Exploration of the Martian internal structure by means of seismic waves

（地震波を用いた火星内部構造探査）

A. Araya[1], N. Kobayashi[2], H. Shiraishi[2], T. Tsuji[3], Y. Ishihara[4], and H. Senshu[5]

[1]Earthquake Research Institute (ERI), University of Tokyo
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032, Japan
[2]Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Chuo-ku, Kanagawa, 252-5210, Japan
[3]International Institute for Carbon-Neutral Energy Research, Kyushu University
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan
[4]JAXA Space Exploration Center (JSPEC), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Chuo-ku, Kanagawa, 252-5210, Japan
[5]Planetary Exploration Research Center (PERC), Chiba Institute of Technology
2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba, 275-0016, Japan

ABSTRACT

A Mars mission including EDL (Entry-Descent-Landing) and surface exploration has been studied in the Mars working group, and potential candidates for scientific instruments have been discussed. For such instruments, we propose seismic sensors to search for internal structure of Mars. Exploration by means of seismic waves is a powerful method to investigate internal structure of a solid planet with high resolution, as fully shown in the case of earth's structure. Seismic exploration on Mars will reveal seismicity, deep layer structure, and shallow structure, which provide clues as to understanding current internal activity, differentiation process,

and dehydrated surface environment, respectively. With sufficient data on the Martian internal structure, a standard model PRISM (Preliminary Reference Interior Structure Model on Mars) could be established, as compared to PREM (Preliminary Reference Earth Model) for earth.

This proposal comprises three kinds of instruments: a broadband seismometer, active surface exploration system, and penetrators. The broadband seismometer measures seismic waves in the frequency range of 1 mHz – 10 Hz. Because seismicity on Mars is not evident and large marsquakes cannot be expected as sources for the seismic exploration, background free oscillations excited by Martian global atmosphere are utilized. With high detectability, 3×10^{-10} $m/s^2\sqrt{Hz}$ at around 1 mHz, using a laser-interferometric detection, the seismometer senses the background free oscillations whose eigenfrequencies can resolve radius and status (liquid/solid) of the core at a single observation station.

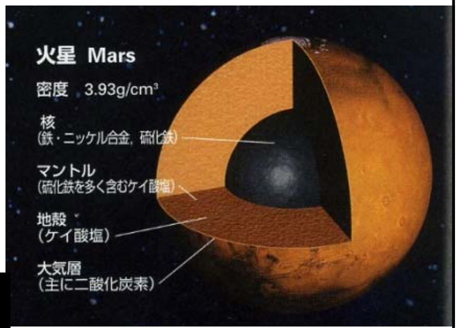
The active surface exploration system includes PZT (piezoelectric) actuators exciting Martian surface and accelerometer pickups sensing waves reflected from boundaries of surface layers. A PZT and a pickup are packaged, and three packages are attached to bottom of respective lander legs to make them stably couple to the surface on landing. This system is designed to detect layer structure and its time variation within a few meters in depth.

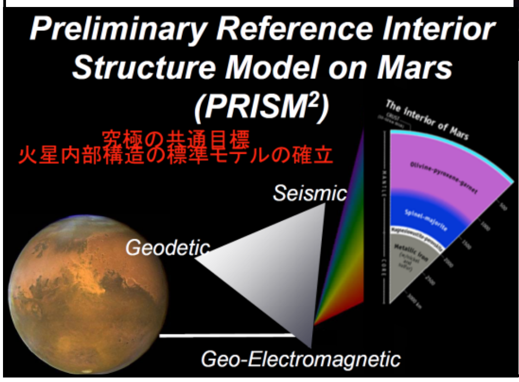
The penetrators confining seismometers are separated from the landing module at the altitude of several km, and stick on surface within the range of several hundred meters from the lander, forming a seismometer network. This local observation network is expected to detect meteorite impact events, local marsquakes, and tremors excited by surface wind, which are used for determination of shallow internal structure. Because the system operates with built-in batteries, the observation period may be several hours to a few days, depending on the surface temperature.

These instruments are unique to our group in that they cover from surface to deep structure with little assumption of marsquake activity on Mars. Especially, core structure has not been explored by previous and planned missions. The exploration of Martian internal structure will open up a new window to research on origin and evolution of the planet, and lead to advanced Mars missions.

地震波を用いた火星内部構造探査

新谷昌人（東大・地震研）
小林直樹（ISAS/JAXA）
白石浩章（ISAS/JAXA）
辻 健（九大）
○石原吉明（JSPEC/JAXA）
千秋博紀（千葉工大・PERC）

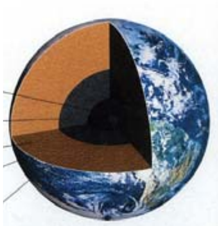




地震観測の重要性

地球の理解・・・地震・測地観測が大きな役割

地震計ー＞地震波観測ー＞境界層
地震活動ー＞プレート境界
トモグラフィーー＞3D構造

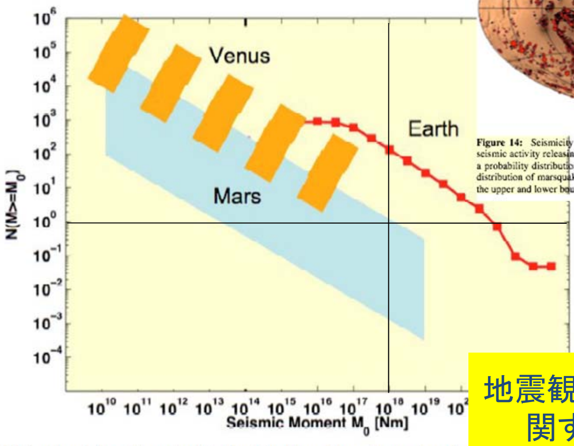


ー＞プレートテクトニクス
地球内部構造の理解
ー＞内部構造モデル
（PREM等）

・地表環境
・地震／火山活動
・地球形成
・進化、環境
・月、惑星モデル
・太陽系科学
を推測／理解

VLBI、GPSー＞地表変位ー＞プレート運動
VLBI、SLRー＞歳差、章動ー＞慣性モーメント

火星の地震活動度
・・・主に地形からの見積もり



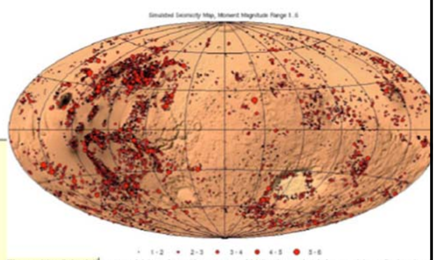


Figure 14: Seismicity map of Mars from Knapmeyer (2006), determined from a MonteCarlo simul seismic activity releasing a cumulated moment of 10^{18}-10^{19} Nm per year (from Golombek *et al.* 1992), a probability distribution of epicenter locations provided by the density of surface faulting The map sh distribution of marsquakes that might be expected during one Earth year, with a annual seismic budget the upper and lower bounds (Knapmeyer, personnal communication).

地震観測・・・内部構造に
関する決定的な情報
（例：地球の場合）

Figure 12 Seismic activity of the telluric bodies. The figure shows the number of e given seismic moment. For the Moon, the estimate is obtained from Oberst (1987) moonquakes. For Mars and Venus, the activity is estimated from various publis thermoelastic cooling of the lithosphere. The terrestrial activity is the mean activity in the period 1984-2004. Figure after Knapmeyer *et al.* (2006)

Lognonne & Johnson 2007

探査深度と地震計

地震探査・・・内部構造を詳しく知るために必須の手法
●内部探査技術の高度化－＞構造・成因・進化に迫る

観測帯域が探査深度（表層～コア）を決める

地震計の構成規模（広帯域型～短周期型）により観測帯域が異なる

探査深度	深（コア）	（マントル）	浅（表層）
観測帯域	低周波（1mHz）	（10～100mHz）	（0.1～1Hz）
地震計	広帯域型（~10kg）	（~5kg）	短周期型(~1kg)

大型

１．広帯域　　・・・コアまでの探査、震源分布、全球構造等

２．中周期　　・・・深部～コアの探査、地震活動、深部構造等

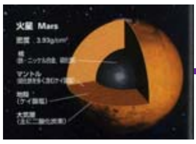
３．短周期　　・・・表層構造、地震活動、火山活動等

小型

本提案の位置づけ　・・・地震学的手法による内部構造探査

現状の理解

おもに表面・
上空からの観測



本提案

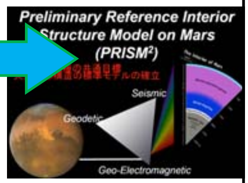
◎アクティブ探査
＞表層構造
＞時間変動

◎広帯域地震観測
＞深部構造・コアサイズ

◎ペネトレータ
＞浅部構造
＞隕石インパクト
＞地震観測網

◎長期データ
＞大気・固体結合

標準内部モデル



・火星形成、進化モデル

・比較惑星（原始惑星）

・太陽系科学

・表層～浅部構造
・水由来変動

・グローバル構造
・惑星システム

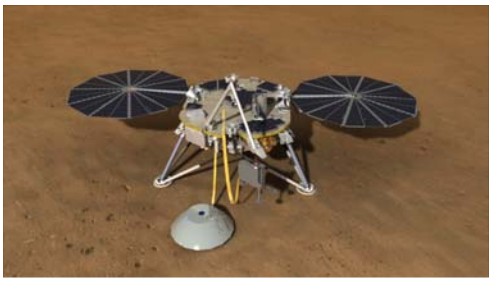
表面　　地下浅部、時間変動　　地下深部、内部活動

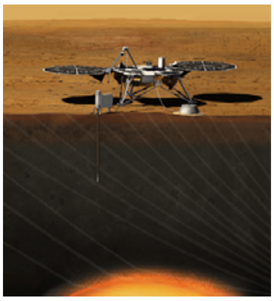
InSight(2016)

・地震観測　帯域　0.02Hz～、ロボットアーム、表面設置、フード内

・表面掘削(5m)、熱流量測定

・回転計測





●本提案（地震探査）のミッションスコープ／目的／意義

スコープ：着陸機本体および周辺で地震観測を行い、火星の地震活動度、浅部～深部の地下構造を明らかにする。惑星表面における地震観測手法を検証する。

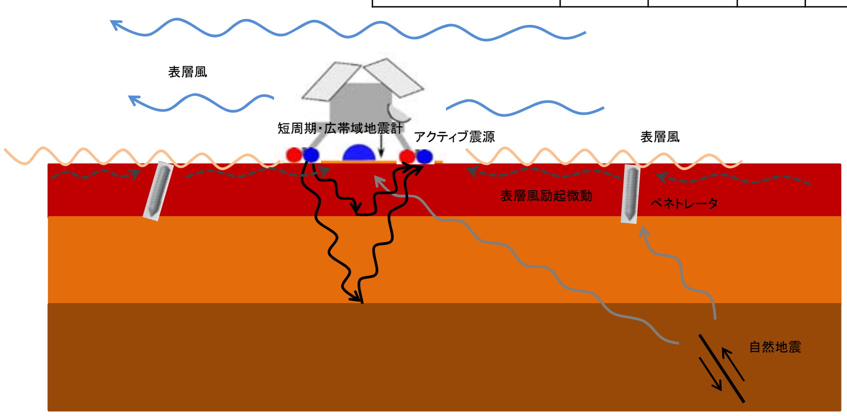
目的と意義：一定期間地震観測を行い、火星でこれまで不明であった地震活動度を評価する。また、常時微動・アクティブ震源を用いて地下浅部構造の探査を行う。ペネトレータでは、多点観測網による震源の特定、ランダーを用いた通信手法を検証する。

InSightミッションの広帯域地震計と比べ、感度が4倍、帯域が1桁低域に広いため、InSightではできない常時自由振動の観測が、～100日間の観測で可能。その結果、地下深部やコアを含むグローバルな構造を決定可能。

ランダ１基／ペネトレータによる地震観測

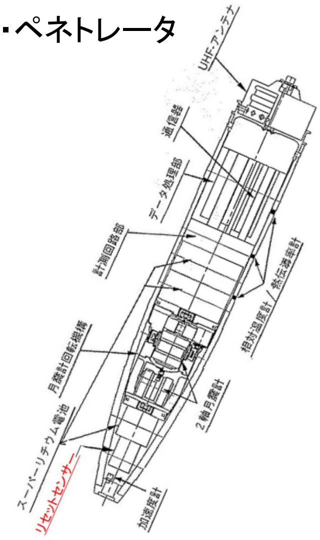
・着陸点近傍の地下構造
・地震活動の有無
（震源位置の特定は困難）

センサ	対象	震源	観測可能性	意義
短周期地震計／ペネトレータ	表層～浅部構造	表層風励起微動	○	表面環境・地殻構造
〃	地震活動	自然地震	？	地殻～マントル活動の有無
〃	浅部構造	隕石衝突	△	地殻・マントル構造
広帯域地震計	深部構造	大気励起自由振動	△	全球構造・コア情報
〃	地震活動	自然地震	？	深部活動の有無
アクティブ震源・ピックアップ	表層構造	能動震源	○	地表下構造



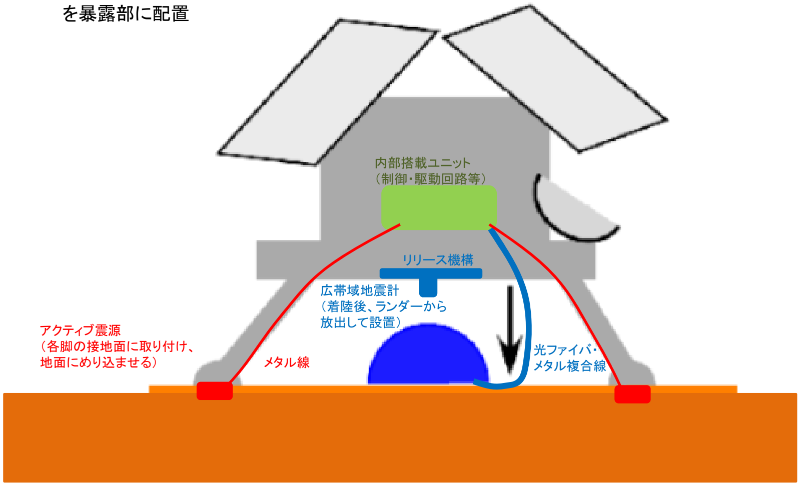
●3つの搭載機器

・広帯域/短周期地震計　・アクティブ探査　・ペネトレータ

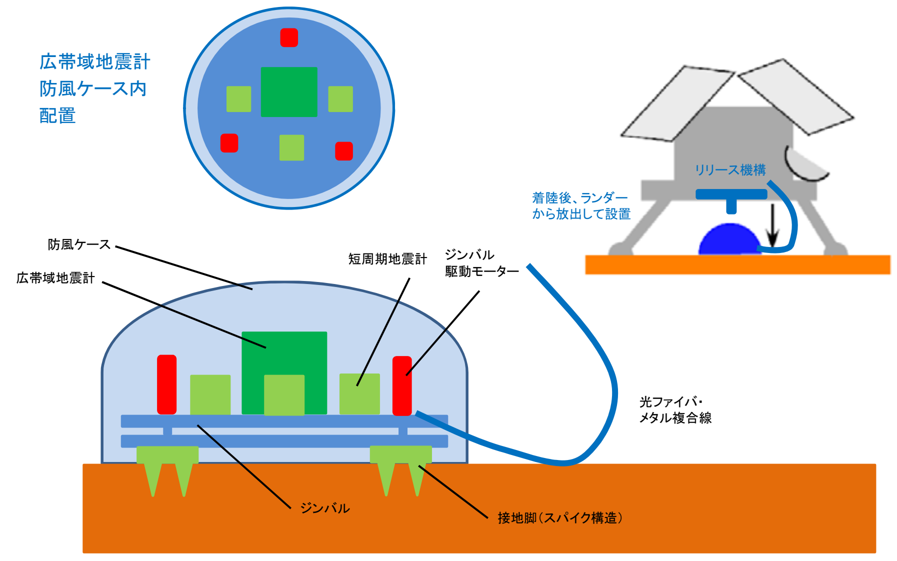


地震探査システム概要

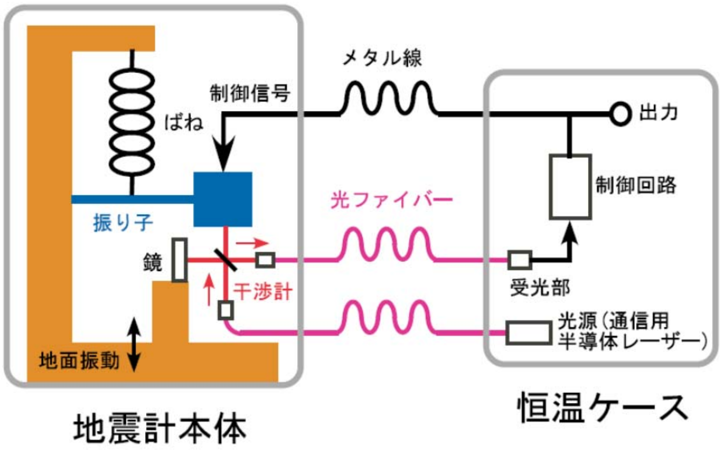
・広帯域地震計
・アクティブ震源
を暴露部に配置



地震探査システム概要



振り子の位置検出にレーザー干渉計を使用
・・・高感度、高温・低温・放射線に耐える

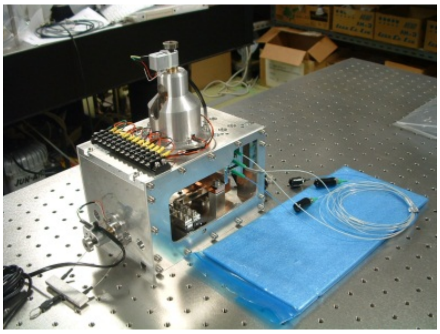


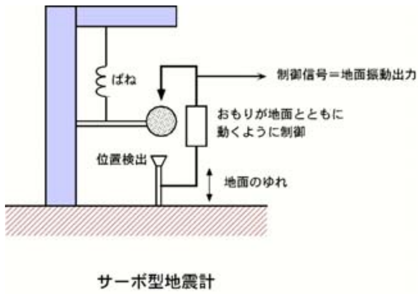
光ファイバーにより光源・受光部と地震計を分離

小型広帯域レーザー地震計

・長周期振り子　＋　レーザー干渉計　＋　制御回路

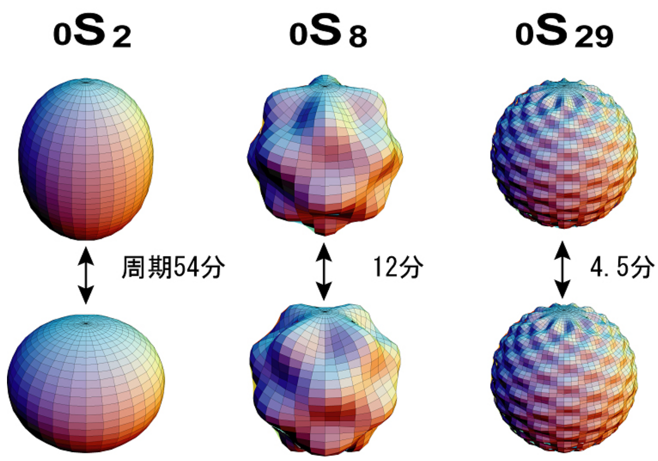
メリット　・高分解能　・低ドリフト　・設置後の自己校正　・広い温度範囲で使用可能





惑星自由振動･･･1台でも内部構造を観測。

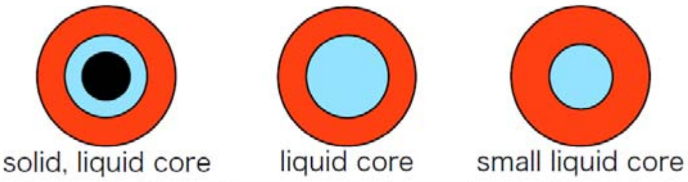
フットボールモードと呼ばれる0S 2モードでは，約1時間の周期で地球が伸び縮みする.（図協力：須田直樹）



火星の場合は1000～2000秒台･･･コアのサイズ･状態に依存

内部構造と自由振動周波数の関係

（西川による）

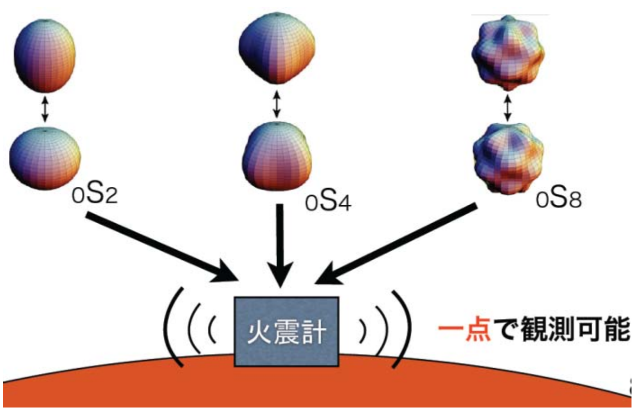


core states radius	$_0S_2$	$_0S_3$	$_0S_4$	$_0S_5$	$_0S_6$	$_0S_7$	$_0S_8$
solid liquid 650,1800km	0.498	0.804	1.15	1.53	1.92	2.30	2.66
liquid 1800km	0.387	0.624	0.883	1.15	1.43	1.69	1.93
liquid 1700km	0.445	0.720	1.02	1.34	1.64	1.92	2.17

自由振動の周波数(mHz)

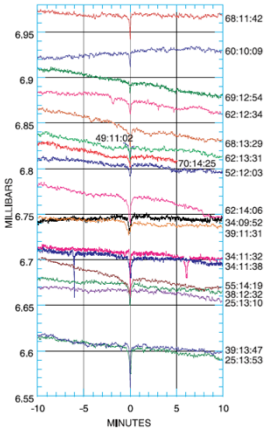
震源について

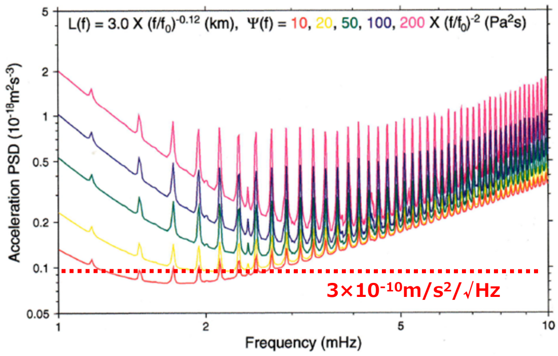
火星深部内部構造探査を１点における観測でも可能とするため、火星大気による常時自由振動が検出可能な性能とする。



常時自由振動

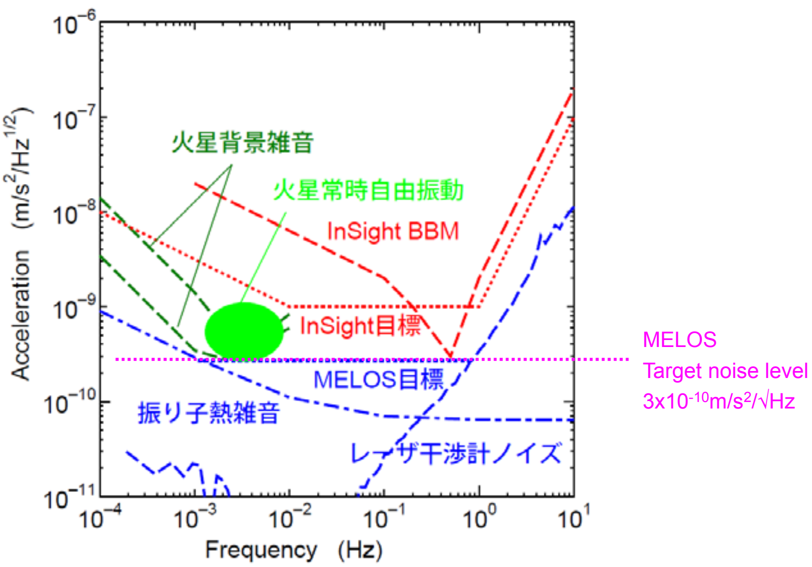
・・・・大気励起による振動　(Suda et al.による見積)





~1 Pa @ 5 min　Murphy & Nelli 2002 ⟶ $\Psi = 3\times10^{3}\left(\frac{f}{f_0}\right)^{2}\ \mathrm{Pa^2Hz^{-1}}$

MELOSとInSightの比較



●アクティブ探査

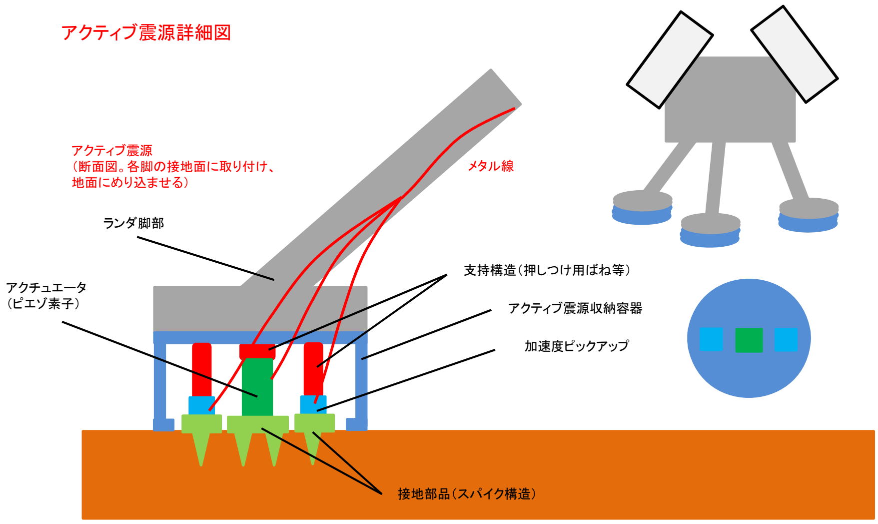
・ピエゾ加速度計（センサ）・ピエゾアクチュエーターを用いた浅層探査

数m（最大~10m）の詳細な構造と季節変化の検出

- ランダの各脚に搭載された3組の発震器・加速度センサにより、着地点におけるアクティ ィブ地震探査(発震・受震の間の走時や波形解析)を行い、数メートル以浅の地下構造を探査する(図5)。1sol あたり 1 時間程度の観測を行い、地下の層構造の深度や物性値を 計測する。時間帯を変え、長期間観測を継続することにより、日周あるいは季節変動など 時間変化を捉えることを視野に入れる。

- 地下数メートル以内の探査深度で、地震波速度~10%程度深さ分解能 5cm 程度(地震波速度 100m/s の場合) でレゴリス・氷などの境界層が検知可能なシステムとする。

地震探査システム概要



加速度ピックアップ

・帯域　・・・DC～数kHz

・高周波で高感度

・右のピエゾ式センサーは、サイズ約15mm立方、重量5g、帯域1Hz～3kHz

Rosetta　ミッション　（CASSE実験）

彗星の表面着陸探査（弾性波構造・電場・ダスト）

2014年　67P／Churyumov－Gerasimenko彗星

・各脚にピエゾ
（加速度計と
発震器）
・脚間基線2m
で発震と受信
・加速度計
xyz各３
・震源×３
・・・かなり冗長

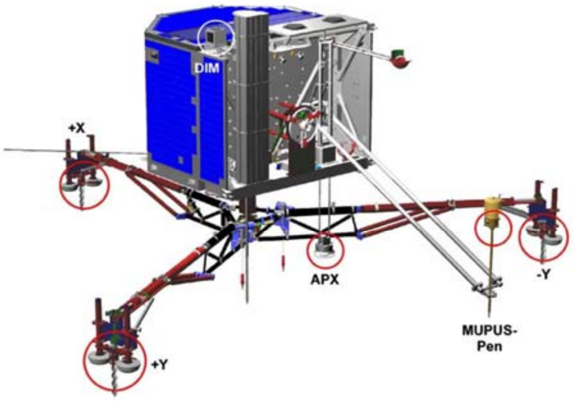


Figure 1. The Rosetta lander Philae shown in landed position with unfolded legs. The SESAME sensors are encircled and the Philae units carrying them are indicated by their designations. The feet are marked with their directional designations +Y, −Y and +X.

Rosetta ミッション （CASSE実験）
彗星の表面着陸探査（弾性波構造・電場・ダスト）
２０１４年 ６７P／Churyumov－Gerasimenko彗星

・発震器（左）
（ピエゾ素子）

・センサーとしても機能

・particleカウントも可能

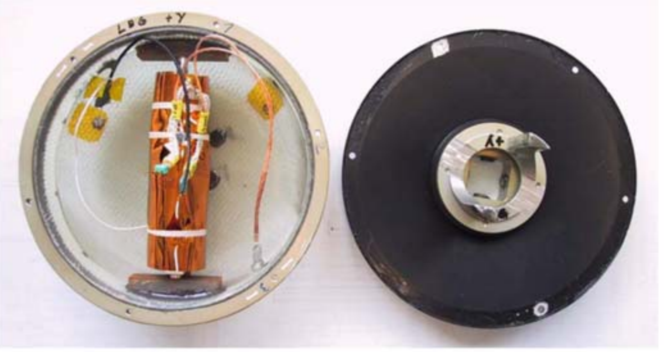
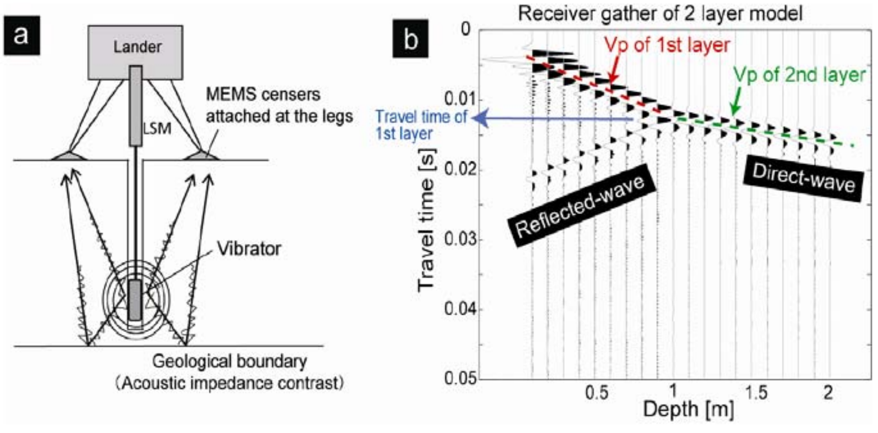


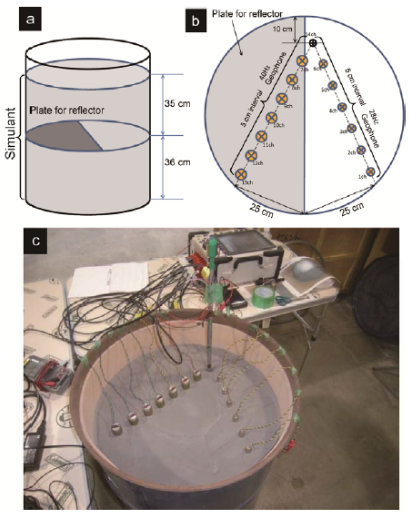
Figure 2. Photograph of the transmitter sole (left) and its black cover (right) of Philae foot +*Y*. The sole (ring diameter: 101 mm) contains an insulated wire-mesh acting as an electrode for the PP instrument. Above the mesh and between two glass-fiber bearings, the CASSE piezo-stack transmitter is mounted. The transmitter is wrapped in a conducting and grounded Kapton foil to provide shielding for PP.

Tsuji et al. (2013)

・SELENE-2 Lander脚のセンサーによる
アクティブ月面探査
・Chirp波震源



Tsuji et al. (2013)　　・Simulantによる実験・・・反射波を検知



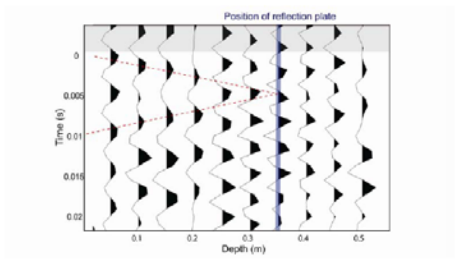


Figure 8. Example of receiver gather. Direct-wave and the reflected-wave at the plate (0.35 m in depth) can be identified. Negative time generated via cross-correlation analysis (gray zone) should be ignored in these results.

アクティブ探査に関する佐藤先生からの質問

(a) アクティブ地下構造探査で測定できる量と精度
(b) (a)の結果（仮定して下さい）からどのような地中構造が見えて、ある構造なら何が、別の構造ならば別の何を言えることになるのでしょうか？

(a)本提案のアクティブ弾性波探査でわかるものは、地下の境界層からの反射波（弾性波速度コントラストに由来）の強度や位相から、地下の弾性波速度、境界層の深さ、境界面の弾性的物性の違いです。今回提案の方法と類似の前例から推測すると、弾性波速度は10%程度、境界層の深さは10cm程度の精度と見込まれます。詳しい数字は、原理検証実験により求めます。

(b)この程度の精度が得られれば、表層の物質や構造（堆積物か岩か）、表層の厚み、境界層の物質の違いが推定できます。また、それらの日周あるいは季節変動が観測されれば、地下の水の存在や温度構造に関する知見が得られます。

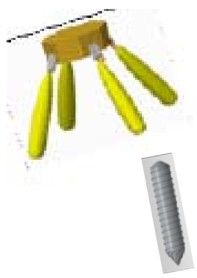
「見えない」が意味のある構造はないのでしょうか？
　音速の変化を可視化する装置提案ですが、逆に「音速変化としては大きなコントラストがないものの、重要な地中構造」というものはあり得ないのでしょうか？ あり得ないならば、その根拠をお示し下さい。あり得るならば、それが見えなくてよいという理由もお答え下さい。

本提案の方法・規模では、弾性波速度が徐々に変化する構造や数メートル以上の深さの境界層からの反射波は計測できません。その場合は数メートル程度の地下には顕著な構造がないという知見が得られますが、それ以上の探査は他の方法を用いることになります（たとえば地盤の含水率が深さとともに徐々に変化している場合は電磁的な探査が有効）。

本提案は他の方法に比べ、浅部の層構造の検知を得意としたもので、とくに地下構造の時間変化を捉えることが期待されます。水由来の弾性波速度の変化や境界面の変動があれば検知できるはずです。物性などそれ以上の詳しい探査は他の方法と組み合わせる必要があります。地球上の地下構造探査でも、弾性波探査とともに電磁的な方法や重力探査など他の方法を組み合わせて大まかな地下構造を求め、掘削によって物質を決定するなど複数の方法を組み合わせます。

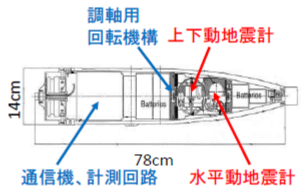
●ペネトレータ

地震探査センサー（ϕ100×400、5kg、10W）
・ペネトレータ地震計
データ取得：　イベントトリガ、連続



搭載機器、設置法
・低空（数km上空）からペネトレータ放出
　　・・・通信・電池の確保

月ペネトレータ（右図）を小型化する

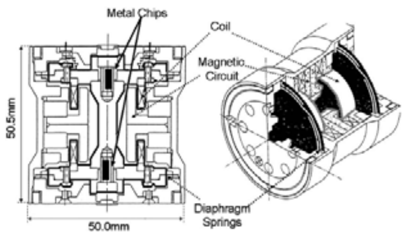


ペネトレータ地震計

・帯域　・・・100mHz～100Hz

・地震、表層イベント、火山帯活動　・・・高精度
< ～10^{-8}m/s^2/$\sqrt{}$Hz (100mHz～1Hz)

・サイズ、重量
50x50x70、0.3kg　月ペネトレータ地震計を小型化



サクセスレベル

●ミニマム：着陸機本体および周辺で地震観測を行い、データ取得する。

●ノミナル：予定期間（100日間）観測を実施・データ取得し、地震活動度および地下構造に関する知見を得る。人工・隕石衝突イベントの観測、およびそのデータから地下構造に関する知見を得る。

●エクストラ：常時自由振動の検出、自然地震イベントの観測、多点観測網による震源の同定、それらによる地下構造の推定、ランダの通信を用いた観測網の検証など。

●内部構造探査の意義等

・サイエンスの意義

- 科学の大きな枠の中での意義　・・・　全球的な内部構造探査
  ー＞火星の現状理解、起源・進化の推定、比較惑星、太陽系起源

- 緊急性
  ・・・　表面の各種観測の充実、打ち上げウインドー、内部構造由来の表面変動

- 類似の他ミッションと比した「存在感」・・・InSight(2016)
  ・・・　高性能広帯域地震計による深部・全球構造の観測
  独自のアクティブ探査・ペネトレータ観測網
  地震学コミュニティ

	広帯域地震計システム	アクティブ探査システム	ペネトレータ
目的	長周期地震波・大気励起常時自由振動の観測ー＞深部構造、地震活動度	着地点表層構造の観測ー＞層の深度、物性、それらの時間変動	人工・隕石落下イベント、近地地震、表層風励起微動の観測ー＞地下構造、震源分布
搭載箇所	着地後にランダ下部より投下。ランダ本体に光源・回路部。	ランダの各脚に計３組。ランダ本体に回路部。	大気エントリモジュールより数kmの高度から投下。地上に貫入
センサ構成	広帯域・短周期地震計、ジンバル、風除け	ピエゾアクチュエータ、加速度ピックアップ	ペネトレータ地震計
検出性能	帯域：1mHz～10Hz ノイズ：mHz帯で $3x10^{-10}m/s^2/\sqrt{Hz}$	深さ数m以内、分解能5cm程度（地震波速度100m/sの場合）	帯域：0.1Hz～10Hz ノイズ：1Hzで $2x10^{-9}m/s^2/\sqrt{Hz}$
サイズ	φ600mm x 300mm	φ150mm x 100mm×3脚	φ100mm x 300mm
重量	センサ：14.2kg エレキ：1.2kg	センサ：1.3kg エレキ：0.9kg	センサ：10kg/台 その他：2.3kg/台
電力（常時、最大）	10W, 17W	0, 13.1W	内蔵電池
オペレーション	連続	1時間/sol	数時間～数sol、連続・イベントトリガ
現状でのＴＲＬ	５～６（地上におけるＢＢＭの性能検証）	２（９月までに原理検証を行い４へ）	６～７（月ペネトレータのヘリテージ）

地震探査：　新谷、小林、白石、辻、石原、千秋
その他：　地震学コミュニティ（連続データ解析）