

QZS と MAGDAS 地上磁力計を用いた同一沿磁力線電流の解析

小串修¹、河野英昭^{2,1}、東尾奈々³、松本晴久³、A. V. Moiseev⁴、D. G. Baishev⁴、
魚住禎司²、阿部修司²、湯元清文^{2,1}、吉川顕正^{2,1}

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

沿磁力線電流 (FAC; Field-Aligned Current) は磁気圏と電離圏を繋ぐ電流で、磁気圏の構造やサブストームなどの現象を理解するにあたってこの FAC の観測は非常に重要である。これまでも静止軌道衛星観測、極軌道衛星観測、地上観測など様々な観測が行われてきているが、同一の磁力線上を流れる FAC を衛星と地上観測で長時間同時に観測した報告例は少ない。そこで本研究では、JAXA が運用する準天頂衛星 (QZS; Quasi-Zenith Satellite) と九州大学の国際宇宙天気科学・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である MAGDAS (MAGnetic Data Acquisition System) の観測データを用いることで同一沿磁力線電流の解析を行う。

QZS は測位システムを補完する目的で打ち上げられた衛星である。静止衛星の軌道から傾斜角 40° と離心率 0.1° を持っている。その独特な角度から同じ子午面 (日本) の高緯度領域に長時間滞在するので、日本上空から物の影に隠れることなく信号を送ることができ、測位システムの補完を行うことができる。QZS は磁力計も搭載している。また、MAGDAS は現在世界 72 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。

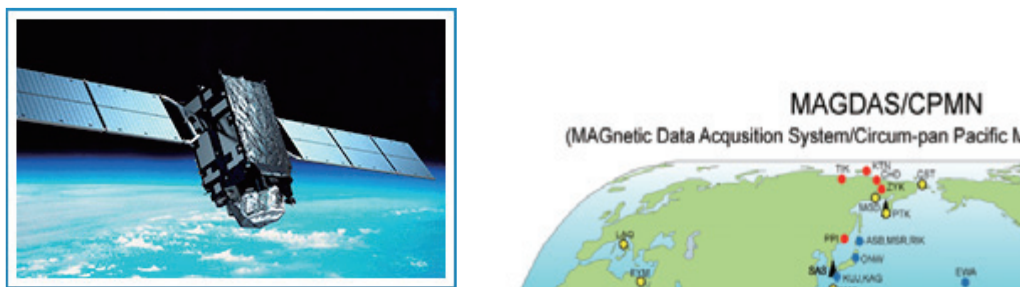


図 1 QZS と MAGDAS 観測点の一部

本研究で QZS と MAGDAS の同時観測磁場データを解析する理由は、高緯度の同一磁力線上を伝わる現象を同時観測できる時間長さをこれまでになく長い値にできるからである。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 footpoint は大きく移動することなくシベリアの MAGDAS 付近にあり続けるので、長時間にわたり磁力線を伝わっていく現象を同時観測できる。また、静止軌道に対し大きい傾斜角を持っているので、磁気圏内高緯度領域に長時間滞在することになる。この領域での観測はあまり行われていないことも魅力である。

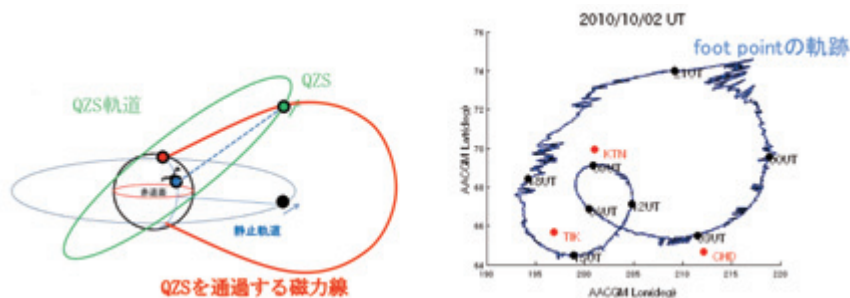


図 2 (左) QZS を通過する磁力線 (右) footpoint と MAGDAS 観測点の位置関係

本研究では 2010/10/1~2011/9/30 の一年間分のデータを用いた解析を行う。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 座標系は Z 軸を衛星の位置での主磁場 (Tsyganenko2002 モデルで計算) と平行の方向に、Y 軸を Z 軸と地球中心と衛星中心を結ぶ r 軸との外積方向に、X 軸を Y 軸と Z 軸との外積でとる。また衛星を通過する磁力線や footpoint などの計算は、全て、グローバル経験磁場モデルである Tsyganenko2002 モデルを用いて行った。

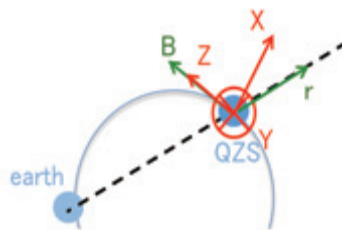


図 3 FA 座標系の 3 成分

2. データ解析・議論

2-1. 統計解析の途中報告

以下の条件を定めて期間中 (2010/10/1~2011/9/30) のイベント選定を行った。

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選定した。

その結果 149 のイベントが選定された。

条件 2: QZS と MAGDAS が同一磁力線上同時観測できるように、下記の 2-1 と 2-2 の条件を両方とも満たすイベントを選定した：

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 の footpoint と MAGDAS 観測点の間の距離で、

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

この条件 2 を適用した結果、イベント数が 59 個に絞られた。

条件 3 : MAGDAS でも擾乱が同時観測されているか、目視により確認した。

その結果 29 のイベントが選定された。

選定したイベントについての QZS の空間分布は図 4 のようになった。右図より、QZS 位置が低緯度でも高緯度でもイベントが観測されていることが分かる（但し、 $Z_{sm} < 1R_e$ では観測されていない）。また、左図より、昼間側ではイベントが観測されていないことが見て取れる。この考えられる理由としては以下の 2 つが考えられる。

1. QZS の軌道では昼間側の FAC を捉えることが難しい事が考えられる。昼間側では磁気圏は太陽風に押し潰され、プラズマシート（FAC が流れやすい）も地球近くでは夜側よりも高緯度になるため、QZS の軌道より高緯度に位置しているのではないか。
2. QZS 磁場データ中の衛星ヒーター起源ノイズは昼間側で乗りやすい傾向が見られた。これは、QZS の姿勢制御と QZS 上のヒーター位置との関係から昼間側で機体のヒーターが ON になることが多い為である可能性がある。この衛星ヒーター起源ノイズのためイベントの選定ができなかったのではないか。

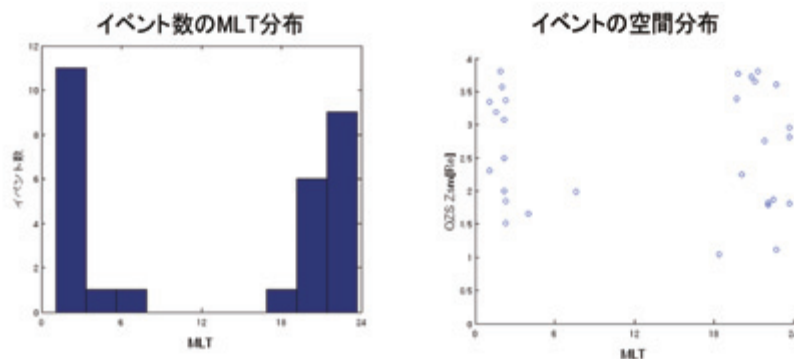


図 4 イベントの分布

2-2. ケーススタディ

今回は選定を行ったイベントの中で QZS が比較的に高緯度にいた 2011/6/6 17:00UT 頃のケーススタディを行った。図 5 は QZS の位置と衛星を通過する磁力線の形状 (左図)、その磁力線の footpoint と MAGDAS 観測点 3 点の位置関係 (右図) を示している。footpoint が KTN に非常に近く、KTN を中心に解析を行う。

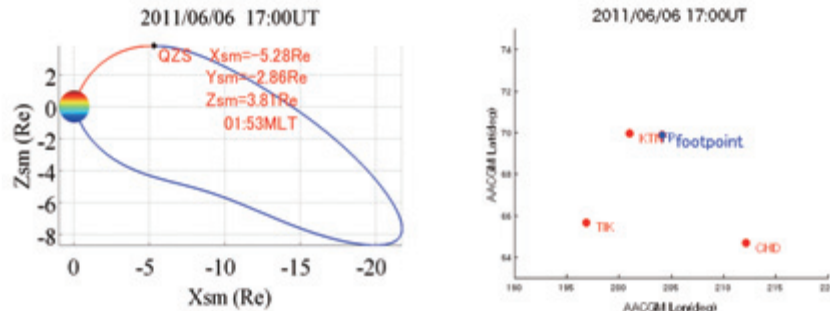


図 5 (左) QZS の位置と通過する磁力線 (右) footpoint と観測点の位置関係

図 6 は変動が見られる時間帯である 16:00~18:00UT での QZS と MAGDAS のデータを示している。上から 4 つのパネルは QZS での観測磁場 (FA 座標における 3 成分(X,Y,Z)と全磁場)、次のパネルは QZS 帯電電位データ (POM データ) に -1 を掛けたもの。次の 3 つのパネルは KTN での観測磁場 (H,D,Z の 3 成分)、次の 2 つのパネルは MAGDAS 観測点と footpoint の距離を経度方向と緯度方向から示しており、最後のパネルは AL 指数の値を示したものである。

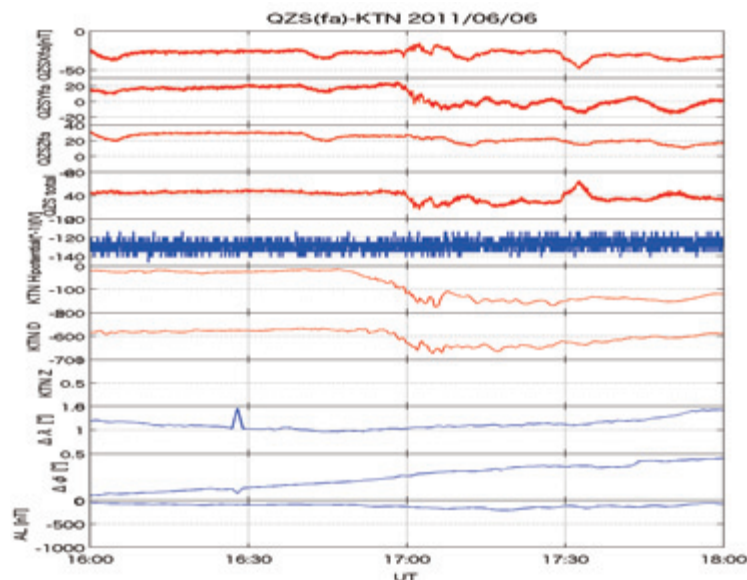


図 6 QZS データ、MAGDAS/KTN データ、関連データ、の同時プロット

イベント時において QZS footpoint は経度・緯度方向に大きく移動していないことから本イベントは同時観測の条件を満たしていると考えられる。

以下、詳しい磁場解析を行っていく。図 7 に QZS と MAGDAS のデータを示す。QZS の磁場

データを見ると X 成分と Z 成分はほとんど変動していないにもかかわらず Y 成分のみが step 的な変動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 を高緯度方向に通過することによって説明することができる (図 8 左)。また、KTN のデータに注目するとイベント時において H 成分、D 成分共に negative に変動している様子が見られる。これは電離層に FAC が流れ込み、FAC が高緯度に移動したと考えると D 成分の変動の説明がつく (図 8 左、赤矢印参照)。また、流れこんだ FAC は図 8 左の青矢印のような電離層電流に繋がる (Region-1 closure のイメージ)、と考えると、H 成分が negative な変動を示したことの説明もできる。図 8 右は以上の説明を整理・図示したものである。

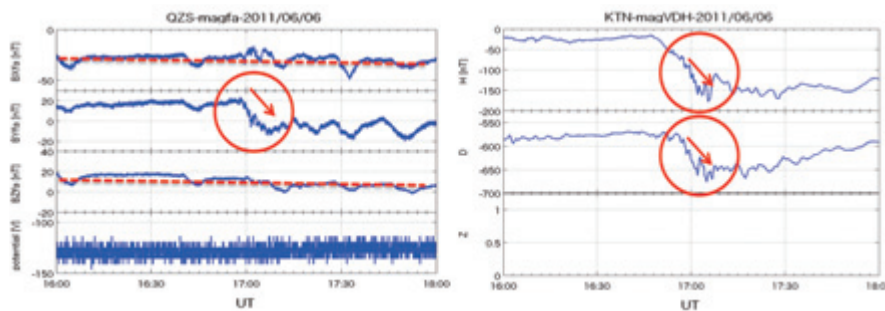


図 7 QZS (左)と MAGDAS/KTN (右)の時系列データプロット

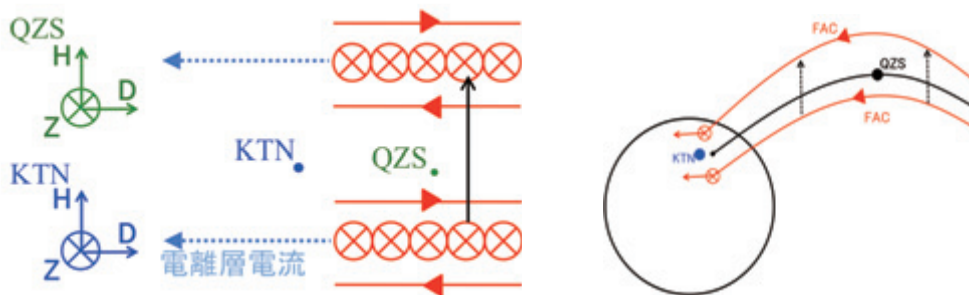


図 8 磁場変動の解釈図

図 8 右、及び図 5 左の QZS を通過するモデル磁力線の形状から、地球から 20Re 程離れた位置の NENL (Near-Earth Neutral Line) に発し、プラズマシート境界層 (PSBL: Plasma Sheet Boundary Layer) を流れる FAC が観測されたのではないかと考えられる。図 9 左でイベント前の IMF Bz を見ると短い時間だが負の値であった。この際に磁気圏内にエネルギーが流入し、NENL を形成したと考えられる。また、図 9 右よりイベント時に小規模 (AE=250nT) のサブストームが発生していたことがわかる。それに伴いプラズマシートが膨らみ FAC も高緯度方向に移動したと考えられる。

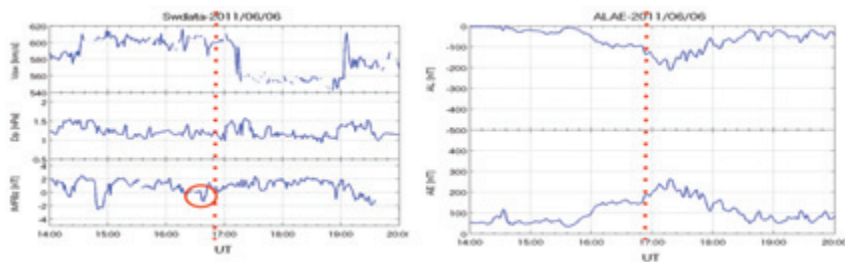


図 9 イベント時における太陽風データ(左)と AL・AE 指数(右)

3. まとめ

選定基準を設け、イベントのリストアップを行った。また、リストアップしたイベントから QZS – MAGDAS の組み合わせによってのみ観測しうるイベントの一例として、シート状の downward FAC が高緯度方向に移動する様子を QZS が高緯度（磁気緯度 31.9° ）にいるときに QZS – MAGDAS 同一磁力線上同時観測した例を紹介した。

今後は統計的な解析を進めていく。FAC のタイプ分けを行い、それぞれについての空間分布や電流強度、磁気活動度依存性などを調べ、また地上同時磁場観測の性質を調べたい。また、今回は QZS と MAGDAS のデータを用いて解析を行ってきたが、ETS-VIII（静止衛星：東経 146° ）など他の観測データも参照することでより詳細な解析も行いたい。