

ERATO「香取創造時空間」プロジェクト 追跡評価報告書

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本プロジェクト(2010年10月～2017年3月)は、戦略目標「最先端レーザー等の新しい光を用いた物質材料科学、生命科学など先端科学のイノベーションへの展開」の下、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を行うことで、現在の秒の基準であるセシウム(Cs)原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ、新しい原理の原子時計「光格子時計」を実現させ、精密時間計測の新たな潮流を作ることを目指した。

「光格子時計」は、本プロジェクト研究総括の香取が2001年に世界で初めて提案した日本発の独創的な技術である。

本プロジェクト終了時、当初の目標であった、光格子時計による18桁の精度での時計の実現に成功し、これまでの単一イオンによる光時計で半月以上時間を要していた時間計測のリアルタイム性を大幅に改善した。また、同時に、時間標準の定義の改定に資するものとなった。

本プロジェクト終了後、科学研究費助成事業 特別推進研究「超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓」および国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)未来社会創造事業「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」の大型の競争的研究資金を獲得し、基礎、応用の両面から、本プロジェクトでの研究成果をさらに発展させている。

本プロジェクト終了後、論文発表は、著名な学術雑誌への掲載も多く、研究総括、プロジェクトリーダー3名の著者の論文だけで25報ある。この中で被引用数Top10%以内は1/5の5報(Top0.1%以内1報含む)あり、世界からの注目度が十分高いことがうかがえる。

特許出願は、本プロジェクト期間中は13件(国内7件、海外6件)であったものが、研究終了後は16件(国内13件、海外3件)と増加しており社会実装に向けた研究が加速していることがうかがえる。

受賞は7件あり、それらの中には「21世紀のノーベル賞」とも呼ばれるBREAKTHROUGH PRIZEを含む多数の著名な賞を受賞している。これらの受賞は、この分野で優れた研究が行われ、社会に認められた証といえる。

ニュースリリースなどのアウトリーチは、香取の研究グループや共同研究機関とともに、“ストロンチウム光格子時計の実効的魔法条件の決定、19桁精度の時計の実現に向けて”、“中空ファイバ導波路内における超放射現象の挙動を解明、超小型・超放射レーザー実現の基盤技術を確認”など顕著な基礎研究成果を逐次発信している。また、“超高精度光周波数の240kmファイバ伝送に成功”、“18桁精度の可搬型光格子時計の開発に世界で初めて成功、東京スカイツリーで一般相対性理論を検証”など社会実装に向けた取り組みも発信している。これらは、専門家だけでなく一般にも相対論的測地が新たな世界を開くイメージを強く喚起した。

これらのことから、本プロジェクト終了後も、社会からの関心が極めて高く、基礎、応用研究の両面で顕著な研究成果が着実に積み上げられたことが認められる。

2. 研究成果から生み出された科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果

(1) 研究成果の科学的・技術的観点からの貢献

本プロジェクト研究終了後は、本プロジェクトの多岐にわたる研究成果をさらに発展させている。

Cs 原子時計の精度を凌駕する高精度化に関しては、ストロンチウム(Sr)光格子時計の実効的魔法条件を決定し、世界で未だ実現されていない 19 桁精度(およそ 3000 億年で 1 秒のずれ)の時計を現実に近いものとしている。ここでは、これまで微小効果でこれまでできなかった超分極による非線形光シフトの高精度計測を、光格子中の原子の振動量子状態を操作するなど新しいアイデアで成功させ実現している。これまでの原子時計の研究では、1 桁の精度向上に 10 年を費やしていたため、画期的な早さで高精度化が進められていることがうかがえる。

また、秒の再定義に向け重要なステップになる水銀(Hg)とイッテルビウム(Yb)の光格子時計の周波数比の直接測定と Hg/Yb/Sr ループを完成させている。

2018 年に CCTF(時間・周波数諮問委員会)WGSP(時間周波数諮問委員会戦略企画作業部会)にて、秒の再定義のための必要条件が上げられ、その中の評価手法の一つとして、少なくとも 3 つの異なる光時計が Cs 原子時計よりもおよそ 2 桁小さな不確かさで Loop closure relation (周波数比閉包)測定などで示されることというのがある。香取らは、¹⁹⁹Hg と ¹⁷¹Yb の光格子時計の周波数比を世界で初めて直接測定し、その不確かさは 8.8×10^{-17} であることを明らかにし、 $(\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Yb}})(\nu_{\text{Yb}}/\nu_{\text{Sr}})(\nu_{\text{Sr}}/\nu_{\text{Hg}})-1=0.4(1.3) \times 10^{-16}$ となるループを完成させた。これは SI 秒の実現精度を上回る Loop closure relation の初めての適用である。本研究の異種原子の超精密時計比較は、さらに研究が進展し、もし周波数比の経時変化が見つかれば、物理法則に普遍的に現れ、時間とともに変化しないとされている基礎物理定数のプランク定数 h 、素電荷 e 、微細構造定数 α など現在の物理学の体系を根底から覆すことにつながるインパクトのあるものになる。

さらに、光格子時計の高安定化の方策として、捕捉原子数増大、光共振器の長尺・低温・ミラーレス化を推し進めており、香取らが着想し進めていたこれら課題を解決する中空光ファイバでの超放射レーザーについて、その特性を実験的、理論的に解明した。ここで用いられた手法や研究成果は、非常に狭いスペクトルを持つ超放射レーザー実現の重要な基盤技術となる。加えて、超放射レーザーは光格子時計の光源としての応用以外にも、量子メモリ、単一光子源の実現など量子情報分野において、様々な分野で用いることができるため、今後につながる重要な知見である。

これらの、精密時間計測の研究開発は、香取の光格子時計の提案を機に、国家戦略の中核

を担う重要な技術として、世界で約 20 か国に拡がりを見せ、競争が激化している。香取らの先端的で拡がりのある研究成果の継続的な発信は、引き続きこの分野を先導しており、SI 秒の再定義に向けた機運や相対論的測地の期待を高める結果となり、超高安定度光時計開発の大きな潮流を創成したと言える。

(2) 研究成果の社会的・経済的観点からの貢献

本プロジェクト研究終了後、光格子時計の実用化に向けた小型化、可搬化技術の開発を進め、18 桁精度の可搬型 Sr 光格子時計の開発や室温動作可能なカドミウム (Cd) 光格子時計の魔法波長の決定など、いずれも世界初の研究成果を上げている。

18 桁精度の可搬型 Sr 光格子時計の開発では、企業と共同で、レーザー光源等光学系や磁気遮蔽シールド、冷却装置、制御系を含め小型化・可搬化し、長時間安定動作のためのレーザー周波数制御自動化、遠隔操作可能なシステムも構築した。これらにより、精度を劣化させることなく実験室外の環境でも 18 桁の精度を持つ可搬型 Sr 光格子時計を世界で初めて成功させた。さらに、標高差約 450m の東京スカイツリーの上下に本光格子時計を設置し、cm レベルの精度で標高差の計測を成功させた。これにより、一般相対論的な重力の効果による時計の進む速さの変化として、時計比較により標高差を測定可能であることを実証した。また、光格子時計で得られた重力赤方偏移と、従来の測定手法によって得られた重力ポテンシャル差を比較しており、重力赤方偏移は、重力ポテンシャル差に等しくなるという一般相対論の予言の検証も同時に成功させている。

Cd 光格子時計の開発では、今まで開発が難しかった深紫外波長のレーザー光源を開発し、世界で初めて理論計算とも矛盾しない魔法波長を実験的に見いだした。実験結果に基づいて、黒体輻射シフトを理論計算し、Sr、Yb 原子に比べ黒体輻射シフトが 1 桁小さいことを見いだした。これは、室温で 18 桁の精度を持つ小型・可搬型光格子時計の実現につながる重要な研究成果である。

また、光格子時計の相対論的測地の実証として、企業と共同で超高精度光周波数の長距離ファイバ伝送技術を開発し、18 桁の周波数精度を保持したまま 200km 級の伝送が可能であることを世界で初めて実証した。

超高精度光周波数の光ファイバ伝送は、敷設環境からの温度変化、振動での伸縮などで 18 桁の周波数安定度を保つことが従来困難であったが、本研究では新たに企業と共同で平面光回路 (PLC) 技術を用いた独自のリピータなど開発し、この課題を克服している。光格子時計は、光ファイバでネットワーク化し、各地の光格子時計の光周波数差をビートにより比較でき、広域に渡って相対論的測地ができるという大きなメリットを持つため、本研究成果はその特長を活かせる重要なものである。これを活かせば、海岸防災、水資源管理などに重要な情報を与え、また、地下資源探査、地下空洞、マグマ溜まり、地殻変動も従来にはない精度で短時間に検出できるため期待が大きい。

さらに、香取らは光格子時計を用いた秒の再定義に向け、国内の他機関と共同で、レーザーの周波数オートリロック機能など開発し、Yb 光格子時計の長期間にわたる高稼働率運転を世界で初めて達成している。この絶対周波数測定、高稼働率データ等の実績により、2021年での第22回 CCTF の一次二次周波数標準作業部会において、Yb 光格子時計が国際原子時計校正に使用できる時計との認定に至っている。

香取が世界で初めて提案した光格子時計の従来にない桁違いの時空間情報は、防災や地下資源探索のみならず高精度時刻同期など情報通信システムへの応用の他、現時点では予想のできない新たな情報インフラを生む可能性がある。産業界からの複数企業の参画は、その期待が現実味を帯びてきているとともに、その裾野の広がりも示している証左である。

これらの研究成果は、光格子時計の最先端基礎科学の極限追究研究から、産業応用の可能性を一気に高め、その実現性を社会に強く示す結果となっている。

以上のとおり、本プロジェクトは研究終了後においても卓越した研究水準で数々の世界初の研究成果を上げこの分野を先導しており、社会的・経済的観点からもその波及効果は大きいと言える。

以上により、本研究プロジェクトは研究成果の発展や活用が認められ、科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果が十分に生み出されている。

以上