

MAGDAS で観測された電離圏電流

山崎洋介^[1, 2], 湯元清文^[1, 3], 阿部修司^[3], 魚住禎司^[3], 吉川顕正^[1, 3]

[1] 九州大学 理学府 地球惑星科学

[2] 日本学術振興会特別研究員 DC

[3] 九州大学 宙空環境研究センター

1. はじめに

地上の磁力計で観測される数十 nT 程度の日変動は Sq 変動として古くより知られており[e.g., Chapman and Bartels, 1940], 高度約 90-150km のいわゆる電離圏ダイナモ領域を流れる電流に起因される[Richmond, 1998]. 宇宙天気分野では太陽地球系に現れる様々な物理量を一貫した物理法則で記述し, 未来の変動を予測・予報することが重要である. 一般に, ダイナモ領域高度における電離圏電流の観測はロケットに搭載した観測機器で”その場観測”を行うか[e.g., Onwumechilli, 1992], 地上の多点で観測された Sq 変動から等価電流ベクトルを算出し, その空間分布(Sq 等価電流系)を調べる[e.g., Stening, 2005]. 近年では人工衛星に搭載された磁力計のデータから電離圏等価電流を求めた例等もあるが[Turner et al., 2007], データの精度や軌道の制約に難があるため, 現在のところ人工衛星による電離圏電流の調査は(電流量が非常に大きい磁気赤道域を除いては[e.g., Mouel et al., 2006])目立った成果をあげていない. 九州大学では MAGDAS/CPMN(MAGnetic Data Acquisition System of the Circum-pan Pacific Magnetometer Network)としてグローバルな地磁気観測ネットワークを展開しており[図1; Yumoto and the MAGDAS Group, 2006], そこから Sq 等価電流を推定する研究が行われてきた. 特に 210°磁気子午線(210MM)沿いには南北半球を貫くように磁力計が密に設置されており, Sq 場の緯度構造やその長期的・短期的変動を詳しく調べることができる[e.g., Yamazaki et al., 2009]. 一般に, Sq 場の長期変動は太陽表面の活動度と, 季節つまり太陽と地球の幾何学的位置関係に強く依存していることが知られている. 本論文では, 最新の MAGDAS データから導出された Sq 等価電流系について取り上げる. そこには太陽活動度や季節といったパラメータだけでは説明できない Sq 場の変動が顕著に現れている. 将来的には, このような Sq 変動成分の原因を明らかにすることが電離圏の宇宙天気予測・予報にとって不可欠である.

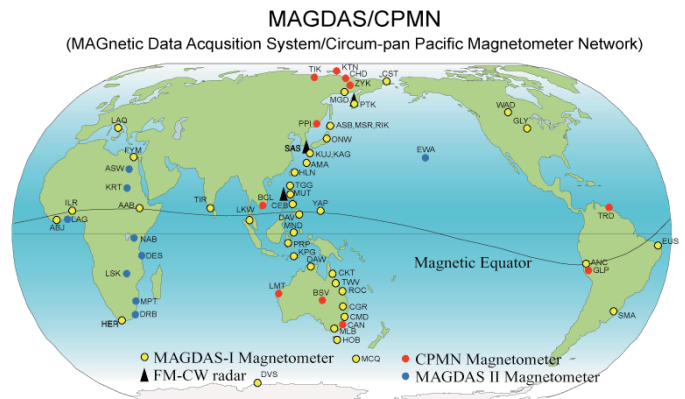


図1. MAGDAS/CPMN 観測点地図, 提供: <http://www.serc.kyushu-u.ac.jp>

2. 研究事例

図2に示すのは 2005 年 12 月 8 日(図2左)と 2007 年 12 月 8 日(図2右)の Sq 等価電流系である. 解析に使用されたデータは 210MM 域で観測された地磁気変動であり, MAGDAS/CPMN に加え, International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET: Kerridge, 2001), 地磁気世界資料センター京都(WDC for Geomagnetism, Kyoto)からの提供データを含む(謝辞参照). 観測点は 210MM 域より選ばれており, 磁気赤道域観測点(伏角緯度が $\pm 3^\circ$ 以内)は使用されていない. 図2では矢印が等価電流ベクトルを表している. 比較が容易となる様, 背面には等価電流ベクトルの大きさを色で示してある.

これら2つの等価電流系に見られる重要な違いとして, まず等価電流系の形があげられる. 2005 年 12 月 8 日の等価電流系では北半球側渦中心がローカルタイムで先行しており午前側に, 南半球渦中心は午後側に位置する. 一方, 2007 年 12 月 8 日の等価電流系では傾向が反対である, 即ち, 南半球側渦中心がローカルタイムで先行しており午前側に, 北半球渦中心は午後側に位置する. このような渦中心位置を決める要素となるのは, 電離圏電流の起電力となる風系の空間分布[Stening, 1989]であるが, それに加え, 南北半球を結ぶ沿磁力線電流を含む3次元電流系の役割も非常に大きいとされている[Takeda, 1990].

また, 等価電流の大きさにも顕著な差異がある. 2007 年 12 月 8 日の Sq 等価電流系は南半球(地方夏)で非常に大きくなっていることが分かる. Sq 等価電流系の全電流量を推定するため, 地方時 11 時から 13 時までの等価電流ベクトルの大きさを積分すると, 2007 年 12 月 8 日の Sq 等価電流系の全電流量は 2005 年 12 月 8 日の Sq 等価電流系のそれに比べて約 1.6 倍の大きさであることが分かった.

図2に示した2つの等価電流系にこれだけ顕著な差を生じさせている原因はどこにあるのかを考えることは非常に重要である. イベント日における太陽や地磁気の活動度を比較するため, 表1に関連パラメータを示す. まず, 表1から明らかのように 2005 年及び 2007 年の 12 月 8 日は地磁気的には極めて静穏であった. Kp 指数が一日を通して 0+以下を維持しつづけることは非常に稀であり, 太陽極小期でも年に数回しか起こらない(Campbell (2003)によると, Kp が 0+以下となる発生頻度は約 5%である. それが一日持続することがいかに稀かは想像に難くない.). 地磁気活動度がこのように極めて低い状態では, 地磁気活動に関連した磁気圏電流系の影響はほとんど無視できると考えられるため, Sq 電離圏電流の解析調査には好ましい. また, オーロラの活動度を示す AE 指数も一日を通して 100nT 未満と稀に見る小ささであり, オーロラの活動に関連した電離圏電流が図2に示した等価電流系に重大な影響を与えているとは考えにくい.

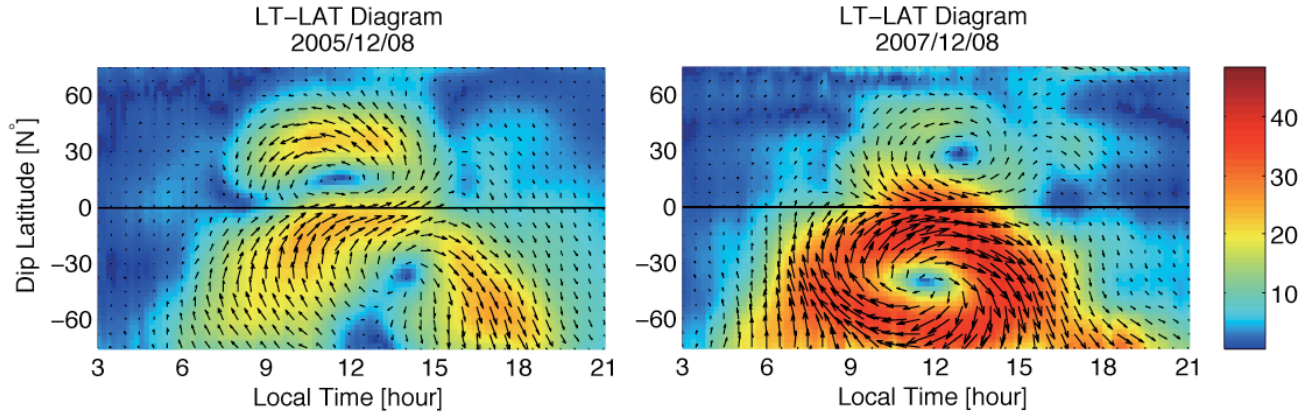


図2. Sq 等価電流系。左図は2005年12月8日の、右図は2007年12月8日の磁場データに基づく。横軸は地方時(03時から21時まで)、縦軸は伏角緯度(75°Sから75°Nまで)を示す。また、背景の色は等価電流ベクトルの大きさを示す。

太陽表面の活動度というのは電離圏電流の全電流量を支配する最も重要な要因である[Takeda, 2002]。これは通常、太陽黒点数 R や 10.7cm の太陽電波フラックス値 ($F10.7$) に代表される。表1には R と $F10.7$ の値も示しているが、両イベントにおいてほとんど違いがないことが分かる(2007年イベントの方が太陽活動度はわずかに低い)。

表1. 両イベント日における太陽活動度、地磁気活動度の比較

イベント	太陽黒点数 R [個]	$F10.7$ [$10^{-22}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$]	Kp 指数最大値*	AE 指数最大値* [nT]
2005年12月8日	25	89.6	0+	74
2007年12月8日	25	86.9	0+	91

*日本標準時(JST)の00時から24時における最大値

3. まとめ

本論文では2005年と2007年の同日(12月8日)に観測されたSq等価電流系の比較を行った。これらのイベント日においては、地磁気活動度やオーロラの活動度は極めて小さく、また太陽表面の活動度にもほとんど差が見られなかった。それにもかかわらず、観測されたSq等価電流系はその渦中心位置や全電流量において顕著な違いが見られた(2007年イベントのSq等価電流の全電流量は2005年イベントの約1.6倍と推定される)。現在の我々の知識ではここに見られる差異が何に起因するのか明言することはできない。電離圏Sq電流の研究においては、太陽風電場侵入による電離圏電場への影響や[Huang et al., 2005], 下層大気の変動に伴う変動[Miyahara and Ooishi, 1997]など、その効果が定量的に明らかにされていない部分が多くある。観測的・理論的研究からこれらの効果を定量的に評価していくことが、今後、電離圏の宇宙天気を正しく予測・予報する上で不可欠であることを本論文で示した事例研究は強く示唆している。

4. 謝辞

使用した磁場データについて、(1) MAGDAS/CPMN[http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/]より; TIK, CHD, CST, ZYK, MGD, PTK, PPI, ASB, MSR, RIK, TNO, ONW, ITA, KUJ, KAG, AMA, HLN, TGG, MUT, GUA, MND, DAW, CKT, ROC, BSV, CMD, CAN, HOB, MCQ, (2) INTERMAGNET[http://www.intermagnet.org/ImotblObs_e.html]より; IRT, MMB, BMT, KAK, KNY, LZH, PHU, KDU, CTA, ASP, EYR, (3) WDC[http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/mdplt/index.html]より; MIZ, KNZ, HTY, CBI の観測点のデータを使用させていただいた。AE 指数, Kp 指数はそれぞれ地磁気世界資料センター京都, GFZ Helmholtz Center Potsdam より、また太陽黒点数, $F10.7$ フラックス値はそれぞれ, National Geophysical Data Center, Herzberg Institute of Astrophysics [http://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/FLUX/]より提供していただいた。以上のデータ提供について感謝申し上げます。

5. References

- Campbell, W. H. (2003): *Introduction to geomagnetic fields*, pp. 175-184., United Kingdom at the University Press, Cambridge.
- Chapman, S. and J. Bartels (1940): *Geomagnetism*, Oxford University Press, London.
- Derridge, D. (2001): INTERMAGNET: Worldwide near-real-time geomagnetic observatory data, paper presented at Space Weather Workshop, Looking Towards a European Space Weather, European Space Research and Technology Centre, Noordwijk, Netherlands.
- Huang, C.-S., J. C. Foster, and M. C. Kelley (2005), Long-duration penetration of the interplanetary electric field to the low-latitude ionosphere during the main phase of magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 110, A11309, doi:10.1029/2005JA011202.
- Le Mouel, J.-L., P. Shebalin and A. Chulliat (2006): The field of the equatorial electrojet from CHAMP data. *Ann. Geophys.*, 24, 515-527.
- Miyahara, M., and M. Ooishi (1997), Variation of Sq induced by atmospheric tides simulated by a Middle Atmosphere General Circulation Model. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 49, 77 - 87.
- Onwumechili, C. A. (1992): A study of rocket measurements of ionospheric currents -II. Ionospheric currents outside the dip zone. *Geophys. J. Int.*, 108, 641-646.
- Richmond, A. D. (1989): The ionosphere and upper atmosphere. *From the sun, auroras, magnetic storms, solar flares, cosmic rays*, edited by Steven T. Suess and Bruce T. Tsurutani, pp. 35-44, American Geophysical Union, Washington, DC.
- Stening, R. J. (1989): A calculation of ionospheric currents due to semidiurnal antisymmetric tides. *J. Geophys. Res.*, 94, 1525-1531.
- Stening, R., T. Reztsova and L. H. Minh (2005): Day-to-day changes in the latitudes of the foci of the Sq current system and their relation to equatorial electro jet strength. *J. Geophys. Res.*, 110, A10308, doi:10.1029/2005JA011219.
- Takeda, M. (1990): Geomagnetic field variation and the equivalent current system generated by an ionospheric dynamo at the solstice. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 52, 59-67.
- Takeda, M. (2002): Features of global geomagnetic Sq field from 1980 to 1990. *J. Geophys. Res.*, 107(A9), 1252, doi:10.1029/2001JA009210.
- Turner, J. P. R., D. E. Winch, D. J. Ivers and R. J. Stening (2007): Regular daily variations in satellite magnetic field intensity data. *Ann. Geophys.*, 25, 2167-2174.
- Yamazaki, Y., K. Yumoto, T. Uozumi, A. Yoshikawa and M. G. Cardinal (2009): Equivalent current systems for the annual and semi-annual Sq variations observed along the 210°MM CPMN stations. *J. Geophys. Res.*, in press.
- Yumoto, K. and the MAGDAS Group (2006): MAGDAS project and its application for space weather, Solar Influence on the Heliosphere and Earth's Environment: Recent Progress and Prospects, Edited by N. Gopalswamy and A. Bhattacharyya, ISBN-81-87099-40-2, 399-405.