

情報通信の
未来をつくる
研究者たち

第IV章

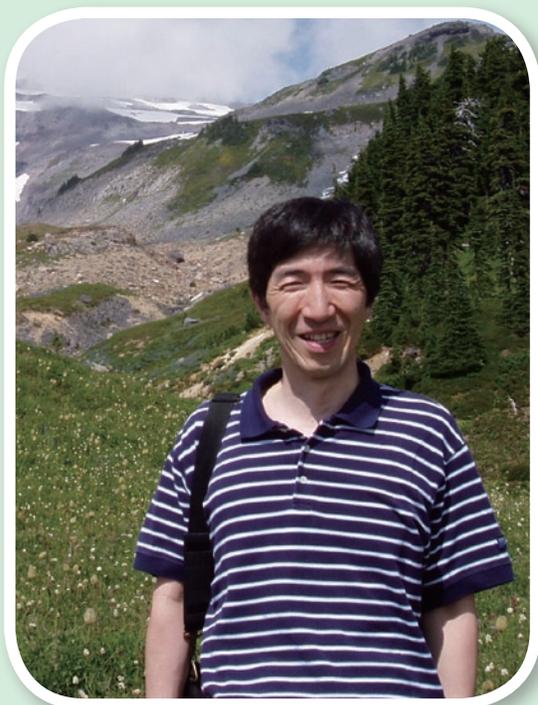
電磁波センシング 基盤技術

井口俊夫
川村誠治
浦塚清峰
笠井康子
高橋暢宏
津川卓也
亘 慎一
井戸哲也
花土ゆう子・今村國康
岩間 司
和氣加奈子
福永 香・藤井勝巳・
水野麻弥・登坂俊英



社会を支える電磁波計測技術

—原子・分子から宇宙空間スケールまでの課題解決に—



井口 俊夫 (いぐち としお)

電磁波計測研究所
研究所長

大学院修了後、研究員を経て、1985年郵政省電波研究所（現 NICT）に入所。海洋レーダの開発、熱帯降雨観測衛星のデータ処理アルゴリズム開発など、リモートセンシングの研究に従事。Ph.D. 趣味としては、最近はおつばら囲碁鑑賞と散歩をするぐらい。たまに、テニスを計画するも、その多くは雨のために流されるという雨男。

「電磁波計測研究所の研究対象は、時刻の生成、電磁波計測技術、リモートセンシング、宇宙環境計測など多岐にわたっています。ここでは、その研究内容を概観します。」

電磁波計測研究所には、センシング基盤研究室、センシングシステム研究室、宇宙環境インフォマティクス研究室、時空標準研究室および電磁環境研究室の5つの研究室があります。これら5つの研究室の研究対象は、原子・分子の大きさから宇宙空間までの幅広い空間スケールにわたっています。

飛び交う電波の計測

研究所名である電磁波計測には、電磁波を計測するという意味と電磁波を使って計測するという2つの意味があります。電磁波そのものの計測に関する研究をしているのが、電磁環境研究

室です。この研究室では、私たちが用いる電気器具からどのような電波がどれほど出ているかを正確に評価する技術の研究をしています。たとえば、電子レンジやLED電球といった身近な器具から、ほかの通信システムに害を与えるような電波が出ていないかといった研究や、携帯電話などから発せられる電波がどのくらい体に吸収されるかという研究をしています。

正確な時間の作成

他の4つの研究室では、電磁波を使っていろいろなものを測る研究をしています。時空標準研究

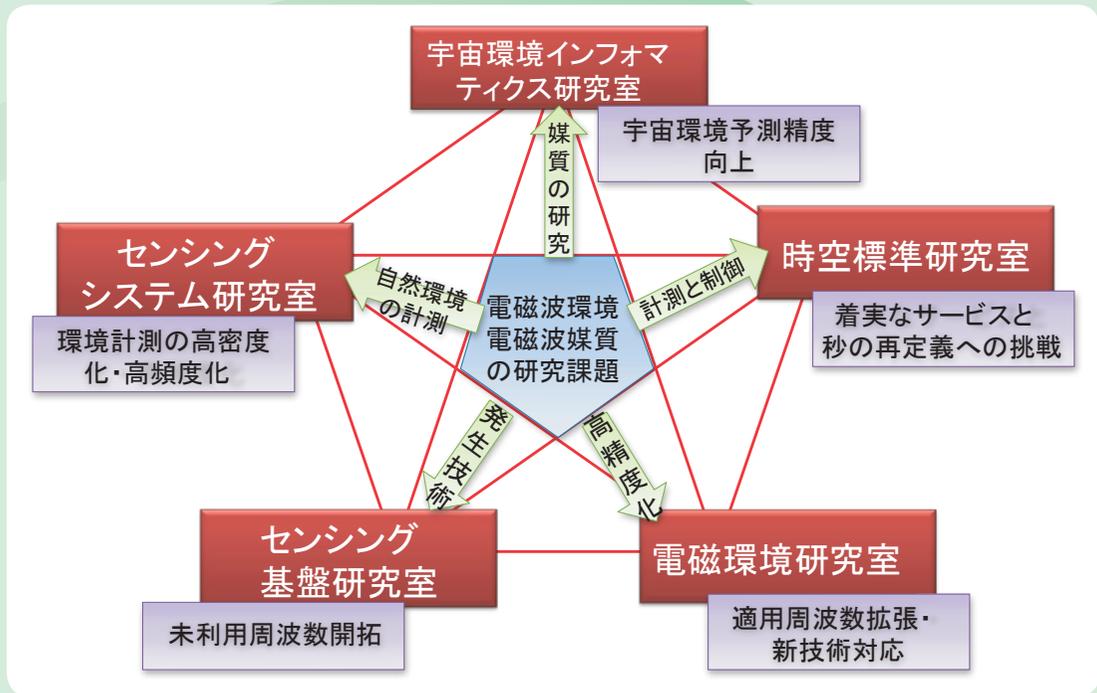


図 電磁波計測研究所の研究配置図

室では、電磁波を使って原子の遷移状態のエネルギー間隔を正確に測る技術を磨いています。電場や磁場あるいは光(電磁波)を使って原子やイオンをできる限り動かないようにし、そこに電磁波を当て、吸収される電磁波の周波数を精密に測ることにより、極めて正確な時間の基準をつくっています。この時間の基準から日本そして世界の時刻がつくられているのです。

● 電磁波による環境計測

センシング基盤研究室では、ミリ波(波長1～10mm、周波数30～300GHzの電波)以上の高い周波数の電磁波を使って、大気中の微量成分を測定したり、風を広範囲にかつ短時間で計測するリモートセンシングの技術の研究をしています。このような研究は、地球環境の状態を正確に把握するために重要な研究です。

センシングシステム研究室では、レーダ技術を用いたリモートセンシングの研究をしています。短時間に降雨の3次元分布がわかる次世

代ドップラレーダや衛星搭載レーダ等の先端のレーダシステム構築技術を確認するとともに、航空機搭載の合成開口レーダ(SAR)による移動体の速度計測技術等を含め、高性能かつ高機能なデータ取得・処理基盤技術を研究開発しています。

宇宙環境インフォマティクス研究室では、短波通信や放送、測位、また人工衛星の利用に悪影響を及ぼす宇宙の乱れを、観測とシミュレーションを用いて診断・分析し、より正確な宇宙環境情報を提供するための研究を行っています。

また当研究所では、無線機器の型式検定と較正、日本標準時の生成、供給と周波数校正、宇宙天気予報などを業務として行っています。このような幅広い分野の研究や業務に対し、色々な専門分野の研究者が協力し合って取り組んでいます。

気象レーダで風を見る

一雨域内の風をモニタする改良型バイスタティック観測システムー

「汎用性が高く安価なソフトウェア無線とデジタルビームフォーミングの技術で、従来の課題を克服する新しい観測手法を開発に挑戦しています。」

川村 誠治 (かわむら せいじ)

電磁波計測研究所
センシングシステム研究室 主任研究員

大学院博士課程修了後、日本学術振興会特別研究員を経て 2006 年に NICT へ入所。大気物理、レーダシステムなどに関する研究に従事しています。趣味は物作り。木工が大好きで電動工具を使って家具なども作りますが、子どもができてからはミシンで子ども服を作ったことも。博士(情報学)。

風観測の現状

近年、突風や局地的大雨(通称ゲリラ豪雨)などの気象災害が大きな社会問題の 1 つとなっています。時間・空間スケールの小さなこれらの災害の予測は、昨今、技術向上がめざましい気象予報モデル(数値モデル)でも未だ困難です。その原因の 1 つは、観測データの不足です。数値モデルの分解能がいくら向上しても、計算の初期値となる現在の状態(観測データ)が分からなければ正確な未来は予測できないのです。

風はこのような気象災害における重要な情報の 1 つです。現時点で日本全土をカバーする風観測としては、気象庁によるアメダス(地上風観測：全国約 850 地点、約 21km 間隔)やウィンダス(風の高度分布観測：全国 31 地点)があります



が、これだけでは空間スケールが数百 m から数 km といわれる局地的災害に対応することは困難です。風を時間・空間的により細かく観測できれば、そのデータは気象予報モデルの入力値としてだけでなく、直接的に局地的災害に対する非常に有効な防災・減災情報となります。今、このような高い時間・空間分解能で、広いエリアをカバーする観測が望まれています。

● 気象レーダによる風観測

このような要請に応え得る有望な観測手段の 1 つに、気象レーダがあります。気象レーダは空間分解能数百 m で雨を測る装置で、すでに気象庁・国土交通省によって日本全土をカバーする観測網が展開・運用されています。雨の強度分布を測る装置ですが、雨で反射されて返ってくる電波のドップラーシフトを測ることで、レーダビーム方向の風速も測ることができます。近年気象庁現業レーダでもこのドップラーシフトによる風観測が可能になってきました。ただし、こうして得られる風速は真の風速ではなく、あくまでも風速のレーダビーム方向成分です。

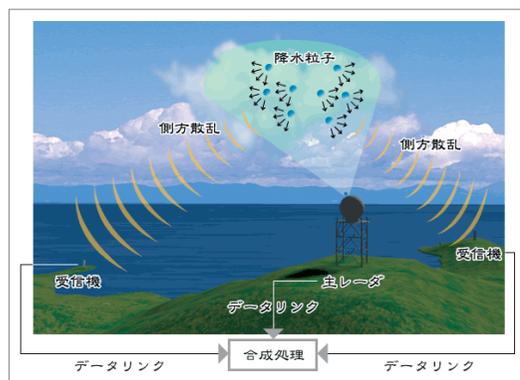


図1 バイスタティック計測のイメージ
通常のレーダでは、自分で送信した電波の後方への反射波(後方散乱)を自分自身で受信する(モノスタティック観測)。一方、電波は後方だけでなく様々な方向に反射される(散乱)。バイスタティック観測では横方向への散乱(側方散乱)を別の受信機で受けることで、モノスタティック観測によるビーム方向の風速成分に加えてもう1つ別の風速成分を得ることができ、真の風速分布が分かる。

気象レーダで真の風速を観測する有効な方法の1つにバイスタティック観測があります。図1はバイスタティック観測のイメージ図です。バイスタティック観測では、既存の送信局の周辺に安価な受信専用局を付加するだけで真の風速を求めることができます。

● バイスタティック観測の課題

バイスタティック観測には、実用化へ向けていくつかの課題がありました。その中でも特に深刻だったのが疑似エコー問題です。

図2は疑似エコー問題の模式図を示しています。バイスタティック観測では、送信局は非常に細いビームを送信し、受信局では幅の広いビームで横方向に散乱した電波(側方散乱)を受信します。この図では送信ビーム(メインローブ)は地点Aを向いているので、観測されるべきは地点Aの雨です。

地点Bは送信局と受信局を焦点とする同一楕円上にある任意の点です。ほとんどの電波は送信局⇒地点A⇒受信局と伝搬して受信されますが、目的と異なる方向に漏れ出す電波(サイドローブ)が存在するため、一部の電波は送信局⇒地点B⇒受信局と伝搬します。この時2つの経路長は全く同じなので、同一時刻に発射された電波は同一時刻に受信されることとなり、地点Aと地点Bの情報を区別することはできません。

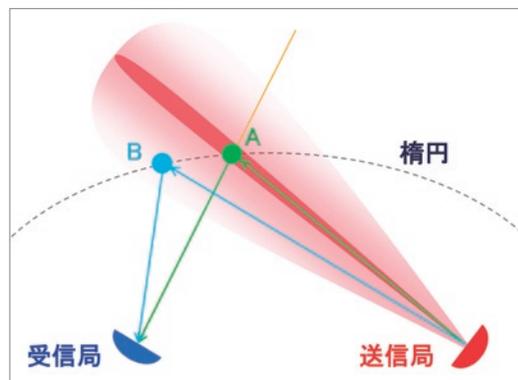


図2 バイスタティック観測・疑似エコー問題の模式図

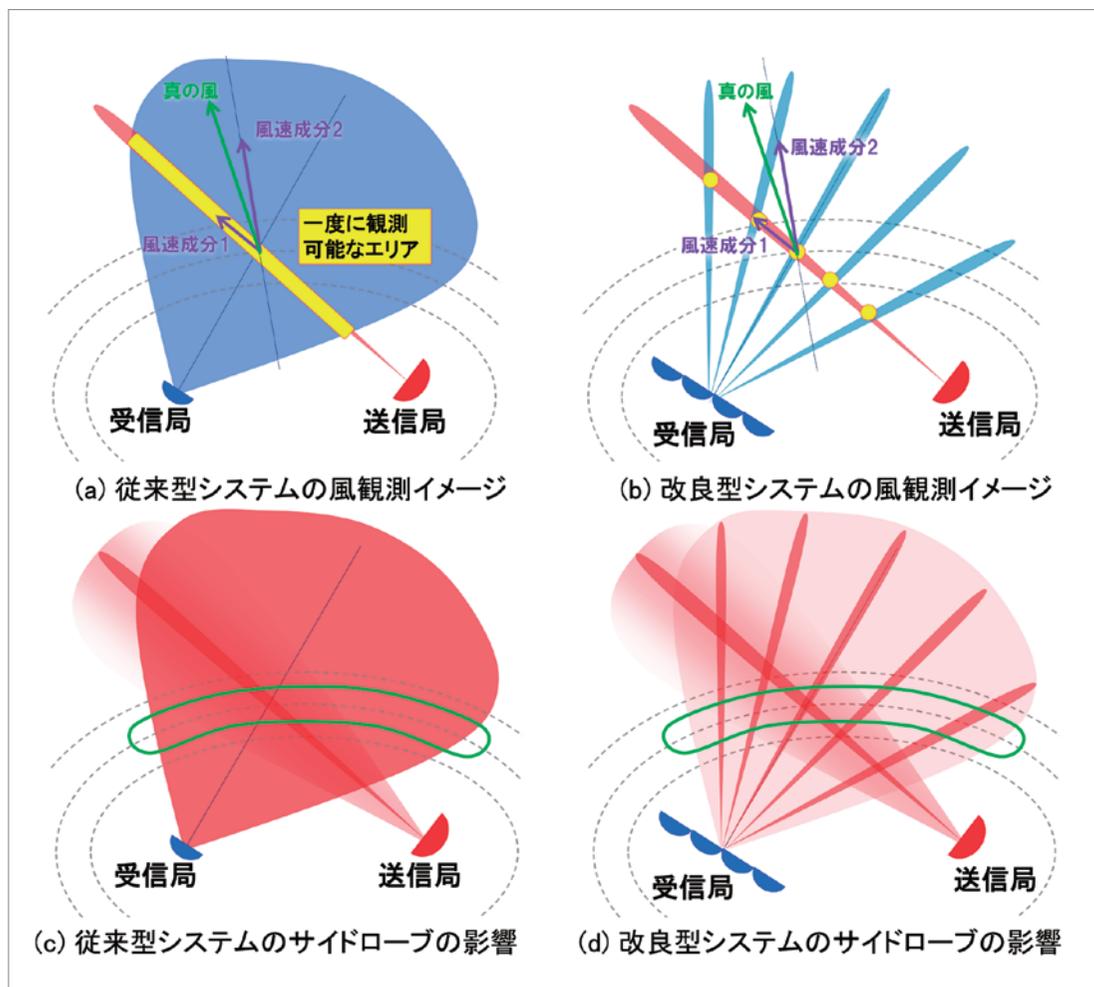


図3 バイスタティック観測システムの模式図

もし地点 A にほとんど雨が降っていなくても、地点 B に強い雨が降っていれば、その雨があたかも地点 A にあったかのように観測されてしまう、これが疑似エコー問題です。

改良型バイスタティック観測システム

我々が提案している改良型バイスタティック観測システムの模式図を図3に示します。改良型システムは次のような特徴を持ちます。(1)受信に複数の素子からなるアレイアンテナを用いる。(2)アレイの素子間隔を波長よりも長くすることで生じる多数の細いビーム(グレーティングローブ)を利

用する。(3)複数素子で受信した信号を位相調整しながら合成することで疑似的にビーム方向を変化させるデジタルビームフォーミング(DBF)*の信号処理を行う。図3の(c)と(d)ではサイドローブの影響を色の濃淡で表しています。改良型システムでは同一楕円上のほとんどの部分で従来型より色が薄くなっており、疑似エコーの発生がそれだけ抑えられることが期待できます。

シミュレーション結果を図4に示します。弱い雨の中に強い雨の領域を3つ配置した状態での受信信号時系列を計算したものです。送信ビームは図中②の雨だけを通っているのですが、従来システムでは①や③の雨の信号もはっきりと受信

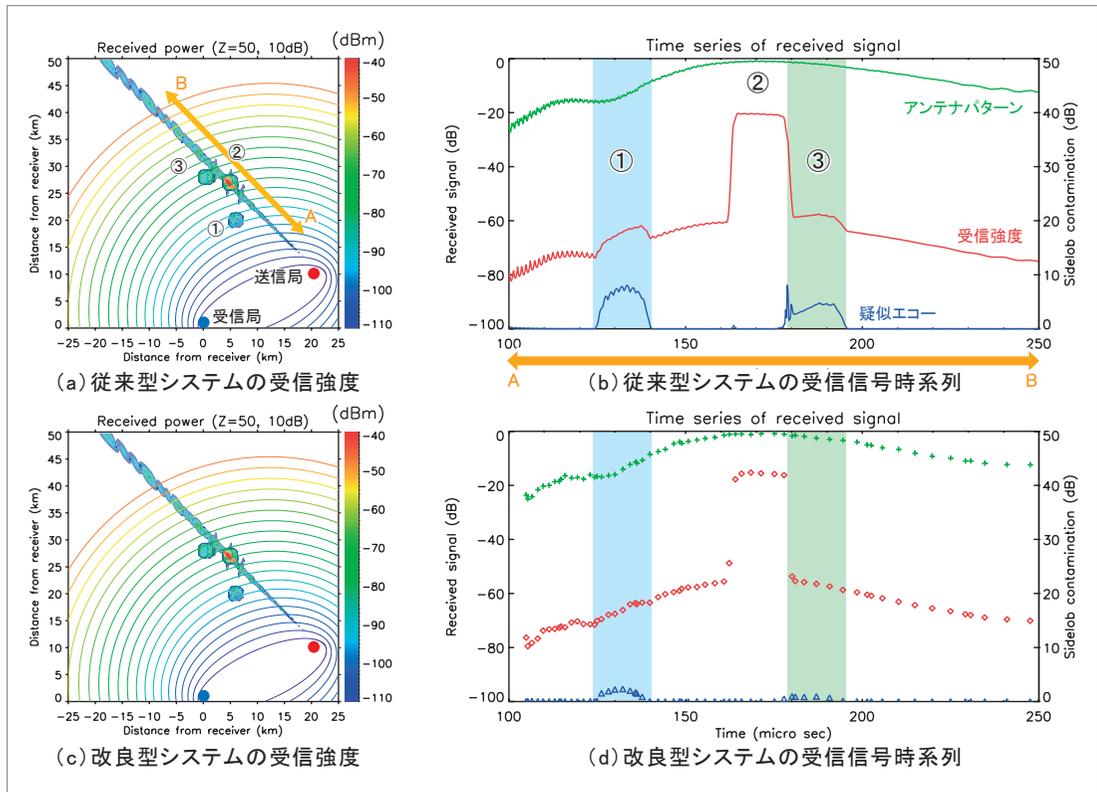


図4 受信信号時系列のシミュレーション結果

されてしまいます(疑似エコー)。改良型システム(DBF処理後)では①や③の信号が効果的に低減されており、疑似エコーの問題が大きく改善されていることが分かります。

● 今後の展開

現在、沖縄偏波降雨レーダ(COBRA)を使ってこの改良型バイスタティック観測システムの実証実験を行っています。受信機には安価で汎用性の高いソフトウェア無線を用い、コンパクトな受信システムの開発を目指しています。近い将来、局地的災害にも有効な観測システムの構築につながることを期待されます。

ソフトウェア無線の技術は、ソフトウェアを変更するだけで様々な用途に応用できます。その利点を生かし、気象レーダの他に、海流を測定する海洋

レーダでもバイスタティック観測システムの研究開発を進めています。これらバイスタティック観測の要は、既存のレーダに付加するだけで機能する受信システムです。この考え方を応用発展させると、自前では送信局を持たず、通信放送など他の目的で使われている電波を受信して情報を得る「パッシブレーダ」につながります。パッシブレーダは、周波数有効利用の観点からも今後重要となってくる技術です。我々は、地上デジタル放送波を用いたパッシブレーダの研究開発にも着手しています。

用語解説

* デジタルビームフォーミング(DBF)

アレイアンテナにおいて、複数素子で受信した信号を別々にサンプリングし、位相を調整しながら合成することで、後処理で疑似的にアレイアンテナのビーム方向を変化させる技術。

東日本大震災の被災地の様子を知りたい

—航空機搭載高性能SAR (Pi-SAR2) による緊急観測—

浦塚 清峰 (うらつか せいほ)

電磁波計測研究所
センシングシステム研究室 室長

南極の氷の厚さを測ることからリモートセンシングの研究を始めて、現在の航空機 SAR につながる仕事をしながら、雲仙岳の噴火、有珠山、三宅島の噴火、新潟県中越地震…とさまざまな災害現場に立ち会ってきました。その中でも 2011 年の東日本大震災の桁違いの恐ろしさには未だに震えが来ます。

「被害状況を広範囲に把握するため、NICT がかねてから開発していた航空機 SAR による観測を東日本大震災の直後から準備し、翌朝の被災地の様子を公開しました。」



はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、死者・行方不明者が2万人を超える惨事となり、その被災地域も青森県から千葉県に至る太平洋側を中心に広大な範囲であり、すべての被災状況の把握が困難な状況でした。

NICTでは、地震発生翌日の2011年3月12日午前7時30分から10時45分に東北地方の太平洋沿岸および主要道路付近の航空機搭載高性能合成開口レーダ*（以後Pi-SAR2）による緊急観測を行いました。

Pi-SAR2は、NICTが開発した航空機搭載SARで、航空機から地上に向けて電波を送信し、地上を航空写真のように観測することができます。このレーダは、12,000mの高い高度からでも30cmの細かさ（分解能）で画像を得ることができます。また、5km以上の幅を連続して一度に観測することができます。

NICTでは1990年代末から1.5mの分解能を持つSAR（Pi-SAR）を開発して火山噴火や地震などの災害の観測に有効であることを実証してきました。Pi-SAR2は、2004年の新潟県中越地震のPi-SAR観測の経験から、もっと細かい情報が必要なことがわかり2010年に開発されたものです。東日本大震災の直前には九州地方の霧島山・新燃岳での観測を行っていたところでした。

Pi-SAR2は名古屋空港近くにあるダイヤモンドエアサービス社（以後DAS）が所有する航空機（ガルフストリーム2型機）に搭載して観測しますが、それには2日ほどかかります。

大きな揺れ、そして

NICTのPi-SAR2チームが東日本大震災に遭遇したのは、東京都小金井市のNICT本部においてでした。大きな揺れを感じてただならぬ事



図1 2011年3月12日の飛行パス（地図提供：国土地理院）
紫の長方形の部分が観測実施場所を表し、数字は観測の順序を表す。なお、管制からの指示により一部のパスにおいては観測が見送られた。

態と判断し、すぐにDAS社に連絡して、緊急作業で12時間以内にPi-SAR2を搭載してもらい依頼をしました。地震により電話が不通になったのは、DAS社への詳細な指示・依頼を済ませた直後でした。レーダ機器のうちデータを記録する記録モジュールは、この直前（3月9日）に実施した新燃岳の観測後の処理のため本部に持ち帰っており、航空機のある名古屋空港までのこのモジュールの緊急な輸送も必要でした。また、地震発生後から新幹線をはじめとする鉄道がすべて運休となっており、観測者の名古屋への移動手段も確保する必要がありました。そこで、自動車による機器輸送と観測者の移動をやむなしとして急遽レンタカーの手配をし、どうにか荷物運搬用のバンを借り受けることができました。もう少し判断が遅かったら、迅速な観測開始には結びつかなかったと思われる。

通常、Pi-SAR2 を運用するには、事前に航空局に飛行パスを申請する必要があります。Pi-SAR2 チームは、地震直後から報道による情報収集を進めて、大急ぎで図 1 に示すような飛行パスを作成し、DAS に緊急の申請手続きをメールで伝えて車に乗り込みました。航空機に搭乗する職員 3 名が NICT を出発したのは 23 時頃の事です。甲州街道等一般道は車で溢れ、渋滞していました。中央自動車道に乗ると車の流れはス

ムーズで、翌朝 5 時頃に名古屋に到着し DAS に入構しました。

到着後直ちに、配線のチェック、機器の動作確認、観測パラメータの入力の作業を行い、6 時 50 分頃から飛行前の天候、フライトコース等の確認の打合せを行い、航空機に乗り込みました。このとき、前日に大阪に出張中だった NICT の熊谷理事も名古屋に駆けつけて陣頭指揮に当たりました。



図2 2011年3月12日午前8時頃に観測された仙台空港付近の画像
画像の大部分を占める黒い部分は、津波により冠水した地域を示している。

名古屋空港を7時30分に離陸して、前日に作成した飛行コースに沿って観測を進めて行きましたが、福島第一、第二原子力発電所の周辺だけは、飛行を迂回するよう管制から指示があり、それ以外の地域はすべて観測を行いました。Pi-SAR2による観測は直線飛行を基本とするため、旋回時にはデータ取得しません。この観測と観測の間の時間を利用して、機上処理システムを用いて複数枚の画像再生処理を行いました。このときの画像は処理の迅速性を考慮し、2km四方の部分に限定しています。観測を終え、航空機が名古屋に着陸した11時過ぎから機上で処理した画像データをNICTのPi-SAR2チームに伝送を試みましたが、震災後の通信の輻輳のせい、機上の緊急処理データをすべて伝送できたのは、地震発生から24時間後の15時近くになりました。このデータは、NICTのWebサイトに特別ページを立ち上げて広く一般に向けて公開いたしました。

● 被害状況がひとめで

取得した生データは記録モジュールを小金井に戻る車に搭載して持ち帰り、翌日から詳細な(5km四方、偏波によるカラー画像)処理を行い、逐次、Webページに掲載していきました。このうちの1つを図2に示します。仙台空港の画像であり、画像の大部分を占める黒い部分は、津波により冠水した地域を示しています。

これらのデータは、災害現場において救難作業や復興作業等に活用されることおよび一般市民に広く状況を知らせることを目的として公開したもので、一定の目的は果たしたと考えておりますが、レーダ画像の判読には専門的知識が必要な部分もあり、今後はその点の改善が必要と考えています。

最後に、東日本大震災により亡くなられた方々のご冥福をお祈りするとともに、一日も早い復興を祈念しております。

用語解説

* 合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar)

マイクロ波を利用し、航空機等から地上に向けて電波を出し、地上を航空写真のように観測することのできるレーダ技術です。電波を使うため曇や雨の天気でも夜でも観測できるメリットがあります。

超高感度センサが拓く 新しい地球大気のすがた

—国際宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波サウンダ(SMILES)—

「世界最高感度により地球大気中の存在比で1兆分の1程度しか存在しない物質計測を達成した超伝導サブミリ波リム放射サウンダ SMILES(Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder) を紹介します。」

笠井 康子 (かさい やすこ)

電磁波計測研究所
センシング基盤研究室 主任研究員

共同研究者：

佐川英夫、菊池健一、落合啓、入交芳久、安井元昭、
メンドロック ヤナ、パロン フィリップ

1995年東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。理化学研究所基礎科学特別研究員を経て、1998年郵政省通信総合研究所(現 NICT)に入所。国際宇宙ステーション搭載・超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES)を始めとした大気リモートセンシング観測研究に従事。趣味は SMILES。博士(理学)。



左から笠井康子、佐川英夫、菊池健一、落合啓、入交芳久、安井元昭
上部左からメンドロック ヤナ、パロン フィリップ

● はじめに

超伝導サブミリ波リム放射サウンド SMILES (Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder) は 2009 年 9 月に国際宇宙ステーション (ISS) に打ち上げられ、現在は日本実験棟 (JEM) 曝露部に搭載されています (図 1)。オゾン層破壊や温暖化そして大気汚染などの地球大気環境変動では、大気中に存在する微量な分子やラジカル*の働きが鍵になります。反応性が高く大気組成の変化を起こす分子ラジカルは、アクティブであるほど存在量が低いという傾向があります。SMILES では、これまで鍵になる働きをすると考えられていたにも関わらず、あまりにも微量で従来は計測が困難であった物質、例えば地球大気中の存在比で 1 兆分の 1 程度しか存在しない一酸化臭素 BrO やヒドロパーオキシラジカル HO₂、100 億分の 1 程度の次亜塩素酸 HOCl などを検出しました。現在はこれらの超微量分子の大気中における振る舞いについて詳細な研究を進めています。

SMILES ミッションの目的は、

- 1) 4K (-269°C) 機械式冷凍機により冷却した高感度サブミリ波超伝導受信機システムの宇宙における技術実証
- 2) 世界最高の超高感度観測により地球大気の新しい姿を拓く

です。SMILES は NICT と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の共同開発ミッションで NICT においては 1997 年から本格的に開発を開始しました。SMILES では大気からのサブミリ波放射を受信し、周波数を落としたのちに分光します。SMILES 測器開発は近年の「小短軽」(小型、開発期間を短く、質量を軽く) 衛星開発の傾向とは逆行した挑戦的な開発でした。質量 500kg、消費電力 400W、これまで宇宙では例のなかった 4K 超伝導受信機開発、など大型でひとつ間

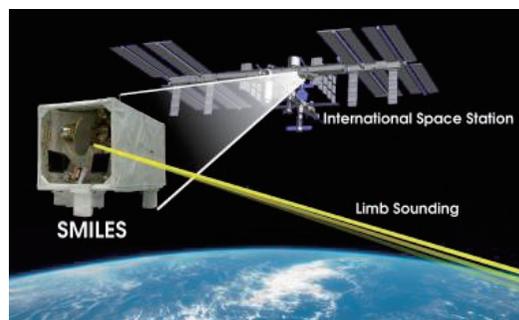


図1 SMILESと国際宇宙ステーション

違えば無謀とも言える技術的挑戦に対して、海外の親しい研究者からは“Crazy Japanese”と言われたものでした。測器の設計寿命は 1 年間でしたが、2010 年 4 月に局部発振器が不具合を起こし、さらには 2010 年 6 月から心臓部である超伝導ミキサを冷却する冷凍機が 4K に到達しなくなり、1 年に満たない期間で観測の継続を断念しています。しかしながら、従来より 10 倍以上の高精度の SMILES による観測は、地球大気の新しい姿を見せてくれました。これらの結果はオゾン層回復と気候変動の関わりを始めとした地球環境問題に対してユニークな視点を追加するでしょう。ここではごく一部ですが、初期的な成果なども紹介いたします。

● SMILES 観測スペクトルとデータ処理

SMILES は国際宇宙ステーションから見える地球周縁の大気サブミリ波放射スペクトルを観測します。SMILES 観測スペクトルの一例を図 2 に示します。一見シミュレーションとも見紛う、美しい測定スペクトルが得られました。2009 年 10 月に出た初データは国際会議等で紹介するたびに関連研究者から“Impressive! Japanese Technology!”などの敬意と称賛の言葉が次々と贈られてきました。これには SMILES 測器チームの技術力の高さを改めて感じました。

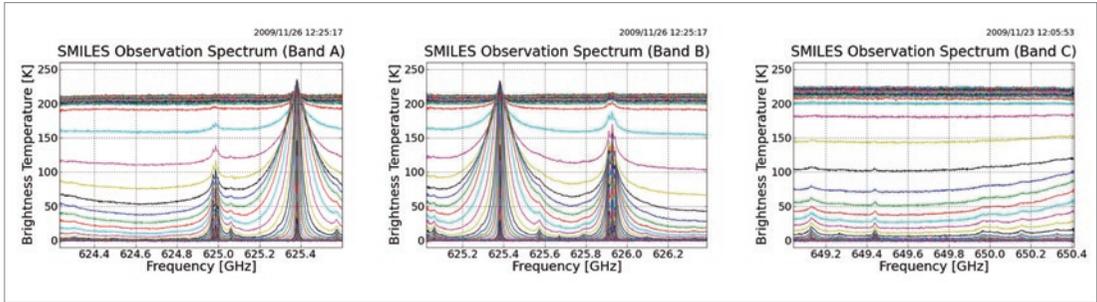


図2 SMILESで観測したスペクトル

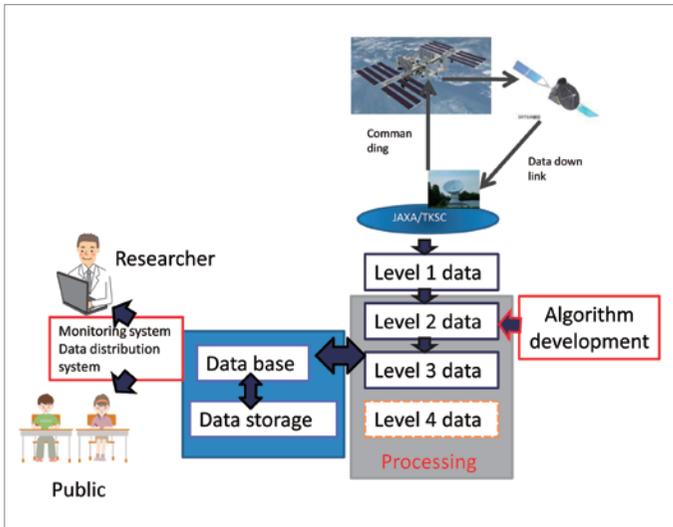


図3 SMILESのデータ処理系の概念図

NICTでは、測器開発のほか、このスペクトルから大気中分子・気温・水蒸気・氷雲・風速などを導出するLevel2アルゴリズム開発と処理、データのグリッド化などのLevel3データ処理を行うと共に、これらのデータ配布を行っています。NICTの地球環境計測分野はこれまで測器開発が主流であり、大容量の地球観測衛星データの準リアルタイム処理を行うのはこれが初めての試みでした。打ち上げ2カ月後の2009年11月末には宇宙ステーションからのSMILES観測データを準リアルタイムで処理したものを実況する「SMILES観測データのクイックルック」を世界に発信する準備が整いました。図3にデータ処理系の概念図と図4にはデータクイックルックページの一例を示します。

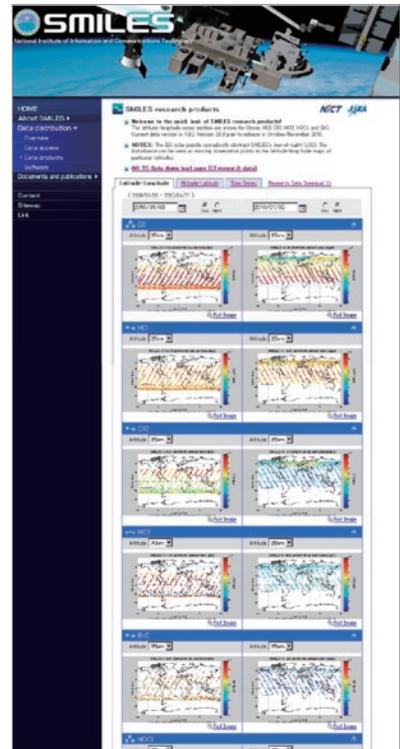


図4 SMILES観測データを実況するWebページの例

最近の成果

SMILESではこれまで上部成層圏から中間圏において光化学ラジカル物質(大気微量成分)の観測を行いました。これらのグローバルな日変化観測はこの高度領域においてはこれまで存在しておらず、世界で初めてのことでした。図5にはSMILES観測で初めて得られた赤道域上空におけるClOとHOClの24時間変化を示しました。例えば高度

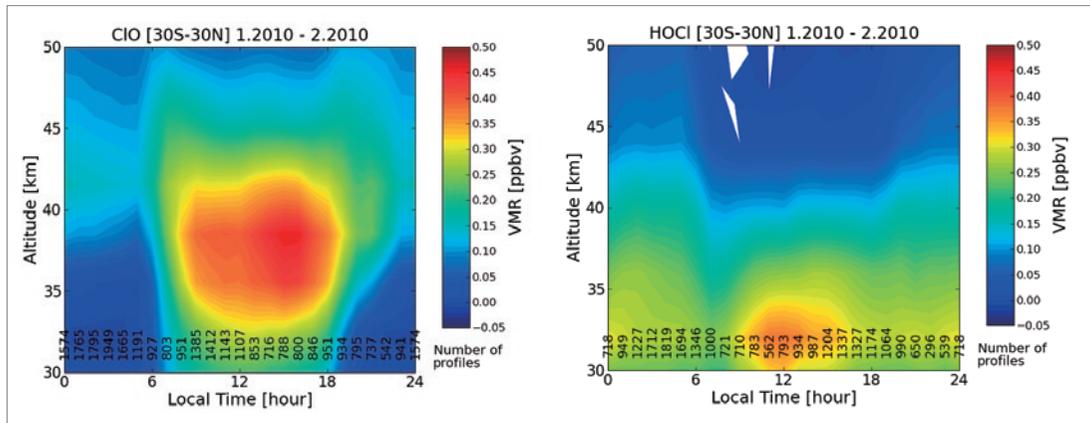


図5 上部成層圏（高度45km付近）において、日没とともにCIOがHOClに変換し、夜明けとともに再びCIOに戻る様子を初めて実測定で捉えました。[T.O.Sato, Titech, Private communication]

45km に注目すると、昼間には CIO の姿をした塩素原子 Cl が、夜間には $\text{CIO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{HOCl}$ の反応により HOCl となり、夜明けと共に $\text{HOCl} + h\nu \rightarrow \text{Cl} + \text{OH}$ 、 $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{CIO} + \text{O}_2$ と変換していく様子を観測により捉えています。これらは理論的計算では予測されていたものの、グローバル観測では SMILES が初めて実証した現象です。SMILES 観測事実により定量的な解釈が可能になりました。オゾン破壊化学反応のメカニズムの詳細な理解は、人類の多くが居住する中緯度や赤道域におけるオゾン破壊量の定量的な見積りを可能にし、オゾン層破壊回復時期予測の精度向上に貢献します。これら SMILES で得られた研究結果を用いて今後は WMO(世界気象機関)への提言をしていくことを目指しています。

これから

現在、人類活動は地球大気環境システムに対する主要な強制力のひとつとなり、生物の生存基盤である大気質や水資源に対して影響を及ぼしています。宇宙からの大気環境の監視は、地球の温暖化や大気汚染と健康被害などの現実の実態把握の道具として非常に有効です。これらのデータを有効に使い、安心・安全な国民生活・

社会経済活動をサポートすることは今後も重要性を増すでしょう。しかし 20 年前とは異なり、現在では環境衛星観測は珍しいものではなくなりました。観測で得られる大量の衛星観測データに対してデータ処理が追いついていないことが問題になってきています。また、たくさんある衛星データの統合的解析の重要性も増してきました。今後は、NICT で進められているサイエンスクラウドプロジェクトを用いて、衛星データ処理を 1 桁高速化し、データ統合することにより新しい世界を展開していきたいと思っています。

参考

- SMILES のホームページ
<http://smiles.nict.go.jp/>
- SMILES 観測データのページ
https://smiles-p6.nict.go.jp/products/operational_latitude-longitude-2days.jsf

用語解説

* ラジカル

通常は 2 個 1 組で原子核の周りの軌道上を回転しているはずの電子が何らかの条件によって1つしかなくなっている状態のこと。

世界の雲分布を計測し 地球温暖化の鍵を探る

—EarthCARE (アースケア) 衛星搭載の雲プロファイリングレーダの開発—

「NICT がこれまで培ってきた雲や雨を計測するレーダ技術は地球全体の雲や降水を監視する衛星へと発展してきました。EarthCARE 搭載の雲プロファイリングレーダはそのうちのひとつです。この衛星は地球温暖化予測の研究等に役立てられます。」

高橋 暢宏 (たかはし のぶひろ)

経営企画部

企画戦略室 総括プランニングマネージャー

大学では気象学を専攻し、レーダを使った降水システムの解析等を行ってきた縁で、熱帯降雨観測衛星(TRMM)が打ち上がる3年ほど前に、郵政省通信総合研究所(現NICT)に入所した。以来、衛星搭載降雨レーダや雲レーダとかかわりを持ってきている。クラリネット演奏が趣味で、長年オーケストラで活動している。最近は、もっぴら息子と遊ぶことが最大の楽しみになっている。

地球温暖化問題の解決を目指して

地球温暖化に代表される気候変動の問題は、私たちに身近な問題となってきています。特に将来への不安を少しでも減らすという観点から、低炭素社会の実現、省エネ、エコというキーワードが頻繁に使われています。この問題に対する科学の役割としては将来の姿を正確に予測することが考えられます。例えば、将来どんな気候になるのか？四季はどうなるのか？年ごとの天候の変化は大きくなるのか？といった疑問に答えることです。その鍵となるプレイヤーは数値気候モデルです。いま話題の「京(けい)」や「地球シミュレータ」といったスーパーコンピュータがそれに該当します。地球温暖化問題では、二酸化炭素の増加による温暖化のシミュレーションが数多くなされて



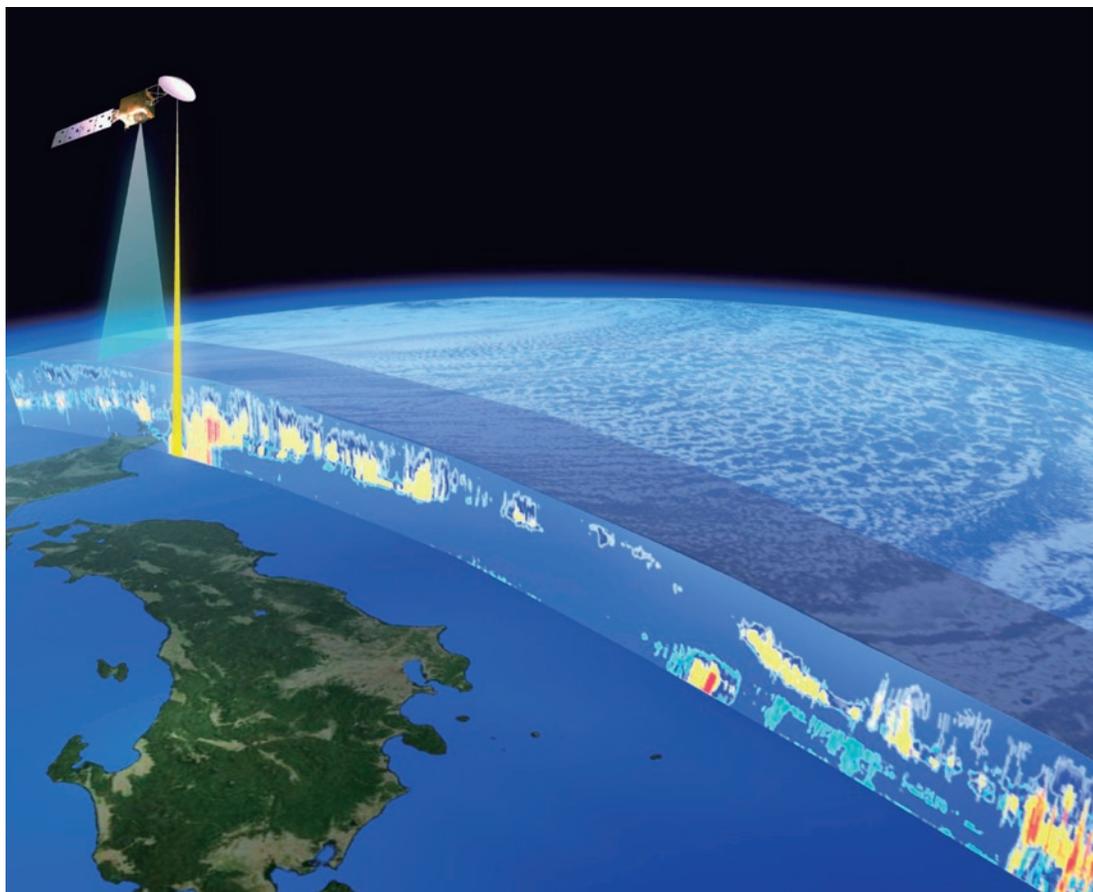


図1 EarthCARE観測イメージ CPRは雲の鉛直構造の情報を取得するのに用いられます。

いますが予測精度向上の鍵を握っているのは雲やエアロゾルといわれる大気塵です。といいますが、高い高度にある雲(絹雲など)は氷粒子からなっており、太陽光は透過しますが地球表面から放射される赤外線は吸収しますので、温暖化に寄与する効果を持っています(毛布の役割などといわれています)。一方、低い高度にある雲(層積雲など)は真っ白く見えることからわかるように、太陽光をよく反射して、地表面の気温を下げる効果を持っています。そして、エアロゾルは雲ができるときに核として働きます。そのため、雲の現れる高さが違ってくると温暖化の度合いが変わってくるのです。さらに細かく言えば、雲による効果は雲粒の大きさや雲の層の厚さ、また相状態(雨か雪か)などで決まるため、スーパーコン

ピュータによる予測であっても非常に難しい問題となっています。このようなことから、雲の、それも地球全体での、高さや厚さを正確に観測することが重要なのです。そこで、人工衛星の出番です。人工衛星なら広い太平洋の真ん中でも、人が住んでいないような砂漠でも、同じように観測することができるからです。

● EarthCARE ミッション

このような背景のもとに、EarthCARE ミッションはスタートしました。EarthCARE は英語の Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer を略したもので、日本語では雲・エアロゾル放射ミッションと訳されますが、地球上の

雲とエアロゾルを立体的に観測し、地球上の放射バランスのメカニズムを明らかにすることを目的とした人工衛星です。この衛星計画は欧州宇宙機関(ESA)と日本(宇宙航空研究開発機構: JAXAとNICT)の共同開発計画であり、2015年の打ち上げを目指しています。図1に観測のイメージを示します。このEarthCARE衛星の大きな特徴は94GHz(波長約3mm)の雲プロファイリングレーダ(以下CPRといいます)とライダー(レーザー光を用いたリモートセンサー)を同時に搭載していることで、これによって雲やエアロゾルの出現高度などの鉛直の分布情報を測定します。CPRはJAXAとNICTが協力して開発し、ライダーなどその他の機器の開発および衛星打ち上げはESAが担当しています。

私たちが開発するCPRのチャレンジは雲の立体的な構造の計測にドップラー速度計測機能から得られる雲内の上下運動の情報を加えることによって、雲の実態を明らかにすることです。このドップラー速度計測機能は、雲や降水を測る衛星搭載のレーダとしてはEarthCAREが初めて挑戦するもので、世界から注目されています。

● NICT だからこそ

NICTではこれまでリモートセンシング機器の研究開発を長年にわたって行ってきており、その成果が1997年に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載の降雨レーダや2014年打ち上げ予定の全球降水観測計画(GPM)主衛星搭載の二周波降水レーダ(DPR)(いずれもJAXAと共同開

発)によって実を結んでいます。そして、さらに技術的に難しい高周波レーダ(雲レーダ)へと挑んできました。1996年には航空機搭載の雲レーダの開発を行い、この実績をもとに2007年からJAXAと共同でCPRの本格的な設計・開発を開始しました。NICTはこれまでの雲レーダの開発経験を活かして、送受信部と1次放射器の機能をもつ準光学給電部の開発を担当し、直径2.5mの大型アンテナと信号処理部、そしてレーダの全体システムをJAXAが受け持っています(図2にCPRの概念図を示します)。送受信部は94GHzの電波をパルス状に送信し、雲から返ってきた電波を受信する機能を持つ、CPRの心臓部と言え

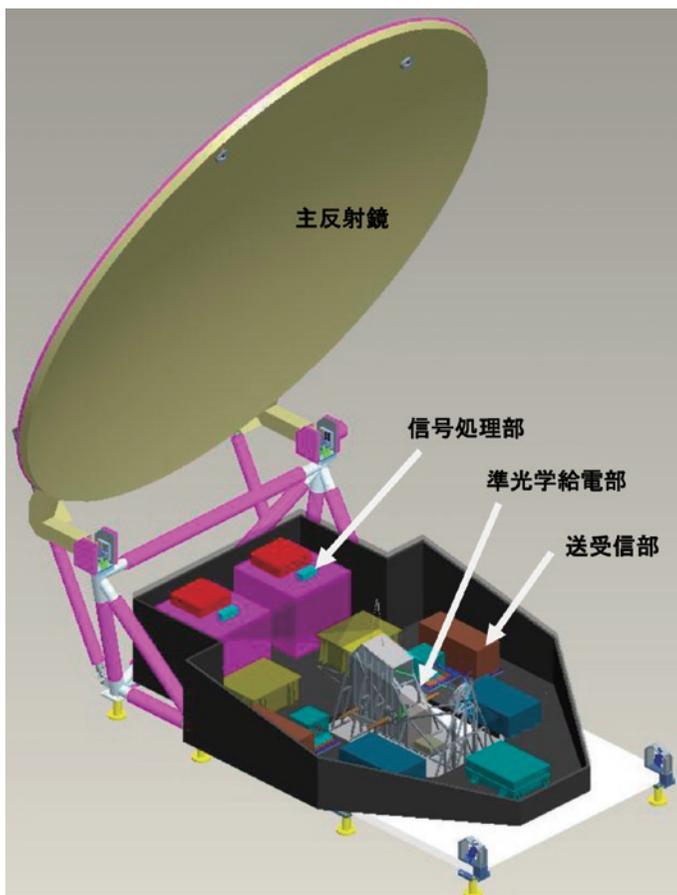


図2 EarthCARE衛星搭載雲プロファイリングレーダ(CPR)の概観図
CPRは直径2.5mの主反射鏡(アンテナ)、送受信部、準光学給電部、信号処理部から構成されています。

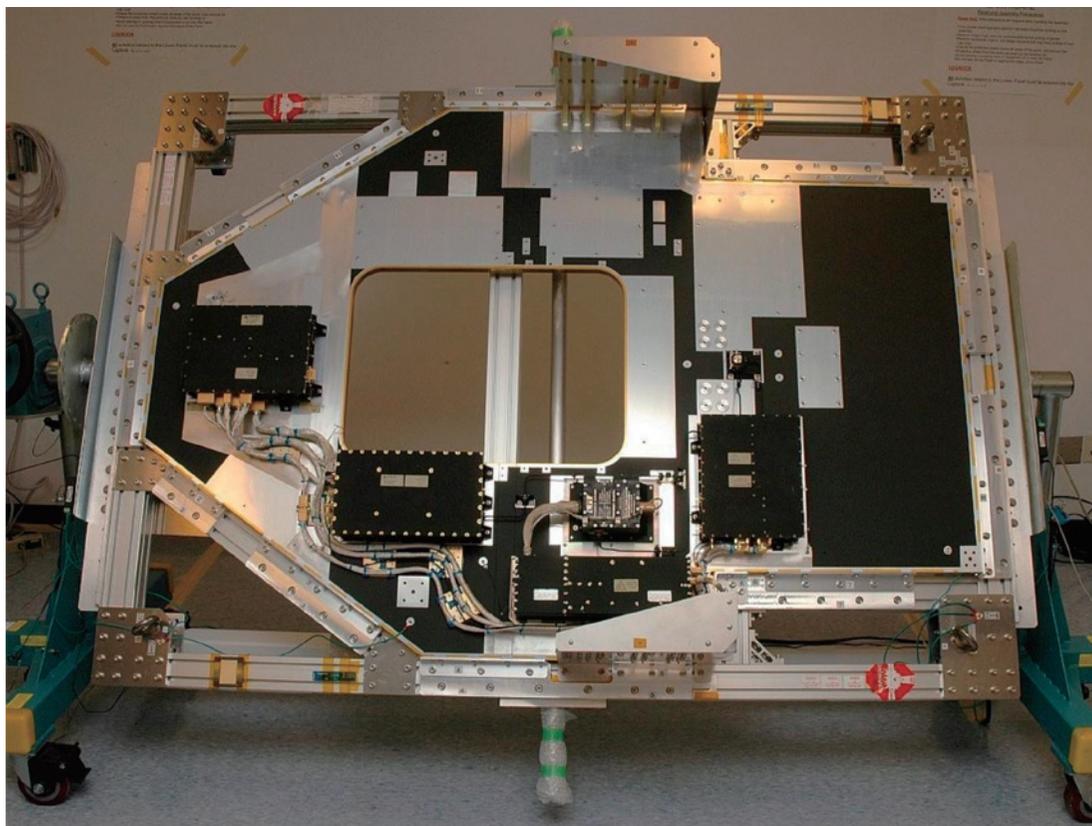


図3 EarthCARE/CPRの送受信部のエンジニアリングモデル

ます。準光学給電部は送信と受信を分離する機能を持ち、光学的なアプローチで少ない損失を実現するとともに、ドップラー計測機能を満たすための高い製造精度を実現しました。

現在、CPRはエンジニアリングモデルという実際に搭載する機器の性能を確認するためのモデルの開発を終え、打ち上げに耐え、宇宙環境において所望の性能が実現できることを試験・確認しています(図3、4にNICTが開発した送受信部と準光学給電部のエンジニアリングモデルの写真を示します)。今後、搭載機器の製造・試験、打ち上げがあり、そしてそのあとにCPRのデータを用いた研究が待っています。長い道のりですが、一步一步着実に進めることができれば、と考えています。

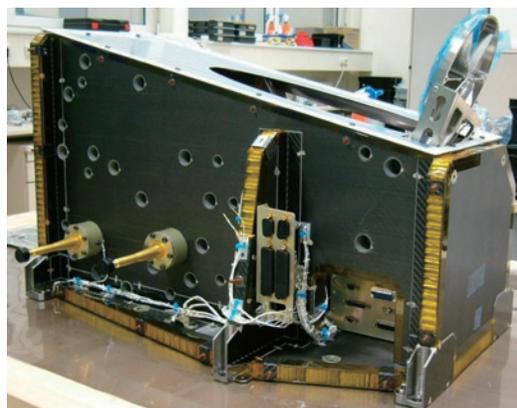


図4 EarthCARE/CPRの準光学給電部のエンジニアリングモデル

東北地方太平洋沖地震後の 大気の波、宇宙まで到達

—300 km上空の電離圏^{でんりけん}で波紋状の波を観測—

「巨大地震は地中や海洋の波だけでなく大気の波も起こし、300km上空まで到達していたことを示す現象が、NICTの電離圏定常観測によって初めて詳細に明らかになりました。」

津川 卓也 (つがわ たくや)

電磁波計測研究所
宇宙環境インフォマティクス研究室 主任研究員

大学院博士課程修了後、日本学術振興会特別研究員(名古屋大学、マサチューセッツ工科大学)等を経て、2007年、NICTに入所。電波伝播に障害を与える電離圏擾乱現象の監視・予測・補正に関する研究に従事。博士(理学)。特技は剣道で学生時代は体育会剣道部の主将として全国大会にも出場。趣味はバイクツーリングと最近始めたテニス。



はじめに

高さ約 60km 以上の地球の大気は、太陽からの極端紫外線等^{きょくたんしがいせん}によってその一部が電離され、プラスとマイナスの電気を帯びた粒子から成る電離ガス(プラズマ)となっています。このプラズマ状態の大気が濃い領域^{でんりけん}を電離圏と呼びます。この「宇宙の入り口」とも言える電離圏は、高さ 300km 付近でプラズマの濃さ(電子密度)が最も高く、短波帯の電波を反射したり、人工衛星からの電波を遅らせたりする性質を持ちます。電離圏は、太陽や磁気圏^{じきけん}、下層大気の活動等の影響を受けて常に変動しており、しばしば短波通信や、衛星測位の高度利用、衛星通信等に障害を与えます(図 1)。このような電離圏の変動の監視や、その予報につながる研究を行うため、電磁波計測研

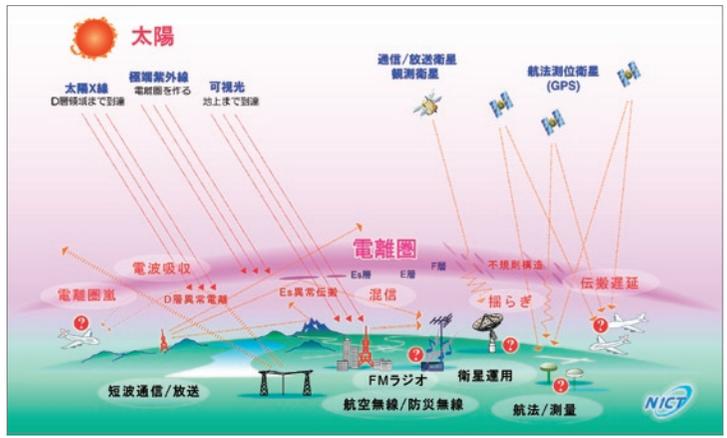


図1 電波伝播に対する電離圏の影響

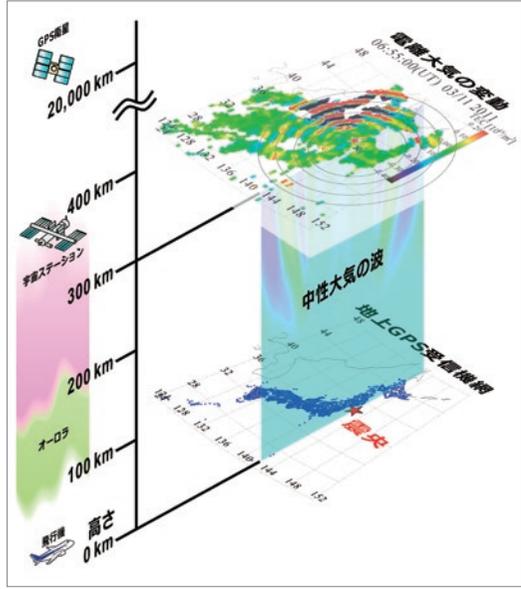


図2 地震後に高度300kmの電離圏まで大気波動が到達したことを示す現象の概要図
 高さ20,000kmを周回するGPS衛星の信号を、地上のGPS受信機網 (GEONET、約1,200観測点) で受信し、高さ300km付近の電離圏を観測します。地震後に、震央付近の海面で励起された大気の波が、高さ300kmまで到達し、電離圏に波紋を作ったと考えられます。

研究所宇宙環境インフォマティクス研究室では、イオノゾンデ網による電離圏定常観測に加え、京都大学、名古屋大学と共同して国土地理院のGPS受信機網(以下「GEONET」)を利用した電離圏全電子数(以下「TEC」)観測を行っています。この観測の中で、2011年3月11日14時46分に

発生した東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9.0)の約7分後から数時間にかけて、震源付近から波紋のように拡がり電離圏内を伝播する大気波動を捉えました(図2)。

● 地震後の電離圏観測

電離圏を突き抜ける電波は、伝播経路上の電子の総数と電波の周波数に依存して、速度が遅くなります。この性質を利用し、GPS衛星から送信される周波数の異なる2つの信号から、受信機と衛星を結ぶ経路に沿って積分したTECが測定できます。TECには、電子密度が最大となる高さ約300kmの電離圏の変化が強く反映されます。約1,200観測点から成るGEONETのデータを利用して算出されたTEC変動を図3に示します。このように稠密なGEONETと視野内にあるすべてのGPS衛星を用いることで、高い空間解像度で広範囲に電離圏が観測できます。図3では、TECの10分以下の短周期変動を示しており、単位はTEC Unit(TECU) = 10^{16} 個/m² で表されます。色はTEC変動の振幅を示しており、赤は定常レベルから+0.2TECU、黒は-0.4TECUです(この時刻の背景TECは20~30TECU)。

このTEC観測によると、赤い星印で示した震央(北緯38.322°、東経142.369°、アメリカ地質調査所による)から、約170km南東にずれた場所(×印)を中心に、地震の約7分後から電離圏で波が現れ始め、同心円状に広がっていました。私たちは、この同心円の中心を「電離圏震央」と名付けました。この電離圏震央は、海底津波計等で推定された津波の最初の隆起ポイントとほぼ一致していました。同心円状の波は、西日本では18時00分頃まで観測されていました。

図4は、イオノゾンデを用いた電離圏電子密度の高度分布を示しています。電離圏は電子密度に応じた周波数の電波を反射する性質がありますが、イオノゾンデは地上から周波数を変えながら上空に電波を放射し、電離圏からのエコーの時間を計測することにより、電子密度の高度分布を観測します。NICTでは、国内4ヶ所(北海道、東京、鹿児島、沖縄)で定常的に観測を行っています。図4では、鹿児島・山川の地

震直前(上図)と直後(下図)の電子密度の高度分布を示していますが、地震直後の高度分布が地震直前の通常見られる滑らかな分布とは異なって乱れており、20～30kmの鉛直波長を持つ波が高さ150～250kmの電離圏内を伝播していたことが分かりました。

これらの観測結果から、巨大地震は、地中の波(地震波)、海洋の波(津波)だけではなく、大気の波(音波、大気重力波)を起こし、その大気の

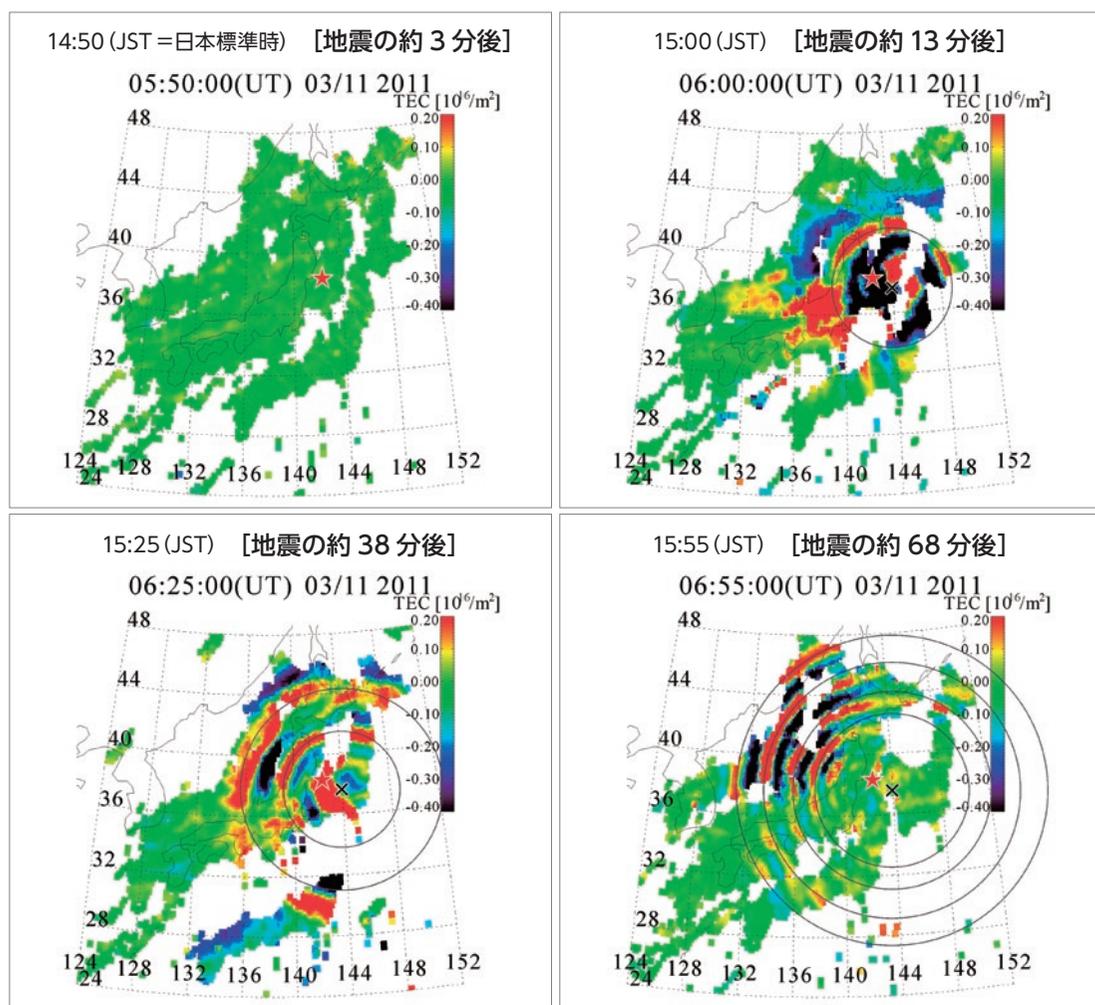


図3 GEONETを利用して算出されたTEC変動

TECは単位面積を持つ鉛直の仮想的な柱状領域内の電子の総数で、一般にTEC Unit (TECU) = 10^{16} 個/ m^2 で表されます。ここでは、10分以下の短周期変動のみを示しています。色はTEC変動の振幅を示しており、赤は定常レベルから+0.2TECU、黒は-0.4TECUです(この時刻の背景TECは20～30TECU)。赤い星印は震央、×印は電離圏震央を示しています。同心円の補助線は電離圏震央を中心としています。

動画は右記Webサイトで閲覧・ダウンロードが可能です。 http://www.seg.nict.go.jp/2011TohokuEarthquake/index_j.html

波が電離圏まで到達したと考えられます(図5)。このような電離圏内の波は、2004年のスマトラ地震や2010年のチリ地震等、ほかの巨大地震でも観測されていますが、高い分解能かつ広範囲に、現象の起こり始めから伝播過程までの全体像を詳細に捉えたのは今回が初めてです。

● 今後の展望

近年、電離圏の変動は、太陽や磁気圏など上方からの影響に加え、対流圏など下層の中性大気の変動も大きく関わっていることが明らかになってきました。しかしながら、下層大気の広範囲かつ高解像度の観測が難しいこともあり、その電離圏への影響は未だ明らかになっていません。今回の観測は、下層大気の変動と電離圏の変動の因果関係が比較的是っきりしているため、両者の関係を明らかにする研究の貴重な資料になります。また、地震の約7分後には電離圏で変動が現れ始めることと、その変動の中心が津波の波源とほぼ一致することから、広域かつ高解像度のリアルタイム電離圏観測が進めば、宇宙からの津波監視といった実利用にも応用できる可能性を示しています。

※共同研究者(敬称略)
 NICT: 丸山隆、西岡未知、品川裕之、加藤久雄、長妻努、村田健史
 京都大学: 齊藤昭則
 名古屋大学: 大塚雄一
 電気通信大学: 松村充

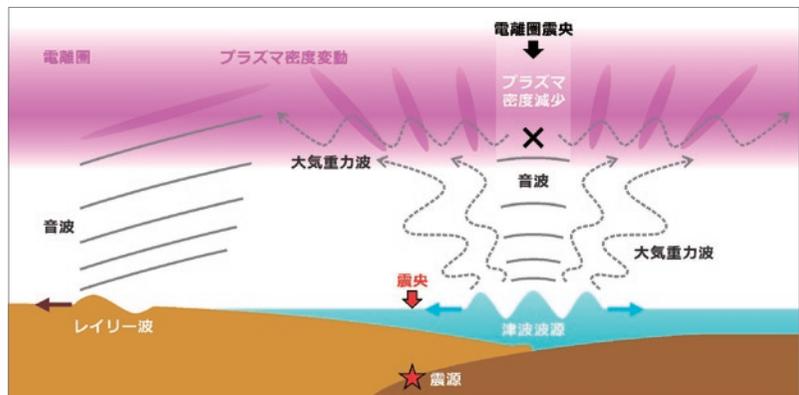


図5 地震後の大気波動と電離圏変動の発生メカニズム

電離圏で観測された同心円状の波の第一波(約3.5km/秒)は、レイリー波(表面波)で励起された音波によるものと考えられます。第二波以降の波は、電離圏震央や津波波面で励起された大気重力波によるものと考えられます。また、波紋状の波に加えて、電離圏震央付近では電離圏プラズマ密度の減少(背景に対して20%程度)や、約4分周期のプラズマ密度変動も観測されました。

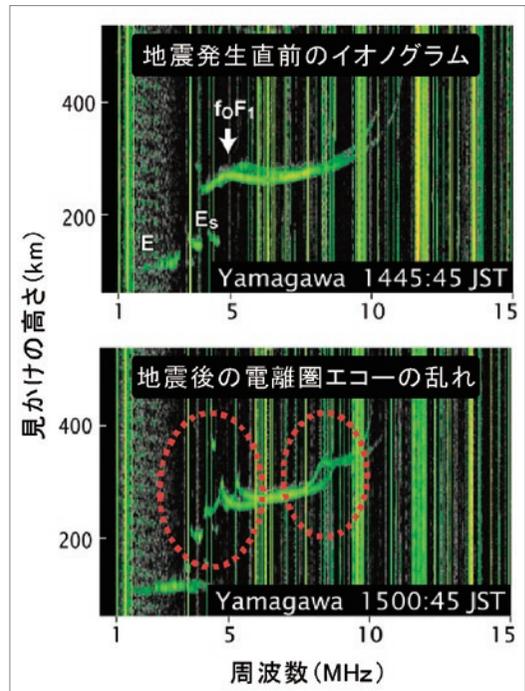


図4 鹿児島・山川のイオノンデ観測から得られた地震直前と直後のイオノグラム

イオノグラムの横軸は周波数、縦軸は見かけの高さで、電離圏に打ち上げた電波の反射(エコー)の様子を示しています。通常の電離圏エコー(上図)と異なり、見かけの高さ200~300km(実高度で150~250km)付近において、電離圏エコーの乱れが見られました(赤丸部分)。この乱れは、電離圏内に20~30kmの鉛直構造を持つ波が存在したことを示しています。

太陽から地球までの観測データをもとに 宇宙環境の変動を予測する宇宙天気予報

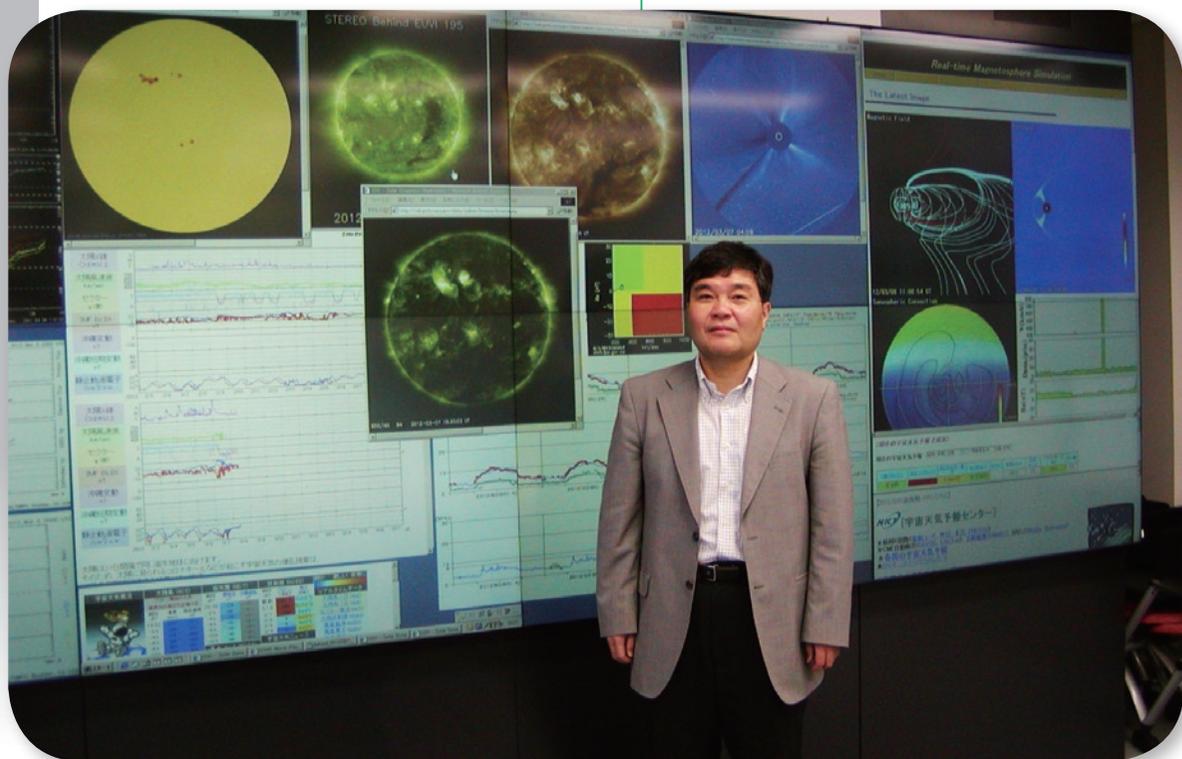
—日々の生活に少なからず影響を与える
宇宙環境の情報をリアルタイムに提供する—

「通信や放送などに使われている人工衛星、衛星を使った測位、電力システムなどに影響を与える宇宙環境の変動を予測する宇宙天気予報について紹介します。」

巨 慎一 (わたり しんいち)

電磁波計測研究所
宇宙環境インフォマティクス研究室 研究マネージャー

宇宙天気の研究に長くたずさわっているのですが、まだ、本物のオーロラを見たことがありません。機会があればぜひ見に行きたいと思っています。



● 宇宙天気予報とは

宇宙環境の変動は地上の天気と同じように、さまざまな形で私たちの暮らしに影響を与えています。NICTは長年にわたり宇宙天気の研究や予測を行い、「宇宙天気予報」として情報提供を行っています。

真空中で何もないと思われている宇宙空間にも微量の電気を帯びた粒子が存在し、それらの粒子により、宇宙の環境は日々変動しています。この宇宙環境の変動は地上と同様に太陽の影響を大きく受けています。例えば、太陽の表面で太陽フレアと呼ばれる爆発現象が発生すると、その影響が地球周辺にまで及びます。太陽フレアの発生から数十分から数時間後には、エネルギーの高い粒子が太陽から到来して人工衛星に障害を起こしたり、宇宙飛行士が被曝したりといった影

響が出ます。その後2、3日経過すると、太陽フレアに伴って放出される電気を帯びた雲のようなものが地球に到達して、地球の磁場が乱されます。地球の磁場が乱されるとオーロラが見えることがあります。その一方で地磁気の変動によって地上の送電システムに誘導電流が発生して障害が起きる可能性もあります。最近では、GPSなどの衛星を使った測位が一般的になって、旅客機の運航や離着陸、あるいは土地の測量や無人の農作業機械などにも利用されるようになってきていますが、衛星測位システムを高度に利用するためには、宇宙天気の影響も考慮する必要があります(図1)。

こうした人間の作ったシステムや人間に影響を与えるような宇宙環境の変動を総称して「宇宙天気」と呼び、太陽や太陽風などのリアルタイムの観測データから宇宙環境の変動を予測し、その

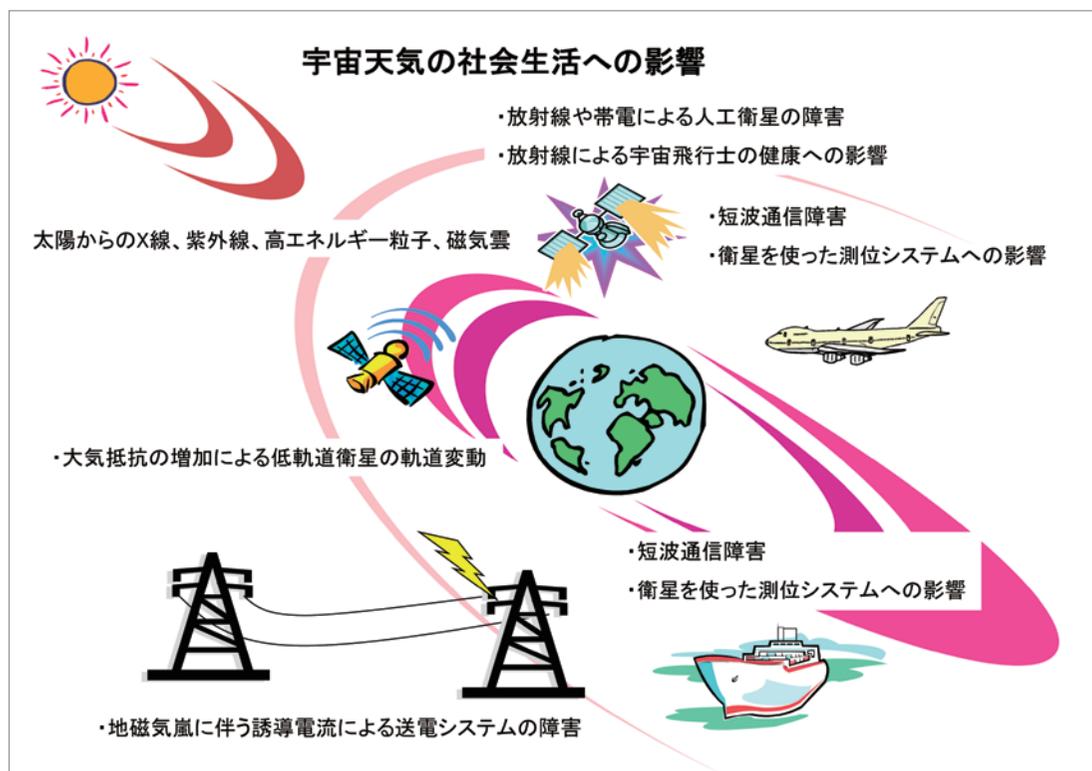


図1 宇宙天気の影響

情報を提供するのが宇宙天気予報です。私たちは日頃から外出前に天気を調べたり、テレビの天気予報を見て洗濯するかどうかを決めたりします。地上の天気予報と同じように、人工衛星など宇宙天気の影響を受ける可能性のあるシステムを運用している人たちは、宇宙天気予報を参考にしています。

実際、2003年10月末の「ハロウィン・イベント」と呼ばれている太陽の活動が非常に活発になった時期に、日本の人工衛星「こだま」に搭載されたセンサーにノイズが入って地球の方向を見失い、衛星の姿勢制御に不具合が発生しました。また、1989年3月にカナダのケベック州で起きた9時間にも及ぶ停電は、地磁気嵐による地磁気の大きな変動が原因です。

● 宇宙天気予報のはじまりについて

NICTが、その前身である郵政省電波研究所であった頃、1957年のIGY(国際地球観測年)の際には、既に現在の宇宙天気予報のルーツとなる短波電波を使った通信のための予報警報を行っていました。当時は国内外の通信や放送などで短波電波が広く利用されていました。その短波電波の伝播に影響を与える宇宙環境の変動を予測することは、電波研究所にとって重要な使命でした。また、IUWDS(ウルシグラム世界日業務)という国際機関があり、日本も参加して国際的な情報交換を行っていました。その後、1996年にIUWDSは、ISES(国際宇宙環境情報サービス)と名称を変更して現在に至っています。ISESには、現在、アメリカ合衆国、インド、オーストラリア、カナダ、韓国、スウェーデン、チェコ共和国、中国、日本、南アフリカ共和国、ブラジル、ベルギー、ポーランド、ロシアの14カ国が参加しています。

衛星通信や光ファイバーによる通信が増えたことで、以前に比べて短波通信の重要度は下

がってきましたが、人工衛星の利用や国際宇宙ステーションに人が滞在するなど人類の宇宙利用が進んできています。そこで、これまでの経験を宇宙天気予報として宇宙利用などにも役立てていこうということで、NICTは世界に先駆けて1988年に「宇宙天気予報」の研究プロジェクトをスタートさせました。このときから「宇宙天気予報」という言葉を使っています。アメリカがNational Space Weather Programと呼ばれる同様の研究プロジェクトを始めたのは1995年、ヨーロッパで欧州宇宙機構(ESA)が宇宙天気プロジェクトを始めたのは1998年のことでした。

● 宇宙天気の情報配信について

NICTの予報センターでは、太陽、太陽風、磁気圏、電離圏の地上や人工衛星によるほぼリアルタイムの観測データを常時モニタリングし(図2)、



図2 ACE衛星からのリアルタイム太陽風データを受信しているNICTのアンテナ



図3 毎日、午後2時半に行われる宇宙天気予報会議の様子 (右) 廊下に響きわたる鐘の音が、会議招集の合図

地球に影響を及ぼしそうな現象が起きた場合には、適宜、臨時情報を配信しています。毎日、午後2時半に予報会議(図3)を行い、日々のデータから太陽フレア発生や地磁気嵐発生の予報、太陽高エネルギー粒子現象の発生状況などについて検討を行い、その結果を日本時間(JST)の午後3時に配信しています。NICTのWebサイト(図4)から公開するほか、電子メールでも情報を送って配信しています。また、毎週金曜日には週報を配信しています。宇宙天気予報を一般の方にもわかりやすいかたちで情報提供するためYouTubeのNICT Channel*から「週刊宇宙天気ニュース」という動画による宇宙天気情報の配信も行っています。

NICTは、スーパーコンピュータを使ったシミュレーションにも力を入れていて、数値モデルの分野においては、他の国の予報センターに比べて進んでいます。リアルタイムデータによる「ナウキャスト」や経験モデルによる予測に加え、長期的には数値予報の活用が重要だと考えています。



図4 宇宙天気情報のWebページ (<http://swc.nict.go.jp>)

* YouTubeのNICT Channel:
<http://www.youtube.com/user/NICTchannel>

誤差6,500万年に1秒

—日本発の光格子時計で1秒の新たな定義を狙う—

「さらなる時の細分化を求める現代社会。時計の振り子を毎秒400兆回という光の振動で実現し、桁外れの精度を皆様にお届けすべく、光原子時計とその配信技術を研究しています。」

井戸 哲也 (いど てつや)

電磁波計測研究所
時空標準研究室 主任研究員

大学院修了後、JST-ERATO 研究員、JILA(米国 NIST/コロラド大学) Research Associate、JST- さきがけ研究者を経て、2006年、NICT に入所。大学院修了後より Sr 原子のレーザー冷却及びその原子時計への応用、また精密光計測技術や周波数コム技術を利用した真空紫外光発生の研究に従事。博士(工学)。

背景

NICT が国民の皆様へ供給している日本標準時は、世界標準時があってそれを中継して国内に配っている、というのではなく、あくまで NICT 内にある多数の原子時計で自ら生成しているものです。従って、NICT 内でできるだけ正確な1秒を生成する能力を保持する必要があります。現在、国際単位系の1秒はセシウム原子の9.2GHzのマイクロ波遷移^{*1}で定義されており、NICTにて開発したセシウム原子泉方式周波数標準は 1.4×10^{-15} の不確かさ(誤差 2,000 万年に1秒)で1秒を実現できます。

しかし、通信においてその媒体を電波から光へ変更して高速大容量が実現したように、周波数標準においても光による方式を確立すると性



能が劇的に改善します。そのため、前世紀末より光原子時計の開発が精力的に行われてきており、近年ではマイクロ波時計を凌駕する光原子時計方式が複数開発され、秒の定義を書き換えることが議論されています。光原子時計の方式として現在欧米発で30年以上の歴史のある単一イオントラップ方式*2と今世紀に入ってから日本で提案された光格子時計方式があります。また、光原子時計の開発と並んで秒の改訂の力を握るのが、遠隔地にある周波数標準を比較・校正する技術です。標準として世界中で皆が1秒を共有するためにはそれぞれの時計が一致した時間を生成することを確認する必要があります。光原子時計による高性能化に見合う性能改善を遠距離周波数比較技術においても実現する必要があります。

時空標準研究室ではストロンチウム(Sr)光格子時計を独自開発し、2010年半ばより動作を開始しました。そしてこの時計が生成する基準光周波数を、開発した光ファイバによる高精度光周波数標準伝送システムによって東京大学(以下「東大」)に伝送し、東大の光格子時計との遠距離周波数比較を行い、光格子時計の普遍性と光周波数標準の伝送・比較技術の確立を実現し、さらなる精度向上を図っています。

● 光格子時計とは

光原子時計は原子遷移に常にレーザー光が共鳴になるようレーザー周波数を調整することによって得られます。このときに原子が動いているとドップラーシフトを受けてしまうために原子を空間に強く固定する(トラップする)必要があります。前世紀においてはイオンを使用して電場でトラップするイオントラップが唯一の固定する方法でしたが、2001年に東大の香取秀俊教授は特定の波長のレーザー光の干渉縞(光格子)に原子をトラップすれば、周波数シフトを

起こさずに強くトラップでき、高性能な光原子時計を構築できることに気づき、2003年には筆者と共にドップラーシフトのない非常に先鋭な原子スペクトルを得る原理検証実験に成功しました。そして2006年には東大の他、米仏の研究機関で得られた時計遷移の周波数がよい一致を示したために、この光格子方式の原子時計はその信頼度が認められ、現在10近くの国立標準研究所において研究が精力的に進められています。

● 光ファイバによる高精度光周波数標準伝送技術

光ファイバは温度変化や振動による伸縮や屈折率変化によって光路長が変化し、このため受け手側ではドップラーシフトした間違った周波数を受信してしまいます。そこで、受信側で受信光の一部を同一ファイバで送信側に送り返し、送信側では伝送路で生じた位相雑音を検出し、それを抑制するよう位相補償を送信側で施すことによって受信側に忠実に光周波数を送信できます。2011年の実験では小金井-大手町間のNICTが運用する光ネットワークテストベッドJGN2plus(現JGN-X)を利用したNICT-東大間のファイバ長60kmにおいて約400THzの光周波数を積算時間1秒で標準偏差1Hz以下の伝送精度で伝送する能力をまず確認しました。ただし日本ではファイバ線が空中に宙づりされたり鉄道の近傍に敷設される等、雑音環境が劣悪な場合が多く、今回この精度は天候が穏やかな真夜中という好条件においてのみ得られたものです。欧州では静かな地中に敷設されたファイバによって伝送距離1,000kmのリンクも実証されており、今後、世界一の伝送能力を実証するにはファイバの敷設環境を改善することが必要不可欠になります。

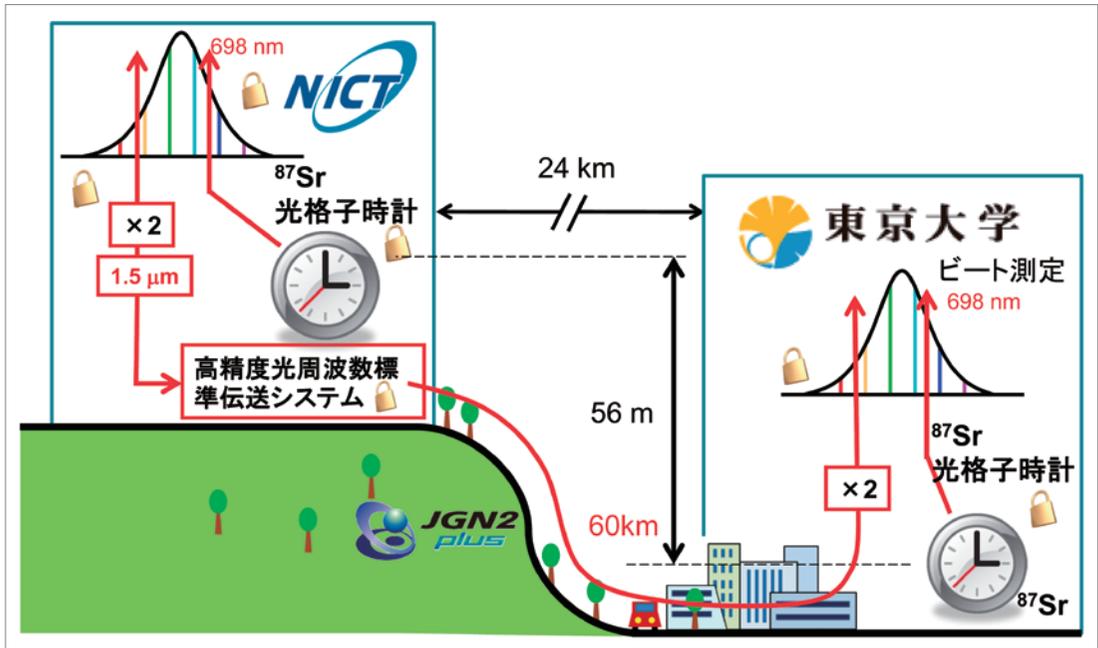


図1 NICT-東大光ファイバリンクによる光格子時計周波数比較の模式図
武蔵野台地の上にあるNICT小金井本部は東大本郷キャンパスに比べて標高が56m高い。

● NICT- 東大光格子時計周波数比較

その後図1に示す構成でNICTと東大の光格子時計の周波数比較を行いました。ストロンチウム光格子時計は波長698nmの光周波数標準信号を生成しますので、NICT(送信)側でまず光周波数コム^{*3}を利用して通信帯への波長変換を行い、その上で東大へ向けて前述の伝送システムを利用して信号を送出します。東大側では受信した光の2倍波をとって再び可視域に戻し、この2倍波に東大側の周波数コムを位相ロックします。これによって、NICTの光格子時計にコヒーレントにリンクされた光周波数コムが東大にて実現し、東大の時計が生成する光周波数とこの周波数コムのビート周波数を測定することにより2つの時計の相対的な周波数差をリアルタイムに測定することが可能になります。図2に1秒ごとに得られた2つの時計の周波数差を示します。NICTの時計の周波数が3~4Hz東大側より高いことが明

瞭に観測され、両地点の光格子時計が同じ周波数を生成していないことが分かります。しかし、この周波数差は主にNICT、東大の56mの標高差に起因しており較正することが可能です。NICTに比べて標高が低く重力が大きい東大では一般相対性理論が示唆するように時の流れが遅くなっていますので同一時間で比較すると周波数が小さくなります。従って2地点の標高差からこのシフト量は不確かさ0.1Hz以下で計算できます。そして最終的にNICTと東大の時計の較正不可能な原因不明の周波数差は430THzのうちわずか $0.04 \pm 0.31\text{Hz}$ (6,500万年に1秒)となりました。周波数標準はいつでもどこでもだれでも同じ周波数が得られることが必須です。この結果によって不確かさ 10^{-16} 台で遠隔地にある時計との周波数一致が初めて確認され、日本発の光格子時計の普遍性が確認されると同時に、周波数標準を正確に遠距離伝送する技術をも手中にしました。

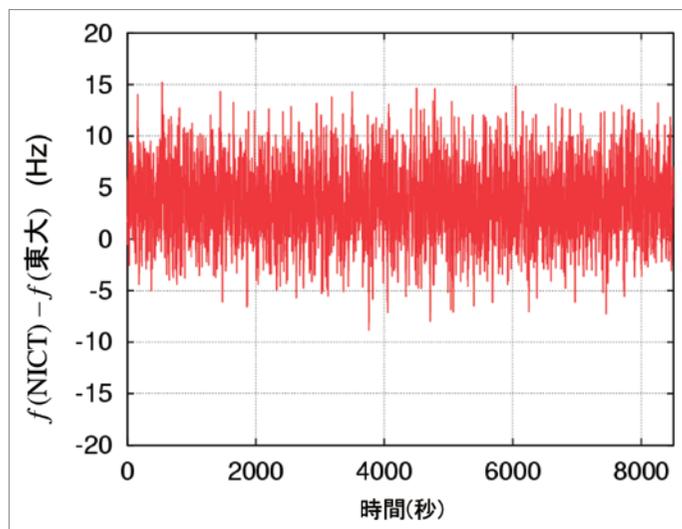


図2 NICT及び東大の光格子時計の周波数差
各点は積算時間1秒で得られており、NICTの光格子時計は3.7Hzだけ東大より周波数が高い698nm光(430THz)を生成している。

● 今後の展望

Sr 光格子時計は2006年に東大の他筆者が在籍していたJILA^{*4}(米国NIST/コロラド大学)で時計動作を開始した後、現在ではNICT・仏独の国立標準研究所においても運用されています。今回光ファイバを利用してNICT-東大間で16桁の周波数同一性が確認されましたが、秒の再定義を確実なものとするには時計自体のさらなる高性能化と共に、光ファイバ接続が困難な欧米の光格子時計との周波数一致を確認する必要があります。これを見据えて時空標準研究室では、現在、世界の標準時と日本標準時の時刻差測定で使用している人工衛星を利用した周波数・時刻比較技術の展開及びVLBI技術を用いた新たな時刻比較技術の開発により、大陸間規模での時刻・周波数比較精度向上を追求しています。また、イオントラップ方式の原子時計についても、光格子時計と同等もしくはそれ以上の性能が得られることがNISTによって研究室内相互比較で確認されており、NICTではこの方式についてもNISTとは異なったアプローチでインジウムイオンによる原子時計の開発を進めています。

用語解説

*1 マイクロ波遷移

原子遷移としては小さいマイクロ波のエネルギー差を持つ原子遷移のこと。通常マイクロ波域の原子遷移は核スピン・電子のスピン間のごく弱い相互作用によって生じる2つの状態間を結び遷移になります。

*2 単一イオントラップ方式

イオンをたった1個電場によってトラップしてそのイオンの吸収線を利用して時計レーザーを安定化する方式。イオンの電場による束縛では上下状態が同じ閉じ込めポテンシャルを感じるため電場の影響によって遷移周波数がシフトすることがありません。なお、一般に複数個をトラップすると近傍のイオンによって生じる不規則な電場のために周波数シフトが起きてしまいます。

*3 光周波数コム

パルスレーザーは、周波数スペクトルを見ると等間隔の周波数成分が存在する櫛状のスペクトルとなっているため、光周波数コム(optical frequency comb)と呼ばれます。一般にこの櫛スペクトルは位相雑音が少ない、非常に安定に動作するパルスレーザーにおいて得られます。

*4 JILA

国立標準技術研究所(NIST: National Institute of Standards and Technology)とコロラド大学の共同機関

世界最高水準の 日本標準時をつくる

「NICT では、日本標準時を『つくり』、世界中と『くらべ』、日本中に『くばる』という業務を行っています。世界の標準時にも貢献し、最高水準にある標準時がここにあります。」



花土 ゆう子 (はなど ゆうこ)

電磁波計測研究所
時空標準研究室 室長

1989年郵政省通信総合研究所(現 NICT)に入所。パルサータイミング計測、時間・周波数標準に関する研究に従事。趣味は野山歩き、絵を見ること。

今村 國康 (いまむら くにやす)

電磁波計測研究所
時空標準研究室 研究マネージャー

1976年郵政省電波研究所(現 NICT)に入所。無線機器の検定・試験法開発、国際間周波数・時刻比較の研究に従事。現在、周波数標準・標準時の運用・開発を担当。



● はじめに

「私たちの研究室(東京都小金井市)では、日本標準時をつくって供給しています」と説明すると、「え?日本の標準時は明石で決めているのでは?」「標準時を作るとは?」など、いろいろな質問を受けます。ここでは、世界と日本の標準時のなりたちと私たちの活動を、簡単に紹介します。

元々の標準時は、地球の自転を基に決められていました。地球の1回転を1日、それを細分化したものを1秒の単位とし、太陽が真南に来る時刻を昼と決めたのです。これを天文時といいます。しかし自転周期がさまざまな要因でゆらいていることが判明し、原子のもつより安定な固有の周波数を基に1秒の長さを決めることとなりました。これを原子時といいます。1967年の国際度量衡総会で「秒は、セシウム133原子の基底状態の2つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の周期の91億9263万1770倍の継続時間である」という定義が定まり、1972年からは原子時が世界の標準時となりました。

現在、定義にもとづく1秒がほぼ実現できる超高精度セシウム原子時計が、世界中で10数台動いています(当研究室の原子泉型一次周波数標準器NICT-CsF1もその1台)。ただ、これらは連続運転が難しいため、精度は落ちるが連続運転が可能な市販されるセシウム原子時計をたくさん平均して連続時間を作り、それを超高精度セシウム原子時計で定期的に補正する、という方法で、標準時のおおもとである国際原子時TAIが計算されています。TAIの計算には、世界中の標準機関が持つ約400台の原子時計データが使われています。

TAIは天文時とは無関係であるため、天文時はだんだん原子の時刻からずれていきます。日常生活の感覚に合った天文時と原子時との差が0.9秒以上にならないよう、うるう秒という操作を加えることで、見かけ上原子の時刻と天文の時刻を一致させています。TAIにうるう秒調整をし

たものが協定世界時UTCであり、これが現在、世界の標準時として使われている時刻です。

TAIやUTCは、5日ごとの値が月に1度パリ郊外にある国際度量衡局BIPMで計算されていますが、結果の公表は約1ヶ月後です。世界の標準時は、とびとびで1ヶ月待たないとわからない、しかも計算機の中にしかない時刻なのです。これでは今が何時何分かがわかりません。そのため各国の標準機関では、連続した時間を独自につくりUTCに合うよう調整しながら実信号の形で供給しています。

NICTがUTC準拠でつくる時刻をUTC(NICT)と呼び、日本標準時はこれを基にしています。

● 日本標準時をつくる

NICTでは、長期間(1日以上)で安定なセシウム原子時計と短期間(1日以下)で安定な水素メーザ周波数標準器を組み合わせ、標準時を生成しています。まず原子時計相互のわずかな時刻差を高精度に計測します。このデータを基に18台のセシウム原子時計を最適な方法で合成します。たくさんの時計の合成結果を使うことで、各時計のゆらぎがならされるだけでなく、いくつかの時計が故障や寿命で止まっても途切れない時刻を作ることができます。この長期的に安定なセシウム合成原子時で、短期安定度の良い水素メーザ周波数標準器の信号を補正することで、短期も長期も安定な標準時が実現できるのです。その時刻ずれは約100万年に1秒程度です。

こうしてつくられた標準時は、GPS衛星などを仲介とする方法や商用通信衛星を利用した時刻比較方法で海外の標準時と時刻比較され、この結果を基にUTCとの時刻差がBIPMから公表されます。NICTは、その時刻差が小さくなるように調整しながら運用をしています。これがUTC(NICT)です。また同時に、時刻比較のデータがBIPMで



図1 日本標準時システム(左)と日本標準時生成に使われるセシウム原子時計(右)

活用されることで、NICTの原子時計はTAIをつくる時計群の一部としても大きく貢献しています。

日本標準時 JST は UTC(NICT) を 9 時間(東経 135 度分の時差)進めた時刻です。厳密には日本の東西で時刻差があるはずですが、東経 135 度の時刻を一律に日本の標準時としています。(明石は東経 135 度にあるので「明石の時刻が日本の時刻」というのは間違いではありませんが、明石で日本の時刻を決めているわけではないのです。)

日本標準時を構成する原子時計は、温度や地球磁場などの周辺環境で周波数が変化するのを避けるため、温度・湿度管理、電磁界シールドを施した原器室と呼ばれる特別な 4 つの部屋に分けて設置されており、相互に補完することでメンテナンスや万一のトラブルの際にも止まらないシステムが構築されています。

● 日本標準時をくばる

NICT でつくられた日本標準時及び 1 秒の基準である標準周波数は、いろいろな形で日本全国に向けて配信されています。その主なものが、電波時計の基準の電波として日本中の皆さんに利用して頂いている標準電波です。福島の送信所からは 40kHz、福岡と佐賀の県境にある送信所からは 60kHz の電波にのせて、時刻信号を常時発信しています。

そのほか、電話回線を使って時刻を配信する「テレホンJJY」、ネットワークを経由してオンラインでコンピュータの内部時計を同期させることを目的とした「NTP サーバ」等、各種サービスも実施しています。最近では、インターネットの普及によって商取引や特許出願など、さまざまな分

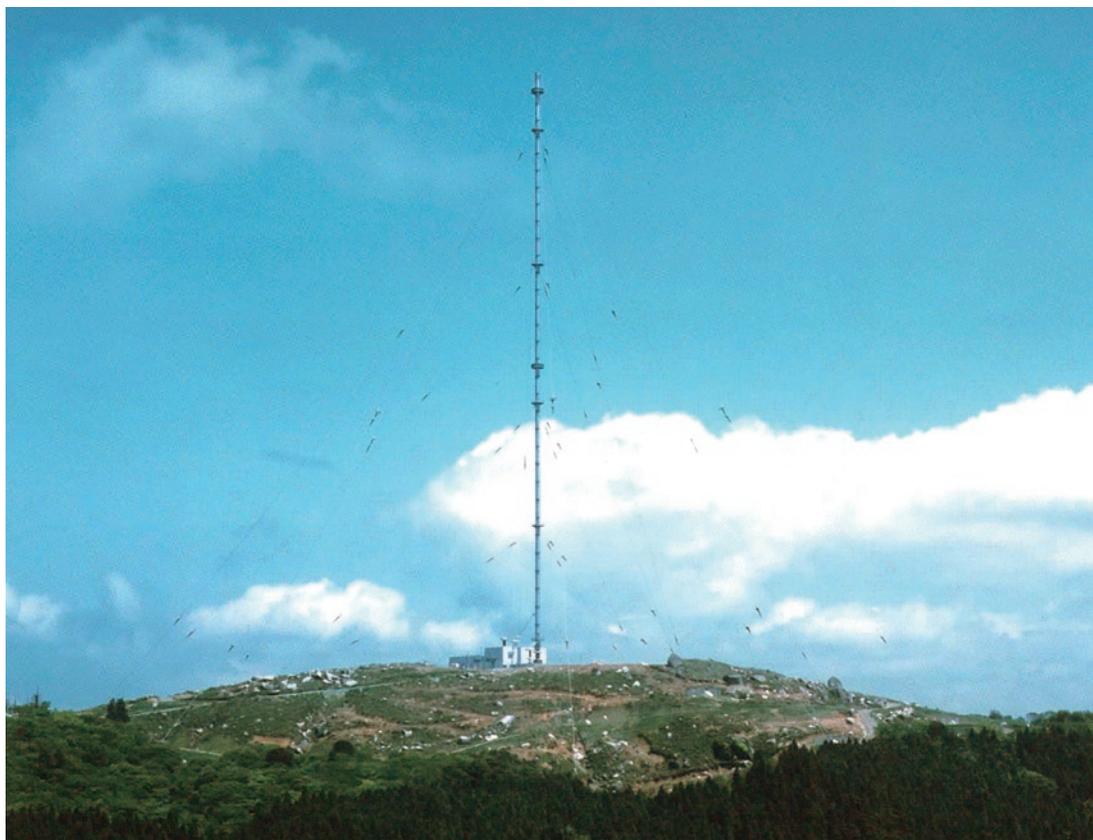


図2 はがね山標準電波送信所(佐賀県と福岡県の境)の全景

野で電子文書の重要性が増してきており、文書の改ざん防止という意味からも、文書作成の時刻を第三者が証明するといったタイムビジネスが注目されてきています。このような時刻認証事業者に対して、正確な日本標準時を配信するというサービスを行っています。また機器持ち込みやGPS衛星を使った遠隔較正サービスにより、ユーザーの周波数標準器と周波数国家標準との周波数偏差を測定する較正業務も行っていきます。

● 正確な標準時はなぜ必要なのか

正確な時刻と高精度な基準周波数は、日常生活だけでなく社会インフラが機能する上でも欠かせないものとなっています。例えば電波や光の行き来で距離を測る場合(GPSカーナビもこの

原理を利用)、1億分の1秒のずれは3mの誤差を生み、また仲介の時計が増えるほど時刻合わせの誤差も増えるため、大元の時計への要求精度は高くなります。産業経済を支える複雑で高精度なシステムでは、計測や制御の信号の周波数が狂ってしまうと正常に動作しなくなり、最悪の場合システムが破綻してしまうかもしれません。日本標準時とその基となる周波数国家標準は、高精度計測・制御の基盤となり、見えないところで最先端技術を支えているのです。

途切れてはならずやり直しもできず、常に正確で高精度な標準時と周波数国家標準を発生し続けることは、大変ですがとても重要な仕事です。私たちの研究室では、標準時の生成から供給までを絶え間なく行うとともに、更なる高精度化と新たなサービス展開に向けた開発を進めています。

日本のタイムスタンプの仕組みを 世界に輸出

「電子文書の原本性保証に必要不可欠なタイムスタンプを、日本は世界に先駆けて制度化・実用化しました。この日本発の仕組みを世界中で活用できるよう標準化活動を行っています。」

岩間 司 (いわま つかさ)

電磁波計測研究所
時空標準研究室 研究マネージャー

本人かなりの引きこもり体質で、土日に家から一步も外へ出ないことがままある。職場でも研究室と実験室にこもっているのを好むのだが、何の因果か毎年 ITU へ出席するためジュネーブへ飛ばされてしまう。しかしジュネーブでも会議以外では…。

● 電子文書に潜む脅威と今回の標準化のポイント

パソコンなどを使って作成するいわゆる電子文書は、何回複製(コピー)しても劣化の心配がなく、対応するソフトウェアさえあれば誰でも同じものを再現できることが大きな利点です。しかしながら、これは見方を変えると、元の文書を改ざんしたり、他人になりすまして文書を作成することも容易にできてしまうという欠点となります。これら電子文書の「改ざん」や「なりすまし」という行為はこれからのネットワークを中心とした情報流通社会においては大きな脅威となっています。

電子文書の改ざんやなりすましを防ぐために有効な手段として電子署名やタイムスタンプがあります。電子署名では「誰が」「何を」作成したかを証明することができ、タイムスタンプでは「い



つ「何を」作成したかを証明できます。そして電子署名とタイムスタンプを併用することにより「いつ」「誰が」「何を」作成したか証明できることとなります(図1)。

電子署名やタイムスタンプ付与の方法は、すでに標準化されており、特に電子署名については日本をはじめ各国で法制化されています。タイムスタンプについては、付与と並んで時刻の信頼性というもう一つの重要なファクタがあります。しかしながら、この信頼性については、協定世界

時(Coordinated Universal Time: UTC)にトレーサブル*¹であることのみが規定されていて、具体的な実現手段は明確ではありませんでした。

● 日本におけるタイムスタンプの制度化

日本におけるタイムスタンプを含むタイムビジネス標準化の動きは2002年1月から6月にかけて複数回行われた総務省主催のタイムビジネス研究会から始まります。この研究会において、日本のタイムビジネスの方向性が示されました。

その後、民間主体のタイムビジネス推進協議会が2002年6月に設立されました。また、NICTは総務省から委託を受け、2003年度から2005年度にかけて「タイムスタンプ・プラットフォーム技術の研究開発」を実施しました。

さらに総務省は2004年11月に「タイムビジネスに係る指針～ネットワークの安心な利用と電子データの安全な長期保存のために～」を公表

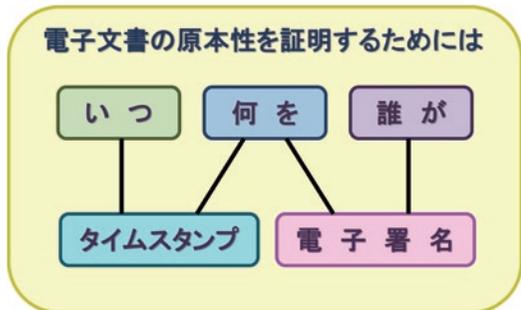


図1 電子文書の原本確保のための技術

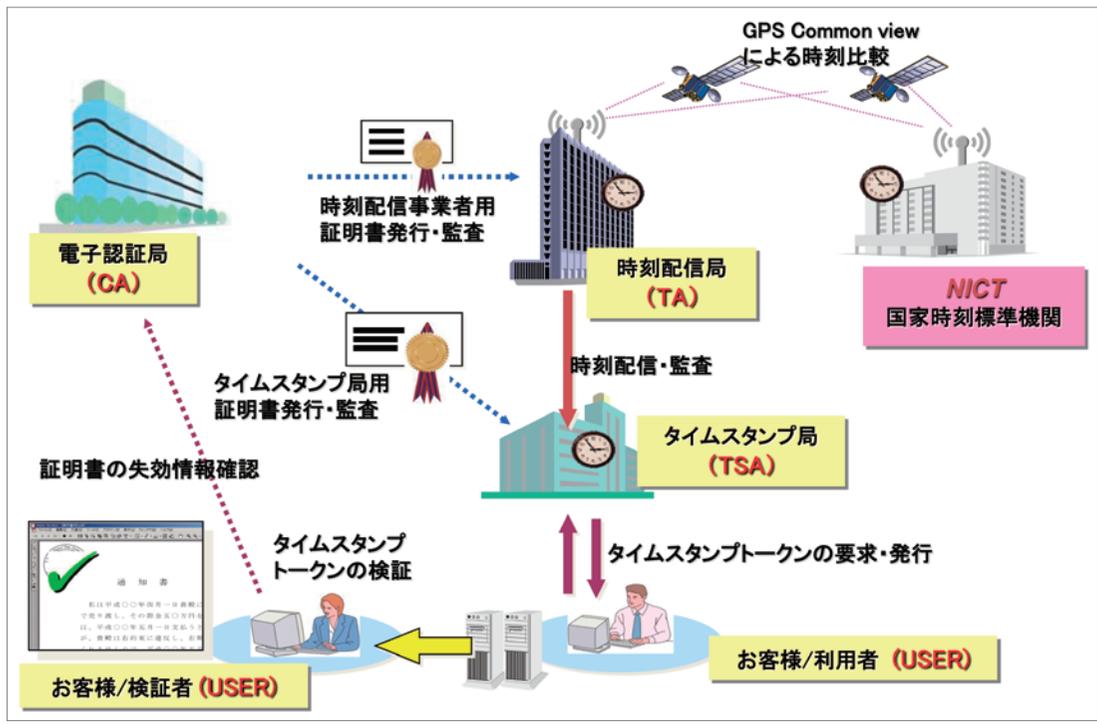


図2 日本のタイムスタンプの仕組み(デジタル署名方式の例)

しました。この指針により2005年2月から日本のタイムスタンプの仕組みを制度化した「タイムビジネス信頼・安心認定制度」が創設されたのです。

● 時刻の信頼性を重視した日本のタイムスタンプ制度

日本のタイムスタンプ認定制度における特徴は、タイムスタンプの根幹となる時刻の信頼性に重きを置いた点です。これまでタイムスタンプに用いる時刻についてはUTCへのトレーサビリティは求められるものの時刻の正確さについての規定はありませんでした。

日本の認定制度では、NICTの標準時と同期した時刻をタイムスタンプ局 (Time Stamping Authority: TSA) などに配信し、かつ、TSAがタイムスタンプに用いる時刻の正確さを監査する第三者機関として、時刻配信局 (Time Authority: TA) を規定しました。これにより、日本のタイムスタンプ制度においてはTSAの信頼できる時刻源の仕組みが明確化されました (図2)。

● ITUにおける勧告化*2への道のり

NICTは日本の標準時に責任を持つ機関として、2000年の国際電気通信連合 科学業務に関する研究委員会 標準時及び標準周波数の通報に関する作業部会 (ITU-R SG7 WP7A) 会合に、タイムスタンプ局が用いる時刻の信頼性をいかにして確保するかを日本からの研究課題として提案しました。この研究課題は、修正のうえITU-R 238/7として採択されました。

2009年9月のITU-R SG7 WP7A会合において前述の日本で実際に制度化されているタイムスタンプ制度の仕組みをNICTが取りまとめ、国内委員会の承認を得たうえで日本からの勧告案として提出しました。提出された勧告案は時機を得た提案として各国から好意的に受け

入れられ、表現の修正などはありませんでしたが、ほぼ日本提案がそのままSG7に送られました。その後、2010年1月にSG7により採択され、この採択を受けITU-Rは直ちに承認手続きに入り、2010年4月に勧告案は勧告ITU-R TF.1876として承認されました。今回の勧告は提案からわずか7カ月という異例の速さで勧告化されたわけです。

● 勧告 ITU-R TF.1876の概要

今回の勧告の主旨は次の4点です。

- ・各国の時刻標準機関は要求される正確さでTSAに各機関のUTC (UTC (k)) を供給しなければならない。
- ・TSAからUTC (k) への時刻のトレーサビリティはタイムアセスメント機関 (Time Assessment Authority: TAA) による連続的なモニタリングで証明されなければならない。
- ・TAAはTSAの用いる時刻が要求される正確さを維持しているかどうか監査する機能も有する。
- ・TAAは各国の時刻標準機関または信頼できる第三者機関が行うべき機能である。

この勧告でTAAという機能を定義付けました。TAAはこれまでのTAを包含する機能であり、より一般化した概念です。ただし、この勧告はTAAという機能について定義しただけですので、今後の補強も求められています。このTAAの概念を導入することにより、日本のタイムスタンプの仕組みを海外に輸出する下地ができました。日本の認定制度においてもTAの機能がTAAに変更になりました (図3)。

● さらなる標準化への動き

このようにITUで勧告化された日本のタイムスタンプの仕組みですが、海外に輸出するためにはさらなる標準化が必要になります。

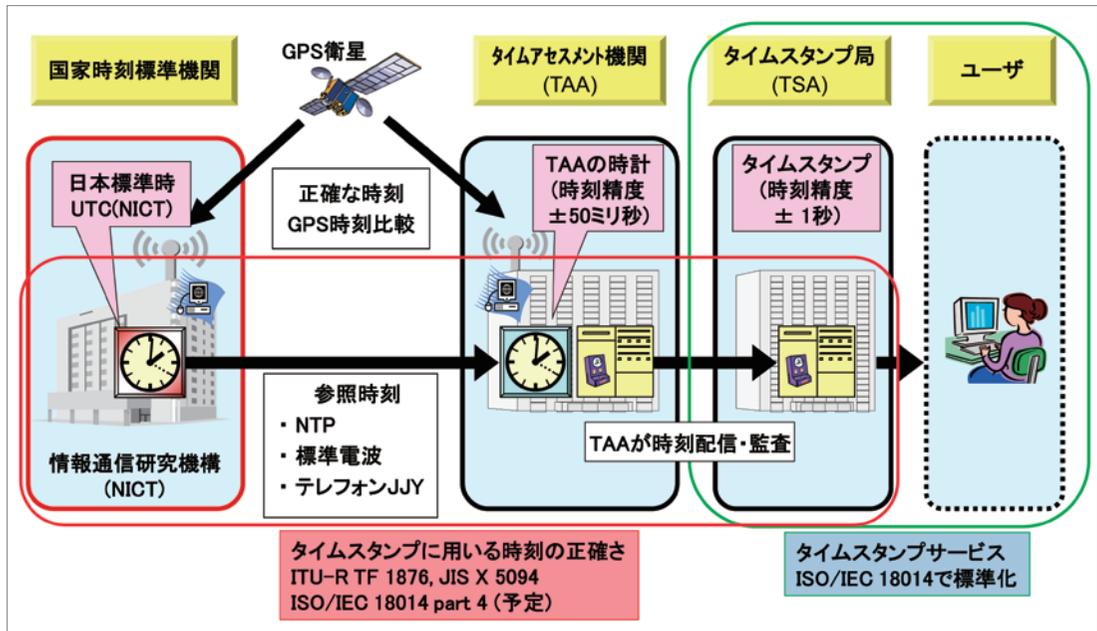


図3 日本のタイムスタンプの仕組みの標準化状況

まず日本の認定制度の運用実績をもとに、ITU-R勧告に認定制度の技術基準の数値を付加して日本工業規格 (JIS) として標準化作業を行い、2011年5月にJIS X 5094 [UTCトレーサビリティ保証のためのタイムアセスメント機関 (TAA) の技術要件] として制定しました。

このJIS X 5094をもとに国際標準化機構 (ISO) において標準化作業に着手しました。

ISOの国内委員会の審査を経てISO/IEC 18014のpart4として2011年6月に作業文書 (WD) を提出、10月のSC27WG2会議の審議を経て、各国からの意見に対処して修正し2012年5月には委員会文書 (CD) に昇格しています。このように現在JISで制定した日本の標準を、ISO/IECの国際標準にするための作業の最中です。

タイムスタンプの付与技術についてはISO/IEC 18014として標準化されていますが、時刻を保証できるシステムとして整備されている国はまだほとんどありません。日本のタイムスタンプの仕組みは世界的にも評価されており、ITUにおける勧告化を足がかりに日本のタイムスタンプ

の仕組みを同じISO/IEC 18014のpart4として世界の標準にするよう今後とも取り組んでいきます。

用語解説

*1 トレーサブル

タイムスタンプで用いる時刻が、正確さと不確かさ込みでUTCまでさかのぼることができること。

*2 ITU 勧告について

ITUでは、電気通信や放送技術に関わるさまざまな国際的な決まりを作っています。ITU-R 勧告は、主にITU-R SGの研究活動の成果として策定され、ITUメンバーステートによって承認された国際技術基準で、分野別にシリーズ化し、番号が付されます。

携帯電話使用と脳腫瘍に関する疫学研究のためのばく露評価

—頭部内の電波吸収への頭部不均質構造の影響—

「携帯電話による電波の生体安全性への関心が高まる中実施された携帯電話使用と脳腫瘍の関係を調べる国際的な疫学研究のために、携帯電話からの電波ばく露により頭部内に生じる電波吸収等のばく露評価を実施しました。」

和氣 加奈子 (わけ かなこ)

電磁波計測研究所

電磁環境研究室 主任研究員

学生の頃に目に見えない電磁波に興味を持ちました。趣味はダイビングのはずですが、ここ10年ほど行けていません。現在は3人の子育てに奮闘中で、子どもが大きくなったら一緒に海に行きたいと思っています。



● 携帯電話使用と脳腫瘍に関する疫学研究

携帯電話の普及に伴い、携帯電話による電波の生体安全性に対する関心が高まっています。その中で、世界保健機関(WHO: World Health Organization)の下部組織である国際がん研究機関(IARC: International Agency of Research on Cancer)の主導により、携帯電話使用と脳腫瘍の関係を調べる国際的な疫学研究(INTERPHONE study: International Case Control Study of Tumors of the Brain and Salivary Glands)が世界13か国共同で実施され、日本もその研究に参加しました。この疫学研究は症例対照研究と呼ばれるもので、脳腫瘍を罹患した方、それらの方々と年齢や性別など様々な条件が一致する健康な方に対して、携帯電話

からのばく露特性を調査し比較しました。携帯電話からのばく露の指標として、携帯電話の使用の有無、使用期間、累積使用時間だけでなく、携帯電話からの電波ばく露により頭部内に生じる電波吸収、すなわち比吸収率(SAR: Specific Absorption Rate[W/kg])が用いられました。

疫学研究のためのばく露評価

携帯電話からのばく露は、端末の近傍で局所的に大きく、離れるに従い急速に小さくなること、携帯電話による頭部 SAR 分布は機種により異なることが知られています。そこで上記の疫学研究では、実際の携帯電話端末に対して適合性試験と同様な方法で均質ファントムを用いて実験的に取得された SAR 分布を用いて、SAR 分布に基づく端末の分類、詳細な頭部モデルにおける3次元分布の推定法の確立を通して、各分類にお

ける均質ファントムからの3次元 SAR 分布の推定および実際に脳腫瘍ができた特定の位置での SAR の推定が行われました。図1にばく露評価の流れを示します。

上記の評価は、携帯電話端末の適合性評価試験と同様な方法で均質ファントムにおいて得られた SAR 分布をもとに行われました。しかし実際の人体頭部は、皮膚、頭蓋骨、筋肉、脳などの様々な組織からなる不均質構造となっています。そこで本研究では、脳における SAR 分布に人体頭部の不均質な構造が及ぼす影響を検討しました。

不均質モデルと均質モデルの比較

まず有限差分時間領域法(FDTD method: Finite Difference Time Domain Method)を用いて、NICT で開発した日本人成人モデル(TARO)の頭部の近傍に金属筐体と1/4波長の

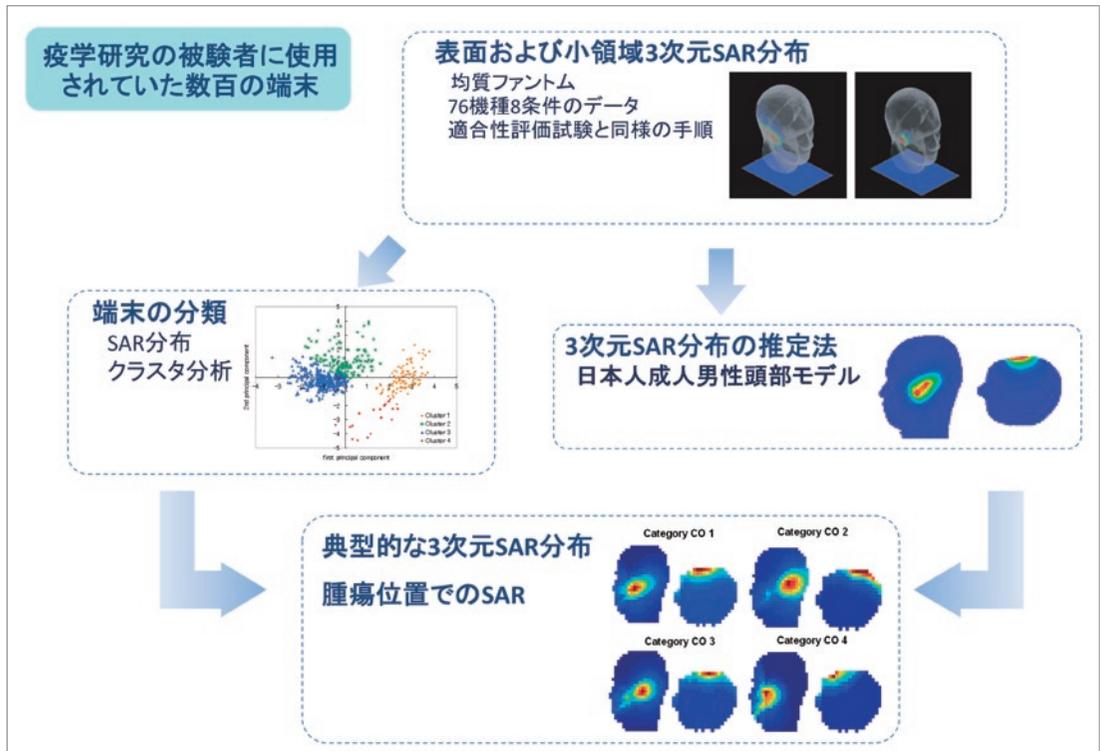


図1 疫学研究におけるばく露評価の流れ

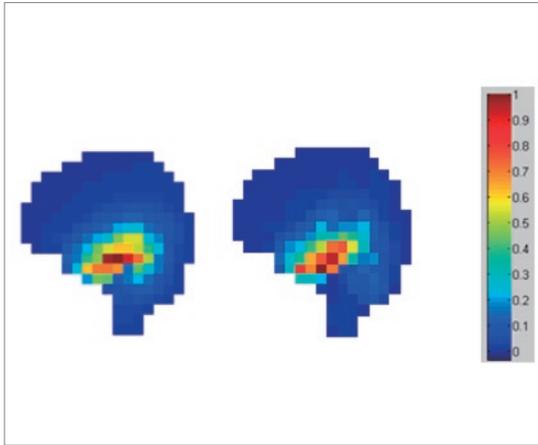


図2 不均質モデル(左)および均質モデル(右) 脳のSAR分布

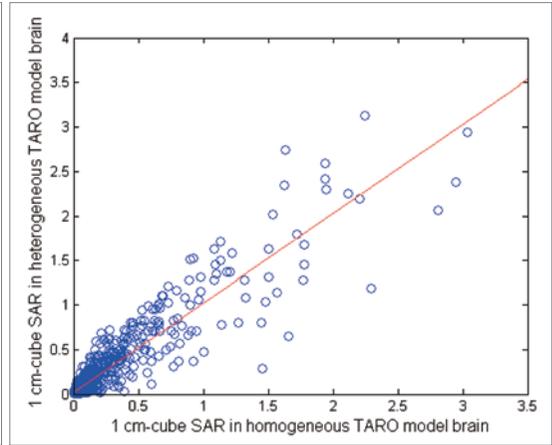


図3 均質モデルと不均質モデルの脳SARの散布図

モノポールアンテナからなる簡易な端末モデルを配置した場合のSAR分布の解析を行いました。頭部モデルを均質とした場合と不均質とした場合とで計算結果を比較しました。頭部モデルの電気定数は、不均質モデルには生体各組織の値を用い、均質モデルは比誘電率 39.425、導電率 0.855 S/m としました。周波数は 835MHz、アンテナの入力電力は 1W としました。

疫学研究では脳腫瘍の同定を 1cm 程度の解像度で行うことを目標としているため、比較はモデルの解像度を 1cm として行いました。図 2 に不均質モデル(左)と均質モデル(右)の脳の SAR 分布を示します。両者の分布は良く似ていることがわかります。不均質モデルと均質モデルにおける脳内の SAR の散布図を図 3 に示します。これより両者には正の相関があることがわかります。両者の SAR の相関係数は 0.93 と計算され、不均質モデルでの脳の SAR は概ね均質モデルのものと同傾向が一致しました。

脳腫瘍は脳のある特定の位置で生じることが多いと言われていています。そこで図 4 に示すように脳を主要な解剖学的位置、すなわち側頭部、頭頂部、前額部、後頭部、小脳、脳幹に分類し、各部位での SAR を不均質モデルと均質モデルとで比較しました。各部位での不均質モデルと均質

モデルの SAR 値の相関係数と回帰係数を表 1 に示します。この結果から、側頭部、頭頂部、前額部で比較的相関が高いことがわかります。脳腫瘍は一般的にこれらの部位で発生することが多いと言われており、端末使用時の SAR は側頭部で比較的大きい傾向があることから、これらの部位で不均質モデルと均質モデルの結果が良く一致するという知見は疫学研究のばく露評価として重要と言えます。

● SAR 解析結果の疫学研究への適用とその後

本研究では、頭部内構造の不均質なモデルと均質なモデルとで端末からの電波にさらされた場合の SAR を比較しました。その結果、脳の SAR は不均質モデルと均質モデルとで相関があり、特に携帯電話使用と脳腫瘍の疫学研究で重要と思われる側頭部、頭頂部、前頭部などにおいては相関が高いことがわかりました。この結果から、実際の人体は不均質な構造をしていますが、均質なファントムを用いて得られた SAR 分布が疫学研究のばく露評価に利用できることを示しました。これを受けて、日本で実施した疫学研究では世界で初めて脳の各部位での SAR を考慮した解析が行われました。2010 年に国際共同

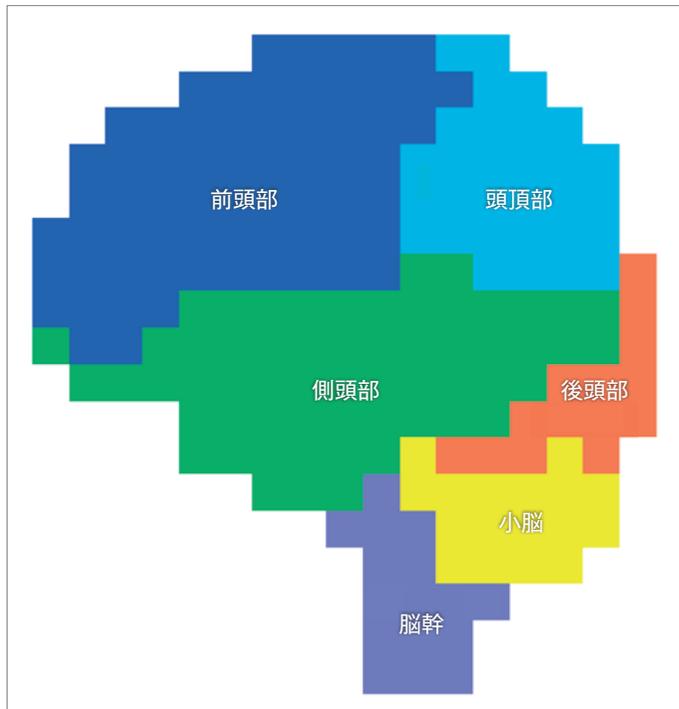


図4 脳の解剖学的構造の模式図

表1 脳の主要部位における不均質および均質モデルのSARの相関係数と回帰係数

	相関係数	回帰係数
側頭部	0.92	0.96
頭頂部	0.95	1.37
前頭部	0.94	1.19
後頭部	0.78	0.43
小脳	0.75	0.55
脳幹	0.23	0.099

研究結果の一部が報告され、全体として(10年以上の利用者に対して)携帯電話の使用による神経腫や髄膜腫の発生リスクの増加は見られなかったものの、累積通話時間が1,640時間以上のサブグループ(1日あたり30分の通話に相当)についてリスク増加が見られましたが、このサブグループについては携帯電話使用時間への回答がありえそうもない時間の場合があったりといった様々な誤差要因を考慮すると、リスク増加があるとは断定できないと結論づけられました。これまでの様々な研究から高周波電磁界の潜在的発がん性について包括的なレビューが2011年IARCにより実施され、高周波電磁界はグループ2B[ヒトに対して発がん性があるかもしれない]と評価しています。今後、WHOにより発がんだけでなくその他の健康影響を含む包括的な高周波電磁界の健康リスク評価が行われ、その後国際的なガイドラインの改定が実施される予定となっています。

電波と光波をつなぐ計測技術

—テラヘルツ波を使うために—

「電磁環境研究室では、近い将来、様々な応用開発が進むと期待されているテラヘルツ波帯(0.1THz～10THz)の電磁波の精密な電力測定や、物質との相互作用の研究をしています。」



福永 香 (ふくなが かおり)

電磁波計測研究所
電磁環境研究室 研究マネージャー

電磁波を使ってモノの劣化や不具合を診断する仕事をしています。電気と化学、科学と文化、日本と西欧など、異分野・異文化をつなぐフィールドワーカーです。



藤井 勝巳 (ふじい かつみ)

電磁波計測研究所
電磁環境研究室 研究マネージャー

中学生のとき、アマチュア無線とアキバに出会い、好きなアンテナはログペリと答えて大学院の面接試験を通過。直流からTHz帯まで、とにかく電波を正しく測りたいメトロロジストです。



水野 麻弥 (みずの まや)

電磁波計測研究所
電磁環境研究室 主任研究員

テラヘルツ波帯の基礎検討をコツコツ行いながら、いつかテラヘルツ波を利用した医学応用を実現したい、と考えているエンジニアです。



登坂 俊英 (とうさか としひで)

電磁波計測研究所
電磁環境研究室 研究員

電磁波の測定から対策まで行います。未知の分野に対して好奇心旺盛で実験好きな研究者です。

● はじめに

電磁環境研究室では、情報通信に用いられる電磁波が、他の目的で用いられる電磁波や電気・電子機器が動作する際に、外にもれ出してしまいう電磁波などと影響を与え合わないよう、電波の環境を守るための測定・評価・対策の研究をしています(図1)。その中でも、未踏周波数と呼ばれるテラヘルツ波帯(0.1THz~10THz)の電磁波は、まだ電力も周波数も国際標準の「ものさし」がありません。そのため発振器(光源)の出力もいわば

自己申告です。それでも実用上は困らないという応用分野も多いですが、それぞれがテラヘルツ波帯を使いたいとなった場合に、相互に影響を及ぼさない環境をつくるため、まず、テラヘルツ波の電力とその減衰量を正確に測ることが必要と考えています。

● テラヘルツ波帯は境界領域

テラヘルツ波帯は光と電波の間の周波数領域にあり(図2)、低周波側(電波側)からはミリ波帯を超える無線通信技術に、高周波側(光側)

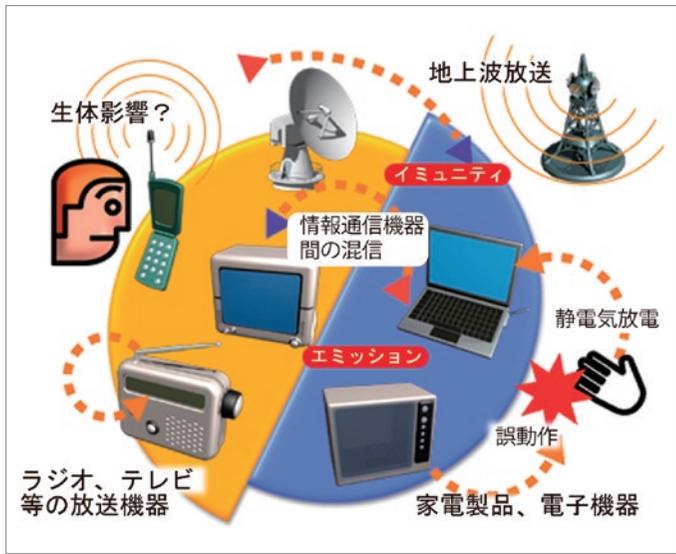


図1 電波の環境を守るための測定・評価・対策の研究の概念図

からは赤外を超える分光技術(特定の周波数の吸収特性から物質の性質を探る手法)として用いられようとしています。学問分野としても、電波と光は別の工学分野と認識され、研究者の情報交換の場である学会も異なることが多いため、その境界は未開拓でした。また周波数帯の使い方も、電波側は、周波数を細かく分配して専有するのに対して、光側の分光技術は周波数を極めて広帯域に使い、物質ごとに吸収しやすい周波数を評価するなど、大きな違いがあります。物理量の単位も周波数、波長、波数が、それぞれの分野で使われており、測定方法も、

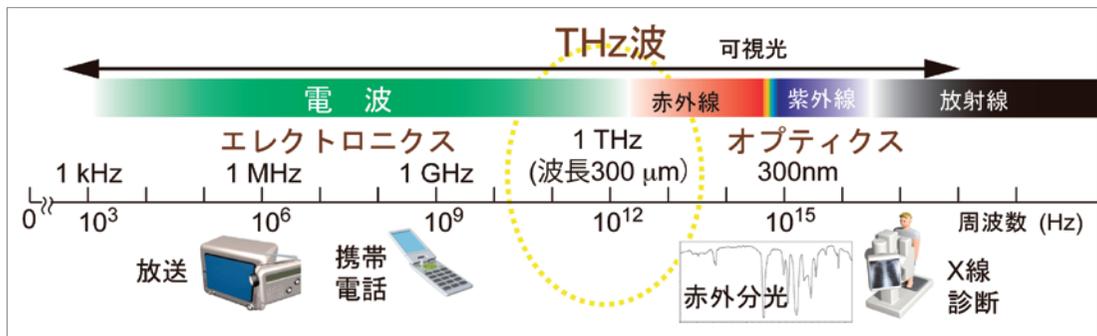


図2 電波と光の間にあるテラヘルツ波

電波側は導波管をつないで測る文化、光側はレンズで集めて測る文化があります。その異なる計測文化を結びつけるのも私たちの仕事です。

● テラヘルツ波を測る

今、無線通信では、60GHz帯が映像伝送や高速データ伝送、70GHz帯が自動車の衝突防止レーダに用いられていますが、情報端末の高性能化にあわせて、ハイビジョン画像のリアルタイム無線伝送など、超高速大容量の情報通信技術が必要とされており、120GHz帯や300GHz帯の無線通信利用の開発が進められています。その周波数帯の通信機器の性能を評価したり、電波を割り当てたり、また、これらの電波によって生じる混信や妨害の低減や、生体への影響の評価のためには、まず、高周波電力を、単に強い・弱いで表すだけでなく、「この無線機からの出力電力は何Wです」と言ったぐあいに、単位を付けて表現できるよう、国際単位系のSI基本単位にトレーサブルな(遡ることができる)測定を正しく行えるようになる必要があります(図3)。また、電力強度の測定可能範囲を拡げるために不可欠な

高周波減衰量標準の開発、空間を飛び交う電波の出入り口であるアンテナの利得や指向性の測定、周波数変換器(ミキサ)の変換損失の測定など、「テラヘルツ波を測る」ために必要な技術の確立を目指し研究開発を行っています。さらに、300GHz帯の無線通信を視野に入れ、電波を空間に発射した際の伝搬モデルの確立や、伝搬路上に存在する壁やプラスチックといった各種材料からの反射や遮蔽・吸収量の評価、電波の絶対強度測定に関する研究開発を行っています。

● テラヘルツ波で測る

電磁波を物質に照射した時の物質固有の吸収特性から材料の特性を探究するのが分光技術です(図4)。従来から用いられている、テラヘルツ波より周波数の高い中赤外領域においては、測定法がマニュアル化され、あらかじめ様々な物質の電磁波に対する応答が集められたデータベースが存在します。そのため何かわからない試料の応答を、データベースと照合して物質が何かを明らかにすることができるなど技術整備が進んでいます。一方、テラヘルツ波帯での分光技術は、

水素結合などの弱い分子間の作用を感度良く捉えることができ、中赤外領域では困難な有機・無機複合体等の特性を評価できると期待されています。しかし、試料の状態や光学系の違いによって取得したデータが異なってしまうなど、まず正確にデータを取得するための手法が未だ確立されていません。そこで、同じ試料を異なる装置で測定し、データを比較したり、値が異なる理由を考察することによって、テラヘルツ分光装置を正しく選び、使うための方法を検討しています。また、様々な



図3 110GHzまでの電力計較正システム
現在、110GHz以上の電力計を較正するためのシステムを開発中。

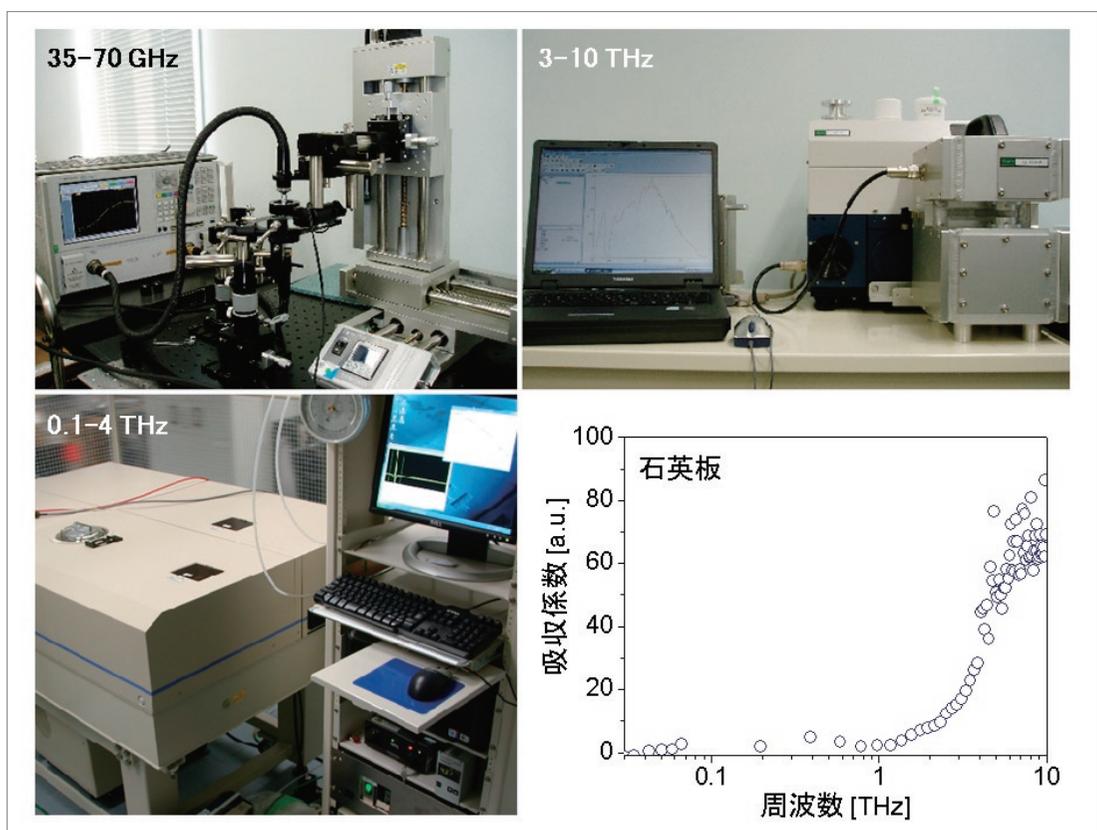


図4 分光システムと測定例

材料の吸収特性をデータベースに構築、その特性がなぜ現れるのかについても、シミュレーション等で検討をはじめています。さらにテラヘルツ波は不透明なモノの内部を壊さずに見るイメージング技術としても実用化が進められていますので、どのくらい小さいものまで見えるか、などの評価も行う予定です。

● まとめ

以上のように、私たちは、様々な応用開発が進むテラヘルツ波帯の電磁波を正しく測れるようになる、という地味ながらも、エンジニアリングの基本中の基本である「測る」という仕事に誇りをもって取り組んでいます。