

# 參考資料

## (参考1)月の科学的探査の流れ(1/3)

### (地球の場合)

- 主な情報が地表関連データに制約された時代には、統一的な地球像を描けなかった。
- 全球的地震計ネットワークで内部を地震波で見通すことが出来るようになって、地球についての他の地球科学的情報も総合し、統一的理解が進んできた。  
⇒今の地球のテクトニクス(大陸移動、造山活動、火山活動、地震活動など)を統一的に理解し、地球の起源と進化の理解へ

### (月の場合)

- 月科学の主たる情報は表層について遠隔探査で得られたものである。有人のアポロ計画で得られた月内部に関するデータは限られたものであり、全体の理解には不十分。
- 月深部を直接探る月震計ネットワークは月の統一的な理解のために必須であり、得られる内部情報により月科学は質的な変貌を遂げることが可能になる。  
⇒今の月(例:コアの有無、月の表裏の違いなど)の統一的理解から月起源と進化の解明へ、更に、月の理解から地球や地球型惑星の理解へ

# (参考2)月の科学的探査の流れ(2/3)

月表面にネットワークを展開することが将来の月探査にとって重要なステップのひとつ  
米国科学アカデミー(National Academy of Science)

## 1. 1978年

- ・ 月探査の主要な科学目標と優先度は
  - (1) 月表面の化学組成の全球的、地域的スケールで決定すること
  - (2) **熱流量**を全球的、地域的スケールで決定すること
  - (3) **月の中心部のコアの性質**を決定すること

## 2. 1990年

- ・ **月震ネットワーク、熱流量測定、月内部構造の研究、月コアの大きさを決定**する事が優先度の高いものとして推薦。

## 3. 2003年

- ・ **地球物理学ネットワークによる科学(地震と熱流量)**によって、内部構造、発熱性元素の分布、地殻、マントルの水平方向、垂直方向の非均質性、鉄に富むコアの存在などを決定することができる。
- ・ **地球物理学ネットワーク**は小さな天体がいかに分化し、月の全体の組成が地球とどう関係しているか、惑星の組成が太陽系星雲の凝縮や集積過程とどのように関連しているかについてのデータを与える。(日本の**LUNAR-A**との協力についても触れられている。)
- ・ 月でのキー技術が月裏面でのローバーと**地球物理学ネットワーク**のリレー衛星による運用と記述。

**1970年代から現在まで月震観測などの地球物理学ネットワークに関する重要性の認識は一貫している。**

- 参考文献1. Strategy for Exploration of the Inner Planets: 1977-1987(COMPLEX, published 1978)  
2. 1990 Update to Strategy for Exploration of the Inner Planets (COMPLEX, published 1990)  
3. New Frontiers in the Solar System: An Integrated Exploration Strategy (COMPLEX, published 2003)

## (参考3)月の科学的探査の流れ(3/3)

ペネトレータは月面上にネットワークを構築して、搭載する超高感度の短周期月震計(地球の高感度地震計より~3桁感度が高い)により、独立して震源の決定や内部構造の解明などが可能。また、熱流量計測から月の全球的放射性元素の分布が分かる。これらから月の進化過程に迫ることができる。

- 相対的に軽量なため、ネットワーク構築に適している
- 人のいけない場所に設置できる(例:月裏面、極地域)
- 人のいけない時期に設置できる(例:Solar Max)
- 内蔵電池容量と消費電力によるが、比較的長期の動作が可能(LUNAR-Aペネトレータ仕様は約1年間の運用)
- 熱制御が容易(表層の温度条件に依存しないため越夜可能。極などの高緯度設置を除けば、保温用のヒータ電力やアイソトープヒータなどを必要としない。)
- 貫入時に表層と密なコンタクトを取って設置するため、月震・熱観測に適した環境を実現
- 独立したシステムのため、付帯設備・装置などからの外乱(参考5、6)が無く、超高感度での月震観測が可能(参考7)

※長周期月震計測は、着陸機により行うのが妥当(参考4)

(参考4)月震学による月内部構造探査 — 月震観測周波数帯域と月震計の開発状況・運搬設置方法 —

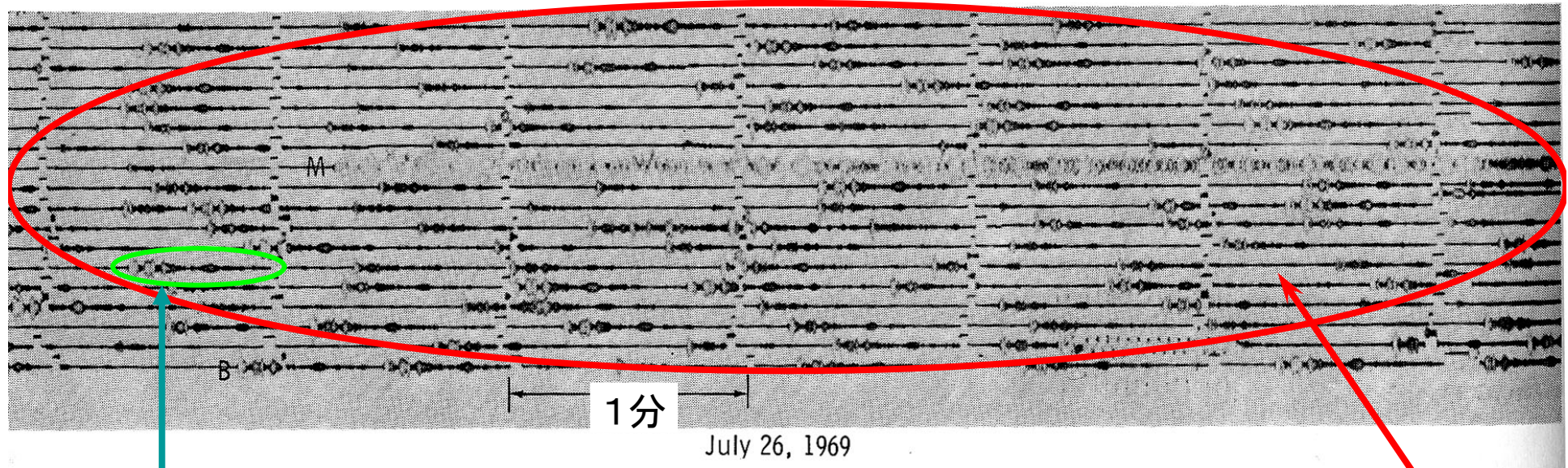
- **短周期観測：** 0.1Hz～10Hz帯域；月震で特徴的な周波数は～1Hz
  - [できる事]**
    - 震源決定
    - 発震機構決定
    - 月震(地震)波速度構造決定
  - [分かること]**
    - ⇒ 震源分布(歪み分布)
    - ⇒ 歪みの方向
    - ⇒ 内部の物質・構造・状態
      - 状況：～1Hzでアポロ短周期月震計より1桁高感度の月震計を開発済み。
      - 運搬設置方法：ペネトレータによる。
- **長周期観測：** ～0.05Hz(周期20秒)～0.01Hz(周期100秒)帯域
  - [できる事]**
    - 月の共振(自由振動)  
周波数とそれらの強度と  
時間変化の決定
  - [分かること]**
    - ⇒ 全球の粘弾性的性質
      - 状況：地球の広帯域地震計(STS-1)より1桁以上高感度なものの開発が必要。
        - 方法1：上述のペネトレータ用短周期月震計を1桁～2桁長周期化する。
        - 方法2：IPGP(パリ大)の火星探査用広帯域地震計(VBB:Net Lander用開発品)を～1.5桁高感度化する。
      - 運搬設置方法：ランダーからの埋設などによる(長周期月震計の耐衝撃性は低い) 43

## (参考5)着陸船等が月震観測に与える外乱(1/2)

- 月震観測に与える着陸船等による振動の影響
  - － 月は極めて静かなため、小さな振動が月震観測に影響する。
  - － 日の当たり方で着陸船が熱膨張・収縮し、微小振動が発生。  
(月面上の観測装置によるもの、微小隕石衝突によるものも含む。)
  - － 着陸船の振動はほぼ連続的に発生し((参考6)にアポロ11号の例)、着陸船が月面に留まる間、月震観測は困難。
  - － 着陸船と月震計が近いため(アポロの例:20m~200m)、自然月震よりも大きな振幅で観測される。
  - － 今後用いられる月震計はアポロ月震計より高感度のため影響は更に大きい。

外乱を生じないペネトレータが月震観測で有効(参考7)。

## (参考6)着陸船等が月震観測に与える外乱(2/2)



アポロ11号着陸船による振動の連続記録(スケール:1分)

- (特徴) 連続的に振動が生じ、1~2回/日で生じる自然月震の観測を妨害する。  
近くで発生するため遠地の自然月震よりも大きな振幅として観測される。  
短周期成分が卓越する。  
(月自由振動など長周期の月震観測への影響はほぼ無い。)

# (参考7)ペネトレータ運用と観測

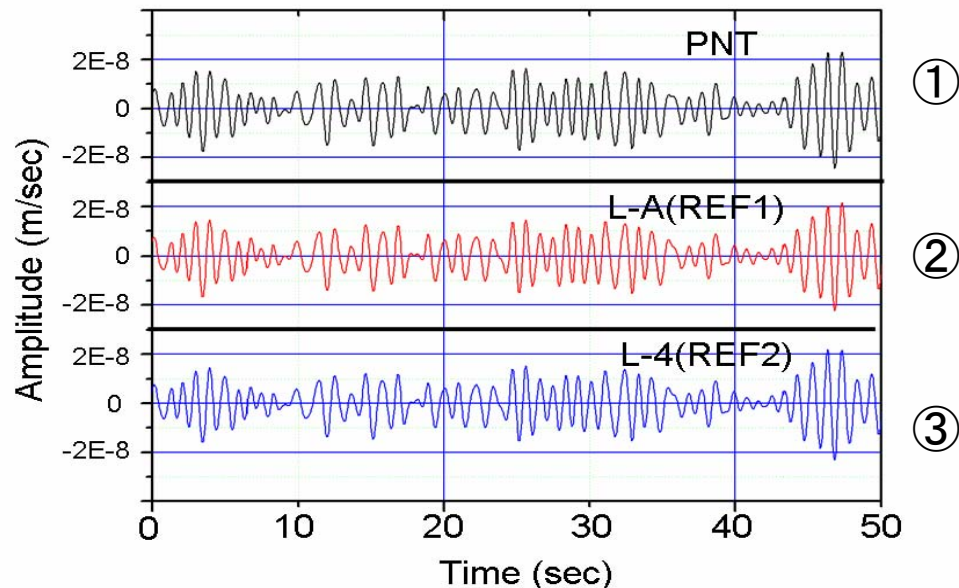
地震観測用トンネルで実施した常時微動(超微小振動)観測

— 例示した常時微動は自然深発月震とほぼ同じ振幅を持つ振動 —

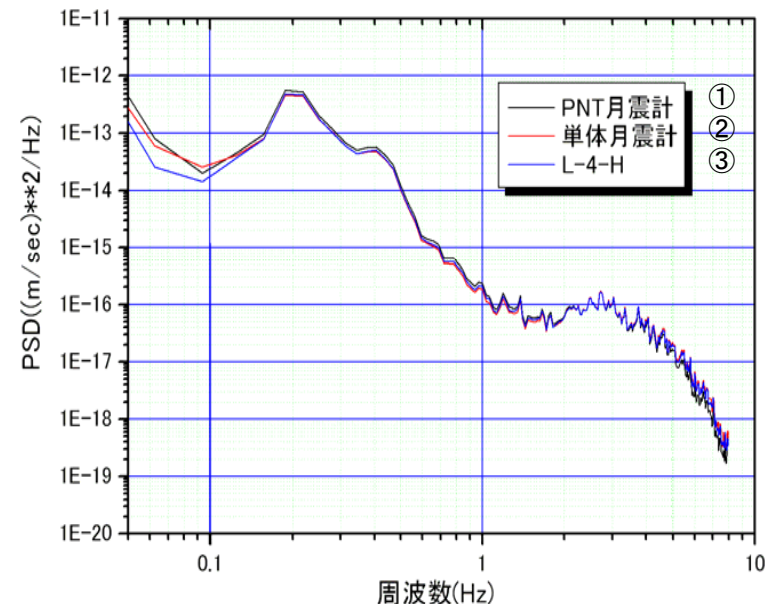
- ①貫入衝撃試験後のペネレータを運用して観測した常時微動
- ②貫入衝撃試験後のペネレータから取り出した月震計で観測した常時微動
- ③比較用の地震計で観測した常時微動

①、②、③は一致 ⇒ ペネレータの運用動作は観測を乱さない。

波形の比較(50秒間の波形を示す)



パワースペクトルの比較



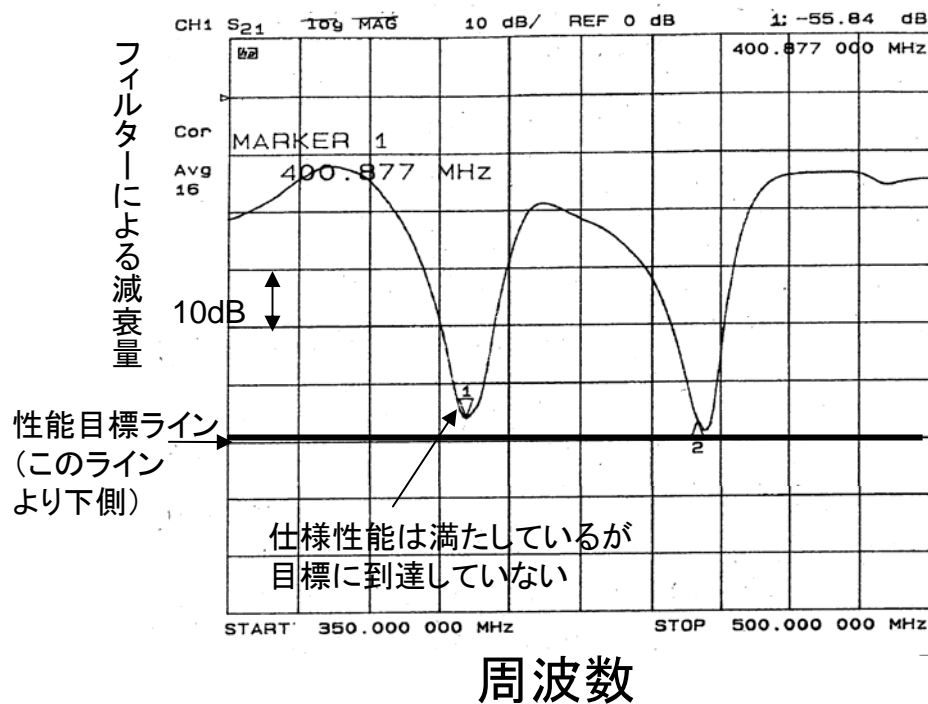
# (参考8)ペネトレータ技術課題への対応(1/4)

母船／ペネトレータ間の通信系のロバスト化

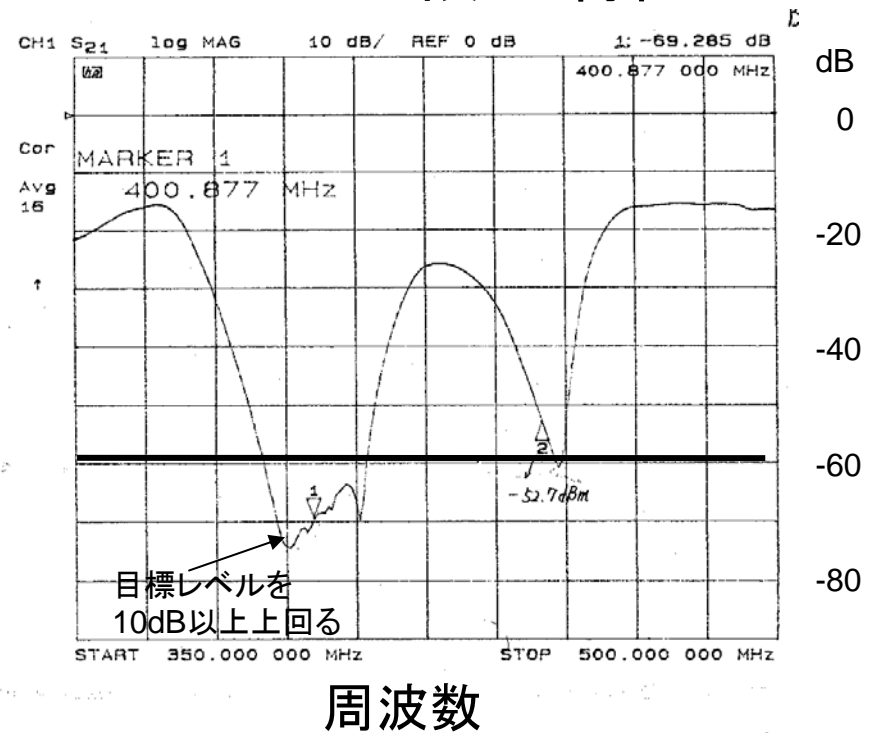
## BEF(Band Elimination Filter) 強化の効果

(送信周波数(400MHz)と受信周波数(450MHz)のアイソレーションを示す。)

対策前 BEF3段のf特性



対策後 BEF5段のf特性



## (参考9)ペネトレータ技術課題への対応(2/4)

各搭載機器の耐衝撃性については確認が完了したが、以下の2点の技術課題への対応が必要。

### (a) 母船／ペネトレータ間の通信系のロバスト化

ペネトレータ貫入後の姿勢等の不確定性に対しても十分な通信マージンを持つために回線の強化が必要である。

通信マージン不足の原因と対策

- 1:ポッピング等によるBEF(通信機の送受周波数分離フィルタ)の中心周波数の移動  
→BEFの多段化で対応
- 2:システムクロックの高調波と送信周波数との混変調による誤動作  
→デジタル系回路見直しとシールドで対応
- 3:CPUクロックの高調波の受信器への混入による受信雑音の増加  
→デジタル系回路見直しとシールドで対応

## (参考10)ペネトレータ技術課題への対応(3/4)

### (b)シーケンス異常への対応

2003年11月に実施した実験で貫入後予定されたシーケンスに異常があり、通信が確立できなかった。電源再投入によるリセット後、動作はすべて正常。  
静電気に起因する可能性が高いと考えられるが、ソフトウェア上の問題である可能性も否定できない。

そのための対策として、静電気対策とソフトウェアの改修を行う。さらに、より信頼性を高めるためにリセット機能を念のため追加する。

#### 静電気対策

- ・発信器の静電気耐性強化
- ・実験時の手順の見直し

#### ソフトウェアの改修

- ・よりロバストであるFMソフトウェアを使用。

#### リセット機能

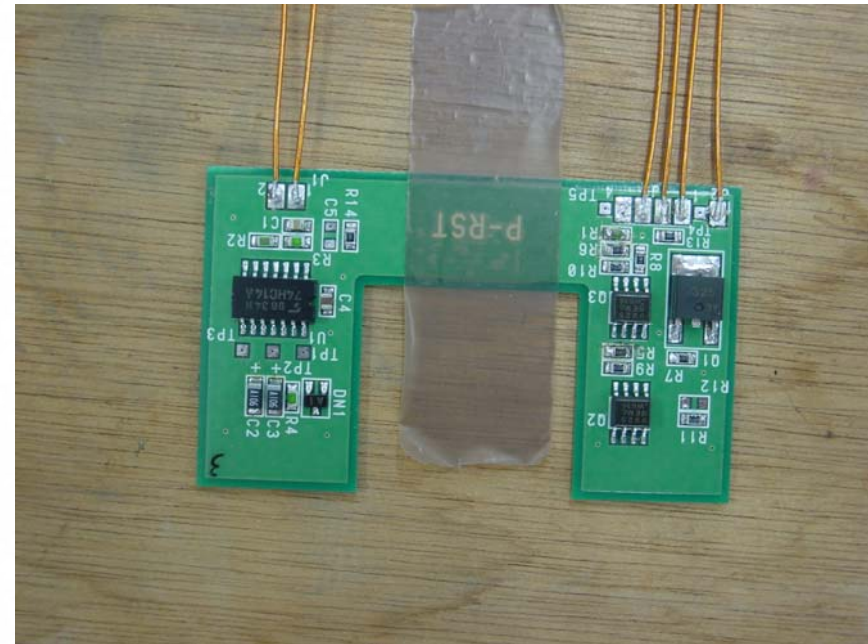
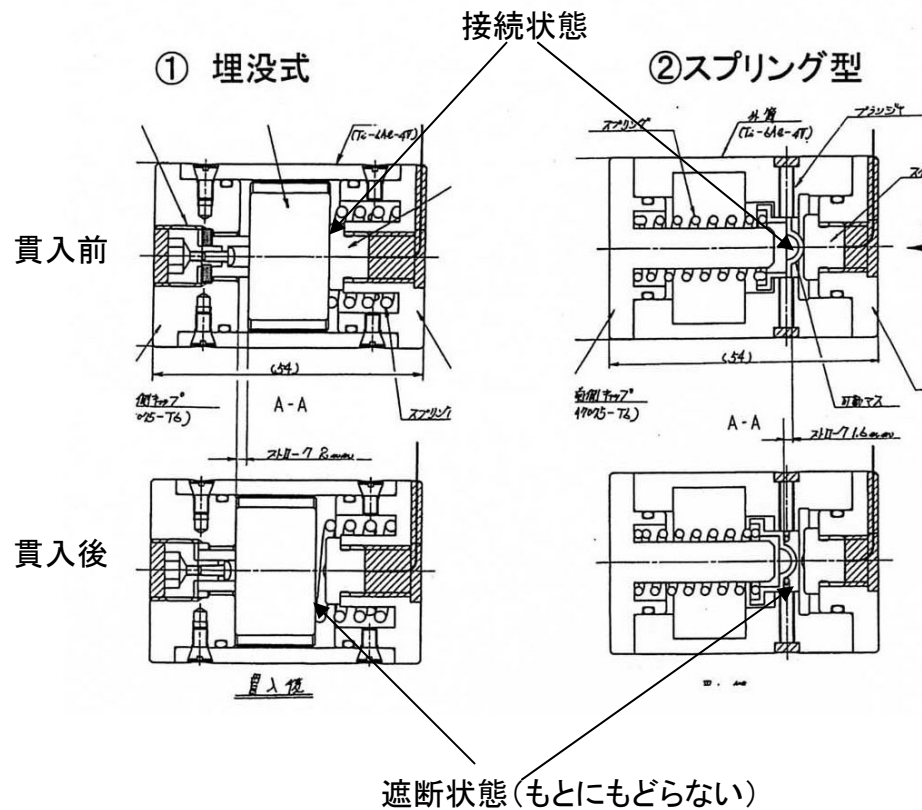
- ・貫入衝撃でメカニカルスイッチ(リセットセンサー)を駆動(ON→OFF動作)
- ・スイッチ動作をトリガーにして3V系バス電源を一定時間遮断

# (参考11)ペネトレータ技術課題への対応(4/4)

リセットセンサー、回路

開発した2タイプのセンサー断面図

回路基板概観



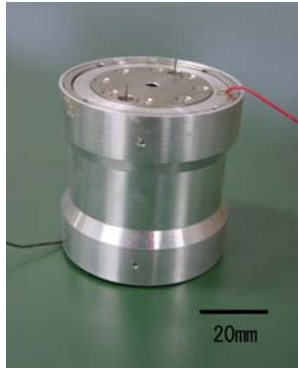
重量: 約200g

大きさ:  $\phi 36 \times 54$

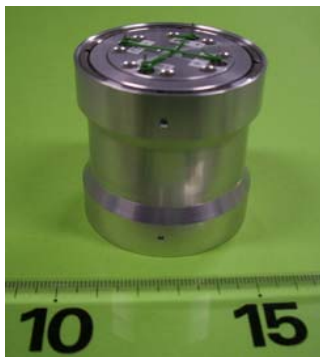
## (参考12)LUNAR-A関連の論文数

	件数
学会発表	261
和文論文	84
英語論文	92
博士論文	5
修士論文	15
卒業論文	6
合計	463

# (参考13) 月震計センサーの応用例



LUNAR-Aペネトレータ  
月震計センサー  
(上下動1成分を示す)



海底地震計センサー  
(上下動1成分を示す)

地上での応用  
例(新幹線、  
変電所、など)

地上用地震計センサー  
(上下動1成分を示す)



**JEP-6A3**  
電源のいらないポータブル地震計  
JEP-6A3は、電源の不要な過減衰型加速度センサを  
防滴ケースに収納した、電源のいらないポータブル地  
震計です。電源に制限のある設置場所での地震観測や  
電源のない場所での臨時地震観測などに最適な地震  
計です。

新幹線沿線に配備さ  
れている地震センサー  
(JEP-6A3)



GPL-6A3P



変電所などの電力施設の安全性確保のため  
の振動計測の例 (四国電力)

# (参考14)国内外のプロジェクトの動向

\* 黒字:過去、青字:現在(PM,FM,運用中)、赤字:検討中、  
 水色領域:高速貫入型(LUNAR-A型)ペネレータは対象天体を選ばない。

方式 観測対象	高速貫入型 (LUNAR-A型)	高速衝突・ ボディー分離型	着陸機+ 埋設機構型	着陸機+ 打ち込み型
水星			BepiColombo-MSE(欧・日) (キャンセル)	
月	Lunar-A(日)(FM制作中) Seleneシリーズ(日)(検討中) LUNA-GLOB(ロシア)*	Polar Night(米(Discovery提案 中・永久影揮発成分計測))		
火星		Mars96(露)(失敗) Deep Space2(米)(失敗) Phobos-Soil(露)(火星ペネ レータをフィンランドと検討) DS2-FOE(米)(概念検討, 米国内限定参加)	Beagle2(欧)(失敗) ExoMars(欧)(PM制作中) MSL(米)(PM制作中) 火星極冠Cryobot(米)(基 礎開発中)	
小惑星/ 彗星	Don Quijote(欧)(ペネレータ が概念検討のみ) Deep Interior(米)(Discovery 提案中・地震計は削除したが、 再提案希望)	CRAF(米)(キャンセル) Phobos-Soil(露)(選抜済・ダ イモスペネレータは概念検討 のみ)		Rosetta(欧)(飛行中)
ガリレオ衛星		JIMO-Europa Seismo Ball(米)(概念検討) Jupiter-Europa Study- Cannonball(欧)(概念検討)	エウロパCryobot(米)(基礎 開発中)	

\* JAXAに対し、ペネレータ提供の打診があった。

# (参考15)将来構想の例(1/3)

## SELENEシリーズ構想の中でのペネトレータを利用した月内部探査の実施案の例

JAXA 中期計画期間 年度	第1期(～2007)	第2期(2008-2012)	第3期(2013-2017)	第4期(2018-2022)	第5期(2023-2027)
年度	FY2006		FY2015		FY2025
フェーズ		月を知る 月探査技術の開発		月利用技術の蓄積 有人月面活動の準備	有人月面滞在
海外の月探査計画 SELENEシリーズ構想		▲LRO(2008,米) ▲Change1(2007, 中) ▲Chandrayaan1(2008,印)	▲RLEP(2011,米) ▲Change2(2012, 中) △SELENE-2	△SELENE-3 △SELENE-4	△SELENE-5
月の科学探査		全球マッピング	深部物質探査 内部構造探査	サンプルリターン 多点観測による地域 多点観測ネットワークによる詳細化	月と地球の歴史の解明 太陽系の分化を探る

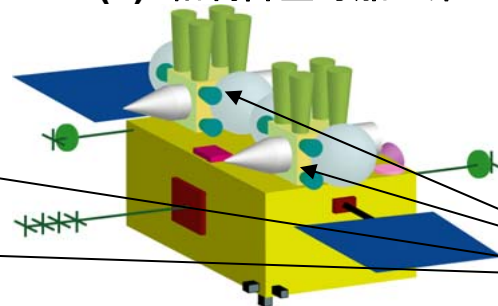
### 1. 周回衛星+ペネトレータの案

### 2. 着陸機+ペネトレータの案

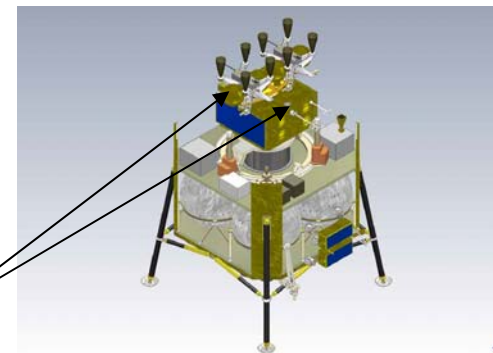
(a)スピン安定型母船の案



(b)3軸制御型母船の案



ペネトレータ



# (参考16)将来構想の例(2/3)

## 火星ペネトレータの構想

Suzuki and Abe, 1998

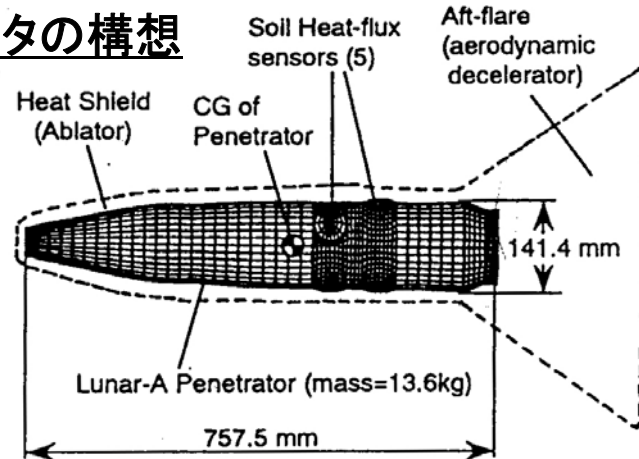
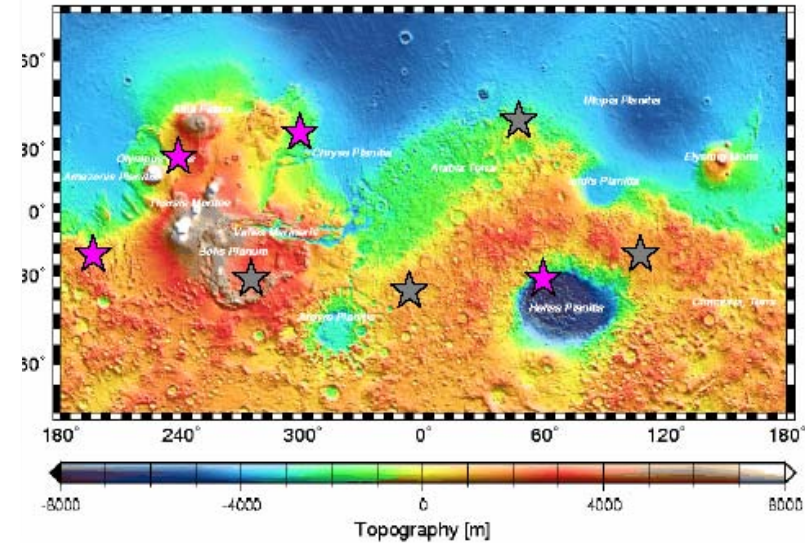
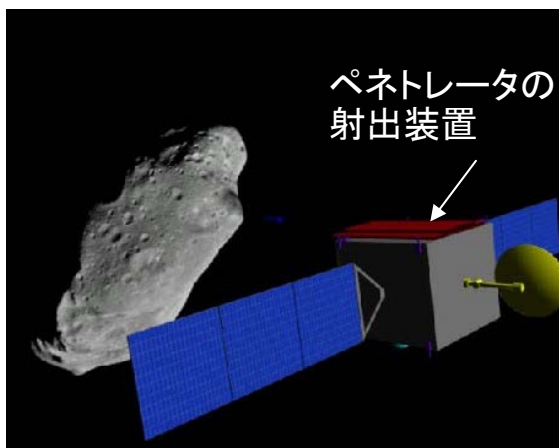


Fig. 1 Mars Penetrator Configuration

## 着陸候補地点



## 小惑星探査ペネトレータの構想



- ★ : Netlander seismic stations
- ★ : PNT seismic stations

## 氷衛星ペネトレータ計画

木星の衛星であるエウロパへのペネトレータ投下。ESAが構想を進めている木星探査ミッションへの搭載を検討。

# (参考17)将来構想の例(3/3)

## ペネトレータを用いた海外との共同観測

**“LUNA-GLOB”**

①ロシア側研究者がLUNA-GLOB搭載用として、JAXA/ISASのペネトレータの可能性打診のため、宇宙科学研究本部に来訪(2006年11月)。

②ペネトレータのLUNA-GLOBへの搭載についての検討の為、2007年1月下旬以降にロシア訪問の予定。

The “Luna-Glob” mission will bring the Russian scientists back to the Moon with a number of unique experiments.

### MAIN FACTS:

Launch.....	2008 - 2015
Launcher.....	Soyuz-2/Fregat
Spacecraft mass (dry).....	420 kg
Propellant.....	760 kg
Payload mass:	
Orbital science.....	100 kg
Lunar-A Penetrators (4 items).....	180 kg
Penetorator Separation System.....	100 kg
Lander.....	600 kg
Margin.....	160 kg
Total.....	2,320 kg

