



NICTにおける電磁波技術研究の最新トピックス(その2)

国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 研究所長

たいら かずまさ
平 和昌



(前号からつづく)

6. 宇宙天気 —太陽活動の影響から社会を守る—

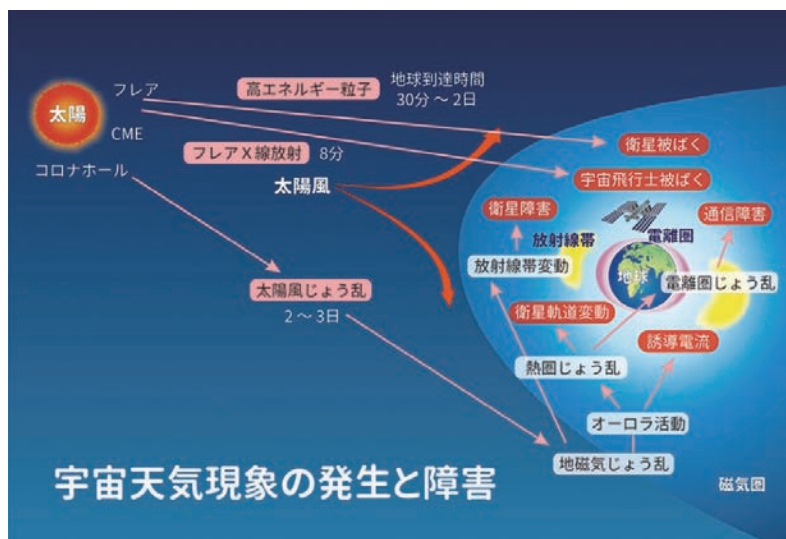
6.1 太陽活動が社会生活に及ぼす影響

衛星通信が一般的に使われる以前の国際通信には、もっぱら短波帯（3-30MHz）による通信が用いられていた。短波通信では、地上のアンテナから送信された電波が、上空の約60-800kmに存在する電離圏と地表との間で反射を繰り返して伝搬し、大陸間の通信を可能とする。しかし、電離圏の状態は時々刻々変化するとともに、季節による変化や数年にわたる変化も加わることから、電離圏の現状や通信相手の位置に応じて使用する周波数を選択する必要があった。国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）では、その前身の組織を含め、1930年代には電離圏の研究を開始し、戦後は本格的に国内多地点で電離圏の観測を行うことにより、予報・警報の発令も含めた「電波の伝わり方」に関する業務を、現在まで継続的に実施している。

電離圏の状態が変化するそもそもの要因は、太陽の活動にある。太陽は自然界に存在する核融合炉であり、その表面では「太陽フレア」と呼ばれる爆発的な現象が起きている。太陽フレアの発生により、非常に高いエネルギーを帯びた粒子（主に陽子）やX線が放出され、高エネルギー粒子はおおよそ

30分から2日、X線は約8分で地球に到達する。また、太陽フレアは同時に「コロナガス」と呼ばれる高温で帯電したガス（プラズマ）を発生させる。太陽は常に高温のプラズマを四方八方に放出しており、これを「太陽風」と呼ぶが、コロナガスは太陽風の密度や温度、速度が大きいものを言う。このコロナガスは「コロナホール」と呼ばれる太陽表面からも発生している。これらが地球方向に噴出された場合、2-3日で地球に到達する。一方、地球にはこれらに対して2つのバリアが存在する。大気と磁場である。大気はX線の通過を妨げ、その結果として大気がイオン化され、電離圏が形成される。地球の持つ磁場は太陽風を跳ね除け、地球内に侵入させない機能を果たす。ところが、太陽フレアの規模が大きかったり、地球に到達した太陽風の持つ磁場の向きによっては上述のバリアも有効に働かず、地球に様々な影響を及ぼす。このように、太陽活動を源とした我々の生活に影響を与える諸現象を「宇宙天気」という。

宇宙天気現象とその発生により生じる障害について図8にまとめる。様々な障害のうち、もっとも生活を脅かすものは、電力網の障害により生じる大規模な停電である。これは、太陽風の擾乱により電離圏に生じた大規模な環電流が地上の送電線上に大きな電流を誘導し、その結果、発電所・変電所の設備にダメージを与えたことが原因で発生する。過去に



■図8. 宇宙天気現象とその発生により生じる障害



は、1989年3月にカナダで約9時間の停電が生じて約600万人が影響を受けたり、2003年10月には南アフリカ共和国の電力網でトランスが焼損する被害が起きている。さらに生活を脅かす障害として、GPSや準天頂衛星を代表とする衛星測位システムにおける測位誤差の増大が挙げられる。太陽風の擾乱により電離圏に生じた大規模な環電流が電離圏の構造を乱していくことにより、電離圏の電子密度が大きく変化する。その結果、測位衛星からの電波が電離圏を通過する際に生じる遅延量も大きく変化して、測位誤差が増大する。現代では、カーナビの利用や航空機や船舶の運用など、社会活動における衛星測位の利用は不可欠であり、宇宙天気の影響が極めて大きいことが分かる。

これら宇宙天気現象が引き金となる障害の深刻さに鑑みて、各国では対応策を打ち出している。米国では、宇宙天気を地震や津波と同様の国家危機と位置付けて対策の検討を始め、2015年には国家戦略とアクションプランを作成した。2016年10月には、宇宙天気現象による被害を最小化することを政府が支援するという大統領令にオバマ大統領が署名している。また、英国や韓国でも同様な政府文書が発表された。国際機関においても宇宙天気関連の活動が始まっている。国連の専門機関であるICAO（国際民間航空機関）では、宇宙天気情報を民間航空機運用へ導入することを検討している。これは、極端な宇宙天気現象によって、航空機と地上及び衛星との通信の途絶、衛星測位における誤差の増大、乗務員の被曝量の増加という3つの影響が大きくなることへの懸念からである。現在、宇宙天気情報を収集し提供する「宇宙天気センター」の選定に向けてWMO（国際気象機構）とも連携した活動が続いている。また、国連の宇宙

空間平和利用委員会（COPUOS）においても、2018年に開催される記念会合「UNISPACE+50」において「宇宙天気サービスのための国際枠組み」が議題として掲げられている。一方、我が国では未だ宇宙天気現象への理解が進んでいないのが現状である。

6.2 宇宙天気予報

時々刻々と変化する宇宙天気の現状を把握するとともに、今後起こるであろう宇宙天気現象を予測して発せられる情報は「宇宙天気予報」と呼ばれている。太陽・地球系空間で起きている現状を1秒でも早く把握し、その対策におけるリードタイムの確保につなげるのが予報を発令する目的である。1988年、NICTの前身である郵政省電波研究所は、それまで行ってきた電波の電離圏伝搬の予報・警報の送信に加え、太陽活動等の情報の通報も行う宇宙天気予報を開始し、同年、この用語を商標登録した。以降、30年間にわたって1日も欠かさず宇宙天気予報を発信しており、我が国唯一の宇宙天気情報の発信機関である。情報を掲載するWebサイト（図9）^[4]にはひと月に約16万のアクセスがあり、毎日送信している宇宙天気情報電子メールサービスへの登録数は1万を超えている。その情報は、衛星運用機関、航空関係機関、電力事業者、通信事業者などが活用している。

NICTが発出する宇宙天気予報では、予報を①太陽領域、②磁気圏領域、③電離圏領域に分類している。「太陽領域」では、NASA（アメリカ航空宇宙局）が打ち上げた太陽観測衛星SDO（Solar Dynamics Observatory）から送られてくる様々な波長で観測した太陽面の画像や、NASAの太陽観測衛星STEREO（Solar Terrestrial Relations Observatory）



■図9. NICT宇宙天気予報センターのWebサイト



から送られてくる太陽面360度観測画像などを用いて、太陽面における活動領域（黒点領域やコロナホールなど）を把握する。また、NOAA（アメリカ海洋大気庁）が運用する気象衛星GOES（Geostationary Operational Environmental Satellite）から送られてくる太陽からのX線の線量のデータや高エネルギープロトン粒子数を把握する。これらの情報を基に、今後どの程度の規模の太陽フレアが発生するかを予報している。太陽フレアが発生予測においては、機械学習を用いた手法^[5]の導入を進めている。NICTが蓄積している太陽面画像における黒点領域の画像から、約60種類の特徴量（面積、明るさ、磁力線の数など）を抽出し、その時に発生した太陽フレアの規模の過去情報を基に、現時点の各黒点領域が引き起こすであろう太陽フレアの規模を機械学習により導出するものである。構築したシステムは世界トップクラスの成績を達成し、人間が判断した結果と比較しても大幅な成績向上を得ている。

「磁気圏領域」では、気象庁地磁気観測所で観測された地磁気データから地磁気変動（地磁気嵐）の現状を把握するとともに、NOAAが運用する太陽観測衛星DSCOVR（Deep Space Climate Observatory）から送られてくる太陽風の速度や密度、磁場の向きなどの情報や、上述の太陽面画像におけるコロナホールの状況を基に、今後地球に到来する太陽風が地球に及ぼす影響を予報している。DSCOVRは地球から150万km離れた地点で観測しており、その観測結果は太陽風が地球に到達するわずか約1時間前の状況でしかない。そのため、太陽風のシミュレーションの実施が欠かせない。NICTでは、独自に開発した太陽風シミュレータによる解析結果を予報に活用している。

「電離圏領域」では、NICTが国内4か所（北海道稚内、東京都国分寺、鹿児島県山川、沖縄県大宜味）で運用している電離圏観測の結果や、国土交通省国土地理院が運用するGEONET（GNSS連続観測システム）からのデータを利用して、電離圏により反射が可能な最大周波数や電離圏の全電子数を導出する。また、局所的・突発的に発生する「スボラディックE層」の発生を国内4か所の電離圏観測の結果から把握する。スボラディックE層の発生は、普段は伝搬しない地点にVHF帯の電波を伝搬させ、VHF帯を利用する業務に混信障害を引き起こす。これらの情報及び地磁気変動の情報などを総合し、今後の電離圏の変動（電離圏嵐）を予報している。また、太陽フレアの予報結果にしたがい、短波帯の電波が吸収されて数時間の通信途絶を引き起こす「デリンジャー現象」の発生を予報している。

前節で述べたように、他国では我が国以上に宇宙天気に関心が高く、NICTと同様に予報を発信している国（組織）がいくつも存在する。中でも米国NOAA、英国気象庁、オーストラリア気象庁は、24時間365日体制で予報を発出している。宇宙天気の影響は世界規模であり、国際的な情報共有が不可欠あり、NICTも参画するISES（International Space Environment Service）には世界18機関が加盟して活動している。

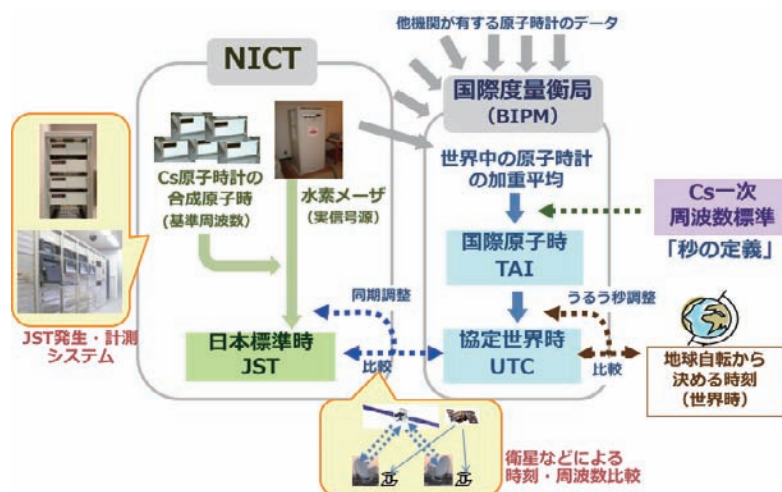
現在の太陽は約11年の活動周期の衰退期を迎えつつあるが、昨年（2017年）9月には11年ぶりの大規模な太陽フレアが2回発生^[6]し、衛星測位や短波通信に影響を及ぼした。我々は、常に大規模な太陽フレアの発生に直面している。そのため、宇宙天気情報は現在の我々の生活を守るために重要な情報であることはもちろん、今後の宇宙利用が活発化する上で不可欠な情報である。NICTは、AIをはじめとする新たなアプローチと、長年の運用により実績を誇る観測技術・観測データを基に、他国を先導する活動を展開していきたい。

7. 日本標準時 —あらゆる社会活動の基準—

7.1 日本標準時の生成と配信

1967年、1秒の定義が変更され、地球の回転に基づいて決められていた時系（天文時）が、原子の出す規則正しい電磁波を用いた時系（原子時）に変更された。今からほんの50年前のことである。原子時計が発明され、原子時計を使って地球の自転を観測するとミリ秒レベルで変動していることが判明したため、秒の定義を原子の遷移周波数を使うことに変更された。現在の秒は、「セシウム133原子の基底状態の2つの超微細構造準位の間の遷移に対応する放射の周期の9,192,631,770倍の継続時間」と定義されている。すなわち、セシウム（Cs）原子が発する約9.2GHzのマイクロ波を使って秒を定義している。Cs一次周波数標準機は 10^{-14} から 10^{-15} の周波数精度をもち、理論的には300万年から3000万年に1秒しかずれない。

日本標準時（JST）はNICTが決定し、日本全国に供給している^[7]。図10に日本標準時及び協定世界時の決定方法を示す。NICTにある18台のCs原子時計が出す周波数を加重平均して合成原子時を作り、それを基準としてリアルタイムなJSTを生成している。一方、国際度量衡局（BIPM）では、国際的な標準時である「協定世界時（UTC）」を定めている。BIPMでは、NICTのような原子時計を運用する世界中の機関から400台を超える原子時計のデータを集め、その周波数を加重平均して国際原子時（TAI）を作っている。これに、



■図10. 日本標準時及び協定世界時の決定のしくみ

後述する「うるう秒」の調整を施したものがUTCである。世界中から原子時計のデータを集めて計算するには一定の時間を要するため、現時点のUTCがBIPMから発表されるのは1か月後であり、5日おきの値しか示されない。そのため、途切れることなくリアルタイムに正確な時刻を供給する仕組みが各国において必要であり、我が国ではNICTがその任務を担っている。

上述のように、現代の時間は極めて正確に時を刻む「原子時」で動いている。一方で、我々は「太陽が昇っては沈む」という、地球の自転を基準として生活している。これまでの観測により、地球の自転は年々遅くなっていることが分かっており、その結果、日を追うごとに時計が表示する時刻が我々の生活とかけ離れていってしまうことになる。この事態を回避するために、TAIとUTCの差が0.9秒以上にならないように加える1秒（地球の自転の方が速ければ減じる1秒）のことを「うるう秒」という。うるう秒の実施は国際地球回転・基準系事業（IERS）が決定し、各国へ通知する。通常、1月1日または7月1日のUTCの0時直前の1秒に対して調整を実施する。TAIとUTCは1958年1月1日に同じ値でスタートし、2018年10月現在で37秒の差が生じている。その間、1972年1月1日に特別調整として10秒の差となる調整を行い、その後、27回のうるう秒調整を実施してきた。うるう秒調整は定期的なイベントではなく地球の自転速度に依存していることから、次回いつ実施されるかは明示できない。

JSTは様々な方法で社会へ供給されている。最も馴染みの深い手段はNICTが運用する「標準電波」を用いる方法、すなわち「電波時計」への時刻配信である。この標準電波は、福島県の「おおかたどや山」から40kHzで、福岡県と

佐賀県の県境にある「はがね山」から60kHzで、それぞれ50kWの出力で送信されており、時刻情報を乗せている。国内における電波時計の出荷台数は1億台を超える（推計値）と言われており、多くの人々に正確な時刻を通知することに貢献している。次に馴染みの深い手段は「NTP（Network Time Protocol）」によるインターネットを通じた時刻配信である。NTPは、ネットワークにつながったパソコンやサーバ等において正確な時刻を得る方法として広く用いられており、NICTが運用するNTPサーバには1日あたり約20億の同期アクセスがある。より正確に時刻を管理する目的で利用されているのが「テレホンJJY」である。電話回線を利用し、NICT側のサーバとユーザ側のクライアントが時刻情報を伝え合い、回線の遅延時間を差し引いて時刻を極めて正確に同期する仕組みである。放送事業者や鉄道事業者、金融機関などが利用しており、月に約14万の同期アクセスがある。

社会の公正を維持し、生活を豊かにするために、極めて正確な時刻が多くの分野で利用されている。NICTは、我が国の時刻を生成・維持して配信する重要な責務を負っている。

7.2 「秒」の再定義に向けて

国際単位系には「基本単位」と呼ばれるものが7つあるが、このうち「質量」、「電流」、「温度」、「物質質量」の4つの基本単位の定義が2019年の国際度量衡総会にて変更されることになっている。これは科学の歴史的な観点からも大きなイベントである。残る3つの基本単位は「長さ」、「光の量」、「時間」であるが、現時点において「秒」は2025年から2026年を目処に定義の変更が検討されている。現在の定義であるマイクロ波の周波数ではなく、光の周波数で定義されることと



っており、ここでも原子の遷移を使う。現在、その原子としてストロンチウム (Sr)、イッテルビウム (Yb)、インジウムイオン (In^+)、カルシウムイオン (Ca^+) などが候補となっており、中でもSrは有力な候補である。Srの遷移周波数は、約429THzである。Sr原子時計は、NICTを含む諸外国の先進的な研究所が開発中であり、正確な遷移周波数値の獲得や精度の向上にしのぎを削っている。NICTにおいて開発されたSr光格子時計 (図11) は 5×10^{-17} の周波数確度を有しており、Cs原子時計の精度をはるかに上回る。しかしながら、光時計は装置が極めて複雑であり、長期にわたり連続して動作させることは容易でないため、光時計に基づいた実際の時刻信号の生成は実現できていなかった。

NICTは、Sr光格子時計と水素メーザ原子時計を組み合わせて、光格子時計に基づく高精度な時刻信号を世界で初めて半年間連続で試験的に生成することに成功した^[8]。時刻信号生成の信号源となる水素メーザの周波数は、短期的には安定であるが長期的には変動しやすい。一方、Sr光原子時計は短時間で高精度に周波数が確定できることから、この利点に着目し、週に1度3時間程度という間欠的な運用でも水素メーザの周波数変動を予測できる手法を開発することで、光格子時計を基準とした極めて安定な時刻信号を生成することができた。その結果、生成された時系は、現在のCs原子時計を基準として生成しているJSTよりも1桁改善した精度であるとともに、BIPMが実験用に公表している最高精度の仮想時刻と比べても非常に良い一致を示した。この方法を用いることにより、光格子時計を連続運転させなくても、これまでより精度の高いJSTの生成が可能となるであろう。

「秒」の精度をあげていくことは、これまで不可能であった計測を可能に変えていくことであり、科学の新たな価値を創造することはもちろんのこと、空間の位置情報の精度向上に

代表されるように、社会における新たな価値も作り出すことができる。NICTは、標準時の運用と研究開発を同じ組織で実施する世界でも珍しい貴重な機関であり、長年にわたる標準時の運用で培った技術や経験を今後の光時計の安定運用などに活かし、世界トップレベルの時刻精度にチャレンジしていく。

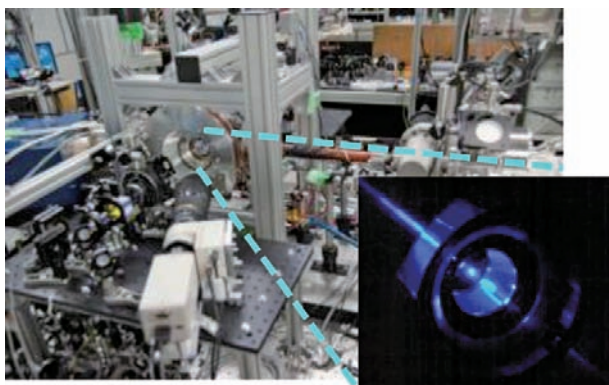
8. おわりに

NICT電磁波研究所では、「電磁波の特性を活かした、より正確な計測を実現することにより、社会を守り生活を守るとともに、これまで見えなかったことを見ることにより、科学の新たな価値の創造を導く」ことを大目標に掲げて基盤的な研究開発を推進している^[9]。ICTを利活用して人類の新たな価値を創造するためには、我々を取り巻く環境における様々な現象や状況を、いかに適切な形でデータ化してサイバー空間上の情報に置き換えられるかが鍵となる。そのためには、計測の基準を構築し、精度の高い計測を可能とするセンサを開発する必要がある。また、社会で活用しやすい形に測定データを料理して公開することも重要である。それらのデータを使った新たな応用分野の開拓には、産業界やアカデミアと連携したオープンイノベーションによる実行が不可欠である。我々は今後も研究開発に一層の努力を続けるとともに、多くの組織や他の分野と連携できる機会が得られることを期待する。

(2018年2月15日 ITU-R研究会より)

参考文献

- [4] 情報通信研究機構宇宙天気予報センターウェブサイト、<http://swc.nict.go.jp/>
- [5] N. Nishizuka et al., "Solar Flare Prediction Model with Three Machine-Learning Algorithms using Ultraviolet Brightening and Vector Magnetograms," The Astrophysical Journal, Vol. 835, Issue 2, 156 (10pp), 2017.
- [6] 情報通信研究機構報道発表、"通常の1000倍の大型太陽フレアを観測"、<http://www.nict.go.jp/press/2017/09/07-1.html>
- [7] 情報通信研究機構日本標準時ウェブサイト、<http://www.nict.go.jp/JST/JST5.html>
- [8] H. Hachisu et al., "Months-long real-time generation of a time scale based on an optical clock," Scientific Reports, Vol. 8, 4243, 2018.
- [9] 情報通信研究機構資料、"電磁波研究所 ビジョンとミッション〜第4期中長期計画から未来へ〜"、<http://aer.nict.go.jp/institute/missionplan.html>



■ 図11. NICTで開発中のストロンチウム光格子時計
右下の拡大写真は、真空装置内で捕獲された冷却ストロンチウム原子集団。