

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@rish.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（九州大学宇宙空環境研究センター）

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（情報システム研究機構・統計数理研究所）

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（電気通信大学）

hashi@geosci.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):

磁気圏と電離圏は沿磁力線電流によりエネルギーを交換する複合系（相互作用系）を形成する。磁気嵐やサブストーム時には、外部磁気圏および内部磁気圏プラズマが駆動するダイナモがつくる電位と電流が極域から赤道の電離圏へ伝搬し、地磁気擾乱と電離圏擾乱を引き起こす。地磁気擾乱は、導体地球面に電流・電場を誘導し、この一部は地上の電力送電線に準直流電流 (GIC) として流れる (Ebihara et al., 2023)。この結果、磁気圏ダイナモから沿磁力線電流、電離圏電流、地球面電流で構成される Magnetosphere-Ionosphere-Ground (MIG) 電磁エネルギー伝送システムが形成される (Kikuchi, JGR2014)。本研究課題は、磁気嵐とサブストーム時の地上磁場観測、電離圏電場観測、及びグローバルシミュレーションを用いて、磁気圏から導体地球面にいたる電磁エネルギー伝送の特性を明らかにすることを目的とする。

2023 年度までに、地磁気急始 (SC)、サブストーム、磁気嵐のイベント時のグローバル地磁気データと日本とチェコにおける HF Doppler サウンダーデータの解析をおこない、電離圏電場と電離圏電流の緯度・地方時特性の一端を明らかにするとともに、REPPU モデルによる事象の再現をおこなった (Hashimoto et al., EPS2020; Tanaka et al., JGR2020; Kikuchi et al., EPS2021, Atmosphere2022)。その後、2024 年 5 月 10-11 日に大規模磁気嵐が発生し、極から赤道の磁力計観測データと中緯度の HF Doppler

サウンダーによる電離圏電場観測データを得た。初期的解析をおこなった結果、SCの磁場と電場の緯度・地方時特性および磁気嵐主相時の磁場と電場の特性が REPPU モデルで再現された特性と一致した。一方、磁気嵐主相では、対流電場発達から2時間後に R1FAC の減少によると思われる過遮蔽電場が発生したが、シミュレーションによる再現は今後の課題である。さらに、磁気嵐回復相に2時間おきに発生したサブストーム時には、孤立型サブストーム時に発生する過遮蔽電場 (Hashimoto et al., JGR2017) ではなく、対流電場が主たる電場であった。このメカニズムの理解は今後の課題であるが、シミュレーションによる再現が可能かどうか検討課題である。

以下の図1～図3に、観測された SC と磁気嵐主相の磁場・電場のデータを示し、図4に REPPU モデルにより再現された磁気嵐時に発達する電離層電流を示す。

図1は、2024年5月10日17:05UTに、中緯度の午前(AM)と午後(PM)、磁気赤道の夜と昼に観測された SC を示す。SC は正または負の PI (preliminary Impulse) と正または負の MI (Main Impulse) で構成され、その緯度・地方時特性は沿磁力線電流を取り囲む2つ渦の Hall 電流と中緯度と赤道を結ぶ Pedersen-Cowling 電流で説明される。これらの観測結果は、また、REPPU モデルによる再現 (Kikuchi et al., 2016 JGR; Kikuchi et al., 2022 FSPAS) と一致する。

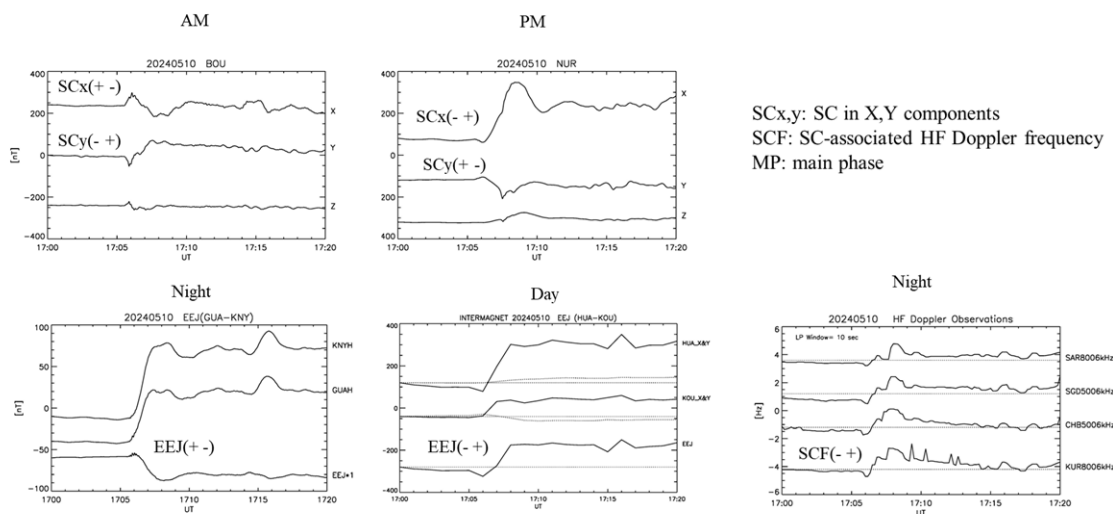


図1. 2024年5月10日17:05UTに発生したSC。中緯度午前(BOU)と午後(NUR)、磁気赤道夜間(GUA)と昼間(HUA)のSCは正または負のPIとこれに続く正または負のMIで構成される。これらの特性は、沿磁力線電流を取り囲む2つ渦のHall電流と中緯度と赤道を結ぶPedersen-Cowling電流で説明される。夜間のSCF(電離圏電場によるHF Doppler周波数変化)はPI, MIのdusk-to-dawn, dawn-to-dusk電場で説明される。

図2に示す磁気嵐主相(17-19UT)の中緯度地磁気 B_x , B_y は、互いに逆センスで午前と午後でも互いに逆センスである。この特性は、R1 FACsが極域電離圏へ持ち込む対流電場による2つのHall電流渦とR1FACsから赤道電離層へ流入する

Pedersen-Cowling 電流により説明される。

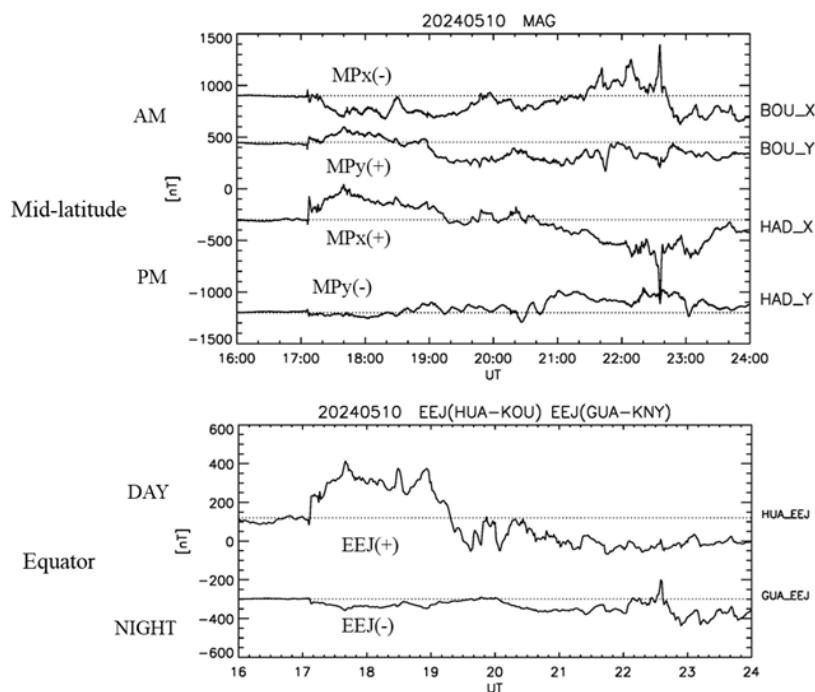


図2. 2024年5月10日に発生したSCに続く磁気嵐主相の中緯度午前(BOU)と午後(HAD)、および磁気赤道昼間(HUA)と夜間(GUA)の磁場変動。SCと同様に、沿磁力線電流を取り囲む2つ渦のHall電流と中緯度と赤道を結ぶPedersen-Cowling電流で説明される。

第3図は、磁気嵐主相時に観測されたHF Doppler周波数を示す。主相の最初17-18UTのHF Doppler周波数は正で、夜間の電場が西向きの対流電場であることを示す。この電場は1830UT付近で負に変化し1時間継続している。このDoppler周波数変動を起こす電場は、他のデータの解析により、対流電場減少による過遮蔽電場と思われる。夜間の過遮蔽電場により電離圏プラズマが上昇したことがイオノグラムデータでも確認され、大規模電離圏嵐時に発生するF3層と推定される。このような急激な過遮蔽電場発生シミュレーションによる再現が今後の課題である。

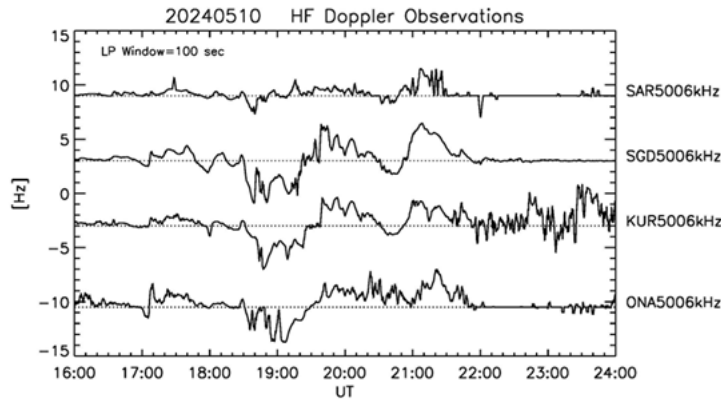


図3. 2024年5月10日に発生した磁気嵐主相の電場による中緯度(日本)における HF Doppler 周波数変化。主相の最初1時間は夜側の西向き対流電場による電離圏プラズマの下降運動、その後の1時間半の負 Doppler 周波数は東向きの過遮蔽電場による上昇運動を示す。

第4図は、REPPU モデルにより再現された中緯度 (磁気緯度 17 度) Hall 電流と Pedersen 電流および磁気赤道 Cowling 電流を示す。これらの電流は、SC と磁気嵐主相の磁場変動の緯度・地方時特性をよく説明する。

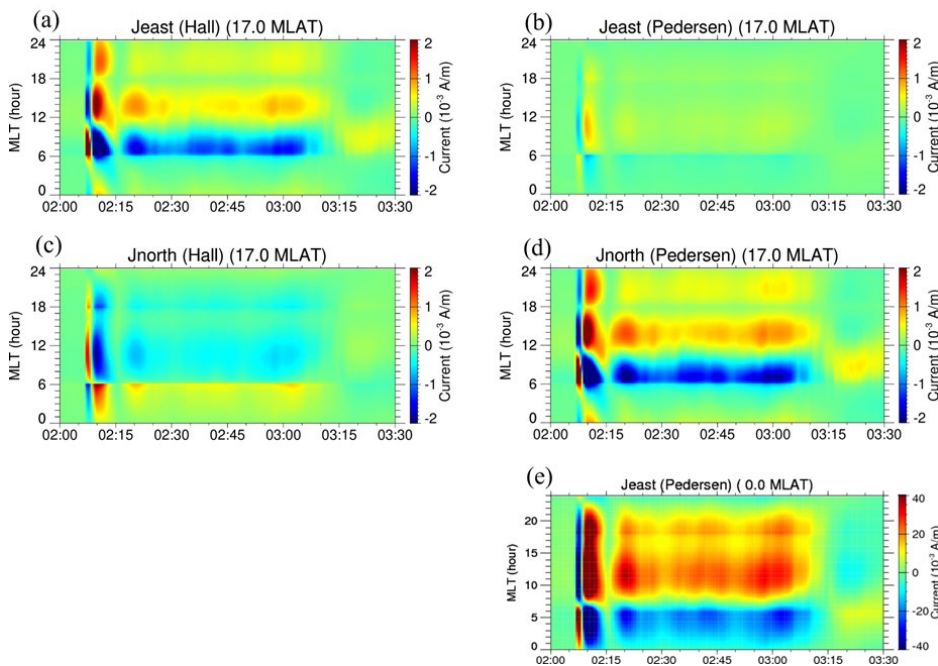


図4. REPPU モデルにより再現された東西および南北方向の電離圏 Hall および Pedersen 電流。最初の1分が SC の PI 電流、その後数分間が SC の MI 電流、そして SC に続いて発達する磁気嵐主相時の Hall および Pedersen 電流を示す。(from Fig.7 of Kikuchi et al., 2022 Atmosphere)

公表状況 (Publications):

(口頭発表)

菊池崇、橋本久美子、細川敬祐、富澤一郎、坂井純、海老原祐輔、HFDOPE グループ、
Mid-latitude ionospheric disturbances observed by HF Doppler sounders during 2024 May
and October storms, 2024年度第2回STE現象報告会 20250319.

(論文)

1. Yusuke Ebihara, Satoko Nakamura, Tada-nori Goto, Shinichi Watari & Takashi Kikuchi ,
Geomagnetic Variability and GIC, Solar-Terrestrial Environmental Prediction Chapter 6,
edit. K. Kusano, 2023, DOI: 10.1007/978-981-19-7765-7_6
2. 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>
3. 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)
4. Kikuchi, T., J. Chum, I. Tomizawa, K. K. Hashimoto, K. Hosokawa, Y. Ebihara, K.
Hozumi, P. Supnithi (2021a), Penetration of the electric fields of the geomagnetic sudden
commencement over the globe as observed with the HF Doppler sounders and
magnetometers, *Earth Planets and Space*, DOI: 10.1186/s40623-020-01350-8.
5. Kikuchi, T., Ebihara, Y., Hashimoto, K.K., Kitamura, K., and Watari, S-I. (2021b),
Reproducibility of the Geomagnetically Induced Currents at Middle Latitudes During
Space Weather Disturbances. *Front. Astron. Space Sci.* 8:759431.
<https://doi.org/10.3389/fspas.2021.759431>
6. Kikuchi, T. (2021), Penetration of the magnetospheric electric fields to the low latitude
ionosphere, *Space Physics and Aeronomy Collection Volume 3: Geophysical Monograph*
260, Ed. C. Huang and G. Lu. American Geophysical Union. 2021, John Wiley & Sons,
Inc. DOI: 10.1002/9781119815617. ch14
7. Hashimoto, K. K., T. Kikuchi, I. Tomizawa, K. Hosokawa, J. Chum, D. Buresova, M. Nose
and K. Koga(2020), Penetration electric fields observed at middle and low latitudes during
the 22 June 2015 geomagnetic storm, *Earth, Planets and Space*,
<https://doi.org/10.1186/s40623-020-01196-0>
8. Tanaka, T., Ebihara, Y., Watanabe, M., Den, M., Fujita, S., Kikuchi, T., K. K. Hashimoto,
and R. Kataoka (2020). Reproduction of ground magnetic variations during the SC and the
substorm from the global simulation and Biot-Savart's law. *Journal of Geophysical*
Research: Space Physics, 125, e2019JA027172. <https://doi.org/10.1029/2019JA027172>
9. Hashimoto, K. K., T. Kikuchi, I. Tomizawa, and T. Nagatsuma (2017), Substorm
overshielding electric field at low latitude on the nightside as observed by the HF Doppler
sounder and magnetometers, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, doi:
10.1002/2017JA024329
10. Kikuchi, T., K. K. Hashimoto, I. Tomizawa, Y. Ebihara, Y. Nishimura, T. Araki, A.
Shinbori, B. Veenadhari, T. Tanaka, and T. Nagatsuma (2016), Response of the
incompressible ionosphere to the compression of the magnetosphere during the
geomagnetic sudden commencements, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121,
doi:10.1002/2015JA022166.
11. 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.