



平成28年8月10日
科学技術振興機構（JST）
東京大学 大学院工学系研究科
理化学研究所
国土交通省 国土地理院
先端光量子科学アライアンス

超高精度の「光格子時計」で標高差の測定に成功 ～火山活動の監視など、時計の常識を超える新たな応用に期待～

ポイント

- 約15キロメートル離れた2地点の光格子時計を光ファイバーでつないで直接比較した。
- 重力の違いによる時計の周波数の差を測定し、センチメートルレベルの高精度で標高差を計測することに成功した。
- 水準測量に相当する高精度な標高差の計測や地殻変動の監視、潮汐変化の観測など、従来の時計の用途を超えた応用が期待される。

JST 戦略的創造研究推進事業および文部科学省 光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発事業において、東京大学 大学院工学系研究科の香取 秀俊 教授（理化学研究所 香取量子計測研究室 主任研究員、光量子工学研究領域 時空間エンジニアリング研究チーム チームリーダー）、国土地理院の研究グループは、直線距離で約15キロメートル離れた東京大学（東京都文京区）と理化学研究所（埼玉県和光市）に光格子時計^{注1}を設置し、2台の時計の相対論^{注2}的な時間の遅れを高精度に測定することで、2地点間の標高差を5センチメートルの精度で測定することに成功しました。

光格子時計は、香取教授が考案した高精度な原子時計で、次世代の「秒」の定義の有力候補として世界中で研究されています。「秒」の定義に求められる時計の「再現性」を担保するためには、その時計の「振り子の振動数」を他の研究機関に伝送し、複数の研究機関で「振り子の振動数」の同一性を検証することが重要です。一方、アインシュタインの一般相対性理論によれば、異なる高さに置かれた2台の時計を比較すると、低い方の時計は地球重力の影響を大きく受け、ゆっくりと時を刻みます。この結果、超高精度な時計の遠隔比較では、時計の再現性の確認にとどまらず、従来の時計の概念を超える「相対論的な効果を使った標高差測定（相対論的測地）」という応用を拓きます。

本研究グループは、先行して開発した「低温動作ストロンチウム光格子時計」を東大に1台、理研に2台設置して光ファイバーでつなぎ、遠隔地比較を行いました。同じ高さに置かれた理研の2台の光格子時計の振り子は 1×10^{-18} で振動数が一致しました。一方、東大の時計の振り子は理研よりも $1,652.9 \times 10^{-18}$ だけゆっくり振動し、これから2地点の標高差1,516センチメートルが算出されました。この「相対論的測地」の結果は、国土地理院が行った水準測量^{注3}と5センチメートルの誤差範囲内で一致し、世界で初めて遠隔地時計比較によるセンチメートルレベルの標高差計測に成功しました。

水準測量では、短区間の測定を繰り返して測定するため、長距離では誤差が累積しますが、時計比較の精度^{注4}は距離が長くなっても累積誤差は生じません。論文では、各地に設置した光格子時計が、将来、新たな高さ基準「量子水準点」を形成し、それらをネットワーク化する「時計のインターネット」の手法を提案しています。これにより、火山活動による地殻の上下変動の監視や、GNSS（全球測位衛星システム）と補完的に利用できる超高精度な標高差計測システムの確立など、安全・安心に向けた社会基盤への実装も期待されます。

本研究は、内閣府 最先端研究開発支援プログラムの一部支援を受けて行われました。本成果は、2016年8月15日（英国時間）発行の英国科学誌「Nature Photonics」オンライン版に掲載されます。

本成果は、以下の事業・研究プロジェクトによって得られました。

戦略的創造研究推進事業 総括実施型研究（ERATO）

研究プロジェクト：「香取創造時空間プロジェクト」

研究総括：香取 秀俊（東京大学 大学院工学系研究科 教授、理化学研究所 香取量子計測研究室 主任研究員、

理化学研究所 光量子工学研究領域 時空間エンジニアリング研究チーム チームリーダー）

研究期間：平成22年10月～平成28年3月

極低温原子操作、量子制御技術、最先端のレーザー制御技術の高度化により、セシウム原子時計の精度を凌駕する、新しい原理の原子時計「光格子時計」の実現を目的としています。

文部科学省 光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発

「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」

拠点名：「先端光量子科学アライアンス」

拠点責任者：五神 真（東京大学 総長）（※平成26年度まで）

三尾 典克（東京大学 大学院工学系研究科 特任教授）（※平成27年度から）

研究期間：平成20年度～平成29年度

「光波の完全制御技術による光科学」をスローガンとする最先端の研究と優秀な若手研究者や博士課程大学院生の育成を両輪とする事業を進めて、既存の機関や部局という枠を超えるネットワーク型の研究拠

<研究の背景と経緯>

振り子の運動や星の運行など、周期現象の繰り返しの回数を数えることで、時間を決めることができます。時計の研究とは、正確で安定な周期現象の探索です。現在の「秒」は、セシウム原子に固有のマイクロ波が、およそ 9.2×10^9 回振動する時間として定義されています。このセシウム原子時計^{注5)}に基づく国際原子時は、およそ 5×10^{-16} の精度（6000万年に1秒のずれに相当）で、全世界で共有されています。

単位時間あたりに計測できる振動数が大きいほど、「原子の振り子」の測定精度を上げられることから、セシウム原子時計のマイクロ波周波数より、さらに5桁ほど高い光の周波数を用いる「光時計」が近年盛んに研究されています。

光時計の1つである光格子時計は、「魔法波長」^{注6)}のレーザー光を干渉させて作り出した「光格子」と呼ばれる、光の波長より小さな領域（図1）に原子を閉じ込めることによって、多数個の原子の同時観測を実現できる原子時計です。香取 秀俊 教授（当時、准教授）が2001年に考案し、2003年に実証しました。その後、世界各国で光格子時計の開発競争が行われています。2015年に、香取教授の研究グループは、2台の低温動作ストロンチウム光格子時計を開発して比較し、およそ 10^{-18} の精度で周波数が一致することを確認し、セシウム原子時計の性能を100倍近く凌駕する精度を達成しています（写真1）。

時計の高精度化に伴い、近年「秒」の再定義に向けた議論が始まっています。再定義に必要な光時計の「再現性」を複数の研究機関で検証する方法の1つが、一方の研究機関の光時計の振り子の振動数を他方に送って比較する直接比較です。本研究グループ（東大グループ）は2006年から産業技術総合研究所（茨城県つくば市）と結ぶ比較実験に着手し、2011年には、情報通信研究機構（東京都小金井市）の光格子時計とつなぎ、世界で初めて光格子時計の直接比較に成功しました。世界でも同様の比較が行われており、最近、ドイツとフランスの研究グループが、 5×10^{-17} の精度で比較実験を報告しています。

この一方、「重力が強いところでは、時間がゆっくり進む」という、アインシュタインの

相対論の効果を測地技術に応用する可能性も1980年代から議論されてきました。時計の精度が極めて高くなると、この「相対論的測地」の精度が、従来の水準測量の精度に迫るようになります。例えば、地上で、異なる高さに置かれた2台の時計を比較すると、わずか1センチメートル低い位置にある時計は、地球重力の影響で、 1.1×10^{-18} だけ、時間の遅れが生じます。つまり、 1×10^{-18} の精度の2台の時計比較は、1センチメートルの精度で標高差計測を可能にします。今回の遠隔比較実験では、世界で初めて、センチメートルレベルの比較を実証しました。

<研究の内容>

本研究グループは、東京大学（東京都文京区本郷、以下、東大）に1台、理化学研究所（埼玉県和光市、以下、理研）に2台の低温動作ストロンチウム光格子時計を設置し、直線距離で約15キロメートル離れた2地点を約30キロメートルの光ファイバーで接続しました。

原子時計の精度を上げるには、原子を観測する際に生じる「量子揺らぎ（量子力学的限界から生じる測定誤差）」の影響を除く必要があります。多数回の測定結果を平均化するために時間がかかります。光格子時計は多数の原子を同時に観測することで、平均化にかかる時間を大幅に短縮することに成功しました。

このように光格子時計では、量子揺らぎを低減した結果、これまで量子揺らぎに隠されていた、原子を励起（れいき）するレーザー光の「周波数揺らぎ」の影響が顕在化し、次に解決すべき問題になりました。そこで、本研究では「同期比較」という方法を用いました（図2）。まず、理研の励起レーザーを、光ファイバーで東大へと伝送し、理研と東大の2地点で励起レーザー光の周波数揺らぎを共有しました。そして、理研に2台、東大1台の合計3台の光格子時計を時間的に同期させて運転し、周波数揺らぎの影響を共有し、それらを共通の雑音（同相雑音）として除去しました。この結果、6時間の平均化時間で6センチメートルの測定精度を得られることを確認しました。理研と東大それぞれで独立に時計を運転した場合と比較して、同期測定では、同じ測定精度を得るために必要な平均化時間は約1/100となり、測定時間の大幅な短縮を達成しました（図3）。

次に、光格子時計を3日間連続で運転し、実時間での標高差測定を実証しました（図4）。同じ高さに置かれた理研の2台の時計は、 1×10^{-18} で周波数が一致するのに対し、理研よりも約15メートル低い位置にある東大の時計では、相対論的な時間の遅れによって周波数が低くなることが観測されます。標高差に換算して、センチメートルレベルの精度を、実時間で観測可能なことを実証しました。これにより、地殻変動のような中・長期にわたる標高差の変化を常時、実時間で観測できる足がかりを得ました。

本研究グループは半年間にわたって、11回の周波数比較実験を行いました（図5）。全ての測定結果を平均したところ、東大の時計は理研の時計よりも、 $1.652.9 \times 10^{-18}$ だけ周波数が低くなっていました。この結果から、「相対論的測地」手法により2地点の標高差1,516センチメートル（誤差5センチメートル）が得られました。この結果は、国土地理院の水準測量による標高差と時計の誤差の範囲で一致し、遠隔時計比較による、センチメートルレベルの標高差測定に世界で初めて成功しました。

<今後の展開>

本研究グループは、光格子時計の実用化のため、さらなる高精度化と可搬化、自動運転、

遠隔制御、長期的な信頼性の向上にも取り組んでいます。将来はこれらを組み合わせて、遠距離時計でもミリメートルレベルの比較を可能とすることを目指しています。

水準測量では、測定距離による累積誤差が生じ、測定にも数日から数カ月にわたる時間が必要です。一方、光格子時計を使った時計比較では、測定距離による累積誤差はなく、実時間での測定も可能です。

今回実証したように、高精度な時計は、重力による時空間の歪みを観測する強力な手法です。光格子時計を使った「相対論的測地」では、数時間でセンチメートルレベルの標高差が測定できるため、数日から数カ月にわたる従来の水準測量では平均化されて見ることができない現象が観測できる可能性があります。一例として、理研（埼玉県和光市）からおおよそ1000キロメートル離れた、鹿児島県阿久根市との2地点間で、月や太陽の引力によって生じる潮汐効果による標高差の変動を見積もりました（図6）。潮汐効果による標高差の変動は15センチメートルにも達します。従って、光格子時計を2地点に設置して、振り子の振動数を比較すれば、潮汐効果で2地点の標高差が変動しているのを実時間で観測できるようになるでしょう。干潮、満潮と潮位が数時間スケールで変動するのは見慣れた現象ですが、同じ時間スケールで、遠隔地間の標高差が時々刻々と変化するのが見えるようになります。光格子時計で堅牢な時間の基準を作ると、月や太陽の引力で、時々刻々と形を変えるゴムまりのような地球があらわになるでしょう。

将来、各地に光格子時計を配置して「量子水準点」を設け、それらを接続して、「Internet of Clocks (I o C)」ともいえる光格子時計のネットワーク（図7）を構築すれば、火山活動やプレート運動などの、数時間から数年という時間スケールで起こる地殻変動（標高変化）を精密に監視できるようになります。さらには、光格子時計を積んだ車を走らせることで、地下の鉱物資源を探索したり、GNSS（全球測位衛星システム）と補完的に利用できる超高精度な標高差計測システムの確立など、光格子時計は将来の安全・安心な社会の基盤となる大きな可能性を秘めています（図8）。

<参考図>

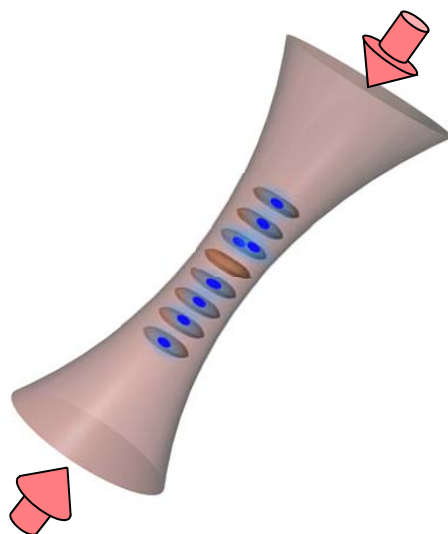


図1 1次元光格子の模式図

原子（青色の球形）が、光の定在波で作られた光格子（茶色）の中で捕獲されている様子。光格子は、「魔法波長」と名づけられた特別なレーザー（赤い矢印）波長で構成される。

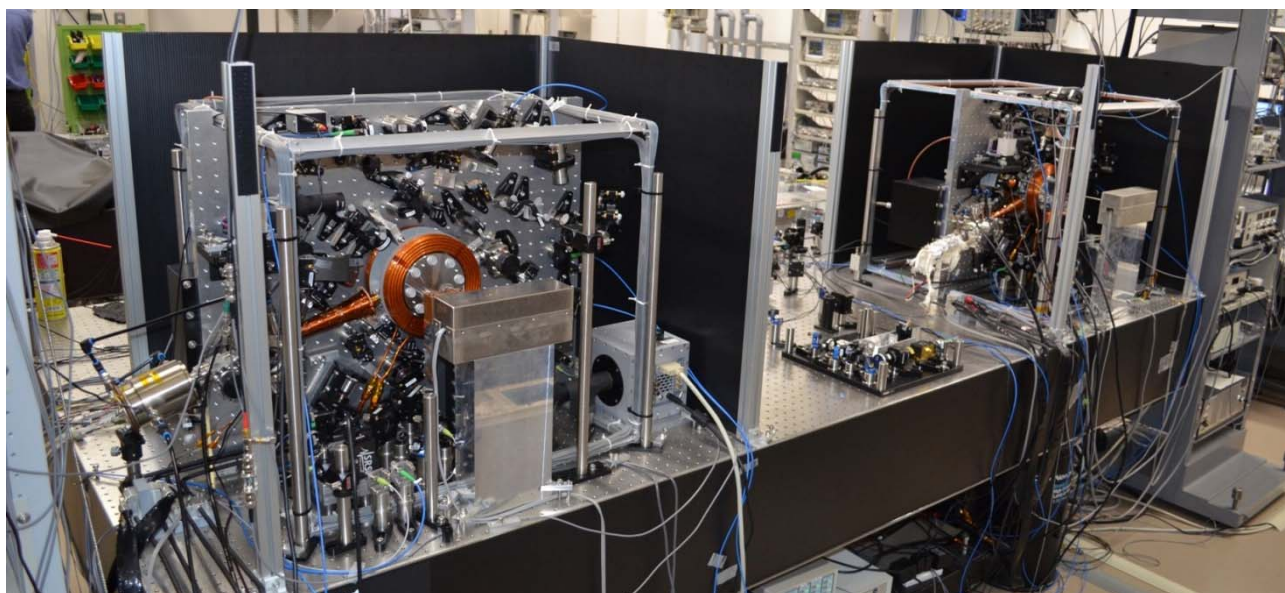


写真1 2台の低温動作ストロンチウム光格子時計（理研に設置）

今回の実験に使った光格子時計。2つは18桁の精度で一致することを確認している。また、同じ高さに置かれているため、周波数は 1×10^{-18} で一致している。

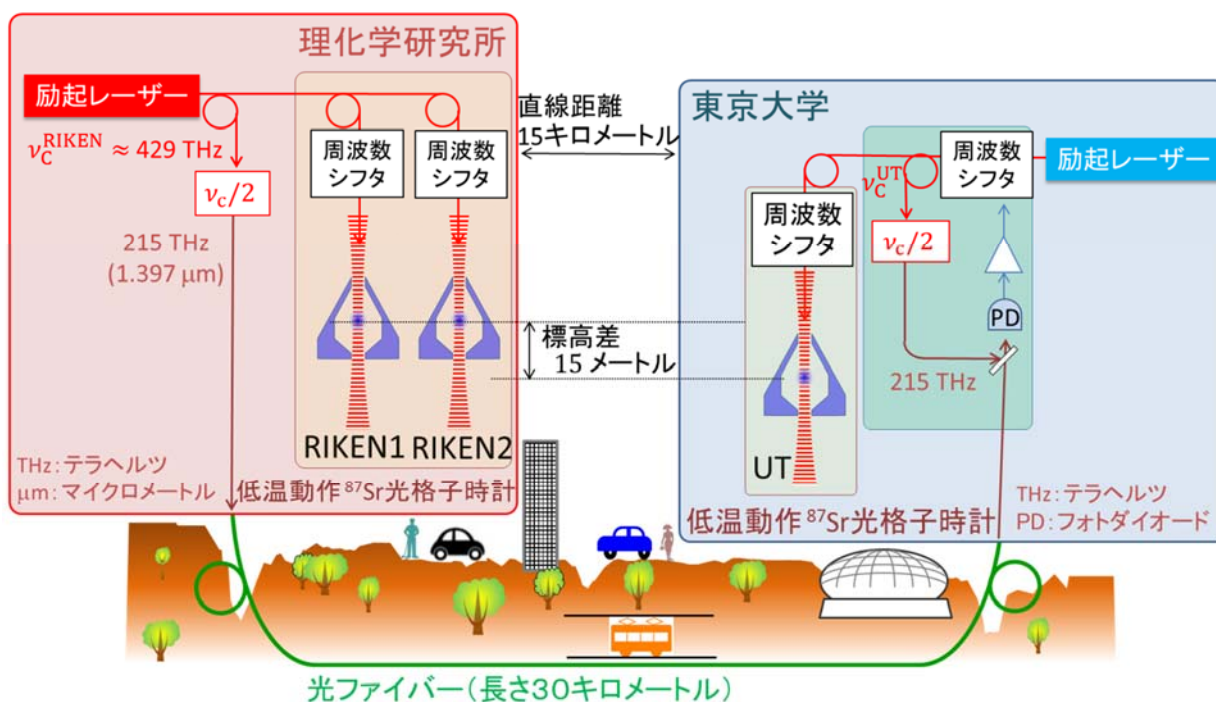


図2 実験装置の概要

東大に1台、理研に2台、計3台の低温動作ストロンチウム光格子時計を設置し、直線距離で約15キロメートル離れた東大と理研の間を約30キロメートルの光ファイバーで接続して比較した。理研の励起レーザーを東大に送り、送られた光を基準に、東大の励起レーザーの周波数を安定化した。光格子時計を同期して測定することにより、同相雑音を除去した。

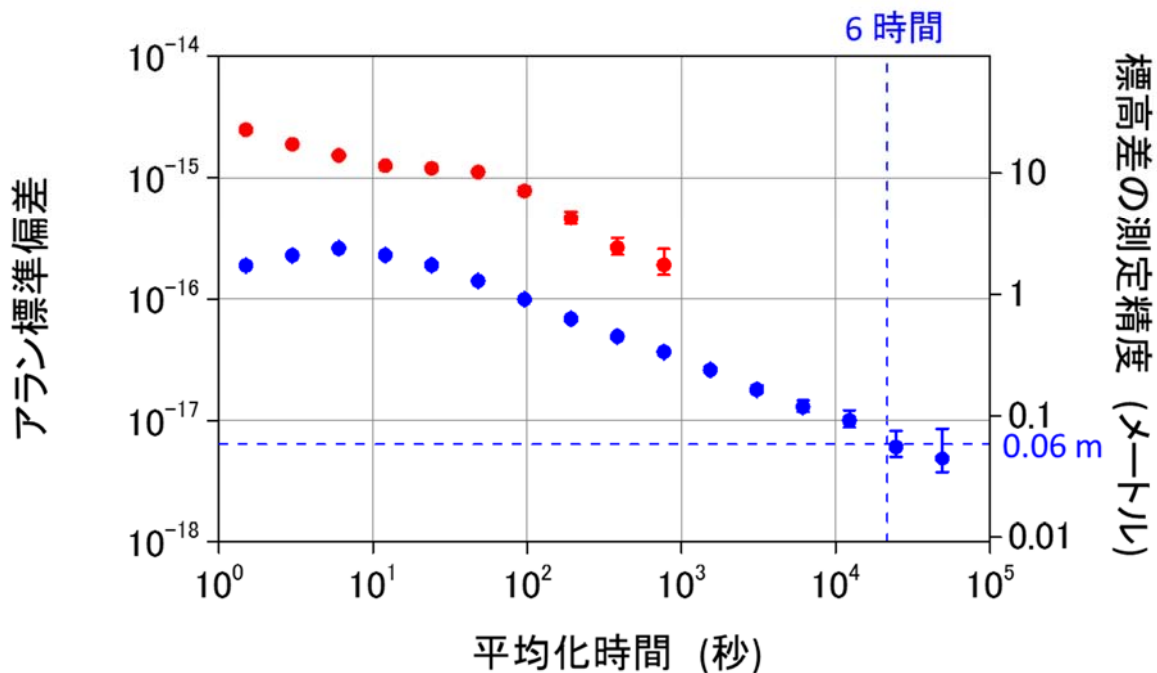


図3 平均化時間に対する到達精度 (アラン標準偏差)

周波数安定化と同期測定を行った結果 (下の青い点)、行わなかった結果 (上の赤い点) と比較して、アラン標準偏差が約 10 倍改善した。この結果、6 時間の平均時間で 6 センチメートルの精度に到達し、短時間の平均化で、高精度の標高差測定を行えるようになった。

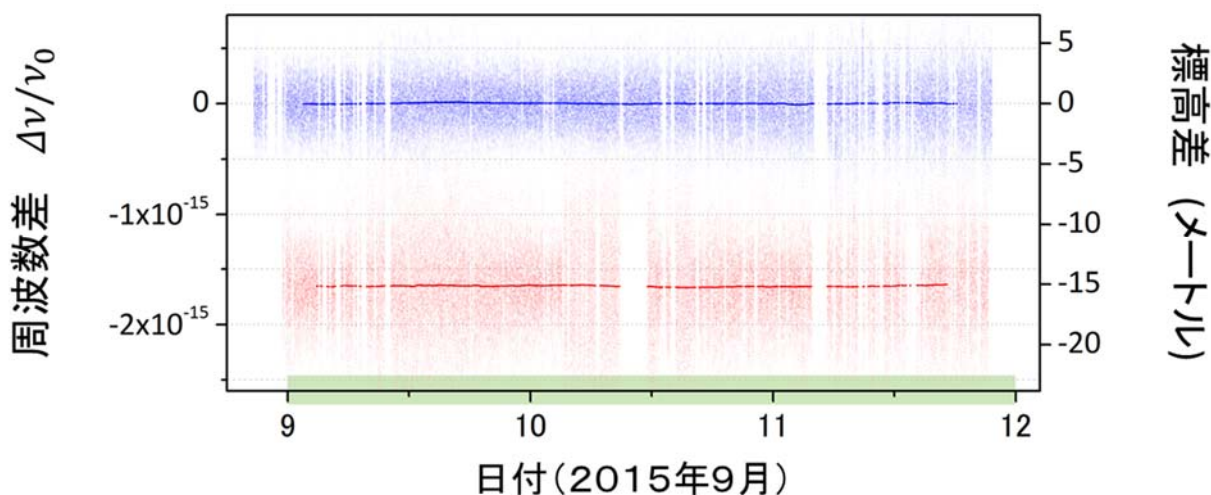


図4 3日間比較実験の結果

3 台の光格子時計を 3 日間連続で運転した。上の青い点は理研の 2 台の比較結果、下の赤い点は東大と理研の比較結果を示す。薄い点は、1.5 秒ごとに測定される標高差を表し、濃い点 (線に見える部分) は 6 時間分のデータを平均した結果を示す。理研の 2 台の時計が 1×10^{-18} で周波数が一致しているのに対し、東大は理研よりも 1.65×10^{-15} 周波数が低くなっている。このことは、東大の時計が、理研の時計に対して、約 15 メートル下方にあることを示唆する。

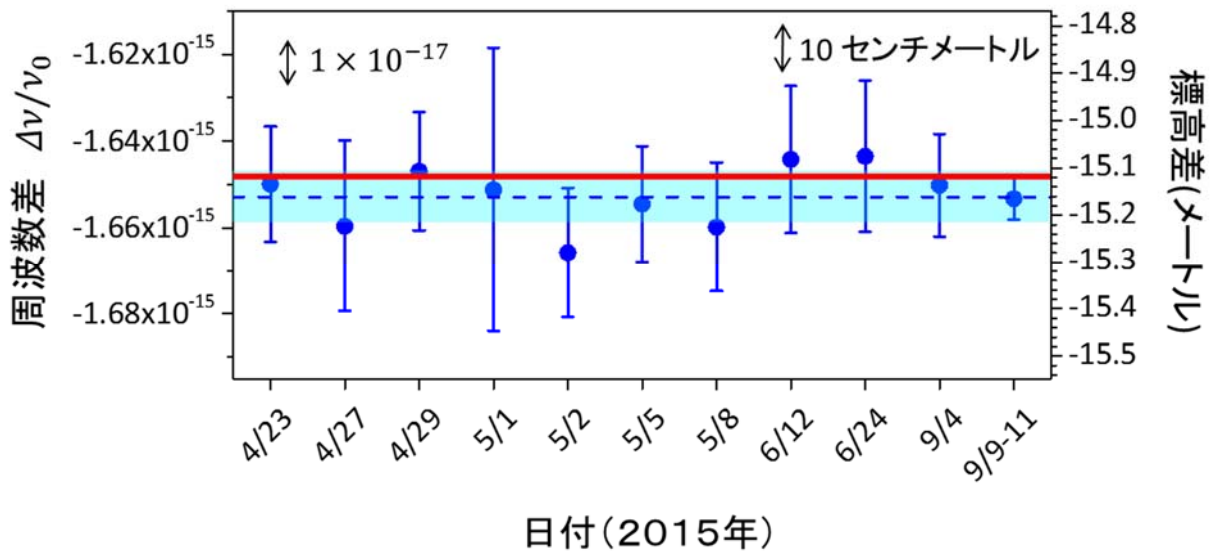


図5 東大—理研の光格子時計比較の結果

半年間にわたって、11回の遠隔光格子時計比較を行った。青い点は各回の測定結果を示す。すべての測定を平均した結果、東大の時計は、理研の時計に比べて、 1.6529×10^{-18} だけ周波数が低いと見積もられた(青い点線)。これは、標高差に換算すると、1.516センチメートルだけ東大の時計が低い位置にあることに相当する。赤い線は国土地理院の水準測量の結果を示す。2つの測定は、光格子時計比較の不確かさ、 5.9×10^{-18} (約5センチメートルの標高差精度に相当)の精度範囲内(図中央の水色の帯)で一致している。

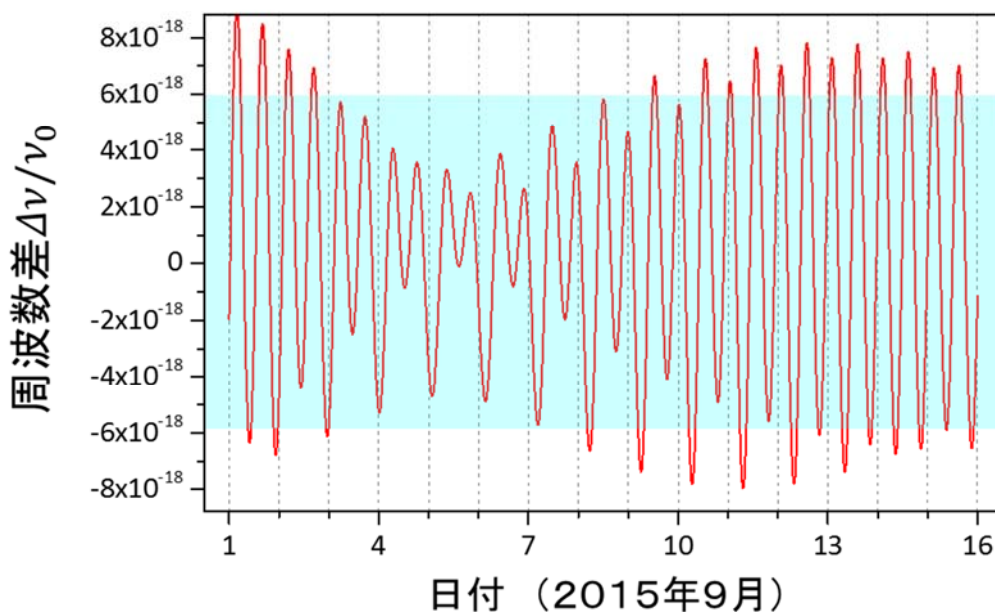


図6 鹿児島県阿久根市—埼玉県和光市の理研における、潮汐効果による周波数差の変化の見積もり

阿久根市と理研に光格子時計を置いたと想定したときに、潮汐効果の影響で、2台の時計の振り子の振動数は最大 14×10^{-18} 変化する（赤線）。今回の実験で、光格子時計比較の安定度は、6時間の平均時間で 6×10^{-18} （水色の帯）に達していることから、時計リンクの延伸によって潮汐効果の観測が可能になる。

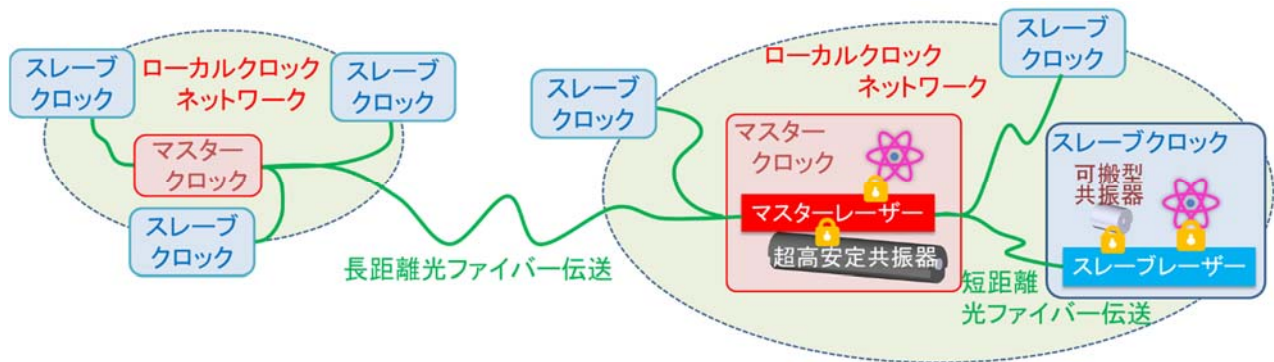


図7 マスタークロックとスレーブクロック群をつなぐ時計のインターネット接続

時計のインターネットは、超高安定なレーザー発振器を持つマスタークロックと、そのレーザー安定度を共有するように接続される多数のスレーブクロックで構成され、それぞれの時計は量子水準点として機能する。今回の実験では、理研の時計をマスタークロックとして、時計の振り子の信号を東大の時計（スレーブクロック）に光ファイバーで伝送し、同期測定の手法を使うことで、比較の安定度の向上が可能であることを実証した。

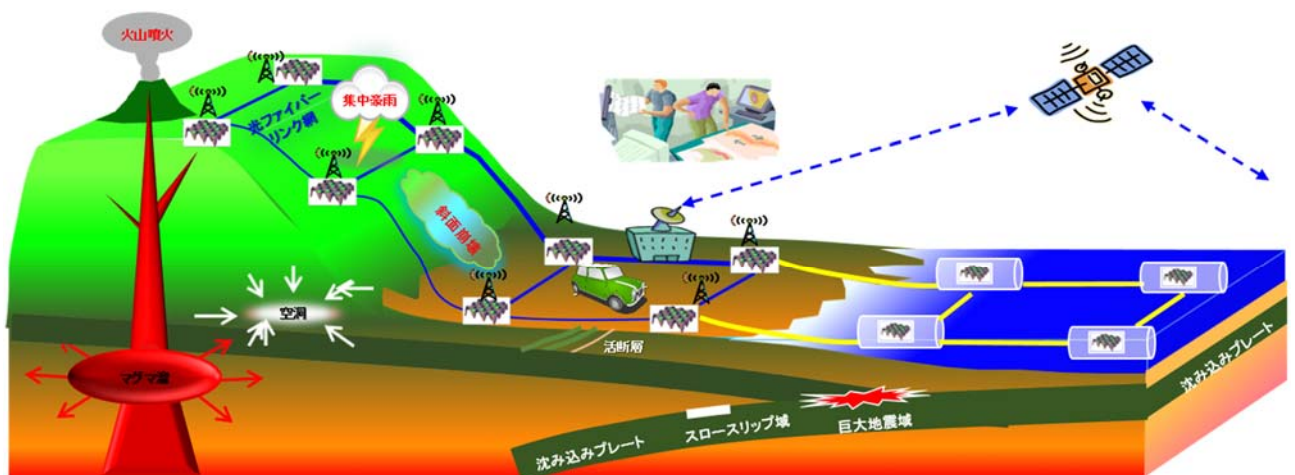


図8 光格子時計ネットワークの実装による未来の社会

各地点に設置される光格子時計は、これまでにない堅牢な時間の基準を与える一方で、「量子水準点」として機能する。光ファイバーによってつながる「量子水準点」群は、ダイナミックな標高差の変動や、地下で起こっている空洞やマグマだまりによる重力の変化を、数時間から数十年にわたる広範な時間スケールで、正確に、かつ空間的にマッピングすることを可能にする。

<用語解説>

注1) 光格子時計

2001年、香取 秀俊 東京大学 大学院工学系研究科 准教授（当時）が考案した次世代の原子時計です。まず、「魔法波長」と呼ばれる特別な波長のレーザー光を干渉させて作った微小空間に、レーザー冷却された原子を捕獲し、原子どうしの相互作用が起きないようにします。次に、これらの原子にレーザー光を当て、吸収する光の振動数（共鳴周波数）を精密に測定します。この光の振動を数えて、1秒の長さを決めます。光格子全体には多数の原子を捕獲できるので、それらの原子の共鳴周波数を一度に測定して平均をとることで、短時間で時間を決めることができます。

注2) 相対論

アルベルト・アインシュタインによって築かれた現代物理の基本理論の1つです。一般相対性理論では、「重いものの周りでは時間は遅く流れる」という現象を論じており、超高精度な時計ではこの現象を観測することができるようになります。

注3) 水準測量

2地点に標尺を置き、その間に水準儀を置いて、それぞれの標尺の目盛の差を読むことで、2地点間の標高差を求めます。それを繰り返すことで、水準点間の高さを求めます。

注4) 時計の精度

時計の精度は、ある時間経過した後の時間のずれで評価します。例えば、月差10秒の腕時計なら、(10秒) / (ひと月はおよそ2,600,000秒) から計算される、およそ 4×10^{-6} が時計の精度です。これを指数の数字を取って、6桁の精度の時計といいます。本研究が目指している 1×10^{-18} 精度は、 1×10^{18} 秒（およそ300億年）の間測定するとやっと1秒ずれる精度です。このような時計の精度は、時計の振り子の振動数の精度で決まります。

注5) セシウム原子時計

1955年に、イギリスのエッセンらが発明しました。セシウム原子の放射の振動を9,192,631,770回数える時間の長さを1秒と定義します。

注6) 魔法波長

原子に光が当たると、光の電場の影響での（原子の）電子状態のエネルギーが変化します。これを光シフトといいます。この光シフト量は、一般に、電子状態によって異なるため、2つの電子状態間の共鳴周波数が変化します。ところが、特定の波長を選ぶと、2状態の光シフトを等しくし、光シフトしない共鳴周波数を観測できます。このような、「原子の振り子」の振動数を変えない波長を魔法波長と呼びます。

<論文タイトル>

“Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks”
(同期接続した光格子時計による重力ポテンシャル測定)

doi:10.1038/nphoton.2016.159

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

香取 秀俊 (カトリ ヒデトシ)

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 工学部6号館

<JSTの事業に関すること>

水田 寿雄 (ミズタ ヒサオ)

科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's五番町

<報道担当>

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

理化学研究所 広報室 報道担当

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1

国土交通省 国土地理院 総務部 広報広聴室

〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番

先端光量子科学アライアンス 事務局

(東京大学 大学院工学系研究科附属 光量子科学研究センター)

〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16