

MELOS 1における地震探査・回転計測

新谷 昌人（東京大学地震研究所）、
地震探査・回転計測 G

Motivation

- 地球惑星システムの振る舞いについて知りたい。
 - その「**ありさま**」を知る。(システムの構造・短期変動)
 - その「**おいたち**」を知る。(システムの進化・長期変動)



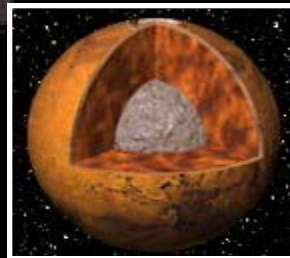
Motivation

- ・ 地球惑星システムの振る舞いについて知りたい。
 - その「**ありさま**」を知る。(システムの構造・短期変動)
 - その「**おいたち**」を知る。(システムの進化・長期変動)



基礎量として内部構造の理解が欠かせない!!

温暖・湿潤



寒冷・乾燥

火星システムの総合的理解

火星内部のサブシステムの理解



核・マントルダイナミクス
(火成活動史・ダイナモ活動史・プレートテクトニクス・・・等)

火星システム変動 (長期的変動＋短期的変動)

大気・氷床ダイナミクス
(全球大循環モデル・局地的気象現象・気候変動・・・等)



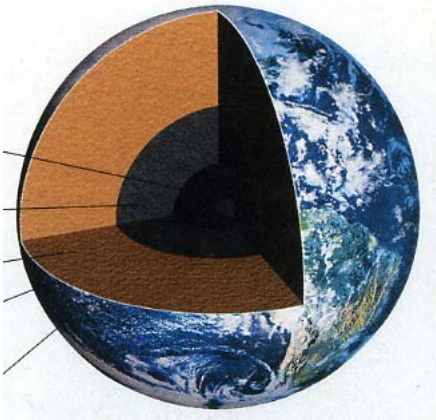
火星表層のサブシステムの理解

地球の場合・・・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

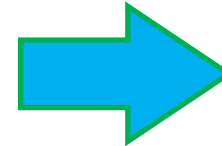
地震活動ー＞プレート境界

トモグラフィーー＞水平構造



ー＞プレートテクトニクス

ー＞内部構造モデル
(PREM等)



- ・地球形成
- ・進化、環境
- ・月、惑星モデル
- ・太陽系科学

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

火星の内部構造の理解(現状)

ー慣性モーメント

ー 分化している

ー 火星隕石の分析結果

ー 材料物質の推定

ー 地形・重力場

ー 地殻厚(平均厚をGTRにより拘束)

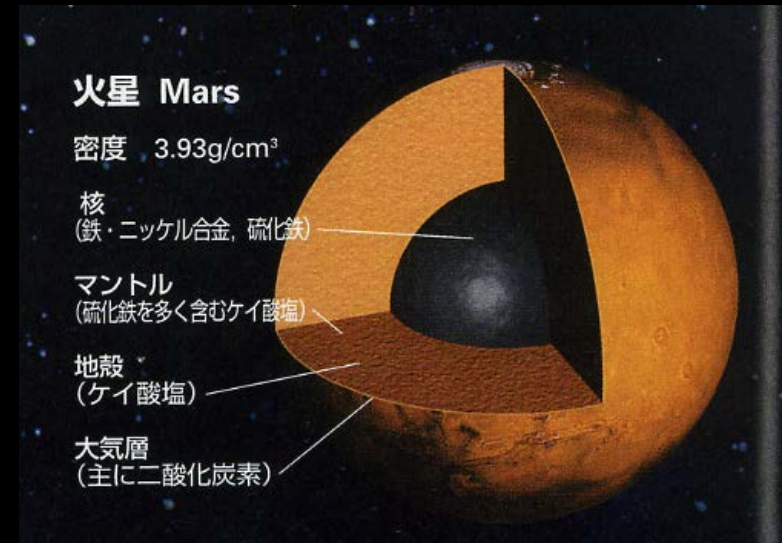
ー 高地殻密度/固く厚いリソスフェア

ー 2次のポテンシャルラブ数 k_2

ー 熔融コアを示唆

ー フォボスの軌道データ(潮汐散逸)

ー 高減衰(低Q)マントルの存在を示唆



火星の地震活動度

・・・主に地形からの見積もり

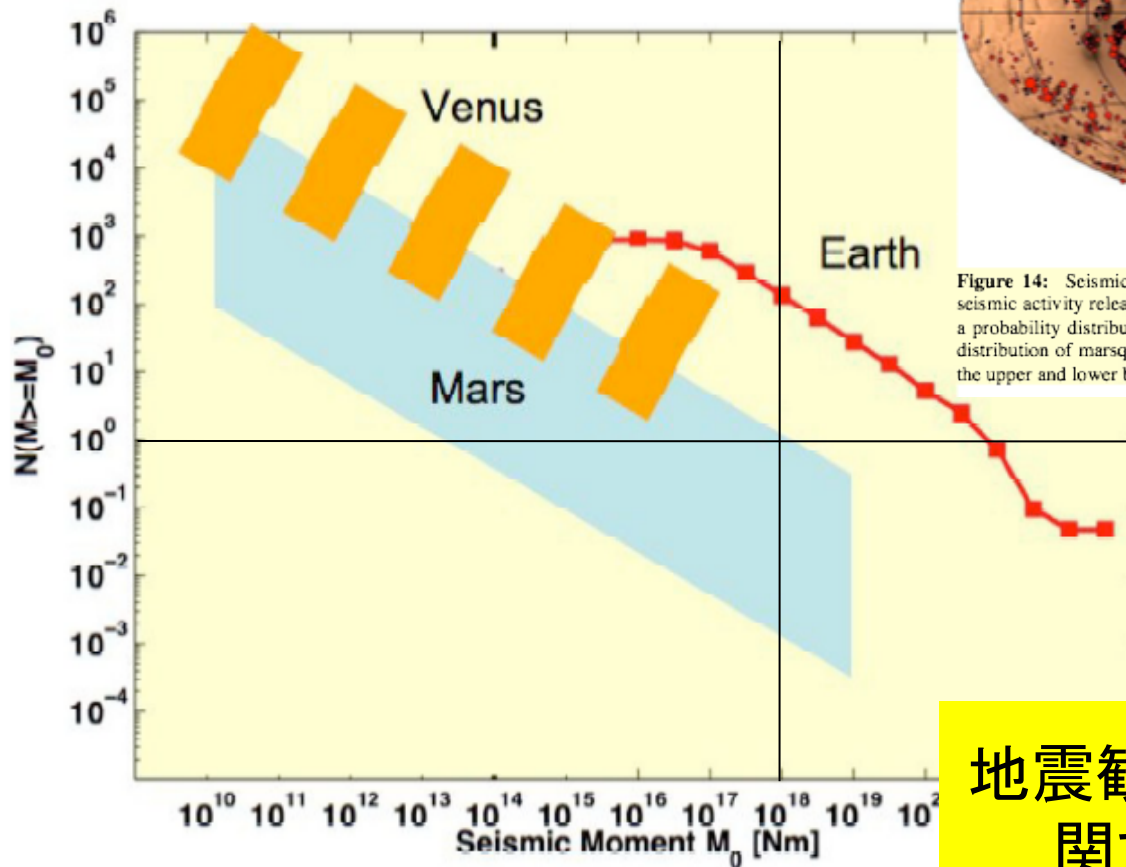


Figure 12 Seismic activity of the telluric bodies. The figure shows the number of earthquakes $N(M \geq M_0)$ versus seismic moment M_0 [Nm]. For the Moon, the estimate is obtained from Oberst (1987) from moonquakes. For Mars and Venus, the activity is estimated from various published data. The terrestrial activity is the mean activity in the period 1984-2004. Figure after Knapmeyer *et al.* (2006)

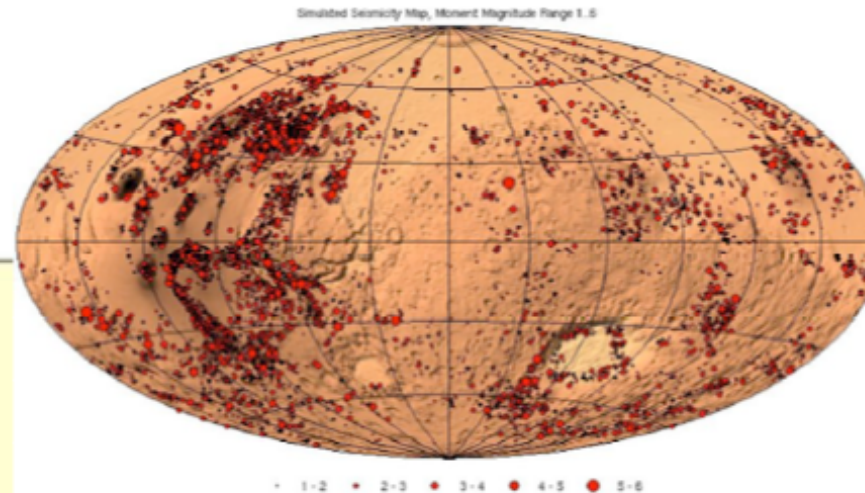


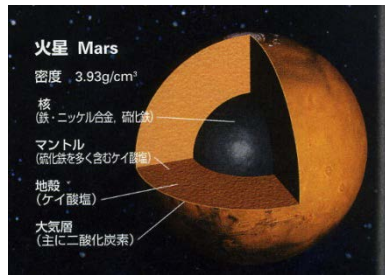
Figure 14: Seismicity map of Mars from Knapmeyer (2006), determined from a MonteCarlo simulation of seismic activity releasing a cumulated moment of 10^{15} - 10^{19} Nm per year (from Golombek *et al.* 1992), and a probability distribution of epicenter locations provided by the density of surface faulting. The map shows the distribution of marsquakes that might be expected during one Earth year, with an annual seismic budget of 10^{15} - 10^{19} Nm. The upper and lower bounds (Knapmeyer, personal 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)

本提案の位置づけ

現状の理解

おもに表面・
上空からの観測



表面

MELOS 1

地震探査
○浅部構造
○表面環境
○地震活動
◎連続データ

回転計測
○慣性モーメント

少し深い
先駆観測

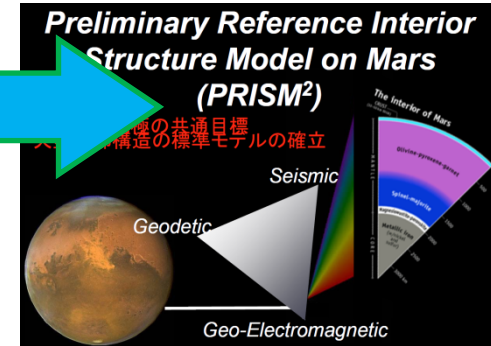
MELOS 2

本格地震探査
◎広帯域地震観測
—> 深部構造
◎観測網
—> 活動度、震源分布、水平構造
◎長期データ
—> 大気・固体結合

回転計測
○慣性モーメント
◎流体核共鳴

本格観測

標準内部モデル



- 火星形成、進化モデル
- 比較惑星
- 太陽系科学

●MELOS1におけるリソース検討

藤田さんの資料(MT-13-036)より

The 4th International ARA Days, 28 May 2013



MT-13-036

Mission scenario

とりあえず、地上に降りて(落ちて)くるもの？

■ EDL phase

- Guided flight by use of a lifting aeroshell equipped with light-weight TPS
- Deceleration by a supersonic parachute with reefing control
- Sky-crate to land a rover

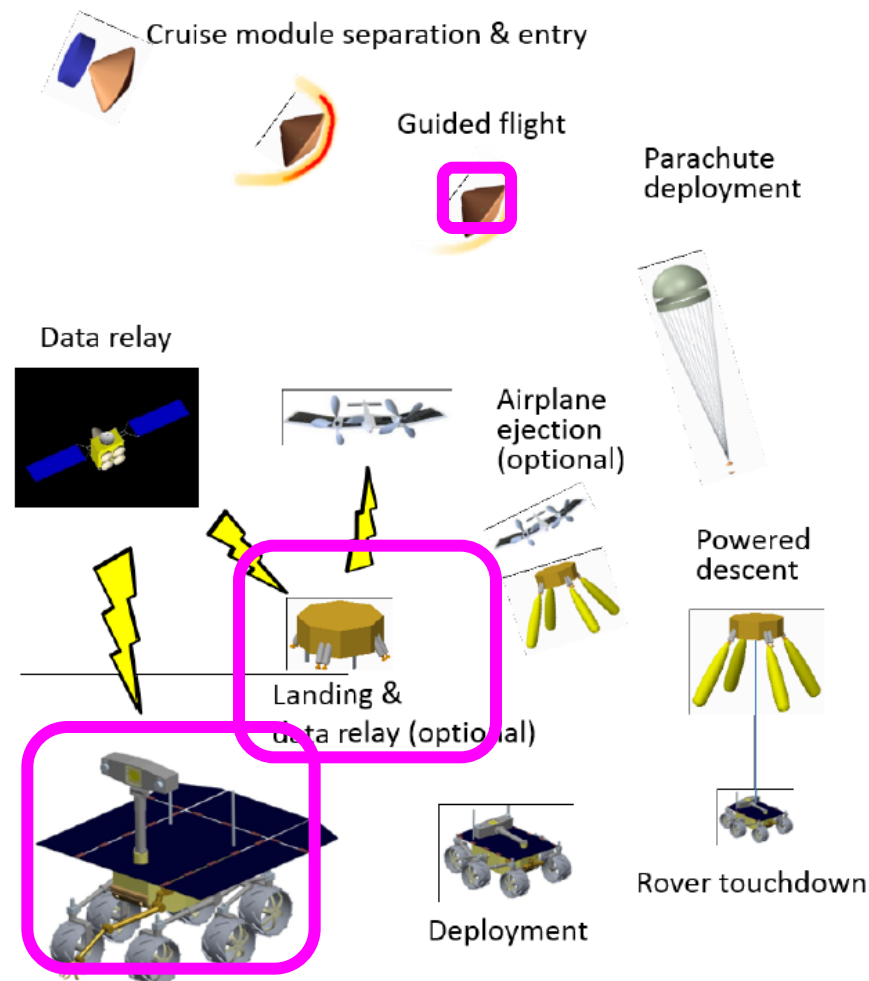
■ Mission phase

Rover

- XLGA for direct communication with ground station (HK)
- UHF communication with relay orbiters for mission data transfer

Airplane (optional)

- 2-m long & 2.6-m wide, 4 kg
- A half-hour flight
- UHF communication with LM



藤田さんの資料(MT-13-036)より

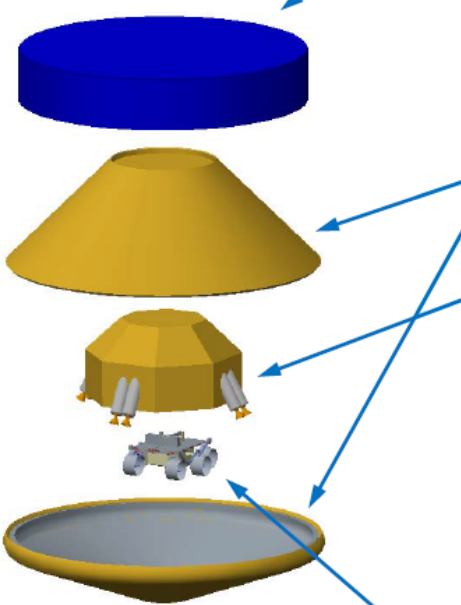
The 4th International ARA Days, 28 May 2013



MT-13-036

19

System Configuration (Baseline)



Subsystem / component	Mass (kg)
Cruise module	156
COM (XLGA and XMGA)	6
AOCS (STT, DSS, RW etc.)	8
RCS (tank, thrusters, driver gas, propellant, valves etc.)	44
EPS (SAP, APR, BAT, PCD etc.)	35
STR	48
Margin	15
Atmospheric entry module	540
Aeroshell module	83
Forebody aeroshell	48
Parachute aeroshell	35
Landing module	360
COM/CDHS (DHS, UHF and X-band components)	27
AOCS (AOCU, ND, IRU, ACC etc.)	21
RCS (tank, thrusters, valves etc.)	66
RCS (driver gas and propellant)	56
TCS (MLI, heater etc.)	5
EPS (BAT, PCD, etc.)	35
INT (HINT, MINT, TINT)	29
Parachute	24
Hanging device	22
STR	74
Rover	51
Margin	55
Total	705

●MELOS1におけるリソース検討

MELOS1の地上設置(落下)機器

- 83kg Aeroshell Module
- 360kg Landing Module
- 50kg Rover(payload 5+2kg・・・生命・気象)
- エアバッグ(オプション)

これらのリソース範囲内で、地震探査・回転計測ができそうなこと

●MELOS1提案(地震探査・回転計測)の目的／意義

- ・表層～浅部の探査に限定
- ・MELOS2につながる技術／データをなるべく含める
(設置法、環境計測、連続地震観測、、、)

●MELOS1目標設定

- ・惑星地震探査の経験(MELOS2へ向けて)
 - ・・・立案／開発／運用／解析
- ・表層構造探査
 - ・・・Wet(?)な地域の地下構造、探査手法・センサの試行、InSightと協同/相補的な探査(地域差データ)
- ・MELOS2へ向けた基礎データ
 - ・・・表面状態、環境(設置方法等検討材料)
地震活動、背景雑音ー>連続データの取得

●探査方法検討(リソース条件)

地震探査センサー

- ・ペネトレータ地震計
- ・ピエゾ加速度計
- ・MEMS

搭載機器、設置法

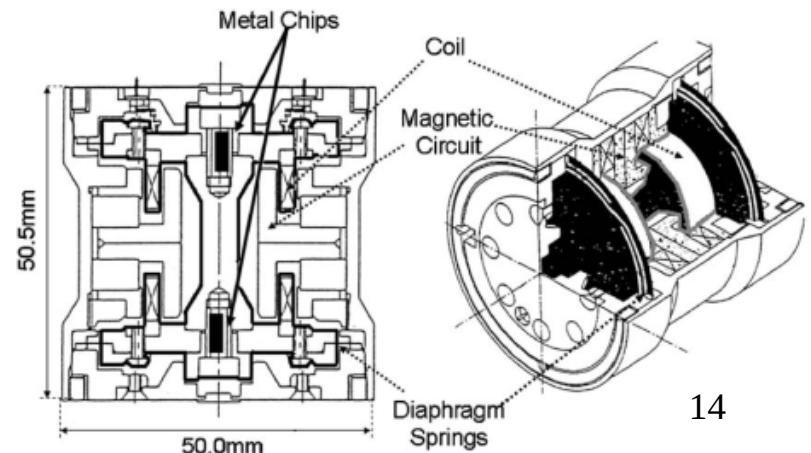
- ・83kg Aeroshell Module ……落下
- ・360kg Landing Module ……軟着陸／脚に組込／固定点
- ・50kg Rover ……アーム組み込み等
- ・エアバッグ(オプション) ……落下

回転計測 ……0.5火星年以上(固定点)

- ・1-way ……高精度信号源搭載
- ・2-way ……トランスポンダ搭載

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
 $< \sim 10^{-8} \text{m/s}^2 / \sqrt{\text{Hz}}$ (100mHz～1Hz)
- ・サイズ、重量
 50x50x70、0.3kg 月ペネトレータ地震計を小型化
 ……やや大きく、重い



ピエゾ加速度計

- ・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



MEMS加速度計

- 帯域 ……DC～数kHz
- 小型だが低感度
 $< \sim 10^{-5} \text{m/s}^2$
 —> 高感度化？
- 耐震性良好



●探査方法(案1、定点長期)

地震探査センサー(φ100×50×3脚、5kg、10W)

・ペネトレータ地震計 ・**ピエゾ加速度計** ・MEMS

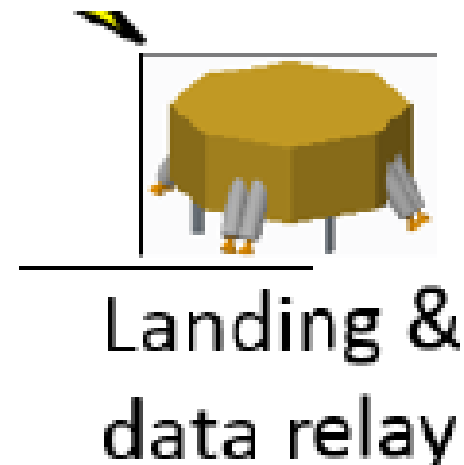
データ取得: イベントトリガ、**連続、アクティブ探査**

搭載機器、設置法

- ・83kg Aeroshell Module ... 落下
- ・**360kg Landing Module ... 軟着陸／脚に組込／固定点**
- ・50kg Rover ... アーム組み込み等
- ・エアバッグ(オプション) ... 落下

回転計測 ... 0.5火星年以上

- ・**1-way ... 高精度信号源搭載**
- ・2-way ... トランスポンダ搭載



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

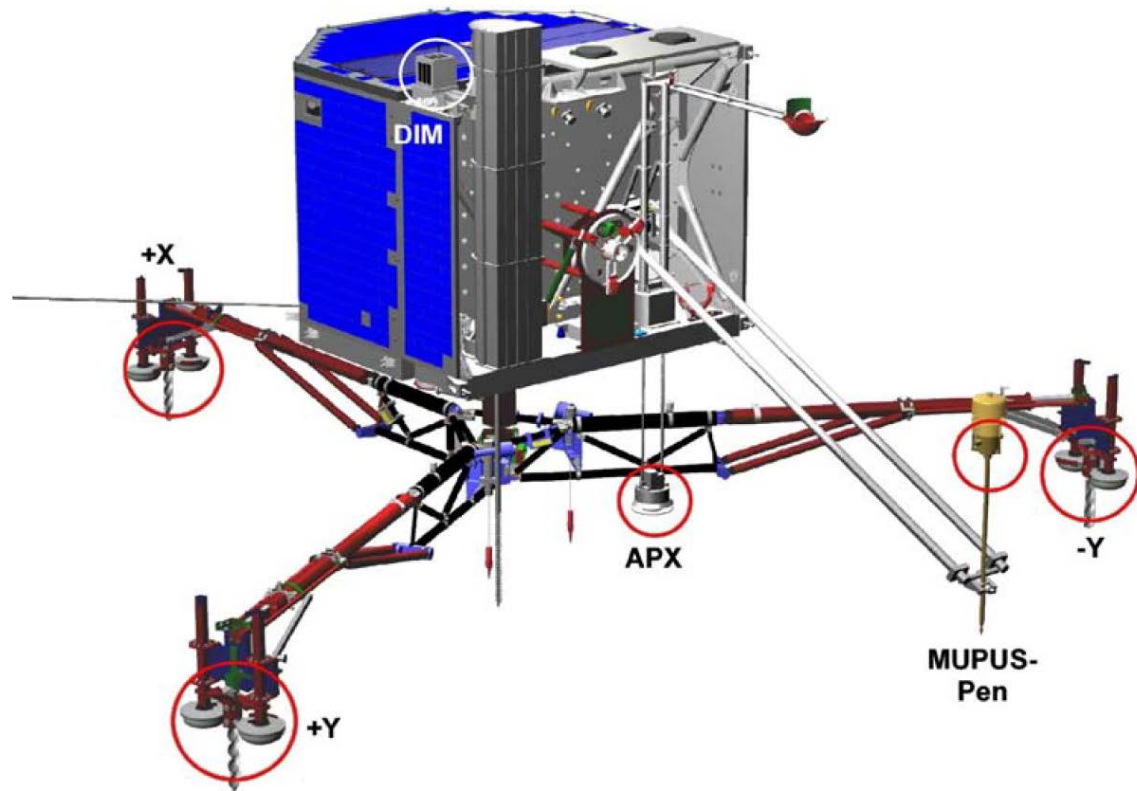


Figure 1. The Rosetta lander Philae shown in landed position with unfolded legs. The SESAME sensors are encircled and the Philae units carrying them are indicated by their designations. The feet are marked with their directional designations +Y, -Y and +X.

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

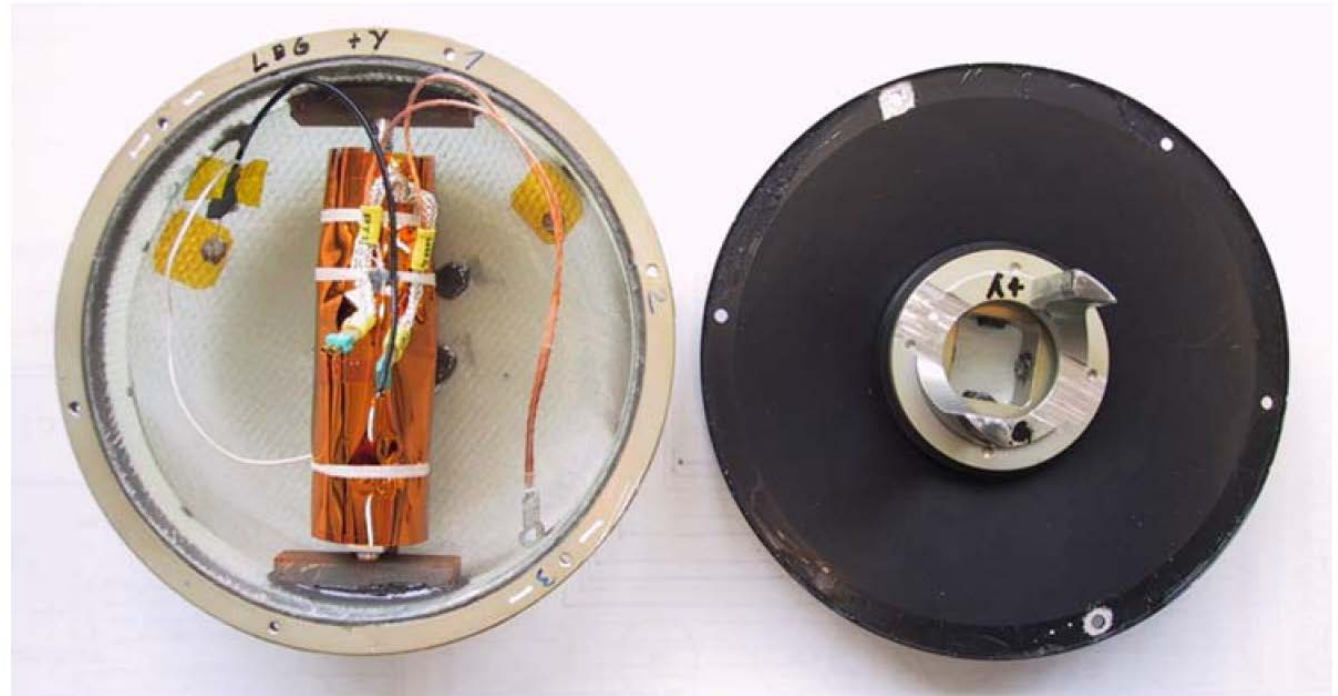
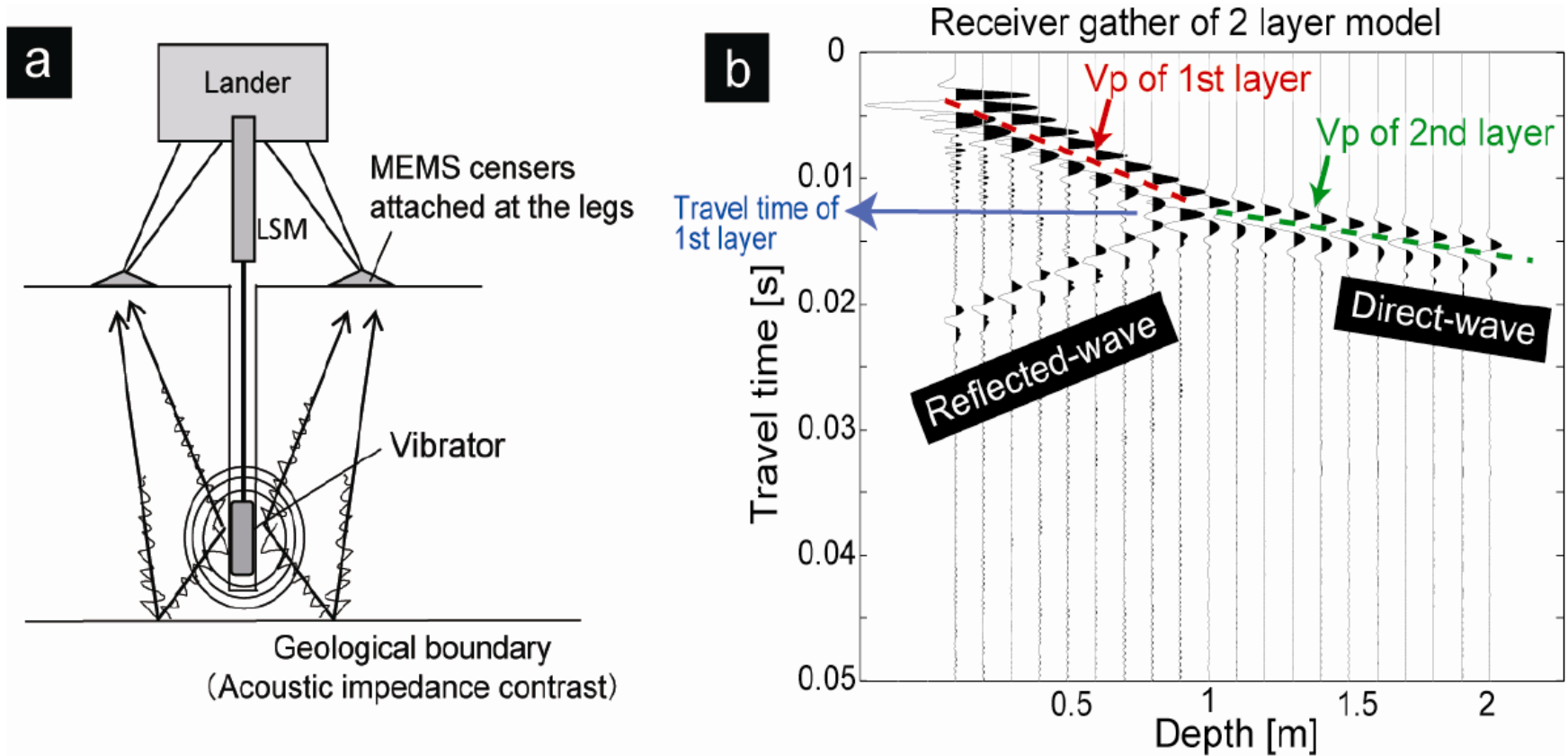


Figure 2. Photograph of the transmitter sole (left) and its black cover (right) of Philae foot +Y. The sole (ring diameter: 101 mm) contains an insulated wire-mesh acting as an electrode for the PP instrument. Above the mesh and between two glass-fiber bearings, the CASSE piezo-stack transmitter is mounted.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



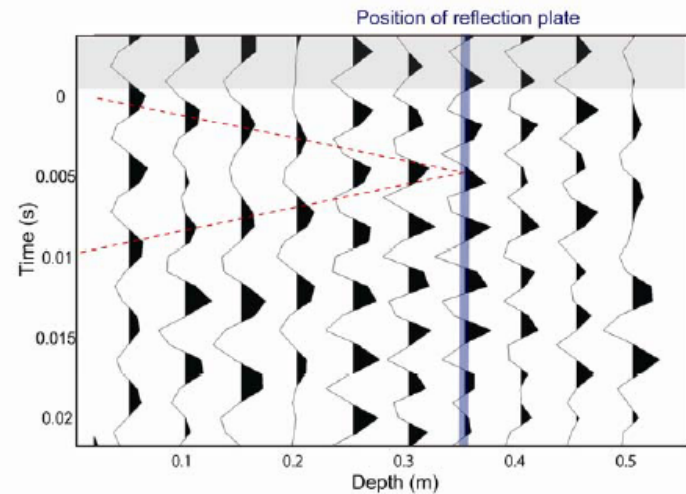
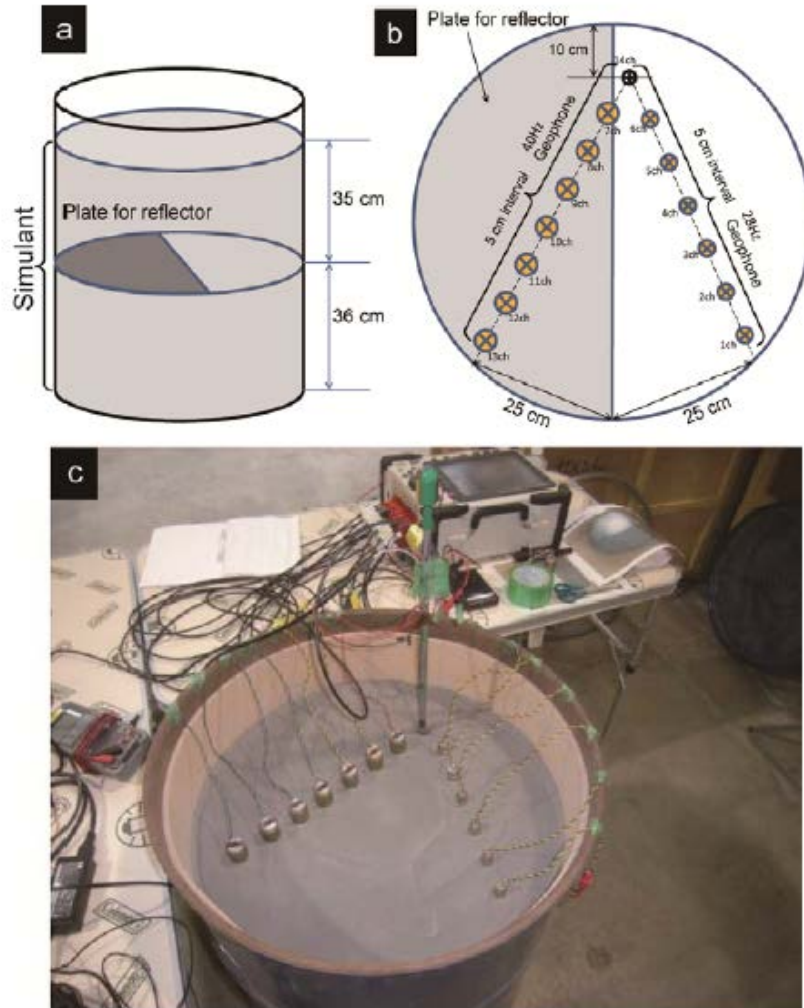


Figure 8. Example of receiver gather. Direct-wave and the reflected-wave at the plate (0.35 m in depth) can be identified. Negative time generated via cross-correlation analysis (gray zone) should be ignored in these results.

●探査方法(案2、移動探査)

地震探査センサー

- ・ペネトレータ地震計
- ・**ピエゾ加速度計**
- ・MEMS

データ取得: イベントトリガ、連続、**アクティブ探査**

搭載機器、設置法

- ・83kg Aeroshell Module ...落下
- ・360kg Landing Module ...軟着陸／脚に組込／固定点
- ・**50kg Rover ... アーム組み込み等(In situ浅部構造探査)**
- ・エアバッグ(オプション) ...落下

回転計測 ...0.5火星年以上

- ・1-way ...高精度信号源搭載
- ・2-way ...トランスポンダ搭載

イメージ … 2つのセンサー(発震、受信)を一体化して
Roverのロボットアームに取り付け。電気伝導度も。
長さ～50cm、重量～1kg、電力～5W

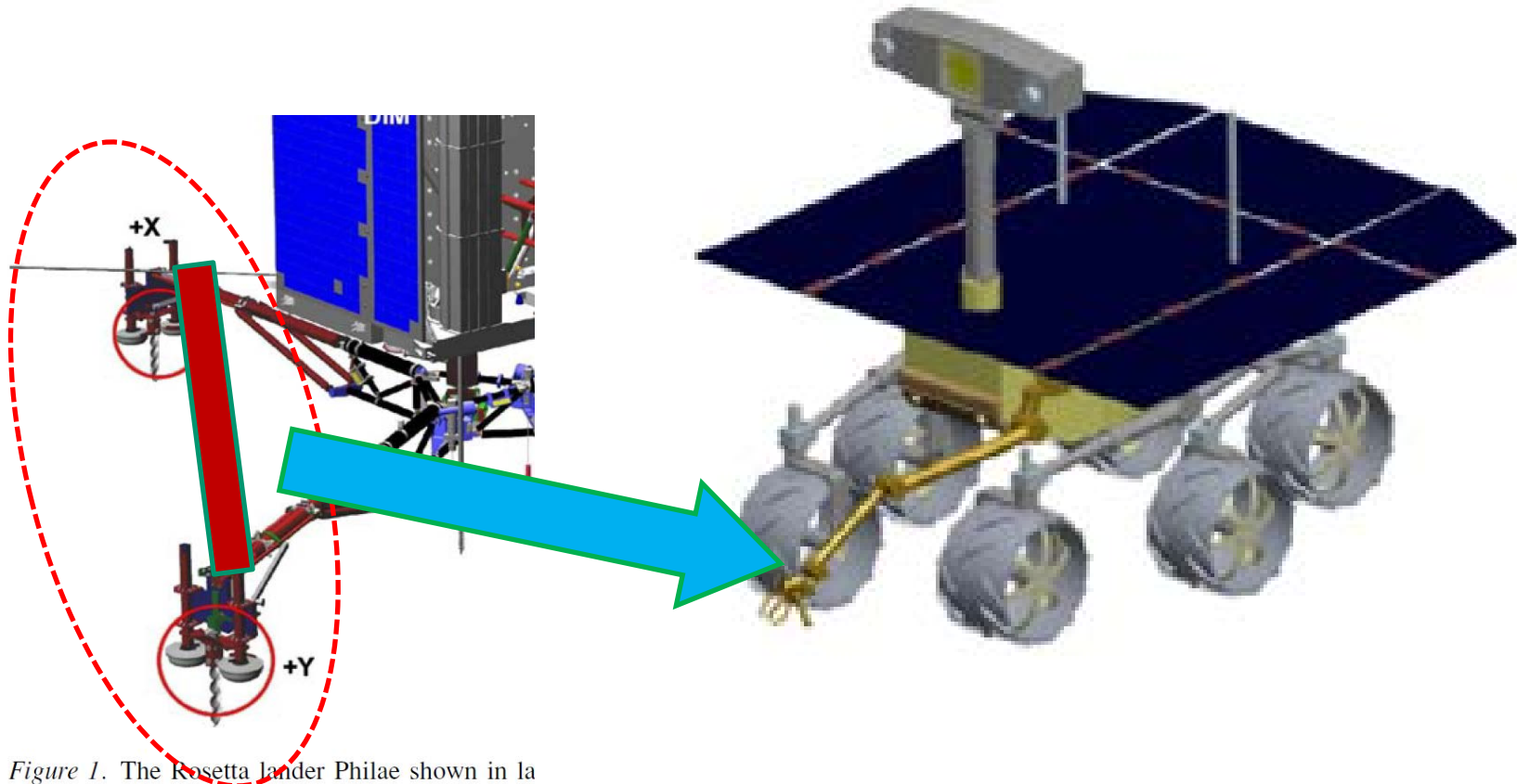


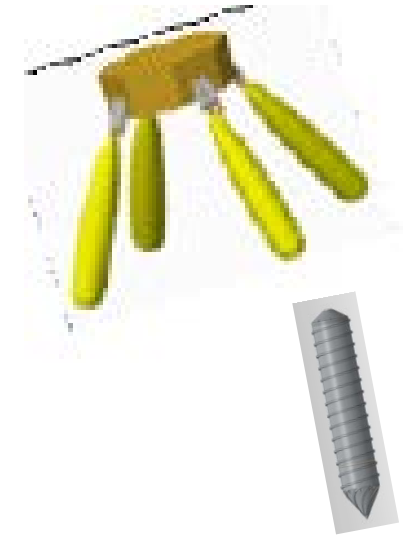
Figure 1. The Rosetta lander Philae shown in la
sensors are encircled and the Philae units carrying
are marked with their directional designations +Y

●探査方法(案3、ペネトレータ)

地震探査センサー($\phi 100 \times 400$ 、5kg、10W)

・ペネレータ地震計 ・ピエゾ加速度計 ・MEMS

データ取得: イベントトリガ、連続、アクティブ探査



搭載機器、設置法

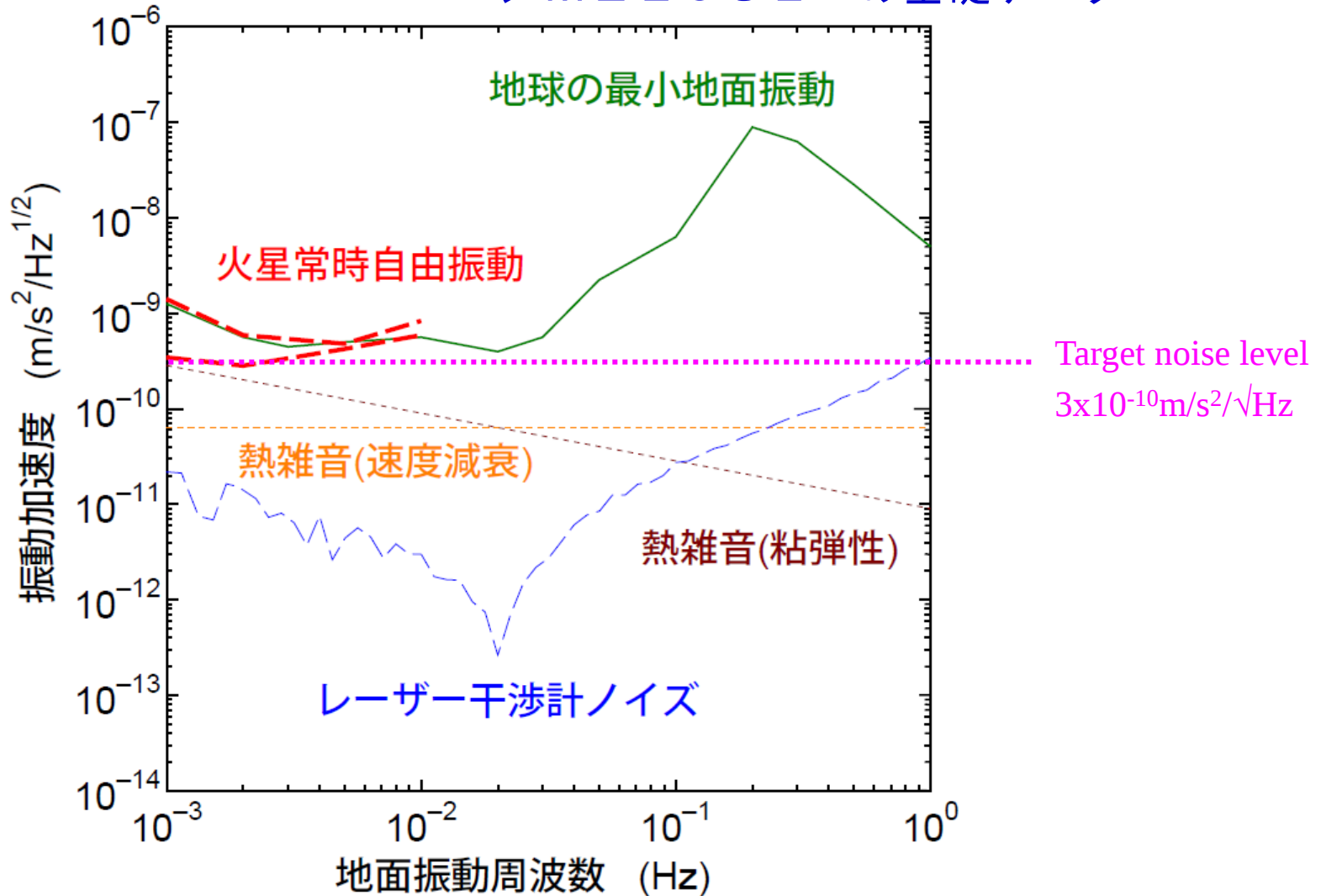
- ・83kg Aeroshell Module ...落下
- ・360kg Landing Module ...低空からペネトレータ放出
- ・50kg Rover ... アーム組み込み等(In situ浅部構造探査)
- ・エアバッグ(オプション) ...低空からペネトレータ放出
- ...通信・電池の確保

回転計測 ...0.5火星年以上

- ・1-way ...高精度信号源搭載
- ・2-way ...トランスポンダ搭載

連続・長期データ→微動のスペクトル→励起源・表層環境（気圧・風）の推定

→MELOS 2への基礎データ

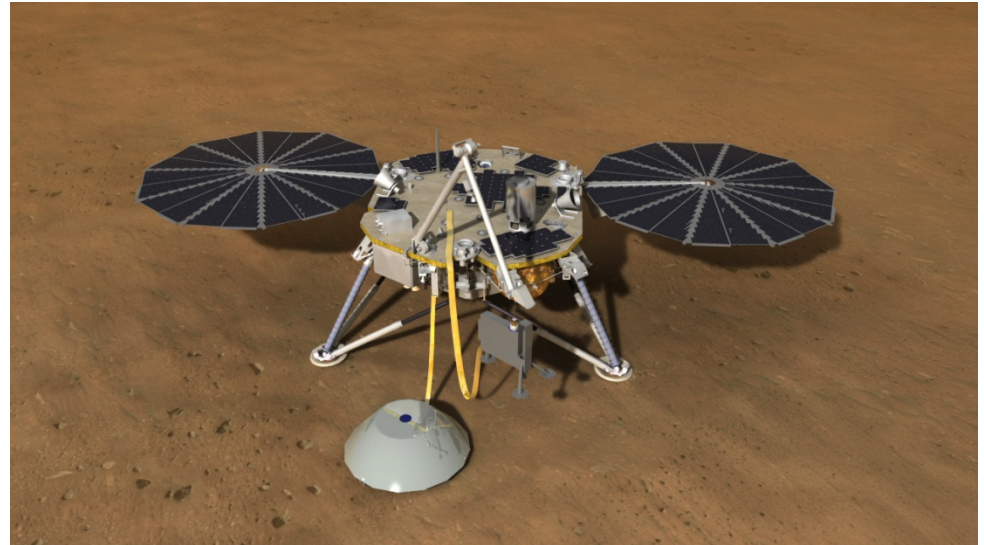
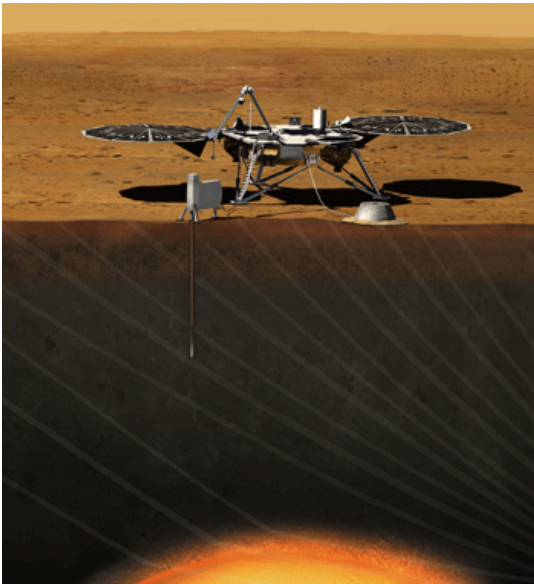


●提案時の質問項目への回答

- ・サイエンスの意義(MELOS1,2)
 - 科学の大きな枠の中での意義 …… 全球的な内部構造探査
 - 火星の現状理解、起源・進化の推定、比較惑星、太陽系起源
 - MELOS1で実施する意義
 - …… 表面環境計測、探査ノウハウ蓄積、MELOS2への布石
 - 類似の他ミッションと比した「存在感」
 - …… 地域性(Wetな地域)、アクティブ探査、長期観測
- ・測定するデータの必要性(精度、分解能など)
 - …… 地震 24bit、3ch、回転 10^{-10} 信号源安定性(間欠計測)

InSight(2016)

- ・地震観測 帯域 $0.02\text{Hz}\sim$ 、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



・測器定義(リソース要求)

案1(定点長期) Landing Module 軟着陸、設置脚、通信、電源、越夜

案2(移動探査) Rover アーム、通信、電源

案3(penetrator) Landing Module / Air Bag ～10m以内降下、
penetrator放出、通信中継点

・搭載に向けての開発ストラテジ

- ヘリテージとクリティカル要素

地震計測、アクティブ探査、回転計測、降下・着陸技術、通信
／ 電源、越夜(気温)、発射・着陸時振動、通信量

- 開発(サイエンス推進)体制

地震探査: 新谷、小林、白石、辻、石原、千秋

回転計測: 岩田、松本、菊池

その他: 地震学コミュニティ(連続データ解析)