

# れいめい衛星搭載磁力計 GAS のデータベース作成・整備： 沿磁力線電流の推定のために

益岡 葵<sup>\*1</sup>, 高田 拓<sup>\*1</sup>, 平原聖文<sup>\*2</sup>, 浅村和史<sup>\*3</sup>

## Database production and management of magnetometer GAS onboard Reimei Satellite: Estimation of field-aligned current

Aoi MASUOKA<sup>\*1</sup>, Taku TAKADA<sup>\*1</sup>, Masafumi HIRAHARA<sup>\*2</sup>, Kazushi ASAMURA<sup>\*3</sup>

### Abstract

Reimei satellite contributes to the developments of auroral sciences, by the simultaneous observations of auroral emissions and auroral particles. Within the limits of a small spacecraft mission, the main mission instruments are only the Multi-spectral Auroral imaging Camera (MAC), the Electron Energy Spectrum Analyzer/Ion Energy Spectrum Analyzer (ESA/ISA), and the plasma CurRent Monitor (CRM). The data analysis of the Reimei satellite is primarily conducted by using the two mission instruments such as MAC and ESA/ISA. The Geomagnetic Aspect Sensor (GAS) is onboard the spacecraft for attitude control and it can make output of high-time resolution magnetic field data. Because of lack of calibration it has not been possible to use GAS data for scientific discussion. The noise level of the data is quite high, compared to the variation of magnetic fields in space, because the magnetometer is not in an optimal position onboard the spacecraft. We calibrated the GAS data using coordinate transformation, averaging, and offset subtraction. As the magnetic field variation of calibrated GAS data corresponds to the characteristics of auroral particles well, it is considered to be affected by field-aligned currents (FACs). We can now estimate the FAC from the magnetic field variations from GAS data. Based on the database of calibrated GAS data, Reimei data analysis is expected to make progress, where three instruments can clarify aurora behaviors and the auroral particles, monitoring FAC effects. Finally, we note that calibrated GAS data can detect even the effects of a weak FAC in spite of the large noise level of GAS raw data. This suggests that magnetometers onboard other similar microsatellites may also be used for FAC studies.

Keywords: magnetometer, field-aligned current, Reimei Satellite

### 概要

れいめい衛星は、オーロラと降り込み粒子の同時観測を行うことで、オーロラ科学の発展に寄与してきた。超小型衛星計画であるため、理学ミッション機器は多波長オーロラカメラ、オーロラ粒子観測器、ラングミュアプローブの3つのみであり、主にオーロラカメラと粒子観測器の2つのミッション機器による高性能で高時間分解能のデータ解析が中心であった。一方、姿勢制御用の磁力計 GAS (Geomagnetic Aspect Sensor) を用いることで、高時間分解能の磁場データを扱うことができる。ただし、磁力計データの補正等が行われておらず、そのままでは科学的議論ができる状態ではなかった。また、磁力計は衛星本体からの電磁波を受けやすい場所に設置されており、宇宙空間の磁場変動に比べて大きなノイズ成分を含んだデータとなる。座標変換、平均化、オフセット調整などのデータ補正を行うことで、磁力計データの磁場変動が、オーロラ粒子データと非常によく対応し、沿磁力線電流による影響を顕著に表していることが確かめられた。これにより、磁場変動から沿磁力線電流を推定することができる。現在、GAS の補正データのデータベースの作成・整備を行っている。GAS のデータベースを利用することで、オーロラとプラズマ粒子に加えて、沿磁力線電流の影響も同時に確認することができ、れいめい衛星データ解析が大きく前進することが期待される。また、ノイズ成分の大きな磁力計であっても、沿磁力線電流の影響を精度よく測ることができており、超小型衛星等への磁力計搭載について、重要な意味を持っている。

doi: 10.20637/JAXA-RR-16-007/0006

\* 平成 28 年 11 月 24 日受付 (Received November 24, 2016)

<sup>\*1</sup> 高知工業高等専門学校 (National Institute of Technology, Kochi College)

<sup>\*2</sup> 名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE, Nagoya University)

<sup>\*3</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 (Department of Solar System Sciences, ISAS, JAXA)

## 1. はじめに

れいめい衛星計画は、オーロラ粒子観測器 ESA/ISA (Electron Energy Spectrum Analyzer/Ion Energy Spectrum Analyzer) によって、高時間分解能のオーロラ粒子を観測しつつ、多波長オーロラカメラ MAC (Multi-spectral Auroral imaging Camera) により、降り込み粒子が光らせるオーロラを撮像するミッションである[1, 2, 3]。超小型衛星であるため、高精度な磁場や電場の測定はミッションに組み込まれていないが、オーロラ粒子とオーロラの関係に関する重要な成果を挙げてきた[4, 5]。さらに、沿磁力線電流を推定できる磁場変動のデータがあれば、大きな系の中での微細なオーロラの振る舞いについて、踏み込んだ解析が可能である。オーロラとプラズマ粒子の同時観測にあたって、れいめい衛星の姿勢を特定するため磁力計 GAS が搭載されており、衛星位置での地球固有磁場の方向をもとに、姿勢制御を行っている。GAS は、200 Hz サンプリングで高時間分解能による磁場計測を行っているが、衛星本体からの誘導磁場の影響を受けやすい位置に搭載されており、宇宙空間磁場に比べて大きなノイズ成分が含まれている。また、GAS データに関しては、衛星座標系での取得値が公開されているのみで、容易に科学的な議論を行うことができる状況にない。

オーロラ帯と地球磁気圏の赤道面は、沿磁力線電流によって大きな電流回路を構成しており、その電流系を理解することは、オーロラ現象のメカニズムの全容解明につながると考えられる。れいめい衛星高度に沿磁力線電流が流れていれば、衛星上で比較的大きな誘導磁場が測定される。この沿磁力線電流は、プラズマ粒子の流れによって生成されており、衛星で測定されたプラズマ粒子データとも対応する。一般に、磁力計で測定される磁場変動から沿磁力線電流の大きさが推定できる。れいめい衛星においては、プラズマ粒子データにより磁場変動が実際に沿磁力線電流によるものかを確認することが可能である。この利点を活かして、姿勢制御用の磁力計による沿磁力線電流の推定の可否を調べることができる。

本研究では、れいめい衛星に搭載された GAS データを科学データとして扱いやすい形式に変換し、GAS データベースの作成・整備を行った。GAS データの補正処理を行い、プラズマ粒子データと比較することにより、沿磁力線電流が適切に推定されていることを確認している。

## 2. れいめい衛星と磁力計 GAS

れいめい衛星は、工学的な新規技術の実証と理学目的であるオーロラの観測を行うために開発された超小型科学衛星である。表 1 に、れいめい衛星の機体データの概要を示す。2005 年に打ち上げられ、高度約 650 km の極軌道を周回し、2012 年度まで運用された。多くのオーロラと降り込み粒子の高時間分解能の同時観測データを蓄積しており、それらのデータの価値は高い。主要搭載機器として、姿勢制御のためのいくつかの機器が搭載されている。GAS は、磁力線方向を認識して、姿勢制御するための機器として搭載された。理学ミッション機器としては、MAC[2]、ESA/ISA[3]、ラングミュアプローブ (CRM) が搭載されている。これまでのオーロラ科学に関する研究では、主に MAC と ESA/ISA から得られたデータ解析が中心だった。

表 1: れいめい衛星の機体データ

名称	れいめい (INDEX)	
打上	日時	2005 年 8 月 24 日 6 時 10 分 (日本標準時)
	場所	カザフスタン共和国
構造	質量	約 72 kg
	形状	約 62×62×72 cm
軌道	高度	近地点 610 km 遠地点 654 km
	傾斜角	97.8 度
	種類	略円軌道
	周期	97 分
主要搭載機器	(1) スタートラッカ (STT) (2) スピン/ノンspin型太陽センサ (SSAS/NSAS) (3) 磁力計 (GAS) (4) 三軸の光ファイバジャイロ (FOG) (5) リアクションホイール (RW) (6) 磁気トルカ (MTQ) (7) 多波長オーロラカメラ (MAC) (8) オーロラ粒子観測器 (ESA/ISA) (9) ラングミュアプローブ (CRM)	



図1：れいめい衛星搭載磁力計（GAS）

GASは、3軸のフラックスゲート磁力計である。図1に、れいめい衛星に搭載されたGASの写真を示す。GASは200 Hzの時間分解能で測定を行っているが、数万 nT の地球固有磁場を測ることが目的であるため、目標とする測定精度が高くなく、衛星本体からの誘導磁場による影響を受けやすい位置に搭載されている。GASは、大きなノイズ成分を含んだデータを出力しているが、科学ミッションのために搭載された測定器ではないため、補正等が行われてこなかった。GASの測定値には、地球固有磁場、沿磁力線電流による誘導磁場、衛星関連の誘導磁場等が含まれており、一般的には、宇宙空間の磁場変動を観測するのに適した観測器ではない。実際にGASによって測定されたデータの一例を図2に示す。

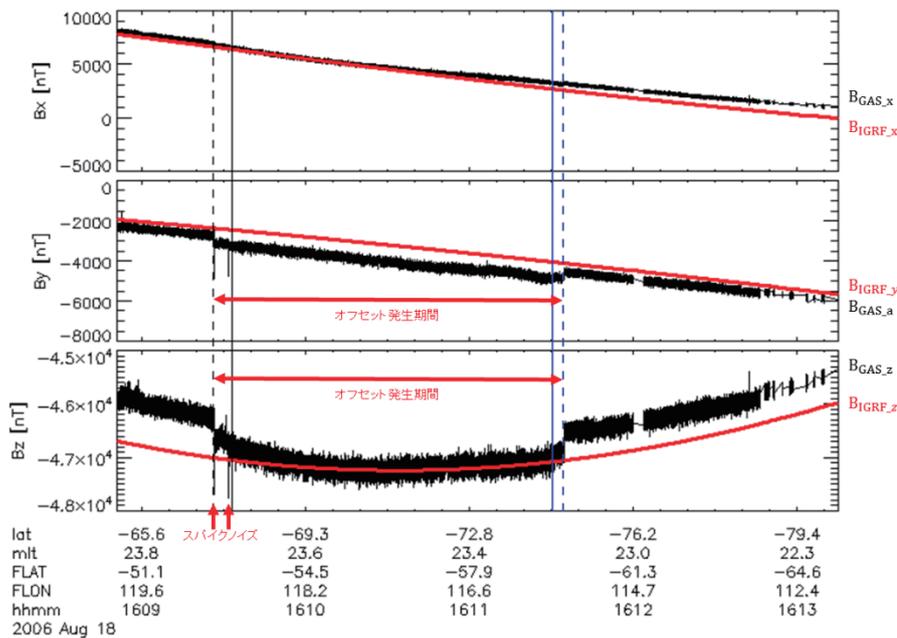
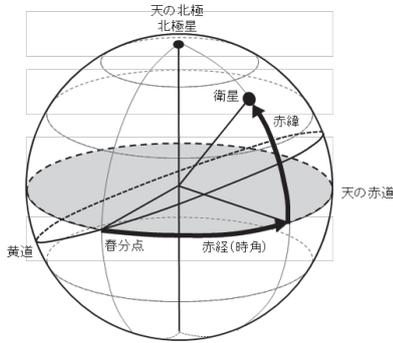


図2：GASによって測定された磁場データ：衛星座標系での磁場の3成分（黒線）と、IGRFモデルによる地球の固有磁場（赤線）。縦線は、MACのコマンド実行時刻（順に、起動、測定開始、測定終了、停止）。

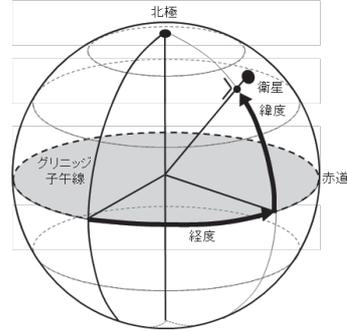
図2では、黒線で示された磁場の3成分が、赤線で示されたIGRF (International Geomagnetic Reference Field) 10モデルによる地球固有磁場の値と同程度の値を示している。磁場データの黒線は太い帯状に見えるが、これは短時間での磁場変動が大きく、大きなノイズ成分を含んでいるためである。また、MACの起動時と測定開始時には、縦の矢印で示すようなスパイク状のノイズが見られ、MACの測定中は、横向き矢印で示す区間に階段状の磁場変動（オフセット）が見られる。MACの起動中（縦の点線の間の区間）に誘導磁場の影響を受けていることが分かる。MAC起動から測定開始の間（16:09:26-33）には、スパイク状のノイズに加えて、オフセットノイズが時間的に変動している。MAC測定終了からMAC停止の間（16:11:30-16:11:34）では、スパイク状のノイズはないが、オフセットノイズの変動は見られる。オフセットノイズの時間変動を補正するのは難しいので、今回は、それらの区間の補正は行っていない。沿磁力線電流に伴う誘導磁場成分を評価するためには、磁場変動のノイズ等をできるだけ軽減し、オフセットノイズを調整する必要がある。

### 3. 磁力計データの補正

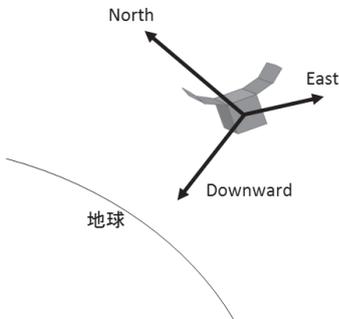
a. 赤道座標系 (J2000, TOD)



b. 測地系



c. NEZ座標系 (North/East/Downward)



d. 衛星座標系

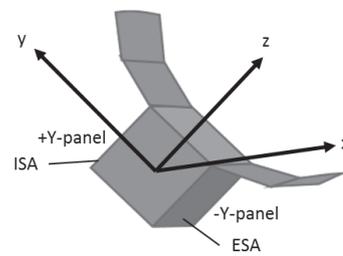


図3：データ処理で用いた座標系

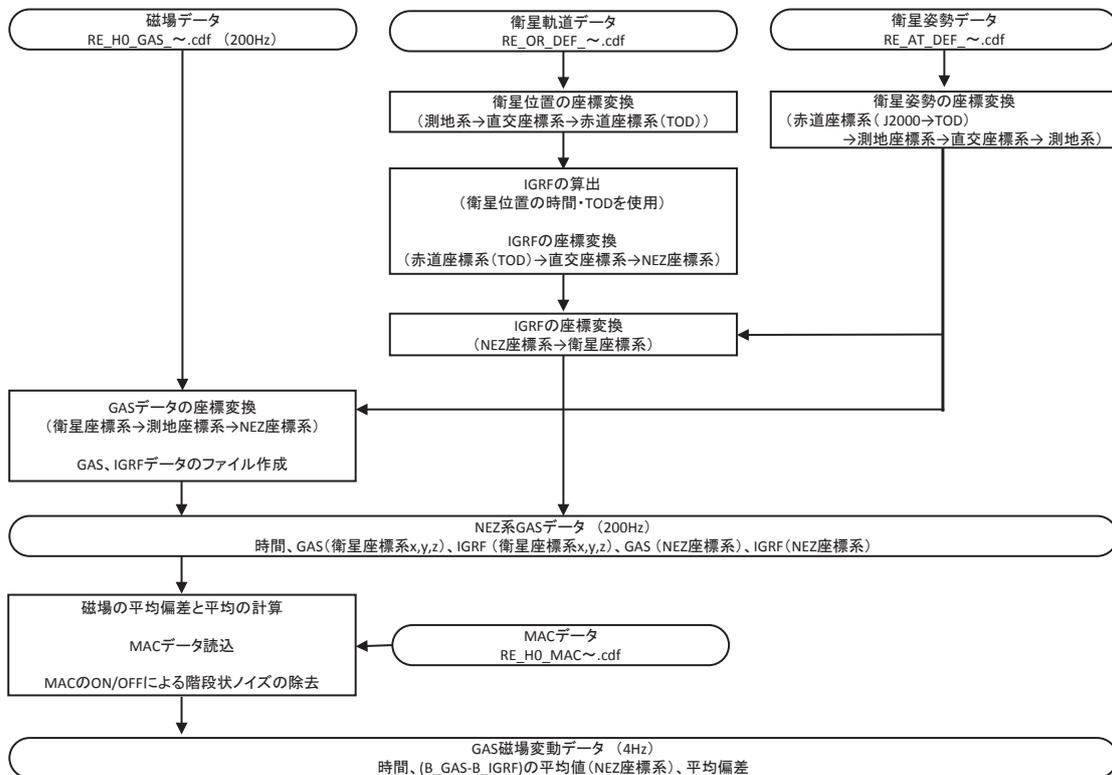


図4：GAS データの補正処理の流れ

GAS データを補正するためには、測定された GAS データの座標変換および、地球固有磁場との差分、ノイズ成分の除去が必要となる。観測値は、衛星座標系で与えられており、衛星の軌道データおよび姿勢データを用いて、座標変換される。使用する4つの座標系を図3に示す。図3aの赤道座標系で Mean of J2000.0 赤道座標系 (J2000) と True of Date 赤道座標系 (TOD) を用いている。J2000 では地球時2000年1月1.5日 (J2000) における平均赤道面、平均春分点を基準としており、TOD では瞬時の真の赤道面、真の春分点を基準とする。図3bの測地系は、経緯度および標高によって位置を示している。図3cの NEZ 座標系は北、東、地球への向きを各々正とした座標系であり、オーロラ帯の現象を扱う際に、視覚的に理解しやすく、よく使われる座標系である。図3dの衛星座標系は、衛星の構造に準拠した座標系であり、GAS が測定を行うときに使用している。

図4に、GAS データの補正処理の概要を示す。200 Hz サンプリングの GAS データを、最終的に 4 Hz サンプリングの補正データとし、データベース化する GAS データに加えて、衛星軌道データと衛星姿勢データの情報をを用いて、各種の座標変換を行う。また、IGRF10 モデルに衛星の軌道データおよび時刻を入力することで、当該時刻および当該衛星位置における地球固有磁場を導出する。座標変換に関しては、最終的に NEZ 座標系に変換し、東向き成分、北向き成分、地球向き成分の磁場とする。座標変換のみを行ったデータに関しても、IGRF 磁場と合わせて、ASCII データとして保存している (NEZ 座標系 GAS データ : 200 Hz)。GAS データと IGRF の差分を求めることで、宇宙空間の磁場を導出でき、強い沿磁力線電流が近傍に流れている領域では、この磁場変動が沿磁力線電流の誘導磁場に相当すると考えられる。ノイズレベルを小さくするため、200 Hz データに対して、1 s 間の平均値と平均偏差を計算して記録してある。沿磁力線電流の構造は数 10 km 以上と大きく、細かな磁場変動は、機器的なノイズ成分と考えられる。また、MAC の起動に伴って、一定値のオフセットノイズが含まれていることに関しては、次のような処理を行っている。MAC データより、MAC の測定開始および測定終了時刻を読み込み、運用手順から、MAC 測定開始の 6.8 s 前に起動、測定終了後 4 s 後に、MAC 停止となることから、MAC の起動に伴って影響を受ける時間帯を特定する。MAC の測定開始前と測定終了後は磁場が不安定になるため、補正処理を行っていない。このことにより、起動時と測定開始の間のスパイクノイズも無視していることになる。MAC 測定中のオフセットノイズは、測定区間の端の値の平均を用いて、オフセット値を算出し、測定区間の磁場変動から、オフセット値を引いている。これらの補正処理を行った磁場データを、サンプリングレートを 4 Hz に落として、データ保存している (GAS 磁場変動データ)。サンプリングレートを落としている理由は、処理の過程で 1 s 間の平均値を取っていることもあり、物理的に意味のある高周波の変動を再現できるとは考えられないためである。

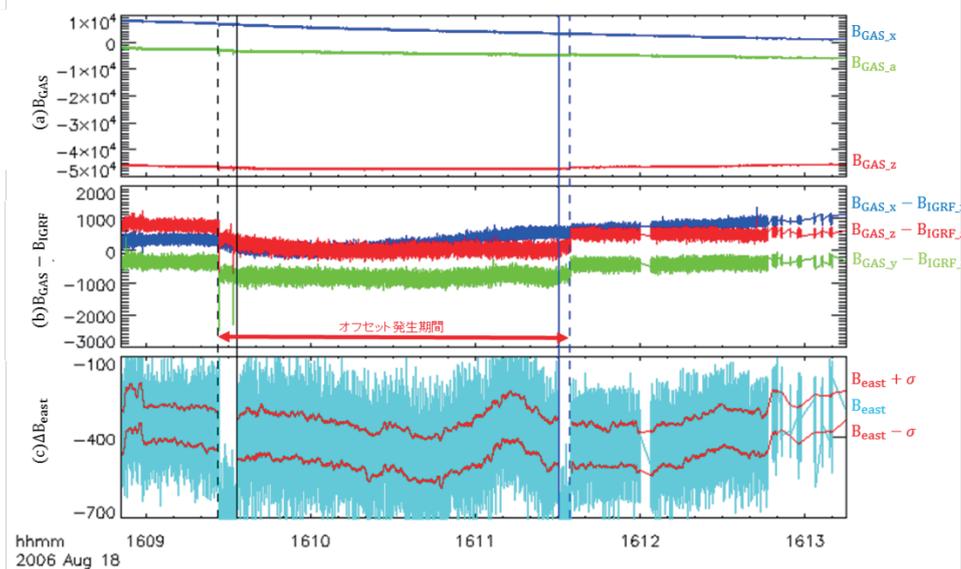


図5 : (a) GAS の元データ, (b) IGRF との差分データ, (c) 東向き成分の磁場変動 : 補正 4 Hz データ (赤線) とオフセットのみ補正 200 Hz データ (水色)

図5に、補正処理を行う際の各データを示す。図5(a)では、衛星座標系の GAS データが示されており、地球固有磁場程度の大きな値を示している。図5(b)では、GAS と IGRF との差分データを示しており、宇宙空間の磁場および衛星機器関連の誘導磁場を合わせた磁場の値となっている。MAC の動作の影響によって図2で説明したオフセットノイズが含まれていることが顕著に見られる。本イベントでのオフセット値は、 $(B_x, B_y, B_z) = (-146, -386, -504)$  であった。図5(c)では、補正データの東向き成分の磁場変動データを示している。水色が 200 Hz のデータで、赤線は、平均値±平均偏差の値を 4 Hz サンプリングで示している。MAC 測定中 (16:09:33-16:11:30) の磁場変動の値 (縦の実線間の区間) が、MAC 起動前後の値とほぼ同じレベルに補正されていることが分かる。

### 4. データ処理の妥当性の検討

本節では、補正データの磁場変動が沿磁力線電流による影響を反映しているかを確認する。図6に、GASの補正データによる東向き磁場変動成分、ピッチ角ごとの電子・イオンのエネルギー—時間スペクトラムを示す。補正前のGASデータ（水色：オフセットのみ考慮）は、ノイズ成分が非常に大きい。補正データである赤線は、沿磁力線電流による緩やかな変動を明確に示している。れいめい衛星が南半球にいて、上向きの沿磁力線電流を北から南へと横切るとき、沿磁力線電流の北側では西向きの誘導磁場を感じ、南側では東向きの誘導磁場を感じる。東向きを正とすると、磁場変動の東向き成分が増加傾向にあれば、沿磁力線電流は上向き、減少傾向にあれば下向きとなると考えられる。また、衛星速度はほぼ等しいので、増減区間が短ければ、沿磁力線電流の空間スケールも小さく、増減区間が長ければ、空間スケールが大きいことを示している。図6の上部には、磁場変動の増減と時間長さを踏まえて、沿磁力線電流の向きと空間スケールを模した矢印を描いている。一方、観測範囲のプラズマ粒子が主な電流の担い手である場合、電子の降り込み量が多ければ、電流は上向きに、イオンの降り込み量が多ければ、電流は下向きに流れているはずである。例えば、16:11:00前後のD区間では、電子の降り込み（ピッチ角120°-180°）が強く、上向きの電流があることが分かるが、それに対応して磁場の東向き成分は増加しており、上向き電流であること示唆している。16:10:22~16:10:30のB区間では、0.8 keV程度とエネルギーが低く、フラックス量の小さな電子の降り込みがあり、弱い沿磁力線電流であることが推測されるが、小さいながらも明確な磁場変動の増加が見られた。一方、16:10:43~16:11:13のE区間では、強いイオンの降り込み（ピッチ角120°-180°）があり、電子の降り込みは強くないため、下向き電流であることが分かる。最後に、ESA/ISAの観測終了後およそ15秒後の16:12:48~16:12:52のI区間に、15秒程度の微小な磁場変動の増加・減少が見られている。これは、ESA/ISAの停止後に常に見られる機器由来の磁場変動である。図6では、沿磁力線電流に対応する電子とイオンが確認できる。

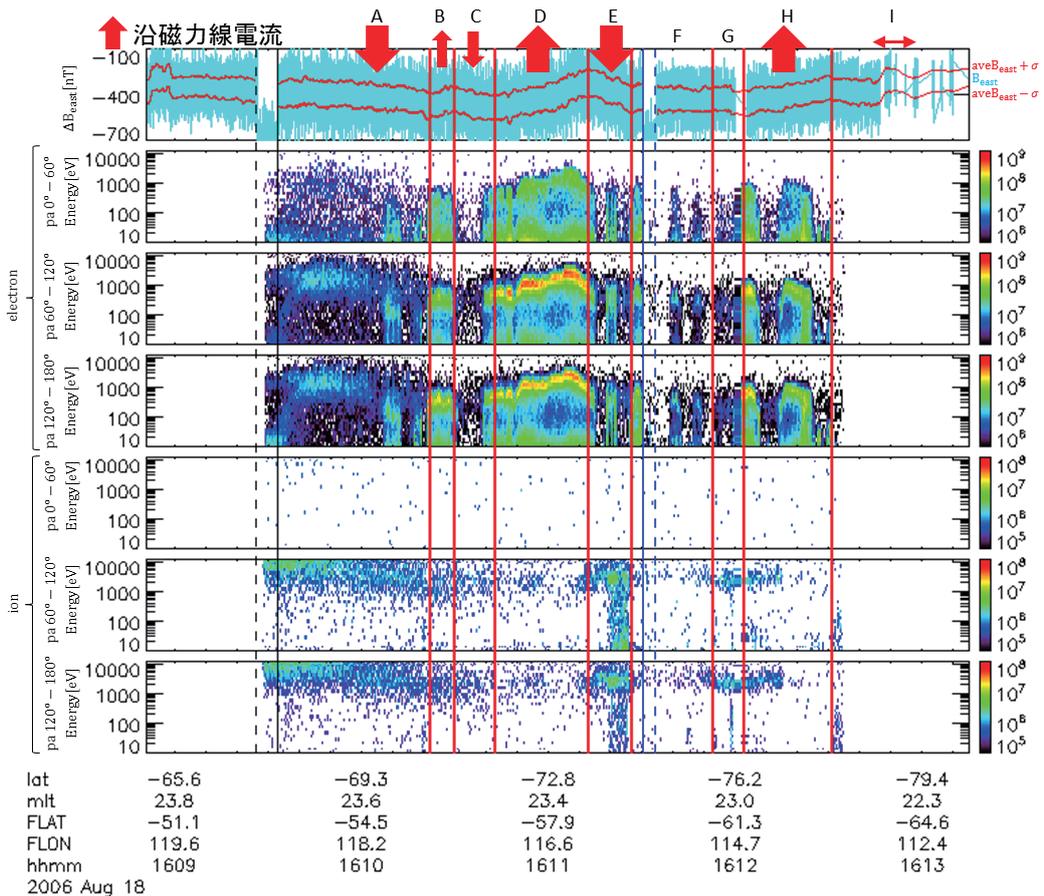


図6：補正後のGASデータ（東向き成分）とピッチ角ごとの電子・イオンのエネルギー—時間スペクトラム

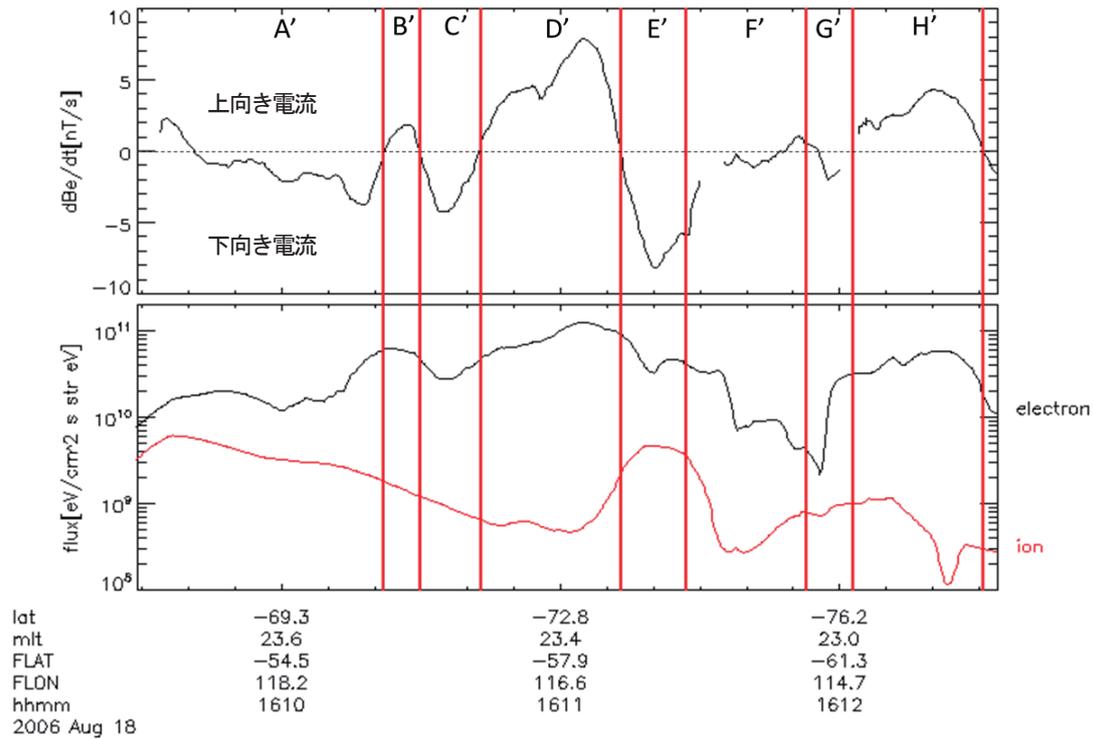


図 7: GAS データ (東向き成分) の傾きと電子・イオンのフラックスの対応

図 7 では, GAS, ESA/ISA から得られた沿磁力線電流に対応する物理量を比較する. GAS データは, 磁場の勾配に相当する  $dB_{east}/dt$  を時間幅 15 秒での最小二乗法により求めた. この時間幅を使用することで, 約 100 m 以下の微細な電流構造は考慮していないことになる.  $dB_{east}/dt$  が正のとき上向き電流, 負のとき下向き電流となる. ESA/ISA データでは, エネルギー方向と時間幅 15 秒間のフラックスを足し合わせた. また, ESA では, 正味の下向きフラックスを求めるため, 下向きフラックス (ピッチ角  $120^\circ - 180^\circ$ ) から上向きフラックス (ピッチ角  $0^\circ - 60^\circ$ ) を差し引いている. ISA では, 上向きフラックスがほぼ 0 のため, 下向きフラックスの値のみを示している. 電子とイオンフラックスの比較に関しては, 観測器のエネルギー範囲の制限や光電子の影響などのため, 定量的な比較はできない. 電子フラックスがピークをもつ区間 B', D', H' では,  $dB_{east}/dt$  が正で上向き電流となっている. 一方, イオンフラックスが多い区間 A', E', G' では, 電子フラックスも多くなっているため,  $dB_{east}/dt$  は負で, 下向き電流となっている. 区間 C' では, イオンフラックスはそれほど多くないが, 電子フラックスが減っており, 下向き電流となっている. 区間 F' は, 電子・イオンフラックスとも少なくなっており,  $dB_{east}/dt$  は微弱な変動を示している. これらのことより, 磁場変動の傾きは電子・イオンのフラックスから予想される沿磁力線電流とよく対応する. このように, GAS の補正データの磁場変動は, 粒子観測機で確認できる沿磁力線電流の向きやスケールの大きさと, 非常によく一致を示している.

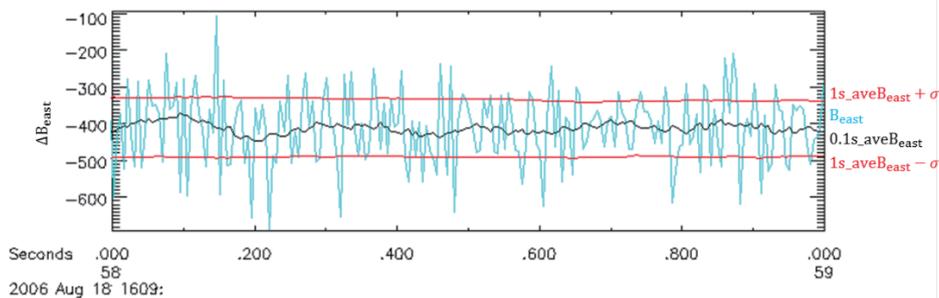


図 8 : 短時間 (2006. 08. 18 16:09:58~16:09:59) の GAS 磁場変動  $\Delta B$  の東向き成分 : 200 Hz (水色線), 0.1 秒平均値 (黒線), 1 秒平均値  $\pm$  平均偏差 (赤線)

表2. : 補正データのノイズレベルのまとめ (2006.08.18 16:09:55~16:10:05)

	時間分解能	平均偏差 [nT]	対応する電流密度 [ $\mu\text{A}/\text{m}^2$ ]
元データ	200 Hz	75.5 ~ 92.7 (1 秒間)	7.94 ~ 9.72
補正データ	4 Hz	6.94 (10 秒間)	0.72

次に、GAS の補正データの磁場変動がほとんどない区間を選び、磁場のノイズ成分の影響について考察する。図8は、1秒間の磁場変動であり、赤線は4 Hz サンプリングの補正データの磁場変動を示しているが、ほとんど変化がないことが分かる。このとき、200 Hz の磁場データ（水色）は、平均偏差を超える磁場振動を周期的にしている。また、黒線は、200 Hz データを0.1秒平均したものであるが、0.2秒程度の緩やかな振動成分がある。ほぼ一定の衛星速度を考慮すると、平均時間である1秒以上の磁場変動は数 km 以上の空間スケールを持つ沿磁力線電流に対応するため、それらの沿磁力線電流の推定には、補正データが対応可能であると考えられる。

次に、磁場変動の大きさに対する評価を行う。表2に補正前後のノイズレベルをまとめた。200 Hz の元データでは、1秒間の平均偏差は75-93 nT であり、宇宙空間の磁場変動と比べて非常に大きい。変位電流を無視したアンペールマクスウェルの式

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

を用いて、磁場変動を電流密度に換算すると、約8-10  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  となり、実際の沿磁力線電流（約1-2  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ ）と比べても、非常に大きいことが分かる。一方、4 Hz の補正データでは、10秒間の平均偏差は約7 nT であり、電流密度に換算すると1  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  以下であり、かなり弱い沿磁力線電流も検出可能なデータとなっている。電流密度の計算に関しては、れいめい衛星の速度が7.585 km/s であると仮定して単位時間当たりの変位を計算し、平均偏差分の磁場変動に対応する電流密度を導出した。補正データは、結果的に、沿磁力線電流の見積りに十分な精度の磁場変動データとなっており、その磁場変動は、プラズマ粒子データの傾向とよく合う。今後、非常に微弱な沿磁力線電流の例などに対して、プラズマ粒子データとも合わせて、電流密度の大きさの見積もりとその妥当性を検討したい。

## 5. まとめ

れいめい衛星には、MAC, ESA/ISA と CRM の3つの理学ミッション機器が搭載されており、降り込み粒子データとオーロラ撮像画像による微細なオーロラ解析が行われてきた。本研究では、姿勢制御用の磁力計 GAS のデータを処理し、沿磁力線電流の大きさや向きについて議論できるかどうかの評価を行った。座標変換、機器依存の高周波のノイズ成分の平均化、および、MAC の起動に伴う磁場変動の除去等の補正を行い、データベースとして整備した。また、ESA/ISA データと比較することで、GAS の補正データによる磁場変動が、沿磁力線電流による変動とよく合うことを確認した。これらの補正データは、科学論文でも利用され、沿磁力線電流の根拠として使われている[5]。一方で、補正データの磁場変動は、比較的規模の小さな沿磁力線電流に対しても、非常によく対応することが分かった。れいめい衛星の ESA 観測器という高時間分解能で高精度な電子データとの比較により、本来であれば GAS データのノイズレベルより小さな磁場変動であっても、優位な変動が見られている。今後の課題として、微弱な沿磁力線電流に対してのさらなる定量的な比較が必要であるが、現時点では、多くの沿磁力線電流を適切に検出できる磁場変動のデータベースとなっている。データベースは公開予定である。

## 謝辞

本研究に際して、国立極地研究所研究員の福田陽子氏、名古屋大学宇宙地球環境研究所研究員の元場哲郎氏には、GAS の補正データの使用等に関して、ご協力を頂いたので、ここに感謝いたします。宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所の齋藤宏文教授、坂井真一郎准教授をはじめとする、れいめい衛星チームの皆さまには、衛星機器や運用等に関して、お世話になりましたので、感謝いたします。本研究は、平成28年度名古屋大学宇宙地球環境研究所「データベース作成共同研究」の助成を受けたものです。また、1名の査読者の方からは有意義なご助言をいただきましたので、感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Saito, H., et al., "INDEX: Piggy-back satellite for aurora observation and technology demonstration", Acta Astronautica, 48, 5-12, 723-735, (2001).
- [2] Sakanoi, T., et al., "Development of the multi-spectral auroral camera onboard the index satellite", Adv. Space Res., 32, 3, 379-384, (2003).
- [3] Asamura, K., et al., "Auroral particle instrument onboard the index satellite", Adv. Space Res., 32, 3, 379-384, (2003).

- [4] Asamura, K., et al., “Sheared flows and small-scale Alfvén wave generation in the auroral acceleration region”, *Geophys. Res. Lett.*, 36, 5, L05105, (2009).
- [5] Fukuda, Y., et al., “Electron properties in inverted-V structures and their vicinities based on Reimei observations”, *J. Geophys. Res.*, 119, 5, 3650-3663, (2014).