国立研究開発法人
情報通信研究機構

NICT NEWS

No.451 APR 2015

FEATURE

日本標準時をつくる

NICT NEWS No.451 APR 2015
国立研究開発法人 情報通信研究機構

CONTENTS

1 国立研究開発法人としての出発にあたって
理事長 坂内 正夫

FEATURE

日本標準時をつくる

2 Interview
ICT社会を担う、正確な「時刻と周波数」を提供する
日常生活から最先端科学までを支える技術
花土 ゆう子

6 セシウム原子泉型一次周波数標準器
現在の秒の定義を実現できる唯一の装置
熊谷 基弘

8 空間と時間の計測に活躍するVLBIアンテナ
関戸 衛

10 次世代の周波数標準
半世紀ぶりの転換点にむけて
井戸 哲也

TOPICS

12 平成26年度 NICT Entrepreneurs' Challenge 2Days
「起業家甲子園(1st day)・起業家万博(2nd day)」開催報告

INFORMATION

14 ◇平成28年度 パーマネント研究職員
およびテニュアトラック研究員採用情報

◇ワイヤレス・テクノロジー・パーク2015(WTP2015)
開催のお知らせ

表紙写真
日本標準時計測システム。セシウム原子時計群（別室の原器室で運用）の信号を常時計測し、日本標準時および標準周波数を生成する。信頼性強化のためシステム主要部は3重化され、各部ステータスも常時監視されている。

国立研究開発法人としての出発にあたって

理事長
坂内 正夫

情報通信研究機構（NICT）は、4月1日、国立研究開発法人としてスタートしました。

国立研究開発法人は、世界最高水準の研究開発等を行い、最大の成果を創出することを目的として創設され、NICTは情報通信分野を専門とする唯一の国立研究開発法人として、他の研究開発関連法人とともに、独立行政法人から国立研究開発法人に移行しました。

豊かで安心・安全な社会の実現や我が国の経済成長の原動力である情報通信技術の研究開発を推進する、といった大きな使命が変わるものではありませんが、新たな研究開発法人では研究開発成果の最大化とともに、我が国が抱える多くの社会的問題の解決に向け、研究開発を通し社会に対して、何が、どのような貢献ができるのかを明確にすることが求められます。

そのためには、先を見通した研究開発活動はもちろん、オープンイノベーション拠点としての活動が重要な課題です。公的な研究機関として、企業、大学、他の研究機関等とよく連携し、それぞれが得意とする技術を持ち寄ることで、新たな価値を創造していく、このような研究拠点を形成、発展させていくことがNICTの大きな使命であると思っています。その際、産業融合をキーワードとして、防災、農業、交通、インフラなどの様々な分野と情報通信分野の融合を通して新たな価値を創造することも重要です。NICTでは、ビッグデータ、センサシステム等を含むICTを集結して社会貢献型の技術を醸成していくソーシャルICTとしてのイノベーション拠点を作り、これらの活動を通して産学官の連携の輪ができつつあります。

また、グローバルな展開が前提である情報通信分野の研究開発活動においては、我が国がリーダーシップを発揮していくことが重要であり、その一翼を担うNICTとしても、常にグローバルな視点での活動が必要です。そのため、グローバルアライアンスの戦略的な展開を進めており、日米、日欧での共同研究開発の推進に加え、ASEAN地域では研究開発機関との研究連携組織を設立し多国間での国際連携プロジェクトの形成など、グローバルな活動を有効に推進していく考えです。

我が国の情報通信分野における研究開発の方向性については、総務省等政府においても活発に議論されているところです。NICTでもこれらの議論を踏まえ、中長期的な視点で、我が国の情報通信分野の研究開発を牽引していくとともに、その活動を通して広く社会に貢献していく所存ですので、引き続きのご理解、ご協力をよろしくお願い申し上げます。

INTERVIEW

ICT社会を担う、正確な「時刻と周波数」を提供する

日常生活から最先端科学までを支える技術

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

大学院修士課程修了後、1989年に郵政省通信総合研究所（現NICT）入所。宇宙電波観測、標準時関連、原子時系構築などの研究と業務に従事。博士（工学）。

今年7月1日、3年振りに「閏（うるう）秒」が入る。世界中で一斉に行われる閏秒挿入の作業。日本でこの業務を行っているのは、NICT電磁波計測研究所 時空標準研究室。ネット時代にあって、正確な時刻を刻む役割はさらに重要なものになってきている。日本の標準時、世界の標準時がどのようにつくられ、精度の高い時刻のサービスがどのように行われているのかについて、同研究室の花土ゆう子室長にお話を伺った。

■標準時の元は原子時計

――時間というと、普段私たちは、もう起きる時間だ、とか、そういう形で気にするだけで、時間そのものが何であるかを意識することはあまりないのですが、正確な時間はどのように得られているのでしょうか？

花土　昔は地球の自転を基に1日を決め、それを細分割して1秒の長さとしていました。ところが20世紀中頃以降の観測技術の向上につれ、地球の自転速度が実はさほど安定していないことがわかってきたのです。より正確な「1秒」を得るために、1967年にセシウム（Cs）原子の遷移周波数を基に時間の長さを定めることとなりました。「1秒は、セシウム133の原子の基底状態の2つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の周期の9,192,631,770倍の継続時間である」という定義です。これは、時間の定義が天文観測結果から離れた歴史的な転換でした。地球の自転に基づく1秒の精度は8桁程度でしたが、セシウム原子の遷移周波数に基づく1秒は15桁以上の精度を実現できます。この正確な周波数を実現するのがセシウム原子時計という装置です。

■正確な1秒をつくる セシウム一次周波数標準器

――原子時計とはどのような装置なのですか？

花土　原子時計とは、原子の特定の遷移周波数を取り出せる装置です。正確な周波数を取り出すためには原子の状態を極限まで安定化する必要があるため、真空技術、量子エレクトロニクス技術、超高安定レーザー技術等、先端技術の粋の結集で実現できる装置です。原子時計と呼ばれていますが、実際の機能としては特定の周波数を正確に発振する装置で（時刻は特に刻みません）、周波数標準器とも呼ばれています。特に、秒の定義の基になる周波数を実現できる装置を一次周波数標準器と呼んでいます。

■標準時の作り方

――セシウム一次周波数標準器が標準時の基になっているのですか？

花土　世界の標準時は、少し複雑な仕組みで作られています（図1）。まず初めに、世界中の原子時計データを加重平均した安定度の高い「自由原子時」（EAL: Echelle Atomique Libre）という合成原子時が作られます。EALには、現在NICTのセシウム原子時計も含めて世界中で400台以上の時計が参加しています。このEALに、一次周波数標準器による正確な周波数校正をかけたものが、標準時の基となる「国際原子時」（TAI: International Atomic Time）という時系です。個々の原子時計のふらつきがならされたEALで連続性と安定度を維持し、

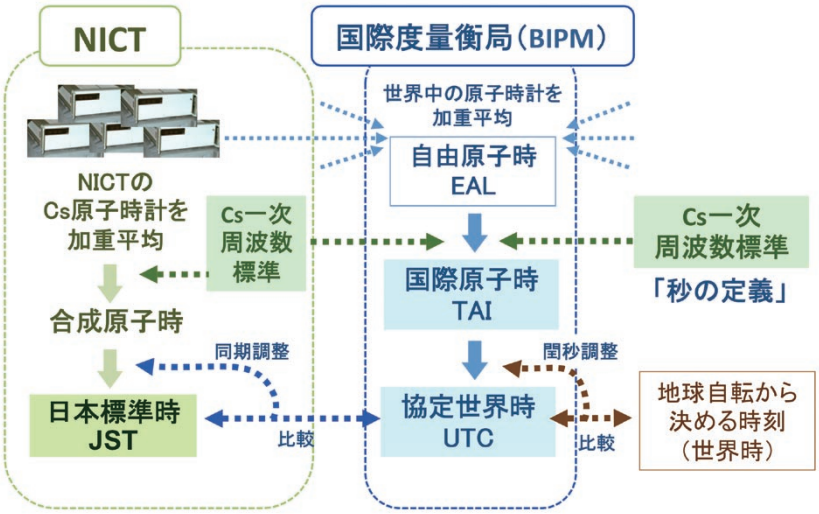


図1　標準時の作られる仕組み

一次周波数標準器で1秒の長さを校正することで、安定で正確なTAIが得られる仕組みです。

一次周波数標準器は研究機関で開発されていますが、現在運用されているものは世界で10数台しかありません。NICTはそのうちの1台である「NICT-CsF1」を独自開発し運用しています（図2）。フランスにある国際度量衡局（BIPM）という国際機関が、毎月1回、世界中からEALの基になる原子時計データ及び一次周波数標準器のデータを集めて、TAIを計算しています。

■協定世界時

――たくさんの原子時計から作られるTAIが世界の標準時なのでしょうか？

花土　いえ、世界の標準時を決めるには、実はもう1ステップあります。地球で暮らす人間にとっては、地球の自転＝太陽の動きに応じた時間（世界時）も非常に重要です。でも原子時計の刻みは地球の自転にはおかまいなしに進んでしまう。原子時と世界時の間には、ずれが生じることになるわけです。そこで、1秒の長さは原子時に従うが、世界時とのずれが積算され1秒を超えそうになったら、時刻だけを1秒調整するという時系が作られました。これが「協定世界時」（UTC: Coordinated Universal Time）という時系です。現在世界の標準時として使われているのは、このUTCです。

この調整のために加減される1秒が「閏秒」です。ただ自転速度の変動が予測できないので、いつ閏秒調整を行うかは、地球回転の観測結果を見ながら半年ごとに決定されています。お聞きになっているかもしれませんが、今度の7月1日に3年ぶりの閏秒調整が入ります。

図2　原子泉型セシウム一次周波数標準器 NICT-CsF1

――標準時の決め方には、原子時計だけではなく地球の自転も絡んでいるんですね。

■地球自転の計測

――自転の計測も精密さが必要になりますね。

花土　昔は、子午線観測を基に1日の長さを決めていました。太陽が天頂を通過してから次に通過するまでを1日とする方法です（実際には太陽ではなく恒星を観測していました）。超長基線電波干渉法（VLBI: Very Long Baseline Interferometry）と呼ばれる宇宙測地技術の開発により、1970年代から地球回転の計測精度が飛躍的に向上しました。このおかげで、自転速度の変化だけでなく自転軸のふらつきも高精度に検出できるようになりました。

VLBIでは、遠く離れた電波星（クェーサー）の信号を離れた電波望遠鏡で受信し、その到着時刻の差を距離に換算することで、観測局間の距離を求めたり、電波星に対する相対位置を求めたりすることができます。原子時計の実現で離れた局での到着時刻を精密に比べることができるようになり初めて可能になった技術です。1回の観測精度は子午線観測のおよそ1,000倍ですが、観測に使える電波星が子午線観測の場合よりも少ないため、総合的には2桁程度の精度向上となります。

NICT鹿島宇宙技術センターは、実は日本におけるVLBI技術発祥の地であり、

INTERVIEW

ICT社会を担う、正確な「時刻と周波数」を提供する

日常生活から最先端科学までを支える技術

図3　VLBI観測で活躍する鹿島34m径アンテナ

30年近くに亘り観測が行われています。鹿島のVLBI観測データも地球回転の国際観測網の中で貢献しています（図3）。

■各国の標準時

――日本の標準時も協定世界時なのですか？

花土　協定世界時は経度ゼロでの時刻なので、経度が15度ずれるごとに1時間の時差が生じます。各国は、ほぼこの経度による時差をUTCに加えたものを、その国の標準時として採用しています。日本標準時は、東経135度（ちょうど明石市がありますね）に対応する9時間の時差をUTCに加えています。

実は、TAIやUTC自身は「今何時？」の時刻合わせには使えません。なぜなら、今月のTAIやUTCが計算されるのは来月で、また計算結果も5日ごとの飛び飛びで数値のみのバーチャル時系だからです。そのため技術の進んだ国の標準機関は、「今何時？」に応えられる、リアルタイムで連続で実体のある標準時を自前で用意して供給しています。

■NICTの活動

――日本ではNICTがその役割をしているのですね。

花土　はい。NICT本部（東京都小金井市）では18台のセシウム原子時計が動いており（図4）、その合成原子時の周波数をカウントアップし、UTC+9時間のタイムラベルをつけて、日本標準時という名称で供給しています。UTCとの時刻比較やTAIへの参加には国際リンクが必要なので、衛星を仲介とする高精度な時刻比較を定常的に行っています。10億分の1秒以下の高精度な比較です。

日本標準時は、いろいろなサービスで全国に供給されています。まず長波帯の標準電波として、福島の送信所（40kHz）と九州の送信所（60kHz）の2か所から全国に送信されています。電波時計はこの電波を受信して時刻合わせをします。また電話回線による時刻提供（テレホンJJY）もあり、こちらは通信キャリアや放送局などで利用頂いています。そのほか、ネットワーク経由で時刻合わせできるNTPサービス、電子商取引等で使われるタイムビジネスサー

図4　日本標準時のもととなるセシウム原子時計群

図5　閏秒挿入の瞬間を待つ来場者と本館正面時計での表示（2012年7月1日）

図6　衛星双方向周波数比較用アンテナ群（NICT本部2号館屋上）

ビスへの時刻情報提供、また周波数国家標準を用いた周波数校正サービス等も行っています。

■閏秒対応での注意

――これらのサービスにおいても閏秒調整が入りますか？

花土　はい。今回は閏秒の挿入なので、NICTでは日本時間の8時59分59秒の後にすべての時刻供給サービスにおいて1秒を追加します。このタイミングでの時刻表示の仕方は時計によっていろいろですが、NICT本部の本館壁面の時計では一般には表示されない「60秒」が表示されます（図5）。

サービス信号の送信側では着実に閏秒挿入を行いますが、受信側においても注意が必要です。例えば、電波時計などで時刻合わせが定時に設定されている場合、閏秒当日に時刻合わせをするタイミングまでは1秒ずれたままになります。また種々のシステムで動いている制御プログラム等が閏秒挿入で誤動作しないかどうかの確認も必要かもしれません。使用している機器がどのような手段で、またどのタイミングで時刻合わせをしているかを、事前にご確認いただくと安心と思います。

■将来に向けて

――最後に、将来に向けた活動についてお聞かせください。

花土　日本標準時に関しては、信頼性強化のために標準時の分散構築を進めています。これは、各地におかれた原子時計を合成して日本標準時を作る試みで、1局目を未来ICT研究所（兵庫県神戸市）に準備中です。また新しい時刻供給技術の開発や、未開拓な周波数領域（THz）に周波数の物差しを確立するための技術開発も進めています。

これらは実利用に近い技術の開発ですが、並行して、超高精度を目指す技術の研究も進めています。まず次世代の原子時計として、秒の定義を書き換えるかもしれない光周波数標準を開発中です。「秒」は、7つの計量単位の中でも突出して高精度な単位です。例えば他の独立した単位の正確さは良くて8桁程度ですが、秒では16桁の精度に達しています。光周波数標準を用いれば、さらに2～3桁の向上が見込まれます。ただ、このような高精度周波数標準器も孤立していたら宝の持ち腐れです。周波数標準を世界中で共通に利用するには、高精度な比較・伝送技術も不可欠なのです。周波数標準そのものの開発力と比較伝送技術の双方で世界トップクラスの実力を持つ研究所は世界でも数少なく、これがNICTの大きな強みです（図6、7）。NICTでは、衛星を仲介とする比較技術において世界最高の精度を実証するとともに、VLBI技術を周波数比較に応用した新手法においても、世界に先駆けた技術開発を進めています。

私たちの活動は、正確な時刻と周波数を、作って測って供給する仕事です。正確な時間と周波数は社会基盤を支える重要な情報であり、基盤インフラ技術への貢献は私たちの大事な使命の1つです。さらにもう1つ、最先端技術開発における役割があります。原子時計の実現により高精度計測への窓が開きました。要素技術の研鑽が計測精度限界のブレークスルーにつながるのです。VLBIもGPSも、原子時計の開発がなければ実現しなかった技術ですし、閏秒も原子時計による標準時と今やVLBIが主役の地球回転観測の協調の賜物です。数千万年に1秒しかずれない時計なんて必要性がぴんとこないなぁと思うかもしれませんが、日常の便利な生活の根っこ、宇宙開発ってすごいなぁと感心したりする話の根っこには、高精度な時間と周波数の技術が隠れていることを知っておいて頂けると、大変うれしく思います。

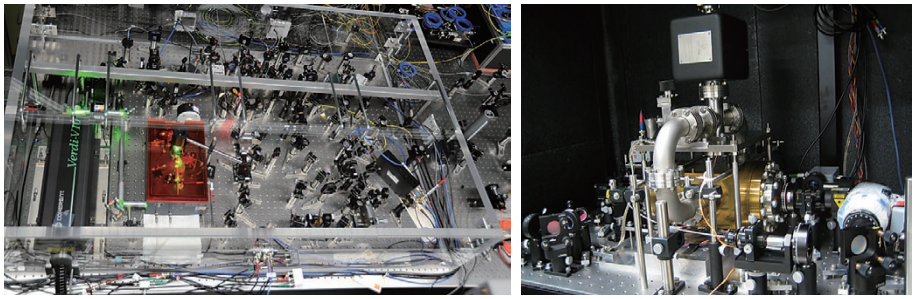


図7　超高精度光計測の要となる装置（左：光周波数コム、右：狭線幅レーザー光源）

セシウム原子泉型一次周波数標準器

現在の秒の定義を実現できる唯一の装置

熊谷 基弘（くまがい もとひろ）
電磁波計測研究所
時空標準研究室
主任研究員

大学院博士課程修了後、2000年に郵政省通信総合研究所（現NICT）に入所。以来、一次周波数標準器開発や光ファイバ経由での基準信号配信など周波数標準の研究に従事。博士（理学）。

原子時計とは、原子・分子またはイオンが持つ離散的エネルギー間隔は（基礎物理定数が変化しない限り）一定不変である、という原理に基づき、原子が発するスペクトルを周波数基準として利用している装置です。アイデアは20世紀前半に提唱されていましたが、実際に実現されたのは20世紀半ばで、最初のセシウム（Cs）原子時計が英国で開発されたのは1955年です。セシウム原子時計を使うと、天文観測に比べ短時間ではるかに高精度（当時の性能で約100億分の1）の計測が可能であることが実証され、1967年に秒の定義がセシウム原子の遷移周波数に基づく表記に変更されました。

■一次周波数標準器の原理

秒の定義はたった一文で表わされますが（本誌p.2参照）、この表現の裏には「絶対零度（0 K）、外部磁場も外部電場もなく、重力の影響もない状況下で、他の原子や分子との衝突もなく、静止しているセシウム原子において」という前提が隠されています。しかし実際の実験系では、このような状態下で信号を観測することはできません。セシウム原子の共鳴周波数は外部環境に応じたシフトを被ってしまいますが、この周波数シフトを定量的に評価し補正できるように設計された特別な装置が「一次周波数標準器（Primary Frequency Standard）」です。

■NICTにおける一次周波数標準器開発の歴史

一次周波数標準器の性能は、どれだけ共鳴周波数からのずれが小さい（=線幅の狭い）信号を原子から取り出せるかに大きく依存します。電磁波を当てられる時間が長いほど狭い線幅の信号が観測できますが、動く原子に電磁波を当て続けるのは難しく、そこで発明された手法がラムゼー共鳴[*1]です。原子に適正な条件で短く2回電磁波を当てると、長時間照射と同じ効果が得られるという手法で、照射時間間隔の逆数が共鳴信号の線幅となります。この画期的な手法は現在もセシウム一次周波数標準器のコア技術となっています。

最初のセシウム一次周波数標準器は、熱したセシウム原子を水平に飛ばし、飛行経路の2カ所に置いた共振器で電磁波を照射し、ラムゼー共鳴によって状態変化した原子を磁石で選別する熱ビーム磁気選別型でした。熱ビーム型はその後、磁力による状態選別ではなくレーザー光を用いる熱ビーム光励起型に移行し、原子泉型登場までの主役となりました。NICTでも磁気選別型（CRL-Cs1）・光励起型（CRL-O1→NICT-O1（図1）、～2006）を開発し、国際原子時（TAI）構築に参加しました。

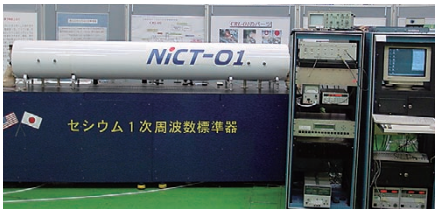


図1　NICT-O1

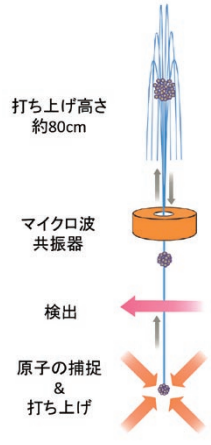


図2　原子泉型一次周波数標準器の概略図

*1　**ラムゼー共鳴：**ノーマン・ラムゼー博士によって発見。原子に電磁波を2回照射する際、原子の状態が変わらなければ電磁波を当て続けた時と似た振る舞いをする物理現象。1989年のノーベル賞受賞技術。

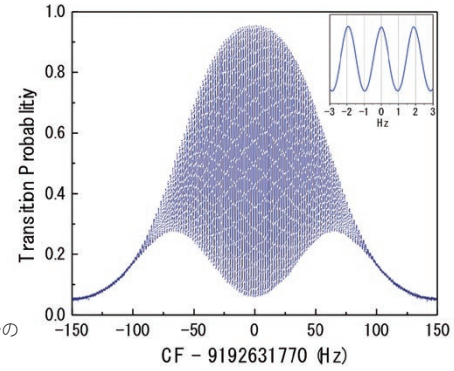


図3　観測されたラムゼー信号
フリンジパターンの中心周波数が秒の定義の基準として利用される。

■原子泉型一次周波数標準器

熱ビーム型は原子速度が毎秒200mと速いため、時間間隔を空けるにも限度があるという本質的な問題がありました。そこで登場したのがレーザー冷却[*2]を使う原子泉型です。原子泉型では、まずレーザー冷却によりセシウム原子を1か所に捕獲し数μKの極低温まで冷却します。捕獲されたセシウム原子集団をレーザー光の輻射力で垂直に打ち上げると、重力によりその後落下します。この経路の途中に共振器を設置すれば、セシウム原子が共振器を通過する際、上昇時・下降時の2回電磁波が当たることになり、ここでラムゼー共鳴が起こります。この方式は、打ち上げられる原子の様子が「泉」に似ているため、「Atomic Fountain」（原子泉）」と呼ばれており、熱ビーム型に比べると電磁波を当てる間隔を長く取れるため、現在のセシウム一次周波数標準器の主流となっています(図2)。

■NICT-CsF1/CsF2

一次周波数標準器は、考えうる全ての周波数シフトを評価できる構造でなければならなく、具体的なシステムの考案と設計は開発者の裁量次第です。また、設計案を使える装置として実現するには、真空技術、レーザー技術、制御技術など、数多くの先端要素技術を高いレベルで融合させる必要があります。時空標準研究室では、熱ビーム型の次世代機として、原子泉型一次周波数標準器を独自の設計で開発しました。プロトタイプ（NICT本部の展示室にて公開中）を用いて課題と問題点を洗い出し、数々の設計変更と試行錯誤のすえ完成したのがNICT-CsF1です（本誌p.3 図2）。原子泉型の動作原理を実現させた上で線幅1Hz以下のラムゼー信号を観測し（図3）、10項目以上の周波数シフト要因を厳密に評価し、「2000万年運用してずれが1秒以下」という正確さを実現しています。NICT-CsF1は、一次周波数標準器ワーキンググループ（世界の主要標準機関の専門家で構成）による審査を世界で初めて受けた標準器であり、2006年よりTAIの校正に貢献できる一次周波数標準器として国際認証を得ています。

また更なる精度向上を目指して、新型2号機CsF2の開発も進めています（図4）。CsF2はCsF1とは異なるレーザー冷却の方法を採用しており、1桁近く正確さが向上する予定です。2台体制になることで稼働効率が上がると共に、CsF1とCsF2の相互比較により互いの周波数シフト要因の精査が可能となり、更なる正確さの向上が期待されます。

■今後の展望

セシウム原子の時計遷移は世界一調べられている遷移と言っても過言ではなく、現在も評価すべき周波数シフト項目は増えています（表1）。新たな周波数シフト要因が提言された際には、そのシフト量を定量的に評価できるようにシステムに改良を加える必要があります。我々も新たなシフト要因に対応すべく装置の改良を随時行っており、正確さの更なる向上を目指していきます。

表1　評価しなくてはならない周波数シフト要因（2015年4月現在）

周波数シフト要因
二次ゼーマン
衝突
黒体輻射
重力ポテンシャル
マイクロ波リーク
マイクロ波純度
共振器引っ張り
ラビ引っ張り
ラムゼー引っ張り
光シュタルク
共振器位相分布
二次ドップラー
マイクロ波レンズ効果
マヨラナ遷移
残留ガス

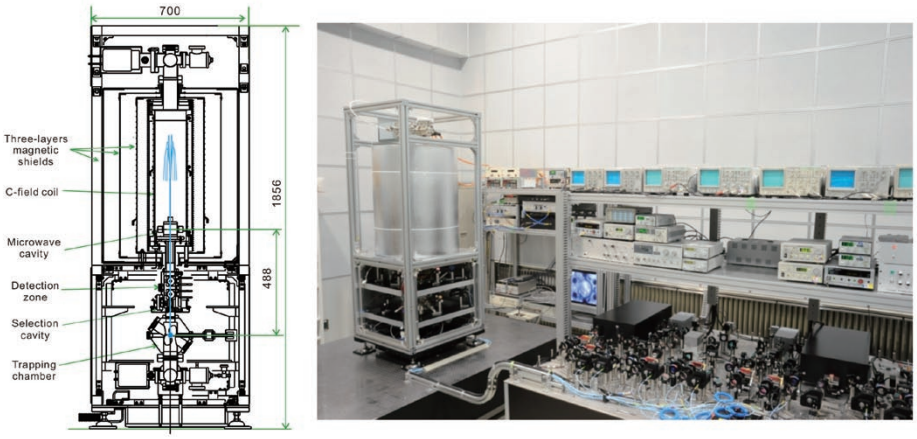


図4　（左）NICT-CsF2本体の断面図、（右）NICT-CsF2システム
右図の左側は真空装置本体、右側は原子捕獲、打ち上げ、検出を行う光学系。レーザー光は光ファイバ経由で送られている。本体奥はマイクロ波シンセサイザーなど。

＊2　**レーザー冷却**：原子に直交する6方向からレーザー光を照射し、レーザーの輻射力により原子の動きを止める方法。1997年のノーベル賞受賞技術。

空間と時間の計測に活躍する VLBIアンテナ

関戸 衛（せきど まもる）
電磁波計測研究所
時空標準研究室
副室長

大学院修士課程修了後、1991年に郵政省通信総合研究所（現NICT）入所。VLBI相関処理技術、パルサーのVLBI観測、高速ネットワークを使ったe-VLBI技術などの研究に従事。博士（学術）。

いまやGPSに代表される宇宙測地技術は日常生活の中で測量や位置の基準として使用されています。その基礎となる地球と天球の基準座標系を支えているのが、VLBI[*1]やSLR[*2]などの宇宙測地技術であることはあまり普段意識されていないでしょう。VLBIは各国の研究機関が協力して観測を行い、ミリメートル精度で地球の基準座標系を決める役割を果たしています。

■VLBIの紹介

世界中の時計を1秒ずらす「閏（うるう）秒」が今年7月1日にも予定されています。これは地球の自転を基準にした時間（UT1）と原子時計で刻む時間に生じたずれを補正するためのものですが、VLBIは現在の技術で地球の自転を長期に安定して計測できる最良の方法です。

空間を精密に測るだけでなく、VLBIは遠く離れた原子時計の進み方の差を比較することにも応用できます。現在私たちのグループでは、VLBIの新しい応用として遠隔地の原子時計の周波数差を精密に比較する技術の開発を進めています。

VLBIとは、それぞれ独立な原子時計を基準周波数源とする複数のアンテナで天体の電波を受信し、その信号を干渉させる技術です。干渉とは波が重なったときに強めあったり弱めあったりする現象のことです。電波天文学では電波が波である性質を利用して、同時に複数のアンテナで受信した信号を干渉させ、天体観測の解像度を上げる電波干渉計という手法が使われます。観測するアンテナ間の距離を離すことで観測の解像度が向上しますが、信号を干渉させるためには波の位相情報を記録する必要があり、そのために共通の基準周波数を各アンテナに供給しなければなりません。したがって基準周波数の信号を送るケーブルの長さでアンテナ間の距離は制限され、解像度を上げる限界となっていました。VLBIは、極めて安定度の高い水素メーザ型原子時計をそれぞれの場所で周波数源とすることで、各アンテナ間をケーブルでつなぐ必要がなくなり、大陸間でも、宇宙に飛ばした衛星との間でも電波干渉計を構成する観測ができるようになりました。これは、精密な原子時計の進歩とデジタル技術が融合して実現されたものです。

VLBIはハッブル宇宙望遠鏡よりも100倍以上高い解像度を実現する人類最高の“視力”を持った電波天文学の観測技術であり、また大陸間の距離や地球の回転の精密計測（測地学）、惑星探査機などの精密軌道決定にも利用されています。

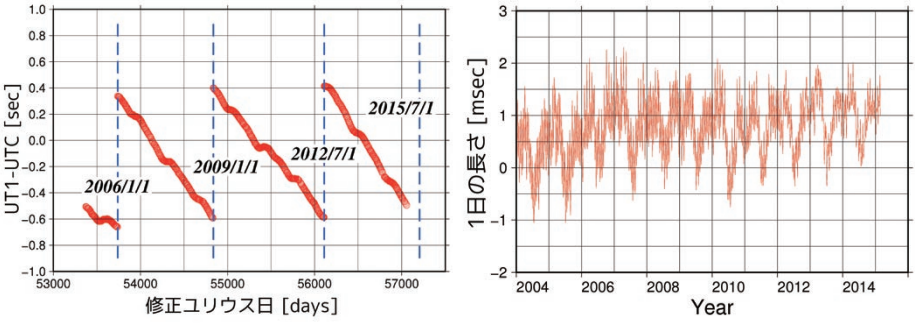
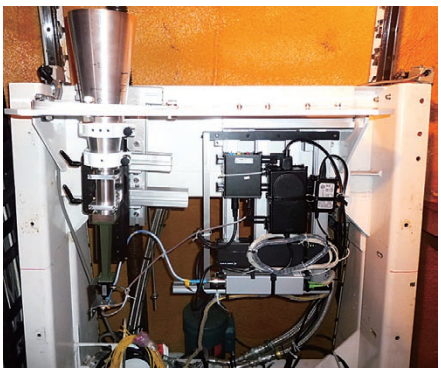


図1　閏秒調整と1日の長さの変動
地球の自転を基準とした時間UT1と協定世界時UTCの差が1秒以下となるように閏秒調整を実施（左）。1日の長さは絶えず予測困難な変動をしており（右）、地球の自転角（＝UT1）を観測により測定する必要がある。

＊1　**VLBI**：Very Long Baseline Interferometry　超長基線電波干渉法
＊2　**SLR**：Satellite Laser Ranging　衛星レーザ測距



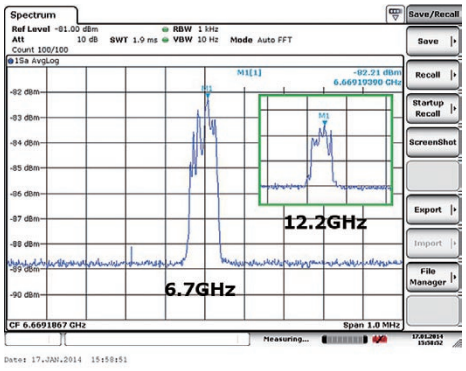


図3　34mアンテナに搭載した広帯域フィード（左）と、これを使って同時受信に成功した、天体W3OHからの6.7GHz, 12.2GHzメタノールメーザ放射（右）

■NICTのVLBIの軌跡

郵政省電波研究所鹿島支所（現NICT鹿島宇宙技術センター）は、日本におけるVLBI技術が生まれた場所です。当時の電波研究所が衛星通信で培った受信機技術、大型パラボラアンテナ、日本標準時の原子時計技術を融合してVLBIが実現しました。NICTの培った技術や人材は、国立天文台の電波天文観測、JAXA宇宙科学研究所の深宇宙探査機のVLBI観測を支え、また国土地理院の測地観測や民間衛星事業者の静止衛星の軌道制御などに活躍しています。世界初の南極VLBI観測や、大陸移動の検出などの過去の実績だけでなく、NICTが開発したVLBI観測システムは現在国内外の観測所で使用されており、後述する新しい広帯域VLBIの技術開発でも先導的な役割を果たしています。

■新たな技術応用：広帯域VLBIによる遠隔周波数比較

各国の原子時計の周波数を精密に比較することは、協定世界時UTCの維持や新しい「秒の定義」の開発にとって重要です。VLBIは一度の観測で地球上の複数の地点の時計の差を同時に比較でき、衛星の軌道情報に依存しないなど、従来の方法にはない利点を持っています。私たちは広帯域の信号を取得する新しい技術によって、大型アンテナを中継して安価で移設可能な小口径アンテナ同士の周波数比較を実現しています。実証実験とし、直径1.6mの小型アンテナを産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ、茨城県つくば市）とNICT本部（東京都小金井市）に設置し、それぞれの持つ原子時計の比較実験を実施しています（図2）。

また、広帯域観測技術開発の一環として、従来困難であったビームの細い広帯域の受信機フィード（図3）を独自設計で開発し、これを搭載した34mアンテナは6.5–14GHzの連続した周波数が観測可能な世界で最も大きなパラボラアンテナとなりました。広帯域の受信機能は電波天文学にとっても大きな魅力となっています。星が生まれる宇宙空間にはアルコールの一種であるメタノール分子が存在し、6.7GHzと12.2GHzの2つの周波数で自然のメーザ放射[*3]をしていることが知られています。新しい広帯域受信機を搭載した34mアンテナはこの約1オクターブ離れた周波数の信号を同時に観測することに成功し（図3）、これまでにない方法で星の進化について解明が進むと期待されています。

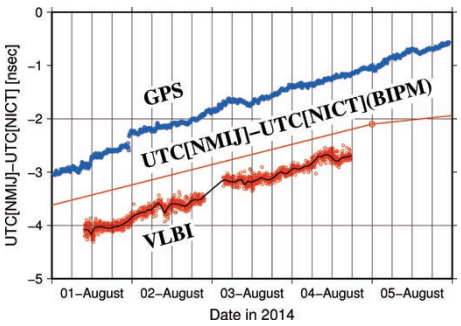


図2　NMIJとNICTに設置した小型アンテナを使い、8GHzの周波数で計測したUTC[NMIJ] -UTC[NICT]の比較結果

■世界初となる超広帯域観測の成功

広帯域観測といっても、個別に1GHz幅の信号を取得するだけでは、計測の精度はそれほど向上しません。広帯域で信号の位相を合成することにより、遅延の計測精度は劇的に向上します。しかし、数GHz以上周波数の離れた信号を波として合成することは大変困難な課題です。なぜなら従来のデータ取得の方法では帯域ごとに異なる信号経路で周波数変換をし、それぞれの帯域ごとにサンプラーを使用していたため、信号間のタイミングや振幅を一様にすることが困難でした。そこで私たちは、信号の分割や周波数変換をすることなく、高速のA/D変換器を使って高い周波数を持つ電波の信号をそのまま直接サンプリングできる「ダイレクトサンプリング」という新しいデータ取得方式を採用し、観測装置による信号のバラツキを低減しました。2015年1月に行った試験観測では、世界初となる8GHz幅の超広帯域の位相合成に成功しました（図4）。この結果の理論的な遅延計測精度は60フェムト秒（光が約20ミクロン進む時間）という極めて高い計測精度です。この新しい超広帯域観測を使った計測法の精度を検証し、NICT–NMIJを皮切りに、今後、世界の原子時計の比較実証実験を行っていきます。

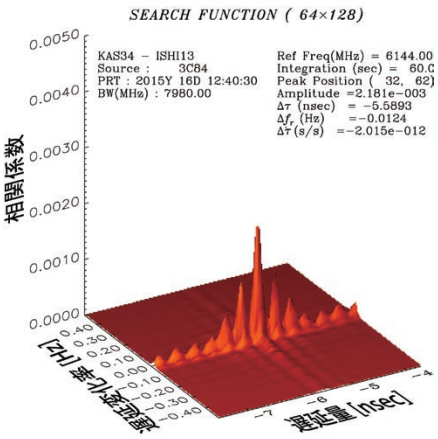
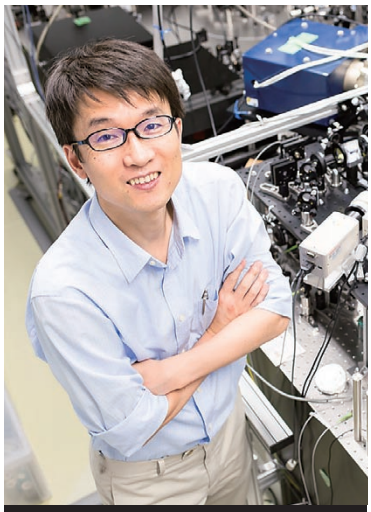


図4　6-14GHzの超広帯域のVLBI観測に成功し、信号を合成して得られた相互相関関数

＊3　**メーザ放射**：物質により決まったある周波数で高い指向性をもつ電磁波が放出される現象。マイクロ波の周波数でこの現象が起こる場合には、これをメーザ放射と呼び、光の周波数で起こる場合にはレーザ放射と呼ぶ。

次世代の周波数標準
半世紀ぶりの転換点にむけて



井戸 哲也（いどてつや）
電磁波計測研究所
時空標準研究室
研究マネージャー

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入所。大学院修了後よりSr原子のレーザー冷却及びその光格子時計への応用、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）。

20世紀最大の発明ともされるレーザー、そこから発せられる単色性の高い光は、レコード→CD、電話→光ファイバ通信等にみられるように多様な分野で技術革新を引き起こしてきました。そして、これは今、超高精度な時計においても現実になろうとしています。

■時計も光の時代？

およそ半世紀前に決定された約9.2GHzの秒の定義をそのまま実現するセシウム原子時計は誤差が1京分の1秒程度まで進歩した一方、原子の光学遷移に基づいた光を出力とする光時計は1980年代からその研究が精力的に行われ、着々と進歩を重ねてきました。10年前にはパルスレーザーによる光周波数→マイクロ波周波数変換技術（光周波数コム）が確立して光時計が発する光周波数を正確にマイクロ波領域に変換できるようになり、ごく最近には、ついにセシウム原子時計を越える、17桁以上の正確さを持つ光時計が複数実現しました。光時計はただ正確であるだけでなく、出力する光信号の周波数がマイクロ波信号より数万倍高く、同じ測定時間でより細かく時間や周波数を計測できるのも利点です。これらの状況により、現在のセシウムに基づく国際単位系の秒の定義はもはや最も優れた時間の表現方法ではなくなってきており、時間・周波数標準の専門家の間では秒の定義を書き換えることが議論されています。

■光時計の二大方式：光格子時計とイオントラップ方式

新しい秒の定義を実現する光時計の方式としては、多数の中性原子を利用する光格子時計方式と、1個のイオンを利用する単一イオントラップ時計方式があり、どちらも最高性能のものはセシウム原子時計を越える18桁の性能となっています。光格子

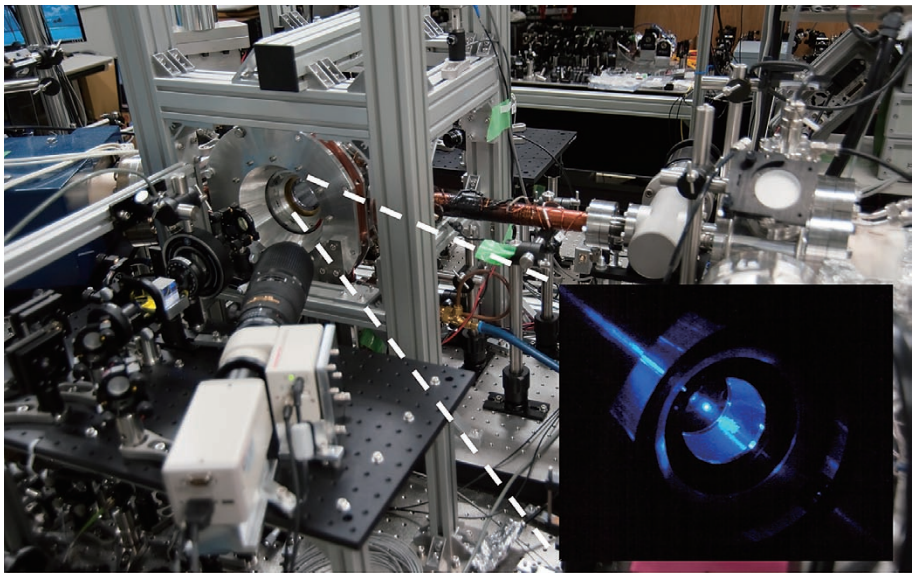


図1　ストロンチウム光格子時計の原子トラップ部
真空槽の中心にレーザー冷却、トラップされたストロンチウム原子にクロックレーザーを照射して励起状態へ遷移させる。この遷移率からレーザーの共鳴からのずれが分かり、それに応じてレーザー周波数を調整して、標準周波数とする。

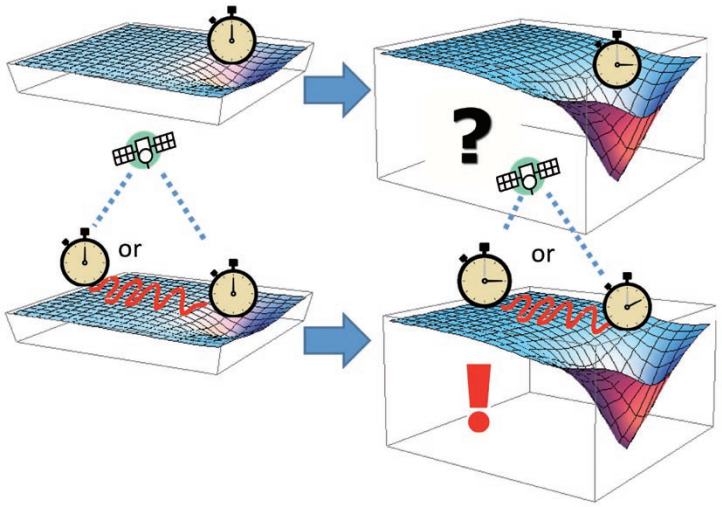


図3　時計の進み具合を重力センサとして利用するには、離れた2つの時計をリンクすることが必要。重力が大きくなっても、上図のように時計1つでは重力変化を検出できない。下図のように光ファイバもしくは人工衛星等で重力変化の違いがある距離を離して2つの時計をリンクしたときに初めて、時計を重力センサとして利用できる。

時計は2001年に東京大学の香取秀俊教授によって提案された日本発の方式であり、筆者も提案当初より開発に携わってきています。光格子時計の最大の特徴は、多数の原子から信号を得るために短時間で共鳴線の中心周波数を判別でき、結果として周波数が短期的に変動しにくいということです。一方、1980年代に欧米で提案されたイオントラップ時計方式は2013年頃まで光格子時計より優れた確度を示していた方式であり、光格子時計に比べて少ない本数のレーザーで構成可能で、モバイル化、長期連続運転等多様な応用技術に利用されやすい特徴を備えています。

NICTではストロンチウム光格子時計（図1）及びインジウムイオン時計（図2）の2つの方式を開発しています。ストロンチウム光格子時計は、2006年に国際度量衡委員会より秒の二次表現として認められました。秒の二次表現とは実質的な将来の秒の再定義の候補であることを意味し、現在7種類の光学遷移が指定されていますが、ストロンチウムは既に世界中の8つの機関で稼働している最もメジャーな光時計です。NICTの光格子時計は2011年から稼働して現在1億4千万年動かすとようやく1秒ずれるという精度を持ち、後述するリンク技術によって国内外の他の光格子時計と整合性ある周波数一致が確認されています。一方、インジウムイオン時計は2012年から本格的に開発に着手したもので、18桁以上の正確さが期待できますが高度な紫外光の制御技術が必要とされ、まだどこでも実現されていない、極めて挑戦的な光時計です。

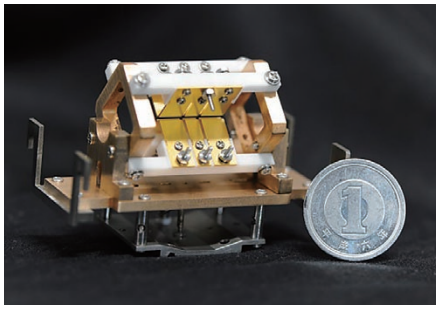


図2　インジウムイオン時計に使用しているトラップの電極
それぞれ3つの部分に分かれている4枚のくさび形電極で囲まれた中心の隙間部分にイオンがトラップされ、これにクロックレーザーを照射して共鳴周波数からのずれを得る。

■リンク技術の重要性

高精度な時計を開発するのは、ギネスブックのように記録を出すことがゴールではありません。高精度な時計が生成する決してぶれない1秒があると、測定対象の時間や周波数についてこれまでは検出できなかったわずかな変動を検出することができ、そこに新しい発見や応用技術のタネが生じます。高精度な時計の開発によってそのような技術革新に貢献することが我々の目指すところです。高精度な時計を利用するためには時計信号を測定対象のある場所まで精度を失うことなく届ける技術も必要です。また、最高精度の時計は信号を離れた場所に伝送して、より独立性の高い他の同一精度の時計との周波数一致を確認して初めて客観的な信頼性が確立されます。そしてこれが全地球レベルで実現することが秒の再定義に必須です。NICTはこのような状況を鑑み、光時計の開発と共に、物理的に離れた研究機関の間を高精度にリンクする技術も磨いてきました。2011年にはNICT本部（東京都小金井市）と東京大学本郷キャンパス（東京都文京区）の光格子時計を光ファイバで結んで、NICTの光格子時計が生成する信号を東大に送り、世界で初めて離れた研究機関の間での16桁での周波数一致を確認しました。この実験ではNICT本部が武蔵野台地の上にあり東京大学より標高が56m高いことによる一般相対論効果の検出にも成功しています。また世界に先んじて、通信衛星を利用した大陸間での高速な光時計の周波数差計測技術を開発し、2013年にはドイツ物理工学研究所(PTB)との間で、光格子時計の大陸間直接周波数比較を初めて実現しました。

■光時計が明らかにする時空の一体化

今年はアインシュタインの一般相対論が確立してから100周年です。これまで相対論は主に宇宙や加速器等日常生活とはかけ離れた領域のみで考慮されてきましたが、高精度な時計については相対論を考慮しないと成り立たなく、前述のNICT–東大リンクはそれを象徴的に示しています。そして光時計は相対論による時計の進み具合の変化によって地中の重力分布の空間的・時間的変動を捉えて資源探索やマグマの移動の検出等に利用することが期待されています。このような応用技術においても高精度な時計が1台あるだけでは時計の進み具合(歩度)の変化を検出できませんし、2台が同じ場所に存在していては同時に変動してしまい、重力環境の変化を検出できません。高精度な時計を2台以上空間的に離れた場所に設置し、その間に精密なリンクを確立することによって初めて実現するのです（図3)。時空標準研究室では光時計をより高精度化する技術と、そのリンク技術、この2つを両輪として開発を進め、名前の通り時空を一体として取り扱う次世代の周波数標準技術を確立していきます。

「起業家甲子園 1st day・起業家万博 2nd day」開催報告

NICTでは、情報通信分野の事業振興を目的として、ICTを活用した事業を志す全国の高等専門学校生、大学生、大学院生などの次世代の人材の発掘・育成、及びICT分野の地域発ベンチャー企業の事業拡大等の支援を行っています。

その一環として、全国から選抜された学生や若手がビジネスプランを競い合う「起業家甲子園」と、地域発の有望ベンチャー企業がビジネスプランを紹介し、資金調達・販路拡大などのビジネスマッチングを促進する「起業家万博」を、2015年3月3日（火）、4日（水）の2日間にわたり、コクヨホール（東京都港区）で開催しました。

（詳細は、http://www.venture.nict.go.jp/）

産業振興部門　事業化支援室

1st day 起業家甲子園 2015年3月3日（火）

全国から選抜された11チームにより、ICT関連の商品やサービスのプレゼンテーションが行われ、総務大臣賞、審査委員特別賞に加え、「社長ランチ権」など11の協賛企業が工夫を凝らして提供する「協賛企業特別賞」のほか、総務大臣賞受賞者をメンタリングしたICTメンターに「最優秀メンター賞」が授与されました。当日は教職員、学生等約190名が参加し、活発な質疑と交流が行われました。

◆総務大臣賞　〈チーム「HackforPlay」（代表）寺本 大輝氏（石川工業高等専門学校）〉

「HackforPlay」

ゲーム中にゲームを作り変えるゲーム、hackforplay（ハックフォープレイ）を教材として使って頂きます。自分の書いたコードがプログラムにどんな影響を与えるのかが、ゲームの中で分かりやすく学べます。今までの基礎学習との親和性も高く、Webなので導入もしやすくなっています。　http://hackforplay.xyz

◆最優秀メンター賞　〈伊藤 健吾氏（Genuine Startups株式会社 代表取締役）〉

◆審査委員特別賞　〈チーム「すくえあ」（代表）山﨑 啓太氏（香川高等専門学校）〉

「すくえあSCREEN feels AIR」

近年、ゲームセンターでは子どもから大人まで様々な世代の方がゲームを楽しんでいます。一つのブームを巻き起こすことに成功したプロダクトも存在し、今でも根強い人気があり、継続的な利益を出しています。例えば、太鼓の達人といった、入力インターフェースに個性があるものは人気があります。私たちが今回提案するプロダクトは、今までにない風を入力としたインターフェースをベースとしたゲームです。

平成26年度 起業家甲子園　出場チーム〈発表順〉

① Capsule Cosme（代表）加藤 早恵氏（横浜国立大学）
②ぱにゃにゃん（代表）小山 紗希氏（鳥羽商船高等専門学校）
③ team Mizuki（代表）五十嵐 太清氏（会津大学）
④Connect（代表）大谷 武嗣氏（近畿大学）
⑤すくえあ（代表）山﨑 啓太氏（香川高等専門学校）
⑥ MAKE Deals（代表）趙 名子氏（デジタルハリウッド大学）
⑦ Quintet（代表）山口 翔誠氏（明治大学）
⑧ヘルスケアテクノロジーズ（代表）松岡 大輔氏（立命館大学）
⑨ MDNA（代表）久保田 凌介氏（近畿大学）
⑩ HackforPlay（代表）寺本 大輝氏（石川工業高等専門学校）
⑪きゃらめるぷでぃんぐ（代表）生田 輪太郎氏（沖縄工業高等専門学校）

平成26年度 NICT Entrepreneurs' Challenge 2Days

2nd day
起業家万博
2015年3月4日（水）

全国から選抜された10社により、事業提携・資金調達・人材確保などの事業拡大に向けて、ICTを用いた新規事業（商品・サービス）に関する熱心なプレゼンテーションが行われました。また、それぞれの選抜地域における地域支援団体による、ベンチャー支援に関する取り組みについても紹介されました。

プレゼンテーション終了後、総務大臣賞、オーディエンス賞に加え、総務大臣賞受賞者をメンタリングしたICTメンターに「最優秀メンター賞」が授与されました。さらに、優秀な取り組みを紹介した地域支援団体に地域支援団体賞が贈られました。

当日は大手企業、都内ICT系企業、投資会社及び地域支援団体関係者等約180名が参加者し、活発な質疑と交流が行われました。

◆総務大臣賞　〈ExMedio CEO 物部 真一郎氏（四国地区：高知）〉

「ヒフミル君」

現在、日本において非皮膚科医が専門外である皮膚疾患を診断する必要が多々生じています。医師がスマートフォンを用いて患部を撮影した写真を用いて弊社サービスを通すことにより、正しい疾患名を提供し、医師の診断のサポートを行います。

◆最優秀メンター賞　〈勝屋 久氏（プロフェッショナル・コネクター/ペインティング・アーティスト）〉

◆オーディエンス賞

〈株式会社笑農和 代表取締役 下村 豪徳氏（北陸地区：石川）〉

「水稲農家向け水門管理サービス」

水稲農家が行っている水田の水管理をITとセンサー技術を活用し自動監視するサービスを提供します。水位、水温が蓄積できるので栽培に活用できるノウハウの集結が可能。高齢化、大規模化が進む農業では必要になってきます。

◆地域支援団体賞

〈福岡県 Ruby・コンテンツビジネス振興会議〉

平成26年度 起業家万博　発表社等〈発表順〉

①株式会社グローカリズム（関東地区：公益財団法人湘南産業振興財団）
②株式会社GOCCO.（東海地区：公益財団法人ソフトピアジャパン）
③クランチタイマー株式会社（中国地区：広島インターネット・ビジネス・ソサイエティ(HiBiS)）
④有限会社アグリフューチャー（東北地区：みやぎモバイルビジネス研究会（MiMoS））
⑤株式会社Eyes, JAPAN（東北地区：会津若松市）
⑥株式会社笑農和（北陸地区：公益財団法人石川県産業創出支援機構（ISICO））
⑦フォーケル株式会社（信越地区：信州ベンチャーコンテスト主催者会議）
⑧株式会社INDETAIL（北海道地区：北海道モバイルコンテンツ・ビジネス協議会）
⑨ExMedio（四国地区：公益財団高知県産業振興センター）
⑩株式会社ウェルモ（九州地区：福岡県 Ruby・コンテンツビジネス振興会議）

（）内は、地区、地域支援団体名

採用情報

平成28年度 パーマネント研究職員 および テニュアトラック研究員

当機構では、情報通信技術の研究開発推進のため、優秀で意欲のある研究者を年齢を問わず広く公募致します。

国内はもとより外国籍の方も、また性別を問わず男性・女性とも、積極的に採用を行っております。

採用時期　平成28年4月1日（原則、応相談）
募集分野　(1) 先端的ネットワーク分野
(2) ICTセキュリティ分野
(3) 情報解析・利活用分野
(4) 電磁波計測・センシング分野
(5) ICTフロンティア分野
(6) その他情報通信に関するイノベーティブな技術
募集人員　パーマネント研究職員または テニュアトラック研究員として　十数名
応募締切日　平成27年5月22日（金）17:00必着（厳守）

詳細は、当機構ホームページの採用情報（パーマネント研究職員公募）をご覧ください。
http://www.nict.go.jp/employment/permanent/2016perm-kenkyu.html
問合せ先　電話：042-327-7304　E-mail: jinjig@ml.nict.go.jp

WTP2015

ワイヤレス・テクノロジー・パーク2015

同時開催：ワイヤレスジャパン2015、運輸システムEXPO

2015年5月27日（水）～29日（金） 東京ビッグサイトにて開催

昨年の展示会の様子

ワイヤレス・テクノロジー・パーク（WTP）は、無線通信技術の研究開発に焦点を当てた専門イベントで、展示会、セミナー、およびアカデミアセッションで構成されております。

今年はメインテーマに「ワイヤレス技術で社会イノベーション」を掲げ、最先端のワイヤレス技術や無線通信のトレンドが分かる様々な企画を予定しております。

NICTは、展示や講演を通じて、ワイヤレスネットワーク研究所およびソーシャルICT推進研究センターの最新成果を紹介いたします。

多くの皆様のご来場をお待ち申し上げます。

主催：国立研究開発法人情報通信研究機構、YRP研究開発推進協会、YRPアカデミア交流ネットワーク
詳細はWTP2015ホームページ（http://www.wt-park.com/）をご覧ください。

今号より誌面をリニューアルしました。これからは年6回の発行になります。
次号では、3月に仙台で開催された国連防災世界会議に関連し、
耐災害ICT研究について特集する予定です。

NICT NEWS No.451　APR　2015
編集発行
国立研究開発法人情報通信研究機構 広報部
NICT NEWS 掲載URL http://www.nict.go.jp/data/nict-news/
〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1
TEL: 042-327-5392　FAX: 042-327-7587
E-mail: publicity@nict.go.jp
URL: http://www.nict.go.jp/
Twitter: @NICT_Publicity
ISSN 1349-3531 (Print)
ISSN 2187-4042 (Online)
〈再生紙を使用〉