

2.3. 地磁気変動と GIC

2.3.1 GIC 発生メカニズム

中村紗都子（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

後藤忠徳（兵庫県立大学 大学院生命理学研究科）

（2020年7月16日受付、2021年5月31日公開）

地磁気誘導電流（GIC : geomagnetically induced current）とは宇宙天気現象の一つで、太陽風擾乱によって地面や電力網、パイプライン、通信網に発生する電流を指す。ここではその発生メカニズムについて述べる。

太陽風の変動に応じて、磁気圏および電離圏には大規模な電流系が生じることが知られている。こうした磁気圏電離圏電流の電磁エネルギーの一部は地表へ伝搬し、地磁気変動および誘導電場（GIE : Geomagnetically Induced electric field）として観測される。この誘導電場は地表および地下の伝導帯に大規模な電流が生じさせる。こうした地磁気変動に伴って発生する大規模電流系を地磁気誘導電流 GIC : geomagnetically induced current とよぶ。GIC は地面をはじめ鉄道網や通信ケーブルなど大きな伝導体に発生することが知られているが、特に電力網に流入した際の被害が多く報告され研究が進められている。地下に流れる GIC の一部が発電所・変電所の接地点を介して電力網に流れ込むことによって電力網に様々な影響が生じる。概念図を図 1 に示す。上空の電磁場変動、電磁エネルギーの地表入射される電磁場変動、地下構造、変電所の設置条件が GIC に大きくことがわかる。

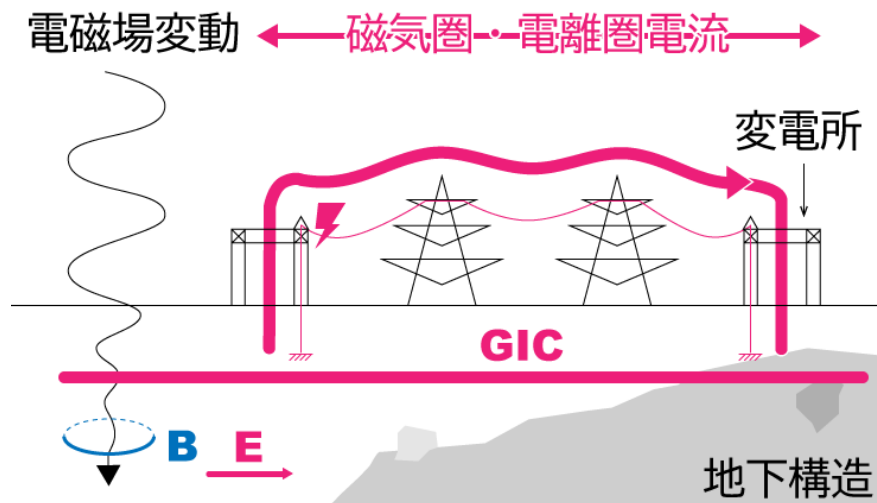


図 1. GIC 発生メカニズムの概念図

ところで、GICの駆動源として送電線と地面からなるループに生じる誘導電場(図2 a)や、地表に生じる電位差(図2 c)を用いた説明がなされることがあるが、これらは物理的には正しくない。上空から入射する電磁場変動は数100km以上の非常に大きな空間スケールを持つため、送電網と地面のあいだでは電場は一樣とみなすことができる(図2 b)。送電線と地下とを並列回路として等価回路を考慮して計算する必要がある(図2 d)。

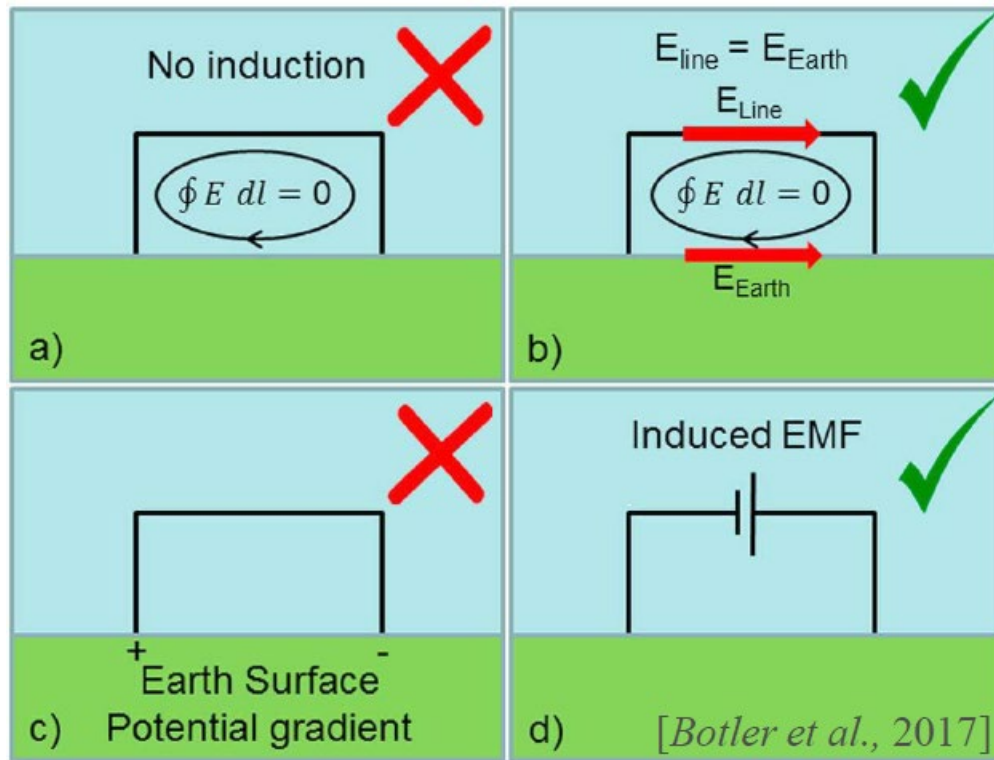


図2. GICの物理メカニズムの概念図 (a)送電線と地表からなるループ中の誘導電場は起電力となりえない。(b)上空から誘起される電場変動は波長が十分大きく、送電線と地表にはほぼ同じ方向に電場が発生する。(c)地表の静電位がGICの駆動源となるという説明は間違い。(d)等価回路としては、地面に設置された導体に起電力が発生すると近似することができる。[Botler et al., 2017]

GICの駆動源は太陽風に伴う磁気圏電離圏電流である。磁気圏電離圏では、磁気圏界面電流、リングカレント、沿磁力線電流、Sq電流などに代表されるように、様々な領域で3次元的な複雑な電流系が形成され、太陽風に応じて激しく変動している。こうしたダイナミックな電流系時空間発展の理解には、地球周辺の3次元シミュレーションや人工衛星による多点観測が必要である。太陽風の速度、電子密度、IMFに応じて駆動される磁気嵐と磁気圏電離圏電流系については2.3.4で詳しく述べる。

上空の電流変動は電磁場変動として古くから地表で観測されてきた。地表の電場は、上空の電流構造に加え地下や周辺の電気伝導度構造に強く影響を受けるが、地磁気変動は磁気圏電離圏の状況をよく表す指標として多くの研究が行われている。磁気嵐時の各電流系と地磁気変動

の対応については 2.3.3 で詳しく述べる。

GIC を直接駆動するのは地磁気変動に伴う GIE である。GIE は観測データが少なく、また地磁気変動との関係についても地下の電気伝導度構造に依存するため複雑である。例として、地面が一様な電気伝導度 σ をもつと仮定すると地表の GIE は

$$\tilde{E}(\omega) = \frac{\omega}{\mu_0 \sigma} \tilde{B}(\omega)$$

で表され、地磁気変動の大きさ \tilde{B} と比例関係にあることがわかる。地磁気変動は一般にオーロラ帯で大きな値が観測される。図 3 は過去の大磁気嵐時に各地で観測された地磁気変動の緯度分布である。実際に高緯度のオーロラ帯域では GIC による被害報告が最も多い。これについては 2.3.2 で詳しく述べる。

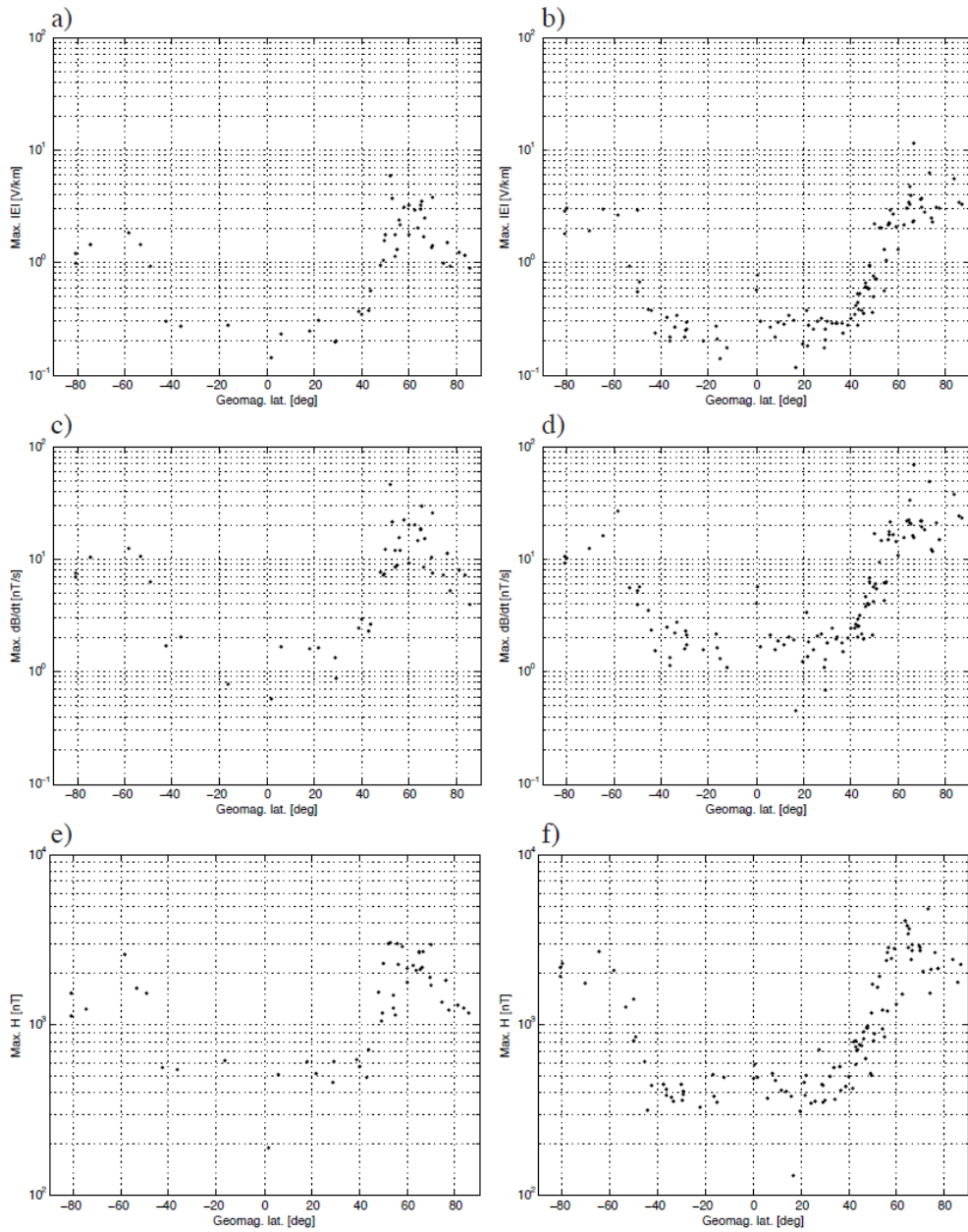


図 3. 1989 年 3 月 13-15 日 (a,c,e) および 2003 年 10 月 29-31 日 (b,d,f) の磁気嵐についての、GIE (計算値) と dB/dt (観測値) と H (観測値)。横軸は磁気緯度、縦軸は(a-b)最大|E|, (c-d)最大|dB/dt|, (e-f) 最大 H [Pulkkinen et al., 2012]

上空から誘導される電場は、地下に電流が流れることにより変調される。磁気圏電離圏の電流構造は数 100km から数 Re という非常に大きな空間スケールをもつため、電流の連続性からローカルな電気伝導度のみならず電気伝導度 3 次元構造に依存している。電磁エネルギーが地中に浸透できる深さ d を skin depth とよび、一様な電気伝導度の場合

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

で表される。式より、地中の電気伝導度と外部電磁場の変動周波数が非常に重要であることがわかる。100 s スケールの地磁気擾乱が 0.01 S/m の地面に浸透する場合、 $d \sim 50\text{km}$ となり、地下深くの情報が必要となることがわかる。

図 4 に日本の周辺の電気抵抗構造（電気伝導度の逆数）をモデル化したものを示す。大まかな構造として、海に比べ陸地が高い抵抗値を持つことがわかる。海の中でも、日本西側の九州近辺は抵抗値が高い。これは大陸棚が存在し海が深いことによる。海陸境界付近の電気抵抗は非常に複雑な構造をしており、実際の海岸線より内陸まで海と同様の低伝導域が広がっている地域もある。また、北海道や東北、関東地域など内陸部に低抵抗の領域が局在していることがわかる。これは地質の違いによるもので、堆積層の厚い地域は電気抵抗が低くなるためである。

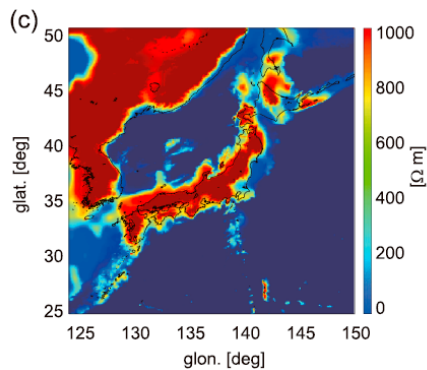


図 4. 日本周辺の地表 2km の電気伝導度構造モデル[Nakamura et al., 2019]

図 4 のモデルを用いて、100 s 周期の一様な外部電磁場擾乱によって発生する GIE を計算した結果が図 5 である。空間一様な外部擾乱に対して、地表では GIE が空間構造を持ち非常に大きな値となる地域があることがわかる。特徴として、海岸付近は GIE が大きくなる傾向がある。これは電気伝導度の空間勾配が存在すると、電流の連続性から地下が帯電し 2 次電場が発生するためである。海陸境界と同様に、北海道、東北、関東に存在する堆積層異常帯で GIE が周囲に比べて大きくなっていることがわかる。

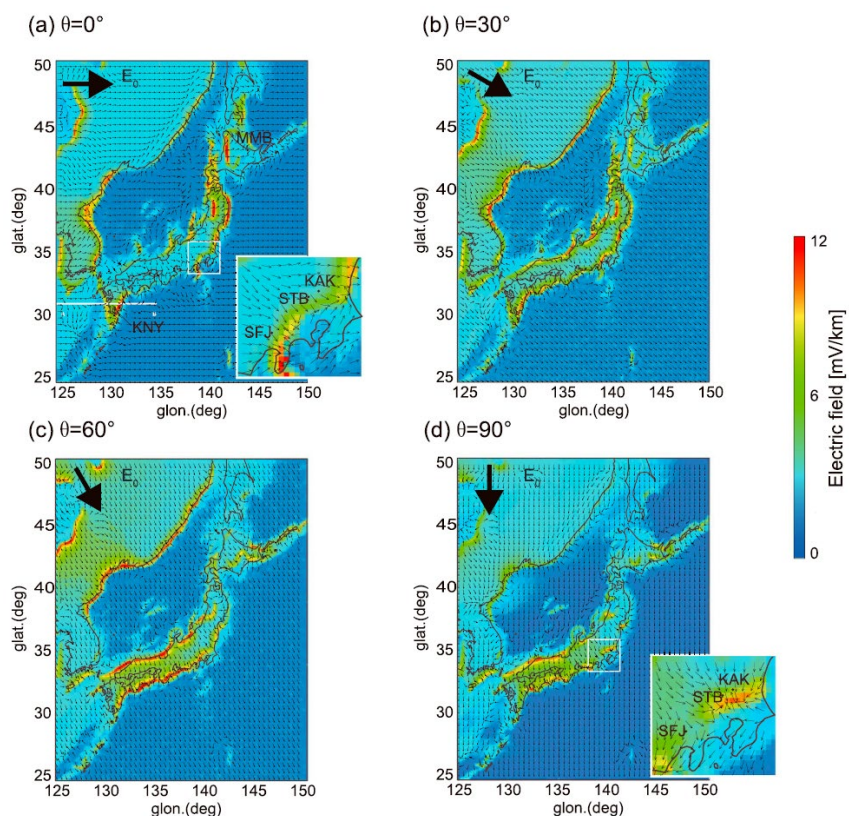


図 5. 100s の電磁場変動に対して発生する GIE のシミュレーション結果[Nakamura et al., 2019]

以上のように GIE の発生には地下電気伝導度構造が非常に大きな役割をはたしている。地下の構造については 2.3.5 で詳しく述べる。

地面に発生した電流および GIE によって、電力網に意図しない電流が流れ込み、これを GIC とよんでいる。GIC の大きさは GIE 分布に加え、送電網の配置、接地点付近の地面の電気抵抗値、送電線抵抗の値に影響される。Lehtinen and Pirjola [1985] による計算式が広く使用されており、日本の 500kV 送電網について計算した結果を図 6 に示す。

各地の変電施設に発生する GIC の大きさは一様ではなく、一部の变電施設に集中している。まず海岸付近の変電施設では大きな GIC が発生する傾向にあることがわかる。また、上述した堆積層異常帯のある東北・関東内陸部で特に大きな GIC が観測されている。さらに、GIE だけでなく送電網配位の影響も大きく、日本の送電網が都市部に偏在しており郊外の発電施設に高効率の送電線が集中しているために、郊外の発電施設で最も大きな GIC が発生する。

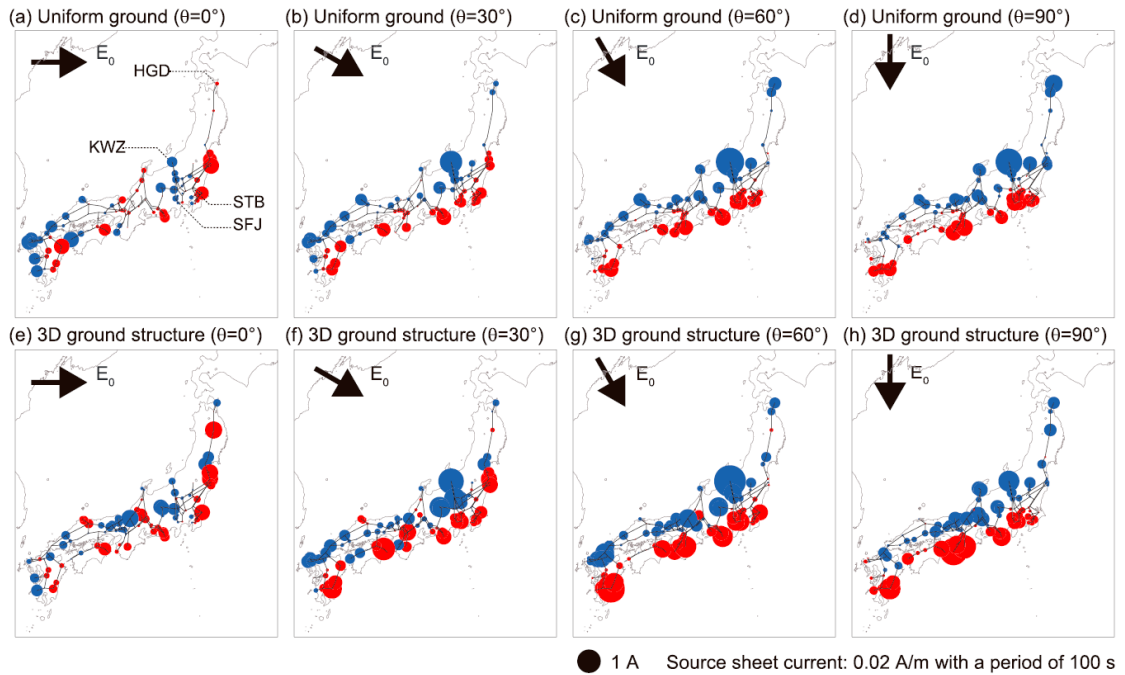


図 6. 100s の電磁場変動に対して高圧送電網における変電所に発生する GIC のシミュレーション結果。各変電所に生じる GIC の大きさを円の大きさで図示している。電流の向きを青（地下から送電網へ）と赤（送電網から地下へ）で表す。(a-d) 地下構造を一様とした場合の計算結果。印加する電離圏電場を左上に示す。(e-h) 3次元地下構造モデルを使用した場合の計算結果。[Nakamura et al., 2019]

参考文献

- Boteler, D. H., and Pirjola, R. J. (2017), Modeling geomagnetically induced currents, *Space Weather*, 15, 258– 276, doi:10.1002/2016SW001499.
- Lehtinen, M., & Pirjola, R. (1985). Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically-induced electric fields. *Annales Geophysicae*, 3(4), 479–484.
- Nakamura, S., Ebihara, Y., Fujita, S., Goto, T., Yamada, N., Watari, S., & Omura, Y. (2018). 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, 1946–1959. <https://doi.org/10.1029/2018SW002004>
- Pulkkinen, A., Bernabeu, E., Eichner, J., Beggan, C., & Thomson, A. W. P. (2012). Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios. *Space Weather*, 10, S04003. <https://doi.org/10.1029/2011SW000750>