

月震大全

ムーンクェイク・オーバービュー

Copyright © 1999 Jun-ya Terazono, all rights reserved.

どこに、どうして、どうやって?

寺藺 淳也

Jun-ya Terazono

(財)日本宇宙フォーラム

terakin@t3.rim.or.jp

<http://planeta.sci.isas.ac.jp/~terakin/>



アポロ12号が撮影したデービー・クレーター、ラッセル・クレーター

(AS12-51-7478, Photo by NASA)

宇宙開発建設研究会(CEGAS) 1999.4.19 大林組本社

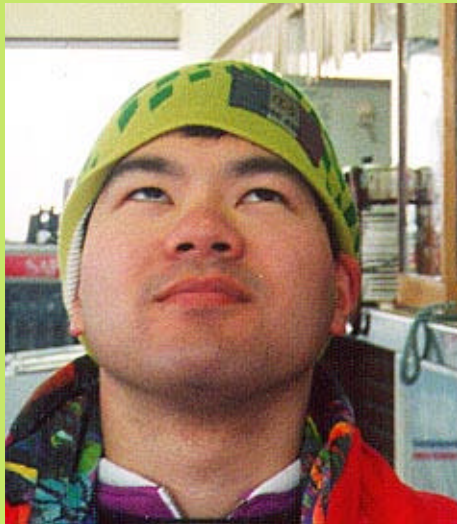
今日の主題

- **月震とは？**
観測の歴史、性質、謎、...
- **月震からわかったこと？**
月震の解析、月の内部構造、...
- **月震のデータ**
月震データベース、実際の解析
- **月震を調べる**
LUNAR-A計画、SELENE-2/LUNAR-B...

terakin@t3.rim.or.jp

<http://planeta.sci.isas.ac.jp/~terakin/>

その前に、講演者紹介!!



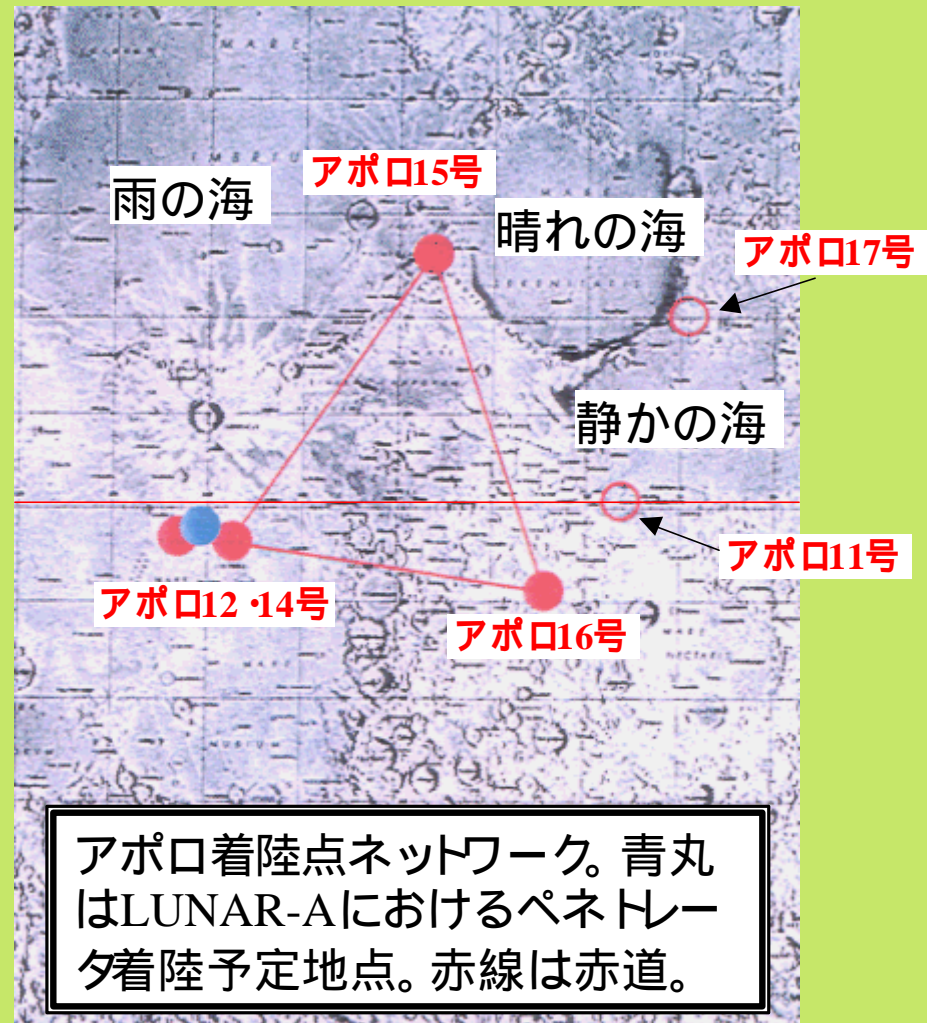
- 修士～博士にかけて、宇宙科学研究所
に在籍
主に月震、惑星の地質について研究
- 1995年～1997年まで、宇宙開発事業団
に在籍
SELENE計画の立ち上げ、将来型衛星の開発などに
従事。
- 1997年から、(財)日本宇宙フォーラムに
在職
引き続き、将来月探査、衛星の研究などのサポートに
従事。研究活動も半分プライベートで続行中。

月震とは？

- 観測の歴史
アポロでの観測の歴史
...アポロはどのように月震を測ったのか？
- 月震とは
月震の分類
...どこにどんなふうに起きるのか？

アポロにおける月震観測

- アポロ11、12、14、15、16号が地震観測ミッションを実行。
- 11号は早く観測を中止したが、12～16号観測点では1977年9月30日まで観測を継続。
- 観測点は、一辺約1100kmの、ほぼ正三角形のネットワークをなしている。



アポロ月震計

上下動1成分の短周期地震計(SP)上下・水平2成分(合計3成分)の長周期地震計(LP)の2種類からなる。

地震計は宇宙飛行士が設置し、月面上にそのまま置かれた。

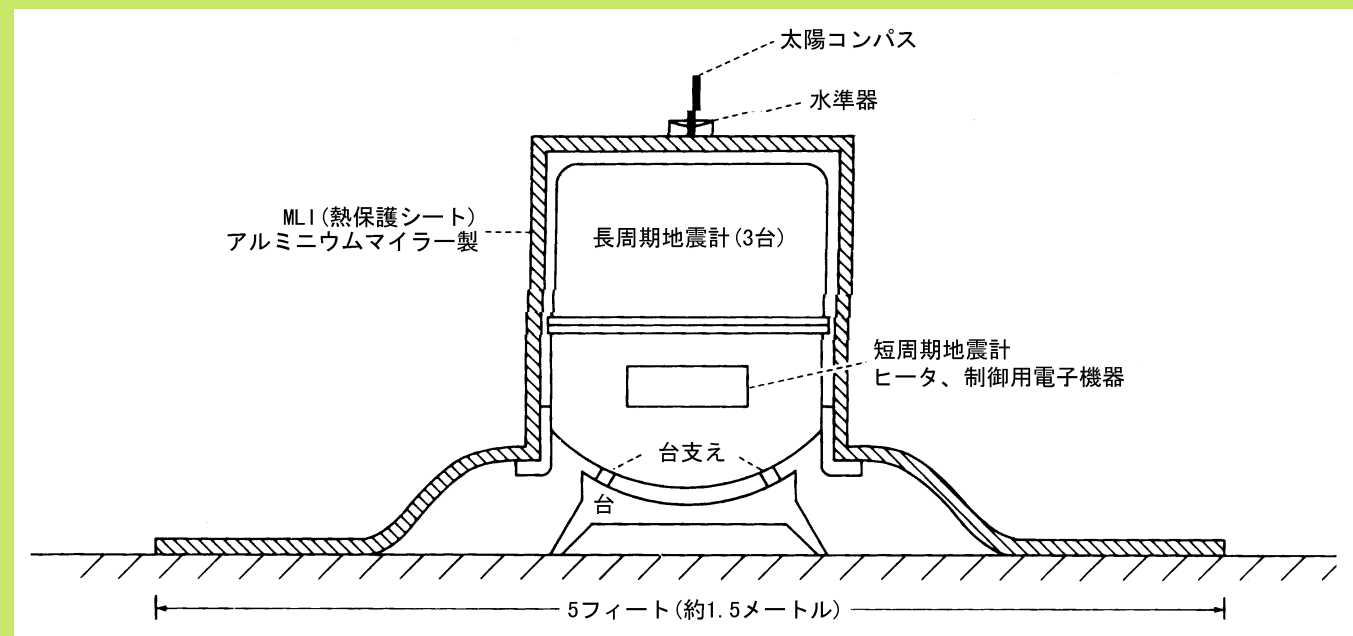
アポロ12号着陸点に設置された月震計(展開後)

(Apollo 12 Preliminary Science Reportより)



アポロ月震計の構造

大きさは直径約1.5メートル。台を介して地面の上に直接置かれている。



月震計の構造概念図 (Apollo 12 Preliminary Science Reportより。一部改変)

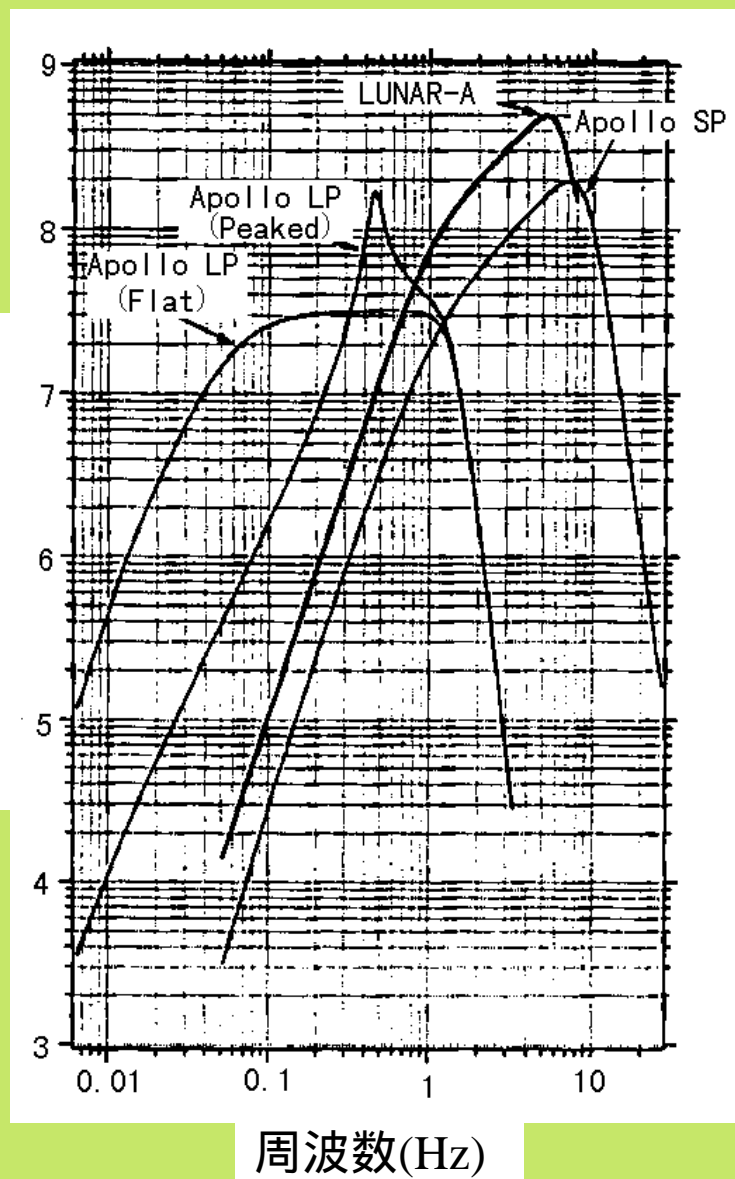
アポロ月震計の 感度

月面は地球に比べてノイズが極端に少ないため、月に持っていった地震計は地球上では最高感度のものとされる地震計に匹敵する。

長周期地震計は0.1～1Hz付近でフラットな感度特性を持つモードと、0.45Hz付近でピークを持つ感度特性の2モードが使われた(実際の記録は後者がほとんど)。

ところが、月の地震の卓越周波数は1Hz付近にある(荒木、1994)ため、実際にはこの月震計は観測に最適とはいえない仕様になっていたことがわかる。

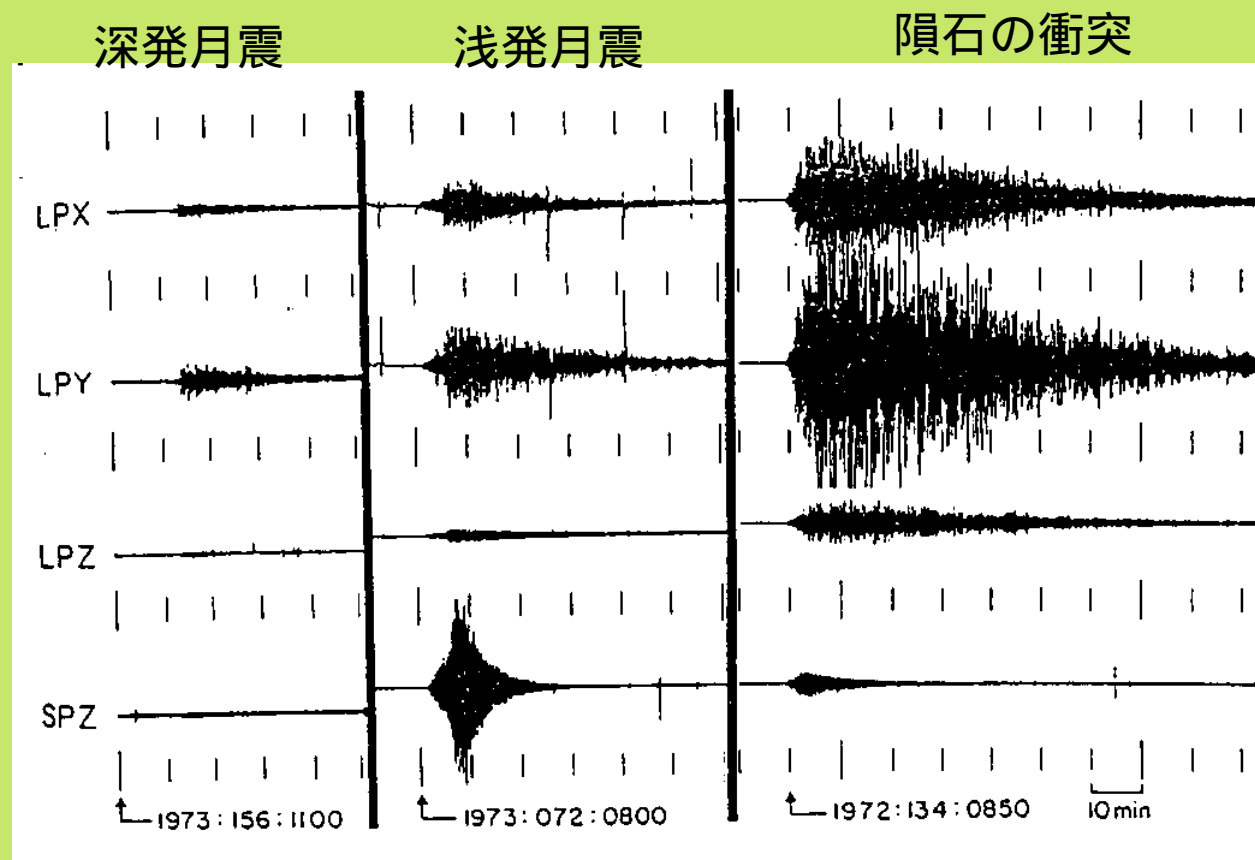
地動(Digital Unit: 10^m)



月震の種類

現在までに
同定されて
いる月震は
4種類。

- 深発月震
- 隕石の衝突
- 熱月震
- 浅発月震



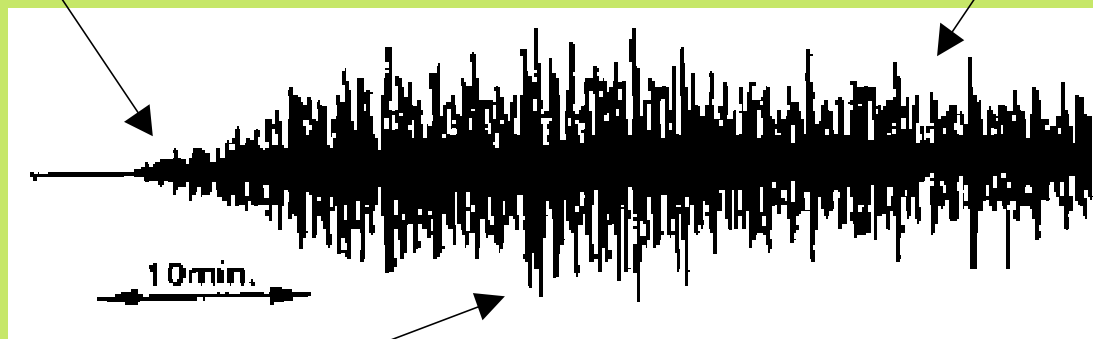
Nakamura *et al.*, 1982より

月震波形の特徴

波形の立ち上がり部分がはっきりしない。

減衰が大変ゆっくりとしている。長いものでは、5～6時間以上かかって減衰していくものもある。

隕石の衝突
(1975年124日、
アポロ12号
観測点)



最大振幅は、地震波到着時から数十分～1時間以上もあとになる。

この現象は、地殻内での地震波の散乱が原因といわれているが、詳細は不明である。

深発月震

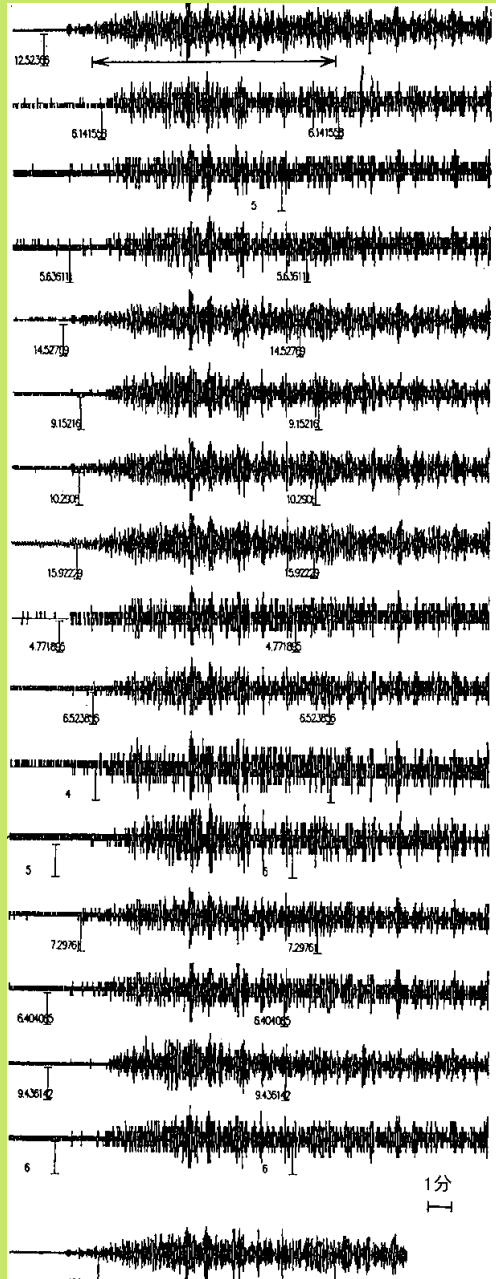
(deep moonquake)

- 月震の中で最も数が多い。
- 極めて波形がよく似た109のグループに分けられる(Nakamura *et al.*, 1982)。これらのグループは、A1、A2、...、A109と名付けられている。このうち、A1がもっとも活動的である。
- 震源の深さは800 ~ 1150km。地球の深発地震と比較しても大変に深い。
- ほとんどは表側で発生する(唯一、A33グループだけが裏側で発生するとされている)。
- 発生や振幅変化の周期が、地球の潮汐に大きく関係している(Nakamura *et al.*, 1978他)。発生の原因はまだよくわかっていない。

深発月震は 波形がよく 似ている

- 同一グループに属する深発月震の波形は、きわめてよく似ている。
- この性質を利用して、波形のスタッキング(足し合わせ)を行い、解析の精度を上げることができる。

深発月震グループA1波形を並べたもの。一番下の波形はスタッキング処理後のもの(寺藺、1993)。



隕石の衝突

(meteoroid impact)

- 文字通り、月面に隕石が衝突するために発生する月震。
- 衝突した隕石の重さは、500g ~ 50kg程度と見積もられている。(Duenneiber and Sutton, 1974a)
- 衝突点の分布は月全体に広がっている。しかし、いくつかの近接したまとまりになっていることから、流星雨との関連が示唆されている。
- 月震の規模としては比較的大きなものを発生させる(それでも、地球の地震に比べれば極めて小さい)。

熱月震

(thermal moonquake)

- 主に、温度変化によるクラックが原因と思われる。
- 夜明けから夕方までの、太陽が昇っている間に発生する。
- 波形や振幅が互いによく似ているという点では深発月震と似ているが、深発月震と異なり、1ヶ所の観測点でしか観測されない。
- 熱月震のグループは、アポロ14号観測点で48、アポロ15号観測点で245にもわたる。(Duennebier and Sutton, 1974b)
- 熱月震も周期的に発生するが、その周期は29.5日。

浅発月震

(shallow moonquake)

- わずか28例しか観測されていないため、詳細が一切不明。
- 震源は深さ300kmよりも浅いところにあると考えられる
(そのため、浅発月震と呼ばれる)。
- エネルギーが大きなものも存在し、最大の浅発月震はM3 ~ 5程度はあると考えられる。
- 比較的遠くで発生しているのに高周波成分が多い。(以前はHFT: High Frequency Teleseismicとも呼ばれていた。)
- P波、S波も区別しやすい。
- 発生周期や震央分布に規則性がみられない。

月震のエネルギー

- 月震のエネルギーは一般に大変小さい。
- 深発月震のエネルギーは、M0.5 ~ 1.3程度。これは、地球における極微小地震に相当する。
- アポロの月震データの振幅は、通常DU (Digital Unit) という単位で測られる。DUはフルスケールで1024単位だが、深発月震は最大のもので十数DU、一般的には数DU程度しかない。
- 深発月震のエネルギーを地動に換算すると、 10^{-7} cm程度。
- 深発月震のエネルギーは合計年間 10^{11} エルグ程度。地球 - 月間の潮汐で失われるエネルギーは年間 10^{19} エルグ程度。(藤村、1991)

月震の数

タイプ	イベント数
人工月震	9
深発月震	3145
隕石の衝突	179
浅発月震	28
その他（分類できないもの）	7633
合計	12558

(Nakamura *et al.*, 1982による)

全体の約6割は、いまだにどのような種類の月震なのか、同定されていないままになっている。

月震からわかったこと

- 月震の解析
アポロの記録から割り出された月震の性質
...実際の記録はどのようになっているのか？
- 月の内部構造
月震から月の内部構造を探る
...月の中身はどのようになっているのか？

月の内部構造

- コアはあるのか？ -

•1000kmより深い領域では、部分的に溶けているところ
があると考えられる。

裏側の衝突の地震波や、裏側で起きていると考えられる深発月震A33に、S波が観測されないとされる。

•月中心部を通過した月震波に走時の遅れがみられることから、中心部に溶けたコアがあるという説もある。

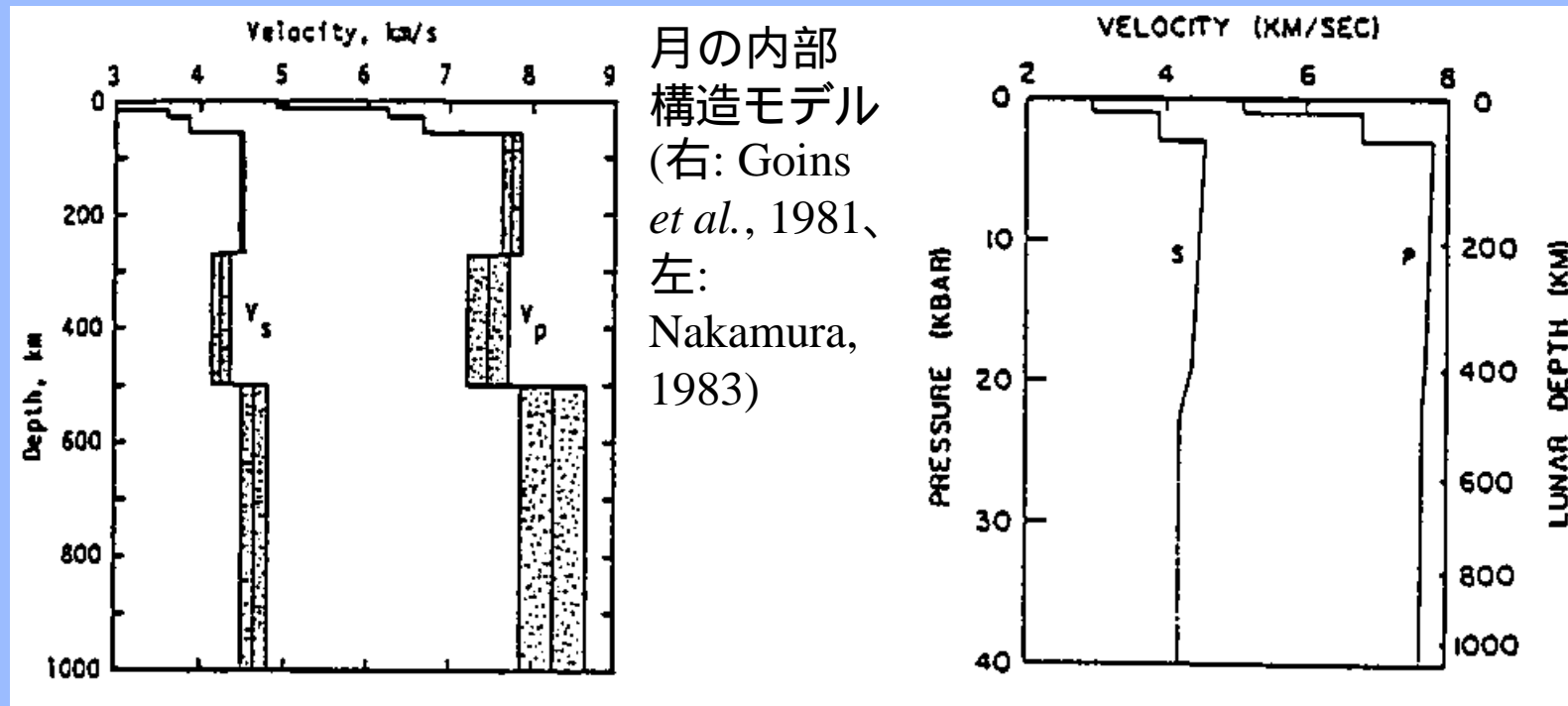
(Nakamura, 1976; Sellers, 1992)

しかし、観測されているのはたった1例であり、実際これをもってコアの存在という証拠にすることはできない。

月の内部構造

- 速度構造はどうなっている？ -

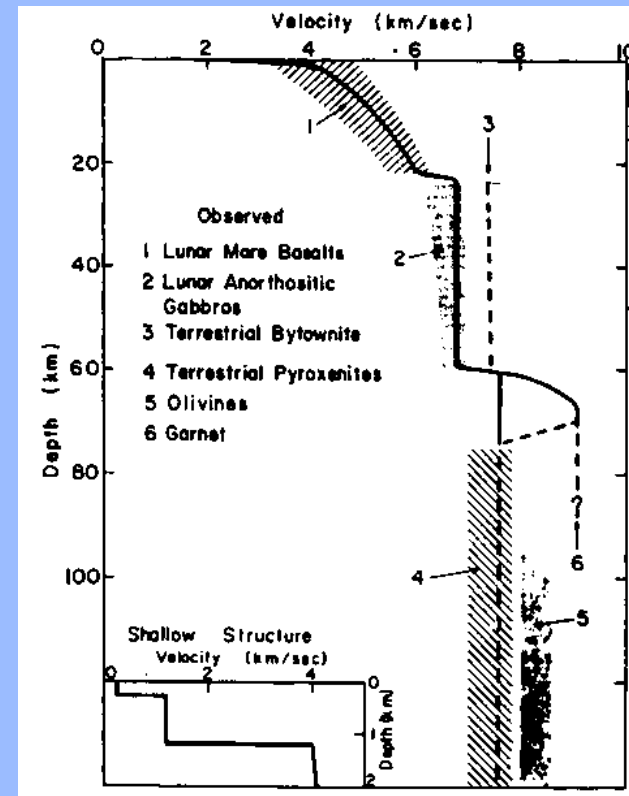
アポロの月震解析により、これまでに、下の2つのモデルが提案されている。両モデルとも、深さ60km程度の地殻と、その下に何層かからなる「マントル」が存在することは共通している。しかし、400km以深の速度構造についてはほとんど決まっていないといっている。



月の内部構造 - 浅いところの構造 -

- 深さ1 ~ 2kmのところには、メガレゴリスと思われる速度の速い層がある。
- 10 ~ 50kmのところには存在する速度の不連続層は組成の違い？ 岩石組織の変化？
- 60km、ないしは80kmのところには大きな不連続層があり、これは地殻とマントルの境界と考えてよい。

(Goins, 1981; Nakamura, 1983)



深さ100kmまでの速度構造
(Töksöz, 1974より)

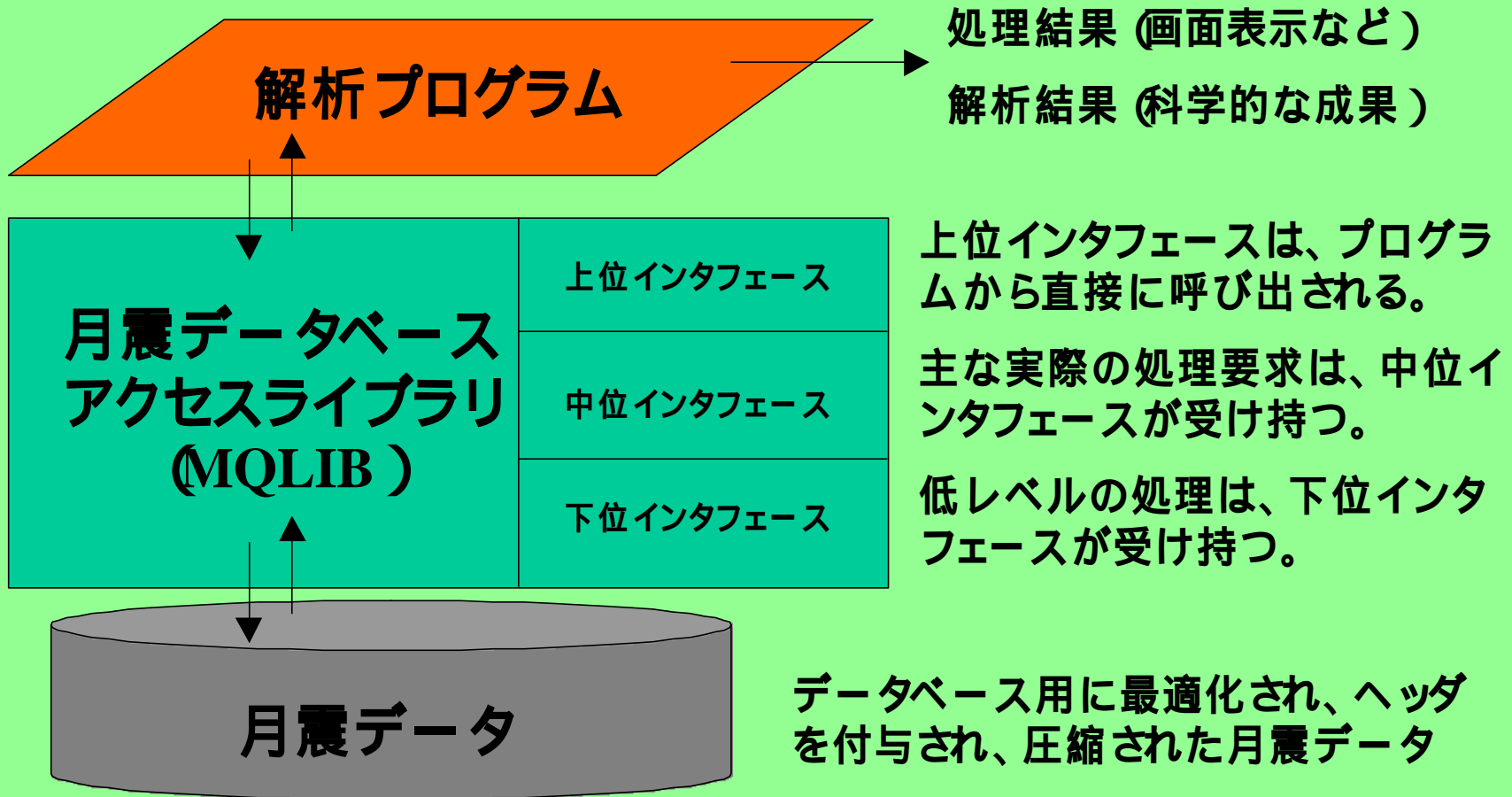
月震のデータ

- 月震データベース
効率よい月震解析を目指して
...どのようなシステムか？
- 実際の解析
データからわかった新たな事実
...どのようなことがわかりつつあるのか？

月震データベースとは？

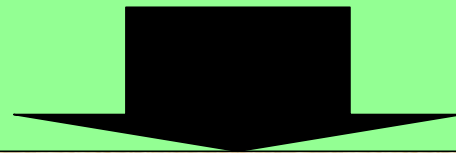
- 月震データは非常に大量(連続データで80GB以上)であるため、そのままではとても研究者の手に負えない。また、解析には不適當なデータもたくさん存在する。
- そこで、解析に必要とされるパラメータを効率よく抽出しておき、アクセスしやすいようにする必要がある。
- データにアクセスするためのライブラリを規格化し、誰でも簡単にプログラムを書いてデータ処理ができるようにした。
- ネットワーク環境でも使えるようなデータフォーマットの工夫を行っている。

月震データベースの構造



月震データベースの特徴

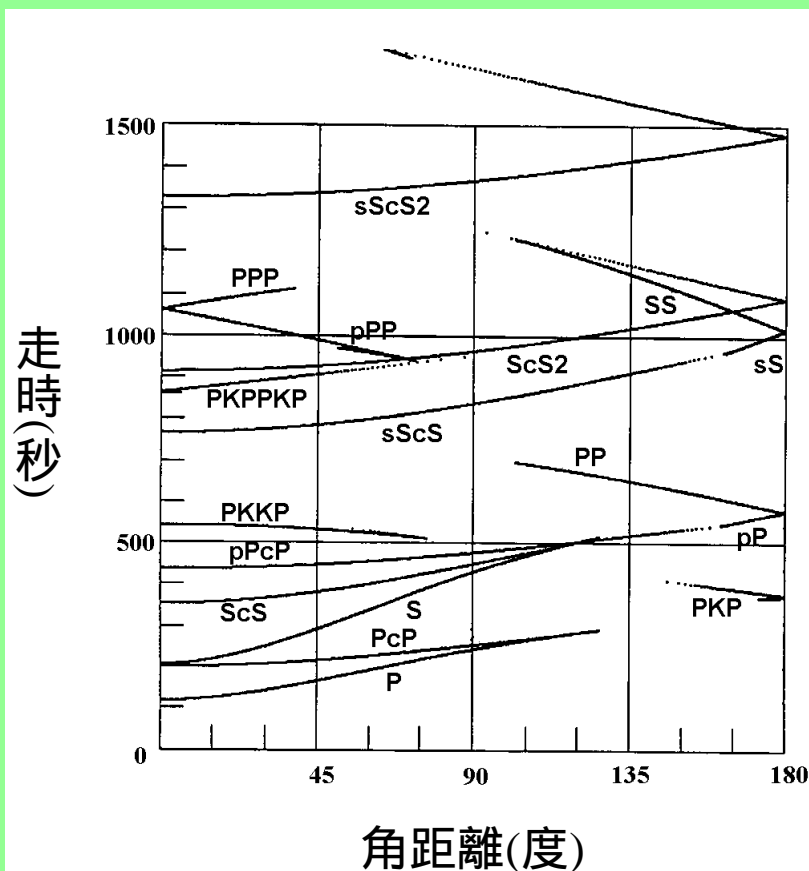
- 高速なデータの入出力
- ネットワーク対応のデータフォーマット
- 読みやすく柔軟性の高いテキスト形式ヘッダ
- 複数の地震波成分を1ファイルで管理可能
- 便利なアクセス用ライブラリを用意
- 波形表示・出力などのユーティリティを用意



これらの特徴を使えば、月震に限らず、地震波形などの標準フォーマットとしても利用可能である。

月震解析(その1)

- 月の走時曲線の作成 -



•月の内部構造モデルについて、コアの大きさを200km ~ 600kmまで100kmおきに変化させ、いろいろな地震波の到達時間を計算。

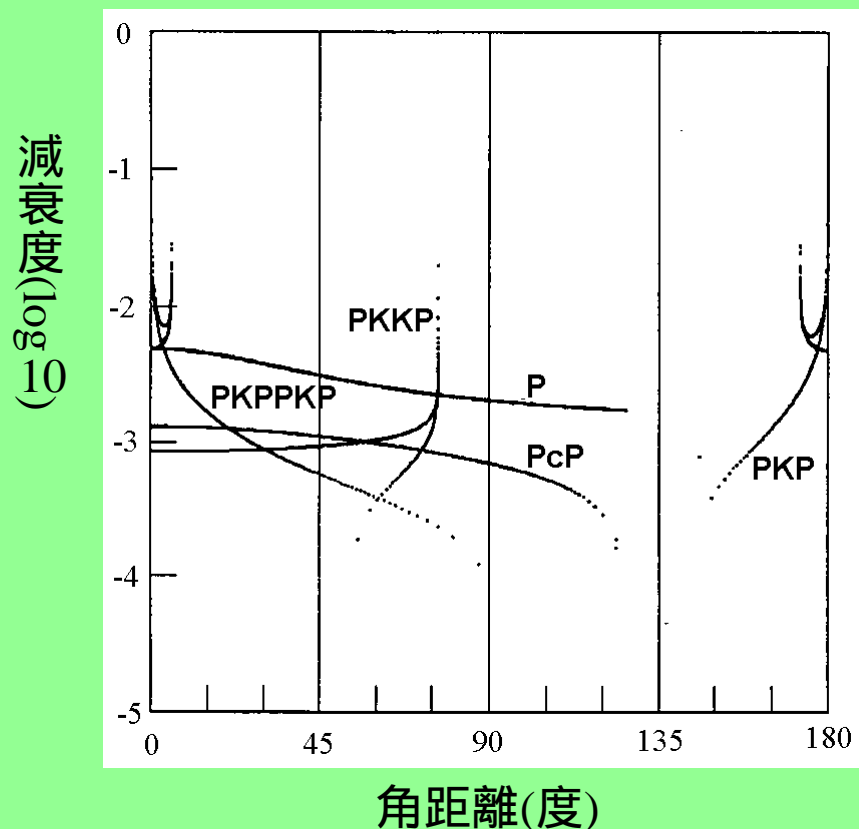
•この結果を利用して、月における走時曲線を作成した。

•これを利用すれば、ある波がいつ、どの地点に到達するかが予測できる。

コア半径500kmにおける走時曲線(寺藺、1993)

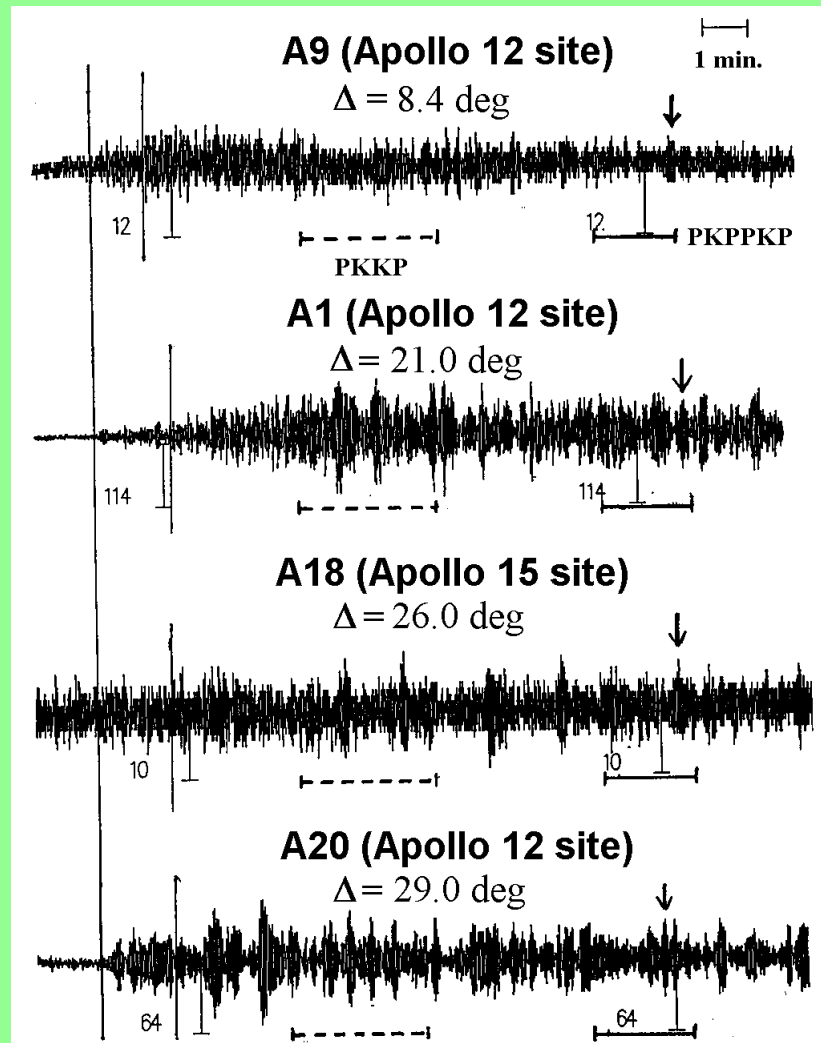
月震解析(その2)

- 地震波の減衰を計算 -



コア半径500kmの場合の減衰度計算
(寺園、1993より)

- 走時計算を利用し、地震波がどの程度減衰するか計算。
- 減衰が小さい地震波は、大きな波として観測されるはず。
- ならば、そういった波形が月震の記録の中に存在しているのではないか？
- とくに、コアを通過して裏側で一度反射された波(PKPPKP)が大きくなる可能性がある。



4つのスタッキングした月震波形からPKPPKPを検出した結果。(寺藺、1993より)

月震解析(その3) - 月震波形から 後続波が見える? -

- 振幅が比較的大きくなると思われるPKPPKPについて、走時から到達時刻を割り出し、該当する波形を調査。
- その結果、いくつかの深発月震グループに、PKPPKPらしい波形が発見された。

暫定的な結論!!

- 見つけられたPKPPKP波形は、スタッキングの失敗や地表付近の反射波である可能性は低い。従って、これは月のコアに関連した月震波形である可能性が高い。
- もしこれがPKPPKPという波形である場合、コアの大きさは450km程度になる。これは、これまでの月震解析で推定されているコアの大きさとかなり近い。
- 波形が実際にPKPPKPかどうか、今後波形合成などの技術も使って調べていく必要がある。

月震を調べる

- LUNAR-A計画
月の内部を調べる世界初の探査
...どのようにして調べるのか？
- 次期月探査計画 (SELENE-2/LUNAR-B)
SELENEを超えて、新たな月探査の世界へ
...どんな探査が考えられるのか？

LUNAR-A計画

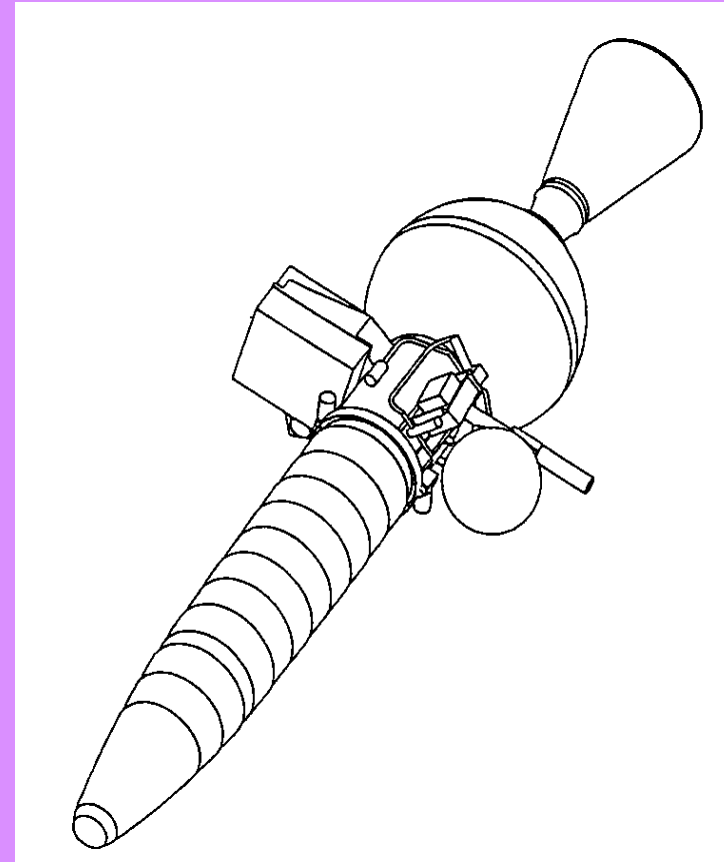


母船から切り離されるペネトレータ
(© 宇宙科学研究所)

- 1999年夏季以降、M-Vロケットで打ち上げ予定
- 2本のペネトレータを搭載。
- ペネトレータには地震計、熱流量計などを内蔵。
- 母船にはLIC(月撮像カメラ)を搭載。月の赤道地域を中心に写真を撮る。
- 約1年間にわたる観測ミッション。

ペネトレータとは？

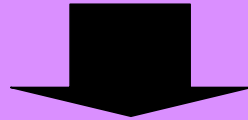
- 槍型をした観測機。
- 軟着陸することなく、月表面に「激突」して貫入。
- 全長約140cm。CFRP製。
- スーパーリチウム電池を電源とする。



ペネトレータの全体図(ペネトレータ及び分離モジュールを含む図)

ペネトレータをどこに落とすか？

- **落とす場所は、次の条件を満たしている必要がある。**
 - 月の深部構造を決めるためのデータが得られる
 - レゴリスが1m以上ある
 - 緯度が40度以下
 - ペネトレータ - 母船間の通信リンクが保ちやすい
 - もちろん、軌道設計から見てペネトレータを落としやすいところ



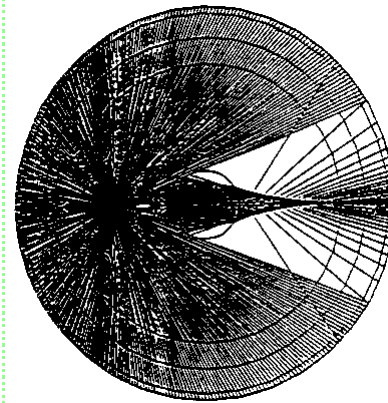
- **ペネトレータのうち、1機は月の裏側に落とす。**
 - 活動的なA1深発月震を捉えやすいため
- **もう1機はアポロ12号着陸点付近。**
 - アポロ観測網の成果も利用しやすいように

月の内部構造を どのようにして調べるか？

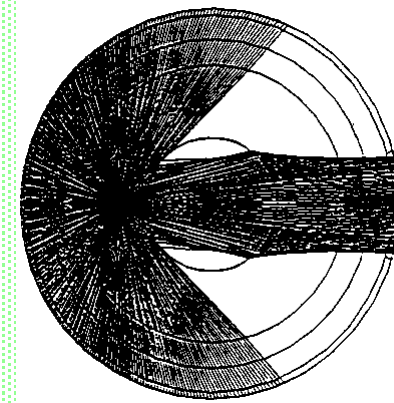
- もしコアが大きければ、月震波はコアで曲げられて、裏側では大きくなるはずである。
- 表側と裏側で観測し、もし裏側で大きな波が観測されれば、コアは大きいことになる。
- 地震波の到達範囲を調べることによって、コアの大きさを推定することができる。

コア半径による地震波到達の様子の違い(P波)

半径300km



半径600km



寺園(1993)より

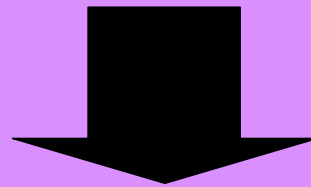
SELENE-2/LUNAR-B計画

- 2006～2008年頃の打ち上げをめどに、宇宙研、国立天文台、宇宙開発事業団が進めている、SELENEの次の月探査計画。
- SELENEの成果を継承し、さらに発展させた計画。と同時に、今後の月探査・開発利用などに向けた基礎データを
得る。
- ペネトレータ、ローバ、着陸機、周回機などを組み合わせた、複合的な探査を行う
- 現在、ミッションに関する基本的な計画を策定している段階。本格的に動き出すのは2000年頃？

マルチペネトレータ計画

LUNAR-Aの限界

- LUNAR-Aでは月震観測点を2点しか設置できないため、詳しい月震観測を行うことは難しい。
- ミッション期間が1年と限られている(ペネトレータの電源の問題)ため、長期にわたる月震の観測ができない。



- ペネトレータ台と着陸機1台で、合計8ヶ所に月震と熱流量観測ステーションを設置(表側3ヶ所+1、裏側4ヶ所)。
- 観測期間は2年間。着陸機には広帯域地震計を装備。

マルチペネトレータ計画で 狙う目標

(1) 月中心核の大きさと構造

中心核サイズの精密化、核内の構造

(2) 月深部マンツルの地震波速度構造

マンツル構成物質の推定、低速度層の存在の有無(温度構造とも係わる)

(3) 月地殻、上部マンツルの非均一性

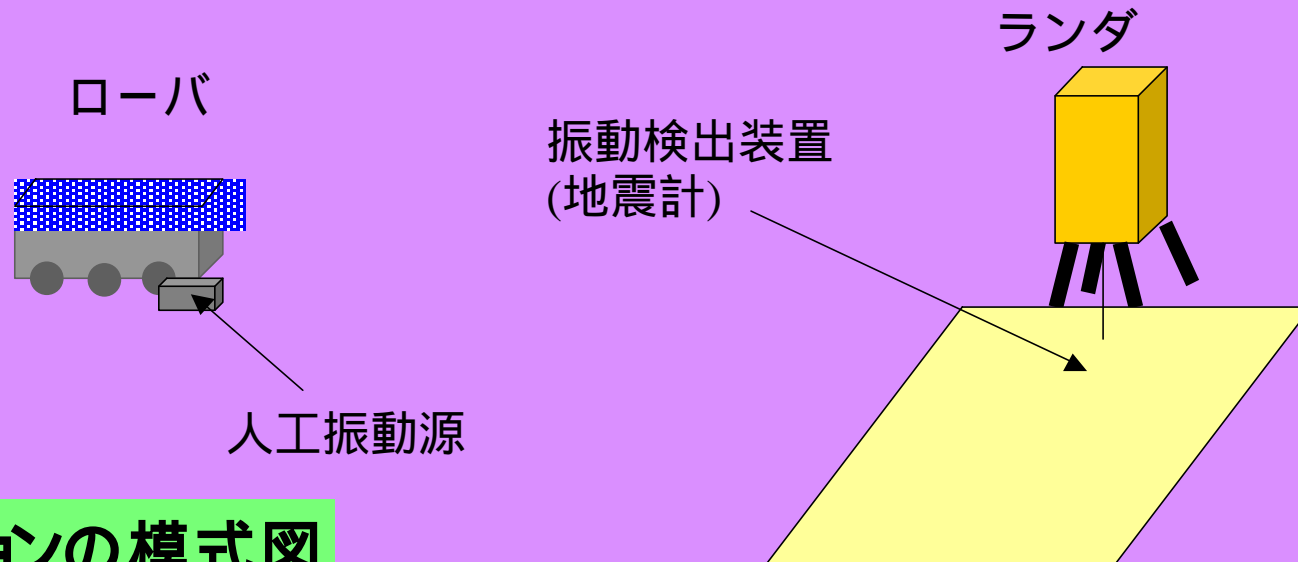
表側と裏側の非対称性、二分性の起源の解明

(4) 月全面の熱流量分布

(水谷ほか、1998より)

ローバを使った物理探査計画

人工振動源を搭載したローバと、振動検出装置を搭載したランダとの組み合わせにより、月の浅部地下構造を探る計画。SELENE-2計画におけるローバミッションの1つとして提案中。



ミッションの模式図

まとめに代えて

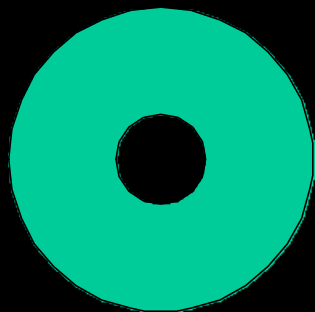
- 月震はなぜ重要なのか？ -

月震を解析することによって、月のコアの大きさを直接知ることができる。

コアの大きさは、月が全体としてどのような物質でできているかに直結する。

月が何でできているかが分かれば、月の成因に直接結びつく手がかりになる。

コアの大小が月の成因を決める

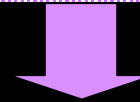


大きい

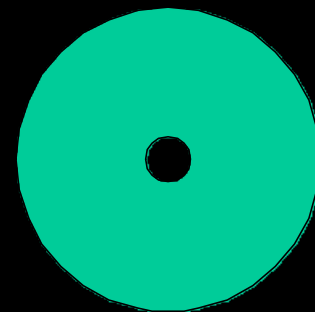
月には鉄などの物質がたくさんある。



月は地球のマントルが分化する前に形成された。



巨大衝突説に不利。

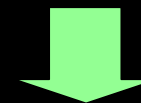


小さい

月には鉄などの物質が少ない。



月は地球のマントルのような物質から形成された。



巨大衝突説に有利。

月震は月の中味を知る強力な手段

- 月の地殻の構造を明らかにすることにより、月の進化の歴史がわかる。
- 月の浅い部分の地下構造は、将来的な月の利用などにとっても重要。
- 重力異常や磁気の分布データと組み合わせて、グローバルな地下構造を把握する。
- 将来的な惑星内部構造探査への試金石として。
- それより、なんといいっても
「見えないものはみたい」