

あけぼの衛星による沿磁力線電流の観測

福西 浩¹⁾・藤井 良一²⁾・国分 征³⁾・遠山 文雄⁴⁾

OBSERVATIONS OF FIELD-ALIGNED CURRENTS WITH THE AKEBONO SATELLITE

By

H. FUKUNISHI¹⁾, R. FUJII²⁾, S. KOKUBUN³⁾, F. TOHYAMA⁴⁾

Abstract: The Akebono (EXOS-D) satellite carries a triaxial fluxgate magnetometer with ring core sensors mounted on a 5-m mast. The magnetometer has four automatically switchable ranges from ± 1024 to ± 65536 nT (full scale) and resolution commensurate with a 16-bit A/D converter in each range (0.031 to 2 nT). The rate of sampling is 32 vectors per second. The characteristics of high sensitivity and high time resolution enable us to observe small-scale field-aligned currents embedded in large-scale field-aligned currents. Intense small-scale field-aligned currents are frequently observed in region 1, region 2 and cusp currents and also in the polar cap region. These currents usually consist of pairs of upward and downward field-aligned currents.

1. はじめに

磁気圏と電離圏のエネルギー結合の主要な役を演じる沿磁力線電流の観測は、過去 20 年以上にわたり人工衛星に搭載された磁力計によって行なわれてきた。最初に沿磁力線電流の観測に成功した衛星は、高度 1100 km の円軌道をもつ 1963-38C 衛星であった (Zmuda et al., 1966)。その後、TRIAD, ISIS-2, AE-C, S3-3, S3-2, MAGSAT, DE-1, DE-2, DMSP/F7, HILAT, Viking などの衛星が沿磁力線電流の観測に成功した (表 1 参照)。

これらの衛星の中で TRIAD, ISIS-2, S3-3, AE-C 衛星は姿勢計として磁力計を衛星

¹⁾ Upper Atmosphere and Space Research Laboratory, Tohoku University, Sendai 980, Japan

²⁾ National Institute of Polar Research, Itabashi-ku, Tokyo 113, Japan

³⁾ Geophysical Research Laboratory, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

⁴⁾ Faculty of Engineering, Tokai University, Hiratsuka 259-12, Japan

表1 極軌道衛星に搭載され、沿磁力線観測に成功した磁力計の規格

衛星名	打上げ年・月	軌道			衛星姿勢 制御	磁力計軸方 向決定精度	磁力計タイプ	ブーム (m)	測定範囲 (nT)	分解能 (nT)	A/D (bit)	サンプリング レート (毎秒)
		近地点km	遠地点km	傾斜角								
TRIAD	1972年9月	749	832	90.1°	3軸	3°	3軸フラックス ゲート(シヨーン ステッドタイプ)	衛星の 外壁	±50000	12	13	2.25
S3-2	1975年12月	240	1557	96.3°	スピン (3rpm)	3.5°	3軸フラックス ゲート(シヨーン ステッドタイプ)	6.1	オフセット ±64000 磁力計 ±600	±1000 ±5	6 8	32
S3-3	1976年7月	240	8040	97.5°	スピン (3rpm)	1°	姿勢計 (3軸フラックス ゲート)	衛星 本体	±64000 ±10000	±480 ±80	8 8	4
MAGSAT	1979年10月	352	561	96.7°	3軸	5 arcsec	3軸フラックスゲー ト(リングコア) セシウムスカラー磁 力計	6	オフセット ±64000 磁力計 ±2000	±1000 ±0.5	6 12	16
DE-1	1981年8月	675	26900	90°	スピン (10rpm)	0.2°	3軸フラックス ゲート磁力計 (リングコア)	5.9	オフセット ±62000 磁力計 ±6000 ±1000 ±80	±8000 ±1.5 ±0.25 ±0.02	4 12	16
DE-2	1981年9月	229	1003	90°	3軸	0.2°	3軸フラックス ゲート磁力計 (リングコア)	5.9	オフセット ±62000 磁力計 ±6000	±8000 ±1.5	4 12	16
DMSP/F7	1983年11月	822	844	98.7°	3軸	0.1°	3軸フラックスゲー ト(シヨーンステッ トタイプ)	衛星の 外壁	±50000	12	13	20
VIKING	1986年2月	817	13530	98°	スピン (3rpm)	1°	3軸フラックス ゲート磁力計 (リングコア)	2	±65536 ±16384 ±4096 ±1024	±8 ±2 ±0.5 ±0.125	13	53.3
EXOS-D	1989年2月	274	10500	75°	スピン (7.5rpm)	0.1°	3軸フラックス ゲート磁力計 (リングコア)	5	±65536 ±16384 ±4096 ±1024	±1 ±0.25 ±0.063 ±0.016	16	32

本体に搭載しており、磁場測定分解能は低い。しかし大規模な沿磁力線電流の構造を調べることはこれらのデータからも可能であり、特に Iijima and Potemra (1976a, b) により TRIAD 衛星磁場データからグローバルな沿磁力線電流分布が求められ、これが今日でも沿磁力線電流研究の基礎となっている。DMSP/F7 や HILAT 衛星は、磁場観測を目的として改良された磁力計を搭載したが、磁力計センサーを衛星外壁に取り付けていたため、これらの衛星データから沿磁力線電流の微細構造を議論することはかなり困難である。

高精度磁場観測という目的で磁力計が搭載された衛星は、S3-2, MAGSAT, DE-1, DE-2, Viking である。特に、MAGSAT 衛星は磁場観測のための専用衛星で、高分解能のベクトル磁力計とスカラー磁力計を並用し、磁場3成分の絶対値を1 nT の高精度で測定することに成功し、地球磁場モデルの作成に大きく貢献した (Acuna et al., 1978)。しかし沿磁力線電流の研究という立場からは、磁場だけでなく、電場、オーロラ粒子、プラズマ波動等の物理量を同時に測定する必要があり、こうした目的には MAGSAT 衛星データを利用することはできない。一方、DE-1 衛星は高精度の磁場観測と同時にオーロライメージ、電場、粒子、プラズマ波動の観測を行ったが、遠地点 26,900 km とかなり高々度の軌道であったため沿磁力線電流のはっきりした空間構造をとらえることは困難であった。

結局、これまでに打ち上げられた衛星の中で沿磁力線電流の研究に最も適したデータを提供した衛星は S3-2, DE-2, Viking 衛星である。例えば、DE-2 衛星は、高度 1,000 km 付近の磁場と電場の同時観測から、沿磁力線電流と電離圏電流の結合構造を明らかにした (Sugiura et al., 1982)。一方、Viking 衛星は高度 3,000-10,000 km 付近に存在すると考えられている沿磁力線加速領域の中での磁場の高精度観測に初めて成功した (Potemra et al., 1987)。

あけぼの (EXOS-D) 衛星に搭載された3軸フラックスゲート磁力計は、これまでの各国の磁場観測衛星の経験を踏まえ、3,000 km-10,000 km の沿磁力線加速領域で Viking 衛星よりも一段と高精度な磁場観測を実現するために開発された (Fukunishi et al., 1989)。すなわち、磁力計センサー用ブームとして新たに宇宙科学研究所で開発された5 m 伸展マストを使用することにより衛星からの磁気干渉を1 nT 以下におさえ、磁力計本体も16ビット A/D 変換器を採用し、 ± 65536 nT レンジに対し2 nT という高分解能を実現した。以下あけぼの衛星による沿磁力線電流観測のねらい、搭載磁力計の特徴、磁力計観測データの処理方法、得られた沿磁力線電流の例を示す。

2. 沿磁力線電流観測のねらい

EXOS-D 衛星に搭載された3軸フラックスゲート磁力計による沿磁力線電流の観測は以下のねらいをもって実施されている。

(1) 沿磁力線加速領域における電流構造の解明

これまで高度 300-1,000 km での沿磁力線電流のグローバルな分布は、TRIAD, MAGSAT, DE-2 衛星などによりかなり詳しく調べられてきた。しかし沿磁力線加速領域と考えられている高度 3,000-10,000 km での観測は、Viking 衛星で行われただけで、この高度領域と低高度領域の沿磁力線電流がどのような関係にあるかは明らかにされていない。あけぼの衛星は近地点 274 km, 遠地点 10,500 km の極軌道衛星となったことから、沿磁力

加速領域の中やその周辺領域を流れる沿磁力線電流のグローバルな分布を明らかにすることが可能となる。

(2) 沿磁力線電流を担う粒子の決定

オーロラを励起させている磁気圏起源の電子が電離圏から磁気圏に向かう上向き電流を担っていることはよく知られているが、下向き電流は電離圏起源の電子によって担われていると想像されているだけでその実体は明らかでない。またカusp領域やポーラーキャップ領域の電流を担う粒子の起源もまだ解明されていない。この電流のキャリアーの決定は、3次元電流系の成因を解明する上での基本的な問題の一つである。あけぼの衛星では広いエネルギーとピッチ角範囲で電子とイオンの測定が行われていることから、磁場測定データとの定量的な比較によりこの問題の解決が期待できる。

(3) 沿磁力線電流の微細構造の解明

あけぼの衛星搭載のフラックスゲート磁力計は高感度に加え、サンプリングレートも32ベクトル/秒と高いため、沿磁力線電流の微細構造の測定が可能となる。また同時にダブルプローブ法による電場測定やUVおよび可視カメラによるオーロラ撮像が行われているので、これまではっきりしなかった沿磁力線電流の微細構造と電場構造やオーロラ構造との関係を明らかにすることができる。

(4) 沿磁力線電流による各種プラズマ波動励起機構の解明

電流（電子やイオンのビーム）により各種のプラズマ波動が励起されることはよく知られている。あけぼの衛星では、サーチコイル磁力計、VLF帯プラズマ波動観測器（VLF）、高域プラズマ波動観測器（PWS）により1 Hzから5 MHzまでの広い周波数帯にわたるプラズマ波動のスペクトル、ポインティングフラックス、波数ベクトルの観測が行われていることから、沿磁力線電流によっていかなる波動が励起されるかを明らかにすることが可能となる。

3. フラックスゲート磁力計の構造と特徴

フラックスゲート磁力計は、センサー部のリングコア（直径1インチ）に流したドライブ電流の2倍高調波の振幅が外部磁場強度に比例することを利用し、磁場強度を検出する。磁

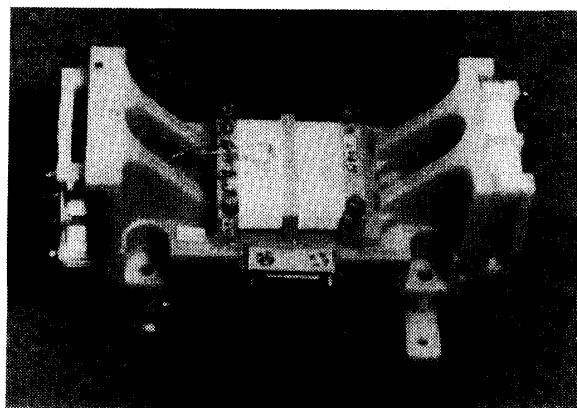


図1 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計センサーの形状。

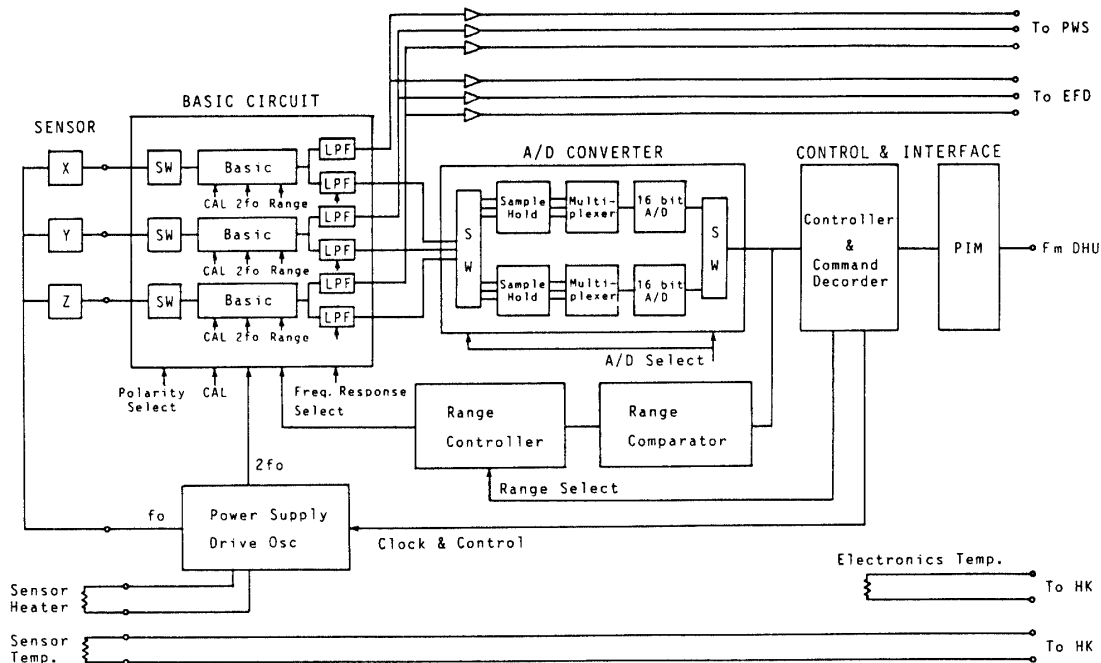


図2 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計のブロック図。

場のベクトル量を検出するために直交3軸（X，Y，Z軸）リングコアを用いる。Z軸は衛星のスピンの方向（太陽方向）であり，X軸，Y軸は，スピンの面に垂直な面内の直交成分である。図1にセンサーの形状を，また図2にフラックスゲート磁力計の回路構成を，表2に磁力計の規格を示す。回路は1）磁力計基本回路部（Basic Circuit），2）A/D交換部（A/D Converter），3）測定レンジ判定部（Range Comparator），4）測定レンジ設定部（Range Controller），5）電源・発振器部（Power Supply & Drive Oscillator），7）コントロール・インターフェース部（Control & Interface）よりなる。

センサーのドライブではノイズレベルとゼロレベル安定度を改善し，省電力化を図るために15 kHzのパルスドライブ方式が採用されている。ピックアップコイルで検出された信号は基本回路部に送られるが，その入力部にはセンサーの極性を反転できるようにポラリティスイッチがついている。極性反転はコマンドによって行われる。基本回路部では増幅後，バンドパスフィルタによりドライブ周波数の2倍高調波成分（30 kHz）が取り出され，参照信号（30 kHz）により同期検波される。その出力はローパスフィルタを通りA/D変換部に送られる。ローパスフィルタのカットオフ周波数は，データサンプリングレートがPCMテレメータの伝送速度に応じて32，8，2 samples/secと3段階に切り替えられるのに対応し，12，3，0.6 Hzと切り替えられる。また高域プラズマ波動観測器（PWS）および電場観測器（EFD）に3成分（X，Y，Z）のアナログ出力を供給するために，A/D変換用出力とは別に50 Hzのカットオフ周波数をもつローパスフィルタを通った出力が取り出される。

A/D変換部はサンプルホールド，マルチプレクサー，16ビットA/D変換器よりなる。放射線対策から，この回路部はアルミ板によって保護されているが，安全性をさらに高めるために二系統となっている。どちらの系統を選ぶかはコマンドによって行う。A/D変換さ

表2 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計の仕様

方式	3軸フラックスゲート磁力計
マスト	5m シンプレックスマスト
センサー	リングコア 直径1インチ, 6-81 Mo. Pe. ホビン・支持台材質 アラミド
センサードライブ周波数	15kHz (第2高調波を検出)
A/D変換器	16ビット
測定レンジ (量子化単位)	レンジ0 ± 1024 nT (0.031 nT) レンジ1 ± 4096 nT (0.125 nT) レンジ2 ± 16384 nT (0.5 nT) レンジ3 ± 65536 nT (2.0 nT)
サンプリングレート	H ビットレート 32 ベクトル/秒 M ビットレート 8 々 L ビットレート 2 々
センサーヒーター	1.5W または 0.15W (コマンドで選択)
寸法	センサー 135×70×70mm 回路部 200×216×125mm
重量	センサー 0.33 kg ケーブル 0.49 kg 回路部 2.63 kg 5mマスト 3.03 kg
消費電力	2.98W
コマンド	ON/OFF, レンジ選択(自動またはマニュアル), ポラリティ選択(+または-), キャリブレーション選択(ON/OFF), ヒーター選択(高, 低)

れたX, Y, Z成分の値は測定レンジ判定部に送られ, 4つの測定レンジ(±1024 nT, ±4096 nT, ±16384 nT, ±65536 nT)に対し, それぞれきめられた上限値と下限値と比較される。そしてこの情報がレンジ設定部に送られ, 上限値よりも小さい場合には上のレンジへ, 下限値よりも大きい場合には下のレンジに切り替わるよう指令信号が出される。この指令信号により基本回路部のフィードバック抵抗が切り替えられ, 測定レンジが設定される。図3に測定レンジと上限, 下限値の関係を示す。この場合にX, Y, Z各成分に対しそれぞれ独立にレンジを設定するモードの他, Zは単独で, Xを基準に(またはYを基準に)X, Yを同一レンジに設定するモード, Zを基準にX, Y, Zを同一レンジに設定するモードなどがコマンドで選択できる。さらに外部磁場強度に関係なくコマンドによりX, Y, Zのレンジをそれぞれ独立に設定することもできる。また, 下のレベルへの切り替えは, 測定値が下限値を越えた場合にただちに行われるが, 上のレベルへの切り替えは1スピン周期にわたって測定値が上限値よりも小さくなった場合に行われる。

電源・発振器部は, 各回路に電流を供給する他, ドライブ信号(15 kHz)をセンサーに, 参照信号(30 kHz)を基本回路部へ送り出す。また, コマンド信号に応じてコントロール信号電流を各部のリレースイッチに供給する。さらにセンサー用ヒーターに電流を供給する。

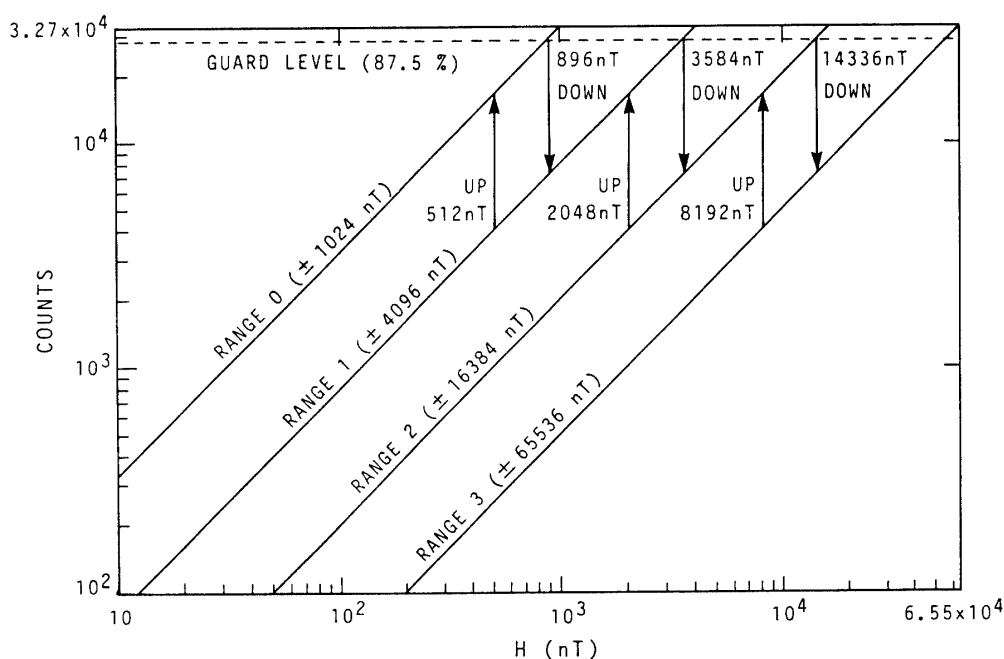


図3 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計の測定レンジとレンジ切り替えレベル。

コントロール・インターフェイス部は、DHUからの情報をPIMを介して受け取り、解読し、各部に指令信号を送る。またA/D変換後の出力を規格のデータフォーマットに並べかえ、PIM介してDHUへ送り出す。センサーおよびエレクトロニクス部の温度はハウスキーピングデータとして検出される。

4. 磁力計のキャリブレーション

フラックスゲート磁力計で観測された磁場3成分より沿磁力線電流を求めるには、衛星観測データをスピン座標系から静止座標系に変換し、さらに地球磁場成分を差し引くことが必要である。そのためには磁力計の3軸の直交度と感度がきわめて精度よく決められていなければならない。このため打ち上げ約半年前に気象庁地磁気観測所（茨城県柿岡）の磁力計較正装置を用い各種のキャリブレーションを実施した。

まず感度、オフセット、リニアリティの測定は、一辺2.5mの立法形の3軸ヘルムホルツコイルを用いて行った。ヘルムホルツコイルが作り出す磁場の精度は0.1 nTである。Dコイルで0-1000 nTの磁場を100 nTステップで発生させ、このときの値を測定した。同じ測定をセンサーの極性を反転させて行い、感度、オフセット、リニアリティを求めた。リニアリティは各センサーとも 10^{-3} よりも小さく、オフセットは各レンジの1%以内であった。

センサーアライメントの測定は2つの方法で実施した。第1の方法は、地磁気観測所のKASMMERシステム（Yanagihara et al., 1973）によって測定した地球磁場の値と搭載磁力計で測定した地球磁場の値を比較することによってアライメントを算出する。センサーに取り付けられているオプティカルキューブ（立方体の鏡）の各面の方向をセンサーの基準座標系とし、搭載磁力計で測定した磁場ベクトルをM、KASMMERシステムで測定した磁場ベ

表3 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計の X, Y, Z 軸センサーのアライメント測定結果. アライメント測定は本文中に示す二つの独立な方法によって行われた.

	垂直軸からの角度		水平面内における Y 軸と Z 軸センサーのなす角	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
X 軸	0.04°	0.07°		
Y 軸	89.91°	89.90°	89.81°	89.81°
Z 軸	89.82°	89.83°		

クトルを \mathbf{B} (地理座標系で定義) とすると, 両者の関係は,

$$M_i = m_i \cdot \mathbf{B} \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

で与えられる. ここで M_i は i 番目のセンサーで測定した磁場成分で m_i は i 番目のセンサーの軸方向の単位ベクトルである. (1)の3つの関係式は9つの未知数をもっているため, これらは, 最低3回の磁場ベクトルの測定で求めることができる. しかし実際はセンサーをジンバル上に置き水平面内でジンバルを 10° ずつ回転させ36回の磁場ベクトルの測定を行い, これらの値より9つの未知数が決められた.

第2の方法は, ジンバルの回転目盛りより求める方法である. オプティカルキューブで決められたセンサーの X 軸がジンバルの垂直軸と一致するようにセンサーをジンバルの回転面に設置する. 水平面内で1回転させ, 測定値の最大値と最小値の差より X 軸 (磁軸) の垂直軸からのずれを求める. 次に Y, Z 軸は水平面の1回転に対し, それぞれ2つの出力 O の点をもつので, その角度を読み取り, その角度差の 180° からのずれから Y, Z 軸の水平軸からのずれを算出する. 表3はそれらの方法による測定結果であり, 2つの方法による直交度の算出結果は 0.03° 以内で一致しており, X, Y, Z センサーは 0.19° 以内で互い直交していることがわかる.

磁力計のキョリブレーションとしては, この他, 搭載磁力計を約1カ月間東京大学理学部柿岡実験観測所にて連続稼働させることにより, 短期, 長期安定度の測定を行った. またフラックスタンクを用いてのノイズレベルの測定も実施した. 測定結果は, 短期安定度は約 0.1 nT , 長期安定度は 2 nT , 温度ドリフトは約 $0.8 \text{ nT}/^\circ\text{C}$, ノイズレベルは 0.05 nT 以下であった.

5. 衛星残留磁気および磁気干渉

搭載磁力計によって地球磁場変化を正確に測定するには, 衛星本体や他の搭載計器が発生する磁気ノイズをできるだけ小さくする必要がある. 磁気ノイズには, 1) 衛星本体の残留磁気と誘導磁場, 2) 太陽電池パドルや磁気トルカの電流ループによる磁場, 3) 計装ケーブルや搭載機器からの磁気干渉等がある.

あけぼの衛星の磁場観測の要求は, 5 m マスト先端で磁気ノイズの大きさが 1 nT 以下になることである. この要求を実現するために衛星には数々の工夫がこらされた. また実際の程度の磁気干渉が起こるかを正確に見積るため, 各種の測定が実施された. まず, 衛星本

体の全残留磁気モーメントは、宇宙科学研究所の大型磁気シールドルームで測定され、その値は、 0.9 ATm^2 であった。5 m先端での磁場変化は1 nTとなり、磁場測定要求を満たした。一方、外部磁場によって衛星磁性体に誘導される磁場は近地点で0.4 nT、遠地点で0.04 nT程度と見積られ、誘導磁場の影響はそれほど重要でないことが判明した。

次に、太陽電池パドルの発生する磁場に漢しては、 $0.68\text{m} \times 1.21\text{m}$ の大きさの1枚の電池パドルを11列の小部分に分け、各列を流れる電流によって発生した磁場が互いに打ち消すように工夫されている。その結果1枚のパドルの磁気モーメントは約 0.003 ATm^2 に減少し、5 mマスト先端での磁場の大きさは、わずか0.003 nTと見積られた。あけぼの衛星にはまた姿勢制御用に長さ50 cmの磁気トルカが4本搭載されている（X、Y方向に各1本、Z方向に2本）。各コイルの磁気モーメントは 35 ATm^2 で、これは5 m先端で約30 nTの磁場をつくり出す。しかしコイルに電流が流れた時刻は分かっているのでこの効果を測定データから差し引くことは可能である。また姿勢コントロールのためにコイルに電流を流す頻度はそれほど多くないので、磁気トルカの問題は磁場観測にとって現在深刻な問題とはなっていない。

計装ケーブルや搭載機器による磁気干渉の大きさは、大型シールドルームに衛星本体を入れ、各搭載機器の電源を順番に入れていくことによって評価された。その結果、5 mマスト先端での磁気干渉の大きさは1 nT以下であることが判明した。また磁力計センサーの底面につけた温度コントロール用のDCヒーターがつくり出す磁場は、ヒーター強（1.5W）のときに全磁力で7 nT、ヒーター弱（0.15W）のときに2 nTであった。ヒーター線は全体として磁場が打ち消し合うように巻かれているが、完全に打ち消すことはむずかしく、この程度の磁場が残っている。しかしヒーターに伴う磁場は正確に測定されているので、観測データからこの量を差し引くことは可能である。実際の運用では現在のところセンサーはヒーターなしで約5℃に保たれているので、ヒーターは使用していない。

6. データ処理

クイックルック（QL）の段階では、姿勢センサー（主にSTS）のスピニング周期情報を用い、このタイミングで磁場データをサンプリングすることにより衛星スピニング座標系の値は静止座標系の値に変換される。QLの例を図4に示す。Z軸は衛星のスピニング軸方向（太陽方向）であり、X、Yはそれに垂直な面内の成分である。この段階では地球磁場成分は差し引かれていないので、変動磁場の部分が分かるように3次曲線近似で求めたゆっくりした変動成分が差し引かれている。

本格的なデータ処理として、宇宙科学研究所 SIRIUS データファイルに格納されているフラックスゲート磁力計のデータは図5に示すような計算機処理がなされる。まず感度、オフセット、センサーアライメント等の地上キャリブレーションデータを用い、測定値を物理量（nT単位）に変換するとともに、センサー座標系から衛星座標系（SC）へ変換する。次に衛星の軌道・姿勢データを用い、衛星座標系を地理座標系へ交換する。さらにIGRF 1985モデルを用い、衛星軌道に沿った地球内部磁場（ $\mathbf{B}_{\text{model}}$ ）を算出する。この磁場を先に求めた磁場より差し引き、変動部分を求める。

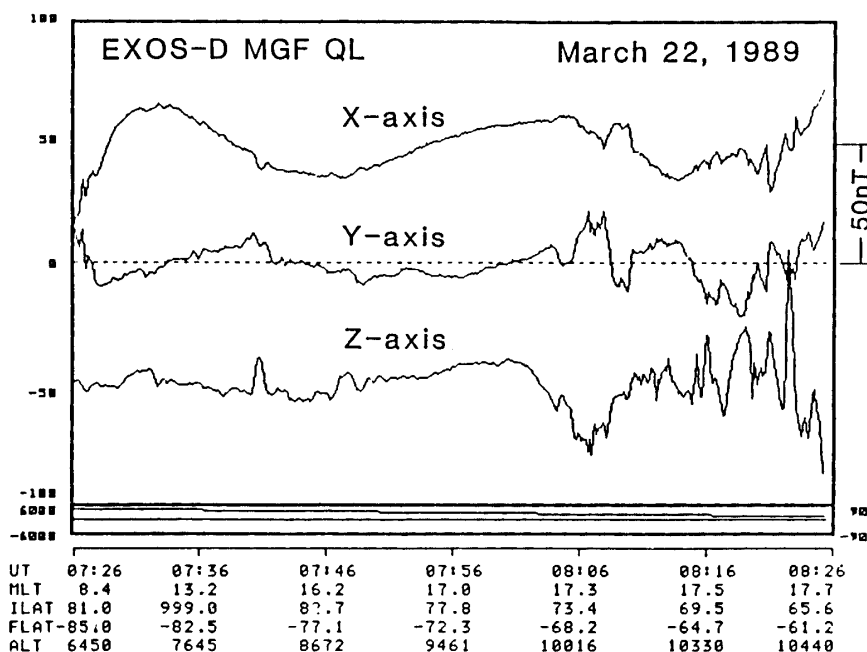


図4 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計データのクイックルックプロットの例。Z軸はスピン軸方向(太陽方向)の成分を、X軸とY軸はスピン軸に垂直な面内での直交成分を表す。

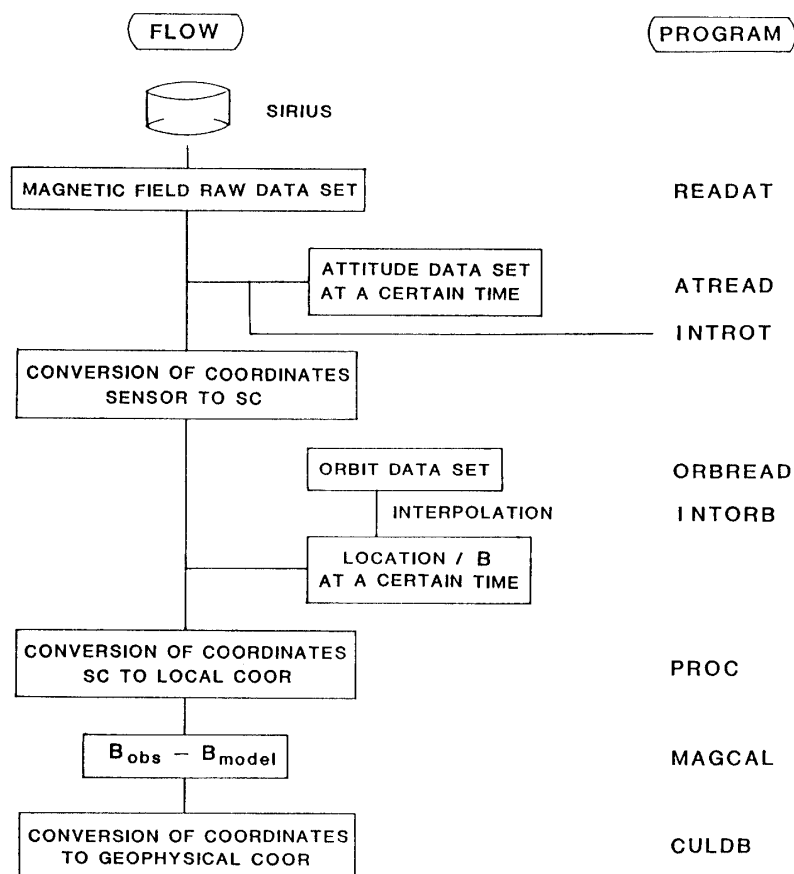


図5 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計の地上計算機処理の流れ。

7. 結果

地球内部磁場を差し引いて得られた磁場変動の観測例を図6に示す。ここで East, North, Radial はそれぞれ地理座標系での東向き, 北向き, 上向き成分を表す。図4に示したクイックルックの磁場変動に近い形をしているが, Radial 成分の変動がかなり小さいことに気づく。Radial 成分は磁力線方向の成分に近いので, 磁場変化は主に沿磁力線電流によって作り出されたことがわかる。衛星は午前側からポーラーキャップを通り, 夕方側のオーロラオーバルを横切る軌道をもち, 図に示すように大規模な Region 1, Region 2 電流系が観測された。特徴的なことは夕方側の Region 1 領域に緯度幅の狭い (0.1° – 1° 程度) 磁場変動が多数出現していることである。これらの磁場変動は鋭い三角波的な形をしていることから上向きと下向きの沿磁力線電流が対となって出現していると推定される。例えば, 08:23 UT (磁気緯度 67.5° , 高度 9,972 km) の磁場変化は, 緯度幅 0.3° で 70 nT の変化が起こっている。この変化が上向きと下向きのシート電流対で起こっていると仮定すると, シート電流の強度と電流密度は 0.056 A/m と $0.8 \mu\text{A}/\text{m}^2$ になる。これを電流の連続性を仮定し, 沿磁力線電流のグローバル構造を明らかにした TRIAD 衛星の高度 800 km に直すと, 0.19 A/m および $9.7 \mu\text{A}/\text{m}^2$ となり, きわめて強い電流が狭い領域に集中して流れていることがわかる。

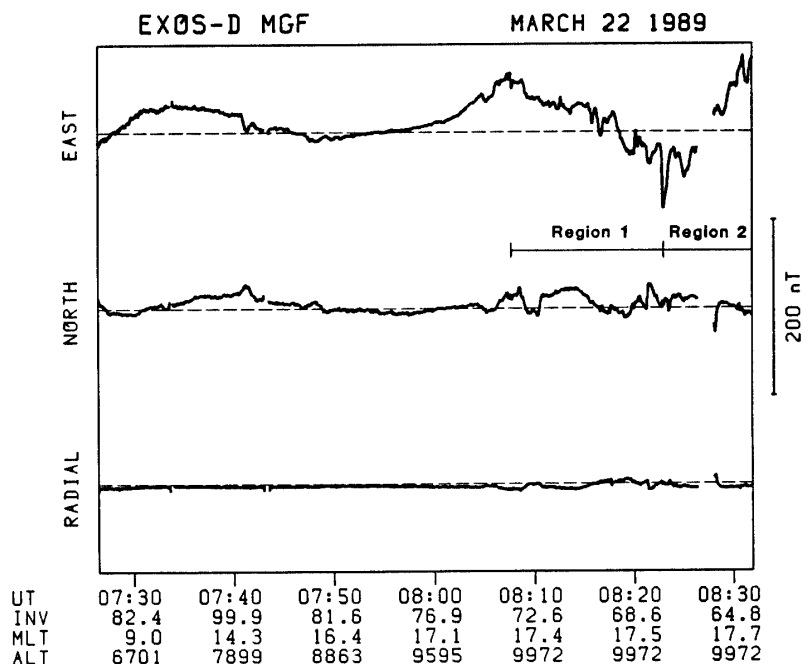


図6 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計で1989年3月22日に南半球極域で観測された沿磁力線電流の例。磁力線レーシングで高度100kmに投影した衛星の位置が図の下段に示される。INV, MLT, ALTはそれぞれ不変磁気緯度, 磁気地方時, 衛星高度を示す。EAST, NORTH, RADIALはそれぞれ地理座標系での東向き, 北向き, 垂直上方成分を表す。

類似した例を図7に示す。衛星は夕方側の Region 2, Region 1 電流領域を横切り真夜中の領域に向かって移動する。この例でもやはり Region 1 領域に微細構造をもつ磁場変化が観測されており、狭い緯度幅もつ上向きと下向きのシート電流対が出現していることがわかる。また真夜中付近の高緯度側境界付近 (0606 UT 付近) においても強い沿磁力線電流対 (高緯度側が下向き, 低緯度側が上向き) が生じていることがわかる。

図8は、午前側で観測された沿磁力線電流の例である。衛星は、磁気地方時 (MLT) 3 時付近でオーロラオーバルの Region 2, Region 1 電流領域を横切り、0236 UT (磁気緯度 71.6°) 付近でポーラーキャップに入ったと思われる。ポーラーキャップ領域には多数のスパイク的な磁場変化が出現しており、沿磁力線電流が狭い領域に集中して流れていることがわかる。この例のようにポーラーキャップに微細構造をもつ沿磁力線電流が出現する例は、あけぼの衛星でひんぱんに観測されており、この電流を担う電子が磁気圏のどの領域から供給されているのか興味深い。

8. おわりに

あけぼの (EXOS-D) 衛星に搭載されたフラックスゲート磁力計は計画通りの性能を発揮し、高度 274-10,500 km の沿磁力線電流の微細構造を明らかにしつつある。これらの微細構造は電場構造や上向き, 下向き荷電粒子流構造, オーロラ微細構造, プラズマ波動の発生領域の構造等と密接に対応していると予想される。現在それらのデータの相互比較が始まろうとしているが、これらの研究から今後沿磁力線電流を担う粒子や沿磁力線電流の駆動機構に関し大きな成果が得られるであろう。

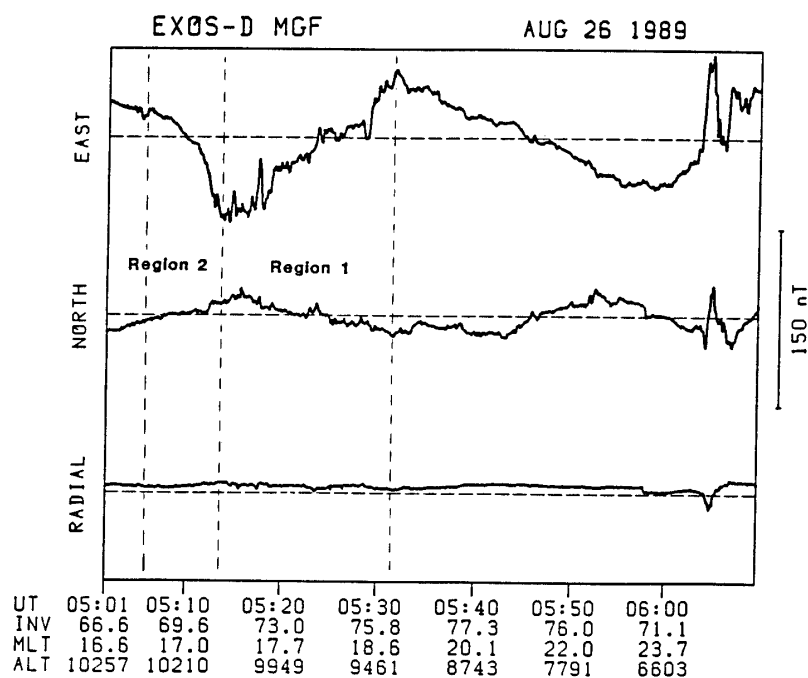


図7 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計で1989年8月26日に南半球極域で観測された沿磁力線電流の例。表示法は図6と同様。

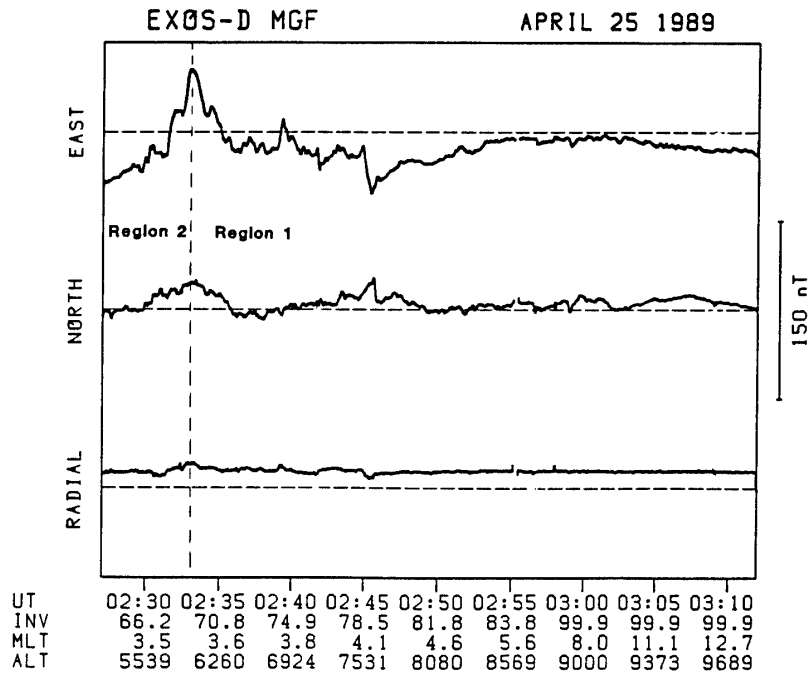


図8 あけぼの衛星フラックスゲート磁力計により1989年4月25日に南半球極域で観測された沿磁力線電流の例. 表示法は図6と同様.

謝 辞

本研究は EXOS-D 衛星 MGF 班の共同研究の一環として行われた。班員として協力された林幹治, 湯元清文, 岡野章一, 利根川豊, 杉浦正久の諸氏に深謝いたします。また, 磁力計の制作を担当された明星電気株式会社と磁力計用マストの製作を担当された宇宙科学研究所の名取通弘氏および日本飛行機株式会社に, そして磁力計の検定に協力された気象庁地磁気観測所と桑島正幸氏に心から謝意を表します。

参 考 文 献

- Acuna, M.H., C.J. Scarce, J.B. Seek, and J. Scheifele, The MAGSAT vector magnetometer-A precision fluxgate magnetometer for the measurement of the geomagnetic field, NASA Rep. TM-79656, Oct. 1978.
- Fukunishi, H., R. Fujii, S. Kokubun, K. Hayashi, T. Tohyama, Y. Tonegawa, S. Okano, K. Yumoto, M. Sugiura, I. Aoyama, T. Sakurai, T. Saito, T. Iijima, A. Nishida, and M. Natori, Magnetic field observations on the Akebono (EXOS-D) satellite, Submitted to J. Geomag. Geoelectr., 1989.
- Iijima, T. and T.A. Potemra, The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by TRIAD, J. Geophys. Res., **81**, 2165-2174, 1976a.
- Iijima, T. and T.A. Potemra, Field-aligned currents in the dayside cusp observed by TRIAD, J. Geophys. Res., **81**, 5971-5979, 1976b.
- Potemra, T.A., L.J. Zanetti, R.E. Erlandson, P.F. Bythrow, G. Gustafsson, M.H. Acuna, and R. Lun-

- din, Observations of large-scale Birkeland currents with Viking, *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 419–422, 1987.
- Sugiura, M., N.C. Maynard, W.H. Farthing, J.P. Heppner, B.G. Ledley, and L.J. Cahill, Jr., Initial results on the correlation between the magnetic and electric fields observed from the DE-2 satellite in the field-aligned current regions, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 985–988, 1982.
- Yanagihara, K., M. Kawamura, Y. Sano, and T. Kuboki, New standard magnetic observation system of Kakioka (KASMMER), *Geophys. Magazine*, **36**, 217–281, 1973.
- Zmuda, A.J., J.H. Martin, and F.T. Heuring, Transverse magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral region, *J. Geophys. Res.*, **71**, 5033–5045, 1966.