

## 1.2.2 電力

海老原 祐輔（京大生存圏研究所）

（2020年7月30日受付、2021年5月31日公開）

### 1.2.2.1 序論

地磁気誘導電流（Geomagnetically Induced Current、以下GICと略す）は宇宙環境由来の現象で、送電網やパイプライン、通信ケーブル等に影響を及ぼすことがある。例えば1989年3月にはカナダで、2003年10月にはスウェーデンでGICを原因とする長時間の停電が発生している（Bolduc 2002; Pulkkinen et al. 2005）。ひとたび停電が起きればその社会的影響は甚大で、復旧にかかるコストも高い。そのため、耐量評価のためのガイドライン制定やリアルタイムでの情報提供などの動きが世界的に始まっている。本稿では、送電網に対するGICの影響とその発生原因、世界の動向と数値予測の現状について概観したい。

### 1.2.2.2 高圧送電網に及ぼす GIC の影響

変圧器は需要者に電力を届けるために必要なコンポーネントの一つで、励磁電流と磁束の間の線形な領域を利用して波形を維持しつつ電圧を変換している。しかし、励磁電流がある閾値を超えて非線形な領域で動作する状態になると磁気飽和をおこし、出力波形が乱れるようになる。送電システムの周波数（50 Hzまたは60 Hz）と比べ十分に低い周波数を持つ準直流電流（GIC）が過剰に混入すると、送電システムの周期で変動する正弦波のうち半周期は飽和状態に、残りの半周期は不飽和状態になる。これを半周期飽和（half-cycle saturation）と呼ぶ。半周期飽和がおこると無効電力が増大するとともに、基本波の整数倍の周波数をもつ高調波が発生する。無効電力の増大は電圧低下を生じさせ、高調波の発生は送電システムを保護するためのリレーが誤作動をおこす原因となる。ただし、普及が進んでいるデジタル式保護リレーはデジタルフィルターにより高調波成分を除去できるため、高調波によるリレーの誤作動はおこりにくくなっている（Van der Zel 2007）。一方、磁束が外部に漏れることで渦電流が流れ、熱が発生する。これをホットスポット加熱（hot-spot heating）と呼ぶ。ホットスポット加熱は巻線の絶縁強度の低下を招く恐れがあり、IEEEスタンダード（標準規格）C57.91-1995ではホットスポット加熱の上限を定めている。また、温度上昇に伴い変圧器に用いられる絶縁紙の劣化（Sakai et al. 2001b）や巻線から発生した気泡により絶縁強度が低下し絶縁破壊に至ることも知られている（Sakai et al.

2001a)。変圧器内部の局所的な加熱について絶縁油や絶縁物が熱分解する際に生じ絶縁油中に溶解したガスを分析（油中ガス分析、Dissolved Gas Analysis; DGA）することで知ることができ、リスク評価の観点から個々の変圧器についてGICと温度の関係を予め把握しておくことが望ましい。変圧器に対するGICの影響についてはGirgis,Vedante（2012）を参照されたい。

### 1.2.2.3 GIC に対する各国の取り組み

#### アメリカ合衆国

2019年3月、大統領府は宇宙天気事象に対する重要インフラとセキュリティの防備体制強化を目指した国家宇宙天気戦略・行動計画（National Space Weather Strategy and Action Plan）を発表した（<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/03/National-Space-Weather-Strategy-and-Action-Plan-2019.pdf>）。GICによる停電も懸念すべき宇宙天気事象のひとつとされ、迅速且つ正確な予測、宇宙天気事象に対する対応と回復のための計画策定を求めている。

北米電力信頼度協議会（NERC）はGICに対する変圧器の信頼性を担保するため、各種ベンチマークテストを提案している（<https://www.nerc.com/pa/Stand/Pages/TPL0071RI.aspx>）。1989年3月13-14日に発生した磁気嵐の際に測定された地磁気を基に地磁気誘導電場（Geomagnetically Induced Electric field、以下GIEと略す）と一様な層状の地下伝導度の参照値（シナリオ）を策定し、北米送電ネットワークを流れるGICを求めた。推定したGICの時系列データから各変圧器のホットスポット加熱の予測も行っている。例えば、有効GICが1相あたり75 A流れた場合、ホットスポット温度が最大摂氏160度から172度の範囲まで上昇すると推定している。摂氏172度という値はIEEE標準C57.91-2011が提唱する緊急時の短時間高負荷時（30分程度）制限基準である摂氏200度を下回る。この制限基準を上回るのは有効GICが1相あたり140 Aを超えるときである。ただし、この推定値は変圧器内の油温に依存することに注意する必要がある。同報告書（TPL-007-1）では、200 kV以上の変圧器について、上記シナリオに基づいて導出されたGICが1相あたり75 A 以上流れる場合には熱影響評価を行うよう求めている。同報告書では磁気嵐に対する送電網の保護と制御についても提言を行っている

（<https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/2012GMD.pdf>）。

アメリカ連邦政府における宇宙天気業務を担う機関の一つであるアメリカ海洋大気庁（NOAA）宇宙天気予報センター（SWPC）は磁気嵐スケール（G-scale）やKp指数に加え、GICの現状把握のためGIEの全米マップをリアルタイムで公開している

（<https://www.swpc.noaa.gov/products/geoelectric-field-1-minute>）。

送電網シミュレータを開発・販売しているPowerWorld社は、NERCが推奨するシナリオを送電網モデルに与え、変電所中性直流電圧、バス直流電圧、変圧器中性点電流、変圧器無効電力損失、送電線直流電圧を求めることができるモジュールを提供している

(<https://www.powerworld.com/products/simulator/overview>)。

アメリカ航空宇宙局 (NASA) のCommunity Coordinated Modeling Center (CCMC) では、太陽で発生するコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) の観測データやリアルタイム太陽風データと各種モデル、シミュレーションを組みあわせ、GIC予測を目指したSolar Shieldプロジェクトを2007年に開始した (Pulkkinen et al. 2009)。現在は、GIEなどのデータを提供している (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/iswa/>)。

### カナダ

変電所でモニターしたGIC (Marti, Yin 2015) や地磁気、オーロラジェット電流、地下電気伝導度モデルを入力として各変電所を流れるGICをリアルタイムで導出するGICシミュレータ (Boteler et al. 2014; Boteler 2014) の開発が行われている。また、NERCの報告を受け、2015年にカナダ地質調査所はアルバータ州におけるGICに関する調査報告書を刊行した (<https://doi.org/10.4095/296909>)。

### イギリス

1982年7月14日、1989年3月13-14日、1989年10月19-20日、1991年11月8日に発生した磁気嵐に伴い、電圧降下、逆相電流補償装置の警報器作動、大規模連携系統における電力変動、変圧器の故障、変圧器の飽和に伴う高レベルの高調波電流などに見舞われた (Erinmez et al. 2002)。幸いにも需要者への影響は限定的で、実質的な被害は二つの変圧器のみであった。この事象を受け、送電事業者であるナショナル・グリッド (National Grid plc) は様々な規模の磁気嵐に対するリスク評価とリスク管理の調査を行った。イギリス地質調査所はGIEのマップとB<sub>GIC</sub>と呼ばれる指数をリアルタイムで提供している

([https://geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/space\\_weather/gic\\_services.html](https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/space_weather/gic_services.html))。

また、英国王立アカデミーは2013年に発行した極端宇宙天気工学システムへの影響に関するレポートの中で、GICの電力網への影響について報告した (Cannon 2013)。

### フィンランド

フィンランド気象研究所はフィンランドを含むスカンジナビア半島における地磁気変動、地磁気データを用いて計算されたGIE及びGICの予測値をリアルタイムで提供している (<http://swe.ssa.esa.int/web/guest/fmi-federated>)。

## 欧州連合

フィンランド、ハンガリー、スウェーデン、英国、ロシア、米国からなるコンソーシアムにより2011～2014年にThe European Risk from Geomagnetically Induced Currents (EURISGIC) プロジェクトを実施した (Viljanen 2011)。GICを予測する上で要となる地下比抵抗分布モデルを作成し、30分のリードタイムで地磁気の時間変化量を予測するシステムの開発、欧州の広域リスクマップの提示、極端事象発生時の状況予測を行った。

## オーストラリア

オーストラリアを含むオセアニア地域におけるGIE分布をGIC-Index (Marshall et al. 2011) としてリアルタイムで提供している (<https://www.sws.bom.gov.au/Geophysical/1/2/5>)。また、2020年の半ばから電力会社と協力して、オーストラリア南西海岸部の変電所でGICの測定を実施している (Marshall et al. 2013)。

## 日本

1989年にカナダでGICによる停電が発生したことを受け、日本の電力会社でも送電網に対するGICの影響評価が行われた。2000年代以降もGICに関する関心が高まり、調査や測定が行われている。ここでは公表されている事例を幾つか紹介したい。東京電力ではGICが変圧器に及ぼす影響について実験を行い (Takasu et al. 1993; Takasu et al. 1994)、GICの実測も行っている (石倉 et al. 2010)。また、(原田 et al. 2009) により新秦野、新富士、新山梨の各変電所で測定したGICと地磁気変動をつなぐ経験的な応答関数 (インピーダンス) が求められている。中部電力でもGICの実測が行われ、1991年10月28日の磁気嵐時に東栄変電所で約7 A (湯本 1991)、2001年11月6日の磁気嵐時に駿遠変電所で最大42 AのGIC (田端,小川 2003) が報告されている。中部電力の委託を受けたアメリカ・メタテック社はGICの実測値と磁気嵐の関係について調査を行い、GICとDst指数の最大振幅の絶対値との間に良い相関があることを示した (Kappenman 2010)。Dst指数は地球規模でおこる地磁気変動を表す指数で、数日間続くDst指数の減少は地球を取り囲むように流れる赤道環電流が原因と考えられている。したたって、赤道環電流は日本のGIC変動の主要な電流源の一つであると言える。

経済産業省は、電力網に影響を及ぼす自然災害の一つとして、GICが日本の電力網に及ぼす影響について調査を行い、2015年3月に「平成26年度電気設備技術基準関連規格等調査役務請負報告書」を刊行した。太陽フレアからGICに至るメカニズムについて事例を交えながら詳細に解説している。同報告書ではGIC発生に至る定量的メカニズムについては確立した知見が得られていないとし、電気設備の保安のあり方を調査する必要があると提言している。また、巨大磁気嵐の発生が続いていた2003年10月31日に129.09 AものGICが日本の変圧器で測定されたことも報告している。このとき送電網に顕著な異常は見られなかったようである。

坪井,堀内 (1988) は日本の磁気緯度と大地の抵抗率を勘案し、GICが日本の電力系統に及ぼす可能性は極めて小さいと述べている。その可能性を定量化するためには、巨大フレアや磁気

嵐の発生確率、大地の抵抗率の分布、送電系統などあらゆる要素を考慮した包括的な調査研究が必要である。2015～2019年度に実施された「太陽地球圏環境予測（PSTEP）」プロジェクト（科学研究費補助金・新学術領域）では太陽フレアの発生予測モデルや太陽が地球に及ぼす影響の短期的、長期的影響の予測モデルの開発が行われた。GICについては電力会社の協力を得て4カ所の変電所でGICの速い変動を捉えることができるように10 Hzのサンプルレートで実測するとともに、日本のGICの性質を正しく理解し、GIC変動を予測するための基盤を構築した。

#### 1.2.2.4 地磁気誘導電流発生のしくみ

GICの究極の起源は太陽にある。ここでは太陽からGICに至る過程を概観する。

##### 太陽

GICの原因となる太陽の現象として、フレア、プロミネンス、コロナホールがあげられる。フレアは黒点群の成長に伴い浮上する磁束が引き起こす爆発的現象で、CMEを伴うこともある。プロミネンスは数千度から数万度のプラズマが磁場に支えられて太陽外層大気であるコロナ中に浮かぶ細長い構造で、突然惑星間空間に向かって飛んでいくことがある。このときCMEを伴うことが多い。コロナホールは極端紫外線で暗く見える領域で、高速の太陽風を吹き出している。大規模なコロナホールは太陽の極域によく現れるが、赤道付近など太陽の低緯度に現れると地球に影響を及ぼしやすくなる。ただし、コロナホールによっておこる磁気嵐の規模は比較的小さい。太陽の現象については3.1章を参照いただきたい。

##### 太陽風

太陽は電離した気体（プラズマ）を惑星間空間に向かって恒常的に放出している。その放出は定常的ではなく、例えばCMEがおこると突発的に大量のプラズマが太陽から放出される。CMEの速さは100～2000 km/sと千差万別である。CMEはねじれた磁束管を伴っていると考えられており、地球から見て南向きの磁場がCME本体やCME前面のシース領域中に含まれていると磁気嵐やサブストームの原因となる。また、CME前面に形成される衝撃波の到来によるSudden Storm Commencement (SSC) あるいはSudden Impulse (SI) に伴い、強いGICが引き起こされることが知られている。コロナホールから吹き出す高速太陽風が先行する低速太陽風に追いつき相互作用することにより形成される領域を共回転相互作用領域（corotating interaction region; CIR）と呼び、太陽の自転とともに回帰し、約27日毎に地磁気擾乱を発生させる。地球軌道付近では前方衝撃波と後方衝撃波が形成される場合が多い。圧縮により密度と磁場が上昇し、磁場は乱流的になる。乱れた磁場に南向き成分が含まれていると弱い磁気嵐やサブストームの原因となる。太陽風の擾乱については3.2章を参照いただきたい。

### 磁気圏・電離圏電流

地球磁場が支配する宇宙空間を地球磁気圏と呼ぶ。地球の磁力線は太陽風によって太陽とは反対側（夜側）に引きのばされ、彗星の尾のような形をしている。境界電流、尾部電流、赤道環電流などの電流が磁気圏を流れ、磁気圏の構造を支えている。地球を通過するCMEやCIRに南向きの磁場成分が含まれていると磁気圏・電離圏電流が強まり、地磁気が乱れる。とくに数日間続く地磁気の乱れを磁気嵐と呼び、突発的な電流増加とオーロラの爆発的な増光を伴う数時間続く地磁気の乱れをサブストームと呼ぶ。高緯度のオーロラ活動に伴って中緯度で発生する地磁気の湾型（bay）擾乱も日本の送電網を流れるGICの原因となる（Watari et al. 2009）。磁気圏電流については2.3.3章で詳しく説明されている。

### 地磁気誘導電場

地磁気が乱れるとファラデーの法則により誘導電場が地面に現れる。これを地磁気誘導電場（GIE）と呼ぶ。電流源の空間的な広がりや電流源からの距離、地下の比抵抗分布のため、地電場は一般に非一様性を示す。地球内部は有限かつ非一様な比抵抗があるため、GIEは周波数に依存する。地電場は地中に埋設した電極間の電位差から測定することができる。日本では気象庁地磁気観測所が柿岡、女満別、鹿屋で地電場を定常観測している。地電場と比抵抗構造については2.3.5章を参照いただきたい。

### 地磁気誘導電流

地面に電場が誘起されると送電線、パイプライン、通信ケーブルのように接地されている長大な導電体に電流が流れるようになる。これを地磁気誘導電流（GIC）と呼ぶ。とくに超超高压送電線（500 kV）や超高压送電線（220-275 kV）では送電線抵抗や変電所の接地抵抗が極めて小さく、GICが流れやすい。通常、GICは電力系統の周波数（50 Hzないし60 Hz）と比べ十分に低い周波数で変動する準直流電流として扱われる。GICの測定には変圧器の中性点と地面を結ぶ導線を流れる電流を測る方法と、送電線の周囲で磁場変動を測定する方法がある。

## 1.2.2.5 GIC 予測研究の現状

### 太陽

太陽を出発したCMEが地球に到達するまで十数時間～数日かかる。地球に向かう可能性があるCMEを検出することができれば、GICを十数時間～数日のリードタイムで予測することが可能である。更に長いリードタイムでGICを予測するためには大きなCMEの発生を事前に予測する必要がある。CMEの原因の一つである太陽フレアの予測は各国の機関で行われている。経験的知見に基づく予測が主であるが、名古屋大学の草野らのグループは物理的に予測するための

アルゴリズムを開発した (Kusano et al. 2020)。詳細は3.3.2章を参照いただきたい。

## 太陽風

コロナグラフのデータを解析することで得られるCMEの速さと方向から地球へのおよその到来タイミングを推定することができる。また、太陽から放出されたCMEの情報を太陽風シミュレーションに埋め込むことでその伝搬を予測することが可能となる。例えば、WSA-ENLILモデル (Odstrčil, Pizzo 1999) やSUSANOO-CME (Shiota, Kataoka 2016) などが開発されている。地球から太陽方向に約150万km離れた太陽と地球の重力が釣り合うラグランジュ点でACEやDSCOVRという宇宙機が太陽風を常時モニターしている。ここで観測した太陽風が地球に届くまで数十分～1時間程度かかるが、観測データを送る電波は約5秒で届く。つまり、数十分～1時間程度前に太陽風の磁場、速度、密度などを入手することができる。この太陽風のデータを用いることにより、地球磁気圏への影響を評価することができる。

## 磁気圏・電離圏電流 (地磁気変動)

地磁気変動は経験モデルや物理モデルを用いて予測することができる。最も簡単なモデルは太陽風のパラメータを入力としてDst指数 (中低緯度の地磁気変動を経度方向に平均したもの) を求めるもので、簡単なモデルでありながら比較的再現性が良いことで知られている (Burton et al. 1975)。既存の30件の経験モデルと物理モデルを用いてDst指数を再現する試みが行われ、物理モデルよりも経験モデルのほうが概ね成績がよいという結果が得られている (Rastätter et al. 2013)。高緯度で流れるオーロラ・ジェット電流については電磁流体シミュレーションによって概ね観測値を再現できることが示されている (Ebihara et al. 2019)。

## 地磁気誘導電場

地面に誘導される電場を求める方法は幾つかある。電場と地磁気を関係づける係数 (インピーダンス) を用いる方法 (Kaufman, Keller 1981) のほか、有限要素法 (Rodi 1976)、有限差分法 (Mackie et al. 1994) がある。Goto (2015) は1次元、2次元、3次元計算の結果を比較し、3次元計算がGICを評価する上で重要であると指摘している。Fujita et al. (2018) は有限差分法を用いて日本列島広域の地電場分布を求めた。以上の計算は周波数領域にて行うが、有限差分時間領域シミュレーションで電磁界の3次元時間発展を直接解く試みもなされている (Nakamura et al. 2018)。局所的な地電場については地磁気変動の畳み込み積分によって求めることができる (Cagniard 1950)、柿岡地磁気観測所で測定された地磁気変動から同所で測定された地電場をよく再現できることが示されている (Love, Swidinsky 2015)。

## 地磁気誘導電流

GICは地磁気の時間微分値に比例するという考え方があるが、長周期変動については地磁気に比例するよう見える場合もあることがWatari et al. (2009) によって指摘されている。これ

は周波数に応じて地下の応答特性が異なるためであることが菊池らによって指摘されている。GICを計算する方法には大きく二つある。一つは地磁気とGICの伝達関数を周波数の関数として予め求めておく方法で (Ingham 1993; Pulkkinen et al. 2007) 、伝達関数はフィンランド (Pulkkinen et al. 2007) 、ニュージーランド (Ingham et al. 2017) 、日本 (原田 et al. 2009) など求められている。ただし、この方法が適用できるのは実測に基づき伝達関数が求められている変電所等に限られる。もう一つは、送電網を一つの回路とみなし、電流保存則から送電網全体を流れる電流を一括して計算する方法である (Viljanen, Pirjola 1994) 。ただし、変電所等の位置や接続状態、接地抵抗、送電線抵抗、巻線抵抗の値を知っておく必要がある。PSTEP計画では公開されている情報をもとに日本の187 kV以上の電圧階級をもつ送電網モデルを構築し、送電網全体を流れるGICを計算した。例を図1に示す。やや東向き (磁気的な東向き) に一様な地電場を与え、送電網を流れる電流を計算した。変電所等を介して送電網と出入りする電流の向きと大きさが円の色と半径で表現されている。この場合、電流は送電網の西端付近から入り、東端付近から出る傾向が見て取れる。詳細については2.3.1章を参照いただきたい。

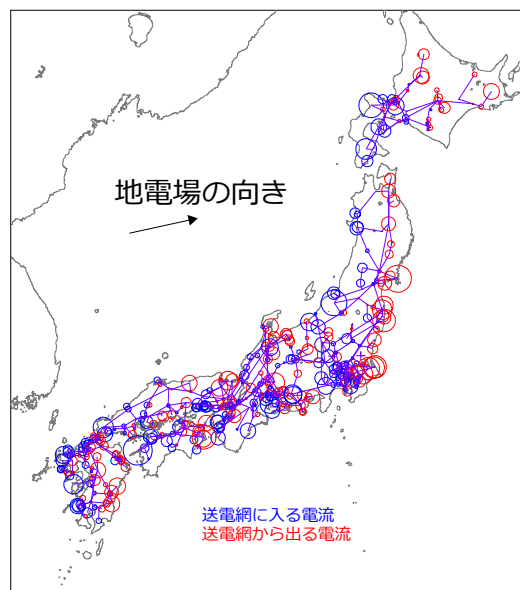


図 1. PSTEP 計画で開発した 187 kV 以上の送電網モデルと GIC の計算例。青色は送電網に入る電流を、赤色は送電網から出る電流を示す。円の半径は電流の大きさを表す。

太陽風パラメータから日本のGICをどのくらい再現できるのか現状を紹介したい。計算手順は以下のとおりである。①Burton et al. (1975) の経験モデルを用いて太陽風パラメータからDst指数を求める。②Dst 指数を柿岡地磁気観測所の地磁気変化とみなし、Love, Swidinsky (2014) の経験モデルを用いて地電場を求める。(柿岡地磁気観測所はDst指数の算出に用いられる観測



所の一つであることから幾分の合理性はある)。③藤井 et al. (2015) の結果を援用し、柿岡地磁気観測所の地電場を広域の地電場に変換する。④前項で求めた広域地電場が日本列島に一様に分布していると仮定し、日本の送電網モデルを用いてGICを求める。図2に結果を示す。変電所STBについては概ね観測をよく再現するが、変電所SFJについては不一致が目立つ。Nakamura et al. (2018) は、変電所SFJ付近の比抵抗構造は複雑であるため、地電場の分布が局所的に大きく異なる可能性を指摘している。地質学的な情報をもとに推定した非一様な地下比抵抗モデルを3次元電磁波伝搬シミュレーションに与えると観測値に近づくが (Nakamura et al. 2018) 、3次元電磁波伝搬シミュレーションは計算時間がかかり、リアルタイム予測には向かない。予めシミュレーション結果を格納しておき、その結果を適宜補間するなどして精度の高いリアルタイム予測を実現することは可能だろう。

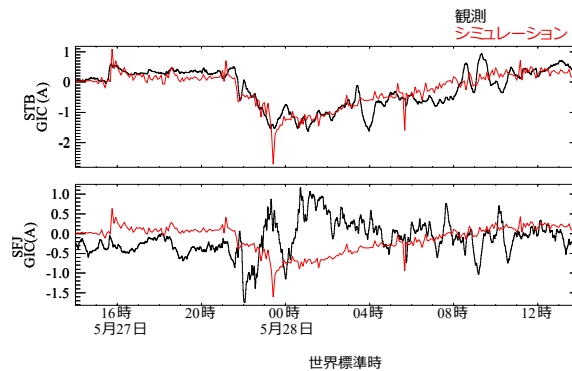


図 2. 太陽風パラメータを入力とし、各種経験モデルと PSTEP 計画で開発した送電網モデルを組み合わせで求めた日本の変電所 (STB、SFJ) を流れる GIC。一様な地電場分布を仮定している。

### 1.2.2.6 まとめ

GIC発生のしくみ、送電網への影響、予測モデルの現状について概観した。GICによって送電網に障害が発生する頻度は一般的に低い。とくに日本のような中低緯度地域では一層低いとされている (Pulkkinen et al. 2012)。事実、日本ではGICが原因で停電が発生したという報告は現在までない。しかし、3.4.2章で紹介されているように、リスクの高い超巨大磁気嵐は過去に多く発生したようである。例えば、カナダで長時間の停電を引き起こした1989年3月の磁気嵐と同等かそれ以上の規模の磁気嵐は過去160年間に少なくとも5回発生しているようである。そのような超巨大磁気嵐が近い将来発生する可能性はゼロであるとは言い切れない。頻度は低いがひとたび起これば甚大な被害をもたらす低頻度巨大災害としてGICを認識し、耐量の確認と被害

低減のための手順、災害発生時の復旧手順を予め定めておくことが望ましい。また、来たるべき巨大フレアへの備えとして、全国の送電網を流れるGICの現況と予測値を分かり易い形で表示するシステムを整備することも有効だろう。

GICを正確に予測するためには太陽から固体地球に至るまでの複雑な過程を正しく理解することが不可欠である。2015～2019年度に実施されたPSTEP計画によって、太陽、太陽風、磁気圏、電離圏、固体地球という個別の研究分野の研究者が密接に連携し、GICを予測するための研究基盤が構築された。このような枠組みを維持し、予測精度の向上を目指した研究を今後も継続することが望まれる。

## 参考文献

- Bolduc, L.: GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **64**(16), 1793-1802 (2002). doi:10.1016/S1364-6826(02)00128-1
- Boteler, D.: Methodology for simulation of geomagnetically induced currents in power systems. *Journal of Space Weather and Space Climate* **4** (2014). doi:10.1051/swsc/2014018
- Boteler, D.H., Pirjola, R., Blais, C., Foss, A.: Development of a GIC simulator. 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition (2014). doi:10.1109/PESGM.2014.6939778
- Burton, R.K., McPherron, R.L., Russell, C.T.: An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *Journal of Geophysical Research* **80**(31), 4204-4214 (1975). doi:10.1029/JA080i031p04204
- Cagniard, L.: Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting. *Geophysics* **18**, 605-635 (1950). doi:10.1190/1.1437915
- Cannon, P.S.: Extream Space Weather: Impacts on Engineered Systems - A Summary. In. Royal Academy of Engineering, London, U. K., (2013)
- Ebihara, Y., Tanaka, T., Kamiyoshikawa, N.: New Diagnosis for Energy Flow From Solar Wind to Ionosphere During Substorm: Global MHD Simulation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **124**(1), 360-378 (2019). doi:10.1029/2018JA026177
- Erinmez, I.A., Kappenman, J.G., Radasky, W.a.: Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company's electric power transmission system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **64**, 743-756 (2002). doi:10.1016/S1364-6826(02)00036-6
- Fujita, S., Fujii, I., Endo, A., Tominaga, H.: Numerical modeling of spatial profiles of geomagnetically induced electric field intensity in and around Japan. *Technical Report of the Kakioka Magnetic Observatory* **14**(2), 35--50 (2018)

- Girgis, r., Vedante, K.: Effects of GIC on power transformers and power systems. *PES T&D* 2012, 1-8 (2012). doi:10.1109/TDC.2012.6281595
- Goto, T.-n.: Numerical studies of geomagnetically induced electric field on seafloor and near coastal zones incorporated with heterogeneous conductivity distributions. *Earth, Planets and Space* **67**(1) (2015). doi:10.1186/s40623-015-0356-2
- Ingham, M.: Analysis of variations in cathodic protection potential and corrosion risk on the natural gas pipeline at Dannevirke. Report for the Natural Gas Corporation, 94 (1993)
- Ingham, M., Rodger, C.J., Divett, T., Dalzell, M., Petersen, T.: Assessment of GIC Based On Transfer Function Analysis. *Space Weather* **15**(12), 1615-1627 (2017). doi:10.1002/2017sw001707
- Kappenman, J.: Geomagnetic storms and their impacts on the US power grid. *M*(805) (2010)
- Kaufman, A.A., Keller, G.V.: The magnetotelluric sounding method. *Method in Geochemistry and Geophysics* **15** (1981)
- Kusano, K., Iju, T., Bamba, Y., Inoue, S.: A physics-based method that can predict imminent large solar flares. *Science* **369**(6503), 587-591 (2020). doi:10.1126/science.aaz2511
- Love, J.J., Swidinsky, A.: Time causal operational estimation of electric fields induced in the Earth's lithosphere during magnetic storms. *Geophysical Research Letters* **41**(7), 2266-2274 (2014). doi:10.1002/2014GL059568
- Love, J.J., Swidinsky, A.: Observatory geoelectric fields induced in a two-layer lithosphere during magnetic storms. *Earth, Planets and Space* **67**(1), 58-58 (2015). doi:10.1186/s40623-015-0213-3
- Mackie, R.L., Smith, J.T., Madden, T.R.: Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example. *Radio Science* **29**(4), 923-935 (1994). doi:10.1029/94rs00326
- Marshall, R.A., Gorniak, H., Van Der Walt, T., Waters, C.L., Sciffer, M.D., Miller, M., Dalzell, M., Daly, T., Pouferis, G., Hesse, G., Wilkinson, P.: Observations of geomagnetically induced currents in the Australian power network. *Space Weather* **11**(1), 6-16 (2013). doi:10.1029/2012sw000849
- Marshall, R.A., Smith, E.A., Francis, M.J., Waters, C.L., Sciffer, M.D.: A preliminary risk assessment of the Australian region power network to space weather. *Space Weather* **9**(10) (2011). doi:10.1029/2011sw000685
- Marti, L., Yin, C.: Real-Time Management of Geomagnetic Disturbances: Hydro One's eXtreme Space Weather control room tools. *IEEE Electrification Magazine* **3**(4), 46-51 (2015). doi:10.1109/mele.2015.2480637
- Nakamura, S., Ebihara, Y., Fujita, S., Goto, T., Yamada, N., Watari, S., Omura, Y.: Time Domain Simulation of Geomagnetically Induced Current (GIC) Flowing in 500-kV Power Grid in Japan Including a Three-Dimensional Ground Inhomogeneity. *Space Weather* **16**(12), 1946-1959 (2018). doi:10.1029/2018sw002004
- Odstrčil, D., Pizzo, V.J.: Three-dimensional propagation of coronal mass ejections (CMEs) in a structured solar wind flow: 1. CME launched within the streamer belt. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **104**(A1), 483-492 (1999). doi:10.1029/1998ja900019
- Pulkkinen, A., Bernabeu, E., Eichner, J., Beggan, C., Thomson, A.W.P.: Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios. *Space Weather* **10**(4), 1-19 (2012). doi:10.1029/2011SW000750
- Pulkkinen, A., Hesse, M., Habib, S., Van der Zel, L., Damsky, B., Policelli, F., Fugate, D., Jacobs, W., Creamer, E.: Solar shield: forecasting and mitigating space weather effects on high-voltage power transmission systems. *Natural Hazards* **53**(2), 333-345 (2009). doi:10.1007/s11069-009-9432-x

- Pulkkinen, A., Lindahl, S., Viljanen, A., Pirjola, R.: 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**(8) (2005). doi:10.1029/2004SW000123
- Pulkkinen, A., Pirjola, R., Viljanen, A.: Determination of ground conductivity and system parameters for optimal modeling of geomagnetically induced current flow in technological systems. *Earth, Planets and Space* **59**(9), 999-1006 (2007). doi:10.1186/BF03352040
- Rastätter, L., Kuznetsova, M.M., Glocer, A., Welling, D., Meng, X., Raeder, J., Wiltberger, M., Jordanova, V.K., Yu, Y., Zaharia, S., Weigel, R.S., Sazykin, S., Boynton, R., Wei, H., Eccles, V., Horton, W., Mays, M.L., Gannon, J.: Geospace environment modeling 2008-2009 challenge:Dstindex. *Space Weather* **11**(4), 187-205 (2013). doi:10.1002/swe.20036
- Rodi, W.L.: A Technique for Improving the Accuracy of Finite Element Solutions for Magnetotelluric Data. *Geophysical Journal International* **44**(2), 483-506 (1976). doi:10.1111/j.1365-246X.1976.tb03669.x
- Sakai, M., Daikuhara, N., Maki, K., Taniguchi, Y., Yanabu, S.: A Research of Critical Temperature on Bubble Formation under Overloaded Oil-Immersed Transformer. *IEEJ Transactions on Power and Energy* **121**(4), 500-506 (2001a). doi:10.1541/ieejpes1990.121.4\_500
- Sakai, M., Kobayashi, N., Daikuhara, N.: Research on Insulation Paper Thermal Deterioration in Oil-Immersed Transformer Over-Load Operation. *IEEJ Transactions on Power and Energy* **121**(4), 507-513 (2001b). doi:10.1541/ieejpes1990.121.4\_507
- Shiota, D., Kataoka, R.: Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME). *Space Weather* **14**(2), 56-75 (2016). doi:10.1002/2015SW001308
- Takasu, N., Miyawaki, F., Saitou, S., Fujiwara, Y.: DC Excitation of Transformer Cores due to Geomagnetically-Induced Currents. *IEEJ Transactions on Power and Energy* **113**(4), 435-444 (1993). doi:10.1541/ieejpes1990.113.4\_435
- Takasu, N., Oshi, T., Miyawaki, F., Saito, S., Fujiwara, Y.: An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents. *IEEE Transactions on Power Delivery* **9**(2), 1173-1182 (1994). doi:10.1109/61.296304
- Van der Zel, L.: Review and Development of Improved Techniques for GIC Measurement and Mitigation. In: *Technical Update*. vol. 1013801. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, (2007)
- Viljanen, A.: European Project to Improve Models of Geomagnetically Induced Currents. *Space Weather* **9**(7), n/a-n/a (2011). doi:10.1029/2011sw000680
- Viljanen, a., Pirjola, R.: Geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system. *Surveys in Geophysics* **15**(4), 383-408 (1994). doi:10.1007/BF00665999
- Watari, S., Kunitake, M., Kitamura, K., Hori, T., Kikuchi, T., Shiokawa, K., Nishitani, N., Kataoka, R., Kamide, Y., Aso, T., Watanabe, Y., Tsuneta, Y.: Measurements of geomagnetically induced current in a power grid in Hokkaido, Japan. *Space Weather* **7**(3), 1-11 (2009). doi:10.1029/2008SW000417
- 原田 誠, 井筒 潤, 植竹 富, 寺山 武, 長尾 年: 500kV 電力線中性点電流の測定による地下比抵抗構造モニタの試み. *東海大学海洋研究所研究報告* **30**, 45-57 (2009)
- 石倉 定, 竹内 雅, 中谷 英, 奥田 誠, 玉木 肇: 地磁気誘導電流測定装置の開発. *日新電気技報* **55**(2), 37-42 (2010)

坪井 昭, 堀内 進: 磁気嵐と電力系統. 電気學會雑誌 **108**(3), 233-236 (1988)

田端 康, 小川 重: 地磁気誘導電流計測装置の設置と実測. 平成 15 年電気学会全国大会論文集, 192 (2003)

湯本 清: GIC 効果について. 月刊海洋 **23**, 264-269 (1991)

藤井 郁, 大川 隆, 長町 信, 大和田 毅: 柿岡・鹿屋・女満別の超広帯域 MT レスポンスについて. 2015 年 *Conductivity Anomaly* 研究会論文集, 16-17 (2015)