

人工衛星搭載用 RING-CORE 型 FLUXGATE 磁力計の製作*

瀬戸正弘**・早坂 孝**・青山 巖†
斎藤尚生††・桜井 亨††・田村忠義††
湯元清文††・佐々木徹††

Trial Manufacturing of a Ring-Core Type Fluxgate Magnetometer for Japanese Artificial Satellites

By

Masahiro SETO, Takashi HAYASAKA,
Iwao AOYAMA, Takao SAITO, Tohru SAKURAI,
Tadayoshi TAMURA, Kiyohumi YUMOTO and Tohru SASAKI

Abstract: This is a report on the first ring-core type fluxgate magnetometer manufactured in Japan under a cooperative work among the three teams: Tohoku Institute of Technology team, Tohoku University team, and Tokai University team. The ring core consists of 6-81 Mo permalloy tape of 10 μm thick and 3 mm width wound m times around a ceramic bobbin of a diameter d . In order to find the best core, two sets of the following twelve different kinds of core were prepared: 5-79 Mo permalloy and 6-81 Mo permalloy, $m=9, 12,$ and $15,$ and $d=20$ mm and 30 mm. One set was examined by the Sendai team (Tohoku Inst. Tech. and Tohoku Univ.) and the other by the Tokai Univ. team. Each of the cores is wound by a 150-turn driving toroidal coil and packed in a 1100-turn pickup coil case. When a common ten-volt drive current is applied, the output voltages V for the 12 cores are in the following relations: $V_{6-81} \succ V_{5-79}, V_{30} \succ V_{20},$ and $V_9 \succ V_{12} \succ V_{15}$. On the next step we applied drive currents with $V_0 = 6, 8, 10,$ and 12 volts, and measured the input power W and the output gain G for various drive frequency f_0 , and found that G becomes largest for the smallest W at $f_0=10\text{kHz}$. Finally we constructed a fluxgate magnetometer with a 6-81 ring core of $m=9, d=20\text{mm},$ and $f_0=10\text{kHz}$ and recorded geomagnetic variations at the Onagawa Magnetic Observatory of Tohoku University. The records were compared with simultaneous records by another commercial biaxial magnetometer. Conclusion is that our ring-core type magnetometer is so sensitive, small, and light in comparison with the previous satellite-borne biaxial magnetometers that an improved ring-core type one is quite possible to be loaded on Japanese artificial satellites.

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東北工業大学

† 東海大学工学部

†† 東北大学理学部

1. 諸 言

我が国における fluxgate 磁力計の製作とその地磁気観測への応用は、東北大学の加藤・阿部・桜井 (1956), 阿部・桜井 (1957), 寺尾・松尾 (1966) などによるいわゆる倍周波型直視磁力計の製作と, それによる女川観測所における routine 観測に始まる. この biaxial 型 fluxgate 磁力計は彼等によって更に改良されて南極観測開始と同時に昭和基地に運ばれ, 1956 年以来極域の磁場観測に用いられてきた. 一方, 我が国で rocket や balloon 観測が開始されると同時に, 加藤・青山・瀬戸などによってそれら飛翔体に搭載され観測されてきた. 以後, fluxgate 磁力計は磁力計若しくは姿勢計として小型計量化の道を歩み, 加藤・青山・遠山などが東海大学に移るに依りて, 東海大学を中心とした研究開発が今日まで行われてきた. 従って, 日本の fluxgate 磁力計の特色は, まず第一に biaxial 型であったことであり, 第二に飛翔体搭載用を目的とした小型軽量化が主眼であったことである. 一方, 地上 station 用としては, 小型軽量の必要性よりも精度・感度が要求され, この点では光学磁力計が伝統的に優れていたために, (瀬戸ほか (1978) の論文の第 1 表および第 8 図参照) 各観測所共光学磁力計を主体にしてこれまで観測が行われてきた.

最近, 日本の人工衛星が ULF を観測できるような高度にまで達してきたので, 人工衛星で ULF を観測すべく, 東海大学工学部・東北工業大学工学部・東北大学理学部の 3 大学で新型 fluxgate 磁力計の開発チームを編成し, 昭和 52 年度初頭から開発研究を開始した. fluxgate 型磁力計の精度を向上させるには, core の dimension ratio を高めることがまず必要なので, 開発には次の二つの方向が平行してたどられた. すなわち一つは従来の biaxial 型磁力計を, 日本の技術で到達し得る極限の dimension ratio まで高める方向であり, (瀬戸ほか, 1978 a, b にも述べられているように,) core の長さ 50 cm の磁力計が製作され, 精度を 0.02 nT にまで高めることに成功した. dimension ratio を高めるもう一つの方法としては core を ring 型にすればよいので, 50 cm の biaxial 型磁力計の製作と平行して, ring-core 型磁力計の開発が進められた. その結果, 地磁気の routine 観測ができるまでに至ったので, ここに現段階までの開発経過を述べる次第である.

2. Ring core の構造

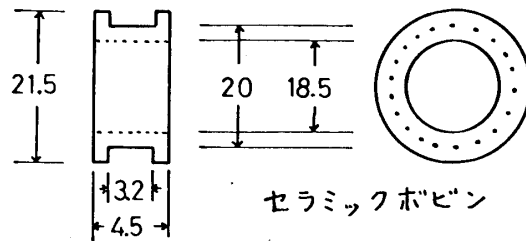
ring-core 型 fluxgate 磁力計の sensor としては, セラミック製のボビンに厚さ $10\mu\text{m}$, 幅 3 mm のパーマロイ箔が捲かれたものが用いられた. 最良の sensor を見出すために, 次のようにパーマロイ材質について 2 種類ずつ, ボビン直径について 2 種類ずつ, パーマロイ捲層数について 3 種類ずつ計 12 個を 1 セットとし, 合計 2 セット (すなわち 24 個) が試作された.

- (1) パーマロイ材質: 5-79 M_0 パーマロイおよび 6-81 M_0 パーマロイ
- (2) ボビン直径: 20 mm および 30 mm
- (3) パーマロイ捲層数: 9 層, 12 層および 15 層

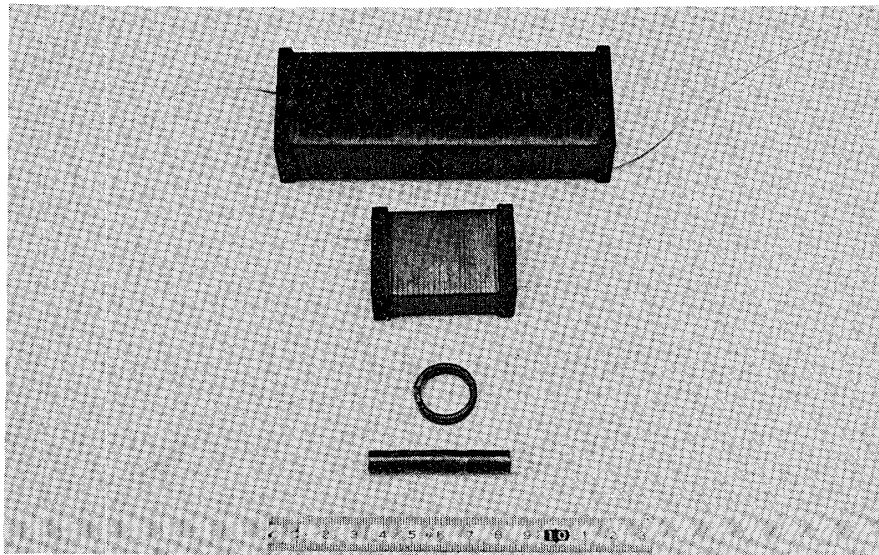
この 2 セットのうち 1 セットについて仙台チーム (東北工大チームと東北大チーム) が分担開発し, 残り 1 セットについて東海大チームが分担開発を行った. 以下仙台チームによる

開発研究に焦点を置いて述べることにする。第1図は直径20 mm の場合のボビン寸法を表わす。なお、このほかに仙台チームでは 5-79 M₀ パーマロイ、20 mmφ、50 層の ring core も比較測定のために用いられた。

この ring core には toroidal に 150 turn の駆動コイルが捲かれ、この core は 1100 turn の出力コイルケースに収められた。第2図に、駆動コイルが捲かれた直径20 mm の ring core と、それを収める打消コイルと検定コイルが示されている。ring core の長所の一つは、第2図で示されたような1個の ring core で、同時に2成分が高感度で測定できることであり、第2図に対比のために示した biaxial 型 sensor が軸方向の1成分しか測定できないのに比べて、ring-core 型 sensor がいかに小型軽量で優れているかが理解できる。sensor が軽くて済めばそれを支える boom も軽くて済み、人工衛星搭載用計器としてはなおさら好都合となるのである。第3図は、女川観測所で routine 用に使用されている sensor 全体の写真を示す。



第1図 Ring core 用セラミックボビン寸法図



第2図 Ring core と 5 cm biaxial core

3. Ring core の材質・直径・捲数の選定

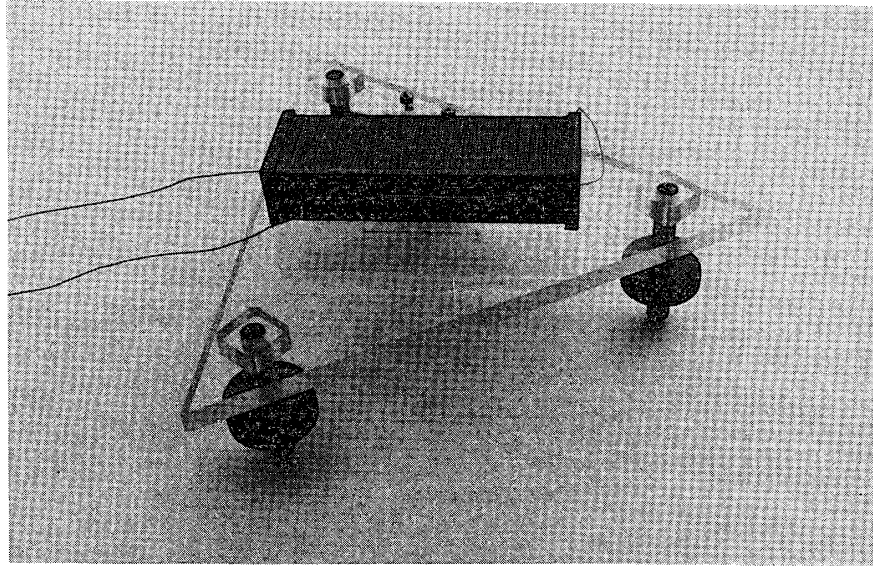
まず, driving coil に第4図のような回路で10 V の交流を印加した時に出力コイルに生ずる電圧 V は,

$$\text{材質に関して: } V_{6-81} > V_{5-79}$$

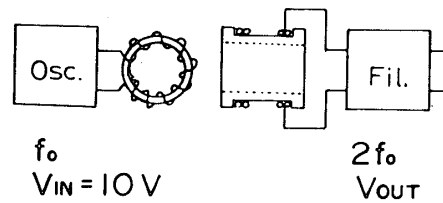
$$\text{直径に関して: } V_{30} > V_{20}$$

$$\text{捲数に関して: } V_9 > V_{12} > V_{15} > V_{50}$$

という結論を得た(瀬戸ほか, 1978 参照). 第5図は駆動電流波形例を, 第6図は出力電流波形例をそれぞれ示す. そこで材質に関しては6-81 Mo パーマロイ, 捲数に関しては9層の core が以下の実験では選ばれた. ring-core 型 sensor は biaxial 型 sensor に比して極め

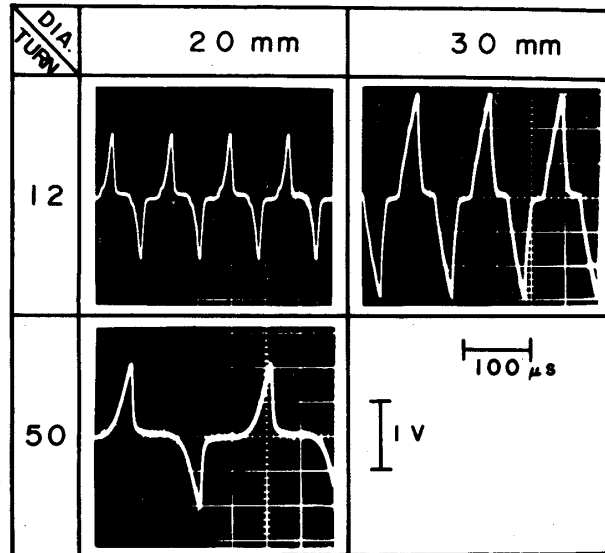


第3図 Ring-core sensor



第4図 20 mm ϕ ring core の周波数特性測定法

WAVEFORM OF EXCITING CURRENT



第5図 駆動電流波形

て出力が大きい事が分かったので、直径に関しては ($V_{30} > V_{20}$ ではあるが) 小型軽量化を目指して 20 mm のものが選ばれた。

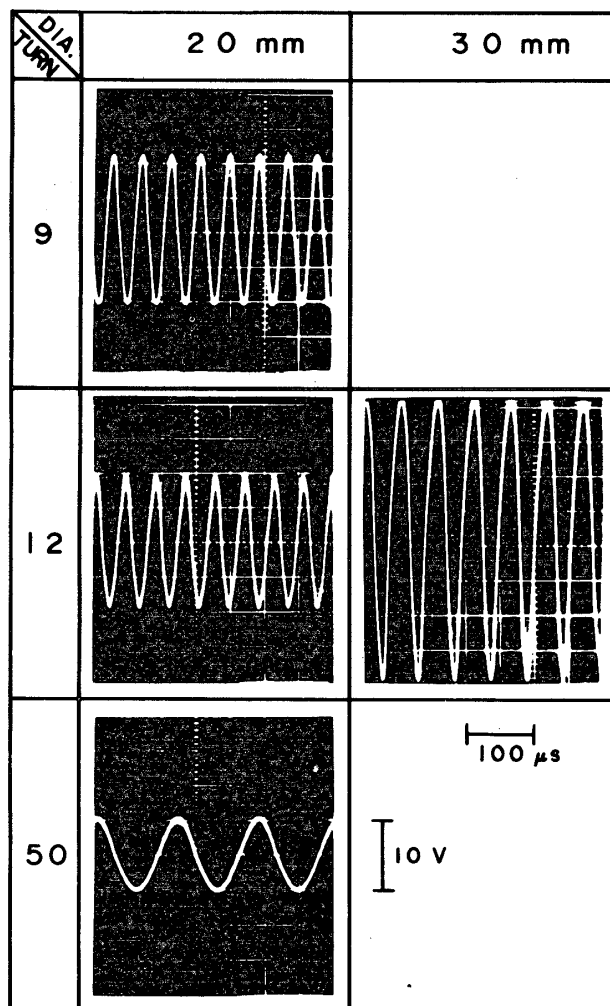
4. 駆動周波数の選定

次にこの 6-81 Mo パーマロイ、20 mmφ、9 回捲きの ring core に入力交流電圧 $V_0 = 6, 8, 10, 12$ V を印加し、かつ交流周波数 f_0 を 3~20 kHz まで変化させた場合の入力 power の変化と、gain (W_{out}/W_{in}) の変化を第 7 図に示す。図に見られるごとく、 $V_0 = 8, 10, 12$ V に対して gain の peak 値は互いにほとんど変らぬ位高い値を示すが、それぞれの peak 値に対する入力消費電力は $V_0 = 8$ V の場合が最低で済むので、 $V_0 = 8$ V を選り、かつ $V_0 = 8$ V に対して最大出力を与える周波数 $f_0 = 10$ kHz を駆動周波数として選定した。第 8 図は、このような条件の場合の駆動波形および出力波形をそれぞれ示す。

5. 磁力計回路

ring-core を駆動する 10 kHz の発振器からは、第 9 図に示すように frequency doubler によって 20 kHz の交流が作られ、phase shifter を経て増幅される。一方、ring-core からの倍周波出力も増幅されて、phase detector で位相検波されることによって測定磁場が出力される。これは地磁気 EW 成分の変化を検出する場合であるが、NS 成分を検出する場合には ring core 全体を打消コイルケースの中に収め、打消電流を流す。

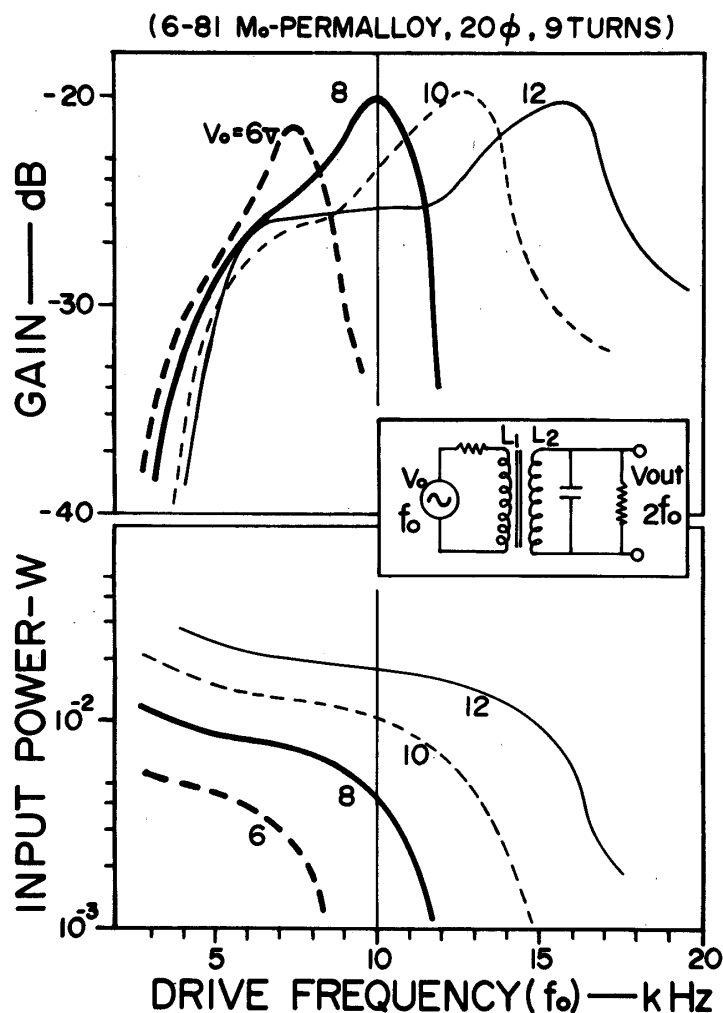
SECOND-HARMONIC OUTPUT



第6図 出力電流波形

6. 地磁気微小変動記録

このような ring-core 型 fluxgate 磁力計を、東北大学附属女川地磁気観測所に設置した。NS 成分の記録例が第10図および第11図である。それぞれの図には、比較のために従来市販されている biaxial 型 fluxgate 磁力計による記録を同一縮尺で示してある。従来型の fluxgate 磁力計記録に対して ring-core 型磁力計記録が、周期5~20分の fluctuation に関して忠実にかつ高感度で記録されているばかりでなく、それに重畳した Pc3-4 range の微小振幅磁気脈動まで、極めて明瞭に記録されている様子が分かる。



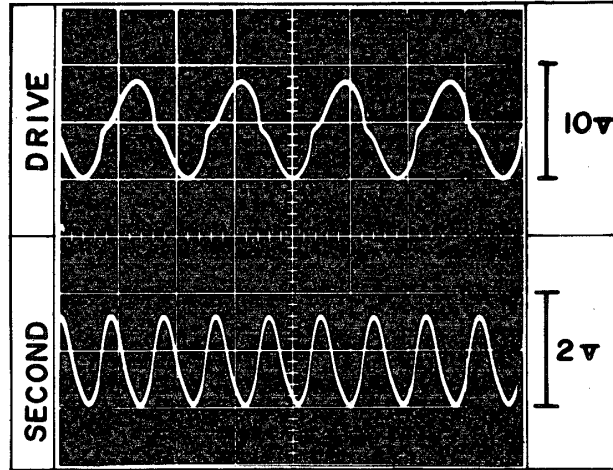
第7図 入出力特性

7. 討論と結論

第64回日本地球電気磁気学会仙台学会々場における磁場計測研究会で、東海大学研究グループによって ring-core 型 fluxgate 磁力計の実物が展示され、直径僅か 20 mm の sensor と、プリント基板僅か一枚の電子回路だけで地磁気が高感度で検出されるさまが参会者の目前で demonstrate された。第12図はその磁力計の回路図であるが、GA用を意図しており、そのために他の PI に対する noise 源とならぬように 50 kHz の発振器を用い、2段の flipflop を通じて 12.5 kHz を作って ring core を駆動している。

このように ring-core 型 fluxgate 磁力計は、小型、軽量、小電力、高感度で磁場を検出

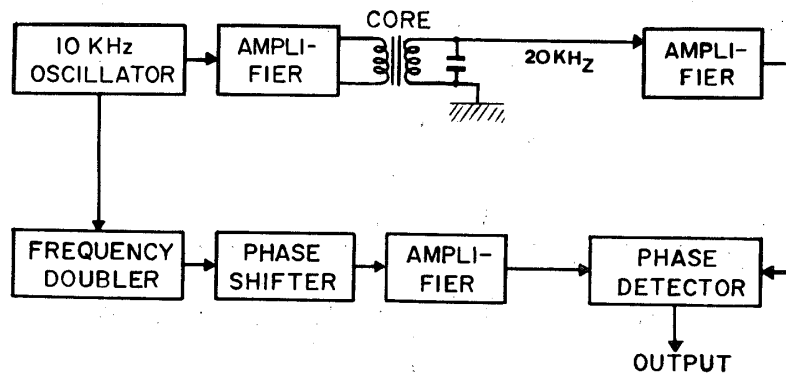
WAVEFORM OF DRIVE & SECOND CURRENT



(6-81 Mo-PERMALLOY, 20φ, 9 Ts.)

第8図 駆動電圧波形と出力電圧波形

BLOCK DIAGRAM

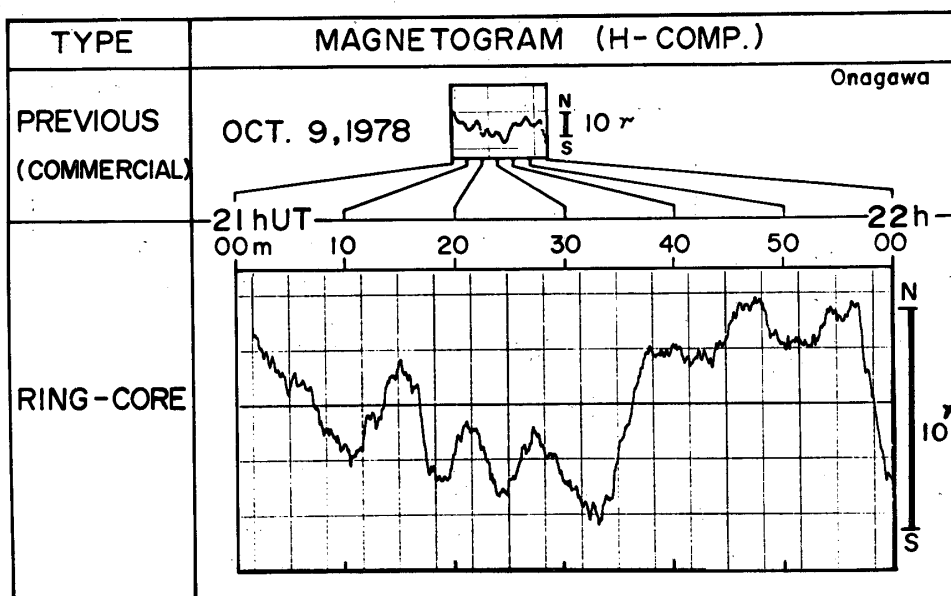


第9図 Ring-core fluxgate磁力計の block diagram

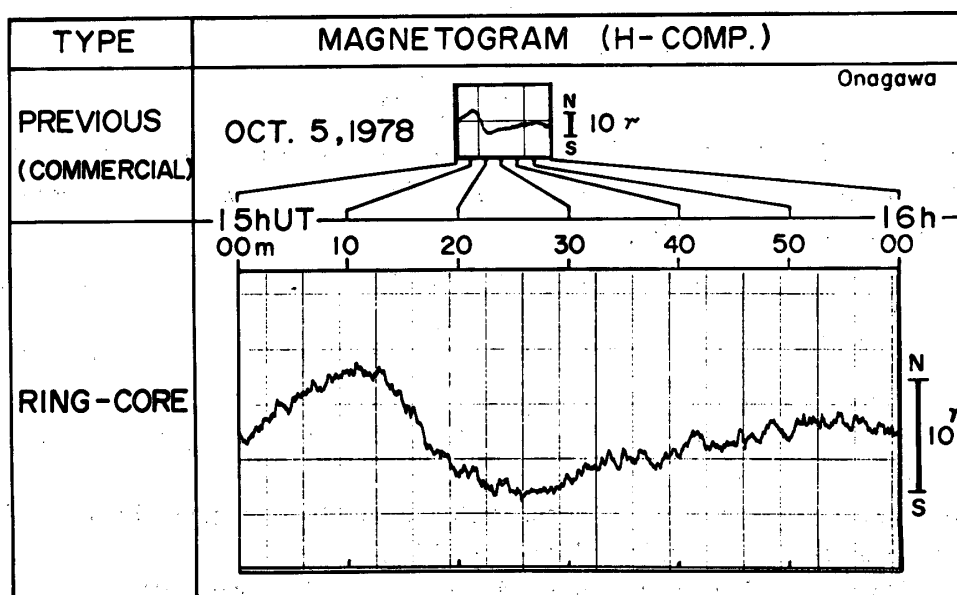
し得ることが判明し、現に女川地磁気観測所において、本研究によって製作された ring-core 型 fluxgate 磁力計が稼動し、routine 的に地球磁場微小変動を記録中である (第13図)。sensor, 回路共小型で簡単なので温度 control も簡単であるが、温度効果や安定性などについては次の機会で述べることにする。なお、本研究で開発を進めつつある ring-core 型磁力計を載せる人工衛星としては、Exos C を当面の目標として目下計画進行中である。

8. 謝 辞

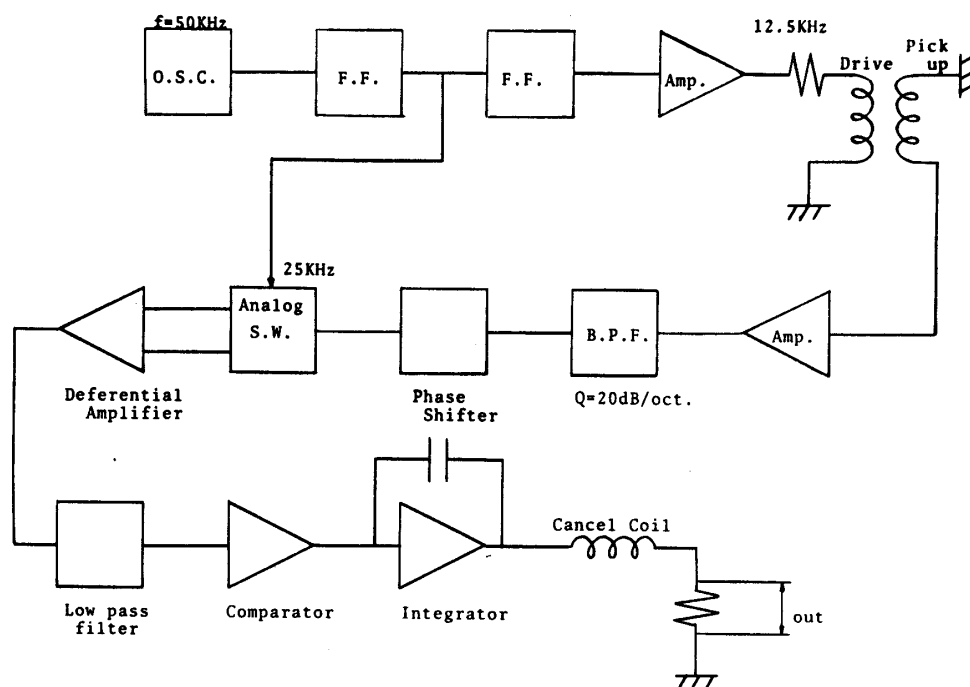
この研究の推進には、東海大学遠山文雄助教授、東京大学国分征助教授、九州大学北村泰



第10図 記録例 (原寸比)



第11図 記録例 (原寸比)



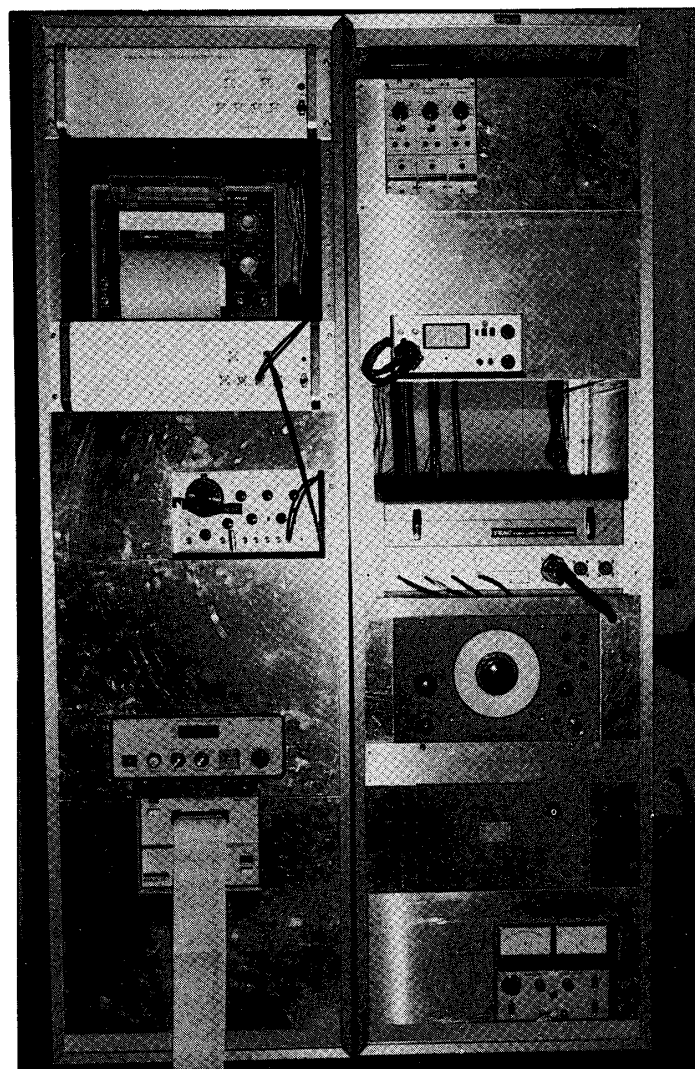
第12図 GA用 Ring-core 磁力計の block diagram

一助教授から種々の助言や有益な御批判を頂いたので感謝する。又、東海大学の大学院生山河仁氏には基礎実験の際手伝って頂いたので感謝する。

1978年11月2日

参考文献

- [1] Y. Kato, Z. Abe and A. Sakurai; The visual magnetic variometer used for the measurement of the effect of 20 June 1955 *eclipse*, *Sci. Rep. of Geophys. of Tohoku Univ.*, 7, (1956).
- [2] 阿部善右衛門, 桜井彰; 直流増幅器を対象とした振幅差変調法の研究, 電気学会誌, 1957, (1960).
- [3] 寺尾諒, 松尾正之; 磁気変調形増幅回路, 「直流増幅回路の設計マニュアル」, 丸善, 317-346, (1966).
- [4] 青山巖, 遠山文雄, 加藤愛雄; ロケットによる電離層 Sq 電流系の磁場成分測定, 東海大学工学部紀要, No 1, (1972).
- [5] W.A. Geyger; The ring-core magnetometer—a new type of second-harmonic fluxgate magnetometer, *Trans. AIEE*, 81, 65-73, (1962).
- [6] D.I. Dordon, R.H. Lundsten, R.A. Chiarodo and H.H. Helms; A fluxgate sensor of high stability for low field magnetometry, *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-4 397-401, (1968).



第13図 東北大学女川地磁気観測所における磁力計群，右側は induction 磁力計，上から amp.，モニター，テープレコーダー，超低周波発振器，電源，左側上から 50 cm 長 biaxial, ring-core fluxgate 磁力計，proton 磁力計

- [7] M.H. Acuna and C.J. Pellerin; A miniature two-axis fluxgate magnetometer, *IEEE Trans. Geosience Electronics*, GE-7, 252-260 (1969).
- [8] D.I. Gordon and R.E. Brown; Recent advances in fluxgate magnetometry, *IEEE Trans Magnetics*, MAG-8, 76-82 (1972).

- [9] D.C. Scouten; Sensor noise in low-level flux-gate magnetometer, *IEEE Trans. Magnetism*, **MAG-8**, 223–231, (1972).
- [10] M.H. Acuna; Fluxgate magnetometers for outer planets exploration, *IEEE Trans. Magnetism*, **10**, 519–523, (1974).
- [11] N.F. Ness; Magnetometers for space research, *Space Sci. Rev.*, **11**, 459–554, (1970).
- [12] 蓮尾隆一, 飯島哲二, 石津美津雄, 坂翁介, 北村泰一; SQUID による微小 ULF の観測, 第62回日本地球電磁気学会講演, (1977).
- [13] 青山巖, 遠山文雄, 高橋隆男; 「科学衛星搭載用磁力計について」科学衛星シンポジウム報告, 昭和48年度東大宇宙研シンポジウム報告, 100–104, 1974.
- [14] 瀬戸正弘, 早坂孝, 斎藤尚生, 桜井亨, 田村忠義, 佐々木徹; Highsensitive biaxial-type fluxgate magnetometer の製作, 第63回日本地球電磁気学会講演, 1978, (a).
- [15] 瀬戸正弘, 早坂孝, 青山巖, 桜井亨, 斎藤尚生; Ring-core type fluxgate magnetometer の試作, 第63回日本地球電磁気学会講演, 1978, (b).
- [16] 瀬戸正弘, 早坂孝, 斎藤尚生, 桜井亨, 田村忠義, 湯元清文, 佐々木徹; 50 cm 長 biaxial-core fluxgate 磁力計の製作, 宇宙航空研究所報告 (宇宙科学特集号) 印刷中, 1978 (c)