3-5 地磁気誘導電流 (GIC) の測定 3-5 Measurement of Geomagnetically Induced Current (GIC)

亘 慎一 中村紗都子 海老原祐輔

WATARI Shinichi, NAKAMURA Satoko, and EBIHARA Yusuke

宇宙天気の影響の一つとして、地磁気じょう乱により送電線に準直流電流が流れて電力システムに障害を及ぼすことがある。このような現象は地磁気誘導電流 (GIC) と呼ばれている。高緯度の地域でその影響が顕著であるが、中低緯度の地域でも電力システムの障害の発生が報告されており、日本においてもその測定や影響の評価が必要となっている。本稿では GIC 測定装置及び関東周辺での測定結果について述べる。

As one of space weather effects, there is failure of electric power systems caused by quasi-dc current in power lines associated with geomagnetic disturbances. This phenomenon is called geomagnetically induced current (GIC). While the impact is significant in high-latitude regions, failures in electric power systems have also been reported in mid- and low-latitude regions. As the result, it is necessary to measure GIC and to evaluate its effect in Japan. This paper described the GIC measurement system and the measurement results around the Kanto area.



宇宙天気の影響の一つとして、地磁気じょう乱により地上の送電線やパイプラインのような長距離にわたって敷設された導体に誘導電流が流れることが知られている。これを地磁気誘導電流(GIC)と呼んでいる。高緯度の地域では、オーロラ活動に伴う強い地磁気じょう乱により大きなGICが流れることが知られており、電力システムやパイプラインへの影響についての研究が以前から行われてきた[1]-[5]。実際、1989年3月の大きな磁気嵐の際にはカナダのオタワで大規模な停電[6]が、2003年10月末に発生した大きな磁気嵐(ハロウィンイベントと呼ばれている)の際にはスウェーデンのマルモで停電[7]が発生した。

グローバルな地磁気データの解析から、大きな地磁 気嵐の際でも地磁気変動の大きさは磁気緯度が50度 以下の地域では急激に小さくなるため、中低緯度では GICの影響は小さいと言われている[8][9]。しかし、 2001年11月6日の磁気嵐の際にニュージーランドで 発生した変電所の変圧器保護リレーの動作[10]や前述 のハロウィンイベントの際に南アフリカで発生した発 電所の変圧器の焼損[11]などの事例が報告されたこと により、中低緯度でもGICによる電力システムへの影 響が懸念されるようになった。また、地磁気データを 用いた解析から、赤道付近でも惑星間空間衝撃波の到 来に伴って大きなGICが発生する可能性があることが 指摘されている[12]。このような状況を受けて、 ニュージーランド[10]、オーストラリア[13]、南アフリ カ[14]、日本[15]、中国[16]、スペイン[17]、ブラジル [18] など中低緯度の国々でもGIC測定やその影響評価 が行われるようになってきている。なお、地磁気じょ う乱によるGICの影響について検討する際には、その 地域の磁気緯度を考慮する必要があるため、参考とし て図1に地理緯度と磁気緯度の世界地図を示す。

本稿では、まず、GIC を測定するために開発し、関 東周辺の 500 kV の変圧器に設置した測定装置の概要



について述べる。次に関東周辺でのGICの測定結果と その原因となった地磁気じょう乱についての分析及び GICの原因となった地磁気じょう乱について柿岡地磁 気観測所(以下、柿岡という)から1分値の地磁気数値 データが提供されている1956年以降の過去約65年の 期間の中で最も大きな現象について述べる。

2 GIC の測定

2.1 GIC 測定装置

GIC 測定装置は、電流を測定するための電流プロー ブと測定されたデータを記録するデータロガーを組み 合わせた構成が一般的である。稼働中の電力システム に影響を与えないで変圧器中性点のアース線に流れる 電流を測定する必要があるため、アース線を挟んで測 定を行うクランプ型の電流プローブが使用される。変 圧器のアース線には金属の棒や平板プレートなどが使 われるため、大きなクランプ径を持つものが必要とな る。

クランプ型の電流プローブでは、アース線に流れる 電流によって生じる磁場を測ることによって電流を測 定する。磁気センサとしては、ホール素子、フラック スゲート型磁気検出素子、変流器(CT 検出)方式など が使われる。フラックスゲート型磁気検出素子は、 ホール素子を用いたものに比べて温度安定性がよいと いう特長を持っている。ホール素子を用いた電流プ ローブを使用する場合は、補正ができるように温度の 測定を一緒に行う例もある[17]。

GIC 測定装置のブロック図を図2に、電流プローブ (日置社製 CT6845)の写真を図3に示す。この電流プ ローブは、磁気センサとして微小電流の検出にフラッ クスゲート型磁気検出素子、大きな電流の検出に変流 器(CT 検出)方式を用いて、大きなダイナミックレン ジと広い周波数特性を持たせている[19]。変圧器中性 点のアース線に流れる電流に比例する電流プローブか らの出力電圧をデータロガー(テラテクニカ社製 DCA323)の32ビットのADコンバーターで10Hzサ ンプリングして記録し、モバイルルータを用いたイン ターネット接続により記録されたデータを取得してい る。他のデータとの比較の際にデータ間の時刻ずれが 生じないようにデータの時刻精度を保つため、GPS (Global Positioning System)衛星からの時刻情報を受 信してデータロガーの時計を合わせている[20]。

測定装置のスペックとして、まず、GICの速い変動 を捉えるためのデータのサンプリング周波数の検討が 必要となる。可能な限り速いサンプリングが望ましい が、データ量との兼ね合いもあるため、最適なサンプ リング周波数の検討が必要である。GICの大きな変動



図 2 GIC 測定装置のブロック図



図3 電流プローブの写真

をもたらす大振幅かつ速い地磁気変動として、惑星間 空間衝撃波の到来に伴う SSC (Storm Sudden Commencement)あるいは SI (Sudden Impulse) と呼ばれる 急激な地磁気変動がある [21]。1991 年 3 月 24 日の SSC の際には、継続時間が 1 分以下で振幅が 202 nT の非 常にシャープで大きな振幅を持つ地磁気変動が柿岡で 観測されたことが報告されている [22]。この現象に対 応して米国のニューヨークの近くの変電所で 130 Aの GIC が測定されている [21]。また、この SSC で始まっ た磁気嵐ではカナダの電力会社ハイドロケベックの変 電所で 100 A を超える GIC が測定されており、GIC に よる変圧器保護リレーの動作があったことが報告され ている [6]。

図4に2000年7月15日14時36分UTに発生した SSCの際に柿岡で観測された電場の南北(X)成分と東 西(Y)成分の0.1秒値とその直流分を差し引いた変動 分の累積割合の周波数スペクトルを示す。このSSCの 際に柿岡で観測された地磁気水平成分の最大振幅は 140 nTで、その時間変化率は最大89 nT/分であった。 このSSCで始まった磁気嵐では、米国の数か所の変電 所で送電効率を調整するためのコンデンサバンクの保



図 4 2000年7月15日のSSC現象に伴う柿岡の電場の南北(X)成分と東西(Y) 成分の 0.1 秒値とその直流分を差し引いた変動分の累積割合の周波数 スペクトル

護リレーが動作したことが報告されている [21]。

図4の累積周波数スペクトルによると1Hz以上の 周波数成分が1~2.5%程度あり、GICの最悪値を得 るために変化のピーク値を捉えるためには、1秒程度 のサンプリングが望ましいことがわかる。

次に、電力網の構成も含めた GIC の評価を行うため には、対向する変電所間を結ぶ送電線をカバーする多 数の観測点を設けてGIC の流入や流出を観測すること が望ましい。流入や流出を評価するためには、GIC の 極性の観測が必要である。GIC の流入点あるいは流出 点となるような電力網の端点で観測を行うことにより、 大きな GIC を観測することができる (端点効果とい う[23])。

さらに、GICの観測データ間あるいは地磁気や電場 のデータとの比較を行うためには、データ間の時刻ず れを無くすため、データの時刻精度を保つ必要がある。 GPS 衛星からの時刻情報を受信することにより、スタ ンドアロンで測定装置の時計を合わせることができる。

観測装置を設置する変電所は人里離れた山中にある ことも多く、記録されたデータを取得する方法も検討 する必要がある。一つの方法として、携帯電話回線を 用いたインターネット接続の利用がある。インター ネット接続を行うと準リアルタイムで観測データを取 得することが可能となり、観測装置のデータ記録容量 によるサンプルレートの制約を軽減することができる とともにGICの現況を準リアルタイムでモニタするこ とができる。また、観測装置に問題が発生した場合に、 観測装置のステータス情報取得や再起動を遠隔からで きるようになる。

最後に、大きな磁気嵐による影響など様々な地磁気



変動に対する GIC をとらえるためには、長期間の GIC 観測が必要である。

2.2 測定場所

関東周辺の変電所の 500 kV 網の変圧器に測定装置 を設置して GIC の測定を実施している。図5に測定装 置を設置した変電所及び柿岡 (KAK)の位置を示す。 太線は測定装置を設置した変電所に隣接する変電所の 間を結ぶ 500 kV の送電線を示す。500 kV の送電線は 日本では一番高い電圧の送電網で、送電電圧が高いほ ど抵抗の小さい送電線を使用しているため、大きな GIC が測定されること期待される。2016 年 2 月より SFJ 及び STB、2017 年 2 月より SFS、2021 年 2 月よ り SKG で測定を開始した。2021 年 5 月現在、測定を 継続している [20]。

3 GIC の測定例

測定を開始した 2017 年から 2020 年にかけては太陽 活動サイクル 24 の極小期にあたるため、Dst 指数(速 報値)が-100 nT を下回るような磁気嵐の発生は3件と 少なかったものの、磁気嵐、惑星間空間衝撃波の到来 に伴う SSC/SI、高緯度のオーロラ活動に伴う地磁気 じょう乱(以下、湾型じょう乱という)、太陽フレアに よって電離圏伝導度が急増することによる地磁気じょ う乱(以下、SFE (solar flare effect) という)による GIC が観測された[20]。太陽活動の極小期ではあるが、湾型 じょう乱に伴う GIC が比較的多く観測されている。

3.1 磁気嵐に伴う GIC

2018年5月5日に発生した磁気嵐時の観測データを 図6に示す。上から順に、SFJ、STB、SFSのGIC測 定データ、柿岡での地磁気変動(X成分とY成分)、電 場変動(X成分とY成分)を示している。SFSとSTB では、GICは逆の変化を示している。これは、SFSと STBは対向する変電所であるため、電場の方向により SFSからのGICがSTBの中性点を通して流れ出す、あ るいはその逆の現象が起こっているためだと考えられ る。SFSがSTBに比べて大きなGICの電流値を示し ているが、これは同時に運用されている変圧器の数の 違いやSFSが送電網の端点となっているので端点効



図 6 2018 年 5 月 5 日の磁気嵐に伴って観測された SFJ、STB、SFS の GIC と柿岡の地磁気及び電場変動



図7 1989年3月13-15日の磁気嵐に伴う柿岡の地磁気水平成分の変動と その時間変化率

果 [23] によるためと考えられる。また、SFJ の GIC は 柿岡の地磁気や電場の変動とあまり類似した変動をし ていないが、これは地下の電気伝導度の影響や電力網 の構成によるものと考えられる [24]。

1分値の地磁気数値データが提供されている1956年 以降に柿岡で観測された最大の磁気嵐は、1989年3月 13-15日UTに発生したものである。この地磁気嵐の 際にカナダのオタワでGICによる停電が発生した[6]。 図7にこの磁気嵐時の柿岡の地磁気水平成分の変動と その時間変化率を示す。地磁気水平成分の変化の最大 振幅は644 nTで、その時間変化率は最大-51 nT/分 であった。

3.2 惑星間衝撃波に伴う GIC

図8に2017年7月16日5時59分UTに発生した SSCに伴う観測データを示す。図の上から順にSFJと STBのGIC測定データ、柿岡での地磁気変動(X成分



図 8 2017 年 7 月 16 日の SSC に伴う SFJ と STB の GIC と柿岡の磁場及び電場変動

と Y 成分) と電場変動(X 成分と Y 成分)を示している。 SSC によるステップ状の地磁気変動に対応して、イン パルシブな GIC が観測されている。

1956年以降に柿岡で観測された最大のSIは、1960年11月13日10時23分UTに発生したものである。 図9にこのSIに伴う柿岡の地磁気水平成分の変動とその時間変化率を示す。地磁気水平成分変化の最大振幅は220 nTで、その時間変化率は最大124 nT/分であった。ニュージーランドでの電力設備の障害[10]が報告されている2001年11月6日のSSCの際には、柿岡の



図 9 1960 年 11 月 13 日の SI に伴う柿岡の地磁気水平成分の変動とその時 間変化率



図 10 2017 年 12 月 5 日の湾型じょう乱時の AE 指数 (暫定値)、SFJ と STB の GIC と柿岡の地磁気及び電場変動

地磁気水平成分変化の最大振幅は 105 nT で、その変 化率は最大 43 nT/分であった。

3.3 湾型じょう乱に伴う GIC

2017年12月5日の13時16分UTと16時40分UT に発生した湾型じょう乱に伴う観測データを図10に 示す。上から順にオーロラ活動を示すAE指数(暫定 値)、SFJとSTBのGIC測定データ、柿岡での地磁気 変動(X成分とY成分)、電場変動(X成分とY成分) を示している。高緯度でのオーロラ活動に伴う地磁気



図 11 2004 年 11 月 9 日の大きな湾型じょう乱に伴う柿岡の地磁気変動と その時間変化率



図 12 2017年4月1日の SFE 時の GOES 衛星で観測された X 線フラックス、 SFJ と STB の GIC と柿岡の地磁気及び電場変動



図 13 1960 年 11 月 15 日の大きな SFE による柿岡の地磁気水平成分の変動 とその時間変化率

の湾型じょう乱により GIC が引き起こされたものであ る。湾型じょう乱による GIC は比較的頻繁に観測され ている。

1956年以降に柿岡で観測された最大の湾型じょう 乱は、2004年11月9日11時4分UTに発生したもの である。図11にこの湾型じょう乱時の磁場変動とその 時間変化率を示す。地磁気水平成分変化の最大振幅は 95 nTで、その時間変化率は最大で-4.7 nT/分とそれ ほど大きくないが、中規模の磁気嵐に相当する地磁気 の変化を示している。

3.4 SFE に伴う GIC

2017年4月1日に発生した M4.4/1 F フレアによる 地磁気変動に伴う観測データを図12に示す。上から順 に GOES 衛星で観測された太陽の X 線フラックス、 SFJ 及び STB での GIC 測定データ、柿岡での地磁気 変動 (X 成分と Y 成分)と電場変動 (X 成分と Y 成分) を示している。21時25分 UT 頃にフレアによる X線 放射の増加が始まり、これに対応して地磁気の変動が 起こっている。フレアによる X線放射が最大となる21 時48分 UT 頃に地磁気 X 成分の変動も最大となって いる。この地磁気の変動に伴って GIC の増加が SFJ と STB で観測されている。

1956年以降に柿岡で観測された最大のSFEは、1960年11月15日2時2分UTに発生した光学観測によるフレアの面積と明るさから決められるフレアの規模(光学重要度)が最も大きい3Bのフレアに伴うものである。図13にこのSFEに伴う地磁気水平成分の変動とその時間変化率を示す。このSFEによる柿岡の地磁気水平成分変化の最大振幅は-67 nTで、その時間変化率は最大で-20 nT/分であった。この現象は、太陽フレアのX線放射により大きなGICが発生する可能性を示唆している。

4 まとめ

電力システムへの宇宙天気による影響を評価するた め、関東周辺の数か所の変電所に測定装置を設置し、 GICの測定を2017年2月から実施している。これまで の測定は太陽活動サイクル24の極小期であったため、 大きなGICは観測されなかったが、磁気嵐、惑星間空 間衝撃波の到来、高緯度域のオーロラ活動、太陽フレ アに伴うGICが観測された。これらの観測データは、 磁気圏界面電流、環電流、沿磁力線電流などの磁気圏 電流や電離圏電流によりGICが引き起こされているこ とを示唆している。

今後、2025年頃と予測される太陽活動サイクル25 の極大に向けてGICの計測を継続して長期的なデータ の蓄積を行い、その影響評価を行っていく予定である。

謝辞

GIC 測定装置の設置にご協力いただいた(株)東京電 カパワーグリッドに感謝します。また、現象リスト、 地磁気及び電場データを提供いただいた気象庁地磁気 観測所、地磁気指数を提供いただいた京都大学地磁気 世界資料解析センターに感謝します。本研究は、科研 費(15 H05815)の助成を受けたものです。

【参考文献】

- V. D. Albertson, J. M. Thorson, Jr., and S. A. Miske, Jr., "The effect of geomagnetic storms on electrical power system," IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, vol.PAS-93, no.4, pp.1031–1044, 1974. DOI:10.1109/TPAS.1974.294047
- 2 S. -I. Akasofu and R. P. Merritt, "Electric currents in power transmission line induced by auroral activity," Nature, vol.279, pp.308–310, 1979. DOI:10.1038/279308a0
- 3 D. H. Boteler, T. Watanabe, R. M. Shier, and R. E., Horita, "Characteristics of geomagnetically induced currents in the B. C. Hydro 500 kV system," IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, vol.PAS-101, no.6, pp.1447–1456, 1982. DOI:10.1109/TPAS.1982.317192
- 4 R. Pirjola, "Induction in power transmission lines during geomagnetic disturbances," Space Sci. Rev., vol.32, no.2, pp.185–193, 1983. DOI:10.1007/BF00242243
- 5 R. Pirjola, "Effects of space weather on high-latitude ground systems," Advance Space Res., vol.36, no.12, pp.2231–2240, 2005. DOI:10.1016.j.asr.2003.04.074
- 6 L. Bolduc, "GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system," J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys., vol.64, no.16, pp.1793– 1802, 2002. DOI:S1364-6826(02)00128-1
- 7 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, no.8, S08C03, 2005. DOI:10.1029/2004SW000123
- 8 A. Pulkkinen, E. Bernabeu, J. Eichner, C. Beggan, and A. W. P. Thomson, "Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios," Space Weather, vol.10, no.4, pp.1–19, 2012. DOI:10.1029/2011 SW000750
- 9 C. M. Ngwira, A. Pulkkinen, F. D. Wilder, and G. Crowley, "Extended study of extreme geoelectric field event scenarios for geomagnetically induced current applications," Space Weather, vol.11, no.2, pp.121– 131, 2013. DOI:10.1002/swe.20021

- 10 R. A. Marshall, M. Dalzell, C. L. Waters, P. Goldthorpe, and E. A. Smith, "Geomagnetically induced currents in the New Zealand power network," Space Weather, vol. 10, no.8, S08003, 2012. DOI:10.1029/2012SW000806
- 11 C. T. Gaunt and G. Coetzee, "Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk," 2007 IEEE Lausanne Power Tech Conference, Lausanne, Switzerland, 1–5 July 2007. DOI:10.1109/ PCT.2007.4538419
- 12 B. A. Carter, E. Yizengaw, R. Pradipa, A. J. Halford, R. Norman, and K. Zhang, "Interplanetary shocks and the resulting geomagnetically induced currents at the equator," Geophys. Res. Lett., vol.42, no.16, pp.6554–6559, 2015. DOI:10.1002/2015GL065060
- 13 R. A. Marshall, H. Gorniak, T. V. D. Walt, C. L. Waters, M. D. Sciffer, M. Miller, M. Dalzell, T. Daly, G. Pouferis, G. Hesse, and P. Wilkinson, "Observations of geomagnetically induced currents in the Australian power network," Space Weather, vol.11, no.1, pp.6–16, 2013. DOI:10.1029/2012SW000849
- 14 J. Koen and T. Gaunt, "Geomagnetically induced currents in the Southern African electricity transmission network," 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, 23–26 June 2003. DOI:10.1109/ PTC.2003.1304156
- 15 S. Watari, M. Kunitake, K. Kitamura, T. Hori, T. Kikuchi, K. Shiokawa, N. Nishitani, R. Kataoka, Y. Kamide, T. Aso, T. Watanabe, and Y. Tsuneta, "Measurements of geomagnetically induced current in a power grid in Hokkaido, Japan," Space Weather, vol.7, no.3, S03002, 2009. DOI:10.1029/2008SW000417
- 16 C. Liu, L. Liu, and Y. Yang, "Monitoring and modeling geomagnetically induced currents in power grids of China," 2009 Asia-Pacific Power and Engineering Conference, Wuhan, China, 27–31 March 2009. DOI:10.1109/APPEEC.2009.4918502
- 17 J. M. Torta, L. Serrano, J. R. Regue, A. M. Sanchez, and E. Roldan, "Geomagnetically induced currents in a power grid of northern Spain," Space Weather, vol. 10, no.6, S06002, 2012. DOI:10.1029/2012SW000793
- 18 N. B. Trivedi, I. Vitorello, W. Kabata, S. L. G. Dutra, A. L. Padilha, M. S. Bologna, M. B. de Padua, A. P. Soares, G. S. Luz, F. de A. Pinto, R. Pirjola, and A. Viljanen, "Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study," Space Weather, vol.5, no.4, S04004, 2007. DOI:10.1029/2006SW000282
- 19 池田健太, "AC/DC カレントプローブ CT6844/CT6845/CT6846,"日置 技法, vol.38, no.1, pp.1–12, 2017.
- 20 S. Watari, S. Nakamura, and Y. Ebihara, "Measurement of geomagnetically induced current (GIC) around Tokyo, Japan," Earth, Planets Space, vol73, 102, 2021. DOI:10.1186/s40623-021-01422-3
- 21 J. G. Kappenman, "Storm sudden commencement events and associated geomagnetically induced current risks to ground-based systems at low-latitude and midlatitude locations," Space Weather, vol.1, no.3, 1016, 2003. DOI: 10.1029/2003SW000009
- 22 T. Araki, S. Fujitani, M. Emoto, Y. Yumoto, K. Shiokawa, T. Ichinose, H. Luehr, D. Orr, D. K. Milling, H. Singer, G. Rostoker, S. Tsunomura, Y. Yamada, and C. F. Liu, "Anomalous sudden commencement on March 24, 1991," J. Geophys. Res., vol.102, no.A7, pp.14075–14086, 1997. DOI:10.1029/96JA03637
- 23 D. H. Boteler and R. J. Pirjola, "Modeling geomagnetically induced currents," Space Weather, vol.15, vol.1, pp.258–276, 2017. DOI:10.1002/2016SW001499
- 24 S. Nakamura, Y. Ebihara, S. Fujita, T. Goto, N. Yamada, S, Watari, and Y. Omura, "Time domain simulation of geomagnetically induced current (GIC) flowing in 500-kV power grid in Japan including a three-dimensional ground inhomogeneity," Space Weather, vol.16, no.12, pp.1946– 1959, 2018. DOI:10.1029/2018SW002004



中村紗都子(なかむら さとこ)

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 附属統合データサイエンスセンター 特任助教 博士 (理学) 磁気圏物理学、地球電磁気学

海老原祐輔(えびはら ゆうすけ)

京都大学 生存圏研究所 准教授 博士 (理学) 宇宙空間物理学