

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沿磁力線電流を伴って極域電離圏へ伝搬し、さらに赤道電離圏へ伝搬し、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、HF Doppler サウンダーによる電離圏電場観測、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。

これまで、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)。

2024 年 5 月 10-11 日に発生した大規模磁気嵐時には、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。なかでも、HF Doppler サウンダーによる電離圏電場を日本 (Sugadaira 等)、チェコ (Praha)、およびアルゼンチン (Tucuman) の 3 つの異なる地方時で観測した。その結果、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することを確認した。新たに、SC の初期インパルス PI の開始が高緯度と赤道で 1 秒の精度で同時であることを確認した。この PI 電場・電流のグローバル同時性は、電場・電流が地球電離圏導波管 TM0 モードで光速伝搬する (Kikuchi et al., 1978; Kikuchi and Araki, 1979) ことを支持した。REPPU モデルは電離圏 Potential Sover が適用されており、沿磁力線電流により供給される電位と電流が瞬時に全球電離圏に伝搬することを前提としている。地球電離圏導波管 TM0 モードの光速伝搬が電位・電流の瞬時伝搬の物理的根拠となっている。

昼間側のアルゼンチンとチェコ、および夜間の日本で HF Doppler 観測により、PI 電場が dusk-to-dawn, MI 電場が dawn-to-dusk の向きを持つ双極性であることを確認した。この事実は、数 10 秒の時間スケールを持つ PI においても沿磁力線電流－電離圏電流で構成される電流回路で伝送される電位性の電場・電流であることを示している。

磁気嵐主相では、南向き IMF が駆動するダイナモが創る R1FAC を伴う dawn-to-dusk 対流電場が夜側 HF Doppler サウンダーにより観測された。これは磁気嵐主相の R1FAC ダイナモがつくる電位・電流が極域電離圏を経由し、さらに地球電離圏導波管を経由して中緯度電離圏へ伝送されることを示している。

磁気嵐主相開始から 2 時間後に R1FAC の減少により R2FAC による遮蔽電場が卓越し過遮蔽 (overshielding) が発生した。日本の HF Doppler 観測により、過遮蔽電場は対流電場の数倍の強度を持つことが観測され、内部磁気圏で生成される R2FAC による遮蔽電場が中緯度赤道の地磁気変動と電離圏プラズマ変動の大きな要因であることを示した。磁気嵐時の過遮蔽電場のシミュレーションによる再現は今後の課題である。

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。磁気嵐時に過遮蔽電場の原因である R2FAC の成長が抑制されたと思われるが、磁気嵐時の R2FAC 生成メカニズムの理解は今後の課題である。

以下の図 1～図 3 に、2024 年 5 月 10 日の磁気嵐中に観測された 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圏電流を示す。

【SC のグローバル同時性と電場】

図 1 上段は、2024 年 5 月 10 日に発生した SC の初期インパルス PI が米国 Boulder (BOU) と英国 Hardland (HRD) で同時に発生したことを示す。PI が両地点で 17h05m33sUT に開始した。PI の開始がシャープであったために 1 秒の精度で同時性を

確認した。図1下段は、西太平洋の赤道 Guam(GUA)におけるPIが中緯度のPIと同時に(17h05m33s)に開始したことを示す。これらのデータはPIが緯度と地方時によらず1秒の精度で同時に開始したことを示している。TM0電磁波モードによる瞬時伝搬であることを支持している。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。

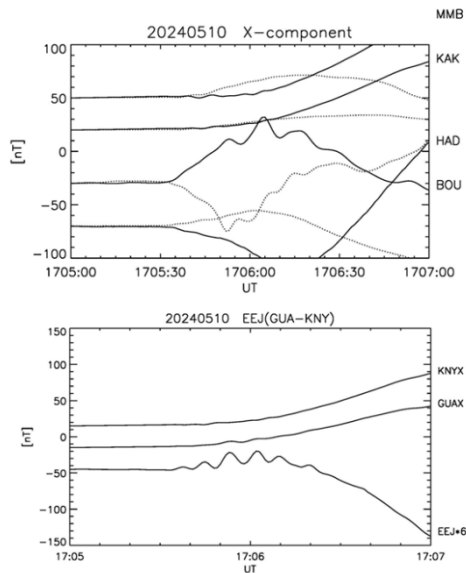


図1. 2024年5月10日に発生したSCの初期インパルスPIが、Boulder(USA), Hardland(UK), Guam(EEJ)で17h05m33sに開始した。

図2はSC時に、アルゼンチン(Tucuman)、チェコ(Praha)、日本(Sugadaira等)で同時に観測されたHF Doppler 周波数SCFを示す。昼側のTucuman, PrahaでSCF(+ -),

夜側のSugadaira等でSCF(- +)となっており、SCFのPIがdusk-to-dawn電場により、MIがdawn-to-dusk電場によって発生したことを示す。これらの電場は磁気圏から沿磁力線電流と共に極域電離圏へ伝搬した電位がTM0モードにより中緯度電離圏へ伝搬し分布した結果である(Kikuchi, 2014)。HF Doppler周波数1Hzは約2mV/mの電場により発生する。SC時には約5mV/mの電場が中緯度へ伝搬することを示している。

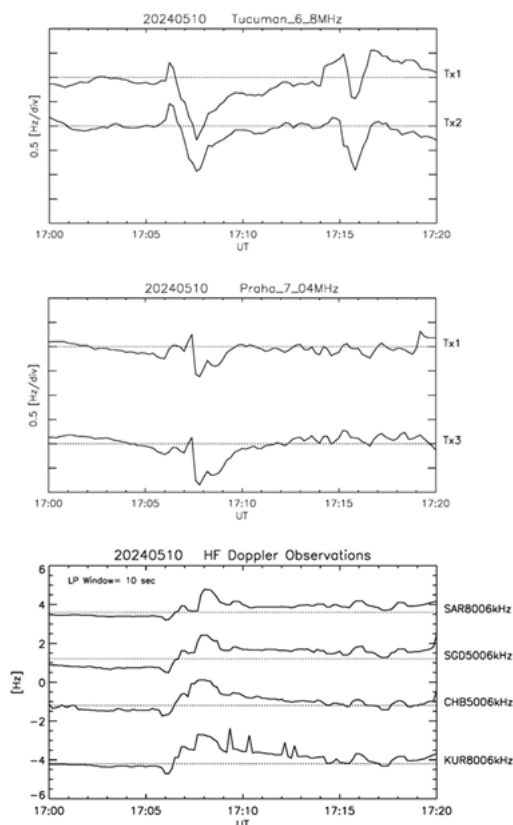


図2. 2024年5月10日17:05UTに発生したSC時に昼側のアルゼンチンTucuman, チェコPrahaと夜側の日本で観測されたHF Doppler 周波数。

【磁気嵐主相の対流電場と過遮蔽電場】

図 3 上段は、SC に続く磁気嵐主相の電場により日本の Sugadaira (SGD) 等で観測された HF Doppler 周波数を示す。SC 開始後の磁気嵐主相では、正の Doppler 変化が観測されており、dawn-to-dusk 対流電場が中緯度へ伝搬したことを示している。さらに、主相開始から 1 時間 30 分後の 1830UT に dusk-to-dawn の overshielding 電場が発生した。その強度は 8mV/m に達している。Overshielding 電場の発生は、主相で発達した R2FAC による遮蔽電場が、対流電場の減少により卓越したと思われる。

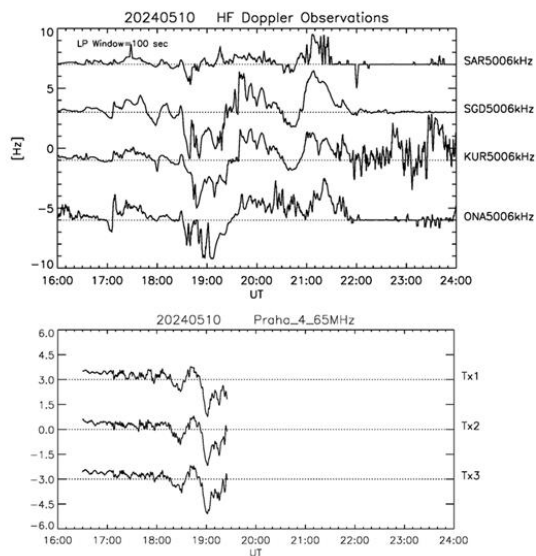


図 3. 日本とプラハで観測された磁気嵐主相電場と過遮蔽電場による HF Doppler 周波数

図3下段は、日本側で過遮蔽電場が観測されたと同時刻に、プラハで正のDoppler変化が観測されたことを示す。プラハは昼間側の特性を示しており、dusk-to-dawnの overshielding電場の発生を示している。

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日本のイオノグラムデータで確認された (Hosokawa et al., 2026 under review)。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 4 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。

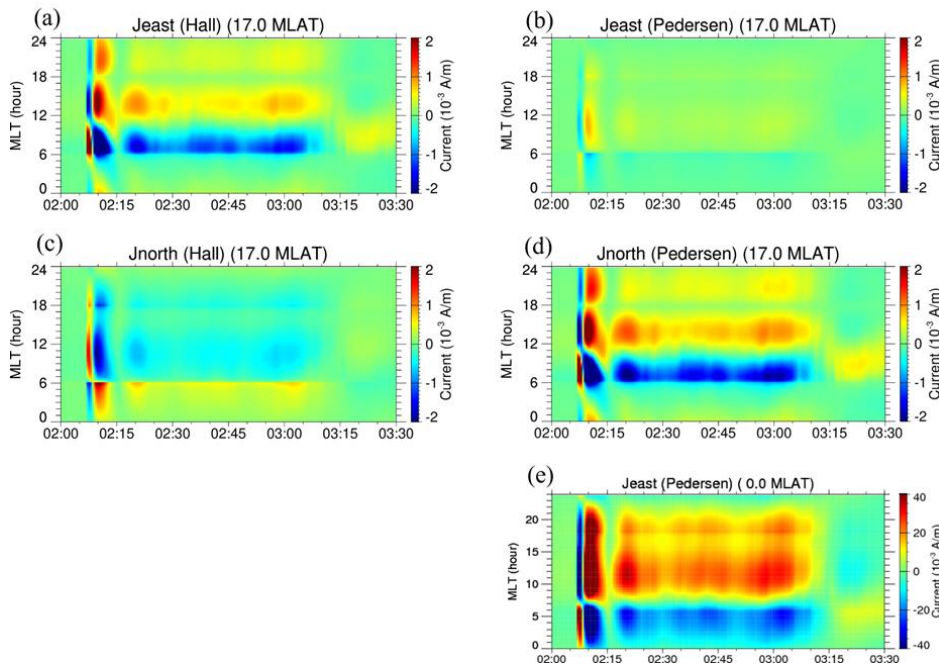


図4. REPPUモデルにより再現された東西および南北方向の電離圏HallおよびPedersen電流。最初の1分がSCのPI電流、その後数分間がSCのMI電流、そしてSCに続いて発達する磁気嵐主相時のHallおよびPedersen電流を示す。(from Fig.7 of Kikuchi et al., 2022 Atmosphere)

公表状況(Publications):

(口頭発表)

1. Takashi Kikuchi, Kumiko K. Hashimoto, Keisuke Hosokawa, Ichiro Tomizawa, Jaroslav Chum, Yusuke Ebihara, Yukitoshi Nishimura, Stormtime electric fields at middle and low latitudes as observed by HF Doppler sounders and magnetometers during the super storm on May 10-11, 2024, The 16th Symposium on Polar Science, Dec 4, 2025.
2. Takashi Kikuchi, Energy transmission in the magnetosphere-ionosphere coupled system, invited, Aurora Modeling Symposium, Okinawa Institute of Science and Technology (OIST), Jan 19-23, 2026,
3. Takashi Kikuchi, Kumiko K. Hashimoto, Keisuke Hosokawa, Ichiro Tomizawa, Ryuho Kataoka, Jaroslav Chum, Yusuke Ebihara, Yukitoshi Nishimura, Stormtime electric fields in three local time zones as observed by HF Doppler sounders at middle latitudes during the storm on May 10-11, 2024, STE(太陽地球環境)現象報告会. March 9, 2026.

(論文)

1. Keisuke Hosokawa; Hiroyuki Nakata; Jun Sakai; Takashi Kikuchi; Kumiko Hashimoto; Michi Nishioka; Takuya Tsugawa, Sudden up-lift of mid-latitude ionosphere during magnetic storms in 2024 HF Doppler sounding in Japan, Earth, Planets and Space 2026 under review.

2. 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
3. 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>
4. 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)
5. 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.
6. 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>
7. 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
8. 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>
9. 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>
10. 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
11. 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.
12. 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.