

「さきがけ」搭載リングコア磁力計について

湯元 清文*・斎藤 尚生**・中川 朋子*・
平尾 邦雄***・青山 巖***・瀬戸 正弘†

(1986年6月20日受理)

Ring-Core Fluxgate Magnetometer Installed on Sakigake

By

Kiyohumi YUMOTO, Takao SAITO, Tomoko NAKAGAWA, Kunio HIRAO,
Iwao AOYAMA, and Masahiro SETO

Abstract: Sakigake, the first Japanese artificial planet, was launched on 8 January 1985, and passed through the upstream region of comet Halley on 11 March 1986. The ring-core magnetometer carried by Sakigake has successfully detected clear multiple crossings of the helio neutral sheet and the interplanetary magnetic field (IMF) variations. The installed magnetometer had been improved to measure the smaller IMF intensity of ~ 5 nT. In the design of the magnetometer system, high fidelity of the magnetometer on board the spacecraft had to be examined with respect to following five problems: (1) electrical exactitude of the basic magnetometer, (2) alignment stability of the triaxial sensor assembly, (3) residual magnetism of the spacecraft, (4) stability of the spacecraft oscillation, and (5) capacity of telemetering of scientific data.

要 旨

「さきがけ」に搭載されたリングコア磁力計は、Halley 彗星最接近時の磁場変化や微小 IMF 変動を成功裡に観測した。この日本初

* 東北大学理学部

** 宇宙研客員助教授, 東北大学理学部

*** 東海大学工学部

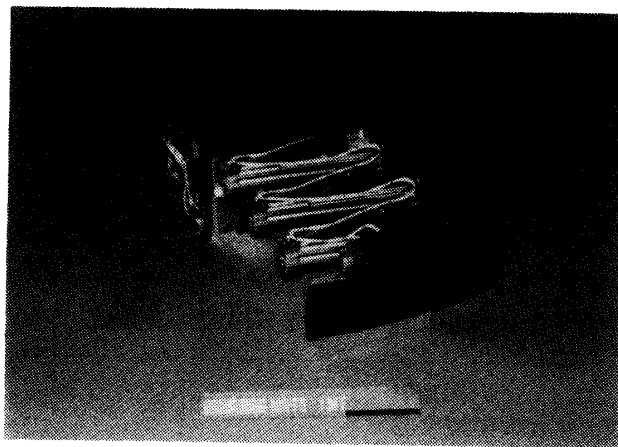
† 東北工業大学

の深宇宙探査機に搭載する為に、計画的な地上、大気球、ロケット実験がなされた。これらの研究から、飛翔体を用いた磁場測定における磁力計設計製作において次の五項目; (1)磁力計自体の電気的精度, (2)検出器の機械精度, (3)飛翔体の磁気バイアス, (4)飛翔体の姿勢精度, (5)データ伝送量に留意し、総合的な性能に仕上げる必要があることが確認された。

1. 緒 言

1985年1月8日に打ち上げられた日本最初の人工惑星“さきがけ”(MS-T5)による惑星間空間磁場(IMF)の高精度計測がなされている。“さきがけ”搭載機器IMFの工学的な信頼性を高める為に、飛翔体搭載用リングコア磁力計の研究開発が、我々研究グループによって1977年頭初から行われて来た。1977年から1980年までの地上野外観測用リングコア磁力計の開発(斎藤他, 1979), 1979年から大気球搭載用磁力計の開発(加藤他, 1980; 斎藤他, 1981)を行い、さらにK-9 M-72及びS-310-13号機ロケット実験(斎藤他, 1980)等の計画的研究がなされ、所期の成果が収められた。1986年4月現在、“さきがけ”に搭載されたIMF計器は、Halley彗星最接近時における太陽風モニター及び彗星起源の O^+ イオンによる磁気流体波を発見する大役を果し(Saito et al., 1986; Yumoto et al., 1986), 太陽風中における惑星間空間磁場変動(湯元池, 1986; 中川他, 1986)の貴重なデータを毎日伝送している。第1図は“さきがけ”に搭載されたIMF計測用磁力計を示す。第1表にその仕様特性がまとめられてある。

本論文においては、“さきがけ”搭載用磁力計IMFのFM製作までのロケット実験およびIMF単体試験や、打ち上後のIMFデータ1次処理解析結果から得られた、飛翔搭載用磁力計の設計製作における留意点についてまとめたい。



第1図 IMF計器(電気回路部・ブーム部・センサー部)の概観。

第1表 「さきがけ」搭載磁力計 IMF の性能仕様.

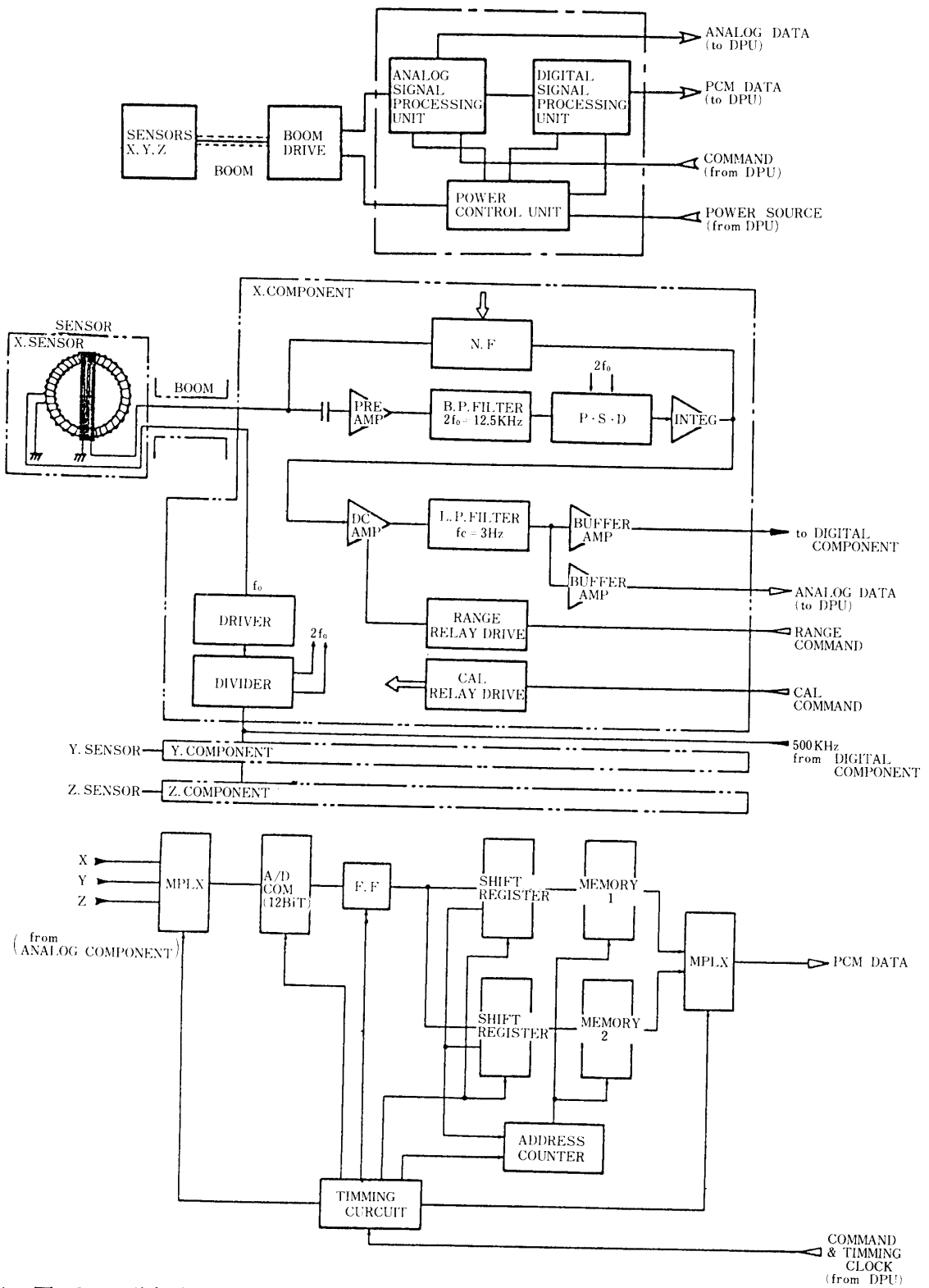
SAKIGAKE (MS-T5)

SPECIFICATION OF IMF	
TYPE	: FLUXGATE MAGNETOMETER
SENSOR	: RING CORE 1 _{inch} φ (THREE AXES)
DYNAMIC RANGE	: ± 64 nT
RESOLUTION	: 0.03215 nT/0.125 _{SEC} (OR 4 _{SEC})
NOISE ENVELOPE	: 0.05 nT
DRIVEN FREQUENCY	: 6.25 kHz
SIZE	: ELECTRONICS 300×245× 75 mm
	: SENSOR 60 × 60×110
	: 2m-BOOM 300×245× 75
WEIGHT	: ELECTRONICS 1.99 kg
	: SENSOR & CABLE 0.39
	: BOOM 2.65
POWER CONSUMPTION	: 2.0 W

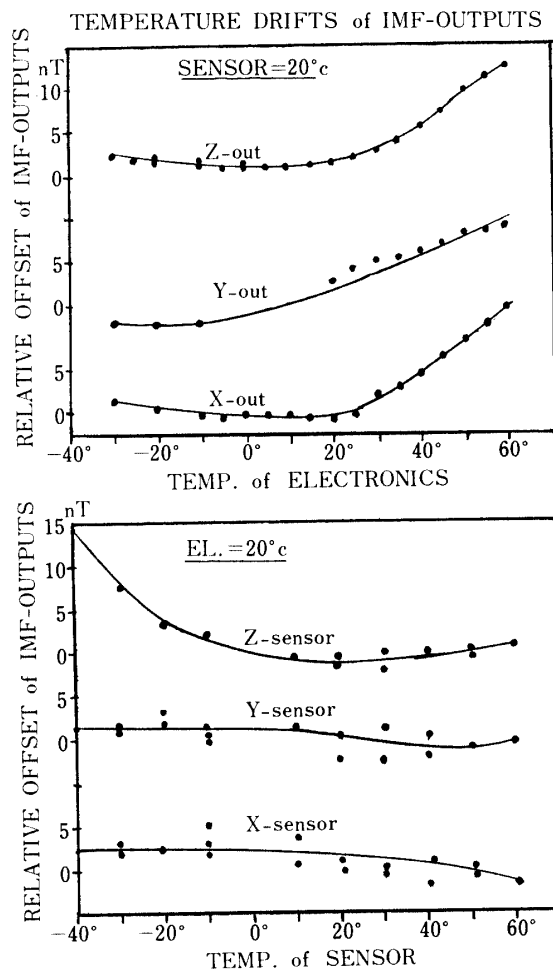
2. 飛翔体搭載用磁力計設計製作における留意点

飛翔体搭載用磁力計としての性能は、地上定点観測における磁力計自体の性能：(1)磁力計電気部の電氣的精度、(2)検出部の機械的精度を向上させようとする問題に加えて、その本筋には拘わらない新たな3つの問題、即ち、(3)飛翔体本体の磁気バイアス、(4)飛翔体の姿勢精度(ブームも含む)、(5)データ伝送量によって評価される。これら5項目の留意点のうち、1項目でも性能が悪ければ、他の4項目がいかに優れていても、その悪い1項目によって磁力計の精度は決定される。それ故に、飛翔体搭載用磁力計の設計においては、これら5項目を総合的に評価し、無駄の少ない最高の性能のものを製作する必要がある。本論文では、これら5項目の観点から“さきがけ”に搭載された磁力計 IMF の性能について、以下にまとめる。

〔1〕電氣的精度：磁力計の電氣的精度は、①外部変動磁場に対する応答特性、②出力の S/N 特性、③出力の絶対精度及びオフセット精度特性、④出力の線型特性及び⑤長期安定性(ドリフト特性)によって評価される。“さきがけ”搭載 IMF 磁力計のアナログ出力基本回路系統図を第2図に示す。①②の f 及び S/N 特性は、周囲変化磁場情報を位相検波する P. D. S. 回路の後の積分回路及びローパスフィルタ回路定数によって主に決定される。1 Hz 程度の速いスピンのかかったロケット実験においては、位相ずれによる誤差を少なくする為に、周波数応答性の良い磁力計が必要であるが、惑星間空間の数 10 nT 以下の微弱磁場測定においては、S/N を良くして分解能を高める必要がある。周波数応答特性を ~ 3 Hz に抑えることにより、ノイズレベルを測定範囲の 5×10^{-5} 以下に抑えた。“さきがけ”の 12 bit/±64 nT 測定範囲に対しては、0.032 nT の高分解能のデータ取得がなされて

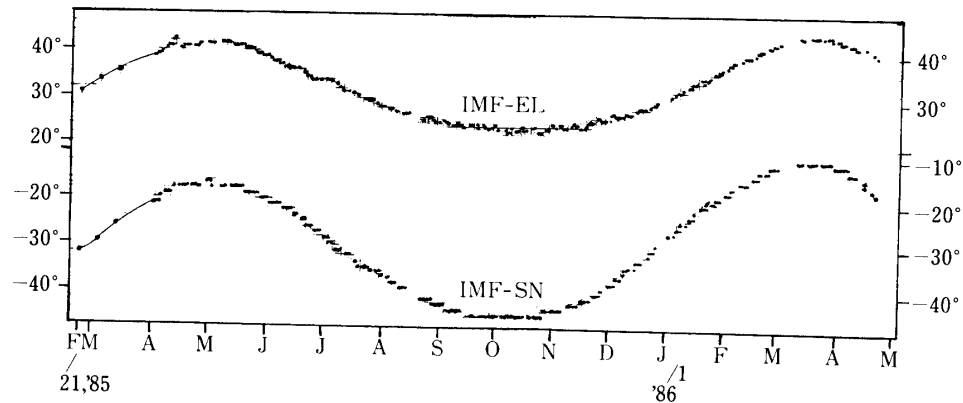


第2図 IMF 磁力計システムブロック図(上), アナログデータ処理部(中), デジタルデータ処理部(下)ブロック図.

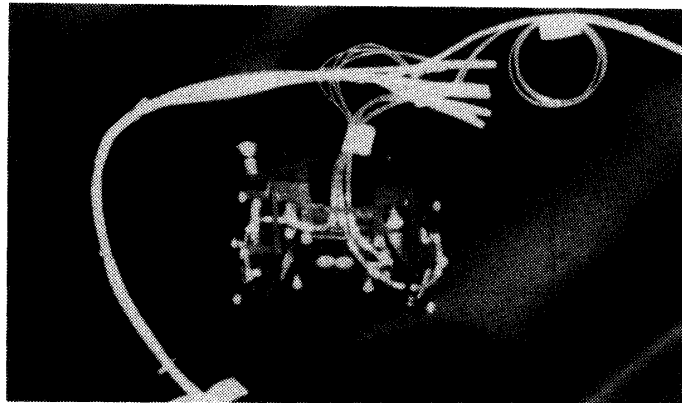


第 3 図 IMF 磁力計(X, Y, Z) 3 成分出力の温度ドリフト。(上)電気回路部の温度依存性,(下) センサ部の温度依存性。

いる。③の出力の絶対精度及びオフセット精度は、飛翔体に使用できる信頼性電気部品の重量及び予算的制約から、現在の所、測定範囲の 10^{-3} のオーダーの精確度である。従って、“さきがけ”による惑星間空間磁場を測定範囲 ± 64 nT で測定するときの絶対精度は 0.064 nT 程度となり、研究の上で問題はない。④の出力線型特性は、測定範囲の 10^{-4} の誤差内に抑え込むことができた。スピン変動に伴う周囲磁場変化 $\sim \pm 50,000$ nT の大振幅変動があるロケット高度では $\sim \pm 5$ nT の誤差になるが、惑星間空間では線型精度 $\sim \pm 6.4 \times 10^{-3}$ nT となり問題とならない。電気的特性の最後の⑤磁力計自身の持つ零オフセットの温度ドリフトは、搭載計器の重量・形状の制限さえなければ、フィードバック回路や出力を反転するフリッパー回路を付けることにより、最少化及び評価が可能である。“さきがけ”に搭載された重さ 1.9 kg の IMF-EL 部の中にはこれらの回路は付けられていない。出力データには温度ドリフトする零オフセットが含まれており、センサー及び電気回路部のオフセットは、地上試験時に求めた特性曲線(第3図)と観測時の SN 及び EL 部の温度の HK モ



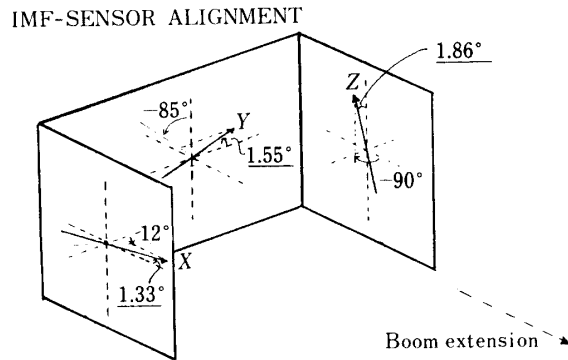
第4図 「さきがけ」のHK温度。IMF-EL（電気回路部）とIMF-SN（センサ部）の温度履歴。



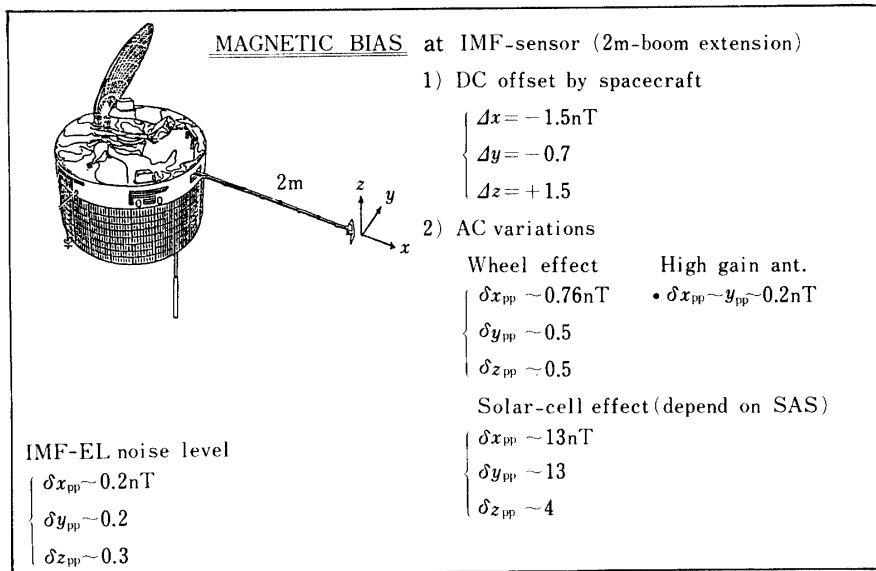
第5図 IMFリングコアセンサーブロック概観。

ニター値（第4図）を用いて、計算機処理によって再評価される。

〔2〕 検出部機械精度：磁力計の絶対値精度は、磁気3成分を検出するセンサーの3軸直交度に大きく依存している。これは主に、センサーブロックの加工精度・電氣的及び機械的取付精度によって決定される。特に、地球主磁場等の強磁場中では大きな誤差となる問題である。第5図の「さきがけ」のIMFセンサーは、カーボン40%含入のベスペル材（熱線膨張係数 $3.8 \times 10^{-5} \text{ cm}/^\circ\text{C}$ ）のセンサーブロック、6-81 Mo-Niの $4 \mu\text{m}$ 厚・3mm巾・20層のパーマロイ箔を内径1インチのボビンに巻いたセンサーコア3個から成っている。センサーカバーはカプトンで作られる。寸法は $55 \text{ mm} \times 55 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ の総重量 260 grである。IMF磁力計センサーの3軸直交精度の検定は新宇宙研のシールドルーム内で3軸ヘルムホルツコイルと2軸回転台を用いて行なわれた。その結果、無調整のまま、センサーの電氣的3軸直交度の誤差は1.9度以下であることが明らかにされた（第6図）。この値は、IMFの測定範囲 $\pm 64 \text{ nT}$ において、3軸直交度誤差による磁力計出力の不確定



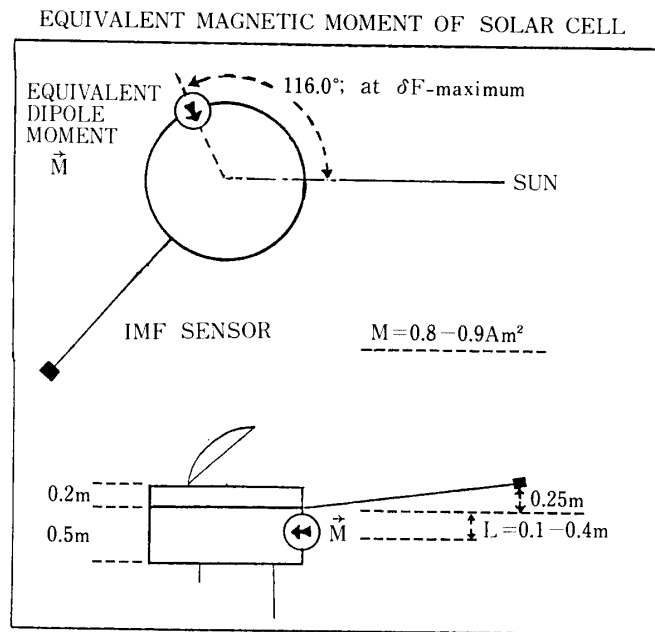
第6図 IMFリングコアセンサー3軸直交度。



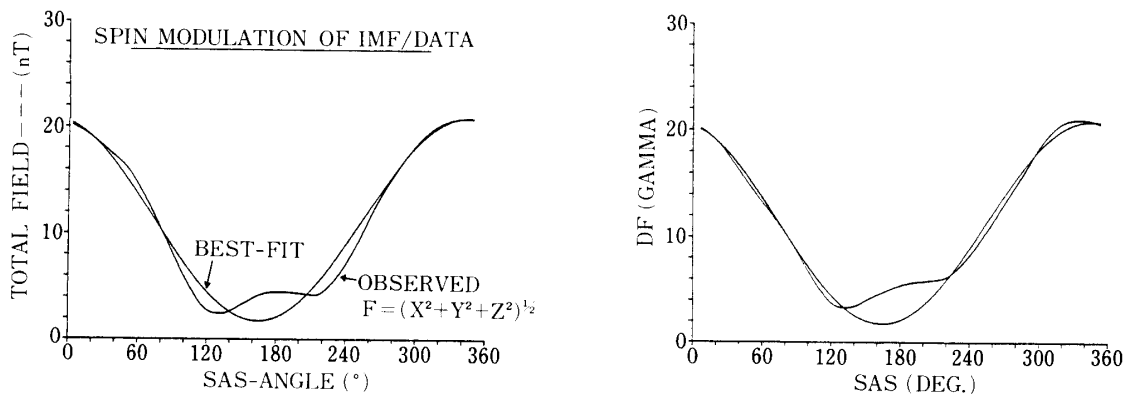
第7図 磁気シールドルーム内の2mブーム伸展先で測定されたMS-T5本体の残留磁気バイアスのDC及びAC変化値。

誤差が0.035 nTとなり、惑星間空間磁場の測定においては問題とならない値である。

[3] 飛翔体の磁気バイアスの評価：惑星間空間における微弱磁場(～10 nT)測定における大きな問題のひとつは、飛翔体本体の持つ残留磁気の問題である。惑星間空間の微弱磁場環境の擬装及び市街地での通常～200 nTの短周期変動を伴う人工擾乱の影響を少なくする目的の為に、-60 dBの性能を有する内径6mのシールドルームが宇宙科学研究所の移転地に建設された(Hirao et al., 1985)。このシールドルームにMS-T5を持ち込み、2mIMFブーム先端での飛翔体本体の残留磁気が測定され、探査機本体の持つ磁気モーメントは～0.2 Am²であり、2mIMFセンサーブーム伸展位置における変動並びにオフセット

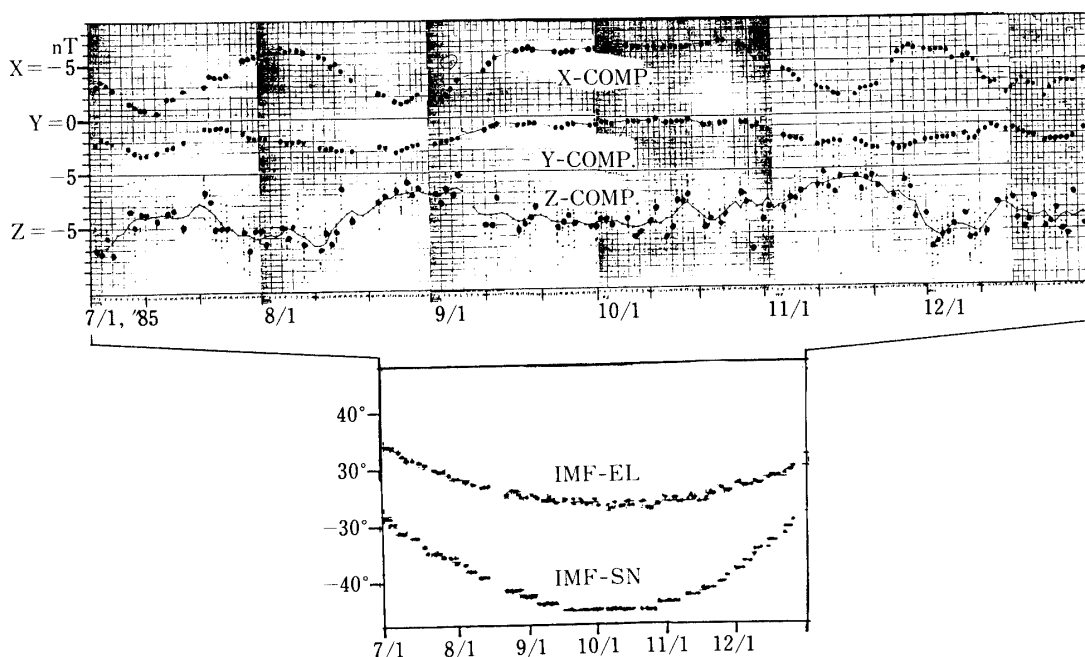


第 8 図 IMF データ (X, Y, Z) 3 成分から推定された太陽電池パネルに発生した等価磁気双極子モーメント。



第 9 図 太陽電池パネルに発生する渦電流により生じた 2 m ブーム先端の磁場変化のスピニ依存性。

トを $\sim 2.0 \text{ nT}$ 以下 (第 7 図) に抑えられることが確認された (藤原, 1985)。然しながら、限られた地上実験設備の為に、太陽風観測時の太陽電池の影響までは評価することができなかった。打ち上げ後のデータ解析の結果、探査機中心向きの等価磁気双極子モーメント ($\sim 0.8 - 0.9 \text{ Am}^2$) が、太陽方向から 116 経度の太陽電池パネル上に存在していることが明らかにされた (第 8 図)。この太陽電池の影響は 2 m ブーム先端で $\sim 20 \text{ nT}$ 弱ものスピニ同



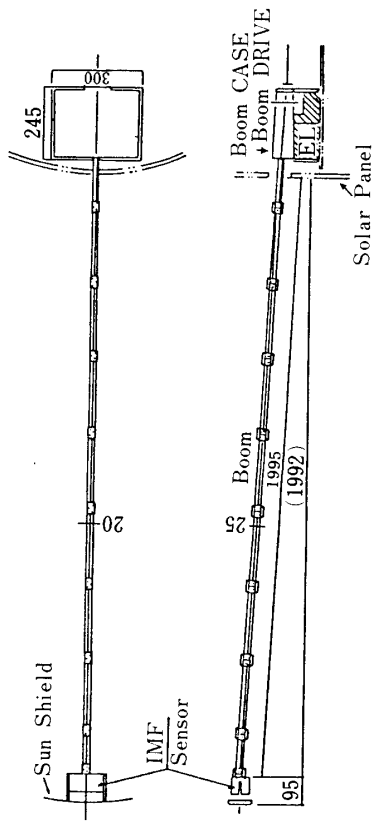
第 10 図 データ 1 次処理によって計算された IMF 磁力計出力の温度ドリフトと計器(電気部, センサー部)の HK 温度履歴.

期変動を与える(第 9 図)為に, 平均 ~ 8 nT の微小 IMF 中の観測データを解析する上で大きな問題となった. 今後の地球磁気圏尾での磁場観測においても, ブーム長や太陽電池の発生量によっては, 十分な対策が必要とされる. IMF 出力データの温度ドリフト[1]及び飛翔体本体の磁気バイアスによる零オフセットの評価方法については, 1960 年代に打ち上げられた米国の人工惑星 Mariner や最近の ISEE 3 の経験から確立されている. その方法は Davis-Smith 法と呼ばれ, 詳細は Belcher (1973), 湯元他 (1985) に論ぜられている. この方法を 20 分間のデータに用いて求めた (X, Y, Z) 3 成分の零オフセットの履歴と, IMF センサー (SN) 及び電気回路 (EL) 部の温度履歴を第 10 図に示した. X 及び Y 成分の \sim 数十日程度のオフセット変化は磁力計自体の持つ温度ドリフトに起因し, 一方, DC 変化は太陽電池に因るものと思われる. 一次処理後のデータの絶対精度は, スピン軸に直角な X, Y 成分は ± 0.1 nT, 平行な Z 成分は ± 0.5 nT である. 又, 相対精度は 3 成分とも ± 0.1 nT 以下である. Z 成分の分散は, スピン軸方向のオフセット評価の近似式

$$\left[O_z = 0.5 \times \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|B_i|^2 \cdot B_{zi}) - |\bar{B}|^2 \cdot \bar{B}_z \right\} \{ (\bar{B}_z^2) - (\bar{B}_z)^2 \}^{-1} \right]$$

が全磁力の変動が少い Alfvénic な IMF データについてのみ有効であることに起因し, 静かな日を選んで再評価すれば改善されるべきものである.

[4] 飛翔体姿勢精度: 飛翔体による磁場測定で最も重要な問題は, 特にロケットや地



第 11 図 IMF センサー伸張の為の 2 m ブーム概観図。

第 2 表 IMF データ伝送量と出力データの測定範囲、時間分解能、感度との関係。

DYNAMIC RANGE	SENSITIVITY		TM BIT RATE	SAMPLING RATE	
	OUTPUT	RESOLUTION		FORMAT-8	FORMAT-A&B
±64 _n T (NARROW)	12 BIT (HIGH GAIN)	0.03125 _n T/LSB	H.B.R. (2048BPS)	1/8 SEC	1/16 SEC
	8 BIT (LOW GAIN)	0.5 _n T/LSB	L.B.R. (64BPS)	4 SEC	2 SEC
			H.B.R.	1/16 SEC	1/32 SEC
			L.B.R.	2 SEC	1 SEC
±128 _n T (WIDE)	12 BIT (HIGH GAIN)	0.0625 _n T/LSB	H.B.R. (2048BPS)	1/8 SEC	1/16 SEC
	8 BIT (LOW GAIN)	1.0 _n T/LSB	L.B.R. (64BPS)	4 SEC	2 SEC
			H.B.R.	1/16 SEC	1/32 SEC
			L.B.R.	2 SEC	1 SEC

球周回衛星等のスピン及びコーニングに伴う振動モードの安定度である。この問題は、飛翔体本体から伸びるブームの取付け精度及び剛性の問題にも深く関与し、測定磁場データの不確定差及び誤差の大きな要因となる。特に、スピン周期に伴う振動成分が最も卓越し、この周期付近の変化磁場データは必然的にS/Nが悪くなる。搭載計器の重量及び予算が制約されている日本の状況では、地上総合及び単体試験において、これら不確定要素を出来るだけ明確にし、〔3〕の残留磁化の問題も考慮しながら取得データをソフト的に較正しなければならない。“さきがけ”のIMFブーム(第11図)の剛性及び直線度測定も、FMの第1次総合試験後に行なわれた。IMFセンサー・ブームの取付け精度及び剛性を含めて 1° 以下の直線度、即ち、 $\{\pm 64 \text{ nT} \times (1 - \cos 1^\circ)\} = \pm 0.01 \text{ nT}$ の誤差以内に抑えられた。

〔5〕データ伝送量の問題：日本の人工惑星として最初に打ち上げられた“さきがけ”のデータ伝送量は、第2表に示されるように遠地点では64 bpsと限られている。従って、IMFの磁場データのサンプリングレイトは、 $\sim 10 \text{ nT}$ の微弱磁場を測定しても、1秒から4秒に制約されている。“さきがけ”のスピンレイトは6.3 rpm、即ち、9.5秒/1スピン $= 360^\circ$ 回転時の磁場データは、スピン回転 152° に1データの割合である。それ故に、IMF磁場データをSolar-ecliptic(SE)座標系の3成分、即ち、ベクトル量として較正する為には、“さきがけ”のスピン軸方向の絶対姿勢情報及びスピンレイト情報が必要不可欠となる。スピン角度データは現在 $0.08789^\circ/\text{bit}/\text{frame}$ の割合で出力されることから、角度データによるIMFデータの不確定差は 10^{-4} nT 以下となり問題にならない。

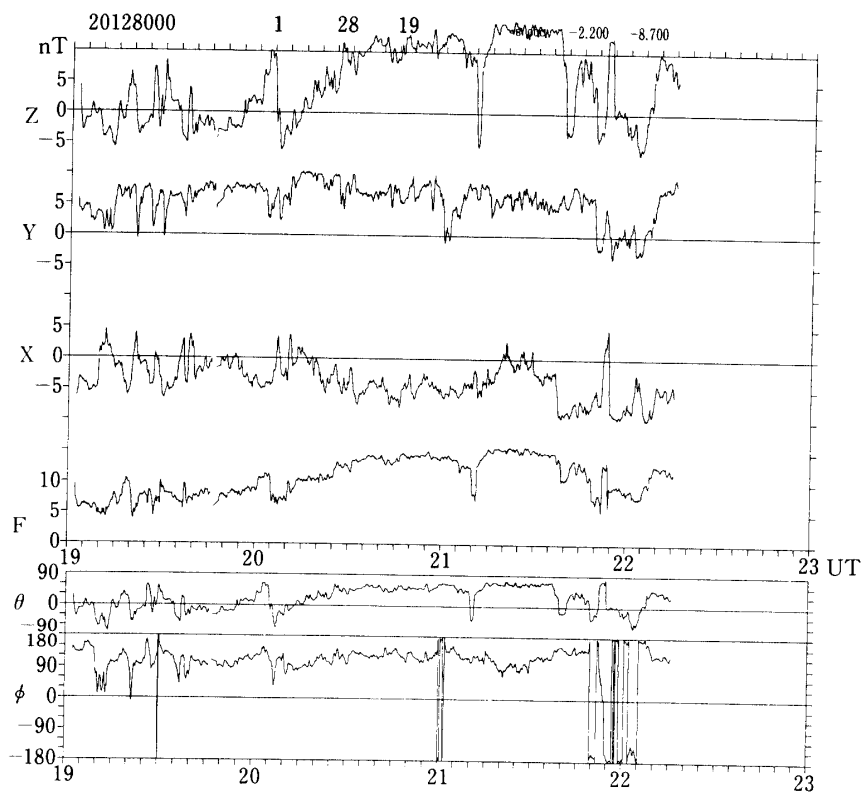
前述の〔1〕から〔4〕までの問題が全て解決され、現在、 $\pm 0.1 \text{ nT}$ の高感度高精度の磁場データが出力されている。

3. 結 語

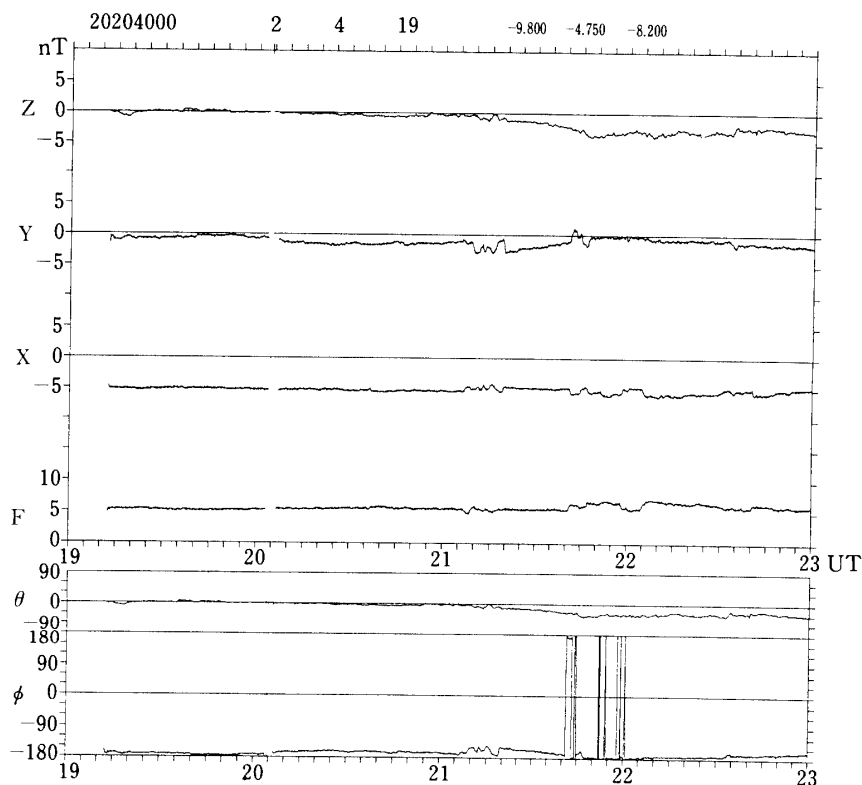
地上野外観測用、大気球・ロケット・そして人工惑星搭載用磁力計の開発研究結果から、飛翔体を用いた磁場測定における磁力計設計製作上の留意点として、主に以下の5項目：〔1〕磁力計自体の電氣的精度、〔2〕検出器の機械精度、〔3〕飛翔体の磁気バイアス、〔4〕飛翔体の姿勢精度、〔5〕データ伝送量が重要となることがまとめられた。最適な磁力計を設計製作する為には、計測すべき対象や目的に応じて、これら5項目を十分に考慮しなければならない。

我が国で最初の人工惑星“さきがけ”に搭載されたリングコア磁力計(IMF)は、惑星間空間磁場を絶対精度 $\pm 0.06 \text{ nT}$ 以下の高精度で測定できる性能を有する。“さきがけ”のスピン及びコーニングの安定度、ブームの直進性・剛性を含めて、センサー先端における機械的ズレを $\pm 2.5^\circ$ 以下にすればIMF測定範囲 $\pm 64 \text{ nT}$ における測定誤差は理論的に $\pm 0.06 \text{ nT}$ 以下に抑えることは可能である。然しながら、上記5項目の中で、〔3〕の太陽電池パネルに生ずる磁気バイアスの問題と〔5〕のデータ伝送量の制約から、IMFの測定磁場データ1次処理後の精度は $\pm 0.1 \text{ nT}$ である。

最後に、太陽電池の影響及び磁力計の温度ドリフトの成分を差し引き、太陽座標系(X；太陽中心方向、Z；黄道面垂直方向、Y；経度方向、F；全磁力)に変換したデータを第12図に示す。この様に相対精度 $\pm 0.1 \text{ nT}$ 、時間分解能10秒のIMFデータを用いて、太陽磁



(A) 荒れた日の IMF (1986年1月28日19-23時).



(B) 静かな日の IMF (1986年2月4日19-23時).

第12図 IMFデータ記録例。X, Y, Zは太陽黄道面座標系の太陽中心, 経度方向, 及び北方向成分を表わし, F, θ , ϕ は磁場絶対値, 黄道面からの仰角, X軸からの偏角を示す。

気圏構造 (Saito et al., 1986), ショック波や地磁気嵐性感星間空間擾乱 (湯元他, 1986), 並びに磁気不連続 (中川他, 1986) 等を議論できるようになった。1次データ処理済の磁場精度は, データ解析結果の蓄積により更に改善されるものである。

謝 辞

“さきがけ”による惑星間空間磁場観測にあたっては宇宙科学研究所をはじめ関係大学, 各メーカーの方々の御尽力により価値あるデータを得ることができましたことを感謝申し上げます。解析に際しては, 宇宙科学研究所の計算機 M 360 および宇宙科学資料解析センターの大型電算機共同利用経費を使用させていただきました。重ねて感謝申し上げます。

参 考 文 献

- Belcher, J. W., A variation of the Davis-Smith method for in-flight determination of spacecraft magnetic fields, *J. Geophys. Res.*, **78**, 6480-6490, 1973.
- 藤原一晃, 磁気シールドルーム内における探査機の帯磁の精密な測定について, 東海大学工学部修士論文, 1985年3月.
- Hirao, K., K. Tsuruda, I. Aoyama, and T. Saito, Large spherical magnetic shield room, *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 581-588, 1985.
- 加藤愛雄, 瀬戸正弘, 早坂孝, 斎藤尚生, 湯元清文, 大気球による日本海溝およびその東方海域における磁場観測, 東京大学宇宙研報告, 第16巻, 2号(B), 1109-1121, 1980.
- 中川朋子, 斎藤尚生, 湯元清文, 「さきがけ」によって観測された太陽風磁気不連続の特性, 宇宙研報告, 特集第14号, 47-57, 1986.
- 斎藤尚生・湯元清文・田村忠義・瀬戸正弘・早坂孝, 飛翔体搭載用リングコア磁力計による高感度地磁気観測, 東京大学宇宙研報告, 第15巻, 3号(B), 461-477, 1979.
- 斎藤尚生, 湯元清文, 永徳昭人, 瀬戸正弘, 青山巖, 人工惑星およびロケット搭載用 Ring-core magnetometer, 東京大学宇宙研報告, 第16巻, 4号(B), 1381-1390, 1980.
- 斎藤尚生, 湯元清文, 瀬戸正弘, 赤間芳雄, 田村忠義, 永徳昭人, 山内美佐子, 加藤愛雄, Ring-core 磁力計を用いた大気球による地磁気異常の観測, 宇宙研報告, 特集第1号, 29-36, 1981.
- Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, T. Nakagawa, and K. Saito, Interaction between comet Halley and the interplanetary magnetic field observed by Sakigake, *Nature*, London, **321**, 303-307, 1986.
- 湯元清文, 斎藤尚生, 中川朋子, 平尾邦雄, 青山巖, 瀬戸正弘, Sakigake/IMF data の1次処理について, 昭和60年度宇宙観測 Symp., 6月25-27日, pp. 17-18, 1985.
- 湯元清文, 小山孝一郎, 斎藤尚生, 平尾邦雄, 平野孝文, 中川朋子, 「さきがけ」で観測された磁気嵐性感星間空間擾乱, 宇宙研報告, 特集第14号, 33-45, 1986.
- Yumoto, K., T. Saito, and T. Nakagawa, Hydromagnetic waves near O⁺ (or H₂O⁺) ion cyclotron frequency observed by Sakigake at the closest approach to comet Halley, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, No. 8, in press, 1986.