

みちびき初号機 footpoint のシベリア MAGDAS 近傍への長時間滞在を 活用した、磁気圏 FAC – 電離圏電流系の同時観測：統計解析

河野 英昭^{1,2}, 安倍松 侑太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¹, 阿部 修司¹, 吉川 顕正^{1,2}

1: 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター

2: 九州大学大学院 理学研究院 地球惑星科学部門

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。また、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。しかし、その繋がりの様相を、衛星と地上観測点が同一磁力線上に長時間滞在する例を使って調べた研究は少ない。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) と
- (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) のシベリア観測点中の Kotel'nyy (KTN) (磁気緯度 69.9° 、磁気経度 201.0°)、Tixie (TIK) (磁気緯度 65.7° 、磁気経度 196.9°)、Chokurdakh (CHD) (磁気緯度 64.7° 、磁気経度 212.1°)

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 (その理由は次段落参照) 事から、その期間の(a)(b)の同時観測磁場データから FAC と電離圏電流の結合の様相の詳細を大規模統計解析によって明らかにする事である。

「みちびき初号機」の軌道 (軌道要素数値は安倍松他 [2017] 参照) はその高度が静止軌道 ($6.6R_E$) に近く、かつ、軌道傾斜角が約 40° となっている。そのため「みちびき初号機」は日本子午面近傍の磁気圏内高緯度領域に長時間滞在し、また、「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 KTN, TIK, CHD の近傍に位置し続ける (footpoint の軌

跡の 1 例は安倍松他[1997]の図 1 参照)。

本研究のもう 1 つの **unique point** は、「みちびき初号機」は磁気圏内の静止軌道距離高緯度領域に長時間滞在する事、そ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事、である。

本論文でのデータ解析期間は 2010/10/1~2013/3/31 の 2 年半である。この期間は安倍松他[2017]と同じで、本論文では安倍松他[2017]以降の統計解析の進展部分を中心に報告する。

2. データ解析・議論

「みちびき初号機」の位置表示には SM 座標系を用いる。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。

地上磁場は HDZ 直交座標系を用いて表現する。ここに、H は地球固有磁場の地表での向き、D は東方向き、Z は鉛直下向きである。

イベント同定方法は安倍松他[2017]と同じである。その本質的な点は、「みちびき初号機」で明瞭に transient perturbation (継続時間 10~30 分程度) が観測されている事、「みちびき初号機」の footpoint (以下 QZSFP と記す) と KTN, TIK, CHD のいずれかとの間の距離が 10° 以下である事、KTN, TIK, CHD でもほぼ同時に perturbation が観測されている事、である。イベント同定方法の詳細については安倍松他[2017]の第 3 章を参照されたい。この方法により 76 events が同定された。

同定された events のうちの 1 例の事例解析も安倍松他[2017]の第 4 章にて行われているので参照されたい。ここにはその重要点を summary として記す。その event では、「みちびき初号機」で観測された磁場変動は、線状 FAC の(磁気圏内)高緯度向き運動が作る磁場変動と consistent だった。また、同時観測された CHD での地上磁場変動は、線状の電離圏電流の高緯度向き運動が作る磁場変動と consistent だった。「みちびき初号機」footpoint と CHD が近かった事から、観測された FAC と電離圏電流は繋がっていたと解釈可能である。

以下、同定された 76 events の初期統計解析について記す。まず、上記事例解析での高緯度向き運動が一般的か否かを知る為に、地上観測点 3 点でのイベント観測時刻の差から直接、FAC (が流れる磁力線)の緯度方向運動(南北運動)の向きを以下のようにして調べた。

- (a) 地上磁場変動のうち D 成分は FAC の寄与が大きい (H,Z 成分については電離圏電流

の寄与も大きい) と考えられるので、D 成分の初動時刻を FAC 観測時刻として採用した。初動時刻は目視により判定し、判定が難しい観測点は南北運動方向推定に使用しなかった。

(b) CHD と TIK の磁気緯度差は上記の通り小さいので、[CHD and/or TIK] と KTN の観測時刻差を南北運動方向推定に使用した。KTN の方が高緯度なので、KTN の方が遅く観測されれば高緯度向き運動と推定した。

(c) KTN のデータが存在しない events については、「みちびき初号機」での FAC 観測で KTN 観測を代用できるか以下のようにして判定し、代用できるものは使用した。(5 events がこれに該当した。)

(c1) 地上 D 成分と対応が良いのは $B_{Y,FA}$ 成分(東向き磁場成分)と考えられるので、 $B_{Y,FA}$ 成分の初動時刻を FAC 観測時刻として採用した。初動時刻は目視により判定し、判定が難しいイベントは使用しなかった。そして、その観測時刻を、地上では、QZSFP での観測時刻として使用した。

(c2) QZSFP が CHD より 3° 以上高緯度にある場合は QZSFP で KTN を代用した。

以上の結果、34 events が残った。その 34 events 中、北向きに動いていると推定されたのは 33 events (97%)であった。このことから、全 76 events の殆どが北向きに動いた、と推定するのは妥当だと判断できる。

そこで、各イベントの FAC の極性 (地球向きか尾部向きか) を、「磁気圏内で高緯度向きに動く FAC が「みちびき初号機」の位置に作る $B_{Y,FA}$ 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 SM 座標系での QZS 位置に表示したのが図 1 である。(これは安倍松他[1997]の図 5 と同じであるが、 Z_{SM} 依存性の重要性から再掲

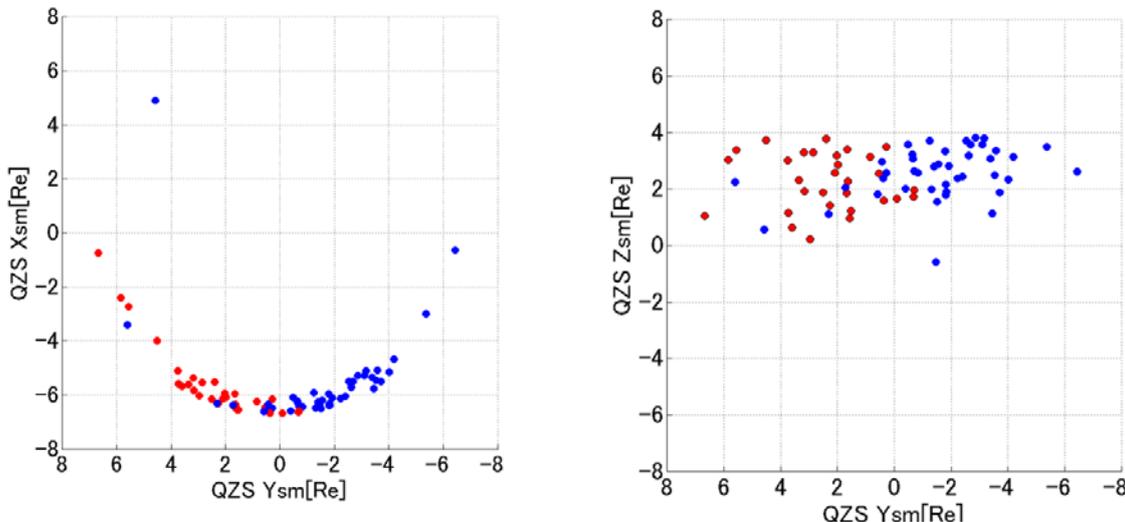


図 1. FAC の空間分布と極性(青：地球向き、赤：尾部向き)

する。また、安倍松他[1997]では FAC が高緯度向きに動く事は完全に仮定であった。)

図 1 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、過去研究と consistent である。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 1 右に示されているものである。

図 1 右に示すように FAC は静止軌道距離での $Z_{SM}=0\sim 4R_E$ で観測されている。 Z_{SM} 大の位置のものは PSBL FAC と考えられ、小さい substorm に伴って plasmashet が南北方向に膨らんだ結果観測された、と考えられる。一方、 Z_{SM} 小の位置のものは大きい substorm 時に current-wedge FAC が静止軌道まで到達したものを含んでいる事も充分考えられる事であり、本研究の FAC events の発生時の AE index を調べる事が重要である。

次に、本研究の本質的目である FAC—電離圏電流結合に関する初期解析結果について記す。今回は第 1 段階として定性的に、FAC—電離圏電流結合回路, TIK, CHD 地上磁場観測点、の位置関係の場合分けと、それに応じて期待される、地上での transient perturbation の同定可能性

について調べた。具体的には、まず図 2 の(a)~(d)の 4 つに場合分けする。FAC は QZSFP の近くにあるものとして、QZSFP の位置に FAC を描いている (⊗:地球向き、⊙:尾部向き)。また、それと繋がって電流回路を作る電離圏電流(一般的に西向き)を点線の矢印で描いている。そして、それと TIK, CHD の位置関係を示している。TIK と CHD は磁気緯度差 1° 、磁気経度差 15° であるので、QZSFP が TIK または CHD と 5° 未満の近さにある events を集めると、図 2 中の吹き出し内に記載の観測が期待される。例えば (a)では、地球向き FAC が TIK に近く電離層電流もそこから西向きのため、CHD はこれらの電流から遠く、その為磁場変動は小さいと期待される。また (b)では、CHD の近くを流れるのは TIK 近くの尾部向き FAC と繋がる電離圏電流のみであるため、それが作る磁場が明瞭に観測されると期待される。(c), (d)についても (b), (a)と同様の説明となる。

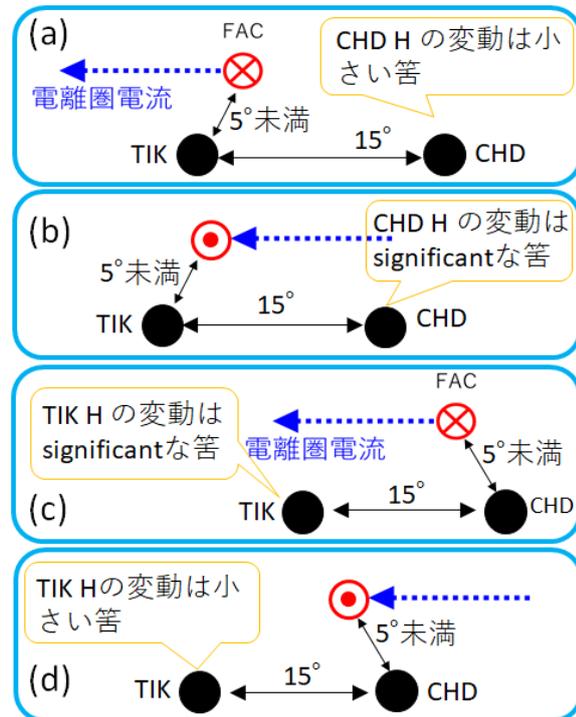


図 2. FAC (QZSFP の位置に表記)—電離圏電流結合回路, TIK, CHD 地上磁場観測点、の位置関係の場合分けと、期待される地上磁場変動

この場合分けのそれぞれについて、該当するイベント数 n とその中で期待を満たすイベント数 m を調べた。結果、それらを $[m/n]$ と書くと、(a) : [9/14]、(b) : [6/6]、(c) : [1/1]、(d) : [0/2]、となった。(a)(b)(c)(d)全て足すと[16/23]となり、期待を満たすイベントは7割で、母集団は小さいが期待された方向の結果であると考えられる。

3. 今後の課題

上記の初期統計解析において示されたように、現在のイベント数では、条件を厳しくしたり場合分けしたりするとイベント数が少なくなり有意な結論を得る事が難しくなる。有意な統計解析を行う為に、解析期間を更に広げ、イベント数をより多くする必要がある。

また、上記統計解析は非常に定性的なものであり、今後は、統計解析する対象として、FACと電離圏電流が繋がった電流回路の空間構造・サイズ、FACがQZS位置に作る磁場振幅と「FAC+電離圏電流」が地上に作る磁場振幅の比率、等をイベント毎に決め、それを統計解析していく必要がある。

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、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)

安倍松侑太、河野英昭、東尾奈々、越石英樹、松本晴久、A. V. Moiseev、D. G. Baishev、魚住禎司、阿部修司、吉川顕正、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、第14回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, p1-7, JAXA-SP-17-006, 2018年01月15日。(査読無し)