

2-5 宇宙天気予報 ～宇宙天気災害による社会影響の低減を目指して～

2-5 Space Weather Forecast ～For Mitigating the Social Impact of Space Weather Disasters～

久保 勇樹
KUBO Yûki

近年、宇宙天気予報の需要が高まりつつある。宇宙天気予報とは、太陽活動に端を発した地球周辺の宇宙環境の乱れを予測する技術であり、我々の社会インフラへの宇宙環境の乱れによる影響の低減に資するものである。本稿では、災害として認識されるようになった宇宙天気現象による社会インフラへの影響の実例を挙げるとともに、宇宙天気予報の精度向上に向けてNICTで行われている宇宙天気予報の研究開発について簡単に紹介する。

In recent years, needs for space weather forecasting have been rising. Space weather forecasting is a technology that predicts disturbances in the space environment around Earth originated by solar activity, and it is for mitigating the impact of such disturbances on our social infrastructure. In this paper, we present examples of the impact on social infrastructure caused by space weather phenomena, which are now recognized as disasters, and briefly introduce the research and development on space weather forecasting being conducted at NICT to improve the accuracy of these forecasts.

1 はじめに

我々が生活する地球に最も近い恒星である太陽、地上で生活している限り太陽の活動が変化しているということにはほとんど気が付かないが、実は太陽活動は約11年の周期で静穏、活発な状態を繰り返している。代表的な太陽活動としては、太陽フレアと呼ばれる太陽表面での爆発現象が挙げられる。太陽フレアは、ほとんどの場合、太陽黒点が密集した黒点群もしくは活動領域と呼ばれる場所で発生するため、太陽黒点が多い時は太陽活動が活発、少ない時は静穏と考えられ、太陽黒点の数は太陽活動度の指標として良く用いられている。

太陽フレアが発生すると、X線や紫外線、電波等の様々な電磁波や、太陽フレアに伴って非常に高速にまで加速された高エネルギー粒子 (Solar energetic particle : SEP)、太陽フレアに伴って噴出されたプラズマ塊 (Coronal mass ejection : CME) が太陽から飛び出し、地球に到来する。地球は、北がS極、南がN極の棒磁石と考えることができ、地球を取り囲むように磁気圏と呼ばれる磁力線が支配する領域が形成されている。また、地球の超高層大気は太陽紫外線によって電離されており、地表面から約60～1,000 kmの高さ

のところに、電離した大気の層である電離圏が形成されている。これら、磁気圏および電離圏における電磁環境のことを、宇宙環境と呼んでいる。太陽フレアに伴って放出された電磁波やSEP、CMEが地球に到来すると、この宇宙環境が乱されることになる。この太陽から地球までの一連の現象は宇宙天気現象と呼ばれ、これらの宇宙天気現象が我々人類の社会インフラに影響を与える、いわゆる宇宙天気災害を引き起こすことが知られている。

本稿では、過去に起こったいくつかの宇宙天気災害の事例について述べるとともに、その社会インフラへの影響を低減するために行っている宇宙天気予報とその精度向上のための研究開発について簡単に述べる。

2 宇宙天気災害

太陽活動が地球周辺の宇宙環境を乱し、結果として社会インフラに影響を与えるということは前節で簡単に述べた。本節では、その社会インフラへの影響について、過去に実際に起こった事例について述べる。

2.1 無線通信の途絶

地上から発射された短波帯の電波は、電離圏中～上

部(F層と呼ばれる)で反射されることによって、本来直接到達できない場所へも到達することができ、これによって遠方の航空機と地上管制とのやり取りなどが可能となっている。しかし、前節で述べたように、太陽フレアが発生すると電磁波やSEP、CMEなどが地球に到来し、磁気圏や電離圏などの宇宙環境が乱されることで、短波通信障害などが発生することがある。

太陽フレアに伴って放出されたX線や紫外線が地球に到来すると、電離圏における大気電離が進行し、電離圏下部(D層と呼ばれる)の電子密度が増加する。それによって、通常はF層で反射されて遠方まで届くはずの短波帯の電波がD層で吸収されてしまい、遠方との通信ができなくなる(図1)。X線や紫外線などの電磁波は、地球の昼間側にのみ到来するため、X線や紫外線が原因となって起こるD層の異常電離と短波帯の吸収は昼間の地域でのみ発生し、デリンジャー現象と呼ばれている。

2017年9月6日、太陽面西半球の活動領域で大規模な太陽フレアが発生した。この太陽フレアが発生した9月上旬、カリブ海地域ではハリケーンのシーズンであり、複数のハリケーンがカリブ海地域に到来しており、地上の気象に関しても大きな被害が懸念されていた。ちょうどこのようなタイミングで大規模太陽フレアが発生し、デリンジャー現象が起こったことにより、カリブ海地域での防災無線が途絶え、プエルトリコなどの国々で防災活動に影響が出たと報告されている [1]。

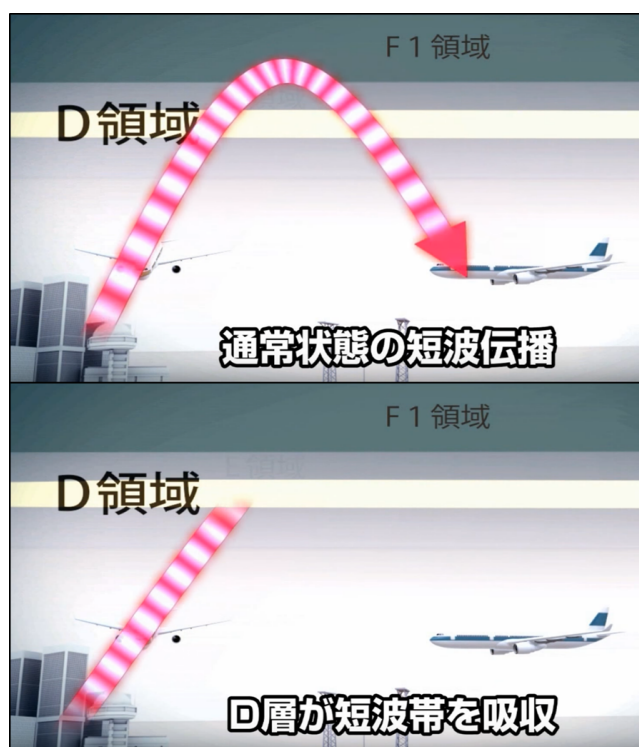


図1 電離圏D層の異常電離による短波通信の途絶©NICT

2.2 衛星測位誤差の増大

太陽フレアに伴って放出されたプラズマ塊であるCMEが地球に到来すると、地球の磁気圏が乱され、時には磁気嵐と呼ばれる現象が発生する。この磁気嵐が発生すると、それに伴いF層の電子密度が増減することがあり、これを電離圏嵐と呼んでいる。

GNSSなどの測位衛星の電波は、電離圏を通過して地上に到達するため、電離圏が乱れることによって、その測位精度に影響が出ることがある。電離圏嵐によってF層の電子密度が増加すると、測位衛星が発する電波が電離圏を通過する際の伝搬遅延が増加し、その結果測位誤差が増大する(図2)。

また、電離圏内に不規則構造が存在すると、測位衛星からの電波が不規則構造内および近傍を伝搬する際にシンチレーションを起こし、地上の受信機が測位衛星の電波を受信することができなくなり、その結果測位ができなくなることがある。局所的に電子密度が減少する泡のような構造をしたプラズマバブルは、赤道域で発生する電離圏内の不規則構造の代表的なものとして知られており、これによっても測位誤差の増大が起こることが知られている。

近年、2024年5月、2025年11月、2026年1月などの大規模太陽フレア発生時には、国内でも国土交通省国土地理院が、太陽フレアに伴う一連の現象が原因でGNSS測位誤差が通常状態よりもかなり大きくなった時間帯があったと発表している [2]。この原因は、太陽フレアに伴って放出されたCMEが地球に到来し、磁気嵐が発生、その後電離圏嵐が発生したことによりF層の電子密度が増加し、GNSS信号の伝搬遅延が増加したことが原因であったと考えられている。

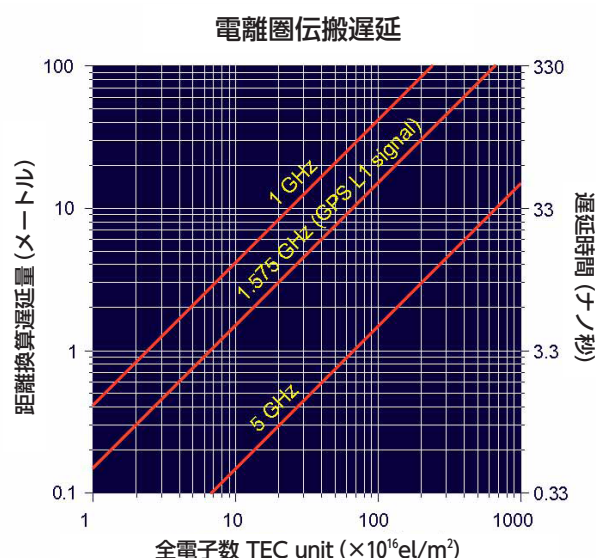


図2 衛星電波が電離圏を通過する際に起こる伝搬遅延時間と距離換算遅延量©NICT

一方で、太陽フレアに伴って発生する電波は、MHz～GHz帯の非常に広帯域の周波数帯で放出される。そのため、測位衛星が受信機から見てちょうど太陽と同じ方向にあるときに太陽フレアが発生すると、測位衛星からの電波と太陽からの電波が干渉してしまい、測位衛星電波の受信エラーが起こり、測位誤差が増大することもある。

2006年12月6日、太陽面東端近くの活動領域で大規模な太陽フレアが発生した。この時、太陽フレアに伴って放射された強い電波（太陽電波バースト）がGPS衛星の電波と干渉し、Carrier-to-Noise ratioが大きく下がったという事象が多数報告されている [3]-[5]。この太陽電波バーストによるCarrier-to-Noise ratioの減少は、L1信号で約17 dB、L2信号で約21 dBであった。この時、米国全土でGPS衛星電波の受信エラーが起こり、受信機が捕捉できる衛星の数が大きく減少し、測位に影響が出ていたことが知られている [3]。太陽電波による衛星測位への影響は、他にも複数の太陽フレア時に発生していたことが報告されている。例えば、前述の2017年9月6日に発生した大規模太陽フレア時には、ヨーロッパではL2信号、L5信号で太陽電波バーストによるCarrier-to-Noise ratioの減少があったが、L1信号には影響は出ていなかったと報告されている [6]。

2.3 人工衛星運用

太陽フレアに伴って放出されたプラズマ塊であるCMEが地球に到来すると、磁気嵐と呼ばれる現象が発生することは前節で述べた。磁気嵐は、CMEの地球磁気圏への衝突による磁気圏の急激な圧縮による地磁気強度の増加が原因となって地球磁気圏内に電流が流れる現象である。電流が流れると熱が発生することから、磁気嵐が発生すると地球の高層大気が加熱され膨張することがある。それにより、通常は大気摩擦が非常に小さい人工衛星が位置している領域の大気密度が増加してしまい、人工衛星にかかる大気抵抗が増加し、人工衛星が姿勢を崩してしまうことがある。

2000年7月に起こった大規模太陽フレアに端を発する一連の現象により、日本のX線天文衛星ASCAが運用停止に追い込まれてしまったという事象があった。これは、磁気嵐に伴う大気膨張・大気摩擦の増加が原因で、衛星の姿勢が崩れてスピン状態に陥り観測不能となり、結果として衛星運用を復旧させることができずに、大気圏に落下してしまったという災害である [7]。

また、2022年2月には、磁気嵐による大気膨張による大気密度の増加が原因で、スターリンク衛星約40機が運用高度まで到達することができずに、大気圏に再突入し消失したという事故も起こっている [8]。

2.4 電力網への影響

磁気嵐発生時には、磁気圏内に急激に流れる電流に誘導され、地上の送電線などに通常では流れない過剰な電流が流れることがある。この誘導電流が変電所などに流れ込んでしまうと、場合によっては変電所のトランスなどを焼失してしまったりすることがあり、結果として送電に影響を及ぼすことがある。

1989年3月に、カナダのトロント州一体で大規模な停電が起こった。この原因は、太陽活動に伴う磁気嵐の発生が原因であることが知られている。この時には、カナダだけでなく、米国の変電所のトランスが焼失したなどの災害が起こっている。この事故は、最も有名な宇宙天気災害の1つであり、この災害による経済損失は莫大なものであったことが知られている。

2.5 航空機運航

太陽フレアに伴って発生する太陽高エネルギー粒子(SEP)は、その主成分は水素の原子核で荷電粒子であるため、地球に到来すると地球の磁力線に沿って地球大気に侵入してくるため、地球の両極域に降り注ぎやすい。そのため、SEPが原因となって発生する電離圏D層の異常電離と短波帯の吸収(2.1参照)は昼夜を問わず両極域で発生し、これを極冠吸収と呼んでいる。

2012年1月23日、太陽面北半球中央付近で大規模な太陽フレアが発生した。これに伴って大量のSEPが放出され地球に到来、地球近傍でSEPフラックスが急激に増加した。この時の粒子フラックスは、SEPが到来していない通常の状態に比べて数千～1万倍以上に達した。この状況を受けて、米国連邦航空局(FAA)は極冠吸収による航空機と地上の管制の無線通信の途絶などを懸念し、両極域上空を飛行する航空機はルートを迂回するようにとの勧告を発している。これを受けて、デルタ航空は、極域上空を通るルートから低緯度側へルート変更を行い、フライト時間が15分程度長くなったことが報告されている。同様にエアカナダは、東京を含むアジア行きの極航路のフライトについて航路変更を行ったことが報告されている。ユナイテッド航空、カンタス航空も同様に航路変更を行っている [9]-[11]。航空機の航路変更の事象は2012年3月にも起こっており、デルタ航空では米国から東京、名古屋を含む東アジア地域へのフライトについてルート変更を実施したと報告している [12]。近年では、当研究室の研究者が、フィンランド航空搭乗中に太陽活動の影響によりルートを変更しフライト時間が伸びたという事象に遭遇している。

航空機の運航では、上記の通信障害以外にも様々な宇宙天気現象による影響が懸念されている。現在の航空機運航は衛星測位情報を利用した運航が主流となっ

ているが、2.2で述べた衛星測位への影響は、この衛星測位の誤差を増大させ、航空機の運航に影響が出ることがある。特に、離発着などを衛星測位情報をもとに自動で行うような場合、衛星測位の誤差増大は、安全な航空機運航を脅かす大きなファクターとなる。

また、航空機が飛行する高度は、定常的に地球に降り注いでいる宇宙放射線による被ばく線量率が地上よりも高いことが知られている。これは宇宙から常に降り注いでいるものであり避けることはできない被ばくであるが、一方で、太陽フレア等に伴って発生する非常にエネルギーの高いSEPは地球の大気中まで到達し、航空機高度での被ばく線量率を一時的に上昇させることがある。この被ばく線量率の増加は、すぐに健康影響が生じるような線量率ではないが、「合理的に達成可能な限り低く」という放射線防護の原則[13]に照らし、極力、SEPによる被ばく線量率の増加を避ける必要があると考えられている。

3 宇宙天気予報の研究開発と業務

2で述べたように、宇宙天気災害は様々な状況で発生しており、近年、宇宙天気予報の必要性・重要性が認識されてきた。このような社会のニーズに応えるべく、NICTでは、宇宙天気予報を業務として行うとともに、その予報精度向上のための研究開発を進めている。NICTの宇宙天気予報研究は以下の4つの柱で構成されている。

1. 現在を見る：宇宙環境観測
2. 未来を予測する：数値シミュレーション
3. 過去を振り返る：大規模データ解析とAI予測
4. 社会に還元する：宇宙天気情報発信

以下では、この4つの柱について簡単に説明する。

3.1 現在を見る：宇宙環境観測

宇宙天気予報を行う上で最も重要かつ不可欠なことは、24時間365日、途切れることなく太陽活動や地球周辺の宇宙環境の状態を監視することであり、NICTでは、日本国内および東南アジア域や南極昭和基地等において、宇宙環境の観測を行っている。例えば、通信障害や衛星測位の誤差増大の原因となる電離圏の状態を、サロベツ、小金井、山川、大宜味の国内4か所で観測し現況把握に努めるとともに、観測の更なる高精度化のための技術開発を行っている。また、SEP発生の早期検出やCMEの地球への到来時刻の推定などのため、山川電波観測施設で太陽電波の観測を行っている(図3)。さらに、太陽と地球の間の重力が釣り合う安定点(第一ラグランジュ点)において太陽風をその場で観測している人工衛星による観測データをリア

ルタイムに24時間365日ダウンリンクするための地上局を、国際協力の下、小金井および鹿島で運用している(図4)。一方で、宇宙天気予報を行うための多くのデータは海外の衛星観測に頼っているのが現状であるが、宇宙天気現象の中には地域性が大きく影響するような現象もあり、そのような現象に関して高精度な情報発信を行うためには、海外の観測ではなく日本近辺の観測データが必要となる。そのため、NICTでは日本上空の静止衛星である気象衛星ひまわりに宇宙環境センサーを搭載し、自ら観測するための装置開発を進めている。



図3 山川電波観測施設に設置されている太陽電波望遠鏡と電離圏観測アンテナ©NICT



図4 鹿島宇宙技術センターにある太陽風監視衛星地上局©NICT

3.2 未来を予測する：数値シミュレーション

3.1で述べた宇宙環境観測は、現況把握に非常に役に立つが、観測だけでは予測はできない。宇宙天気の前測をするためには、地球の天気予報と同じように、観測データをもとにした、数値シミュレーションによる将来予測が必要である。そのため、NICTでは、宇宙天気の前測のための数値シミュレーション技術の研究開発も行っている。例えば、太陽フレアなどに伴って発生したCMEがいつ頃どのように地球に衝突するかを予測する太陽嵐到来予測シミュレーションや、CMEなどの衝突によって地球磁気圏がどのように乱れ磁気嵐を発生させるかなどをリアルタイムに予測するリアルタイム磁気圏シミュレーション、そして磁気嵐や、時には下層大気の変動により電離圏がどのように乱され、結果として社会インフラに影響を与え得るのかをリアルタイムに予測する、大気圏－電離圏結合シミュレーションなどのシミュレーションコードの開発とその運用が行われている。

3.3 過去を振り返る：大規模データ解析とAI予測

宇宙環境の観測は古くから行われていて大量データの宝庫であり、近年急速に発展している機械学習・AI技術と相性が良い。そのため、現在の知見では数値シミュレーションによる予測が困難な現象、例えば太陽フレアの発生などに対して、過去から大量に蓄積されている観測データを利用してAI技術を用いた予測モデルの開発を行っている。また、数値シミュレーションによる予測自体は原理的に可能である現象に対しても、数値シミュレーションでは計算時間がかかりすぎるため実質的にリアルタイム予測ができないものなどについても、AI技術などを用いた予測モデルの開発なども行っている。

3.4 社会に還元する：宇宙天気情報発信

宇宙天気予報の研究開発の4つの柱の最後は、宇宙天気情報の発信である。NICTは、日本で唯一の宇宙天気予報を業務として行っている公的機関であり、その前身である郵政省電波研究所が発足した1950年代初めごろには、短波通信障害を事前に察知して利用者に伝える電波警報業務を行っていた。この業務は、郵政省通信総合研究所に名称変更された1988年、宇宙天気予報業務と名前を変え、2019年12月からは有人による24時間365日体制で宇宙天気業務が行われている。現在は、短波通信障害や衛星測位の誤差増大の原因となり得る太陽活動、地磁気じょう乱、電離圏じょう乱などの情報を始め、人工衛星障害の原因となり得る放射線帯電子や、宇宙飛行士や航空機乗務員の宇宙放射線被ばくの原因となり得る太陽高エネルギー粒子など、

様々な情報を発信している。一例をあげると、決められた基準を超える宇宙天気現象が発生した際に、即座に自動的に配信されるイベント通報サービスや、NICTの研究者および予報担当者の判断により決定し配信される宇宙天気情報レポート等がある。また、より利用者にわかりやすい情報発信を目指して、宇宙天気予報を利用している事業者等との議論を通して、社会インフラへの影響度を考慮した警報基準を策定し、その基準に基づいた警報発信を行う宇宙天気警報サービス (Space weather Alert For social Impacts and Risks: SAFIR) を2025年6月に開始した。

さらに、本節で述べてきた宇宙天気予報の研究開発の成果として、ユーザに使いやすい情報発信を目指した様々なツールを開発し、ウェブサイトなどで公開している。例えば、短波通信を行う際に、電離圏の状態に応じてどの周波数の電波が電離圏反射によってどこまで伝わるのかをシミュレーションするツール (HF-START) や、太陽高エネルギー粒子による航空機高度での被ばく線量率の増加をリアルタイムに発信するツール (WASAVIES：図5)、人工衛星の帯電状況を数値シミュレーションによってリアルタイムに発信するツール (SECURES)、そしてオーロラの発生予測ツール (オーロラアラート) などを公開している。

航空業界では宇宙天気情報の実運用が進んでおり、民間航空機の運航にすでに利用されている。国際連合の専門機関である国際民間航空機関 (ICAO) では、民間航空機の運航に際して、航空機と地上管制との短波通信障害や衛星通信障害の回避のため、電子航法に関連した航空機位置の測定誤差の増大防止のため、航空機乗務員の宇宙放射線被ばくの低減のための3つの観点で宇宙天気情報の重要性が認識されている。宇宙天気情報を発信するICAO宇宙天気センターには、2018年1～3月に国際連合の専門機関である世界気象機関によって行われた査察を経て、米国 (SWPC)、欧州連合 (PECASUS)、日豪仏加連合 (ACFJ)、中国ロシア連

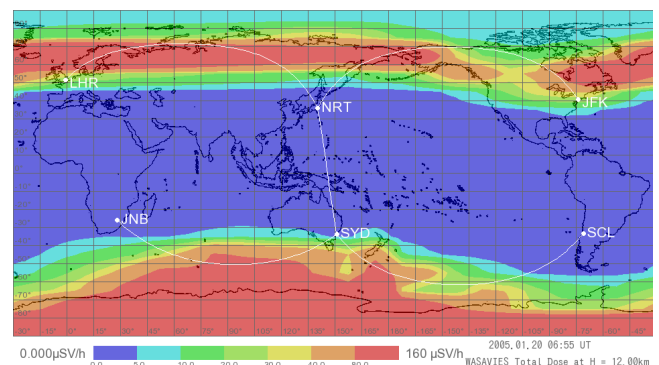


図5 WASAVIESにより推定された太陽放射線被ばく線量率分布の一例
©NICT

合(CRC)の4つの組織がICAOグローバル宇宙天気センターとして、南アフリカがICAOリージョナル宇宙天気センターとして指名されている。NICTはACFJの一員としてICAOグローバル宇宙天気センターの一翼を担っており、2019年11月7日に、ICAO宇宙天気業務を開始し、航空関係各機関への情報発信を行っている。



久保 勇樹 (くぼ ゆうき)

電磁波研究所
電磁波先進・基盤研究センター
宇宙環境研究室
副室長
博士(学術)
宇宙天気予報、予報評価法、太陽宇宙線
【受賞歴】

2022 第67回前島密賞
2019 日本原子力学会関東・甲越支部賞

4 終わりに

2021年10月に国連防災機関によって発表されたハザードリストにおいて、宇宙天気に関わる4つの現象(電波障害、太陽嵐、磁気嵐、電離圏嵐)が地球外ハザード分類の1つとして位置づけられた。これは、国連が公式に宇宙天気現象を災害として認めたということを示す。これにより、宇宙天気は自然災害として対応すべきものの1つになった。NICTの宇宙天気予報は、これからますます重要度を増していくと思われる。宇宙天気予報の精度向上と利用しやすい情報発信は今後更なる進化を遂げていく必要がある。自然現象を予測する技術という点では宇宙天気予報に比べて先行している気象予報を見習いつつ、宇宙天気独自の予報技術の発展を今後も続けていくことが重要であると考えている。

【参考文献】

- 1 Rodmon, R. J. et al., "September 2017's Geoeffective Space Weather and Impacts to Caribbean Radio Communications During Hurricane Response", Space Weather, vol.16, pp.1990-2001, 2018.
<https://doi.org/10.1029/2018SW001897>
- 2 国土交通省国土地理院, <https://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/eiseisokuchi41013.html>
- 3 Cerruti, P. A. et al., "Effect of intense December 2006 solar radio bursts on GPS receivers", Space Weather, vol.6, S10D07, 2008.
- 4 Carrano, C. S. et al., "Impacts of the December 2006 solar radio bursts on the performance of GPS", Radio Sci., 44, RS0A25, 2009.
- 5 Kintner Jr., P. M. et al., "Global Positioning System and solar radio burst forensics", Radio Sci., 44, RS0A08, 2009.
- 6 Sato, H. et al., "Solar Radio Burst Events on 6 September 2017 and Its Impact on GNSS Signal Frequencies", Space Weather, vol.17, pp.816-826, 2019.
- 7 JAXA, <https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/asca.html>
- 8 SpaceX, <https://www.spacex.com/updates>
- 9 <https://www.bloomberg.com/news/articles/2012-01-24/delta-reroutes-some-flights-on-solar-flare>
- 10 <https://nationalpost.com/news/canada/air-canada-flights-rerouted-as-a-precaution-after-massive-solar-storm>
- 11 <https://www.reuters.com/article/us-delta-diverts-polar-flights-due-to-solar-storm-idUSTRE80N28I20120124>
- 12 <https://www.foxnews.com/science/sunstorm-watch-planes-rerouted-as-massive-solar-storm-brushes-by-earth>
- 13 ICRP Publication42