

## LUNAR-A 月震計の磁気特性と長周期化

## Improvement of Seismometer onboard LUNAR-A Penetrator: Its Magnetism and Period Extension Method

# 白石 浩章[1], 綱川 秀夫[2], 田中 智[3], 山田 功夫[4], 高木 義彦[5], 藤村 彰夫[3], 水谷 仁[3]  
# Hiroaki Shiraishi[1], Hideo Tsunakawa[2], Satoshi Tanaka[3], isao yamada[4], Yoshihiko Takagi[5], Akio Fujimura[3], Hitoshi Mizutani[3]

[1] 宇宙研・惑星・比較惑星, [2] 東工大・理・地球惑星, [3] 宇宙研, [4] 名大・理・地震火山観測研究センター, [5] アカシ

[1] Res. Div. Planetary Sci., ISAS, [2] Earth and Planet. Sci., TITECH, [3] ISAS, [4] Research Center for Seismology and Volcanology, Nagoya Univ., [5] Akashi Co.

LUNAR-A ペネトレータに搭載される月震計は電磁式-速度検出型の短周期地震計である。LUNAR-A 月震計は月面貫入時の 5000G 以上の高衝撃に耐えるように設計されるとともに、過去のアポロ月震観測で使用された短周期および長周期地震計に比べて 10 分の 1 以下の小型・軽量化を実現している。また、極細線の信号コイルと磁気回路の改良による高い発電感度の実現と、磁気力による支持バネの復元力の無安定化を利用した長周期化を図っている。これにより微小な振幅の深発月震が検出可能な感度・周波数特性をもつことができる。本講演では LUNAR-A 月震計の構造、長周期化の原理および改良型センサーの性能特性について説明する。

LUNAR-A ペネトレータに搭載する月震計センサーは、永久磁石によるセンサー内部の静磁場とバネ振り子に一体化したコイルとの相対運動によって発生する誘導起電力を計測する速度検出型の短周期地震計である。LUNAR-A 月震計（直径 50 mm、長さ 50.5 mm の円筒形）は高い感度特性（10 V/kine 以上）を実現するために素線径 20  $\mu$ m の信号コイルと高い保持力をもつネオジウム系磁石を使用している。また、永久磁石の磁束密度の高さを生かすためのヨーク材としてパーメンダーを採用している。さらに、小型化を図る目的から円形・薄板状の 2 枚の Be-Cu 合金製ダイヤフラムバネを使用することで磁気回路も円筒形状にし、その磁気ギャップに発生する放射状磁界中を 3 箇所の螺旋形の梁で支持されたコイルボビンが相対変位する構造になっている。バネ振り子を構成する部分（可動部）は耐衝撃性および小型・軽量化の観点から感度軸方向の可動範囲（ $\pm 0.5$  mm）と固定部とのクリアランス（ $\pm 0.2$  mm）を必要最小限に抑制する設計になっている。

感度特性とともに地震計の重要な性能要素はその周波数特性である。アポロ月震観測で記録された月震波形、特に LUNAR-A ミッションの主要な観測対象である深発月震（深さ 700~1200 km で発生する月震）の卓越周波数が 1 Hz 近傍にあることから、LUNAR-A 月震計の感度も 1 Hz 付近においてアポロ月震観測で使用された 2 種類の月震計センサー（固有周期 1 秒の短周期月震計と固有周期 1.5 秒の長周期月震計）のそれを上回るような特性をもつ必要がある。固有振動数はバネ振り子と可動部でつくる力学系で決まり、固有振動数を下げる（長周期化する）には支持バネのバネ定数を小さくして復元力を弱めるか、可動部質量を増やすことで実現できる。一方で、LUNAR-A ペネトレータに搭載される月震計の可動部とセンサーケース間を繋ぐダイヤフラムバネの機械的剛性を小さくすることは貫入衝撃による破断や変形をもたらしたり、限られたクリアランスの中で可動部を月重力下において中立位置に保持することを困難にする。LUNAR-A 月震計に割り当てられた重量と容積、貫入衝撃に対するバネ材の強度などを考慮すると達成可能な固有振動数は 2.5 Hz 程度にとどまり、上記に述べた高い発電感度をもたらす信号コイルと磁気回路を採用したとしても 1 Hz 近傍においてアポロ月震計の感度を上回することは難しい。地球上で使用される広帯域地震計ではフィードバック型と呼ばれる周波数応答を操作する電子回路を付加することで長周期化を実現できるが、LUNAR-A ペネトレータの重量や電池容量の制約から同様の方式を採用することができない。そこで、LUNAR-A 月震計では磁気力によるバネの復元力の無安定化を利用した長周期化を図っている。磁気力による復元力の無安定化とは、センサー可動部内に炭素鋼製の強磁性体を搭載することで磁気回路からの漏洩磁束によって作用する磁気力をダイヤフラムバネの復元力の一部を打ち消す力として利用するものである。極微小なサイズの炭素鋼片を漏洩磁束に対して適切な位置に調整することで、可動部質量を増加させることなくバネ定数のみを小さくすることができる。磁気力を利用した長周期化を行うことで、バネ振り子の力学系のみで達成可能な 2.5 Hz 程度から 1.0~1.2 Hz にまで固有振動数を小さくしている。これにより LUNAR-A 月震計はアポロ月震計システムの 10 分の 1 以下の軽量化を実現しながらも長周期成分（peaked-mode）に比べて周波数 1 Hz 付近で約 3 倍、短周期成分に比べて約 5 倍の感度をもつことが可能になる。

これまでペネトレータ搭載用として小型・軽量化の厳しい制約条件を考慮しながら、耐衝撃性および感度・周波数特性の向上を図るために数多くの改良を重ねてきた。ペネトレータの月面貫入時を模擬した耐衝撃性試験において構成部品の耐性およびセンサー機能の保持については確認されたものの、貫入衝撃前後においてわずかに固有振動数の変化がみられることが懸念されていた。今回衝撃前後での特性変化について構成部品の磁気特性を中心に

検討を行い、原因究明と有効な対策を施して性能特性をさらに向上させた月震計センサーを製作した。