



**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**

平成27年3月

一般財団法人エネルギー総合工学研究所

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

目次

1. はじめに.....	1
2. 太陽フレアによる地磁気誘導電流発生に係るメカニズムの調査.....	2
2.1. 太陽フレアと磁気嵐について.....	2
(1) 太陽フレア.....	2
(2) キャリントン・フレア.....	3
(3) 過去の太陽フレアの推定.....	5
(4) スーパーフレア.....	6
(5) 太陽フレアの発生メカニズム.....	8
(6) コロナ質量放出.....	9
(7) 超高速コロナ質量放出.....	11
(8) 磁気嵐.....	13
(9) 太陽フレアと磁気嵐（まとめ）.....	15
2.2. 太陽フレアの観測と地球への影響予測.....	16
(1) 宇宙天気.....	16
(2) 太陽の観測.....	19
(3) 太陽フレアの影響.....	23
2.3. 地磁気誘導電流（GIC）について.....	25
(1) GIC と磁場の磁気データがある場合の GIC 推定方法.....	25
(2) GIC 観測データがない場合の GIC 推定方法.....	26
(3) 誘導電場のシミュレーション結果.....	30
(4) GIE 計算および最大 GIC 推定の課題.....	32
(5) GIC のまとめ.....	35
2.4. 我が国の電力システムに及ぼす影響について.....	36
(1) GIC の実測データについて.....	36
(2) GIC が変圧器に及ぼす影響について.....	37
(3) GIC が保護リレーの応動に及ぼす影響について.....	39
(4) 過去の GIC 経験事例とその対策について（ハイドロ・ケベック社）.....	40
2.5. 得られた知見と課題.....	44
3. 現行の保安水準を確保するに当たっての技術基準の課題について.....	47
3.1. 現行の保安水準を確保するに当たっての技術基準の課題.....	47
4. おわりに.....	49

1. はじめに

近年、過酷化する自然災害が発生しており、電気設備においてもその被害の未然防止及び軽減が不可欠である。経済産業省では、未然防止のための一手段として技術基準を定めているが、過酷化する自然災害に対しても、現行の設備基準が十分な保安水準を満たしているか否か不断の検証が必要である。

経済産業省では、自然災害等対策WG中間報告書（平成26年6月）において、現在の電気設備及び電力システムの耐性を評価し、自然災害に強い電気設備及び電力システムの在り方等の検討を行った。

同報告書の中において、近年Mクラスの太陽フレアの発生数が上昇してきていることや将来的に巨大な太陽フレアの発生の可能性が指摘されているが、太陽フレアに伴う地磁気嵐による地磁気誘導電流（GIC）発生等に至る定量的メカニズム等について確立した知見が得られていないと指摘されている。このため、当該現象の発生による電気設備への影響に至るメカニズムを把握するとともに、現行の保安水準を確保するにあたっての保安の在り方を調査する必要がある。

そこで今回、電気設備を対象として、専門的な検討を行うために「太陽フレアによる地磁気誘導電流に関する調査検討委員会」を設置し、既存文献やヒアリング等により、太陽フレアに伴う地磁気嵐によるGIC発生等に至るメカニズムに関して各々の分野の専門家の協力を得ながら最新知見を調査するとともに、我が国の電力システムに及ぼす影響について磁気緯度が高い欧米諸国における検討も参考にして最新知見を調査した。加えて、以上の知見を踏まえ、現行の技術基準に課題がないか否か及び技術基準以外の自主保安も含む保安の在り方の必要性について調査を実施した。

2. 太陽フレアによる地磁気誘導電流発生に係るメカニズムの調査

2.1. 太陽フレアと磁気嵐について

(1) 太陽フレア

太陽フレアは、太陽コロナ中に蓄積された磁場のエネルギーがプラズマの運動と熱エネルギーとして放出される現象である。この磁場は、太陽に存在する黒点にある。黒点磁場は数 1,000G（ガウス）程度で、地球の磁場が 0.5G 程度なので、約 2,000 倍以上になる。

磁場強度自体は普通に我々が使っている永久磁石と同じであるが、磁場のエネルギーは強度の二乗と体積に比例するので、地球より大きな体積を持つ黒点の磁場のエネルギーは 10^{32} erg（エルグ）以上となる場合がある。これは、水爆の 100 万個分相当のエネルギーであり、6,500 万年前に恐竜を絶滅させた彗星が持っていた運動エネルギーと同程度になる。これが、太陽フレアのエネルギー源になる。



図 2.1-1 人工衛星「ようこう」による太陽コロナの X 線像

図 2.1-1 は、人工衛星「ようこう」が、大気圏の外から X 線で観測した太陽コロナの画像である。可視光線で見た太陽は、黒点が黒く見えるが、X 線で見ると黒点のある上空が白く明るく見える。黒点の持っている磁場のエネルギーが、太陽の周りのコロナで熱エネルギーに変わり、プラズマを加熱する現象が起きていると考えられる。その結果、太陽表面の温度は 6000 度以下であるが、太陽コロナは 100 万度まで加熱されている。

図 2.1-1 で、まだら模様の明るい部分が太陽黒点など活動領域と呼ばれる磁場の強

い部分に対応し、フレア爆発はそうした領域で突発的に発生する。

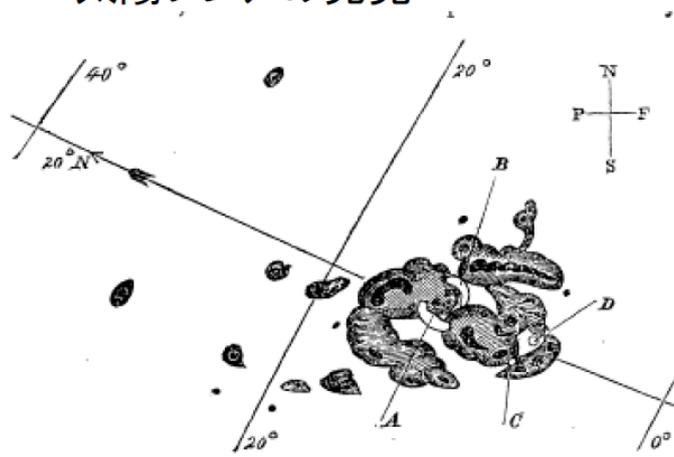
太陽フレア発生に伴い、概ね3つの現象が起こる。1つは、X線やγ線などの電磁波の放出で、もう一つは、陽子・電子・中性子などの粒子（高エネルギー粒子（SEP））の放出である。これらの電磁波や粒子は、地球まで到達するが、宇宙空間では宇宙放射線による被爆の原因となる。最後の一つは、太陽コロナから大量のプラズマ（電離高温ガス）が宇宙空間へ放出される現象である。これはコロナ質量放出（CME）と呼ばれる大規模な爆発にしばしば発展する。さらにCMEは、惑星間空間を衝撃波を伴って超音速で伝播し、地球磁気圏に衝突すると地磁気変動などの宇宙天気擾乱現象を引き起こす。地磁気誘導電流（GIC）はその結果として発生する。

(2) キャリントン・フレア

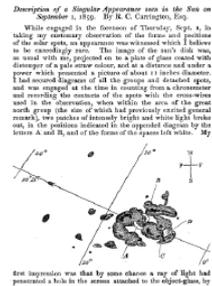
1859年9月1日に英国の天文学者リチャード・キャリントンは黒点のスケッチ観測を行っているときに、黒点中で急に明るくなる現象を発見した。これが、太陽フレアの人類最初の発見である。その後このフレアは、キャリントン・フレアと呼ばれる。

■ Richard C. Carrington

■ 太陽フレアの発見



first impression was that by some chance a ray of light had penetrated a hole in the screen attached to the object-glass, by



with the general shape is shown into shade, for the latter will fully reveal to them the exact position, but, by an error, I interpreted the correct observation, and making the shape to seem by seeing the R.A. bands. I saw a very unexpected witness of a very different effect. I discovered some time by the observation, and using the light, that it was very rapidly in the process, and being somewhat fainter by the aperture. I hardly can so tell some one to witness the exhibition with me, and an occurring within 50 seconds, one might be led to think it was a very strong effect and included. Very shortly afterwards the last trace was gone, and although I maintained a strict watch for many an hour, no recurrence took place. The last traces were at C and D, the spaces having travelled considerably from their position and reaching so two rapidly fading ones of white light. The traces of the first outbreak was not a minute distant from 15° 18' Greenwich mean time, and 11° 25' was taken for the time of disappearance. In this space of 1 minute, the rays of light traversed a space of about 1,000 miles, as may be seen by the diagram, which is given exactly on a scale of 12 inches to the sun's diameter. On this scale the centre of the spot will be very nearly equal in size to that of the detached spot situated next to the heart in the diagram, and the action of light would almost cover the area of the larger group, without including the existing position. It was the position, at first witnessed as appearing so clearly in a certain configuration, as to expect a reasonable result in the way of alteration of the details of the group in which it occurred, and I was naturally surprised, referring to the sketch which I had carefully and satisfactorily (and I may add accurately) finished before the occurrence, in that the sketch was able to recognize any change whatever as having taken place. The impression left upon me is that the phenomenon took place at an alteration considerably above the general surface of the sun, and accordingly, describing them with the great group in which it remains projected. Both in figure and position the patches of light seemed entirely independent of the configuration of the great spot, and of its parts, whether inside or outside. The contrary observation, which shortly resumed, and the diagram engraved, as well as the larger drawing exhibited at the Meeting on Dec. 14, was obtained from an exact reduction of the recorded trace. It has been very gratifying to me to learn that our friend Mr. Hodgson observed to be observing the sun at his house at 11 o'clock on the same day, and in fact that he was a witness of what he also considered a very remarkable phenomenon. I have carefully avoided including any information with this problem, that any value which the accounts may present may be increased by their entire observation.

図 2.1-2 キャリントンが描いた太陽黒点とフレア（キャリントン・フレア）のスケッチ¹

¹出所：Carrington, R. C., (1859), Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 20, 13.

オーロラの記録

- Green & Boardse
2006 AdSR

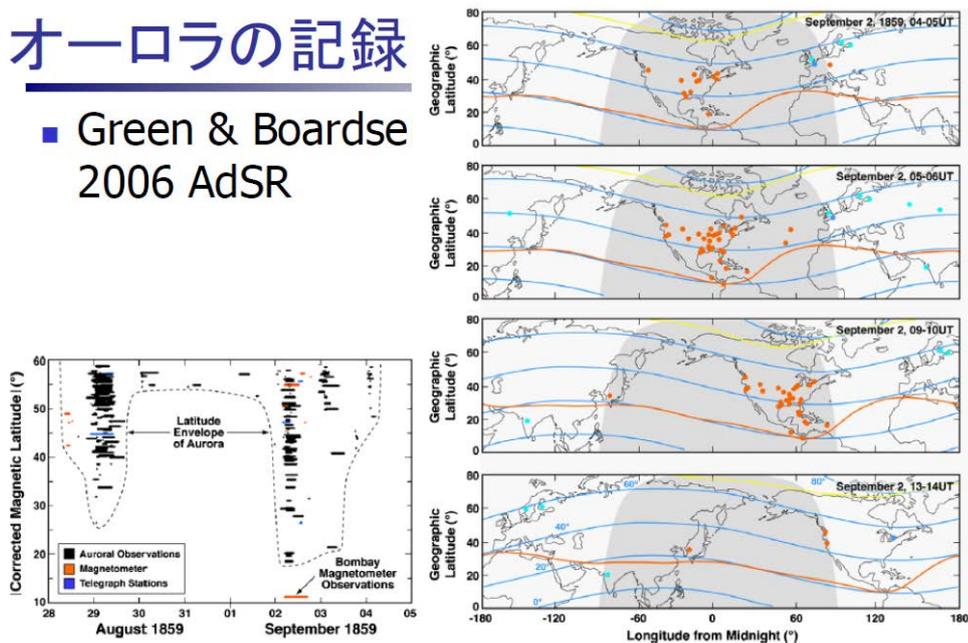


図 2.1-3 1859年8月28日～9月5日のオーロラの記録(Green & Boardse 2006 AdSR)²

通常は極地地方でしか見られないオーロラが、この日の夜に地球上の至る所で観測された。図 2.1-3 (右図) の赤い点は、オーロラが観測されたポイントを示す。北米大陸の南端、パナマ運河やキューバでもオーロラが見えたという記録が残っている。極めて大きな磁気嵐が発生したことが、これから想定される。

図 2.1-3 (左図) は、横軸が時間、縦軸はオーロラが発生した緯度を示している。通常オーロラは、高緯度地帯で見えるが、9月2日の夜は、ほとんど赤道に近いところ、北緯20度位まで、オーロラ帯が降りてきたことが分かる。この事実は9月2日の朝には、CMEが地球に到達していたであろうことを示唆している。当時、人工衛星の観測はないので、CMEを直接観測できなかったが、太陽フレアが9月1日の正午に発生しているので、大体半日から十数時間で地球に到達したことが推測される。これから推測されるスピードは、2,380km/秒で、極めて強力なイベントだったことがわかる。キャリントン・フレアに伴うこうした一連の宇宙天気擾乱現象はキャリントン・イベント（キャリントン事象）と呼ばれている。

²出所：Green, J.L. and Boardsen, S., (2006), Advances in Space Research, 38, 130.

(3) 過去の太陽フレアの推定

さらに過去の太陽フレアを調べる方法が幾つかある。一つは、太陽フレアから高エネルギー粒子が放出され、地球の大気に侵入すると、大気上層部に窒素酸化物を作ることを利用したものである。この窒素酸化物が、地上まで落ちてくると南極やグリーンランドの氷床に硝酸として取り込まれる。氷床コア中に含まれる硝酸塩濃度の分析により、直接の観測結果のない過去の大規模な太陽嵐等の発生状況を推測することができる。

図 2.1-4 は、氷床コアの硝酸塩濃度を分析したもので、上図が黒点を示している。下図は硝酸量の変化を示している。1860 年付近の大きなシグナルは、キャリントン・フレアによるものと考えられており、過去 400 年で最大のシグナルを与えている。

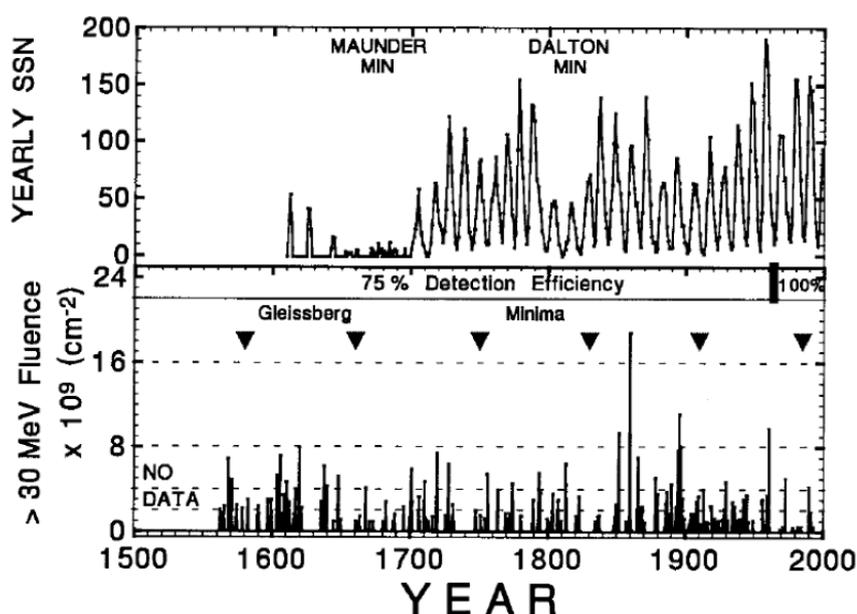


図 2.1-4 過去 400 年の太陽フレア (McCracken et al.2001) ³

もう一つは、樹木年輪中の炭素 14 (^{14}C) 濃度から宇宙線強度を調べるものである。太陽フレアが発生すると、宇宙放射線が放出される。宇宙放射線のうち非常にエネルギーの高いものは、地球の大気の窒素との核反応で炭素の同位体である放射性炭素 ^{14}C を生成する。この炭素はその後、二酸化炭素となり、光合成により樹木に取り込まれて年輪内に固定される。それ故、樹木年輪中の炭素 14 を調べると、その年の宇宙放射線量を推定することができる。

名古屋大学のグループは、屋久杉年輪中の炭素 14 濃度を測定し、奈良時代である西暦 774-775 年にかけて 1 年で約 10% の炭素 14 濃度増加と、それに続く減衰を発見した。図 2.1-5 は、縄文杉 (屋久杉) 年輪中の炭素 14 濃度を測定した結果である。西暦 775 年と西暦 993 年に不連続なシグナルが出ている。両方とも、前年に比べ炭素 14 の濃度が急激に上昇しており、この年に突発的に放射線量が増加したことを示している。

³出所: McCracken, K. G., Dreschhoff, G. A. M., Zeller, E. J., Smart, D. F., and Shea, M. A., (2001), Journal of Geophysical Research, 106, 21585.

この原因はまだ分からないが、当初、太陽フレアによる大規模な太陽陽子現象（SPE）とショートガンマ線バーストが候補として挙がっていた。しかし、300年間に2回、炭素 14 イベントが起きていることから、観測でわかっているショートガンマ線バーストの頻度よりもはるかに大きいことが明らかになり、炭素 14 イベントの原因として太陽フレアが最も可能性があると考えられている。

特に、西暦 775 年のイベントは、非常に大きなイベントで、炭素 14 から換算すると、キャリントン・フレアの約 10 倍程度の太陽フレアであった可能性がある。

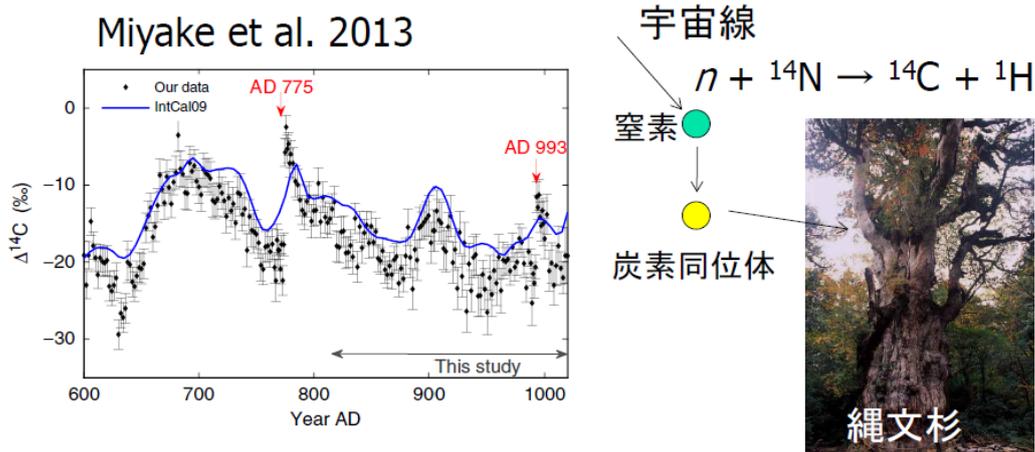


図 2.1-5 西暦 600—1000 年までの炭素 14 (¹⁴C) 濃度 (Miyake et al.2013) ⁴

(4) スーパーフレア

さらに大きな太陽フレアとして、スーパーフレアが考えられている。人工衛星による太陽フレア観測は 30 年程度、地上からの観測もキャリントンの観測から 150 年程度しかデータがないので、どれ程大きな太陽フレアが、今後発生するかを太陽観測から判断することは容易ではない。しかし、太陽と同じような恒星は、宇宙に数多く存在するので、そのような恒星を多数調べると、太陽を長期間観測したのと同等のデータが得られる可能性がある。

京都大学のグループは、米国の人工衛星（NASA の惑星探査衛星ケプラー）の観測データを解析することにより、非常に明るい爆発現象が太陽型の恒星で従来考えられていたよりも高頻度で起きていることを発見した。

図 2.1-6 は、スーパーフレアを起こした太陽型恒星の明るさの時間変化である。明るさが周期的に変動しているのは、その恒星の自転による影響と考えられる。図中、突然針のように立ち上がっているのが、恒星で起こったフレアと思われるものである。明るさが 0.08 というのは、星の明るさが 8%明るくなる現象であるが、太陽フレアを光で観測しても、明るさとしては 1 万分の 1 程度 (0.0001) しか明るくならない。それ故、8%程度明るくなるというのは、極めて大きな爆発だということがわかる。

⁴出所：Miyake et al. (2013), Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings, Nature Communications 4, Article number, 1748, doi:10.1038/ncomms2783

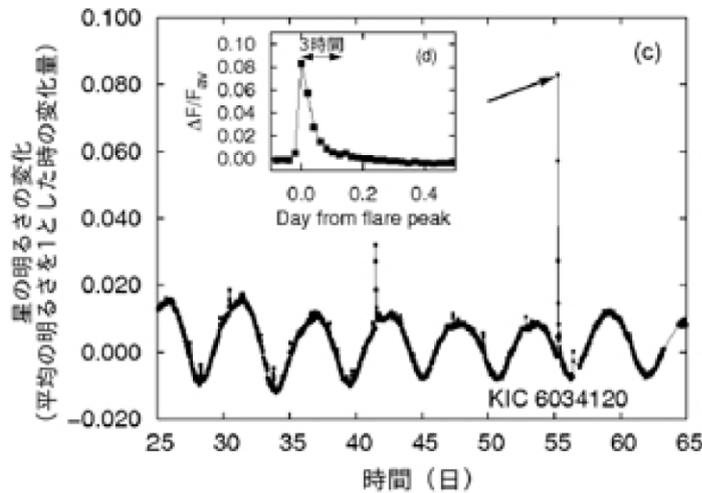


図 2.1-6 スーパーフレアを起こした太陽型恒星の明るさの時間変化
(Maehara et al. 2012) ⁵

図 2.1-7 は、太陽フレアとスーパーフレアの発生頻度分布で、横軸はエネルギーになるが、 10^{34} から 10^{35} erg 程度の爆発が起きていたと推測される。これは大型の太陽フレアの 100 倍から 1000 倍に相当する。しかし、太陽フレアも、地球の地震と同じように、非常に大きな現象は極めて稀にしか起きない。縦軸は頻度で、 10^{32} erg の爆発は大体平均 1 年に 1 回程度の頻度で起きている。恒星フレアの頻度分布もこのスケールとほぼ一致しており、 10^{34} erg の爆発は一つの星で 1000 年に一度発生する頻度に相当する。

このような星は、光の強度や色等で分類すると太陽型に分類されるが、本当に我々の太陽と厳密に同じなのかどうかを最終的に判断するためにはより詳しい研究が必要である。しかし、我々の太陽でキャリントン・フレアを遥かに超えるスーパーフレアが発生する可能性を排除することはできない。

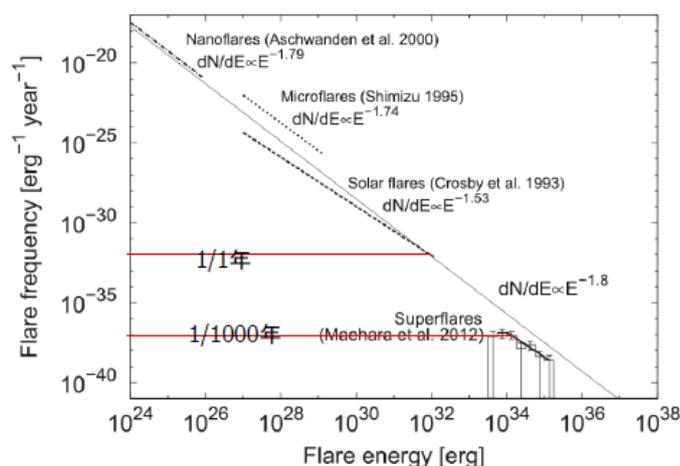


図 2.1-7 太陽フレアとスーパーフレアの発生頻度分布 (Shibata et al. 2013) ⁶

⁵出所: Maehara et al. (2012), Superflares on solar-type stars, Nature, 485, 478-481, doi:10.1038/nature11063

⁶出所: Shibata et al. (2013), Can superflares occur on our sun?, Publ. Astron. Soc. Japan 65, 49

(5) 太陽フレアの発生メカニズム

太陽フレアの発生メカニズムは様々な説があるが、磁場エネルギーが、磁力線のつなぎ替え（リコネクション）によって運動エネルギーや熱エネルギーに変換されるというモデルがほぼ確認されている。しかし、その発生メカニズムの詳細はまだ十分に解明されていない。そのため、そうした現象が起きる時間・場所及びその規模を何が規定しているのかはまだ良く分かっていない。図 2.1-8 に太陽フレアの発生メカニズムの一つを示す。

矢印のついている曲線が磁力線で、白・黒の楕円が黒点を表している。黒点は磁場の強い領域であり、黒点には磁場の極性（地球でいうとN極とS極があるように）が違うものがある。このように、プラスの磁場を持った黒点とマイナスの磁場を持った黒点が、基本的に対で存在する。白がプラス、黒がマイナスなので、磁力線は白い楕円から出て黒い楕円に入っていく。（図 2.1-8 ①）

この磁場中に蓄積される自由エネルギーがフレアの源となる。磁場の中に自由エネルギーを蓄積するためには、磁力線の捻じれが必要である。例えば、黒点が太陽の表面で回転するような運動をすると黒点に繋がっている磁力線が捻じれていく。（図 2.1-8 ②）

これは、まさにゴムひもを捻じった状態と同じで、磁力線の中にエネルギーがたぎ込まれる。こうした現象が大体、数時間から数日続き、その後ある特定の領域で磁場の乱れが現れると、磁力線のつなぎ替え（リコネクション）が起こる。（図 2.1-8 ③）

赤い部分が繋ぎ変わり、小さな真ん中にある磁力線と、元々2つの違う磁力線であったものが繋がった長い磁力線が発生する。この長い磁力線が、ゴムひもを伸ばし離れたように、宇宙空間に向かって飛び出していく。（図 2.1-8 ④）

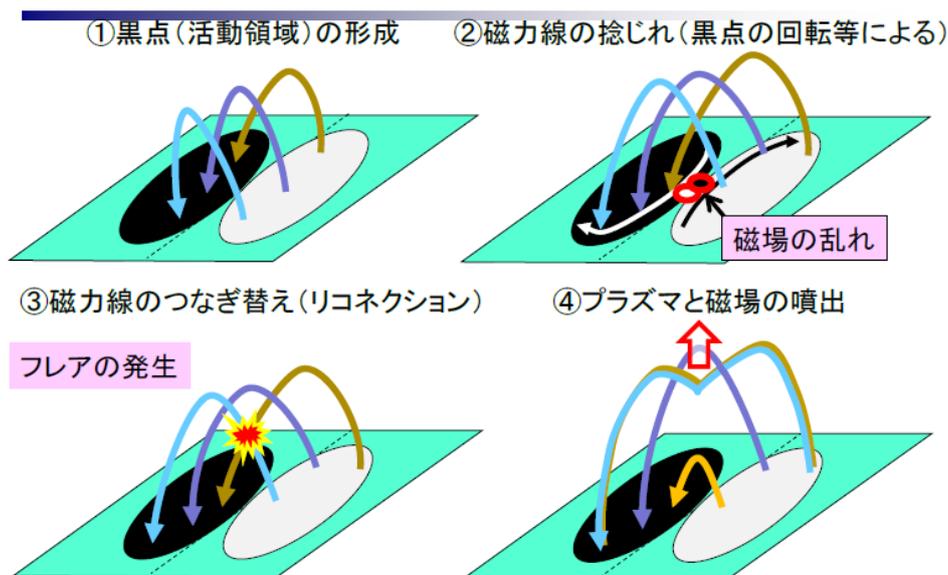


図 2.1-8 太陽フレアの発生メカニズム

(6) コロナ質量放出

大型の太陽フレアは磁場を伴う巨大なコロナ質量放出（CME）を生成する。巨大で高速の CME が地球磁気圏に遭遇すると、磁気嵐の原因となる。統計的な傾向として、太陽フレアのクラス（軟 X 線の強度を表す）と CME の規模の間には相関関係があるが、フレアとしては規模が小さくても大型の CME が生まれる場合もある。

図 2.1-9 は、太陽の周りのコロナ（ガス）を見たもので、常に太陽から太陽風として噴き出している。このガスは 100 万°C という高温であり、平均 400km/秒程度のスピードで噴き出ている。CME はこの太陽風中を太陽から伝搬する。CME には 1000km/秒を超える高速のものもある。さらには、2000km/秒を超えるような非常に高速のものもあり得る。

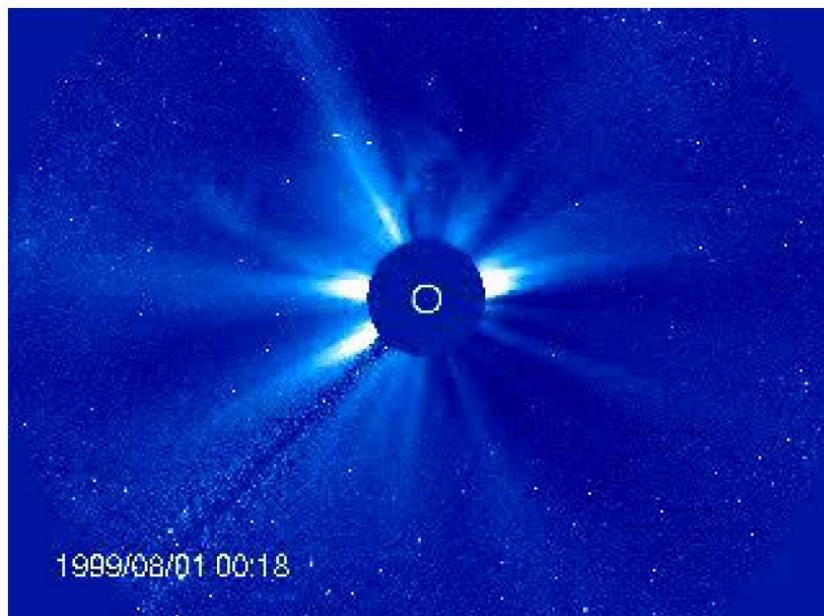
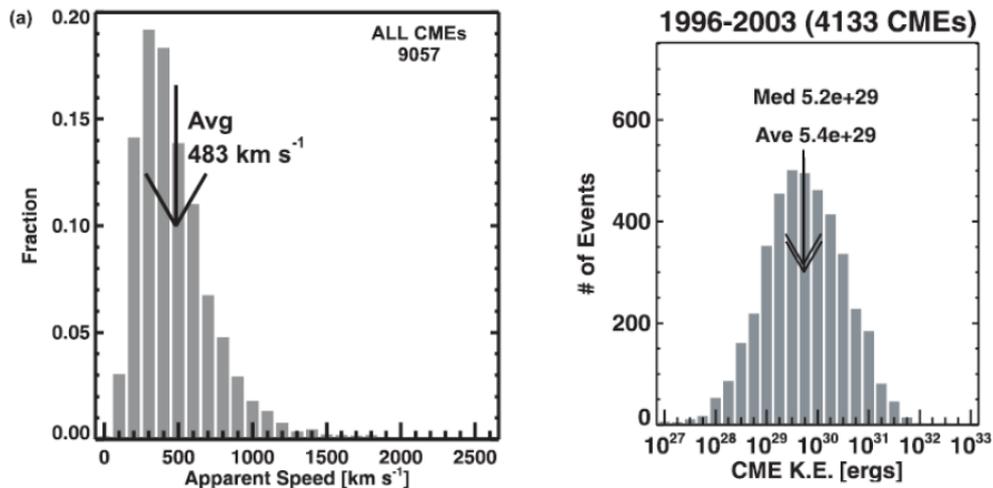


図 2.1-9 太陽風とコロナ質量放出（CME）⁷

⁷出所：SOHO/MASA, ESA



Gopalswamy 2006

図 2.1-10 サイクル 23 のCME統計(Gopalswamy 2006)⁸

太陽は約 11 年の周期で活動する。これは、太陽活動周期と呼ばれ、黒点や CME は、太陽活動周期に追従して増減する。現在、太陽はサイクル 24 で、図 2.1-10 は、その前の周期サイクル 23 で発生した CME を分類したものである。左のグラフは、横軸はスピードで、縦軸は頻度を示しており、平均はおおよそ 483km/秒というスピードになる。そこから、高速のところまで伸びていて、1500km/秒を超過する CME も少数存在することがわかる。

高速の CME が、地球方向に飛び出し地球に到達すると磁気嵐の原因となる。ただし、スピードだけではなく、CME は磁力線を伴い飛んでくる。CME の磁力線が、地球の磁場に対して同じ方向、あるいは違う方向なのかが重要で、地球の磁場と反対方向の磁力線が地球にぶつかると、磁気嵐を引き起こす要因になる。スピードと飛んでくる磁場の強度と向きが極めて重要な要素になる。

右のグラフは、横軸は CME 1 個の運動エネルギーを示している。中央の 10^{30} erg にピークがあり、平均が 5.4×10^{29} erg である。 10^{32} erg 程度の CME も、少数存在することがわかる。 10^{32} erg は、1 個の黒点の全エネルギーと同じくらいのエネルギーで、巨大な CME に対応する。

⁸出所：Gopalswamy, N., (2006), Journal of Astrophysics and Astronomy, 27, 243.

(7) 超高速コロナ質量放出

黒点は太陽活動周期により発生数が増減するが、キャリントン・フレア発生時には、黒点は必ずしも多いサイクルではなかった。それゆえ、黒点の数が少ないからといって強力な磁気嵐が起きないわけではない。

キャリントン級の太陽面爆発がその後全く発生していないかということ必ずしもそうではない。図 2.1-11 のように、2012 年 7 月 23 日にキャリントン・イベントとほぼ同等の爆発現象が、太陽あるいは太陽の周りで起きていたということが、NASA の太陽観測衛星「STEREO」の解析からわかっている。ステレオ A、ステレオ B というのは、地球の公転軌道から少しずれて、太陽を地球から遠く離れて観測できる太陽観測衛星で、図 2.1-11 の緑色部分の中央が太陽で、その周りのガスを観測したものである。

このデータを使い再現したシミュレーションが図 2.1-12 である。図 2.1-12 の中央が太陽で、地球は右側（図中の緑点）にあるが、太陽系全体の太陽風の速度を示している。この図の左上に向かって、灰色の領域が伸びているが、これが超高速 CME である。黒い部分で、1600km/秒のスピードになっている。この CME は非常に巨大なもので、幸いにも地球から見ると、右奥側に飛んで行った。

Baker (2013)⁹によると、2 週間前にこの現象が起きた場合、この CME は地球に飛んできた可能性が高い。仮にその時に、地球がどうだったかというシミュレーションは可能であり、その結果が図 2.1-13 になる。図 2.1-13 は、CME が仮想的に地球に衝突したときの様々な物理量の変化を示している（上から、a, b, c: 磁場（磁束密度）の各成分、d: 速度、e: 密度、f: Dst）。

図 2.1-13 の d で、急激に上がっている部分が、衝撃波が通過したところで、このスピードが約 2300km/秒である。この速度はキャリントン・イベントを起した CME の推定値とほぼ同じである。

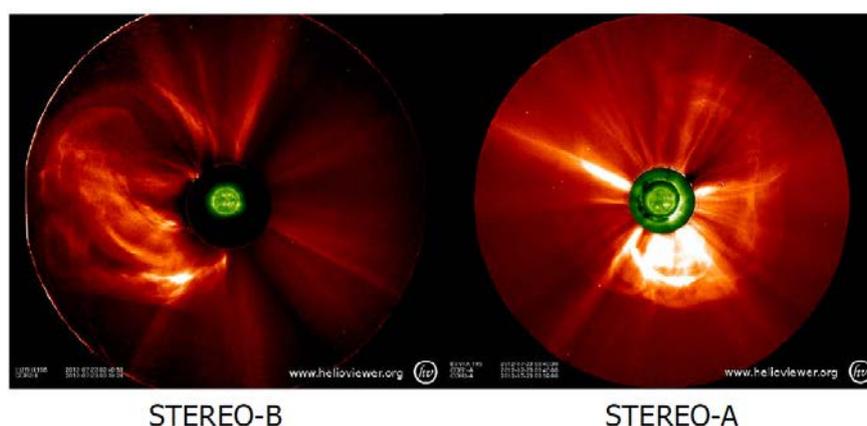


図 2.1-11 太陽観測衛星STEREOによる 2012 年 7 月 23 日の太陽フレアイメージ (Baker et al. 2013)⁹

⁹出所: Baker et al. (2013), A major solar eruptive event in July 2012. Defining extreme space weather scenarios, Space Weather, 11, 585-591, doi:10.1002/swe.20097

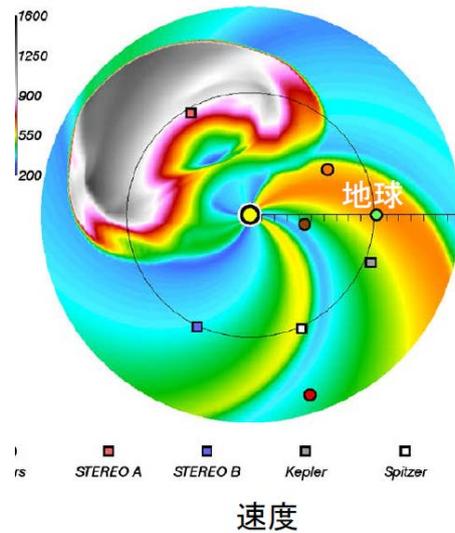


図 2.1-12 WSA-ENLIL モデルによるシミュレーション結果（太陽風速度）
(Baker et al. 2013)⁹

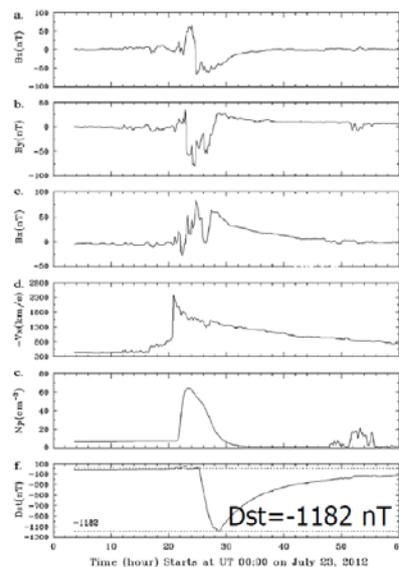


図 2.1-13 シミュレーション結果（2012年7月23日の太陽フレアが地球方向だった場合）
(Baker et al. 2013)⁹

磁気嵐の規模を表す指標は幾つかあり、Dst という指標（nT：ナノテスラ）がある。これは、中低緯度の地磁気変動量を表す指数で、値がマイナスの大きな値を取るほど地磁気が乱れていることを表している。図 2.1-13 から、Dst で -1182nT 変化したと推測される。

キャリントン・イベントでは、Dst が -1760nT になっていたであろうという推定がある。

1989年のカナダのケベック州で起きたイベント（ケベックイベント）では、 -570nT と記録されている。2012年の超高速 CME はそれに対して約2倍の規模に相当しており、キャリントン・イベントと同程度のイベントが起きた可能性がある。

(8) 磁気嵐

磁場が荷電粒子の動きをくいとめる効果によって、磁場を持つ地球の領域には、太陽風粒子は通常入り込めない。しかし、太陽風は数百 km/秒の荷電粒子の流れとして圧力を持っている。太陽風の圧力と地球の磁場の圧力が均衡して磁気圏が形成されている。

太陽フレアによって放出された CME 内の荷電粒子の集団が地球の磁気圏まで到達すると、それまでの太陽風よりも強い圧力がかかり、磁気圏は縮む。その磁気圏変動は、地上（日本等の中低緯度）でも地磁気水平分力の増加として観測される。これを磁気嵐の急始（SSC: Storm Sudden Commencement）という。このあと1時間から数時間くらい、水平分力の増加した状態が続く。この期間を初相（Initial phase）という。

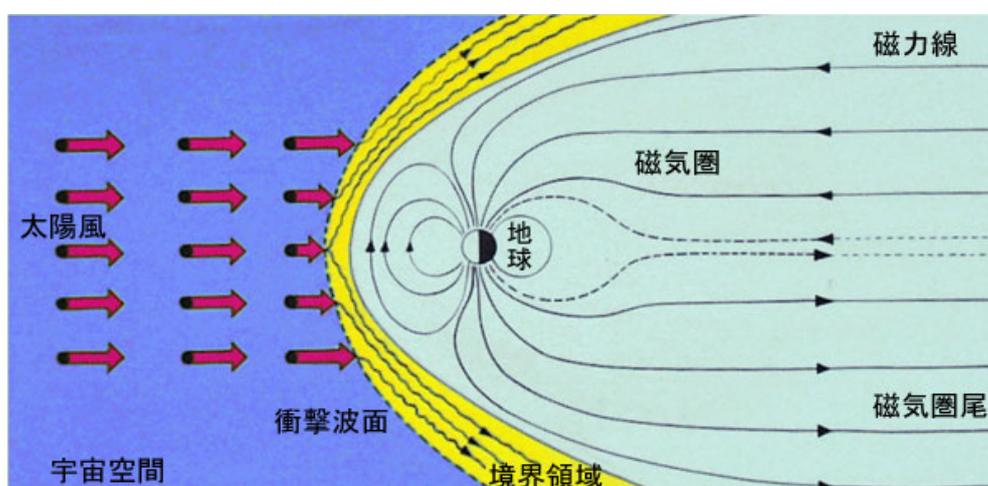


図 2.1-14 磁気圏の形と構造¹⁰

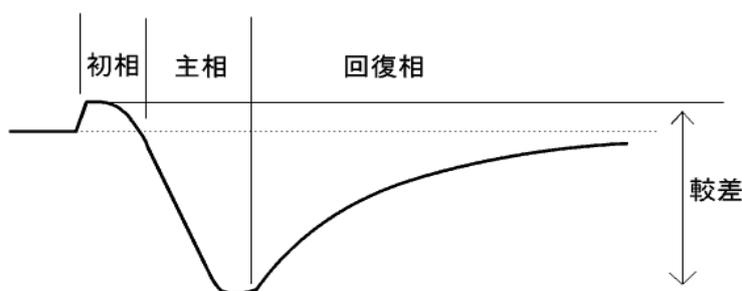


図 2.1-15 磁気嵐の平均的形態（水平分力変化の模式図）¹¹

CME が磁気圏に押し寄せた時に、太陽風が地磁気と逆向きの南向きの磁場を持っていると、太陽風の磁場と磁気圏境界の磁場が打ち消しあうことによって、太陽風が磁気圏に入り込みやすくなる。磁気圏に入り込んだ粒子は、磁気圏夜側の赤道面に蓄積される。荷電粒子の蓄積が進行すると、突発的な爆発現象が発生し、粒子加速が行われ、激しいオーロラ活動が起こる。同時に、夜側に蓄積されたこれらの粒子は磁気圏内の電場によって、地球方向へ流れる。

¹⁰出所：気象庁地磁気観測所 HP <http://www.kakioka-jma.go.jp/knowledge/qanda.html#4>

¹¹出所：気象庁地磁気観測所 HP http://www.kakioka-jma.go.jp/knowledge/mstorm_bg.html

磁気圏内を地球へと進む荷電粒子は、地球に近づくにしたがって磁場が強くなっていくので、ドリフト（漂動）を起こし、正（+）と負（-）の粒子が逆に動くため、電流が流れる。その電流は地球半径の数倍程度の半径をもつ巨大なドーナツ状のものであり、主に赤道面内を流れる（赤道環電流）。赤道環電流の作る磁場は、地上で南向きになり、地磁気とは逆向きになる。したがって、地上（日本等の中低緯度）では、地磁気水平分力が減少する。この期間を主相 (Main phase) といい、その後の回復期を回復相 (Recovery phase) あるいは終相 (Last phase) という。磁気嵐は地球規模の現象であるが、観測点の緯度や経度により地磁気変化の様相は異なる。

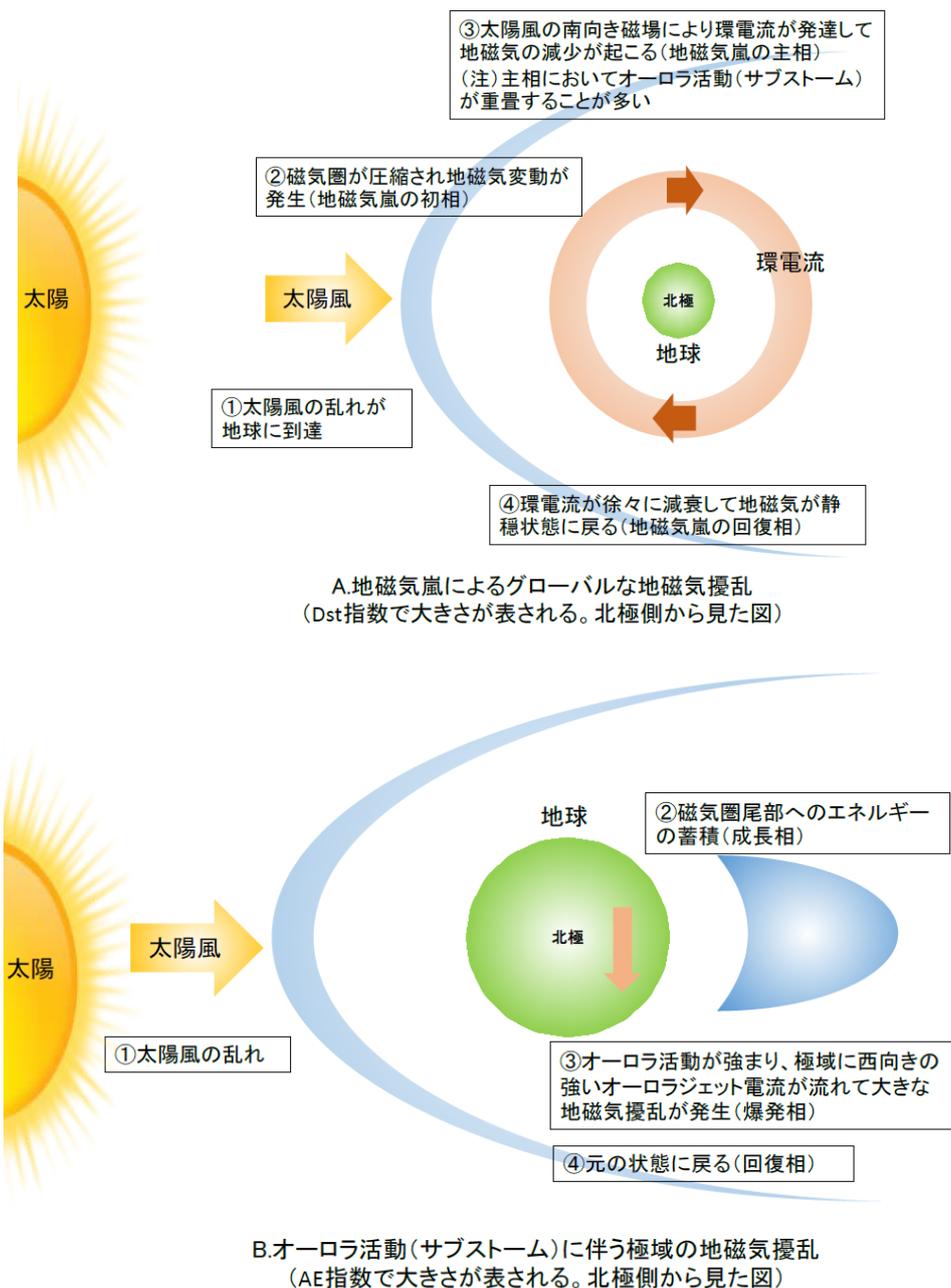


図 2.1-16 磁気嵐のメカニズム

(9) 太陽フレアと磁気嵐（まとめ）

以上により整理した太陽フレアと磁気嵐のまとめは、以下のとおりである。

- ・ 太陽フレアは太陽磁場に蓄積されたエネルギーの爆発的解放現象である。
- ・ 大型フレアが駆動するコロナ質量放出（CME）が地球磁気圏と相互作用する結果、磁気嵐が発生し、地上誘導電流を誘起する。
- ・ 太陽フレアの規模はべき乗則に従い、観測されている太陽フレアの最大エネルギーは $10^{32\sim 33}$ erg 程度である。
- ・ 記録されている最大の磁気嵐は、1859年のキャリントン事象である。
- ・ 樹木年輪からは、775年にキャリントン・フレアの10倍程度の巨大爆発の痕跡が見ついている。
- ・ 太陽型の恒星フレアでは、キャリントン級の100倍程度のスーパーフレアが1000年に一度程度の頻度で起こり得るとする研究がある。

2.2. 太陽フレアの観測と地球への影響予測

(1) 宇宙天気

宇宙天気の源は太陽である。太陽は、これまで約 46 億年以上の期間にわたり輝き続けているが、その実態は水素がヘリウムに変わる核融合によって熱と光を出している。太陽からは、生命にとって有益な光や熱のみならず、有害な紫外線や X 線、あるいは高エネルギー粒子やプラズマと呼ばれる電気を帯びたガスなどが噴き出ている。

これに対して地球は、2つの強固な防護壁を持っている。一つは地球の磁場であり、磁気圏と呼ばれている。これが太陽からくる太陽風と呼ばれる電気を帯びた高温のガスが地球表面に届くのを防いでいる。もう一つは地球の大気（超高層大気）であり、X 線や紫外線が地表に届くのを防いでいる。これらの2つのバリアが太陽活動から地球の生命を守っている。

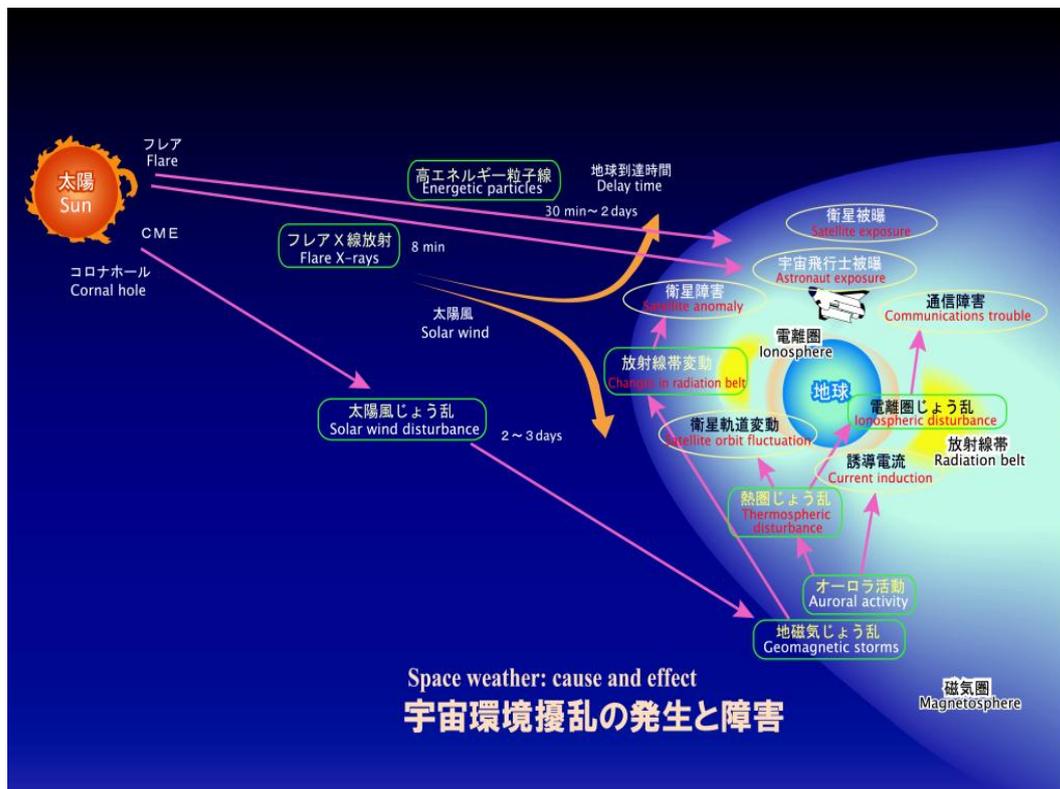


図 2.2-1 宇宙環境擾乱の発生と障害

ただし、太陽フレアに伴う X 線の増大により電離圏下部の D 領域と呼ばれる領域の電子密度が大きく増えると、短波の吸収が起こり通信障害が発生する。また、太陽フレアに伴う CME などにより太陽から放出された太陽風が、たまたま地球の磁場と反応しやすい方向（南向き）に向いていると、磁場のバリアが有効に働かず、このガスの一部が地球のそばまで到達する。このような場合には、地球の大気圏の外にある人工衛星あるい

は宇宙ステーションに影響が及ぶ。また、地球の大気の一番外側にある電離圏が乱されることで電波を使った通信、航空などのインフラに影響を与える。さらには、極域に電流を流し、その電流によって地磁気変動すると地球表面に電位を生じ誘導電流が流れる。

宇宙天気予報は、このような太陽からの光や電波、太陽風、そのバリアとなる地球の磁気圏や超高層大気がどのような状態にあるか、人工衛星や地上の通信・放送インフラにどのような影響を与える可能性があるかを実況し予報するものである。しかし、太陽フレアの発生予測は、現状実用レベルには至っていないのが現状である。



図 2.2-2 NICT 宇宙天気予報センター

NICT（独立行政法人 情報通信研究機構）の宇宙天気予報センターは、毎日午後2時30分に予報会議を開いて、24時間後までの太陽フレアの発生状況、地磁気や高エネルギー粒子の状況について予測し、午後3時頃にウェブサイトで発表するとともに、登録者宛に電子メールでも情報を配信している。情報提供は、Web アクセスが16万件程度／月、メール発信が9千件／月を超えている（平成26年6月20日現在）。

ユーザーは、通信衛星や放送衛星など人工衛星を運用している会社や機関、航空関係者、漁業無線やアマチュア無線など短波電波を使って通信を行っている人たち、電力事業者などが利用している。

- 国際民間航空機関(ICA0)第3付属書:航空機の運行責任者等に提供しなければならない気象情報を規定。
- 現在、宇宙天気情報を含めるよう第3付属書の改定が進められている。

背景

- 航空運用において、宇宙天気情報は通信・測位・被ばくの3つの点で重要
 - 通信:短波通信のみ利用可能な極域において宇宙天気現象による通信途絶が発生しうる。
 - 測位:宇宙天気現象による測位誤差増大、衛星測位の使用不能
 - 被ばく:太陽宇宙線の増大による極域航路での被ばく



ICA0本部(カナダ・モントリオール)

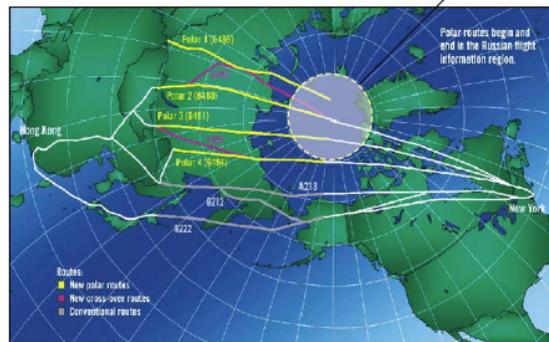


図 2.2-3 宇宙天気情報の航空機運用への利用義務化¹²

今、宇宙天気情報の利用で一番関心が高いのは、航空機運用である。現在民間航空機の運用は、国連の専門機関の一つである国際民間航空機関(ICA0)によって定められている。ICA0では、航空運航で使用すべき台風や雷、大雪などの気象情報を定めているが、それと同様なレベルで、宇宙天気情報についても使用を義務付ける方向で検討が進んでいる。

例えば、図 2.2-3 のニューヨークから香港等に飛行するには、極域(中央の白く抜いた部分)を飛行するのが一番近く効率的になるが、極域は、太陽フレア発生時の高エネルギー粒子(SEP)が集中する地域である。このSEPが極域の電離圏に集中することが原因で、極域の電離圏の吸収が増加し短波による通信ができなくなることがある。この現象は極冠吸収と呼ばれている。極域では、地上にVHF帯の通信局がなく、赤道上空の静止軌道にある通信衛星も利用できないので、通信は短波通信が主となるが、そこで極冠吸収が起これば、短波通信に障害が発生する。

また、GPSも宇宙天気による影響を受ける。GPSによる測位は、複数の衛星からの電波の到来時間の差を使って位置を決める。衛星からの電波は電離圏を伝わるときに少し遅れが生じるため、地磁気嵐などに伴って電離圏の電子密度の空間分布が大きく変動すると想定する遅延時間との差が増大し、測位誤差が大きくなってしまおうという弱点がある。

¹²出所: ICA0 IAVWOPSG/7 Draft Concept of Operation V2.2

[http://www.icao.int/safety/meteorology/iavwopsg/Space%20Weather/Concept%20of%20operation s. V2. 2%20 \(IAVWOPSG. 7. WP. 019\) . pdf](http://www.icao.int/safety/meteorology/iavwopsg/Space%20Weather/Concept%20of%20operation%20s.%20V2.2%20(IAVWOPSG.7.WP.019).pdf)

このように、宇宙天氣的に荒れた時には、航空運用にとって危険な状況に陥る可能性が高いので、荒れている時あるいは荒れそうだという時は、この領域を回避することが検討されている。

表 2.2-1 米国戦略的国家機器評価¹³

Threat/ Hazard Group	Threat/Hazard Type	National-level Event Description
Natural	Animal Disease Outbreak	An unintentional introduction of the foot-and-mouth disease virus into the domestic livestock population in a U.S. state
	Earthquake	An earthquake occurs within the U.S. resulting in direct economic losses greater than \$100 Million
	Flood	A flood occurs within the U.S. resulting in direct economic losses greater than \$100 Million
	Human Pandemic Outbreak	A severe outbreak of pandemic influenza with a 25% gross clinical attack rate spreads across the U.S. populace
	Hurricane	A tropical storm or hurricane impacts the U.S. resulting in direct economic losses of greater than \$100 Million
	Space Weather	The sun emits bursts of electromagnetic radiation and energetic particles causing utility outages and damage to infrastructure
	Tsunami	A tsunami with a wave of approximately 50 feet impacts the Pacific Coast of the U.S.
	Volcanic Eruption	A volcano in the Pacific Northwest erupts impacting the surrounding areas with lava flows and ash and areas east with smoke and ash
	Wildfire	A wildfire occurs within the U.S. resulting in direct economic losses greater than \$100 Million



米国では、宇宙天気予報を注視しており、米国戦略的国家危機評価 (US Strategic National Risk Assessment) の一つとして、津波や地震と並べて宇宙天気を挙げている。

(2) 太陽の観測

宇宙天気の源は太陽であるので、太陽を観測することが重要になる。太陽を含む観測は、古くは地上からの望遠鏡による観測を行っていたが、その場合天候が悪いあるいは夜の間はできないというような制限があるので、現在は人工衛星を使い色々な波長による観測が主流になっている。

図 2.2-4 の3つの画像は、同じ太陽を映したものだが、可視光で見たものは、例えば、日食メガネで太陽を見た画像に相当する。黒い点が幾つかあるが、これが黒点である。可視光だと特に変化は見られないが、波長を変えて極端紫外線で見ると、この左上の黒点に当たる部分が光っているのが見える。これが太陽フレアで、このときに太陽の持っている高温のガスおよび磁場が噴き出すことになる。この噴き出した太陽風が、どんな方向に吹いて行くかを調べるのが、一番右のブルーの画面になる。これは、中央の太陽を隠して、外に出た白いガスを観測している。この画面では、左上の方に広がって見えるが、これが全面真っ白になると、地球方面に吹いてくるということで、影響が懸念されることになる。

¹³出所：DHS（アメリカ合衆国国土安全保障省）HP
<http://www.dhs.gov/strategic-national-risk-assessment-snra>

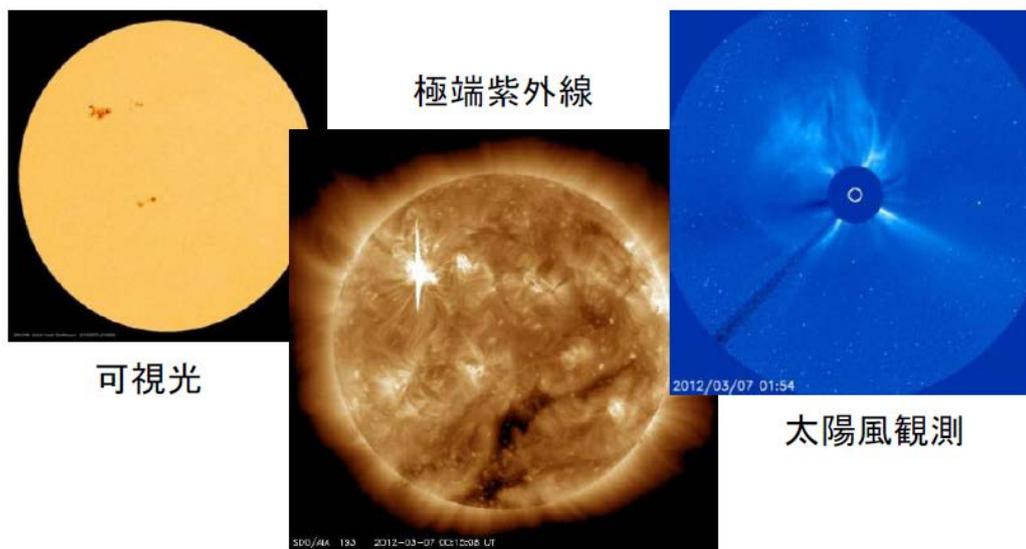


図 2.2-4 人工衛星による太陽の観測¹⁴

太陽黒点の数は、太陽の活動推移を表す、すなわち太陽の活動度合いを示す指数として重要である。この変遷を図 2.2-5 のグラフで描いているが、大体 11 年周期で規則正しく変化することが知られている。1950 年代半ばからの変遷が上のグラフで、11 年ごとに変化しているのが見て取れる。

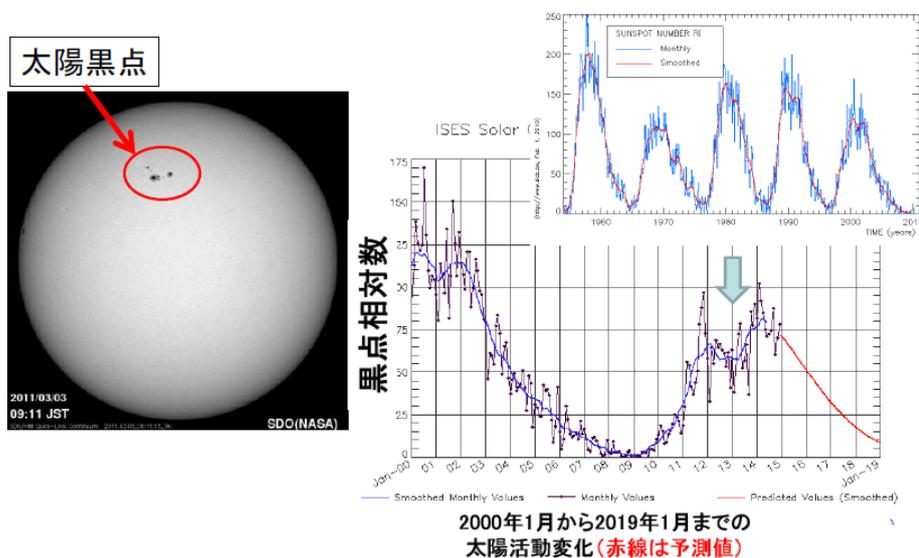


図 2.2-5 太陽活動の現状¹⁵

¹⁴出所：可視光・極端紫外線：SDO 衛星（NASA）<http://sdo.gsfc.nasa.gov/>
太陽風観測：SOHO 衛星（NASA/ESA）
http://www.nasa.gov/mission_pages/soho/index.html

¹⁵出所：Sunspot number progression
<http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

ただし、ピークの位置はサイクルごとに変化しており、現在のサイクル 24 は、他のサイクルに比べると非常に低い推移をしているのが見て取れる。サイクル 24 は 2014 年にピークを迎えたと考えられており、今後太陽活動は減衰していくと思われる。

NICT では、これ以外にも 2 つの観測装置を持って観測している。一つは、太陽電波望遠鏡で、地上から太陽から出ている電波を測定している。これを測定していると、太陽フレアが発生した時に特殊な周波数の電波が突然発生することが分かる。この観測によって、太陽フレアの早期発見とその影響の見積もりが可能となる。

もう一つの観測は、地球方向に来る太陽風の成分を直接調べるために、太陽と地球の間に浮かぶ探査機が行っている。これは、日本の気象庁にあたる米国海洋大気庁 (NOAA) が打ち上げた ACE という探査機である。ACE がいる場所に飛んできた太陽風を観測して、そのデータを NICT の受信システムで受けている。この探査機は、常に太陽と地球の間 (昼間側) に位置しているので、地球が自転すると地上一カ所では受信できない。そこで、米国とドイツ、そして日本等で受信し、24 時間体制でデータを取得している。また、これらの情報は、データベースとして、Web や電子メールで提供している。

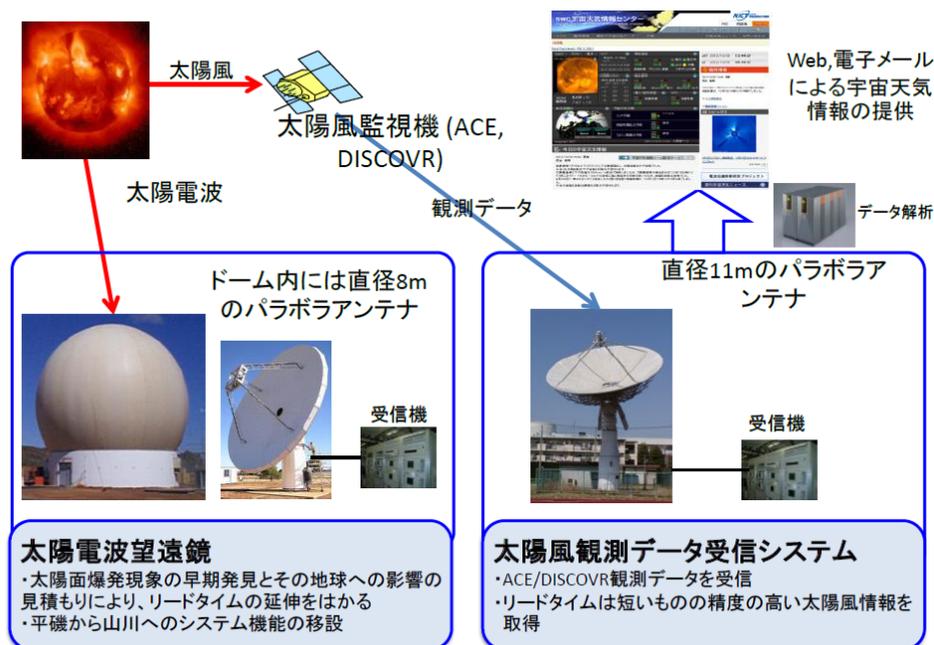


図 2.2-6 宇宙モニタリングシステムの概要

太陽フレアが発生した時に、いつ強いガスが飛来するかについては、シミュレーションを使って推定している。図 2.2-7 は ENLIL と呼ばれる NOAA が開発したシミュレーションモデルの一つである。上下はそれぞれ太陽風の密度および速度を示している。また、図 2.2-7 左から、太陽と地球の面を北側から見た画像、太陽と地球を南北に切った画像、地球及び探査機 STEREO における将来の予測である。左の図において、中央が太陽で右側のグリーン丸が地球である。左側の2つの丸は、NASA の太陽観測衛星 STEREO である。

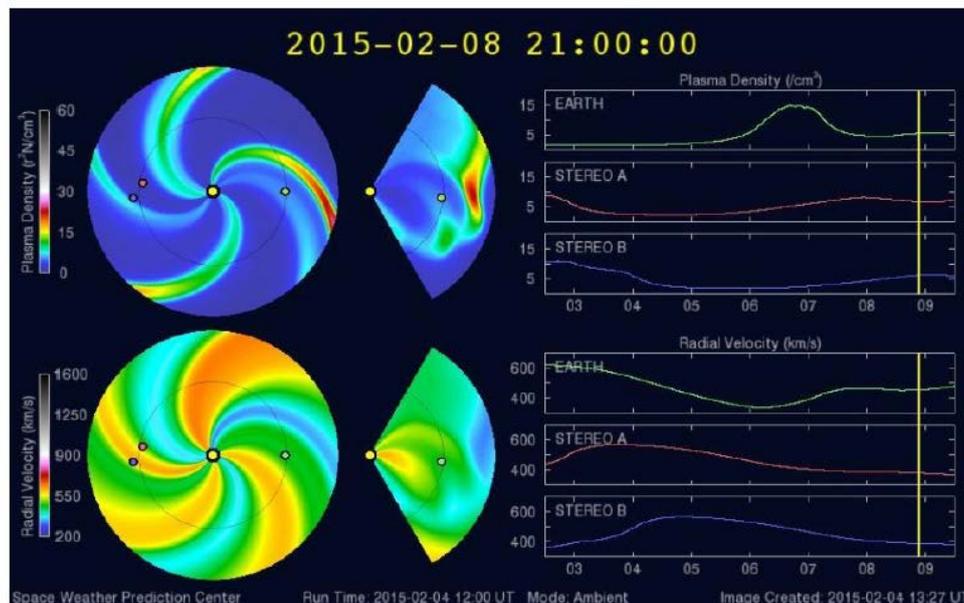


図 2.2-7 太陽風シミュレーション¹⁶

太陽フレアが発生すると、CME が噴出するが、それ以外にも定常的に強いガスが出る部分がある。これは、太陽が 27 日周期で回っていくにつれて、噴き出し口が回転しながら噴出するような形になるので、こういうスパイラル構造ができていく。太陽フレアが発生すると、このきれいなスパイラル構造を破壊しながら飛んでいく。これが、たまたま地球の方向に飛んでくると、大きな影響がでる。この定常的に噴出するガスが地球に到達した際にも地球に影響が起きるが、これは CME と比較して予測は容易である。

¹⁶出所 : WSA-ENLIL solar wind prediction
<http://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction>

(3) 太陽フレアの影響

表 2.2-2 は、現在キャリントン級の現象が起こったらどの程度の経済損失が発生するかを見積もった、スイスのスイス・リーという保険会社の計算結果である。表 2.2-2 から、例えば、米国、カナダだけみても、東日本大震災の経済損失並みという数値になっている。高緯度の国で損失が高く出ているのは、GIC の影響を考慮して計算しているからと思われる。

表 2.2-3 に、GIC が原因と思われる事例を示す。米国、カナダを中心に幾つかの事例があることが知られている。図 2.2-8 および図 2.2-9 は変圧器焼損の写真である。

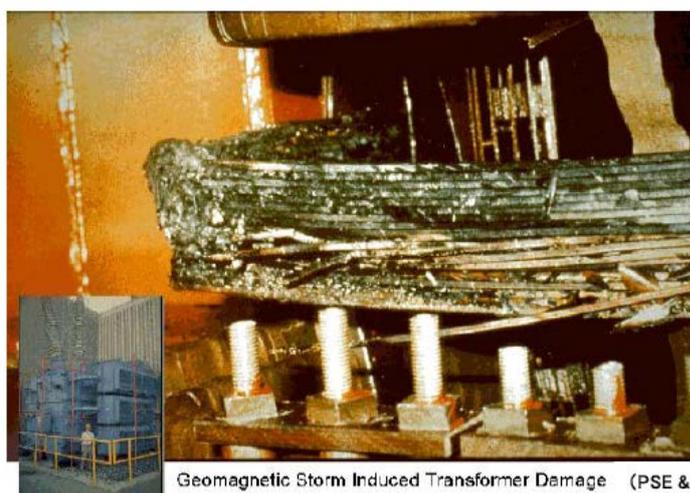
表 2.2-2 キャリントン級事象が発生した場合の経済的損失計算例¹⁷

Regions	Best	Worst
米国、カナダ	128,808	163,866
スカンジナビア、英国	28,903	37,210
独・仏・伊・瑞・澳	73,934	95,185
欧州全体	102,837	132,395
日本	41,746	53,745
豪州	7,617	9,806

Unit; 百万ドル

- 潜在的・地球レベルの影響は本計算に含んでいない
- 東日本大震災の経済損失: 100,000-250,000 (百万ドル)

Reference: SWISS Re, Space Weather Workshop 2014, April 8-11, 2014, Boulder US.



Geomagnetic Storm Induced Transformer Damage (PSE & G 提供)

図 2.2-8 1989年3月の磁気嵐に伴うGICの影響で焼損した米国ニュージャージー州の発電所の変圧器¹⁸

¹⁷出所: Girgis et al., Analysis of observed geomagnetically induced current effects on transformers, Proc. Geomagnetically Induced Current Conference, EPRI Report TR-100450, 1992.

¹⁸出所: Girgis et al., Analysis of observed geomagnetically induced current effects on transformers, Proc. Geomagnetically Induced Current Conference, EPRI Report TR-100450, 1992.

表 2.2-3 GICが原因と思われる電力システムの障害例¹⁹

発生時期	障害の内容
1940年3月24日	米国ミネアポリスの電力網で保護リレーの不要動作
1958年2月10-11日	北米・カナダの電力網で保護リレーの不要動作 (カナダのトロントで停電)
1972年8月4日	北米・カナダの電力網で保護リレーの不要動作
1989年3月13日	カナダのケベックで保護リレーの不要動作により、約9時間の停電:約600万人に影響
1989年3月	米国ニュージャージー州で発電所のトランスの焼損
2001年11月6日	ニュージーランドのSouth Island Power Networkで保護リレーの不要動作
2003年10月30日	スウェーデンのマルメで保護リレーの不要動作により、約1時間の停電:約5万人に影響
2003年10-11月	南アフリカ共和国の電力網でトランスの焼損

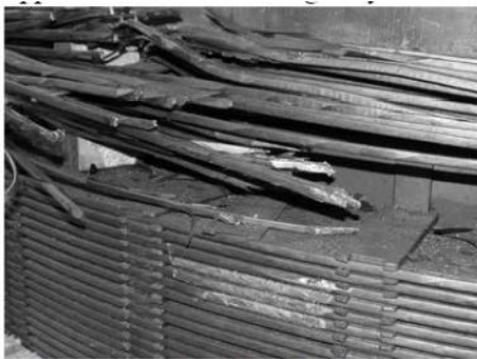


Fig 6: Failure in HV winding of Lethabo #6



Fig 7: Failure in HV winding of Matimba #4

図 2.2-9 Halloween storm(2003年10-11月)の際に焼損した南アフリカ共和国の変圧器²⁰

¹⁹出所: Albertson, V. D., General overview: Geomagnetic storms and electric power system effects, Proc. Geomagnetically Induced Current Conference, EPRI Report TR-100450, 1992.
: Davidson, W. F., Sun-spot disturbances of terrestrial magnetism, Electrical Engineering, Vol.60, Issue 2, pp.72-75, 1941.
: Albertson, V. D., General overview: Geomagnetic storms and electric power system effects, Proc. Geomagnetically Induced Current Conference, EPRI Report TR-100450, 1992.
(Slothower, J. C. and V. D. Albertson, The effects of solar magnetic activity on electric power systems, J. Minnesota Academy of Science, 34, 194, 1967.)
: Albertson et al., Power system disturbances during a K-8 geomagnetic storm: August 4, 1972, IEEE Trans. Power App. and Sys., Vol.PAS-93, 1025, 1974.
: Girgis et al., Analysis of observed geomagnetically induced current effects on transformers, Proc. Geomagnetically Induced Current Conference, EPRI Report TR-100450, 1992.
: Marshall, R. A., M. Dalzell, C. L. Waters, P. Goldthorpe, and E. A. Smith, Geomagnetically induced currents in the New Zealand power network, Space Weather, 10, S08003(13pp), doi:10.1029/2012SW000806, 2012
: Pulkkinen A., 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, 3, S08C03 (19pp), doi:10.1029/2004SW000123, 2005
: Gaunt C. T. and G. Goetzee, Transformer failure in regions incorrectly considered to have low GIC-risks, 2007 IEEE Lausanne Power Tech, New York, Inst. of Electr. and Electr. Eng., 807-812, 2007

²⁰出所: Gaunt C. T. and G. Goetzee, Transformer failure in regions incorrectly considered to have low GIC-risks, 2007 IEEE Lausanne Power Tech, New York, Inst. of Electr. and Electr. Eng., 807-812, 2007

2.3. 地磁気誘導電流（GIC）について

地球の磁場を地磁気と呼ぶ。地磁気変動により地表面に電場が誘導されると、送電線両端に直接接地された変圧器の中性点間に電位差が生じ、変圧器巻線を通じて電流が流れる。この電流は、地磁気誘導電流（GIC）と呼ばれている。（地磁気変動によってパイプライン等に流れる電流も GIC と呼ばれる。）また、地表面に現れる電場は地磁気誘導電場（GIE）と呼ばれている。

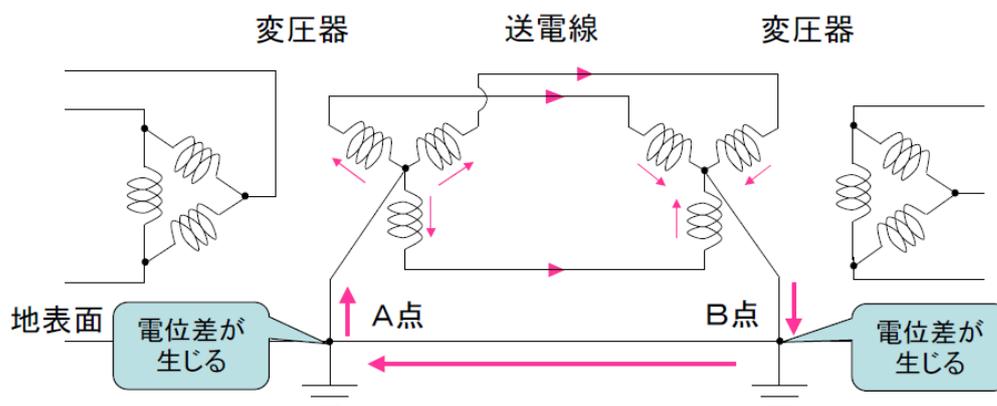


図 2.3-1 地磁気誘導電流

(1) GIC と磁場の磁気データがある場合の GIC 推定方法

GIC の推定には、2つの方法がある。1つは、GIC と磁場変動の時系列観測データがある場合に、GIC と磁場変動の関係を求めておき、将来想定される磁気嵐に対して、どれだけ GIC が流れるかを推定する方法である。

この方法は、2007 年にパルキネンが考えた方法²¹である。GIC は地面に誘導される電場と線形関係にあり、かつ、誘導電場は、宇宙空間からくる磁場変動を平面波と仮定すれば、以下の方程式が成り立つ。

Pulkkinen et al (2007)

$$\text{GIC}(t) = aE_x(t) + bE_y(t) + \epsilon(t)$$

$$\begin{pmatrix} \overline{E_x}(\omega) \\ \overline{E_y}(\omega) \end{pmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{yx} \\ Z_{xy} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{B_x}(\omega) \\ \overline{B_y}(\omega) \end{pmatrix} + \epsilon'(\omega)$$

Z (surface impedance)の非対角成分を決定（1次元地下構造仮定）

図 2.3-2 の左図はフィンランドの地図を示す。図中に3文字で書かれた地点はフィンランドの地磁気観測所の位置である。黒い折れ線はパイプラインを示す。地磁気観測所の磁場観測データを使って、このパイプラインを流れる GIC 観測データを説明できるような地下の電気抵抗のモデルを決めるのがパルキネンの方法である。電気抵抗分布は深さ方向のみに変化する 1次元分布を仮定している。図 2.3-2 中央のグラフは、地下

の電気伝導度の深さ分布を示す。計算に使用した地磁気観測所が異なると磁場変動が異なるため計算で得られた電気抵抗分布が異なる。この電気抵抗分布は実際の地下の電気抵抗分布を示すものではなく、磁場変動と GIC の間を結ぶ、実験的な分布である。

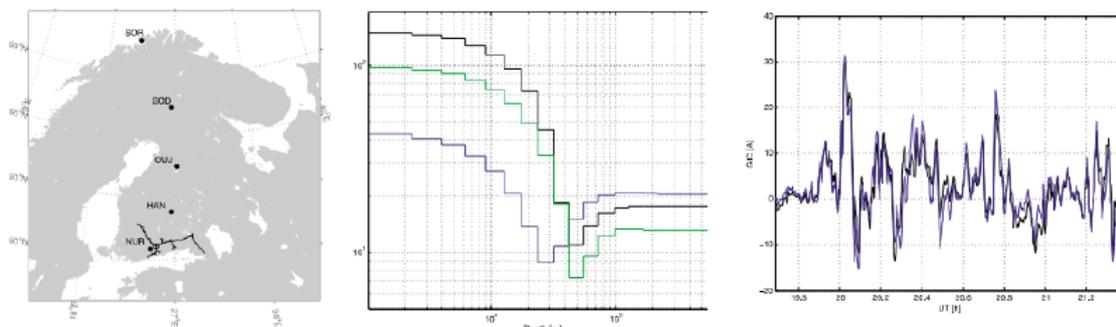


図 2.3-2 GICの計算例 (Pulkkinen et al 2007) ²¹

図 2.3-2 の右図は、観測された GIC と実測された GIC の結果を示している。後者は前者をよく再現していることがわかる。この方法は、GIC の時系列データがあれば、有効であると思われる。ただし、平面波近似の是非や、電気抵抗分布が 3 次元性の強い領域でどの程度有効であるかなどの課題があるため、実際に応用する際には実効性の検証が必要である。

なお、この方法で求めた係数 a, b 及びインピーダンステンソルは、送電線ネットワークに依存する。送電線の増設等によりネットワークが変更された場合、再び a, b 及びインピーダンステンソルを決めなおす必要がある。

(2) GIC 観測データがない場合の GIC 推定方法

もう一つは、気象大学の藤田教授のグループが検討している方法である。この方法では、GIC の観測データがない場合に、地面に誘導される電場 (GIE) を求め、送電線ネットワークの情報などを組み込んで、磁場変化から GIC を計算する。この研究は、2 年前 (2013 年) から始められたもので、現段階では GIC を求めるところまでは試みられていない。

この方法では、まず GIE を作り出す地上での磁場変動を与えるために、宇宙空間に流れる電流を磁場変動駆動源として与える。その結果、地中に現れる電場・電流・磁場は相互に Maxwell の方程式を満たすような振る舞いをする。すなわち、以下の 3 つの式を連立させて解けば良いことになる。

²¹出所 : Pulkkinen, A., R. Pirjola, and A. Viljanen (2007), Determination of ground conductivity and system parameters for optimal modeling of geomagnetically induced current flow in technological systems, *Earth Planets Space*, 59, 999–1006.

$$\vec{E} = R(\vec{r})\vec{J}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \vec{J}^{ext}(\vec{r}, t)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = i\omega \vec{B}$$

□ 地下電気抵抗
□ 外部電流

外部電流を、駆動源として与え、それから地下の電気抵抗の情報を加味して電場を計算するという方法は、GIC 研究にとっては正攻法である。しかし、課題が2つある。一つは、赤で囲んだ地下の電気抵抗の分布の与え方である。もう一つは、得られた結果はGIC でなく、GIE であるということである。GIC を求めるためには、さらに送電線のインピーダンスや変圧器の接地抵抗などの送電線ネットワークのパラメータ情報が必要である。

現在行われている研究は以下のとおりである。日本において、地下の電気抵抗の3次元分布は、残念ながら実測に基づくデータが手に入らない。図 2.3-3 は、3次元抵抗分布の推定方法を示している。この方法は、一般に公開されている標高水深データと堆積層の厚さデータ²²を使用する。標高水深データは、1分メッシュ(1' × 1')で水深と標高情報を与える。一方、堆積層の厚さデータは1度×1度メッシュしかない。日本は非常に複雑な電気抵抗の分布を持っているので、実用的なGIE分布を求めるためには、1度メッシュでは粗すぎる。そこで12.5kmメッシュを用いた。従って、堆積層の厚さのデータを、元々のデータから、内挿によって12.5kmメッシュにする必要があるが、これが計算結果に誤差を与える要因になる。

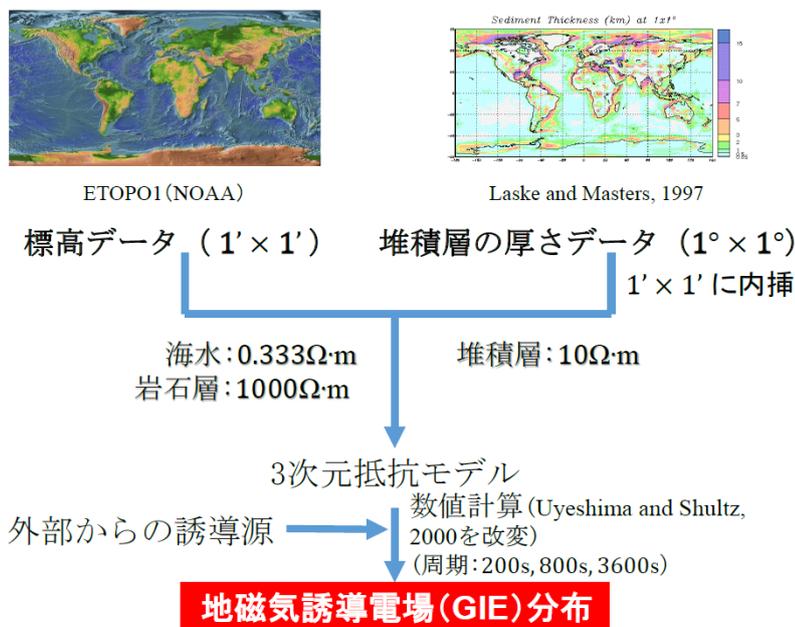


図 2.3-3 地磁気誘導電場 (GIE) 分布の想定

²²出所: Laske, G. and G. Masters (1997), A global digital map of sediment thickness, EOS Trans. AGU, 78, F483.

次に、地下の電気構造として、海水と堆積層、それから堆積層の下に岩石層を想定している。地下の電気抵抗を推定するために、各領域の電気抵抗を図 2.3-3 に示した数値を当てはめている。

こうして3次元の電気抵抗モデルを決定後、外部からの誘導源を与えて、数値計算を行うが、この計算は地球電磁気学ではよく知られたUyeshima and Shultzの数値計算のコード²³をGIE計算用に改変して実施している。今回はGIEを、周波数ドメインで計算するので、周期としては、200秒、800秒、3600秒という周期を考える。200秒は、地磁気の現象の一つに地磁気急始変化（SC）という現象の時間スケールである。一方、3600秒は、磁気嵐の中に現れる比較的大振幅のゆっくりとした変動であるサブストーム（オーロラ現象）の時間スケールである。この2つに代表される周期と、その中間の800秒で、GIEの分布を求めている。

標高データ 1' × 1'

堆積層の厚さデータ 1° × 1°

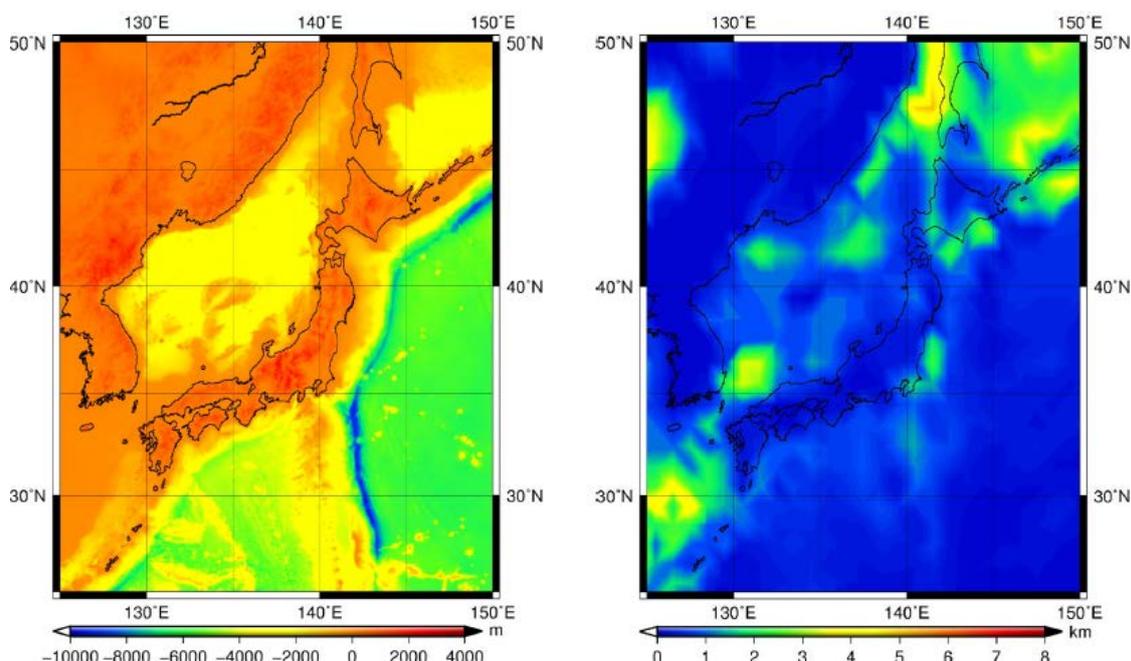


図 2.3-4 日本近郊の標高データと堆積層の厚さデータ分布図

図 2.3-4 に、標高水深データおよび堆積層の厚さデータを日本地図に重ねた分布図を示す。

図 2.3-5 は、標高水深データおよび堆積層の厚さデータから求めた地下の抵抗分布の計算例である。この図では、深さ 1km までの平均の電気抵抗値を描いたものである。この図において、青い部分と赤い部分はそれぞれ電気抵抗が低いところと高いところを示している。

²³出所：Uyeshima, M. and A. Schultz (2000), Geoelectromagnetic induction in a heterogeneous sphere: a new three-dimensional forward solver using a conservative staggered-grid finite difference method, Geophys. J. Int., 140, 636–650.

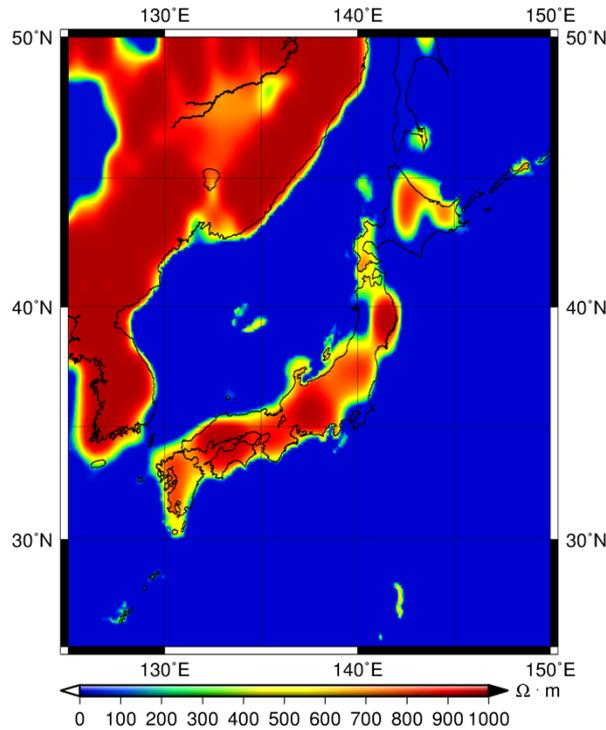


図 2.3-5 日本近郊の地下抵抗分布（深さ 1km までの平均）

次に、地上での磁場変動を与えるため、外部の駆動源の与え方を考える。外部の駆動源の与え方は 2 種類ある。一つは実際に起こった磁気嵐の磁場変動データを再現できるような駆動源を与える方法である。もう一つの方法は、磁場変動を与える駆動電流を各周波数成分に分け、各成分に対する電磁感応を計算する方法である。将来起こりうる巨大磁気嵐の波形は推定できないことから、ここでは後者の方法を選択する。

外部擾乱源

- 将来起こりうる極端現象の波形は不明。よって地上磁場擾乱を与える外部擾乱源（電流）を基本変動に分けて、それぞれの感応を調べる。実際の現象を模したのではない。
- 最大誘導電場を評価するため、外部擾乱電流の軸の向きを変える。



図 2.3-6 外部擾乱源

地上磁場変動を与えるため、地球半径の 10 倍のところに、200 秒、800 秒、3600 秒

の周期をもった駆動電流を与える。この時、赤道面に東西方向に流れる電流を与えるが、この電流は地上に南北方向の磁場しか作らない。しかし、実際の磁気嵐は、南北成分だけでなく東西成分も伴う。南北成分と東西成分を持つ磁場変動を与えるため、駆動電流を赤道面だけでなく、そこから傾けるようにして磁場変動を与える。

電磁反応は線形であるから、ある大きさの磁場変動（駆動電流）に対する誘導電場を求めるためには、ある単位の強さの駆動電流を与えて電場を求め、それに磁場変動の大きさを掛ければよい。よって、単位の大きさの駆動電流に対する誘導電場を求める。図 2.3-7 は、日本の地磁気観測所（柿岡）で観測される磁場変動が、100nT の振幅の磁場変動を起こすような変動があった場合の電場（周期 200 秒）を計算したものである。任意の大きさの磁場変動に対する誘導電場は、柿岡での磁場変動が 100nT の何倍かを求め、その係数を図 2.3-7 に示された誘導電場の値に掛ければよい。

(3) 誘導電場のシミュレーション結果

日本は深い海に囲まれて、その深い海から急に陸になるというような場所（海岸）が何カ所もある。このことは、例えばフィンランドやカナダなど大陸の中央では想定する必要はなく、日本に特有なことである。これは下で説明する海岸線効果と呼ばれる現象である。海岸線効果は新しい知見ではないが、図 2.3-7 から、日本では、大きな電場は局在化して現れるということが分かる。

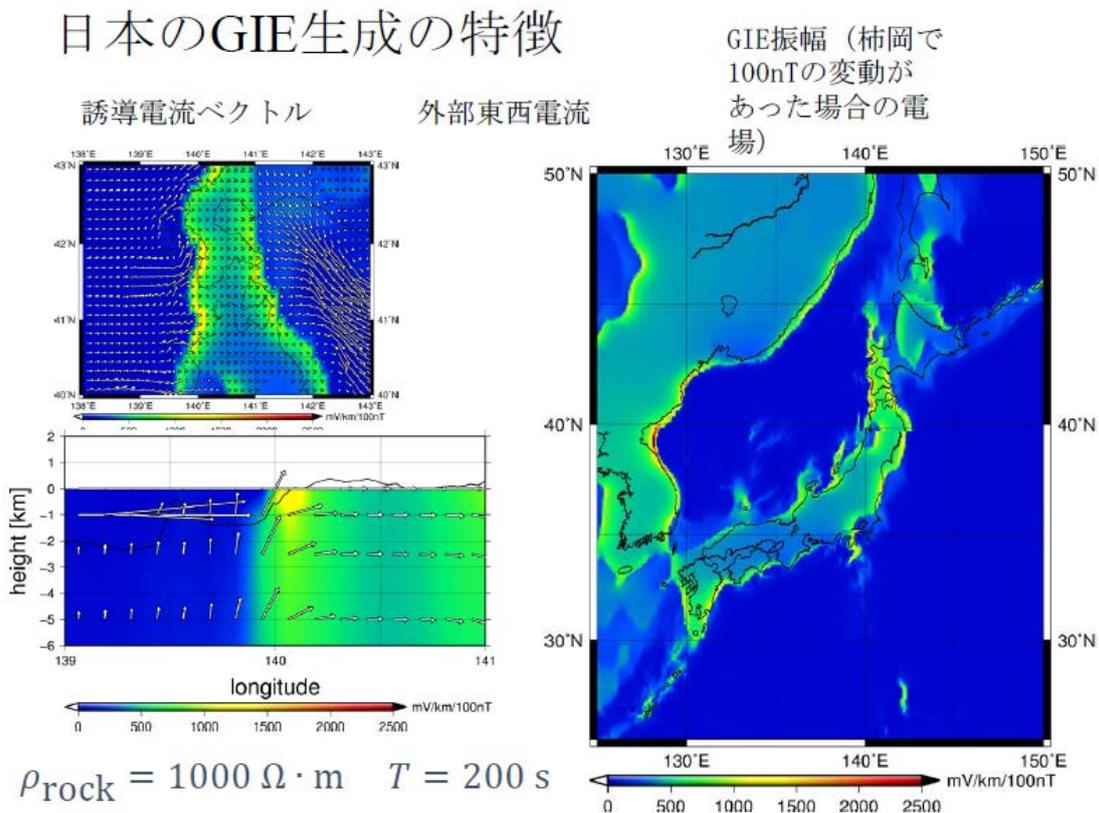


図 2.3-7 日本の GIE 生成の特徴

図 2.3-7の左図は、深い海の海岸のところでは電場ができる物理機構を説明している。電気抵抗が低い海に誘導された強い電流が海岸に押し寄せた時、電流は海岸のところで完全に止まらず、ある程度陸地に染み込む。その際、大きな電場が現れることを示している。矢印は電流のベクトルで、図 2.3-7 の左上図は、地表面の電場を示している。また、図 2.3-7 の左下図は断面図で、断面図で見ても、海岸のところに行くと、海の中に流れた電流が、上向きのベクトルを持って3次的に海岸に集中してくる様子が分かる。なお、図 2.3-7 は、宇宙空間の駆動電流が東西方向のケースである。この時は、図 2.3-7 右図から、津軽半島や松前半島などの日本海側で電場が大きくなっていることが目立つ。

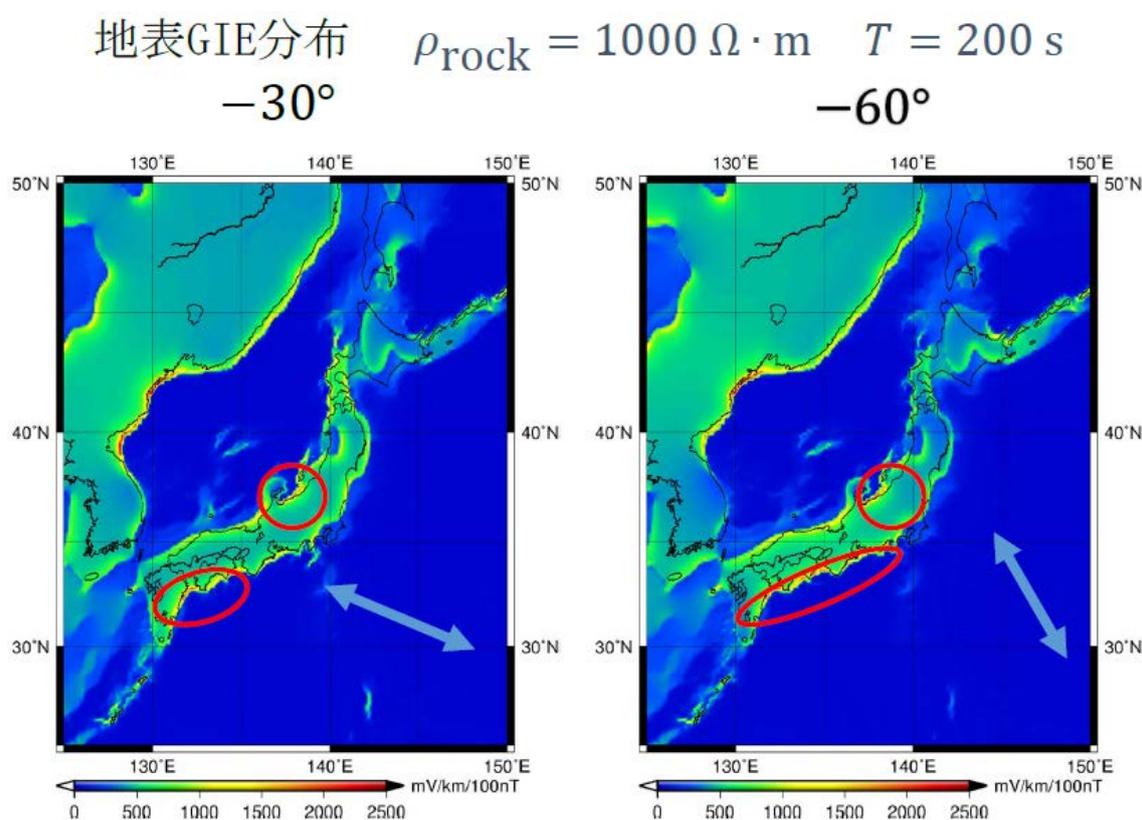


図 2.3-8 地表 GIE 分布 (海岸に流れ込む電流の角度を変えた場合)

図 2.3-7 は、完全に宇宙空間に東西方向の電流だけ流し、地上では南北成分しかないような状況での GIE 分布であるが、実際の磁気嵐は、南北成分と東西成分の両方の磁場変動を持っている。そこで、駆動電流を傾けて一般的な磁場変動を出すようにした結果が図 2.3-8 になる。この図で、海の中に書いてある矢印は、宇宙空間の駆動電流を傾けたとき、海に誘導される電流の方向を示している。その電流の方向に応じて、電場が大きくなる場所は徐々に変わっていくが、これは、海岸線の形や海岸線近傍の海の深さに依存する。

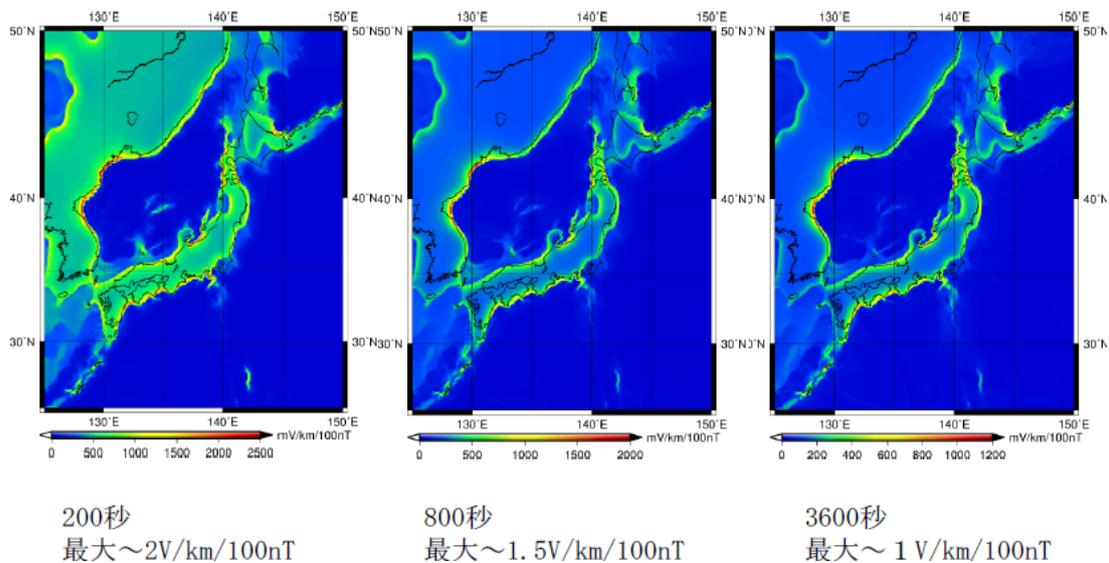


図 2.3-9 最大 GIE 分布

図 2.3-9 は、宇宙空間に流す駆動電流を連続して変化させて、一番 GIE が大きくなるところをピックアップして、重ね合わせて描いたものである。電気抵抗分布の与え方に不確かさがあるため、この結果が示す値が定量的に正しいかは今後検討する必要があるが、この計算では、GIE は最大で 1km あたり 2V 程度になっている。なお、水深データは計算メッシュと同程度の細かさで与えられるため、GIE が大きくなる海岸の場所は、信頼できると考えられる。

(4) GIE 計算および最大 GIC 推定の課題

日本における GIC 推定（モデリング）研究は始まったばかりで、今後すべきことは多い。

a. 実測データに基づく地下電気抵抗モデルの構築

GIC を推定するために、一番の課題は、地下電気伝導度のモデルが、実測に基づくものではないということである。そのために、得られた電場の分布が定量的に妥当であるかという問題になる。これから研究を進めるためには、実測に基づく地下抵抗分布をこのモデルに入れ込んでいくのが一つの方法である。さらに、GIC もしくは GIE の実測値とこれらの計算結果の比較による計算結果の検証も必要である。実用的な結果を出すためにはこの 2 つは極めて重要である。

b. 送電線ネットワークの情報

GIC の実測データがない場合、GIE より GIC を求めるが、電力系統に流れる GIC を計

算する場合は、送電線ネットワークの情報（変圧器や送電線のインピーダンスなど）が必要になる。

c. 巨大磁気嵐の特異な振る舞いの解明

日本など中低緯度において GIC が電力系統に影響を与えるのは、巨大磁気嵐である。通常の規模の磁気嵐から GIC が推定できたとした時、その結果を用いて巨大磁気嵐に対する GIC を推定する際の注意は以下のとおりである。

磁気嵐の規模は、南北成分の磁場変動に注目し Dst という指標を用いる。これは等価的には宇宙空間に赤道環電流という電流が流れていることになる。Dst は磁気嵐全体のエネルギーに関連する指標であるが、Dst を用いて違う磁気嵐間の GIC を推定すると以下で述べるような課題がある。すなわち、巨大磁気嵐には、10 分以下の短周期擾乱が発達するイベントがある。GIC 発生にはこのような短周期変動が効果的である。このような変動の振幅と Dst の間の関係はまだ調べられていない。従って、中小の磁気嵐と大規模な磁気嵐は、磁場擾乱のスペクトルが異なり、Dst の大小だけが、GIC の大小に必ずしもつながらない可能性がある。例えば、普通の磁気嵐が 100nT だとして、キャリントンだと 1700nT という数値になるが、普通の磁気嵐が 100nT だから 17 倍すれば、キャリントンの時にいいのではないかという議論は問題あるかも知れない。

図 2.3-10 は、普通の磁気嵐と大きな磁気嵐の Dst の変化を示したものである。図 2.3-10 の左図は、2014 年 10 月 14 日という比較的普通の磁気嵐で、なだらかな変動をしているが、右図は、有名なカナダの停電を引き起こした 1989 年のイベントで、細かい変動が沢山出ているのがわかる。

通常の磁気嵐と巨大磁気嵐

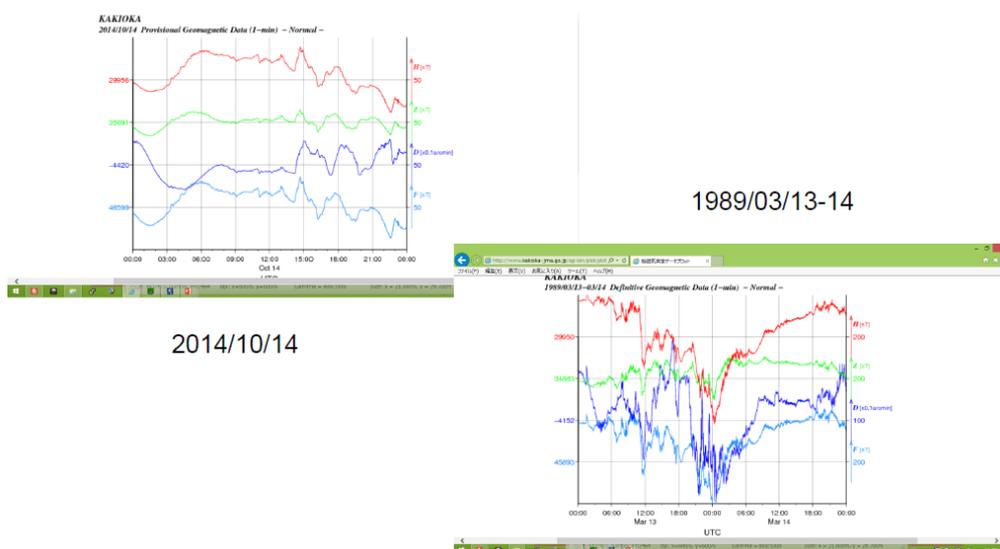
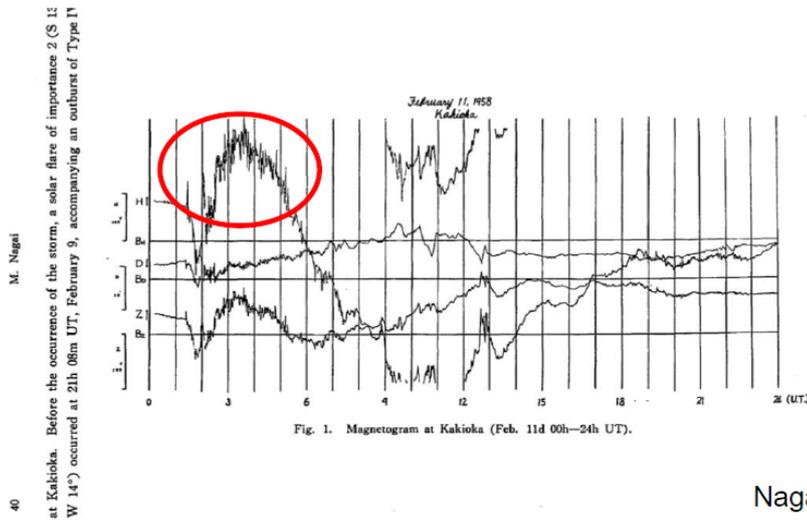


図 2.3-10 通常の磁気嵐と巨大磁気嵐

1958/02/11巨大磁気嵐の際、長時間継続した短周期変動（振幅>100nT）



Nagai, 1964

図 2.3-11 巨大磁気嵐（1958年2月11日）²⁴

また、顕著な例として、図 2.3-11 に示すように、1958年2月の巨大な磁気嵐は、赤枠で囲った部分が南北成分（水平成分）の磁場変動を示しているが、振幅が100nTを超える細かい振動が3~4時間にわたって継続している。これは、地磁気脈動に相当するもので、通常こういうものは日本には現れない。しかしながら、大きな磁気嵐のときには、こういうものが現れる場合がある。これはNagai氏の研究論文²⁴で指摘されている。

d. GIC データが存在する場合の GIC 推定法（パルキネンの方法）の課題

パルキネンの方法により、GIC のデータと地磁気変動のデータがあると、GIC を任意の磁気嵐に対してある程度推定できるが、その場合は、基本的には、宇宙空間から地面に係る電場と磁場変動は、南北成分と東西成分の水平成分2成分しかないという前提条件がある。

この条件は、通常の磁気嵐であればそれ程問題ないと思われるが、Iyemori (1999)²⁵ は、巨大な磁気嵐では、中低緯度の地上磁場変動は、電離層に流れる電流が作る磁場変動と、磁気圏から電離圏に磁力線に沿って流れる電流が作る磁場変動の両方が現れる傾向があることを指摘した。後者が作る磁場は、地上で見ると、水平成分に加えて鉛直成分を作る。従って地上で見える磁場変動は水平2成分の平面波ではなく、3次元の磁場変動になる。このような状況は、通常はオーロラが現れる高緯度域の磁気嵐に顕著なこ

²⁴出所：Nagai, M. (1964), On the geomagnetic storm on February 11, 1958, Mem. Kakioka Mag. Obs., 24, 39-54.

²⁵出所：Iyemori, T. (1990), Storm-Time Magnetospheric Currents Inferred from Mid-Latitude Geomagnetic Field Variations, J. Geomag. Geoelectr., 42, 1249-1265.

とであるが、巨大磁気嵐の場合は、日本のような中低緯度でも同様なことが現れ、平面波近似の妥当性が問題になるかもしれない。このように、パルキネンの方法は非常に有効ではあるが、正確なGICを計算しようとする、誤差をもたらす可能性があると考えらるべきである。

さらに、大きなGICのため、ある変電所の変圧器が全台停止した場合、送電線ネットワークが変化する。この時は、パルキネンの方法で必要なパラメータを新しい送電線ネットワークの下で計算しなおす必要がある。

(5) GIC のまとめ

以上により GIC のまとめは、以下のとおりである。

- ・ 日本域の地下電気抵抗分布をモデルで与えた場合の GIE 分布を試算すると、深い海から陸地になる海岸や深い湾で電場が大きくなる。計算からそのような場所を特定した。
- ・ GIE のモデル計算結果は、実用上多くの課題がある。特に地下電気抵抗分布が実測に基づいたものではないので今後の研究が必要である。GIE から GIC を計算する手法も開発する必要がある。
- ・ 中低緯度の巨大磁気嵐は、極域磁気嵐に典型的な短周期変動が卓越する場合がある。この変動は GIC 発生に効果的である。
- ・ 大規模磁気嵐推定の際、中小規模の磁気嵐で得た GIC の値に Dst の比を掛けた推定は GIC の過小評価になるかもしれないので、今後の研究が必要である。
- ・ GIC 観測と地磁気観測の両方のデータが利用できる場合は、任意の地磁気変動に対する GIC を推定する方法が提案されている。欠点は、巨大磁気嵐に伴う中低緯度の磁場変動は平面波近似からずれることと、電気抵抗分布が複雑な場合の再現精度により、実際の GIC と誤差が生じる可能性があることである。また、GIC によってある変電所の変圧器が停止した場合は、送電線ネットワークが変わるため、前もって求めた GIC 推定に必要な係数が使えなくなる。

2.4. 我が国の電力システムに及ぼす影響について

(1) GIC の実測データについて

GIC の特徴として数分から数十分オーダーで変動することが知られているが、実際の測定データから GIC の様相（大きさ、継続時間）を確認することは重要である。

図 2.4-1 は、実際に日本の変圧器で測定された GIC を示している。GIC の最大値は 130A 程度で継続時間は数分程度であった。この GIC は 2003 年 10 月 31 日であるが、ちょうどこの時期は「ハロウィン・イベント」と呼ばれる大きな磁気嵐が発生した時期と重なる。この時のイベントでは特に変圧器の異常は見られなかった。図 2.4-2 は、磁気嵐が発生した際に海外のある発電所の変圧器で測定された GIC（詳細は不明）を示している。GIC の最大値は 45A 程度で継続時間は数分程度であった。日本と海外の GIC において、変動とピークの生じ方に大きな差は見られない。

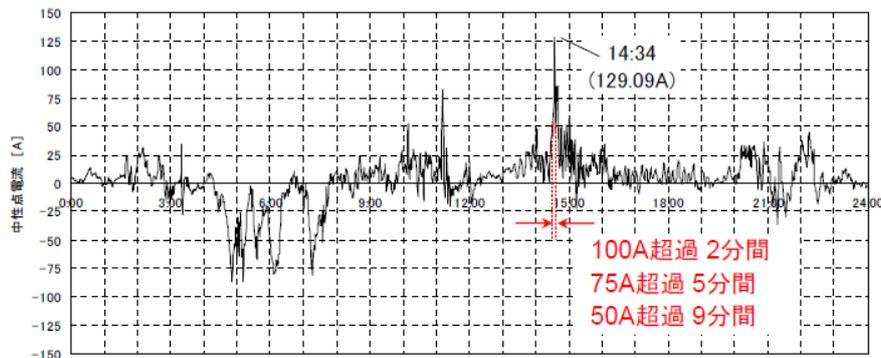


図 2.4-1 日本の GIC 測定波形（2003 年 10 月 31 日：24 時間）

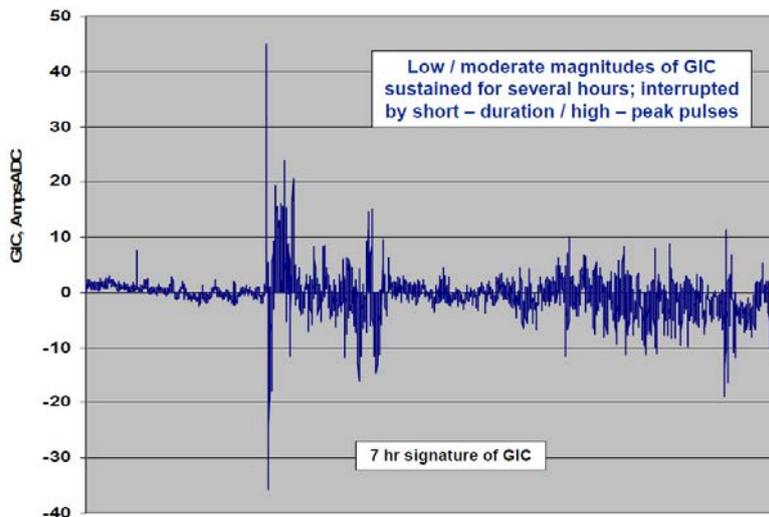


図 2.4-2 海外の GIC 測定波形（7 時間）²⁶

²⁶出所：R. Girgis and K. Vedante, “Effects of GIC on Power Transformers and Power Systems”, PSRC Meeting, May 14, 2014

(2) GIC が変圧器に及ぼす影響について

GIC が電力設備に及ぼす影響については、変圧器磁気飽和による影響が懸念されている。そこで、GIC が変圧器に及ぼす影響について、変圧器メーカー（東芝、日立製作所、三菱電機）にヒアリングを行った結果は以下のとおり。

A) 変圧器メーカーの認識

- この3メーカーと東京電力は、平成3年ごろから、GICによる変圧器への影響に関する共同研究を実施し、電気学会の論文誌²⁷に共著で発表している。また、知識も共有化されており認識に違いがなかった。

B) GIC による変圧器への影響と変圧器の耐量について

- GIC は周期が5～15分と非常に長い準直流電流であり、電力系統の商用周波数に対してはほぼ直流電流とみなせる。変圧器にGICが流れ込むと、鉄心飽和により鉄心の一部で部分過熱を起こす場合がある。日本では、小規模モデルと実規模モデルによる実験を通じて同様な結果を得ている。
- 変圧器は、巻線の漏れ磁束による過熱により温度上昇するが、これにGIC発生時には鉄心飽和に伴う鉄心からの漏れ磁束による過熱（部分過熱）が重畳する。
- 変圧器の部分過熱は、鉄心支え板（外鉄型）または鉄心当て板（内鉄型）の部分で発生する。
- 鉄心の過熱そのものは影響が少ないが、巻線の絶縁に影響を与えると変圧器内部事故となる。日本では設計で配慮している。
- 部分過熱が発生したかどうかは、油中ガス分析で検証することができる。部分過熱は5分程度の現象（時定数：分単位）であり、負荷電流による変圧器全体の温度上昇（時定数：時間単位）に加算して実際の温度となる。この現象は油温監視での検出は難しい。
- 過去に経験のあるGICに対して耐量はあると考えられる。
- 日本においては、GICに起因する変圧器の事故例はない。
- GICに対する耐量を上げるには、巻線との間隔を適切にするか、部分過熱を起こす部分の材質について過熱を生じる磁性体から、過熱を生じない非磁性（ステンレス鋼等）に取替える方法がある。
- GICに耐える仕様（電流値）が提示されれば、設計で対応するが、コストアップになる。
- 海外からの注文で、GICを考慮した変圧器を設計・納入した実績がある。（東芝、三菱電機）

²⁷出所：高須伸夫ほか、地磁気誘導電流による変圧器の直流偏磁現象の検討、電学誌B, 113巻, 4号, 1994

C) 更に大きな GIC に対する変圧器の耐量について

- 過去に経験のある GIC 程度であれば対応可能であるが、それ以上の GIC（電流値）および継続時間の場合は分からない。検証が必要である。
- GIC に対し現状以上の要求があった場合は、現状の設計の延長では、大型化・コストアップになりかねないので、GIC を抑制または遮断する対策が必要になる。ただし、以下の対策を実施する場合は、系統全体への影響等を含め総合的な検討が必要である。
 - ・ 変圧器中性点にバイパス回路付抵抗器の挿入
 - ・ 変圧器中性点に避雷器付コンデンサの挿入
 - ・ 長距離送電線の送電容量増加対策と兼ねることでの送電線への直列コンデンサの挿入

D) その他得られた知見

- 変圧器は、GIC により飽和現象が発生すると異常な騒音を発するようになる。
- 1989 年のニュージャージー州での変圧器事故は、部分過熱現象に対する設計面の配慮が不足していることで、潜在的に部分過熱があり、その中で GIC の発生がトリガーを引いた可能性がある。（三菱電機）
- 2003 年の南アフリカの変圧器事故は、その後の調査で、絶縁油に含まれる適正でない添加物が、GIC による許容できる温度上昇で硫化腐食が加速し、巻線の絶縁を破壊した事象である。（東芝）
- 米国では、エネルギー省（DOE）が北米電力信頼度協議会（NERC）と共同で、GIC 対策のプロジェクトを 2010 年から実施しており、現在も活動中である。
- 実系統のように定格負荷電流がかかった状態で、中性点に大きな直流電流を流すことは工場の試験設備では実現できない。小規模の実験とシミュレーションの組み合わせによる検証とならざるを得ない。

(3) GIC が保護リレーの応動に及ぼす影響について

GICによる電気設備への影響として、前述の変圧器への影響のほか、変圧器磁気飽和に起因する高調波発生による保護リレーへの影響が懸念される。保護リレーへの影響について調査した結果は以下のとおり。

- デジタル保護リレーは、電圧・電流情報が保護リレーに一旦入力されるが、アナログ値であるため、デジタル値（情報）に変換される。その後、デジタル情報を、デジタルフィルタで演算し、その情報をリレー演算及び動作判定に渡して、シーケンス演算終了後に指令（動作 or 不動作）を出す。
- デジタルフィルタ演算部は、電圧、電流情報から、高調波成分や直流成分を除去し、基本波成分（50Hz/60Hz）を取り出す演算を行う。
- このように、デジタル保護リレーは、デジタルフィルタにより高調波成分や直流成分を除去するため、GICによる影響はないと考えられる。
- 従って、ハイδρο・ケベック社の事例のような保護リレーの不要動作によるコンデンサ設備の停止はないと考えられる。

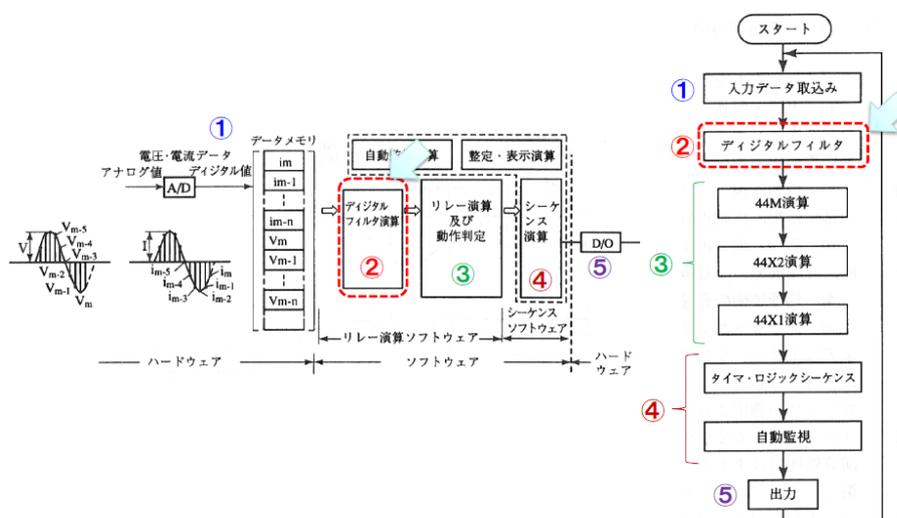


図 2.4-3 デジタル形保護リレーの構成²⁸

²⁸出所：電気学会技術報告 第 641 号『保護リレーシステム基本技術体系』電気学会

(4) 過去の GIC 経験事例とその対策について (ハイドロ・ケベック社)

1989年3月13日、大規模な地磁気嵐が発生した。カナダのケベック州では、この地磁気嵐によるGICが直接原因となる電力機器故障はなかったが、大規模な停電が発生し復旧まで9時間要した。以下に、海外文献²⁹からこの概要とその後の対策について記載する。

A) ハイドロ・ケベック社の事故概要

- 1989年3月13日朝、ハイドロ・ケベック社の系統がGICの影響を受けた。
 - ① 02時44分17秒、チブーガモー変電所のSVC（静止型無効電力補償装置）が高調波電流保護装置により停止。
 - ② 02時44分19秒、同変電所でもう1台のSVCが停止。
 - ③④ 02時44分46秒、150km離れたアルバネルとネミスコの発電所では、更に4台のSVCが停止。
 - ⑤ 02時45分16秒、チブーガモーの南にあるラ・ヴェンドリュ・コンプレックスで1台のSVCが停止。
- これらSVCの停止により、735kV電力系統で電圧調整機能が喪失し、一連の送電線が解放され、1分以内にラ・グランド・ハイドロ・ケベック・コンプレックスが南の負荷中心から切断された。図2.4-4にトリップ（停止）したSVCと解放された送電線、並びに主要な障害前の電力潮流を示す。
- 解放された送電線、および停止したSVCにより、線間静電容量のために数カ所で過電圧が発生し、一部の設備が損傷を受けた。
- 確認できる範囲で、設備損傷がGICから直接発生したケースはなかった。おそらく、保護リレーがSVCを保護するために動作するのが早すぎたため、負荷が失われた後、過電圧になったものだろう。しかし、保護リレーがSVCを損傷から保護したのであり、これは目的通りである。
- この一連の現象は、停電を回避するように設計されていた故障想定範囲を超えるものだった。
- この系統は9.5GWの発電力を急に失ったが、これは早朝の系統総出力のほぼ半分に相当した。
- 02時45分32秒までには、ハイドロ・ケベック電力系統がブラックアウト（停電）状態になり、州内の842,000軒（ほぼ600万人）の顧客の大半が被害を受けた。

²⁹出所：Kirkham H, YV Makarov, JE Dagle, JG DeSteele, MA Elizondo, and R Diao. 2011. Geomagnetic Storms and Long-Term Impacts on Power Systems. PNNL-21033, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.

- ハイδρο・ケベック社の大半の顧客は、最長でも 9 時間以内にブラックアウトから復旧した。そして、1989 年 3 月 13 日 11 時までに 3,500 軒の顧客（総顧客数の 0.5%未満）を除き全ての顧客に対して電力が復旧した。

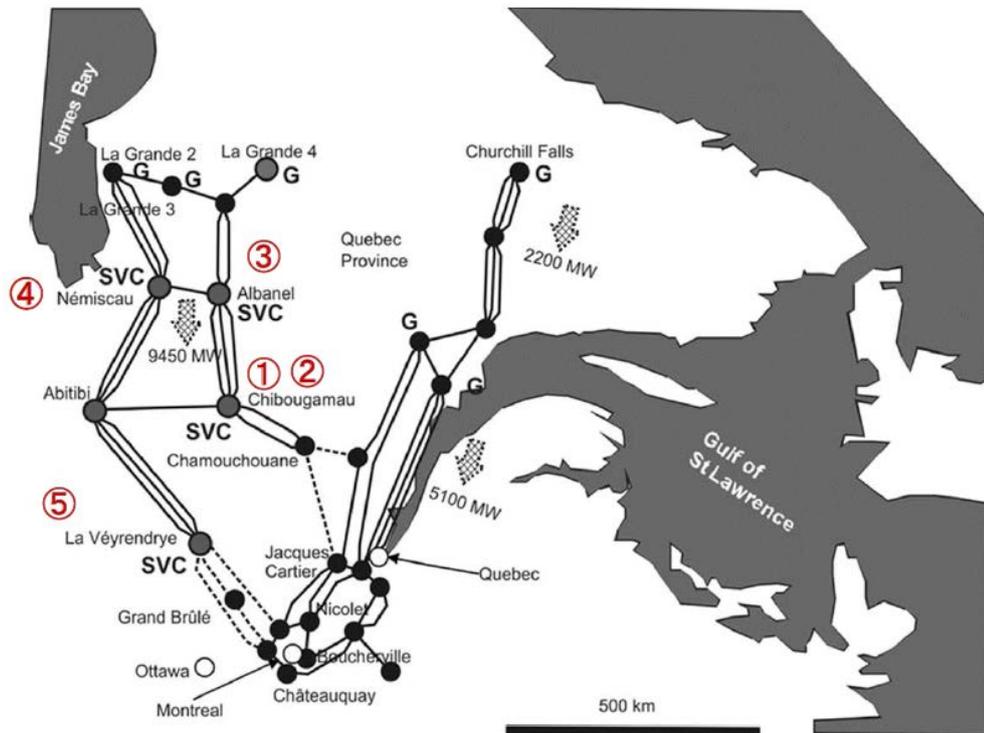


図 2.4-4 1989 年 3 月のハイドロ・ケベック社の 735kV 系統²⁹

B) ハイドロ・ケベック社の対応策

- 1989 年 3 月の事象後、ハイドロ・ケベック社は数回の調査を行い、幾つかの変更を実施した。特に、以下の課題への取組が行われた。
 - ・ SVC は GIC 事象に対処できることが確認されたが、系統を保護できる設定になっていなかった。そこで、SVC の設定を変更した。GIC 事象が発生したとき設定が変更後のようになっていれば、どの SVC もトリップしなかったと考えられる。
 - ・ SVC を 2 台追加し、系統に設置されている SVC の総数は 11 台となった。
 - ・ 大型変圧器は、巻線内の直流に対する許容度が予想されていたより遙かに大きいことが確認された。実験から、直流によって変圧器の過熱が確認されているが、最も脆弱な個所はタイププレート（鉄心支え板、鉄心当て板）だった。これは、比較的シンプルな機械部品であり、非磁性体材料で作ることが可能。タイププレートの過熱により変圧器が損傷を受ける大きなリスクに曝されるとは考えられていない。

・変圧器中性線に流れる直流を阻止する装置が開発され、その試作品が設置された。しかし、そのような装置の必要性は小さくなったとも言えるかも知れない。これは、ハイδρο・ケベック社が 735kV ネットワークの長距離送電線の大半に直列補償コンデンサを取り付けたためである。

- 現在は、図 2.4-5 に示すように直列補償コンデンサが設置されている。
- 実は、この変更は 1989 年の GIC 事象より前から計画されていたものである。ハイδρο・ケベック社は、東－西方向がジェット電流の「発生しやすい方向」と考えている。ジェット電流とは、CME（コロナ質量放出）によって高緯度地域で発生する電流である。
- 従って、この方向は、送電線にとって最も好ましくない方向だが、ラ・グラン드의東－西送電線は低電圧送電線であり、距離も比較的短いので、ハイδρο・ケベック社は、主として距離の長い北－南送電線に対策を講じた。

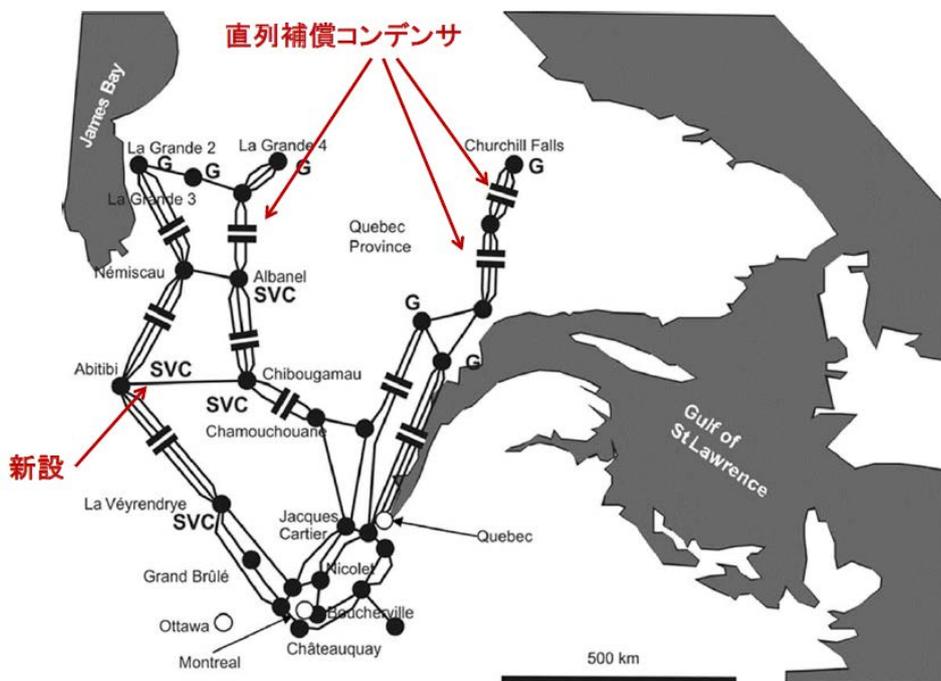


図 2.4-5 ハイδρο・ケベック社の系統図と直列コンデンサの位置²⁹

C) ガイドラインとこの事象で得られた知見

- CME 事象時にシステムを運用するため、以下のガイドラインが作成された。
 - ・大容量送電設備に頼るのではなく、発電能力を均一に分散させる。
 - ・発電機が喪失した場合に迅速に対応するため、運転予備力を増強する。
 - ・可能な限り多くの送電線路を運用する。
 - ・送電線上の潮流を定格容量以下のレベルに下げる。
 - ・試験を中断する。
 - ・SVC 保護を「警告モード」に切り替え、トリップを許可しない。
 - ・可能な限り切替え操作を減らす。

- 1989 年の経験から次の教訓を得た。
 - ・一旦保護システムが動作（停止）を開始すると、事象は急速に広まっていく。
 - ・保護システムは設備保護のために設置されているが、一般的に、大規模な混乱に対処するようにはできていない。
 - ・保護システムが「正しい」と見なされるような動作を行った結果、連鎖が始まる場合がある。
 - ・保護システムが動作したので、GIC に直接誘発された故障は無かった。

2.5. 得られた知見と課題

以上より得られた知見と課題は、以下のとおり。

<知見>

『太陽フレアについて』

- ✓ 太陽フレアの発生メカニズムは、太陽コロナ中に蓄積された磁場エネルギーが磁力線のつなぎ替え（リコネクション）によって運動エネルギーや熱エネルギーに変換されて放出されるという説が有力である。
- ✓ 記録されている最大のフレアは、1859年のキャリントン・フレアである。
- ✓ 過去のフレアを調べる方法の一つに、樹木年輪中の炭素濃度から宇宙線強度を調べる方法がある。これによると樹木年輪から 775 年にキャリントン・フレアの 10 倍程度の巨大爆発の痕跡が見ついている。
- ✓ フレアの大きさと発生頻度には一定の関係がある。太陽型の恒星フレアの頻度もその関係に従っているようであり、これによるとキャリントン事象を遥かに超えるスーパーフレアの可能性も否定できない。
- ✓ 黒点観測からフレア発生確率を統計的に推測することは行われているが、巨大フレアの発生を正確に予測することはまだできていない。精密な観測と数値計算によって予測するための研究が進行しつつある。
- ✓ 太陽は望遠鏡や人工衛星などにより常に観測されており、太陽フレアが発生すれば確認可能であり、Web や電子メール等による情報発信で周知する体制は確立している。

『地磁気誘導電流（GIC）について』

- ✓ 地磁気変動により地表面に電場が誘導されると、送電線両端に直接接地された変圧器の中性点間に電位差が生じ、変圧器巻線を通じて電流が流れる。この電流は、地磁気誘導電流（GIC）と呼ばれ、地表面に現れる電場は地磁気誘導電場（GIE）と呼ばれている。
- ✓ 磁気嵐時にはオーロラ活動が活発になる。オーロラに伴う地磁気変動は高緯度地域ほど大きいので、一般的には高緯度地域の方が大きな GIE が現れやすい。
- ✓ 中低緯度の磁気嵐では、赤道環電流（赤道面に電流が東西方向に流れる）が地上に作る南北方向の地磁気変動が卓越しやすい。しかし、巨大な磁気嵐においては、オーロラ活動域がより低緯度方向に移動することや複雑な磁気圏の電流が発生するため、南北成分だけでなく東西成分の地磁気変動も大きくなる。日本では、磁場変動の方向だけでなく、深い海から陸地になる海岸や深い湾などの地下電気抵抗構造の不均一が GIE の発生に影響を与える。
- ✓ 太陽フレアの発生から、GIC の発生地点と大きさを定量的に予測する技術は未確立で解明の途上である。

- ✓ GIC の予測には、以下の 2 つの方法がある。
 - ① 地下電気抵抗分布と宇宙空間の電流の振る舞いを与えて数値計算によって地磁気誘導電場 (GIE) を推定した上で求める GIC を推定する方法
 - ② 小規模な GIC の観測と地磁気観測の両方のデータから GIC を推定する実験的な方法
- ✓ ①の方法で GIE が相対的に発生し易い地域の推定は行われているが、現状では精度が低い。

『日本の電力システムに及ぼす影響について』

- ✓ これまでに観測された日本における GIC について、1 台の変圧器の中性点に流れる GIC が最大百数十アンペア程度で、ピークの継続時間も数分程度であることを確認した。
- ✓ 太陽フレアに伴う磁気嵐によって GIC が電力システムに流れ、それが電力機器に与える影響として、変圧器の磁気飽和による鉄心過熱や高調波発生による影響が考えられるが、メーカーへのヒアリング等で以下を確認した。
 - ・ 過去に経験のある GIC に対して、変圧器は部分過熱に対する耐量がある。
 - ・ 日本において GIC による変圧器の事故は発生していない。
 - ・ 変圧器の耐量を上げるには、設計面である程度可能であるが限界があるため、現状以上の要求に対しては、GIC を抑制または遮断する対策が必要となる。
 - ・ GIC による変圧器鉄心の飽和現象に伴い発生する高調波については、日本のデジタルリレーはデジタルフィルタにより高調波成分や直流成分を除去するため、リレーの不要動作による影響はない。

<課題>

- ✓ 太陽フレア発生から GIC 発生に至る定量的メカニズム解明の出発点として、想定すべき巨大太陽フレアの規模と頻度の確度を高めると共に、巨大フレア発生を事前に予測する技術を開発する必要がある。
- ✓ メカニズム解明について、今後どのようなアプローチが必要かという検討が必要であり、このためには、学問領域を超えた専門家の連携した継続的な取り組みが必要である。
- ✓ 磁気嵐により GIC が発生するが、太陽フレア発生から磁気嵐の規模を推測する研究を進める必要がある。
- ✓ 数値計算による GIE を用いた GIC 推定方法と、小規模な GIC の実測データと地磁気観測データから GIC を推定する方法が提案されているが、地下構造が複雑であり、かつ中低緯度に位置する日本にそのまま適用できるかを検証する必要がある。日本周辺の地下構造および巨大地磁気嵐の特性の解明を行い、日本における GIC を定量的に予測する技術の開発が必要である。

- ✓ 上記メカニズムの解明の中で、GICの対応として、電力の安定供給に繋がる総合的に最適な対策を検討して行く必要がある。

3. 現行の保安水準を確保するに当たっての技術基準の課題について

3.1. 現行の保安水準を確保するに当たっての技術基準の課題

A) 電気事業法等における規定

- 電気事業法では、電気設備を含む電気工作物について、人体への危害の防止、電気の著しい供給支障の防止等を図るため、主務省令で定める技術基準に適合するよう維持することをその設置者に義務付けている。主務大臣は、その設置者に技術基準への適合を命令することができ、これに従わない場合、罰則の対象になる。電気設備については、経済産業省令として「電気設備に関する技術基準を定める省令」が定められ、感電火災の防止、供給支障の防止等のための規定が定められている。
- 電気事業法では、電気工作物の維持及び運用に関する保安を確保するため、保安規定を定めることをその設置者に義務付けている。自主的な保安については、「電気事業法施行規則」の中で、電気工作物の運転又は操作に関することを保安規定において定めることが規定されている。

B) 太陽フレアに伴う地磁気誘導電流（GIC）による電気設備への影響と技術基準・解釈との関係

太陽フレアに伴う磁気嵐が電気設備に与える影響として、平成 26 年 7 月 17 日付け電力安全小委員会中間報告では、次の 4 つのものを掲げており、それぞれに関連すると考えられる省令基準を対応させる。

- ① 変圧器への影響（変圧器磁気飽和による鉄心加熱）
 - 第 4 条（電気設備における感電、火災の防止）、第 5 条第 3 項（電路の絶縁）、第 18 条（電気設備による供給支障の防止）
- ② 電圧低下（変圧器磁気飽和による無効電力消費増）
 - 第 18 条（電気設備による供給支障の防止）、第 44 条第 2 項（発電設備等の損傷による供給支障の防止）
- ③ 高調波の発生（変圧器磁気飽和による高調波発生）
 - 第 18 条（電気設備による供給支障の防止）、第 44 条第 2 項（発電設備等の損傷による供給支障の防止）
- ④ 保護リレーの不要動作（GIC による保護リレー不要動作）
 - 第 18 条（電気設備による供給支障の防止）、第 44 条第 2 項（発電設備等の損傷による供給支障の防止）

C) 太陽フレアに伴う GIC による電気設備への影響が顕在化する場合の対応

- B) の考察で示すように、太陽フレアに伴う GIC が電気設備へ影響をもたらすことについても、省令基準において感電、火災の防止及び供給支障の防止の観点から必要な対応をとることが求められている。しかしながら、省令基準を受けた解釈においては、そのための具体的な規定はなく、これが顕在化し、具体的な対応をとる必要があるのであれば、その態様に応じた規定を検討する必要があると考えられる。
- 保安規定の対応も上記と同様。

4. おわりに

今回、電気設備を対象として、専門的な検討を行うために「太陽フレアによる地磁気誘導電流（GIC）に関する調査検討委員会」を設置し、既存文献やヒアリング等により、太陽フレアに伴う地磁気嵐による GIC 発生等に至るメカニズムに関して各々の分野の専門家の協力を得ながら最新知見を調査するとともに、我が国の電力システムに及ぼす影響について磁気緯度が高い欧米諸国における検討も参考にして最新知見を調査した。加えて、以上の知見を踏まえ、現行の技術基準に課題がないか否か及び技術基準以外の自主保安も含む保安の在り方の必要性について調査を行った。

この委員会で、GICによる電力システムへの影響を議題として、異なる学問領域の専門家が一堂に会して議論する機会は初めてであったが、審議を通じて他の領域の知見について相互理解を深めることができた。

調査の結果、一定の知見は得られたものの太陽フレアの発生から GIC 発生に至るメカニズムを定量的に予測する技術は、未確立で解明の途上であること及びこの解明についてどのようなアプローチが必要かという更なる検討が必要であることが判明した。そして、このためには、学問領域を超えた専門家の連携した継続的な取り組みが必要である。

また、GIC 発生定の量的メカニズムの解明が前提となるものの、電気事業者においては、GIC 発生に至る事象とその影響について、より知見を高めることが望まれる。

本報告書の取り纏めに当たっては、限られた期間の中、変圧器メーカー、有識者の方から、ヒアリング等でご尽力いただいた。関係各位の御指導・御支援に対して、深く感謝する次第である。

参考文献

<電力系統関係>

1. 坪井昭, 堀内進, 磁気嵐と電力系統, 電気学会雑誌, 108 巻, 3 号, 1988
2. 高須伸夫, 宮脇文彦, 齊藤進, 藤原康夫, 地磁気誘導電流による変圧器の直流偏磁現象の検討, 電学誌 B, 113 巻, 4 号, 1994
3. Dr. Ramsis Girgis and Kiran Vedante, Effect of GIC on Power Transformers & Power Systems, PSRC Meeting. May 14, 2014
4. Kirkham H, YV Makarov, JE Dagle, JG DeSteeze, MA Elizondo, and R Diao, Geomagnetic Storms and Long-Term Impacts on Power Systems, PNNL-21033, Pacific Northwest National Laboratory, 2011
5. North American Electric Reliability Corporation Interim Report, Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System, February 2012
6. 亘慎一, 國武学, 北村健太郎ほか, 地磁気誘導電流 (GIC) が電力網に与える影響, 情報通信研究機構研究報告, 第 55 巻, Nos. 1-4, 109-117, 2009

<太陽観測関係>

1. Maehara, H., T. Shibayama, S. Notsu, Y. Notsu, T. Nagao, S. Kusaba, S. Honda, D. Nogami, K. Shibata, Superflares on solar-type stars, *Nature*, 485, 478-481, doi:10.1038/nature11063, 2012.
2. Shibata, K., H. Isobe, A. Hillier, A. R. Choudhuri, H. Maehara, T. T. Ishii, T. Shibayama, S. Notsu, T. Nagao, S. Honda, and D. Nogami, Can superflares occur on our sun?, *Publ. Astron. Soc. Japan* 65, 49, 2013.
3. Baker, D.N., X. Li, A. Pulkkinen, C. M. Ngwira, M. L. Mays, A. B. Galvin, and K. D. C. Simunac, A major solar eruptive event in July 2012, Defining extreme space weather scenarios, *Space Weather*, 11, 585-591, doi:10.1002/swe.20097, 2013
4. Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events: A Workshop; Space Studies Board; Division on Engineering and Physical Sciences; National Research Council
5. The working group on extreme solar weather of the Royal Academy of Engineering, Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure, Royal Academy of Engineering, London, ISBN 1-903496-95-0, 2013.

<地磁気観測関係>

1. Tsurutani, B. T., W. D. Gonzalez, G. S. Lakhina, and S. Alex, The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859, *J. Geophys. Res.*, 108, 1268–1275, doi:10.1029/2002JA009504, 2003.
2. Boteler, D. H., Space Weather Effects on Power Systems, in *Space Weather*, ed. P. Song, H. Singer, and G. Siscoe, AGU Geophys. Monogr. Ser., 125, 347–352, AGU, Washington D.C., ISBN 0–87590–984–1, 2001.
3. Pulkkinen, A., 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*, 3, S08C03, doi:10.1029/2004SW000123, 2005.
4. Gaunt, C. T., and G. Coetzee, Transformer failure in regions incorrectly considered to have low GIC-risks, in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, New York, Inst. of Electr. and Electr. Eng., 807–812, 2007.
5. Pulkkinen, A., E. Bernabeu, J. Eichner, C. Beggan, and A. W. P. Thomson, Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios, *Space Weather*, 10, S04003, doi:10.1029/2011SW000750, 2012.

<地質学関係>

1. Kappenman, J. G., Space weather and the vulnerability of electric power grids, in *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*, ed. I. A. Daglis, 257–299, NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, ISBN 1–4020–2747–8, 2004.
2. Viljanen, A., R. Pirjola, E. Pracser, J. Katkalov, and M. Wik, Modelled occurrence in a continent-wide power grid, *J. Space Weather Space Clim.*, 4, A09D01: 10.1051/swsc/2014006, 2014
3. Pulkkinen, A., R. Kataoka, S. Watari, and M. Ichii, Modeling geomagnetically induced currents in Hokkaido, Japan, *Advances in Space Research*, 46, 1087–1093, doi:10.1016/j.asr.2010.05.024, 2010.
4. 原田誠ほか, 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第30号, 45–57, 2009.
5. 小川康夫, MT法による地下構造探査, 地質ニュース, 428号, 48–54, 1990

太陽フレアによる地磁気誘導電流に関する調査検討委員会名簿

(敬称略)

委員長 松村 年郎 名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻 教授

(委員名：五十音順)

委員 荒川 雅昭 東京電力株式会社 系統運用部 系統運用技術グループマネージャー

荒川 嘉孝 一般社団法人 日本電気協会 技術部長

石井 守 独立行政法人 情報通信研究機構 宇宙環境インフォマティクス研究室長

石倉 定幸 日新電機株式会社 電力機器事業本部 受配電機器事業部

宜保 直樹 一般財団法人 電力中央研究所 システム技術研究所 上席研究員

草野 完也 名古屋大学 太陽地球環境研究所 総合解析部門 教授

後藤 忠徳 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授

藤田 茂 気象大学校 教授

源 泰拓 気象庁 地磁気観測所 主任研究官

オブザーバー

望月 武 経済産業省 商務情報政策局
商務流通保安グループ 電力安全課 課長補佐

青木 辰徳 経済産業省 商務情報政策局
商務流通保安グループ 電力安全課 電力技術基準係長

亘 慎一 独立行政法人 情報通信研究機構
宇宙環境インフォマティクス研究室 研究マネージャー

山口 真一 電気事業連合会 工務部 副部長

川崎 拓哉 電気事業連合会 電力技術部 副部長

太陽フレアによる地磁気誘導電流に関する調査検討委員会における検討の経緯

第1回 平成27年2月9日

- 自然災害等対策WG中間報告書（太陽フレア）
- 太陽フレアの観測と地球への影響予測
- 太陽フレアの発生機構と巨大フレアの可能性
- 電力系統への影響（海外文献の紹介）
- ヒアリング案審議

第2回 平成27年2月24日

- 地質面から見た日本における地磁気誘導電流想定 of 現状
- ヒアリング結果報告
- 電気設備の技術基準や保安対策に関する論点について
- ハイドロケベック事故について（海外文献紹介）
- 取りまとめの方向性について

第3回 平成27年3月23日

- 報告書（案）について

