待される成果の概要を中心に観

<sup>1.</sup> 東京大学地震研究所

<sup>2.</sup> 宇宙航空研究開発機構·宇宙科学研究所

<sup>3.</sup> 中央大学

<sup>4.</sup> 国立環境研究所

araya@eri.u-tokyo.ac.jp

liauid

1700km

0.445 0.720 1 02 1.34 1.64 1 92 2 17

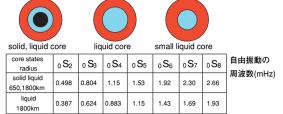


図1:火星の各コアモデルに対する自由振動の固有周波数。。S. は振動モードを表し、nとlはそれぞれradial orderおよび angular order(半径方向および角度方向の節の数)、Sは Spheroidal mode(伸び縮み振動)を示す.

測対象ごとに述べる。より詳細な地震観測によるサイ エンスの検討は例えば文献[3]や[4]を参照されたい.

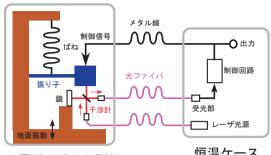
#### 2.1 震源から得られる情報

アポロ計画の地震計による観測によって月の地震活 動が明らかになっている。本提案で高感度な広帯域地 震計を月面縁近くもしくは裏側に設置することで、こ れまで不鮮明であった月の裏側の月震活動を同定する ことができる。表側と裏側の地震活動を比較すること により、月の2分性がマントル深部にまで達している かが明らかとなる。また、アポロ観測期の活動度との 比較から月震活動の経年変化の有無がわかる. 地震波 スペクトル形状から読み取れるコーナー周波数からは. 震源域の規模の情報を引き出すことができる. もし, 地震観測が多点に展開できれば、震源の分布やメカニ ズムから内部の応力状態が理解できる.

火星においては地震計の設置方法にも問題がありこ れまではっきりとした地震波は観測されていない. 火 星表面での本格的な観測が実現できれば火星の地震活 動に関する初めての知見がもたらされる。断層起源あ るいは火山性の地震が観測されれば火星内部の活動に ついての理解が深まる. 月の場合と同様に. 震源の分 布やメカニズムから応力状態や火山活動の形態が同定 できる.

#### 2.2 反射波から得られる知見

地殻-マントル境界(モホ面)からの反射波や変換波 を観測できれば、それらの波の解析により地殻厚を推 定できる。現状の重力・測地データから得られた地殻



地震計本体(耐環境)

恒温ケース

図2: レーザ干渉式広帯域地震計の構成、地震計本体に組み込ま れた振り子の動きをレーザ干渉計で高精度に検出する. 本 体には半導体素子が含まれておらず、極限環境で使用でき る

厚の推定値は最薄値を0kmと仮定し地殻厚の相対分 布を求めている。 1点でも地殼厚の絶対値が精度良く 決定できれば地殼の平均厚や総量が決められることに なり、地殻の分化過程を理解する鍵となる. 同様に下 部マントル境界からの反射波の有無や程度がわかれば. 物質化学的な考察からマントル構成物質と温度に制約 を課すことができる.

#### 2.3 コアサイズの同定

金属核であるコアのサイズを決定することは、月・ 火星の形成シナリオや組成に強い制約を与える。また. コアの固相、液相の状態は深部の温度状態の制約を与 える. 月の場合は、アポロの月震観測から330~350 km程度のコアの存在が示唆されているが[5]. 確定的 なものとは言えない、火星のコアのサイズについては 測地学的な観測から推定されているものの. 構成成分 の仮定に応じた不確定さがある. いずれの場合も. コ ア表面からの反射波あるいは地震によって励起される 惑星自由振動をとらえるために広帯域地震観測が必要 である。図1は3つの単純化されたコアモデルに対す る惑星自由振動の固有周波数を示したものである[6]. 1800 kmのコア半径を仮定した場合. 内部に半径650 kmの固体部分がある場合とすべて液体の場合で,2 mHz以下の低次の固有周波数に30%程度の違いが生 じる. 一方, 液体コアのみの場合, 100 kmの半径の 違いは15%程度の固有周波数の差として表れる。火 星の場合は地震活動の有無が不明であるが、大気運動 で励起される常時自由振動が1 ngal 程度の振幅で励起 されている可能性が指摘されている[7]. もし火星常

時自由振動の低次のモードの周波数が観測できればコアサイズの同定に寄与できる。実際の火星の常時自由振動のレベルは観測してみないとわからないが、地球常時自由振動を検出可能な性能を持っていることが一つの目安である。本提案の地震計の検出性能はこのレベルに基づいて設定されている。

#### 2.4 他の観測機器との連携

地震観測と相補的な観測として、測地観測・電磁場 観測・熱流量観測等と組み合わせることでより信頼性 の高い内部構造モデルの構築が可能となる。逆VLBI や天測観測等の測地観測から得られる回転変動から地 震観測とは相補的にコアサイズやその様態が制約され る。電磁場観測から得られる電気伝導度構造から内部 の温度構造や流体の存否が推定され、地震波速度構造 の物質化学的解釈を深めるうえで大きな役割を果たす。 通信リレー衛星等のオービタを利用して上空から隕石 衝突が観測できれば[8]、その発光源の位置を既知の 震源とみなすことで、地殻から上部マントルにかけて の地震探査による内部構造推定に大いに貢献する。

このように、地震観測により広域応力場、地殻構造、 火山活動、コア状態・サイズなど地表から地下深部に 至るさまざまな惑星内部の情報を引き出すことができ る. これらは月・惑星のモデルに強い制約を与え、現 在の内部状態や構成物質のみならず初期形成過程や進 化など月・惑星の本質を議論するうえで欠かせない。 とくに深部構造(マントル構造、コア状態・サイズ)は 長周期地震波の観測が必要であり、広帯域地震計が不 可欠である。

## 3. レーザ干渉式広帯域地震計

月・惑星探査の極限的な環境条件においても使用できる地震計とするために、図2のように地震計本体と制御回路等を分離し、地震計本体側に耐環境性能を持たせる構成とした広帯域地震計を開発している[9]. 地震計本体は金属や石英ガラス等で構成され、振り子の動きの検出はレーザ干渉計による光計測を用いているため本体には半導体素子が含まれておらず、低温から高温までの広い温度範囲(-50℃~300℃程度)かつ宇宙放射線環境下でも使用できる。制御回路やレーザ光源は恒温ケース内に収められ、通信機器等とともに

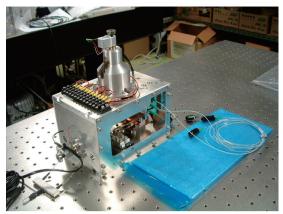


図3: レーザ干渉式広帯域地震計のBBM. 写真右手は干渉計に レーザ光を入出射するための光ファイバ.



図4: 地震研究所鋸山観測所(千葉県富津市)の坑内における性能 評価、BBMは真空容器(写真右奥)に収められている。

環境の制御された着陸船内部に置かれる.2つの部分は耐環境性の高いメタル線と光ファイバで接続される. 地面に対して振り子の動きを静止するような負帰還制御の信号から地面振動出力が得られる.

表層付近から深部における構造を地震波を用いて探査するために、地震計の周波数帯域(正確には、地面振動速度に対する応答が平坦な帯域)は1 mHz ~50 Hzとした. 長周期の地震波を必要な精度でとらえることができるように、地震計本体の振り子は50秒以上の固有周期を持つように調整できる構造となっている. 振り子部分が機械的に弱い構造であるため、ロケット打ち上げ時や着陸時の振動に耐えるようとくに支点の部分(ヒンジ)を工夫した.

このような広帯域地震計のBreadboard Model(試作 試験用モデル, BBM, 図3)を製作し地上で性能を評価した. 図3の地震計本体には振り子が収納されてお

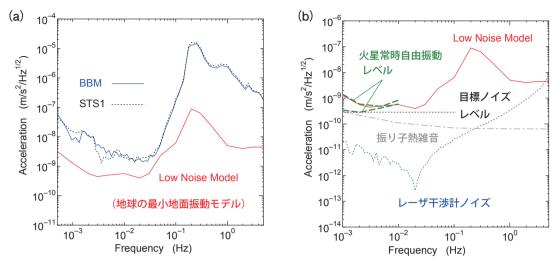


図5: STS1型地震計との並行観測の結果(a), および地震計の各雑音レベルと火星常時自由振動レベル(b). これらの結果から, レーザ干渉式広帯域地震計は火星大気で励起される低次の常時自由振動が検知できる性能と見込まれる.

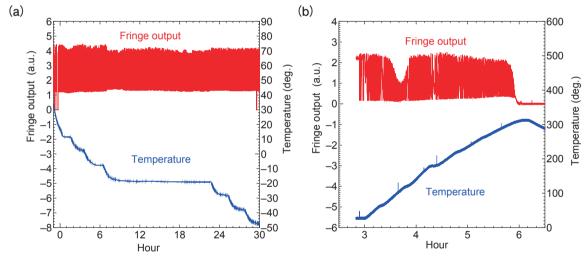


図6: レーザ干渉計部分の温度変化に対する干渉縞コントラストの変化。図6(a)は-50  $^{\circ}$   $^{\circ}$   $^{\circ}$   $^{\circ}$   $^{\circ}$  での低温側を含む結果、図6(b)は 20  $^{\circ}$   $^{\circ}$ 

り、干渉計用の光ファイバが引き出されている。静穏な環境で雑音レベルを評価するために、地震観測所坑内(東京大学地震研究所鋸山観測所、千葉県富津市)で既存の高性能広帯域地震計(STS1型地震計, Streckeisen社)と並行観測し信号の比較を行った。大気の流れや浮力の擾乱をさけるために、BBMは真空容器に収められた状態で観測を行った(図4)。その結果、図5(a)に示すように背景地面振動レベルまでSTS1と同等の検出性能があることがわかった。地震

計の真の自己雑音は背景地面振動のため直接測定することはできないが、レーザ干渉計単体での雑音レベルの実測に基づく予測値や振り子の力学的損失から見積もられる熱雑音レベルの結果からは、火星大気で励起されると考えられるレベルの低次の常時自由振動が検知できる性能と見込まれた(図5(b)).

このように、BBMを用いた評価では目標とする性能が達成されているとみられる。また、レーザ干渉計部分の動作可能な温度範囲を調べるために、干渉計部

分のみを真空中の恒温槽に入れ、温度変化を与えて干渉縞コントラストを測定した。図6(a)は-50 $\mathbb{C}$ ~40 $\mathbb{C}$ までの低温側を含む結果、図6(b)は20 $\mathbb{C}$ ~300 $\mathbb{C}$ までの高温側の結果であり、290 $\mathbb{C}$ 以上で干渉縞が消失していることを除けば、月・惑星探査の温度範囲をカバーする干渉計の動作が確認できた。

### 4. 今後の開発検討課題

以上の結果を踏まえ、次の段階として探査に必要な システム化や省電力化などの技術開発に移行する予定 である。地震計本体はさらに小型のものを製作し(10 cm立方程度のサイズ), 性能評価や耐環境試験を行っ ている. システム化に必須の装置の自動化(初期調整 やドリフト補正)については、マイコンを組み込んだ 制御システムをBBMに付加し正常に機能することを 確認した. 設置方法についても検討を進めており、火 星表面の表層風の影響を低減するために, 流線形の覆 いの効果を風洞試験装置による実験と流体シミュレー ションの両面から検証している. その結果に基づいて. 火星表面の最大風速に近い60 m/s程度の風による浮 力や回転モーメントの影響を避けられる覆いの形状が 提案されている[6]。また、本体のさらなる小型化が できれば、ペネトレータのように埋設することも可能 となる. ただし, 広帯域地震計は短周期地震計ほどの 耐衝撃性能が期待できないため、自由落下による打ち 込みではなく、表面設置状態からの自己埋設方式が有 力であると考えている[10]. ミッションにおけるリソ ースの制限もあるため、いくつかの実現可能な方法を 検討し、最適化された方式を採用することになるであ ろう.

地震計の設置場所については、月の場合は技術的に可能であれば月面縁近くあるいは裏側へ設置し、月の裏側からの情報が得やすい配置が望ましい。火星の場合はそもそも地震活動が明らかでないため、確実に地震観測できる保証はなく、設置点の選定には検討を要する。地形的な考察から地震活動の可能性が高いと思われるTharsis地域が候補の一つであるが、そこを震源とした地震波を裏側で捉えコアからの情報を得るという考えもありうる。また、大気励起の常時自由振動はグローバルな現象であるため設置点の制約は緩いが、励起される振動レベルの見積もりに不定性がある。本

提案で想定した常時自由振動レベルは一つの励起モデルに基づいたものであり、それを検出できる性能面の要求は、地震観測の可能性を高めるための方策の一つといえる。設置点に共通する要求は風によるノイズの影響が少なく、表面に安定に設置できることである。 選定した場所に確実に地震計を設置し、良質な観測を継続するための技術の具体化も今後必要である。

### 5. むすび

本稿では月・惑星において広帯域地震計を用いた内部構造探査について述べ、その期待される科学的成果およびレーザ干渉式広帯域地震計の開発について紹介した。広帯域地震観測はとくに月・惑星の深部構造を明らかにすることが期待され、対象天体の組成や進化の過程を理解するための重要なデータを提供することになるであろう。レーザ干渉計測を用いることにより、高い検出性能と耐環境性能を両立した地震計が開発できる見込みが得られている。現状では機器の性能面の本質的な部分と耐環境性能の一部を実証した段階であり、今後ミッション提案にむけて、現実的な多くの開発課題をクリアする必要がある。光計測自体は耐環境性が高く、月・火星以外にもより低温の外惑星の氷衛星や水星・金星などの高温環境における探査へも適用できる手法である。

## 参考文献

- [1] Nakamura, Y., 1983, JGR 88, 677.
- [2] Anderson, D. L. et al., 1977, JGR 82, 4524.
- [3] 小林直樹 他, 2009, 日本惑星科学会誌 18, 84.
- [4] 田中智 他, 2011, 日本惑星科学会誌 20, 4.
- [5] Weber, R. C. et al., 2011, Science 331, 309.
- [6] Nishikawa, Y., 2012, Master thesis, University of Tokyo.
- [7] Kobayashi, N. and Nishida, K., 1998, Nature 395, 357.
- [8] Ortiz, J. L. et al., 2006, Icarus 184, 319.
- [9] Araya, A. et al., 2007, in Proc. of International Symposium on Underwater Technology 2007, Tokyo, Japan, 17-20 April, 2007, IEEE, 245.
- [10] 安田進 他, 2011, 日本機械学会論文集 77, 3405.