

2-2-6 地磁気誘導電流 (GIC) が電力網に与える影響

2-2-6 *Effects of Geomagnetically Induced Current on Power Grids*

亘 慎一 國武 学 北村健太郎 堀 智昭 菊池 崇
塩川和夫 西谷 望 片岡龍峰 上出洋介 渡辺祐司

WATARI Shinichi, KUNITAKE Manabu, KITAMURA Kentarou, HORI Tomoaki, KIKUCHI Takashi, SHIOKAWA Kazuo, NISHITANI Nozomu, KATAOKA Ryuho, KAMIDE Yosuke, and WATANABE Yuji

要旨

地磁気変動に伴う地磁気誘導電流の電力網への影響に関して多くの報告がなされている。日本は地理的な緯度と比べて地磁気的な緯度が低いため、地磁気誘導電流による電力網への影響は小さいと考えられているが、詳細な解析はなされていなかった。本稿では、情報通信研究機構、北海道電力、名古屋大学太陽地球環境研究所の連携により北海道で実施した約 2 年間の地磁気誘導電流の測定結果について述べる。

There have been numerous reports about effects of geomagnetically induced current (GIC) on power grids. The effect of GIC is believed to be small in Japan because of her low geomagnetic latitude. We need more detailed analysis to evaluate the effect of GIC. In this paper, we report the result of a GIC study carried out by the collaboration among National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Hokkaido Electric Power Co., Inc., and Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL), Nagoya University.

[キーワード]

地磁気誘導電流, 地磁気嵐, 電力網

Geomagnetically Induced Current (GIC), Geomagnetic storm, Power grid

1 まえがき

電力網において、発電所や変電所の変圧器の中性点は安全のため、通常、地面に接地されている。このため、地磁気変動によって中性点の間に電位差が生ずると、図 1 に示したように中性点を通して電流が流れることになる。この電流を地磁気誘導電流 (GIC : Geomagnetically Induced Current) と呼んでいる [1] - [3]。中性点にゆっくりと変動する電流が流れると変圧器の動作点がずれ、変圧器でのロスにより変圧器が過熱したり、高調波が発生して、保護用リレーの誤動作を起こしたりすることが知られている。

北米や北欧などでは、地理的な緯度と比べて地磁気的な緯度が高いため、GIC による電力設備の

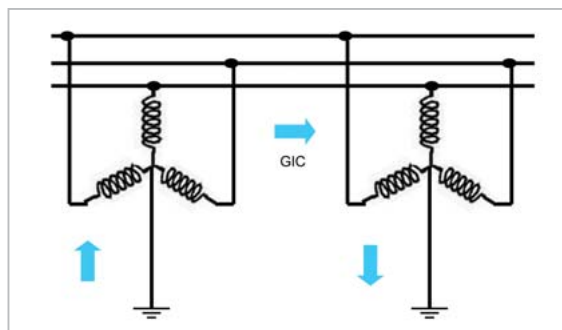


図 1 地磁気変動に伴って電力網に流れる地磁気誘導電流 (GIC)

障害がこれまでに何例か報告されている [1] - [3]。1989 年 3 月 13 日には、大きな地磁気嵐による GIC のため、カナダのケベックで大規模な停電が発生して約 600 万人が暗闇の中で 9 時間過ごすことになった [2] - [4]。また、2003 年 10 月 30 日には、南スウェーデンのマルモで GIC による電力網の障害のため停電が発生して約 5 万人が影響を受けた [5]。

オーロラが見られるような高緯度の地域では、オーロラ活動に伴う強い電流によって電力網に大きな GIC が流れることが知られている [6]。惑星間空間衝撃波の到来に伴うインパルスな地磁気の変化による GIC が電力網に障害を与えることがある。Kappenman は、1991 年 3 月 24 日の惑星間空間衝撃波の到来に伴うインパルスな地磁気変動により米国で大きな GIC が測定されたことを報告している [7]。また、地磁氣的に低緯度の地域でも地磁気嵐の主相で大きな GIC が流れる場合があることが報告されている [8]。

日本は地理的な緯度に比べて地磁氣的な緯度が比較的低位のため、これまでのところ GIC による障害は報告されていない。しかし、地磁気嵐は自然現象であり、これまでにない大きな地磁気嵐が発生する可能性を完全に否定することはできない。表 1 に示す気象庁の女満別地磁気観測所で過去約 50 年間に観測された主な地磁気嵐のリストによると、過去に大きな地磁気嵐がいくつか発生していることがわかる。そこで、基礎的なデータを取得して詳細な解析を行うために北海道において、地磁気変動に伴って電力網に流れる GIC の測定を約 2 年間継続して実施した [9] ので、その結果について報告する。

表 1 気象庁の女満別地磁気観測所で 1957 年に以降に観測された主な地磁気嵐

No.	開始 (UT)	継続時間 (h)	急始変化量 (nT)	水平成分の最大変化量 (nT)
1	1982/07/13 1617	---	148	796
2	1989/03/13 0127	68.6	94	747
3	1958/07/08 0748	51.2	165	565
4	1959/07/15 0802	42.0	92	563
5	1958/02/11 0126	52.6	50	557
6	1967/05/25 1235	103.4	202	547
7	2000/07/15 1436	27.4	180	520
8	1972/08/05 1400	52.0	63	520
9	2003/10/29 0611	---	112	513
10	1960/11/12 1348	56.2	48	490

2 地磁気誘導電流の測定およびデータについて

北海道電力の女満別変電所で行った 2005 年 12 月から 2007 年 12 月までの約 2 年間の地磁気誘導電流の測定データに関して解析を行った。女満別変電所は女満別と十勝を結ぶ約 95 km の 187 KV 送電線の幹線の東端にあたる。直流電流の計測が可能なホール素子を使ったクランプオン電流計を変圧器 (187/66 kV) の中性線に設置して測定を行った。データのサンプリングレートは、デジタル型保護リレーの検出感度や高調波成分の分析などを考慮して 1 ミリ秒とした。測定で得られた地磁気誘導電流の 1 秒値と気象庁の女満別地磁気観測所の地磁気三成分の 1 秒値データを用いて解析を行った。

表 2 気象庁の女満別地磁気観測所から報告された 2005 年 12 月から 2007 年 12 月に発生した地磁気嵐と測定された GIC の最大値

開始 (UT)	終了 (UT)	タイプ	水平成分の最大変化量 (nT)	測定された GIC の最大 (A)
2006/04/04 07.6	2006/04/06 16:00	緩始型	132	1.29
2006/04/08 22.3	2006/04/10 18:00	緩始型	106	0.95
2006/04/14 01.6	2006/04/16 17:00	緩始型	157	1.58
2006/07/27 13:53	2006/07/28 17:00	急始型	130	1.06
2006/08/07 00:35	2006/08/07 21:00	急始型	97	1.29
2006/08/19 10.5	2006/08/20 19:00	緩始型	103	1.52
2006/11/09 13.0	2006/11/11 21:00	緩始型	122	2.23
2006/11/30 02.4	2006/11/30 22:00	緩始型	108	1.75
2006/12/05 22.2	2006/12/07 18:00	緩始型	101	0.78
2006/12/14 1414	2006/12/16 00:00	急始型	239	3.85
2007/07/10 18.1	2007/07/11 10.7	緩始型	100	0.98
2007/07/20 0616	2007/07/20 13.5	急始型	86	0.66
2007/11/20 0908	2007/11/21 17:00	急始型	105	1.13
2007/12/17 0252	2007/12/17 24:00	急始型	103	0.77

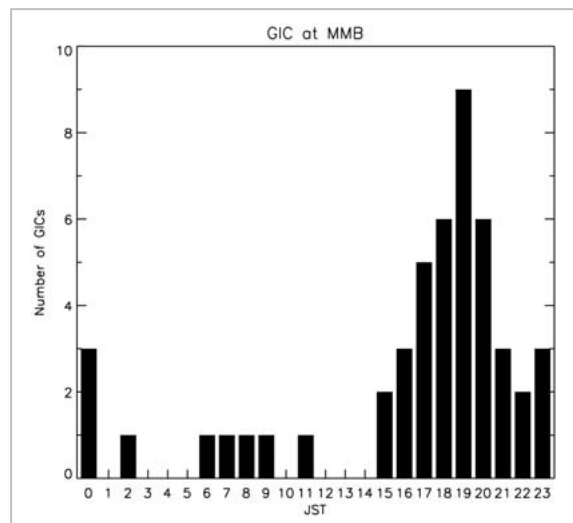


図 2 GIC 発生の地方時依存性

3 地磁気誘導電流と地磁気活動について

表2に気象庁の女満別地磁気観測所から報告された2005年12月から2007年12月に発生した地磁気嵐とその際に測定されたGICの最大値を示す。この期間は、平均すると約11年周期で変動する太陽活動の極小期にあたるため、表2からわかるようにそれほど大きな地磁気嵐は発生していない。しかし、オーロラ活動に伴う地磁気水平成分の湾型の変動(湾型地磁気擾乱)に伴って1アンペア程度のGICがしばしば測定されている。また、惑星間空間衝撃波の到来に伴う地磁気のインパルス的な変動に伴うGIC、地磁気脈動に伴うGICも何例か観測された。

図2に2005年12月から2007年12月の間に測定された大きさが1アンペア以上のGIC発生の時刻分布を示す。図からGICイベントの発生は夜19時JST頃によく観測されることがわかる。オーロラ活動は、真夜中から明け方にかけて活発になる傾向があるが、必ずしもこの傾向とは一致していないようである。

4 地磁気活動に伴って観測された地磁気誘導電流の例

4.1 地磁気嵐に伴うGICの例

2005年12月から2008年12月までの期間に観測されたGICで最大のものは2006年12月14日

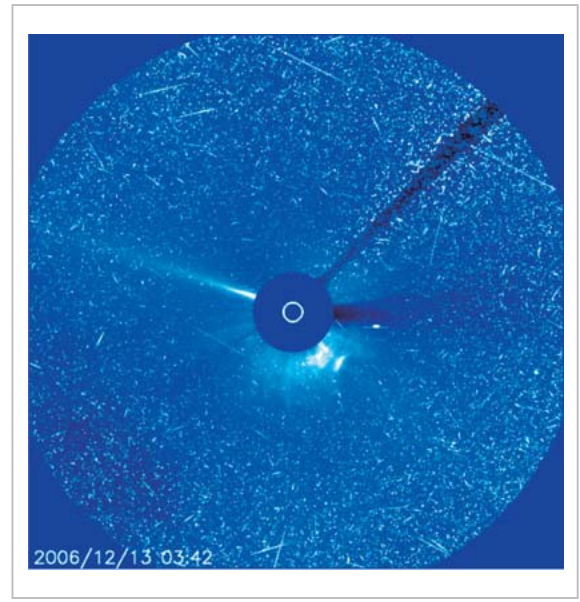


図3 SOHO/LASCO (ESA&NASA) によって観測された地磁気嵐の原因となったCME

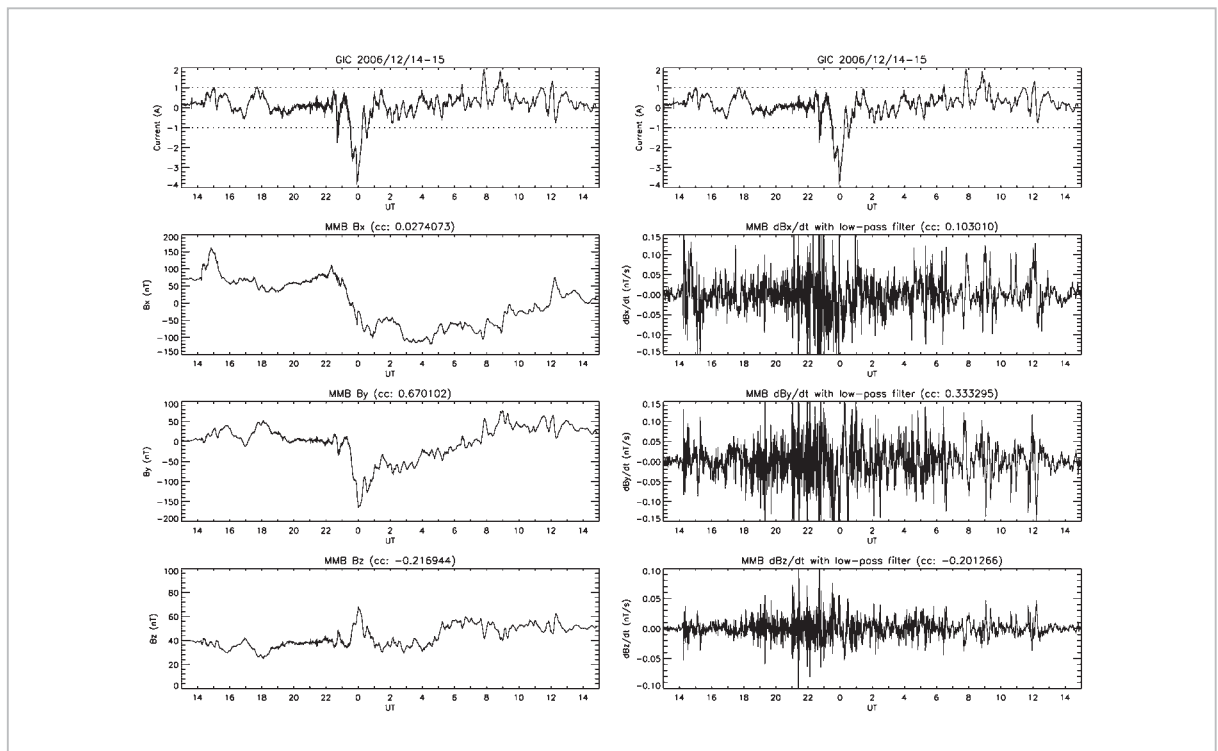


図4 地磁気嵐に伴うGICの例

に発生した地磁気嵐の急始部の地磁気の急激な変動に対応したもので、約3アンペアの電流が観測された。この地磁気嵐は12月13日の2時40分UTに活動領域10930で発生したX3/4Bフレアに伴うfull-halo CME (Coronal Mass Ejection)によるものである。日本の太陽観測衛星「ひので」の観測によれば、このフレアは白色光フレアであった[10]。図3にSOHO/LASCO (ESA&NASA)によって観測された地磁気嵐の原因となったCMEを示す。このフレアに伴う太陽高エネルギー粒子により地上の中性子モニターでフラックスの増加が観測された。Full-halo CMEによる惑星間空間衝撃波の到来に伴い、14日の14時14分UTに急始型の地磁気嵐が発生した。地磁気嵐の初相から主相へ向けての地磁気の大きな変動により、これまでの測定で最大のGICが観測された。図4にこの地磁気嵐に伴うGICの例を示す。図からGICは、地磁気(B_y成分およびB_z成分)の変動とよい相関があることがわかる。

4.2 惑星間空間衝撃波の伴うインパルスな地磁気変動に伴うGICの例

SSC (Sudden Storm Commencement)あるいはSI (Sudden Impulse)と呼ばれる惑星間空間衝撃波の到来に伴う地磁気のインパルスな変動がGICを発生させることがある[6]。図5にSIによるGICの例を示す。図から測定されたGICは、地磁気(B_y成分およびB_z成分)の変動とよい相関を持つことがわかる。このSIは、7月6日に発生したpartial halo CMEに伴う惑星間空間衝撃波の到来により引き起こされたものである。CMEに関連して活動領域10898で発生したM2.5/2FのLDE (Long Duration Event)フレアが観測されている。また、10 MeVより高いエネルギーを持った太陽高エネルギー粒子が米国の気象衛星GOESで観測されている。

4.3 オーロラ活動に伴うGICの例

高緯度地方では、オーロラ活動に伴う強い電流がGICの原因となることが知られている[8][11]。

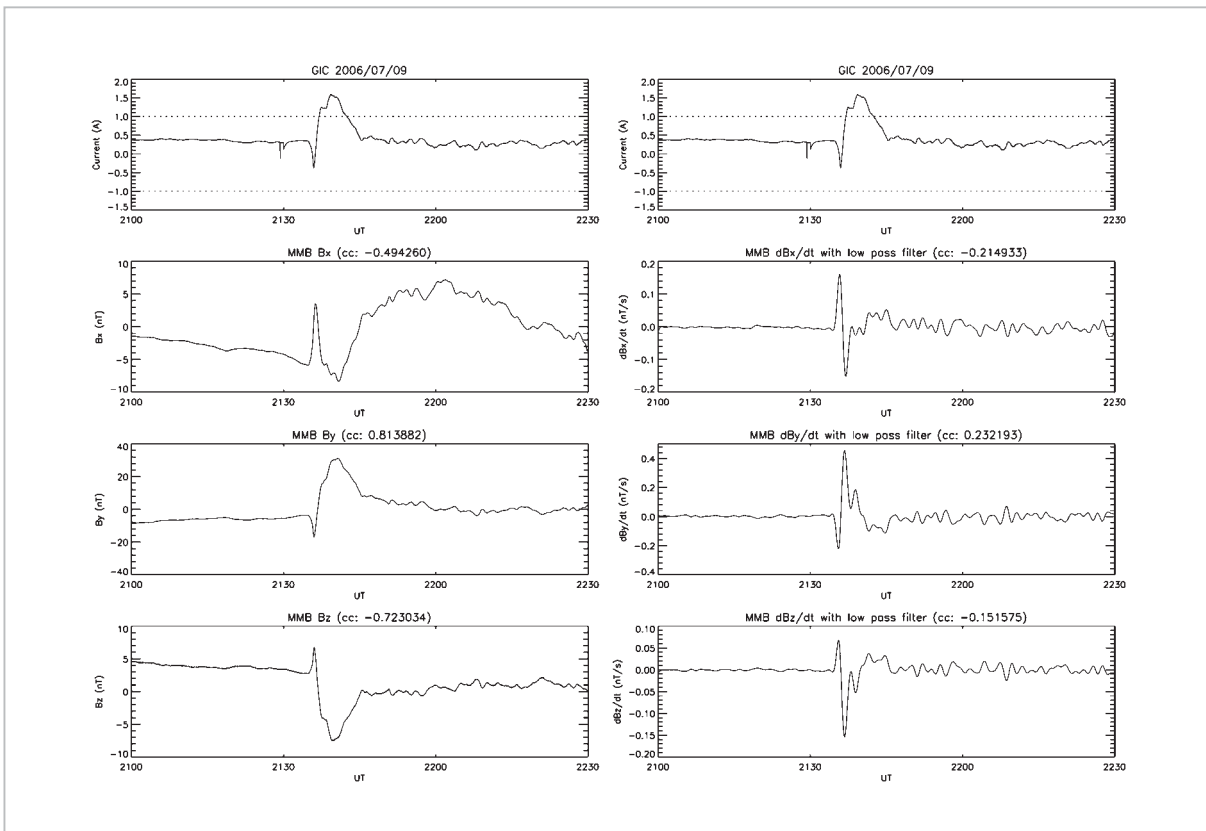


図5 惑星間空間衝撃波によるインパルスな地磁気変動に伴うGICの例

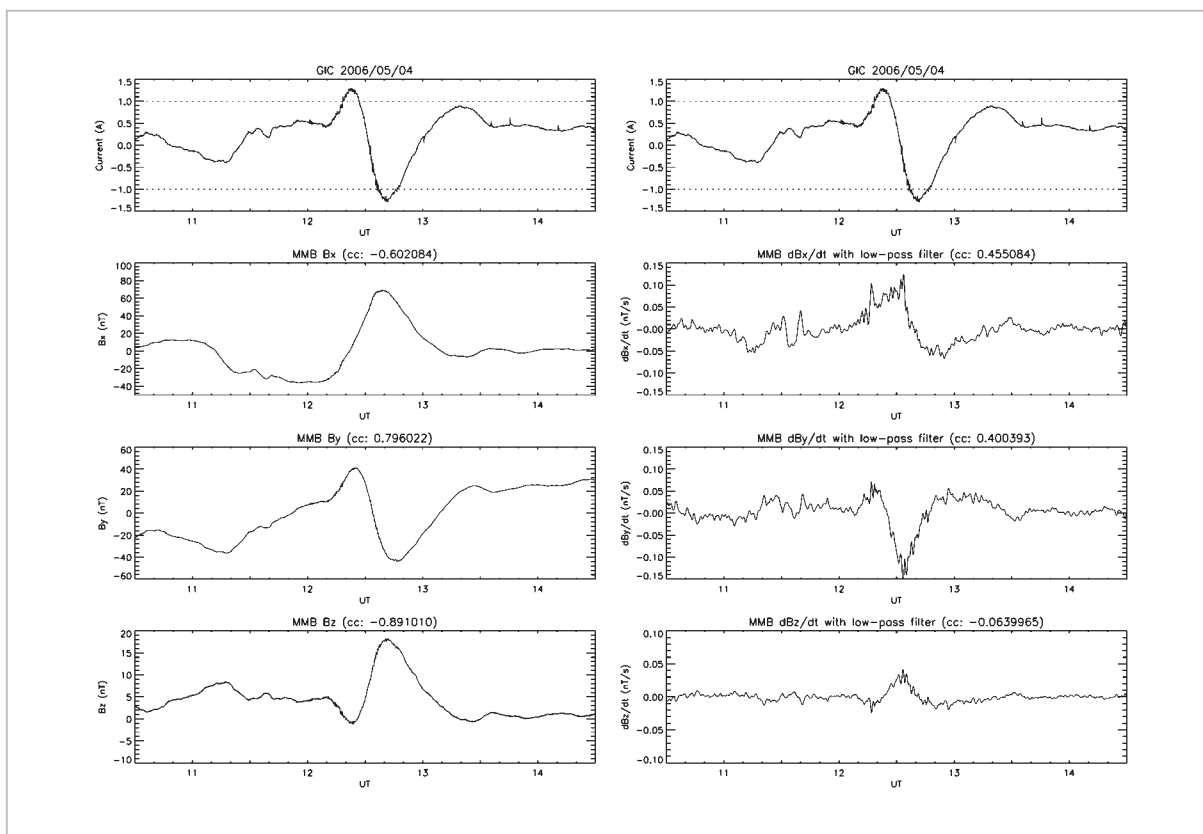


図6 オーロラ活動に伴う GIC の例

オーロラ活動に伴って、中緯度では、湾型地磁気擾乱が引き起こされる[12]。この地磁気変動を「ポジティブベイ」と呼ぶ。北海道における GIC の測定により、ポジティブベイに伴う GIC がしばしば発生することがわかった。ポジティブベイに伴う GIC の例を図 6 に示す。

4.4 地磁気脈動に伴う GIC の例

周期が 0.2 秒から 100 秒くらいの周期的な地磁気の変動を地磁気脈動という[13]。この地磁気脈動に伴って GIC が観測されることがある。図 7 に地磁気脈動に伴う GIC の例を示す。北欧のパイプラインで測定された GIC に関して、周期が 1 から 600 秒の地磁気脈動による GIC が報告されている[14][15]。図 7 で 23 時 UT から 3 時 UT に観測された GIC は、コロナホールからの高速太陽風に関連した地磁気脈動に対応したものである。地磁気脈動による GIC は振幅が小さいため、電力網への影響はほとんどないと考えられる。しかし、地磁気脈動により頻繁に GIC が流れるこ

とにより、高緯度地方ではパイプラインの電気的な腐食を引き起こす要因になる可能性がある。

5 測定結果に関する検討

電磁誘導の法則によれば、地磁気変動の時間微分が測定される GIC となる。しかし、北海道での GIC の測定結果は、図 4、5、6、7 からわかるように地磁気 (By 成分および Bz 成分) の変動と良い相関を示している。Lanzerotti ら[16]は、海底ケーブルの GIC 測定で同様の傾向が得られたことを報告している。Trichenko と Boteler[17]は、地下の導電率の構造により、GIC と地磁気変動がよい相関をもつことがあることを指摘している。Pulkkinen[18]は、地下の浅い領域の導電率が高いモデルを使うことにより、この特性を説明できるとしている。このことは、GIC の予測をするためには地下の導電率の構造が重要であることを示している。大和田[19]は、気象庁の女満別地磁気観測所の地電流と地磁気の観測データから地下の導

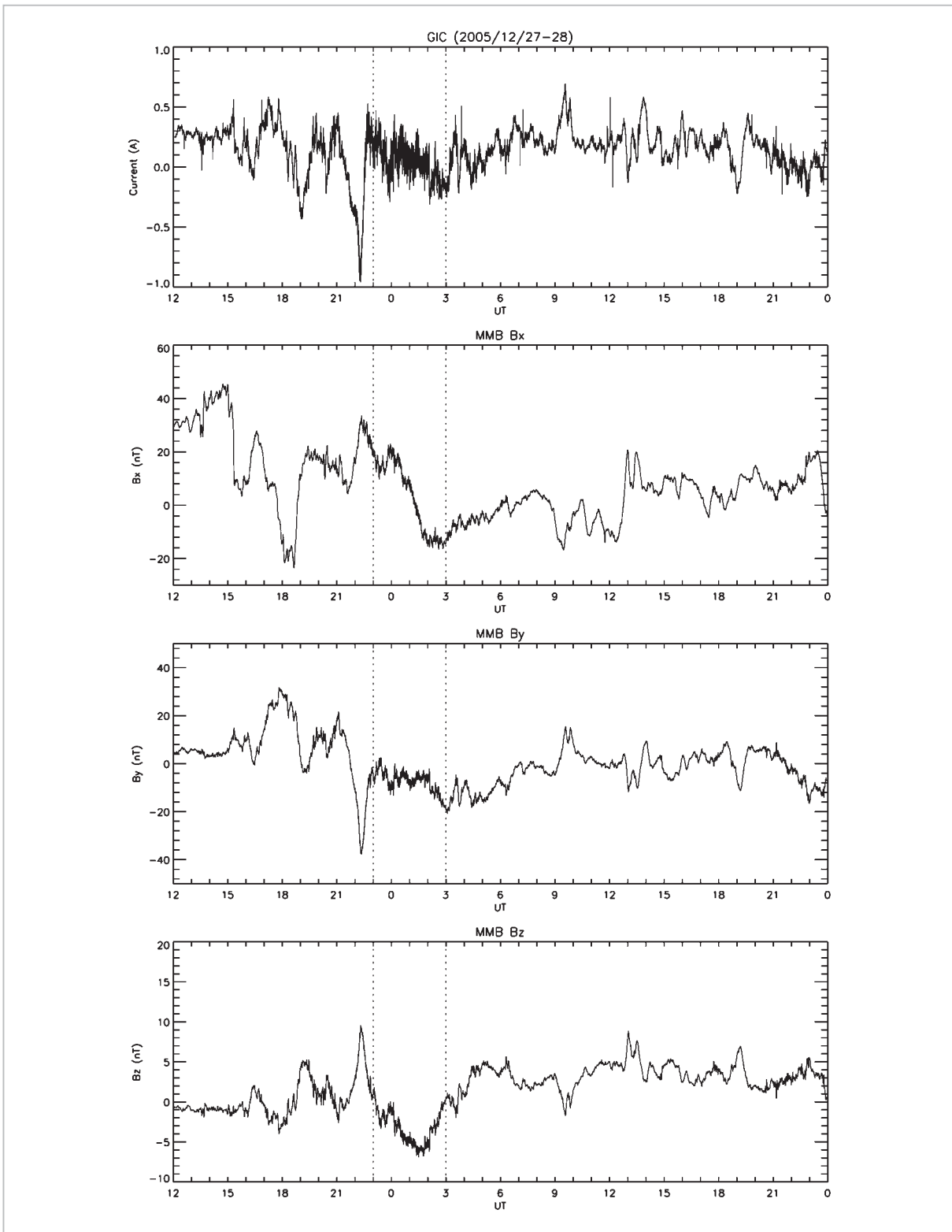


図7 地磁気脈動に伴う GIC の例

電率の計算を行い、8～20 km の深さの導電率は $3 \times 10^{-17} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ 、20～90 km の深さの導電率は $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ S/m}$ 、90～170 km の深

さの導電率は $3 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ と報告している。

図8は、表2の地磁気嵐について、水平成分減

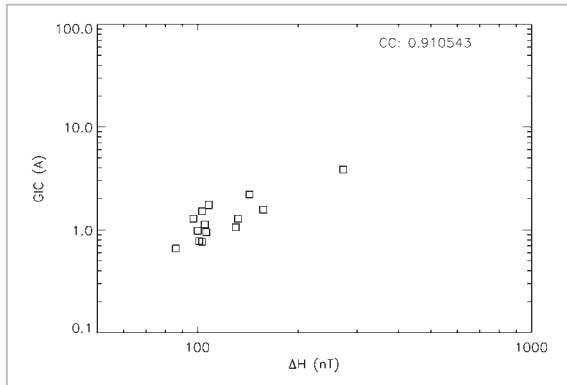


図8 表2の地磁気嵐についての水平成分減少の最大値 ΔH とそれに対応する GIC の最大値のプロット

少の最大値 ΔH とそれに対応する GIC の最大値をプロットしたものである。両者の相関係数は、0.91 と良い相関を持っている。図8のデータに対して最小二乗法によりフィッティングを行った結果が式1である。

$$\text{GIC の最大値 (A)} = 0.0158 \times \Delta H \text{ (nT)} - 0.558 \quad (1)$$

表1の1957年以降、女満別地磁気観測所で観測された1982年7月13日の地磁気嵐の際の ΔH

参考文献

- 1 J. G. Kappenman, V. D. Albertson, and N. Mohan, "Current transformer and relay performance in the presence of geomagnetically-induced currents", IEEE Trans. Power App. & Sys., PAS-100, pp.1078, 1981.
- 2 J. G. Kappenman, "An introduction to power grid impacts and vulnerabilities from space weather", in Space Storms and Space Weather Hazards (Edited by I.A. Daglis), pp.335-361, NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- 3 D. H. Boteler, "Space Weather Effects on Power Systems, in Space Weather", Geophys. Monogr. Ser., Vol.125, edited by P. Song, H. Singer, and G. Siscoe, AGU, Washington, D.C., pp.347-352, 2001.
- 4 D. H. Boteler, R. M. Shier, T. Watanabe, and R. E. Horita, "Effects of geomagnetically induced currents in the B. C. Hydro 500 kV system", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.4, pp.818, 1989.
- 5 A. Pulkkinen, S. Lindahl, A. Viljanen, and R. Pirjola, "Geomagnetic storm of 29-31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system", Space Weather, Vol.3(8), S08C03, doi:10.1029/2004SW000123, 2005.
- 6 J. G. Kappenman, "An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29-31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms", Space Weather, Vol.3(8), S08C01, doi:10.1029/2004SW000128, 2005.

の値、796 nT を式2に入れてやると、GIC の最大値は、約12アンペアと予測される。

6 むすび

これまで地磁気緯度の高い地域において GIC の研究が進められてきたが、北海道電力の協力のもとに地磁氣的に緯度の低い日本での GIC に関する長期間のデータを得ることができた。今回の測定データでは、ほぼ地磁気変動の大きさに比例する地磁気誘導電流が測定された。これは、測定を行った電力網のある地域の地下の浅い領域の導電率が高いことによるものと考えられる。得られた結果は、大きな地磁気嵐が発生した際の GIC の予測に役立つと思われる。

謝辞

女満別観測所で観測された地磁気三成分の1秒データおよび地磁気嵐のリストの提供に関して気象庁地磁気観測所柿岡に感謝する。

- 7 J. G. Kappenman, "Storm sudden commencement events and the associated geomagnetically induced current risks to groundbased systems at low-latitude and midlatitude locations", *Space Weather*, Vol.1(3), 1016, doi:10.1029/2003SW000009, 2003.
- 8 J. G. Kappenman, "Space weather and the vulnerability of electric power grids, in *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure* (Edited by I.A. Daglis)", pp.257-299, NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- 9 S. Watari, M. Kunitake, K. Kitamura, T. Hori, T. Kikuchi, K. Shiokawa, N. Nishitani, R. Kataoka, Y. Kamide, T. Aso, Y. Watanabe, and Y. Tsuneta, "Measurements of geomagnetically induced current in a power grid in Hokkaido, Japan", *Space Weather*, Vol.7(3), 10.1029/2008SW000417, 2009.
- 10 H. Isobe, M. Kubo, T. Minoshima, K. Ichimoto, Y. Katsukawa, T. D. Tarbell, S. Tsuneta, T. E. Berger, B. Lites, S. Nagata, T. Shimizu, R. A. Shine, Y. Suematsu, and A. M. Title, "Flare ribbons observed with G-band and Fe I 6302A Filters of the solar optical telescope on board Hinode", *Publ. Astron. Soc. Japan*, Vol.59, pp.S807-S813, 2007.
- 11 D. H. Boteler, R. J. Pirola, and H. Nenalanina, "The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface", *Adv. Space Res.*, Vol.22(1), pp.17-27, 1998.
- 12 G. Rostoker, S. - I. Akasofu, J. Foster, R. A. Greenwald, Y. Kamide, K. Kawasaki, A. T. Y. Lui, R. L. McPerron, and C. T. Russell, "Magnetospheric substorms- Definition and signatures", *J. Geophys. Res.*, Vol.85(A4), pp.1663-1668, 1980.
- 13 W. J. Hughes, "Magnetospheric ULF waves: A tutorial with a historical perspective, in *Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves, Space Weather*", *Geophys. Monogr. Ser.*, Vol.81, edited by M. J. Engebretson, K. Takahashi, and M. Scholer, AGU, Washington D.C., pp.1-11, 1994.
- 14 A. Pulkkinen and R. Kataoka, "S-transform view of geomagnetically induced currents during geomagnetic superstorms", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.33, L12108, doi:10.1029/2006GL025822, 2006.
- 15 R. Kataoka and A. Pulkkinen, "Geomagnetically induced currents during intense storms driven by coronal mass ejections and corotating regions", *J. Geophys. Res.*, Vol.113, A03S12, doi:10.1029/2007JA012487, 2008.
- 16 L. J. Lanzerotti, L. V. Medford, C. G. MacLennan, and D. J. Thomson, "Studies of large-scale earth potential across oceanic distances", *AT&T Technical Journal*, May/June, pp.73-84, 1995.
- 17 L. Trichenko and D. V. Boteler, "Response of power systems to the temporal characteristics of geomagnetic storms", *IEEE CCECE/CCGEI*, Ottawa, May 2006, pp.390-393, 2006.
- 18 Pulkkinen, 私信による, 2009.
- 19 大和田真一, "地磁気地電流法による女満別の地下電気伝導度について", *地磁気観測所要報*, 第14巻, 第2号, pp.77-86, 1972.



伊 慎一

電磁波計測研究センター宇宙環境計測グループ研究マネージャー 博士(理学)
太陽地球系物理学、宇宙天気



國武 学

電磁波計測研究センター宇宙環境計測グループ主任研究員
磁気圏物理学、超高層物理学



北村健太郎

徳山工業高等専門学校機械電気工学科助教 博士(理学)
太陽地球系物理学、宇宙天気



埴 智皓

名古屋大学太陽地球環境研究所特任助教 博士(理学)
磁気圏物理学



菊池 崇

名古屋大学太陽地球環境研究所教授 理学博士
超高層物理学



塩川和夫

名古屋大学太陽地球環境研究所教授 博士(理学)
超高層物理学

西谷 望

名古屋大学太陽地球環境研究所准教授 博士(理学)
磁気圏・電離圏・熱圏ダイナミクス

片岡龍峰

東京工業大学理学研究流動機構特任助教 博士(理学)
磁気圏物理学

上出洋介

名古屋大学名誉教授 理学博士
太陽地球系物理学

渡辺祐司

北海道電力総合研究所太陽光発電プロジェクト推進室PVシステム研究グループ