

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

竹内勇人¹、河野英昭^{2,1}、東尾奈々³、松本晴久³、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 研究開発本部 宇宙環境グループ
- 4: Yu.G.Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

1. はじめに

沿磁力線電流 (FAC : Field-Aligned Current) については、極軌道衛星[1], [2]、高高度楕円軌道衛星[3], [4]、地上観測[5], [6]、等での観測例が数多く報告されている。しかし、同じ沿磁力線電流を人工衛星と地上とで同時観測した報告例は少ない。それは、人工衛星は地上観測点上を短時間で通過してしまう場合が大半である為である。本研究の準天頂衛星 QZS (Quasi-Zenith Satellite) [7] -MAGDAS [8] 地上同時観測は、下記の通り、この同時観測確率を高めるものである。QZS (図 1) は JAXA が運用している人工衛星で 2010 年に打ち上げられた。MAGDAS は九州大学国際宇宙天気科学・教育センターが中心となって運用している地磁気ネットワークで、図 2 に示すように現在 72 観測点を運営している (図 2 中のアルファベット 3 文字は各観測点の略称を意味する)。

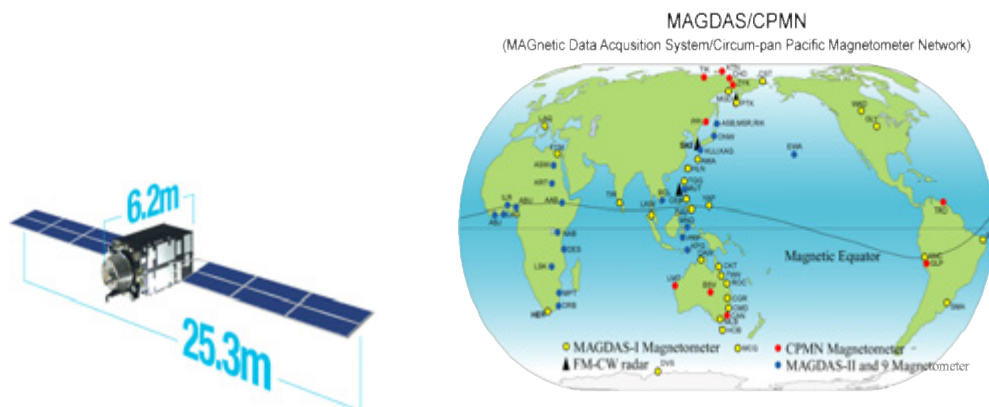


図 1

図 2

本研究では、静止衛星や極軌道衛星にない 2 つの性質を生かして FAC の観測を行った。1 つ目の性質は、QZS (遠地点高度 : 6.1Re、近地点高度 : 5.1Re) は静止衛星 (高度 : 5.6Re)

と異なり赤道面から 41° の軌道傾斜角を持っているため高緯度上空を通ることである。図 3 は、Tanaka (personal communication, 2009) によるサブストーム発生時の磁気圏 MHD シミュレーション結果である。Panels (1) ~ (3) は、サブストーム中のプラズマ速度の磁力線垂直成分の時間変化を、(4) ~ (6) は、サブストーム中のプラズマ速度の沿磁力線成分 (赤 : tailward flow、青 : sunward flow) の時間変化を表している。この図は、サブストームが発生すると磁気圏尾部プラズマシートで地球向きの沿磁力線プラズマ流が強まる事を示している。Panel (5) の時、静止衛星ではそのプラズマ流を観測することができないが、QZS ならばこの時刻に夜側高緯度上空にいれば観測できる (Panel (5) 中の茶色の丸)。そして、そのプラズマ流増加と同時に FAC も強まると考えられ、QZS はその静止軌道高度高緯度プラズマシート FAC を観測することができると考えられる。

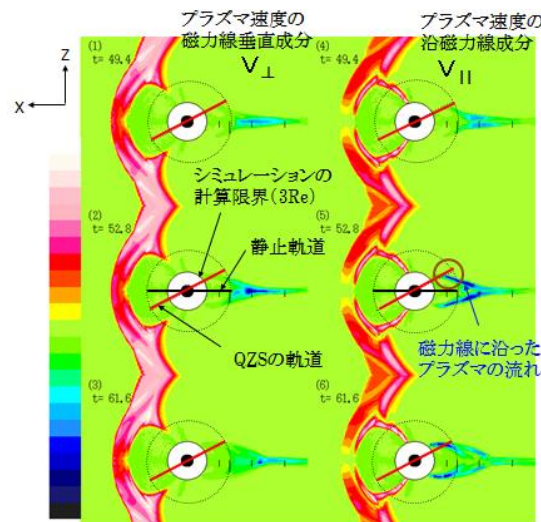


図 3

2つ目の性質は、QZS は日本の子午面近傍に長時間滞在することである。図 4 に、1日分の QZS の footpoint (地理座標系、磁気座標系) を示す。図 4 左図 (地理座標系表示) の赤線は、QZS を通る磁力線の北半球と南半球における footpoint (3 時間毎に 1 点描画) を示しており、青線は、QZS の位置を動経方向に地球表面に投影した点を示している。この図の青線を見ると分かるように、QZS は日本の子午面 (135° 付近) 近傍に長時間滞在するために QZS が通る磁力線の footpoint も赤線のように固まることができる。これにより QZS と MAGDAS 地上観測点が同一磁力線上にいる時間が長くなることから、FAC を同時観測できる時間も長くなる。一方、図 4 右上図は図 4 左図の黒破線長方形部分を、地理座標系から磁気座標系にして拡大したものである。本研究では、footpoint が近いか遠いかについて磁気座標で考える。それは、FAC のような磁気現象を見る際には地理座標よりも磁気座標の方が正確に比較することができるからである。図 4 右上図によると QZS の footpoint (赤線) の近くに 3 つの MAGDAS 地上観測点があることが分かる。

本研究においては、JAXA から QZS の軌道データ 1 年分 (2010 年 10 月 1 日~2011 年 9 月 30 日) を頂いている。その期間中のデータについて今後統計解析を行う予定であるが、

それに先立つ第一段階のイベントスタディとして、3観測点中 data gap が最も少ない CHD (Chokurdakh) を用い、QZS と CHD の位置から、QZS と CHD が FAC を同時観測している可能性がある日を7日分選定し、その磁場データを頂き、それについて QZS-CHD のデータ比較を行った。今回は、その中で、FAC を実際に同時観測したと考えられるイベント1例について報告する。

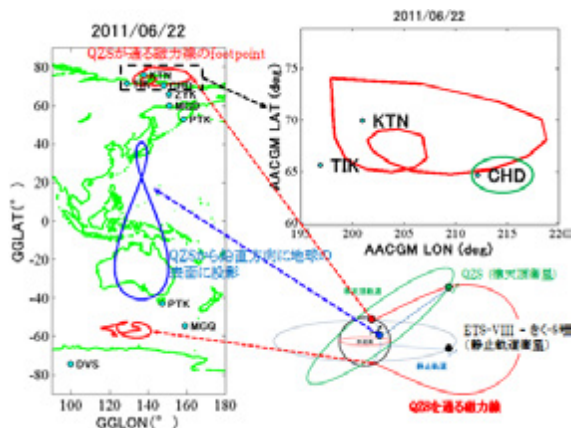


図4

2. イベントスタディ

図5に、イベント日に起こったサブストーム中 (15:30UT~18:30UT) における QZS と CHD の磁場変動と AL を示す。AL はサブストーム活動度を示す指標であり、下がり始めがサブストームの開始、最低値まで下がる期間が拡大相 (expansion phase)、その後元の値に向けて上がっていく期間が回復相 (recovery phase) である。図中、サブストーム拡大相期間 (15:45UT~17:30UT) 中に、QZS と CHD に transient な磁場変動が見られる期間 (17:05UT~17:25UT; 図中赤四角) がある。これを QZS-CHD 同時観測イベント期間とし、以下、この期間に FAC がどの位置をどのように流れていけばこの同時観測データを説明できるか考える。

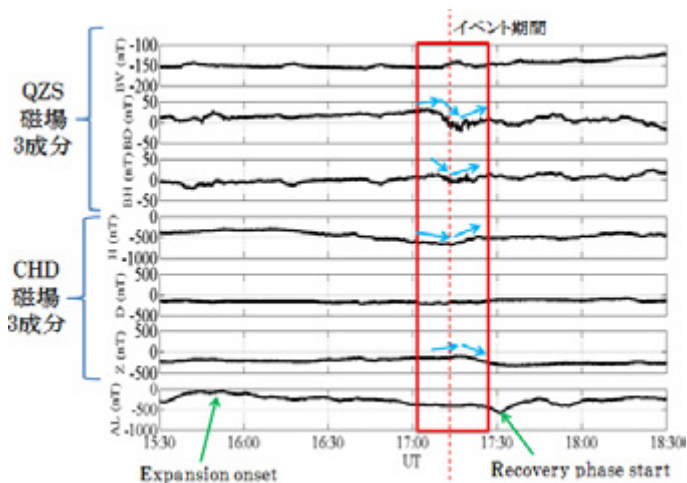


図5

まず、QZS が磁気圏内のどの領域を流れる FAC を観測したかを考える材料として、QZS

の位置 (QZS がイベント時に図 6 中のどこにいたか) について考える。図 7 は、イベント日における QZS の軌道 (3 時間毎に 1 点プロット) 及び QZS を通る磁力線を示している。各プロット図はそれぞれ、+Z 方向 (左上図)、+Y 方向 (左下図)、+X 方向 (右下図) から見たものであるが、この中で左下図に注目してほしい。Zsm 座標軸は磁北極、磁南極を通るが、この図から QZS はイベント時 (17:00UT 近く) には夜側高緯度上空に位置していたことが分かる。しかし、この図からは QZS が位置する磁気圏内領域 (プラズマシート (PS)、プラズマシート境界層 (PSBL)、ローブ (lobe)、等) は分からないため、QZS がどのあたりの FAC を観測しているのかが不明である。

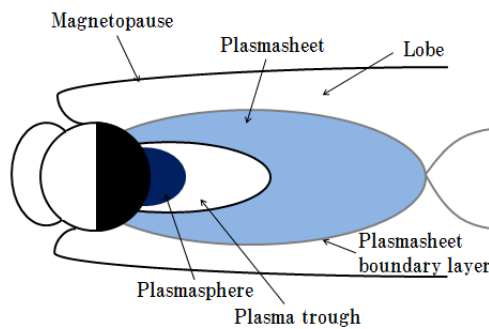


図 6

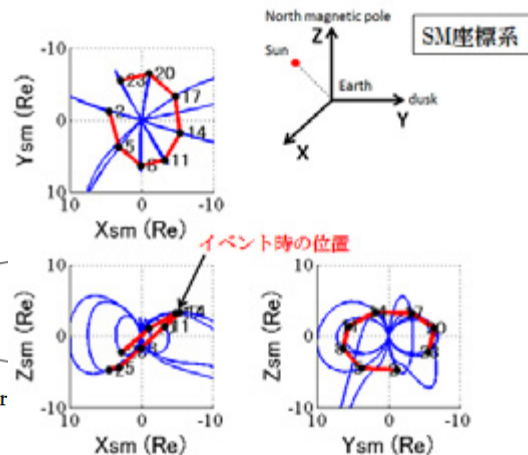


図 7

磁気圏領域の判定の為に、QZS の位置における衛星帯電電位、磁場強度のデータが有用である。衛星帯電電位は正で、衛星周辺のプラズマ密度が高いほど小さい傾向がある。よって、衛星が lobe から PS に移動する場合には急減すると期待される。一方、磁場強度も、lobe の方が PS よりずっと大きい (lobe-PS 圧力バランスのため) ので、衛星が lobe から PS に移動する場合には磁場強度も急減すると期待される。

図 8 ではそれを調べている。上から順に、POM (帯電電位モニタ) の PEN フィルムから得られた電位値に-1 をかけた値、QZS 位置座標 3 成分、磁場強度、の panels である。帯電電位に-1 をかけているのは、プラズマ密度と電位に正の相関を持たせ、プラズマ密度の大小を見やすくするためである。

QZS 位置が磁気赤道面に近くて (Panel 4) 磁場強度が小さい (Panel 5) 期間に、POM 帯電電位 (Panel 1) は小さい値となる傾向がある。これより、期待通り、帯電電位が QZS 周辺のプラズマ密度と相関していると考えられる。

一方、QZS が PSBL を通過したと解釈できる期間は、帯電電位 (Panel 1) でも 磁場強度 (Panel 5) でも明瞭に同定されていない。これより、このイベントでは、QZS は全期間 PS~PSBL 内にいた、と推測される。

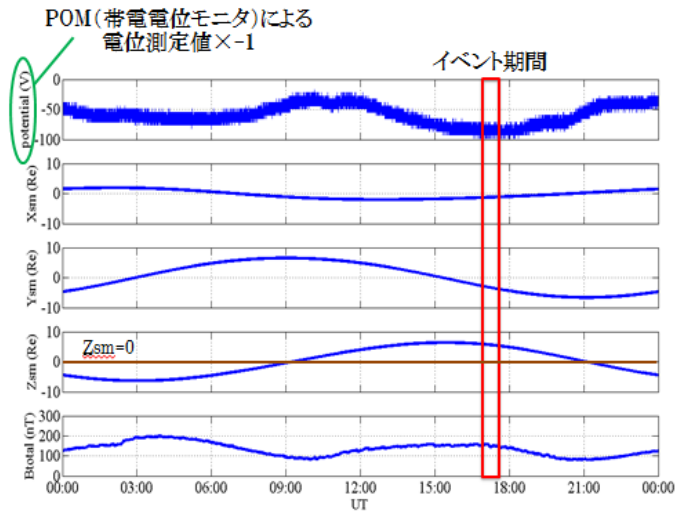


図 8

次に、QZS と CHD で観測された磁場変動から FAC の位置と動きを推定する。まず、QZS と FAC の位置関係について考え、次に、CHD と FAC の位置関係について考える。最初に QZS と FAC の位置関係についてであるが、イベント時刻における QZS の磁場 D , H 成分を図 10 に示す。この図から分かるように、 BD のピークは 17:05UT と 17:18UT (青線)、 BH のピーク (緑線) は 17:13UT にあり位相にずれがあることが分かる。この位相のずれの説明として、この磁場変動を作っている FAC は線状電流であると考え。

そして、話を簡略にするために、図 11 左図のように、FAC が流れている磁力線は V 方向に平行で、FAC は地球向きで、赤線で示すように QZS の西側を北向きに通過すると仮定する。図 11 中図は、上記の仮定下で期待される QZS 磁場観測値の変動を示したものである。FAC が遠くから QZS に近づいてくると FAC が作る磁場の影響を受けるために BD は増加するがある程度近づくと BD は減少し、FAC が QZS の真西にある時には 0 となる。その後離れていくときには近づくとときと逆のパターンになる。よって、 BD は図 11 中図の通りになる。 BH の図も同様の考察で得られる。これを観測磁場 (図 10) と比較すると同様のパターンの磁場変動が起こっているので、図 11 のモデルは観測と consistent である。

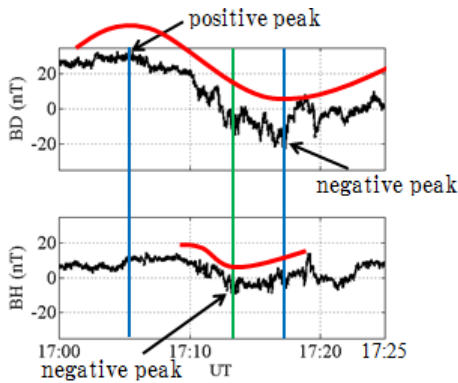


図 10

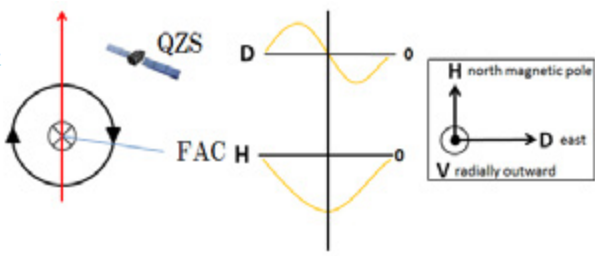


図 11

次に、CHD と FAC の位置関係について考える。図 12 に、イベント期間における CHD

の磁場 3 成分を示す。さらに、図 13 に、下向き FAC (QZS での FAC 地球向きに対応) が流れる磁力線が CHD の西側を北上する際に観測すると期待される H 成分と D 成分の磁場変動を示す。図 12 の H 成分変動パターンはと図 13 と一致しており、図 13 のモデルの妥当性を支持するが、一方、図 12 の D 成分は顕著な変動を示していない。これは、FAC が CHD の遠くを流れていたために振幅が小さかった、として解釈できるかも知れないが、今後の検討課題である。

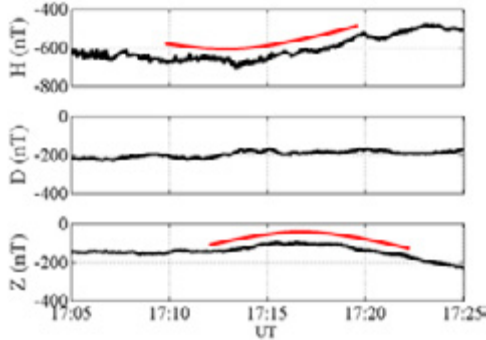


図 12

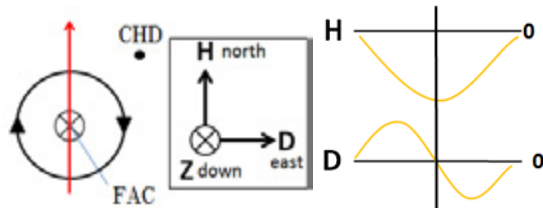


図 13

一方地上においては Z 成分 (鉛直下向き正) の変動も顕著である。この説明として、FAC が地表に対し斜めに流れる (磁力線が斜めである為) 事の効果と考えられる。これにより、Z 成分の変動からも FAC の位置関係を推定することができる。図 14 左図は、FAC が斜めから流れこむイメージ図であり、図 14 中図は図 14 左図を上から見た図である。図 14 中図から、FAC が北上するとき、FAC が作る磁場の Z 成分は FAC より西側では負、東側では正、となることが分かる。これと実際の観測磁場 Z 成分変動 (図 12 下図) を比較すると、FAC は CHD の西側を通ったと示唆され、これは CHD H 成分変動からの示唆 (図 13) と一致する。

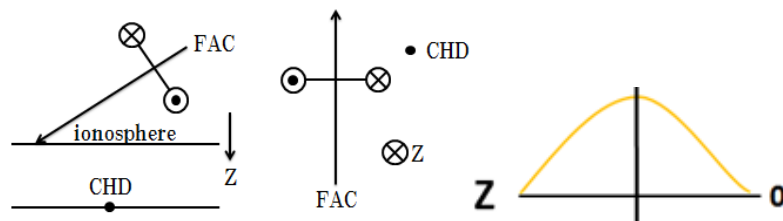


図 14

以上、QZS と FAC、CHD と FAC のそれぞれの位置関係をまとめると、FAC の位置と動きは図 15 の黒矢印の通りになる。図 15 左図において、赤線は FAC が流れる磁力線、緑線は QZS を通る磁力線を表している。また、図 15 右図は、図 15 左図に対応する電離層平面上での図であり、赤線は QZS を通る磁力線の footpoint で、イベント時刻 (17:15UT) における footpoint 位置を黒点で示している。

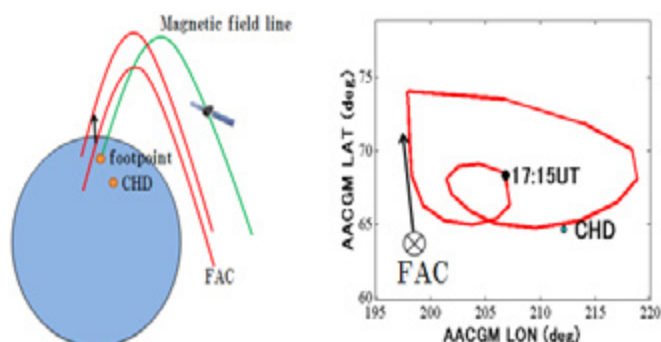


図 15

3. まとめと今後の課題

イベントスタディの結果から、線状の FAC が QZS と CHD の同一磁力線の西側を図 15 の黒矢印のように北向きに動いていると考えれば、このイベントにおける QZS と CHD の同時観測磁場データを説明できるといえる。この線状 FAC は、サブストーム中に PSBL で発生しその後 PSBL の北上に伴って北に移動したと説明できる可能性がある。

今後は以上のイベントスタディの結果（PSBL FAC）が一般的なものか否かを、QZS-MAGDAS 同時観測例の統計解析によって調べる必要がある。また、より精度よく FAC の空間分布を推定するために、使用する MAGDAS 観測点を増やしていく必要がある。

また、QZS-MAGDAS 同時観測からは current wedge の FAC も観測されると期待されるので、PSBL FAC との観測比率やそれぞれの空間分布、磁気活動度依存性を統計解析で調べる事も有意義である。

また、低エネルギー電子観測装置（ELS-A）（エネルギー範囲 4keV~1.95MeV）のデータからの FAC 強度の推測（外挿 model fitting）を試み、磁場変動強度との比較を行う事も有意義である。

参考文献

- [1] Zmuda, A. J., J. H. Martin, and F. T. Heuring (1966), Transverse magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral region, *J. Geophys. Res.*, 71(21), 5033–5045, doi:10.1029/JZ071i021p05033.
- [2] Iijima, T., and T. A. Potemra (1978), Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms, *J. Geophys. Res.*, 83(A2), 599–615, doi:10.1029/JA083iA02p00599.
- [3] Ohtani, S., S. Kokubun, R. C. Elphic, and C. T. Russell (1988), Field-aligned current signatures in the near-tail region: 1. ISEE observations in the plasma sheet boundary layer, *J. Geophys. Res.*, 93(A9), 9709–9720, doi:10.1029/JA093iA09p09709.
- [4] Ueno, G., S. Ohtani, Y. Saito, and T. Mukai (2002), Field-aligned currents in the

outermost plasma sheet boundary layer with Geotail observation, *J. Geophys. Res.*, 107(A11), 1399, doi:10.1029/2002JA009367.

[5] Kamide, Y., A. D. Richmond, and S. Matsushita (1981), Estimation of ionospheric electric fields, ionospheric currents, and field-aligned currents from ground magnetic records, *J. Geophys. Res.*, 86(A2), 801–813, doi:10.1029/JA086iA02p00801.

[6] Lester, M., H. J. Singer, D. P. Smits, and W. J. Hughes (1989), Pi 2 pulsations and the substorm current wedge: Low-latitude polarization, *J. Geophys. Res.*, 94(A12), 17133–17141, doi:10.1029/JA094iA12p17133.

[7] Furuhata, S., Matsumoto, H. and Obara, T. (2012), Overview of Initial Observation Data of Technical Data Acquisition Equipments on the First Quasi-Zenith Satellite. *Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence, Aerospace Technology Japan*, 10.

[8] Kiyohumi Yumoto and the MAGDAS group (2007), Space weather activities at SERC for IHY: MAGDAS. *Bull. Astr. Soc. India*, 35, 511-522.