

## 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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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):

磁気嵐・サブストームは、磁気圏と電離圏が沿磁力線電流と電離圏電流によりエネルギーを交換する複合系(相互作用系)の太陽風に対する応答である(Tanaka 他, 2010 JGR)。磁気圏ダイナモで創られる電磁エネルギーは、沿磁力線電流を流す一対の磁力線を伝送線(MI 伝送線)として極域電離圏へ伝送され、さらに電離圏 E 層と地面で構成される地面電離圏伝送線(IG 伝送線)を経由して中低緯度へ伝送される(Kikuchi, 2014)。この過程において、固体地球表面に電流を流す結果、地表面の電位差が電力送電系の変圧器中性線を通じて送電線中に準直流の地磁気誘導電流(GIC)を流す(Kikuchi et al., 2021b)。

IG 伝送線を流れる電流を輸送する TM0/TEM モード波の 1 個の波動が輸送する電流量は、波動インピーダンスに依存する小さい量である。しかし、有限長伝送線中を波動が往復伝搬することにより、数秒から 20 秒程度の時定数をもって成長する(Kikuchi, 2014)。これは、赤道で観測される磁気インパルス(PI)のピークが 20 秒程度遅れる現象を説明する(Takahashi, Kikuchi et al., 2015)。TM0/TEM mode が輸送する電流は、電離圏 Pedersen 電流である。このため、中緯度から赤道の Pedersen-Cowling 電流回路は、電磁エネルギーの輸送路であると同時に、消費する負荷でもある。IG 伝送線は不完全導体で構成される伝送線(lossy transmission line)として扱われる。

電流に伴う磁場は、地上の磁力計網で観測されるが、原因となる電流には、磁気圏境界電流、環電流、沿磁力線電流、電離圏 Hall 電流、電離圏 Pedersen 電流、地面電流など多様である。この結果、地上で観測される磁場変動は、緯度、地方時により大きく異なる。しかし、これを逆に利用することにより、原因となる電流を特定し、それを流すエネルギー回路を特定することが可能である。電離圏で観測される電場もこの電流回路で伝送されるため、電流回路はエネルギー伝送路でもある。電流回路を特定するために、電場・磁場データ解析と理論・シミュレーションの両面から解析を進める。

これまで、磁気急始(SC)について、電流回路の特定をおこなった。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、高緯度SCの原因となる Hall 電流も含めて、その電流回路を特定した (Kikuchi et al., 2022, submitted)。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。このような強いAM-PM対称・非対称と、南北両半球の対称・非対称の原因となる電流回路を図2(右)に示す。X成分がHall電流、Y成分がPedersen電流に因るとすることで理解される。Pedersen電流はTMO/TEMモードにより赤道へ輸送され、昼間赤道でCowling電流を流し、Pedersen-Cowling電流回路が形成される。この結果、赤道では、図2(左)に示すようにSC(- +)となる。

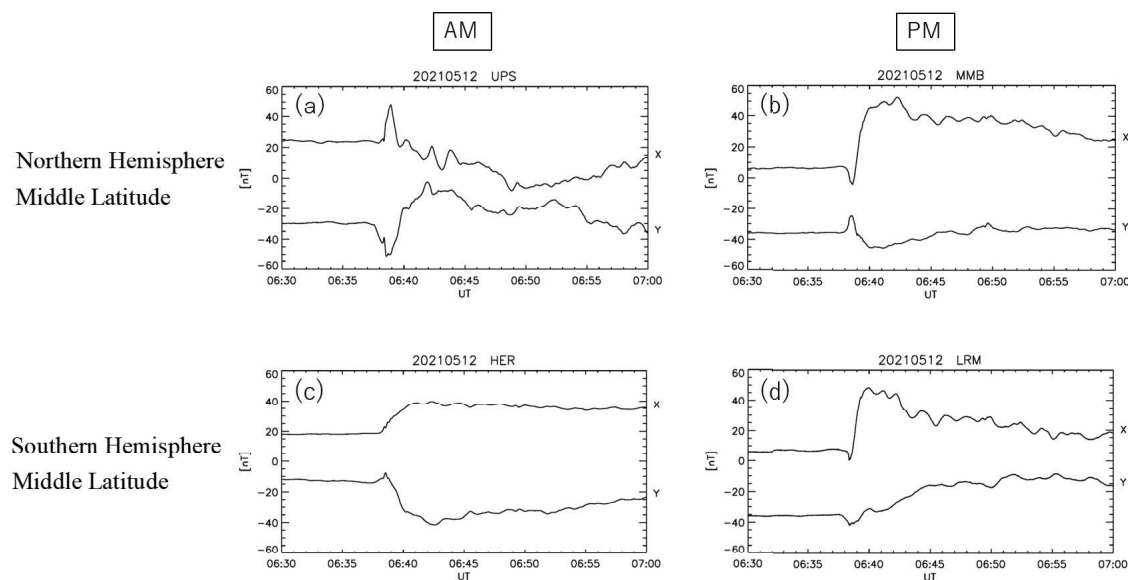


図1(上段)北半球の午前(AM)で観測されたSCx(+ -)とSCy(- +)、午後(PM)で観測されたSCx(- +)とSCy(+ -)。(下段)南半球で観測されたSC。

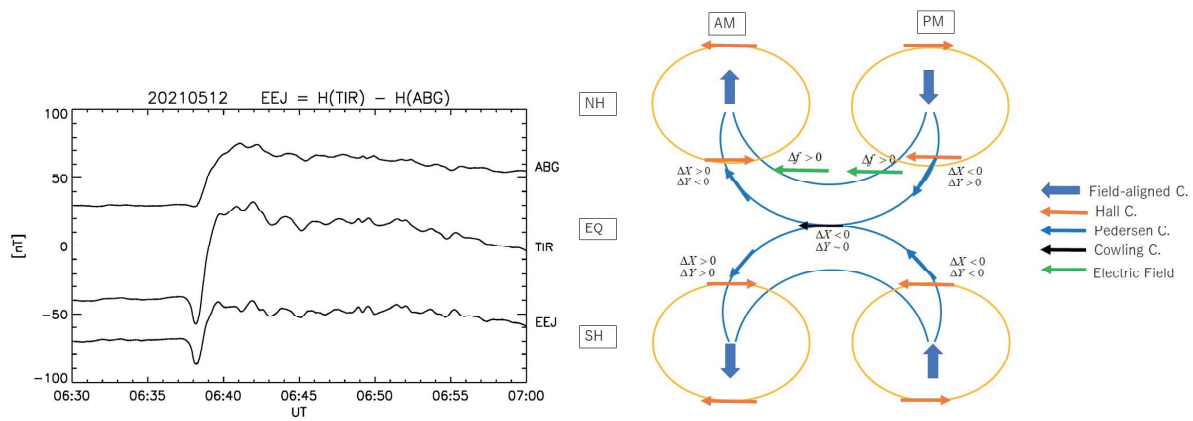


図 2 (左) 正午に磁気赤道 TIR で観測された SCx(- +)と、低緯度 ABG で観測された SCx(+ )を示す。両ステーションの X 成分の差である EEJ(- +)は Cowling 電流による磁場である。  
 図 2 (右) SC の午前・午後の対称・非対称および南北半球の対称・非対称を説明する高中緯度電離圏 Hall 電流および極から赤道への Pedersen-Cowling 電流回路。

図 3 に、REPPU シミュレーションモデルで再現した SC の昼間中緯度電離圏電場 (図上段) と赤道 SC(- +)を示す (図下段)。赤道電離圏で再現された Cowling 電流が図 2 の赤道 SC(- +)の原因である。Cowling 電流が伝搬する途中の中緯度電離圏には Pedersen 電流と共に、電流と相似形の電場が伝搬する。この電場は HF Doppler サウンダーにより観測される(Kikuchi et al., 2016)。

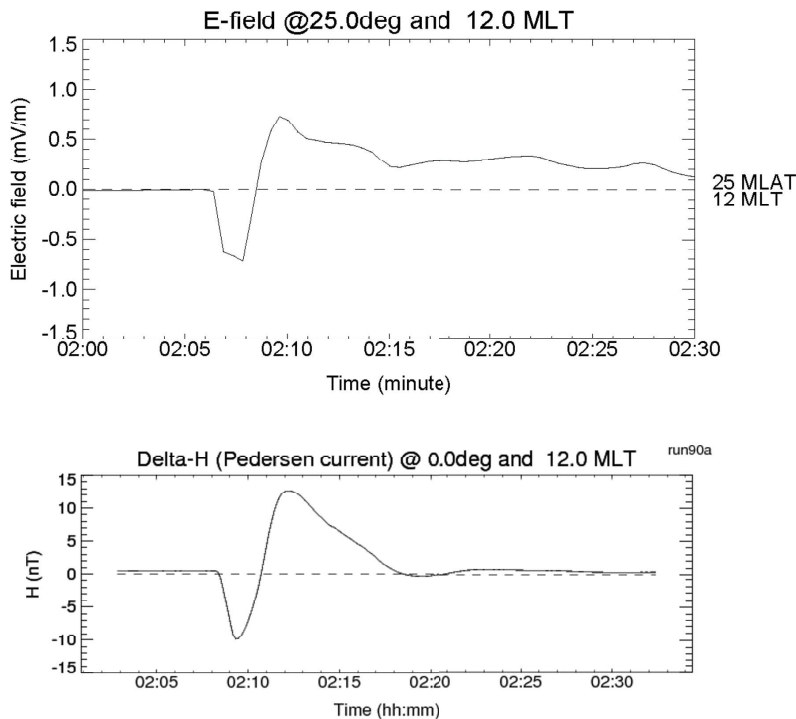


図 3 (上段) REPPU シミュレーションモデルで再現された昼間中緯度電離圏の SC 電場、(下段) 磁気赤道を流れる Cowling 電流による SC(- +)。インド磁気赤道で観測された SC (図 2) の PI, MI を再現している。

上に示したように、グローバル磁場、中緯度電離圏電場が図 2 右の Hall 電流回路と Pedersen-Cowling 電流回路により理解され、これが REPPU シミュレーションで再現された。Pedersen-Cowling 電流回路を可能にする地球電離圏導波管/伝送線モデルの模式図を図 3 に示す(Kikuchi et al., 2021a)。

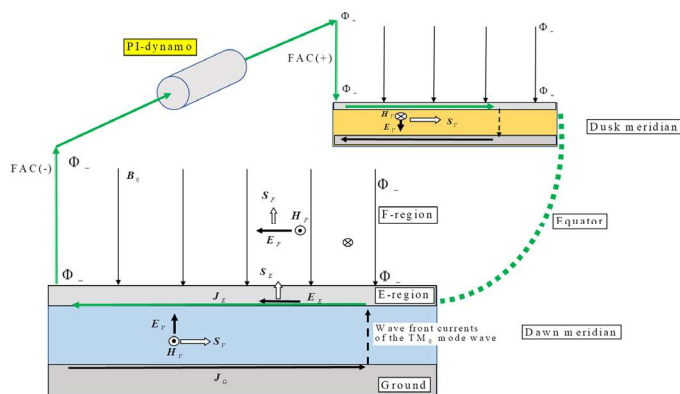


図 4 PI ダイナモが創る正負の電位が沿磁力線電流を伴って極域電離圏へ伝送され、地球電離圏導波管/伝送線の TM0/TEM モードによりグローバルに伝搬する。電離圏電流に伴う水平電場は磁力線沿いに F 層へ伝搬し、電離圏プラズマを動かす。これが HF Doppler sounder により観測される。(Figure 7 of Kikuchi et al., 2021a)

SC により発生する磁気圏電離圏電流回路は、時間スケールの長いサブストームや磁気嵐において発生する電流回路と類似している。電流と電場を輸送する導波管/伝送線モデルを応用することが可能である。これらを AGU book (2021) と極地研究所オーロラ物理学シリーズ③としてまとめた。

### 公表状況 (Publications) :

#### (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)

#### (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 (2022), Instantaneous achievement of the Hall and Pedersen-Cowling current circuits in northern

and southern hemispheres during the geomagnetic sudden commencement on 12 May 2021. Submitted to *Frontiers*.

2. Hiroyuki Nakata, Kenro Nozaki, Yuhei Oki, Keisuke Hosokawa, Kumiko K. Hashimoto, Takashi Kikuchi, Jun Sakai, Ichiro Tomizawa and Satoko Saita (2021), Software-defined radio-based HF doppler receiving system, *Earth Planets and Space*, DOI: 10.1186/s40623-021-01547-5
3. 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>.
4. Kikuchi, Takashi, Jaroslav Chum Ichiro Tomizawa Kumiko K. Hashimoto Keisuke Hosokawa Yusuke Ebihara, Kornyanat Hozumi Pornchai 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. 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>
6. 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>
7. 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
8. Kikuchi, T. and K. K. Hashimoto (2016), Transmission of the Electric Fields to the Low Latitude Ionosphere in the Magnetosphere-Ionosphere Current Circuit, *Geoscience Letters*, DOI: 10.1186/s40562-016-0035-6.
9. 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.

10. Nishimura, Y., T. Kikuchi, Y. Ebihara, A. Yoshikawa, S. Imajo, W. Li, H. Utada (2016), Evolution of the current system during solar wind pressure pulses based on aurora and magnetometer observations, EPS DOI: 10.1186/s40623-016-0517-y
11. Takahashi, N., Y. Kasaba, A. Shinbori, Y. Nishimura, T. Kikuchi, Y. Ebihara, and T. Nagatsuma (2015), Response of ionospheric electric fields at mid-low latitudes during sudden commencements, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, doi:10.1002/2015JA021309.
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.