

研究成果報告書

研 究 題 目		電力送電線に流れる地磁気誘導電流の計測と地磁気との定量関係	実 施 年 度
			2018-19 年度
代 表 研 究 者	所 属	吉備国際大学農学部醸造学科	
	氏 名	橋本 久美子 印	

1. 研究の目的・背景

太陽黒点で爆発現象（太陽フレア）が発生すると、地球周辺の宇宙空間に強い電流が流れ、地磁気嵐を発生させる。地磁気変動は地面に誘導電流を流し、地面の 2 地点間で電位差が生じる結果、電力送電系統の変圧器間に準直流の電流が流れる。これを地磁気誘導電流（GIC : Geomagnetically Induced Current）と呼ぶ。カナダや北欧などの高緯度地域では直上の電離層に強いオーロラ電流が流れ、地上で強い地磁気変動が発生するため、電力送電線やパイプラインに悪影響を及ぼすことが知られている。一方、日本など中・低緯度地域の GIC は無視できる程度と考えられていたため、日本における GIC 計測例はまだ少ない。しかし、2003 年 10 月の大規模地磁気嵐時には関東地域で高緯度 GIC の数分の一に達する強い GIC が流れたことが確認された。その後、2006～2008 年に北海道電力管内で GIC 計測が実施され、原因となる地磁気変動の東西成分への依存性が強く、南北成分依存性が強い高緯度の特性と大きく異なることが報告された (Watari et al., Space Weather 2009)。このように、日本での GIC の理解に、高緯度を中心とした諸外国の研究成果がそのまま適用できず、かつ、日本における計測例が少ないため、メカニズムや地磁気変動との定量関係が確立されていないのが現状である。

我が国が地磁気的な低緯度にありながら、比較的強い GIC が流れる原因として、地下の電気伝導度や送電系統周辺の地形、特に良導体である海と送電系統の位置および方向の関係が考えられる。これら複数の要因が複合的に影響し合うために、多くの計測が必要であるが、北電、東電等での計測に限られる。しかも、これらの地域は海岸線の形状が複雑であり、送電網も複雑に絡み合っているため、原因の切り分けが難しい。本研究課題では、この困難を解決するために、海岸線と送電線が地磁気緯度線に沿ってほぼ東西に延びる中国地方に着目した。図 1 に示す中国電力東山口変電所と新山口変電所で、それぞれ 2018 年 3 月、2019 年 3 月より GIC の計測を開始し、次の 2 つの課題の解析を進めた。

（１）地磁気方向成分との相関が海岸線と送電線の方に依存するとの仮説の下、GIC と地磁気東西・南北成分との相関解析をおこなう。極域オーロラ現象など事象による違いも明確にする。

（２）地磁気データを与えて地球内部の誘導電場を計算し、これと GIC の相関解析により、GIC を再現するモデルの構築を図る。地磁気嵐予測モデルと協力して、GIC 予測につなげる。

中国電力(株)送電系統図

50 万 V 送電

火力・原子力発電所

変電所

図 1 中国電力の 50 万ボルト送電系統図。東西に延びる海岸線とこれに平行する送電線が特徴である。



図 1 中国電力の 50 万ボルト送電系統図。東西に延びる海岸線とこれに平行する送電線が特徴である。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

（1）東山口・新山口変電所における GIC 計測実施

本課題申請時の計画では、GIC 計測装置一式を整備し、半年程度で移動させて最低二ヶ所で計測する予定であった。しかし、中国電力管内での GIC 計測は、科学研究費補助金新学術領域「太陽地球圏環境予測（PSTEP）」の GIC 計測グループから評価され、同グループから予備の計測機器を貸与されることとなった。この計測装置一式を、中国電力周南電力所変電課の協力のもと、2018 年 3 月 23 日に東山口変電所（山口県周南市）に設置し、計測を開始した。それにより、PSTEP の計測器と財団からの助成金で整備した計測装置を用いて、二ヶ所での同時観測を実施することが可能になった。そこで 2018 年度には、GIC 計測器の整備と二カ所目である新山口変電所の調査、検討を行った。

GIC 計測器を構成するクランプ型電流センサーは、二カ所でのデータの同質性を確保するため、PSTEP の計測機と同機種（HIOKI CT6845-05, CT9555）を選定した。データ収集については、申請時の計画では数ヶ月に一度、現地に赴き記録媒体の交換を行うことを想定していた。しかし、PSTEP 貸与のシステムがオンライン伝送であるため、二カ所の計測のリアルタイム可視化とデータの同時利用を可能にするため、FOMA 通信を利用したオンラインデータ収集をおこなった。このために、KGC 計測技研（株）のデータロガー（KS-970）を採用し、同社のサーバー利用を選定した。変電所内での計測器運用には独立電源を確保する必要があるため、太陽電池パネルとバッテリーによる電源システムを検討し、別予算により必要機材を整備した。

計測機器の整備と並行して、2018 年 4 月以降に発生したオーロラ嵐や 8 月の磁気嵐の事例について、東山口変電所の GIC と 吾川・高知県（京都大学地磁気解析センター）や柿岡・茨城県（気象庁地磁気観測所）から地磁気データを入手し、相関解析を行なった。その結果、東山口変電所の GIC の多くは、地磁気東西（By）成分あるいは By の誘導電場（Ex）と高い相関を示した。この傾向は PSTEP が実施している新福島や新筑波変電所の GIC とは異なっており、中国地方の東西に延びる海岸線特有の特性と考えられた。そこで、二ヶ所目の GIC 測定地は、計画通り新山口変電所に決定した。



写真 1 変圧器の接地線に取り付けられたクランプ型電流センサー



写真 2 変圧器そばに接地した太陽電池パネルと計測機器・ロガー収納箱

2019 年 3 月始めから、共同研究者の北村健太郎氏（徳山高専・教授）のもとで、太陽電池電源を組み上げ、電流センサーとデータロガーとを接続し、連続運用試験を行なった。その後、2019 年 3 月 26 日に新山口変電所で設置作業を行い、定常運用を開始した（写真 1、2）。

GIC は 20Hz サンプリングで計測し、10 分ごとに計測技研のデータサーバーに準リアルタイムで転送される。取得したデータは、我々の研究グループと PSTEP とで共有するため、バイナリデ

ータをフォーマット変換し、1 日ファイルにまとめたのち PSTEP のサーバーに転送する作業を行っている。本研究期間に、中国電力管内の 2 観測点で、同時の GIC 計測データを 1 年分蓄積することができ、当初の計画を上回る結果となった。

(2) 解析結果

電力送電線を流れる交流の電圧は、途中の変電所において 50 万ボルトに昇圧されて、遠隔地へ送電される。変圧器内では三相交流の中性点が地面に接地され、交流波形が正弦波であれば、接地電流は流れない。しかし、地磁気変動が発生して地面に誘導電流が流れると、その一部が接地線を通じて送電線中に流れ、GIC として計測される。中国地方は世界の GIC 計測の中で最も低い緯度に位置するが、極域オーロラ現象による地磁気湾型変動や太陽フレアに起因する磁気インパルス(SC)による GIC が計測された。その結果を次に示す。

【極域オーロラ現象に伴う GIC】 図 2 (下段) に新山口変電所(SYG)で計測した GIC の事例を示す。図上段に茨城県柿岡地磁気観測所(KAK)で観測された地磁気データを示す。16-20 時 UT(世界標準時) (日本時間 01-05 時)にオーロラ現象に特有な湾型地磁気変動が観測された。この地磁気変動により誘導された最大振幅 5 アンペアの GIC が新山口変電所で計測された。山口は緯度が低いにもかかわらず、地磁気嵐時に北電で観測された GIC に匹敵する強度である。これらのデータは大規模地磁気嵐発生時に、新山口変電所においてさらに強い GIC が流れる可能性を示唆する。

【磁気急始(SC)時の GIC】 図 3 に、太陽爆発による太陽コロナ放出現象(CME)が原因となる磁気急始(SC)の例を示す。柿岡で地磁気南北(X)成分が階段状に増加し、東西(Y)成分が負のインパルスに伴う増加を示した。東山口と新山口で計測された GIC の形状は地磁気 Y 成分と酷似しており、GIC が地磁気東西成分によって誘導されたことが明らかになった。この結果は、東西に延びる海岸線効果が顕著であることを示しており、課題(1)の理解を大きく進める重要なデータである。課題(2)に関して、GIC と地磁気による誘導電場との比較解析をおこない、相関係数 0.95 という高い確度で GIC の再現が可能であることを確認した。また、新山口の GIC が東山口の約 4 倍(図 3 下段)であることは、瀬戸内側と山陰側の基幹送電線(新山口幹線と中国西幹線)が合流する位置にあるため、GIC が強めあった結果であると考えられる。

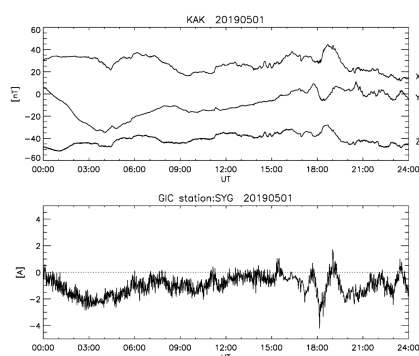


図 2 極域オーロラに伴い柿岡地磁気観測所(上段 KAK)で観測された地磁気変動と新山口変電所(下段 SYG)で計測された GIC (16-20 UT)。

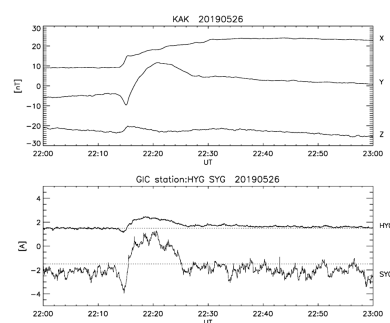


図 3 磁気急始事象時に観測された GIC の事例。柿岡地磁気観測所で観測された地磁気 3 成分(上段)、東山口変電所(HYG)と新山口変電所(SYG)の GIC(下段)。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

設備備品費として、計画通り新山口変電所に設置する GIC 計測機器を構成する電流センサー、データロガー、電源コントローラ等の購入に使用した。

予算計上していなかった設備備品費として、収集したデータのフォーマット変換等の処理が Mac に対応しないプログラムであったため、Windows ノートパソコンを購入しデータベース作成に使用している。

旅費は、山口電力所関係者との打ち合わせと新山口変電所の現地調査、および GIC 計測機器設置時に使用した。変電所への移動に使用したレンタカー代は借料損料に計上した。また、成果発表のため、地球電磁気・地球惑星圏学会秋季講演会（名古屋大学）への参加にも、旅費を使用した。

申請時には、データ収集の手段として現地において、記録媒体の交換を行うことを想定し、旅費を計上していたが、FOMA 通信によるオンラインデータ収集に計画を変更した。データサーバ利用・管理費として借料損料に振替えた。これにより、リアルタイムでデータ収集、観測機器のモニターが可能になり、現地への保守点検を年に 1 度に減らすことができた。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

これまで、東山口変電所で 27 カ月、新山口変電所で 15 カ月のデータを取得した。この期間は太陽活動が極小であったために大きな地磁気嵐は発生していない。しかし、極域オーロラ現象や太陽フレアに起因する GIC が観測され、地磁気変動との相関解析をおこなうとともに、地磁気変動から GIC を再現するモデルの検証をおこなった。太陽活動は 2020 年中にサイクル 25 期が始まると予測されており、今後上昇していくと見込まれるため、計測を 2 年間程度継続して地磁気嵐時のデータを蓄積する。これらの計測データを用いて、（1）地磁気から GIC を再現するモデルの高精度化をおこない、今後 2 年間程度でモデルを確立する。

（2）スーパーコンピュータを用いて太陽プラズマデータから地磁気嵐を予測するモデル開発を進めている、九州大学・田中高史名誉教授や京都大学生存圏研究所・海老原祐輔准教授と共同して、太陽活動－地磁気嵐－GIC の一貫した予測モデルの確立を目的とする 5 年間程度の研究計画を立案する。両教授とはすでに、地磁気変動予測に関する共著論文の実績（Kikuchi, Hashimoto, Ebihara, Tanaka 他 JGR2016、Ebihara, Kikuchi, Tanaka JGR2014、Tanaka, Ebihara, Hashimoto, Kikuchi 他 JGR2020）があり、今後は、これを地球内部の誘導電流へ拡張する研究へ発展させる。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

【学会】

橋本久美子, 北村健太郎, 菊池崇, 海老原祐輔, 中国電力山口電力所管内 2 変電所における地磁気誘導電流, 日本惑星科学連合大会 2020, 2020/07/12-16, オンライン開催（予定）

西田 悠一郎, 海老原祐輔, 中村紗都子, 亘慎一, 橋本久美子, 北村健太郎, 菊池崇, Simulation of GIC flowing through the power transmission network (187 kV-500 kV) in Japan, 日本惑星科学連合大会, 2019/5/28, 幕張・千葉

橋本久美子, 北村健太郎, 菊池崇, 海老原祐輔, 家森俊彦, 亘慎一, 中国電力における地磁気誘導電流観測と初期解析報告, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 146 回講演会, 2018/11/25, 名古屋大学

Takashi Kikuchi, Yusuke Ebihara, Kumiko Hashimoto, Shin-Ichi Watari, Period dependence of reproducibility of the geomagnetically induced currents, PSTEP-3, NICT, May2018

T. Kikuchi, Y. Ebihara, K.K. Hashimoto, S. Watari, Reproducibility of the geomagnetically induced currents in Hokkaido with a two-layer conductivity model, JpGU2019 Makuhari 20190526-30

T. Kikuchi, Y. Ebihara, K.K. Hashimoto, S. Watari, Reproducibility of the geomagnetically induced currents in Hokkaido with a two-layer conductivity model, PSTEP-4 International Symposium 2020.

【誌上】

Kikuchi, T. Y. Ebihara, K. K. Hashimoto, K. Kitamura, and S. Watari, Empirical model for reproduction of the geomagnetically induced currents at middle latitudes, Space Weather 投稿中.

菊池崇、磁気圏電離圏電流系と地磁気変動、太陽地球圏環境予測オープン・テキストブック 2.3.3、名古屋大学 2020 年出版予定。

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>

Takashi Kikuchi (2020), Penetration of the magnetospheric electric fields to the low latitude ionosphere, Space Physics and Aeronomy, Volume 3: Advances in Ionospheric Research: Current Understanding and Challenges Chaosong Huang (Editor), Gang Lu (Editor), ISBN: 978-1-119-50755-0, American Geophysical Union