

## 宇宙天気の電力網への影響と北海道での地磁気誘導電流 (GIC) 測定について

亙 慎一  
(情報通信研究機構)

Effect of space weather on power grids and measurement of geomagnetically induced current (GIC) in Hokkaido

Shinichi Watari  
(National Institute of Information and Communications Technology)

## 概 要

宇宙天気が電力網へ与える影響について過去の事例などを上げて述べるとともに 2005 年末から 2008 年はじめにかけて北海道で実施した地磁気誘導電流 (GIC) の測定について報告する。

## Abstract

Effect of space weather on power grids is described with several examples and the measurement of the geomagnetically induced current (GIC) carried out in Hokkaido from the end of 2005 to the beginning of 2008 will be reported.

## 1. 電力網に影響を与える宇宙天気

太陽フレアなど主に太陽活動により引き起こされる人間や人間が作ったシステムに影響を与えるような宇宙環境の擾乱を「宇宙天気」と呼んでいる (Lanzerotti, 2001)。

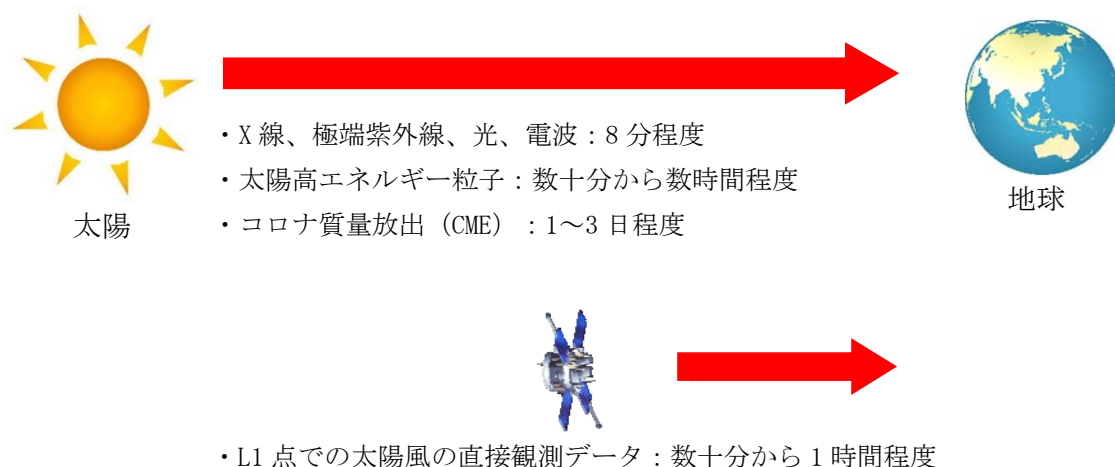
第 1 表 宇宙天気の影響を受けるシステムと原因となる宇宙天気現象

Table 1. Systems affected by space weather and space weather sources of effects.

宇宙天気の影響を受けるシステム	原因となる宇宙天気現象
電力網、パイプライン、海底ケーブル	地磁気擾乱
人工衛星、有人宇宙活動	太陽高エネルギー粒子 地球磁気圏の放射線帯粒子
低軌道周回衛星やデブリの軌道	太陽放射 地磁気擾乱
人工衛星を利用した測位	地球電離圏の擾乱
短波電波を用いた通信	太陽放射 太陽フレア 地球電離圏の擾乱

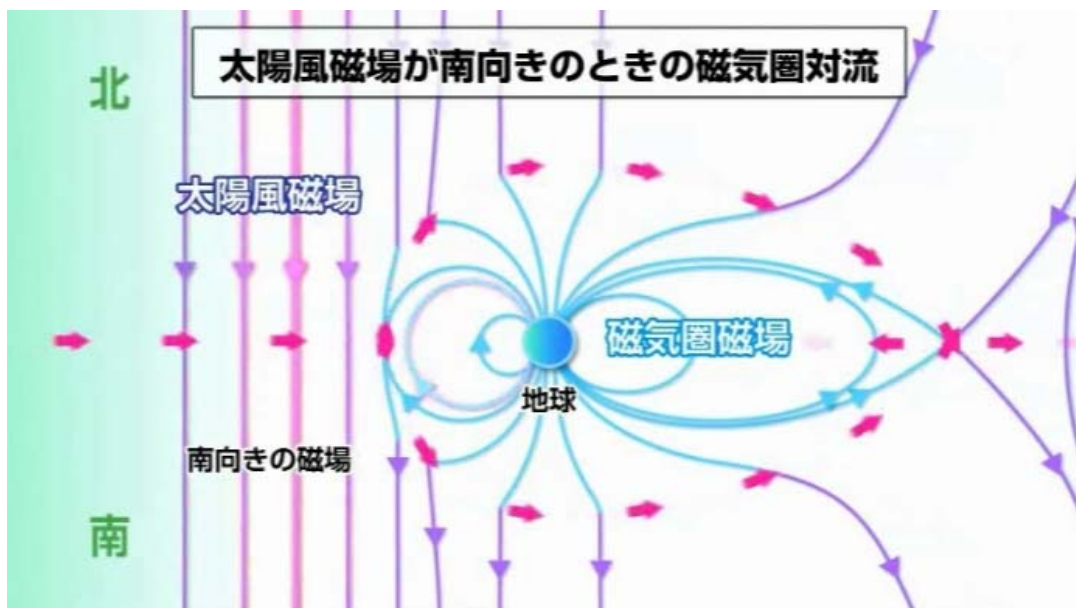
第1表に示したように宇宙天気は、電力網、人工衛星、人工衛星を利用した測位 (GNSS: Global Navigation Satellite System)、短波電波を用いた通信などに影響を及ぼすことが知られている。電力網の障害は、地磁気擾乱 (GMD: Geomagnetic Disturbance) による地磁気誘導電流 (GIC: Geomagnetically Induced Current) が送電網に流れることにより引き起こされる。地磁気嵐の大きさを表す Dst 指数で見たとき過去約 50 年間で最大規模の 1989 年 3 月の地磁気嵐の際にカナダのケベック州で大規模な停電が発生した (Boteler, 2001)。また、2003 年 10 月の地磁気嵐の際には、スウェーデンのマルメで停電が発生した (Pulkkinen et al., 2005)。この地磁気嵐に関連して南アフリカ共和国では、トランスの焼損が報告されている (Gaunt and Coetzee, 2007)。

津波の予測において、地震波の観測データから得られた地震の情報 (発生時刻、発生場所、規模) を用いて津波の影響を受ける地域や到来時刻の予測を行うように、「宇宙天気予報」においても、太陽フレアやコロナ質量放出 (CME: Coronal Mass Ejection) の発生から約 8 分遅れで地球へ到来する X 線、極端紫外線、光、電波などの電磁波による観測データで得られた太陽フレアや CME の情報 (発生位置、放出方向、放出速度、放出の広がり) をもとに地球への影響の有無や到来時刻の予測を行う (第 1 図)。特に GIC の原因となる地磁気擾乱に関しては、太陽風が運んでくる磁場の方向が重要である。第 2 図に示すように南向きの磁場を持った太陽風が地球磁気圏の北向きの磁場と相互作用して地磁気擾乱が引き起こされる。Gonzalez and Tsurutani (1987) によれば、10nT を超える強さを持つ南向きの太陽風磁場が 3 時間を超えて続くと Dst 指数が -100nT を下回る地磁気嵐が発生すると言われている。太陽と地球の重量が釣り合うラグランジュ点 (L1) では、1997 年に打ち上げられた NASA の ACE (Advanced Composition Explorer) 衛星による太陽風の直接観測が行われており、この衛星から送られてくるリアルタイムデータを用いることにより数十分から 1 時間程度先の地磁気擾乱の発生予測を行うことができる。2015 年はじめには、ACE 衛星の後継機である DSCOVR (Deep Space Climate Observatory) 衛星が打ち上げられる予定である。



第 1 図 太陽での現象の地球までの到来時間

Fig.1 Arrival time of solar events to the Earth.



第 2 図 太陽風磁場と地球磁気圏の相互作用

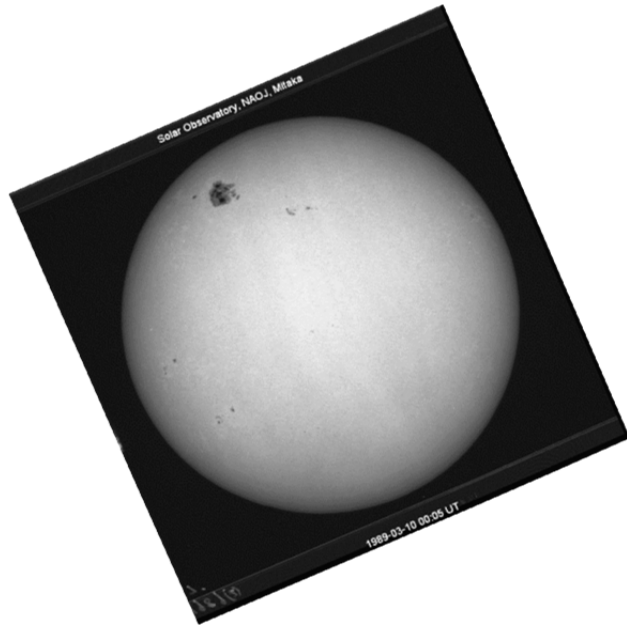
Fig. 2 Interaction between magnetic field of solar wind and Earth's magnetosphere.

電力網への GIC の影響を評価する際には、過去に発生した大きな地磁気嵐の調査、統計的処理による発生確率の計算、太陽型の恒星でのフレア発生の研究などにより、どれくらい大きな地磁気嵐がどれくらいの頻度で発生する可能性があるのかについて評価する必要がある (Hapgood, 2011)。

第 2 表 1868 年以降に観測された大きな地磁気 aa 指数

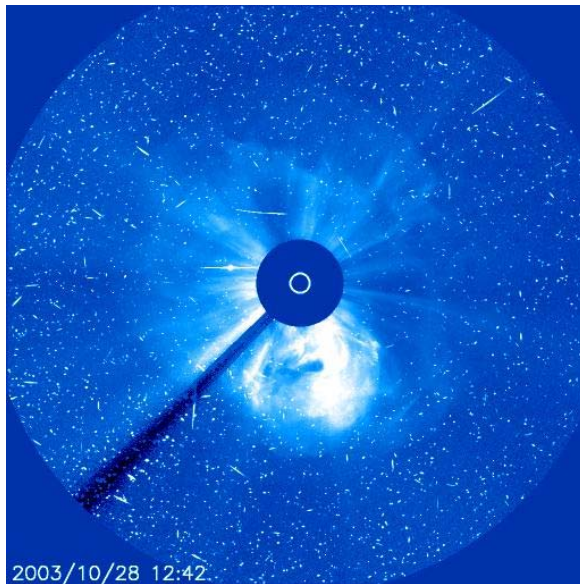
Table 2 Large aa-index since 1868.

no.	年月日	1 日の内で最大の aa 指数 (nT)
1	1989/03/14	715
	1989/03/15	715
	2003/10/29	715
4	1958/07/08	698
	1959/07/15	698
	1972/08/04	698
7	1921/05/14	680
	1921/05/05	680
9	1872/02/04	658
	1892/02/14	658
	1903/10/31	658
	1909/09/25	658



第3図 国立天文台で観測された1989年3月の地磁気嵐の原因となったと考えられるX4.5/3Bフレアが発生した黒点群 (AR5395)

Fig3. Sunspot group (AR5395) produced X4.5/3B flare associated with the geomagnetic storm in March, 1989. It was observed by the National Astronomical Observatory Japan (NAOJ).



第4図 SOHO衛星 (ESA/NASA) によって観測された2003年10月の地磁気嵐の原因となったX17.2/4Bフレアに伴うコロナ質量放出

Fig4. Coronal mass ejection (CME) associated X17.2/4B flare. This CME caused the geomagnetic storm in October, 2003. It was observed by SOHO (ESA/NASA).

第2表は、1868年から現在までに観測された大きな地磁気 aa 指数の値を示したものである。この表によると停電の原因となった1989年3月及び2003年10月の地磁気嵐の際に、過去約150年間で最も大きなaa指数が観測されていることがわかる。1989年3月の地磁気嵐に関しては、第3図に1989年3月の地磁気嵐の原因となった太陽フレアを発生した黒点群、第4図に2003年10月の地磁気嵐の原因となったCMEをそれぞれ示す。第3表によると1898年3月の地磁気嵐は、1874年以降に観測された黒点群で8番目くらいに大きな黒点群で発生したことがわかる。1859年9月には、Dst指数で1989年3月の地磁気嵐の約3倍の-1760nT程度の地磁気嵐が発生したのではないかとされている (Tsurutani et al., 2003)。この現象は、「キャリントン・イベント」と呼ばれている。最近では、2012年7月に地球から見て太陽の西側へ放出されたCMEについて、NASAのSTEREO探査機による太陽風の直接観測データを用いた解析から、この現象が地球に到来していれば、Dst指数で1989年3月の地磁気嵐の約2倍の-1182nT程度の地磁気嵐が発生したのではないかと考えられている (Baker et al., 2013)。一方、太陽型の恒星でのフレア観測データを用いた研究によれば、重要度がX1000クラスのフレアが800年に一度くらいの割合で発生する可能性があるという結果が出されている (Maehara et al, 2012; Shibata et al., 2013)。

第3表 1874年以降に観測された大きな面積を持った黒点群  
(グリニッジ及びNOAAデータによる)

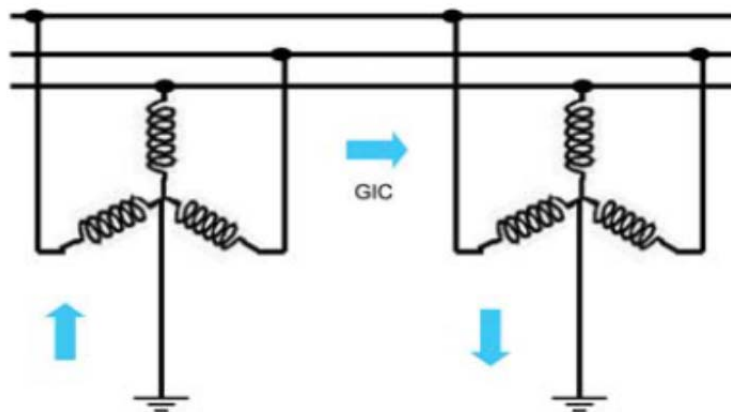
Table 3 Sunspot group with large area using Greenwich and NOAA data since 1874.

no.	年月日	面積 (millionths of solar disk)
1	1947/04/08	6,132
2	1946/02/07	5,202
3	1951/05/19	4,865
4	1946/07/29	4,720
5	1947/03/12	4,554
6	1926/01/19	3,716
7	1938/01/21	3,627
8	1989/03/17	3,600
9	1917/02/14	3,590
10	1938/07/20	3,379

## 2. 地磁気誘導電流の電力システムへの影響

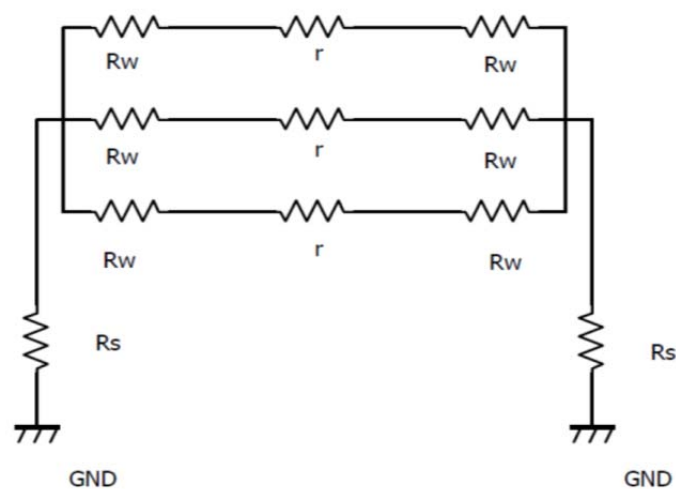
第5図に示すように送電網のトランスの中性点は、安全のために接地されている。このため、GICによる準直流電流が流れることにより、送電網のトランスに磁気飽和が起こり、以下のような影響が発生する可能性がある。

- (1) 磁気コアからの漏洩磁束による磁気コア付近の加熱及び加熱による絶縁オイルの劣化
  - ・ 1989年3月に発生した米国ニュージャージー州の発電所トランスの焼損
  - ・ 2003年10-11月に発生した南アフリカ共和国の電力網でのトランスの焼損
- (2) 無効電力の増加による電圧の低下
- (3) 波形歪による高調波の発生
- (4) 保護リレーの不要動作
  - ・ 1989年3月13日に発生したカナダ・ケベック州での停電
  - ・ 2003年10月30日に発生したスウェーデンのマルメでの停電



第5図 地磁気擾乱に伴って送電線に流れる地磁気誘導電流

Fig. 5 Geomagnetically induced current of a power line by geomagnetic disturbance.



第6図 第5図に示した電力線の等価回路

Fig. 6 Equivalent circuit of the power line shown in Fig. 5.

第5図に示した両端が設置された送電線の長さを  $L$  とし、送電線と平行に一様な電場  $E$  (V/km) 印加された場合の電流  $I$  を計算する。送電線の単位長当たりの抵抗値を  $r$  ( $\Omega$ /km)、また、両端で同じトランスの巻線抵抗値  $R_w$  ( $\Omega$ ) 及びトランスの接地抵抗値  $R_s$  ( $\Omega$ ) を持つとすると第5図の送電線について第6図のような等価回路を描くことができる。電流  $I$  は、

$$I = \frac{EL}{2R_s + \frac{2R_w + rL}{3}} \quad (1)$$

で与えられる。送電線の長さ  $L$  が十分長い場合、電流の最大値  $I_{\max}$  は、

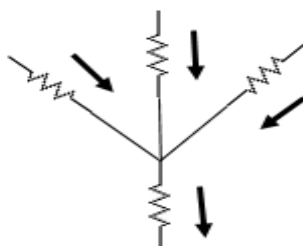
$$I_{\max} = \frac{3E}{r} \quad (2)$$

となる。



第7図 単純な1次元の送電網でのGIC

Fig.7 GIC of a simple one-dimensional power line.



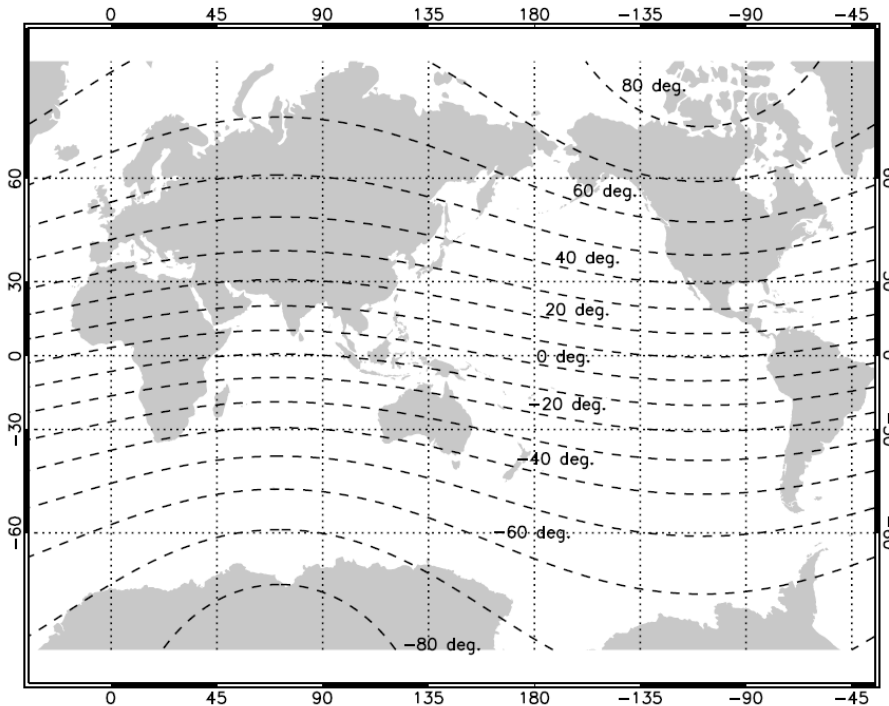
第8図 複数の電力線に接続されたノードでのGIC

Fig.8 GIC at a node connected several power lines.

各ノードで測定されるGICは、電力網の構成に依存し、第7図に示すような単純な網を考えた場合、電力網の中のノードではGICが相殺されるため、電力網の端のノードでGICが大きくなる傾向がある (Boteler, 2014)。また、第8図に示すようにGICによ

る電流が集中するノードでは、GICが大きくなる傾向がある。

第9図は、地理緯度と磁気緯度(点線)を示した世界地図である。図に示したように北米大陸では、地理緯度に比べて磁気緯度が高く、GICの影響を受けやすいことが知られている。一方、日本は地理緯度に比べて磁気緯度が低くGICの影響を受けにくいと言われている。しかし、1909年9月25日の地磁気嵐の際に電信線へのGICにより、東京ーグアム間、東京ー小笠原間、東京ー四日市間、東京ー松本間などで電信による通信に影響が出たことが内田(1909)により報告されている。この時、東京ー松本間では、平常時の電流値10ミリアンペアに対して±5ミリアンペア前後の変動が測定された。また、GauntとCoetzee(2007)により、磁気緯度が日本とほぼ同じ30から40度に位置する南アフリカ共和国で、2003年10月末から11月はじめの一連の地磁気嵐に伴って電力トランスの焼損が発生したことが報告されている。磁気緯度的に低緯度で送電線の長さも比較的短いニュージーランドでも太陽風衝撃波の到来に伴う急激な地磁気変動により2001年11月6日に電力網の保護リレーの不要動作が発生したことが報告されている(Marshall et al., 2012)。このような点から考えると日本でも、GICによる電力網への影響についての評価が必要であると思われる。



第9図 地理緯度と磁気緯度(点線)を示す世界地図

Fig.9 World map showing geographical and geomagnetic (dotted line) latitudes.

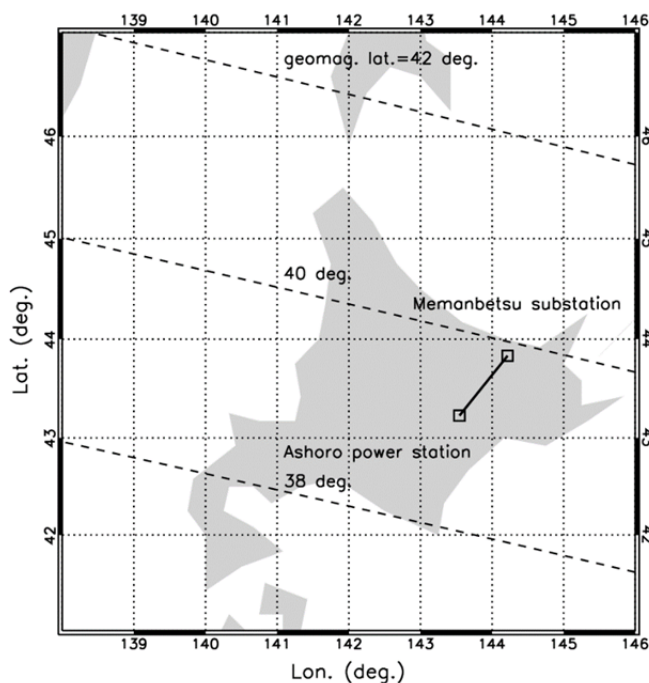
### 3. 北海道での地磁気誘導電流の測定

北海道電力(株)の協力により、2005年12月から2008年3月までの約2年間、北海道女満別変電所のトランスの中性点でGICの測定を実施した(Watari et al., 2009)。測定を行ったトランスは、第10図に示したように女満別変電所と足寄発電所を結ぶ長



さ約 100km の 147 kV の電力線に接続されている。地磁気嵐、太陽風衝撃波の到来に伴う地磁気変動(Sudden Impulse)、高緯度のオーロラ活動に伴って中低緯度で観測される湾型擾乱 (ポジティブベイ) などの地磁気擾乱に伴って、GIC が測定された。第 4 表に約 2 年間の測定期間中に発生した大きな GIC と関連する地磁気活動を示す。表から大きな GIC は、ほとんどが地磁気嵐に伴って発生していることがわかる。

太陽フレアに伴う CME により引き起こされた地磁気嵐に伴って測定された GIC、太陽風衝撃波の到来に伴って測定された GIC、高緯度のオーロラ活動による中低緯度の湾型擾乱 (ポジティブベイ) に伴って測定された GIC のプロットを気象庁の女満別地磁気観測所の地磁気データのプロットと共に第 11 図、第 12 図、第 13 図に示す。北海道で測定された GIC の時間変化は、地磁気の時変化に近い変動を示しており、データの解釈には地下の導電率構造の影響を考慮する必要がある (Pulkkinen et al., 2010)。



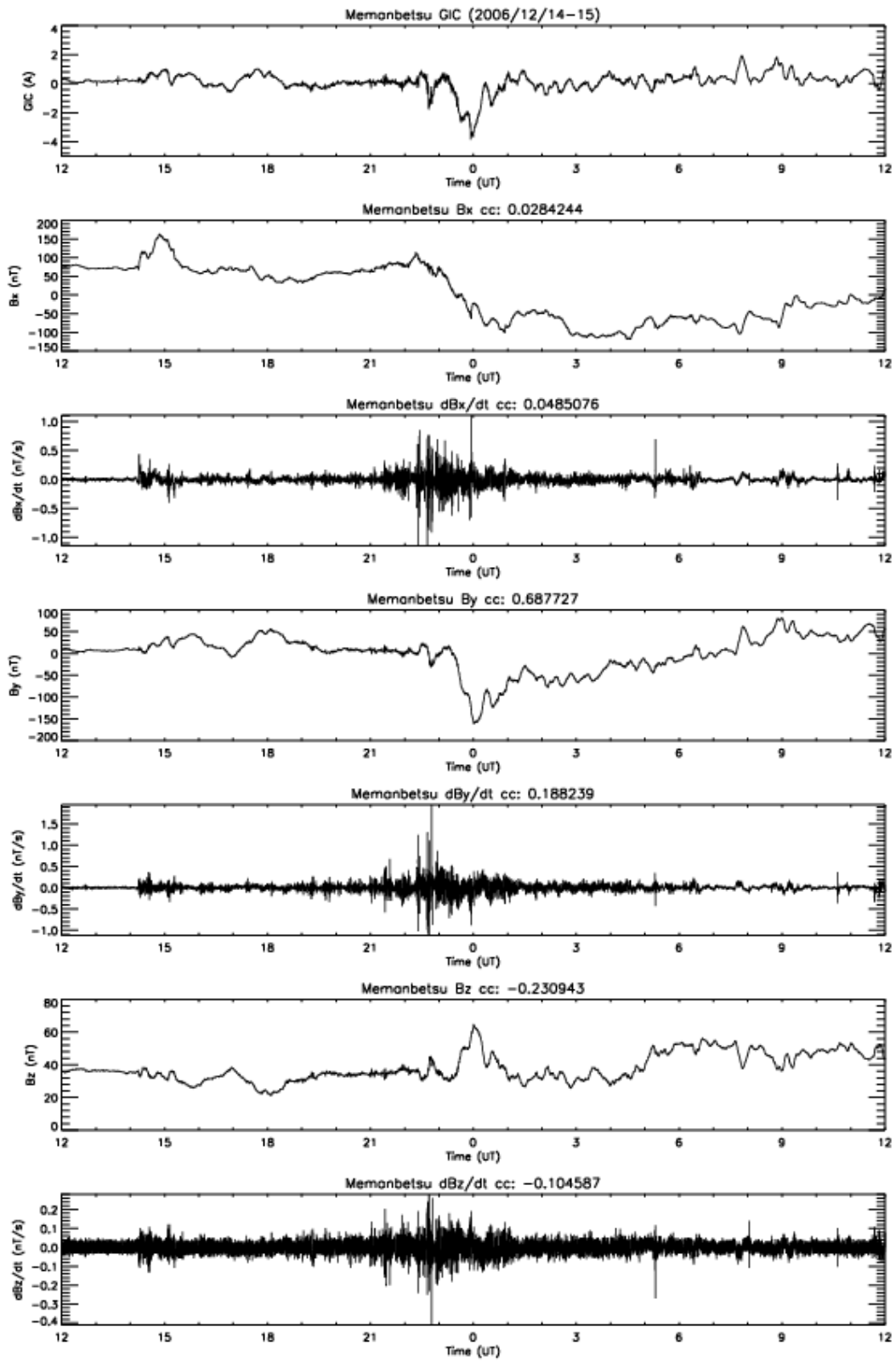
第 10 図 GIC の測定を行った電力線の配置

Fig.10 Location of the power line where GIC is measured.

第 4 表 北海道で測定された大きな GIC

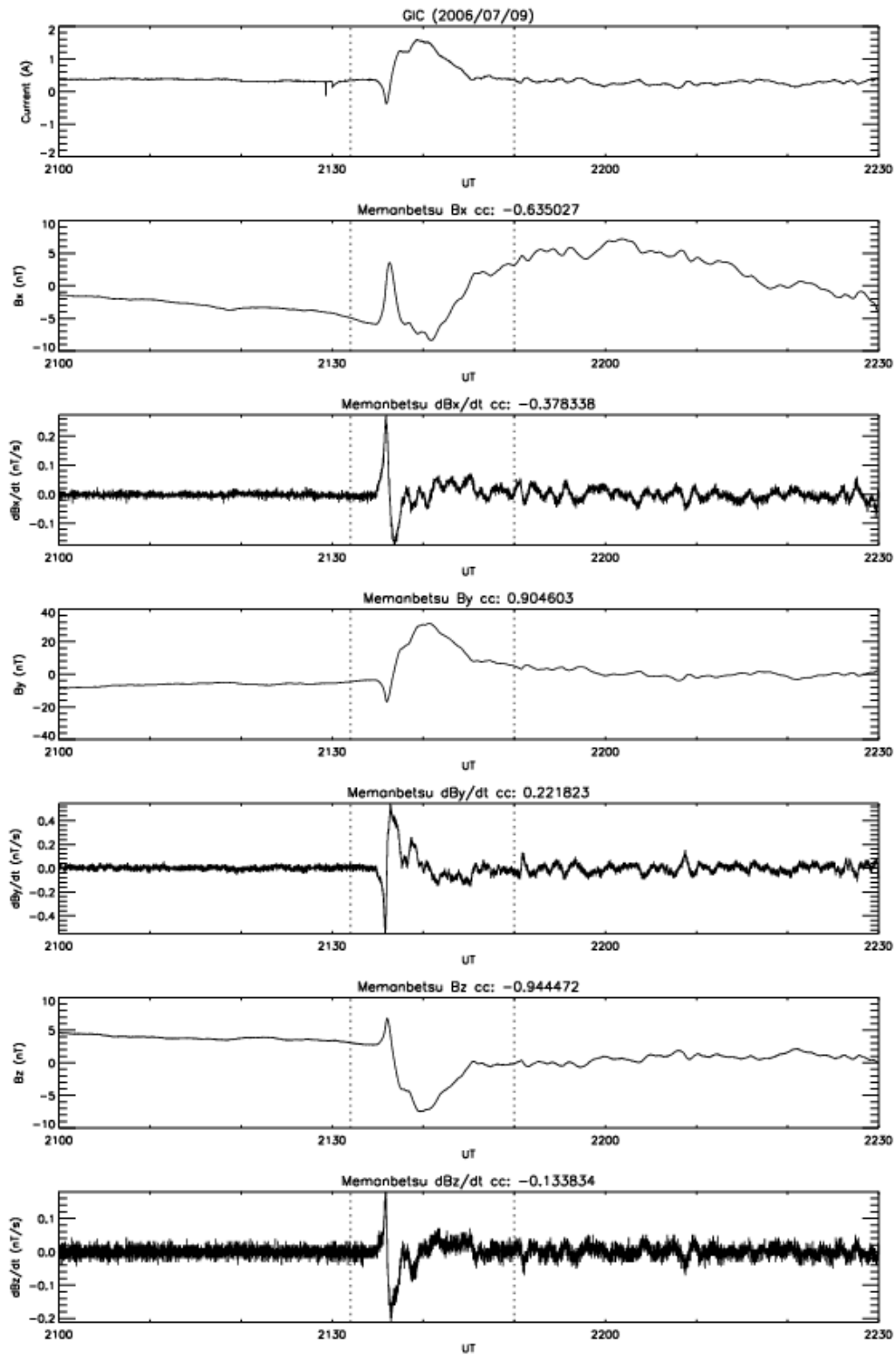
Table 4 Large GICs measured in Hokkaido.

no.	年月日 (UT)	最大の GIC (A)	関連する地磁気擾乱
1	2006/12/14	3.85	急始型地磁気嵐
2	2006/11/10	2.23	緩始型地磁気嵐
3	2007/05/23	1.81	ポジティブベイ
4	2006/11/30	1.75	緩始型地磁気嵐
5	2006/07/09	1.59	Sudden Impulse
6	2006/04/14	1.58	緩始型地磁気嵐



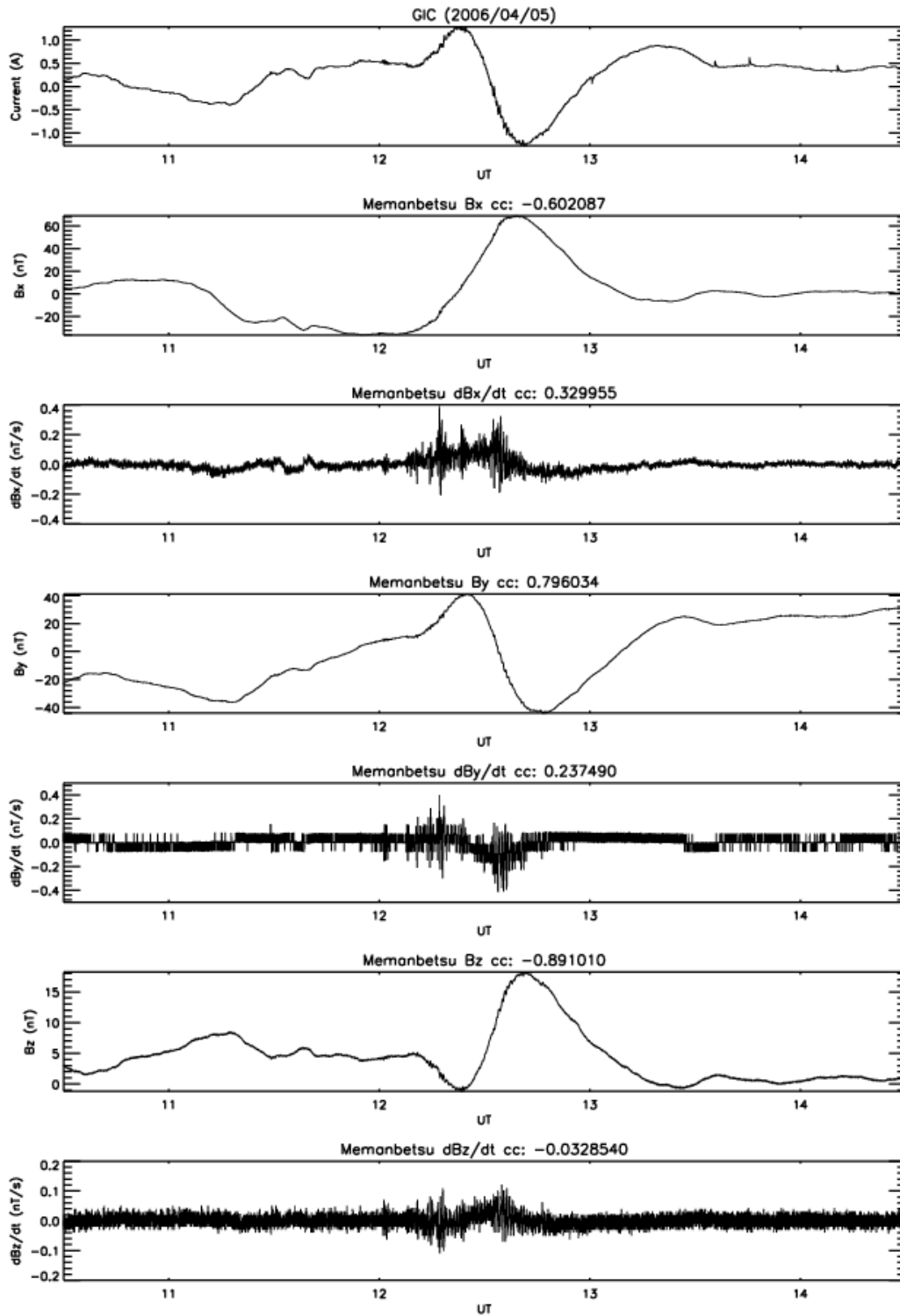
第 11 図 地磁気嵐に伴って観測された GIC と地磁気変動

Fig.11 GIC and geomagnetic fields associated with a geomagnetic storm.



第 12 図 太陽風衝撃波の到来に伴って観測された GIC と地磁気変動

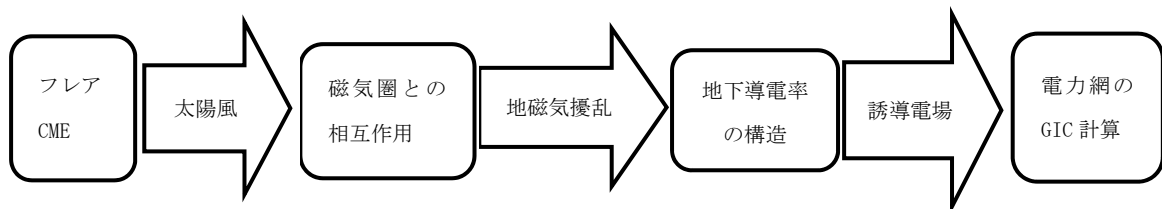
Fig.12 GIC and geomagnetic fields associated with arrival of an interplanetary shock.



第 13 図 高緯度のオーロラ活動による湾型擾乱に伴って観測された GIC と地磁気変動  
 Fig. 13 GIC and geomagnetic fields associated with positive bay by aurora activity  
 in high latitude.

#### 4. まとめ

- (1) 日本と同じような地磁気緯度に位置する南アフリカ共和国で大きな地磁気嵐の際に電力トランスの焼損が発生したことが報告されており、日本でも GIC の影響に関する検討が必要であると思われる。
- (2) 北海道での GIC 測定により、地磁気嵐、太陽風衝撃波の到来に伴う地磁気変動 (Sudden Impulse)、オーロラ活動に伴う中緯度での湾型地磁気擾乱 (ポジティブベイ) などの地磁気擾乱に伴って GIC が測定された。大きな GIC は、主に地磁気嵐に伴って観測された。大きな地磁気嵐時の GIC について議論を行うためには、さらに長期間の GIC データの取得が必要である。
- (3) GIC 研究は、第 14 図に示したように太陽・太陽風、磁気圏、地下導電率の構造、電力網の構成など複数の研究分野が関連おり、各領域間での協力が不可欠である。



第 14 図 GIC に関連する研究領域

Fig.14 Research areas related with GIC.

#### 謝 辞

女満別変電所での GIC 測定は、情報通信研究機構、名古屋大学太陽地球環境研究所、北海道電力 (株) の連携協力により実施された。女満別地磁気観測所の地磁気データの提供について気象庁柿岡地磁気観測所に感謝いたします。

#### 参考文献

- Baker, D. N., X. Li, A. Pulkkinen, C. M. Ngwira, M. L. Mays, A. B. Galvin, and K. D. C. Simunac, A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios, *Space Weather*, 11, 585-591, doi:10.1002/swe.20097, 2013
- Boteler, D. H., Space Weather Effects on Power Systems, in *Space Weather*, ed. P. Song, H. Singer, and G. Siscoe, AGU Geophys. Monogr. Ser., 125, 347-352, AGU, Washington D.C., ISBN0-87590-984-1, 2001
- Boteler, D., Methodology for simulation of geomagnetically induced currents in power systems, *J. Space Weather Space Clim.* 4 A21, doi:10.1051/swsc/201418, 2014
- Gonzalez, W. D. and B. T. Tsurutani, Criteria of interplanetary parameters causing intense geomagnetic storms ( $Dst < -100nT$ ), *Planetary and Space Science* 35(9), 1101-1109, 1987
- Gaunt C. T. and G. Coetzee, Transformer failure in regions incorrectly considered

- to have low GIC-risks, 2007 IEEE Lausanne Power Tech, New York, Inst. of Electr. and Electr. Eng., 807-812, 2007
- Hapgood M. A., Towards a scientific understanding of the risk from extreme space weather. *Adv. Space Res.* 47:2059-2072. doi:10.1016/j.asr.2010.02.007, 2011
- Lanzerotti, L. J., Space Weather Effects on Technologies, in *Space Weather*, ed. P. Song, H. Singer, and G. Siscoe, AGU Geophys. Monogr. Ser., 125, AGU, Washington D. C., 11-22, ISBN0-87590-984-1, 2001
- Maehara H., T. Shibayama, S. Notsu, Y. Notsu, T. Nagao, S. Kusaba, S. Honda, D. Nogami and K. Shibata, Superflares on solar-type stars, *Nature*, 485, 478-481, doi:10.1038/nature11063, 2012
- Marshall, R. A., M. Dalzell, C. L. Waters, P. Goldthorpe, and E. A. Smith, Geomagnetically induced currents in the New Zealand power network, *Space Weather*, 10, S08003(13pp), doi:10.1029/2012SW000806, 2012
- Pulkkinen A., 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*, 3, S08C03 (19pp), doi:10.1029/2004SW000123, 2005
- Pulkkinen, A., R. Kataoka, S. Watari, and M. Ichii, Modeling geomagnetically induced currents in Hokkaido, Japan, *Advances in Space Research*, 46, 1087-1093, doi:10.1016/j.asr.2010.05.024, 2010
- Shibata, K., H. Isobe, A. Hillier, A. R. Choudhuri, H. Maehara, T.T. Ishii, T. Shibayama, S. Notsu, T. Nagao, S. Honda, and D. Nogami, Can Superflares Occur on Our Sun?, *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, 49, 2013
- Tsurutani B. T., W. D. Gonzalez, G. S. Lakhina, and S. Alex, The extreme magnetic storm of 1-2 September 1859. *J. Geophys. Res.* 108(A7), 1268(8pp), doi:10.1029/2002JA009504, 2003
- 内田孝好, 明治四十二年九月二十五日の地電流に就て, *電氣學會雜誌*, 29 (255), 701-721, 1909
- Watari, S., 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*, 7, S03002(11pp), doi:10.1029/2008SW000417, 2009.