

令和元年6月18日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26400478

研究課題名(和文) 地磁気擾乱時における電離圏電場分布の変動と電離圏擾乱ダイナモとの関係

研究課題名(英文) Temporal and spatial variations of ionospheric electric fields during geomagnetic storms and the relation to ionospheric disturbance dynamo

研究代表者

新堀 淳樹 (Shinbori, Atsuki)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教

研究者番号：30555678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽表面現象(太陽フレアなど)や太陽風構造の急変に伴う太陽風擾乱が引き起こす磁気嵐は、磁気圏から電離圏に至る広範な領域の電磁場やプラズマ環境を激変させる。本研究では、磁気嵐に伴うグローバルな電離圏変動の原因となる電離圏電場の空間分布と電子密度の時間・空間変動を明らかにするために、太陽風、地磁気、および全電子数(TEC)データの解析を行った。その結果、磁気嵐主相時には、極域電離圏では2セル型の対流が発達し、極域電場が磁気赤道に侵入を示唆する赤道ジェット電流の増大が見られた。それに伴って午後側の中緯度電離圏の電子密度が増加し、磁気嵐の発達とともにその増加領域が低緯度側へ伝搬することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気嵐に伴って午後側の中緯度電離圏で電子密度が増加し始め、それが低緯度へ拡大していく様相を示した本研究の結果は、これまでこの電子密度増加の起源が赤道電離圏にあると考えられていた過去の研究の概念では説明することはできず、磁気嵐に伴う中緯度電離圏変動について新しい知見を与えるものである。また、この中緯度に形成される電離圏電子密度増加域は非常に狭い構造を持ち、その境界付近で電子密度が急激に変化する。このような変化は衛星測位誤差を大きくさせる要因であり、本研究で得られた成果は、そのような電離圏電子密度擾乱の発生予測と予報への応用研究につながるという社会的意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：Geomagnetic storms caused by solar wind disturbances related to a solar surface phenomenon (solar flare) and a sudden change in the solar wind structure lead to a severe change in the electromagnetic and plasma environment in a wide region from the magnetosphere to ionosphere. In this study, we analyzed solar wind, geomagnetic field and global total electron content (TEC) data to clarify the temporal and spatial variations of ionospheric electric fields and electron density associated with geomagnetic storms. As a result, a two-cell ionospheric convection is enhanced significantly in the polar regions and the polar electric field penetrates to the equatorial ionosphere during the main phase of the geomagnetic storms. Associated with the instantaneous distribution of storm-time electric field, the electron density enhancement begins in the midlatitude ionosphere and propagates to the low-latitude ionosphere as the geomagnetic storms develop.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：磁気嵐 電離圏電場 地磁気変動 電離圏擾乱ダイナモ 遮蔽電場 太陽風 惑星間磁場

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁気圏と電離圏をつなぐ大規模な沿磁力線電流とそれに伴って形成・配位する大規模電場の空間分布は、太陽表面現象に伴うコロナ質量放出によって乱された太陽風と磁気圏との相互作用で発生する磁気嵐時において劇的に変化し、発達することが近年の地上・衛星観測及びグローバル磁気流体シミュレーションからわかってきた。しかしながら、磁気圏と電離圏が磁力線を介して電磁気学的に強く結合し、沿磁力線電流を伴って電離圏へ大規模な電場が伝送・配位する[Kikuchi and Araki, 1979; Kikuchi, 2005]といった非平衡複合系を形成しているため、磁気嵐を代表とする非定常な擾乱現象を、因果関係を含めて定量的に理解するに至っていない。また、複合系における電離圏は、磁気圏プラズマ対流の発達[e.g., Tanaka, 1995]だけでなく、それによる磁気圏プラズマの輸送に伴う環電流の発達や放射線帯粒子の消失・再形成過程といった磁気圏プラズマダイナミクスにも重要な役割を演じることが指摘されている[e.g., Ebihara, 2004; Shinbori et al., 2004, 2005; Nishimura et al., 2006]。

近年になって、オーロラ帯と磁気赤道域の地磁気観測データの綿密な解析から、磁気嵐の主相と回復相とは、赤道電離圏電場の極性が異なることがわかってきた[Kikuchi et al., 2008]。特に、磁気嵐回復相初期に赤道域で出現する西向き赤道ジェット電流は、磁気嵐時において内部磁気圏に形成された非対称環電流に繋がる領域 2 電流系がもたらす過遮蔽現象に伴うものであることがわかってきた[Tsuji et al., 2012]。しかしながら、サブオーロラ帯から中緯度、及び赤道域までを含めた全球に及ぶ地磁気多点観測データの詳細な解析がほとんどなされていないため、この過遮蔽現象に伴う地磁気変動の時間・空間的な発達と衰退の様相については定性的な理解の域を超えていない。

一方、極域電離圏へ流入した電磁エネルギーは、電離圏・熱圏に介在する荷電粒子と中性大気との相互作用によって熱圏大気を加熱し、その熱源を介して熱圏大気の風速分布が数時間といった有限の時間をかけて赤道域へ広がるのが電離圏と熱圏を結合させたシミュレーションから明らかにされている[e.g., Fejer et al., 1983; Sastri, 1988; Mayuyama et al., 2005]。そのグローバルに乱された熱圏風によって駆動される電離圏擾乱ダイナモ電場は、中・低緯度において通常の地磁気静穏日を作る電離圏電流とは逆向きの電流を数日にわたって駆動することがこれまでの地磁気観測等から明らかにされてきている [Le and Mazaudier, 2007; Zaka et al., 2009]。しかしながら、高時間分解能を持つ全球的な地上・衛星の同時観測データの不足と、多圏間相互作用の視点に立って熱圏・中間圏領域(70-120km)の中性大気の風速データを有機的に結合した解析、および解析が十分に行われていなかったため、磁気嵐に伴う熱圏・中間圏における中性大気の風速変動と地磁気変化の観測的実証が十分になされていない。それに加え、電離圏擾乱ダイナモによる赤道域の西向きジェット電流は、領域 2 電流系のもたらす過遮蔽電場の作る電流と同方向であるため、明確に両者を区別することができていない状況にある。

2. 研究の目的

本研究では、以下の事項について明らかにする。

(1) 磁気嵐時における全球地磁気変動に見られる電離圏電場分布の推定

高時間分解能を持つ全球地磁気観測データの解析を中心に行い、磁気嵐の主相と回復相における全球的な等価電流分布の特徴を調べ、領域 1 と 2 の沿磁力線電流の強弱に呼応して赤道域でのジェット電流の極性がどのような時間スケールで変化するかを見る。この結果と全球電離圏電気伝導度モデル値との統合解析を行い、全球に渡る電離圏電場分布の時間・空間発展の推定を行う。この電場分布が正しいかどうかを見るために、IS レーダーなどの電離圏電場の直接観測データを援用する。さらに、磁気嵐回復相において西向き赤道ジェット電流が出現している時間帯に、領域 2 の沿磁力線電流に伴う渦電流がサブオーロラ帯や中緯度で見られるかについて着目し、電離圏擾乱ダイナモが作り出す地磁気変動との違いを明確化する。

(2) 電離圏擾乱ダイナモの発達過程

地上磁場、電離圏レーダー、及び、熱圏下部・中間圏の風速データの統合解析から、太陽風-磁気圏相互作用で生じた電磁エネルギーがどのような時間スケールで全球的な電離圏擾乱ダイナモが時間・空間発展するのかを捉える。特に、その影響が及ぶ高度領域や継続時間について調べ、磁気嵐の規模に対する依存性があるかどうかを見る。最終的には、長期の観測データの解析を行い、電離圏擾乱ダイナモの季節や太陽活動依存性についても明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、磁気嵐時における全球的な電離圏電流と電離圏電場の時間・空間変動の特徴を捉えるために、太陽風、惑星間磁場、地磁気指数、および高緯度から磁気赤道に分布する地磁気観測点から得られる地磁気データの解析を行った。太陽風と惑星間磁場は NASA CDAWeb から公開されているものを用い、地磁気指数と地磁気データは京都大学地磁気センターから公開されているものを用いた。これらのデータ解析には、大学間連携プロジェクト「IUGONET」で開発された解析ツールを使用した。まず、磁気嵐時における地磁気変動成分を取り出すために、各月の 10 日地磁気静穏日の平均的な地磁気日変化成分を求め、磁気嵐時の地磁気データからその地磁気日変化成分を差し引いた。差し引きを行った地磁気東西・南北成分について地理座標から磁気座標へと座標変換を行い、2 次元電離層等価電流マップを作成した。次に、磁気嵐時における電離圏電場がもたらすグローバルな電離圏電子密度構造の時間・空間変化の特徴を調

べるために、全球測位衛星システム(GNSS)の受信機ネットワークから得られるデータを基に絶対値 TEC を算出した。そして、各月の 10 日地磁気静穏日の平均的 TEC 値との差分をその値で規格化した TEC 値(rTEC)について 5 分ごとの 2 次元 TEC マップを作成することで、磁気嵐の主相と回復相におけるグローバルな TEC の変動特性について解析を行った。

4. 研究成果

4.1 磁気嵐時のグローバルな電離層等価電流の空間分布の時間変動特性

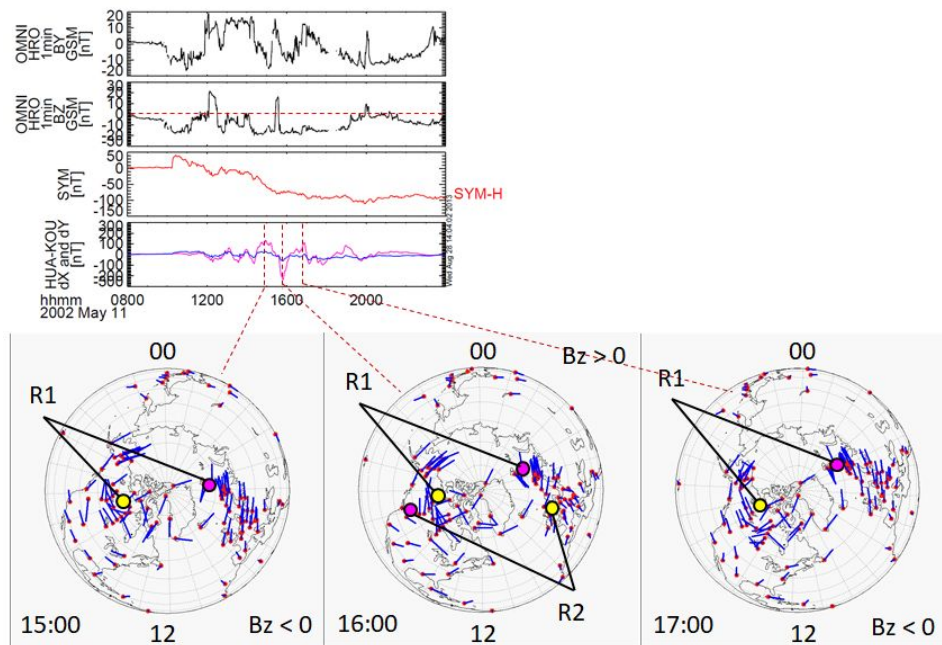


図 1：惑星間磁場変動に伴うグローバルな電離層等価電流マップ。上段の時系列プロットは惑星間磁場の東西と南北成分、地磁気指数、および磁気赤道域の南北(桃色)と東西(青色)成分の地磁気変動を表す。下段の 3 枚は電離層等価電流マップで、桃色と黄色の丸印は下向きと上向きの沿磁力線電流の付け根を示す。

図 1 は 2002 年 5 月 11 日に発生した磁気嵐に伴う全球電離層等価電流分布の変動と磁気赤道域の磁場変動を示す。上段の時系列プロットからこの磁気嵐の主相時に惑星間磁場の南北方向が何回か入れ替わっていることが見て取れるが、その入れ替わりのタイミングで磁気赤道域の南北成分の磁場が正から負へ変化している。これは極域電離圏から磁気赤道域へ持ち込まれた東西方向の電場が惑星間磁場の北転に伴って西向きへ瞬時に変化していることを意味している。さらに、この時の全球電離層等価電流分布はその前とは様相が一変し、磁気緯度 50 度から 55 度のサブオーロラ帯・中緯度域に領域 1 型の電流系が作る等価電流とは異なる電流系が出現している。この電離圏電流の分布から領域 2 型の電流系がサブオーロラ帯よりも低緯度において卓越していることを示している。再び、惑星間磁場が南向きになると同時に領域 1 型の電流系が作る磁場変動が卓越するようになる。今回の解析から、惑星間磁場の方向の変化に伴って瞬時に卓越するグローバルな電流系が短時間のうちに低緯度側で入れ替わり、電離圏擾乱ダイナモが発動する前の時間帯であれば、容易に領域 2 型の電流系が作る磁場変動を捉えることができることがわかった。本解析結果が持つ科学的意義は領域 1 型と同様に領域 2 型の電流系が作る電離圏電場も非常に短い時間でグローバルに配位することを示した点であり、その電場によって引き起こされる電離圏電子密度変化の瞬時応答を解く鍵を持っている。

4.2 磁気嵐時のグローバルな電離圏電子密度分布の変動特性

2000 年から 2018 年までの期間に発生した複数の磁気嵐イベントについて統計解析を行った結果、磁気嵐の主相の開始から 1 時間以内に真昼または午後側のサブオーロラ帯で TEC の増大領域が出現し、磁気嵐の発達とともに経度方向に拡大しながら低緯度へ広がっていく様相が明らかとなった。その後、夕方側の磁気赤道を挟んだ低緯度域で TEC が増加しはじめ、それが時間とともに高緯度側へ拡大した。最終的に中緯度から低緯度へ移動してきた TEC 増大領域と一つになって赤道域から高緯度へ TEC 増大域が流線状に伸びた構造へと変化することがわかった。この構造は従来から指摘されている Storm Enhanced Density (SED) である。本統計解析から判明した SED の生成機構は従来から考えられている赤道異常の拡大[Tsurutani et al., 2004] とその高緯度部分の西向き輸送[Foster et al., 2007]ではなく、磁気嵐時に発達した電離圏対流による局所的な電離圏の持ち上げ効果[Liu et al., 2016]であることがわかった。その電場による電離圏電子密度分布の変化を詳しく見るために、2002 年 5 月 11 日に発生した磁気嵐イベントについて 2 次元 rTEC マップに加えて惑星間磁場、地磁気指数、ならびに磁気赤道域にお

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

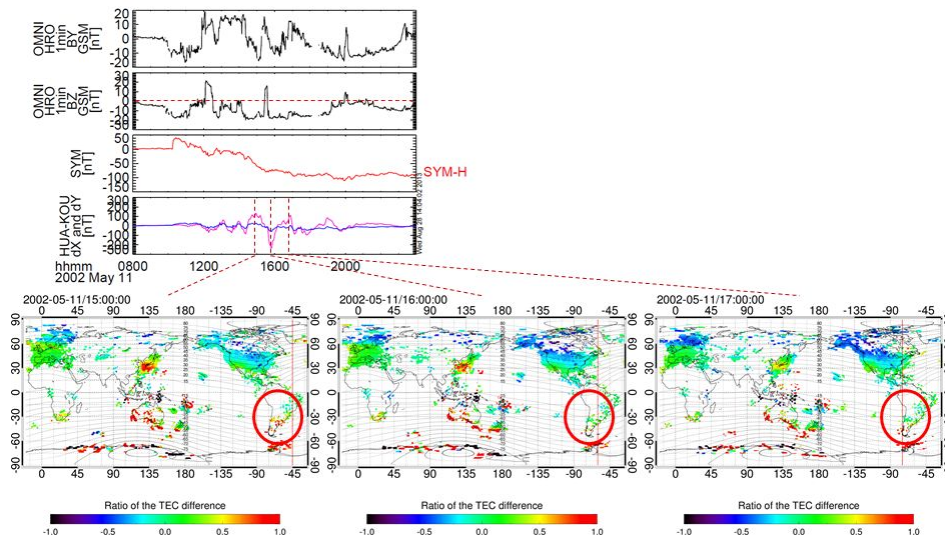


図 2: 惑星間磁場変動に伴うグローバルな 2 次元 rTEC マップ。上段の時系列プロットは惑星間磁場の東西と南北成分、地磁気指数、および磁気赤道域の南北(桃色)と東西(青色)成分の地磁気変動を表す。

る地磁気の南北と東西成分の変化を調べた。その結果が図 2 に示されている。この図の下段の 2 次元 rTEC マップは磁気赤道域の南北成分磁場がそれぞれ正、負、そして正の変動を示した時間に該当する。惑星間磁場の方向が南から北へ変化すると同時に赤道域の南北方向の磁場の値が正から負へと変化している。この地磁気の変化は赤道電離圏の電場の方向が東向きから西向きへ変化したことを示している。一方、2 次元 rTEC マップから赤道電離圏の電場の方向が西向きを向いている時間帯で南米の高緯度側(赤丸で囲った部分)の TEC 値が減少し、赤道電離圏の電場の方向が再び東を向くと増加し始めることがわかった。このことは電離圏に配位した電場の方向によって電離圏の電子密度が変化することを示しており、中緯度の TEC 増加には東向きの電場の存在が必要であることが結論される。この結果の持つ科学的意義は磁気嵐時に高緯度電離圏に持ち込まれた電場は瞬時にグローバルに配位し、広範な領域の電離圏の構造を短時間に変化させることを明らかにした点である。電離圏の局所的な電子密度変化は衛星測位の精度を落とすため、本研究で明らかにした磁気嵐時の中緯度電離圏変動特性は電離圏擾乱の発生と伝搬の予測や予報に役立つと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件)

Obana, Y., N. Maruyama, A. Shinbori, K. K. Hashimoto, M. Fedrizzi, M. Nosé, Y. Otsuka, N. Nishitani, T. Hori, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, A. Matsuoka, Y. Kasahara, A. Yoshikawa, Y. Miyoshi, and I. Shinohara, Response of the Ionosphere-Plasmasphere Coupling to the September 2017 Storm: What Erodes the Plasmasphere so Severely?, Space Weather, 2019 (accepted) (査読有)。

Shinbori, A., Y. Otsuka, T. Tsugawa, M. Nishioka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, Y. Kasahara, A. Matsuoka, J. M. Ruohoniemi, S. G. Shepherd, and N. Nishitani, Temporal and spatial variations of storm time midlatitude ionospheric trough based on global GNSS-TEC and Arase satellite observations, Geophys. Res. Lett., 45, 7362-7370, doi:10.1029/2018GL078723, 2018 (査読有)。

Shinbori, A., Y. Koyama, M. Nosé, T. Hori, and Y. Otsuka, Characteristics of seasonal variation and solar activity dependence of the geomagnetic solar quiet daily variation, J. Geophys. Res., 122, 10796-10810, https://doi.org/10.1002/2017JA024342, 2017 (査読有)。

新堀淳樹, 多様な地上・衛星観測データを用いた太陽活動に伴う宇宙圏、および大気圏環境の長期・短期変動に関する研究, 生存圏研究, 第 12 号, pp67-102, 2016 (査読有)。

Hori, T., A. Shinbori, S. Fujita, and N. Nishitani, IMF-By dependence of transient ionospheric flow perturbation associated with sudden impulses: SuperDARN observations, Earth, Planets and Space, 67:190, doi:10.1186/s40623-015-0360-6, 2015 (査読有)。

Shinbori, A., Y. Koyama, M. Nose, T. Hori, Y. Otsuka, and A. Yatagai, Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet daily variation, Earth, Planets and Space, 66, doi:10.1186/s40623-014-0155-1, 2014.

Koyama, Y., A. Shinbori, Y. Tanaka, T. Hori, M. Nose, S. Oimatsu, An Interactive Data

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

Language software package to calculate ionospheric conductivity by using numerical models, Computer Physics Communications, 185, 3398-3405, doi:10.1016/j.cpc.2014.08.011, 2014 (査読有).

[学会発表](計 7 件)

Shinbori, A., Y. Otsuka, T. Tsugawa, and M. Nishioka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, and Y. Kasahara, Temporal and spatial variations of the plasmasphere and ionosphere during geomagnetic storms based on global GNSS-TEC and Arase satellite observations, Asia Oceania Geoscience Society 2018, Honolulu, USA, June 8, 2018, 発表形式: 口頭.

Shinbori, A., Y. Otsuka, T. Tsugawa, and M. Nishioka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, and Y. Kasahara, Temporal and spatial variations of mid-latitude ionospheric trough during a geomagnetic storm based on global GNSS-TEC and Arase satellite observations, 2nd URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT RASC) 2018, Gran Canaria, Spain, May 28, 2018, 発表形式: 口頭.

新堀淳樹、様々な太陽地球環境データの統合解析を推進するための IUGONET データ解析システムについて、第 369 回生存圏シンポジウム 生存圏データベース全国共同利用研究成果報告会「モノのデータベースから電子データベースまで」、京都大学宇治キャンパス、2018 年 3 月 9 日、発表形式: 口頭.

新堀淳樹、地球プラズマ圏ダイナミクスと電離圏・熱圏との結合過程、電離圏・熱圏・中間圏研究集会、小金井、2016 年 8 月 29 日、発表形式: 口頭.

新堀淳樹、地上 衛星観測に基づく、磁気嵐時の電離圏・プラズマ圏電場変動について、ワークショップ「プラズマ圏の観測と予測モデルの構築」、枚方、2015 年 12 月 22 日、発表形式: 口頭.

Shinbori, A., Y. Koyama, M. Nose, T. Hori, Y. Otsuka, and A. Yatagai, Long-Term Variation in the Upper Atmosphere as Seen in the Geomagnetic Solar Quiet Daily Variation, Asia Oceania Geoscience Society 2015, August 2-7, 2015, 発表形式: 口頭.

Shinbori, A., Y. Koyama, M. Nose, T. Hori, Y. Otsuka, and A. Yatagai, Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet daily variation, 26th IUGG General Assembly, June 22 - July 2, 2015, 発表形式: 口頭.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.iugonet.org/index.jsp>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 堀 智昭

ローマ字氏名: HORI Tomoaki

所属研究機関名: 名古屋大学

部局名: 宇宙地球環境研究所

職名: 特任准教授

研究者番号(8桁): 30467344

研究分担者氏名: 小山 幸伸

ローマ字氏名: KOYAMA Yukinobu

所属研究機関名: 大分工業高等専門学校

部局名: 情報工学科

職名: 講師

研究者番号(8桁): 50598513

(2) 研究協力者

なし