

リングコア磁力計センサの衝撃実験
—ペネトレータ型磁力計開発の基礎実験—

渋谷 秀敏*・宮川 龍洋**・眞下 茂***・永山 邦仁****・
森 保仁****・綱川 秀夫*****

(2001年11月16日受理)

Assessing the shock effects to the fluxgate magnetic sensor
for the lunar penetrator.

By

Hidetoshi SHIBUYA*, Tatsuhiko MIYAGAWA**, Tsutomu MASHIMO***, Kunihiro NAGAYAMA****,
Yasuhito MORI****, Hideo TSUNAKAWA*****

Abstract : In order to assess the feasibility of the penetrator magnetometer for lunar magnetic field fluctuation measurements, we examined the influence of the shock to the fluxgate magnetic sensor. We measured the magnetic susceptibility of the sensor core metal and sensitivity as used in a magnetometer before and after a big shock (10000G). Several experiments using four different fluxgate sensors showed that neither susceptibility nor sensitivity changed significantly after the exposure to the shock. This result indicates that the penetrator magnetometer has no fundamental difficulty.

要 旨

月面上に磁力計を設置する手段としてペネトレータ使用の可能性を探るためにフラックスゲートセンサの衝撃実験を行なった。フラックスゲートセンサの感度はコアの高透磁率金属の磁氣的性質に強く依存し、それは、衝撃から極めて甚大な影響が懸念される。そこで、実際にリングコアフラックスゲートセンサのコアを衝撃に曝し、帯磁率の測定と、センサの感度の測定を行なった。結果は帯磁率、感度とも、衝撃前と大きく変化することはないことが分かった。

*熊本大学理学部地球科学科 Department of Earth Sciences, Kumamoto University

**熊本大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

***熊本大学衝撃・極限環境研究センター Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumamoto University

****九州大学大学院工学研究院 航空宇宙工学部門 Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University

*****東京工業大学理学部地球惑星科学科 Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

1. 序 論

磁場変動の惑星内部への浸透，すなわち，惑星の電磁感応の測定は，惑星の内部構造を探る重要な手段である（例えば，Dyal *et al.*, 1976; Hood *et al.*, 1999）。そのための測定手段としてペネトレータで設置した磁力計の可能性について検討した。

ペネトレータを磁力計設置に用いるのは三つの利点が考えられるからである。

1. 磁場の時間変動のみを捕らえることができる

惑星の磁場探査で最も一般的な周回衛星での磁場測定では，磁場の空間変動と時間変動が分離されていないデータとして得られる。電磁感応の測定においては時間変動のみを取り出す必要があり，周回衛星では様々な仮定が必要となる。

2. 着陸機に比べて安い価格で設置できる

特に月のような対称性の低い天体の内部構造を調べるとなると複数の地点での磁場変動測定が必要となる。ランダーによる設置はコストの点から非常に難しく，ペネトレータを用いた複数点の同時観測ができて初めて詳細な研究が可能となる。

3. 温度変化が小さい

ペネトレータは月面から2 m程潜り込んで観測するので，月表面など，温度変化の激しい惑星でも観測温度の変化は少なくなる。磁力計の場合，温度によるセンサ特性の変動は大きいと考えられるので，この点も重要である。

ペネトレータ自身はLunar-Aで開発が進んでいるので（例えば，LUNAR-A概念設計書，1992），構体，エレクトロニクス，通信系などは基本的に新規設計の要素は少ない。しかし，磁力計固有の問題もいくつか解決しなければならない。

1. 磁力計センサへの衝撃の影響の評価

三成分磁力計として最も一般に用いられているフラックスゲート型磁力計は，高透磁率の金属（ μ メタルのコア）のヒステリシスの非線形性を用いて磁場を測定するものである。従って，コアの磁氣的性質が変化すると，磁力計の感度に影響を及ぼす。高透磁率金属の磁氣的性質が温度履歴や衝撃の影響を受けやすいことは広く知られた事実で，ペネトレータ突入時の衝撃が磁力計の感度に致命的な影響を及ぼす可能性が危惧されるところである。

2. 磁力計の消費電力の問題

フラックスゲート磁力計の消費電力は，例えば，セレーネ計画のものを例にとると4 W程度はある（SELENE計画 IICD, 2000）。惑星深部の電磁感応を計測するためには長周期の磁場変動を測定する必要がある上，都合の良い磁場変動の出現を待たなければならない点まで考えると，かなり長期間の磁場変動の観測が必要である。地中にもぐるペネトレータでは太陽電池は利用できず，一次電池だけで数カ月から1年程度の連続測定をするには電力消費量の削減が必要である。

本論では1. の磁力計センサへの衝撃の影響にしばらく，2. については，別途，議論する予定である。

2. 実 験

磁力計センサがペネトレータの月面突入時の衝撃に耐え得るかという問題を検証するために，磁力計センサを衝撃に曝して感度変化を調べる実験を行なった。

検体には，一般的な磁力計センサとして株式会社トーキンで製作されている磁力計センサ数種類と人工衛星

GEOTAIL（宇宙科学研究所）に搭載された磁力計センサと同型のセンサコアを使用した。磁力計センサをそのまま衝撃に曝し感度変化を調べる実験に先立って、リングコアセンサから μ メタルを取り出し、衝撃による帯磁率の変化を測定する実験と、取り出した μ メタルを再利用して作成した小さなリングコアセンサの感度変化を測定する予備実験を行なった。これは、渋谷、宮川、綱川が研究を企画した段階で入手可能な磁力計センサと、当初真下の協力で利用した熊本大学衝撃・極限環境研究センターの火薬衝撃銃の口径との兼ね合いからである。この衝撃銃の銃身の直径から決まる飛翔体サイズの上限から検体の直径が10.7 mmまでに制限される。当初、入手が比較的容易であった磁力計センサはこのサイズより大きかったので、センサ全体を衝撃に曝す実験はこの施設では行なうことができなかつた。しかし、検体を衝撃に曝す方法が試行錯誤段階であるために、繰り返し実験を行ない易い筆者の所属大学の施設が好ましいこと、また研究を始めた当時は他に利用できる衝撃施設がなかったこともあって、この衝撃銃で行なうことができる実験を予備実験とすることとした。ここで、大きく劣化するようであれば、それ以上の実験は不要で、ペネトレータ磁力計にはフラックスゲート型センサは適さないことになると考えていた。

2.1. 予備実験

予備実験で利用したのは熊本大学衝撃・極限環境研究センターのキー付火薬衝撃銃（Mashimo *et al.*, 1984）である。この銃の口径は28 mmで、しかも、飛翔体の回転を防ぐキーが一方に取り付けられている関係などで、検体の直径は10.7 mmまでに制限された。この銃で飛翔体内部に試料を搭載して回収する実験は今回が初めてであったので、飛翔体の的となる減速材、それをサポートするための治具等を準備した。

飛翔体は図1の形状である。飛翔体の主要部はステンレス鋼を用いた。通常は飛翔体の材料は銃身をいためないように樹脂が使われている。今回は銃身の保護のために銃身に直接当たる部分は樹脂で作り、そのなかにステンレス鋼の主要部を挿入した。樹脂の前半部分はポリカーボネイト、後半部分はポリエチレンを用いた。ポリエチレン部分の変形のしやすさが火薬から発生する高圧ガスをシールし、ポリカーボネイトで主要部をしっかりと支えるためである。二つの樹脂のつなぎ目に小磁石を設置し、飛翔中にコイルを横切らせて速度計測を行った。主要部の中に収まるポリエチレン円筒を用意してそれを加工して試料を取めた。

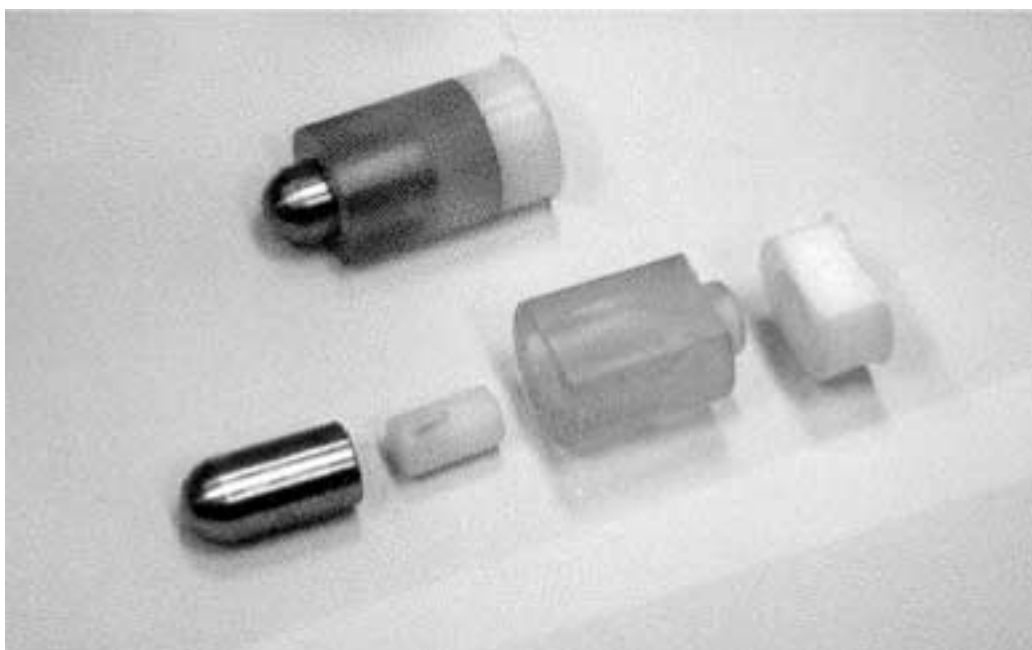


図1 予備実験用飛翔体の概観

減速材にはポリエチレンの丸棒（ ϕ 100 mm 長さ 250 mm）を用いた。測定室（Measurement Chamber）中でこの棒を支えるためと、予想より減速効率が悪く、飛翔体や減速材が飛び散ったときの測定室の保護のための治具を作成した。材質にはいずれも軟鉄を用いた。実験に先立って減速材が適切かどうか見るために試射を1回行なった。上記のようにこのような回収実験は初めてであったので、うまく止まるかどうか不安であったが、ポリエチレンは丁度良い硬さを持っていたようで、幸運なことに計画通り数十cm走ったところで飛翔体は止まった。それで、予備実験の減速材にはポリエチレンの丸棒を用いることとなった。

2.1.1. 予備実験1

予備実験は2種類行なった。最初の予備実験では磁力計センサコアの μ メタルを衝撃に曝しその前後で帯磁率の変化を調べる実験を行なった。透磁率がセンサの感度に直接かかわる特性であるが、帯磁率と透磁率が比例関係にあることから、この実験では測定が簡単な帯磁率を測定した。測定には熊本大学の Bartington MS-2 帯磁率計を用いた。

試料には3種類の磁力計センサを使用した（図2.A,B,C；Dは後の本実験でのみ使用）。予備実験1で、都合、3

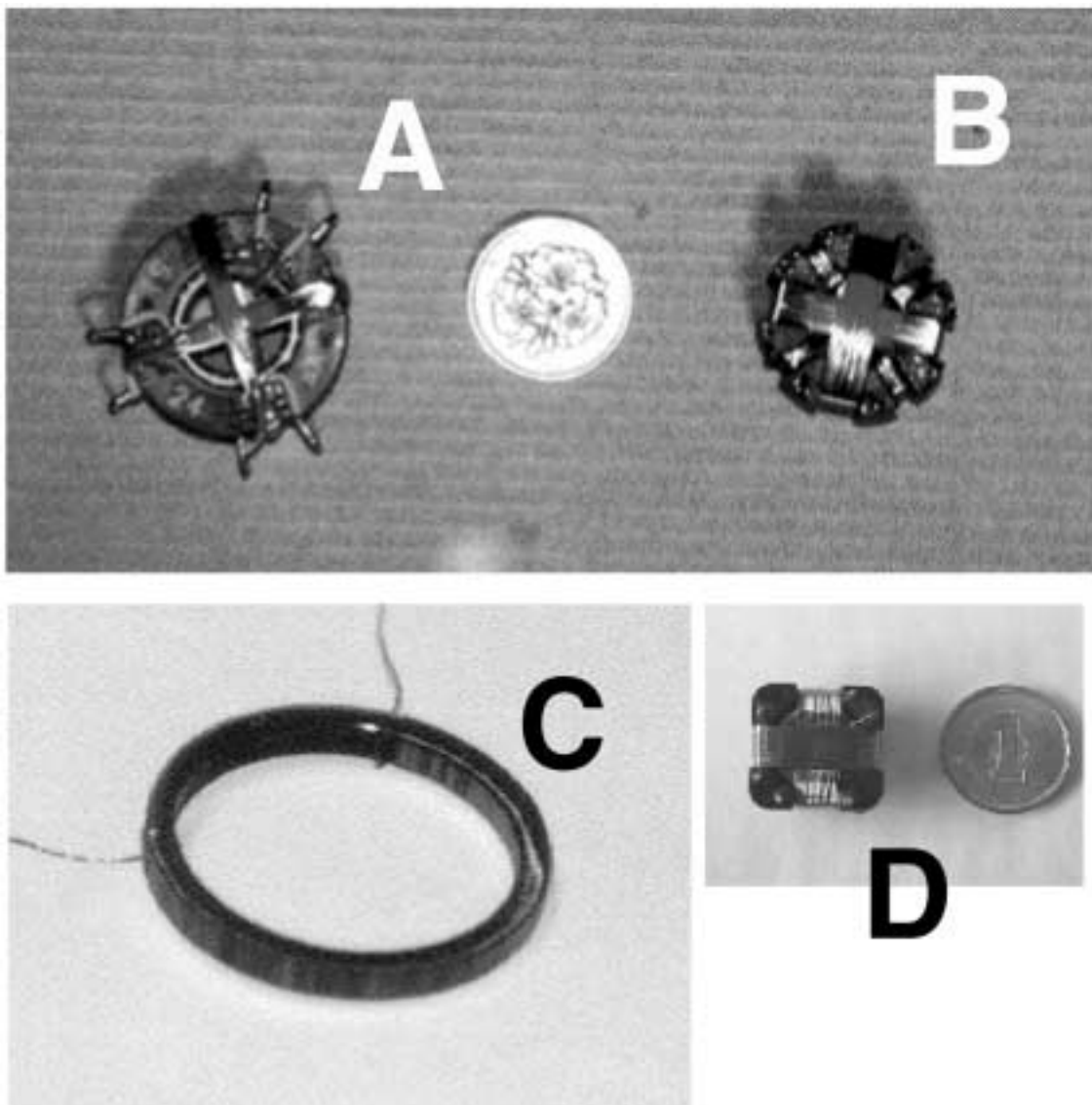


図2 使用したリングコアセンサの外観

shot行なったこととなる。このうち2種類（以下センサA,B）が株式会社トーキン製作の磁力計センサコアの μ メタルである。これらは高感度磁力計センサとして市販されているものではないが、夏原技研(株)のスピナ磁力計のセンサとして利用されているもので、同磁力計がスピナ磁力計としては一般的な感度を有しているので、入手し易く高性能であるこれらのセンサを試料として用いることにした。検体A、Bともに詳しい技術情報は入手できていないが、検体Bについては(株)トーキンから販売されているTMC-2000方位計モジュール用のセンサであることが分かっている。センサの残りの一種類は人工衛星GEOTAILにて磁場観測用磁力計センサとしての実績のあるセンサ（以下センサC）コアの μ メタルを使用した（図2C）。

まず、センサを分解して μ メタルコアを取り出した。センサAのコアはフォイル状で、幅3.0 mm、厚さ0.0076 mm、質量0.18 gであった。センサBのコアはリング状（内径13.0 mm、外径17.5 mm、厚さ0.11 mm、重量0.095 g）のものが2枚入っていた。センサCについてもフォイル状で、幅1.6 mm、厚さ0.012 mm、質量0.097 gであった。

これらから、A、B、Cそれぞれ、1.0 mg、6.9 mg、0.32 mgを取り出して、ポリエチレン円柱に切ったスリット中に埋め込み、アラルダイト（AR-R30）で固定した後に初期帯磁率を測定した。本来、帯磁率を測定するためには、試料と同じ大きさ形で既知の帯磁率を持った標準試料との比較が必要であるが、今回の実験では衝撃実験前後の比較が目的であるので、帯磁率計の読みをそのまま帯磁率として報告する。帯磁率計の測定範囲として妥当なものであることを示す以上の意味はない。

帯磁率の測定は試料が小さいことから試料の位置によるばらつきに注意して、数回置き直して測定し、1%以下の誤差であることを確認した。

試料を組み込んだ飛翔体の質量は46 g～46.8 gで、600 m/s程度の速度を得るために10.4 g～13.0 gの火薬を使用した。実際のペネトレータの貫入速度はLunar-A 概念設計書（1992）によれば、250～300 m/s程度であるが、それ以下の火薬量での実験は十分な経験がないのでこの速度を目標として設定した。実際の速度はA:662 m/s、B:672 m/s、C:579 m/sであった。ここで、飛翔体の速度の設定はペネトレータの速度を目安としたが、これは、加速度と停止距離の双方を再現することは出来ないので、時間が短い分大きめの加速度で実験し、試料に

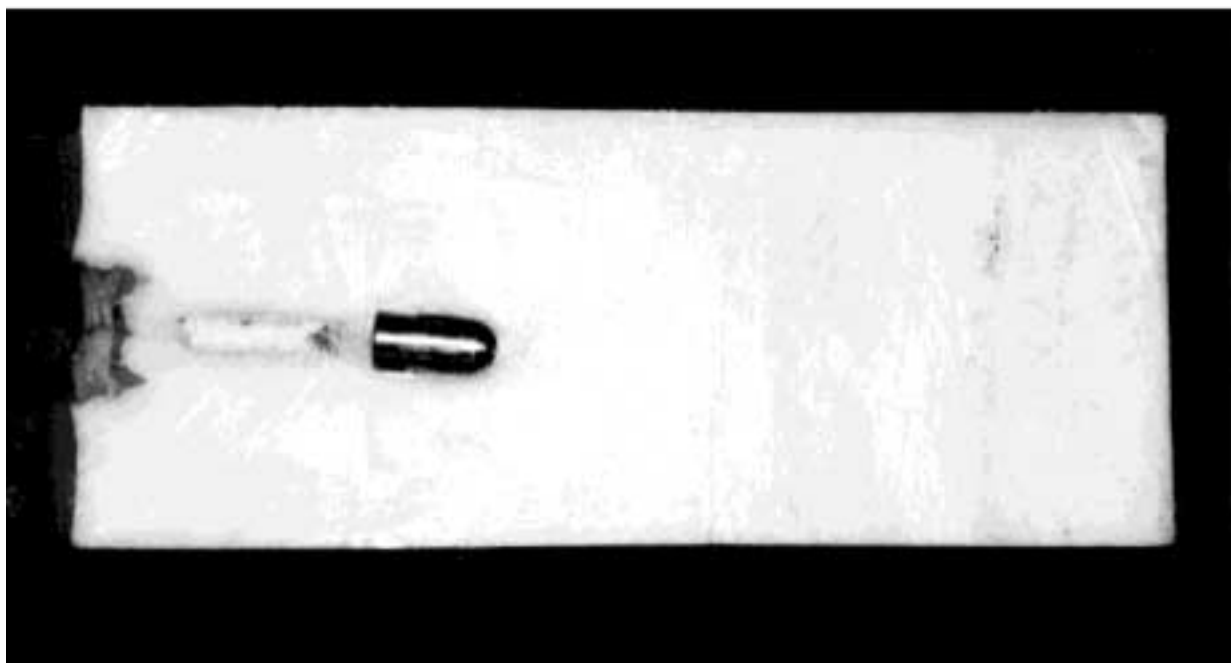


図3 弾丸を打ち込んだ後の衝撃吸収材の断面

表1 予備実験結果

		予備実験 1			予備実験 2	
		検体 A	検体 B	検体 C	検体 A	検体 C
検体質量 (mg)		1.0	63.9	3.2	9.1	26.4
飛翔体質量 (g)		46.5	46.8	46.0	47.5	47.1
火薬量 (g)		12.9	13.0	10.4	11.2	10.8
速度 (m/s)		662	672	579	622	628
飛翔体貫入距離 (cm)		13.2	12.9	10.4	13.0	12.9
平均加速度 (10^6m/s^2)		1.66	1.75	1.61	1.49	1.53
G (10^5)		1.69	1.79	1.64	1.52	1.56
帯磁率 (10^{-5}SI)	衝撃前	507	1219	473		
	衝撃後	212	1218	386		
	比	0.42	1.00	0.82		
感度 (V/mT)	衝撃前				20	12.1
	衝撃後				17	12.0
	比				0.85	0.99

帯磁率の測定では試料体積及び形状の補正を施していないので、絶対値には帯磁率計の測定範囲として妥当なものであることを示す以上の意味はない。

変化がなければ良いとの方向性で決定した。

飛翔体の樹脂部分は減速材表面で留まり、金属部分のみが減速材の中に貫入していた (図 3)。減速材を切り出し、飛翔体を確認して、貫入距離を測定した。貫入時の加速度は減速が一定であると仮定して計算した。これらの値は表 1 にまとめられている。

取り出した試料を実験前と同様に帯磁率を測定した。この測定値も表 1 にまとめた。

2.1.2. 予備実験 2

予備実験 2 では、フォイル状のコアを持っていたセンサ A と C から取り出した μ メタル箔をプラスチックのリングに巻き、それに、1 次、2 次コイルを巻いて、フラックスゲートセンサを作成し、衝撃による感度変化を測定する実験を行なった。磁力計の回路は図 4 に示す簡単なものを自作した。磁場は、直径 26 cm 長さ 80 cm の μ メタルシールド中に直径 7.6 cm、長さ 24 cm、24 巻のコイルを置き、磁場を発生して、20 ~ 30 点の磁場で磁力計の出力電圧を読み、回帰直線から感度を求めた。

センサ A については長さ 7.3 cm (9.1 mg) を用い、プラスチックのリング (内径 5.25 mm、外径 8.00 mm、長さ 5.10 mm) に巻き付けセンサコアとした。これに導線 $\phi = 0.32$ mm を巻き付け一次コイル (47 巻) と二次コイル (35 巻) とした。

センサ C については長さ 12.6 cm (26.4 mg) を用い、同様の (長さは 3.85 mm) プラスティックリングに巻き、一次コイル (45 巻) と二次コイル (25 巻) を同様の導線で巻いてセンサとした。

作成したセンサを飛翔体に安定して収めるために、センサ全体をアラルナイト及びポリエチレンで固めて円柱

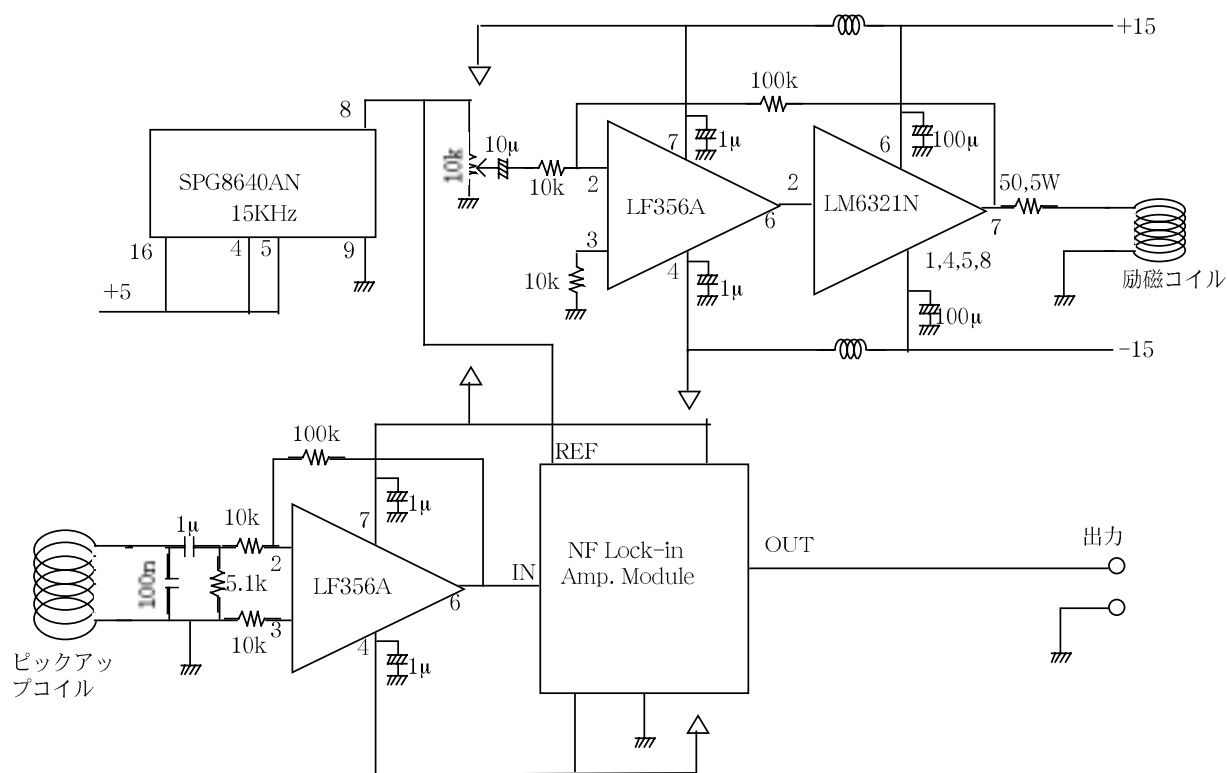


図4 磁力計回路図

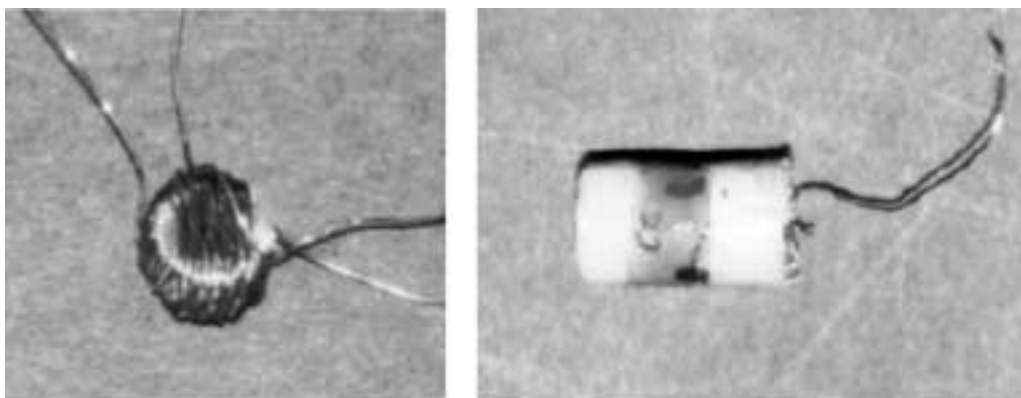


図5 自作簡易センサ：左のようにコイルを巻き、右のようにポリエチレンの円柱に納めて、飛翔体の検体室に入れた

状の飛翔体の検体室を充填する形にした（図5）。この状態で感度を測定し、衝撃にさらした。衝撃実験の条件は、予備実験1と同等であった。飛翔体を回収した後、同様にして感度を測定した（図6）。これらの値も表1にまとめた。

2.1.3. 予備実験の結果のまとめ

予備実験1, 2を通じて飛翔体から取り出した検体は目視では衝撃実験前と変化はなかった。予備実験2の結果を予備実験1の結果と合わせてまとめると表1のようになる。帯磁率は試料A, B, Cで、それぞれ、58%, 1%, 18%減少した。また、感度は最大15%程度減少したものも見られる。当初より、衝撃による特性の変化はある程

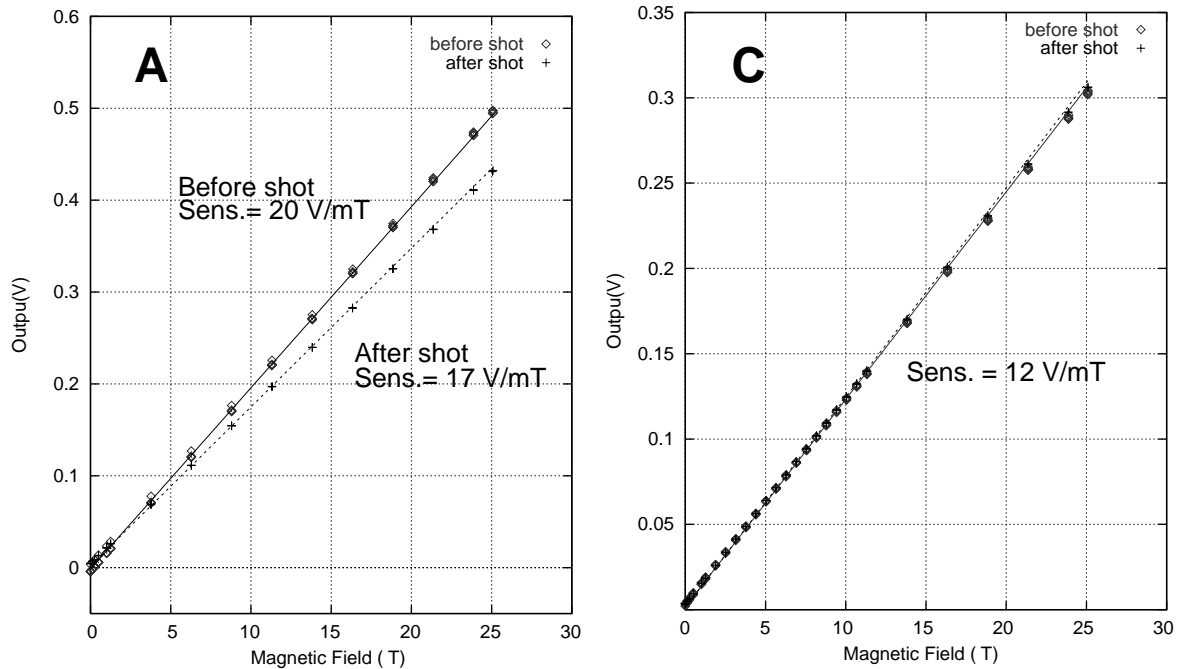


図6 自作簡易センサの衝撃に曝した前後の感度

度覚悟しており、感度が桁で変化するようなことのない限りはペネトレータ磁力計として利用することは可能であろうと考えていた。予備実験の結果を見る限りは、衝撃の影響はペネトレータ磁力計の実現をさまたげるものではないように思える。

2.2. 本実験：衝撃による既成センサの感度及び磁氣的性質の変化

予備実験の結果から、衝撃にさす前に μ メタルを加工せずに感度変化を測定するの必要を感じた。そこで、永山、森、の協力を得てセンサがそのまま入る飛翔体を使用できる大口径衝撃銃を利用することとなった。この九州大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻の空気銃 (Mori and Nagayama, 1995) は口径が 40 mm と大きく、飛翔体の検体室の直径を 30 mm 程度確保することができた。この銃でも予備実験に用いた火薬衝撃銃と同様に、通常は検体に飛翔体を衝突させるという方法で使用されている。検体を組み込んだ飛翔体を減速材に打ち込み、後に検体を回収するといった方法で使用されているものではないため、今回の実験を行なうために飛翔体と減速材を収めるサポートを新たに設計した (宮川, 2000 MS)。

飛翔体及び減速材サポートの構造は基本的に予備実験の火薬衝撃銃の場合と同様であるが、各部とも直径が大きくなっている (図7)。この銃ではレーザー光のインタラプタを用いて飛翔速度を測定している。

今回の実験では特別に作成した飛翔体を使用することから、この銃で通常使用されている飛翔体の質量とガス圧から飛翔速度の推定値を求める経験則が使えない。したがって、検体センサの代わりに飛翔体の検体室をポリエチレンで充填した模擬弾で用いた試射を行っておよその飛翔速度を決定した。これにより本衝撃銃で最大 200 m/sec 程度の速度で、準備した飛翔体を飛ばせることができることが分かった。本実験では全てこの速度を目標にガス圧を設定した。

本実験では飛翔体の質量が予備実験の 3 倍程度と重くなるものの、飛翔速度が 1/3 と小さくなり、また、飛翔体の直径が 3 倍程度と大きいために予備実験と同様にポリエチレン丸棒を減速材として使用すると貫入距離が非常に短くなるのではないかと考えた。貫入距離があまりに短くなると検体に巨大な加速度がかかり磁力計センサが破壊する恐れがでてくるため、飛翔体が減速材中を適度に走って停止する適度な強度を持った減速材が必要

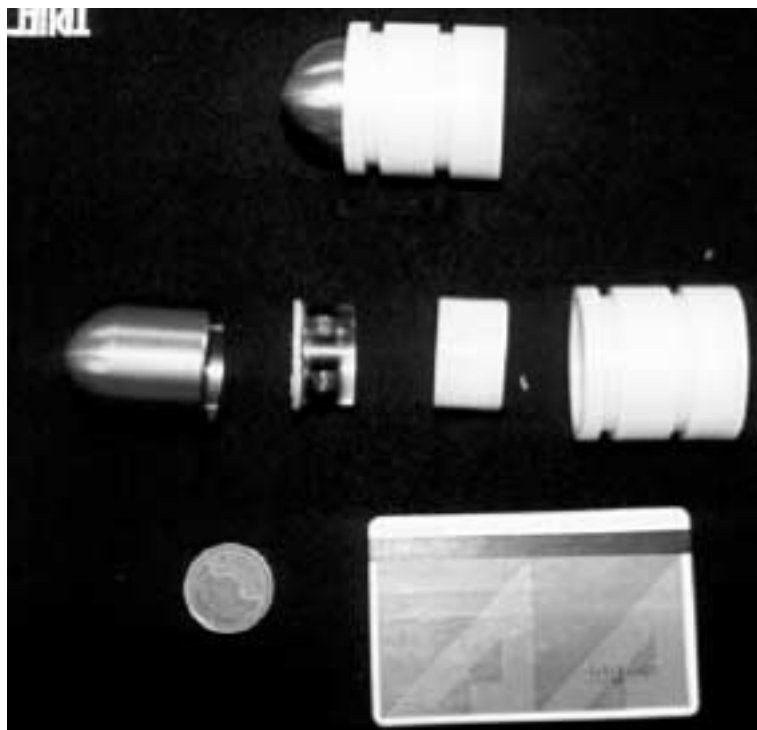


図7 本実験用飛翔体の写真:センサは樹脂（透明）によって固めてポリエチレンのケースに収める。これをステンレス鋼のキャリアに格納する。

となる。

しかし、適当な素材がなかったので、ポリエチレン円盤を間隔を開けて並べたものを減速材として使用することにした。用意したものは厚さが10 mmと5 mmのポリエチレンの円盤と円盤を一定間隔で配列するためのスペーサである。スペーサは厚さ5 mmの円盤の中心を円形にくり貫いたものを使用した。ポリエチレン円盤の厚さと円盤を配列する間隔を調整することで減速材の強度を調整することができる。以下ではこの減速材を層構造減速材と呼ぶ。

減速材を決定するために計3回の試射を行なった。最初の試射で減速材に予備実験と同様にポリエチレン丸棒を使用した。飛翔体は減速材に貫入せずに、表面で跳ね返る結果となった。したがって、準備していた層構造減速材を使用することにした。2回の試射を行ない減速材円盤の厚さ及び円盤の間隔を決定した。結局5 mm厚の円盤を20 mm間隔で配列したものを減速材として採用した（図8）。さらに、飛翔体がポリエチレン円盤を完全に貫通するのを防ぐために、減速材の一番端に長さ70 mmのポリエチレン丸棒をおいた。この設定の減速材では飛翔体のサポート部が2枚目の減速材円盤でトラップされて、キャリアの部分のみが更に突き進む。結局、検体を収納するキャリアは7枚目の減速材円盤にトラップされ、減速材の突入面からおおよそ21 cmのところまで停止した（図8下）。これによって検体を約1万Gの加速度に曝すことができた。

本実験ではもう一種類の小型の磁力計センサ（検体D；図2参照）を入手し、使用した。これも検体A、Bと同じく（株）トーキンが製作しているもので、型番はTFMS-18201sである。このセンサは方位計としてカーナビゲーションシステム等に利用されているものである。コアにはセンサBと同様の外径11.0 mm、内径9.0 mm、厚さ0.106 mm、質量0.028 gのドーナツ状の μ メタルが2枚重なっていた。コイルの巻数は一次コイル178巻、二次コイル125巻であった。

検体A、B、C、Dのうち検体Cは大口径の飛翔体にも入らなかったため、残りの3種の検体で実験を行なった。

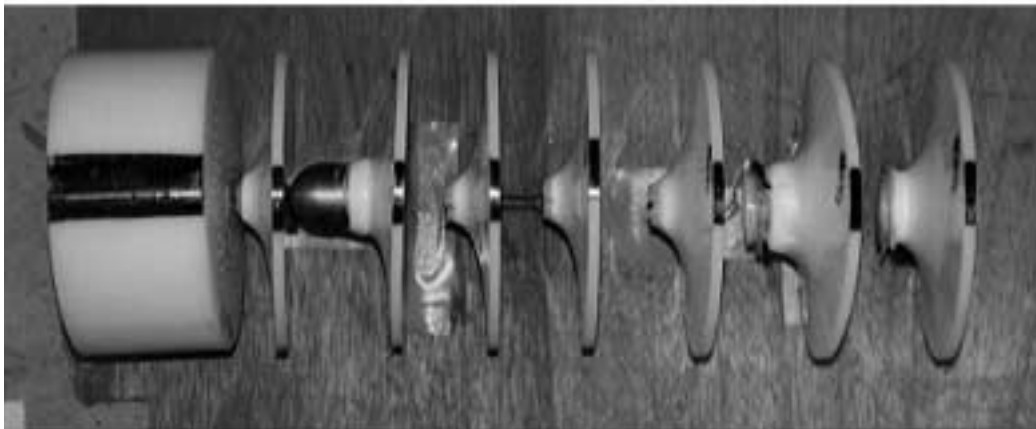
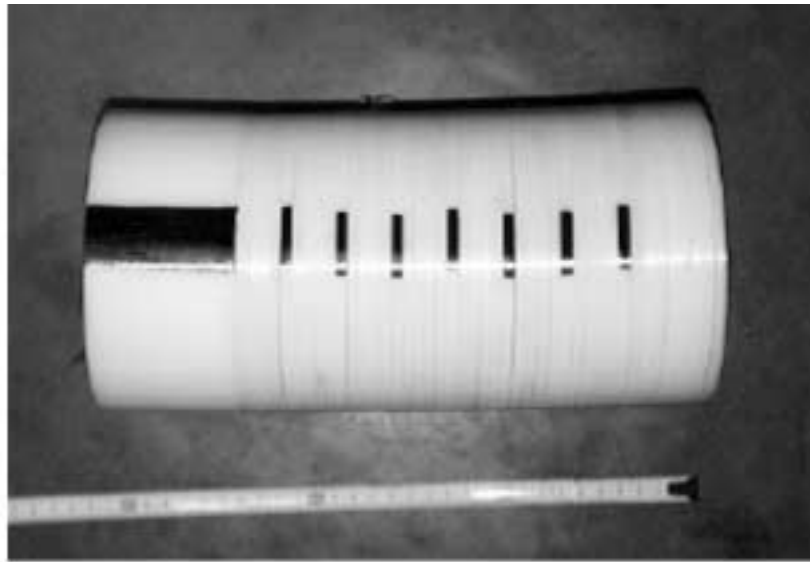


図8 層構造減速材。

打ち込み前（上）：ポリエチレン円柱のうち黒のマークがついている部分が減速材。残りは円盤の中心が円形にくり抜かれたスペーサである。

打ち込み後（下）：突入面から2枚目で飛翔体のサポート部がトラップされて、7枚目でキャリアが停止している。

今回の実験ではセンサを飛翔体に安定して組み込むために光硬化樹脂（マルトールアクリルワン#1320）で円柱状に固めて検体とした。この状態で、予備実験2と同様に感度と帯磁率を測定した。

検体を組み込んだ飛翔体の質量は157g前後で、200 m/s程度の速度で減速材に突入し、20 cm程度走って止まっている。センサBの実験では速度の測定に失敗したが、同じ圧力、同じ飛翔体での3回の試射と2回の実験計5回が安定して200 m/s程度を示しているので、同様の速度であったと考えられる。その結果、検体は約1万Gの加速度にさらされたこととなる。取り出した検体を衝撃にさらす前と同様に感度（図9）と帯磁率を測定した。

表2にまとめた結果を見ると分かるが、いずれのセンサでも感度、帯磁率ともに変化は非常に小さかった。また、目視での変化もまったく見られなかった。予備実験では、それでも帯磁率が半分以下になる試料もあり、変化が見られたのに対照的である。この違いの原因は定かではないが、埋め込んだ樹脂のサポートの違いによるものではないかと思われる。予備実験では、試料をアララルライト（ARR30）で固め、ポリエチレンの円柱に埋め込

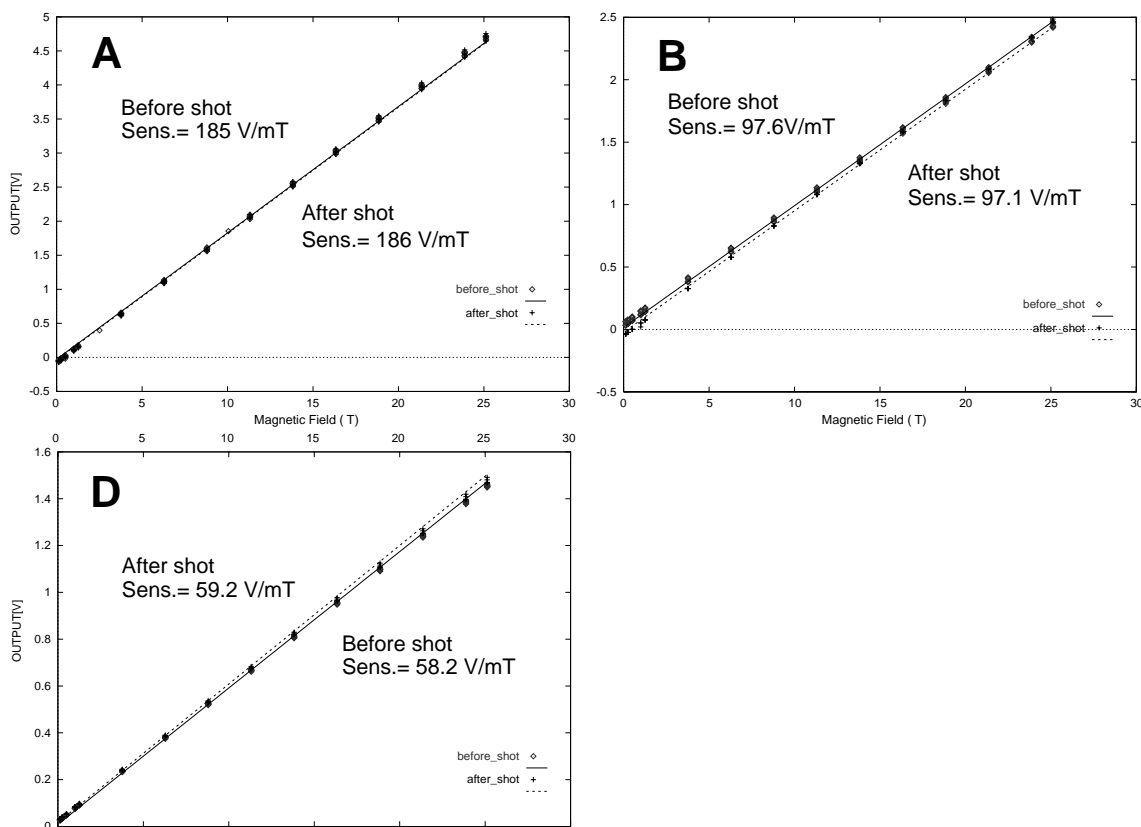


図9 センサ A, B, D を衝撃に曝した前後の感度

表2 本実験結果

検体名		検体 A	検体 B	検体 D
飛翔体質量 (g)		157.6	157.4	156.2
速度 (m/s)		204.8	(200)	201.8
飛翔体貫入距離 (cm)		20.9	20.7	20.6
平均加速度 (10^4m/s^2)		10.0	(9.7)	9.9
G (10^3)		10.2	(9.9)	10.1
帯磁率 (10^{-5}SI)	衝撃前	4723	241	94.6
	衝撃後	4662	242	93.6
	比	0.99	1.01	0.99
感度 (V/mT)	衝撃前	185	97.6	58.2
	衝撃後	186	97.1	59.2
	比	1.00	0.99	1.02

検体Bの速度は本文にあるように測定できなかったが、200 m/sであるとして参考値を記載した。帯磁率の測定では試料体積及び形状の補正を施していないので、絶対値には帯磁率計の測定範囲として妥当なものであることを示す以上の意味はない。

んだのに対し、本実験では光硬化樹脂（マルト-アクリルワシ#1320）で固めている。この光硬化樹脂はアラライトやポリエチレンより硬く、センサの構造を作っている樹脂の強度にこれらよりは近そうである。その結果、強度的に近い材料の円柱となり、一様な加速度を受けた時の変型が少なかったものと思われる。

いずれにせよ、今回の結果は適切に樹脂で固めておけば、フラックスゲートセンサは衝撃に曝しても感度等磁気的性質の変化は非常に小さいことを示している。従って、フラックスゲート型磁力計をペネトレータに搭載することは可能であると考えられる。

謝 辞

熊本大学衝撃・極限環境研究センターの皆さんには衝撃実験のお手伝いを頂いた。株式会社夏原技研の夏原信義さんにはセンサの入手ならびに御協力頂いた。記して謝意を表す。本研究経費の一部は、1998～1999年度搭載機器基礎開発経費「月・惑星ペネトレータ磁力計用センサの衝撃実験」により充当された。

参 考 文 献

- Dyal, P., C. W. Parkin and W. D. Daily, Structure of the lunar interior from magnetic field measurements, *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 7th, 3, 319-337, Pergamon, New York, 1976.
- Hood, L. L., D. L. Mitchell, R. P. Lin, M. H. Acuna and A. B. Binder, Initial measurements of the Lunar induced magnetic dipole moment using Lunar Prospector magnetometer data, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2327-2330, 1999
- Mashimo, T. and K. Ozaki, Keyed-powder gun for the oblique-impact shock study of solids in several 10s of GPa, *Rev. SCI. Instr.*, 55, 226-230, 1984.
- Mori, Y. and K. Nagayama, Precision optical observation system for shock waves in condensed media in 1 GPa pressure region, *Proc. the Second Symposium on High Speed Photography and Photonics, Japan*, 159-193, 1995.
- 宇宙科学研究所SESデータセンター：LUNARA概念設計書，1992.
- 宮川龍洋：固体惑星の磁場測定に用いるペネトレータ型磁力計開発のための基礎研究，熊本大学大学院自然科学研究科修士論文，2000