

50cm長 BIAXIAL型-CORE型 FLUXGATE 磁力計の製作*

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

High-Sensitive Fluxgate Magnetometer
with a 50-cm Length Bi-axial Core

By

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

Abstract: Both resolution and sensitivity of a fluxgate magnetometer is theoretically expected to be improved if dimension ratio of its biaxial core is increased. Based on this theoretical expectation we manufactured a biaxial 6–81 Mo permalloy core with a dimension ratio of as high as $\ell/d = 2.0 \times 10^3$, where length $\ell = 500$ mm, thickness $h = 10$ μm , width $w = 5$ mm, and $d = 2\sqrt{h \cdot w/\pi}$. A drive current applied on the core with a 1-kHz frequency makes a 2-kHz pick-up current which is amplified and phase-detected. The output voltage from the phase detector stands for the magnetic field strength along the core axis. Geomagnetic field variations are recorded by this 50-cm biaxial magnetometer at the Onagawa Magnetic Observatory of Tohoku University and compared with those recorded simultaneously by another commercial biaxial magnetometer. It is concluded that this 50-cm biaxial one is very excellent magnetometer with resolution of 10^{-2} nT (100 times better than the commercial type) and with sensitivity of 10 mV/nT (~ 100 times better).

1. 諸 言

現在、磁力計として地磁気連続観測の実用に供されているものの主な種類は第1表に示す

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東北工業大学

† 東北大学理学部

通りである。この表で*印を付したものは東北大学理学部女川地磁気観測所で実用されているものを示すが、*印のないものの resolution 等については Campbell の資料にもとづいている。本研究においては、このうち fluxgate 磁力計について従来用いられてきた biaxial 型 sensor の dimension ratio を技術的に最高の限界にまで向上させることによって、どの程度の精度にまで到達し得るかを試みた。その結果、従来の biaxial 型に比べて極めて高精度で地磁気を観測することに成功したので、ここに報告する。

遠山(1969)は、いろいろな dimension ratio を有する biaxial 型 core を用いて dimension ratio に対する fluxgate 磁力計の sensitivity と noise level を実験的に測定し、第1図に示すような直線関係を求めた。すなわち、これによると dimension ratio が高まるにつれて noise level は減少し、sensitivity は向上することが分かる。従ってこの図から、もし最高の dimension ratio を有する biaxial 型 sensor を製作すれば、最低の noise level と最高の感度を有する優れた fluxgate 磁力計ができることが期待される。この原理にもとづいて本研究で製作された磁力計は、その core の長さから、50cm 長 biaxial-core 型 fluxgate 磁力計と呼ぶこととする。

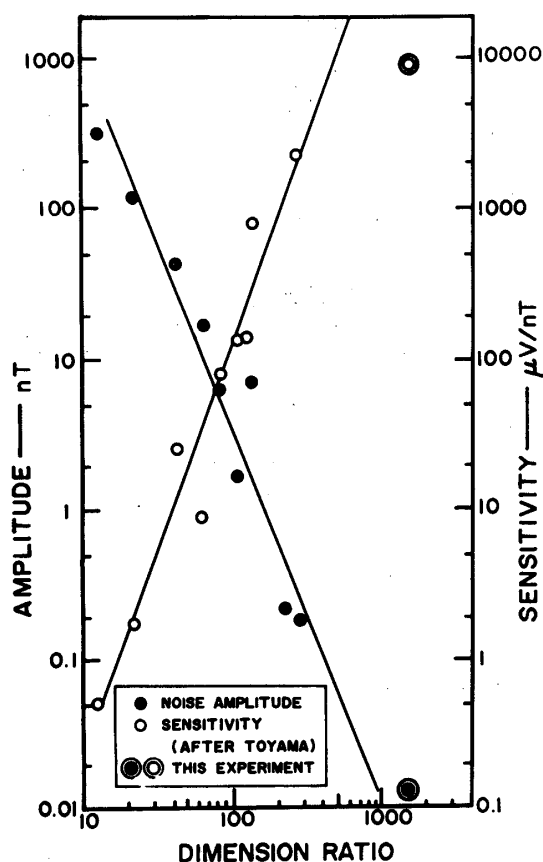
2. Sensor の構造

前記のごとく fluxgate 磁力計の精度と雑音は、dimension ratio が高くなればなるほど改良されるので、金工研の協力を得て、日本で到達し得る最高の技術を傾けて dimension ratio 実に 2.0×10^3 という優れた core を製作した。これには厚さ 10^{-4} mm, 長さ 500 mm, 幅 5 mm という極めて薄く細長い 6-81 M_0 パーマロイのテープを、長さ方向に、こよりのように丸めて、内径僅か 1.8 mm, 長さ 504 mm の石英管の中央に歪みなく位置するように細心の注意を払って通す技術が必要なので、器用な日本人でなければできない仕事で、

第1表 各種磁力計の特性 (*印以外は Campbell による)

Magnetometer Type	Uppermost Limit (Gauss)	Resolution (Gauss)
Fluxgate	$< 10 \sim 20$	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
Superconducting	$< 10^{-5}$	10^{-7}
Proton precession	< 10	10^{-6}
Optically Pumping	< 10	10^{-7}
Hall Effect	$< 5 \times 10^4$	10^{-7}
Induction	$< 10^{-4}$	10^{-9}
Ordinary variometer *	$< 10^{-2}$	10^{-6}
La Cour Magnetometer *	$< 10^{-2}$	10^{-8}

* Onagawa

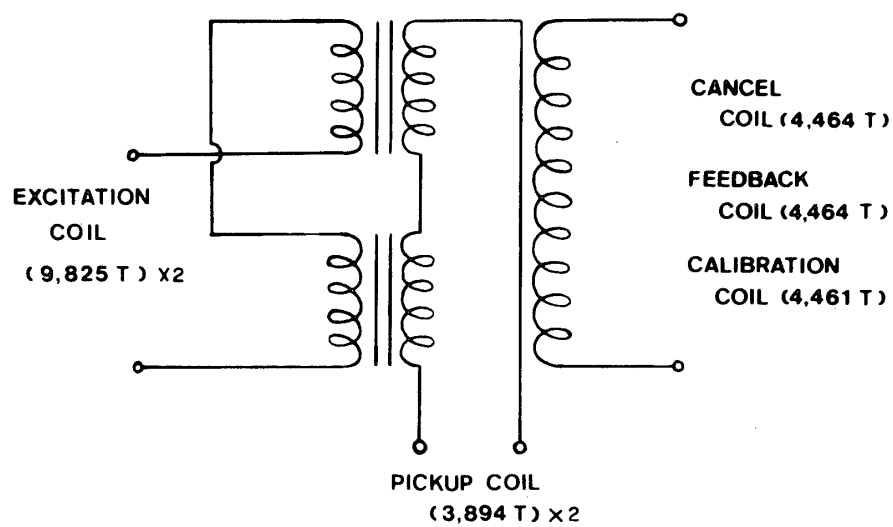


第1図 Dimension ratio に対する感度, 雑音

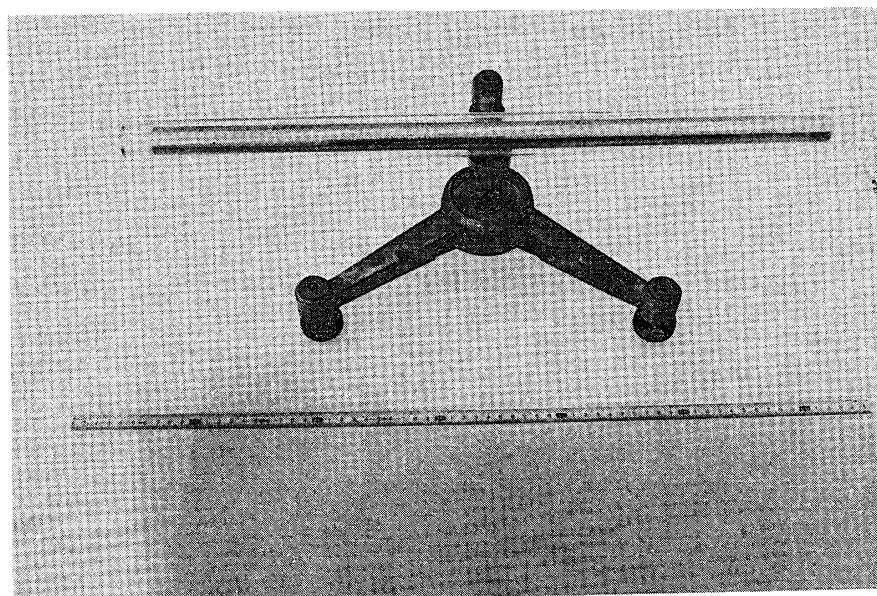
文献を見た限りでも biaxial 型 core として現在までに世界最高の dimension ratio を有している。外径 2.8 mm のその石英管 2 本に第 2 図に示す如くそれぞれ駆動 coil を 9825 回巻き, それを差動型に結線する。その上にそれぞれ 3894 turn の検出 coil を巻き, 両者を束ねて (すなわち biaxial にして) 一緒に内径 16 mm の石英管に入れ, その上に 4464 turn の cancel coil, 4464 turn の feedback coil, および 4461 turn の calibration coil を巻いて sensor とした。外観を第 3 図に示すが, 人工衛星搭載用としてはいささか大きい, balloon 搭載用としては十分小型であり, かつ長さ 2 m 程度の induction magnetometer の sensor や, 重く可搬に不便な超伝導磁力計に比べればいかに小型で portable かがわかる。

3. 磁力計の回路

まず 1 kHz の周波数を音叉発振器で作成し, 電力増幅器を経て sensor の駆動コイルに流す (第 4 図参照)。発振器の出力はまた, frequency doubler で 2 kHz に変換されて phase shifter, amplifier を経て phase detector に入力される。一方, sensor の出力を 2 kHz の bandpass filter に通し, 増幅器で増幅してこれも phase detector に入力する。両者の入

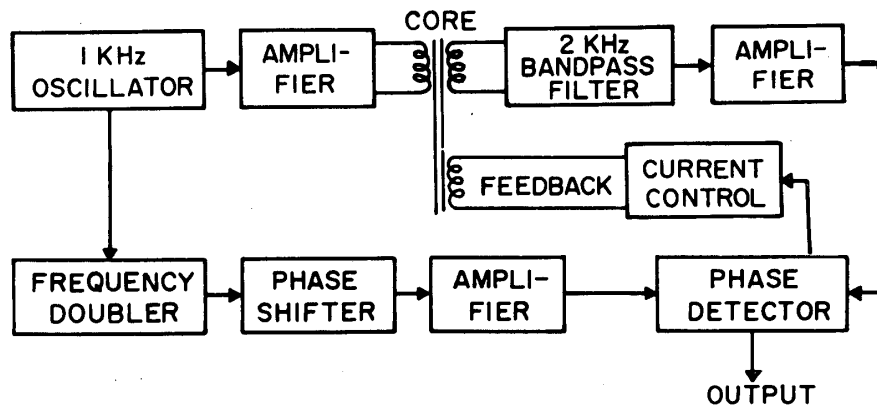


第2図 Sensor coil の構成



第3図 50 cm 長 fluxgate 磁力計 sensor

BLOCK DIAGRAM



第4図 50 cm 長 fluxgate 磁力計 block diagram

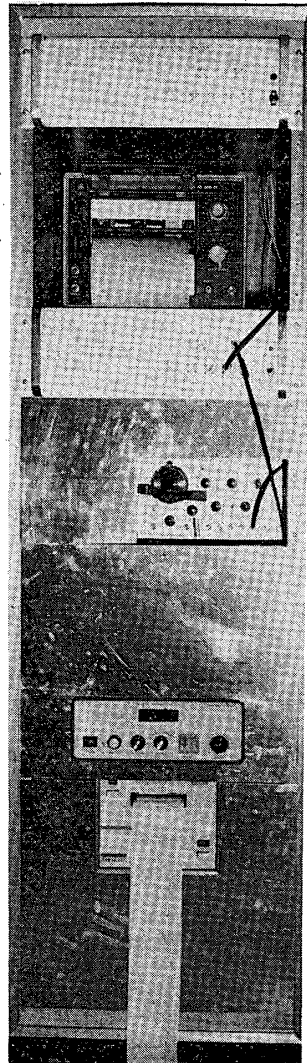
力信号で位相検波をすると sensor 軸方向の磁場が測定できる。地球の主磁場が常に bias として印加されている NS 成分の磁場変動を検出するには current control を経て sensor の cancel coil に cancel 電流を流せば常に零位法を用いて磁場測定ができるので、その出力をペンレコーダーに接続すればよい。第5図は、プロトン磁力計などと一緒にラックに収めた 50 cm 長 biaxial 型磁力計の電子回路部分を示すが、簡単な一つの筐体で済んでいることに注目されたい。

4. 地磁気微小変動記録

このような sensor と電子回路によって構成された biaxial 型磁力計を、東北大学理学部女川地磁気観測所に設置して水平成分の微小変動磁場を記録させたのが第6, 7図である。それぞれの図の下方には、比較のために現在市販されている biaxial 型 fluxgate 磁力計記録を同一縮尺で示してある。従来型と比較しても、今回製作された 50 cm 長 biaxial 型 fluxgate 磁力計は、周期3分以上の fluctuation を忠実に、かつ極めて高感度で記録していることが分かる。しかもそればかりでなく、その fluctuation の上に重畳した Pc 3~4 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ことが分かる。これが artificial または instrumental noise でなく、自然の脈動であることは、同観測所で同時記録されている誘導磁力計記録と比較することによって確かめられている。

5. 討論と結論

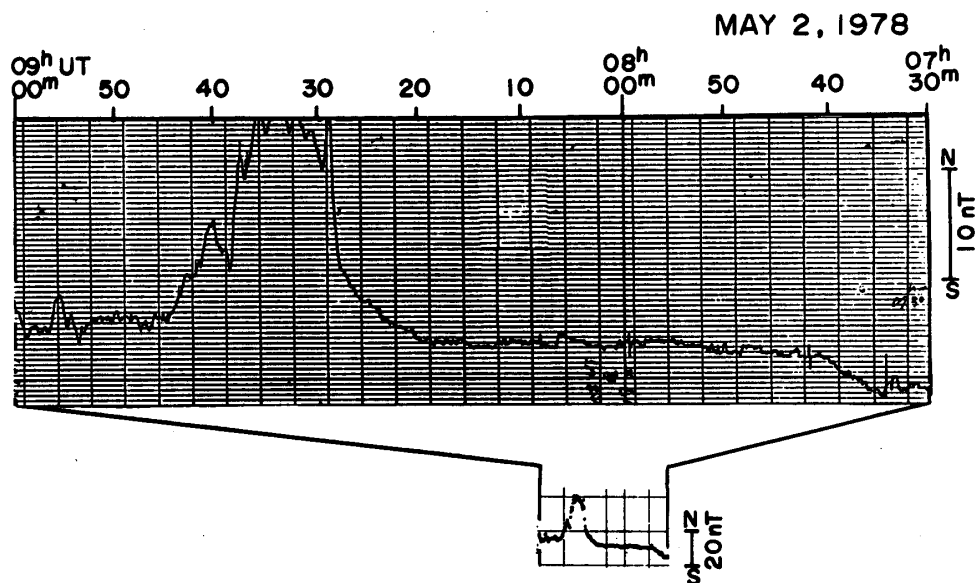
2.で述べたようにこの 50 cm 長 biaxial 型磁力計 sensor の dimension ratio は 2.0×10^3 であるので、この dimension ratio をもとに、測定された sensitivity と noise level を第1図に重ねて plot してみると同図の2重丸のようになり、期待通り従来の biaxial 型



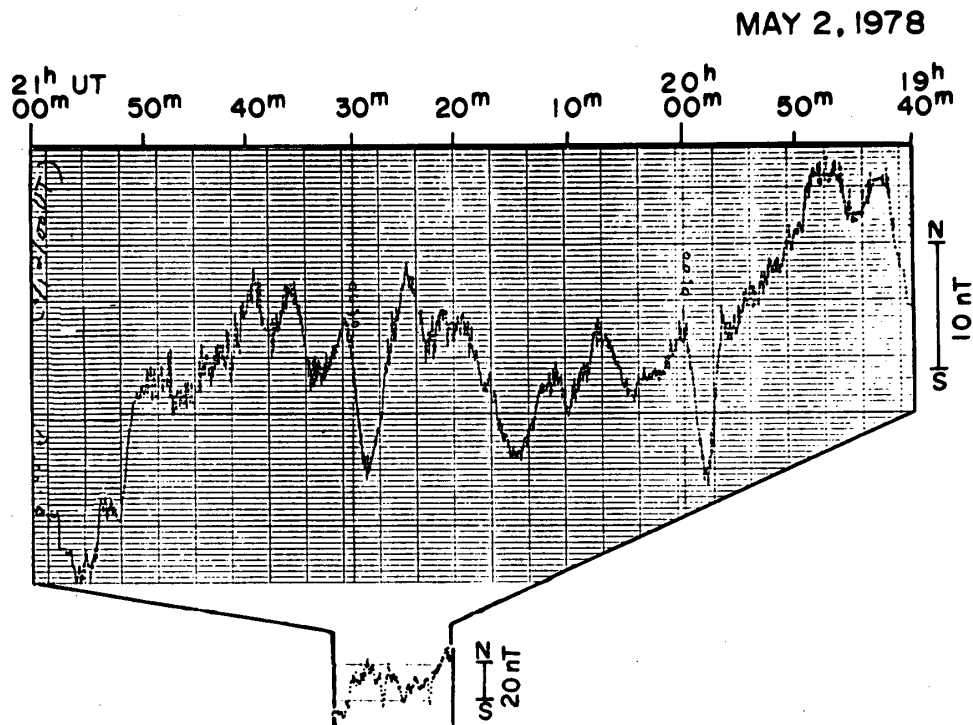
第5図 東北大学女川地磁気観測所に設置された磁力計, 上から 50 cm
長 biaxial, ring-core fluxgate 磁力計, Proton 磁力計

磁力計に比して最高の性能に到達したことが分かる。同図においては dimension ratio に対する sensitivity と noise level が直線に表示されているが、無限大の dimension ratio に対してそれらは saturate してくるはずなので高い dimension ratio に対しては勾配のゆるい曲線になるはずである。

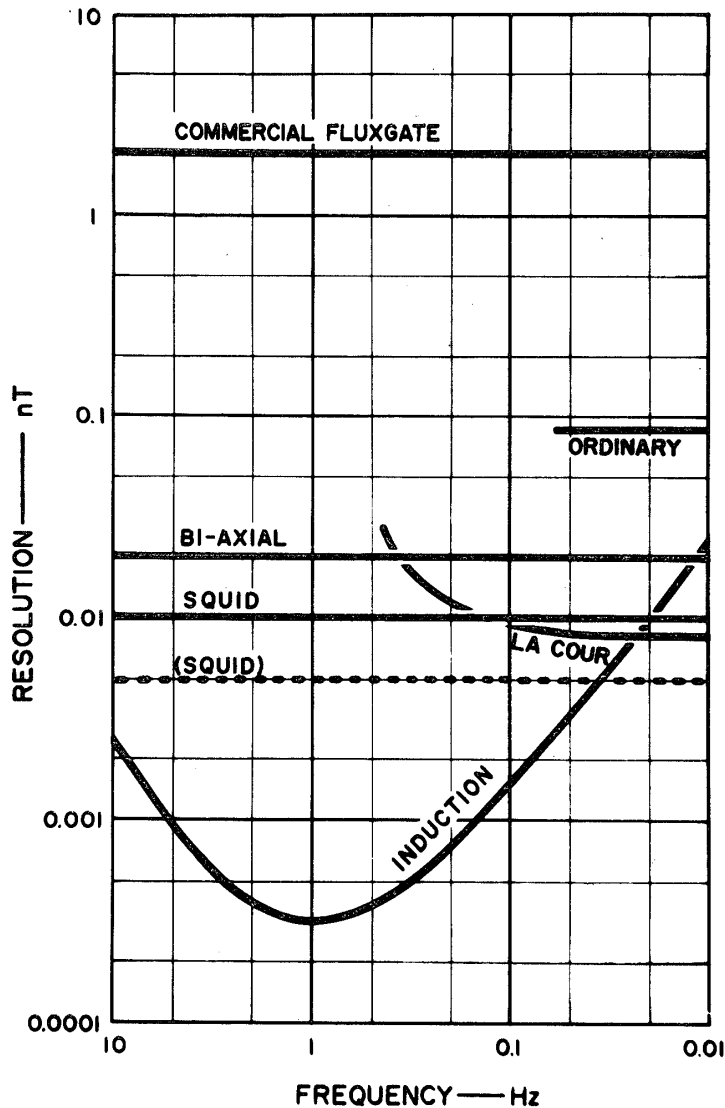
次にこの resolution と他の magnetometer の resolution とを比較したのが第8図である。現在市販されている biaxial 型 fluxgate 磁力計に比して 10^2 も resolution が向上していることが分かる。SQUID 型磁力計については印刷公表されている資料（北村ほか, 1977; 実線は当時到達した resolution, 点線は将来到達するであろう resolution) にもとづいたが、現在はこれよりも向上しているとのことである。但しこれは微分型として記録さ



第6図 記録例 (原寸比)



第7図 記録例 (原寸比)



第8図 各種磁力計の周波数に対する resolution

れているので、直流部分（多分 $f < 10^{-2}$ Hz）はこの 50 cm 長 biaxial 型磁力計の方が精度が高いはずである。図に見られるごとく、この 50 cm 長磁力計といえども、女川観測所に設置してある光学式 La Cour 型磁力計や induction 型磁力計の精度にはまだ及ばぬが、これらの磁力計に対して 50 cm 長 biaxial 型 fluxgate 磁力計は小型、軽量、対震性、携帯性、操作の簡易性等について遥かに勝っている。

この磁力計では駆動周波数が 1 kHz なので、周波数特性は地磁気脈動の最短周波数帯、すなわち Pc 1 range まで十分 cover しているが、地上 station 用の非微分型磁力計としてはそこまで cover する必要はないと考える。なぜならば精度 10^{-2} nT を要する Pc 1 ま

で記録し、かつ非微分的に 10^3 nT 程度の磁気嵐も同時に記録させようとする La Cour 型記録方式にならざるを得ず、この記録方式では 10^{-2} nT 以上に精度を上げるとはなはだ読み取り難くなり非実用的になるからである。非微分型磁力計の出力を filter などを用いて微分的に記録する方式も考え得るが、それならばもともと検出器が微分型である誘導磁力計を用いれば簡単で、第8図に見られる如く induction magnetometer では現在既に $\sim 10^{-4}$ nT の精度にまで到達している。従って、地上 station 用磁力計としては、地震計などと同じく、目的とする周波数帯に応じて最も適した微分型、非微分型磁力計を選ぶ方が賢明なやり方なので、地上 station 用として最適の 50 cm 長 biaxial 型 fluxgate 磁力計としては、本研究で到達した精度で十分である。

地上と異なって宇宙空間になると磁場変動の dynamic range は地上より狭くて済むし、人工衛星に搭載するには重量、容積、sensor 種類などに制限があるので、この場合には biaxial 型でなく、別掲論文（瀬戸ほか、1978）に述べる如く ring-core 型 sensor を用いた磁力計を用いるのが賢明である。

謝 辞

本研究に対して、東北大学工学部松尾教授から有益なご教示を得たのでここに深く感謝する。

1978年11月2日

参 考 文 献

- [1] F.C. Williams and S.W. Noble; The fundamental limitations of second-harmonic type of magnetic modulator as applied to the amplification of small D.C. signals, *Proc. IEEE.*, **97**, Part II, 445, (1950).
- [2] 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).
- [3] P.H. Serson; An electrical recording magnetometer, *Can. J. of Phys.*, **35**, 1387-1394, (1957).
- [4] 遠山文雄; 倍周波型磁力計磁芯の雑音特性, 東海大学工学部紀要, No.2, (1969).
- [5] N.F. Ness; Magnetometers for space research, *Space Sci. Rev.*, **11**, 459-554, (1970).
- [6] 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
- [7] 瀬戸正弘, 早坂孝, 青山巖, 斎藤尚生, 桜井享, 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) 印刷中 (1978)
- 62 回日本地球電気磁気学会講演, (1977)