

「高精度光格子時計の開発とその実用化に向けた研究」

理化学研究所 香取量子計測研究室 高本 将男

高精度な時計は、正確に時間を計るための道具として重要であるだけでなく、精密計測を通じた科学技術への貢献、高精度な位置情報を提供する衛星測位システムや大容量高速通信ネットワークの構築など、現代社会において欠かせない基盤技術の一つとなっている。このような正確な「秒」を生成するために用いられているのが、原子時計である。原子時計とは、原子の振りを基準とする時計で、振りの周期は、同じ原子を用いれば、いつでもどこで計っても不変であり、同じ時間を共有することができる。原子時計は、より高速な振動を用いることで高精度化が可能であり、近年では、超狭線幅レーザー光源、光周波数コム、光ファイバ周波数伝送に代表される光周波数制御技術の進展とともに、光周波数領域の振動を基準とする光時計の開発が盛んに行われている。その中でも特に高い性能を実現できる光時計として注目されているのが光格子時計である。光格子時計は、レーザー光で作られた小さな器「光格子」の中に数万個もの冷却された原子を閉じ込めて、その原子の振りの振動数を計測することにより、18桁の精度、つまりは宇宙年齢の138億年たっても1秒もずれないような高い精度を実現できる時計である[1]。2001年の東京大学香取教授の提案から15年余りで、我々は18桁精度の光格子時計の実現に成功した。この精度は、「秒」の定義として用いられているセシウム原子時計よりも100倍以上高い精度であり、現在、国際度量衡委員会において「秒」の再定義に向けた議論が進められている。

光時計の原理は、レーザー光を原子に照射し、時計の基準（振り子）となる原子の共鳴遷移に常に共鳴するように、レーザー光の周波数を制御することによって、原子固有かつ不変な時間・周波数を実現することである。一方で、正確な時計を実現するためには、原子を取り巻く摂動を排除して、その周波数を正確に読みだす必要がある。特に重要となるのが、原子の熱運動によるドップラー効果が引き起こす周波数シフトの除去である。光格子時計では、レーザー光の干渉によって作る微小空間に原子を閉じ込めることによって、原子の運動を完全に凍結させる。一方で、原子をレーザー光で閉じ込めると、そのレーザー光によって原子の共鳴周波数がずれてしまうが、これを相殺するような「魔法波長」と呼ばれる特定の波長を選ぶことによって、光格子自体の影響も排除する（図1(a)）。我々は、これらのスキームが実際に有効に働くことを実証するために、ストロンチウム原子の共鳴遷移を探し出し、光格子中で共鳴遷移の精密な分光を実現した[2]。さらに、ストロンチウム原子の魔法波長を決定し（図1(b)）、光格子時計の初の時計動作を実現した[3]。

実現した時計の精度を評価するために、光格子時計の周波数を国際原子時へと繋ぎ、ストロンチウム原子の共鳴遷移の絶対周波数計測を行った[4]。この測定はその後、米、仏の研究機関の追試により再現性が確認され、2006年、「秒」の再定義の有力な候補としてストロンチウム原子を用いた光格子時計は「秒」の二次表現に採択された。また、この絶対周波数

計測は、光格子時計の精度向上とともにセシウム時計の不確かさが計測精度を制限するようになり、更なる高精度な評価を行うためには、複数台の光格子時計を開発してそれらを直接比較することが不可欠となった[5]。

提案時に目標として掲げられた 18 桁時計精度の実現を妨げる最大の要因は、原子を囲む室温の壁から放射される電磁波（黒体輻射）によって生じる周波数シフトの影響であった。室温でこの影響は時計周波数の 15 桁目で現れるため、18 桁精度実現のためには、このシフトの抑制が不可欠であった。我々は、低温環境（95 K）でストロンチウム原子を分光することによって、黒体輻射の影響を 1/100 に低減する低温動作型光格子時計を開発した（図 2）。このような時計を 2 台開発し、2 台の時計の周波数差を同期比較手法 [6]を用いて高速かつ精密に評価することによって、シュテファン=ボルツマンの法則に従う絶対温度の 4 乗に比例する黒体輻射シフトを観測することに成功し、2 台の時計が 18 桁の精度で一致していることを実証した[7]。

アインシュタインの一般相対性理論によると、時間の進み方は重力によって影響を受け、地上の低い場所では高い場所に比べて時間がゆっくり進む。このような効果は、実際にはとても小さな効果であり、日常生活において意識することはないが、18 桁精度の時計を用いると、僅か 1 cm の高さの違いによる時間の遅れでも観測できるようになる。この相対論的な効果を使えば、高精度な時計は重力の影響を検出するセンサとして働き、測地技術としての応用が可能となる。このような光格子時計の実用化に向けて、これまで実験室一部屋を占めるようなサイズであった時計システムを、実験室外に持ち出せるように小型化・可搬化し、東京スカイツリーに移設して検証実験を行った[8]。開発した 2 台の可搬型光格子時計を東京スカイツリーの地上階と展望台に設置して、光ファイバで繋ぎ、450 m の高さの違いで生じる時間の進み方の違いを精密に計測した（図 3）。展望台では、地上階よりも 1 日の長さが 4 ns（10 億分の 4 秒）ほど短くなる。このような僅かな時間の遅れを光格子時計で高精度に測定した。得られた結果を従来の測量法により測定した標高差と比較することで、アインシュタインの一般相対性理論を高精度に検証した。従来の宇宙規模の実験に匹敵する精度が地上実験において達成され、光格子時計の測地応用が cm レベルの高低差の精度で有効であることが示された。

光格子時計は、高精度化の追求により究極の 18 桁精度を実現し、時間を共有するための標準器としての役割だけでなく、重力によって歪んだ時空間を検出する量子センサとしての応用も期待される。たとえば、光格子時計を日本各地に配置して光ファイバで繋ぎ、光格子時計のネットワーク化が実現できれば、火山活動による地殻の上下変動やプレート運動など、地殻変動による標高変化を精密に監視することができるようになる。また、従来の衛星測位技術とともに利用できる超高精度な標高差計測・測位システムの確立や地下資源探査、地下空洞、マグマ溜まりの検出など、光格子時計は新しい基盤技術を創出する可能性を秘めている。今後、このような時計の実用化に向けて、さらなる時計の小型化・可搬化が加速され、新たな測地技術として応用されることが期待される。

本研究は、東京大学工学部物理工学科香取研究室および理化学研究所香取量子計測研究室において行われたものであり、多く研究者および学生の協力によって得られた成果である。改めて関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

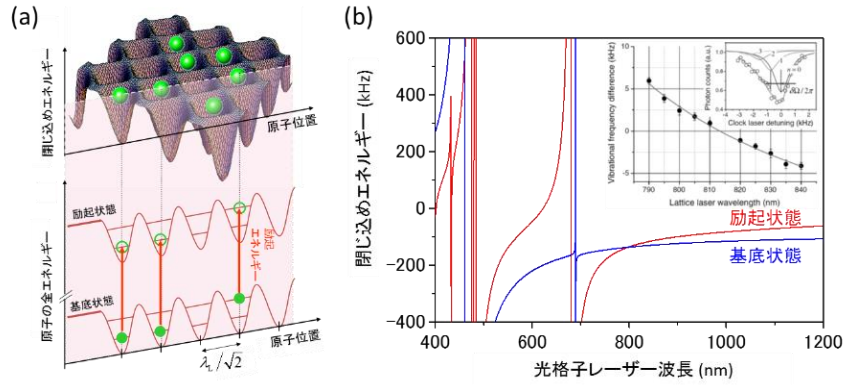


図 1 (a) 光格子時計の概略図。レーザー光の干渉パターンで生成された光格子中に原子集団を閉じ込め、その共鳴周波数をもとに高精度な時計を構成する。(b) 光格子レーザーによって生じる周波数シフトの波長依存性の理論曲線。基底・励起状態のシフトが等しくなる波長「魔法波長」(~800 nm) を用いることで、共鳴周波数のずれを相殺することができる。(内挿図) 実験により魔法波長の存在が初めて確認された[2]。

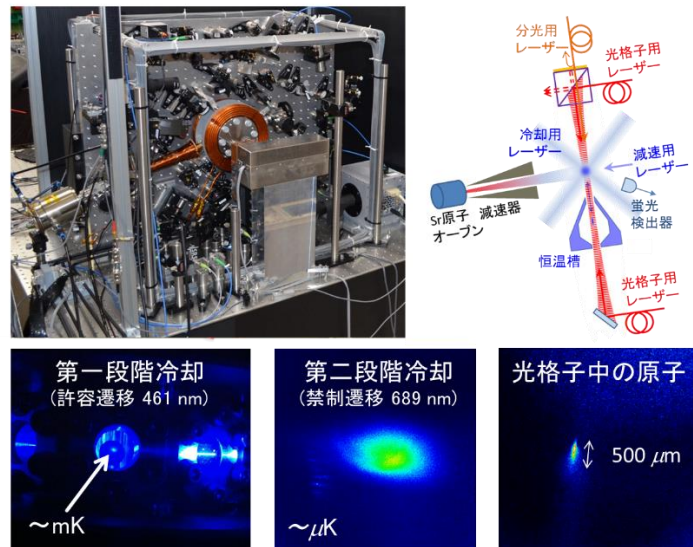


図 2 低温動作型ストロンチウム光格子時計の装置概要とレーザー冷却されたストロンチウム原子。極低温までレーザー冷却されたストロンチウム原子を光格子中に捕獲し、低温に冷却した恒温槽の中で原子の共鳴遷移で高精度に分光する。

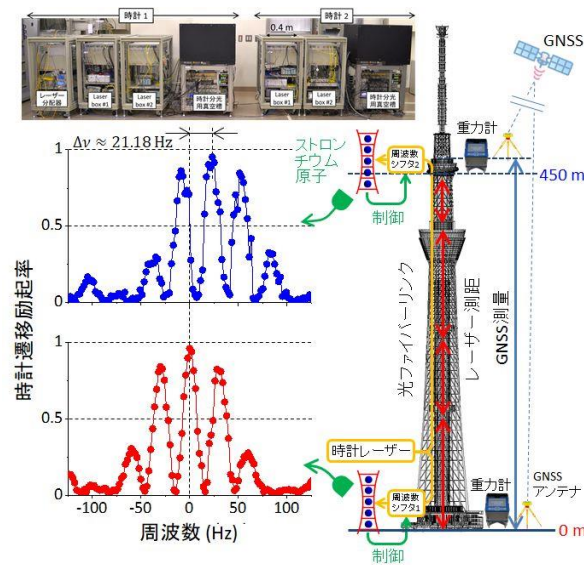


図 3 東京スカイツリーで行った一般相対性理論の検証実験。地上階と展望台に設置した 2 台の可搬型光格子時計の周波数を 18 桁精度で比較して、450 m の高低差で生じる重力赤方偏移を精密に測定することで、一般相対性理論を検証した。

参考文献

1. H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal'chikov, and V. D. Ovsiannikov, "Ultrastable Optical Clock with Neutral Atoms in an Engineered Light Shift Trap," *Phys. Rev. Lett.* 91, 173005 (2003).
2. M. Takamoto and H. Katori, "Spectroscopy of the 1S_0 - 3P_0 Clock Transition of ^{87}Sr in an Optical Lattice," *Phys. Rev. Lett.* 91, 223001 (2003).
3. M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, "An optical lattice clock," *Nature* 435, 321 (2005).
4. M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, Y. Fujii, M. Imae, and H. Katori, "Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic ^{87}Sr Isotope," *J. Phys. Soc. Jpn.* 75, 104302 (2006).
5. T. Akatsuka, M. Takamoto, and H. Katori, "Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions," *Nature Physics* 4, 954 (2008).
6. M. Takamoto, T. Takano, and H. Katori, "Frequency comparison of optical lattice clocks beyond the Dick limit," *Nature Photonics* 5, 288 (2011).
7. I. Ushijima, M. Takamoto, M. Das, T. Ohkubo, and H. Katori, "Cryogenic optical lattice clocks," *Nature Photonics* 9, 185 (2015).
8. M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Yahagi, K. Kokado, H. Shinkai, and H. Katori, "Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks," *Nature Photonics* 14, 411 (2020).