

A proposal for determining the lunar crustal thickness by one penetrator probe using impact seismic events

(衝突震源を用いた PNT1 点観測での地殻厚の推定)

Naoki Kobayashi¹, Yoshiaki Ishihara², Ryuhei Yamada³, Hideki Murakami⁴, Hiroaki Shiraishi¹, Satoshi Tanaka¹, Masahiko Hayakawa¹, Masahiko Arakawa⁵, Tomokatsu Morota⁶, Taichi Kawamuta⁷, Kiyoshi Kuramoto⁸, Ken Gotoh¹, Tetsuo Yamamoto⁹, The Lunar Internal Structure WG,

¹ Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)

3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara-shi, chuo-ku, Kanagawa-ken, 252-5210 Japan

² RD-Office, JAXA Space Exploration Center (JSPEC)

3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara-shi, chuo-ku, Kanagawa-ken, 252-5210 Japan

³ RISE project Office, National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ)

2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

⁴ Department of Applied Sciences, Faculty of Science, Kochi University

2-5-1 Akebono-cho, Kochi, 780-8520, Japan

⁵ Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kobe University

Nada-ku, Rokkoudai-machi 1-1, Kobe, 657-8501, Japan

⁶ Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Environmental Studies,

Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan

⁷ Institute de Physique du Globe de Paris (IPGP)

35 rue Helene Brion, Case 7071, Lamarck A, 75205, Paris Cedex 13, France

⁸ Department of Cosmo Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

Kita-10, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo City, 060-0810, Japan

⁹ Center for Planetary Science, Graduate School of Science, Kobe University

7-1-48, Minamimachi, Minatojima, Chuo-ku, Kobe 650-0047, Japan

ABSTRACT

The thickness of the lunar crust, so its volume, is a key parameter for understanding the size of the lunar magma ocean and differentiation process in it. Recently a relative crustal thickness map can be depicted using the high precision topography and gravity data of Kaguya and GRAIL. If an absolute value of the crustal thickness can be determined at even one point, we can estimate of the total volume of the crust even more accurately. An application of a seismic method to determine the thickness is desired although the Apollo seismic experiments were performed in 1970's. Inaccuracy in the determination of source locations with use of the Apollo data prevents us from obtaining an accurate estimate of the thickness. The values of the thickness at the Apollo 12/14 station are estimated in a range of 30 to 60 km. The source location issue, however, can be avoided if we use impact flashes on collisions of meteorites on the lunar surface. Some of these flashes can be observed from the Earth. This fact opens a new type of seismic experiment on the Moon using a penetrator probe carrying a seismic sensor.

For the purpose, we evaluated performance required for the seismic sensor using the inferred impact rate of meteorites. The performance of the sensor is determined by a request that more than one event must be simultaneously observed as a seismic signal and impact flash in an assumed observation period of one year. Considering meteorite flux, seismic excitation efficiency on a collision and attenuation with distance, we need a sensitivity 3.5 times higher than that of the Apollo short period (SP) sensors. The seismic sensor developed in the former Lunar-A project has just the required sensitivity. So we conclude that a definite determination of the crustal thickness is possible by one-year observation by the penetrator system even if only one station can be deployed.

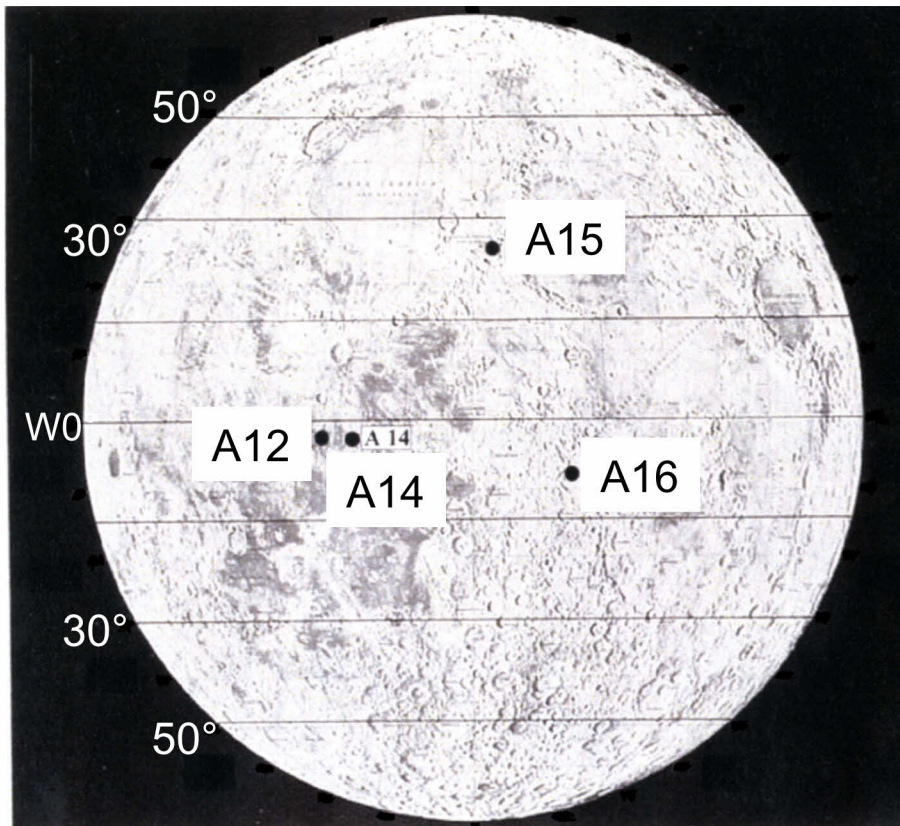
衝突月震を用いた PNT1 点観測 での地殻厚の推定

小林直樹, 白石浩章, 田中智, 早川雅彦, 後
藤健(宇宙研), 村上英記(高知大), 石原吉明
(JSPEC), 山田竜平(NAO), 川村太一(IPGP),
荒川政彦, 山本哲生(神戸大), 倉本圭(北大),
諸田智克(名大), 月内部構造探査WG

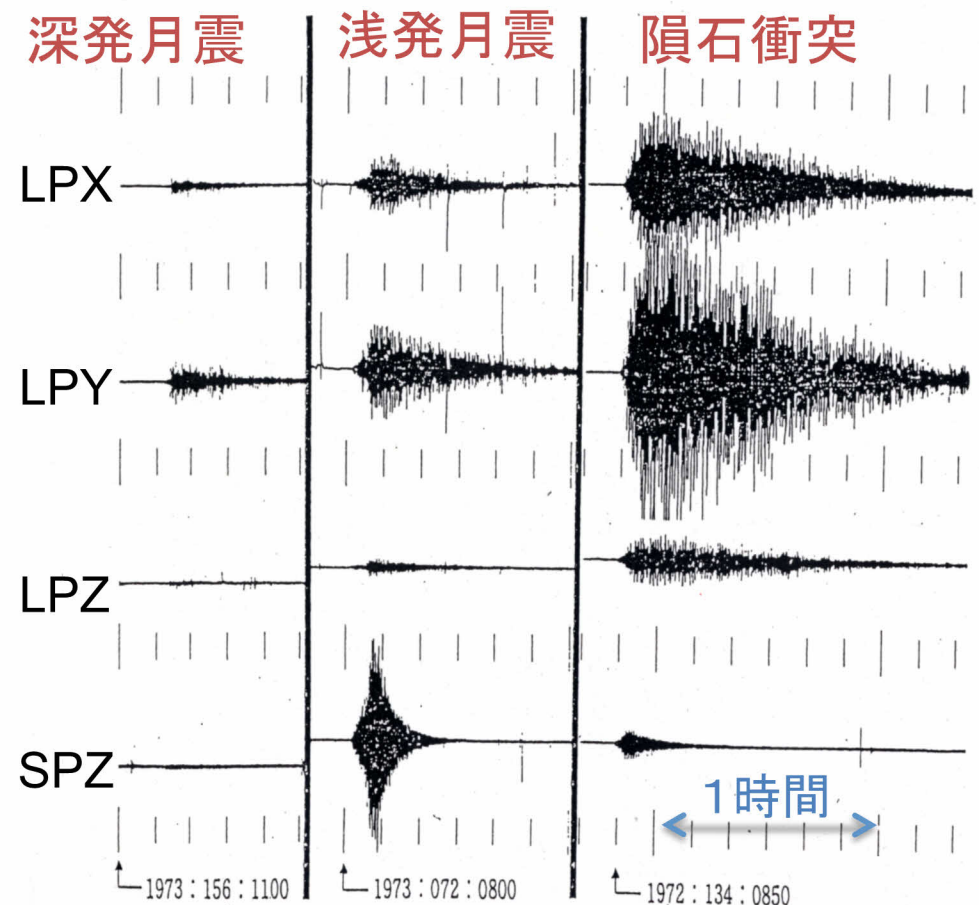
月震観測

- アポロ計画において月面上に地震計の観測ネットワーク
- 深発月震, 浅発月震, 隕石衝突イベントなどの月震を検出

アポロ月震計ネットワーク
modified from [Khan et al., 2002]

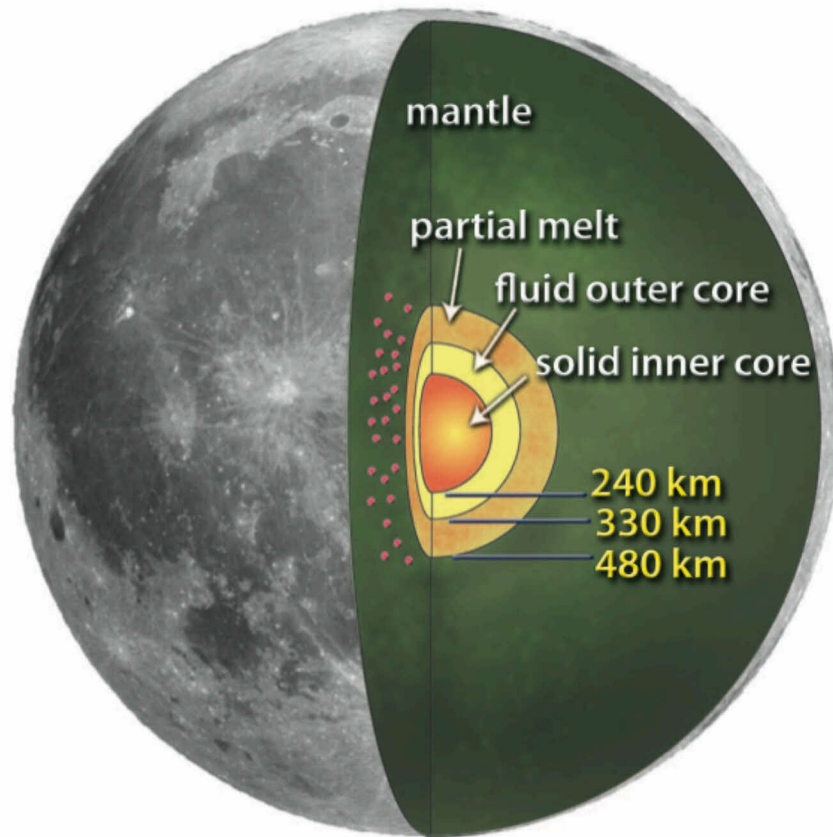


1969 – 1977年



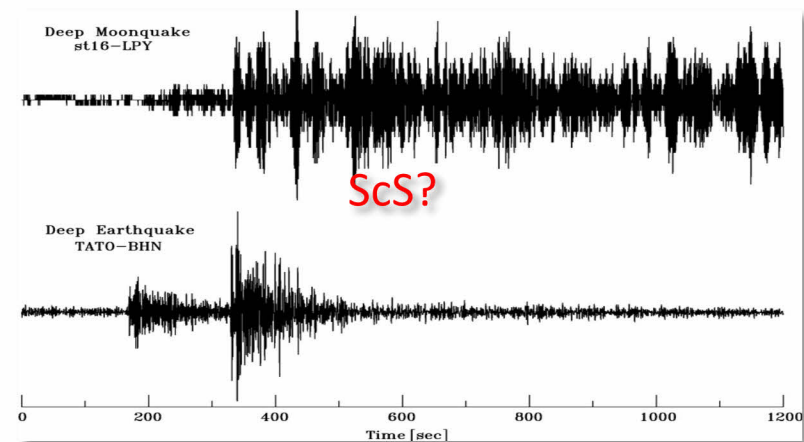
5]

月震学(アポロ月探査計画)



微弱で強い散乱 → 月震観測

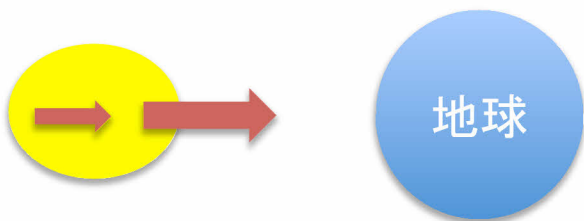
- 自然月震
 - 深発月震(700~1200km)
 - 浅発月震(<200km)
 - 隕石衝突
- 月は分化した天体
 - ✓ 巨大衝突
 - ✓ 初期分化
 - ✓ 熱進化
- Nakamura et al. 1981
- Weber et al. 2011



月震

地震

月震の不思議

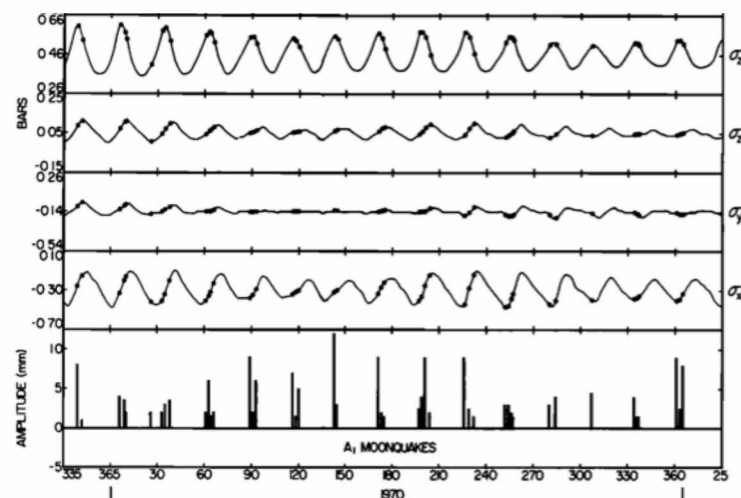


潮汐の力 < 1気圧
圧力 \approx 5万気圧

月内部はスベスベ！？
月の中身は？

- 何故900kmもの深さで月震が起こる？
- 何が月震を起こしている？
- 何故同じ震源で周期的に起こるの？
- 裏側の月震は？
- 何故長く揺れ続けるの？

月地殻はガサガサ！？



現在

2015

2020

2030

未来

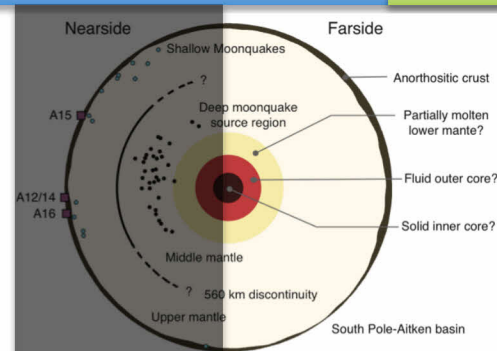
月探査



SELENE-2



月ペネトレータ実証



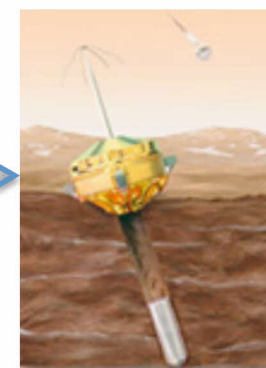
月の裏側着陸探査

火星探査

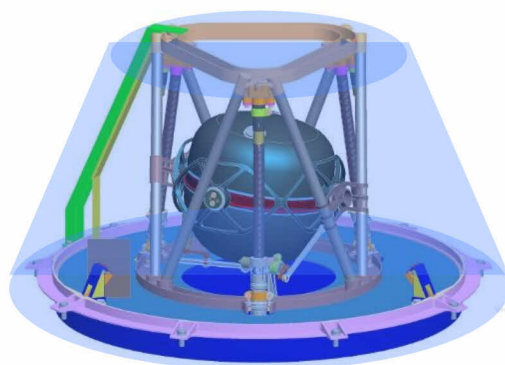


InSight
(米NASA)

内部探査の未来



火星ペネトレータ



鍵となる技術:

広帯域地震計+サバイバル技術
新谷ほか



ペネトレータ+
ネットワーク観測
白石ほか

APPROACH

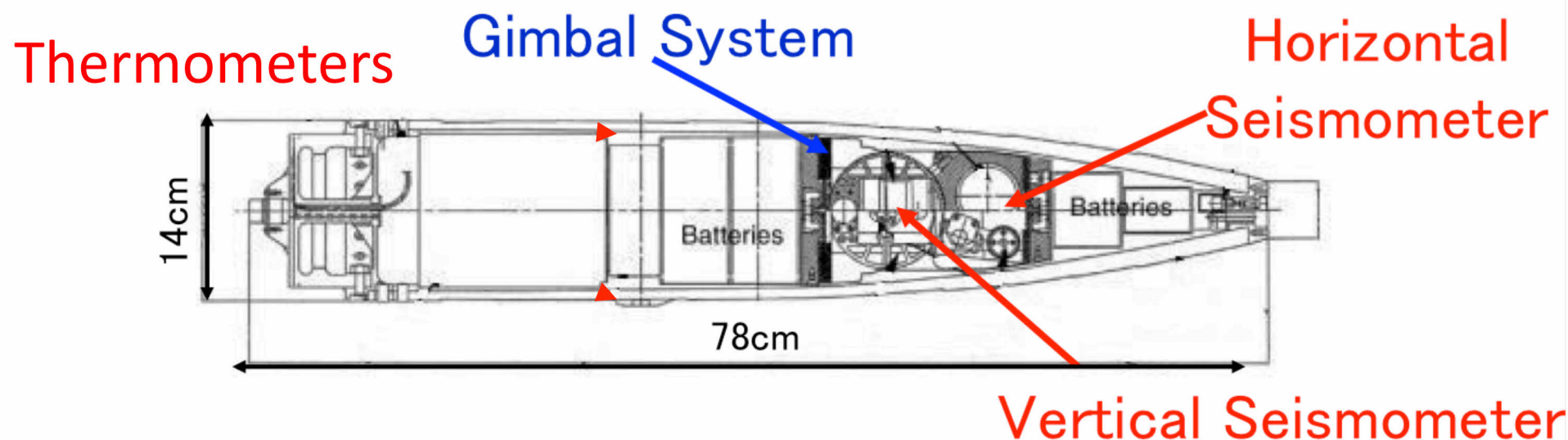


イプシロンロケット

- Advanced Penetrator PRObe
Applied for a Challenge of
Hard-landing
- ペネトレータ1機を表側月
面高地に設置し、衝突月震
を用いて月の地殻厚を決
定
- ペネトレータ技術による次
世代惑星探査の扉を開け
るようアプローチ
- 2013(平成25)年度イプシロ
ン搭載宇宙科学ミッション
に提案
 - 扉は開かず

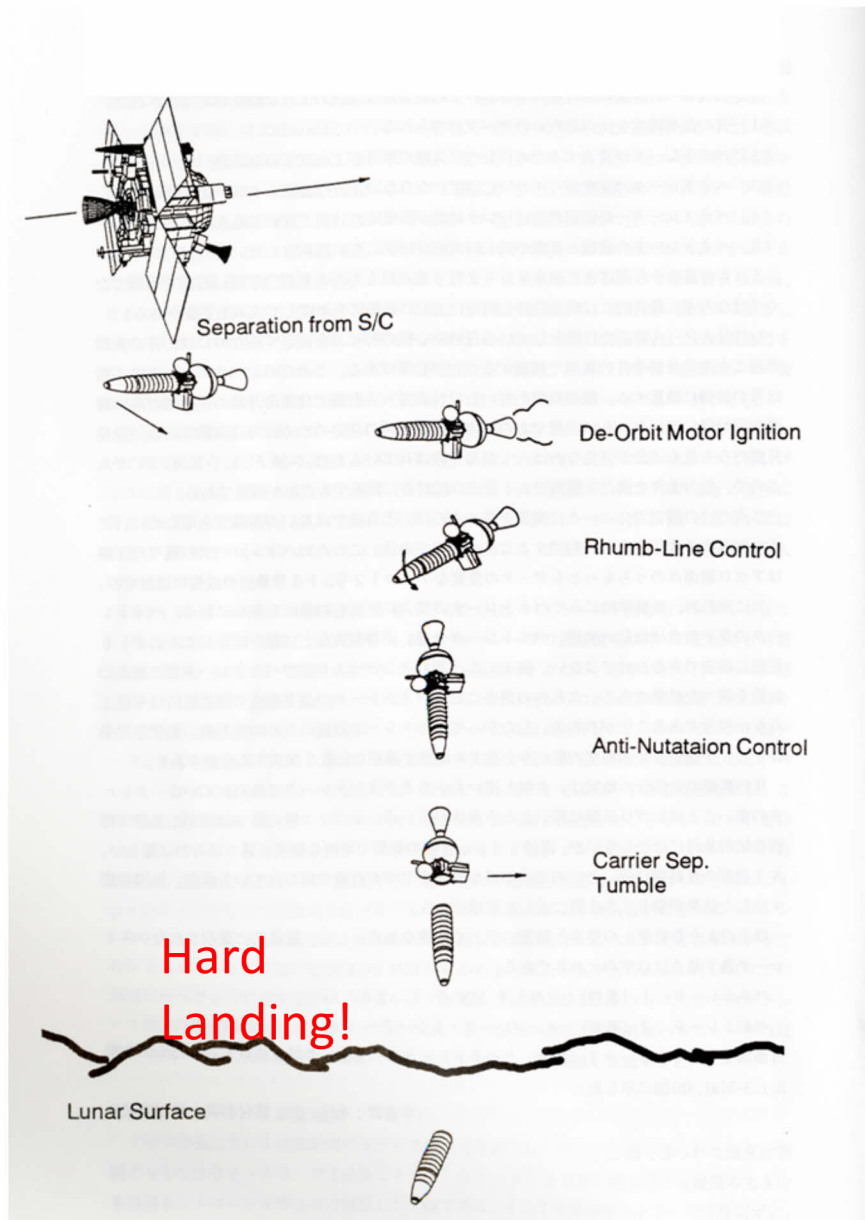
ペネトレータシステム

- LUNAR-A計画で開発されたハードランディングプローブ
 - ✓ 二軸のジンバルに搭載された二成分月震計
 - ✓ 6つの熱電対と7つの絶対温度計による熱流量計測



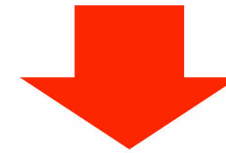
- 小型軽量な着陸装置
 - ✓ 複雑な着陸制御・熱制御システムが要らない
 - ✓ 一度のミッションで多点ネットワークを形成可能

ペネトレータの展開シーケンス



ハードランディング

- ✓ 月面貫入時における高い耐衝撃性能が必要



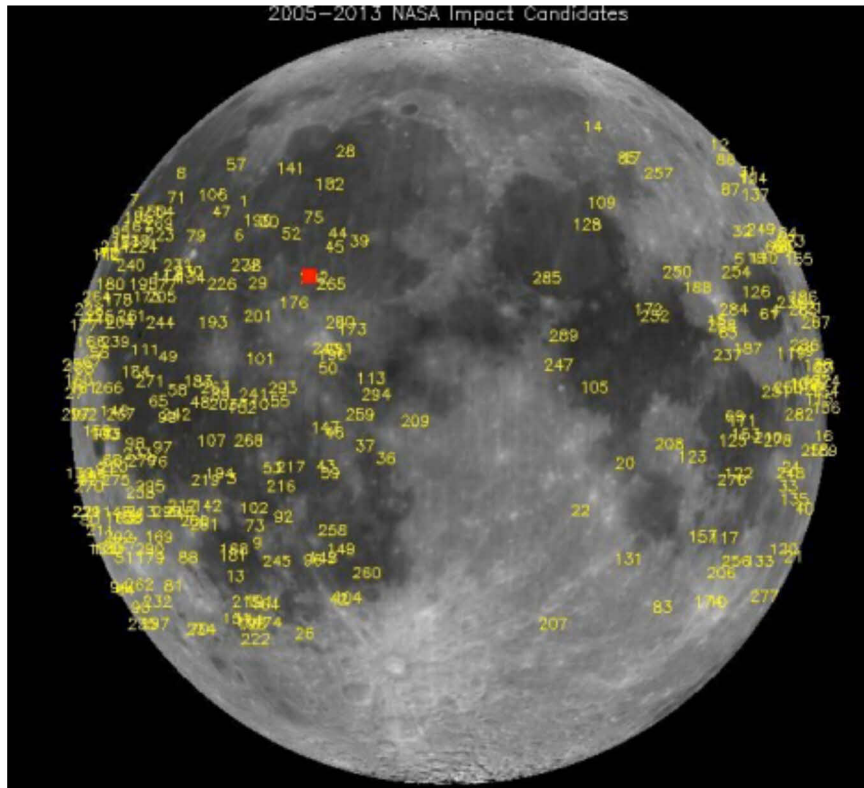
これまでの地上試験により、搭載機器と通信システムの衝撃後の正常な動作を確認 [Yamada et al., 2009, Tanaka et al., 2010]

次の段階として、月惑星表面への投下設置による実証試験に移る段階

APPROACHの目的

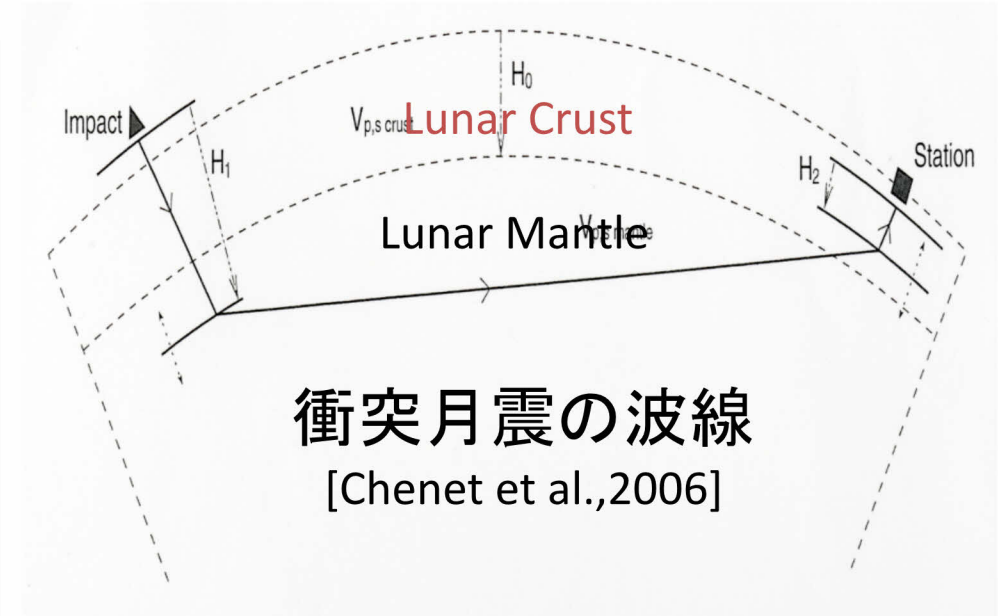
- 搭載質量制約によるペネトレータ1機の搭載
- 1機のペネトレータミッションの目的:
 - ✓ 月面衝突発光イベントの月震を捉え月の地殻厚を決定する(→ AIの総量の制約)
 - ✓ 月高地地域における初の熱流量観測
 - ✓ 月面におけるペネトレータシステムの実証
 - 貫入, 月面下での科学観測, 通信・データ転送
 - ✓ アポロ計画で観測された月震活動の再確認

地殻厚決定の原理



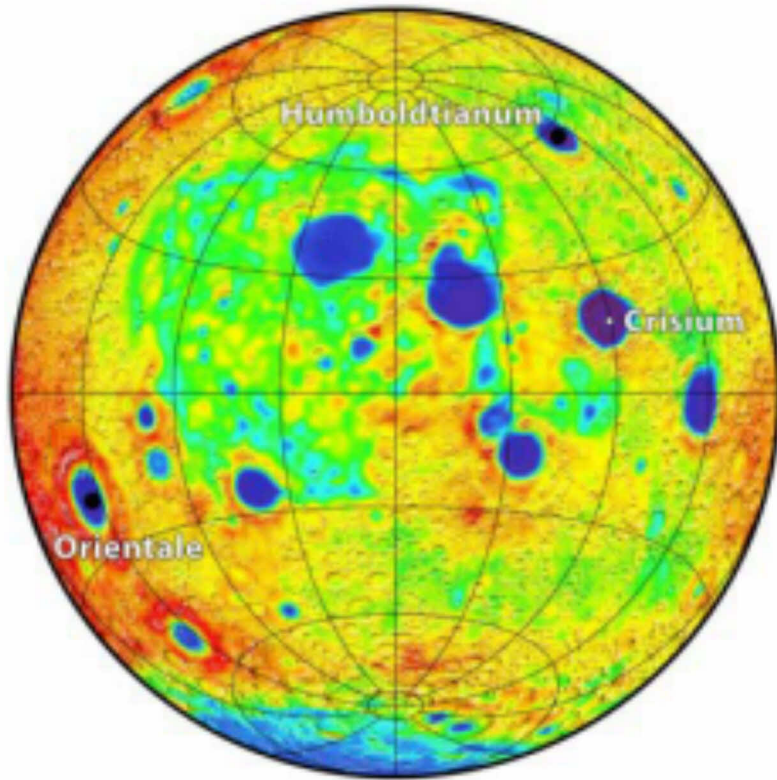
衝突発光現象の観測

by NASA Marshall Flight Center
from 2005 to 2013.



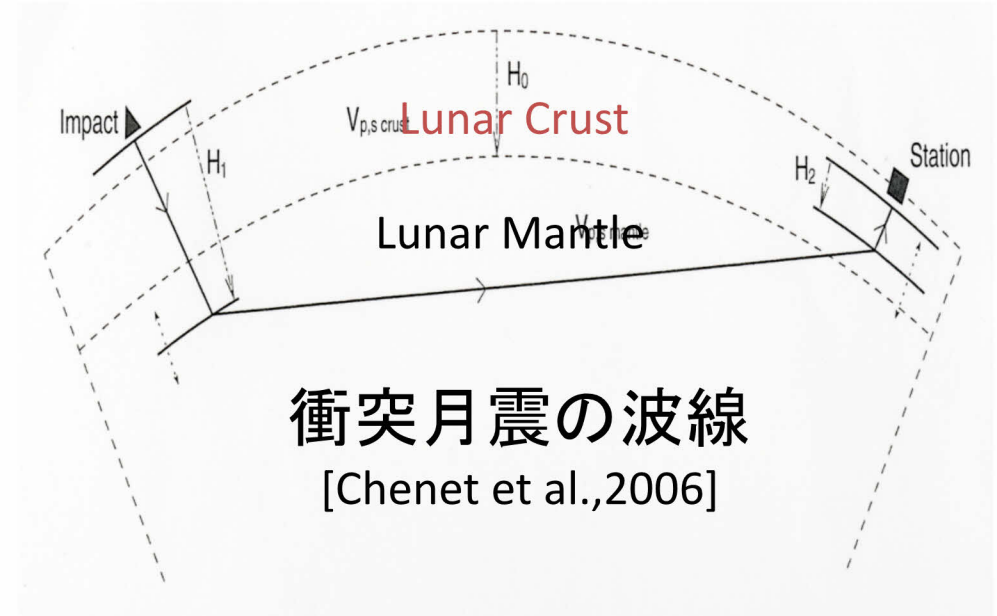
- 観測回数
✓ ~50個／年
- 観測範囲
✓ 経度: $\pm 30^\circ$ - $\pm 90^\circ$, 緯度: $\pm 50^\circ$
- 観測精度
✓ 位置: $\sim 0.3^\circ$, 時刻: 1/25秒

地殻厚決定の原理



月地殻の相対厚さマップ(表側)

by GRAIL, Wieczorek et al., 2013



$$T = \frac{H_1}{v_c \cos \theta_1} + \frac{L}{v_m} + \frac{H_2}{v_c \cos \theta_2}$$

$$= \frac{L}{v_m} + \left(\frac{1}{\cos \theta_1} \frac{H_1}{H_2} + \frac{1}{\cos \theta_2} \right) \frac{H_2}{v_c}$$

アポロ12号地点の地殻厚

✓ 58±8 km (Nakamura+ 1982)

✓ 30±2 km (Lognonnè+ 2003)

衝突月震頻度

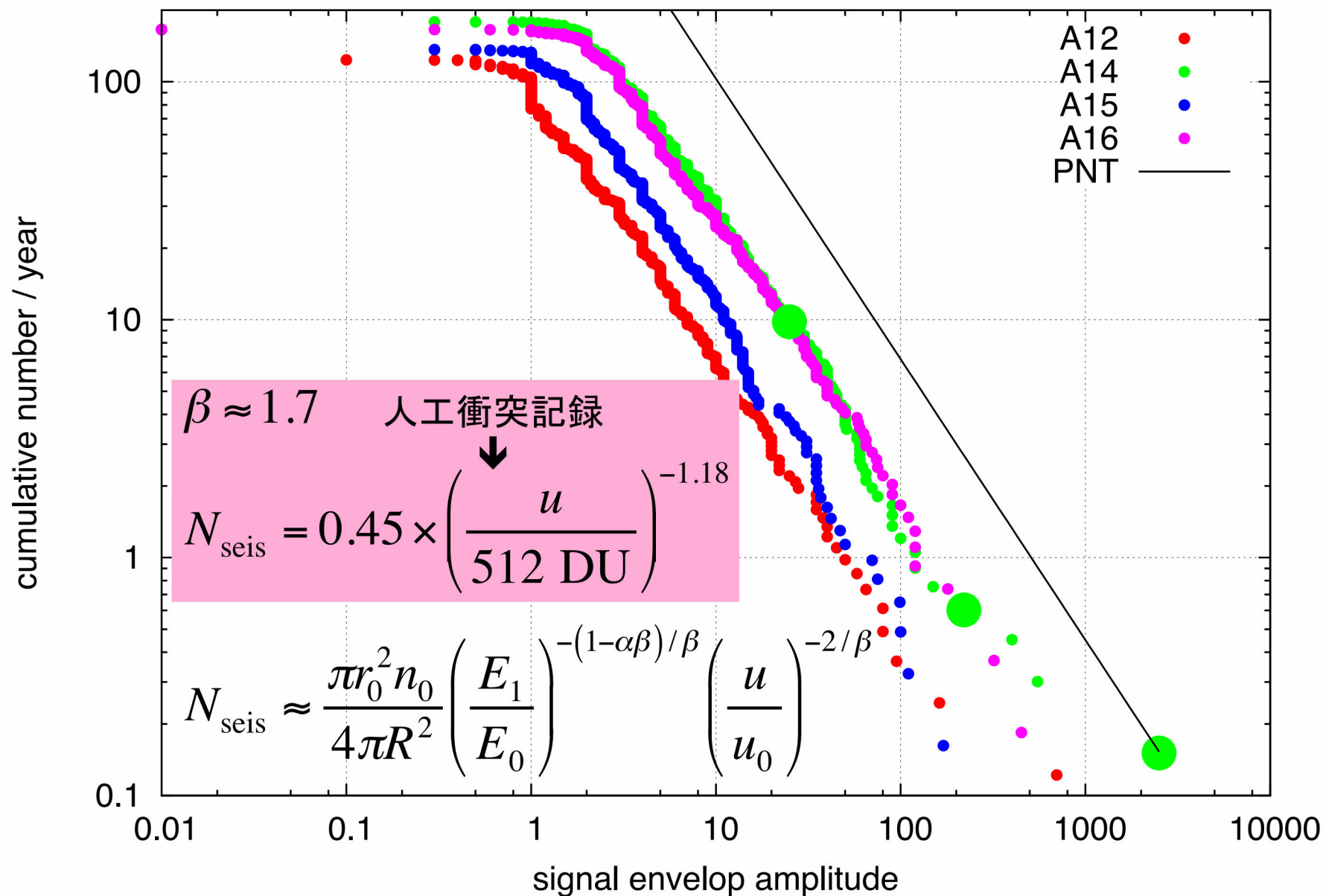
$$\left\{ \begin{array}{l} N = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha}, \quad N_0 = 7.6 \times 10^4, E_0 = 1.77 \times 10^6 \text{ J}, \alpha \approx 1 \\ u = u_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{1/2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\beta} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Oberst (1989)} \quad \pi \text{ scale, Holsapple (1993)} \end{array}$$



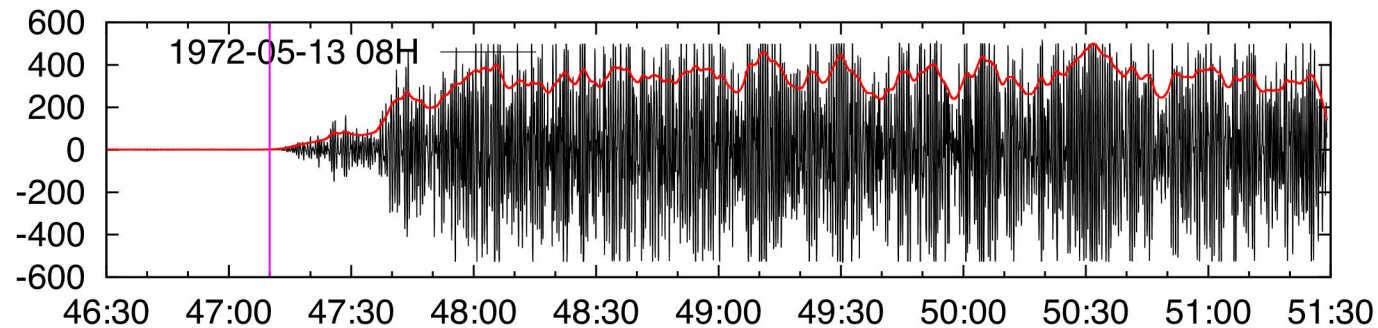
$$n = \frac{N_0}{4\pi R^2} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha} = n_0 \left(\frac{u}{u_0} \right)^{-2\alpha} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-2\alpha\beta}$$

$$N_{\text{seis}} = \int_r n_0 \left(\frac{u}{u_0} \right)^{-2\alpha} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-2\alpha\beta} 2\pi r dr \approx \frac{\pi r_0^2 n_0}{4\pi R^2} \left(\frac{E_1}{E_0} \right)^{-(1-\alpha\beta)/\beta} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{-2/\beta}$$

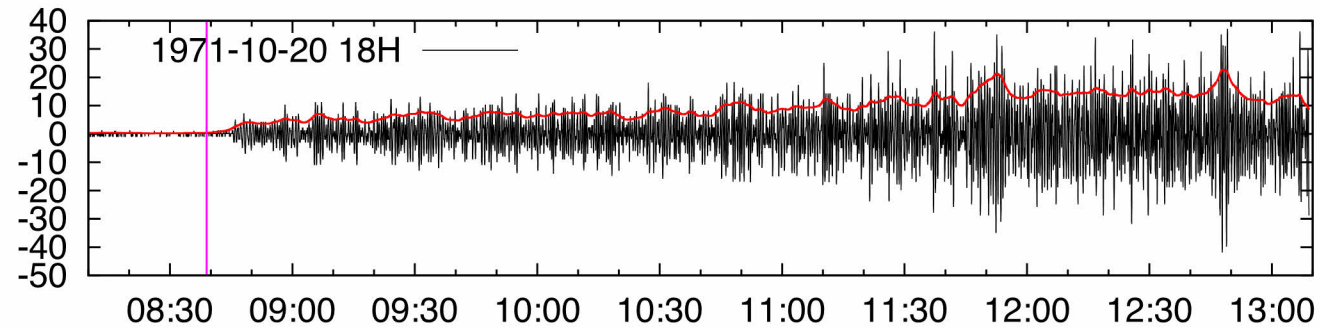
衝突月震頻度



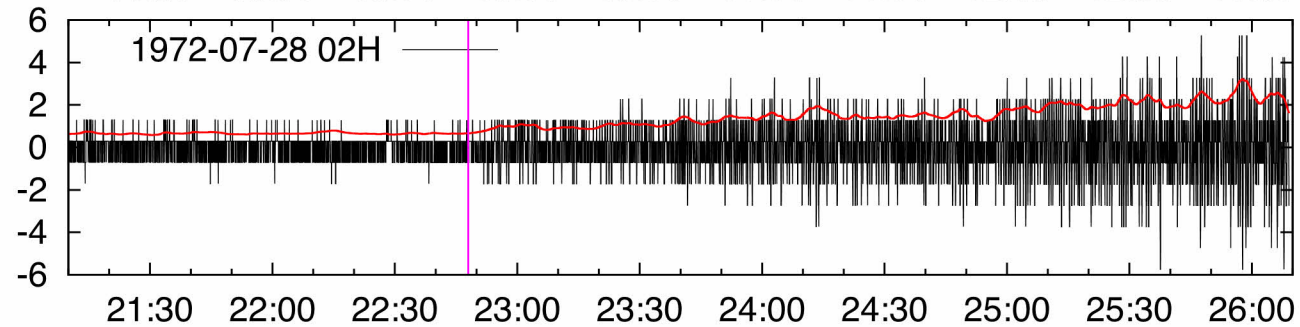
振幅と立ち上がり



512DU



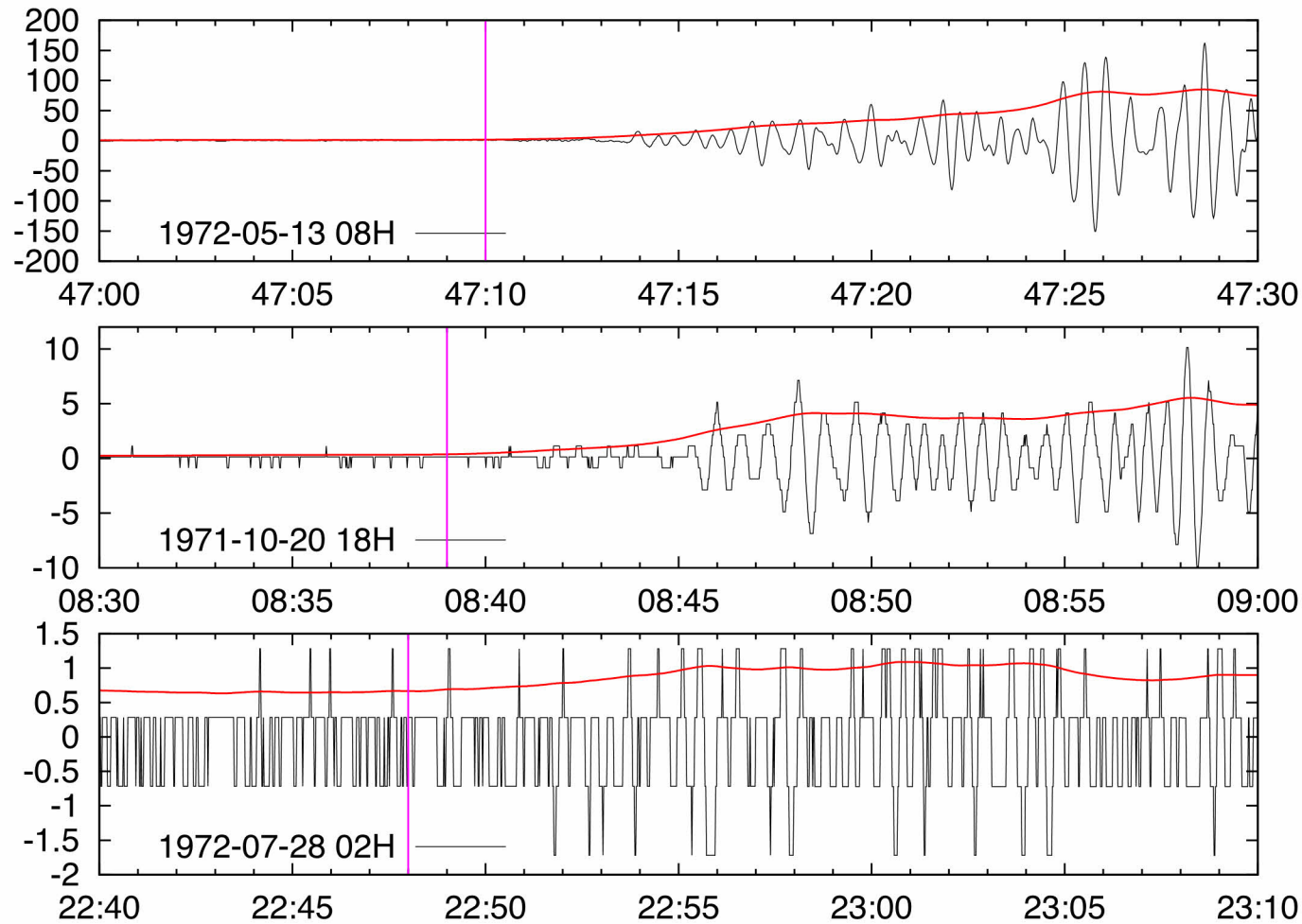
50DU



5DU

分:秒

振幅と立ち上がり



512DU

50DU

5DU

分:秒

$$A_{\text{envelop}} > 10 \text{ DU} \rightarrow 1 \text{ sec} < \delta t$$

月震計への性能要求

$$n = n_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha} = n_0 \left[\frac{1}{\eta} \frac{u}{u_0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^\beta \right]^{-2\alpha}, \quad \frac{u}{u_0} = \eta \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-1/2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\beta}$$

$$N = \int_{r_2} n_0 \left[\frac{1}{\eta} \frac{u}{u_0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^\beta \right]^{-2\alpha} 2\pi r dr \approx \frac{\pi r_0^2 n_0}{\alpha\beta - 1} \left(\frac{1}{\eta} \frac{u}{u_0} \right)^{-2\alpha} \left(\frac{r_2}{r_0} \right)^{2-2\alpha\beta}$$

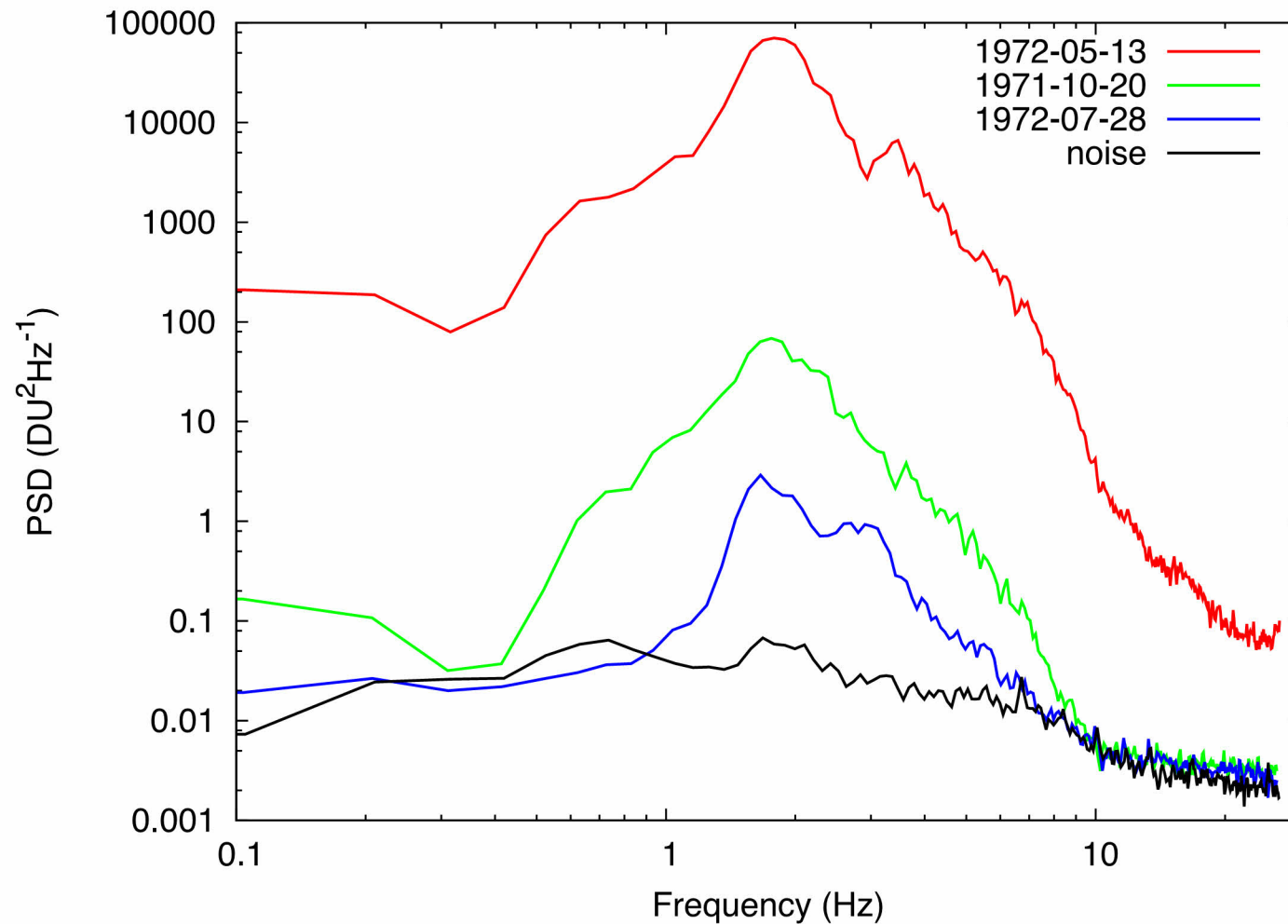
$$N \geq 20, u \geq 10 \text{ DU}, r_2 \geq 1000 \text{ km}$$



$$\eta \geq 3.5$$

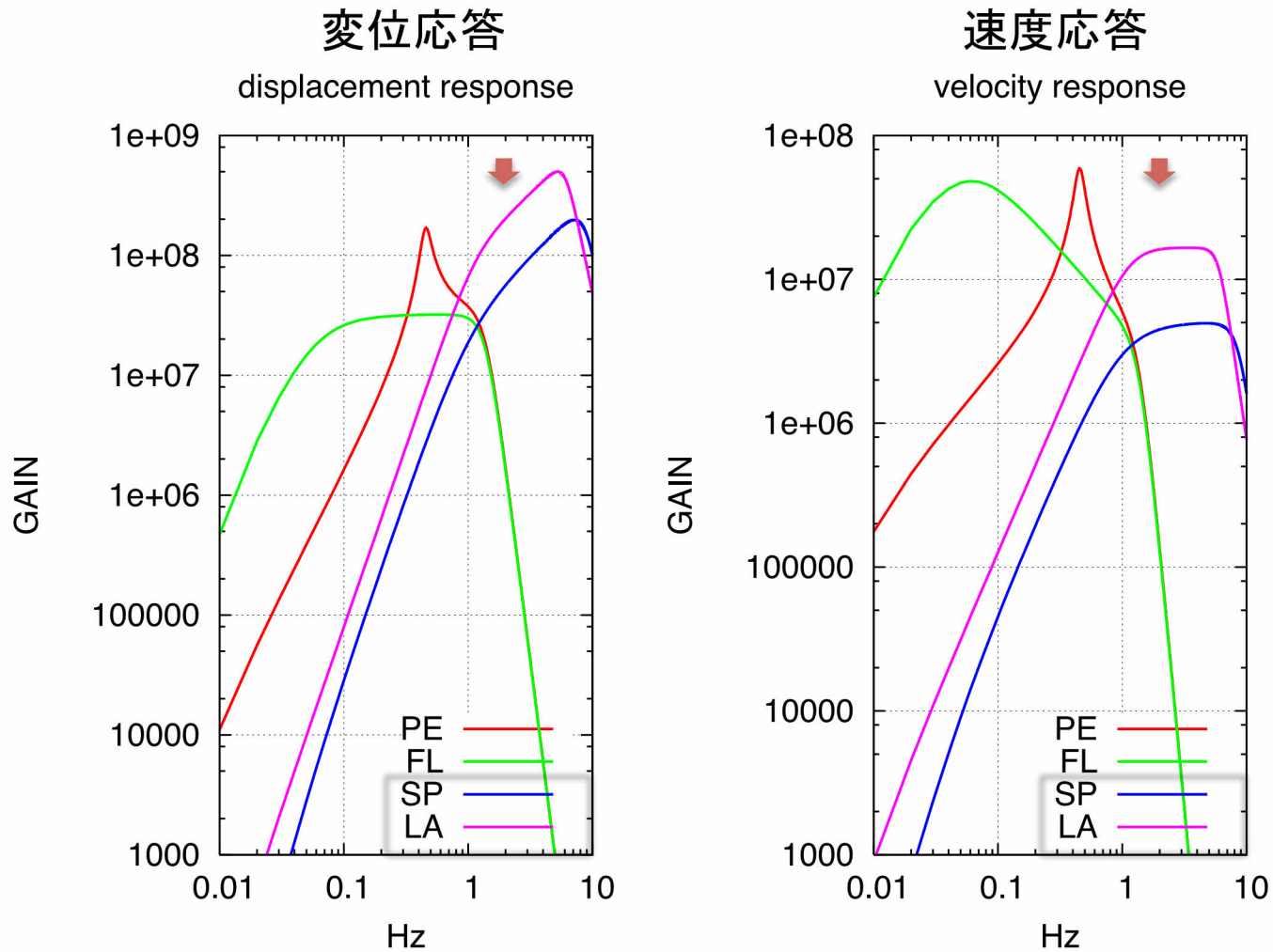
アポロ短周期計の3.5倍の感度

衝突月震の観測スペクトル



✓ 2 Hz付近にスペクトルピークを持つ

月震計の感度の比較



まとめ

- 月・惑星の内部構造はそれらの形成・進化を考える上で必要な情報
- アポロの月震観測は月内部構造の知見をもたらしたが、不確定・謎も未だ多い
- ペネトレータは1ミッションで観測ネットワークを構築できるシステム
- APPROACHとしてペネトレータ実証ミッションを提案した
 - 発光を伴う隕石衝突を用いることで1観測点、1年の観測で地殻厚を決める
- この実現のために必要な月震計の感度を見積もった
 - アポロ短周期計の3.5倍の感度が必要
- ルナAで開発された月震計はこの要求を満たす