

磁気嵐・サブストーム時の電磁エネルギー生成・伝送メカニズムの研究

Generation and transmission mechanisms of the electromagnetic energy during storm and substorms

研究代表者：菊池 崇（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

kikuchi@isee.nagoya-u.ac.jp

担当：HF ドップラーデータ解析・伝送線モデルによる事象解析

研究分担者：海老原祐輔（京都大学生存圏研究所）

ebihara@rishi.kyoto-u.ac.jp

担当：リングカレントシミュレーションコード開発と事象解析

研究分担者：田中 高史（九州大学宇宙環境研究センター）

tatanaka@serc.kyushu-u.ac.jp

担当：MHD シミュレーションコード開発と事象解析

研究分担者：藤田 茂（気象大学校）

sfujita@mc-jma.go.jp

担当：MHD シミュレーションによる事象解析

研究分担者：橋本久美子（吉備国際大学）

hashi@kiui.ac.jp

担当：地磁気・レーダーデータ解析による事象解析

研究目的と成果 (Research Objective and accomplishments):

沿磁力線電流と電離圏E層電流で構成される磁気圏電離圏電流回路は、磁気嵐・サブストームのエネルギーを中低緯度赤道の電離圏へ運ぶ大動脈である(Kikuchi, 2021 AGU book)。沿磁力線電流を流す一対の磁力線は完全導体とみなされ、2 導体伝送線(2-conductor transmission line)に置換される。電離圏E層とそのリターン電流を流す地球表層は不完全導体とみなされ、損失性伝送線(Lossy transmission line)で置換される。極域電離圏と赤道電離圏を結ぶ地球電離層伝送線(IG: ionosphere-ground transmission line)は、極域電離圏から赤道へ広がるグローバル電離圏へ電磁エネルギーを供給する重要なエネルギーチャンネルである。電離圏E層は、エネルギー伝送を担うと同時にエネルギー消費をも担う(Kikuchi, 2014)。エネルギーの一部は地球内部へ侵入し、地表面に電位差を創り出すために、地上の電力送電線に地磁気誘導電流(GIC: geomagnetically induced current)を流す。2022年度は、地磁気急始(SC: geomagnetic sudden commencement)と準周期DP2磁場変動を引き起こすグローバル電離圏電流系の一端を明らかにし、これを裏付けるためにREPPUシミュレーションモデルを用いて電離圏電流と電場を再現した。その結果、地上磁場変動は、電離圏Hall電流回路とPedersen-Cowling電流回路で説明できることが明らかとなり、チェコと日本におけるHF Doppler サウンダーにより観測された電離圏電場

との対応から、電離圏電場が電離圏電流回路に付随して中緯度へ伝搬することを明らかにした。SCに関する成果を Kikuchi et al. (2022a)、DP2に関する成果を Kikuchi et al. (2022b)の2本の論文にまとめて公表した。その概要を以下に示す。

【SC 電場と電流系の観測とシミュレーション】

2021年5月12日に発生したSCの地方時、緯度特性を南北両半球について解析し、高中緯度SCの原因となるHall電流回路と、中緯度赤道SCの原因となるPedersen-Cowling電流回路を特定した(Kikuchi et al., 2022a)。図1上段は、北半球中緯度の午前(AM)と午後(PM)で観測されたSCのX, Y成分を示し、図1下段は、南半球のSCを示す。X成分は、北半球と南半球で対称的であるが(HERを除く)、午前と午後は、SC(+ -)、SC(- +)と非対称である。一方、Y成分は、両半球共に午前と午後で非対称となり、また、南北両半球間で非対称である。昼間磁気赤道では、図2(左)に示すようにSC(- +)である。中緯度の強いAM-PM対称・非対称と、南北両半球の対称・非対称、および赤道SCの原因となる電流回路を、図2(右)に示す。これらの特性は、X成分がHall電流、Y成分がPedersen電流に因るとすることで説明される。また、中緯度を南北方向に流れるPedersen電流は赤道Cowling電流と結合することで極赤道間のPedersen-Cowling電流回路を構成しており、この結果、赤道では、図2(左)に示すようにSC(- +)が観測される。

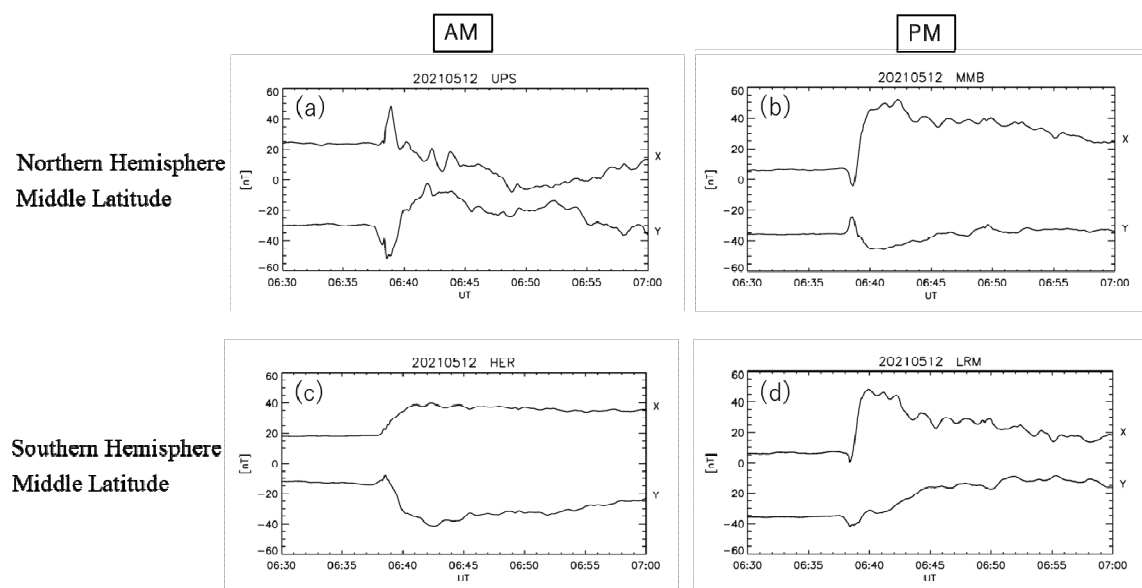


図1. 北半球と南半球の午前(AM)と午後(PM)で観測されたSC。UPS、MMB、HER、LRMは、それぞれUppsala, Memambetsu, Hermanas, and Learmonthを表わす。(Figure 1 of Kikuchi et al., 2022a)

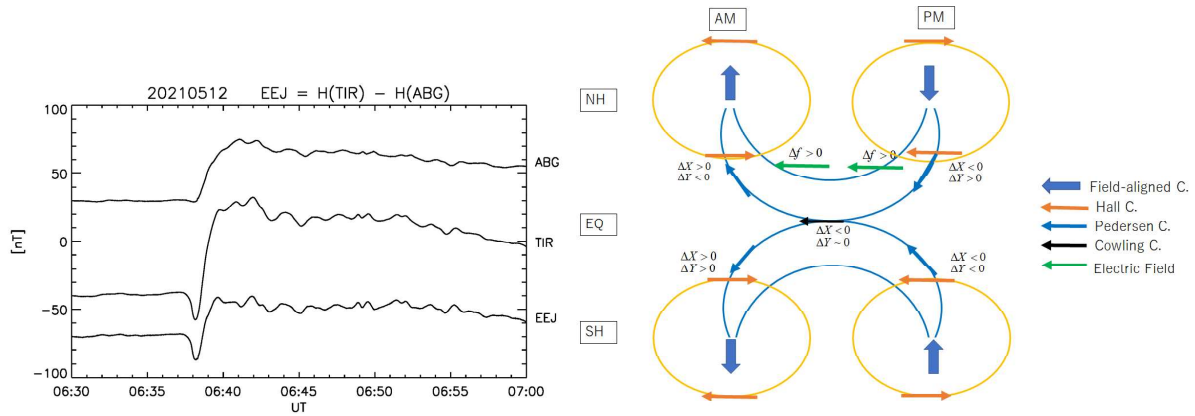


図 2 (左) 正午に磁気赤道 TIR で観測された SC(- +) と、低緯度 ABG で観測された SC(+)を示す。両ステーションの X 成分の差である EEJ(- +)は Cowling 電流による磁場である。(Figure 2 of Kikuchi et al., 2022a)
 図 2(右) SC の午前・午後の対称・非対称および南北半球の対称・非対称を説明する高中緯度電離圏 Hall 電流回路および極から赤道への Pedersen-Cowling 電流回路。(Figure 6 of Kikuchi et al., 2022a)

図 3 に、REPPU シミュレーションモデルで再現した SC の午前(a)と午後(b)の中緯度電離圏電場、および赤道 SC(- +) (c)を示す。このシミュレーション結果は、中緯度で観測された電離圏電場が電離圏電流に付随して中緯度へ伝搬し、Pedersen 電流が赤道 Cowling 電流に接続することにより赤道 SC(- +)が発生することを示している。高中緯度磁場変動と中緯度電離圏電場、そして赤道磁場変動が互いに相似形であるのは、電離圏電場と電離圏電流が極域から赤道へ一体となって伝搬するためである。

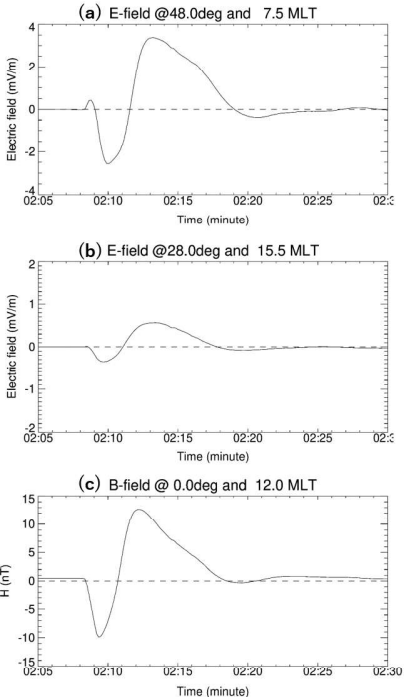


図 3 (a) (b) は、REPPU シミュレーションモデルで再現された中緯度午前と午後の SC 電場を示す。(c)は、磁気赤道 Cowling 電流による SC(- +)を示し、観測された図 2 の EEJ を再現している。(Figure 5 of Kikuchi et al., 2022a)

【DP2 電流系の観測とシミュレーション】

Pedersen-Cowling 電流回路は、周期が1時間程度のDP2 磁場変動においても成立していることを、中緯度と赤道の磁力計データ解析により示した。図4は、中緯度、ロシアの Paratunka (PTK、 45.58° GML)、低緯度の Okinawa (OKI、 16.95° GML) および赤道 Yap, Micronesia (YAP (EEJ)、 0.51° GML)を示す (Kikuchi et al., 2022b)。図中で、磁場の H/D 成分を PTKH、OKIH、PTKD、OKID と表記し、EEJ (実線) および YAPH (点線)を示した。図4(a)(b)では、PTKH と PTKD の相関が高く、 $cc(PTKH-D) = -0.95$ と -0.94 である。この結果は、PTKH が Hall 電流、PTKD が Pedersen 電流によることを示している。PTKH と EEJ の相関も高く、 $cc(PTKH-EEJ) = -0.95$ と -0.87 であり、PTKH が午前中の右回りの Hall 電流によることを示している。また、D 成分と EEJ の相関は、非常に高く、 $cc(PTKD-EEJ) = 0.98$ と 0.96 、および $cc(OKID-EEJ) = 0.97$ と 0.90 である。この高い相関は、Pedersen-Cowling 電流回路が PTK から OKI を経由して赤道に及んでいることを示している。エネルギーの観点から見ると、Pedersen-Cowling 電流回路は、FAC から極域、中低緯度を經由して赤道電離圏へエネルギーを供給するエネルギーチャネルである。

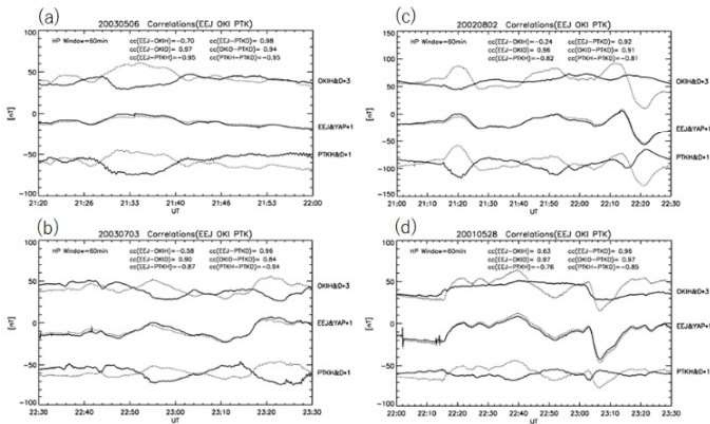


図4 午前中 (0630-1030 MLT) に PTK と OKI の H, D 成分に記録された DP2 磁場変動。PTKH, OKIH (実線) および PTKD, OKID (点線) で示す。OKIH と OKID は、見やすくするために3倍にしている。赤道では、EEJ (実線) と YAPH (点線) を示す。2つの変数間の相関係数は、枠内に cc で示す。(Figure 2 of Kikuchi et al., 2022b)

観測から推定された Hall, Pedersen-Cowling 電流回路を確認するために、REPPU シミュレーションによる電離圏電流の再現した (Kikuchi et al. al., 2022b)。図5は、OKI の緯度 17.0° MLAT における東西 (a) (b)、南北方向 (c) (d) の Hall 電流と Pedersen 電流、および、赤道 (0.0° MLAT) における東西方向 Cowling 電流を示す (e)。縦軸は MLT、横軸はシミュレーション時間 (hh:mm) を示す。最初の数分間、SC の PI と MI の Hall/Pedersen 電流が流れ、続く南向き IMF により DP2 電流が1時間程度、流れる。東西方向の DP2 Hall 電流は、午前で西向き、午後と夕方は東向きであり、電流密度が Pedersen 電流より大きい。南向きと北向きの Pedersen 電流は、それぞれ午前と午後に卓越しており、昼間の東向き赤道 Cowling 電流 (EEJ) で閉じることを示している。REPPU モデルは、観測を説明する中緯度 Hall 電流回路と中緯度赤道間の Pedersen-Cowling 電流回路を再現している。

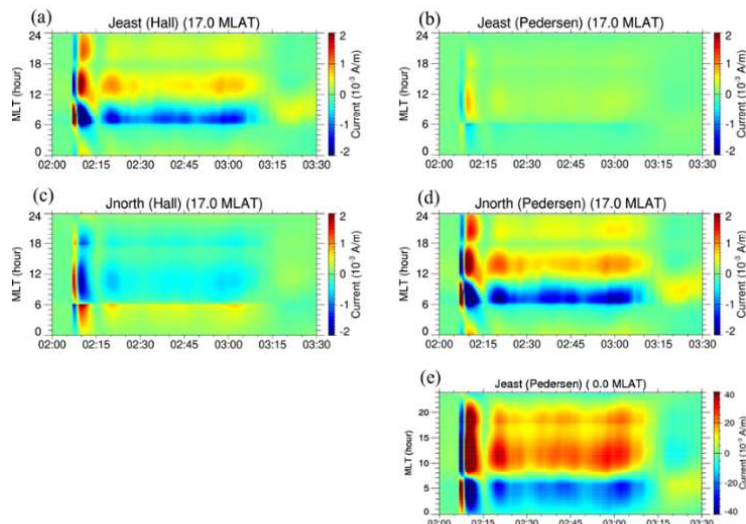


図 5. REPPU グローバルシミュレーションモデルによって再現された低緯度 (17.0° MLAT) と赤道 (0.0° MLAT) での電離圏 Hall 電流と Pedersen 電流を示す。(a) (b) は東向き Hall, Pedersen 電流、(c) (d) は北向き Hall, Pedersen 電流を示す。(e) は赤道 Pedersen (Cowling) 電流を示す。縦軸は磁気地方時 (MLT)、横軸はシミュレーション時間 (hh:mm)。(Figure 7 of Kikuchi et al., 2022b)

公表状況 (Publications):

(論文)

1. Kikuchi, T., T. Araki, K. K. Hashimoto, Y. Ebihara, T. Tanaka, Y. Nishimura, G. Vichare, A. K. Sinha, J. Chum, K. Hosokawa, I. Tomizawa, Y. Tanaka, A. Kadokura (2022a), Instantaneous achievement of the Hall and Pedersen-Cowling current circuits in northern and southern hemispheres during the geomagnetic sudden commencement on 12 May 2021, *Front. Astron. Space Sci.* 9:879314. doi: 10.3389/fspas.2022.879314.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2022.879314/full>
2. Kikuchi, T.; Hashimoto, K.K.; Tanaka, T.; Nishimura, Y.; T. Nagatsuma (2022b), Middle Latitude Geomagnetic Disturbances Caused by Hall and Pedersen Current Circuits Driven by Prompt Penetration Electric Fields. *Atmosphere* 2022, 13, 580.
<https://doi.org/10.3390/atmos13040580> (INVITED)
3. Kikuchi, T. (2014), Transmission line model for the near-instantaneous transmission of the ionospheric electric field and currents to the equator, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, doi:10.1002/2013JA019515.

(解説)

菊池崇 (2021), 磁気圏電離圏複合系のエネルギー伝送—宇宙地球電磁気学入門—, 極地研電子ライブラリー「オーロラ物理学シリーズ③」2021年9月出版。

<http://doi.org/10.15094/00016389>

Kikuchi, Takashi (2021), Penetration of the magnetospheric electric fields to the low latitude ionosphere, *Space Physics and Aeronomy Collection Volume 3: Ionosphere Dynamics and Applications, Geophysical Monograph 260*, Edited by Chaosong Huang and Gang Lu. © 2021 American Geophysical Union. Published 2021 by John Wiley & Sons, Inc. DOI: doi:10.1002/9781119815617.ch14 (INVITED)