

QZS(みちびき)初号機と MAGDAS による磁気圏 FAC—電離圏電流回路の 同時観測に関する統計解析に向けて

安倍松侑太¹、河野英昭^{1,2}、東尾奈々³、越石英樹³、松本晴久³、
A. V. Moiseev⁴、D. G. Baishev⁴、魚住禎司²、阿部修司²、吉川顕正^{1,2}

1: 九州大学大学院 理学研究院 地球惑星科学部門

2: 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター

3: 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第一研究ユニット

4: Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Siberian
Branch, Russian Academy of Sciences

1. イントロダクション

FAC (Field-Aligned Current; 沿磁力線電流) は磁力線に沿って流れ、磁気圏の構造や substorm などの現象を理解する上で非常に重要である。これまでに静止軌道衛星、極軌道衛星、地上磁力計、などによって FAC 観測が行われてきている。しかし、以下の(1)(2)の研究報告例は少ない。

- (1) 同一の磁力線上に位置する衛星と地上磁力計によってその磁力線を通る FAC を長期間にわたって同時観測・解析した例
- (2) 磁力線沿いに電離圏に到達した FAC は電離圏電流と繋がって電流回路を作っており、その電流系の理解は磁気圏電離圏連続系の理解において重要であるが、その繋がりの様相を同一磁力線上衛星—地上長期間同時観測で調べた例

その大きい理由は、極軌道衛星は地上に対して高速で移動するため同一磁力線に位置する時間が非常に短い事、静止軌道衛星は常に同一磁力線上に位置するが磁気圏内の FAC 発生位置の中心からは離れており、substorm 等の際に FAC が静止軌道を通過する回数も長くない事、である。

本研究の本質的目的は、

- (a) 内閣府が運用する準天頂衛星 (QZS; Quasi-Zenith Satellite) 「みちびき初号機」(2010 年に JAXA により打ち上げ)
- (b) 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター (ICSWSE; International Center for Space Weather Science and Education) が中心となって運用する地磁気観測ネットワーク MAGDAS (MAGnetic Data Acquisition System) 中のシベリア磁力計の 2 つが同一磁力線上に位置する期間が過去研究にないほど長い (詳細は下記参照) ことから、そ

の期間の(a)(b)の同時観測磁場データから上記(1)(2)を大規模統計解析研究する事である。

「みちびき初号機」の軌道（表 1）はその高度が静止衛星(約 36000km)とほぼ同じで、かつ、軌道傾斜角が 40° 、離心率が 0.1° となっている。そのため「みちびき初号機」は日本子午面近辺の磁気圏内高緯度領域に長時間滞在する。「みちびき初号機」は磁力計を搭載しており、本研究ではその磁場データを使用する。

軌道	準天頂軌道
軌道高度	約 32000～40000km
離心率	約 0.1°
軌道傾斜角	約 40°
軌道周期	23 時間 56 分

MAGDAS は現在世界～100 箇所に地上磁力計を設置しており、その磁場観測データはインターネットを介してリアルタイムで ICSWSE に送られている。その観測点は複数のシベリア観測点も含んでいる。本研究では Kotel'nyy (KTN)、Tixie (TIK)、Chokurdakh (CHD)、の 3 観測点の磁場データを使用する。

「みちびき初号機」は日本の子午面付近に長時間滞在するので、「みちびき初号機」を通過する磁力線が地表に到達する点 (footpoint) は大きく移動することなく MAGDAS シベリア観測点付近に位置し続ける (図 1)。そのため、磁気圏 FAC—電離圏電流回路の同一磁力線上同時観測の頻度がこれまでにない高いものになると期待される。また、大きい軌道傾斜角を持っている「みちびき初号機」は静止軌道距離（地心距離：地球半径の～6.6 倍）の磁気圏内高緯度領域に長時間滞在するが、この領域での長時間連続観測はこれまであまり行われていない。これも本研究の unique point である。

本論文では 2010/10/1～2013/3/31 の 2 年半のデータの解析について報告する。「みちびき初号機」での磁場データは FA (Field-Aligned) 座標系で表現したものをを用いる。磁力線に沿って伝わる現象を研究対象としているためこの座標系を用いる。FA 座標系の原点は衛星中心にあり、 Z_{FA} 軸は衛星位置での主磁場（グローバル経験磁場モデルである Tsyganenko2002 モデルで計算）の向きに取り、 Y_{FA} 軸は Z_{FA} 軸単位ベクトルと地球中心→衛星位置ベクトルとを外積した向きに取り、 X_{FA} 軸は Y_{FA} 軸と Z_{FA} 軸との外積で決まる。また、衛星を通過する磁力線や footpoint などの計算は、全て Tsyganenko2002 モデルを用いて行った。

表 1. みちびき初号機の軌道諸元

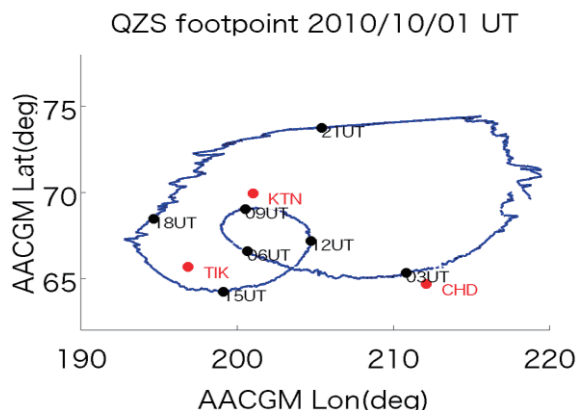


図 1. 「みちびき初号機」の 1 日間の footpoint の軌跡の例 [小串他、2016 より引用]。横軸：磁気経度、縦軸：磁気緯度。赤点：MAGDAS シベリア観測点。

2. データ解析・議論

2-1. イベント同定

以下の条件によりイベント同定を行った。(同定条件は河野他[2017]と同じだが、今回データを見直す事によって同定がより正確になり、また解析期間を河野他[2017]の1年から2年半に増やした事によりイベント数が増えた。)

条件 1: 「みちびき初号機」の磁場データプロットの目視によって、明瞭に **transient perturbation** が起こっているイベントを同定した。

その結果 367 のイベントが同定された。

条件 2: 「みちびき初号機」－MAGDAS 同一磁力線上同時観測イベント候補として、条件 1 を満たしたイベントの中から下記の 2-1 と 2-2 の条件を両方とも満たすイベントを同定した：

条件 2-1 : $Z_{sm} > 0$ 、ここに Z_{sm} は SM 座標系における「みちびき初号機」位置の Z 成分:「みちびき初号機」と MAGDAS が赤道面(多くの現象のソース領域)の反対側にあると、現象の南北対称性は保証されていないので「みちびき初号機」・MAGDAS 相関が下がると予想される為。

条件 2-2 : $R < 10^\circ$ 、ここに R は「みちびき初号機」を通る磁力線の footpoint (以下「QZS footpoint」と記す事もある)と MAGDAS 観測点の間の距離で、その定義は

$$R = \sqrt{(2 \text{ 点の磁気緯度の差})^2 + (2 \text{ 点の磁気経度の差})^2}。$$

この条件 2 を適用した結果、102 のイベントが同定された。

条件 3: 条件 2 を満たしたイベントの中から、MAGDAS でも擾乱が同時観測されているイベントを目視により同定した。

その結果 76 の「みちびき初号機」－MAGDAS 同一磁力線上同時観測イベントが同定された。

2-2. 事例解析

同定された 76 イベント中 1 例について以下紹介する。このイベントは 2012 年 12 月 14 日に観測された。このイベントでは明瞭に線状の FAC と電離圏電流が同時観測できた。

図 2 左はその時刻の「みちびき初号機」の位置と衛星を通過する磁力線を SM 座標系 XZ 面に投影した形状を示している(衛星位置の MLT は $\sim 19:30$)。この磁力線の footpoint と MAGDAS 観測点 3 点の位置は図 2 右に示している。footpoint が CHD に近く、地上磁場については CHD データを解析する。

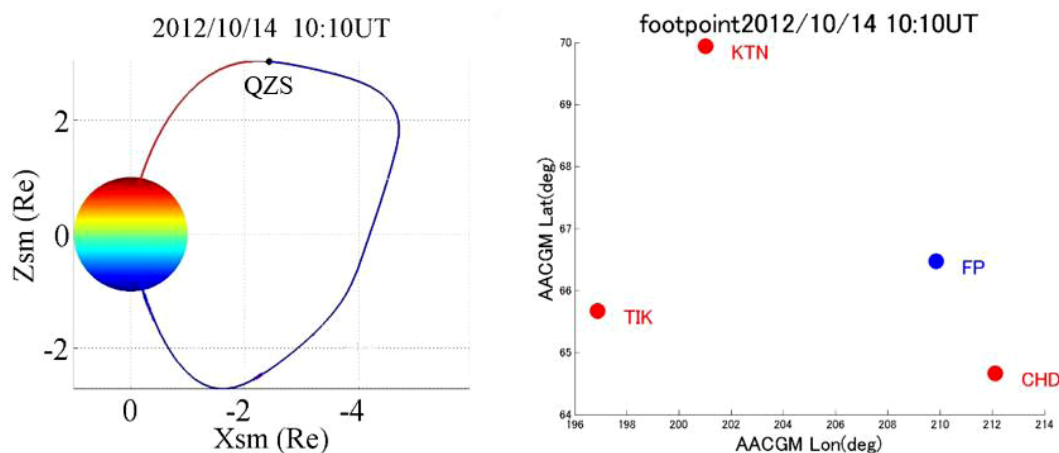


図 2. (左)「みちびき初号機」(QZS と表記) の位置を通過する磁力線 (右) MAGDAS 観測点 3 点(赤)と QZS footprint (青、FP と表記) の位置 (横軸経度、縦軸緯度)

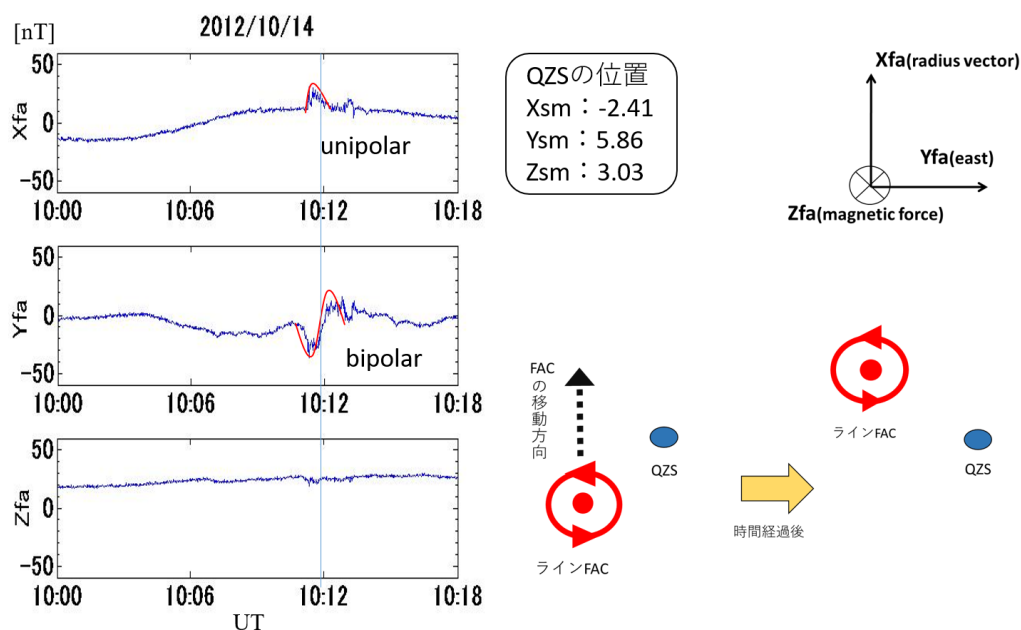


図 3. (左)「みちびき初号機」の磁場データ (右)その変動の解釈図

以下、詳しい磁場解析を行っていく。まず「みちびき初号機」の磁場データを見る(図 3 左)。表示されているのは観測磁場データから Tsyganenko2002 モデル磁場を引いたデータである。イベント時において、磁場変動量は Z_{FA} 成分より X_{FA} 、 Y_{FA} 成分の方が圧倒的に大きく、 Y_{FA} 成分は bipolar perturbation (負と正の極値が並んでいる)を示し、また、 X_{FA} 成分は unipolar perturbation (極値が 1 つ)を示していてその極値は Y_{FA} 成分の 2 つの極値に時間的に挟まれている。この変動は、線状の FAC が「みちびき初号機」の磁気圏内西側かつ南側の位置から北向きに移動していったとすれば説明できる (図 3 右)。初めは FAC が衛星の位置よりも磁気圏

内で西側かつ南側にあるので衛星の位置に北向き且つ西向きの磁場を作るが、FAC が北向きに移動して衛星位置の真西に来ると北向き磁場のみ作り、更に移動して衛星の位置より北側に来ると北向き且つ東向きの磁場を作ることになる。 Z_{FA} 成分変動が X_{FA} 、 Y_{FA} 成分変動より圧倒的に小さい事は、電流が実際に磁力線に沿って流れている為である、つまり今見ている磁場変動は実際に FAC により作られている自然現象である、と解釈できる。

次に CHD の磁場データを見る (図 4 左)。イベント時において H 成分は南向きの unipolar perturbation を示し、D 成分は西向きの unipolar perturbation を示した。また、Z 成分は鉛直下向きの極値に続いて鉛直上向きの極値を示し、H 成分と D 成分の極値 (ほぼ同時) は Z 成分の 2 つの極値に時間的に挟まれていた。

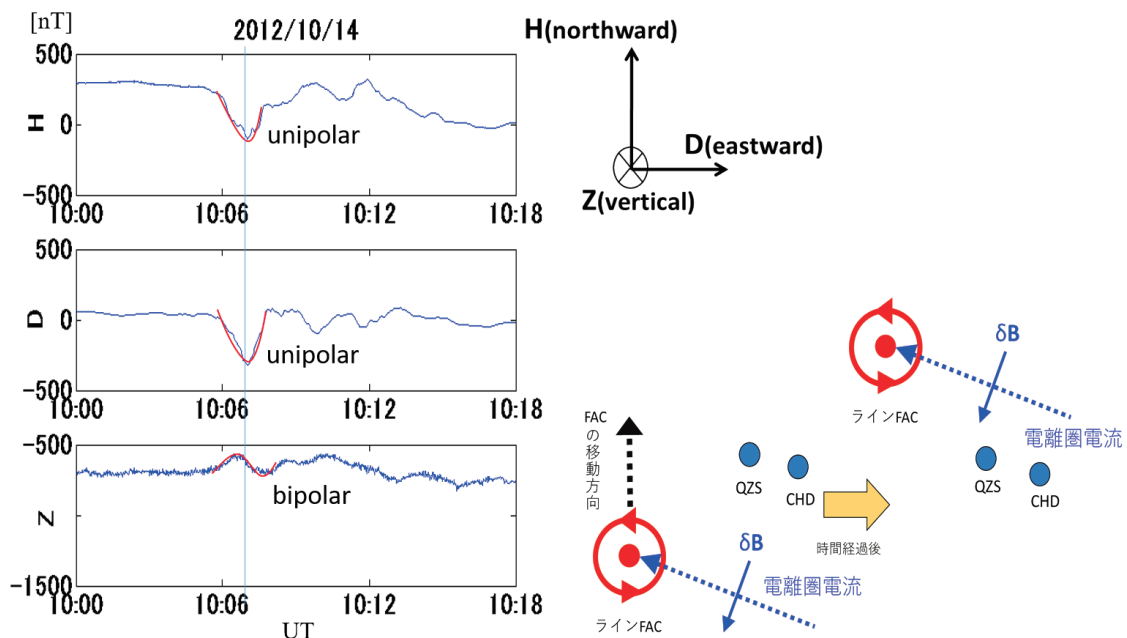


図 4. (左) CHD の磁場データ (右) その変動の解釈図

H、D 成分が仮に線状 FAC によって作られたとすると、H 成分と D 成分の位相は、「みちびき初号機」のデータと同様、ずれていなければならない。しかし実際に観測された H、D 成分の位相はほぼ揃っていた。このことから、この H、D 成分は、FAC (図 4 右・赤太点) によって作られたのではなく FAC と繋がる電離圏電流 (図 4 右・青点線矢印) によって作られた、と解釈できる。ここに、電離圏電流が南向き H 成分と西向き D 成分を作ったという事は、図 4 右に示すように電離圏電流が北西向きに流れたことを意味する。また、FAC は地上観測点から遠く離れていたため FAC の作る磁場の振幅は相対的に非常に小さかった、と解釈される。ただ、上記の解釈には数多くの仮定が含まれている為、今後更に検討・検証する必要がある。

2-3. 初期統計解析

同定された 76 イベントの統計解析については、イベント数が増えたため再解析中で、以下、現在までに得られている初期結果として FAC の極性の分布を報告する。

ここではまず「FAC の流れる磁力線は高緯度向きに移動する」と仮定し、各イベントの FAC の極性（地球向きか尾部向きか）を「その FAC が「みちびき初号機」の位置に作る磁場変動の東向き成分が、イベント中心時刻において増加するか減少するか」で推定した。その結果得られた FAC 極性を「みちびき初号機」観測位置の関数としてプロットしたのが図 5 である。ここに、図 5 は「みちびき初号機」により観測された FAC 位置を SM 座標系で示している。左図の横軸縦軸は Y 座標、X 座標であり、右図の横軸縦軸は Y 座標、Z 座標であり、である。また、青色は地球向き FAC を、赤色は尾部向き FAC を意味する。

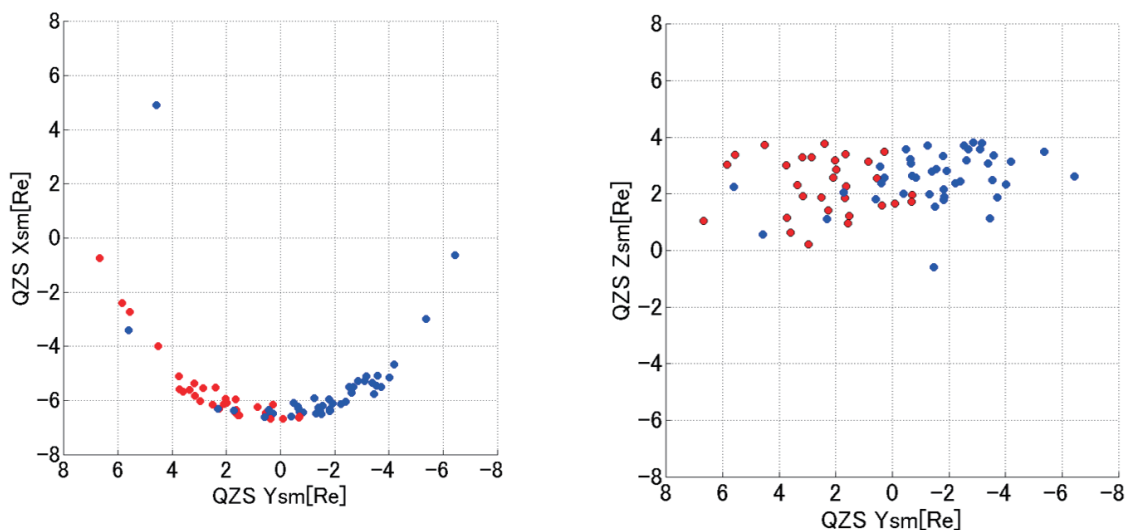


図 5. FAC の空間分布と極性(青：地球向き、赤：尾部向き)

図 5 は、FAC は朝側で地球向き、夕方側で尾部向きに流れる傾向が強い事を示している。これは Region-1 のセンスであり、過去研究と consistent である。(これは、本研究で同定したイベントが自然現象である事を示す結果でもある。) ただ、平均的磁気活動度の期間においては、静止軌道距離の磁気圏内高緯度領域は plasma sheet が南北に分かれてオーロラ帯に繋がっていく領域にあたり、この領域を長時間連続観測した過去衛星は少ない。イントロダクションに記したように、大きい軌道傾斜角を持っている「みちびき初号機」はそれを行える、という unique point を持っており、その長時間連続観測の結果が図 5 右に示されているものである。この位置でもほぼ常に Region-1 センスの FAC が流れている、という結果は過去研究結果を補強する新しい観測結果である。Plasma sheet を流れる FAC の大半は plasma sheet boundary layer

(PSBL)を流れるので、図 5 右の FAC の多くは静止軌道距離での PSBL FAC と考えられるが、大きい substorm では current-wedge FAC が静止軌道まで到達する事もあるので 図 5 右の FAC events の中にも current-wedge FAC events が含まれるのは充分考えられる事であり、本研究の FAC events の発生時の AE index を調べて 2 つのタイプの FACs を識別する事が重要である。

3. まとめ・今後の課題

設定した基準に基づいて、2 年半の期間のデータ中から「みちびき初号機」ーシベリア MAGDAS 同一磁力線上同時観測イベントを同定した。その中の 1 例の上記事例解析において、FAC と電離圏電流とで閉じる電流系の morphology を推定した。また、同定した events の初期統計解析を行い、静止軌道距離の磁気圏内高緯度領域でも PSBL FAC がほぼ常に Region-1 センズで流れている事を確認した。

ただ、イントロダクションに記したように、本研究の本質的目的は「みちびき初号機」ーシベリア MAGDAS による同一磁力線上同時観測によって FAC-電離圏電流回路を同定し その繋がり様相を大規模統計によって調べる事である。その目的に向かって、今後、5 年分のデータを解析してイベント数を増やし、統計的解析をさらに進めていく。

4. 参考論文

- 竹内勇人、河野英昭、東尾奈々、松本晴久、D. G. Baishev、魚住禎司、阿部修司、湯元清文、吉川顕正、QZS 衛星と MAGDAS 地上磁力計による沿磁力線電流の同一磁力線上同時観測、第 10 回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, p33-40, JAXA-SP-13-016, 2014 年 5 月 15 日。(査読無し)
- 小串修、河野英昭、東尾奈々、松本晴久、D. G. Baishev、魚住禎司、阿部修司、湯元清文、吉川顕正、QZS と MAGDAS 地上磁力計による同一沿磁力線電流の同時観測ー沿磁力線座標系解析、第 11 回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, p205-210, JAXA-SP-14-012, 2015 年 3 月 20 日。(査読無し)
- 小串修、河野英昭、東尾奈々、松本晴久、A. V. Moiseev、D. G. Baishev、魚住禎司、阿部修司、湯元清文、吉川顕正、QZS と MAGDAS 地上磁力計を用いた同一沿磁力線電流の解析、第 12 回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, p271-276, JAXA-SP-15-012, 2016 年 3 月 11 日。(査読無し)
- 河野英昭、小串 修、安倍松侑太、東尾奈々、松本晴久、A. V. Moiseev、D. G. Baishev、魚住禎司、阿部修司、吉川顕正、QZS と MAGDAS 地上磁力計による磁気圏 FAC-電離層電流回路の同時観測：初期統計解析、第 13 回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, p57-64, JAXA-SP-16-010, 2017 年 2 月 15 日。(査読無し)