

飛翔体搭載用リングコア型磁力計による 高感度地磁気観測*

斎藤 尚生**・湯元 清文**・田村 忠義**
瀬戸 正弘***・早坂 孝***

High-sensitive Observation of Geomagnetic Fluctuations
by Means of a New Ring-core Type Magnetometer
(to be Installed on Space Vehicles)

By

Takao SAITO, Kiyohumi YUMOTO, Tadayoshi TAMURA,
Masahiro SETO and Takashi HAYASAKA

Abstract: High-sensitive magnetometers to be installed on space vehicles have been developed under a scrupulous schedule. The first program on manufacturing of a two-core type magnetometer with a 50-cm length sensor and the second program on a comparative test of twelve kinds of ring-core sensors were already executed successfully. On the basis of the successful geomagnetic routine observation by the plot-type ring-core magnetometer manufactured as the second program, a new ring-core type magnetometer was ordered to Sokkisha Co. as the third program with which the present report concerns. This magnetometer is characterized by a digital electronic circuit to avoid a phase mismatching due to a temperature effect on both exciting and output waveforms. It is also characterized by an automatic cancelling of parametric DC magnetic fields so as to facilitate high-sensitive recording. The output signals are registered on a magnetic tape with a transport speed of 1.524 mm/s. The signals are also registered on monitoring pen-recorders with two ways; vertical recording with 60 mm/h and with 0.3 nT/mm, and lateral recording with 250 mm/h and with 0.1 nT/mm on a routine base. The sensitivity can be changed up to 0.036 nT/mm for the vertical-writing recorder. The sensitivity is so strikingly high that even the Pc3 pulsation was registered with the maximum range of more than 170 mm at about 01h23mUT on August 25,

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東北大学理学部

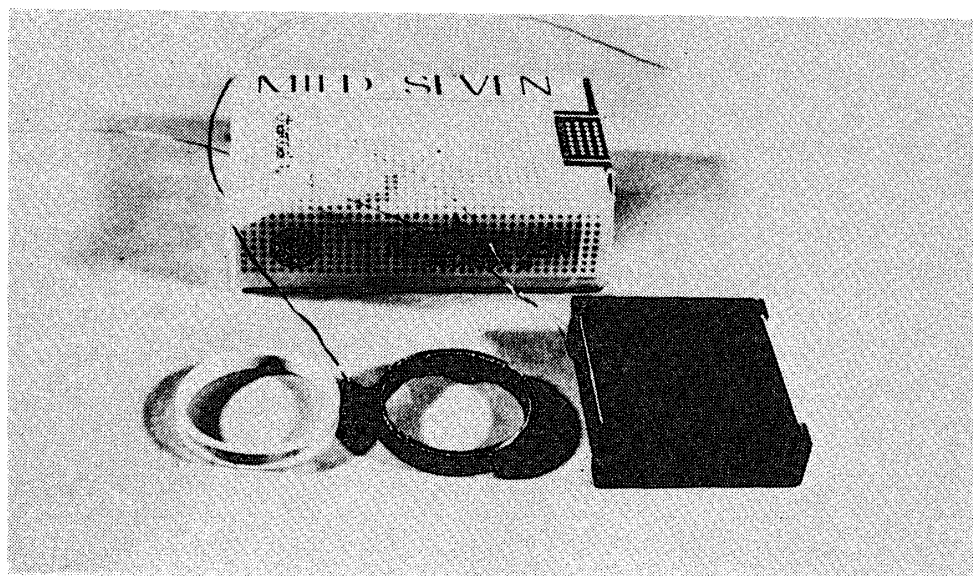
*** 東北工業大学

1979. The merits of this magnetometer are compared with those of other types of magnetometers. Possible applications of the ring-core type magnetometers to various research fields are described.

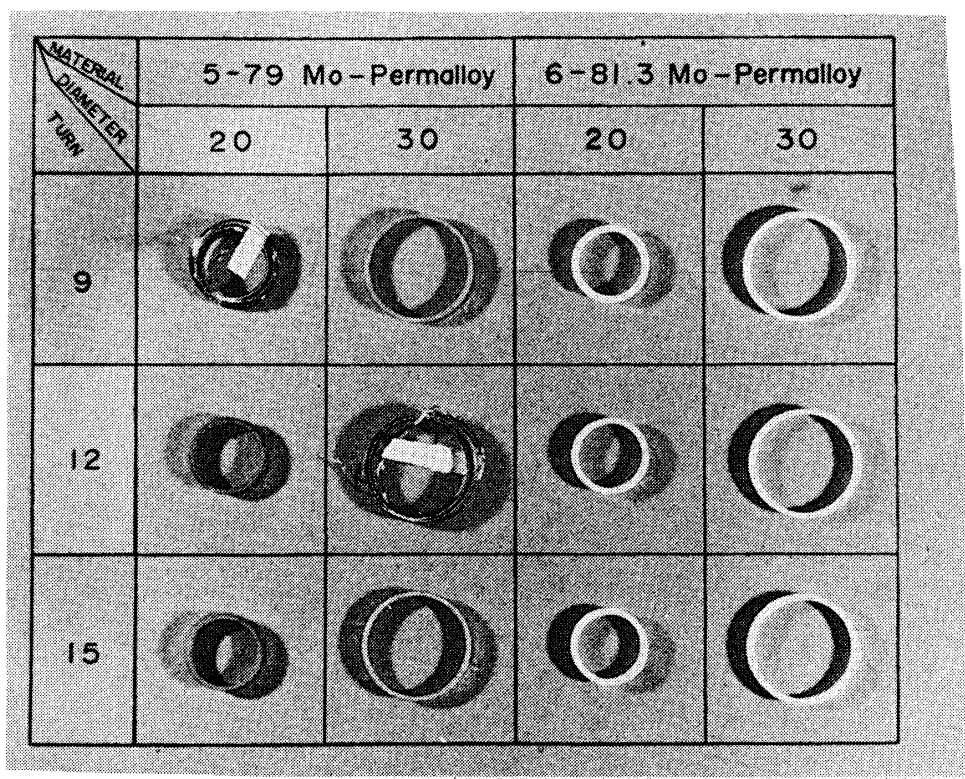
1. 緒 言

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、加藤・阿部・桜井（1956）、阿部・桜井（1957）、寺尾（1966）等によるいわゆる倍周波型直視磁力計の製作と、それによる東北大学付属女川観測所における routine 観測に始まる。この two-core 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、1957 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・瀬戸等によってそれらは飛翔体に搭載され観測されてきた（加藤・青山，1966；加藤ほか，1967，1970）。以後，fluxgate 磁力計は磁力計もしくは姿勢計として小型軽量化の道を歩み、加藤・青山・遠山等が東海大学に移るに応じて、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。

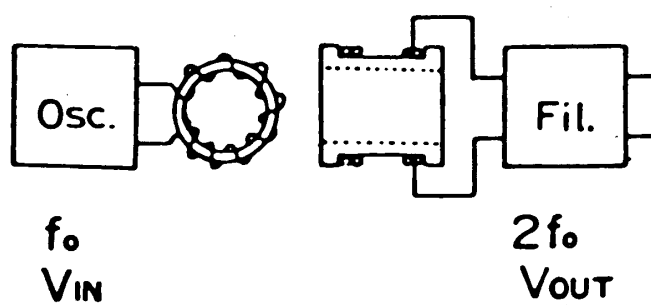
最近，日本の人工衛星が ULF を観測できるようになり，（Aoyama et al., 1979；斎藤ほか，1979a），人工衛星で ULF を観測すべく（斎藤，1978；斎藤ほか，1979b），東北大学理学部・東海大学工学部・東北工業大学の 3 大学で新型 fluxgate 磁力計開発の為に開発チームを編成し，昭和 52 年度頭初から研究開発を行った。ところで，感度を高めるには，sensor の長さとの直径の比である dimension ratio を大きくすればよい。そこで two-core 型としては世界最高の dimension ratio を持つ sensor を開発し，従来のよりも感度の高い



第1図 Ring-core sensor



第2図 基礎実験に用いた ring-core



材質に関して： $V_{6-81} > V_{5-79}$

直径に関して： $V_{30} > V_{20}$

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

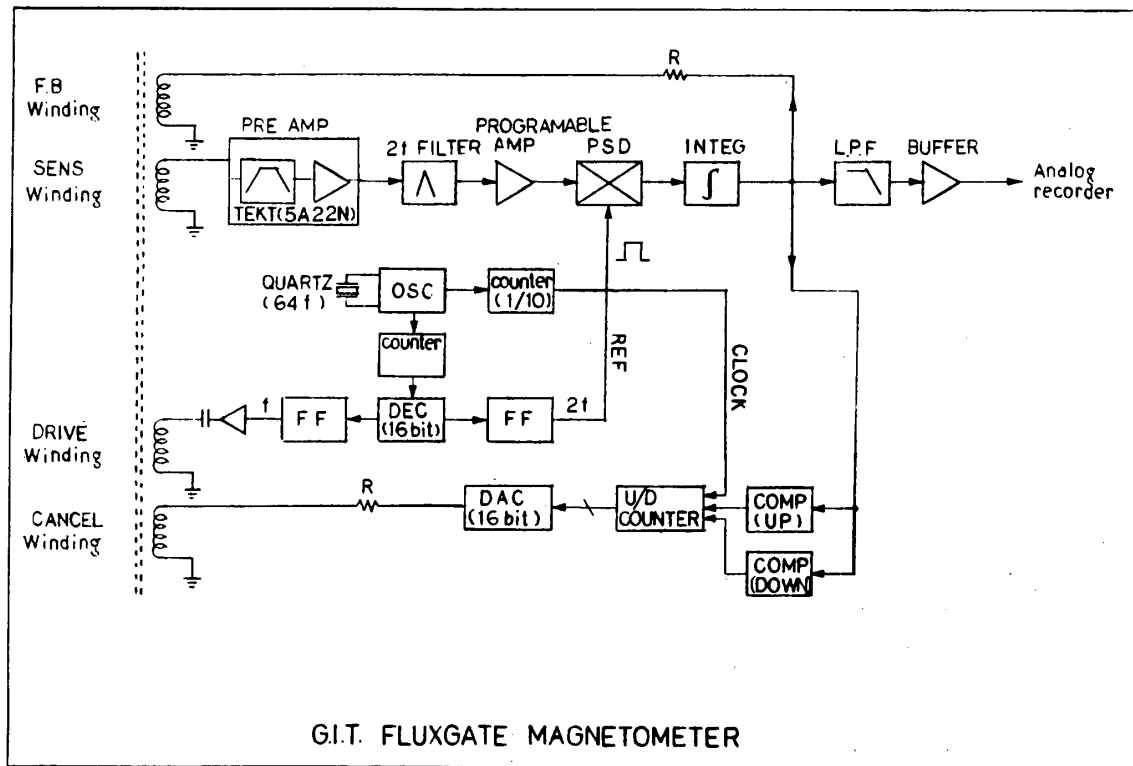
第3図 Ring-core の出力特性

且つ雑音の小さい磁力計による連続観測に成功した(瀬戸ほか(1978a)の論文の第1, 6及び7図参照). 又, 飛翔体搭載用として観測機器は, 寸法・重量ともに制限されているので, 第1図の様に two-core 型を ring-core 型にすることにより, demension ratio を更に大きくして而も小型軽量化を行い, これからの飛翔体搭載用としては最適な sensor をも開発した(瀬戸ほか, 1978a, b and c). 試作品製作の段階で, 最良の ring-core 型 sensor を見出すために, パーマロイ材質2種類, ボビン直径2種類, パーマロイ箔捲層数3種の合計12種(第2図)について実験を行った. その結果, 第3図に示す回路で, 周波数 f_0 の一定交流電圧を drive coil にかけた時の pick-up coil に出力される倍周波の電圧は, 材質に関しては 6-81 モリブデンパーマロイ, 直径に関しては 30mm ϕ , パーマロイ箔捲層数に関しては12層のものが最も大きくなることが分かった(瀬戸ほか, 1978cの第7図参照). この選定された sensor を用いて磁力計を試作し, 従来の fluxgate 磁力計に比べて高感度の記録を routine 的に観測できるようになったことは, 斎藤(1978)・瀬戸ほか(1978bの第10図及び第11図参照)等によって既に報告されている. この様に開発チームによって試作され, 連続観測に成功した ring-core 型 fluxgate 磁力計の plot-type を基礎にして, 飛翔体搭載用 ring-core 型磁力計を製作するために, 先ず地上 station 用磁力計を測機舎に製作させた. その結果, 高感度の地磁気の routine 観測が, 東北大学附属女川地磁気観測所においてできるようになったので, その新しい ring-core 型 fluxgate 磁力計について報告する.

2. Ring-core 型 fluxgate 磁力計

今回作られた新しい ring-core 型 fluxgate 磁力計の Block-diagram を第4図に示す. sensor の drive 周波数の安定化の為に水晶発振器を用い, その出力波形の温度変化による位相ズレを避ける為に digital 方式を採用してある. drive 周波数は 2.5 KHz とした. pick-up coil からの出力は pre-amp 部で増幅された後, 倍周波の 5 KHz 成分を filter out され, main-amp 部で再増幅されている. この main-amp は programable amplifier であり, sensitivity の切換ができる様になっている. 次に, main-amp からの出力は phase sensitive detector において, 5 KHz の基準波と位相比較され, 低周波 (≤ 5 Hz) の微小磁場変動成分のみが取り出されている. その際, 出力の直線性及び安定性の為の feed-back 回路を取りつけ, DC 磁場を打ち消す為に up-down counter 及び D/A converter を用いる自動 cancel 方式を採用している. 現在 D/A converter 16 bit のうち 12 bit が使用されているので, 外部磁場を 4096 分割したおよそ 6 nT が最大感度時の記録紙上の full scale に相当する.

第3図に示された実験結果に従って 6-81 モリブデンパーマロイ, 12層捲, 30mm ϕ の, 新しく測機舎に製作させた ring-core 型 sensor を第5図に示す. 鉢巻状に巻かれた coil が pick-up coil である. cancel coil は一様性の為に第6図の様に円筒状にした. 次に電気回路部及び特殊記録部を示す. 電気回路は一成分ごとに, 主に pre-amp 部・drive 部・analog-amp 部・cancel 部の 4-block に分割され, (第7a, b, c, d 図) 3成分1セットとして標準ラックのケースに組み込まれた(第8図). 日本の会社製品として実用化され



第4図 Ring-core fluxgate 磁力計の block diagram

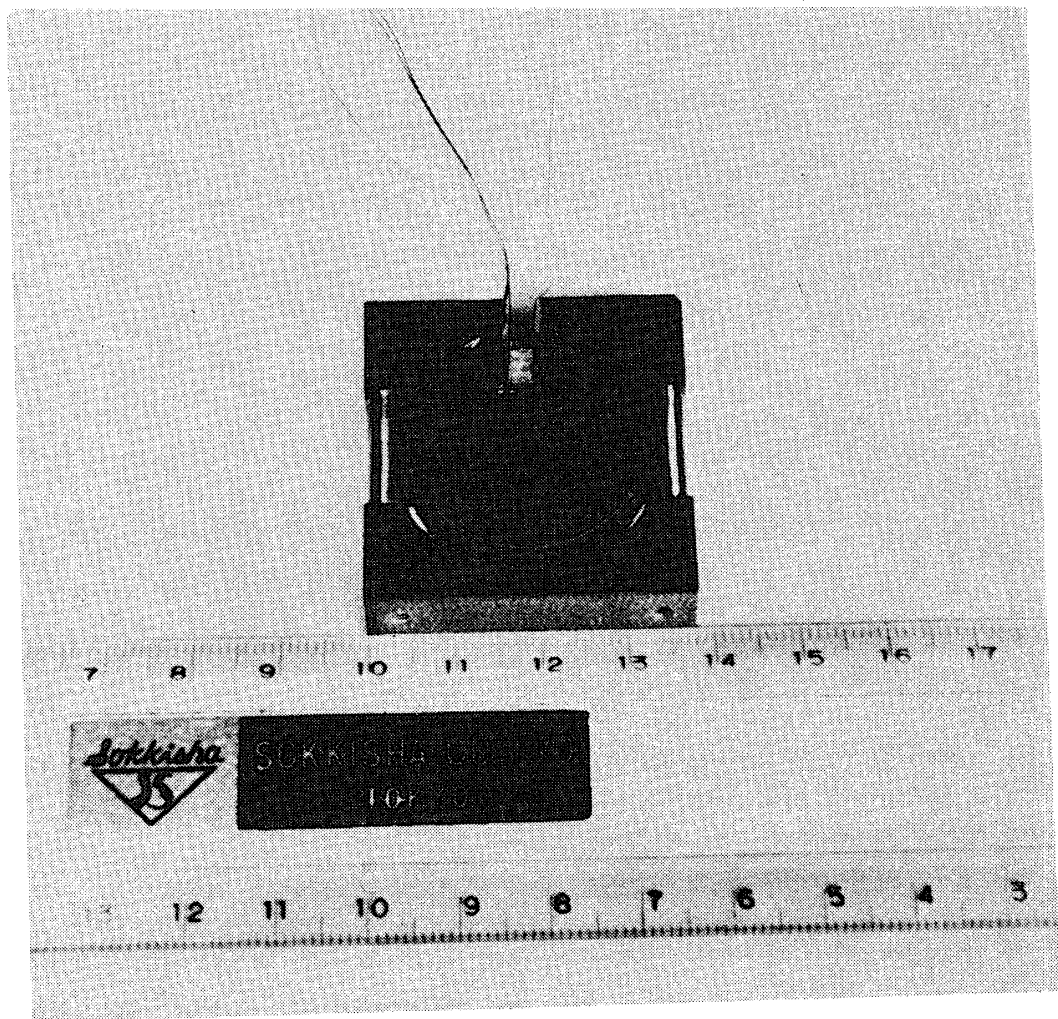
た第1号機であることや、地上 station 及び野外連続観測用の ring-core 型 fluxgate 磁力計であることから、電気回路部にいろいろな汎用性を持たせてあるので電気回路部は大きくなっている。

3成分1組の電気回路及び特殊記録計の各々2セット分が、第9図に示した様に一つのラックに組みこまれた。図の上から3段目の縦書き方式の3成分用記録計及び下段3台の横書き方式の記録計でそれぞれ H, D, Z 成分を記録している。

3. 特殊記録方式

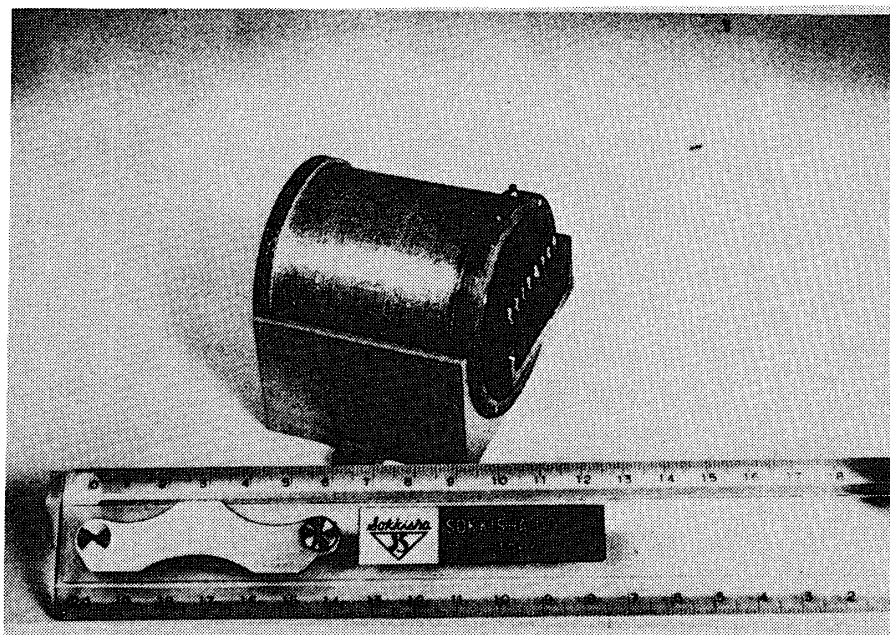
女川観測所に設置された fluxgate 磁力計の出力は、長時間磁気テープレコーダーに記録される一方、縦書き及び横書きの特殊記録方式で monitor できる様になっている。ペン書き記録計においては、高感度にすればする程それだけ記録紙の chart speed を早くしなければ意味がないのであるが、そうすると記録紙の経済性と記録の実用性の点で新たな問題が生じてくる。これらの問題点を解決したのが以下に述べる縦書き及び横書きの特殊記録方式である。

高感度による地磁気の連続観測は 1956 年から東北大学附属女川地磁気観測所において、

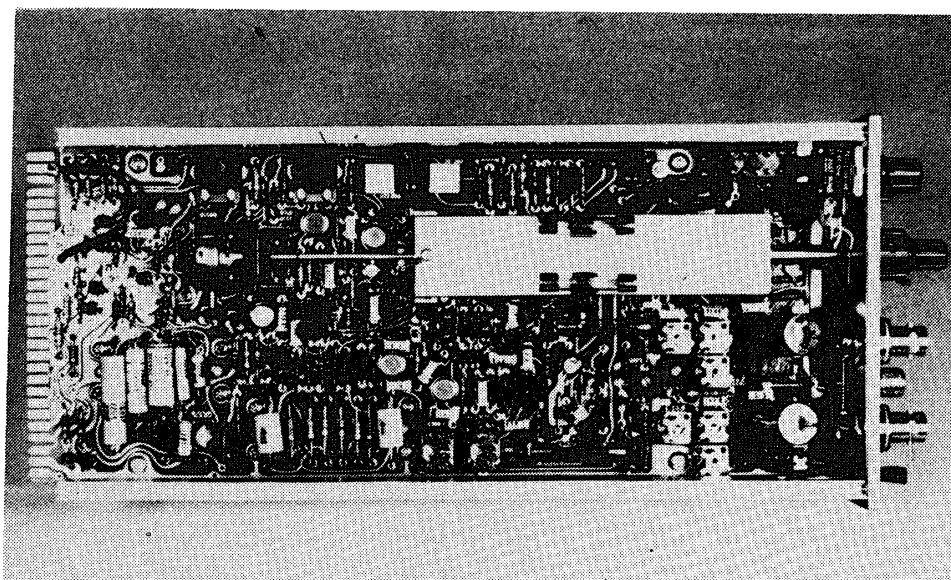


第 5 図 測機舎製 ring-core sensor

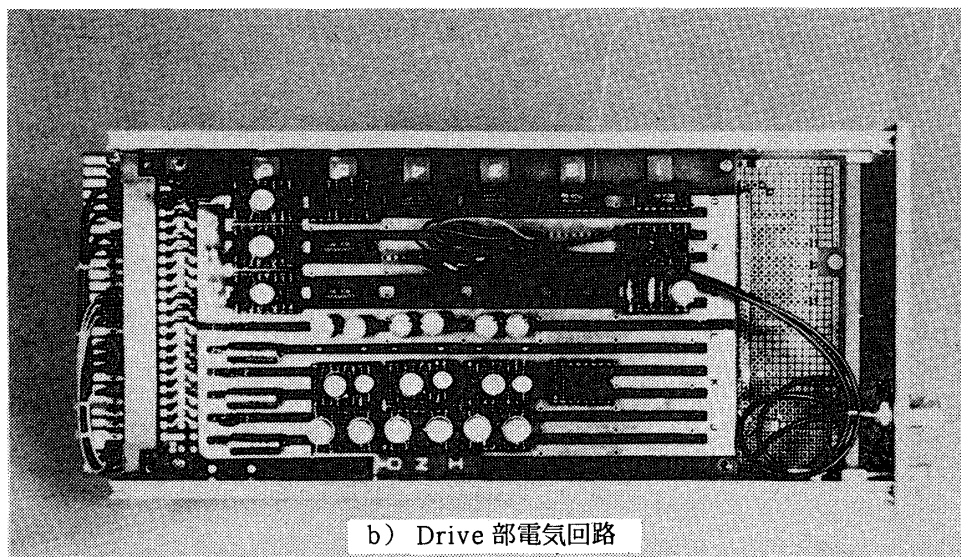
La Cour magnetometer を用いて行われている。その 1 例を第 10 図に示すが、30 秒の Pc 3 range においては induction magnetometer よりも感度の良いことが、SEP. 22, 1962, 22 h 30 m UT - 23 h 00 m の記録の部分を見ても明らかである。この La Cour magnetometer の様な自動 suppression 方式を ring-core 型 fluxgate 磁力計の記録計に応用した。先ず、縦書き方式を第 11 図に示す。同縮尺で表わした従来の fluxgate 磁力計の記録に比べて ring-core 型の記録は格段の高感度 (0.036 n T/mm) であり、従来の ordinary magnetogram では検出し難い Pc 3 が極めて明瞭に記録されているのがよく分かる。高感度のためにすぐに scale out するので、特殊自動 suppression をかけることによって感度を良くしたままで連続記録が可能になるようにしてある。この特殊自動 suppression は、第 4 図に示した自動 cancel の電気回路部及び記録計によって制御されている。次に、横書き式の高感度早書き記録を第 12 図に示す。縦書き式のままで高感度早書き記録をすると、数日で記録紙



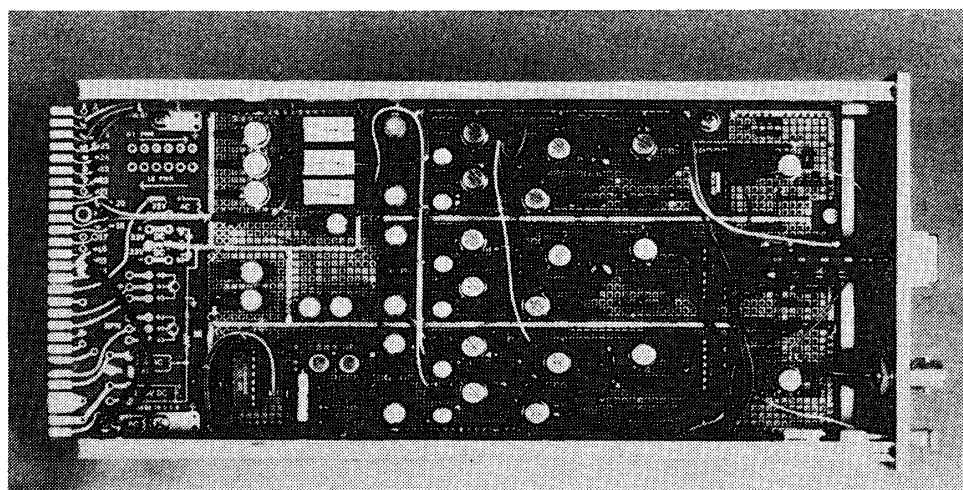
第6図 Cancel coil



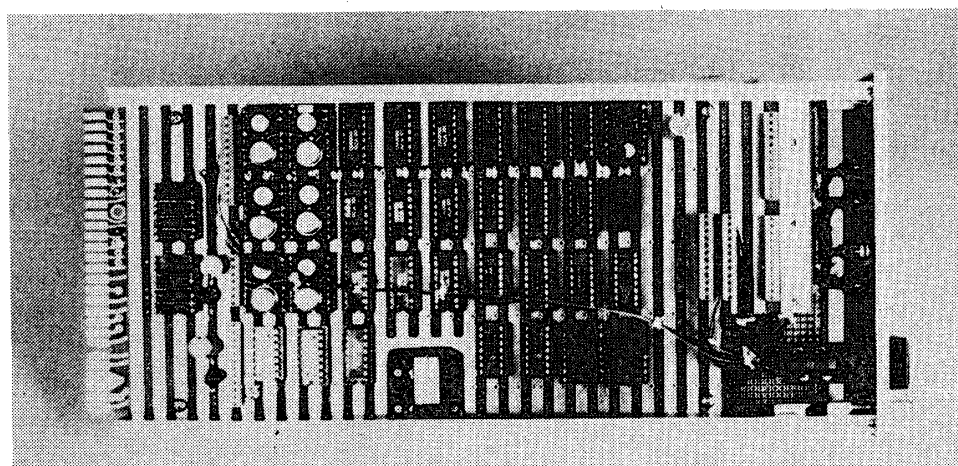
第7図 a) Pre-amp 部電気回路



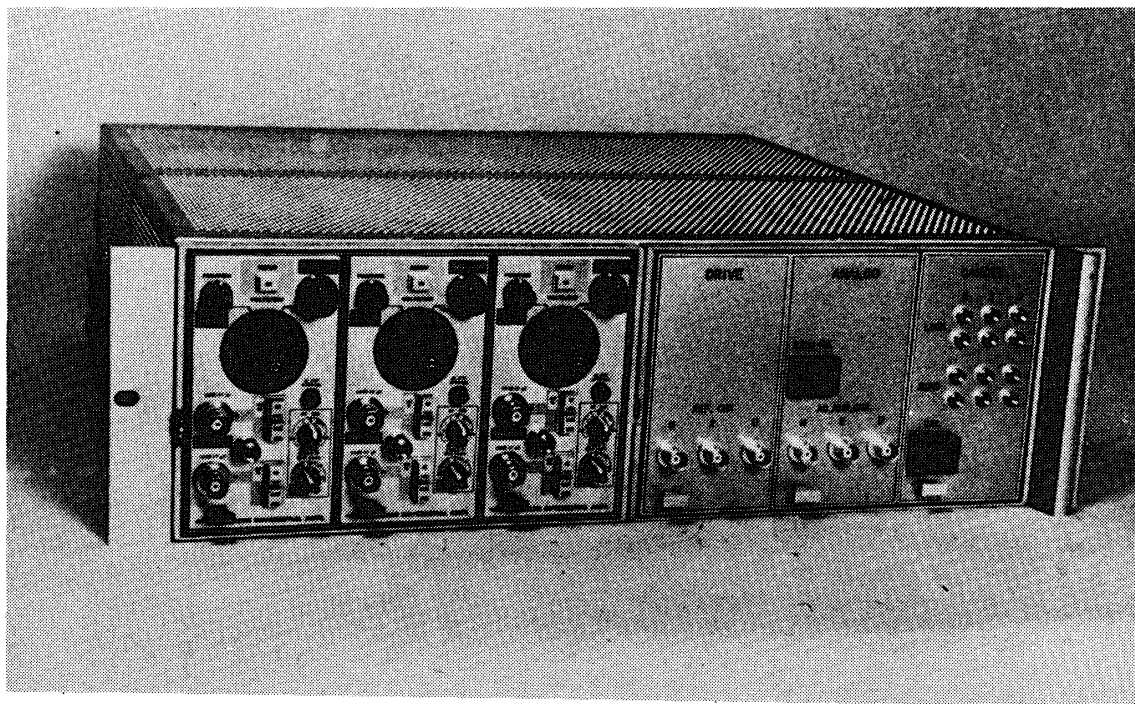
b) Drive 部電気回路



c) Analog-amp 部電気回路



d) Cancel 部電気回路



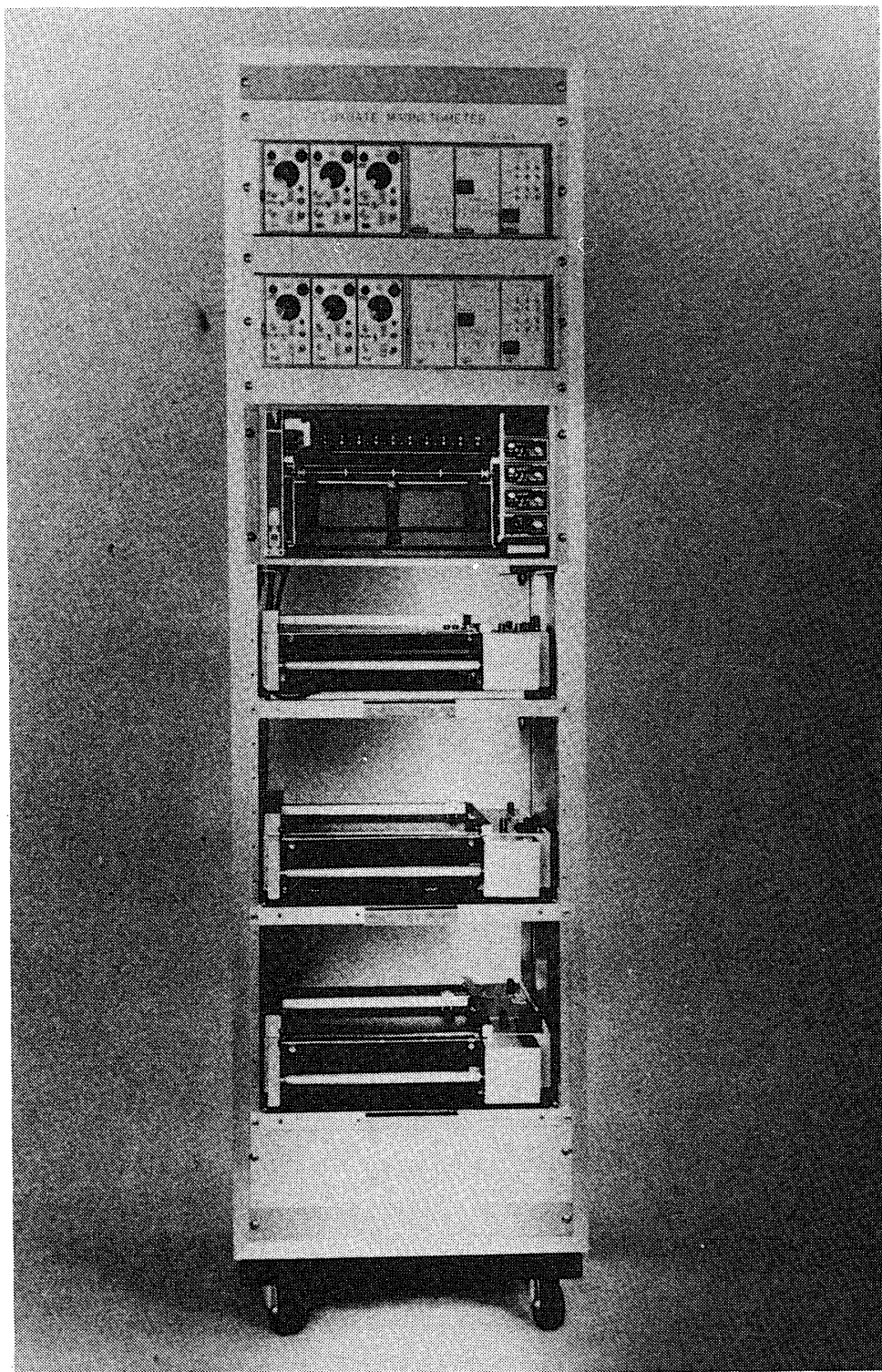
第 8 図 電気回路部

1 本を使う。しかし、この横書き方式では 1 時間毎に横書きしながら、 6 cm/hr の割合で紙送りをしているので、同じ記録紙 1 本で高感度 (0.1 nT/mm) 早書き (25 cm/hr) のまま 16 日間も記録できるようになっている。この横書き方式においても、縦書きと同様に特殊自動 suppression を行っている。従来市販されている two-core 型は勿論、ULF 観測用の誘導磁力計よりも高感度で ULF 領域の Pc 3 型磁気脈動を明瞭に記録していることが図から明らかである。

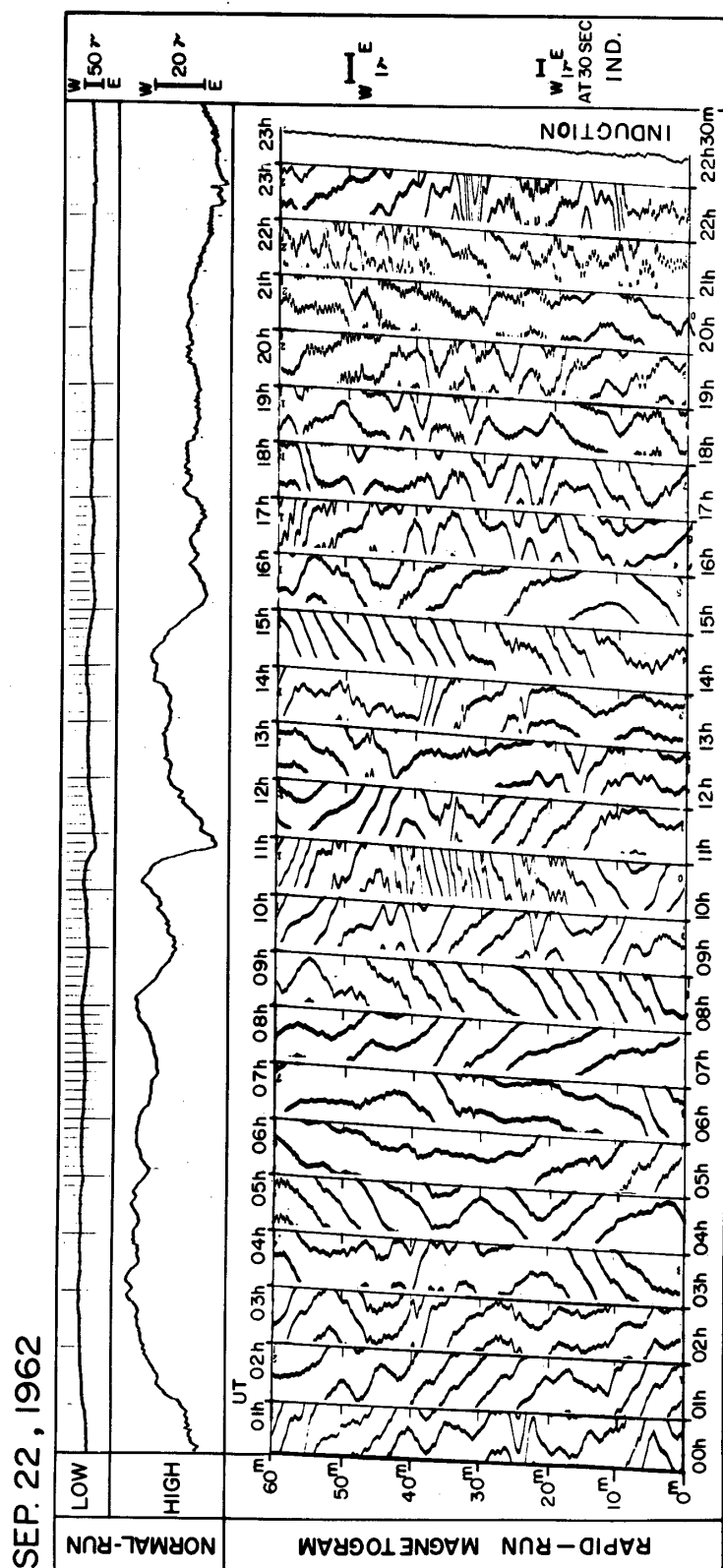
4. 討論と結語

今回測機舎に製作させた地上 station 用磁力計の最高感度は 0.036 nT/mm であり、飛翔体搭載用 ring-core 型磁力計製作の当面の感度に対する目標はここに達成された。現在東北大学附属女川地磁気観測所においては、ring-core 型 fluxgate 磁力計の低感度用として 0.3 nT/mm 、高感度用として 0.1 nT/mm に感度を固定して地磁気の routine 観測を行っている。

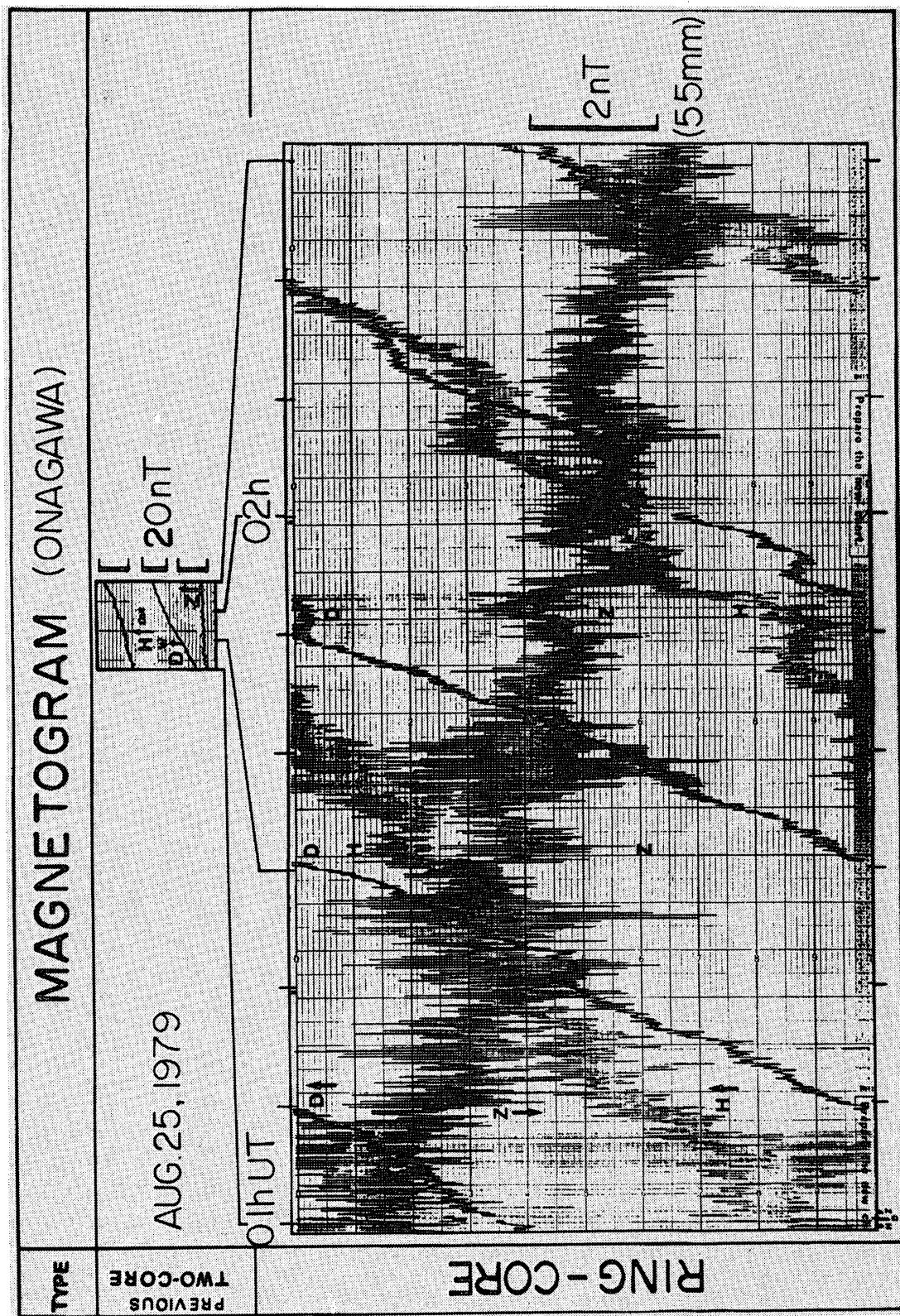
1979 年 6 月 14 日の STE 研究会における磁場計測討論会においておよそ 70 名の参加者のもとで磁力計各論、観測技術、解析論、将来計画等について論議がなされた。第 13 図のような各種磁力計の中で、ring-core 型 fluxgate 磁力計は、小型、軽量、小電力、高感度で磁場を検出し得る最良の磁力計であり、飛翔体搭載用として最適であることが再確認された (斎藤 1979; 斎藤ほか 1979c)。但し、Pc 1 ~ 3 程度の周波数帯 (約 $5 \sim 0.05\text{ Hz}$) の



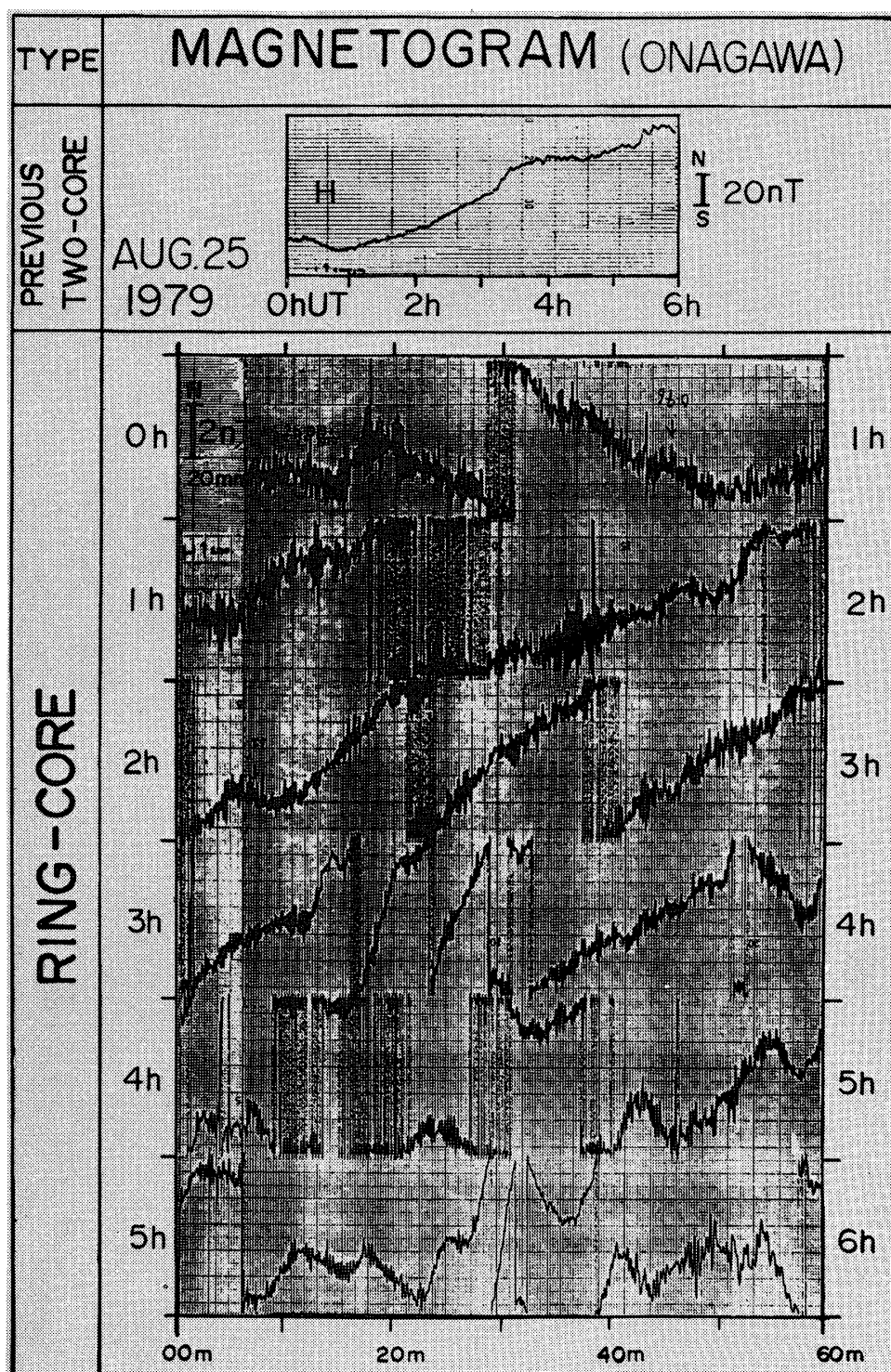
第9図 電気回路及び特殊記録計全体図



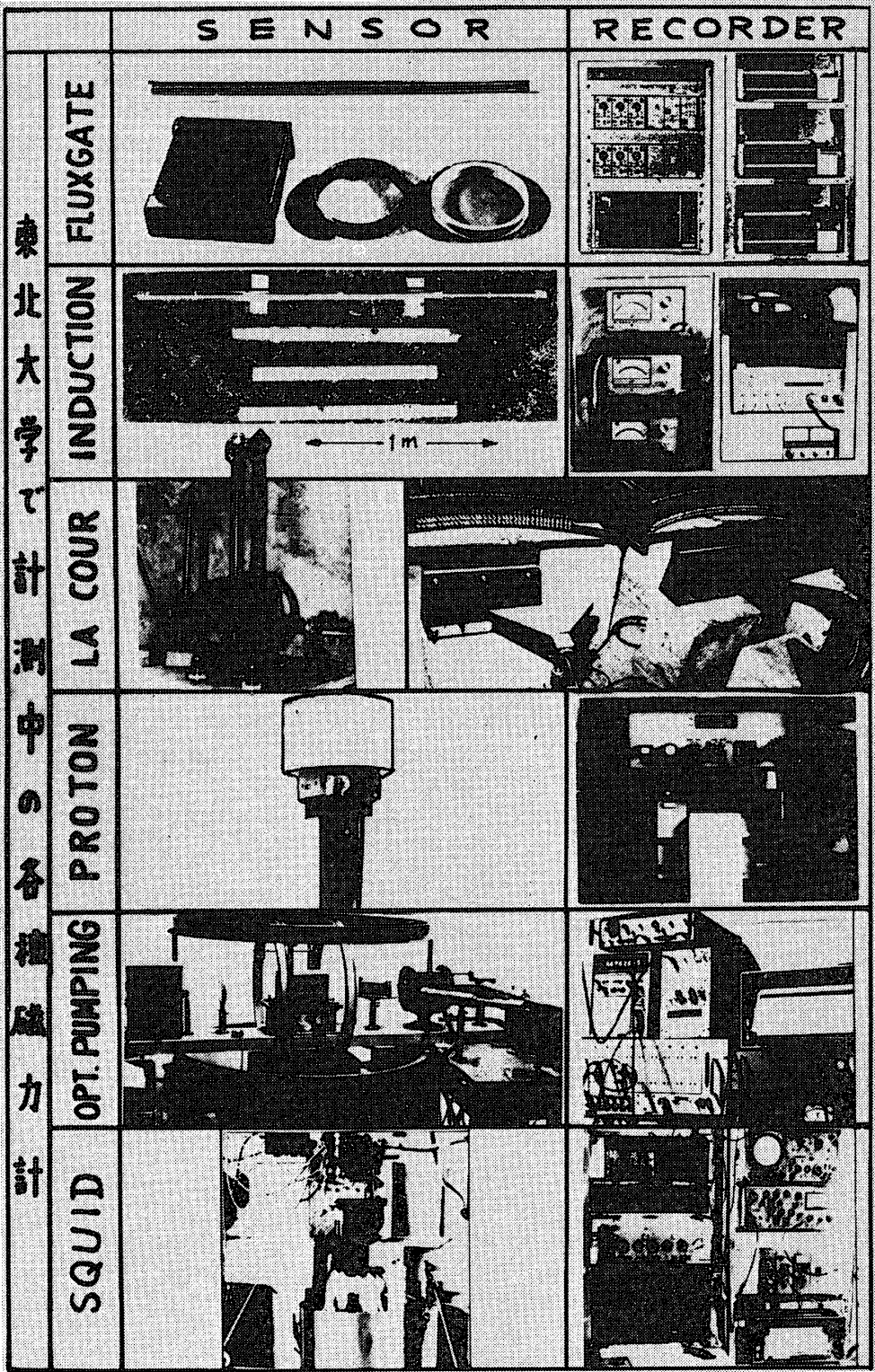
第10図 La Cour 磁力計による高感度記録例



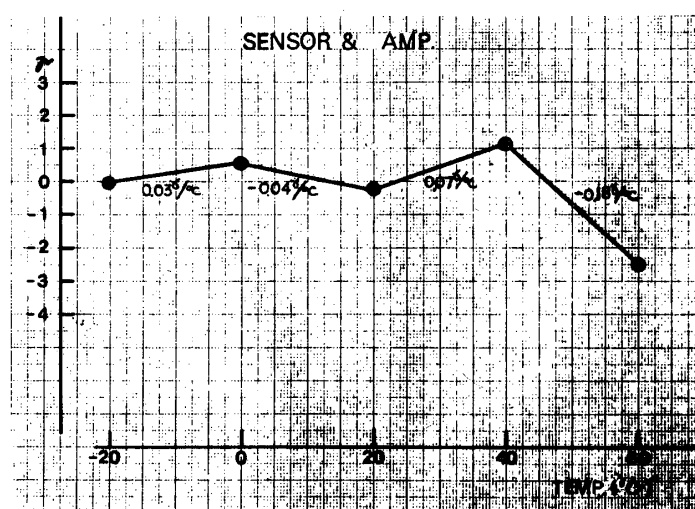
第 11 図 縦書き方式記録例 (原寸比)



第 12 図 横書き方式記録例 (原寸比)



第 13 図 東北大学で計測中の各種磁力計の比較



第 14 図 Sensor および Amp 部の温度特性曲線

ULF 波動を観測する際には、振幅の格段に大きい長周期成分が邪魔になるので、微分型センサーの search coil magnetometer の高感度化を考えると得策である。特に、かなり大振幅の長周期成分が含まれることが予想される Open-J などでは $P_c 1$ を観測する為には、search coil magnetometer と ring-core magnetometer を一緒に搭載する必要があるであろう。

飛翔体搭載用磁力計としての ring-core 型 fluxgate 磁力計については、高感度化及び小型軽量化が十分達成し得ることを本論文で述べたが、最後に残った温度変化による zero offset の問題について、現状に少し触れておく。飛翔体の日照及び日陰による温度変化 ($\sim \pm 70^\circ\text{C}$; 表面) は大きく、特に惑星間空間を飛翔する人工衛星の磁場計測における温度 drift は大きな課題の一つである。従来の市販されている two-core 型 fluxgate 磁力計の温度 drift は、およそ $0.5 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ ($-5^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$) であり、特に 0°C 以下になると zero offset (入力磁場 0 のときの出力) が大きくなっていた。今回開発された ring-core 型 fluxgate 磁力計においては、第 14 図 (測機舎, 1979) に示す様に温度係数が $0.1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ 以下 ($-20^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$) におさえられ、温度的にもより安定化した。この課題は sensor の材質の温度特性を調べ、出力側の増幅回路・feed-back 回路・cancel 回路等を sensor の特性にあわせる様な改良をすることにより解決されるものと考えられる。

上記のように高性能なので、ring-core 型磁力計は将来飛翔体用として有用であるばかりでなく、定点観測用、CA や脈動の移動観測用、極域等無人観測用、海底磁力計用 air-borne 用、岩石磁気測定用等、応用範囲の極めて広い有望な磁力計として期待される。

5. 謝 辞

この研究の推進には、東海大学青山 巖教授、遠山文雄助教授から、種々の助言や有益なご批判を頂いたので感謝する。又、第 13 図を作成するに当っては東北大学の上西克二助手に Optical pumping 磁力計、鈴木治彦助手に Squid 磁力計について資料をそれぞれ頂いたの

で感謝する。なお、三大学共同開発チームによって試作に成功した plot-type ring-core 型磁力計にもとづいて、測機舎が本研究における本邦最初の実用化会社製品である ring-core 型磁力計を完成させたが、その際、測機舎開発チームの献身的な努力があったことをここに付記する。

1979 年 9 月 17 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, Sci. Rept. 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, 1597, (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] 加藤愛雄, 青山 巖; ロケットによる電離層 Sq-current の測定, 東大宇宙航空研究所報告, 2, 3 (B), 1166-1172, (1966).
- [5] 加藤愛雄, 青山 巖, 遠山文雄; ロケットの姿勢測定及び電離層内の磁場測定, 宇宙観測シンポジウム (昭和 42 年度), 57-59, (1967).
- [6] 加藤愛雄, 青山 巖, 遠山文雄; $B_2 - 27$ による地磁気測定, 大気球シンポジウム, (昭和 45 年度) (1973).
- [7] I. Aoyama, F. Toyama, T. Takahashi, Y. Tonegawa, T. Saito and K. Yumoto, "Jikiken" (EXOS-B) results—Magnetic field observation, Magnetospheric Study 1979, 242-246, (1979).
- [8] 斎藤尚生, 湯元清文, 青山 巖, 遠山文雄, 高橋隆男; 1978 年 12 月 11 日 “じきけん” によって観測されたミニサブストームに伴う長周期 Pi 2 磁気脈動, 東大宇宙航空研究所報告 (宇宙科学特集号) (1979a).
- [9] 斎藤尚生; Planet -A による惑星間空間磁場の観測, 惑星プラズマ圏および磁気圏研究会, 361-367, (1978).
- [10] 斎藤尚生, 国分 征, 青山 巖, 瀬戸正弘, 福西 浩, 西田篤弘; Planet -A による磁場計測計画, 科学衛星シンポジウム, 80-89, (1979b).
- [11] 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, 東大宇宙航空研究所報告 (宇宙科学特集号) 14, 4 (B), 1267-1275, (1978a).
- [12] 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; 人工衛星搭載用 ring-core 型 fluxgate 磁力計の製作, 宇宙航空研究所報告 (宇宙科学特集号) 14, 4 (B), 1277-1288, (1978b).
- [13] 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; Ring-core 型及び biaxial 型 fluxgate 磁力計の製作, 宇宙観測シンポジウム, (昭和 53 年度), 223-232, (1978c).

- [14] 斎藤尚生；磁力計各論　まとめ　磁場計測検討会, Jun. 14, 1979, STE 研究会, pp. 1-2, (1979).
- [15] 斎藤尚生, 瀬戸正弘, 青山　巖, 国分　征, 福西　浩；将来計画　Planet -A 磁場計測検討会, Jun. 14, 1979, STE 研究会, pp. 1-3, (1979c).
- [16] 測機舎；Ring-core 型 fluxgate 磁力計実験報告書, (1979).