

FEATURE

01

時空の
歪みまで
見える

160億年に1秒しか狂わない 「光格子時計」を実現

私たちの生活を支える時計が、新たな進化を遂げた。2014年初頭、東京大学の香取秀俊教授らが開発した「光格子時計」が、これまでの原子時計をはるかに上回る精度を実現したのだ。その精度はなんと「160億年に1秒しか狂わない」というもの。超高精度の時計の出現によって、私たちの「時間」は、どのように変化するのだろうか？

なぜ、高精度の時計が必要なのか

セシウム原子時計は3,000万年に1秒しか狂わない。なぜこれほど高精度な時計が必要なのか。実は、原子時計のおかげで、私たちは携帯電話やカーナビを利用できている。

日本で使われている携帯電話の電波の周波数は、700メガヘルツ～2ギガヘルツ。ヘルツは1秒間の振動数なので、1秒間に7億回～20億回も振動する電波で通信していることになる。もし、1秒の長さが不正確だったら、この周波数も変化して混信が起きたり、つながらなくなったりしてしまうだろう。

カーナビは、原子時計を搭載した複数のGPS衛星から送られてくる時刻の信号からそれぞれのGPS衛星までの距離を計算して、車の位置を割り出している。GPS衛星と自分との距離は、送信と受信の時刻の差に電波の伝わる速度（光速と同じ秒速約30万キロメートル）をかけることで求められる。仮に時計が0.0000001秒狂っていたら、位置が30メートルもずれてしまう。原子時計の高い精度があるからこそ、私たちはほとんど誤差を感じずにカーナビを利用できる。

歴史に記された 日本初の時計は水時計

「漏刻を新しき台に置く、始めて候時を打つ、鉦鼓（しょうこ）を動かす」——日本書紀には、671年6月10日（グレゴリオ暦）、天智天皇が“漏刻（ろうこく）”と呼ばれる水時計を使って日本で初めて時を知らせたという記述がある。これをもとに、6月10日は「時の記念日」として定められた。

それから1,300年以上経ったが、60年ほど前まで時間の単位は地球の自転周期を基準にしていた。その後、1956年に自転周期よりも変動が小さい公転周期を基準に「1秒」が定義され、1967年には、

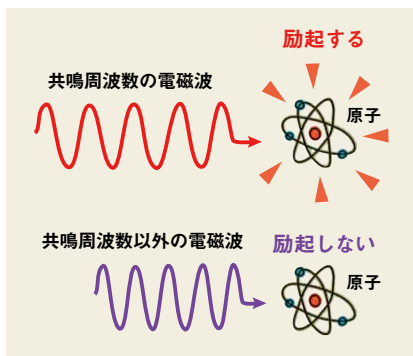
天体の運行よりもはるかに正確なセシウム原子時計で新たな「1秒」が定義された。セシウム原子時計は3,000万年に1秒しか狂わない。時代を経ながら、時間の定義は変遷してきた。

さらにセシウム原子時計の精度を1,000倍程度向上させ、次世代の時間標準として注目されているのが光格子時計だ。香取さんらの開発した光格子時計は宇宙の年齢138億年で1秒以下の誤差しか生じない精度を実現した。

時計の相対誤差と原子時計の原理

私たちが普段使っている水晶振動子を用いたクォーツ時計の誤差は、1カ月で15～30秒程度である。1カ月を秒に直すと267万8,400秒。時計の性能は相対誤差で求めるので、1カ月に30秒狂う時計の相対誤差は、 $30 / 2678400 = 1 / 89280$ となる。これはだいたい10万分の1(10の5乗分の1)になる。つまり、この時計は5桁の有効数字で時間を計ることができる。

原子時計の主役である「原子」は、種類によって異なる固有の共鳴周波数を持つ。原子は、この共鳴周波数の電磁波(電波や光など)だけを吸収したり放出したりする。1秒の基準となる原子時計に使われるセシウム(正確にはセシウム133)原子の共鳴周波数は、91億9,263万1,770ヘルツ。セシウム原子にこの周波数のマイクロ波(電磁波の一種)を当てると、原子はそれを吸収しエネルギー状態が高くなる(「励起」という)。励起したセシウム原子は、この周波数のマイクロ波を放出する。



香取 秀俊

かとり・ひとし

東京大学 大学院工学系研究科
物理学専攻 教授

1994年、東京大学大学院 博士学位取得(工学)。
97年、JST ERATO 五神協同励起プロジェクト
基礎グループリーダー。2002年、JST さきがけ研
究員。05年、JST CREST 研究代表者。
10年より現職。JST ERATO 香取創
造時空間プロジェクト研究総括。
11年、理化学研究所 香取量子
計測研究室 主任研究員。



共鳴周波数は常に一定なので、セシウム原子時計は、セシウム原子が励起したときのマイクロ波が91億9,263万1,770回振動する時間を「1秒」と定義しているのだ。

セシウム原子時計はおよそ15～16桁の精度を実現しており、15桁の精度が国際原子時として全世界で共有されている。

共鳴周波数を いかに正確に測るか—— 単一イオン光時計

日常生活では、このセシウム原子時計で十分な精度がある。しかし、量子力学や素粒子論といったミクロの世界を表現する物理学では、さらに高精度の原子時計が望まれている。その1つが、1980年代に考案された「単一イオン光時計」である。

原子時計で最も重要なのは、原子の共鳴周波数そのものをいかに正確に測るかだ。原子は運動しているので、共鳴周波数を測ろうとすると、ドップラー効果により周波数がずれてしまう。

ドップラー効果とは、近づいてくる救急車のサイレンが実際より高く聞こえ、遠ざかっていくサイレンが低く聞こえる現象のこと。つまり、静止している人は、動いている物体が出す音の周波数を正しく測ることができない。このことは、音だけでなく電波や光にも当てはまる。

動いている気体の原子から放出される電磁波のドップラー効果によるずれをなくすには、原子を捕まえておく必要がある。これを可能にする「ポール・トラップ」という技術を使ったのが単一イオン光時計である。ポール・ト

ラップとは、電場を使ってイオンを捕まえるのだが、その電場を互いに打ち消し合うようにうまく作用させることで、イオンの共鳴周波数に影響を及ぼさない工夫がなされている。原子を静止させ、電場の影響も打ち消して、共鳴周波数を正確に測れるようにした。

このアイデアによって単一イオン光時計は究極の原子時計と呼ばれるようになった。考案したアメリカの物理学者ハンス・デーメルトは、1982年の時点で、18桁の精度を持つ原子時計が可能になると考えていた。

しかし、単一イオン光時計には、実用化を妨げる大きな難点があった。原子やイオンの周波数測定では、量子力学的な効果によって生じる誤差、「量子揺らぎ」の影響を考慮して、多くの測定の平均をとらなければならない。単一イオン光時計では、約1秒かけて1個のイオンの周波数を15桁の精度で測る。18桁の精度を得るには100万回の測定が必要になるため、1回の測定に10日以上かかってしまうのだ。

光格子時計の誕生

1990年代に、香取さんはドイツのマックス・プランク量子光学研究所の客員研究員を務めていた。偶然にも、単一イオン光時計の研究グループの実験室が隣にあり、その研究動向を見聞するうちに、時間がかかり過ぎるという難点に気づいた。

「計測を100万回繰り返すかわりに、100万個の原子を一度に観測することができれば、たった1回の計測で18桁の精度が得られるのではないか?」

帰国した香取さんは、2001年、画期的なアイデアを思いつき、それを利用する「光格子時計」の構想を初めて発表した。2003年にはストロンチウムを使った原子時計の基礎実験に成功。ストロンチウムはセシウムよりも共鳴周波数が高い。セシウム原子の共鳴周波数は約92億ヘルツで、マイクロ波の領域にある。ストロンチウム原子の共鳴周波数はそれよりも高い光の領域にあり、約429兆ヘルツと5桁も高い。

より細かな数字で1秒を表せるので、原子時計の精度をさらに上げることができる。香取さんらが光格子時計の手法を確立すると、アメリカやフランスなどの研究者もこ



図1 光格子時計の構造

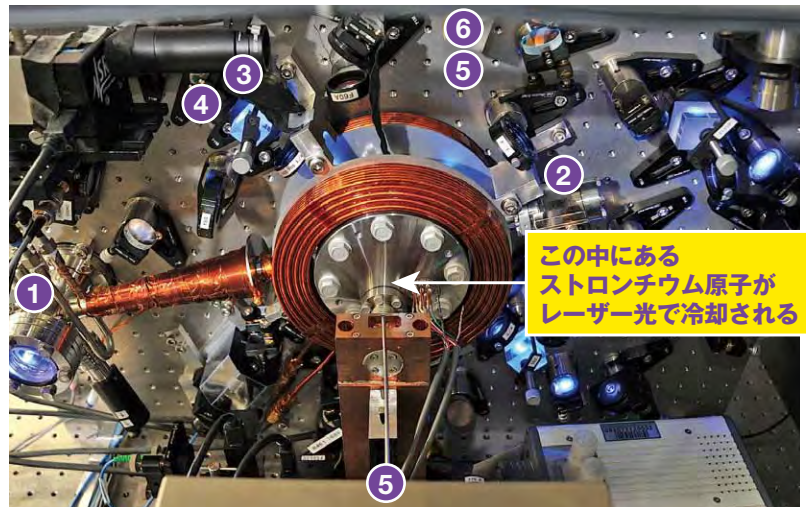
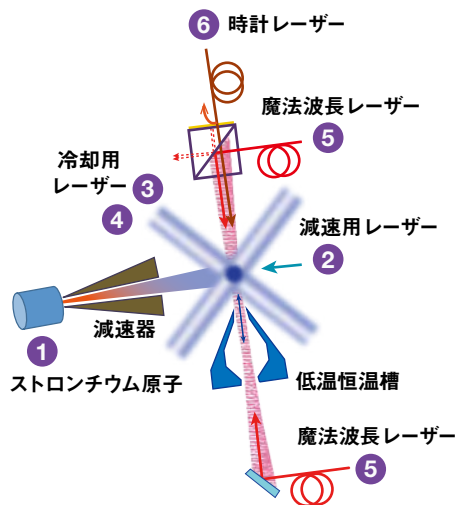


図2 光格子時計による原子の閉じ込めの流れ

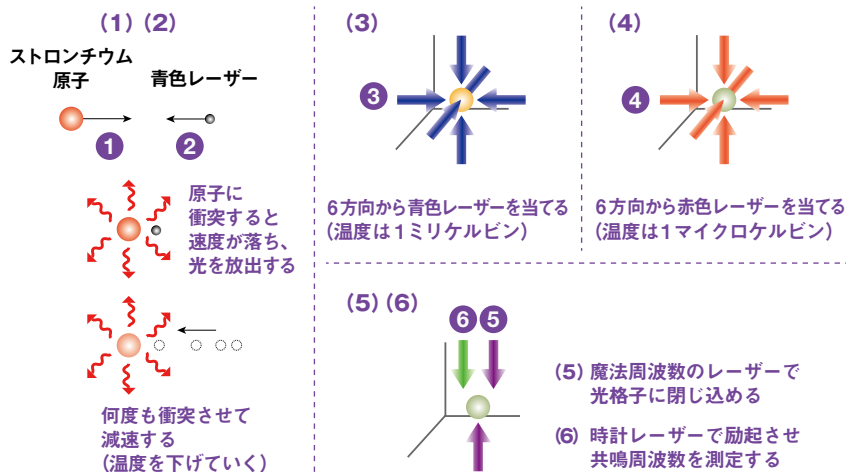
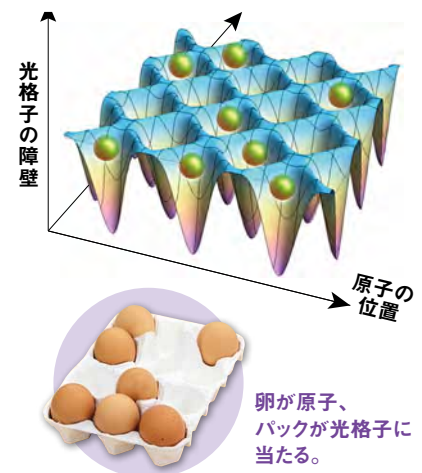


図3 パックに入った卵のように原子を閉じ込める



ぞって光格子時計の開発に乗り出した。光格子時計は、図3のようにレーザー光で格子状のエネルギー障壁に原子を閉じ込めるのでその名がある。

そして2014年始め、香取さんは、光格子時計で160億年に1秒しか狂わない精度を達成したのである。これは18桁の精度にほかならない。

このような超高精度のカギとなったのは、100万個を超える原子のエネルギーのずれをキャンセルしてしまう波長を持つレーザー光の発見だった。

原子をレーザーで静止させ、魔法波長で閉じ込める

原子の周波数を正確に測定するには、

原子を静止させ、電場などが原子の共鳴周波数に影響を及ぼさないようにしなければならない。そのために、光格子時計では以下の6ステップで計測を行う(図1、図2)。

(1) (1) (写真では見えていない)で熱せられ摂氏約700度になっているストロンチウム原子を、真空容器に導入する。

(2) 直進するストロンチウム原子に、反対方向(2)から青色のレーザー光を当てる。光も粒子なので、ストロンチウム原子は光子を1個吸収することに減速する。これを繰り返して原子の速度を落としていく。温度は原子の運動エネルギーに比例する。運動がゆっくりになるほど温度が下がり、絶対零度(0ケルビン=摂氏-273.15度)に近づいていく。

(3) 6方向から青色のレーザー光(3)を

当て、さらに原子を減速する。このとき、原子の温度は1ミリケルビンまで下がる。

(4) 今度は6方向から赤色のレーザー光(4写真では見えていない)を当てて原子をほぼ静止状態にする。このときの温度は約1マイクロケルビン。

(5) ここで原子を光格子に閉じ込めるため、ある特別な波長(魔法波長)のレーザー光を照射する(6赤外線なので見えない)。原子はパックに入った卵のように、整列して動かなくなる(図3)。

(6) 最後に、原子に時計レーザーと呼ばれるレーザー光(6写真では見えていない)を当て、励起したときの共鳴周波数を計測する。

ここで、光格子時計を最も特徴づけているのが、魔法波長を用いる(5)の操作である。

魔法波長のレーザーのはたらき

光格子時計は、レーザー光の干渉でできる光の格子に原子を閉じ込める。格子に閉じ込めるとは、エネルギーが低い凹んだところに原子が取り込まれて動かないということだ。基底状態と励起状態のエネルギー差をプランク定数と呼ばれる物理定数で割ったものが遷移周波数になる。

光格子を作るために原子にレーザー光を当てると、本来原子の持つエネルギーが変化してしまう。一般には、基底状態と励起状態でこの変化量が異なるため、エネルギー差も本来の値から変化する。つまり共鳴周波数が変化してしまつて正確な時計が作れないことになるのだが、香取さんらは、絶妙な波長のレーザー光で原子を閉じ込めれば、このエネルギー差が同じになることを発見した(図4)。エネルギー差が同じため、原子をレーザー光に当てていないのと同じ状態で閉じ込められる。この波長を「魔法波長」と名づけた。

「ポール・トラップでは電場を打ち消しあうようにかけ、あたかも電場が存在しないようにして原子を静止させていたのです。魔法波長のレーザー光で閉じ込めれば、基底状態とのエネルギー差は同じになるので、卵

パックがあること(レーザーによる影響)に気づかないというわけです」と説明してくれた。

また提案当初から、原子を取り囲む室温の容器の壁から輻射される電磁波が、原子の共鳴周波数に影響を及ぼしてしまう現象が課題だった。しかし、新たに原子を囲む壁の温度を下げる技術を開発することで解決した。そして、2014年始めに、時刻が160億年かかっても1秒もずれない高精度を達成した。

相対性理論の世界を身近に実現できる

光格子時計にはストロンチウムのほか、イッテルビウム、水銀などを使ったものもあり、世界中の研究者がその精度を競い合っている。

その結果、驚くべき精度を持つことになった光格子時計は、時を測るという役割を超え、アインシュタインの「相対性理論」の世界を体験できるようになったのだ。

相対性理論によると、動いている乗り物の中では、静止状態よりも時間の進み方が遅くなる。同様に、重力の大きいところは小さいところよりも時間の進み方が遅い。し



光格子時計の精度を測定するには、同じ精度を持つもう1台の光格子時計が必要だ。

かしこの効果はあまりに小さいので、日常生活ではまったく実感できないが、時計の精度が上がれば、この差が見えてくる。

光格子時計では、地表からの高さが1センチメートル違うだけで時間のずれが観測できるという。標高が高くなるほど、重力は小さくなる。つまり、時間の進み方が早くなるというわけだ。

香取さんがおもしろい例を話してくれた。

「現在の光格子時計は実験室がいっぱいになるくらい大きいですが、将来は車に積めるくらいコンパクトになると思います。小さくなった光格子時計を搭載した車が、光格子時計のあるスタンドで燃料を入れるとしましょう。この時点で2つの光格子時計を同時刻に合わせます。車がスピードを上げると車内の時間の進み方が遅くなります。そして、この車が再び同じスタンドに立ち寄

図4 魔法レーザーで原子を閉じ込めると、共鳴周波数は一定になる

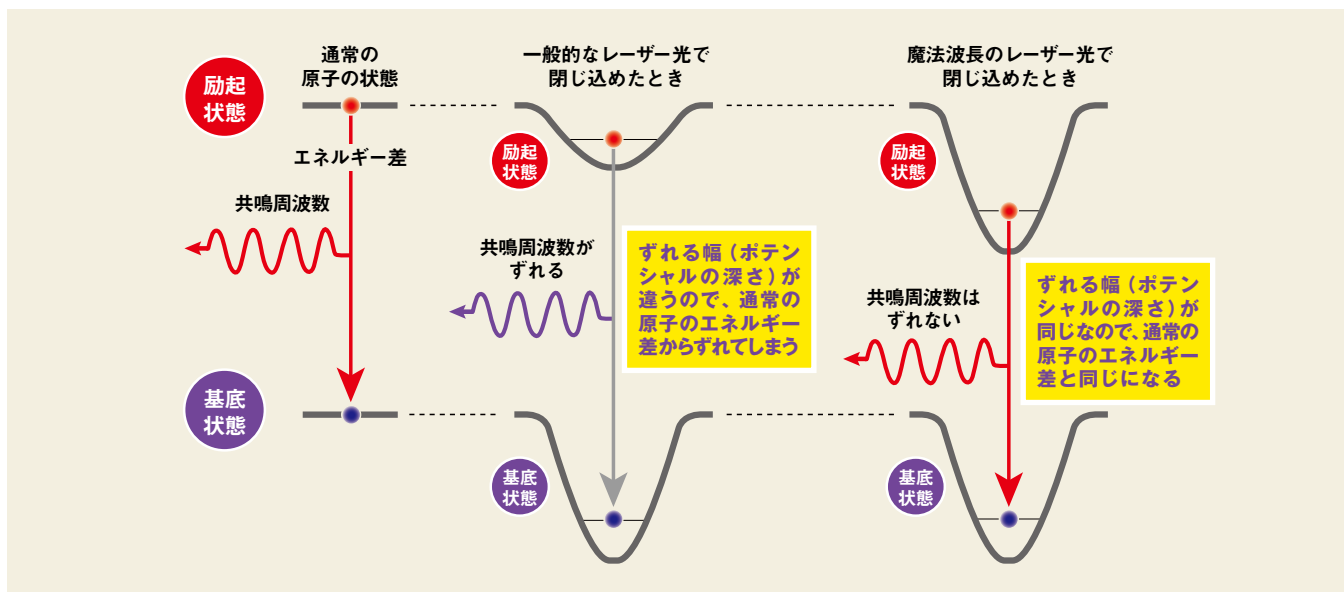
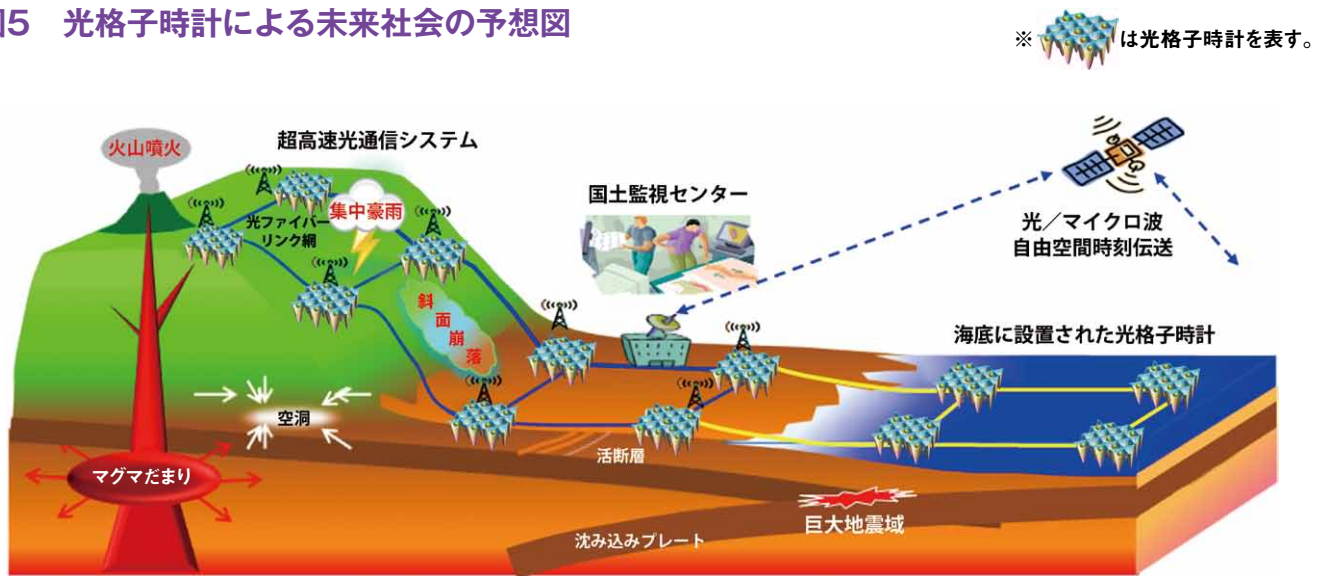




図5 光格子時計による未来社会の予想図



重力のわずかな変化を計測できる光格子時計を使うと、地下資源やマグマの動き、活断層やプレートの変化などを高精度にとらえられるので、まったく新しい防災情報システムの構築も夢ではない。さらに、超高精度のカーナビによる自動運転システムなども実現できるかもしれない。

ると、その光格子時計と車の光格子時計では時刻にずれが生じています。その差を比べることで、途中の車のスピードがわかってしまうのです」。

「でも、それをごまかす方法もありますよ。スタンドに戻って時間を確認する前に高い山に登れば、重力が小さいから時間の進み方が早くなって帳消しにできるというわけです」。今は香取さんの単なるジョークでも、20年後には現実になっているかもしれない。

時間のずれから 地殻変動の探索、地下資源探査も

光格子時計は、微妙な重力の変化もとらえることができる。地下のマグマだまりや空洞、金属資源などは地表の重力を変化させるので、地下の状態の変化が時間のずれとして観測される。このことから地殻変動の観測や火山の研究、地下資源の探査にも活用できるかもしれない。

さらに光格子時計を使って「物理定数は本当に定数か?」という根本的な疑問に迫る研究も進めている。「物理学の最も基本的な定数である微細構造定数(電荷素量、プランク定数、光速の物理量で定義される無次元量)が本当に定数なら、どの原子で時計を作っても同じ時を刻むはずなのです」

と言う。もし、ストロンチウム原子、水銀原子、イッテルビウム原子などの異なる原子を用いた光格子時計の精度がさらに向上し、それぞれの時間を比較してずれが見つければ、現在の物理学の基礎となっている定数が定数でなくなる可能性があるというのだ。

新しい時間を創造する

現在、私たちは15桁の精度のセシウム原子時計が刻む国際原子時で同じ時間を共有している。この先、18桁の精度で秒の定義ができたら、国際原子時も18桁で共有できると想像したくなるが、香取さんは、単に時計の精度が上がること以上に、時計の見方が変わるほどの変革になるだろうと言う。

「18桁の国際原子時を成立させるには、世界各地に置く時計の位置を標高差1センチメートル以内の精度で測定しなければなりません。それも大変なのですが、それだけでは済まないのです。地球は月や太陽の引力の影響でわずかに変形しています。30センチメートルぐらいの幅で、標高が伸びたり縮んだりするわけですね。そうすると日本と経度が大きく違うドイツとは、同じ時間を共有できなくなります。標高差が同じでも、地下に空洞が空いていたり、重いものがあると重力が変わります。ではどうすればいいの

か。まったく同じ位置に置かない限り、2台の時計が同じ時を刻むことはない、ということです。超高精度の光格子時計は“時空間”の歪みを可視化する時計なのです」。

まさにダリが描いた歪んだ時計の絵画の世界に迷い込んでしまう。ともあれ、光格子時計は文明を一步前に進める働きをするに違いない。

香取さんはこんな未来も予測している。

「かつてGPSができたとき、カーナビに利用されるなどと予想した人はいませんでした。光格子時計も、誰かが思わぬ使い方を発見して、私たちの暮らしをより豊かに便利にしてくれると思います」。

時間はあらゆる科学の基盤となるものだが、これまでは欧米諸国がイニシアチブをとって整備してきた。イギリスはグリニッジ標準時を決め、アメリカはGPSのシステムを作り上げた。将来、光格子時計による新しい「1秒」が定義され、新たな利用が始まれば、光格子時計を発明した日本がこの分野で大きな貢献をするだろう。光格子時計は、これまで完璧な時間のものさしと考えられていたセシウム原子時計のものさしを、測られる対象にしてしまう、まさに「新しい時間を創造する」スーパークロック(スパクロ)なのだ。