

学位論文

月震発生様式の解明とその
LUNAR-A計画における月震観測への適用

平成6年12月博士(理学)申請

東京大学大学院理学系研究科
地球惑星物理学専攻
荒木博志

①

学 位 論 文

月震発生様式の解明とその
LUNAR-A計画における月震観測への適用

平成6年12月博士（理学）申請

東京大学大学院理学系研究科
地球惑星物理学専攻
荒木博志

月震発生様式の解明とその
LUNAR-A計画における月震観測への適用

荒木 博志
Hiroshi Araki

宇宙科学研究所
Institute of Space and Astronautical Science

博士論文
1994年12月22日
Doctoral Thesis
December 22, 1994

謝辞

博士論文をまとめるにあたり、研究テーマを与えて下さるとともに、常に御指導を賜り、また議論に快く応じて頂きました宇宙科学研究所の水谷 仁教授に感謝いたします。テキサス大学の中村吉雄教授は、アポロ月震データを全て宇宙科学研究所に送っていただいただけでなく、データ内容及びアポロ月震計測システムの詳細を御教示していただきました。宇宙科学研究所の藤村彰夫助教授、早川雅彦助手、田中 智助手には、LUNAR-A月震取得システムについての詳細な議論やベネトレータ貫入実験等、研究課題全般にわたり多大なる助力、激励をしていただきました。高知大学の村上英記助教授には、月震後半データ用デジタルフィルターの設計等で指導していただきました。名古屋大学の山田功夫助教授には地震計の原理、月震計の改良等に関する情報を教えていただきました。東北大学の小山順二助手にはアポロ月震観測の論文になっていない基礎知識や情報について教えていただきました。京都大学防災研究所の伊藤 潔教授には地球地震に対するイベントトリガー法について情報を教えていただきました。高知大学の本田理恵助手には、アポロ月震データの読みとり方を初歩から教えていただきました。宇宙科学研究所博士課程の寺菌淳也さんにはアポロ月震データ用のグラフィックソフトを作成してもらったことをはじめ、ワークステーション上での作業で多大なる助力をいただきました。宇宙科学研究所の安部正真助手には月内部潮汐計算を行う際に必要となるプログラム調達でお世話になりました。国立天文台の木下 宙教授及び中井 宏助手には、月からみた地球秤動計算に不可欠な月の暦(ELP2000/82)を使わせていただきました。さらにLUNAR-A月震計やデータ取得関係の会議等では、日産(株)、日本電気(株)、アカシ(株)のLUNAR-A月震計、月震計測担当者の皆さんに議論、共同作業を通じてお世話になりました。そして最後になりましたが、宇宙科学研究所の水谷研、藤原研のスタッフ、学生の皆様にはセミナーの場等で有意義な議論、批判をしていただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

なお、本研究のうち第5章の月内部潮汐応力の計算は宇宙科学研究所の大型計算機FACOM. M1800で行いました。

目次

謝辞	-----	1
論文要旨	-----	4
第1章 緒言	-----	7
1-1 月、惑星内部構造探査とLUNAR-A計画		7
1-2 研究内容及び論文構成		8
第2章 過去の月内部構造探査と将来の課題	-----	11
2-1 アポロ計画における月震観測		11
2-1-1 月震観測の歴史		11
2-1-2 月震活動		13
2-1-3 地震学的月内部構造		19
2-2 Lunar-Laser-Ranging(LLR)		22
2-2-1 月自転軸まわりの慣性モーメント(C)		22
2-2-2 月のラプ数(k_2)、Q		23
2-3 月震観測、今後の課題		24
2-3-1 月コアの存在、大きさ、地震学的構造		24
2-3-2 月深部マントル(深さ1000km以下)の地震学的構造		24
2-3-3 地殻厚さの不均一性(表と裏)		25
2-3-4 深発月震震源の月全体にわたる分布(海と高地)		25
2-3-5 隕石衝突と流星群との関連(1998年の獅子座流星群)		25
2-4 LUNAR-A計画概要		25
第2章付録 アポロ月震データ		31
第3章 LUNAR-A 月震計	-----	36
3-1 LUNAR-A月震計の原理と構成		36
3-2 LUNAR-A月震計の観測周波数帯域と目標感度		36
3-3 月震計開発		39
3-3-1 ベネトレータ貫入実験		39
3-3-2 月震計内部バネ振り子の運動拘束による耐衝撃性向上		43
3-3-3 磁気回路の削り込みによる月震計小型軽量化		45

3-3-4	Sm-Co系磁石、 $\phi 20\mu$ コイルを用いた月震計高感度化	45
3-3-5	バネの非線形化と鉄片の利用による月震計長周期化	47
3-3-6	その他の問題	48
3-4	月震計回転機構	50
3-5	月震計総合特性	50
第4章 LUNAR-A 月震データ取得法 -----		53
4-1	LUNAR-A月震観測	53
4-2	月震用イベントトリガー法の開発	55
4-2-1	アナログトリガー法	55
4-2-2	LUNAR-A用アナログトリガー法	62
4-2-3	アナログトリガー後のノイズチェック (有効トリガー)	67
4-3	月震取得時間判定法	81
4-4	月震後半データの4Hzダウンサンプル用 anti-aliasing filter	86
4-5	伝送優先順位判定法	88
第5章 月内部潮汐応力の周期性と応用 -----		93
5-1	月内部潮汐応力計算の意義と目的	93
5-2	計算手法	94
5-2-1	概要	94
5-2-2	地球秤動	95
5-2-3	y関数決定	102
5-2-4	月内部応力テンソル	106
5-2-5	最大シア応力方向、仮想面を介した力	107
5-3	震源データ及び検討事項	108
5-4	結果と考察	110
5-4-1	LUNAR-A用深発月震予報表の作成	110
5-4-2	A33深発月震活動の6年周期	112
第5章付録1 Magnetic Tape ELP 2000/82		123
々	付録2 深発月震20グループにおける潮汐応力テンソル計算結果	137
参考文献 -----		182

論文要旨

本論文は、宇宙科学研究所のLUNAR-A計画で主要探査項目となる月震観測を適切かつ効率的に実行するための基礎研究を集成したものである。LUNAR-A計画(1997年夏打ち上げ予定)は月の裏を含む3カ所で月震観測、熱流量観測を行うことで月のコアを含む中心構造の解明し、ひいては月起源に関する重要な情報を得ることをめざしている。以下各章ごとに内容の要旨を示す。

第1章では月起源と進化の問題に答えんとするLUNAR-A計画の意義をまとめ、本論文のLUNAR-A計画における位置づけ及び内容紹介も同時に行った。月をはじめ惑星起源、進化の問題の解明には惑星全体の構造、組成に対する制約条件が不可欠であるにも関わらず、過去には内部構造を主要なターゲットにした探査計画はなかった。その意味でLUNAR-A月震観測は将来の惑星探査が進むべき一方向を示すものでもあり、その基礎を固める本研究は重要な意義を持つ。

第2章では、はじめに過去の月内部構造探査結果を振り返り、それを踏まえて将来の月内部構造探査の具体的な目標を以下のようにまとめた。さらにLUNAR-A計画の概略を紹介し、テキサス大学の中村吉雄先生から送られたアポロ月震データのフォーマットを第2章付録として示した。

1. コアのサイズ、速度構造、Q、これから、月の平均的構成物質を押えられ、月岩石中の親鉄元素挙動から月起源を探る研究に寄与することができる。月全体の弾性的、熱的構造決定にも大きな影響をおよぼす。
2. 深部マン托ルの速度構造、Q、これは月内部の弾性的、熱的構造を押えるのに重要な役割を果たす。1と合わせ、月の熱史を考察するための重要な情報となる。
3. 月地殻の厚さの非対称性、この正確な評価は、Al, Caなどの難揮発性元素の存在量の正確な見積もりにも欠かせない。
4. 深発、浅発震源分布の不均一性、この問題の追求から月内部の水平方向不均質性の有無に関する手がかりが得られる可能性がある。

この他、内部構造とは直接つながらないが興味深い問題として、5. 流星群と隕石衝突の関連がある。流星群構成粒子のサイズ分布の情報が得られる可能性がある。LUNAR-A計

画では3以外を目標にしているが特に1,2が主目標である。

第3章ではLUNAR-A用月震計の開発状況、現状について述べる。まず、アポロ月震データのスペクトル解析を行なったところ深発月震のスペクトルピークは0.5~1Hzにあることがわかった。深発月震は月深部の情報を定期的にもたらすものとして、LUNAR-A計画で重視されているターゲットである。この結果をもとに月震計の固有周期を2sec.にすることが目標とされた。この目標に対し、非線形バネの利用、及びバネ振り子に取り付けた鉄片と月震計磁石間に働く磁力の利用、という2方針を組み合わせた長周期化が進められ、現状では1sec.まで達成されている。また耐衝撃性の確立には各種ベネトレータ実験を行い、月震計内部バネ振り子の拘束条件が求められた。小型軽量化には月震計内部の永久磁石の削り込みなどで1つ当たり330g以下を達成し、サイズも $\phi 50 \times 51$ にまで小さくなった。さらにバネ振り子に巻き付けるコイル線直径を20 μ mまで細くしても耐衝撃性が損なわれないことが実証され、感度は10V/kine(20Hz)にまで達成できた。これら耐衝撃性、小型軽量化、高感度化の成果に加え、月震計固有周期が目標の2sec.を達成できると、周期1sec.の波をアポロ月震計の3倍の感度で観測できる。

第4章では、LUNAR-A月震観測におけるイベントトリガー法、さらに取得したデータのデータ処理、種類判別の方法を論じている。まず地球の地震観測でよく用いられているSTA/LTA法をもとにアポロ月震データを用い、有効かつ簡便なイベントトリガー法を探した。その結果、Fig.4-2[3]に示すようなLTAの中にSTAが組み込まれている方式を提案し、STAの長さ(T_s)は経験的に数十秒程度、LTAの長さ(T_L)は500~600秒がよいことを見いだした。次にアポロの長周期月震計の連続記録データを数ヶ月間調べ、そこにしばしば現れる継続時間10秒程度のノイズと片側振幅ノイズをよるトリガー誤動作を避けるため、トリガー後に数秒以上あとに4秒間の振幅レベル、片側振幅度をチェックする方法を提案した。さらにトリガーをかけた月震データの取得時間を前半の256秒で判断する方法として、トリガー後128秒と256秒付近の振幅レベル(それぞれ A_1, A_2)を計算し A_2/A_1 と A_2 を組み合わせでおこなう方法が提案されているが、各種月震について実際に計算し、この方法に必要なパラメータ決定に役立てた。また取得した月震データの後半部を16Hzサンプリングから4Hzに落とすとき必要となるデジタルフィルターの設計、検討を行い実機搭載用として23次FIR(非再帰型数値)フィルターを提案した。最後に月震データの地上伝送順序決定のために種別判定を簡単に評価できるかを見るために、各種月震についてrise-time(初動より振幅が最大となるまでの時間)を計算し、震央距離との関係を調べた。この結果、1. 深発月震のrise-timeは角距離によらず3~8分で一定していること、2. 浅発月震、隕石衝突に

については、角距離と正の相関が存在すること、が認められた。一方、3. 熱月震のrise-timeはほぼ2分以内に収まっている。このため、熱月震は他の3種類の月震とはrise-timeによって明確に区別することが可能である。これら3つの結果を使えば、rise-timeを月震の種類の判別に利用することができる。

第5章では震源位置が既知である深発月震20グループについて震源における潮汐応力を10年分(1969年～1977年と1998年)計算を行った。この結果、深発月震の6年周期の活動度変化と潮汐応力の6年周期性との間の対応関係を明らかにでき、各深発震源における潮汐応力テンソルの変動周期性から1998年の初日は1974年の通算112ないし114日に相当することがわかった。この対応関係をもとにアポロ当時の月震発生データを使って1998年における深発月震活動を推定し、LUNAR-A用深発月震予報表を作成した。1998年には、少なくとも深発月震グループA1, A5, A6, A9, A20, A24, A30, A33, A40, A42, A44, A50, A61の13グループが活動していることがわかった。12ヶ月の総数は63イベントである。この予報表は、約6年の周期性が月震活動においてアポロの記録どおり正確に繰り返すことを前提にしたものであり、LUNAR-A月震計のようにアポロ月震計より高性能であればさらに多くの深発月震が観測されることが予想される。これらの結果はLUNAR-A月震観測においてターゲットの1つとなるべき深発月震の予報に役立てられ、運用計画策定のための基礎資料とされるものである。

第1章 緒言

1-1 月、惑星内部構造探査と LUNAR-A 計画

月の表面は無数のクレーターで覆われ、海と高地の2大地域に大別される以外は地形の多様性に乏しい天体である。また火山活動など内部の活動性も表す現象も見みあたらず、大きさも地球の1/4に過ぎないことから、内部エネルギーに乏しく、形成以来分化を経験していない死んだ天体であろうと思われていた。従って表層のサンプルを採集すれば直ちに月全体の平均組成が得られ、月起源の謎にせまることができると予想されていた。しかしアポロ月探査計画によって月岩石やレゴリスが大量に持ち帰られると、月は未分化な天体ではなく、形成初期に加熱され大規模な溶融分化を経験していたことがはっきりした(e. g. Wood et al., 1970)。そして月全体の組成を明らかにするにはその内部構造探査が必要であることも、このとき同時に明らかになったといえよう。しかしアポロ月探査ではそれまで行われておらず、かつ将来的にも重要と思われる2種の内部構造探査を実行している。ひとつは月震観測であり、ひとつは複数設置した電波源の相対VLBI観測あるいはレーザー測距といった測地学的観測であった。残念ながら当時は月震観測、測地学的観測ともに感度、精度が不十分であり月中心部まで探査の手がおよばず、将来の課題として残された(Nakamura et al., 1982; King et al., 1976)。

アポロ11号月着陸から四半世紀が過ぎた今、日本初の本格的固体惑星探査、宇宙科学研究所のLUNAR-A計画が1997年夏の打ち上げをめざし準備が進められている。この探査計画は月震観測、月熱流量観測を行い、月全体の構造、組成を知るためのかぎとなる月コアのサイズ、構造を探ることを主目標としている。これはアポロ計画までの一連の月探査では未解明のまま残された課題であり、月バルクの組成から月起源へ、ひいては地球-月系起源の謎に迫る情報が得られることも期待されている。LUNAR-A計画では3台のペネトレータと呼ばれる砲弾型のケースに月震計、熱流量計を搭載し、月の裏1カ所を含む月面の3カ所に貫入させて観測を行う予定である。このペネトレータ方式による惑星探査はこれまで例がなく、宇宙科学研究所で世界にさきがけて開発が進められている。惑星全体に観測網を一度に設置できることが最大の利点であるが、観測装置には通常の衛星観測機器と同様の小型軽量化、信頼性等に加え約10000Gという並外れた耐衝撃性が要求される。

従来、惑星探査はサンプルリターンやリモートセンシングが中心で対象はほとんど表層に限られており、内部構造探査としては、上記のアポロ月震探査、月の相対VLBI観測、

レーザー測距による低次重力係数、慣性能率決定以外には、火星のバイキング2号による地震探査、惑星周回衛星のトラッキングデータからの重力係数決定等しかない。しかし惑星科学の主目的である惑星の起源と進化を探るには、惑星全体の構成物質の知識は不可欠であり、表層探査と並んで内部構造探査を実行しなければならない。LUNAR-A計画はその意味で将来の惑星探査の進むべき一方向を示すものでもある。

1-2 研究内容及び論文構成

本論文のもとになった研究は、LUNAR-A計画の中心となる月震観測を成功に導くための基礎研究であると位置づけられる。その主要な内容は以下の通りである。

- ① 深発月震スペクトル評価をもとにしたLUNAR-A月震計周波数特性の開発目標決定や、各種ペネトレータによる耐衝撃性実験参加等を通して月震計開発に関与した。
- ② アポロ月震データを用いて月震用イベントトリガー方式の開発研究において中心的役割を演じた。
- ③ LUNAR-A月震データの取得時間判定法、地上伝送優先順位判定法及び月震データ後半部のダウンサンプル用デジタルフィルターの決定に際し、基礎資料を作成してこれに貢献した。
- ④ 月内部潮汐応力の計算を行い、アポロによる深発月震発生データと比較することで1998年深発月震予報表を作成し、LUNAR-A運用計画のための基礎資料のひとつとした。

論文の構成は以下の通りである。

- 第1章 緒言
- 第2章 過去の月内部構造探査と将来の課題
- 第3章 LUNAR-A月震計
- 第4章 LUNAR-A月震データ取得法
- 第5章 月内部潮汐応力の周期性と応用

以下、簡単に第2章以降の内容紹介を行う。

〔第2章〕 1-1節で述べたように、アポロ計画で実行された月内部構造探査は不十分なまま終了したが、それでも月は他の惑星と比較すると内部構造に関する情報が最も豊富な天体である。ここではこれら過去の月内部構造探査のうち、アポロ月震観測の結果(2-1節)とLLR(Lunar Laser Ranging)観測25年の解析結果(2-2節)について整理する。これらは大きく違った周波数帯域での観測であり両者そろって初めて真の内部構造が明らかになると考えられるからである。さらに内部構造に限らず月震探査の将来展望について述べ(2-3節)、LUNAR-A計画の概要についても紹介する(2-4節)。またテキサス大学の中村吉雄教授から宇宙科学研究所に送られたアポロ月震データについて紹介する(第2章付録)。

〔第3章〕 LUNAR-A計画の主目標達成のためにはLUNAR-A月震観測システムは、少なくともアポロ月震計を上回る感度特性を持たなければならない。しかしLUNAR-Aでは観測、データ伝送等をすべてベネトレータに搭載した電源を利用して行う。フィードバック回路は電力消費が大きく、これを使った月震計特性改良は困難である。このため月震計の感度特性改良は、低消費電力、低ノイズアンプの利用以外では、センサーそのものによって行う必要がある。またベネトレータ搭載用として耐衝撃性確立や小型軽量化も同時に進めなければならない。この章では月震計に関する様々な開発項目と達成状況、展望について述べる。月震のスペクトル解析結果から月震計の持つべき固有周波数帯域、目標感度を明確にした後(3-2節)、月震計耐衝撃性試験に利用したベネトレータ貫入実験の概要を説明し(3-3-1節)、耐衝撃性向上(3-3-2節)、小型軽量化(3-3-3節)、高感度化(3-3-4節)、固有周期長周期化(3-3-5節)、その他の問題(3-3-6節)について述べる。また、3成分ある月震計の調整をするジンバル(月震計回転機構と呼ばれる)に必要な回転精度についてもふれる(3-4節)。最後に現時点でLUNAR-A用月震計として最終的に達成可能と思われる総合感度特性を紹介する(3-5節)。

【第4章】 ここではLUNAR-A計画における具体的な月震観測法についての検討結果を述べる。LUNAR-A計画では電力、通信能力から来る制約のため、アポロ月震探査のように月震計の連続記録をそのまま直接地上に伝送することは不可能である(4-1節)。従って信頼性が高くかつ簡便な月震用イベントトリガー法の開発が不可欠である。さらに取り込みを開始した月震の取得時間を決める、取得したデータの伝送順位を必要度が高い順に番号づける、等も自動的にを行う方法を確立しておく必要がある。そこでアポロ月震データを用いた各種のイベントトリガー法の比較検討を行い、立ち上がりが緩慢な月震にふさわしく、かつ簡便な方法を提案する(4-2節)。この方法はLUNAR-A計画に採用されることになっている。また月震の取得時間決定法(4-3節)、取得した月震データ後半部のダウンサンプル用デジタルフィルターの設計(4-4節)、取得したデータの伝送順位決定法(4-5節)についても、アポロ月震データの解析結果をもとに検討を行い、LUNAR-A計画で採用される方法決定に役立てられるべき基礎資料を得た。

【第5章】 第4章では月震の取得法を検討したが、月深部の情報を担う深発月震をその周期性を利用して発生日をあらかじめ予想しておくことができれば、データ取得の立場からは非常に有益である。第5章では1998年のLUNAR-A月震観測時に確実に観測可能な深発月震を洗い出すことを試みる。すなわち月内部の各深発月震の震源において地球による2次潮汐応力を計算してアポロ月震の発生日の記録と比較し、また同時にLUNAR-A月震観測時にアポロ計画時の潮汐応力変動がどのように再現されているかを調べ、1998年のLUNAR-A計画実行時に予想される深発月震発生日時の推定を行う。結果は1998年から1999年始めの深発月震予報表を中心にまとめている(5-4-1節)。さらにA33深発月震グループのきわだった周期性と震源に働く潮汐応力変動の関連をみるため、最大潮汐シア応力が得られる2平面についてシア応力、垂直応力の変動を求め、月震発生時期との対応を検討した(5-4-2節)。以上月内部潮汐応力変動の計算結果はLUNAR-A月震観測時はもちろん、月震データ取得後の震源過程解析時等にも利用できる。

第2章 過去の月内部構造探査と将来の課題

本章ではアポロ計画での月震及び月内部構造探査とその成果、さらに将来の月震観測の課題について整理し、1997年に打ち上げ予定のLUNAR-A計画の実際について簡単に説明する。その前にここでは固体惑星の内部構造探査の方法について述べる。

固体惑星面で地震観測を行うことは、少なくとも隕石衝突による地震が期待されることから、内部構造探査に有効となる方法である。アポロ計画では、アポロ12、14、15、16号の各着陸地点に月震計を設置して観測網をつくり、深さ約1000kmまでの地殻、マントル構造の概略を決定したのをはじめ、表層レゴリスの構造も人工地震探査で決定している(2-1-3節)。一方、月震探査と並ぶ内部構造探査として、人工衛星によるドップラー観測、VLBI、レーザー測距等を用いて重力場、秤動、潮汐を観測する方法がある。アポロ探査の時は、月面上に5個の電波源(VLBI用)、3個のコーナーキューブ(レーザー測距用)が設置され、3軸回りの慣性モーメント比 β 、 γ を4~5桁の精度で、また重力場の低次の係数を1~2桁で精度で決定した(King et al., 1976)。コーナーキューブは後に旧ソ連による2台が加わり、現在に至るまで観測を続けている(Dickey et al., 1994)。2-2節では Dickey et al. (1994)に従って、最新の月内部情報を整理しておく。これらは、慣性モーメントやラブ数等、月全体の、かつ1ヶ月程度以上の長周期応答に相当する力学的、あるいは弾性力学的特徴を求めることができる。これはアポロ月震観測網が、最大でも約1000kmのスケールでしかなく、0.3~10Hz程度の周波数に対する観測であったのと対照的である。すなわち、①地震観測と、②重力場、秤動、潮汐の観測、は相補的なものであり、将来の月、固体惑星の内部構造探査でも両方のデータを得ることを目指すべきであろう。

2-1 アポロ計画における月震観測

2-1-1 月震観測の歴史

月に地震計(月震計)を設置する計画は、1959年のレンジャー計画にまでさかのぼる。レンジャー探査は、探査機を月面に衝突させるというものであったが、月震計をsurvival sphereという約3000Gの衝撃に耐えられる容器に入れて設置を試みた(Press et al., 1960)。この月震計は上下動のみ固有周期1秒、重量3kgであったが、レンジャー計画での3回の設置実験はすべて失敗している(Lehner et al., 1962)。数年後、サーバイヤー月軟着陸船に3成分

Characteristics of Apollo Seismometers

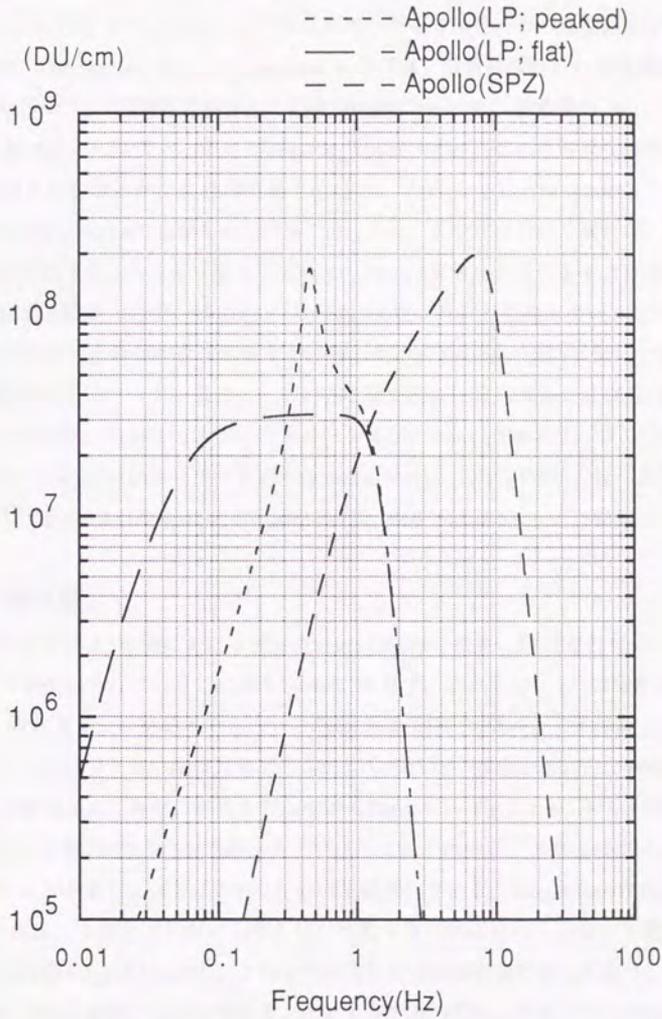


Fig.2-1 アポロ月震計の特性図。長周期月震計(LP: peaked mode and flat mode)と短周期上下動月震計(SPZ)の3種の観測が行われた。LPは、0.45Hzで3A(flat-mode)、0.5A(peaked-mode)、SPZは8Hzで0.5Aの振動を検出できた。1DUはAD変換の1bitを表す。2-1-1節参照。

長周期、上下動1成分短周期、総重量11.5kgの月震計設置が計画された。この月震計は Lamont Doherty Geological Laboratory で開発されたが(Sutton and Latham, 1964)、結局サベイヤーには搭載されず、アポロ計画まで実現が延期された(Lognonne and Mosser, 1993)。

こうして1969年、アポロ11号により地球以外の天体ではじめての地震観測が開始された。この実験は、PSE(Passive Seismic Experiment)と呼ばれ、固有周期15秒の長周期(LP)月震計3成分、固有周期1秒の短周期月震計上下動成分(SPZ)からなり、総重量11.5kg、 ϕ 23×29cm、消費電力は4.3W~7.4Wであった(Latham et al., 1969, 1970a)。この月震計は当時としては地球用地震計よりもはるかに高感度であり、LPは、0.45Hzで3A(flat-mode)、0.5A(peaked-mode)、SPは8Hzで0.5Aの振動を検出できた(Fig.2-1)。アポロ11号の月震計は、プロトタイプとして太陽電池をエネルギー源としていたため、設置地点が夜になる21日間のみ作動しただけで観測を停止したが、後の12、14、15、16号は原子力電池を用い、1977年9月30日に地上から観測停止命令が送られるまで作動した。これらは、月の表側に一辺約1100kmの三角形観測ネットワークを構成し、月内部の速度構造決定に大きく貢献した。アポロの月震データは10bitsでLPのサンプリングレートは150.94ms.、SPのサンプリングレートは20.8ms.であり誤差は0.01%以下である(Nakamura, 1991)。これら4箇所、延べ26.18年に及ぶ観測データは総計6.3 10⁶kbitsに上る(Latham et al., 1969; Nakamura et al., 1980)。

2-1-2 月震活動

アポロ計画による8年弱にわたる観測(Table2-1参照)の結果、LP月震計によって12558個のイベントが検出された。その内訳をTable2-2に示す。これらは、1. 深発月震、2. 浅発月震、3. 隕石衝突、に分類されるが、半数以上は未分類である。これらは振幅が小さすぎてグループ分けできない深発月震であるのかも知れない(Nakamura et al., 1982)。LPのイベントが各観測地点、各年に観測された個数をFig.2-2-1~Fig.2-2-4に示す。未分類のものを合わせると、年間500~1500回観測されていることがわかる。またこの他に、4. 熱月震というグループがあり、ほとんどSPZのみに記録されている。Duennebier(1976)によれば熱月震は、1日当たり数回(アポロ14号)ないし数十回(アポロ15、17号)も発生する。これら1~4の波形をFig.2-3に示す。これらの共通した特徴は紡錘形をしており、かつ熱月震以外は数十分以上継続することである。これは月内部の散乱が大きくかつ吸収が小さいためと考えられている(Dainty et al., 1974; Dainty and Toksoz, 1977; Nakamura, 1976, 1977)。

以下これらの諸月震について、すでに判明している点を中心にまとめておく。1. の深発月震は、震源が700~1200kmの深さにあり、一般に月潮汐の周期(約27日)に合わせて

Table 2-1 アポロ月震観測網¹⁾の詳細。Horvath (1979)のTable 1を引用。

Station	Installation	Location (degree)		Azimuths ²⁾ (degrees)	Total number of days ³⁾	
		Latitude	Longitude		in peaked	in flat mode
11	July 21, 1969	0.68 N	23.42 E	0.		21 ⁴⁾
12	Nov. 21, 1969	3.04 S	23.42 W	180.	2055 ⁷⁾	817 ^{5,6)}
14	Feb. 21, 1971	3.65 S	17.48 W	0.	2288 ⁸⁾	
15	July 31, 1971	26.08 N	3.66 E	0.	1615	638 ⁶⁾
16	Apr. 21, 1972	8.97 S	15.51 E	-25.5	1350	638 ⁶⁾

- 1) The network was turned off on September 30, 1977.
- 2) The listed azimuths are the direction of the ground motion which give positive signals on one of the horizontal components (X) and no signal on the other (Y). Azimuths are measured clockwise from North. The direction of the ground motion which gives positive signals on Y is 90° clockwise from the direction listed.
- 3) Only those days were excluded from this count when the signal was lost for at least one full day. This happened at station 14 only between March 1 and March 5, 1975, between January 18 and February 19, 1976, between March 17 and May 20, 1976, between June 8 and June 10, 1976, between October 9 and November 12, 1976, and between July 30 and August 4, 1977.
- 4) Station 11 was turned off for the lunar night between August 2 and August 17, 1969.
- 5) Station 12 was operating in the flat mode between November 19 and November 22, 1969, and between October 14, 1974 and April 9, 1975.
- 6) Station 12, 15, and 16 were operating in the flat mode between June 28, 1975 and March 27, 1977.
- 7) The short-period vertical seismometer at station 12 never worked properly.
- 8) The long-period vertical seismometer at station 14 did not worked properly most of the time.

繰り返し発生する。109個のグループが同定され、同一グループに属する深発月震はほとんど同じ波形を出しており(Fig.2-4)、相関係数が0.8程度になることもある。これはほぼ同一震源からはほぼ同一の震源過程で発震していることを示唆している。震源が求まっているのは52グループである(Nakamura et al.,1982)。表側の月東南部すなわち表側の高地の下には震源分布がほとんど見られないようだが(Lammlein,1977; Lognone and Mosser,1993)、統計的に有意であるとの断定はできていない。月の裏に深発震源が見つからなかった(A33は除く)ことと合わせ、今後の課題として残されている問題である。

Table 2-2 分類がなされたアポロ長周期記録のイベント数。Nakamura et al.(1982)より。

Type	Number of Events
Artificial impacts	9
Meteoroid impacts	1743
Shallow moonquakes	28
Deep moonquakes	3145
unclassified	7633
Total	12558

深発月震は月潮汐と同じ発生周期を持つといっても、月内部潮汐応力は0.5bar程度であるから、月内部の岩石に断層をつくることはできない。全ての深発震源はすでに存在している断層面に相当し、それが月内部のテクトニックな応力に潮汐応力変動が加わることであり、周期的に活性化されているのであろう(Lammlein, 1977)。深発月震のマグニチュードはリヒタースケールで0.5~1.3と見積もられている(Lammlein et al., 1974; Lammlein, 1977)。さらにGoins et al.(1981)によれば、最大の深発月震グループA1では、典型的地震モーメントは $5 \cdot 10^{13}$ Nm、corner frequencyは1Hz、応力降下は0.1barとしたが、アポロ月震計の特性補正が困難であるのに加え非弾性効果補正に敏感であるためこれが正しいのかは不明である。

2. の浅発月震は全部で28回しか観測されていない。深さは200km程度とされている。規模は深発月震よりはるかに大きい。マグニチュードは最大4~5と見積もられ(Lammlein et al., 1974; Lammlein, 1977)、地震学的モーメントは $1.6 \cdot 10^{15}$ Nm、corner frequencyは10Hz以上、応力降下は400~2100barにもなる(Oberst, 1987)。深発月震のような周期性は見られず、原因も良く分かっていないが、月全体の冷却に伴う歪み蓄積に求める考えがある(Lammlein et al., 1974; Lammlein, 1977)。

3. の隕石衝突はLPによって観測期間中に1743回数えられたが、これらは500g~50kgと見積もられている(Nakamura et al., 1982)。しかしSPZでは局所的な隕石衝突がもっと頻繁におこっているらしく、さらにLSPE(2-1-3節)のgeophoneの観測ではさらに小規模な衝突があると言われている(Duenebier and Sutton, 1974b)。これらの衝突は、全くランダムに起こるのではなく、クラスタリングがあるとも言われている(Duenebier, 1976)。さらにOberst and Nakamura(1991)によると推定質量1kg以下の衝突のうち28%、それ以上の衝突のうち15%がクラスターをなし、かつ既存の流星群と一致するという。

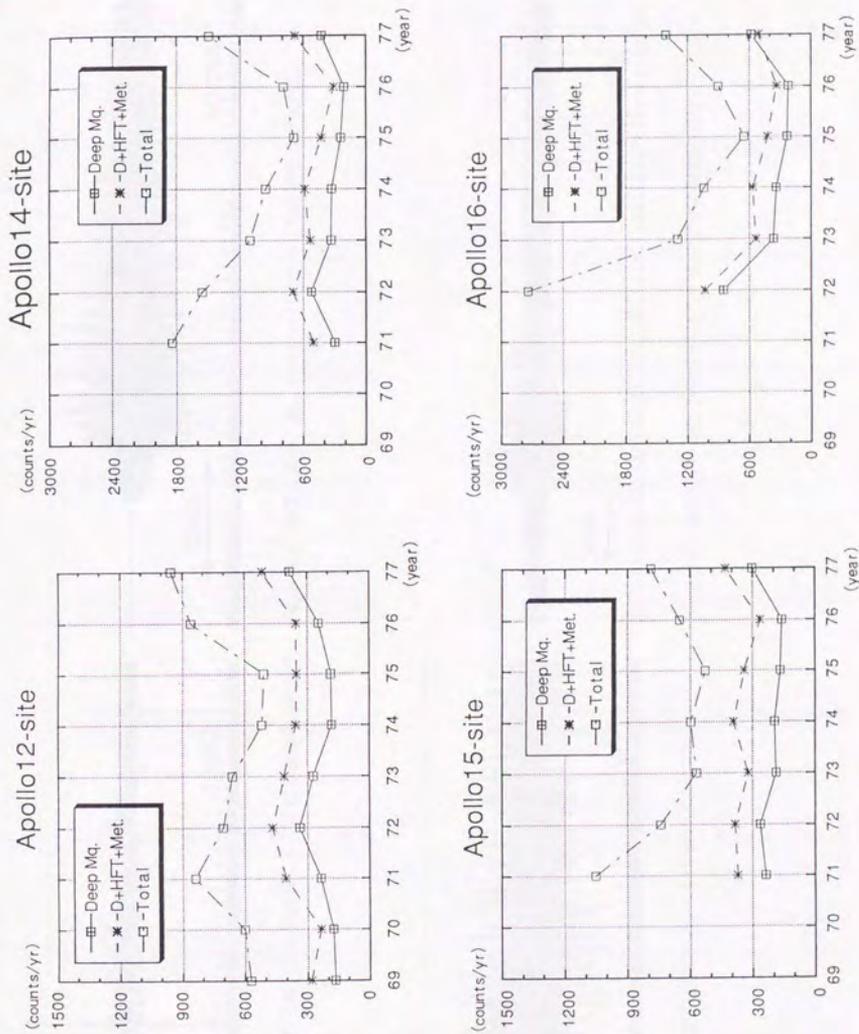


Fig.2-2 アポロの各観測点の長周期月震計で毎年何個の月震を観測できたかを表す。ただし、観測開始年と終了年は、カウント数を年率に換算した。田は深発月震、田と※の差は(隕石衝突+浅発月震)÷隕石衝突、□と※の差は未同定月震である。

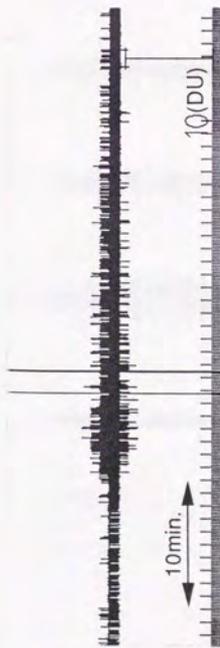


Fig.2-3-1 深発月震グループA1の一例。1970年91日、アポロ12号観測地点(LPZ)。

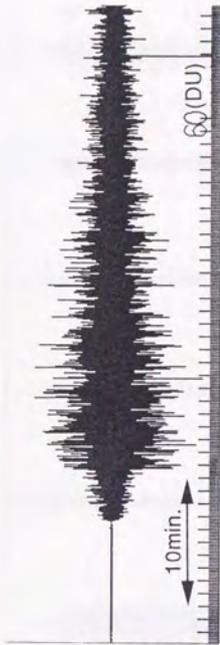


Fig.2-3-2 浅発月震の一例。1973年72日、アポロ12号観測地点(LPZ)。

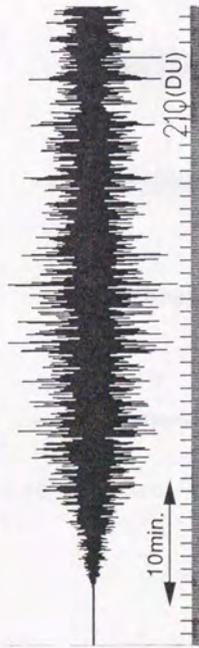


Fig.2-3-3 隕石衝突の一例。1975年124日、アポロ12号観測地点(LPZ)。

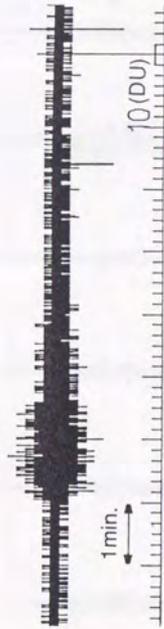


Fig.2-3-4 熱月震の一例。1971年51日、アポロ14号観測地点(SFZ)。

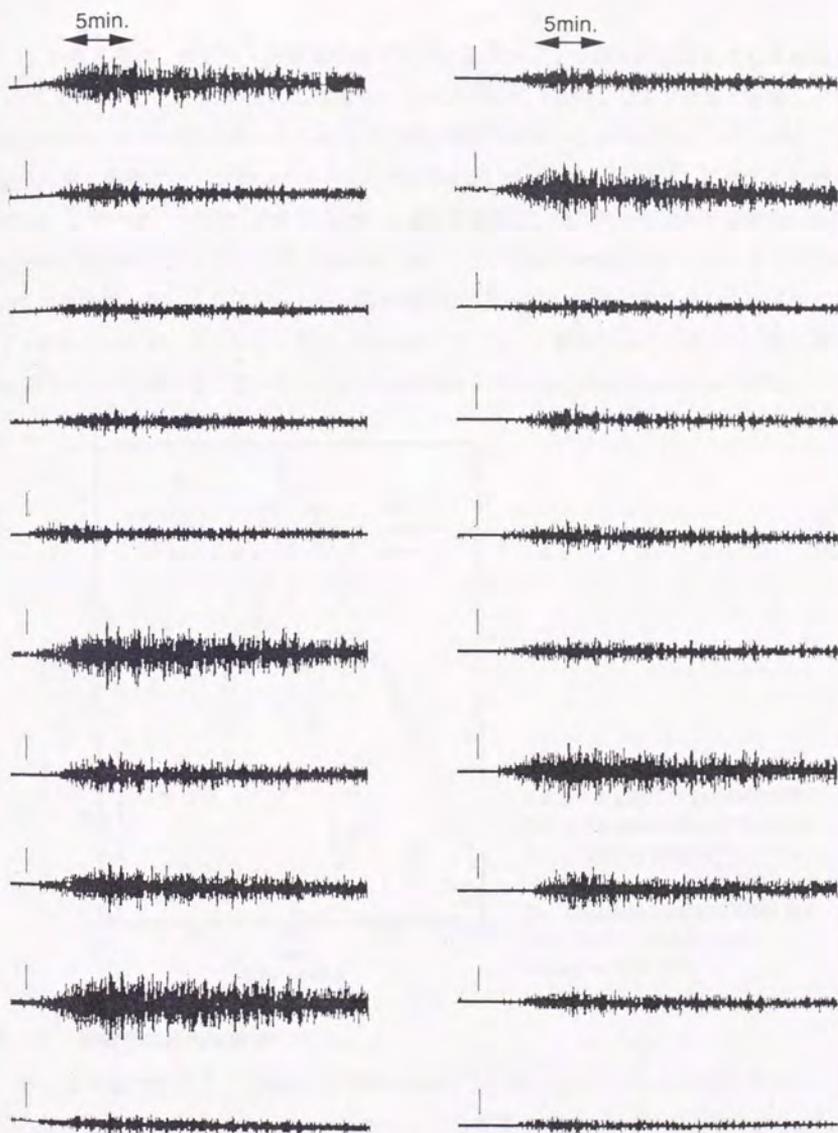


Fig.2-4 アポロ12号観測地点(LPZ)でとらえた深発月震グループA1のいろいろ。これらの波形は非常に似ており、相関係数0.8に達する組み合わせもあった。1969年344日～1971年273日。縦スケールは10DU。

4. の熱月震は、おそらく月表層で起こっているイベントで単一の観測点でしか観測されず、かつほとんどSPZのみにしかみられない。一般に（月の）日中には多く発生し、夜間には少ない。日の出、日の入りにおいて発生数が急増ないし急減する。このイベントも深発月震と同様にいくつかのグループにわけられ（アポロ14号地点で48、アポロ15号地点で245）、同一グループは、1朔望月(29.5日)に1回発震し、ほぼ同一の波形をみせる。活動は非常に地域性が大きく、アポロ14号地点は、1日に数回しか発生しないが、アポロ15号、17号地点は数十回にもなる(Fig.2-5)。発生機構は月面の若い地形におけるレゴリス移動などとされているが、はっきりしたことはわかっていない。数年たってもほとんど同じ様な発生パターンを繰り返しているらしい(Duennebieer and Sutton, 1974a; Duennebieer, 1976)。

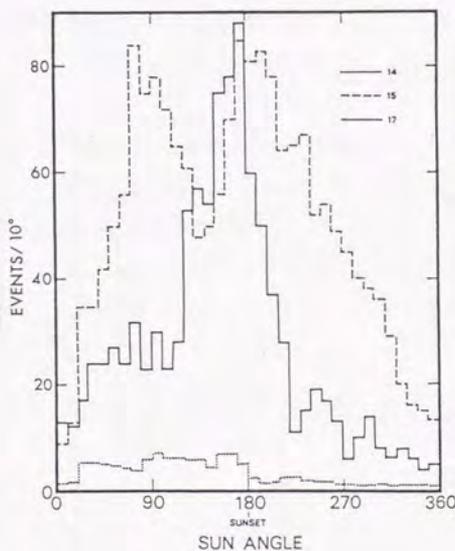


Fig.2-5 アポロ14,15,17号観測地点での太陽高度と熱月震発生頻度の関係。縦軸は個数/20hrに相当。アポロ14号、15号は短周期月震計SPZで、アポロ17号はLSPE listening-modeで観測した結果。日の出後約2時間後に急激に数が増え、日の入り後急激に減る。Duennebieer(1976)より。

2-1-3 地震学的月内部構造

2-1-2節で述べたように月震波は一般に紡錘状であり、個々のフェーズは分かりにくい。このため内部構造のインバージョンはP波、S波の着震のみをつかっておこなわれた。

月表層約1kmまでのP波速度構造は、アポロ14号、16号、17号で LSPE (Lunar Seismic Profiling Experiment)という人工月震探査により求められた(Fig.2-6参照; Kovach and Watkins, 1973a, 1973b; Watkins and Kovach, 1973; Cooper et al., 1974)。それによると月の深さ1km以下はP波速度 105 ± 5 m/sのレゴリス層が2~12mの厚さでおおい、この下には、P波速度300

±50m/sの層が0~100mの厚さで広がっている。前者はできてまもないさらさらのレゴリスであり、後者はエジェクタとやや古びたレゴリスの混合物とされる。この下にP波速度1km/sの層が深さ1~1.5kmまでひろがる。これは破壊された岩石層で地殻上部の不連続層まで続くと考えられており、そこでは4.7~4.9km/sとなる。これ以下深さ約120kmまでの速度構造は、アポロのサターンIVBロケットと月からの離陸用ロケットの月面への衝突(アポロ計画全体で全体で9回)を各観測点の月震計で計測することで決められている(Fig. 2-7; Toksoz, 1974)。これによると深さ25kmと60kmに速度の不連続がある。このうち25kmの不連続は地震学的には確定できない。もし実際に存在するならば、岩石組織、空隙率が変化する面であろうと考えられている(Mizutani and Newbigging, 1974; Wang et al., 1974)。60kmの不連続は地球における地殻、マントルへの速度変化と類似するので、この上部を月の地殻、下部を月のマントルと呼ぶ。

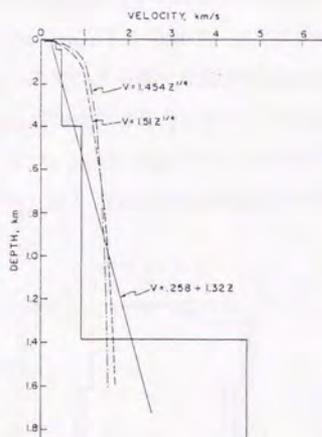


Fig.2-6 月表層のP波速度構造。深さ1.4kmに顕著な飛びがある。2-1-3節参照。Cooper et al.(1974)より。

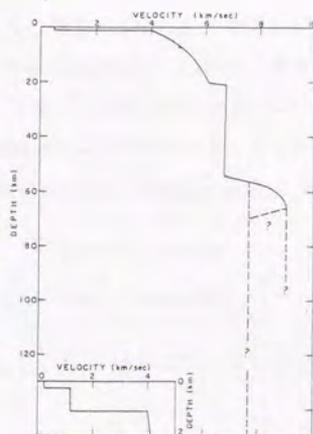


Fig.2-7 Artificial Impacts を用いた深さ~120kmまでの構造。深さ60km付近の速度境界層上部を月地殻、下部を月マントルという。Toksoz et al.(1974)より。

さらに深さ数10km以下1000kmまでの構造は、自然月震である深発月震、浅発月震、隕石衝突の走時解析から決められている。これらの深さ1km以下の構造はFig. 2-8(Nakamura, 1983)、あるいはFig. 2-9(Goins et al., 1981)にまとめられている。ここで注意すべきことは、

どちらのモデルでも、深さ500kmまでは地震波速度が深さと共に減少していることである。Goins et al.(1981)によればその割合は、

$$\begin{aligned} \frac{dV_p}{dh} &= -0.0013 \pm 0.0013 \text{ s}^{-1} \\ \frac{dV_s}{dh} &= -0.0011 \pm 0.0005 \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (2-1)$$

と表される。また月マントルにおける地震学的Qは月震波が非常に長時間継続すること等から最大数千と考えられている(Toksoz et al., 1974, Nakamura et al., 1982)。

しかしそれより深い速度構造については、両説で食い違いがみられる。Fig.2-8では深さ500km以下ではP波速度、S波速度ともに増加に転ずるが、Fig.2-9では逆に減少し続けている。月深部の地震学的速度構造は、まだ良く分かっていないとすべきであろう。この原因は、主に深さ500km以下を通る地震波線が少なかったことによる(Toksoz et al., 1974)。最後に深さ1000km以下の領域は、コアの存在をふくめほとんどなにも分かっていない。ただし、月の裏での隕石衝突記録ではS波走時が遅れる(Nakamura et al., 1974)、あるいは唯一月の裏に震源を持つ深発月震グループA33からくる波は、距離の大きなアポロ12ないし14号観測点では、距離の比較的小さいアポロ16号観測地点より非常に小さいことから(Goins et al., 1981)、深さ1000km付近のQ値は100程度と推定されている(Nakamura et al., 1982)。

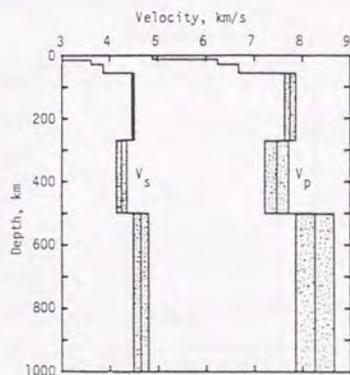


Fig.2-8 Nakamura(1983)による月深部速度構造。誤差は1σ、深さ500kmまでは速度が減少、深さ1000kmまでは再び増加する。

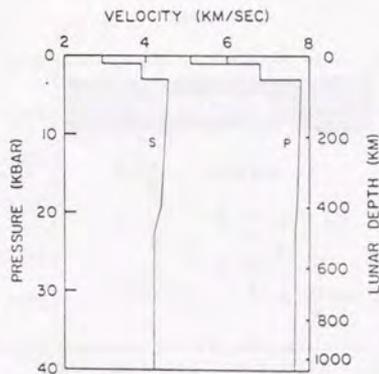


Fig.2-9 Goins et al.(1981)による月深部速度構造。Nakamura(1983)とは対照的に深さ1000kmまで速度が減少傾向にある。

2-2 Lunar-Laser-Ranging(LLR)

アポロ計画(11号,14号,15号)及び旧ソ連のルノホート2号で月表面に設置されたレーザー測距用コーナークューブを用いた地球-月間距離の観測(LLR)は、今日まで続けられている。LLRは、一般相対論検証をはじめ地球-月力学系の諸パラメータ決定に大きな役割を果たしている。以下Dickey et al.(1994)に従ってLLRからの月内部に関する情報を整理する。

2-2-1 月自転軸まわりの慣性モーメント (C)

LLRよりCは、 $C/MR^2=0.3935 \pm 0.0011$ 、と求められた。これは従来受け入れられていた 0.3905 ± 0.0023 (Ferrari et al.,1980) より大きい。これをもとに簡単な月コアのサイズ推定を行なった結果が、Fig.2-10のようにまとめられている。ここで月表層60kmは密度 2.75g/cm^3 、

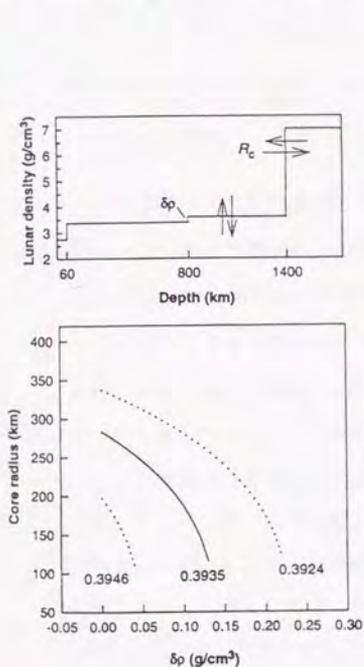


Fig.2-10 LLRによる慣性モーメントの観測値 0.3935 ± 0.0011 をもとに決めた月コア半径。深さ800 kmまでの密度を既知とし、月下部マントルの密度をパラメータとしてコア半径(R_c)を求めた Dickey et al.(1994)より。

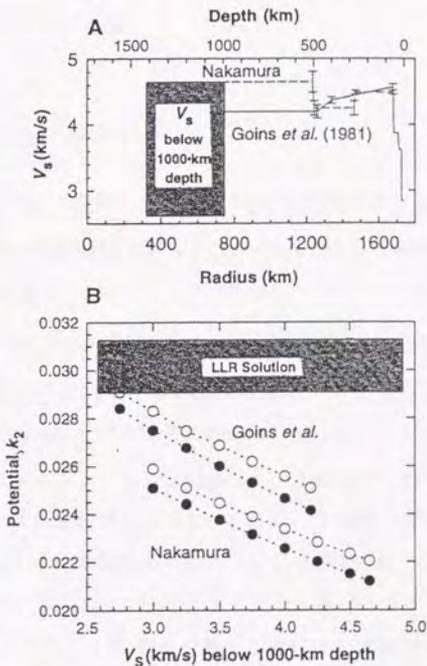


Fig.2-11 深さ1000km以下の深部の地震学的速度(V_s)構造を仮定したときのラブ数 k_2 。LLR観測値よりかなり小さい(コアは300km●、又は400km○、と仮定)。Dickey et al.(1994)より。

深さ800kmまでは 3.4g/cm^3 とし、それ以下の深部マンツルの密度、コア半径(密度 7.0g/cm^3)、平均密度を慣性モーメントの制約を満たすように求めている。月コアがFe主成分のコアを持つと仮定すると、半径は最大でも220km~350km程度となる。

2-2-2 月のラブ数 (k_2)、 Q

月の物理秤動(月自転運動の乱れ)は、地球、太陽、諸惑星からの摂動を受けているが、観測値からこれらの影響をとりのぞいて月の非剛体性すなわちラブ数 k_2 と Q の効果を抽出できる。 k_2 は月全体を完全弾性体としたときの地球潮汐ポテンシャルに対する応答、 Q は月が完全弾性体にどれだけ近いかの指標である。月自転軸の緯度方向の首振り運動を p_1 と置くと、

$$p_1 = \left[86k_2 + 4.9 \frac{x(1-x) - y^2}{(1-x)^2 + y^2} \left(\frac{R_c}{350\text{km}} \right)^5 \right] \sin F + \left[230 \frac{k_2}{Q} + 4.9 \frac{y}{(1-x)^2 + y^2} \left(\frac{R_c}{350\text{km}} \right)^5 \right] \cos F \quad (2-2)$$

where $x = e_c / 0.0040$, y : core frictional parameter

となる。さらに F は(月平均黄経-月昇交点黄経)、 R_c は月のコア半径(コア密度は 7.0g/cm^3)、 e_c は月コアの楕円率、 y はコア摩擦係数である。LLRデータから p_1 が与えられるので(2-2)から k_2 や Q を求めることができる。

式(2-2)で e_c を0として月コアを球とすると、 $\sin F$ の係数から k_2 は 0.0302 ± 0.0012 と求められる。これに対し、Fig.2-8やFig.2-9の月モデル(深さ1000kmまで)をそのまま深さ方向に延長してよいと仮定すると(コア半径350km) k_2 はそれぞれ0.0215、0.0245となる。この仮定が正しいとすると、月は地震学的タイムスケールではLLRのような測地学的タイムスケールにおいてよりも硬いことになる。この結論が正しくないならば、月深部の弾性波速度は非常に小さいか(Fig.2-11)、LLR観測のような長周期の観測に対して非弾性的に振舞うことを示唆することになる。しかし式(2-2)より $e_c=0.04\%$ だけコアがひしゃげていると k_2 は0.024にまでなるので、決定的なことはいえない。両者を分離するにはより高精度の測定が必要とされる。

また月自転軸方向が剛体月モデルと比較して常に 0.26° 遅れることがLLR観測より求められた。このことは、月全体として $Q=26.5 \pm 10$ 、であるということを示唆する。ただしこ

れは最低値で月のコアとマンツルの摩擦係数を0とした場合に相当する。Qが全体として小さいことは、月マンツルのQ値が最大数千と見積もられていることと矛盾するようにみえるが、その一方で深さ1000km以下でのQは非常に小さいとすると、両者は調和しうものかも知れない(2-1-3節)。

2-3 月震観測、今後の課題

アポロ月震観測は1969年から1977年までの8年間にわたって行なわれ、月内部構造のみならず隕石衝突に関する情報、月表面の地動環境などについて大きな成果をもたらした。この節ではアポロで未解決のまま残った問題のうち主要なものをまとめておく。

2-3-1 月コアの存在、大きさ、地震学的構造

月にコアがあるか否かは月起源を考察する上で非常に重要な情報となる。これまではコアの組成やサイズに関する確定的な情報はなく、それによって月全体の組成が大きく変更される可能性があり、その起源を探る上で大きな障害となっていた。たとえば、月岩石試料の親鉄元素データをもとに月物質の起源が論ぜられるが、現状では月岩石はどの程度月の代表とみなせるのか不明確である。月コアの大きさ、構造を押さえることでこの種の議論を整理し、一歩進めさせることができる。2-2節で述べたようにLLRデータの解析から、コアの大きさについて新しい知見が生まれつつあるが、月コアの問題は今だ謎に包まれている。この問題は地震学的に解決することがもっとも直接的であるため、月震を利用した計画的な探査が望まれている。

2-3-2 月深部マンツル(深さ 1000km 以下)の地震学的構造

月深部は速度構造自体が不明確である。さらにQ構造をさぐる意義も大きい(2-1-3節)。月表層あるいは月内部500kmくらいまでは、地震学的Q値は最高数千にもなっているが、1000kmになるとデータは少ないものの100程度とされる(Nakamura et al., 1982)。またLLRデータの解析でもこの傾向と調和的な結果が出ている(2-2-2節)。これは月深部は部分溶融状態になっていることの反映なのかも知れない。これを地震学的に調べ、その物理状態を明らかにできれば、月の熱史研究に対する大きな貢献となろう。

2-3-3 地殻厚さの不均一性（表と裏）

月の重心位置は、形状中心位置よりも2km地球側にずれている(e.g. Brown et al., 1974)。これは月地殻の厚さが表と裏で違うことによるとされているが、裏側の内部構造はなにも分かっていない。表裏を問わず月地殻の厚さ分布を十分細かく求めることができれば、月における難揮発性元素（地殻構成物質である斜長石に含まれるCa, Alなど）の総量を押えることができ、月総化学組成、ひいては月起源に対する重要な制約のひとつとなろう。また月地殻の非対称性は地球-月系の進化と密接に関係しているはずであるから、そのシナリオ作りにも役立てられるかもしれない。

2-3-4 深発月震震源の月全体にわたる分布（海と高地）

深発月震の震源分布は奇妙なことに月高地の下にはほとんど見られないようにみえる(Lammlein, 1977)。これは裏を含めて成り立つことかを調べることは、月内部構造、テクトニクス、進化にかかわる重要な課題となる。すなわちこの地域で深発震源が観測されなかったとすると、高地の下に波を減衰させる領域があるためなのか、本当に震源がないためかであり、高地と海という表面の違いが深さ約1000kmのテクトニックな違いと対応すること、すなわち月内部の水平方向不均質性が示唆されるからである。これは月の力学的、熱的進化等を考える際の重要な制約条件となる可能性がある。

2-3-5 隕石衝突と流星群との関連（1998年の獅子座流星群）

Oberst and Nakamura(1991)によると月面における隕石衝突頻度と流星群活動はある程度相関関係が認められる。たとえば獅子座流星群(Leonids)はTempel Tuttle 彗星33年ぶりの回帰(1998年2月)により活動が活発化すると予想されるが、月震計で感知できるような隕石（アポロ長周期月震計では500g以上）を伴っているであろうか。この観測から、流星群構成物質のサイズ分布に関する貴重な情報が得られることが期待される(Watanabe, 1993)。

2-4 LUNAR-A 計画概要

2-3節に述べた諸課題の解決に向けて、宇宙科学研究所のLUNAR-A計画が進められている。ここではその概要を説明する。この計画は、月に3台のペネトレータを貫入させ月震、熱流量の観測網を設けて12ヶ月の観測を行い、主に月内部構造に関する諸問題の解明を目

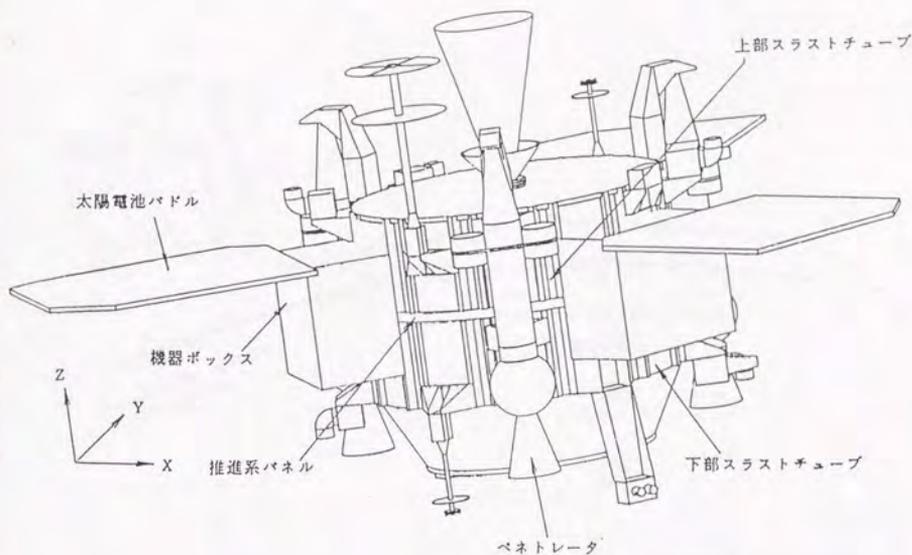


Fig.2-12 LUNAR-A外観図。脳に3台のベネトレータを取り付けているNEC(1994a)より。

指している。LUNAR-A衛星は母船の周囲に3台のベネトレータを抱えた格好をしている (Fig.2-12)。1997年8月または9月に内之浦から打ち上げられ、翌1998年2月、または3月に到着する予定である。月に到着すると月赤道面と 25° の角度をなす、長径(1738+200)km×短径(1738+45)kmの楕円軌道に移り3台のベネトレータが次々と切り離され、高度25kmの位置から投下(自由落下)され、速度約250m/sで月面に貫入する。このときベネトレータの向きを横から真下に変える制御(Rhumb line control)を行なう(Fig.2-13)。ベネトレータはFig.2-14の様に砲弾型をした長さ944.6mm、直径13.4mmのCFRP(carbon fiber reinforced plastics)構体でできているが先端はチタン合金製である。科学観測機器として、月震計、熱流量計、温度計、加速度計が搭載される。これらの観測機器以外は電池(スーパーリチウム電池)、計測系電子回路で占められている。母船から切り離されるときは、月面貫入に至るまでに必要な制御用モータが取り付けられている(Fig.2-15)。ベネトレータの投下

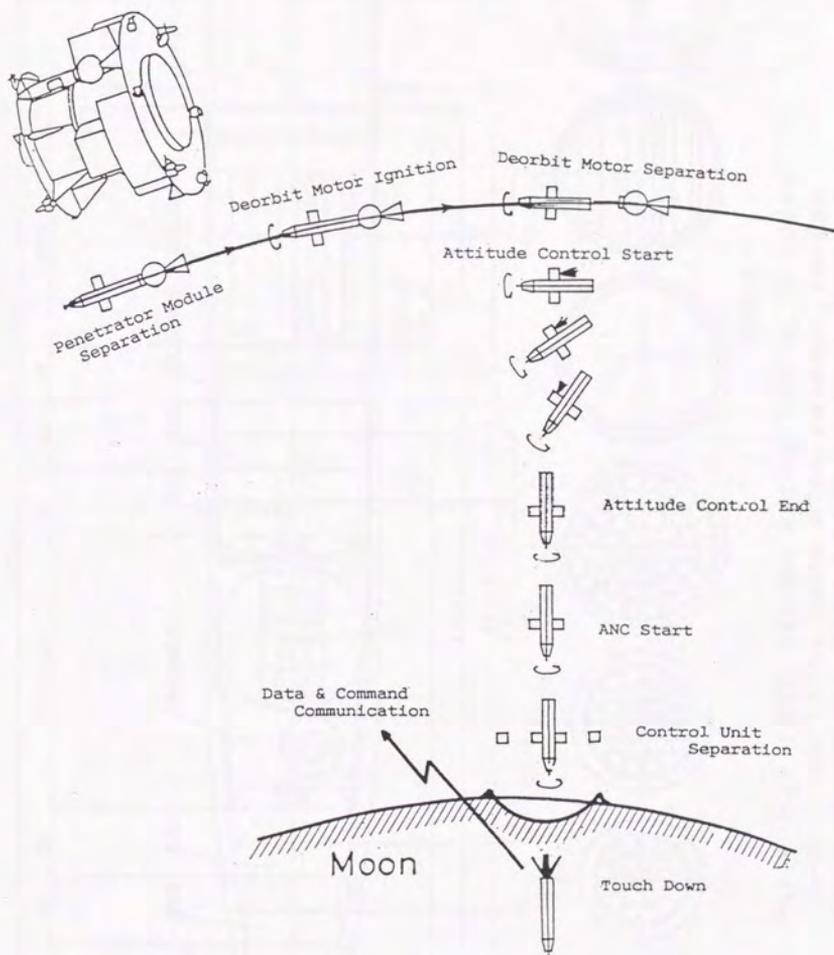


Fig.2-13 ペネトレータが高度25kmから投下される様子。DOM（デオービットモータ）による月上空静止の後、ペネトレータ両脇に抱えたANC（姿勢制御装置）で向きを真下に変える。NM(1992)より。

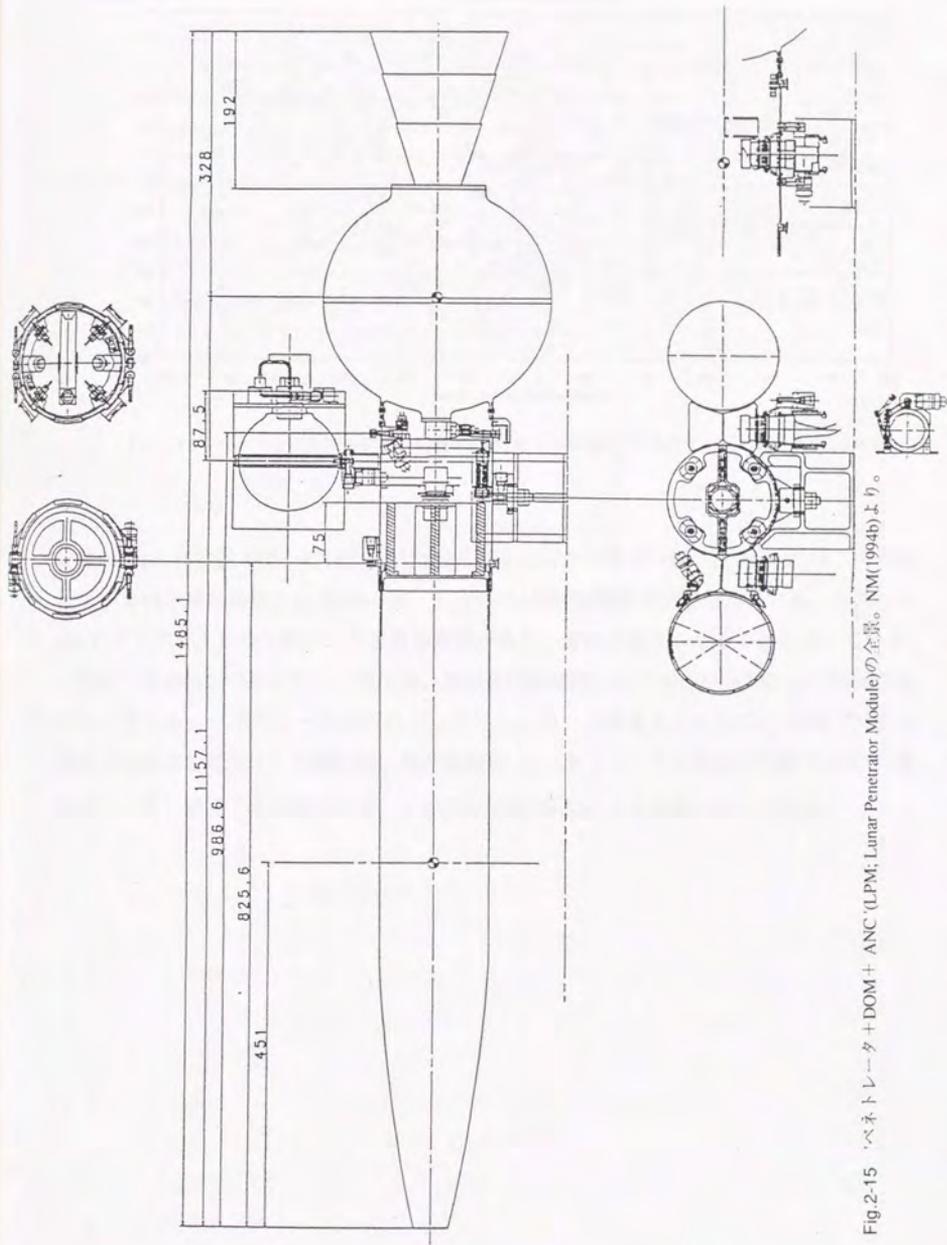


Fig.2-15 'パネトレータ+DOM+ANC (LPM; Lunar Penetrator Module)の全景。NM(1994b)より。

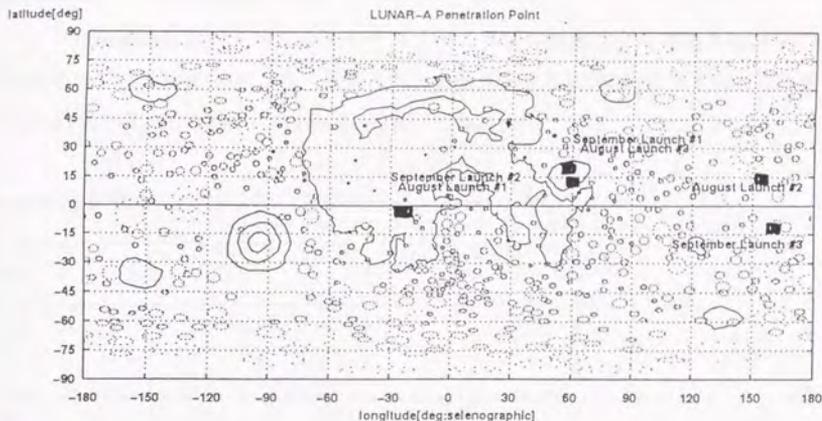


Fig.2-16 ペネトレータ投入位置。1998年8月打ち上げの場合と9月打ち上げの場合(NEC, 1994b)。

位置はFig.2-16の通りで、8月打ち上げか9月打ち上げかで若干の違いはあるが、1. アポロ12ないし14号着陸地点、2. 危難の海、3. 1のはは裏の3箇所が予定されている。このうち1はアポロデータとの比較という重要な意味があり、最初に投下させることになっている。

母船の軌道は、ペネトレータ投下後、長径(1738+200)km×短径(1738+200)kmの略円軌道にうつされる。ペネトレータからのデータリレーや、月撮像カメラ(LIC)の画像データ伝送はこの軌道で行なう。月震観測、熱流量観測、はペネトレータの電源が作動する限り(現在約1年間)継続する予定である。その後も母船のLICによる撮像は続けられる。

第2章付録 アポロ月震データ

アポロ月震観測記録のすべてはテキサス大学の中村吉雄教授より宇宙科学研究所にExabyteテープ(2.3GB)に格納されて提供され、全巻78。さらにVikingによる火星地震観測の記録も1巻ある。その内分けはTable2-3の通りである。

Table2-3 宇宙科学研究所にあるアポロ月震データ(exabyte tapeの巻数)。

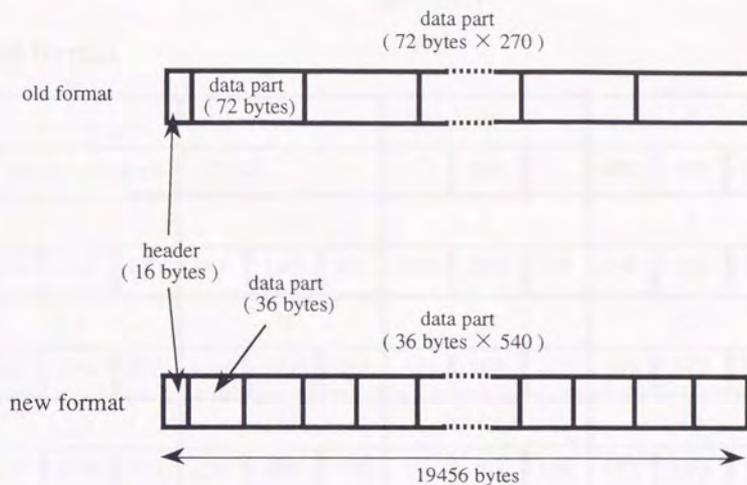
site	1 1	1 2	1 4	1 5	1 6	1 7
PSE	1	10	11	10	8	
ET		2	2	2	2	
SE				1		
WT				21		
WT-H				7		
Viking				1		

ここでPSEは各観測地点ごとに1976年60日までの連続記録データが格納されているテープのことである。それ以降のデータはWT(work tape)に格納されている。WT-Hはアポロ17号探査で行なわれたLSPE(Lunar Seismic Profiling Experiment)の観測記録である。LSPEとは人工月震観測実験であり、月表層の速度構造を決める目的であったが(McAllister et al., 1969)、観測のみをするListening-modeの観測があり(Duennebier, 1976)、その記録がWT-Hにおさめられている。このほか月震のイベント部分だけを編集したET(event-tape)、特に著しい記録を選んで編集したSE(special event tape)がある。解析の便を図るため、ETとSEは5-inch光磁気ディスク(容量800MB)17枚にも格納してある。

PSE、ET、SEデータは1レコード長19456バイトのバイナリフォーマット形式で格納されている。記録形式には2種類あり、SPZデータとLPデータを同時に収めたold formatと長周期データのみをおさめたnew formatがある。new formatはアポロ12号観測地点でSPZが稼働を停止した後に使用されたものである。1レコードのうち先頭の16バイトはヘッダで、他はデータ部(Fig.2-17)。データは10bitで0~1023の整数値になっている。データ部はold formatの場合270回、new formatの場合540回繰り返される。WT、WT-Hデータは、1レコード長5776バイトのバイナリ形式である。先頭16バイトがヘッダ、後はデータ部で1レコード当たり60回繰り返される(Fig.2-18)。

(a)

contents of a record (1 record = 19456 bytes)



(b)

header (16 bytes)

PSE	Apollo station No.	Original Tape Seq. No.	Record No.	Year	data format (0:old 1:new)	Number of physical rec. from original tape	Original tape read error flags
-----	--------------------	------------------------	------------	------	---------------------------	--	--------------------------------

Fig.2-17 アポロ月震データの記録形式。(a)1レコード中の区分。old formatとnew formatでは、1レコード長及びヘッダの長さは同じであるが、データ部のフォーマット形式が異なる。(b)ヘッダ部の記録形式。ヘッダの長さは16byteで図に示す情報が2byteのバイナリ形式で納められている。(c)データ部の記録形式。LPX,LPY,LPZ長周期地震計の記録X,Y,Z (Table2-1参照)、SPZは短周期地震計の上下動成分である。各データは10bitのバイナリ形式で納められている。寺蘭(1992)より。

(図2.17 前ページの続き)

(c)

data part

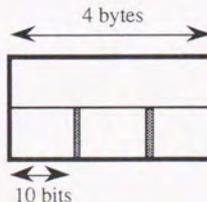
old format

				3		4	
time in milsecond		(1)(2)		SPZ		SPZ SPZ SPZ	
5		6		7		8	
LPX	SPZ	LPY	SPZ	LPZ	SPZ	SPZ	SPZ
9		10		11		12	
SPZ	LPY	SPZ	LPZ	SPZ	SPZ	(3)	(4) SPZ SPZ LPX
13		14		15		16	
SPZ	LPX	SPZ	LPY	SPZ	LPZ	(5)	SPZ SPZ SPZ LPX
17		18					
SPZ	LPY	SPZ	LPZ	SPZ	SPZ		

new format

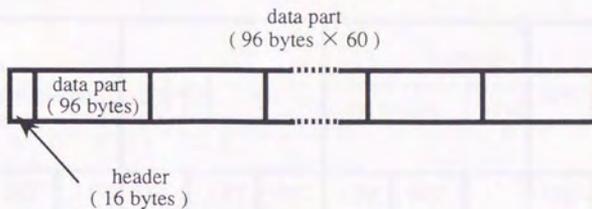
1		2		3		4	
time in milsecond				(6) SPZ		LPX LPY LPZ	
5		6		7		8	
LPX	LPY	LPZ	(3)		LPX	LPY	LPZ (5) LPX LPY
9							
LPZ							

- (1) ALSEP tracking st. ID
- (2) bit error late
- (3) house keeping
- (4) odd: tidal z, even: tidal x
- (5) command verification
- (6) ALSEP number



(a)

contents of a record (1 record = 5776 bytes)



(b)

header (16 bytes)

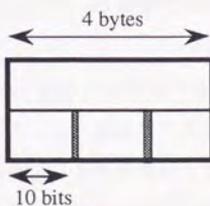
PSE	Apollo station No.	Num of Active Station	Original 9 track ID	Year	time of the year in msec. (1)	time of the year in msec.(2)	not used
-----	--------------------	-----------------------	---------------------	------	-------------------------------	------------------------------	----------

Fig.2-18 アポロ月震データWTの記録形式。WT(work tape)は、'76年.61日以後の月震連続記録データが納められている。他のテープと違い、観測地点ごとにテープを分けていないことに注意。(a)1レコード中の区分。(b)ヘッダ部の記録形式。ヘッダの長さは16byteで図に示す情報が2byteのバイナリ形式で納められている。(c)データ部の記録形式。LPX,LPY,LPZ長周期地震計の記録X,Y,Z(Table2-1参照)、SPZは短周期地震計の上下動成分である。各データは10bitのバイナリ形式で納められている。

(図2.18 前ページの続き)

(c) data part

		3 mode bit			4						
time in milsecond	(1)	(2)	(3)	(4)	Barker code and its comp.	frame count	SPZ		SPZ		
5		6			7			8			
	SPZ	LPX	SPZ	LPY	SPZ	LPZ	SPZ		SPZ		SPZ
9		10			11			12			
	SPZ		SPZ		SPZ (10)	LPX	SPZ	LPY	SPZ	LPZ	SPZ
13		14			15			16			
	SPZ	(6)	SPZ	(7)	SPZ	(8)	SPZ		SPZ	LPX	SPZ
17		18			19			20			
LPY	SPZ	LPZ	(9)		SPZ		SPZ		SPZ		SPZ
21		22			23			24			
		LPX	SPZ	LPY	SPZ	LPZ	SPZ		SPZ	(5)	(5)



- (1) ALSEP tracking st. ID
- (2) ALSEP package ID
- (3) bit sync. status
- (4) orig. 7-track rec. num. (first sub-frame only)
- (5) not used
- (6) house keeping
- (7) odd: tidal z, even: tidal x
- (8) odd: instrument temp. even: tidal y
- (9) command verification
- (10) not SPZ for sta.15

第3章 LUNAR-A 月震計

3-1 LUNAR-A 月震計の原理と構成

地震計はその内部に不動点となる振子と、その不動点を基準とする地動を電圧に変換する部分から構成される。地震波が地震計に入射してきた場合、振子のおもりが不動点となり周囲が地動とともに動く。地震計の固有周期とはこの振子の周期のことである。その周期が長いほど長周期の地震波が観測できる。

地動を電圧に変換する機構は数多くあるが、LUNAR-A用月震計では動コイル型を使うことが予定されている。この方式では、永久磁石によるセンサー内部の磁場と、振子（バネ振子）と一体化したコイルとの相対運動によって誘導起電力が発生する。この場合出力電圧はバネ振子の動く速度に比例したものとなる（速度型）。地上用地震計はフィードバック回路を付加して特性を制御することも多いが、LUNAR-Aの月震計測系は機構のサイズ、重量、省電力性を追求しなければならないため、動コイル型センサーからの出力をそのまま低消費電力、低ノイズアンプで拡大する方式をとる。従って感度、特性の改良は、使用するアンプ性能以外は回路に頼らず、センサーそのもので行う必要がある。すなわちLUNAR-A月震計は動コイル型センサーの改良を通して最終的にはアポロ月震計を上回る性能を達成することを目指している。

3-2 LUNAR-A 月震計の観測周波数帯域と目標感度

LUNAR-A月震計に必要な性能や感度、観測周波数等を決定するにはアポロ計画により月面に展開された月震観測システムの性能や観測結果が参考になる。このとき月面に設置された地震計は長周期地震計と短周期地震計の2種類がある。その感度をFig. 2-1に示す。これらは地上での超高感度地震観測システムの10倍以上の感度を持っている（Sutton and Latham, 1964）。一方、Fig. 3-1に深発月震(A1)、浅発月震、隕石衝突の21.64min.のパワースペクトルの代表を示す。これらは、相対スペクトルであり、シグナルの直前21.64min.とのスペクトル比をとっているため、月震計特性補正も行なっている。これですぐ分かることは、1. すべての月震でピーク値は1Hz付近にある、2. 深発月震のパワーは0.5～1Hz付近にある、3. 浅発月震のパワーは1Hz以上の短周期側に偏っている、の3点である。長周

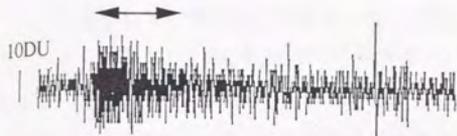


Fig.3-1-1 A1グループ深発月震の相対パワースペクトル。波形図に示した21.64min.のパワースペクトルをその直前21.64min.のパワースペクトルで規格化したもの。'75年86日、アポロ12-site(LPZ)。

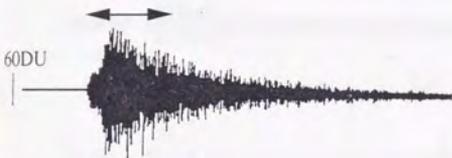
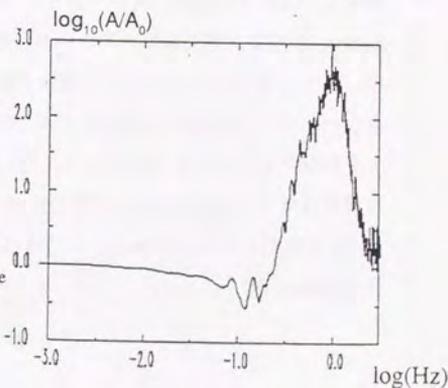
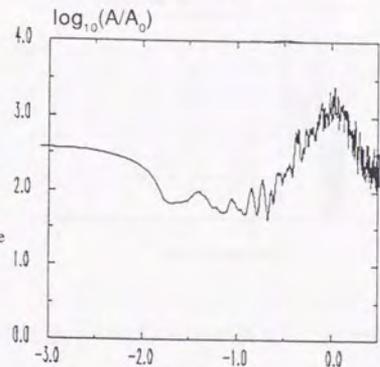
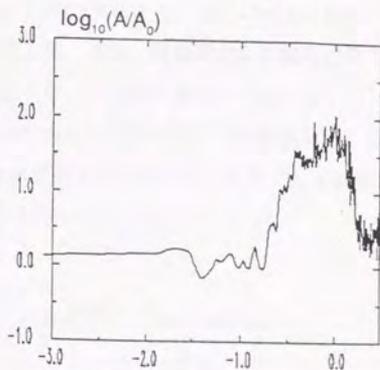


Fig.3-1-2 浅発月震の相対パワースペクトル。波形図に示した21.64min.のパワースペクトルをその直前21.64min.のパワースペクトルで規格化したもの。'73年72日、アポロ12-site(LPX)。



Fig.3-1-3 隕石衝突の相対パワースペクトル。波形図に示した21.64min.のパワースペクトルをその直前21.64min.のパワースペクトルで規格化したもの。'70年98日、アポロ12-site(LPX)。

Relative Power-Spectrum



期側の限界は月震計センサーの固有周波数0.45Hzによるものであり、さらに低い周波数成分も含まれている可能性がある。同じ方法で、Fig.2-3-4で示した熱月震5.43min.の相対パワースペクトルをFig.3-2に示す。熱月震のパワーは深発、浅発、隕石衝突より高周波側の3~10Hzにピークがあることがわかる。2-1-2節で述べたように熱月震はローカルなイベントであるためLUNAR-A月震探査では主要な観測対象とはなっていない(4-4節参照)。従って、LUNAR-A月震観測が実質的にアポロ月震観測を超えるためには、少なくとも0.5Hzから1Hz程度の周波数帯域でアポロ月震計の感度を上回っていればよい。

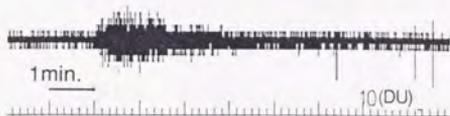
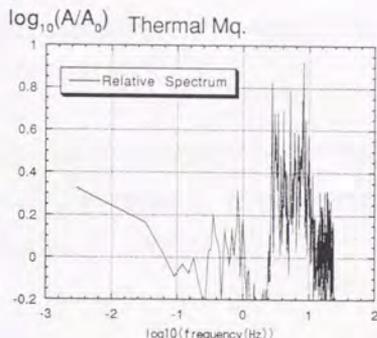


Fig.3-2 熱月震の相対パワースペクトル(右図)。上の波形図に示した熱月震5.43minのパワースペクトルをその直前5.43min.のパワースペクトルで規格化したもの。71年51日、アポロ14-site(SPZ)。ピーク位置がFig.3-1の月震より高周波側(2~10Hz)にある。



地震計の特性曲線は、そのタイプ(加速度型、速度型、変位型)で形が決まり、センサー内の振子の固有周波数によってそのピーク位置が決まる。例えばFig.2-1において、SPZは固有周波数1Hzの速度型の月震計である。このセンサーでアポロ長周期月震計の peaked responseをカバーしようとする、50倍もの感度増を必要とすることがわかる。一方、固有周波数 0.5Hzの振子を持った月震計が使えるならば10倍程度の感度増加でカバーできる。LUNAR-Aの月震観測において、1台のセンサーでアポロ月震計全ての周波数領域を上回ることを目標にするならば、月震計振子の固有周波数を0.5Hz、感度をアポロ月震計のSPZの約10倍にしたものが理想的である。この時センサーの地動に対する感度は1Hzにおいて 5×10^8 DU/cm (DUはdigital unitsでA/D変換の1ビット)、すなわち、最小分解能は 2×10^9 cm必要となる。これは地動速度Vに換算すると、

$$V = 2\pi f U = 2\pi \cdot (1\text{Hz}) \cdot (2 \times 10^9 \text{ cm}) = 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s} \quad (3-2-1)$$

となる(山田等., 1992)。

3-3 月震計開発

3-2節では、LUNAR-A月震計が持つべき周波数特性、感度について述べたが、月震計は2-4節で紹介したようにペネトレータに搭載されて月面に250m/sで貫入設置される。これを考慮するとLUNAR-A月震計の目標性能は以下のようにまとめられる。

1. ペネトレータ貫入時に発生する約10000Gの衝撃に耐える性能を持ち、
2. ペネトレータ搭載用として十分に小型軽量化され、
3. アポロ計画時に用いられた月震計を上回る感度、周波数特性を持つ。理想的な一例としては、固有周期2sec.かつ速度分解能 1.2×10^{-8} cm/sを持つこと。

以下、3-3-1節ではペネトレータ貫入実験概要を、3-3-2節から3-3-6節までは上記の各項目のうちアンプ性能（速度分解能に関連）以外の月震計自身の開発項目、すなわち耐衝撃性、小型軽量化、高感度化、長周期化等の現状と見通しについて述べる。

3-3-1 ペネトレータ貫入実験

月震計開発は、上記の項目2、3の基本性能向上と、項目1の耐衝撃性確認を交互に行うことで進められた。月震計の耐衝撃性確認は、 $\phi 120$ 、 $\phi 50$ 、 $\phi 30$ の各種ペネトレータ貫入実験を利用した。

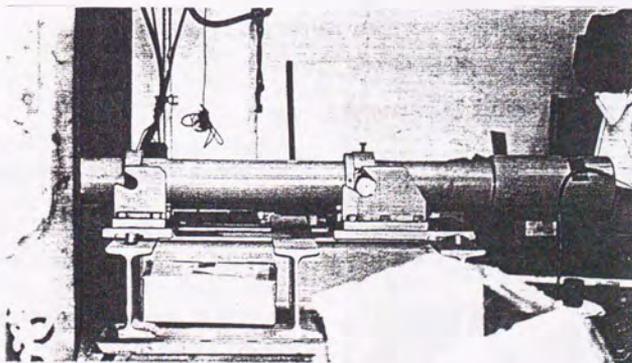


Fig.3-3-1 $\phi 50$ ペネトレータ射出用砲身。全長1520mm。無煙火薬使用。最高スピード約300m/s。砂箱(図の左側で見えず)に横から打ち込む。日産(株)川越工場にて。

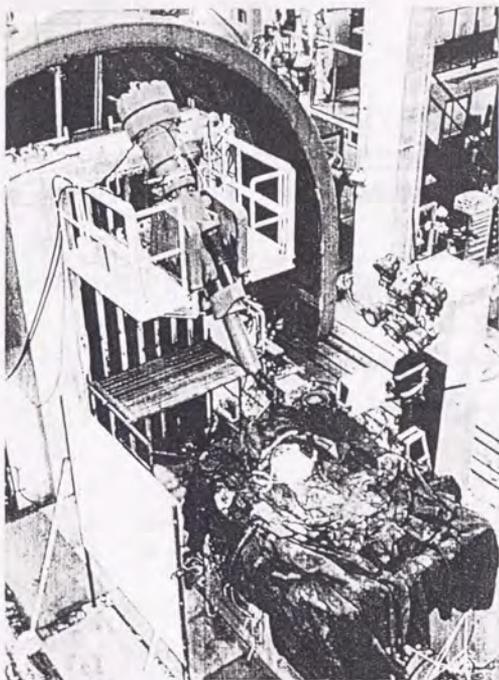


Fig.3-3-2 ϕ 120ペネトレータ射出装置
鳥瞰図。砲身全長3232mm。高圧乾燥窒
素ガス使用(高圧室400 kg/cm²、中圧室
200kg/cm²)。射出最高スピード約250m/s。
砂箱(縦2300mm、横1400mm、深さ1400
mm)に天頂角50°で打ち込む。宇宙科
学研究所、能代ロケット実験場にて。

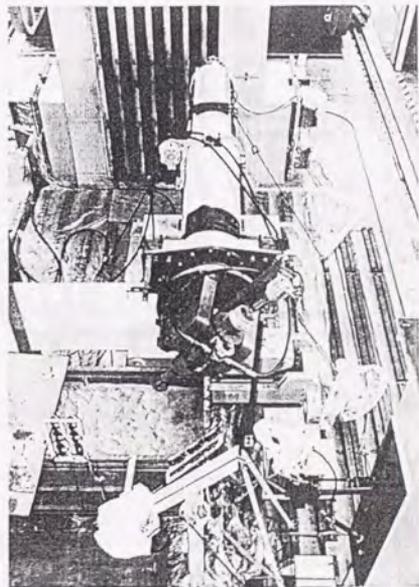


Fig.3-3-3 ϕ 30ペネトレータ射出装置
鳥瞰図。砲身全長約80mm。無煙火薬
使用。射出最高スピード約300m/s。砲
身をスピンドルに垂直に回転させ
(max.5.5Hz)、ペネトレータ機軸と進行
方向に角度を持たせ(迎角)、砂箱(縦
3790mm、横1000mm、深さ800mm)
に貫入させることができる。現在は宇
宙科学研究所の駒場キャンパスにある
が、この図は宇宙科学研究所、能代ロ
ケット実験場にて。

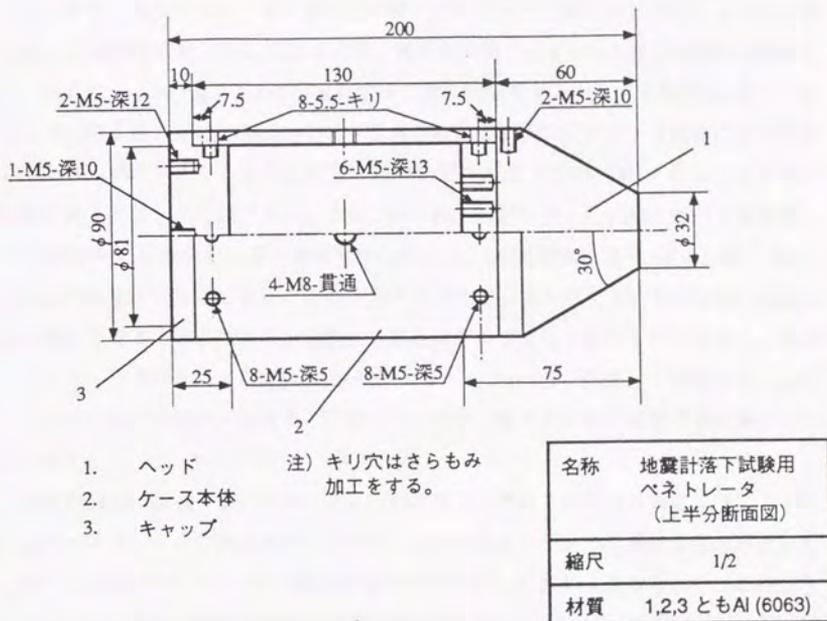


Fig.3-4-1 月震計耐衝撃試験（落下実験）用、φ90ベネトレータケース。荒木等(1992)より。

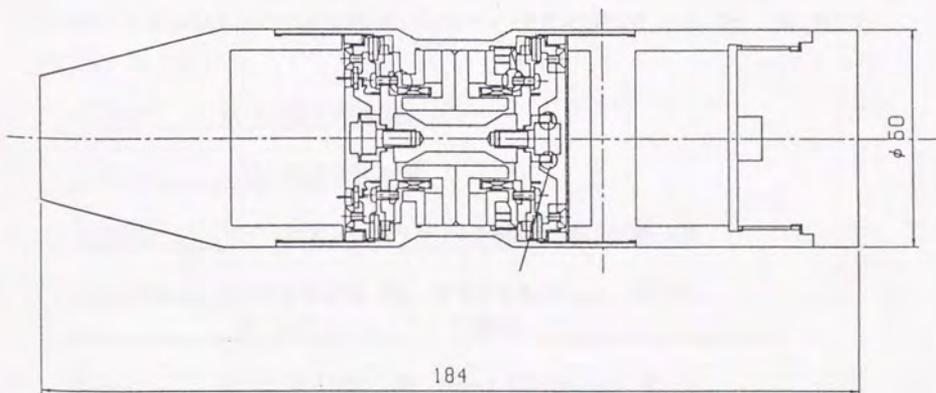


Fig.3-4-2 試作月震計(Fig.3-5-2)を組み込んだφ50ベネトレータ。アカシ(1994a)より。

φ30は貫入姿勢研究を中心に、貫入加速度計測、ペネトレータ構体歪計測に、φ50は各種搭載機器の耐衝撃性試験、貫入加速度計測、構体歪計測に、φ120は総合耐衝撃試験用として用いられた。φ30(Fig.3-3-3)は宇宙科学研究所の駒場キャンパス、φ50(Fig.3-3-1)は日産(株)の川越工場、φ120(Fig.3-3-2)は宇宙科学研究所の能代ロケット実験場に射出設備がある。いずれもペネトレータの月面貫入時の衝撃加速度(約10000G)、あるいはそれ以上の衝撃を加えることが可能である。またこれら射出装置を使った試験のための予備試験として、宇宙研の0G実験棟での落下実験も行なわれた。0G実験棟は地下1階から地上7階の高さ約31mの吹抜けになっており、ここを落下させてモルタル板で受ければ2000~3000Gの衝撃を発生させることができる。試験する部品はそのまま落下させるのではなく、格納するペネトレータ状のケース(Fig.3-4-1;φ90ペネトレータ)内部に固定して実験した。φ90ペネトレータは当初月震計試験用として製作されたが、種々の部品の衝撃予備試験としても使用された。

以下月震計開発の現状を中心に述べる。開発手順は、改良を加えた月震計に対し、φ90、φ30、φ50ペネトレータで部品評価を行ない、φ50ペネトレータで月震計全体の評価を行なった後に、φ120ペネトレータで確認試験を行なうことを基本に進められた。このうちφ50ペネトレータ貫入実験は月震計耐衝撃試験の中心を占めている。Table3-1に月震計開発にかかわる衝撃試験履歴を簡単にまとめ、Fig.3-4-2にはφ50ペネトレータへの月震計搭載の様相を示す。

Table3-1 月震計開発にかかわる耐衝撃試験φ50ペネトレータ貫入実験概要(日産(株),川越工場にて)

'92/09/09	板バネ部品試験 3発
'93/01/21	板バネ部品試験 12発
'93/04/22	コイルボビン(スリット1.5,6箇所)部品試験 2発
'93/12/08&10	センサ本体試験 7発、信号コイル(20μm)、板バネ、コイルボビン(スリット1箇所)
'94/01/17	センサ本体試験 3発、信号コイル(20μm)、板バネ、コイルボビン(スリット1.2箇所)

次ページへつづく

'94/03/31	センサ本体試験 3発、信号コイル(20 μ m)、板バネ、コイルボビン (スリット1箇所 ϕ 3穴23箇所)
'94/06/07	センサ本体試験 5発、信号コイル(20 μ m)、板バネ、コイルボビン (スリット1箇所 ϕ 3穴23箇所、ガラスエポキシのフランジ)
'94/07/25	センサ本体試験 3発、信号コイル(20 μ m)、板バネ、コイルボビン (ガラスエポキシフランジの繊維方向、ボビンスコイル)
'94/08/25	センサ本体試験 3発、信号コイル(20 μ m)、板バネ、コイルボビン (第16回 ϕ 120実験不具合再確認)、最高19000G

継続中

----- '94/12 までで41発

3-3-2 月震計内部バネ振り子の運動拘束による耐衝撃性向上

Fig.3-5-1及び2は最新型の月震計試作品である(1994年12月現在)。月震計内部にある可動部は、リング状板バネ(Fig.3-6)を含むバネ振り子(Fig.3-7)として一体化されている。衝撃時に月震計が使用不能になるようなダメージを受けるのは、これが磁気回路と衝突した場合だと考えられている。この現象を防ぐにはFig.3-5-1に示すような4箇所の隙間をTable3-2の値以下に拘束し、振り子の運動を蓋の部分の細工で押えられるようにすればよいことが、Table3-1の多数の実験を通して明らかになった(アカシ,1993b)。ただし(d)のバネ部振動方向の拘束値は上限値でこれ以上進めると、かえってバネに曲がり等が入りやすくなるため注意を要する。

Table3-2 月震計内部バネ振り子の拘束条件(Fig.3-5-1参照)

振動方向	(a) [mm]	± 0.5
可動部直角方向(b)	[mm]	± 0.25
回転方向	(c) [deg.]	± 2.0
バネ部振動方向(d)	[mm]	± 1.0

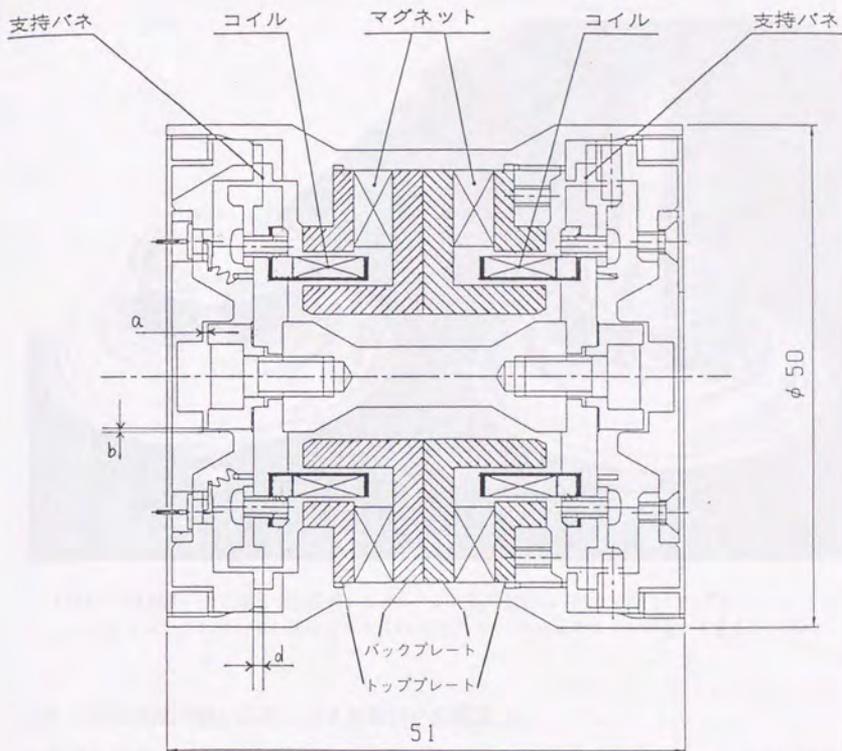


Fig.3-5-1 最新型試作月震計の断面図。外形は円筒形でケースはアルミニウム。内部にリング状板バネ2枚（この図では横から；正面図はFig.3-6）、コイル2巻（全体で一本のコイル）を一体化したバネ振り子が入っている。バネ振り子の遊びのうち、a,b,dを図示した。cは軸回り回転の遊びである。コイル2巻きそれぞれに対するトーラス状磁気回路（パーメンダー製）を斜線で示す。アカシ(1994c)のFig.3-1を改変。



Fig.3-5-2 最新型試作月震計の外形図。上下動、水平動共にサイズは $\phi 50 \times 51$ 。重量約330g。

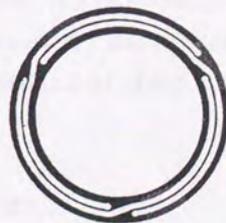


Fig.3-6 月震計に使われるリング状板バネ(Fig.3-5-1の支持バネ)の正面図。1台の月震計に2枚組み込まれている。

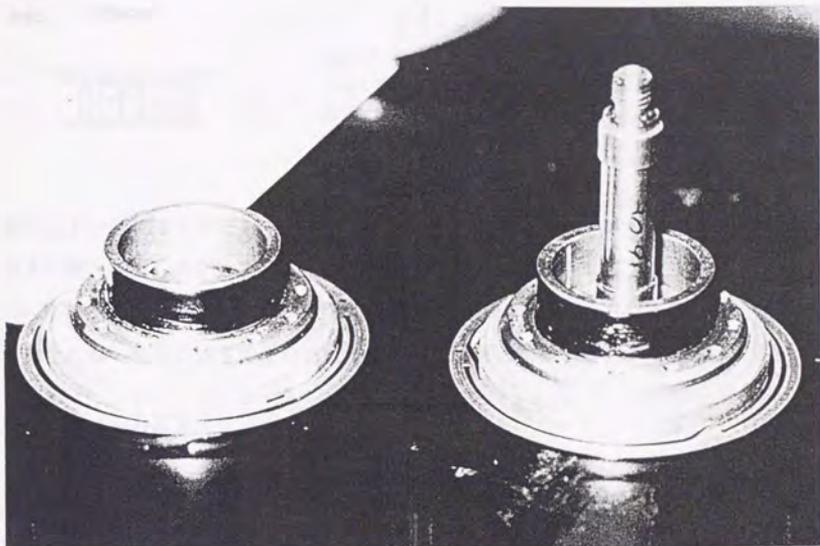


Fig.3-7 月震計のバネ振り子を分解したところ。左右の部品（コイル+バネ）がアルミシャフトで接続されている。黒いエポキシの保護膜内部に20 μ mのコイルが巻いてある(3-3-4節)。

3-3-3 磁気回路の削り込みによる月震計小形軽量化

月震計の軽量化の試みで最も貢献したのは磁気回路の削り込みであった。磁気回路とは Fig.3-5-1に斜線で示したようなトーラス状の磁力線回路であり、この切れ込み部にコイルが入り、軸方向に運動することで起電力が発生する。磁気回路構成部品すなわち、マグネット（Sm-Co系）をはさむパーメンダー製のトッププレートとバックプレート（密度8.3g/cm³）を、性能劣化が始まる限界まで削り込んだ。この結果、従来1個約500gだったものが326gまで軽量化でき、長さも従来60mmはあったものが51mmにまで短縮された(アカシ,1993a)。これによって実機用としての月震計サイズ、重量目標は完全に達成されたといえる。

3-3-4 Sm-Co系磁石、 ϕ 20 μ コイルを用いた月震計高感度化

月震計の感度を増すには、月震計内部の磁石を高性能化やコイルの巻数増をはかればよいが、衛星搭載用としてはそれによる体積、重量増加はできる限り抑えなければならない。磁石に関してはLUNAR-Aでは最高性能を持つSm-Co系磁石を使用する予定である。また

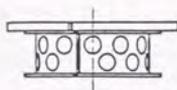


Fig.3-8 コイルを巻きつけるコイルボビンの図(Al合金製、 $\phi 22.6 \times 7.1$)。穴をあけたり、スリットを切ったりして渦電流が流れないようにしたもの。さらにコイルボビン自身のCFRP化が検討中である(3-3-5節参照)。アカシ(1994b)より。

月震計コイルはコイルボビン(Fig.3-8、 $\phi 22.6 \times 7.1$)に納める必要があり、使用する導線を限界まで細くする必要が生ずる。しかし一方で月震計に接続されるアンプの入力換算ノイズは、 $0.6 \mu V_{pp}$ と見積もられているので(名出 and 田中,1994)、これ以上の熱雑音のコイルから発生しない程度の細さでなければならない。コイルの熱雑音は、

$$V_{o-p} = \sqrt{4kTB_w R} \quad (3-3-1)$$

で表される。ここで k はボルツマン定数($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)、 T は温度、 B_w はバンド幅、 R は抵抗である。(3-3-1)で、 $T=250\text{K}$ 、 $B_w=50\text{Hz}$ 、 $V_{o-p}=0.3 \mu \text{V}$ とにおいて、コイルの熱雑音のアンプノイズと等しくなる R を求めると、 $R=130\text{k}\Omega$ になる。逆に R がこの程度になるまではコイル線を巻くべきであると考え、コイルボビンのサイズのかねあいから、直径 $20 \mu \text{m}$ のコイルを実現すればよいことがわかった。このコイルについては、1993年5月の第14回 $\phi 120$ ベネトレータ貫入実験から試作、衝撃試験が開始された。以後1994年11月現在までに $\phi 30$ で1回、 $\phi 50$ で24回、 $\phi 120$ で3回の試験が行なわれ、コイル自身の耐衝撃性は確立された。その一方、コイルを巻くコイルボビンの変形には大きく影響され、断線するケースもあることもわかり、ボビン自身の強度のほか、ボビンとの接着を完全にすること、及び月震計内部での運動拘束を適切にコントロールすること、等に注意する必要があることがわかった(3-3-2節参照)。

ここで付随する問題として、ベネトレータ貫入時に月震計コイルの相対運動(約 250m/s)によって高電圧が発生し、月震計と接続している計測回路を痛めるのではないかの懸念がなされた。このことを確かめるため、モデル計算をおこない、地震計を短絡した場合の高電圧、電流、発熱を評価したところ、 $20 \mu \text{m}$ のコイル 1500m の場合($84\text{k}\Omega$)、自己インダクタンス L は $L=14.8\text{H} \times f_{iron}$ になり(ただし f_{iron} は鉄芯によって L が大きくなる効果)、磁場 B が $B=0.57\text{T}$ であるので、 $v=250\text{m/s}$ で貫入すると、発生電圧 V は $V=lvB=2.1 \times 10^5(\text{V})$ に達する。しかし、 f_{iron} が1の場合でも、電流値はピーク値で 17mA 、振動継続時間は 0.2 秒、温度変化率は 5.1K/sec にすぎず、コイルが焼き切れる心配はないことがわかった。

3-3-5 バネの非線形化と鉄片の利用による月震計長周期化

3-2節で述べたようにアポロの月震観測を上回る感度特性を得るには、高感度化を進めるとともに、バネ振子の固有周波数0.5Hzを目標に振子の長周期化をも進めなければならない。このため、

1. 月震計振子の板バネをたわませることで特性を敢えて非線形にし、バネ定数の最も平坦な部分のみを使用する。
2. ボビン軸の先端に鉄片を取り付け、バネ復元力を弱める。

の2方法の同時採用を検討中である(Fig.3-9)。上記の対策を施す前は、固有周波数約3Hzであったのが現状では最高1.1Hzに達し、1994年8月25日の $\phi 50$ ペネトレータ貫入実験では、射出時19222G、貫入時10594Gの衝撃に耐えて特性変化もなかった。ただしこれは常温での話であり、ペネトレータ貫入予想深さ、月面下1mから3mでの -20°C 付近で同様の性能が得られるかは今後の検討課題として残されている(3-3-6節の第2項)。

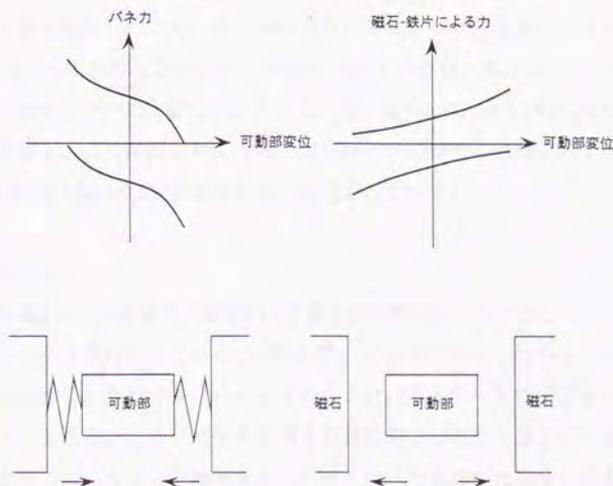


Fig.3-9 月震計長周期化の原理図。可動部（バネ振り子）には変位と逆向きの力が作用している。バネ特性は非線形にして長周期化を図る（バネ定数の減少、左図）。さらにバネ振り子のシャフト先端に鉄片を取り付けてバネと逆方向の力を働かせる（右図）。この2つの効果を合成して0.5Hzの固有周波数の月震計を実現させることを目指している。2枚のバネに対応してグラフはそれぞれ2本ずつ書いてある。アカシ(1993c)の図を改変。

さらにこれに伴い、加震時にコイルボビン (Al合金製) を流れる渦電流による減衰効果が問題視されるようになった。この対策としてコイルボビンに切れ込み (スリット) を入れる、小穴を開ける (Fig.3-8)、コイルボビンを取り付ける、フランジ板をガラスエポキシ製にする、などの対策で渦電流による影響を減衰させようとの試みが、'93年4月以降に行なわれた。さらに効果をあげ、かつ月震計軽量化を進めるために'94年10月以降は、コイルボビンをCFRP製にする計画が進みつつある (アカシ, 1994e)。

3-3-6 その他の問題

1. 月震計の検定方法

月震計の地球上での検定法は、水平動の場合はセンサーを水平に置いて、中立点、周波数特性を検定する。上下動の場合はセンサーを水平から9.5度傾けて振子の振動方向の重力が1/6になるようにして行なえばよい。

2. 振り子の低温下での中立点ずれ

月震計センサーの置かれる環境は -20°C の低温であるため、構成部品である板バネやマグネットの温度特性により、振り子の中立点がずれ、バネも短周期化されることが、'94年10月になって判明した (アカシ, 1994d)。Fig.3-10に見られるように 20°C ～ 30°C の範囲で約0.6mmもの中立位置のずれが生じ、周波数も1.1Hzから2Hzに短周期化していることがわかる。この問題に対しては、現在板バネの材質の変更、振り子のクリアランス拡大 (現状 $\pm 0.5\text{mm}$) の2方向から対策が検討されている。

3. 月震計相互干渉

月震計水平動1台と月震計上下動1台は月震計回転機構のピッチブロックに、水平動1台はロールブロックにのっている (3-4節参照)。ピッチブロックはベネトレータの機軸と垂直な軸を中心に回転でき、ロールブロックはベネトレータの機軸を中心とした回転ができる。ところが、各ブロックに乗る月震計磁石が相互干渉して釣合の位置からずれてしまうこと、また上下動センサーに取り付けた長周期化用鉄片に影響を与えることが判明し、対策として水平動月震計2個に Fig.3-11 の様に磁気遮蔽箱 ($t=0.3\text{mm}$) を側面に巻き付けることになった。これで磁束もれは実用上無視できる程度に押えられる。この対策による総重量増加は20gと見積もられている (アカシ, 1994c)。

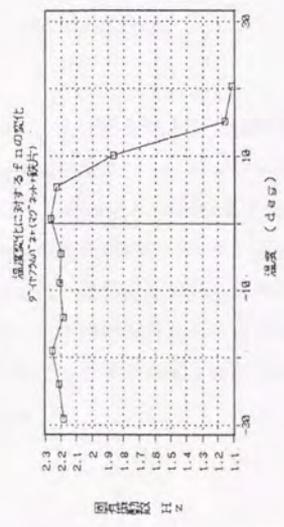
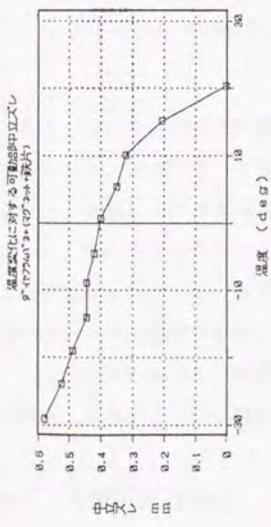
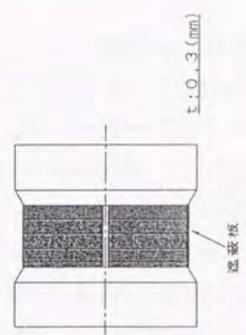


Fig.3-10 月震計可動部中立点ずれと固有周波数の温度変化の図。
 月震計は1m~3mの深さに設置され、温度が太陽放射平衡温度・20°
 となるため、中立点ずれは0.5mmに達し、バネ振り子の振動方向ク
 リアランスを現状より大きくする必要がある(Table3-2の(a))。バ
 ネ固有周波数も材質硬化により1.1Hzから2.2Hzに上がるため、バ
 ネ材質の変更(現在はBe-Cu)が必要かも知れない。アカシ(1994d)より。

ピッチプロック搭載水平動



ロールプロック搭載水平動

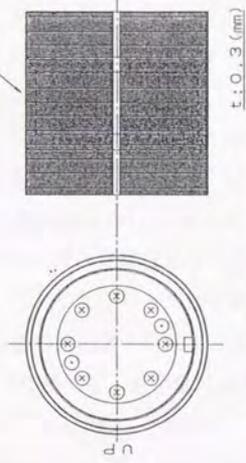


Fig.3-11 月震計外部への磁束漏れ防止遮蔽膜 (パーメンター)
 を月震計ケースに巻いた様子。遮蔽膜の隙間 (くびれ部) にエポ
 キシ樹脂を充填する。スリット部は漏洩磁束による影響が少ない
 位置に置く。端面には取り付けない。アカシ(1994d)より。

3-4 月震計回転機構

ベネトレータ断面図(Fig.2-14)にみるように、ベネトレータはオジャイブ(Ogive)と呼ばれる砲弾型をしている。月震計は上下動1成分、水平動2成分からなり、ベネトレータ先端部に連なるカーブが始まる場所付近におかれ、回転機構に搭載されて水平出しを行なう。回転機構はロールブロック、ピッチブロックの2重構造となっている。ロールブロックは、ベネトレータの長軸と共通する回転軸を持ち水平動月震計の1台とピッチブロックが取り付けられる。ピッチブロックはロールブロックの中にそれと垂直な方向に回転軸を持ち、上下動月震計と水平動月震計1台が設置される。この2つのブロックはそれぞれの軸回りに自由回転できるようになっているが、ベネトレータの月面貫入直後までは固定されている。

ここでは回転機構に必要な回転精度について考察する。水平動月震計の固有周期が2秒を達成し、振子の最大クリアランスが $\pm 0.5\text{mm}$ である場合(クリアランスはこれ以上になる可能性あり、3-3-6節参照)を考える。設置誤差が 0.1° だと地球上の場合は、

$$x = 9800\text{m/s}^2 \cdot \sin(0.1\text{deg}) / (2\pi \cdot 0.5\text{s}^{-1})^2 = 1.7\text{mm} \quad (3-4-1)$$

一方月面上では、

$$x = 1633\text{m/s}^2 \cdot \sin(0.1\text{deg}) / (2\pi \cdot 0.5\text{s}^{-1})^2 = 0.28\text{mm} \quad (3-4-2)$$

ずれる。従って月面では問題はないが、これを地球上で性能検定することは困難であることがわかる。現在では、月震計地上検定の際は、ミッション実行時と同様に試験するのではなく、別個に方法を考えることにし、各軸回りの回転は月面上で 0.1° の精度を目指している。この要求を満たすため、各軸回りの回転用モータ、傾斜計がそれぞれのブロックに取り付けられている。月震計調整には、傾斜計出力と月震計そのものの出力を参照し、回転モータから摩擦車を介して水平、上下調節が行なわれる予定である。実際にはこのプロセスは種々の不具合に対処するためにもできるかぎり自動化する必要があり、1994年12月現在、具体的な方法を検討中である。

3-5 月震計総合特性

LUNAR-A用月震計は1994年11月現在で、以下の段階に達している。

Characteristics of Seismometers (Apollo and LUNAR-A)

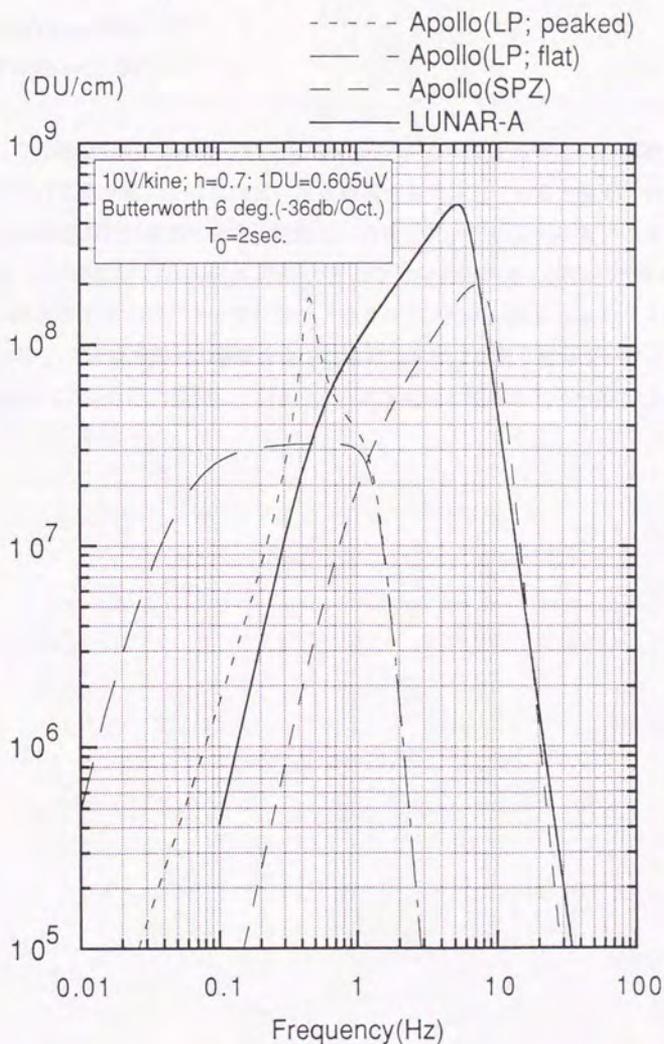


Fig.3-12 現在LUNAR-Aに搭載可能と思われる月震計の総合特性。アポロ月震計との比較したもの。諸特性は、発電感度10V/kine, $h=0.7$, アンブノイズ $1DU=0.605\mu V$ 、固有周期2sec., これに16Hz サンプリング用のアナログバターワース6次フィルターをかけた。

1. 重量330g、サイズ $\phi 50 \times 51$
2. 耐衝撃性、10000G
3. 感度10V/kine(20Hz)
4. 固有周期(1Hz、 20°C)

ここで、1、2は要求をほぼクリアーしており、3もこれ以上増やすのは困難であるので、4の固有周期の問題を除いてはほぼ望み得る最高性能に達していると見てよい。将来は理想的に固有周期0.5Hzが達成出来ると仮定し、月震計アンプの入力換算ノイズを $0.6 \mu\text{V}$ に押さえられるとすると ($1\text{DU} = 0.6 \mu\text{V}$)、アポロ月震計と感度の比較ができる (Fig. 3-12)。この図では6次のアナログバターワースフィルターを16Hz用のanti-aliasingフィルターとしてかけてある。アポロ月震計の谷間を完全に埋めるまでには至っていないが、それでもアポロと比較して1Hz付近の振幅にして約3倍の感度増加が達成されると期待されている。

第4章 LUNAR-A 月震データ取得法

4-1 LUNAR-A 月震観測

LUNAR-A計画では月震観測と月熱流量観測を2本柱とし、月内部構造の情報を得ることを目指している。このうち月震観測では、取得データ量が膨大になることが予想され、通信、電力からくる制約のため、データ伝送のための何等かの工夫が不可欠である。この処理方法の良し悪しは、LUNAR-Aの科学的成果を左右する問題である。

月震観測を確実にこなすには常時記録を取り続けていけば良いのであるが、それを全て地上に伝送することはLUNAR-A計画では極めて困難である。ペネトレータで取得した月震データは地上への直接の伝送は不可能であり、月を周回する母船経由で地上まで送られる。母船は月面にペネトレータを設置した後、母船は高度約200km、月赤道面に対し約25度の傾斜角を持つ略円軌道を取ることが予定されている。しかし母船と各ペネトレータの間のリンク時間はTable4-1に示すようにほぼ年間1700min.と見積もられている。この値は母船の軌道だけでなく、母船が常に太陽電池パドルを太陽に向けていなければならないという制約、ペネトレータの月面への貫入姿勢などで決まる。またペネトレータと母船間のテレメトリービットレートは標準値1024bps、伝送効率を0.8として年間約10Mbytesとなる。しかもこれは通信時間をすべてデータ伝送に費やした場合であるから上限値とみなすべきである。これに対し、3成分の月震計で10bitデータを16Hzサンプリングした場合、データ圧縮率が30%として1日で約1.56Mbytes、年間約570Mbytesに達する。一方ペネトレータの電力供給期間は上記程度のデータ伝送であっても、12ヶ月程度しかないと見積もられている。従って連続観測を定常的に行なうことは電力面からみても困難である。

以上のことからLUNAR-A計画においては、イベントトリガー法を中心にした観測を行うことになっている。Fig.4-1にデータ取得の流れ図を示す。すなわち、

1. 電力節約のため、アナログ回路を利用したイベントトリガー法で月震を監視し、P波着震を感知するとトリガー信号が発生して始めてCPUを動かし、データのチェック、取得を行なう。このときプレトリガーデータは256秒間確保する。
2. 最初256秒間は16Hzサンプリングでデータ取得を行なう。これが終了するまでに、後

月震データ取得
(パネトレータ内部)

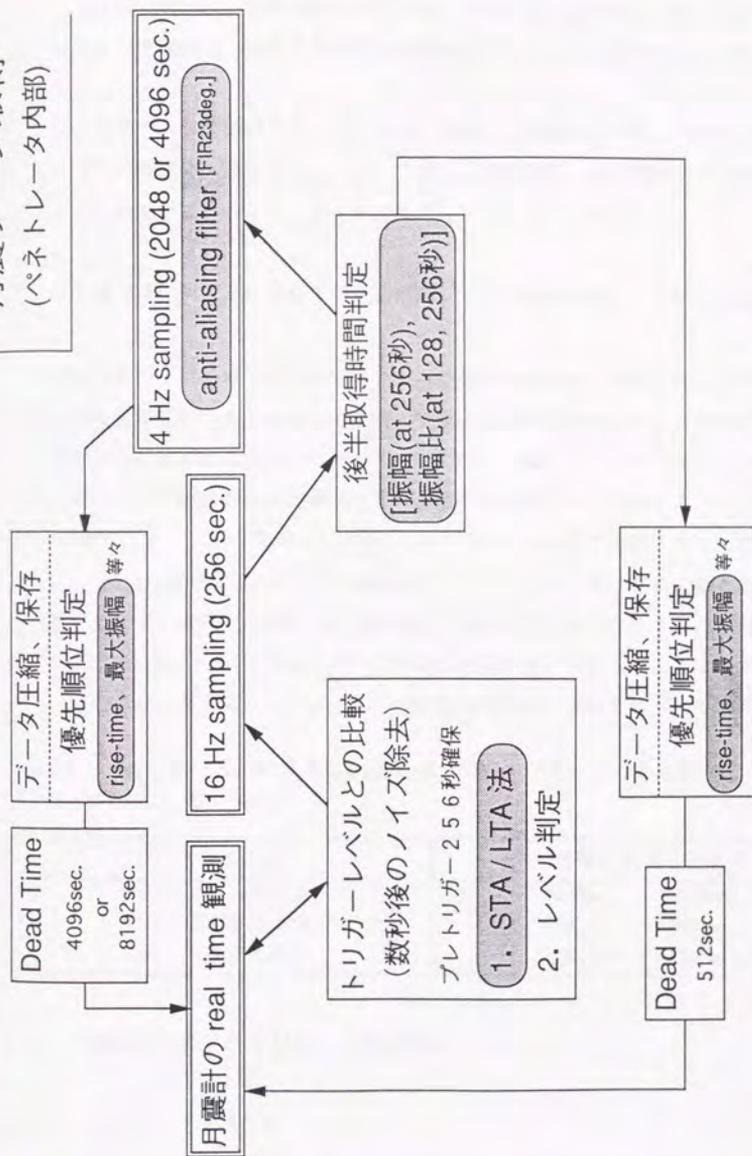


Fig.4-1 LUNAR-A計画における月震観測、データ取得の概念図。影をつけた部分は筆者が主に担当した。計測は基本的にイベントトリガー法で行われる(4-2節)。トリガー後はまず256秒間16Hzでのデータ取得し、256秒直前にその後データ取得をするかどうかを判断する(4-3節)。後半データは4Hzにダウンサンプリングするためのデジタルフィルタが必要(4-4節)。取得後は月震の地上への伝送優先順位を判定し(4-5節)圧縮、格納される。

半のデータ (4Hzサンプリング) を何秒取得するか(0、2048、4096秒)を判断する。ここで初期256秒間の取得時間は予想される深発月震のS波着震を捕らえられるように、後半データは同じく深発月震の継続時間程度になるように決められている。

3. 2の後半データ取得終了後、フィルター処理、圧縮処理、メモリへの保存格納を行い、地上への伝送優先順位を指定する。これは月震の規模、発生時間などの情報と共にテーブルの形でまとめられ、データに先だって地上まで伝送される。
4. 月震観測は、データ取得終了後月震規模に応じて観測を休止した後に再開する。

上記の方針の下で各項目について方法の具体化が進められ、詳細も決定しつつあるが、これらは衛星搭載用システムとして電力、重量、容積の点でインパクトが小さいことを第一に重視しなければならない。以下のこの章では、上記の1~4のスケジュールの中で私が主に関与した下線部の検討結果及びその実機への応用について論ずることとする。すなわち4-2節ではイベントトリガー法全般について述べ、4-3節では後半データ取得時間判定法について、4-4節では後半データを4Hzにダウンサンプルするときに必要となるフィルター処理について、最後に4-5節では月震の地上伝送順位について述べる。各節では検討結果の実機での応用についてもふれる。これらは地震計測システムとしては必ずしも最善のものではないが、衛星用システムとしての制約内で最良の方法をめざした結果である。

Table4-1 母船-ペネトレータリンク時間 (97年8月 γ の場合)、ペネトレータの設置位置については Fig.2-16を参照のこと(NEC, 1994c)。

ペネトレータ	1年間の総リンク時間	
PNT-1 (嵐の大洋機)	748 pass	1672min.
PNT-2 (危難の海機)	758 pass	1698min.
PNT-3 (裏赤道機)	724 pass	1712min.

4-2 月震用イベントトリガー法の開発

4-2-1 アナログトリガー法

4-1節に述べたように、通信、電力からの制約からLUNAR-Aでの月震観測にはイベントトリガー法が採用される。これは、主にペネトレータ計測系のアナログ回路上で行なわれ

るものであり以後アナログトリガーと呼ぶことにする。

この方法は、地球の無人地震観測で採用されている方式を応用したものである。基本的にはFig.4-2の【1】に示すように、時間軸に沿って前半に地震データの長時間平均(LTA)、後半に短時間平均(STA)を求めるタイムウィンドウ（以後それぞれの長さを T_L 、 T_S とする）を設け、それぞれのウィンドウ内の振幅平均の比(STA/LTA)が、ある適当な閾値を超えた場合にイベントと判定する。この節ではSTAとLTAは、それぞれタイムウィンドウ T_S 、 T_L における振幅絶対値の単純な時間平均を意味する。

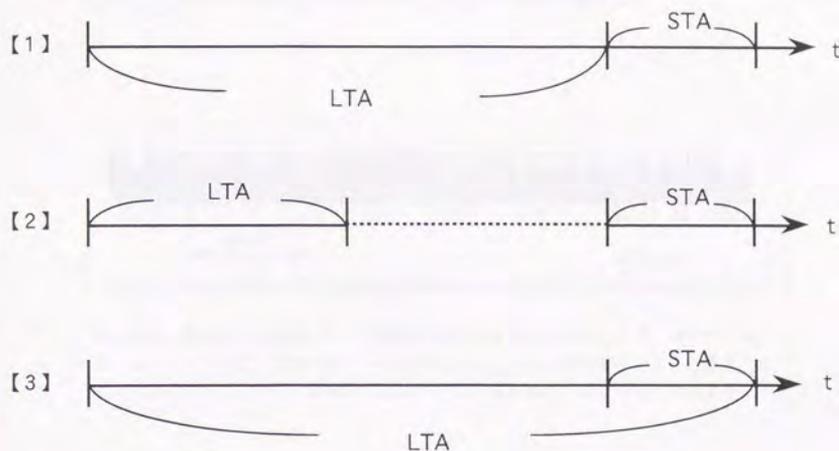


Fig.4-2 イベントトリガー法による地震検出法。LTAとSTAの時間ウィンドウはそれぞれ時間軸に沿って前後におかれ、振幅平均などを計算してレベルを監視している。STA/LTAがある閾値を越えたときに地震が来たと判定する。LTA、STAの取り方によってトリガーの性質を変えることができる。【1】は一般的な地球地震のトリガー用。【2】はLTAとSTAの間に数分時間を空けると月震用として理想的。【3】はLUNAR-Aに採用される方法。

地球上の地震の場合には、 $T_L=60\text{sec}$ 、 $T_S=3\text{sec}$ 程度という例があるが(青木, 1990)、月内部推定に有用と思われる深発月震、浅発月震、隕石衝突などの場合の継続時間は地球地震に比べて長く、一般に十数分から二時間に及ぶため、 T_L 、 T_S ともにより長い時定数が必要であることが予想される。このことを確かめるため、アポロ月震データの中からFig.4-3-1の月震(A170089z.12)を選び、トリガー判定実験を行なった。これはもっとも活動度が大きい深発月震グループA1に属し、かつその振幅が最大級のものである。波形は振動が始ま

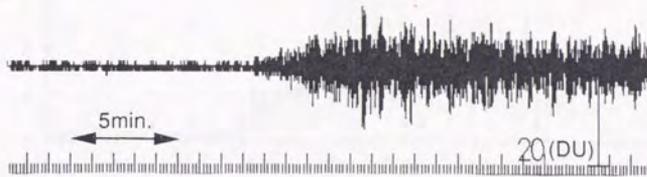


Fig.4-3-1 深発月震A1グループのなかでも最大級の月震。Apollo 12 site 長周期月震計上下動成分(LPZ)、'70年089日。Fig.4-29のA170089z.12と同じものである。初期の目標はこれを十分効率的に検出するトリガー方式を見いだすことであった。

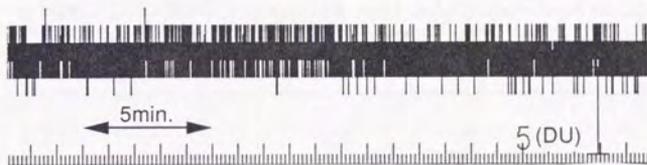


Fig.4-3-2 試作した月震計アナログ増幅回路から発生した実測ノイズ。本文中では、アンプノイズと略称。日産（株）から提供された。Fig.4-7の回路を元にした現実的なトリガーシミュレーションの際に16Hzにリサンプルされたアポロデータに加えた。



Fig.4-3-3 深発月震A1グループのなかでは非常に小さな月震。Apollo 12 site 長周期月震計上下動成分(LPZ)、'70年091日。Fig.4-29のA170091z.12と同じものである。A1の活動は1潮汐周期に2~3回発生する。A170089z.12の余震ともいべき月震である。

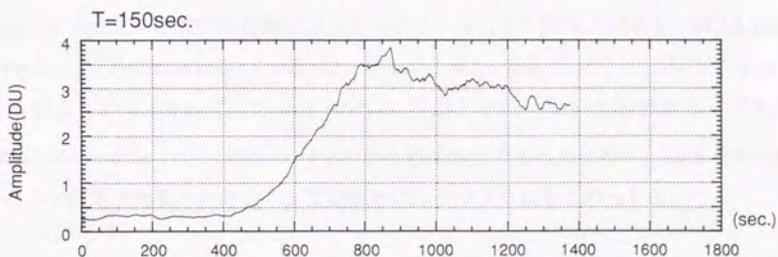
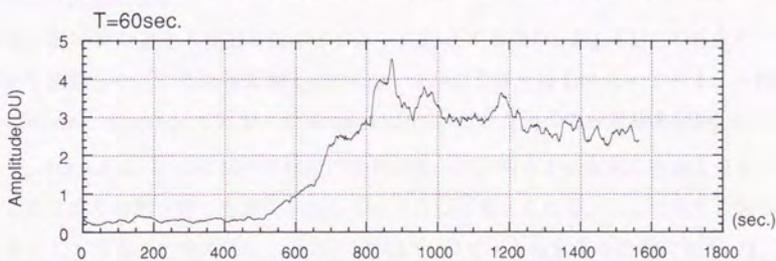
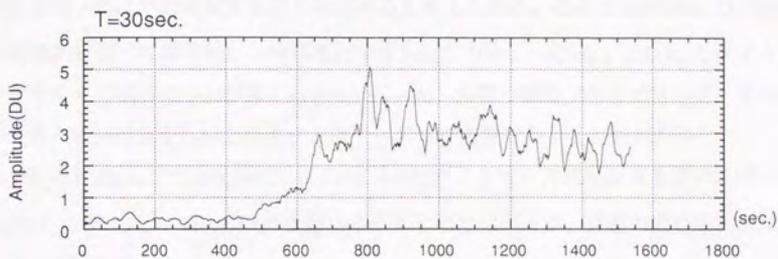
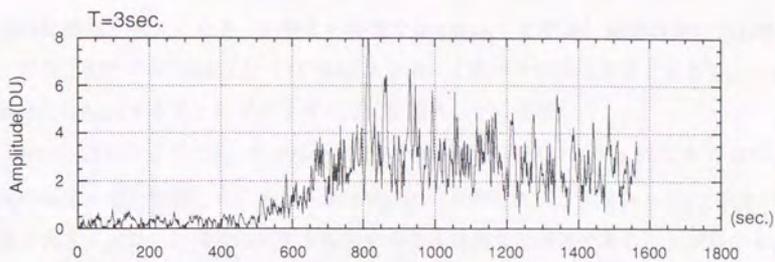


Fig.4-4-1~Fig.4-4-4 一番上がFig.4-4-1でA170089z.12の振幅平均を3秒のウィンドウで求めたもの。以下順にFig.4-4-2は30秒、Fig.4-4-3は60秒、Fig.4-4-4は150秒で振幅平均を求めた。月震の外形を的確に捉えるためには、数十秒以上の振幅平均が必要である。

って数分後に振幅が最大になり（以後この時間をrise-time, τ と呼ぶ）継続時間は1時間弱である。以後当面このA170089z.12をLUNAR-Aで捕らえるべき代表的月震とみなし、これを十分効果的に検出するアナログトリガー方式を探すことにする。

まず、Fig.4-2[1]の方式で $T_L=61.88\text{sec.}$ 、 $T_S=3.0\text{sec.}$ としてA170089z.12にあてはめ、STA/LTAの時間的変化を表してみる。結果はFig.4-5-1に示した。これを見るとSTA/LTAの値は非常に大きく変動し、月震の開始を判別することは非常に困難であることがわかる。

この原因は、 $T_S=3.0\text{sec.}$ が短すぎることにありと考えられる。そこでA170089z.12の振幅平均（振幅絶対値の時間平均）の時間変化を3sec.、30sec.、60sec.、150sec.とタイムウインドウを変えて調べてみた結果(Fig.4-4-1~4-4-4)、月震の概形（エンベロープ）を的確に捕らえるためには数十秒以上のタイムウインドウが必要であることがわかった。

そこで $T_L=61.88\text{sec.}$ 、 $T_S=30.0\text{sec.}$ としてFig.4-2[1]のトリガー方式で計算を行い、その結果をFig.4-5-2に示した。STA/LTAの変動は小さくなってはいるが、月震の開始を判別することはやはり困難である。

そこで、長時間の立上り時間を持つイベントに対応するため、Fig.4-2[2]の形式のトリガー方法を検討した。これは時間軸上でのLTA、STAの位置を離れたものである。一例として $T_L=150\text{sec.}$ 、 $T_S=50\text{sec.}$ で両者の間隔(lag)を155.4秒離れた場合の計算結果をFig.4-5-3に示したが、Fig.4-5-1、4-5-2に比べて格段の改善が見られ、明らかに従来の方法よりも、ゆっくりした立上り時間を持つ月震向きのトリガー方法と考えられる。ここで示した例は実用上十分としても良いであろう。これは、STA/LTAのピーク値自身の改善に加え、 T_L, T_S を長く取ってイベント以前での変動がおさえられていることの効果が大きく、STA/LTAの値は、Fig.4-5-1で最大3、Fig.4-5-2で最大2であるのに対し、Fig.4-5-3では1.3以下になっている。このことから、 $\min(T_L, T_S)=50\sim 60\text{sec.}$ 以上とすればよいと思われる。さらにA170089z.12のrise-time (τ)はFig.4-4-4などから約400sec.であることから、lagもその程度以上あることが理想的である。ここまでの結果は以下のようにまとめられる。

1. LTAとSTAは時間軸上で分離することが有効であり、月震のrise-time (τ) 以上離すことが理想的である。
2. A170089z.12データのノイズ部でのSTA/LTA変動を1.3以内に押えることを目安にすると、 T_L, T_S ともに数十秒以上が望ましい。

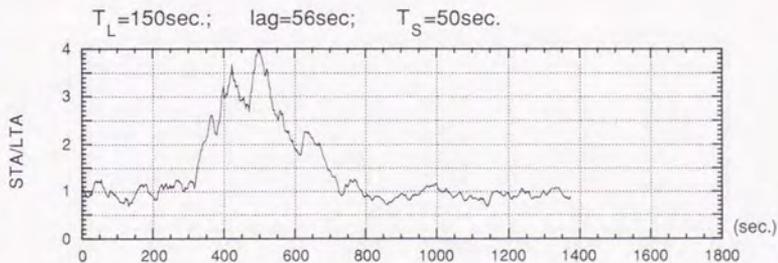
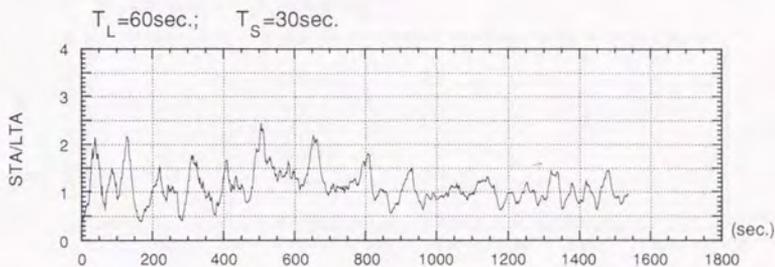
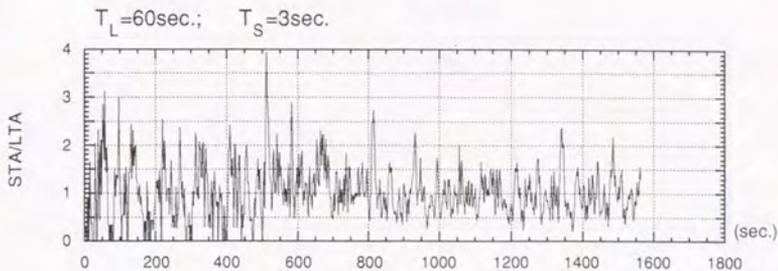


Fig.4-5-1~Fig.4-5-3 一番上(Fig.4-5-1)、及び二番目(Fig.4-5-2)は、A170089z.12をFig.4-2[1]のトリガー方式で検出を試みたもの。時定数 T_L, T_S は図に示した。Fig.4-2[1]ではイベント検出は困難である。一番下の図(Fig.4-5-3)はFig.4-2[2]の方式を同一データに試みたもので、トリガーはFig.4-5-1, Fig.4-5-2より格段にかかりやすい。

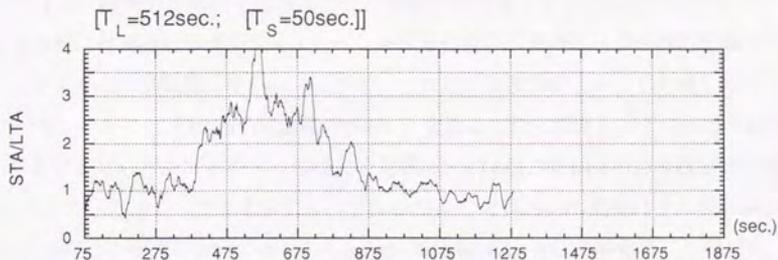
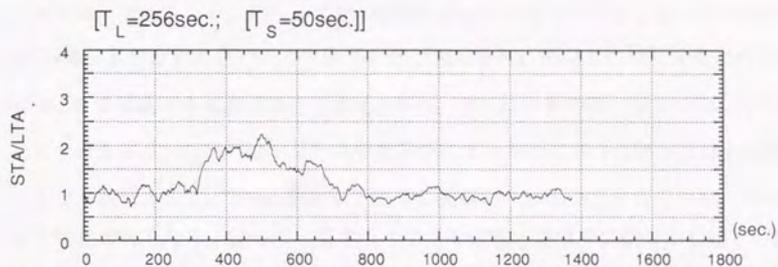
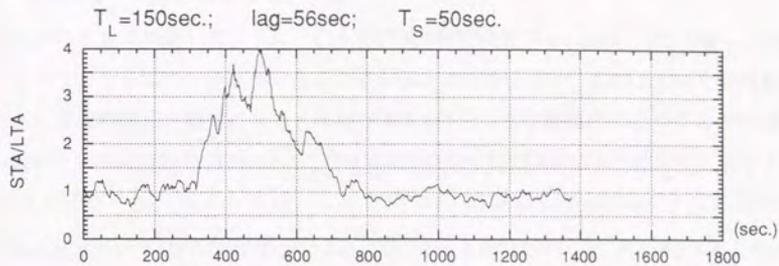


Fig.4-6-1~Fig.4-6-3 一番上(Fig.4-6-1)は、(Fig.4-5-3)と同じもの。(Fig.4-6-2)は(Fig.4-6-1)とタイムウィンドウ全体及び T_S を同じ長さにしてFig.4-2[3]のトリガー方式を試行したもの。明らか効果が劣ることがわかる。(Fig.4-6-1)と同一の効果を得るにはタイムウィンドウ全体を2倍にする必要がある。

4-2-2 LUNAR-A 用アナログトリガー法

前節4-2-1のまとめで述べたように、LTAとSTAは時間軸上でrise-time(τ)だけ離し、タイムウィンドウはともに数十秒以上とするとよいことがわかったが、LTAとSTAを時間軸上で離すことは回路構成が複雑になるためLUNAR-A用としては現実的でないことが指摘された。代わりに実現可能な方策として、Fig.4-2[3]のようにLTAがSTAを含んでしまうような形式のトリガー法が考えられた。この方式で $T_L=256\text{sec.}$ 、 $T_S=50\text{sec.}$ とした場合、A170089z.12のSTA/LTA比の時間変化を求めた例をFig.4-6-2に示す。これはFig.4-6-1(Fig.4-5-4と同じ)と同様に T_L 、 T_S 、lagで占められるタイムウィンドウ全体を256秒に保ったままで比較するためにおこなった。明らかに比の値がFig.4-6-1に比べて小さくなっているが、Fig.4-2[3]の構成上やむをえないことである。検出能力をFig.4-6-1と同等にするために T_L を $T_L=512\text{sec.}$ まで延長する必要がある(Fig.4-6-3)。このほか比の値(検出能力)を大きくしようとするならば、 T_S を短縮する方法があるがタイムウィンドウは数十秒以上は確保されていることが望ましく、30sec.程度を下回ると変動が大きくなりすぎてうまくかからなくなる可能性が高くなる。従って、実用上十分な安定性と感度を確保するには T_L が500から600sec.程度必要になるようである。

以下ではより現実的な検討を行なうため、実機搭載可能とされたFig.4-2[3]のタイプの回路の具体例に月震波形を通すシミュレーションを行ない、そのトリガー特性を調べていくことにする。この回路構成をFig.4-7に示す。これは月震波形のトレンドを取り除くためにハイパスフィルター(cut off 周波数0.106Hz)を通した後に整流し、その出力をLTAとSTAに相当するローパスフィルターの出力を比較し、STA出力がLTA出力×設定比を超えたとき、トリガーがかかったとみなすものである(Fig.4-7ではcut off 周期はそれぞれ642sec.、60.2sec.、以後この回路においてはこれらcut off 周期をLTA、STAの時定数、と呼び T_L 、 T_S と書くことにする。設定比 r は1.0になっている)。この回路にステップ波形を印加した時の出力をFig.4-8に示す。この図で検波出力はハイパスフィルターと整流の出力に相当し、これを回路のSTA、LTAに入力した結果が、STA出力、LTA出力になる。これらの波形の継続時間、形はそれぞれのタイムウィンドウの長さ、重みパターンに対応する。また、 T_L は回路設計上長くすることには限界があり、約700秒に制限される。前節4-2-1で行なった数値実験ではこのタイムウィンドウは箱型であった。この方法によってアポロデータにアナログトリガーをかける数値実験を行なった。このときアポロデータをそのままトリガー回路に通すのではなく、LUNAR-A月震取得法にならって16Hzにリサンプリし、月震計ア

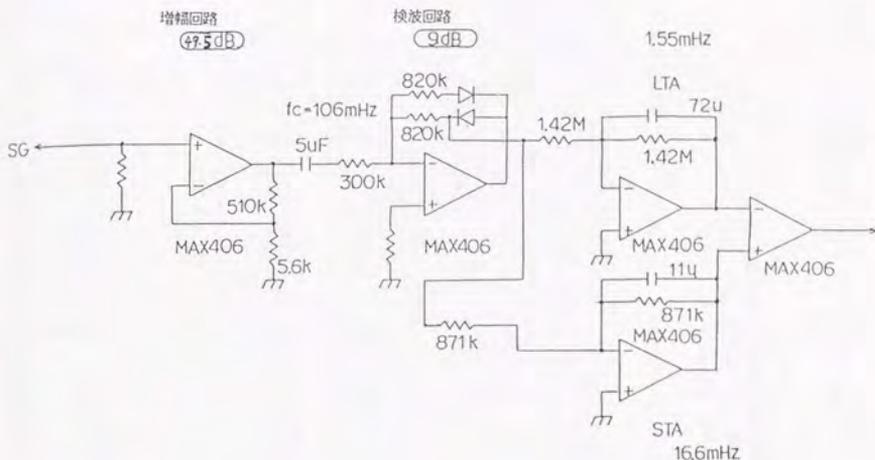


Fig.4-7 アナログトリガー回路の1例。Fig.4-2の[3]タイプのトリガー回路である。信号増幅後トレンドを除くためにハイパスフィルター($f_c=106\text{mHz}$)を通したあと整流し、信号を分割してそれぞれLTAとSTAに相当するローパスフィルターに通す。この2つのレベルの比を取り比較して設定比(r)を越えたらイベントとみなす。設定比はローパスフィルターの抵抗を変えて調節する。NM(1994a)の図3-1より。

ナログ増幅回路から入ってくると思われるノイズ(Fig.4-3-2; 日産(株)より提供、以下アンプノイズ)をアポロデータに4:1の割合で加えたものを使用した。まず最初に、A170089z.12(Fig.4-3-1)とA170091.12(Fig.4-3-3)について試験した例をそれぞれFig.4-9とFig.4-10に示す。A170091.12はA1深発月震であるが大きさとしては小さい部類に入る月震である。これらの図は、上から1段目にアポロデータ+アンプノイズ、2段目にSTA出力、3段目にLTA出力、4段目にトリガーを示したものである。これは、LTA時定数 $T_L=642$ 秒、STA時定数 $T_S=60.2$ 秒の場合 $r=1.526$ とすればトリガー検出が成功することを示している。

次にFig.4-7の回路を用いて微小イベントの検出実験を行なう事を通して、 T_L 、 T_S 、に対する適切な設定比 r を具体的に決める。ここではFig.4-29に示した仮称sp-2というアポロ月震を用いる。これはアポロ14号着陸地点の短周期月震計(SPZ)のデータで数分程度の継続時間から判断して観測地点付近の小規模な隕石衝突によるものであろう。sp-2とアンプノイズの合成比を4:1から4:4まで変えたもの4種類の合成波形を用意した(Fig.4-11-1~Fig.4-11-4)。ここでは月面における地動ノイズの効果については全く考慮していない。こ

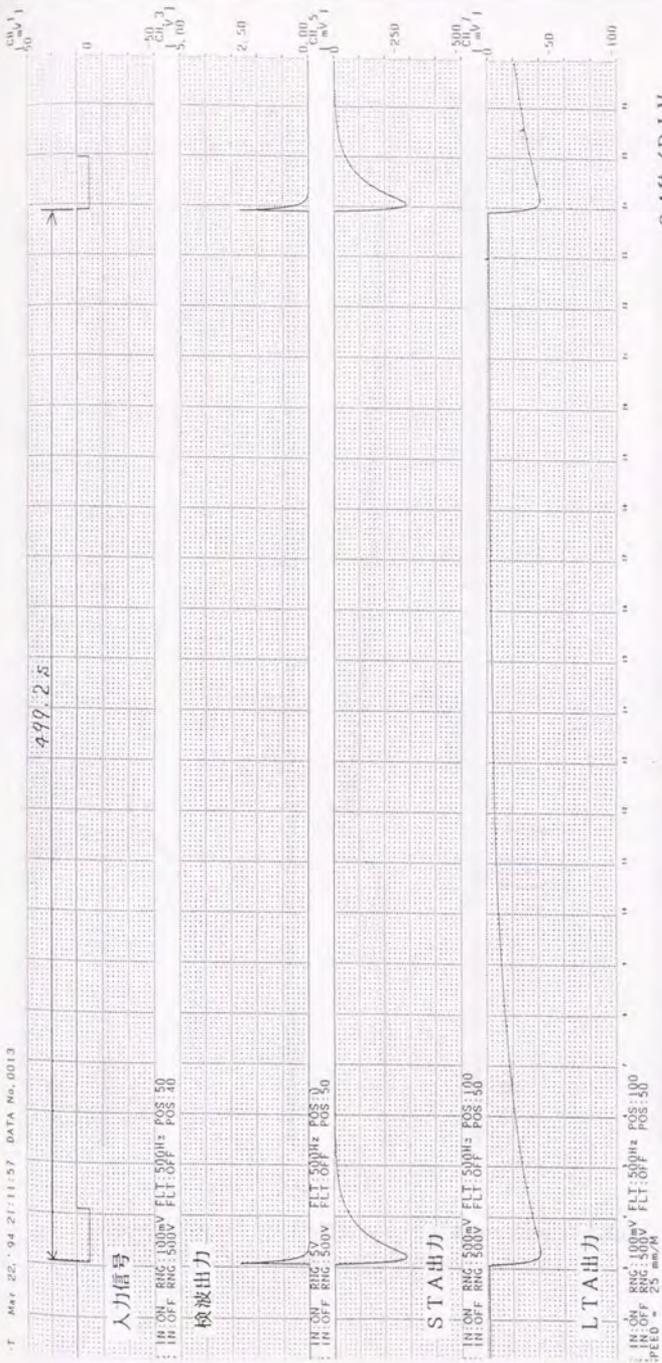


Fig.4-8 アナログトリガー回路Fig.4-7にステップ波形を印加した時の出力。検波出力はハイパスフィルタと警流の出力に相当し、これを回路のSTA、LTAに入力した結果が、STA出力、LTA出力になる。これらの波形の継続時間、形はそれぞれのタイムウィンドウの長さ、重みバスターンに対応する。NM(1994a)の図3-6より。

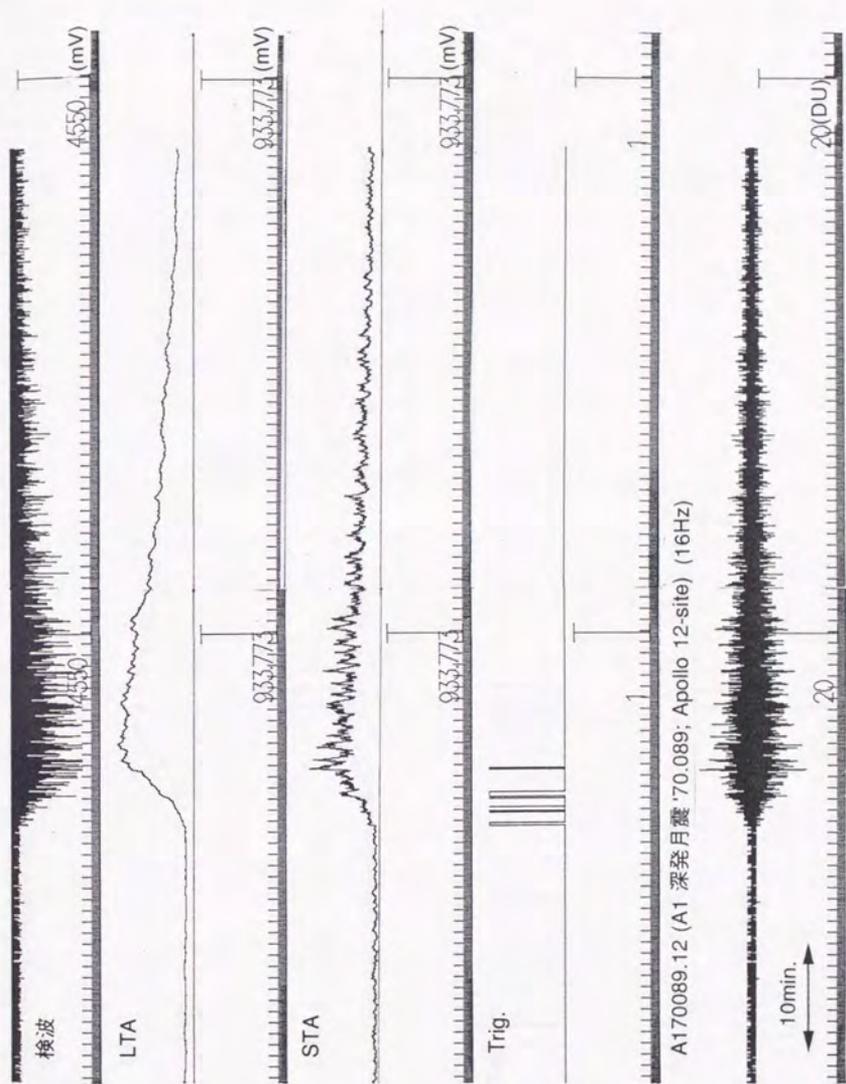


Fig.4-9 アナログトリガー回路Fig.4-7でA170089z.12(Fig.4-3-1)を通してみた結果。着震を的確に捉えている。 $T_S=60.2\text{sec}$ 、 $T_L=642\text{sec}$ 、設定比 $r=1.526$ 。

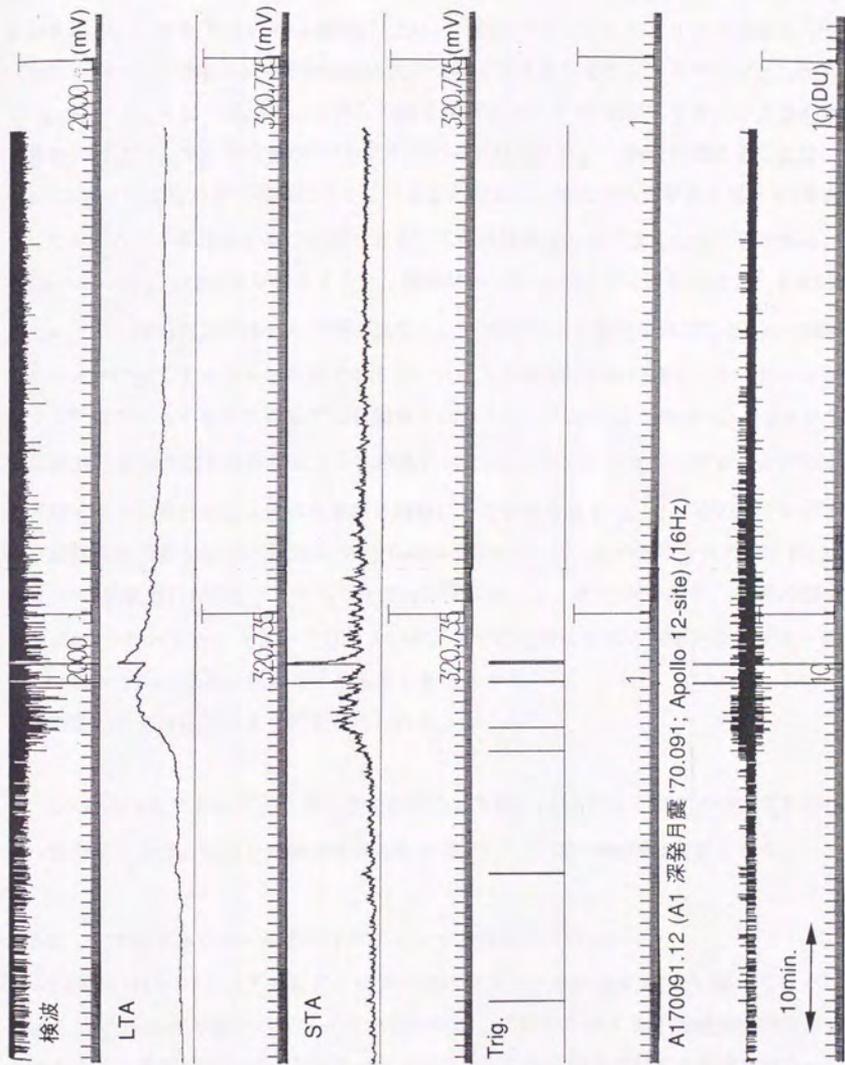


Fig.4-10 アナログトリガー回路Fig.4-7でA170091.12(Fig.4-3-3)を通して見た結果。着震を的確に捉えている。 $T_S=60.2\text{sec}$ 、 $T_L=642\text{sec}$ 、設定比 $r=1.526$ とした。

れについては次節4-2-3で検討する。Fig.4-11-1~4-11-4について、 $T_s=30$ 秒から60秒まで10秒おきに変え、横軸に設定比 r 、縦軸にLTA(sec.)をとって、いくつトリガーがかかったか(当然Fig.4-11-1~Fig.4-11-4で14min.以後について数える)をコンターマップとしたものをFig.4-12~Fig.4-15に示した。これらの図ではパラメータは1個のトリガーが立つ条件から求めればよい。すなわち値が1のコンターのみに注目する。一般的に言えることは、値が1のコンターは右上がり曲線になっていることである。すなわち T_L を長く取ると r を大きくしてもイベントを検出することができる。これは検出能力が大きくなることである。またFig.4-14、Fig.4-15に見られるように、非常に小さなイベントに対しては、 T_L を600sec.以上とっても検出能力にほとんど差が出ない。一方 r を小さく設定すれば T_L を500~600sec.よりはるかに短くすることが可能であるが、ノイズの影響が大きい場合、トリガーが誤差動する恐れが大きくなるため必ずしも得策とはいえない。さらに、Fig.4-12~Fig.4-15で T_s のみが違う条件の図を比較すると、 T_L が長いほど $r=1$ のコンターは左へ寄ることがわかる。これはイベント検出が上に述べた意味で困難になる事を意味する。これらのアナログトリガー数値実験の主な結果をTable4-2からTable4-5にまとめた。この表はそれぞれ、Fig.4-11の4つの合成波形に対応し、 T_L と T_s の主だった値に対して、最大の r を示す。 r の最小値は理想的には1よりわずかに大きいだけでよいが、月での地動ノイズの影響を考慮すると設定比 r はTable4-2~4-5の最大値のほうをとるべきであろう。

この節の結果は以下のようにまとめられる。

- LUNAR-A用アナログトリガー方式、すなわちFig.4-2[3]のように T_L の中に T_s を含む形式を取る場合、安定した結果を得るために、 T_L には500~600秒は必要となる。

4-2-3 アナログトリガー後のノイズチェック (有効トリガー)

4-2-2節ではLUNAR-Aアナログトリガーのパラメータを決定するため、微小なイベント(Fig.4-11)の検出が可能なパラメータを求めたが、これをそのまま月震観測に応用できるであろうか。前節のアナログトリガー方式では月面の振動環境に対する配慮を行っていないため、そのままでは地動ノイズなどにも反応してしまう危険性がある。

アポロ月震観測結果から月では、地球に比べ圧倒的に地動ノイズが小さいことが報告されている(Latham et al.,1970b)。にもかかわらず、アポロデータにはFig.4-16とFig.4-17に示すような奇妙なノイズがしばしば見られる。Fig.4-16は月面における昼夜交替時に月震計

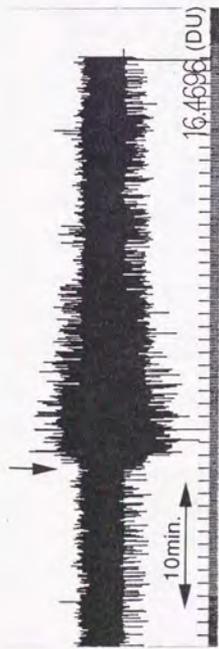


Fig.4-11-1 Fig.4-29のsp-2とアンブノイズ(Fig.4-3-2)を4:1で混合し、16Hzにリサンプルしたデータ。これを回路Fig.4-7に通すシミュレーションを $T_{L,T_{SR}}$ の値をいろいろ変えて行い、"↓"の後に引つかかるトリガー数を数える。以下本文ではFig.4-11-4までを微小月震の例とみなして議論を進める。結果はFig.4-12-1~Fig.4-12-4に示す。

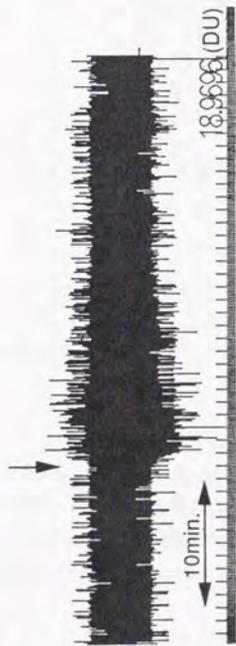


Fig.4-11-3 Fig.4-29のsp-2とアンブノイズ(Fig.4-3-2)を4:3で混合し、16Hzにリサンプルしたデータ。このデータを回路Fig.4-7に通すシミュレーションを $T_{L,T_{SR}}$ の値をいろいろ変えて行い、"↓"の後に引つかかるトリガー数を数える。結果はFig.4-14-1~Fig.4-14-4に示す。

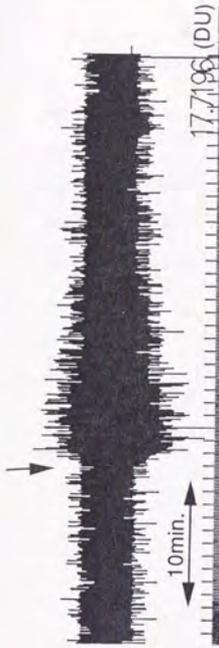


Fig.4-11-2 Fig.4-29のsp-2とアンブノイズ(Fig.4-3-2)を4:2で混合し、16Hzにリサンプルしたデータ。このデータを回路Fig.4-7に通すシミュレーションを $T_{L,T_{SR}}$ の値をいろいろ変えて行い、"↓"の後に引つかかるトリガー数を数える。結果はFig.4-13-1~Fig.4-13-4に示す。

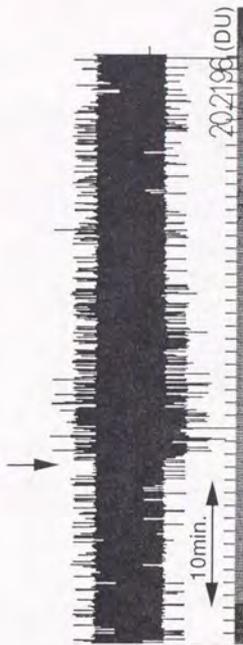
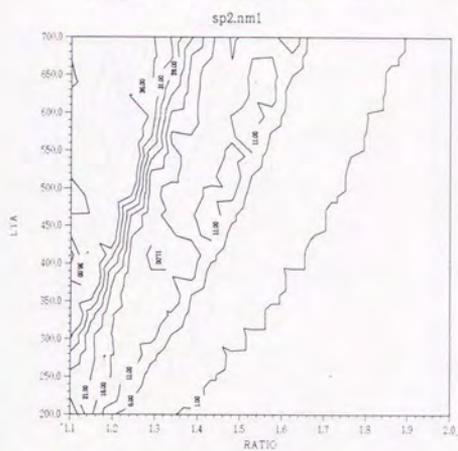
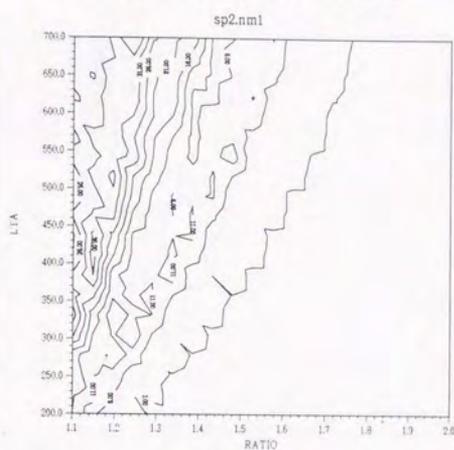


Fig.4-11-4 Fig.4-29のsp-2とアンブノイズ(Fig.4-3-2)を4:4で混合し、16Hzにリサンプルしたデータ。このデータを回路Fig.4-7に通すシミュレーションを $T_{L,T_{SR}}$ の値をいろいろ変えて行い、"↓"の後に引つかかるトリガー数を数える。結果はFig.4-15-1~Fig.4-15-4に示す。

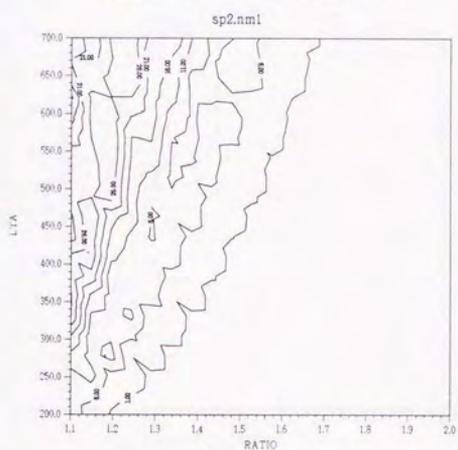
Trigger (A only: STA=30 SEC.)



Trigger (A only: STA=40 SEC.)



Trigger (A only: STA=50 SEC.)



Trigger (A only: STA=60 SEC.)

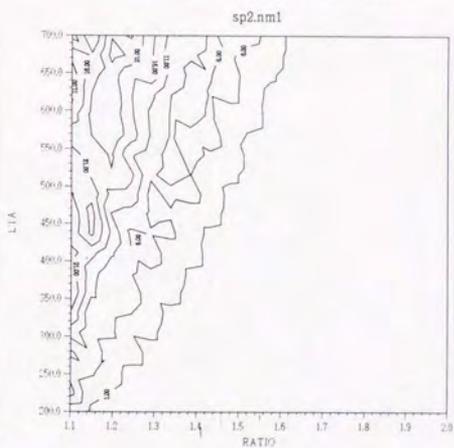
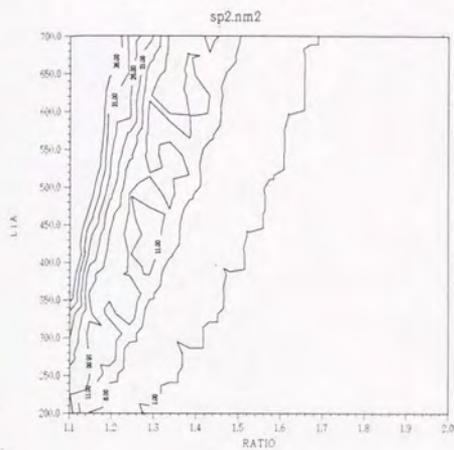
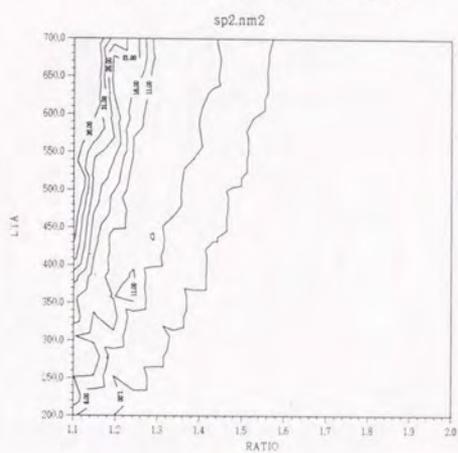


Fig.4-12-1~4-12-4 Fig.4-11-1の合成イベントを、回路Fig.4-7に通すシミュレーション結果。パラメータを $T_s=30\sim60$ 秒、 $T_L=200\sim700$ 秒、 $r=1.1\sim2.0$ と変えた。イベント検出は値が1のコンターの左側の領域で成功する。(左上)→Fig.4-12-1($T_s=30$ sec.)、(右上)→Fig.4-12-2($T_s=40$ sec.)、(左下)→Fig.4-12-3($T_s=50$ sec.)、(右下)→Fig.4-12-4($T_s=60$ sec.)。Table4-2参照。

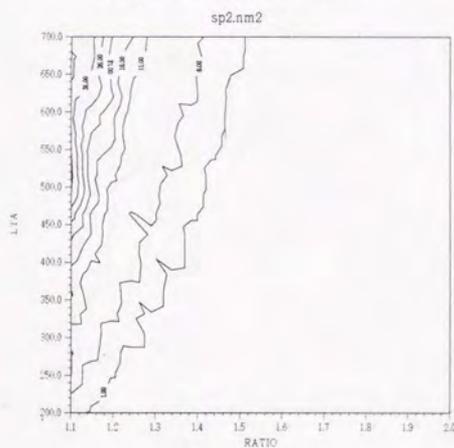
Trigger (A only: STA=30 SEC.)



Trigger (A only: STA=40 SEC.)



Trigger (A only: STA=50 SEC.)



Trigger (A only: STA=60 SEC.)

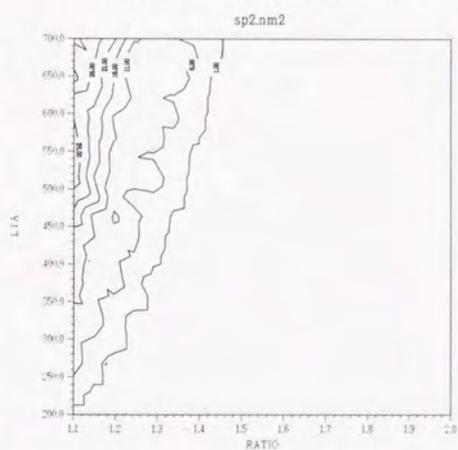
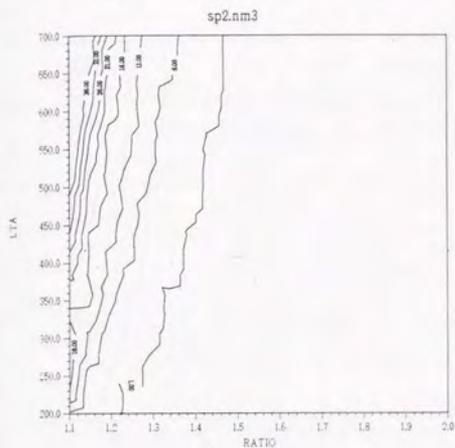
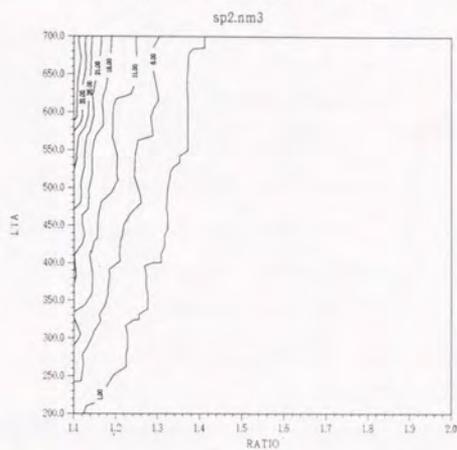


Fig.4-13-1~4-13-4 Fig.4-11-2の合成イベントを、回路Fig.4-7に通すシミュレーション結果。パラメータを $T_s=30\sim 60$ 秒、 $T_L=200\sim 700$ 秒、 $r=1.1\sim 2.0$ と変えた。イベント検出は値が1のコンターの左側の領域で成功する。(左上)→Fig.4-13-1($T_s=30$ sec.)、(右上)→Fig.4-13-2($T_s=40$ sec.)、(左下)→Fig.4-13-3($T_s=50$ sec.)、(右下)→Fig.4-13-4($T_s=60$ sec.)。Table4-3参照。

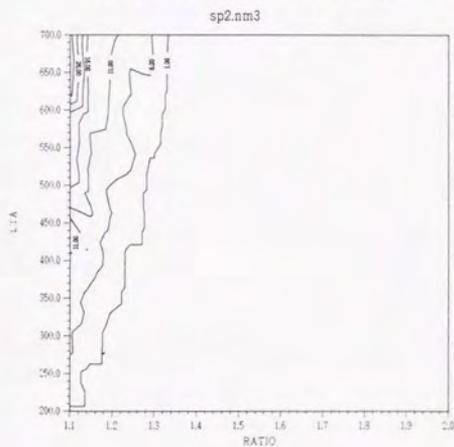
Trigger (A only: STA=30 SEC.)



Trigger (A only: STA=40 SEC.)



Trigger (A only: STA=50 SEC.)



Trigger (A only: STA=60 SEC.)

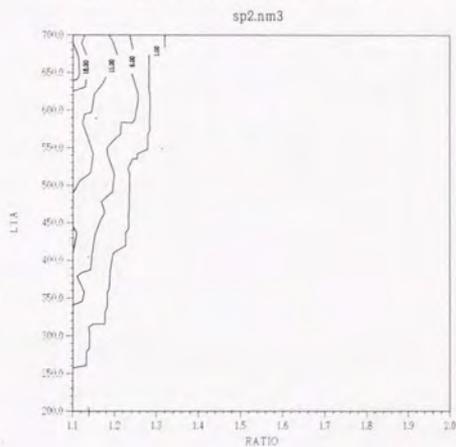
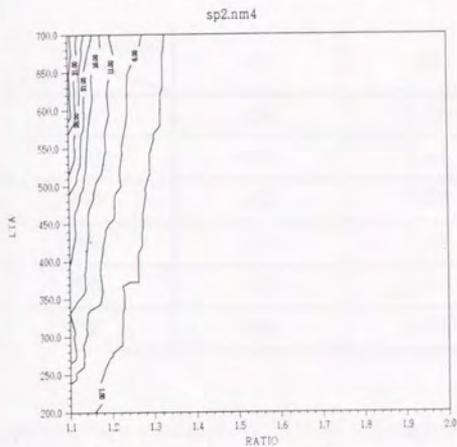
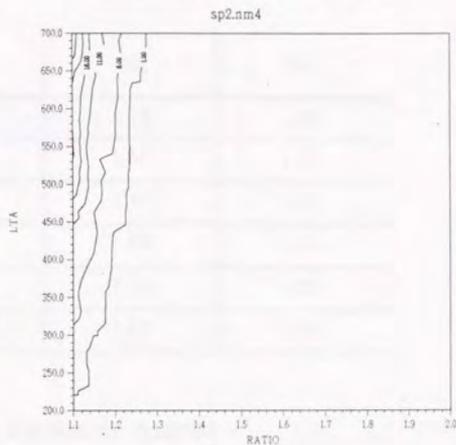


Fig.4-14-1~4-14-4 Fig.4-11-3の合成イベントを、回路Fig.4-7に通シシミュレーション結果。パラメータを $T_s=30\sim 60$ 秒、 $T_L=200\sim 700$ 秒、 $r=1.1\sim 2.0$ と変えた。イベント検出は値が1のコンターの左側の領域で成功する。(左上)→Fig.4-14-1($T_s=30$ sec.)、(右上)→Fig.4-14-2($T_s=40$ sec.)、(左下)→Fig.4-14-3($T_s=50$ sec.)、(右下)→Fig.4-14-4($T_s=60$ sec.)。Table4-4参照。

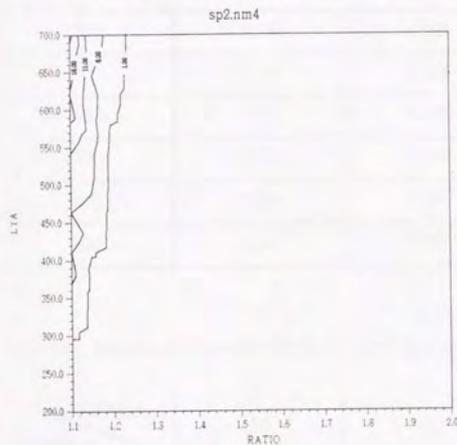
Trigger (A only; STA=30 SEC.)



Trigger (A only; STA=40 SEC.)



Trigger (A only; STA=50 SEC.)



Trigger (A only; STA=60 SEC.)

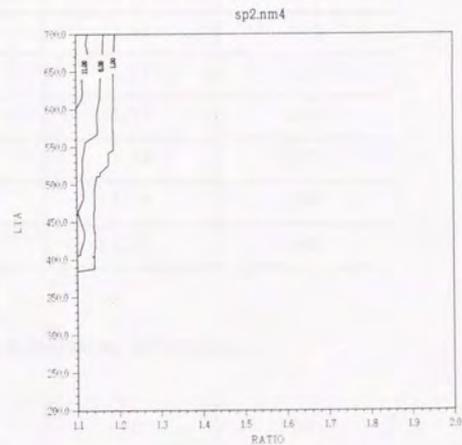


Fig.4-15-1~4-15-4 Fig.4-11-4の合成イベントを、回路Fig.4-7に通すシミュレーション結果。パラメータを $T_s=30\sim60$ 秒、 $T_L=200\sim700$ 秒、 $r=1.1\sim2.0$ と変えた。イベント検出は値が1のコンターの左側の領域で成功する。(左上)→Fig.4-15-1($T_s=30$ sec.)、(右上)→Fig.4-15-2($T_s=40$ sec.)、(左下)→Fig.4-15-3($T_s=50$ sec.)、(右下)→Fig.4-15-4($T_s=60$ sec.)。Table4-5参照。

Table4-2 Fig.4-11-1にFig.4-7のアナログトリガーをかける数値実験結果。最大設定比 (r)。

STA(sec.) \ LTA(sec.)	30	40	50	60
200	1.36	1.28	1.19	1.15
300	1.51	1.42	1.36	1.31
400	1.65	1.55	1.47	1.41
500	1.75	1.65	1.56	1.46
600	1.81	1.70	1.61	1.55
700	1.89	1.76	1.69	1.61

Table4-3 Fig.4-11-2にFig.4-7のアナログトリガーをかける数値実験結果。最大設定比 (r)。

STA(sec.) \ LTA(sec.)	30	40	50	60
200	1.28	1.20	1.14	<1.1
300	1.42	1.33	1.27	1.23
400	1.51	1.42	1.37	1.31
500	1.57	1.46	1.42	1.37
600	1.66	1.54	1.46	1.42
700	1.68	1.57	1.51	1.46

Table4-4 Fig.4-11-3にFig.4-7のアナログトリガーをかける数値実験結果。最大設定比 (r)。

STA(sec.) \ LTA(sec.)	30	40	50	60
200	1.22	1.12	<1.1	<1.1
300	1.32	1.23	1.18	1.14
400	1.37	1.31	1.23	1.19
500	1.42	1.32	1.28	1.23
600	1.47	1.37	1.32	1.28
700	1.47	1.41	1.33	1.31

Table4-5 Fig.4-11-4にFig.4-7のアナログトリガーをかける数値実験結果。最大設定比 (r)。

STA(sec.) \ LTA(sec.)	30	40	50	60
200	1.16	<1.1	<1.1	<1.1
300	1.23	1.16	1.11	<1.1
400	1.26	1.19	1.15	1.14
500	1.28	1.23	1.19	1.15
600	1.32	1.24	1.21	1.19
700	1.33	1.28	1.23	1.19

が設置してあるところの月レゴリスの熱膨張（あるいは収縮）が起こり、地震計がわずかに傾くことが原因とされている(以下tilt noise と呼ぶ; (Latham et al., 1970b))。これに対しLUNAR-Aでは、月震計は地下1~3mに埋設されるから、アポロと同様のノイズが入る心配はないはずである。しかしペネトレータは月レゴリス中に貫入する時にクレーターをつくり、それは次第に崩落していくであろう。これにともなう月レゴリスの振動は月震観測に障害になる可能性がある。特に日出、日没時の温度急変時には、多発する恐れがある。またペネトレータが理想的に貫入せず、月震計が浅く設置される場合には、その可能性がさらに増すと考えられる。このクレーター崩落に伴う振動はFig.4-16に類似しているかも知れない。一方Fig.4-17はアポロ月震計回路部から発生するフィードバックノイズらしいがはっきりしたことは不明である。以下これをf.b.noise(Yamada, 1994)と呼ぶ。もしその解釈が正しいならば、LUNAR-A計画では月震計測回路はフィードバック回路ではないため、この種のノイズが入る可能性はtilt noiseよりも低い。

以上のようにアポロ月震データには、月震よりもはるかに短いタイムスケールのシグナルがあるため、LUNAR-A月震観測でそれらが観測されるのか、あるいはどうしたら避けることができるかといった問題について考察を行なっておく必要がある。本論文では万全を期するため、Fig.4-16とFig.4-17の2種のシグナルを月での自然現象とみなし、これらを拾わないような方策を追求することにする。

まず、Fig.4-11と同様にtilt noise にアンプノイズを 4:1~4:4 の割合で加え(Fig.4-18-1~4-18-4) T_L 、 T_S 、 r をパラメータとしたアナログトリガー実験を行なった。ただし T_S は60sec.のみに限り、noiseに対する感度をもっとも小さくなるようにした。その結果をFig.4-12~



Fig.4-16 アポロ月震データのノイズのひとつ。月レゴリスの熱膨張、収縮のため月震計がわずかに傾くことが原因とされている(NASA; SP235)。本文中のtilt noise。
Apollo 12-site LPZ (長周期上下動), 1970.090.05:30.取得。

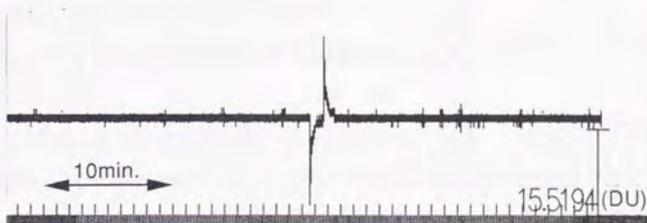


Fig.4-17 アポロ月震データのノイズのひとつ。これはアポロ月震計のフィードバック回路から来るノイズの可能性がある。本文中の f.b. noise。Apollo 12-site LPZ (長周期上下動), 1970.089.15:20.取得。

Fig.4-15と同様の形式でFig.4-19～Fig.4-22に示す。これらの図はFig.4-12～4-15とは逆にコンターの値が0であるところが望ましい領域である。ところが、Fig.4-16の tilt noise に対しては、ほとんどの場合1回はトリガーがかかってしまい、アナログトリガーのみではtilt noiseを避けることは困難なことがわかる。

最初にこのtilt noise(Fig.4-16)の除去方法を考える。これは典型的なtilt noiseであり、時間拡大図をFig.4-23 (上段) に示す。アポロ月震データから判断する限りその継続時間は10sec.程度であるため、アナログトリガーがかかってから同じく10秒程度の待機時間を設け、そのあとに振動が続いているかを確認する方法が考えられる。次にf.b.noiseへの対策であるが、このシグナルは、中立点に対して片側に振れているという特徴をとりだせばよい。このためにはアナログトリガー直後のたとえば4秒間(16Hzサンプリングで64データ)のデータが、

$$Q = \sum |a_i - \text{off}| - \sum (a_i - \text{off}) \geq 64 \cdot \alpha \cdot \text{Noise} \quad (4-2-1)$$

を満たす場合（このとき両側に振幅がある）に有効な信号と判断する方法が最も簡潔であろう。ここで、 a_i が16Hzデータであり、offは月震データのオフセット値で、

$$\text{off} = 1/128/16 \cdot \sum a_i \quad (4-2-2)$$

Noiseは月震計回路のアンプノイズ(0-p)、 α は調整パラメータである。

以上のノイズに対する対策ををまとめると、

1. tilt noise に対してはアナログトリガー後の約10秒後に振動がノイズレベルをこえているかを確認したうでイベントとみなす。
2. f.b. noise に対しては、(4-2-1)のQによる判定をおこなう。

となる。以下ではこの2つの対策を組み合わせることとする。すなわちアナログトリガー後16秒間待機し、その後の64データ（4秒間）のQを計算して片側振幅でなく、ノイズレベルをこえていることがわかれば、イベントとみなしてデータ取り込みを開始する。ここでNoise、 α はノイズ状況に応じた定数とすればよいが、この節ではNoiseはデータの先頭128秒での振幅平均、 α = アナログトリガー設定比 r として検討した。

この方法（有効トリガー法）をFig.4-16、Fig.4-17に適用した結果を、Fig.4-23、Fig.4-24に示す。これらの図で上から1段目はアポロデータの波形、2段目はアナログトリガーの結果、3段目はアナログトリガーと上述の有効トリガー法を同時に実行した一例である。いずれもこの方式で除去しうることがわかる。

この結果を幅広い T_L 、 T_S 、 r について調べてみる。すなわち、4-2-2節で検討したアナログトリガー法とこの節で検討した有効トリガー法を同時に実行した場合、tilt noise をイベントと誤認したFig.4-19～4-22の結果はどの程度改善されるのであろうか。Fig.4-18-1とFig.4-18-2についての結果をFig.4-25とFig.4-26に示す。これらの図には合成微小イベント（sp-2+アンプノイズ）Fig.4-11-1とFig.4-11-2について同じ方法でトリガーをかけてみた結果も入れてある。ただし $T_S=60\text{sec}$ である。微小イベントについてはアナログトリガーのみの結果とあまり変わらないが、tilt noise については劇的に改善されている事がわかる。 r を1.4ないし1.5以上にセットすれば、トリガー誤動作はほとんど避けられる。また、

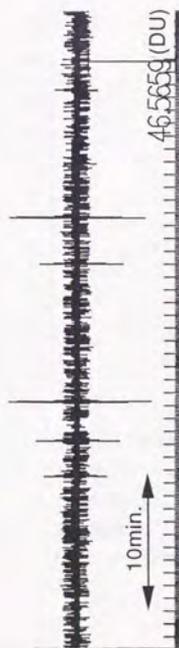


Fig.4-18-1 tilt noise(Fig.4-16)とアンプノイズ(Fig.4-3-2)を4:1で混合し、16Hzにリサンプリングしたデータ。これを回路Fig.4-7に通すシミュレーションを $T_{L,T,S,r}$ の値をいろいろ変えて行い、引っかかるトリガー数を数える。以下本文ではFig.4-18-4までをtilt noiseの典型例とみなして議論を進める。結果はFig.4-19に示す。

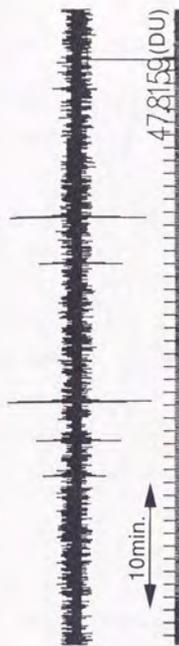


Fig.4-18-2 tilt noise(Fig.4-16)とアンプノイズ(Fig.4-3-2)を4:2で混合し、16Hzにリサンプリングしたデータ。これを回路Fig.4-7に通すシミュレーションを $T_{L,T,S,r}$ の値をいろいろ変えて行い、引っかかるトリガー数を数える。結果はFig.4-20に示す。

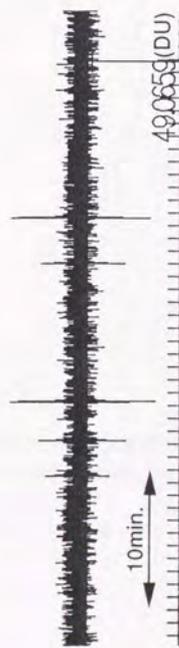


Fig.4-18-3 tilt noise(Fig.4-16)とアンプノイズ(Fig.4-3-2)を4:3で混合し、16Hzにリサンプリングしたデータ。これを回路Fig.4-7に通すシミュレーションを $T_{L,T,S,r}$ の値をいろいろ変えて行い、引っかかるトリガー数を数える。結果はFig.4-21に示す。

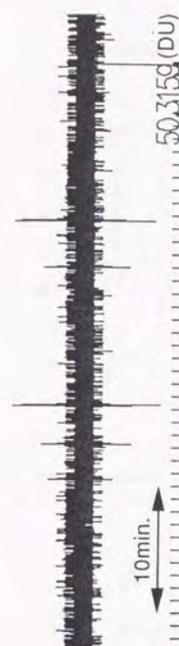
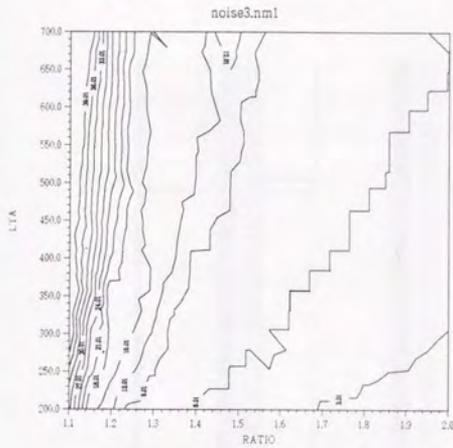
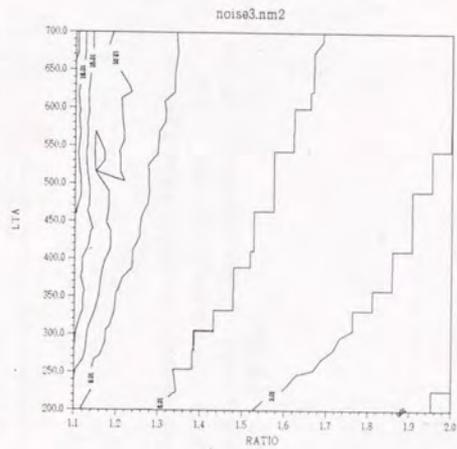


Fig.4-18-4 tilt noise(Fig.4-16)とアンプノイズ(Fig.4-3-2)を4:4で混合し、16Hzにリサンプリングしたデータ。これを回路Fig.4-7に通すシミュレーションを $T_{L,T,S,r}$ の値をいろいろ変えて行い、引っかかるトリガー数を数える。結果はFig.4-22に示す。

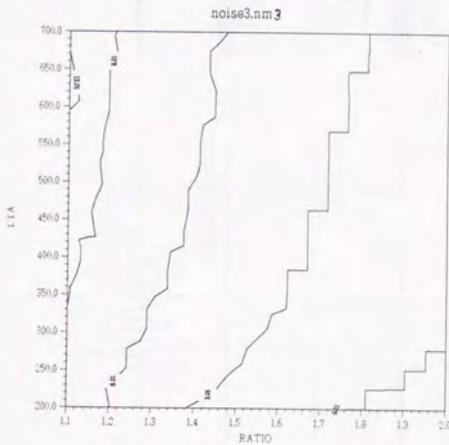
Trigger (A only: STA=60 SEC.)



Trigger (A only: STA=60 SEC.)



Trigger (A only: STA=60 SEC.)



Trigger (A only: STA=60 SEC.)

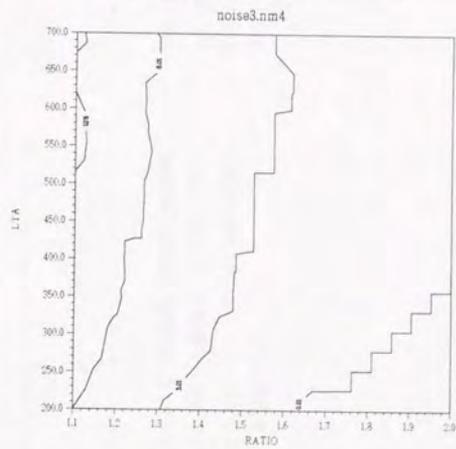


Fig.4-19~4-22 Fig.4-19 (左上)はFig.4-18-1の合成tilt noiseを、回路Fig.4-7に通したシミュレーション結果。パラメータを $T_s=30\sim60$ 秒、 $T_L=200\sim700$ 秒、 $r=1.1\sim2.0$ と変えた。同様にFig.4-20 (右上)はFig.4-18-2に対する、Fig.4-21 (左下)はFig.4-18-3に対する、Fig.4-22 (右下)はFig.4-18-4に対するシミュレーション結果である。ほとんどのパラメータで1回はノイズに引っかかってしまう。

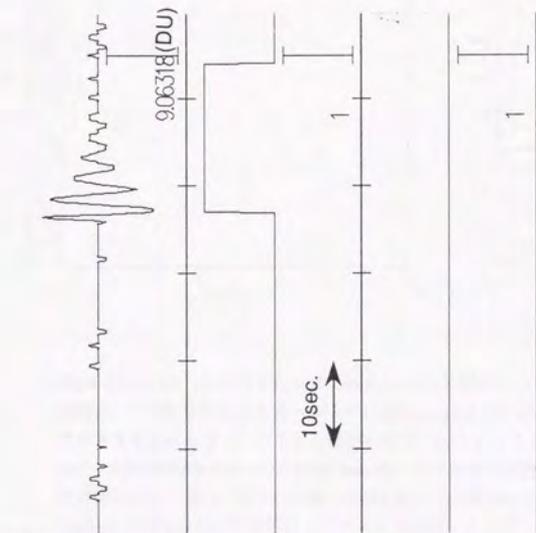


Fig. 4-23 上段はtilt noise(Fig.4-16)の部分拡大図。中段は $T_L=642\text{sec.}$, $T_S=60.2\text{sec.}$, $r=1.526$ でのアナログトリガの結果でノイズをイベントと誤認している(36秒付近の立ち上がり)。下段は4-2-3節の有効トリガの結果で、中段の誤動作を回避できた。

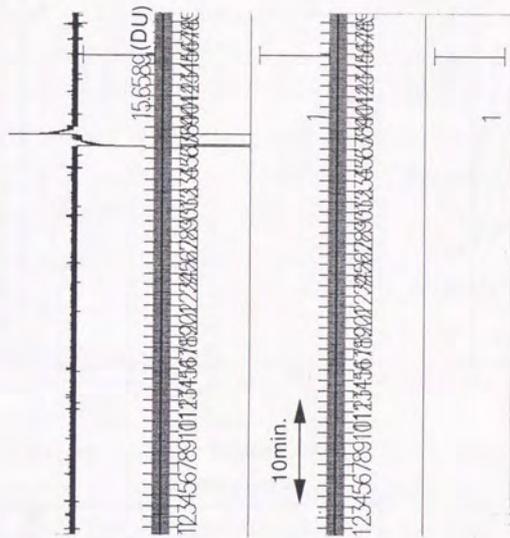
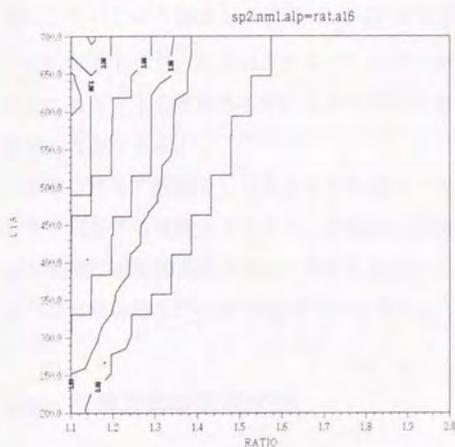
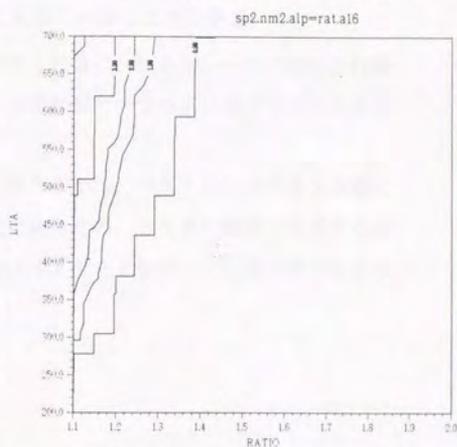


Fig. 4-24 上段はt.b. noise(Fig.4-17)。中段は $T_L=642\text{sec.}$, $T_S=60.2\text{sec.}$, $r=1.526$ でのアナログトリガの結果でノイズをイベントと誤認している(37分付近の立ち上がり)。下段は4-2-3節の有効トリガの結果で、中段の誤動作を回避できた。

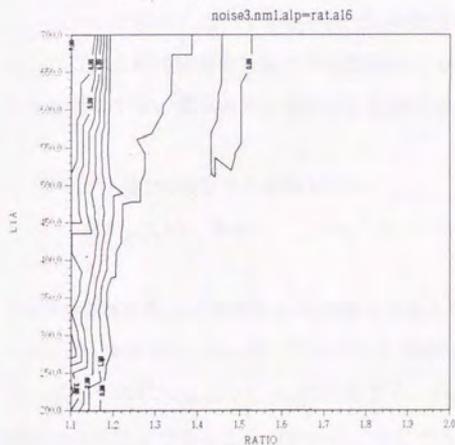
Trigger (A and E: STA=60 SEC.)



Trigger (A and E: STA=60 SEC.)



Trigger (A and E: STA=60 SEC.)



Trigger (A and E: STA=60 SEC.)

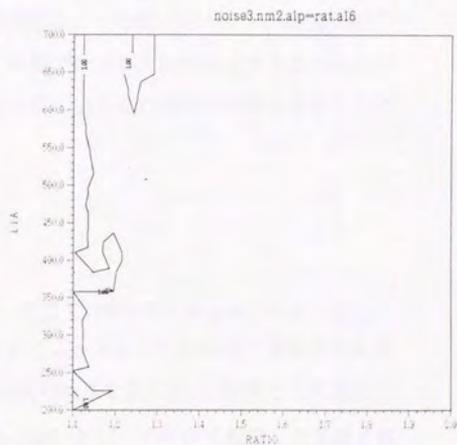


Fig.4-25~4-26 左上図 (Fig.4-25-1)はFig.4-11-1の微小イベントの(アナログ+有効)トリガー判定結果。この図は有効トリガーがなければFig.4-12-4と同じになる。コンター値1の線に注目する限りあまり変わらない。すなわち有効トリガー法によってイベントを排除することはない。左下図(Fig.4-25-2)はFig.4-18-1の合成tilt noiseの(アナログ+有効)トリガー判定結果。ノイズを検知しない領域が広く現れ、状況は大幅に改善した。右上図(Fig.4-26-1)、右下図(Fig.4-26-2)は、それぞれFig.4-11-2、Fig.4-18-2の波形の(アナログ+有効)トリガー判定結果。Fig.4-25と同様に有効トリガー法の効果を確認できる。

Fig.4-25-1と4-25-2、及びFig.4-26-1と4-26-2を比較してみると、月震は検出するがノイズは検出しないという望ましい領域 (T_L , r) が出現してきていることがわかる。

この有効トリガー判定はアナログトリガーがかかった後に、ペネトレータのCPUを作動させて実行する必要があるが、アナログトリガーと合わせて一つのトリガーシステムとみなすことができる。

実際に月面で観測をした場合どの程度のノイズがでるか、ペネトレータの貫入状態に大きく依存する可能性が大きく、本質的に未知数であるため、トリガー観測を開始する前にある程度連続観測を行ない、そのとき得られたノイズデータを用いて本節で述べたような方法で最終的な T_L , r を決定すべきであろう。

4-3 月震取得時間判定法

アナログトリガー、有効トリガーのイベント検出を通過したシグナル（以後トリガー後のシグナルと呼ぶ）は、まず16Hzで256秒間取得される。この間にイベントの規模に応じてこれ以降の取得時間を決定する必要が生じる。本節ではその方法を決定するための手がかりを提供する。月震波形は基本的に紡錘状波形をしているとの基本的特徴を考慮すると、

1. トリガー後256秒後での振幅レベル、
2. その増大していく割合、

の2つの規準に従って評価するのが適切であろう。ここでは概念的にFig.4-27のように、トリガー後128秒後と256秒後にそれぞれ ΔT 秒間のタイムウィンドウを設けて振幅平均を求め、値をそれぞれ A_{T_1} (DU)、 A_{T_2} (DU)とする。Fig.4-28の結果を見ると ΔT 秒間として適当な時間は16秒以上であることがわかる。そこで $\Delta T=16$ sec.とし、アポロで観測した各種月震波形の中から20種類を選び(Fig.4-29)、これらの A_{T_1}/A_{T_2} 、 A_{T_2} についてプロットした図をFig.4-30に示す。Fig.4-29の各月震の内訳は、深発月震7、浅発月震5、隕石衝突5、近距離隕石衝突（推定）3である。このうち近距離隕石衝突だけは短周期月震計(SPZ)で、あとは長周期月震計(LPZ)による。この他に熱月震というローカルなしかもその継続時間が高々2~3min.しかなく、数が大変に多くなりうる月震もあるが(Duennebier, 1976、Duennebier and Sutton, 1974a)、これは後述するようにトリガー後256sec.以内には終わってしまうことを利

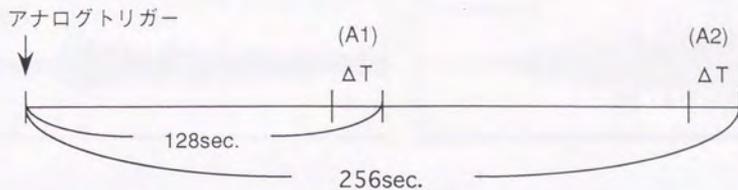


Fig.4-27 アナログトリガー後256sec.までのデータ処理。128sec.後と256sec.後に ΔT sec.の時間の時間ウィンドウを設けて振幅平均A1、A2を計算し、これ以後何秒データをとるかを決める。4-3節参照。

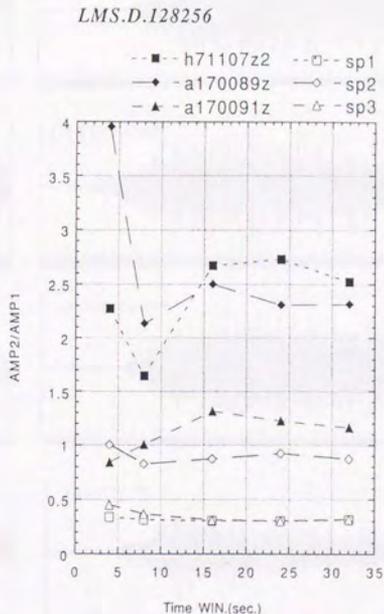
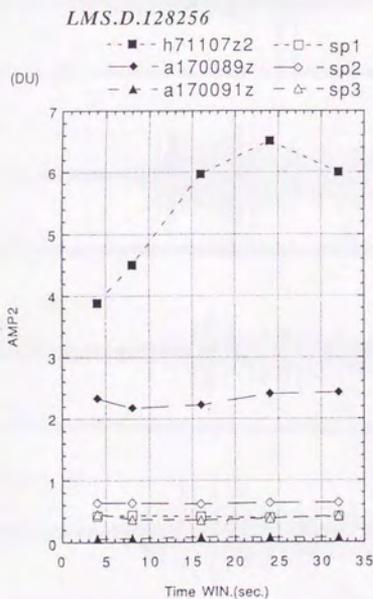


Fig.4-28 表示したFig.4-29の6つの月震についてアナログトリガー($T_L=642\text{sec.}$, $T_s=60.2\text{sec.}$, $r=1.526$)がかかった時を起点として、Fig.4-27に示すような方法でA₁(左図)、A₂/A₁(右図)を求め ΔT を変えてプロットした。安定した結果を得るには $\Delta T=16\text{sec.}$ 以上が必要。

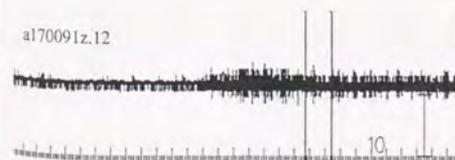
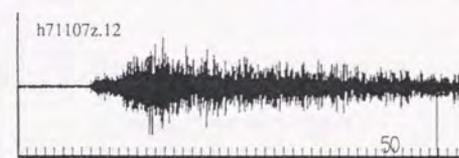
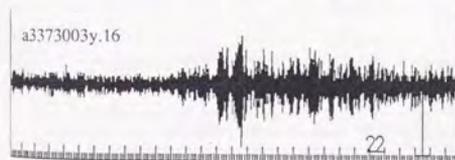
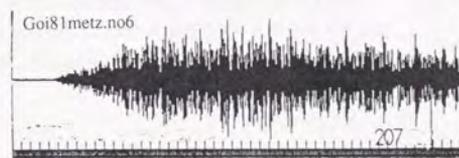
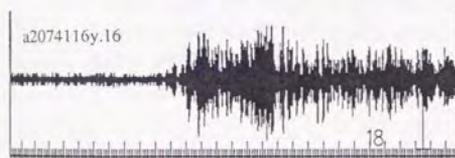
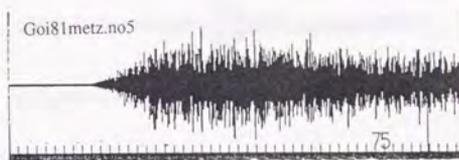
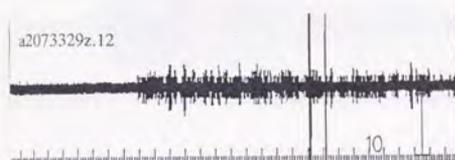
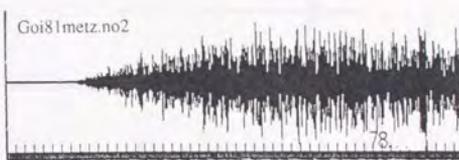


Fig.4-29 次ページへ続く

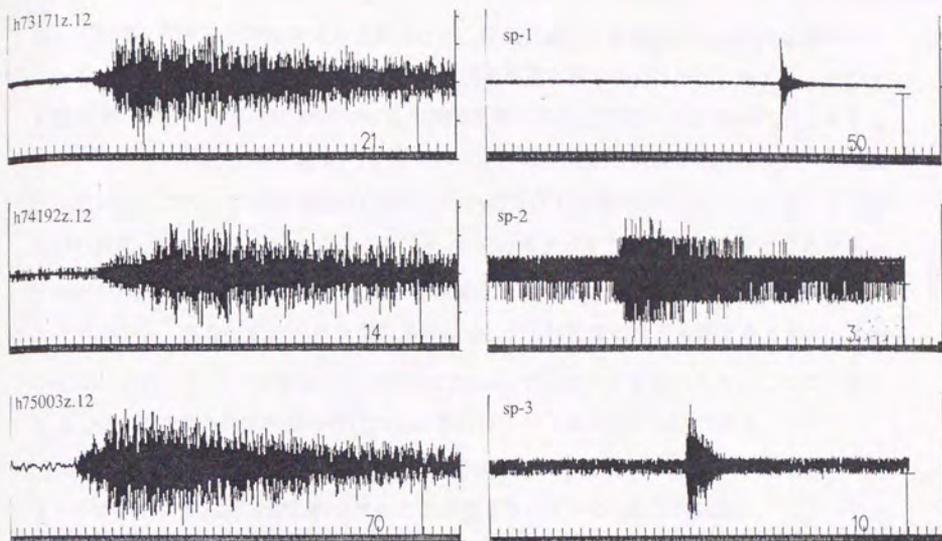


Fig.4-29 前ページより続く。月震データ取得時間決定法、伝送優先順位判定法等で使ったデータ20種。名前がaから始まるのは深発月震、hから始まるのは浅発月震、Goi81metで始まるのはGoins et al.(1981)に記載されている隕石衝突。sp-1.sp-2.sp3はアポロ14号SPZデータでそれぞれ1972年281日19:37、同年281日20:00、283日07:35付近のものである。長い目盛り針の間隔が1min.縦スケールはDU。

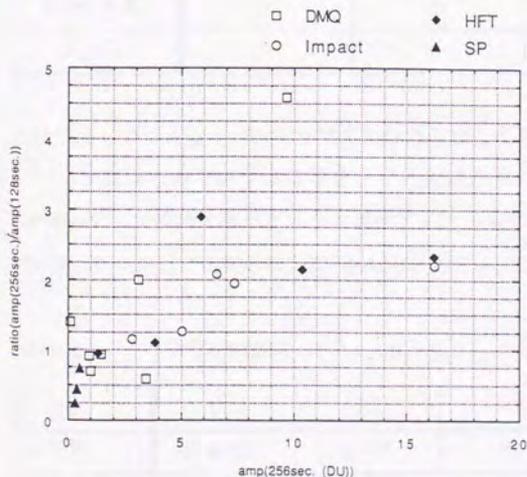


Fig.4-30 Fig.4-29に表示した20の月震について、アナログトリガー($T_L=642\text{sec.}, T_s=60.2\text{sec.}, r=1.526$)がかかった時を起点としてFig.4-27に示す方法で (Fig.4-28-2)を求めたもの。DMQは深発月震、HFTは浅発月震、Impactは隕石衝突、SPはFig.4-29のsp-1.sp-2.sp-3, $\Delta T=16\text{sec.}$

用して捨てるのでここでは考える必要はない。深発月震は、各観測点からの角距離のバリエーションをカバーするように選択したが、浅発月震と隕石衝突は解析に耐えるイベントを選んでいる。これらにSPZの3つの近距離隕石衝突を加えて種々の月震の代表とみなしてよいだろう。Fig.4-30の A_{T1}/A_{T2} の分布をみると、近距離隕石衝突を除けば0.5~4程度になっている。このうち深発月震(A3373003y.16)については値が4をこえているが、これは波形の振幅が大きくなっているところに A_{T2} を求めるタイムウィンドウがきたためである。また値が1を割っているイベントも同様な事情があるため、本当に振幅が減少しているわけではない。また近距離隕石衝突の場合 A_{T1}/A_{T2} が0.25程度になるものがあるが(Fig.4-29のsp-1)、このイベントの場合、取得時間は256sec.でほぼ十分ともいえる。このことから $A_{T1}/A_{T2}=0.2$ 程度であれば取得時間は256sec.あれば十分とみなすことができる。

以上の結果はLUNAR-A計画の月震取得時間判定法に应用されている。まずTable4-6-1のような枠組で月震取得時間を判定することが提案されている(NEC, 1994d)。

Table4-6-1 月震取得時間判定マトリックス

$R \backslash A_{T2}$	$A_0 > A_{T2}$	$A_1 > A_{T2} > A_0$	$A_2 > A_{T2} > A_1$	$A_{T2} > A_3$
$R > R_2$	×	中	大	大
$R_2 > R > R_1$	×	中	中	大
$R_1 > R > R_0$	×	小	中	中
$R_0 > R$	×	小	小	中

×は取得しつづめるイベントを熱月震等とみなして棄却することを意味し、小は256sec.のデータ取得のみで終了する事を、中、大はそれぞれ4Hzサンプリングで2048sec.、4096sec.データ取得を継続する事を意味する。ここで $R=A_{T1}/A_{T2}$ である。さらにTable4-6-1での R_0 、 R_1 、 R_2 は、上記のまたはFig.4-30を反映し、Table4-6-2を基本とする(NEC, 1994e)。

Table4-6-2 月震取得時間判定パラメータ($R_0 \sim R_2$)

R_0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
R_1	0.35	0.475	0.6	0.85	1.0
R_2	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0

4-4 月震後半データの 4Hz ダウンサンプル用 anti-aliasing filter

4-3節の月震データ取得時間判定を経て、中、大と判定された月震データは2048sec.あるいは4096sec.の間4Hzサンプリングを行なう(後半データ)。データは16Hzで取り込みつつ4Hzに間引いていくので、このときcut off周波数が2Hzのanti-aliasingフィルターが必要となる。これはペネトレータのCPUを用いて月震データを取り込みながら16Hzデジタルデータのフィルター処理も同時に行なうため、計算処理時間の許す範囲でできる限り急峻かつ通過帯域が平坦なものを設計しなければならない。

候補としてIIRフィルターとFIRフィルターについて優劣を比較する。IIRはフィードバック型のフィルターである。すなわち x_i を元データとし、 y_i をフィルターを通した後のデータとすると、

$$y_i = a_0 x_i + a_1 x_{i-1} + a_2 x_{i-2} - b_1 y_{i-1} - b_2 y_{i-2} \quad (4-4-1)$$

となる。このことはIIRを用いると、たとえ4Hzダウンサンプリングする場合でもフィルタリングの計算は16Hzでおこなわなければならないことを意味する。しかもこれは最も単純な2次のIIRの場合で一般には(4-4-1)を係数を変えて何段か繰り返さなければならない。一方FIRは、

$$y_i = \sum_{j=i-m}^{i-1} h_j x_j \quad (4-4-2)$$

として計算されフィードバックはないので、4Hzでフィルタリング計算を行なえばよい。実際にはFig.4-31のデータ取り込みシーケンスに示したようにIIRでは1/16sec.時間のうち3/4はデータ取り込みに使われるので1/64sec.で3成分のフィルター計算を1回行なわなければならない。これに対しFIRでは、1/16sec.で3成分のフィルター計算を1回行なえばよい。上の条件を満たすIIRのうち、2Hzで-3dB以下の減衰特性を持った出来るだけ急峻なフィルターをプログラムbutlop.fを用いて設計した(斎藤,1978)。これは実現困難と判断されたものであるが、その特性をFig.4-32に示す。同様にFIRの方も計算時間の制約を満たし(23次以下)、2Hzで-3dB以下、通過帯域がなるべく平坦で、停止帯域で~-60dBの要求を満たすものの特性をFig.4-33に示す。

これらを比較すると、計算時間を同じとするとFIRの方がIIRよりもはるかに急峻なフィルターを設計できることがわかる。この結果からFig.4-33の23次FIRを4Hzダウンサンプル

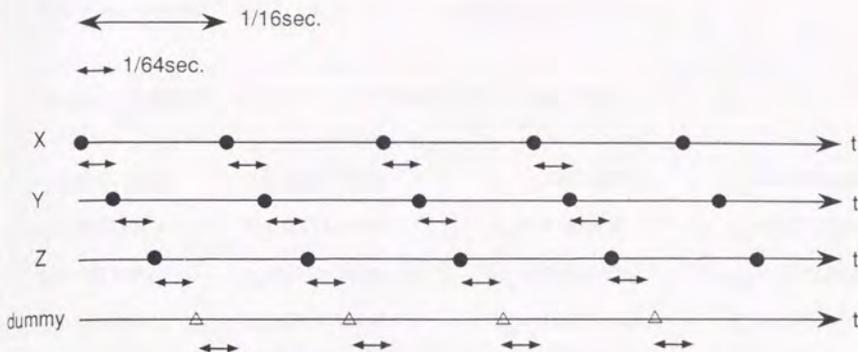


Fig.4-31 月震データ取得タイミング。●△はデータ取り込みを表す。
 16Hzを4Hzに落とす場合、IIRフィルターは再帰型のため1/64secごとに1
 データ処理しなければならないが、FIRフィルターは非再帰型なので1/16sec
 に1データ処理すればよい。

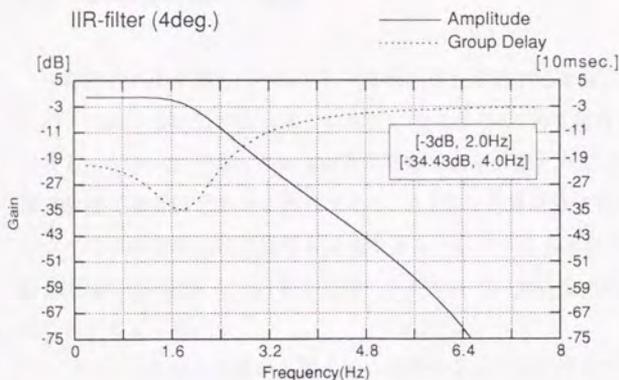


Fig.4-32~4-33 上図がFig.4-32で4
 次のIIRフィルターで最も急峻な特性
 を持つが、計算時間の制約上実現困
 難とされる。下図Fig.4-33は計算時間
 からの制約内で最高次数の23次FIRフ
 イルタの特性。これは上図のIIRより
 はるかに急峻である。

用フィルターに採用することになった。その係数 h_i を以下に示す。

Table4-7 月震後半データダウンサンプル用FIRフィルター(23次)の係数

$h_1=0.00227660$	$h_7=-0.04138530$	$h_{13}=0.23624489$	$h_{19}=-0.0090104$
$h_2=0.07611353$	$h_8=0.01619593$	$h_{14}=0.15035897$	$h_{20}=0.00743262$
$h_3=0.01119970$	$h_9=0.05321816$	$h_{15}=0.05321816$	$h_{21}=0.01119970$
$h_4=0.00743262$	$h_{10}=0.15035897$	$h_{16}=-0.01619593$	$h_{22}=0.07611353$
$h_5=0.0090104$	$h_{11}=0.23624489$	$h_{17}=-0.04138530$	$h_{23}=0.00227660$
$h_6=0.0313972$	$h_{12}=0.27059814$	$h_{18}=-0.0313972$	

4-5 伝送優先順位判定法

月震データは月面上のペネトレータから月を周回する母船へ、さらに地球へと伝送されるが、データ伝送量が最大限どの程度になるかは4-1節で見積もられている。これに対し、どのようなデータが蓄えられるかは不明確である。たとえばペネトレータ貫入地点の熱月震活動度が非常に大きかったりすると、4-3節の月震取得時間判定法で大量の熱月震がメモリーにためこまれる可能性も否定できない。こうなるとLUNAR-A計画で重視されるべき月深部の情報をないう月震よりローカルなイベントのほうが優先的に地上まで伝送される恐れがでてくる。

このため、重要な月震から優先的に取得する工夫が不可欠であり、本節では以下この問題を考えることにする。まず月震は、以下の4種類に分けられることを確認しておく。

- 深発月震（震源深さ700～1100km）
- 浅発月震（震源深さ300km以下）
- 隕石衝突
- 熱月震

LUNAR-Aの月震観測では、月マントル深部の情報を得て、中心付近を含む大局的内部

構造を探ることを主目標に掲げている(2-4節参照)。この目的に最も適するものは、'2台以上のペネトレータで同時に観測され、かつ少なくとも1つの波線は月深部(特に中心付近)を通るようなイベント'といえるであろう。この条件を満たすものは、下記の

1. 深発月震(震源深さ700~1100km)
2. 浅発月震
3. 大規模隕石衝突(観測点相互の角距離90度程度以上で観測され得るもの)

だと考えられる。こうしたイベントは月震取得の際に優先度を高くすべきであろう。これに対し、下記の4、5は一箇所では観測されないイベントであるため優先度が低くなる。

4. 小規模隕石衝突
5. 熱月震

しかし、4、5の観測は、

- 月面への隕石衝突頻度計測
- 月面での熱月震活動度計測(その地域性)

といった課題に答えるために重要であり、これらの観測の可能性を排除するものではない。従ってLUNAR-A月震観測では、上記の1、2、3と4、5の区別が自動的に行なえることが望ましい。このためには、

1. 複数の地点で観測された月震を認識できること、
2. 各々の月震波形からその(角)距離を推定できること、
3. 深発月震との判定の自動化、

の3項目が可能であればよい。1については母船、ペネトレータ間で発信時刻などのエッセンスデータをまとめた月震テーブルをやりとりすることが検討されているためここでは省き、2と3の問題を考える。

月震波形は大まかに紡錘状になっているが、その原因は月表面のレゴリス層の影響とさ

れる(e.g. Toksoz et al., 1974)。従って、隕石衝突や浅発月震の様に震源が浅いものは、震源距離が大きくなるほど月表面を伝播して来る波の遅れのためrise-time（月震波形振幅がトリガー以後最大になる時間； τ ）が大きくなることが予想される。その一方深発月震はそのような影響が少ないため、rise-timeは震源距離に余りよらないのではないかと予想できる。Fig. 4-29の20個のデータのうち17個はすでに震源距離が求められているものである(Goins et al., 1981)。回路Fig.4-7によるLTA出力($T_L=642$ 秒; 4-2-1節参照)を用いて各月震のrise-time (τ)を求め、震源距離との関係を求めたものをFig.4-34に示したが、結果はほぼ予想通りになっていることがわかる。この図は、角距離0度から180度までのイベントをカバーしている。また深発月震については、角距離が最短の部類になっているApollo 14 siteとA9深発月震グループの組み合わせを含み、深発月震のrise-timeの下限は押えられているとしてよい。

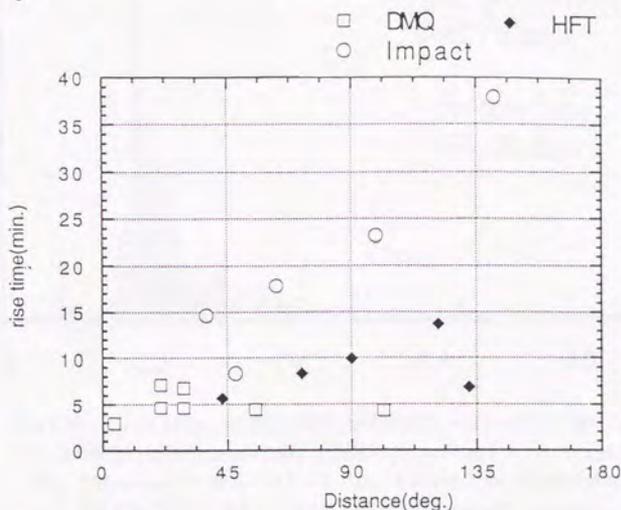


Fig.4-34 Fig.4-29の中で震源距離のわかっている17個 (sp-1,sp-2,sp-3以外)について、アナログトリガー回路のLTA出力 (Fig.4-7参照; $T_L=642$ sec.)を用いてrise-timeを求め角距離との相関を調べた図。浅発月震(HFT)と隕石衝突(Impact)は角距離との正の相関がみられるが、深発月震(DMQ)はrise-timeは3~8分でほぼ一定している。この結果はLUNAR-A月震観測での優先順位判定法に役立てられた。

深発月震のrise-timeは最短で3分ならず、最長でも8分程度である。このことを利用すれば、2と3の問題は部分的には解決可能になる。すなわち、rise-timeが3分~8分のイベントの場合

合、深発月震の可能性ありとみなし、それ以外を隕石衝突、浅発月震、或は熱月震とみなすのである。深発月震との最終的判定は、地上で潮汐周期から判断しておこなうことが考えられる（5章参照）。さらに熱月震と近距離隕石衝突のrise-time (τ) の分布をApollo 14 site の短周期月震計(SPZ)を用いて1ヶ月間調べた結果をFig.4-35に示す。これから τ は1~2min.以下としてよいことは明らかである。本来熱月震は4-3節の月震取得時間判定で棄却されているはずであるが、仮にデータ取り込みが行われていたとしても、隕石衝突、浅発月震と熱月震はrise-timeに明白な違いがあることを利用して比較的容易に判別することができる。

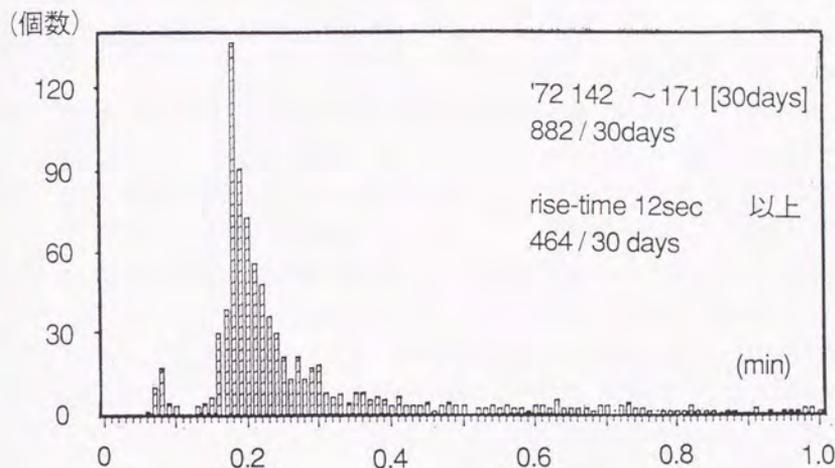


Fig.4-35 Apollo-14 site の短周期月震計(SPZ)の記録1ヶ月分を用いて調べた熱月震と近距離隕石衝突のrise-time分布。133秒以内にすべて納まっている(Araki et al., 1993)。なおrise-timeが10秒以内のイベントは、アポロ着陸船の接地部を源に持ち、レゴリスの運動に伴って発生するされている (Duennebier and Sutton, 1974)。

以上のように最初にあげた3項目は実現可能と思われる。本節の結果は下記のLUNAR-A月震伝送順位判定法の1と2に反映されている。ペネトレータのデータ処理部では、取得した月震の伝送優先順位を、E(excellent)、H(high)、L(low)の3クラスに分ける方針である。Eクラスは確実に欲しくすぐ必要な月震、Hクラスは確実に欲しい月震、Lクラスは余裕があれば送ってほしい、という想定である。Lはメモリがいっぱいになると重ね書きされるが、Hはされない。また標準としてのEは月震計のキャリブレーションデータや複数地点

で観測されたイベントのことである。ただし、ペネトレータで行なわれたクラス分類は、月震テーブルで優先的に地上へ送られるので、テーブルにあるエッセンスデータを参考にして変更することは可能である。ペネトレータ内部では以下の規準を満たす月震を自動的にHクラスと判断することになっている(NEC, 1994e)。

1. $15\text{min.} < \tau$ 、(遠距離の月震)。
2. $3\text{min.} < \tau < 8\text{min.}$ (深発月震)。
3. 4-3節で大月震(月震取得時間判定にて)と判定されたもの。
4. A_{max} (月震の最大振幅) が大きい。
5. A_{max} と A_{TBDD} の比による判断で継続時間が長いとされたもの。