

論文内容の要旨

論文題目 ペネトレータ搭載用月震計の改良と月探査への応用
(Improvement of the seismometer on board the penetrator and its application to lunar explorations)

氏名 山田 竜平

月・惑星の起源や進化に関する議論の進展においては、その天体内部の物質分布を理解する事が必要不可欠である。なかでも地震観測は天体の内部探査を行ううえで有力な手法となる。これまでの惑星探査の歴史において、唯一地球以外の天体で地震計を設置し地震情報を得ることに成功しているのは、1960-1970 代に実施された米国のアポロミッションである。アポロミッションでは月の表側に一辺約 1100Km の三角地震観測ネットワークが構築され、約 5 年半の同時連続観測が行われた。観測の結果、隕石衝突に加え、月内部に起因する地震（浅発月震や深発月震）が検出され、それらのデータを利用して 1970 年代から 2000 年代まで様々な月内部構造モデルが提示されてきた。しかし、これらの大きな成果の一方で、ネットワークの配置や大きさ、設置地震計の感度の制約などのため、観測された大部分のイベントは月の表側の震源で発生したものであり、未だコアを含む月中心部の構造（深部 1100Km 以下）や、裏側の構造については未解明の状態である。また、マンツルの速度構造分布についてもモデルによる差異が見られている。このように月でさえ、未だ球対称構造すら決定されていない状況であり、天体表面への地震計の設置と更なる地震観測データの取得が要求されている。

この現状に対し、月の中心構造の解明を目指し計画されたのが日本の LUNAR-A ミッションである。LUNAR-A ミッション自体は中止となったが、この計画を経て開発されたペネトレータ(PNT)はネットワーク観測に適した小型・軽量のハードランディングシステムであり、将来の月・惑星内部構造探査にとって強力なツールになると期待されている。また、ペネトレータに搭載される地震計（月震計）は小型・軽量かつ高感度なセンサーであり、

月震の卓越周波数である 1Hz 近傍でアポロ地震計の約 3 倍の感度を達成している。このペネトレータと搭載月震計を利用して、広域かつ高 S/N の月震観測ネットワークを構築することで、中心部や裏側を伝搬する月震を捉え、未知である月中心部・裏側構造の決定が期待できるようになる。

しかし、月震計においてはペネトレータに搭載しハードランディング時に加わる貫入衝撃を上回る衝撃(QT 条件)を加えたところ、その周波数応答が変化するという問題が生じていた。この変化により 1Hz での感度は 50%程度減少する。月震計は動コイル型の電磁式短周期地震計であり、小型なサイズを維持したまま 1Hz での高感度を実現するために、振子の両端に金属片を埋め込み、ケースに固定した磁気回路との間に働く吸引力を利用して、バネ自体の復元力を弱め周期延ばしを図っている (図 1)。周波数応答の変化の原因が調査された結果、この周期延ばし用の金属片、及び振子に使用しているいくつかの金属部材が帯磁している事が分かった。そこに衝撃が加わり、帯磁状況が変化することで、磁石との間の吸引力が変化したことが原因だと推察された。本研究では、まず衝撃後も月震計が仕様範囲内の周波数応答を維持できるように、この問題点に対する対策を施した。

その対策として、まず金属片、及び金属部材の材質をより残留磁化 (ヒステリシス) が少ない材質へと変更し、元々の帯磁が少なくなるようにした。また、製造時の月震計組み込み前に金属部材の消磁を行う工程も取り込んだ。更に、月震計は高感度化のためケースの中心に対して一組のコイルと磁気回路を対称に組み合わせた構造になっている (図 1)。そこで、この振子の両側での金属部材の帯磁状況を同じにするような製造管理工程も取り込むようにした。この対策の有効性を確認するために、対策後月震計をペネトレータに組み込み、再び貫入衝撃を加え、取り出した月震計の応答を調べた。その結果、月震計は仕様値の範囲内の周波数応答を維持し、対策が有効である事が示された。

実際の観測では、この月震計はペネトレータに搭載して使用される。しかし、月震計をペネトレータに搭載した状況での観測性能の評価は行われていなかった。月震計はペネトレータ内では調軸を行うための回転機構内に搭載されており、内部で摩擦車とベアリングにより支持されている。その摩擦車はシリコンゴム製であり、回転軸受けのベアリングの座には、衝撃時にベアリングが破損しないように金属バネが使われている。月震計をペネトレータに組み込んだ場合、このような弾性体による支持が月震計のカップリング状況を変化させ、観測波形に影響を与える事が懸念される。また、月震計のすぐ近くでは、電子機器が働いており、これらの電磁干渉が観測に影響を与える事も懸念されていた。そこで、本研究では対策後の月震計をペネトレータに組み込んだ状況での観測性能を調査した。

調査としては、内部に月震計を搭載し貫入衝撃を加えた後のペネトレータを名古屋大学の犬山地震観測所の坑道内に設置して、リファレンス地震計との比較観測を行った。リファレンス地震計としては、PNT の直近に単体の月震計 (ペネトレータに搭載されていない月震計) と物理探査用ジオフォン(L-4C)を設置した。特に犬山地震観測所内の常時微動は比較的大きな深発月震と振幅値が同等であり、月での振動状況があるレベルで模擬された

環境で比較が行われる事になる。観測の結果、ペネトレータ搭載月震計とリファレンス地震計の観測波形は極めて良く一致し、地震計保持の力学的な影響や、PNT 内部の電子回路による電磁気干渉も月震観測に影響を与えない事が分かった。

一方で、犬山と月面とでは環境が異なり、特に温度の差異が観測性能を変化させる事が分かった。そこで、貫入衝撃後に調べた月震計の周波数応答に温度変化の補正を加え、月面で実現されると予測される周波数応答とノイズレベルを推定した。その性能を用いて、アポロで観測された深発月震波形を基に月面で PNT により観測されうる深発月震波形を模擬した。この結果、PNT は月面上で予測される性能においてもアポロよりも良い S/N で月震を観測できる事が分かった。

更に、本研究では月面で得られるサイエンスゲインを拡張するため、月震計のノイズレベルの低減と周波数応答の拡張という観点で更なる性能の向上についても検討を行った。ノイズに関しては 1Hz 付近で卓越していると予測されるサスペンションノイズ（地震計振子の周囲のガス分子のブラウン運動により振子が振動する事で発生するノイズ）の低減を図った。このノイズは周囲のガス圧を下げる事で低減させることができ、月震計の内圧を 1Pa まで下げる事で $\sim 1/10$ まで低減できる事を実験的に確認できた。

また、周波数応答の拡張についてはアクティブ制御により月震計の広帯域化を図った。PNT 内では電力の制約が大きい、太陽電池などを用いてより電力制約が緩和できるランダー（軟着陸機）を用いれば、広帯域計を月面に設置し利用する事も可能である。本研究では特に短周期の月震計の高感度特性と耐衝撃性を維持した状態での広帯域化の手法について検討した。その結果、月震計は帰還回路を取り付けることで周期 20 秒まで高感度特性を拡張することができるが、一方で短周期側のノイズレベルが向上する事が分かった。このノイズは帰還回路の設計変更や、ローノイズアンプの使用、または短周期月震計自体の性能を向上させる事により低減させる事が可能であるので、広帯域計としての性能向上のためには月震計の構造自体の変化も含めた設計変更を行う必要があると考えられる。

以上より、本研究を通して改良・評価したペネトレータ搭載用月震計を用いれば、月面に広域ネットワークを展開して、良質な月震データを取得できるようになり、月の内部構造に関する新たな知見を得る事が可能となる。また、このネットワークに広帯域計の観測点を加える事ができれば、観測される長周期イベントの解析より、更に付加的な内部構造の情報を得る事ができるようになる。これらの新しい月内部構造の情報により、月の起源や進化に関する議論が急速に進展する事が期待される。

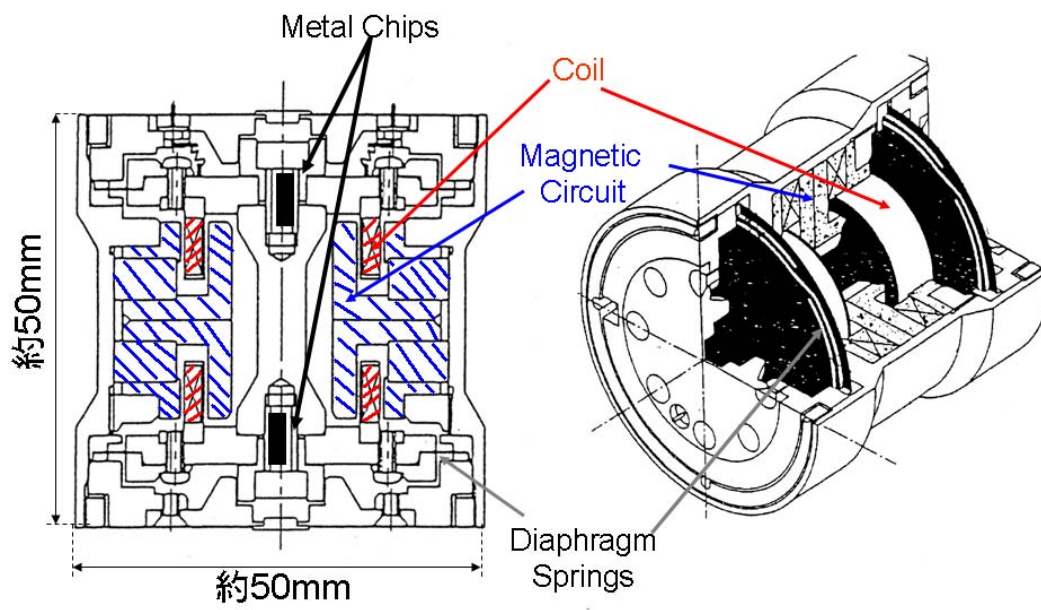


図1. ペネトレータ搭載用月震計（断面図と鳥瞰図）