

宇宙・野外および常時観測用 微分型磁力計の開発*

齋藤 尚生**・湯元 清文**・田村 忠義**
山内 美佐子**・瀬戸 正弘***・早坂 孝***
赤間 芳雄***

Development of new time-derivative magnetometers
to be installed on spacecrafts

By

Takao SAITO, Kiyohumi YUMOTO, Tadayoshi TAMURA,
Misako YAMAUCHI, Masahiro SETO, Takashi HAYASAKA and
Yoshio AKAMA

Abstract; The fundamental formula $S_A/N = 5 \cdot 10^{-7} \pi^2 L^2 / \{\ln(2L/D) - 1\}$ is reappraised to construct the most appropriate search-coil sensor for each of the three ways; routine observation at permanent stations, temporally observation at field stations, and space observations at spacecrafts. Calculation of the sensitivity and the coil weight derives an important conclusion that a direct winding around a slender core minimizes the net weight for a reasonable sensitivity. The most appropriate sensors according to our calculation are $l = 2000$, $d = 20$, $N = 10^5$ for the permanent stations, $l = 1000$, $d = 20$, $N = 10^5$ for the field stations, $l = 400$, $d = 5$, $N = 2 \cdot 10^4$ for the spacecrafts, respectively, where l and d are the length (mm) and diameter (mm) of the core, respectively, and N is the number of the coil winding. A new idea to connect the search-coil sensors is proposed. Another new idea proposed herewith is to filter out the output signals from a high-sensitive ring-core magnetometer.

1. 緒 言

この論文では我々研究グループによって開発されてきた微分型磁力計の開発進展の順序に

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東北大学理学部

*** 東北工業大学

従って、常時観測用、可搬用、人工衛星搭載用の三段階に分けて以下述べることにする。

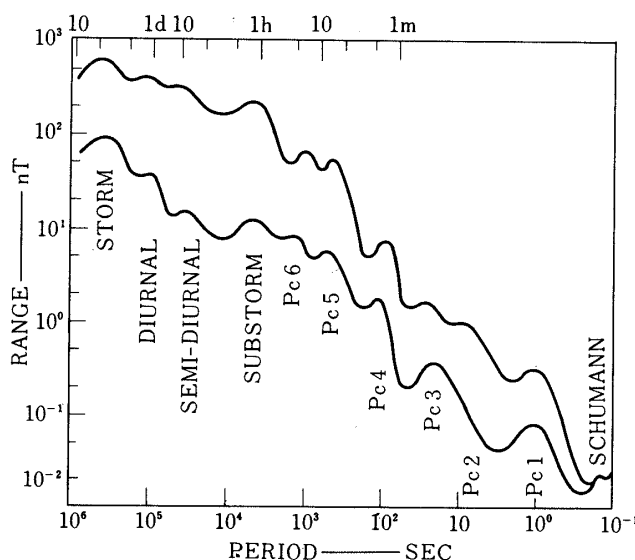
2. 常時観測用誘導磁力計検出器

一般に ULF 磁波を計測する場合に、search coil 方式のほかに例えば SQUID の様な高感度磁力計出力の低周波部分を filter で cut する方式が考えられる。ところが磁場変動の振幅は、Pc1 から Pc6 までの脈動、substorm、日変化、磁気嵐に至る 10^7 程度の幅広い周波数 range にわたって frequency に逆比例する spectrum を持っている（第1図）ので、この意味では sensor 部分で始めから全部微分される induction type つまり search coil の方が優れている。そこで induction sensor を如何に設計するかが問題になるが、sensor は、何故か加藤等（1949）によって最初に設計されて女川観測所に設置されて以来、世界中でほとんど寸法が一定しており余り疑問を持たずに各地で同じ物が作られてきている様である。そこで常識にとらわれずにはじめから設計をし直してみることにする。

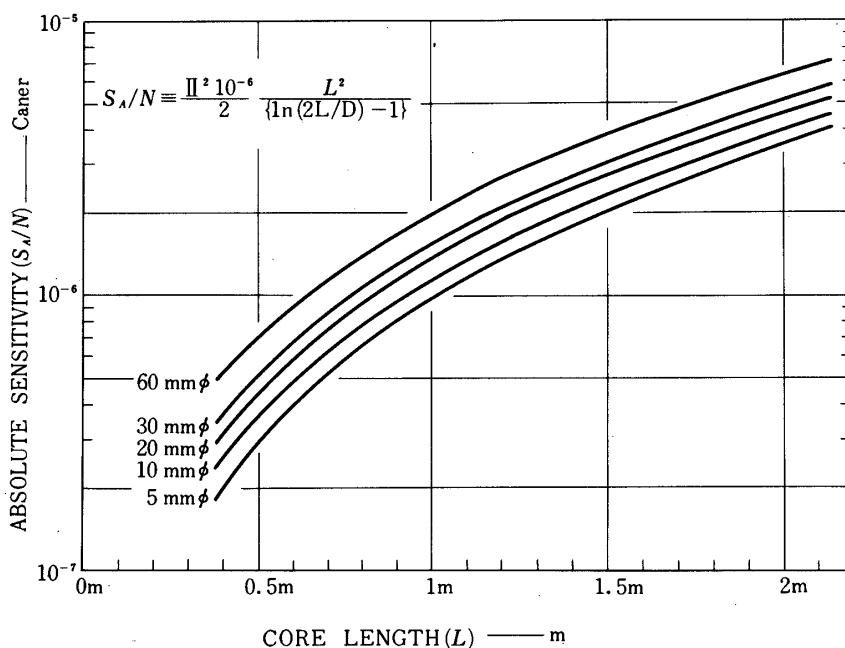
今、core length に対して core diameter を parameter にして sensitivity curve を書いてみると理論式は次の様になるので第2図に見られる様に、長さは長い程、core 直径は大きい程感度が高くなるという常識通りの結論が得られる。

$$S_A = \frac{\pi^2}{2} \times 10^{-6} L^2 \{ \ln(2L/D) - 1 \}^{-1} N$$

今 anneal する炉の size からして制限があるので core の長さは 2 m が限度となる。そこで core length は 2 m に固定して次に coil をどの位の長さの捲いたらよいかを考える。今 core



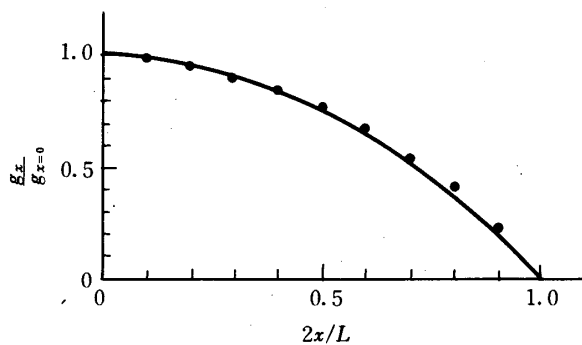
第1図 磁場変動の周波数に対する平均的な振幅



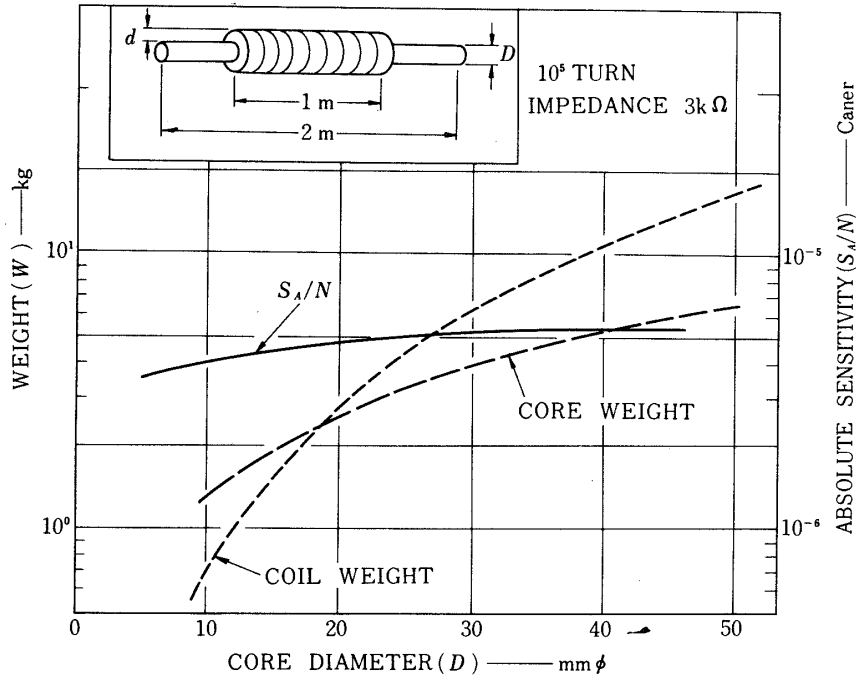
第2図 Permalloy core の長さ と 直径 に対する 絶対感度 曲線

中心からの距離を横軸にとると μ の実効値は第3図の様になり、coil length は core length 半分、つまり 1 m 程度が良いという結論が得られる。そこで次に coil 長 1 m、捲数 10^5 、impedance $3K\Omega$ と固定して、core diameter を変えてやると、感度、core weight、coil weight は第4図の様になる。

第2図で述べた様に core diameter を大きくすればそれだけ flux が増大して感度は上るの



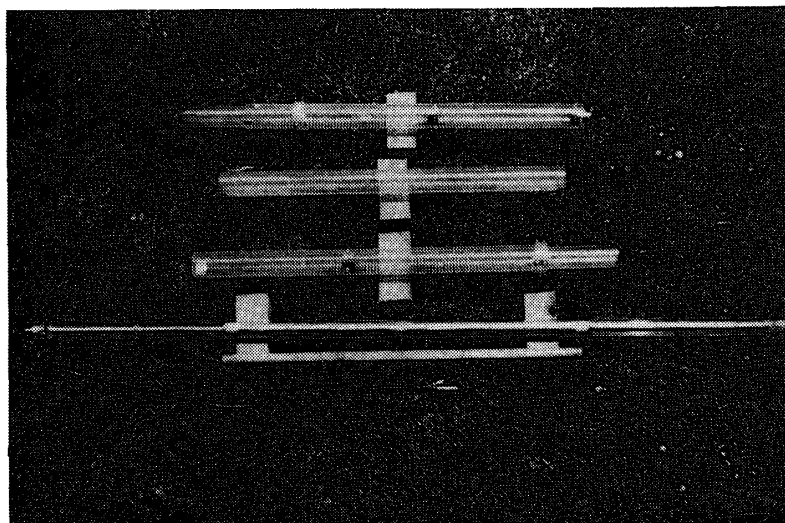
第3図 core の中心からの距離に対する磁束増幅度分布



第 4 図 直径 D の core に長さ 1 m, 捲数 10^5 , coil impedance $3\text{K}\Omega$ の coil を捲いた時の重量及び感度曲線

で、かって 7 本の core を束ねて感度をかせぐ実験が行われたこともあるとの事であるが、定量的には感度はほとんど頭打ちになってしまっていて重量の方は 10 倍以上になってしまうので断面積を大きくすることは得策ではない、何故頭打ちになるかの理由は前記の式で dimension ratio の log が入ってくるからである。又、今まで習慣的になされていた様に検出 coil の内側に感度 coil を捲いたりボビンを何層も使ったりすると、ちょっと設計に油断すると coil 内径が簡単に core 直径の 2 倍近くになる。そうすると途端に重量、体積共 5 ~ 6 倍にはね上ってしまい、turn 数は相対的に減ってしまうので、coil はじか捲きにした方がよいという結論がここから導き出される。

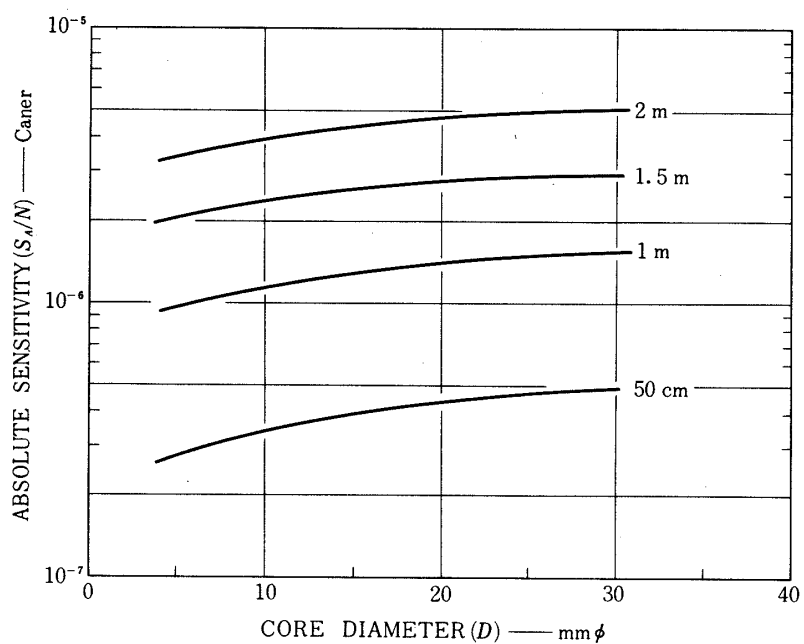
そこで 2 m にじか捲きすると、常時観測用の決定版として第 5 図の様に smart な sensor ができ、今、日本で現役で使われている中で一番重い 80 Kg のものと比べると重さは 7 分の 1 で感度は一桁近く改善されたものができた。つまり、じか捲きというのは何でもない idea の様であるが、感度を高めるのには大変有効である事が分る。



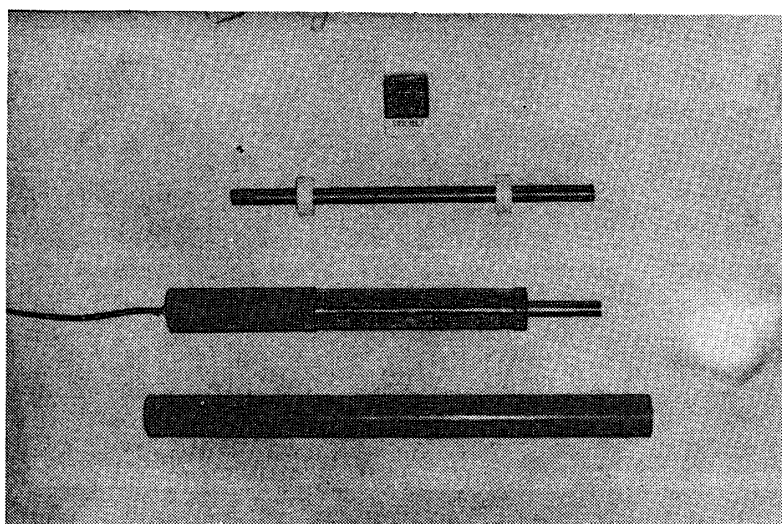
第5図 station 用 search coil

3. 可搬型誘導磁力計検出器

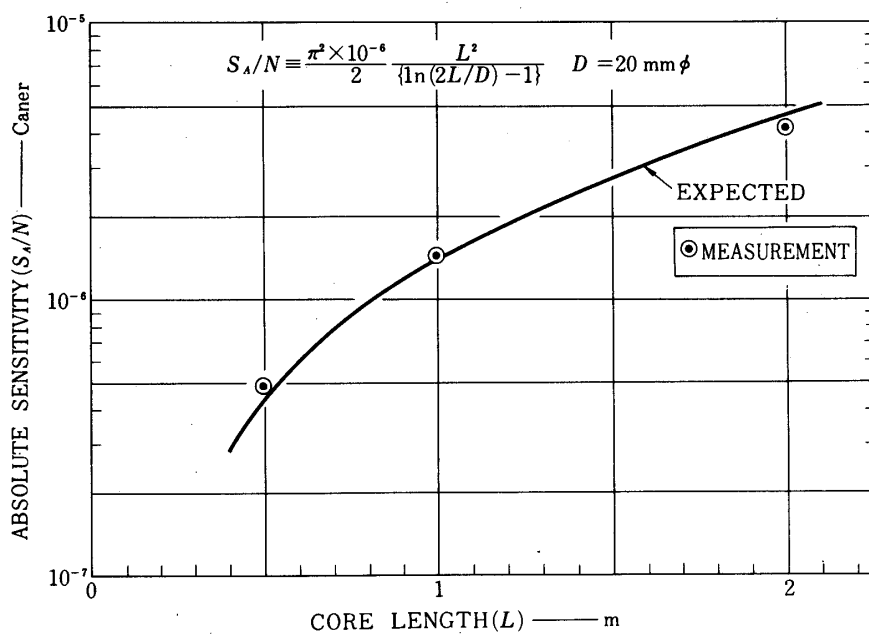
sensor を portable にしようとして小型軽量化をめざして core の長さをどんどん短くすると、第6図に見られる様に感度もそれに比例してどんどん落ちる事が分る。第7図に示す様に実際にこの様な理論式通りになるかどうかを、いろいろな長さの sensor を作って実験的に確かめてみると、第8図の様になって実験値は理論 curve によく一致して、1 m以下では急速に感度が落ちるので、core の長さとしては1 m程度が portable sensor として手頃とすることが分る。つまり直径2 cm の core が与えられた場合には、第9図に示す様な sensor が portable 用誘導磁力計の決定版ということになる。



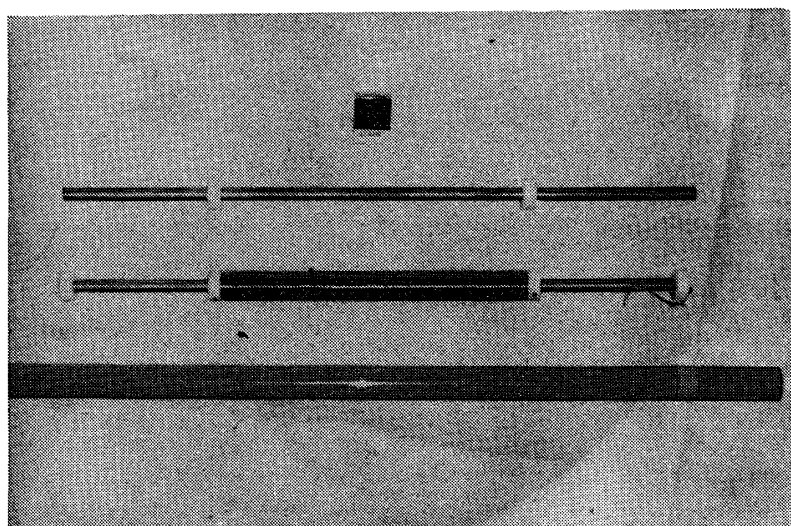
第6図 core length を parameter にした場合の core 直径に対する絶対感度曲線



第7図 core length 50 cm の携帯用 search coil



第8図 core length 絶対感度曲線の理論曲線及び測定値

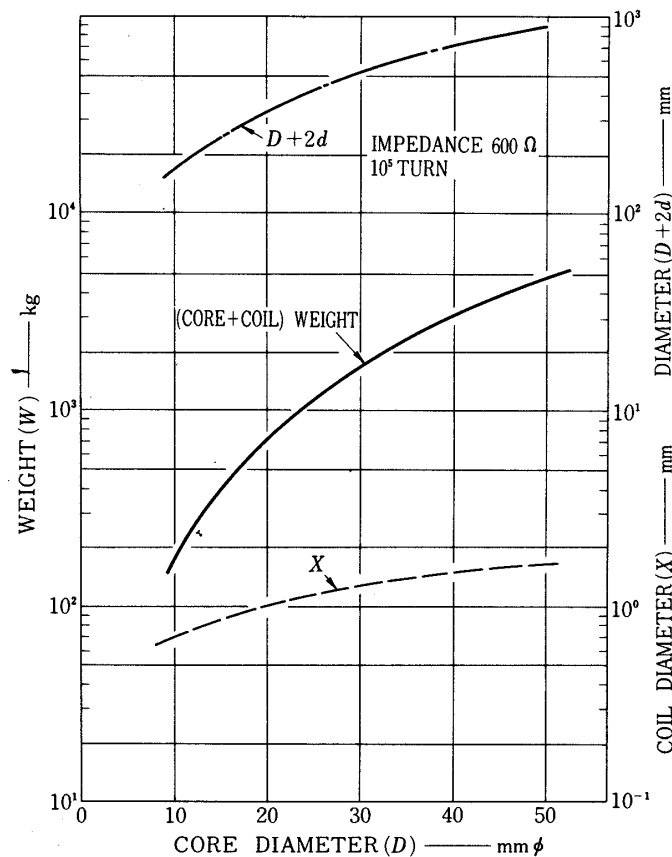


第9図 core length 1 mの携帯用 search coil

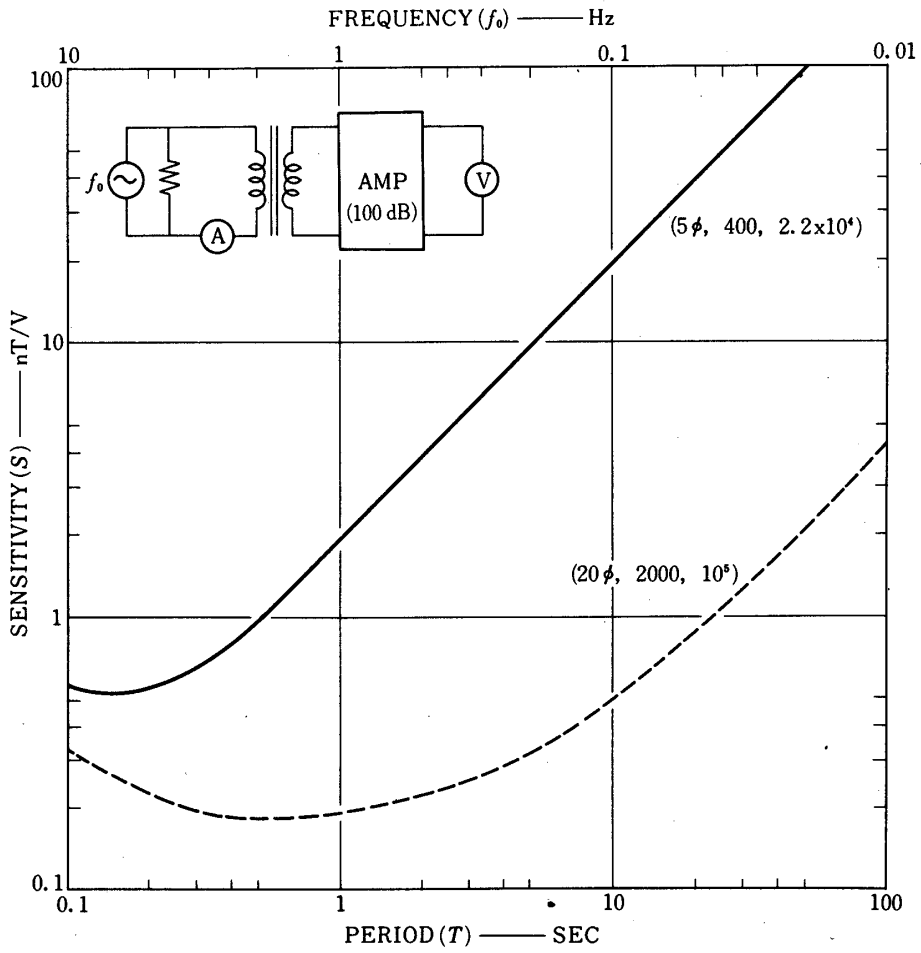
4. 人工衛星搭載用 search coil

最後に, satellite 搭載用の search coil を試作したので結果を報告する. 先ず, core diameter を小さくしさえすれば第 10 図に示す様に重量は drastic に変わるから coil をいくら捲いても余り重くならないので, 22, 000 turn 捲いて最初の地上 station 用最大感度のものと較べると第 11 図の様になって, station 用に較べれば感度は落ちる. ところが地上で観測する場合に較べると ULF 自体の振幅が電離層より上では 1~2 桁大きくなるので, これで充分受信可能になる.

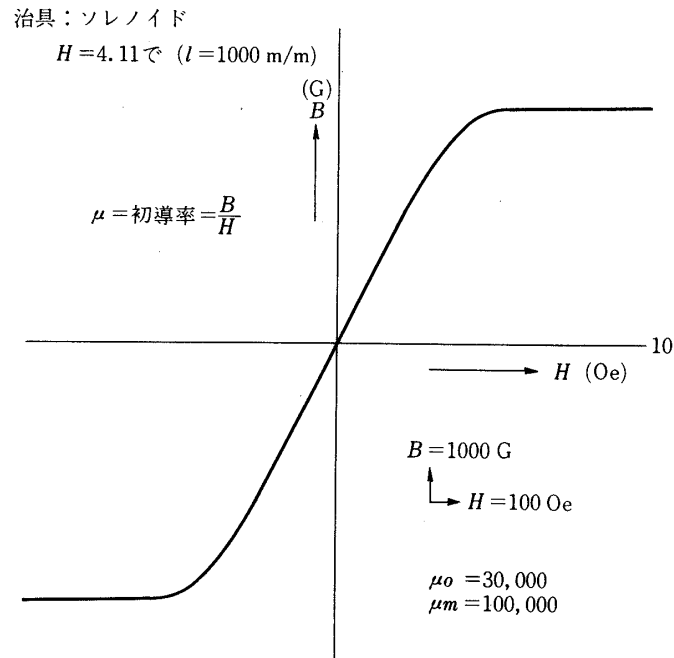
core が細いので apparent μ がはかり難いが, B-H curve を描かせてみると第 12 図の様になって, dimension ratio が有効にきいている事が分る. 結局, 人工衛星搭載用 search coil としては第 13 図の様なものが良いという結論が得られた.



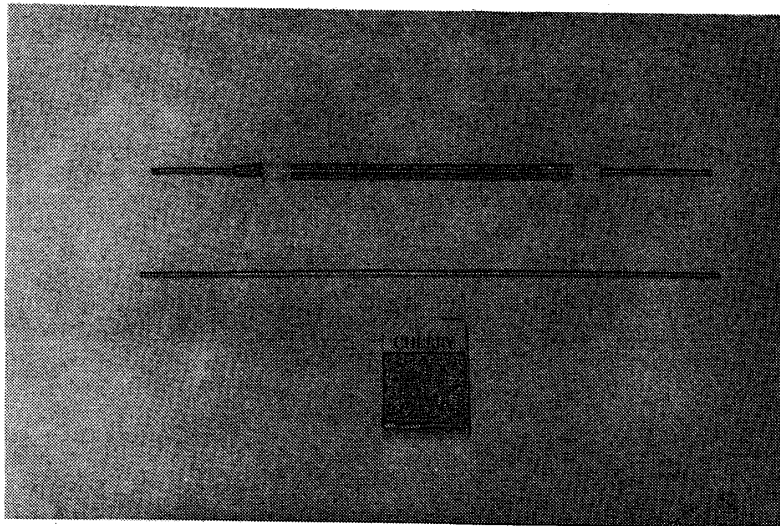
第 10 図 直径 D の core に長さ 1 m, coil impedance 600 Ω , 捲数 10^5 の coil を捲いた時の重量及び coil 外径



第11図 station用 search coil (点線) と人工衛星搭載用試作 search coil (実線) の周波数特性



第12図 試作した人工衛星搭載用 search coil の core の B-H 曲線



第13図 試作した人工衛星搭載用 search coil

5. 結 語

この研究は、実は新しいアイデアによる磁力計ができるという目算のもとに3年前に開始された。即ちそれは、センサー・アンプを含む三成分一式が鞆の中に入れて持ち運べる高感度誘導磁力計である。その為にパーマロイ棒を anneal して実験を開始すべく戸棚の上に置いておいたところが、1978年6月12日の宮城沖地震の為にコンクリートの床に叩きつけられて折れ曲るなどした為磁性を失い、女川地磁気観測所全体の常時観測の被った損害を優先的に復興させることに年月を費したので、その間本実験が中断されたものである。今回新たに anneal し直して実験を再開したところ、ほぼ初期の目的通りの携帯用高感度誘導磁力計ができた。ただしこれは、従来の search coil とは異なったアイデアによるものなので、稿を改めて後日別な論文として発表する予定である。

1980年10月1日

参考文献

- [1] Hayashi, K., Y. Oguti, T. Watanabe, and L.F. Zambresky (1978); Absolute sensitivity of a high- μ metal core solenoid as a magnetic sensor, *J. Geomag. Geoelectr.*, 30, 619 - 630.
- [2] Kato, Y. and S. Utashiro (1949); On the micropulsation of the earth current, *Sci. Rept. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophys.*, 1, 96 - 99.
- [3] Kato, Y., T. Saito and M. Kondo (1960); Geomagnetic rapid variations observed at the Onagawa Magnetic Observatory during the International Geophysical Year, Part I, *Sci. Rept. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophys.*, 11, Suppl., 1 - 49.
- [4] Kato, Y., T. Saito and M. Kondo (1961); Geomagnetic rapid variations observed at the Onagawa Magnetic Observatory during the International Geophysical Year, Part II, *Sci. Rept. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophys.*, 12, Suppl., 1 - 75.
- [5] Kato, Y. and T. Saito (1964); Observation of Pcl by a visual-type induction magnetometer at the middle latitude station, Onagawa, *Rept. Ionos. Space Res. Japan*, 18, 188 - 196.
- [6] Onishi, N and Y. Kato (1976); Characteristics of the induction magnetometer with a high permeability cylindrical metal core, *Proc. Engineering Tokai Univ.*, No. 3, 171 - 176.
- [7] Ueda, H. and T. Watanabe (1975); Several problems about sensitivity and frequency response of an induction magnetometer, *Sci. Rept. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophys.*, 22, 107 - 127.
- [8] Saito, T. and A. Morioka (1971); Spectral structure of geomagnetic pulsations during the severe magnetic storm of March 8, 1970, *Rept. Ionos. Space Res. Japan*, 25, 70 - 75.
- [9] Saito, T. and M. Kuwashima (1971); High speed spectrum analyzer (HISSA) and its application to the study of geomagnetic pulsations, Part 1. S-type hissa, *Rept. Ionos. Space Res. Japan*, 25, 326 - 341.
- [10] Saito, T., T. Sakurai, M. Kondo, T. Tamura, and M. Abe (1973); Spectral structure of storm-associated geomagnetic pulsations observed at Onagawa during the period

of August 4 – 11, 1972, *UAG Report, National Academy of Science, Washington, D. C.*, pp. 747 – 751.

- [11] Saito, T. (1976); The HISSA (high-speed spectrum analysis) method to analyze various time-varying phenomena in space physics, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 30, 3/4, 69 – 80.