

光格子時計の現状と今後の展開可能性について

平成28年6月20日

科学技術・学術審議会 先端研究基盤部会
量子科学技術委員会

21世紀の科学技術進展と我が国の競争力強化の根源となり得る量子科学技術の推進について検討している当委員会において、成果の進展が特筆される研究として、トピックス的に光格子時計の状況について聴取・議論を行った。

量子科学技術特有の研究の進展や今後の可能性について示唆があり、国民・社会にとっても研究の状況が見えるよう可視化しておくことは意義があるとの観点から、現状と今後の展開可能性を以下にまとめた。

1. はじめに

高精度な原子時計は、衛星搭載によるナビゲーションシステム（GPS）はもとより、モバイル、クラウド、電子取引といったネットワーク通信における基準時間、工業や先端科学技術における精密計測等の要として、我々の身近な生活を含む現代社会のあらゆる活動に欠かせないインフラとなっており、普段我々が意識しない様々な場面で正確な時間を提供している。半世紀前まで、地球の自転や公転周期を基準にしていた時間の定義（国際単位系の1つである秒）は1967年の国際度量衡委員会において、はるかに正確なセシウム原子時計によって国際的に統一的に再定義され、現在の「1秒」を与える国際原子時は、セシウム原子（ ^{133}Cs ）の共鳴周波数に基づいて3000万年に1秒のずれ（ 10^{-15} という15桁の精度）で時間を刻んでいる。

このセシウム原子時計の精度を更に1000倍以上向上させ、次世代の原子時計を提供する可能性のある研究が近年著しく進展しており、2001年に我が国研究者が提案した光格子時計がその代表例である。光格子時計は、宇宙年齢の138億年でも1秒も狂わないという精度を持つ。

2. 研究の状況

（経緯）

光格子時計は、特別な波長のレーザー光で作った光格子¹の中に、卵パックに入った卵のように原子を捕捉し、別のレーザー光を当てて共鳴周波数を測定する原子時計である。

この光格子の研究は、1980年代後半、極低温に冷却した原子を微小空間に閉じ込めて観測しようという基礎物理的な興味から始まったものである。その後、光格子で規則正しく並んだ原子を使った様々な研究（例えば量子シミュレータ等の情報処理を見据えた研究）が提案されたが、光格子を作るレーザー光による原子の摂動²を極限まで抑える「魔法波長」を

¹ 光格子：波長、振幅が等しい2つの対向するレーザー光が重なり合っできる定在波では、光強度が極大となる「電場の腹」が半波長毎に形成される。レーザー光の波長を適切に選ぶと、「電場の腹」で原子のエネルギーが極小になり、原子がその位置に捕捉される。このような、光の定在波によってできる周期的なポテンシャルに捕捉された原子を光格子と呼ぶ。

² 摂動：力学系において、主要な力の寄与による運動が、他の副次的な力の寄与によって乱される現象。光格子は一般的には空間的に原子のエネルギーを変化（摂動）させるため原子時計としては性能が低下するが、魔法波長と呼ばれる特定の波長のレーザー光を使って原子を閉じ込めるとその影響を受けない。

我が国研究者が2001年に提唱、2003年に実証することにより、誰も想定していなかった光格子を時計に使うという画期的なアイデアが実現に向かうこととなった。

光格子時計は他の量子科学技術と同様に、レーザー冷却法³や光周波数コム⁴といった最先端レーザー技術とともに進展し、10数年にわたる連綿とした基礎研究を経て、2010年代前半にセシウム原子時計よりも高い精度を示すまでに至った。そして、その驚くべき精度により、時間を計るツールという当初の役割を超え、アインシュタインが相対性理論で見出した「時空のゆがみ」も計測できるツールとしての展開可能性も見えてきている。

量子科学技術はこのように、新たな科学技術アイデアとそれを実現する地道で継続的な研究により、当初想定した出口とは異なる、思いもよらぬ応用が見出されるポテンシャルを有し、将来の我々の生活や経済・社会に大きなインパクトを及ぼす可能性を秘めているものと言える。

(現状と世界的な競争)

光格子時計は現在、次世代原子時計の新たな潮流となり、日本をはじめ、米国、欧州、中国など世界で20以上のグループが研究を進めている。既にセシウム原子時計の精度の限界 (3×10^{-16} という16桁の精度。1億年に1秒のずれ) よりも高精度となった光格子時計の正確さを測るには、異なる原子を使用した光格子時計の周波数比の測定が精度評価の客観的な指標となるが、日本における光格子時計の精度は世界をリードしており、今から10年ほど先に控えている、国際度量衡委員会による「秒の再定義」で想定される精度である 3×10^{-18} (18桁の精度。106億年に1秒のずれ) に迫る、 4.6×10^{-17} (17桁の精度。7億年に1秒のずれ) が2016年に達成されている。また、同種原子を用いた光格子時計の比較では 2×10^{-18} (18桁の精度。160億年で1秒のずれ) の精度での一致が確認され、その上の19桁の精度を実現することも視野に入れることができるところまで来ている。

超高精度の2台の光格子時計の時間の進み方の差を計測することは、重力で曲がった相対論的な「時空のゆがみ」の計測を可能とし、従来の時計概念を超越した新しい計測ツール・時空間プローブ (重力ポテンシャル計) としての応用も可能となる。相対性理論によると重力の強い場所は弱い場所よりも時間の進み方が遅くなり、例えば一般的に標高が低くなると重力は強くなるため、時間の進み方が遅くなる。これは日常生活では全く実感できないが、18桁の精度の光格子時計を用いれば、2台の時計の高さが数cm違うだけで、時間の進み方の差が観測できる。

2015年には東京大学地震研究所と理化学研究所の間で、直線距離にして約15km離れた光格子時計を光ファイバーでリンクし、その時間の進み方の差を計測することにより、両地点間の約15mの高低差を数cmの精度で観測することに成功している。将来的には、捕捉する原子の数を増加させること等による光格子時計の更なる精度向上で、mm単位の高差を数分間で計測できる可能性がある。

なお、光格子時計を長距離にわたってリンクする研究については欧州が進んでおり、全欧州での光ファイバーリンク網の構築や衛星経由でのリンクによる光格子時計の比較が進めら

³ レーザー冷却：レーザー光を用いて、原子・分子やイオンを絶対零度近くまで冷却(エネルギーを低く)する方法。

⁴ 光周波数コム：周波数軸上に等間隔に並んだ成分(モード)からなるコム(櫛)形のスペクトルを持つ光信号。光の周波数を正確に測定することができる。

れているところである。

3. 今後の展開可能性

光格子時計の今後の研究の進展には、「秒の再定義」のみならず、様々な展開可能性が見出される。現時点で見通せるものとしては以下の通りであり、研究の進展等によっては更なる展開可能性が拓かれうる。

- 国際的な「秒の再定義」への貢献

我が国で実現された光格子時計はその研究と利用を更に進展させる技術的素地が国内に構築されている。これらにより欧米諸国が圧倒的にリードしてきた重要な国際的計量標準であり、10年程先に控えている国際単位系の「秒の再定義」において、我が国がこれまで為し得なかったような積極的な国際貢献（我が国発でアジア初の積極貢献による「秒の再定義」）が期待できる。

- 物理学の革新に繋がりうる実験的検証

「秒の再定義」そのものが、時間がその単位に入っている光速やプランク定数等の基礎物理定数や他の基本単位の精度に影響を与え得るが、さらに、現在の物理学の理論は「基礎物理定数が定数である」との仮定のもとに成り立っているところ、光格子時計によりこれら物理定数の恒常性の検証や変化の検出が実験的に可能になり、標準モデルを超える物理学の探索に繋がりうると考えられる。仮に、異種原子の光格子時計の高精度比較によって時間のずれが見つければ、研究対象の物理定数が定数でなくなり、現在の物理学の暗黙の仮定を覆すような発見に至る可能性がある。

- 「時空のゆがみ」の計測を用いた経済・社会的利用

光格子時計の小型化・可搬化や耐環境性向上が今後進むことで、場所を選ばずに光格子時計の設置が可能となり、それらを安定した光ファイバー・ネットワークで結べば、設置場所における「時空のゆがみ」や高低差及び変化、微小な重力ポテンシャルの変化が高精度に計測できることとなる。つまり、全く新しい計測インフラであり、将来社会の安全・安心に貢献する時空間計測インフラとなる可能性がある。

例えば、測地分野においては、我が国の標高体系の根幹となる基準点としての利用（従来の水準測量よりも迅速で高精度な標高の決定、水準測量と組み合わせた効率的な復旧・復興測量の実施）や、GNSS⁵水準測量に必要となる高精度な標高基準（ジオイド・モデル⁶）の維持管理といった相対論的測地への展開や、地震やひずみ集中帯等の地殻変動に関する研究での利用が期待される。また、GNSS衛星測位においては、高度計測の高精度補完による位置情報の高度利用が考えられ、国土の監視・探査・防災の観点からは、地上での地殻変動の観測のみならず、地下資源探査、マグマだまりの変化検知や、GPS信号の届かない海底のような場所での地

⁵ GNSS：Global Navigation Satellite System。GPS衛星を含む衛星を用いた測位システムの総称。

⁶ ジオイド・モデル：GNSS測量によって得られる任意の測点での楕円体高から標高を算出するためのモデル。水が地球の表面で落ち着いたときにつくる面を「重力の等ポテンシャル面」と呼ぶ。測地学では、世界の海面の平均位置にもっとも近い「重力の等ポテンシャル面」をジオイドと定め、これを地球の形状としている。日本では、東京湾平均海面を「ジオイド」と定め、標高の基準としている（離島を除く）。

殻変動観測といった領域への展開も考えられ、これらの時空間情報は地震・火山に関わる防災研究の更なる進展に貢献する可能性もある。

4. おわりに

光格子時計では、地道で継続的な研究によって、当初想定しなかった応用と、将来の経済・社会にインパクトを及ぼす可能性が見出されている。量子科学技術特有の研究進展と展開可能性を示す典型例と言えよう。今後の量子科学技術の推進にあたっての示唆とするとともに、光格子時計の研究進展や展開の注視及び時宜に応じた推進を図ることが重要と考えられる。

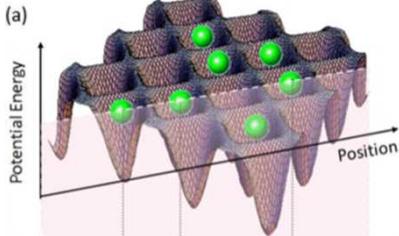
成果の進展が特筆される研究として、トピックス的に光格子時計の状況について聴取・議論を行ったところ、以下のとおり。

はじめに

- 高精度な原子時計は、GPSはもとより、モバイル、クラウド等のネットワーク通信、精密計測等の要として現代社会のあらゆる活動に欠かせないインフラ。現在のセシウム原子時計の精度（3000万年に1秒のずれ）を更に1000倍以上向上させる（宇宙年齢の138億年でも1秒も狂わない）可能性のある研究が近年著しく進展。



光格子時計：
特別な波長のレーザー光で作った光格子の中に、卵パックに入った卵のように原子を捕縛し、別のレーザー光を当てて共鳴周波数を測定する原子時計



香取秀俊教授（東大・理研）

今後の展開可能性

- 10年ほど先に控えている国際度量衡委員会による「秒の再定義」において、我が国がこれまで為し得なかったような積極的な国際貢献が期待できる。（我が国発でアジア初の積極貢献による「秒の再定義」）
- 物理定数の検証・検出が実験的に可能になり、プランク定数等の「物理定数が定数である」との物理学の暗黙の仮定を覆すような発見に至る可能性がある。
- さらに、光格子時計の設置場所における「時空のゆがみ」や高低差及び変化、微小な重力ポテンシャルの変化が計測可能な将来社会の安全・安心に貢献する全く新しい時空間計測インフラとなる可能性がある。

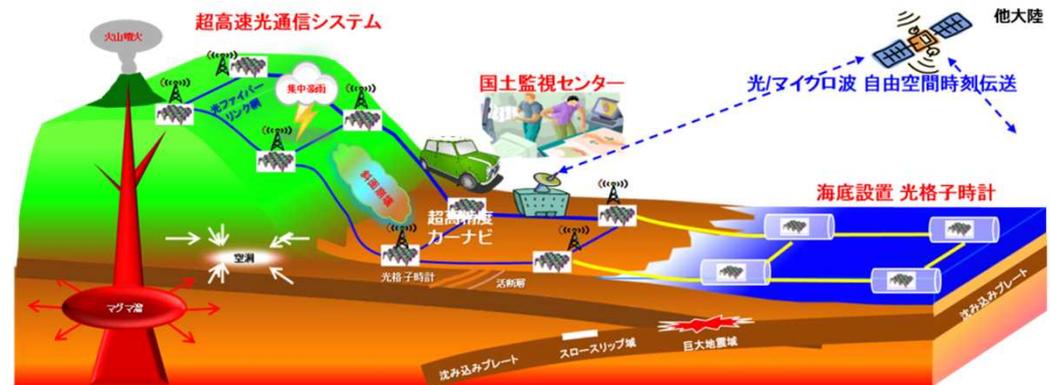
時空間計測インフラの応用例：

現在の水準測量より迅速で高精度な標高の決定等の測地分野、GPS高度利用、地下資源探査、マグマだまりの変化検知やGPSの届かない海底の地殻変動など地震・火山に関わる防災研究

研究の状況

- 我が国の研究者が2001年に提唱、10数年にわたる連綿とした基礎研究で「光格子時計」を実現。
- 日本、米国、欧州、中国など世界で20以上のグループが研究する世界的な競争。
- さらに、超高精度で相対論的な「時空のゆがみ」の計測を可能に。数cmの高低差を2台の時計の進み方の差で観測できる。

- －高さが低い→重力が強い→時間の進み方が遅い
- －更なる精度向上で、mm単位の高低差を数分間で計測できる可能性



光格子時計による時空間計測と将来社会の安全・安心への貢献

(出所) 量子科学技術委員会（第3回）香取秀俊教授 発表資料