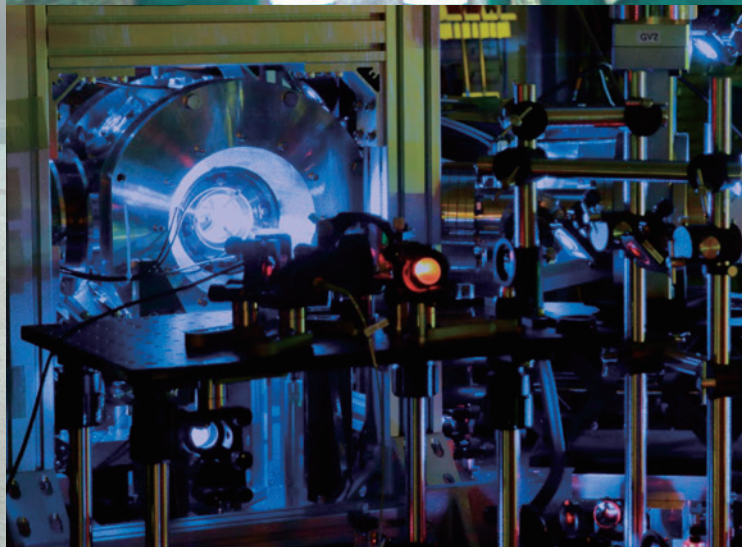
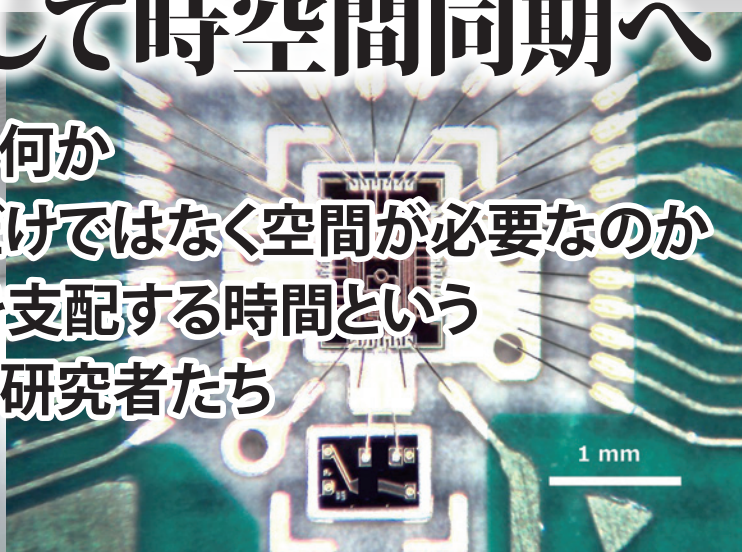


FEATURE

時空標準技術： 分散化、そして時空間同期へ

Interview

時空間とは何か
なぜ時間だけではなく空間が必要なのか
現代社会を支配する時間という
情報を作る研究者たち



FEATURE

時空標準技術：分散化、そして時空間同期へ

Interview

- 1 時空間とは何か
なぜ時間だけではなく空間が必要なのか
現代社会を支配する時間という情報を作る研究者たち
松原 健祐×志賀 信泰×原 基揚×井戸 哲也

- 4 光格子時計を基準に刻む標準時刻
蜂須 英和／Nils Nemitz／伊東 宏之

- 6 時空間同期によるデバイスの協働
安田 哲／志賀 信泰

- 8 小型原子時計を活用した分散時刻同期とそのビジョン
矢野 雄一郎／原 基揚

- 10 光原子時計と測地学
市川 隆一

- 11 秒の定義を実現するための時刻・周波数比較技術
関戸 衛／後藤 忠広

- 12 日本標準時供給の近況
松原 健祐

TOPICS

- 13 NICTのチャレンジャー File 21 木原 亜美
量子技術を活用した複数個イオントラップ時計の開発に向けて

INFORMATION

- 14 受賞者紹介



表紙写真：時空標準研究室で開発している高精度な時刻・周波数の発生とそれを皆様のお手元に届ける技術

（左）原子時計の信号を集めて時刻を発生する日本標準時計測システム
（右上）原子時計を小型化するための弾性波素子を利用した超小型発振器
（右中）ストロンチウム光格子時計
（下）時空間の把握（時空間同期）を可能にするワイワイ（近距離無線双方向時刻比較）モジュール1～7号機

左上写真：時空間同期技術のセンサ応用の一例

NICT本部（手前）とスカイタワー西東京間（遠方）約4.3 kmの距離では、経路上の水蒸気によって約1.5 mの電波伝搬経路の伸びが生じますが、この間でワイワイ（近距離無線双方向時刻比較技術）を利用して通信することで、約2 cmの精度で伸びの変化を明瞭に検出できます。

PRムービー『Nのいる未来』が完成！



2022年6月、NICTの新しいPRムービー『Nのいる未来』が完成しました。

203X年の近未来を舞台とするドラマ仕立てで、NICTが力を入れて研究開発している **Beyond 5G、AI 同時通訳、量子暗号、サイバーセキュリティ**の4つを人工知能“N”がわかりやすく説明しています。

そしてナレーションと“N”の声は人気急上昇の若手実力派女優である**上白石萌音さん！**

NICTが作る“これからの未来”を是非ご覧ください。

<https://www2.nict.go.jp/publicity/pr-movie/>



FEATURE

時空標準技術：分散化、そして時空間同期へ

Space-time Standards Technology: Heading for the Decentralization and Space-time Synchronization



Interview



井戸 哲也（いどてつや）〈中央左〉

電磁波研究所 電磁波標準研究センター
時空標準研究室 室長

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。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等の研究に従事。博士（工学）。

松原 健祐（まつばらけんすけ）〈中央右〉

電磁波研究所 電磁波標準研究センター
時空標準研究室 日本標準時グループ
グループリーダー（研究マネージャー兼務）

大学院修了後、非常勤研究員を経て、2001年独立行政法人通信総合研究所（現 NICT）入所。単一イオン光時計の開発、標準電波による高精度周波数提供、日本標準時の維持運用に従事。博士（理学）。

志賀 信泰（しがのぶやす）〈右〉

グローバル推進部門 北米連携研究センター
プランニングマネージャー／
電磁波研究所 電磁波標準研究センター
時空標準研究室 主任研究員

大学院修了後、ポスドク研究員を経て、2008年 NICT 入所。光格子原子時計及びイオントラップ原子時計の開発の後、無線時刻同期技術（Wi-Wi）と「時空間同期」の応用に関する研究開発に従事。Ph.D（Physics）。

原 基揚（はらもとあき）〈左〉

電磁波研究所 電磁波標準研究センター
時空標準研究室 主任研究員

大学院博士課程修了後、株式会社富士通研究所に入社。東北大学大学院工学研究科准教授を経て2016年 NICT に入所。半導体微細加工技術を応用したデバイス開発に従事。博士（工学）。

間を空間の位置把握に利用する技術を開発しています。必要な精度に応じてサービスするためには、まず正確な時刻と周波数を生成することが必要であり、こちらは研究室の日本標準時グループがその任にあたっています。

——時空標準研究室とは

井戸 時空標準研究室はNICTの基幹ミッションである日本標準時の生成・供給を行っている研究室で、そのための技術開発も行っています。日本標準時の基礎となる周波数を、安定して途絶えることなく社会に送り続けることが使命です。さらにはこの活動をより発展させて新しい技術を開発・提示し、これまでになかったような時間の使い方を切り拓い

ていきたいと考えています。

一口に時刻と言っても、ただひたすら精度が良ければいいというものではありません。またユーザーが正確な時間を得るのに大きなコストがかかるようではいけません。

このような観点に立ち、当研究室では図のような将来のイメージを描き、多様なレイヤーにあるユーザーの必要に応じた形式や精度で時刻や周波数の基準を国民の皆様へ供給し、また正確な時刻や時

時空間とは何か なぜ時間だけではなく空間が必要なのか 現代社会を支配する時間という情報を作る研究者たち

松原 日本標準時にとって最初に大事なことは、誰もが安心して使える正確な標準時を生成し、途切れること無くこれを利用者に供給することです。そしてこのことを高いレベルで行うことにより、世界においても高い日本の科学力を実証することです。このことが日本の技術への信頼を生み出すと考えています。現在、世界共通の標準時である協定世界時（UTC）は、世界各国の計測機関の原子時計が示す時刻をパリの国際度量衡局（BIPM）で平均処理することにより決定されています。自国の標準時をUTCに対してどれだけ正確に維持できるかは、その国の時間周波数における技術力を示しており、日本標準時は過去1年間に於いてUTCに対して最大でも8ナノ秒以内の差で維持できています。これがどれくらい短い時間かと言いますと、8ナノ秒では光でも2.4メートルしか進むことができません。

しかしながらナノ秒といったスケールの高精度は、日常生活で必ずしも必要では無いでしょう。NICTからは電話回線やNTP（ネットワークタイムプロトコル）等幾つかの手法で標準時を供給しています。例えば、長波帯電波を利用した標準電波の手法では、100ナノ秒以内の誤差で時刻を発信しており、これは電波時計で受信して利用する上では全く無視できる誤差です。一方で、サイエンスの領域では非常に高い精度が求められると思います。NICTで運用するストロンチウム光格子時計は、数億年に1秒以内という正確さを誇ります。このような時計も応用しながら、将来を含めて様々なニーズに利用できる時刻を生成して供給して行きます。

井戸 正確な時刻や周波数の基を作るとともに、これをできるだけ精度を落とさずに国民の皆様のお手元にお届けする技術也非常に重要です。また、電波が届くまでの時間を測るとその間の距離を知ることができるため、時刻情報の共有により互いの位置を知ることでもあります。時刻同期は空間にも関係するという点で私たちは「時空間同期」という言葉の基に研究を進めています。

志賀 時刻の同期はすでに皆さんよくご存じだと思います。時計を合わせる操作のことです。では空間同期とはどういうことをいうのでしょうか。これは、空間的に離れた場所にある多くの機械がお互いに相手の位置を把握しあっていることをいいます。このとき、位置を正確に測る技術と正確な時刻の同期との間には切り離せない密接な関係があります。

例えば壁掛け時計を基準時計としてみんなが時刻を合わせようとするとき、厳密に言うとも壁掛け時計からの各自の距離が少しずつ違うため全員の時刻をぴたりと合わせることができません。距離の違いによって壁掛け時計が示す時刻の視覚情報が眼に届くまでにわずかな時間差があるからです。ですから離れた二人の間で正確に時刻を合わせるには空間における位置関係をきちんと把握しておく必要があるのです。このように正確な時刻同期と空間同期は実は一つのコインの表裏の関係にあり、それらを同時に実現するのが時空間同期なのです。

今は海外とオンラインで結んでも、ほとんど遅延を感じませんが、これは人間どう

しのコミュニケーションでは数ミリ秒程度までの遅れは気にならないからです。

これをばくちがが研究している技術を使ってナノ秒・ピコ秒といったところまで精度を上げると、できることが大きく広がってきます。人間の脳の処理速度をはるかに超えるコラボレーション（連携）ができるようになります。それが実現することで、人間だったら制御しきれない量と密度の機械群の運動をさばくことができるようになるのです。

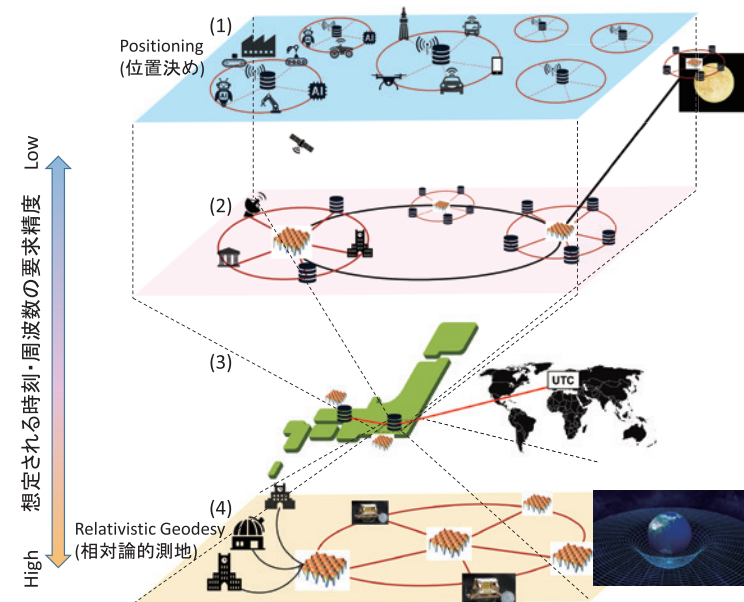
——原主任研究員も時空間同期に関する研究をしていますね。

原 私は原子時計をチップに埋め込んで小型化する研究をしています。イメージしているのは、あらゆる機械やデバイスに高精度な時計が入っていくことです。これからは、すべてのデバイスが情報でつながるようになります。そうすると複数の機械が一体として動けないといけません。どの機械もすべてが高精度の時計を持つことで、正確な場所と時間を自ら把握し自律的に判断して行動できるようになります。そうすると人間が機械を制御するというよりも機械どうしが連携して人間に対して能動的にスマートな対応をしてくれるようになるのではないのでしょうか。

スマートフォンが進化したイメージでしょうか。スマートフォンもIoTデバイスもすべてが時間を同期してつながっていると、時間も空間（場所）も全員で共

図 将来の時刻周波数社会基盤のイメージ

(1)から(4)は時間及び空間利用の用途に応じた供給レイヤーの例を示す。
(1)エッジサーバを起点にしたモバイルネットワーク。供給される時刻基準は位置決め等の空間把握にも利用される。
(2)光原子時計を相互接続したメトロネットワーク。ここからエッジサーバ等に必要な要求精度に応じた時刻・周波数を供給する。
(3)NICTや国内外の研究機関の協力で作る堅牢な標準時や協定世界時。
(4)超高精度原子時計の開発や基礎科学の開拓といった未踏領域。この究極精度は相対論的な測地技術への活用も期待される。



有されることになります。

——精度を目指す光格子時計の研究も気になります。現状はいかがでしょうか？

井戸 国際度量衡総会で2030年頃には、秒の定義が光時計によるものになる可能性があることが議論される予定となっており、私たちはその実現に貢献する研究成果をあげつつあります。また、秒の定義が変わっても、それに対応した形で秒をしっかりと自分たちで生成し標準時として供給していけるように努力しています。現在すでに標準時グループでは、光格子時計が刻む正確な1秒間を標準時に反映させ始めています。

松原 NICT・東大本郷キャンパス間での光格子時計による相対論効果の実証実験（2011年）やスカイツリーにおけるより高精度な実験（2020年）によって、光格子時計は重力ポテンシャルの違い（数十メートルの高度差）で時間の進み方が違うことを目の当たりにしてくれました。これまで私たちは、時間には唯一正しいものが一つあり、それを共有できるものだと思っていましたが、これからは別々の時間があるのは当たり前という社会が生まれてくるかもしれません。精密な時間の研究は、新しい時代の時間の使い方の変化につながっていくのではないかと思います。

原 我々が使う情報端末の直近の情報インフラにも光格子時計の高精度な時刻情報が届けられるようになると思います。

そうすると、我々が取り扱える時間の精度を5桁くらい改善することが可能となり、端末間の連携レベルを大幅に引き上げることができます。これまでのIoT機器は主にセンサーとして情報を扱ってきましたが、これからは画像及び動画をリアルタイムに扱うようになります。さらに、これらは自動運転のように空間を「移動しながら」処理されることになります。このような大容量データを高速に複数の機器で連携して並列処理する要望に対して、精度の高い時刻同期が欠かせず、光格子時計の実用化は重要なインパクトを持つと考えています。

志賀 ロボットたちが連携して作業しているところを想像すると、これからの情報通信がどのような方向に進んでいくかがイメージできると思います。物流ならぬヒト・モノ・コト流を3次元的・4次元的に円滑に進めることは、時空間同期がとれていないとできないのです。

原 例えば、公共交通機関である乗り合いバスを考えると、今はバスの時刻表に合わせて乗客が集まり、バスが遅れれば、遅れた分だけ乗客は待ち、乗客が遅れたら、バスは乗客を待たずに行ってしまう。最近では、バスの遅延や移動場所を表示してくれるアプリも有りますが、さらに乗客を取り囲むシステムに同期した時計が内蔵されると、乗客の遅延や場所

も把握できるようになり、バスがそれに合わせて、サービスの効能を最大化できるようになります。バスが自動運転により無人化され、ネットワークを介して最適制御されるようになると、その効果はより鮮明になるでしょう。

ここで、重要なのは、バスと乗客の時計が合っていて、遅刻を防いでくれるということではなく、人間の認知レベルを越えて同期化されたシステムが乗客のニーズや行動を汲み取って、公共交通機関をより柔軟に、より効率的に運用できるところにあります。逆に、人間は時計に縛られることがなくなります。

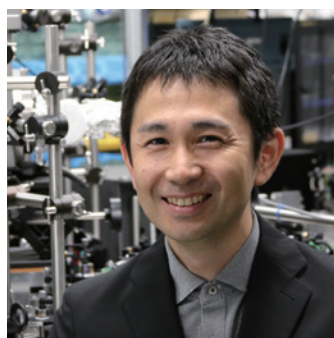
——最後に時空標準研究室の目標をまとめてもらえますか。

井戸 光格子時計などを使って時刻の精度を上げることがひとつの大きな目標であることは変わりません。その一方で、時間情報は重要な社会インフラの一つですから、災害などで一か所が損害を受けても、分散化技術により神戸の副局や標準電波送信所を^{きょうじん}活かして決して止まることのない強靱な標準時を生成・供給することも目標です。

集中から分散へ、そしてさらには時空間同期へと正確で安定した時刻・周波数とこれを使いこなす技術を提供することで新しい価値の創出に貢献していきたいと考えています。

光格子時計を基準に刻む標準時刻

マイクロ波を基準にした時刻から光を基準にした時刻へ



蜂須 英和

(はちす ひでかず)

電磁波研究所 電磁波標準研究センター
時空標準研究室 主任研究員

大学院修了後、JST-CREST 研究員を経て、2010年 NICT に入所。2013年10月から現職。光周波数標準、特に光格子時計の高精度化及びその応用に関する研究に従事。博士（工学）。



Nils Nemitz (左)

(ニルス ネミッツ)

電磁波研究所 電磁波標準研究センター
時空標準研究室 主任研究員

ドイツの PTB、理化学研究所を経て、2017年に NICT に入所。現在は、光時計と UTC をつなぐ周波数コムやデータ評価などに従事。Dr. rer. nat. (Physics)。

伊東 宏之 (右)

(いとう ひろゆき)

電磁波研究所 電磁波標準研究センター
時空標準研究室 主任研究員

大学院修了後、1999年通信総合研究所（現 NICT）に入所。原子時計、精密周波数計測、時刻・周波数標準などに関する研究に従事。博士（理学）。

協定世界時 (UTC) の1秒の長さを「秒の定義」に基づくように正確に保つため、これまでは世界中のマイクロ波周波数標準が UTC の歩度（時刻の刻み幅）を校正してきました。近年、レーザー光による原子の精密分光を基にした光時計が発展し、NICT のストロンチウム光格子時計を含めたいくつかの光格子時計が UTC の歩度を校正し始めています。さらに NICT では、同光格子時計が日本標準時の基準となり、その高精度化に貢献しています。これらの活動は、現在検討されている「秒の再定義」実現に強いインパクトを与えています。

■標準時刻の枠組み

国際度量衡局 (BIPM) は、世界中の450台以上の原子時計が刻む時刻情報を収集し、それを重み付き平均して自由原子時 (EAL) という決して止まることのない堅牢な時刻を決定しています (図1)。この1秒の長さが国際単位系の「秒の定義」に基づくように、各機関が開発した周波数標準^{*1}がこの歩度を評価し、その結果を使って BIPM が校正値を毎月決定します。この校正を施した時刻が国際原子時 (TAI) です。そして、地球の自転

に基づく時刻（地球時）に合わせるため TAI に対して「うるう秒」で時刻を1秒単位でオフセット調整することで、国際的な標準時刻として使われている協定世界時 (UTC) が決定されます。つまり、TAI と UTC の歩度は同じです。TAI と UTC は5日ごとの断続的な時刻で、かつ、最長でおよそ40日後に公表されることから、実生活で使うには不便です。そこで、各機関では実信号のあるローカル標準時刻 UTC(k)（“k”は機関名称）を独自の方法で生成しています。NICT では短期安定度が高い水素メーザー原子時計を信号源とし、その歩度を長期安定度の高い18台の商用セシウム原子時計によって調整して UTC(NICT) を生成し、これを9時間進めて日本標準時として提供しています。

■光時計

振り子時計は振り子の振動数（周波数）を利用しますが、原子時計では振り子の代わりに原子が吸収・放出する電磁波の周波数を利用します。セシウム原子時計では秒の定義に従って9,192,631,770回の電磁波の振動を数えて1秒としています。ものさしの目盛りが細かい方がより正確に長さを計測できるように、振動数が高ければより正確に1秒を計測できま

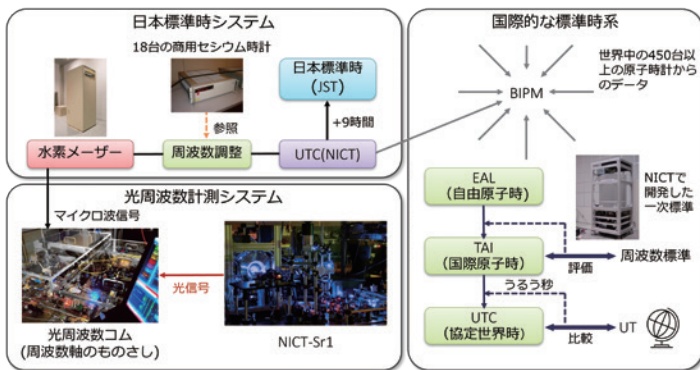


図1 標準時刻の構造。水素メーザーの周波数は光周波数コムという周波数軸のものさしを使って、光格子時計を基準に計測される。

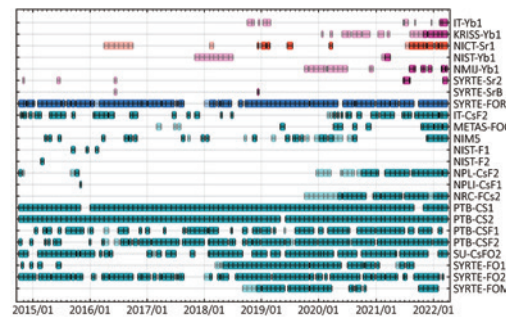


図2 2014年10月以降の各周波数標準のTAI歩度評価。オレンジはNICT-Sr1、ピンクと青はそれぞれ光、マイクロ波の二次周波数標準、緑はセシウム一次周波数標準。淡色は「遅延」校正を示している。

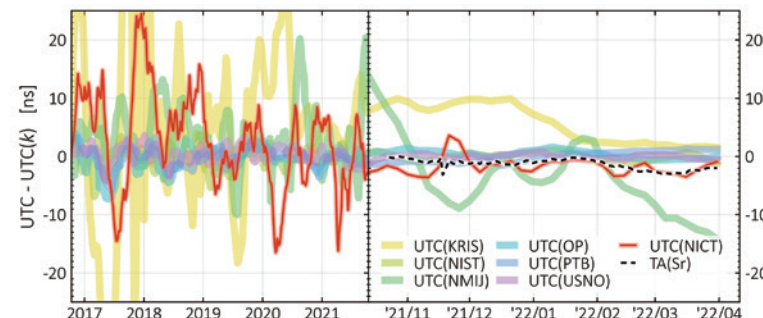


図3 各機関が生成するローカル標準時UTC(k)とUTCの時刻差。点線はTA(Sr)とUTCの時刻差。

す。すなわち、セシウム原子時計よりも1万倍以上も高い周波数の光を使った光時計^{*2}の方が精度向上の点で有利です。近年、光時計は急速な発展を遂げ、セシウム一次周波数標準よりも高精度であることが明らかになりました。そこで、国際度量衡委員会傘下の時間周波数諮問委員会 (CCTF) ではセシウムのマイクロ波遷移に基づく現行の「秒の定義」を原子の光学遷移で新たに定義し直すための条件を議論しています。この「秒の再定義」を実現する条件のひとつとして「ひと月当たり少なくとも3台の光時計が、 2×10^{-16} 以下の不確かさで定期的にTAIの歩度校正に貢献すること」が求められています。

■NICT光格子時計の国際標準時刻への貢献

周波数標準がTAIの歩度校正に貢献するためには、CCTF傘下に設置された、時間周波数分野の研究者で構成される国際作業部会の審査を受け、その校正に資する能力を認定される必要があります。この認定された周波数標準の中で、現在の秒を定義するセシウム以外の特定の原子を利用する原子時計を二次周波数標準と呼び、NICTで開発したストロンチウム原子を使った光格子時計 (NICT-Sr1) は、2018年11月にパリ天文台のストロンチウム光格子時計に続いて、光時計として世界で2例目の二次周波数標準となりました。BIPMは周波数標準の歩度評価結果をもとにTAI校正値を決定します。例えば2022年5月の校正値は6月に計算されます。その校正値に、4月以前の歩度評価からも推定できますが、高い精度で校正値を決定するためには、5月（校正対象の月）の評価結果をBIPMに提供する「無遅延」校正が必要です。NICTは二

次周波数標準に認定された翌月（2018年12月）に、パリ天文台と同時に光時計としては初めて無遅延校正を実施し^{*3}、それ以降2年半の間、断続的ではありませんが、光時計としては実質唯一の無遅延校正を行ってきました。そして2021年11月には、各国のマイクロ波周波数標準とNICT-Sr1を含む3台の光時計を合わせて、これまでで最多の16台の原子時計がTAI校正に貢献しました (図2)。これは各国の協力の下、国際標準時刻が堅牢に維持されることにつながるだけでなく、「秒の再定義」実現の条件を満たしています。この成果はBIPMのwebページで報告されています^{*4}。さらにその一か月後 (2021年12月) には衛星仲介周波数比較の不確かさ等を可能な限り抑制し、NICT-Sr1が他の周波数標準を含めて、歴代最小の計測不確かさ 1.9×10^{-16} でTAIの歩度を評価しました。この高精度校正は『「秒」が原子の光学遷移に再定義された暁には、光時計によるTAIの校正精度が現行の精度を上回る』ことを初めて実証したことになります。

■NICT光格子時計の日本標準時への貢献

光格子時計は計算時系であるTAIだけでなく、リアルタイムの時刻信号の精度も向上させることができます。NICTでは2016年の5か月間、水素メーザーの周波数をNICT-Sr1で評価・調整することで、世界に先駆けて光時計を用いた高精度時刻実信号を生成しました^{*5}。2021年には同様の手法で生成した高精度時刻信号TA(Sr)を参照したUTC(NICT)の運用を開始しました (図3)。そのため、現在の日本標準時は光格子時計を1秒の基準として刻まれています。UTC(NICT)と一か月

ごとに得られるUTCの時刻差は、光格子時計の導入前は20 ns（ナノ秒：10億分の1秒）程度でしたが、導入後は数nsに改善しています。私たちが知る限り、光時計が国家標準時刻に導入されたのは初めてです。このように「UTC(k)に光時計が貢献する」ことは、「秒の再定義」実現の努力目標にも掲げられており、NICTは国際標準時刻のみならず、国家標準時刻の観点からも「秒の再定義」実現に貢献しています。

■今後の展望

私たちは、今後も光時計の標準時刻への貢献において、世界を牽引し、UTCや日本標準時の維持及び高精度化に努めるとともに、「秒の再定義」実現において重要な役割を果たしていきます。また、高精度な時刻信号を「いつでも、どこでも、だれでも」使えるようにすることで、光時計の測地学への応用^{*6}や暗黒物質探索などの基礎科学への応用^{*7}にも貢献できればと考えています。

【用語説明】

- *1 周波数標準：時間周波数分野の研究者で構成される「時間周波数諮問委員会傘下の国際作業部会」によって、TAI校正に資する能力を認められた原子時計のことです。定義に基づいた1秒を生成できるセシウム一次周波数標準とそれ以外の特定の原子を用いた二次周波数標準があります。
- *2 光時計：原子の光学遷移を利用した原子時計で、代表的な方式に光格子時計と単一イオン光時計があります。
- *3 NICTのプレスリリース: <https://www.nict.go.jp/press/2019/02/07-1.html>
- *4 BIPM, "Record number of frequency standards contribute to International Atomic Time", <https://www.bipm.org/en/-/2021-12-21-record-tai>
- *5 NICTのプレスリリース: <https://www.nict.go.jp/press/2018/03/15-1.html>
- *6 NICT News 本特集号 p.10
- *7 蜂須英和, "レーザー光による次世代の周波数標準", NICT NEWS 2019年 No. 3.

時空間同期によるデバイスの協働

モノが「つながる」から「シンクロする」ビジョンへの移行

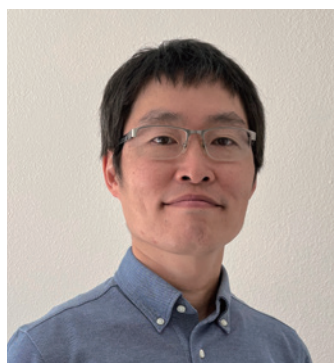


安田 哲

(やすだ さとし)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
研究員

大学院修了後、静岡大学の研究員、民間企業でのシステムエンジニアを経て、2014年から現職。無線時刻同期技術（Wi-Wi）と「時空間同期」の応用に
関する研究開発に従事。博士（理学）。



志賀 信泰

(しが のぶやす)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター／
時空標準研究室
主任研究員

大学院修了後、ポスドク研究員を経て、2008年NICT入所。光格子原子時計およびイオントラップ原子時計の開発の後、無線時刻同期技術（Wi-Wi）と「時空間同期」の応用に関する研究開発に従事。Ph.D (Physics)。

今 情報通信の分野では5Gの実装が急ピッチで進められています。それと同時に5Gの先（Beyond 5G）の通信についての研究開発が世界中で進められています。Beyond 5Gの時代には、たくさんのロボットが高度にタイミングと位置を合わせることで社会的な課題を解決するようになるでしょう。私たちはデバイス同士が時刻と位置を合わせる技術を時空間同期技術と呼び、研究開発を進めています。機械の連携が進むことで人の連携も進められることを私たちは目指しています。

■背景

ロボットアニメではロボット同士が変形合体することで、より高度な機能を実現するシーンが描かれてきました。しかしながらロボットアニメの出現から50年以上たった今でも変形合体ロボをつくるのは難しいという現実があります。その理由のひとつに、ロボット同士が時刻と位置を合わせる技術が未熟だからということを挙げるができると思います。近年スマホやパソコンはインターネットにつながることで時刻が自動的に数ミリ秒精度で合わせられるようになりました。数ミリ秒精度というのは人間が気づかない時間スケールですが、機械同士の時計をマイクロ秒精度に上げることができれば通信の効率を飛躍的に上げることができるようになります。5Gにおける通信の効率化の指標として大容量、低遅延、多接続の3つが掲げられています。これまでの数ミリ秒精度の時刻同期はその効率化の足かせとなり始めており、今後更に通信の効率を上げていくために

は、ますます時刻同期の精度を上げていく必要があります。

また移動体の精密時刻同期にはGPSをはじめとする衛星測位システム（GNSS）が最も簡便でよく用いられていますが、B5G通信の仕組みをGNSSに過剰に依存させると万が一の災害に対して脆弱なシステムになってしまうため、レジリエントな通信を確立するために新たな時刻同期及び位置計測技術の開発が世界的な課題となっています。時刻同期精度をピコ秒（1兆分の1秒）精度まで上げることができれば、電波を用いてmm精度の位置計測をすることができるようになります（図1）。

■Wi-Wiの紹介

そのような背景の下、私たちは無線双方向時刻比較技術（Wi-Wi）を開発してきました。この技術は日本標準時を協定世界時と比較する際に用いられる衛星双方向時刻比較という技術が基となっています（図2）。この技術は衛星を介して相互に時刻情報を送り合うことで時刻差とともに信号が相手に届くまでの時間（伝搬時間）を同時に測る技術であり、ピコ秒の精度まで計測することが可能です。私たちはこのプロトコルを無線通信機に組み込むことで無線通信機の時計をピコ秒レベルで揃える技術を開発してきました。Wi-Wiは時刻比較と伝搬時間の計測を行います。伝搬時間に光の速さをかけることでアンテナ間の距離を計測することも原理的に可能です。私たちはこれまでに電波暗室や屋外のフィールドなど周りに電波を反射するものが少ない環境で位置計測が可能であることを実証しています。



図1 時間スケールと光の進む距離

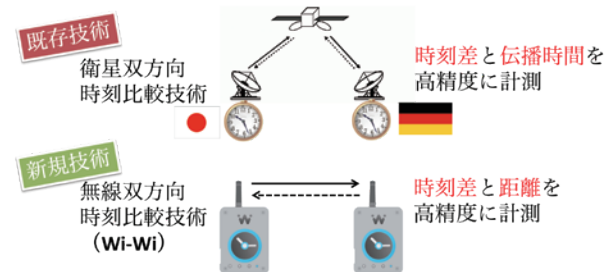


図2 衛星双方向時刻比較技術と無線双方向時刻比較技術

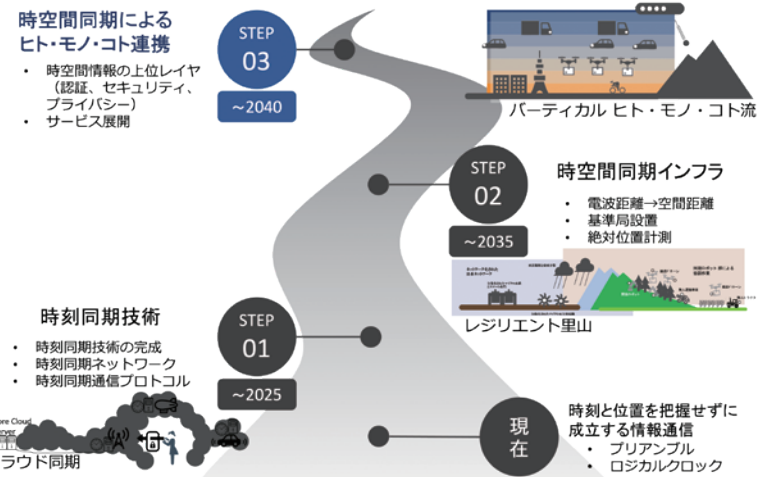


図4 時空間同期技術開発のロードマップ



図3 Wi-Wiモジュールの歴史

■Wi-Wi モジュールの開発

2015年に計測器でWi-Wiの原理を実証した後、商用通信機にWi-Wi機能を搭載したWi-Wiモジュールを開発してきました（図3）。

これらのWi-Wiモジュールは920 MHzの帯域を使用し、IEEE802.15.4gに準拠した通信モジュールで、試作機ですが技術基準適合を取得しており、誰でもどこでも利用することが可能です。通信レンジは見通しで200 m程度、時刻同期精度は30ナノ秒、同期ジッタ20ピコ秒です。モジュール弐号機はハガキサイズだったのが六号機では半分の名刺サイズに小型化が進んだほか、時刻同期精度も1マイクロ秒から30ナノ秒へと改善するなど性能もアップし続けています。

このWi-Wiモジュールの開発及び応用研究をNEDOの「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業」のサポートを受けながら東北大学、東京大学、広島大学、日本電波工業と共に進めています。この研究では時刻同期技術があるという前提で効率的な無線通信技術を構築し、

ロボット群の制御に活用することを目指しています。時刻同期をWi-Wiにより実現しておくことで、これまでにない性能の低遅延、多数接続、雑音に強い無線通信プロトコルをそれぞれ開発してきました。そしてWi-Wiモジュールを通信電波環境の計測センサとして用い、ロボットにより通信環境のサーベイを行う研究にも着手しています。

■時空間同期技術開発の展望

私たちは、2040年頃にヒト・モノ・コトが3次元的に整然と行き交うことを目指しています。そのために2035年頃までに特定の地域で時空間同期インフラを整え、自動運転ロボット群による協働作業を実用化します。これにより山林の手入れなどの作業を少ない人手で進めることが可能になります。時空間同期を実現するためにはまず時刻同期基盤を整備する必要があり、2025年頃までに時刻同期コア技術を完成させることを目指して研究開発を進めるとともに、実装を進める試みを進めています（図4）。このビジョンを実現するためには研究開発だけ

でなくビジネスとの連携、国際標準化、そして法整備も並行して進める必要があります。ビジネスとの連携では2016年より模索を続けており、徐々に時刻同期の重要性が認識されてきました。また標準化推進室と時空標準研究室とで連携して時空間同期の国際標準化を進めており、ITU-RのWP5Dにて6Gの将来技術トレンドに時空間同期を入力しています。また、日本国内だけの実装の活動だけでは不十分であり、今後国際連携も必要になってきます。私たちは主に米国の研究機関、大学、ビジネスとの共同研究を目指して連携の準備を進めています。

■まとめ

私たちはデバイスの時刻と空間の同期を飛躍的にすすめる技術を開発しています。なぜならロボットたちが「つながる」から「シンクロ」へと進むにはもっと時刻精度を上げる必要があるからです。私たちは機械が連携することで人の連携がスムーズになることを目指し、技術の研究開発と同時に使われる技術とするための取組も進めています。

小型原子時計を活用した分散時刻同期とそのビジョン

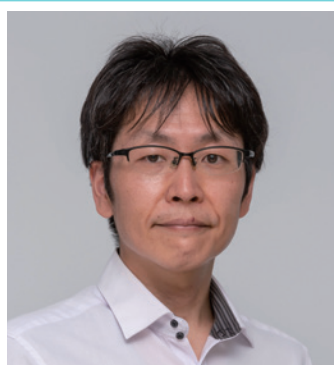


矢野 雄一郎

(やの ゆういちろう)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
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、2016年NICTに入所。小型原子時計とその応用に関する研究に従事。博士（工学）。



原 基揚

(はら もとあき)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
主任研究員

大学院博士課程修了後、株式会社富士通研究所に入社。東北大学大学院工学研究科准教授を経て2016年NICTに入所。半導体微細加工技術を応用したデバイス開発に従事。博士（工学）。

マイクロ波の量子遷移を周波数基準とした原子時計の小型化が進んでいます。将来的にはスマホに乗るくらいに小さくなり、原子時計はより身近なものになると予想しています。原子時計の普及が進むと何が変わるのか、小型原子時計を活用した現在の取組と、その将来像について時刻供給の観点から紹介します。

■集中管理型の時刻同期から分散管理型へ

端末の時刻合わせをするとき、基準となる時計に端末の時刻を合わせるのが最も単純な方法です。現在の時刻供給システムも同じで、基準の時計と端末には従属関係があり、基準となる一つの時計が刻む時刻をネットワーク全体で共有する集中管理型のシステムになっています。管理がしやすい一方で、基準となる時計や時刻情報の伝達経路の障害に対しては脆弱です。例えば、現在、GNSS（全球測位衛星システム）を使った時刻同期が広く利用されていますが、ジャミングやなりすましなどの悪意のある攻撃や、太陽風による自然災害の脅威を受けやすいことが指摘されています。米国の試算ではGNSSが利用できない場合、1日あたり10億ドル（約1,280億円）の経済損失が生じると報告されています。日本の時刻を決定している日本標準時システムでは、複数の独立した原子時計を高度に管理する分散管理型のシステムとすることで高い精度と信頼性を得ています。NICTでは、商用の原子時計を約18台使い、各時計の時刻を集約し計算（合成）することで、高い精度と不具合に対する高い耐性を両立しています。我々は、小

型原子時計の普及を見据えて、Beyond 5Gに向けた高精度かつ高信頼な分散管理型の時刻同期の研究開発を進めています。

■小型原子時計の研究開発とNICTの取組

原子時計の小型化、省電力化は半導体レーザーの性能が向上した2000年代から大きく進み、2011年には大きさ17cc、消費電力125mWの小型原子時計が登場しました。現在は日本も含め米国、中国、欧州、イスラエルなど世界各国で研究開発が進んでいます。NICTでは大学や企業と連携して、核となる構成部品の小型化と省電力化の研究開発を実施してきました。例えば、圧電薄膜共振子を利用して原子の遷移周波数であるGHz帯を直接発振する発振回路（図1）を新規開発し、上記のサイズと消費電力の両方を約半分に抑制できることを示しました。更なる構成部品の研究開発を進めて、小型、安価、省電力、これらを同時に満たすような小型原子時計の実現を目指しています。

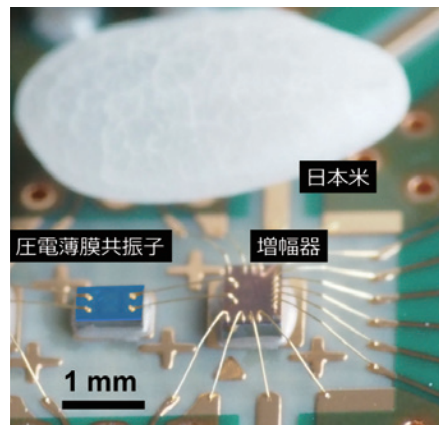


図1 圧電薄膜共振子を用いた発振器

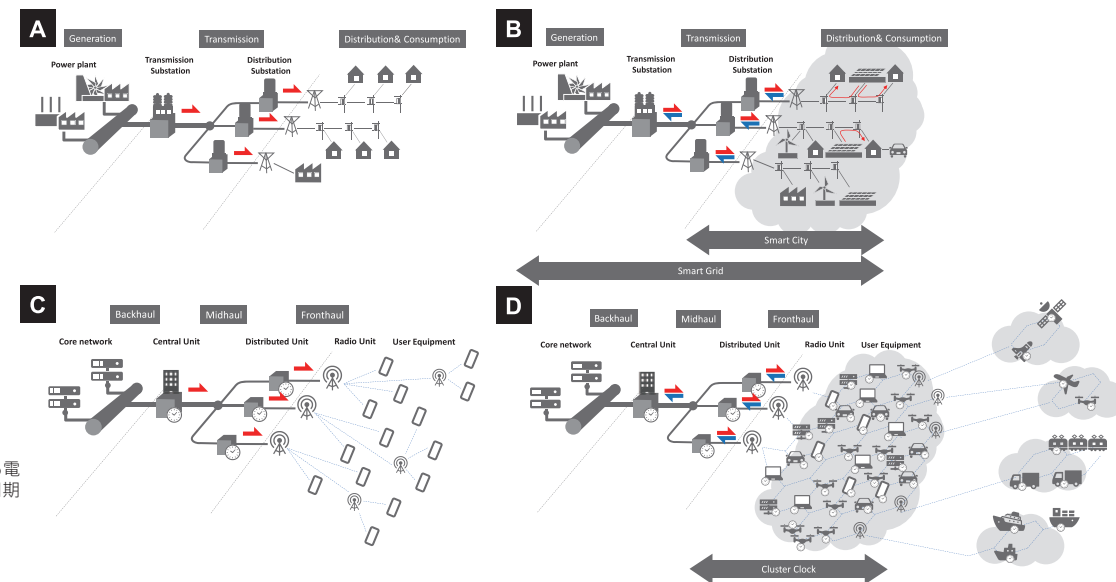


図2 集中型から分散型へ移行する電力システム（A,B）と時刻同期システム（C,D）の概念図

■小型原子時計を使った分散時刻同期

NICTでは、今後普及が見込まれる小型原子時計の「数の力」を最大限に活用して、精度と信頼性をより高めた時刻同期網の研究開発を進めています。複数の原子時計が集団で時を刻むことからこの仕組みをクラスター（集団）クロックと呼んでいます。この研究では、まず、原子時計の時刻の生成を模擬したネットワークの数値解析から始めました。最近では、実際のマッチ箱サイズの小型原子時計3台を使った検証実験を実施し、単体で利用するよりも安定性を1.6倍程度高めることができることがわかりました。今後、更に多くの原子時計を利用することや、集約のための計算アルゴリズムをより高度化することで、更なる高精度と高信頼性が期待できます。

■分散型時刻同期インフラの将来像

クラスタークロックを拡張した分散型時刻同期の将来像について、既に集中型（図2-A）から分散型（図2-B）への移行を先行しているスマートグリッドの取組が参考になると考えています。スマートグリッドでは、IT技術により太陽光や風力などの分散型電源を効率的に制御し、電力を安定的に供給することが目指されています。また、従来の集中型電源による電力網と比べて、災害時などに特定の発電所が停止しても、ある程度の電力供給確保が期待できます。複数の分散

表1 スマートグリッドと分散型時刻同期網の類似点

スマートグリッド	分散型時刻同期
ソーラー、風力などの分散型電源	小型原子時計
分散電源の電力情報を集約して送電ロスを最小化して電力伝送するシステム	原子時計の時刻情報を集約して、伝搬誤差を最小化して時刻配信するシステム
電力供給の安定度向上	時刻供給の安定度向上
需要家	時刻・周波数を知りたいユーザー
供給家	原子時計を持っているユーザー

電源により発電した電力を束ねて安定して電力が得られるように、複数の原子時計が生成する時刻も束ねることで安定な時刻が共有できます。電力インフラが集中型電源から分散型電源に移行していくように、原子時計の普及に合わせて、時刻同期のインフラにおいても、集中型（図2-C）から原子時計による分散型（図2-D）への移行は自然な流れと考えています。類似する対応関係をまとめるとスマートグリッドと分散型時刻同期には表1のような関係性があると考えています。

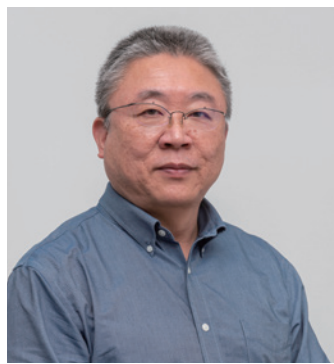
ただ、エネルギーは市場価値が存在して金銭に換算できますが、時刻・周波数情報は価値に換算できるかまだ定かではありません。価値に換算できなければ、原子時計の時刻情報を供給する供給家や分散型同期システムを維持する事業者が現れず、持続可能なインフラは成り立ちません。しかし、高度道路交通システム（ITS）やサイバーフィジカルシステム（CPS）では高精度な時刻要求が安全性

と信頼性と共に求められています。また、COVID-19の影響から、高信頼な時刻情報に基づいた電子署名、サプライチェーン、eシールやタイムスタンプなどのトラストサービスの需要は高まっています。今後、高精度かつ高信頼な時刻情報の価値が大きくなり、対価と引き換えに情報を提供するシステムが成立すると考えています。

■今後の展望

SDGsでは高品質、高信頼、持続可能なインフラの実現が掲げられています。時刻や周波数情報はデータ社会を支える基盤となる情報です。また、これからの時刻インフラには高精度だけでなく、安全性、信頼性や省電力性、経済性など、様々な要求に応えなくてはなりません。持続可能な時刻同期のインフラを実現するために、多くのステークホルダーの方々と連携しながら研究活動を進めていきたいと思っています。

光原子時計と測地学



市川 隆一

(いちかわ りゅういち)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
研究マネージャー

大学院博士課程修了後、1995年に郵政省通信総合研究所（現NICT）入所、VLBI・GPSによる地殻変動観測、深宇宙探査機軌道決定、距離基準測定用超小型VLBIの開発及びGNSS時間・周波数比較などの研究に従事。博士（理学）。

「測地学」、馴染みのない言葉かもしれませんが、簡単に言えば「地球の形や大きさ、回転、重力及びそれらの時間的変化を知る学問分野」です。身近なところでは、正確な地図の作成や、カーナビやスマホのナビでも必須の分野です。NICTは、今までにない高精度な時計として光周波数標準器（光原子時計）の研究・開発を進めていますが、ここでは一見まったく別の分野に見える測地学との密接な関係について紹介します。

光原子時計の周波数変化についての感度は、過去15年程の間に劇的に向上し、16桁から18桁前半、ないしは19桁台へと2桁以上も上がっています。また、光原子時計の絶対周波数は、例えばストロンチウム光格子時計（Sr光格子時計）について、多くの実験結果により2022年4月現在、

$$\nu(^{87}\text{Sr}) = 429\,228\,004\,229\,872.99\text{ Hz}$$

と得られています。絶対周波数は「秒の定義を実現するセシウム周波数標準」を基準にしており、その不確かさはセシウムで制限される16桁でほぼ頭打ちであるため、本来の光原子時計の性能を生かしきれていません。そのため、2015

年頃からの世界の関連研究者の間で光原子時計による「秒の再定義」の検討が始まりました。

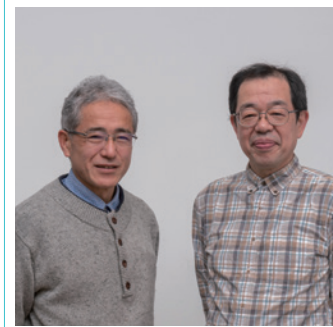
さて、時計の設置場所の標高が変化すると、

その時計が刻む「周波数」が変化することは以前から知られており、これを利用した標高の測量手法「Chronometric leveling（時計式水準測量）」は約40年前に提唱されました。ただし、1 cmの標高変化を検出するためには、18桁での周波数変化を検知する必要があり、当時の時計の精度では、せいぜい2 m程度の標高変化測定でした。これは、10 kmの距離を1 cm以下の精度で測定可能な水準測量には遠く及びません。

その後、光原子時計の開発が進み、2020年に理化学研究所等が実施した、東京スカイツリーの展望台と地上に各々設置した可搬型Sr光格子時計間では、18桁精度での周波数差、つまり標高差に換算してセンチメートル精度での測定結果を得ることに成功しました。この成果は、従来の水準測量と同程度の精度で「時計式水準測量」が実現でき、将来的には距離に依存せずにリアルタイムの標高差計測が可能であることを意味します。

最近では、関連研究は国際的にも「相対論測地学（relativistic geodesy）」として認知され、全地球規模での高さの基準決定への光原子時計の応用等が盛んに議論されています。一方で、「秒の再定義」を想定した光原子時計の安定運用のために、時計の設置場所の標高変化、例えば振幅10～20 cm程度の固体地球の潮汐変化、海洋潮汐荷重、地震による地殻変動、あるいは地下水等の変動による地盤変動等の影響を把握することが重要です（図）。NICTでは、国土地理院や国立極地研究所、産業技術総合研究所及び大学等との連携を持ちつつ、こうした観測やデータ解析に着手し、光原子時計の不確かさ評価を進めています。そして、NICT発の光原子時計が将来の測地学的応用に大いに貢献できると考えています。

秒の定義を実現するための時刻・周波数比較技術



関戸 衛

(せきど まもる)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
研究マネージャー

1991年郵政省通信総合研究所（現NICT）に入所。超長基線電波干渉法（VLBI）を用いた測地学・天文学に関する研究に従事。2021年より時刻・周波数校正と衛星双方向時刻周波数比較技術を担当。博士（学術）。

後藤忠広

(ごとう ただひろ)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
主任研究員

1985年郵政省電波研究所（現NICT）に入所。人工衛星を用いた時刻比較に関する研究に従事。博士（工学）。

「秒」の定義に基づいて刻まれる協定世界時（UTC）を決定するためには、世界各国の標準機関が維持・運用している原子時計の時刻を高精度に比較する必要があります。地球上の離れた地点にある原子時計の時刻差を測定する方法としては、測位衛星（GNSS）の信号を仲介する方式や、原子時計が生成する信号を通信衛星を介して相互に送り合う衛星双方向時刻比較方式があります。

GNSS時刻比較方式に必要な装置は受信機とアンテナのみであり、GNSS衛星の信号を受信するだけで時刻比較を行うことができます（図1）。比較的低コストで長距離の時刻・周波数の比較ができることから、UTCに寄与している各国の標準機関の大多数はこの方式を採用しています。衛星から受信機へ信号が伝搬する時間は、地球の大気や水蒸気などにより真空中の信号伝搬に比べて余分な遅延を受けます。高精度な比較を行うためには、時間・周波数の専門知識のみならず衛星軌道や大気伝搬特性などの幅広い知識が要求されます。

一方、衛星双方向方式は、比較対象の原子時計－衛星－原子時計の間で同時・双方向に信号を送り合うため、計測される信号の時刻差の単純な引き算から信号伝搬の経路による遅延を相殺して時刻・周波数比較を実現することができます。静止衛星に向けて信号を送信するための送信設備、通信衛星の中継機や無線局を運用する費用などは必要となりますが、衛星双方向方式はGNSS方式よりも高い精度の比較性能が期待できます。二つの方式を並行して運用することで、相互の比較結果やその精度を確認し、それぞれの性能を維持・向上させることができます。NICTはこの比較技術を使って協定世界



図2 NICTが開発したSRSモデムは、変調コードの位相を使った時刻比較に加えて、搬送波位相を使って17桁の周波数比較が可能である。

時に寄与するとともに、日本標準時の分散化や標準電波の運用に役立っています。

現在の1秒の時間の長さの定義には、セシウム原子の放射するマイクロ波が基準として使われていますが、近い将来には原子が放射する光の振動周波数を使ってより正確な定義に変更することが計画されています。これまでの時刻比較技術はマイクロ波標準の周波数比較には十分な精度を持っていましたが、光時計の比較にはより高精度な比較手法の開発が要求されています。NICTでは、光時計の比較にも対応可能な次世代の比較技術を目指して開発を行ってきました。

従来、双方向時刻比較は変調波信号の伝搬時間を使っており、高精度な時刻マーカーを変調信号に乗せるためには帯域幅の広い信号を送送する必要があり、衛星中継器の帯域幅で測定精度が制限されていました。NICTではこの問題を解決するため、衛星双方向の信号の搬送波位相を計測することで従来に比べて一桁精度の高い17桁の比較が可能な次世代双方向モデム（SRSモデム）を開発しました（図2）。台湾（TL）、韓国（KRISS）との間では開発したモデムを用いた定常的な運用を開始しています。またこのモデムは日本標準時の分散化や標準電波等日本標準時業務を支える役割も担っています。さらに、現在本モデムはフランスやドイツから試験導入の問い合わせが来ており、本技術の国際的な普及展開を図っていきます。

図 NICT本部での測地計測。地盤変動や地下水流動は光原子時計の不確かさ評価に影響し得る。

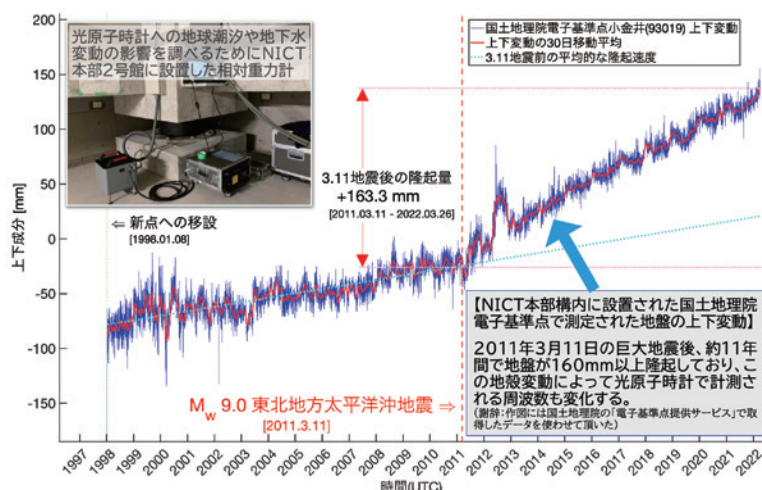


図1 本部2号館屋上に設置されたGNSSアンテナ。国際比較や標準電波の運用のために使用される。

日本標準時供給の近況



松原 健祐

(まつばら けんすけ)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
日本標準時グループ
グループリーダー (研究マネージャー兼務)

大学院修了後、非常勤研究員を経て、2001年独立行政法人通信総合研究所(現 NICT) 入所。単一イオン光時計の開発、標準電波による高精度周波数提供、日本標準時の維持運用に従事。博士(理学)。

NICTは、日本標準時の発生・維持・供給の業務を行っています。発生・維持については、本特集号の各記事で紹介される光時計や時刻比較技術の導入を進める一方、供給については、通信網や社会要請に応じた改良の努力を続けています。本稿では日本標準時供給の近況を紹介します。

日本標準時の供給手法として、標準電波、電話回線、通信ネットワーク等があります。標準電波では、おおたかどや山送信所(福島県・田村市都路町／双葉郡川内村、1999年開局)と、はがね山送信所(佐賀県佐賀市富士町／福岡県糸島市、2001年開局)が各々開局20周年を経た今も、長波帯標準電波を安定に送信しています。

電話回線では、光テレホンJJYへの移行を進めています。従来のテレホンJJYは、1995年から個人を含め広く時刻を供給していますが、回線IP化の拡大等により安定した精度維持が困難になっています。そこで民間との共同開発を経て、光電話回線を用いて、高精度かつ高速に時刻供給できる光テレホンJJYを、2019年から正式運用しています。一方で、従来のテレホンJJYは、利用の多い放送局等の業界団体への説明を終えた後、2024年3月末の廃止予定を発表しました。その後、利用者に光テレホンJJYへの移行を呼び掛けて、2022年3月には、光テレホンJJYの月間利用数は12万件以上となり、同じ月のテレホンJJYの利用数を超えました(図)。今後も周知を進め、光テレホンJJYへの完全移行を行います。

通信ネットワーク利用では、NTP(ネットワークタイムプロトコル)や、タイムビジネス時刻情報提供によるサービスがあります。誰でも利用できるNICTの公開NTPサービスは、2018年から利用数が増大して、現在は1日最大90億回以上の通

信アクセスがあります。海外からのアクセスが多く、複数の回線及び系統を使った冗長運用で対応しています。今後更に安定な時刻供給のため、停電等の異常時対策を強化したシステムを東京・大手町に新たに配置することを計画しています。またNICTではhttp/httpsによる時刻供給も試験運用してきましたが、スマートフォンアプリからの高頻度な接続等により、サーバの能力を超える場合が生じたため、サービスを公開NTPに一元化することにしました。そこでhttp/httpsによる供給は、供給を時限停止する経過期間を経て、2022年3月に完全終了しました。

タイムビジネス時刻情報提供の目的であるタイムスタンプ時刻認証の仕組みは、NICTも参加して2005年に日本で制度化されました。その後NICTの主導で、各国事情に適合しやすい時刻配信及び監査方式の体系が提案され、国際標準化されています。そして2021年4月には、国内の時刻認証業務を総務大臣が認定する規程が告示(令和3年総務省告示第146号)されました。ここでは日本標準時が準拠するUTC(NICT)が認証の時刻源に指定されており、今後も確実な時刻情報提供を行っていきます。

以上に並行して、万一首都圏が甚大な災害を被っても、継続して時刻供給できる対策を進めています。2018年から運用されている日本標準時神戸副局は、本部と併用する標準時局として、標準時発生とともに、光テレホンJJYと公開NTPによる時刻供給及び標準電波送信所の監視の設備を備えています。そして災害時に速やかに、日本標準時における本部の機能を神戸副局に移す訓練を、作業マニュアル改訂とともに毎年行っています。これらにより、安定で継続的な日本標準時の供給を実現しています。

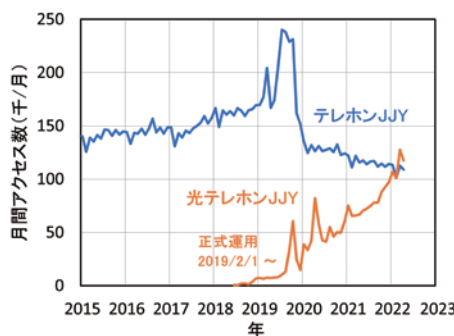


図 テレホンJJY・光テレホンJJY利用アクセス数(2015/1-2022/4)

量子技術に応用した
複数個イオントラップ時計の開発に向けて

木原 亜美

(きはら あみ)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
研究員
博士(理学)

●経歴

1991年 福井県生まれ 東京都出身
2014年 学習院大学理学部物理学科卒業
2019年 学習院大学大学院自然科学研究科物理学専攻 博士後期課程修了
2021年 大阪大学大学院基礎工学研究科特任助教を経てNICT入所

●受賞歴等

2018年 第45回応用物理学会講演奨励賞
2021年 電気学会電子・情報・システム部門研究会優秀論文発表賞

一問一答

Q 最近はまっていること

A 博士課程の時から筋トレにハマリ、今はYouTubeを見ながら家でトレーニングをしています。テレワークの前にも筋トレで心拍数を上げて体を目覚めさせています。

Q 研究者志望の学生さんにひとこと

A 研究はうまくいかないことが多くてくじけることもあるかもしれませんが何事もポジティブに捉えて今を楽しんでほしいと思います。

Q 休日の過ごし方は？

A 筋トレをしたり、夫と家の近くを散歩したり、作り置き用の料理を作ったりしています。季節の野菜や珍しい野菜を見つけては調理法を調べて実験…ではなく実践しています。



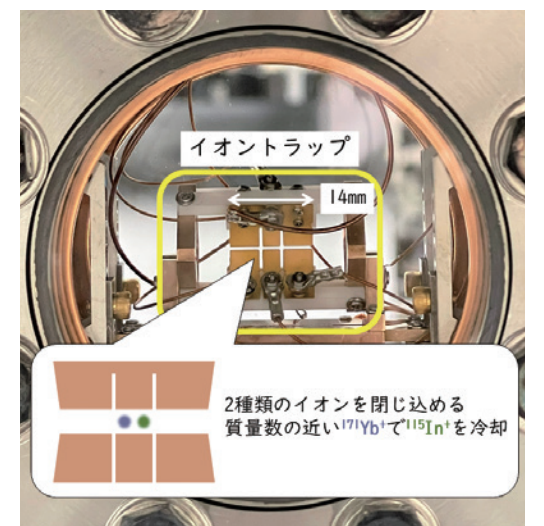
現 在の秒の定義はセシウム原子のマイクロ波遷移の共鳴周波数を元に定められていますが、これからの基準として冷却原子の光学遷移を用いた光時計を使うことが検討されています。

インジウムイオン光時計では、真空中に設置した電極の中心に単一のインジウムイオンを、電場を使って閉じ込め、レーザーで10万分の1ケルビン程度まで冷却した後で、非常に周波数幅の狭い遷移に共鳴するレーザーを照射し、イオンの状態を観測して共鳴状態を維持することで、そのレーザーの周波数を基準とします。インジウムは外部の電場や磁場などの影響を受けづらいという特徴を持つため複数のイオンを同時に捕獲することで、より高い周波数安定度が見込まれる複数個イオン光時計や、複数のイオン間で量子相関を持たせて量子情報操作をする際のイオン種の候補となっています。

インジウムイオンはレーザーで直接冷却する際に、到達できる温度が比較的低

いという特徴がありますが、それと引換えに単独でトラップすることが難しいです。そのため時空標準研究室で現在開発されているインジウムイオン光時計では、単独で捕獲可能なカルシウムイオンをまず捕獲し、冷却した後で同じトラップ中にインジウムイオンを入れて、カルシウムイオンとエネルギー交換を繰り返して冷やす共同冷却という手法を使っています。この共同冷却では2種類のイオンの質量が近いほど効率的に冷却できます。

そのため、私が開発に取り組んでいるインジウムイオン光時計ではインジウムに質量がより近いイッテルビウムイオンで共同冷却をします。イオンを冷却しやすい条件にすることで、上記の複数個イオンによる量子もつれ状態を利用したイオン光時計の実現を目指しています。



▲真空チャンバー内に設置したイオントラップ電極。電極と電極の間の1 mmの空間にイオンを閉じ込め、イオンに向かってレーザーを直径0.1 mm程度まで絞って照射する。



前島密賞は、通信事業の創始者「前島密」の功績を記念し、その精神を伝承発展せしめるために設けられたものです。情報通信事業（郵政事業を含む）及び放送事業の進歩発展に著しい功績のあった者に贈呈され、本年度、NICTからは2件の受賞がありました。市村学術賞は、大学ならびに研究機関で行われた研究のうち、学術分野の進展に貢献し、実用化の可能性のある研究に功績のあった技術研究者またはグループに贈呈されます。本年度、NICTからは1件の受賞がありました。

※所属・役職名は受賞者決定時点のものです。

公益財団法人 通信文化協会 第67回 前島密賞

67th Maejima Award

団体 情報通信研究機構 宇宙天気情報 社会利用展開チーム

●受賞内容：宇宙天気情報の社会利用の展開

●受賞日：令和4年4月7日

●概要 太陽活動による電波利用等への影響（宇宙天気情報）の利用について、ユーザーと直接議論するための「宇宙天気ユーザー協議会」を発足して議論を活発化させ、社会が必要とする情報提供のための観測・モデル・アプリケーション等の開発を進め、また、宇

宙天気の24時間監視体制を構築するなど、宇宙天気の観測業務の実利用に多大な貢献をした。

受賞の言葉 この度は前島密賞を頂き大変ありがとうございます。宇宙天気予報は、太陽から地球まで各領域の横断的な知識を必要とします。この度の



（撮影：電波技術協会 杉山氏）

左から、平電磁波研究所長、石井電磁波伝搬研究センター長、久保宇宙天気予報グループリーダー

共同受賞は正に宇宙天気予報に関わる方々の結集によるものと感じます。今後とも社会が求める情報提供に努めたいと思います。

奨励賞 吉田 悠来（よしだ ゆうき）

ネットワーク研究所 フォトニックICT研究センター
光アクセス研究室 主任研究員

●受賞内容：低コスト・低消費電力を実現する新しい超高速光伝送用信号処理技術の研究開発

●受賞日：令和4年4月7日

●概要 デジタル信号処理技術により、アレイ型強度受信器による強度情報の相関から光信号の位相情報を推定し回復・復元する方式を新たに研究開発し、光強度受信のみでコヒーレント通信信号の強度・位相情報を受信・復調する技術を世界に先駆けて実証し

た。将来社会におけるデジタルトランスフォーメーションの加速において、更なる功績が期待される。

受賞の言葉 基幹系光ファイバ網で用いる光コヒーレント伝送方式を、アクセス網など身近なところでも利用可能にする信号処理技術に取り組んできました。



（撮影：電波技術協会 杉山氏）

研究をサポートくださった機構内・外の皆様に深く感謝いたします。今後も更なる性能向上や実用化を目指して努力してまいります。

公益財団法人 市村清新技術財団 第54回 市村学術賞貢献賞

The 54th Ichimura Prize in Science
for Distinguished Achievement

東脇 正高（ひがしわき まさたか）

未来ICT研究所 小金井フロンティア研究センター グリーンICTデバイス研究室 室長

●受賞内容：酸化ガリウムデバイスの先駆的研究開発

●受賞日：令和4年4月15日

●概要 世界初の酸化ガリウム（Ga₂O₃）トランジスタの動作実証を果たしたことを皮切りに、これまで数々のデバイスプロセス、エピタキシャル成長技術を開発し、それらをマイルストーンと位置づけられる新規デバイスの実現、優れたデバイス特性の実証につなげた。さらに、一連の研究開発成果・技術を移転したGa₂O₃ベンチャー企業の設立に貢

献するなど、多くの優れた研究業績、産業化に向けた活動等により、現在までGa₂O₃デバイス・材料分野を牽引し続けている。

受賞の言葉 栄誉ある市村学術賞を受賞できたこと大変光栄に存じます。自身の酸化ガリウムデバイス研究開発におけるこれまでの活動が認められたことを大変嬉しく思うと同時に、その責



左から3番目が東脇正高

任の重さも感じております。今後も本受賞を一つの励みとして、酸化ガリウムデバイスの実用化、産業化に向けて尽力していきたくと考えております。