

研究成果報告書

研究 題 目		中国電力送電線に流れる地磁気誘導電流と地磁気嵐の定量関係	実 施 年 度
			2022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

太陽黒点爆発が発生すると、地球磁場が及ぶ 10 万 km に広がる宇宙空間(磁気圏)や高度 100 ～600 kmに広がる電離圏が嵐状態になる。磁気圏を流れる電流の一部は、地球磁力線をあたかも電力送電線として極域電離圏へ流れ、オーロラ中に 100 万 A に達する電流を流す。さらに電離圏電流は水平方向に流れ、日本上空から赤道の電離圏まで達し、地球規模の地磁気変動を発生させる(橋本、菊池他 2020, 菊池、橋本他 2022a,b)。地磁気変動は地球表面に誘導電流を流し、電力送電系統中の変圧器間に電位差を生じさせる。この電位差が変圧器の接地線を通じて、送電線中に準直流電流(GIC: geomagnetically induced current)を流すために、送電系統を不安定化させる。高緯度地方では、大規模停電を引き起こした例もあり研究がなされてきた。

日本では、名古屋大学等が北海道電力で GIC を計測し(2005-08 年)、地磁気東西成分と相関関係があることを報告した(亘、菊池他, 2009; 菊池、橋本他, 2021)。地磁気南北成分の時間変化率との相関が高い高緯度 GIC とは異なる結果である。さらに近年名古屋大学と京都大学が中心となり東京電力で GIC 計測を実施しているが、中緯度 GIC の特性は十分理解できていない。

我々は、地磁気嵐やオーロラ嵐などの宇宙天気事象が、低緯度の GIC に与える影響を定量的に検証することを目的に、中国電力技術研究財団から助成(2018-19 年度)を受けて、東山口変電所と新山口変電所(図1)で GIC の計測を実施してきた。中国電力の基幹送電線は、山陰と山陽地方の海岸線にほぼ平行に長く伸びるものと、それらを南北に結ぶもので構成された単純な構造であることが特徴である。そのため、GIC に対する地磁気南北・東西成分の寄与や海岸線効果の切り分けに適していると考えられる。これまで、両変電所の GIC が地磁気東西成分に比例する特性と、その地磁気変動から GIC を再現するモデルを論文に発表した(菊池、橋本他 2021)。

しかし、中国電力の GIC を再現、予測するモデルの改良には、GIC と地磁気変動成分、誘導電場との関係を定量的に明らかにする必要があるが、これまでは事例解析にとどまっていた。本研究では、太陽活動が極大期に向かい、発生頻度が高くなった極域のオーロラ嵐にともなう1～2時間の継続時間を持つ湾型地磁気変動に起因する GIC に対して、下記の基本特性を詳細に解析した。

① GIC と地磁気方向成分の相関関係と海岸線効果

② 新山口と東山口変電所の GIC の強度差

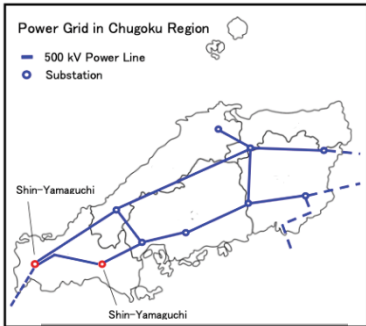


図 1 中国電力送電網

参考文献：Kikuchi, T., Ebihara, Y., Hashimoto, K.K., Kitamura, K., and Watari, S-I., Reproducibility of the Geomagnetically Induced Currents at Middle Latitudes During Space Weather Disturbances. Front. Astron. Space Sci. 8:759431, 2021.

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）

極域でオーロラ嵐(サブストーム)が発生するのにもない、非常に強いジェット電流が高緯度地方の高度 110 km 付近の電離圏を水平に流れる。この電流が数 100～2000 nT の地磁気変動を起こし、高緯度地域に重大な GIC を発生させる。オーロラ嵐では同時に、ジェット電流を供給する電流が磁力線に沿って磁気圏から流れる(沿磁力線電流)。沿磁力線電流は、日本のような中低緯度の夜間に、数～数10 nT の湾型地磁気変動を発生させる。すなわち、オーロラ電流のエネルギーの一部が、地磁気変動として日本にまで伝搬する。本研究では、湾型地磁気変動により中国電力新山口、東山口変電所において引き起こされる GIC の特性を定量的に調べた。東山口、新山口両変電所で同時に計測データが得られた 2019 年 4 月-2021 年 8 月、2022 年 8 月-2023 年 3 月の 37 ヶ月間に発生した事象を解析した。

本研究では、地磁気変動データとして、気象庁柿岡地磁気観測所(茨城県石岡市)で計測された 1 秒サンプリングデータを使用した。オーロラ電流による地磁気変動事象の抽出のために、同観測所が公表する地磁気現象「bay」リストを使用した。湾型地磁気変動 89 件(以下、bay イベントと呼ぶ)に関して解析を行った。菊池,橋本他(2021)の誘導電場計算モデルを使用し、地磁気南北(X)成分と東西(Y)成分のそれぞれが誘導する東西方向電場、南北方向電場を計算し、GIC との相関解析を行った。このモデルは、地球が一様な電気伝導度(10^{-4} mho/m)を持つ単層で構成されている。

① GIC と地磁気方向成分の相関関係と海岸線効果

本研究課題の最も重要な成果は、新山口と東山口では、GIC の地磁気方向成分に対する依存性が異なることを定量的に明らかにしたことである。太陽活動が低調で顕著な宇宙天気事象の発生頻度が低い時期に得られた、数例の事例解析に基づく結果では、新山口と東山口変電所の GIC が共に地磁気東西成分と相関が高いとの見通しを立てていた。しかし、すべての bay イベントについて、新山口と東山口の GIC と、柿岡の地磁気方向成分の相関関係を調べたところ、新山口は地磁気東西成分による誘導電場、東山口では南北成分による誘導電場に対して強い依存性があることが明らかになった。

図 2 は、2020 年 9 月 25 日 14:53 UT (世界時)に発生したオーロラ嵐に伴う bay イベントの例である。上段から柿岡の地磁気 X,Y 成分(KAK-X, KAK-Y)、地磁気から計算した誘導電場二成分(E_x , E_y)、そして、新山口、東山口の GIC(GIC-SYG, GIC-HYG)を表す。新山口と東山口の GIC 相互の相関は低く(相関係数: 0.39)、新山口の GIC は地磁気東西成分(0.71)

と、この成分により誘導される南北方向電場(0.92)と高い相関関係を示す。一方、東山口の場合、GIC は地磁気南北成分(0.83)、東西方向電場(0.81)と相関が高い。

同様の相関解析を 89 件の bay イベントについておこなった結果、新山口の場合、GIC と南北方向電場の間の相関係数が 0.8 以上の事例は 77.5%、東西方向電場では 10.1%となり、南北方向の電場と相関が高い。他方、東山口では、GIC は東西方向、南北方向の電場と相関係数が 0.8 以上の事例はそれぞれ、59.6%と 16.9%となり、東西方向電場との相関が高い事例が有意に多い

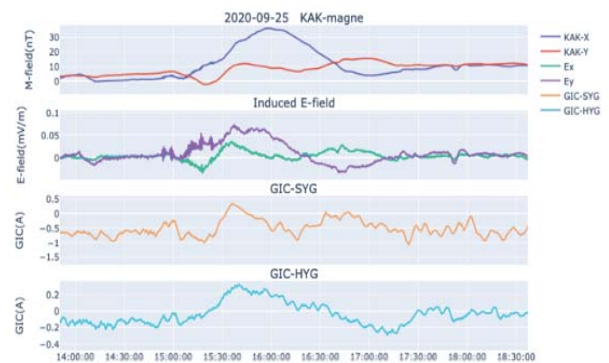


図 2 オーロラ嵐に伴う bay イベントの例

結果となった。隣接する二変電所間の GIC が誘導電場に対して異なる方向成分依存性を示すことが明らかになった。

そこで、さらに GIC を目的変数、東西方向と南北方向の誘導電場を説明変数として、標準化重回帰分析を行い、二方向の誘導電場の GIC に対する影響度を定量的に比較した。その結果、二変電所とも、80%を超える bay イベントに対して、R 二乗決定係数が 0.7 以上の高い値で標準化偏回帰係数を得た。東西方向と南北方向の誘導電場の影響度(標準化偏回帰係数)の比率から、GIC と最も相関が高くなる電場の方向を計算した結果を図 3 に示す。縦軸は北からの角度を東回りで表す。東山口の GIC (図 3 左:HYG) は北から平均 62.5 度東寄りの方向の電場と相関が高く、新山口 (図 3 右:SYG) は北から東に平均 13.5 度の向きであった。個々の bay イベントにより、ばらつきはあるものの、隣接する変電所間で電場が寄与する方向に有意な差異があることを定量的に明らかにした。このような誘導電場の方向成分依存性が生じる原因の 1 つは、海岸線効果が考えられる。地面に対して海は良導体であるため、電場は海岸線に垂直になろうとする。この性質が一種のフィルター作用となり、ある方向の電場だけを存在させることが考えられる。

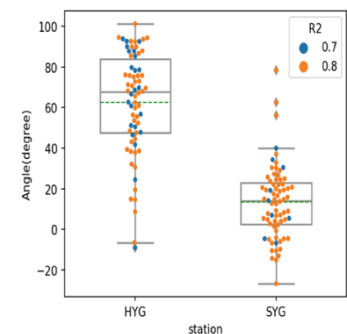


図 3 誘導電場ベクトルの北からの角度

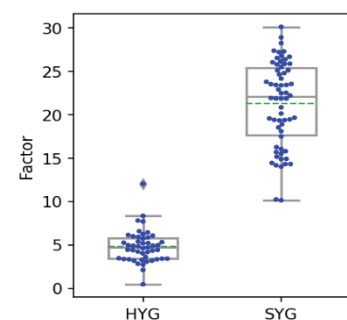


図 4 誘導電場に対する GIC の応答係数

② 新山口と東山口変電所の GIC の強度差

課題①の成果の通り、新山口と東山口の GIC の相関関係は低く、それぞれ異なる方向の誘導電場に応答する。そのため、二変電所間の GIC 強度を直接比較することは困難である。そこで、誘導電場に対する GIC の応答係数を求めて強度比較を試みた。先述の重回帰分析から求めた方向の誘導電場を bay イベントごとに計算し、GIC と単回帰分析を行った。回帰方程式の 1 次項の係数を用いることにより、地磁気から計算された誘導電場に対する応答(強度)を比較した。結果を図 4 に示す。東山口 (図 4 左) では平均 4.79 (sd=1.86)、新山口 (図 4 右) では平均 21.27 (sd=4.87) が得られた。この数値はモデルの電気伝導度に依存する値であるが、同じ強度の誘導電場に対して、新山口の GIC 強度は東山口の約 4.4 倍になることが示された。この強度差が生じる要因として、2 つの可能性があげられる。東山口変電所は山陽地方を東西に伸びる新山口幹線と東山口幹線の中継点に位置するため、中性線で両基幹線の GIC が打ち消しあうことが予想される。一方、新山口変電所は、西に伸びる山陰と山陽の 2 本の基幹送電線が合流(分岐)する位置にあるため、GIC が増幅すると考えられる。今後、定量的な検証を行っていく。

本研究では、以上の通り、新山口、東山口両変電所の GIC の、地磁気が誘導する電場に対する方向依存性、および強度特性を定量的に示した。また、本解析に使用した誘導電場の計算モデルは、地下構造を考慮しない単純化したモデルであったが、中国電力の GIC と高い相関関係を示すことを確認できた。これらの成果は、中国地方の海岸線と中国電力の送電線の方向、変電所の位置を考慮した GIC 予測モデルの改良に必須な基本特性と考えられる。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

- 新山口変電所内で落雷による短絡事故が発生し、GIC 計測機器に深刻な障害が発生したため、2021 年 11 月から原因箇所の調査と修理作業を最優先で行ってきた。しかし、計測再開に 2022 年 8 月までかかり、申請時に計上していなかった修理作業の旅費、設備備品、消耗品等が発生した。補助バッテリー、テスター、工具類、パテ、ケーブル等の消耗品は変電所内屋外での計測機器修復作業に使用した。
- 計画では、データ可視化プログラミングソフト IDL のバージョンアップを行う予定であったが、2021 年度の予算の関係でライセンスが切れてしまったため、2022 年度に 1 ライセンスを新規購入した。今回、事例解析の積み重ねから、統計解析まで行うための解析ツールを作成し、データ解析の効率化に活用した。Office は共同研究者が成果発表のために使用した。
- GIC データ、磁力計データ以外にモデル計算など解析の過程で 2 次データが生成され、データベース用 PC のデータ容量が逼迫したため、外付け SSD で拡張した。
- 旅費は、新山口変電所のデータ回収のため3回、中国電力ネットワーク(株)周南ネットセンター関係者との打合せ、電気通信大学でのプロジェクト成果報告のために使用した。山口県内変電所への移動には、レンタカーを使用した。
- 3 月 14-15 日に、代表研究者も周南ネットセンター等への出張を予定していたが、体調不良のため中止した。そのため、旅費分約6万円が使用できずに残金が生じた。

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）

北海道電力で実施された先行研究において報告された、GIC の地磁気変動の東西成分への依存性は、これが誘導する電場南北成分への依存性を意味する。その原因として、①東西に延びる海岸線効果により電場の南北方向成分が優越する、②極域から電磁波 TM モードにより南北方向に輸送される電離層電流が南北方向電場を伴うこと、が考えられた。ところが、今回の誘導電場との相関解析は、新山口 GIC が南北方向電場と高い相関を示す一方、東山口 GIC が東西方向電場と高い相関を示すことが明らかになった。この結果は、②よりも①の可能性が強いことを示唆する重要な結果である。しかし、東山口が位置する瀬戸内側の海岸線だけで説明することは難しく、新たな課題として送電線の方法や地下構造などを考慮した検証が必要であると考えている。この課題に対して手掛かりを得るため、今後、宇宙天気事象の変動周期に対する依存性を調べる計画である。周期の長い地磁気変動は地中深く浸透するために、短い周期の変動に比べて海岸線効果を受けにくいことが予想される。今後、磁気インパルスや地磁気脈動(数分-10 分)から地磁気日変化など多様な時間スケールの事象に同様の解析手法を応用し、誘導電場に対する応答特性の全容を明らかにしていく。日本国内の他の中緯度 GIC も含めて、海岸線効果の検証に重要な知見が得られるものと考えられる。

短絡事故による計測器障害の復旧作業の影響により、論文発表のスケジュールが年度内に間に合わなかったが、成果は全て国際学術誌に発表予定で執筆中である。

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）

1. Kikuchi, T.; Hashimoto, K.K.; Tanaka, T.; Nishimura, Y.; Nagatsuma, T. (2022), Middle Latitude Geomagnetic Disturbances Caused by Hall and Pedersen Current Circuits Driven by Prompt Penetration Electric Fields. Atmosphere, 13, 580.
<https://doi.org/10.3390/atmos13040580> , 2022.
2. Kikuchi, T., T. Araki, K. K. Hashimoto, Y. Ebihara, T. Tanaka, Y. Nishimura, G. Vichare, A. K. Sinha, J. Chum, K. Hosokawa, I. Tomizawa, Y. Tanaka, A. Kadokura, Instantaneous achievement of the Hall and Pedersen-Cowling current circuits in northern and southern hemispheres during the geomagnetic sudden commencement on 12 May 2021, Front. Astron. Space Sci. 9:879314. doi: 10.3389/fspas.2022.879314, 2022.
3. Yusuke Ebihara, Satoko Nakamura, Tada-nori Goto, Shinichi Watari & Takashi Kikuchi , Geomagnetic Variability and GIC, Solar-Terrestrial Environmental Prediction Chapter 6, edit. K. Kusano, DOI: 10.1007/978-981-19-7765-7_6, 2023.