

Interview

## 時間はここから生まれる！

日本標準時を生成し世界の時刻に貢献する

### 時空標準研究室

NICT時空標準研究室は、正確な時刻を生成し日本標準時として提供するとともに、国際標準時の生成にも貢献している。正確な時間は、現代社会の基幹インフラのひとつである。産業・経済も学術も正確な時間なしでは成り立たないからだ。

時空標準研究室は具体的にどのような研究を行い、何を目標しているのか。時空標準研究室室長の井戸哲也と電磁波研究所上席研究員の花土ゆう子に話を聞いた。

#### ■時間の定義はどのように変遷してきたか

— どのようにして、正確な時間が求められるようになってきたのでしょうか。

**花土** 昔、いちばん計りやすかったのは、太陽の動きです。太陽が昇ってまた次の日に太陽が昇るまでを一日とする。そして、一日を分割して1時間、1分、1秒を作っていました。しかし、太陽の昇る時刻は場所によって違います。狭い地域で生活していた時代はそれでよかったのですが、通信や鉄道の発達で人間の行動範囲が広がるとともに、時刻を合わせる必要が出てきました。

そこで、場所が離れていても時間を共有できる方法を作ろうということになり、1920年代に、世界時 (UT)<sup>\*1</sup>が登場し

ました。グリニッジ子午線における一日の始まりを夜中の0時とした平均太陽時です。しかし、地球の自転はあまり正確ではないということがわかってきました。

そこで今度は、地球の公転周期を使おうということになりました。地球が太陽の周りを一回りする時間を1年とし、それを分割して日・時・分・秒を決めたのです。これが1960年に決められた歴表時 (ET)<sup>\*2</sup>です。ここまでは天文観測によって時間が決められていました。

— 天文観測の精度はあまり良くなかったのですか。

**花土** 地球の自転速度にはふらつきがありますし、公転周期も正確に計ろうとすると大変時間がかかります。ETが決まる少し前の1955年、イギリスの国立研究所NPL<sup>\*3</sup>で世界初のセシウム原子時

### 井戸 哲也 (いどてつや)

電磁波研究所 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)。

### 花土 ゆう子 (はなどゆうこ)

電磁波研究所 上席研究員

大学院博士課程前期修了後、1989年、郵政省通信総合研究所 (現NICT) に入所。以来、時刻・周波数標準に関する研究開発などに従事。博士 (工学)。

計が誕生しました。セシウム原子が持つ固有の遷移周波数を利用することで、1秒を非常に精密に計ることができました。さらに、1967年の国際度量衡総会では、セシウム原子の遷移周波数 (低いエネルギー状態に移る際に出る電磁波の周波数) を9192631770Hzとして時間の単位「秒」が定義されることとなりました。

#### ■標準時はこうして生成される

— 現在はどのようにして標準時を決めているのですか。

**花土** フランスにBIPM<sup>\*4</sup>という国際機関があります。ここで世界各国の400台を超える原子時計が作り出す「秒」のデータを集め、重みを付けて平均し、それを基にして世界の標準時を決めています。

## Interview

## 時間はここから生まれる！

日本標準時を生成し世界の時刻に貢献する

ただし平均しただけでは刻みの間隔が正確かどうかはわかりません。そこで、本当に1秒の長さが正しいかどうかを調べるために、一次周波数標準器というものを使います。これは、自分自身で1秒の長さを正確に測ることができる装置で、「時計の神様」と呼ばれています。

——普通のセシウム原子時計とは違うのですか？

**井戸** 基本的にセシウム原子時計なのですが、時間を計る方法が違います。原子泉型（atomic fountain）と呼ばれるもので、セシウム原子を噴水のように打ち上げ、レーザー冷却した原子とマイクロ波を相互作用させて超高精度に秒を計ります。誤差は、250万年から2億年に1秒という正確さです。この時計は世界に10数台しかありません。そのうちの1台がNICTにあり、現在2台目を開発中です。

——なるほど、超高精度な原子泉型のセシウム原子時計に替わっていくのですね。

**井戸** 残念ながらそうではありません。この一次周波数標準器は、精度は極めて高いのですが連続運転ができないのです。量産もできないので故障すると交換が難しい。

**花土** ですから、一次周波数標準器は、普通のセシウム原子時計から作られた合成原子時の刻みを定期的に校正するために使われます。

——BIPMはどのようにして世界中の原子時計データを合成しているのですか。

**花土** GPS衛星などを仲介として使います。GPS衛星は搭載した原子時計に基づ

く精密な時間と位置情報を乗せた電波を出しています。例えば1つの衛星の信号を同じ時刻に複数の場所で観測し、そこにある原子時計と比較することで、離れた原子時計のずれを知ることができます。このようにして比較しあった時計データをBIPMで加重平均し、確度の高い1秒を決めるのです。

——標準時の刻みの正確さは確認できませんが、時間の起点はどこなのでしょう。

**花土** 国際単位系で「秒」をセシウム原子の遷移周波数を基に定義したのは1967年です。しかし、原子時計の刻む国際原子時TAI<sup>\*5</sup>の起点は、イギリスでセシウム原子時計が発明されてから3年後の1958年です。この国際原子時に「うるう秒」を時折入れて地球の自転におおむね合わせたものが、私たちが日常的に使っている協定世界時UTC<sup>\*6</sup>です。日本標準時JST<sup>\*7</sup>は、協定世界時に9時間をプラスしたものとなっています。

### ■日本標準時の生成・配信

——NICTはどのようにして日本標準時を生成・配信しているのでしょうか。

**花土** NICTには18台のセシウム原子時計があります。これは市販されているもので、それぞれの「秒」を加重平均して日本標準時を生成しています。ただ、それだけでは協定世界時とずれてしまうので、衛星を介して世界の原子時計と比較し、協定世界時に合うように調整しながら日本標準時を生成しています。NICTの原子時計データは、協定世界時の基となるBIPMの合成原子時においても高い寄与率で使われています。

日本標準時の供給方法としては、まず

電波時計に向けた標準電波の発射があります。これは、おおたかどや山（福島県）とはがね山（佐賀県-福岡県）の標準電波送信所から長波帯の電波（40kHz、60kHz）に乗せて送信しています。

このほか、主に放送局向けにアナログ及び光電話回線を使ったテレホンJJY、インターネットを通してPCの時刻を合わせるNTPサービス、タイムビジネス事業者への時刻供給のほか、各種測定器や水晶発振器の周波数較正なども行っています。

——昨年、神戸に副局ができましたが、こちらの役割は？

**花土** 主に災害時のバックアップ用です。神戸副局には標準時を生成するセシウム原子時計が5台とNTPと光テレホンJJYの設備があります。供給装置については通常はスタンバイ状態にあり、非常時のみここから供給するようになっています。

### ■時空標準研究室の取組

——時空標準研究室では、日本標準時の生成・配信のほかにどのような研究を行っているのでしょうか？

**井戸** 当研究室には全部で4つのグループがあります。周波数標準グループは、セシウム一次周波数標準器、光標準器などの原子周波数標準の研究開発を実施しています。また、CSAC<sup>\*8</sup>という超小型のチップスケール原子時計の開発も行っています。

先ほどお話ししましたように、日本標準時グループでは、セシウム原子時計18台で正確な時刻を作り、日本標準時（JST）として国民の皆様にお届けする

業務を行っております。また、新しい平均時刻信号の生成法の研究開発も行っています。

周波数・時刻比較グループは、離れた地点の周波数・時刻を比較する手法を研究し、日本標準時が世界の標準時とどれくらいずれているかを常にチェックしています。上記の2つのグループと関連した仕事です。

時空計測グループは、VLBI\*9（超長基線干渉計）に関する研究開発です。茨城県鹿嶋市に専用のアンテナ設備があり、宇宙の電波源（クエーサー）をとらえることで、海外のVLBI局との距離をミリ単位で測っています。

——VLBIは標準時の生成とはどのように関係しているのでしょうか。

**井戸** うるう秒の挿入には地球の自転の様子を知る必要があります。地球は自転速度がふらついていますし歳差運動も加わって複雑な動きをしています。VLBIを使うと自転速度の精密な測定ができます。誤差は1ミリ秒以下です。普通の天体観測ではこのような精度は実現できません。

——研究開発の国際連携は？

**井戸** 我々のような各国の時刻をつかさどる機関では、先ほど述べた国際原子時生成のための400台超のうちの一部となる商用セシウム原子時計や水素メーザーを運用してそのデータをBIPMに送るとともに、国際原子時が刻む1秒を校正することで協定世界時の生成に資することが期待されています。そのために用いるツールが我々が開発している原子泉型一次標準器や次世代の光格子時計等の光周波数標準です。これからも、これらの仕

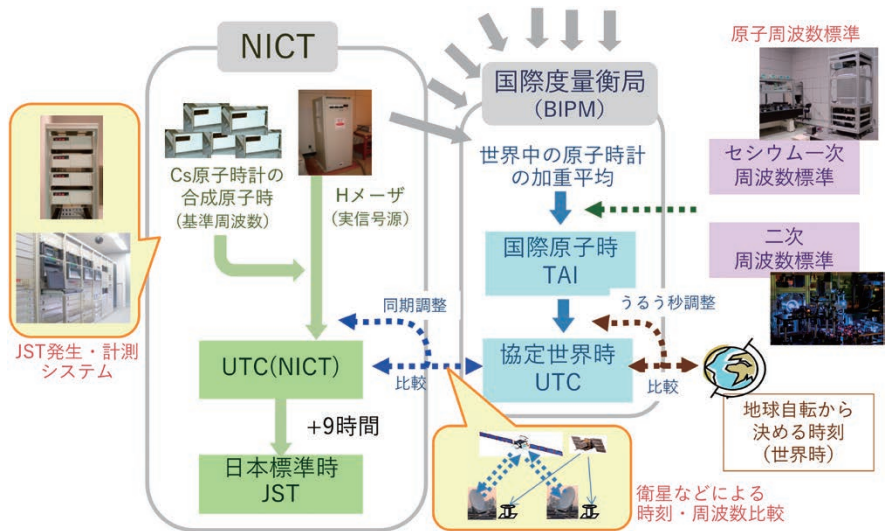


図 標準時生成の仕組み。NICTだけでなくBIPMや世界中の研究機関との協力・相互依存のもとに、社会生活の基準となる時刻は生成・維持されています。

事を通して、国際社会に更なる貢献をしていきたいと考えています。

我々がストロンチウム光格子時計を利用して半年間にわたって生成した実信号としての時刻は、BIPMが世界中の原子時計や原子泉周波数標準のデータを集めて生成した計算結果としての時刻に対して0.8ナノ秒しかずれていませんでした。このようなデータも、BIPM等と共同で解析するなどの国際連携を行っています。

### ■「秒」がますます重要になってきた

**花土** 国際活動では「秒」の定義を決める会議にも参加しており、国際標準の策定等に関わっています。また、アジアの新興国に対して標準時生成等に関する技術支援も行っています。さらに、もうひとつ重要なのは国際相互承認の仕事です。例えばメーカーが周波数測定器を作り、それを輸出する場合、品質・性能が国際的に保証されていないといけません。そういった計測手法の標準化や国際相互承認に関する業務も行っています。

——これからの時空標準研究室に求められるものはなんですか？

**井戸** 当研究室としては、まず第一に日本標準時を確実に安定して提供することです。また、現在、光格子時計の登場で時間の精度が数桁高まろうとしており、

こういった高精度な時間を国民の皆さまにお届けできる日がいずれ来るかと思っています。その時のために、高い精度をどのように使いこなすかということも考えていかなければならないと思っています。

国際単位系の「秒」の再定義の時期も近づいています。昨年はキログラムの定義もプランク定数に基づくものになり、「秒」が他の基本単位の定義に更に深く関わるようになり、時間の単位がますます重要なものとなっています。

また、スマートフォンに搭載できるような超小型のチップスケール原子時計の開発も進めます。近い将来、スマートフォンで精密な時刻を利用できるようになればこれまでになかったような斬新なアプリが開発されることでしょう。

——時間は重要な社会インフラのひとつということですね。

**井戸** はい、ですから、時間の標準に休みは許されないので。重要な基幹インフラのひとつとして停止させないという決意をもって、更なる研究開発を進めていきたいと考えています。

\*1 UT: Universal Time  
 \*2 ET: Ephemeris Time  
 \*3 NPL: National Physical Laboratory  
 \*4 BIPM: Bureau International des Poids et Mesures  
 \*5 TAI: Temps Atomique International  
 \*6 UTC: Coordinated Universal Time  
 \*7 JST: Japan Standard Time  
 \*8 CSAC: Chip Scale Atomic Clock  
 \*9 VLBI: Very Long Baseline Interferometry

# 未開拓な周波数領域に新しい標準をつくる

## テラヘルツ周波数標準の確立を目指して



### 長野 重夫

(ながの しげお)

電磁波研究所  
時空標準研究室  
主任研究員

大学院修了後、2005年NICT入所。光周波数標準用フェムト秒レーザー光コム、テラヘルツ周波数標準などに関する研究に従事。博士（理学）。

**貴** 重な周波数資源であるテラヘルツ領域の利活用に大きな注目が集まっています。長い間、「未開拓周波数帯」と呼ばれてきたこの領域には、ユーザーの利便性を向上させるための共通インフラである周波数標準が存在してきませんでした。NICTではテラヘルツ領域に新しい標準を立ち上げるための研究が進められています。世界に先駆けたこの研究によって、国際的に広く実際に使われる標準、すなわちデファクトスタンダードの獲得も期待されています。

### ■研究の背景

電波と光の周波数の間にあるテラヘルツ領域（約0.1～10THz）は、電子回路技術と光エレクトロニクス技術による両翼からの攻略を拒み続けてきたので、「未開拓の周波数帯」と呼ばれてきました（図1）。ところが、情報通信の急激な発展に伴い、この領域が超高速通信のための貴重な周波数資源として認識されるようになっていきます。また、物質を形づくる、様々な分子の吸収線（指紋スペクトル）がこの領域に存在することから、分光分析や非接触計測などへの活用も既に始まっていて、その市場規模は増加の一途をたどっています。今後、科学から私

たちの実生活に至る多くの場面で、テラヘルツ領域の利用は広がっていくと思われます。

一方、これまでに使われてきたテラヘルツ帯分光器の中には周波数の正確さが3～4桁しかなく、測定の再現性も乏しいことから、指紋スペクトルによる分子の同定結果に信頼性の問題が生じる例も出てきており、ユーザー間で混乱が起らないように共通の周波数尺度（周波数標準）を設定することが重要になりつつあります。しかし、この領域ならではの精密計測の難しさなどが要因となって、テラヘルツ周波数標準に関する研究は国内外の標準研究所において、これまではほとんど未着手という状況でした。

NICTは電波法を根拠としてテラヘルツ標準の確立に対する貢献が求められており、またテラヘルツ領域のデバイス開発からセンシング研究などで培ってきた豊かな技術的土壌が整っていたことも踏まえて、時空標準研究室では標準器だけにとどまらず、その周辺技術である周波数計測及び周波数伝送を三位一体として研究しています（図2）。

### ■テラヘルツ領域に周波数のものさしをつくる

周波数標準器を開発するためには、正確な周波数計測が行えなければなりません。そこで、私たちは研究の第一歩として、光コム技術を応用したテラヘルツ周波数カウンターを開発しました。光コムとは、一定の周波数間隔で並んだ多数のレーザー光の集まりのことで、その並びが櫛（コム）のように見えることから、その名前が付いています。これは光周波

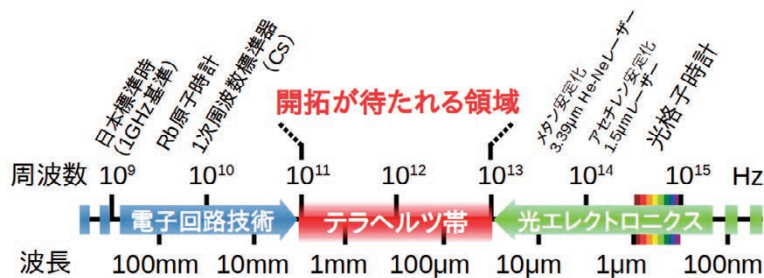


図1 周波数（波長）標準の現状とテラヘルツ領域の関係

数のものさしになるので、光格子時計の計測などに幅広く利用されてきました。半導体の光伝導素子などを使うと、この光コムを周波数変換することができて、テラヘルツ領域にコム構造を発生させることができます。私たちは光伝導アンテナを利用して光コムを変換し、テラヘルツコムを発生させました。このコムの間隔を、日本標準時を基準として制御するとテラヘルツ領域の周波数ものさしになり、被測定テラヘルツ波の絶対周波数を計測できるようになります。

計測そのものを研究対象とする計量学の観点からは、このような方式で作られた周波数カウンターの測定限界に関心があります。そこで、1つの被測定テラヘルツ波を2台のカウンターで同時に測定し、得られた周波数の差を見ることで測定限界を評価したところ、カウンターの持つ周波数揺らぎは $10\mu\text{Hz}$ 以下になることが明らかになりました。これは計測精度に換算すると、17桁レベルに相当していて（図3）、現在開発中のテラヘルツ標準器の評価にとどまらず、理論提案されている極低温分子を参照基準に使った「テラヘルツ分子時計」に対しても十分な性能です。

### ■テラヘルツ周波数標準を遠くへ送る

電波や光の場合、大気中もしくは光ファイバー



図2 テラヘルツ周波数標準の研究イメージ

バー内での吸収が弱いと、遠距離通信が容易です。ところが、テラヘルツ領域には水蒸気による強い吸収があり、大気中での伝送は困難です。また、テラヘルツ波用の導波路も実用の域に達していません。そこで、私たちはコム技術を使ったテラヘルツ周波数伝送法を開発しました。この方法ではテラヘルツ標準の位相情報を、コム技術を駆使してレーザー光にコピーし、そのレーザー光をファイバー伝送した後、再びテラヘルツ領域に情報を復元します。長さ20kmの光ファイバーを使った実証実験では、テラヘルツ標準の伝送精度は18桁に達していることが確認されました（図3）。将来的には光ファイバー網を使って、測定機器の遠隔校正への応用が期待できます。

### ■テラヘルツ光源の周波数を安定にする

周波数標準器の原理は、原子や分子の吸収線を参照基準にして電磁波の周波数を安定化することです。よって、取り扱いきやすい光源や精密分光の手法が存在することも大切ですが、どのような原子・分子を選択するかが重要になってきます。私たちは詳細な理論検討を行い、一酸化炭素（CO）分子を基準として採用することにしました。その吸収線はテラヘルツ領域に広く分布しており、市販の

光源による分光が可能です。また、単純な構造を持つ二原子分子なので、外部の電磁場を原因とする周波数シフト量を比較的容易に計算することもできます。既に私たちは、発振周波数が約3.1THzの量子カスケードレーザーをCO分子の吸収線に周波数安定化することに成功しました（図4）。詳細な性能評価などはこれからの課題ですが、まずは7桁程度の周波数不確かさ（正確さ）を目標として研究を進めています。

### ■今後の展望

テラヘルツ周波数標準の研究には挑戦的な課題も数多く残されており、これからの発展に対する興味は尽きません。その一方で社会的なニーズを踏まえながら、この新しい標準と精密計測技術の両輪を世界に先駆けて立ち上げることで、NICT発の国際的なデファクトスタンダードの獲得も目指していきます。

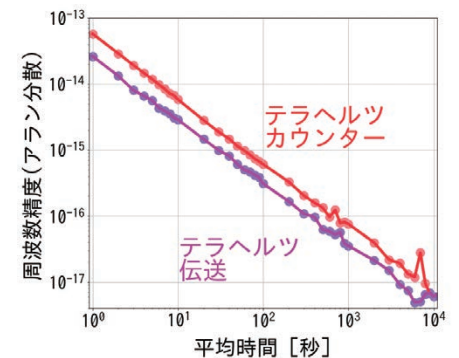


図3 周波数カウンターの計測精度（赤）と周波数伝送法の伝送精度（紫）。どちらも0.3THzでの実験結果。

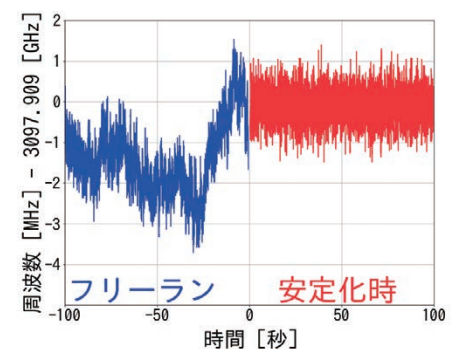


図4 3.1THz量子カスケードレーザーの周波数揺らぎ：フリーラン時（青）、CO分子に安定化時（赤）

## 「UTCの将来問題(うるう秒論争)」の最新動向



**岩間 司**

(いわまつかさ)

電磁波研究所  
時空標準研究室  
研究マネージャー

大学院修了後、1985年郵政省電波研究所(現NICT)入所。以来、1~3GHz帯地上波伝搬特性解析、移動通信のセル構成、日本標準時供給、周波数校正、時刻認証基盤技術の研究開発等に従事。博士(工学)。



2017年1月1日のうるう秒挿入の瞬間

**昨** 年秋、重さの定義が改定されたというニュースが話題となりました。これは、2018年11月に開催されたメートル条約に基づく最高機関である第26回国際度量衡総会(General Conference on Weights and Measures: CGPM)において、質量の基準がキログラム原器からプランク定数に基づいた質量の定義に変更されたからです。

実はこの第26回CGPMにおいて時刻の定義についても決議Bの中で勧告されています。

1つめの勧告は、現在のUT1 - UTCの上限値についての検討であり、もう1つはUT1 - UTCの予測精度の向上とその公表の方法についてです。

ここでUT1とは地球の自転に基づく天文時系である世界時(Universal Time: UT)のひとつであり、UTCとは協定世界時(Coordinated Universal Time: UTC)のことでUT1に準拠するように調整された原子時系です。ただし、地球の自転周期は一定ではないため、UT1とUTCの間にはずれが生じます。

現在、国際電気通信連合無線通信部門(International Telecommunication Union Radiocommunication Sector: ITU-R)の勧告TF.460-6でUT1-UTCの上限は±0.9秒以内と定義されています。UT1-UTCの値がこの上限を超えそうになった際には1秒を

挿入または削除してUTCの時系がUT1から0.9秒以上開かないよう調整しています。この調整の1秒がうるう秒です。1972年に10秒挿入の特別調整を実施以降、うるう秒調整はこれまでに27回実施され、UT1-UTCの値を±0.9秒以内に維持してきました。

うるう秒調整を行うと調整前と調整後で時刻が1秒ずれることとなるため、近年の高度情報化社会においては通信インフラ等に様々な影響が懸念されます。実際に2012年のうるう秒調整時には世界中で様々なインシデントの報告がありました。日本は情報通信の安全性等の観点からうるう秒調整については廃止の立場です。

ITU-Rにおいては、2000年から「UTCの将来問題」としてうるう秒調整の廃止に関する議論が行われており、2012年の無線通信総会で活発な議論が行われたが合意に至らず、2015年の世界無線通信会議(World Radiocommunication Conference 2015: WRC-15)においても決着せず、WRC-23までは現行のUTC(うるう秒調整)を維持することが決議されました。この際に、ITU-R以外の国際機関等の意見を幅広く集めWRC-23までに提言を受けることも併せて決議されました。

今回のCGPMの決議Bは、このWRC-15の決議を受けたものであり、CGPMとして「UTCの将来問題」に取り組むことを決議したことになります。

UT1-UTCの上限値については、例えばUT1 - UTCを1分とした場合、最近60年の結果(合計で37秒を調整)から類推すると約100年ごとの調整周期、UT1 - UTCを1時間とした場合、調整周期は5,000年以上となり実質的にうるう秒調整の廃止と同義となります。

今後、CGPMの決議を受けて国際度量衡委員会及び時間・周波数諮問委員会で議論され、その結果がCGPMを通じて2023年のWRC-23にフィードバックされ「UTCの将来問題」に寄与することになります。

### Draft Resolution B

#### On the definition of time scales

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting, considering that

(略)

and recommends that

- all relevant unions and organizations consider these definitions and work together to develop a common understanding on reference time scales, their realization and dissemination with a view to consider the present limitation on the maximum magnitude of UT1-UTC so as to meet the needs of the current and future user communities,
- all relevant unions and organizations work together to improve further the accuracy of the prediction of UT1-UTC and the method for its dissemination to satisfy the future requirements of users.

Convocation of the General Conference on Weights and Measures (26th meeting) 抜粋