

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

河野英昭^{1,2}、小串修²、安倍松侑太²、東尾奈々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) は磁気圏内で磁力線に沿って流れる電流で、磁気圏の構造やサブストームなどの現象を理解する上で非常に重要である。これまでも静止軌道衛星、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が、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 を長時間同時観測した報告例は少ない。さらに、電流の連続性により、磁力線沿いに電離層に到達した FAC は電離層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、その繋がりや様相を同一磁力線上衛星－地上同時観測で調べた報告例も少ない。

本稿では、JAXA が運用する準天頂衛星 (QZS; Quasi-Zenith Satellite) と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) による磁気圏 FAC－電離層電流回路の同一磁力線上同時観測例の大規模統計に向けた初期解析結果について報告する。

QZS の主目的は日本における衛星測位の精密化である。QZS の軌道は静止衛星とほぼ同じ地心距離、傾斜角 40° 、離心率 0.1° を持っており、そのため QZS は日本子午面近辺の高緯度領域に長時間滞在するので、日本の鉛直上方近くから建物等に遮られることのない測位信号を送ることができ、日本近辺において現存の測位システムを補完する位置情報をもたらす。また、QZS は磁力計も搭載しており、本研究ではその磁場観測データを用いる。

MAGDAS は現在世界 70 箇所以上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。

QZS は日本の子午面付近に長時間滞在するので、QZS 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-電離層電流回路の同一磁力線上同時観測の頻度がこれまでに
なく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 QZS は静止軌道距離
(地球半径の ~ 7 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。

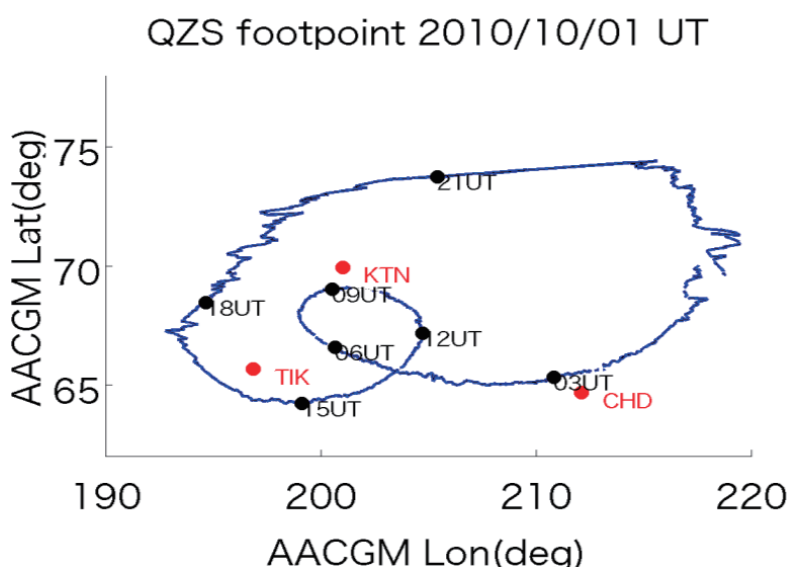


図 1. QZS footpoint の軌跡 (青線) と MAGDAS シベリア観測点 (KTN, TIK, CHD) の位置。
横軸: 磁気経度、縦軸: 磁気緯度。

本論文では 2010/10/1~2011/9/30 の 1 年間のデータの解析について報告する。QZS での磁場データは FA (Field-Aligned) 座標系で表現したものを用いる。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 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) の向きに取られ、Y 軸は Z 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られ、X 軸は Y 軸と Z 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。

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。(同定条件は小串他[2016]と同じだが、今回データを見直す事によってイベント数がより正確になった。)

条件 1: QZS の磁場データプロットの目視によって、明瞭に擾乱が起こっているイベントを同定した。

その結果 149 のイベントが同定された。

条件 2: QZS-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 QZS 位置の Z 成分: QZS 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 QZS-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 QZS 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

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

この条件 2 を適用した結果、45 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 33 の QZS-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 33 イベント中 1 例について以下紹介する（小串他[2016] と同じイベントをより詳しく解析）。図 2 は QZS の位置と衛星を通過する磁力線の形状（左図; Y 方向には 01:53 MLT に位置）、その磁力線の footpoint と MAGDAS 観測点 3 点の位置（右図）を示している。footpoint が KTN に非常に近く、地上磁場については KTN データを解析する。

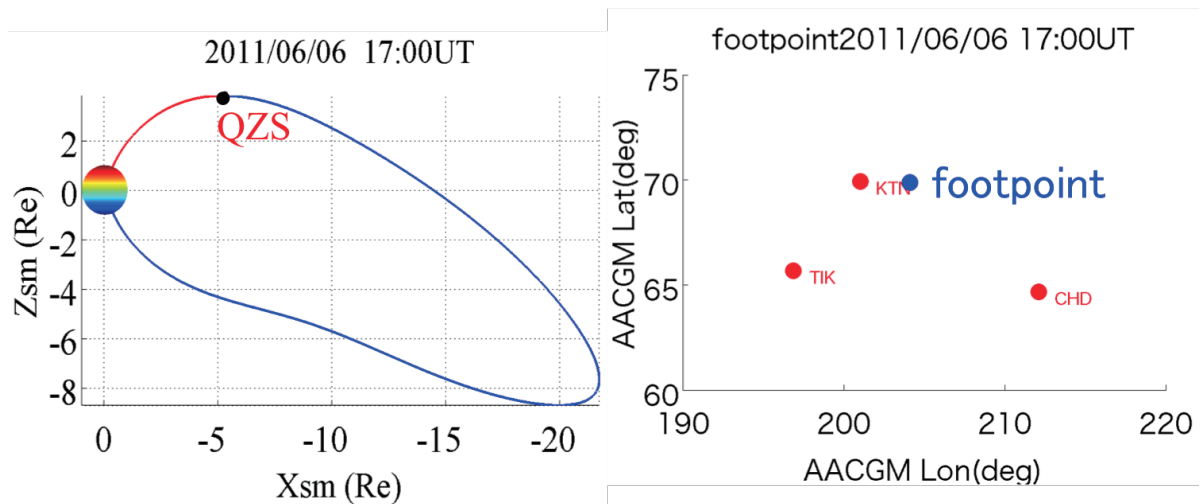


図 2. (左) QZS 位置と通過する磁力線 (右) QZS footpoint と MAGDAS 観測点の位置

以下、詳しい磁場解析を行っていく。まず QZS の磁場データを見る (図 3 左)。イベント時 (赤丸でマーク) において、X 成分 Z 成分に比べて Y 成分の変動量が圧倒的に大きく、negative step-like 変動 (対応部分に深緑矢印を上書き) を示していることが分かる。この変動は、東西方向に広がったシート状の FAC が QZS を高緯度向きに通過したとすれば説明できる (図 3 右)。初めは FAC が QZS よりも低緯度にあるので QZS に東向きの磁場を作るが、FAC が QZS を通過し高緯度に移動することで西向きの磁場を作ることになる。よって西向きの step 的な変動をしたと考えられる。

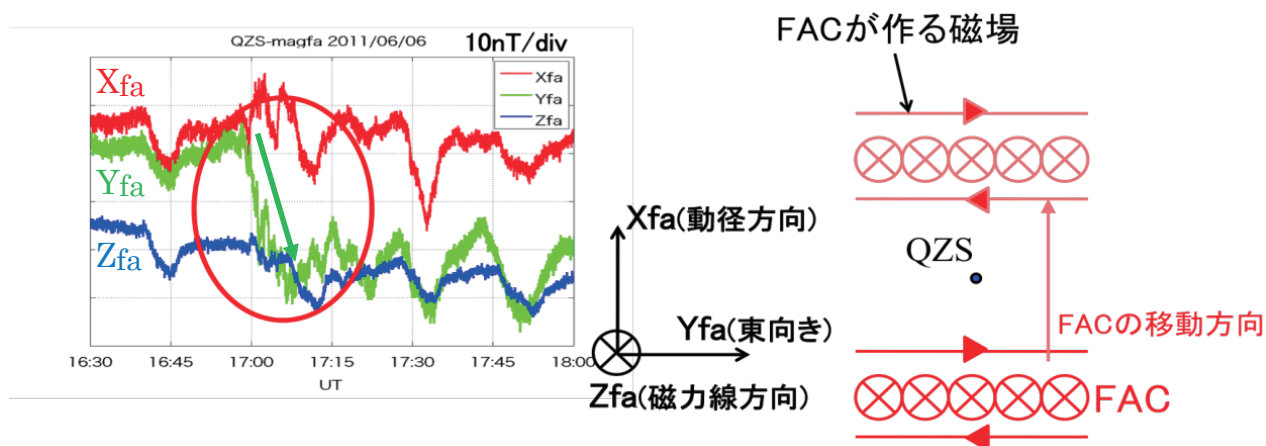


図 3. (左) QZS の磁場データ (右) その変動の解釈図

次に KTN 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 negative (南向き) single peak を示し (淡青矢印)、D 成分は negative (西向き) step-like 変動した (淡緑矢印)。(H 成分に重畳している長時間スケールの減少はサブストーム起源と理解できる。)

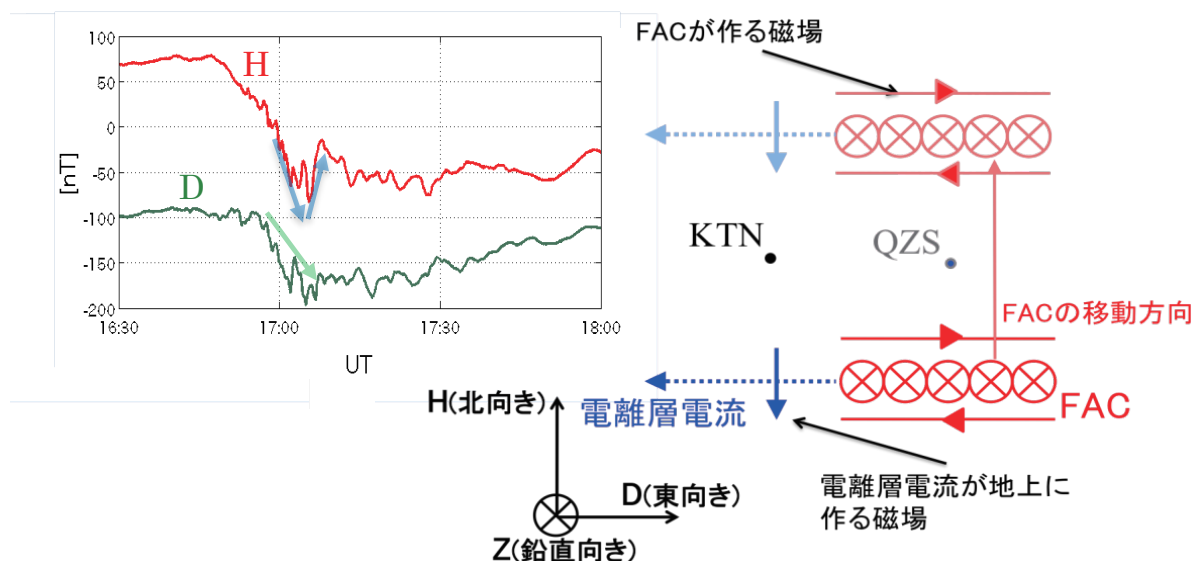


図 4. (左) KTN の磁場データ (時間範囲は図 3 左と同じ) (右) その変動の解釈図

D 成分の **step-like** 変動は、QZS の Y_{fa} 成分と同様、高緯度向きに移動するシート状 FAC が地上に作った磁場として理解できる (図 4 右・赤矢印)。また、電離層に流れこんだ FAC は図 4 右・青破線矢印で示した電離層電流に繋がる (Region-1 センスの **closure**) と考えると、この電離層電流が地上に作る南向き磁場 (図 4 右・青実線矢印) は電流直下で最大となるので、観測された H 成分の **negative single peak** を説明できる。

2-3. 初期統計解析

同定された 33 イベントについて現在統計解析中であり、以下、その初期結果について報告する。

2-3-1. FAC の極性の分布

ここではまず「FAC の流れる磁力線は高緯度向きに動く」と仮定し、FAC の極性 (地球向きか尾部向きか) は「FAC の作る磁場変動の東向き成分が時間とともに減少するか増加するか」で推定した。その推定は QZS 観測磁場から行う事もシベリア MAGDAS 観測磁場から行う事も出来るので、それら複数の推定結果が同じになる例を選ぶと 20 例存在した。その 20 例について、その FAC 極性を QZS 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 左の横軸縦軸は、SM 座標系における QZS 位置の Y 座標、X 座標である。図 5 右の横軸は SM 座標系で計算した地方時 MLT [hour]、縦軸は緯度 λ [deg] である。青色は地球向き FAC を、赤色は尾部向き FAC を意味し、それを観測した QZS 位置に青点または赤点で記している。

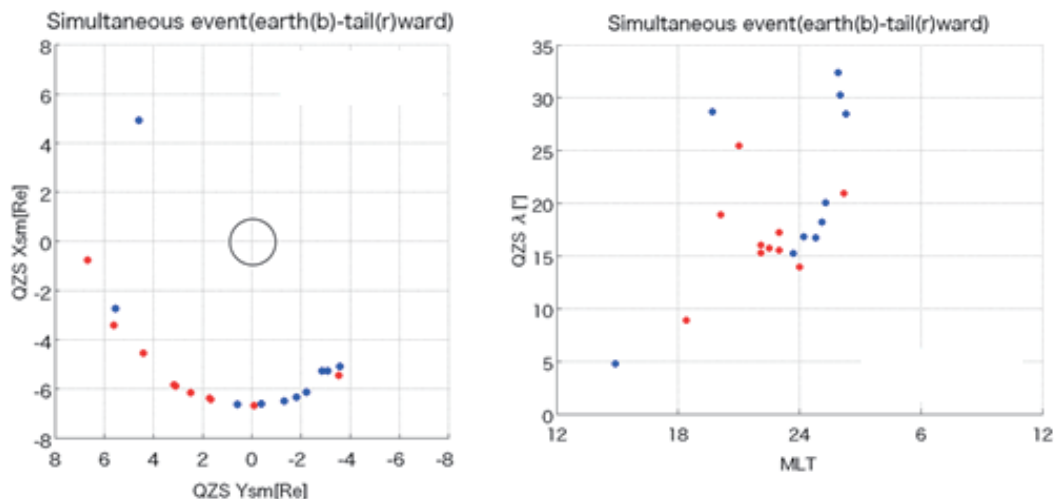


図 5. FAC の空間分布と極性

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。これは静止軌道で観測される **current wedge FACs** の極性と同様であるが、図 5 右に示されてい

るように、FAC を観測したときの QZS の緯度 λ は 15° 以上のものが大半で、静止軌道 ($\lambda \sim 0$) よりずっと高緯度での観測となる。このことより、観測された FAC は NENL (Near-Earth Neutral Line) に発し PSBL (Plasma Sheet Boundary Layer) に沿って流れるものである可能性が考えられる。2.2 節の事例解析において QZS を通る磁力線の最遠点が地球から $\sim 20R_E$ であった事 (図 2 左) はこの解釈と consistent である。

2-3-2. FAC の流れる磁力線の動く向きの分布

同定された FAC イベント 33 例のうち、シベリア MAGDAS の複数地上観測点で観測されたものについて、観測点の位置関係と観測時間差から FAC の移動する向きを推定する事が出来る。それを行った結果が図 6 である。

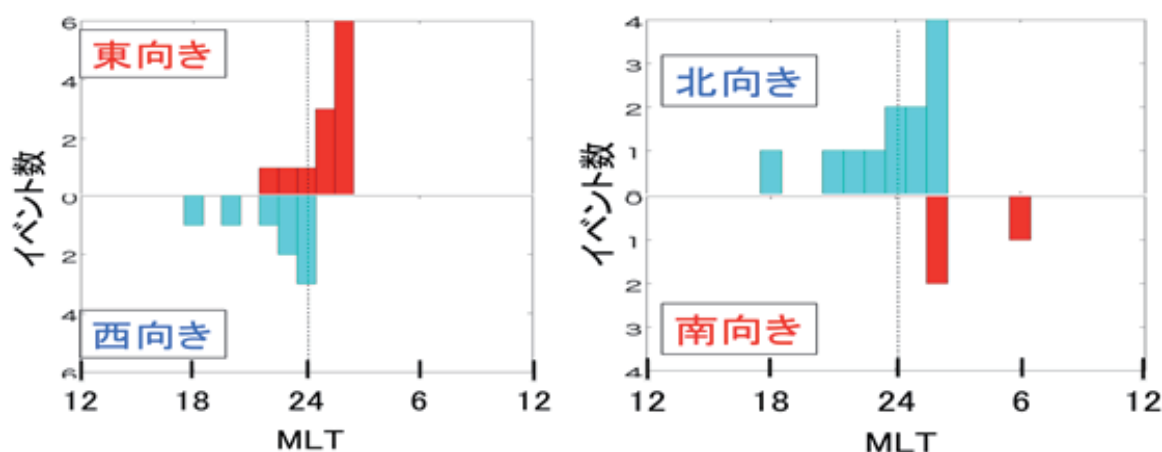


図 6. FAC の移動方向

図 6 右は南北方向の動きを示しており、大半が北向き (= 高緯度向き) に動いている。この高緯度向き運動は、プラズマシートの厚さがサブストーム爆発層において増大する事に対応していると解釈でき、上記の FAC 極性の解釈と consistent である。

図 6 左は東西方向の動きを示しており、真夜中 (24hr MLT) から離れていく傾向がある事を示している。上記解釈の流れで解釈すると、NENL (その東端から地球向き FAC が流れ出し、その西端に尾部向き FAC が流れ込む) が時間と共に東西両方向に広がっていく、として解釈可能である。

3. まとめ

基準を設け、1 年分のデータ中から QZS—シベリア MAGDAS 同一磁力線上同時観測イベントの同定を行った。その中の 1 例の上記事例解析において、FAC と電離層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、サブストーム爆発相中の NENL を起源とする FAC が観測されている可能性を示唆した。

今後は、5 年分のデータを解析してイベント数を増やし、統計的な解析をさらに進めていく。その中で、上記事例解析にて行ったような FAC-電離層電流系の性質の解析も統計的に行う。また、FAC のタイプ分けを行い、それぞれについて空間分布、電流強度、磁気活動度依存性、地上同時観測磁場の性質、等を調べる。

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、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-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)