

ERATO 香取創造時空間プロジェクト事後評価（最終）報告書

【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）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

上妻 幹旺（東京工業大学 大学院理工学研究科／教授）

田中 歌子（大阪大学 大学院基礎工学研究科／講師）

納富 雅也（日本電信電話株式会社 物性科学基礎研究所／上席特別研究員）

盛永 篤郎（委員長；東京理科大学 理工学部／教授）

評価の概要

レーザーの干渉縞によってできる微小空間を光格子とよび、各々の光格子に 1 個ずつ閉じ込められたおよそ 100 万個の原子が吸収・放出する光の振動数から 1 秒を決める新しい原子時計は、香取研究総括の独創的なアイデアによるものであり、これを「光格子時計」とよぶ。

香取秀俊 東京大学工学系研究科 教授を研究総括とする本プロジェクトは、2010 年 10 月に発足し、(1) 原子物理学・量子光学の知識と極低温原子物理の高度な実験技術、(2) 最先端のレーザー開発・制御技術、(3) 電子回路・システム制御技術、そして (4) 実験のデザイン、検討のための理論計算能力を結集し成し遂げられる実験物理学の集大成として最先端の時間標準研究体制を構築し、時間計測のブレークスルー「高精度時間の実時間測定」を実現し、新たな精密時間計測の潮流を作ることを目的とした。

その結果として、プロジェクト発足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、時間標準の定義の改定に資する顕著な成果を上げた。それとともに、低温動作や黒体輻射の影響の小さい原子による常温動作など種々の異なる手法による光格子時計の実現と、それらの高精度な比較に関しても成果を次々と創出した。これにより、重要な物理定数の 1 つである微細構造定数の恒常性の検証に繋がることが期待される。さらに、短期周波数安定度が非常に優れている超放射レーザー実現の可能性を示し、光格子時計のミニチュア化に向けた一歩に繋がる顕著な成果や、相対論的測地の実証など、光格子時計の社会実装の可能性を示した。これらは、新たな情報インフラの実現による社会へのインパクトの検討とその可能性まで含めた広く総合的な成果であり、今後のキラーアプリケーションへの展開、さらには、原子・分子・光科学分野(AMO)／量子光学研究の発展への波及効果に大いに期待することができる。

これらの一連の成果は、Nature 系などの著名な学術誌や招待講演・学会発表による外部発表、プレス発表、各種取材、アウトリーチ活動、多数の受賞を通じて極めて適切に専門分野のみならず一般にもアピールされた。さらに、本研究の成果は、世界の周波数標準研究所での光時計の研究を加速し、2026 年度に光時計による「秒の再定義」をめざす国際的なロードマップの設定に重要な寄与をした。

以上を総合し、ERATO 香取創造時空間プロジェクトは、卓越した研究水準を示し、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」に資する成果が十分に得られたと評価できる。

1. 研究プロジェクトの設定および運営

1-1. プロジェクトの全体構想

本プロジェクトの全体構想には、基礎科学を支える量子計測と原子時計の研究である光格子時計により高精度時間の実時間測定を実現することを目指した基礎科学技術の構築が「基本理念」としてある。原子時計の研究では、これまで1桁の精度向上に10年間を費やし、また、単一イオンによる光時計は量子限界から18桁の安定度の達成に半月以上もの時間を要するとされ、時間計測のリアルタイム性の画期的な改善がなされてこなかった。これまでの関連分野での通念からすると、本プロジェクトの構想は非常に挑戦的なものであった。

光格子時計の着想は、香取秀俊教授が基礎グループリーダーを務めていたERATO五神協同励起プロジェクト（1997年度から2002年度）期間中の2001年に遡る。香取総括が自身の着想により提案し、実証した、狭線幅レーザー冷却法、魔法波長などの一連の研究成果に端を発する。光格子時計の提案の後、香取総括は実際に ^{87}Sr 原子に対する魔法波長の実測と1次元光格子中での時計遷移分光に成功した。そして、「無摂動下の原子を使った時計」という当時の常識に対し、香取総括は本プロジェクト開始前の10年間に「摂動下にある原子を使った時計」に着目し基礎研究を展開した。「魔法波長でトラップの摂動を相殺する」個々の光格子に原子1個ずつを捕捉し100万個の原子を捕まえることによって、18桁の精度を1秒の積算時間で達成する可能性がある。この精度が達成されると、同時刻の概念に相対論的な時空間が登場し、秒の再定義がなされるような科学的・社会的な課題とも結びつく。基礎物理定数の普遍性の検証や、地上の高さがわずか1cm異なる2地点の高さの差が、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、時計の比較により測定可能になる。相対論的效果を利用して測地学に活かすという、基礎科学面のみならず、応用面から大きなインパクトをもたらすことが期待されたプロジェクトとして、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」のもとで発足した¹。

1-2. プロジェクトの目標・計画

研究構想をふまえて設定された本プロジェクトの具体的な目標は、1. 積算時間1秒で 10^{-18} の安定度を実現する、2. 表面プローブ、ミニチュア光格子時計など「魔法波長・光トラップ」の概念の精密計測ツールとしての応用例を実証する、3. 高精度原子スペクトル測定や高精度時刻比較が提起する物理的課題の探索を行い、今後10年にわたる原子時計研究の課題を検討する、そして、4. 前記3が未来社会の基盤技術に与えるインパクトを予測・検討する、というものである。3に関しては、異なる原子種を使った光格子時計を構築し、時計遷移の周波数比を精密評価することで基礎物理定数の時間変化をとらえること、また相対論的測地学、つまり重力ポテンシャル差を時計遷移の周波数シフトとしてモニターすることが提案された。

「リアルタイム計測性をもつ原子時計の実現とその応用」という研究構想に対し、1が前半の、2、3が後半の具体的な目的に対応した。それに加え、光格子時計が社会インフラ化された後のアプリケーション探索まで目的に据えた。香取研究総括がERATO開始当時実現していた15桁の精度の光格子時計を3桁凌駕する性能を実現するため、より具体的には以下の研究を推進した。まず、18桁の精度を実現するためには黒体放射シフトを除去する必要があり、その解決手法として、低温動作SrまたはYb光格子時計を実現する、および、黒体放射の影響の少ないHgまたはCd光格子時計を開発することの2つが計画された。これらの技術的課題は、前者で低温動作法、後方で紫外レーザー光源開発である。さらに、光格子時計の高安定度を実現するために2つの課題がある。それらは、使用するレーザーの周波数雑音の低減、および、量子射影雑音を低減するための捕捉原子数の増大である。レーザーの低雑音化に向けて、レーザー周波数の安定化に用いる光共振器の長尺化、および、低温化の2つの取り組みが計画された。さらには、ミラーの熱雑音に

¹ <http://www.jst.go.jp/pr/info/info766/shiryu2-2.html>

影響されないミラーレス・レーザー、すなわち中空光ファイバからの超放射レーザーのアイデアが計画された。一方、時間標準の定義に資するため、実現した周波数の 17 桁の周波数比計測が計画された。具体的には、異種原子からなる光格子時計間の周波数比較、および、遠隔地間を光ファイバで結び両者の光周波数の比較を行った。これらはそれぞれ、物理定数の恒常性の検証と相対論的測地学の確立となるもので、共に 18 桁の時間標準の必要性を主張するものとなる。

以上のように目標「18 桁の精度の光格子時計を実現し、時間標準の定義の改定に資する」ために課題を分類し、各課題の達成のために複数の方法を提案した。本プロジェクトの研究計画は、光格子時計という研究テーマに対して、十分に練られた適切な目標設定により、純粋な時計の極限追究研究から精密計測へ向けた応用研究、さらには新たな情報インフラの実現による社会へのインパクトの検討まで含めた広く総合的なものとなった。

1-3. プロジェクトの運営

本プロジェクトは第 1G 光格子時計実験グループ（グループリーダー（GL）：高本将男博士）、第 2G 物理応用グループ（GL：高野哲至博士）、第 3G 先端レーザーグループ（GL：大前宣昭博士）の 3 研究グループから構成された。研究実施場所は、光格子時計実験グループと先端レーザーグループが理化学研究所、物理応用グループが東京大学工学部 6 号館であり、いずれもプロジェクトのためのスペースを確保した。3 研究グループは各課題別でなく研究の種類によっており、グループが相互に緊密に連携し成果を結集し、プロジェクト一丸となって目標を成し遂げられるように構成された。

第 1G にて低温動作型 Sr、Yb 光格子時計の開発を行った。プロジェクト期間にわたり時計の精度を向上させる地道な努力が行なわれた。第 2G にて中空光ファイバへの捕捉と分光、超放射レーザーの開発を行い、時計の応用の模索・検証を目指した。第 3G にて紫外レーザー光源を開発し常温動作 Hg および Cd 光格子時計の開発と、レーザーの周波数雑音低減のための光共振器の開発を行った。光格子時計において、原子を冷却し操作し、時計を実現するのはレーザー光であり、世界最先端のレーザー技術が、最先端の光格子時計構築に直結する。第 1G と第 2G が光コムを用いた周波数測定を、第 2G と第 3G が遠隔地間の光ファイバリンクの開発をそれぞれ進めた。研究を促進するため、極低温光共振器、紫外レーザー、光周波数コムとファイバレーザーに関して外部機関への委託研究を行った。

プロジェクトは、各 GL が核となりリーダーシップを発揮し、プロジェクトの目標に向けて十分に絞り込まれ機能的に構成され、運営された。そのためプロジェクト開始当初より極めて良好な研究環境が立ち上げられた。GL は全員 30 代前半の若手研究者であり、原子時計と異なる分野の出身者も登用しプロジェクトの屋台骨を支えさせ、異分野出身者の発想や技術を上手く引き出し、若手に大きな活躍の機会を十分与える運営方針がとられた。研究費の執行も効率的かつ十分に効果的に行われたと認められる。国内では、時間標準にかかわる産業技術総合研究所や周波数標準にかかわる情報通信研究機構の研究者と協力関係の体制がとられた。海外連携では紫外レーザー光源の開発がアリゾナ大で行なわれ、一方、ロシアの理論家との共同研究が効果的に行われ、本プロジェクトと良好な相補的な関係を築いた。これにより、欧米で行われているような、戦略的な国際的協力関係が構築された。今後も継続的に、国際的な協力関係を維持し、世界全体をリードすることが期待される。

〔研究プロジェクトの全体構想〕〔研究プロジェクトの目標・計画〕〔研究プロジェクトの運営〕
a+（十分に的確かつ効果的である）

2. 研究の達成状況および得られた研究成果

2-1. 光時計実験グループ

プロジェクト目標の一つは、高い正確さと安定度を両立する 18 桁の光格子時計を作ることであった。この目的を阻む一番の要因は、黒体輻射光による時計遷移周波数のシフト—黒体シフト—であった。本グループは、問題解決の具体的な方法として、1. 低温冷却した恒温槽中で時計分光を行う装置の開発、2. 黒体輻射への感度が小さい Hg を用いた光格子時計の開発、という大胆な二つの方法を起用した。1 については、環境温度を 95K にまで下げ、空洞放射の影響を室温の 1/100 に低減するクライオ・チャンバーの導入により、黒体シフトの抑制を実現した。さらに、Sr 原子をクライオ・チャンバーに導入する手法を確立し、「クライオ光格子時計」を世界で初めて実証した。同じ高さに設置した 2 台の Sr クライオ光格子時計間で周波数比較を行い、18 桁の相対不確かさでの一致を確認したインパクトは極めて大きい。特に、これまでの単一イオン時計では 20 日間の積算時間を要しているのと比較し、2 時間で可能にしたことは驚愕に値する。これらにより、独自の手法を用い優れた性能による光格子時計の優位性を実証した。

Yb 原子に対しても同様のクライオ光格子時計を構築し、系統不確かさとして 3.5×10^{-17} を実現した。この値は、2009 年に NIST で報告された不確かさ 3.4×10^{-16} をおよそ 10 倍改善する。また、光周波数コムを用い低温動作型 Yb 光格子時計と低温動作 Sr 光格子時計の周波数比測定では、レーザー周波数ノイズを相殺する同期比較法を適用することで、量子限界 $4 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau/s}$ の高安定度を実現した。この安定度は、わずか 150 秒の平均化時間で系統不確かさの限界 (3×10^{-17}) に達することを可能とし、単一イオン時計に対して約 100 倍の高速化を実現した。Yb、Sr 時計周波数の比の測定不確かさは 4.6×10^{-17} であり、これまでの周波数比を 1 桁改善した。一方、黒体輻射シフトの小さい常温動作 Hg 光格子時計を開発し、Sr 光格子時計と周波数比較を行い系統不確かさ 7.2×10^{-17} 、統計不確かさ 3.7×10^{-17} を得た。Hg 原子と同様 Cd 原子は、Sr 原子や Yb 原子に比べて黒体輻射光への感度が 1 桁小さく、低温環境が要求されないため、コンパクトで高精度な光格子時計を実現できる可能性がある。プロジェクトでは、Cd 原子が 5 μ K まで冷却され、さらに時計遷移を分光することも成功しており、Cd 光格子時計実現への道筋がつけられた。

異種原子・光格子時計での直接周波数比較は、現行の周波数標準である Cs 周波数標準の性能で制限されないことが大きな特徴である。Yb と Hg 光格子時計の性能向上によって、異なる原子種間の周波数比のマトリックスを、現在の SI 秒の定義の実現精度を有意に超える 17 桁で完成させた。これは本プロジェクトの大きな成果であり、また微細構造定数の恒常性の検証にも貢献するものである。一方、高次光シフトを引き起こす、多重極分極率、超分極率の測定が高精度に行なわれ、19 桁精度の光格子時計の実現を視野に入れた。本グループの成果や、今後の各種原子の光格子時計化のためには、高安定なレーザー光源、紫外域を含む従来と異なる波長の安定化レーザー開発が重要な役割を果たしている。本第 1G、また、第 2、3G との連携が非常にうまく機能して得られた成果だと評価される。

本グループの担当分野はまさに時間標準の精度競争の舞台上にあり、世界的な研究競争が最も厳しい領域である。時間標準の研究は従来欧米が主体であり、欧米に有力研究者が結集した歴史のある巨大な研究拠点があるという現状で、日本の一プロジェクトがこの競争に正面から立ち向かうのは容易なことではない状況下であった。本 ERATO プロジェクトは、光格子時計発案者としての知見先行を活かし、より技術の先を見据えよく練られた目標設定がなされた。その結果として、重要かつレベルの高い成果が多数得られた。世界的に光格子時計の研究が大きな広がりを見せている中で、同一研究室でこのような多彩な原子系の格子時計を実現している例は他にない。3 種類の原子の光格子時計の相互周波数比較に成功し、異種原子の光格子時計が刻む時間を相互に比較可能になった点は、次世代時間標準の研究に対してきわめて重要な成果である。精度限界競争に留まらず、光格子時計研究としての将来を見越した研究テーマが結実しつつある。当初の目標は十二分に達成された。

2-2. 物理応用グループ

本グループでは、本評価報告書中の本章記載の光ファイバ中の原子集団による光格子時計の追究および2-4章の理研-東大の光格子時計の遠隔周波数比較を担当しており、いずれのテーマについても独自性の高い成果が得られた。光格子時計の構築では、レーザー光を高Q光共振器に安定化しレーザースペクトル線幅を抑圧することが求められるが、光共振器を構成するミラーの熱雑音に起因するスペクトル狭窄化の限界が存在する。一方、自由空間での光格子の体積は、光格子を生成するレーザービームのレイリー長で制限され、観測可能な原子数を制限する。そこで、時計遷移の観測に寄与する原子数を増加し、時計の高安定度精度化を実現するプラットフォームとして、中空フォトニック結晶光ファイバに注目しファイバ中に光格子を形成して冷却 Sr 原子をトラップする「次世代のミニチュア光時計」と呼ぶ全く新しい手法に着手した。コア径の太いファイバを用いることで壁との相互作用を低減する独自の方法により、原子間の衝突を抑制することに成功し、従来報告の10倍である原子のトラップ寿命 350ms を達成し、この系を用い線幅 7.8 kHz の分光を得た。さらに原子を拡散させることで、原子間相互作用による周波数シフトや広がりが除去できることを確認した。

一方、光格子時計の高精度化につながる有望な技術として、中空フォトニック結晶ファイバ中の冷却原子系の超放射を利用して、共振器の熱雑音限界を回避する、超放射レーザーの開発が行なわれた。理論検討の後、実験的に中空ファイバ中にトラップした冷却 Sr 原子集団による 1S_0 - 3P_1 遷移に対する超放射現象の観測に成功し、超放射光の周波数や収集効率の測定を行ない、超放射レーザー構築の基盤を築いた。これらの特性は、超放射レーザーを構築する際に非常に重要なパラメーターとなる。使用する遷移を時計遷移 (1S_0 - 3P_0) に変え連続的なレーザー発振を行うことで、より狭線幅の超放射レーザーが期待される。プロジェクト終了後も、時計遷移を用いた連続的なレーザー発振に向けてさらなる発展が期待される。本方法は、短期安定度の高い光源を提供するだけに留まらず、光格子時計の可搬化とミニチュア化の実現可能性を高めるものであり、「次世代光格子時計」としての高い新規性をもち極めて高く評価できる。

2-3. 先端レーザーグループ

本グループはプロジェクト途中の2014年に設置されたが、実質的に先端レーザーの研究自体はプロジェクト開始当初から研究内容に含まれており、一貫して本プロジェクトの根幹を支える重要な技術を担った。特に光格子時計実験グループの各種原子による高精度光格子時計の実現と理研-東大間の光格子時計の遠隔周波数比較の成果に関して、本グループによる先端レーザー開発が鍵となる技術となっていた。

本プロジェクト発足当時の時計レーザーの周波数安定度は、1秒のアラン分散偏差で 10^{-15} 台であり、プロジェクトの目的達成には一桁以上高い安定度をもつレーザーが必要とされた。共振器のスペーサ材料や環境の振動レベルについて周到な検討がなされ、光共振器のミラー熱雑音のみに制限される安定度到達を目指した。この熱雑音限界を低減するアプローチとして、本グループは、1. 光共振器の大型化により、ミラーの熱揺らぎの光周波数変動への寄与を相対的に縮小する、2. 光共振器を極低温に冷却しミラーの熱揺らぎを低減する、という技術的に極めて難易度が高いが原理的に確実な2つのアプローチをとった。ゼロ膨張ガラスによる40cm長および極低膨張ガラスセラミクスによる1m長の光共振器をそれぞれ世界で初めて開発し、共に 10^{-16} 台の安定度を得ることに成功した。また、20cmの単結晶シリコン光共振器をシリコンのゼロ膨張温度以下の4Kにまで冷却することに成功した。さらに、極低温下では熱容量が極端に小さいため冷凍機の熱交換による温度揺らぎの影響が共振器長を揺らすことを明らかにし、冷凍機や内部構造の熱設計を一から見直した。その結果、1秒での共振器の安定度にして 7×10^{-15} を実現し、振動によって制限される安定度まで到達した。

一方、プロジェクト中盤の2013年頃からは、熱雑音を劇的に低減する半導体ミラーの入手が可能になった。これを用いると、室温で40cm長の共振器を準備するだけで当初の1、2の目標に達することから、研究戦略の変更が決定された。このような最先端技術を最大限活用する柔軟な計画変更は、実験を効率よく進める上で極めて重要な判断である。現在までに、この結晶性コーティングミラーで29万のフィネスの光共振器が実現されている。今後、本研究の共振器を実装した超高安定度・光格子時計の実証が期待される。

本研究チームでは、冷却遷移のレーザー構築が可能であり黒体放射を回避する理想的な原子種として、世界に先駆けHg光格子時計に着手している。Hg時計の開発の鍵は、長寿命の深紫外レーザーの開発であることから、このノウハウを有するアリゾナ大との委託研究を行った。3ヶ月もの寿命をもつ深紫外光源が実現し、これを用いてHg光格子時計が実現した。このノウハウをもとに当初計画にはなかったCdを用いた光格子時計にも挑んだ。Cd用の紫外レーザー冷却用光源として波長229nm、出力0.56Wでの深紫外光発生に成功した。このような短波長での連続波・高出力の報告は初である。この光源を用いた磁気光学トラップを達成し、さらに 1S_0 - 3P_1 遷移を使い、5 μ Kまで冷却し時計遷移を分光することにも成功した。これらの原子では常温で黒体放射シフトが小さく、常温動作で高精度の光格子時計の実現が期待される。

原子時計の比較のキーデバイスである光コムを作製を産総研チームに委託した。先端レーザーグループは、それを実際にシステムに組み込み、原子遷移への安定化を行った。双方の連携がうまく奏功し、高精度な周波数比較システムが完成し、光周波数コムのパフォーマンスを最大限に利用した周波数比較を行った。紫外から近赤外に至る広範な波長域を用いた光格子時計実験を可能にする自作のレーザー技術は、プロジェクトの屋台骨を支えている。特にHgやCd原子等の新しい原子種を用いた光格子時計の研究に、この紫外域の高性能レーザーおよびその制御技術の開発が決定的に貢献している。種々の科学技術分野においてこれら光源の実用化も重要であり、長期動作に向けたノウハウの蓄積が評価される。

異分野から参加した本GLは高いレーザー技術をプロジェクト内に導入し、本プロジェクトの光格子時計研究を一段高いレベルに押し上げることに寄与している。高安定光共振器の開発が高安定化レーザー実現の要となる中で、従来その開発を欧米の技術に依存していたが、国内において同技術のノウハウ蓄積を目指し、国内メーカー各社と条件出しから始め装置開発までをプロジェクトの自前技術で行った。欧米グループと比肩する共振器開発技術が国内に立ち上がった。

2-4. 理研-東大の光格子時計の遠隔周波数比較

遠隔地への光周波数伝送技術の確立と相対論的測地を目的に、理研-東大間(30km)の光ファイバリンクシステムが構築された。理研と東大にそれぞれ作製した2台のクライオSr光格子時計を光ファイバネットワークで結合し、両者の相対周波数の同期比較を行うことに成功し、17乗台の精度での周波数比較を達成した。通常、光ファイバを用いた高精度な周波数比較には、光コムを用い光ファイバ伝送に適した波長に変換されるが、この場合には光コムは安定度(1秒の積算時間で 10^{-16} 程度)で周波数安定度が制限される上、光コムは連続運転時間を制限する。本プロジェクトでは、Sr光格子時計のサブハーモニクス光である1397nmの波長を用いることで、光コムを介さずに光リンクを構成し、高精度の周波数比較に成功した。これは、ファイバリンクの新しいアプローチを提起した。一般相対論によると、重力下では時間の進み方が遅くなり、18桁の遠隔周波数比較では、1cmの重力ポテンシャルの差を測定可能にする。実際、理研と東大の光格子時計の相対周波数差 $\Delta\nu/\nu_0$ は $1.652.9(5.9)\times 10^{-18}$ と測定され、これは標高差に換算すると、1516(5)cmだけ東大の時計が低い位置にあることに相当する。この値は国土地理院の水準測量による測定値の1511.9(6)cmと時計の不確かさの範囲で一致し、センチメートルレベルの相対論的測地に初めて成功した。これは、同時期にヨーロッパ(ドイツ-フランス)で行われた測地精度を1桁凌駕する成果である。原子時計の遠隔地周波数比較は光ファイバや衛星を利用して欧米でも盛んに行われており、今後もこの動向が継続すると予想される。当プロジェクトで提唱されている、重力

ポテンシャルの測定ツールとしての光格子時計の基盤技術が培われた。

本成果は、プロジェクトの3グループが参加し、総力を結集した結果として得られたものである。理研－東大間のダークファイバの選定や通信方式の選択など、本来の研究テリトリーを大きく超えた研究開発により、プロジェクト全体がよくマネージされ高いレベルの成果が得られた。香取研究総括が掲げている壮大な構想である「光格子時計ネットワークによる相対論的時空間情報インフラ」の整備に向けた重要な一歩であり、プロジェクトの主要成果の一つである。プロジェクトでは2点間のPeer-to-Peerの接続が実現されたが、3点以上の面的なネットワークに拡大すればこのインフラの機能が飛躍的に高まる。このような取り組みが、2016年からNTTとの共同研究によって開始され、今後の展開が期待される。

以上に基づき研究成果を俯瞰すると、開始当初に掲げていた目標の18桁の正確さを実証し、さらに当初想定していなかった成果まで得られており、順調に進行したと評価される。本プロジェクト開始と前後し世界中に多くの光格子時計の研究が本格的に立ち上がり、本プロジェクトが含まれる研究分野は当初想定以上の激しい競争のステージに入りつつある。その中で、総括の強いリーダーシップの元に、的確な戦略で目標に向かって着実に研究が前進した。

本プロジェクトで掲げられた研究目標は壮大なものであり、プロジェクト期間の5年間で完結するものではない。本研究では、将来の光格子時計研究の発展のための重要な礎となるオリジナリティの高い成果が複数得られており、この成果が今後5年から10年後にさらに大きな成果として結実することが十分期待できる。これらの成果は、国際会議等における発表を通して世界の主たる研究グループに周知され、また一流の雑誌への出版報告がなされており、本プロジェクトの達成状況、達成成果は著しく高いものとして評価できる。高い研究構想をうちだし、それを見事に実現した本プロジェクトのクオリティーは、非常に高いものと評価できる。本プロジェクト期間中に研究発表した論文数は、他の研究分野と比して決して多くはないが、非常に高精度で精緻な測定により、長期にわたる再現性の検証が厳しく行われる高度な研究内容で、研究時間を要するため、発表論文数が少ないことは必然ともいえる。本プロジェクトで計測した光格子時計の周波数比(Yb/SrとHg/Sr)は、論文出版時点では、いずれも過去の同様の報告値のエラーバーの外にあった。論文出版後、他のグループの追試により、本プロジェクト成果の周波数比を支持する結果が得られていることは、特筆すべき点であり、厳しい再現性検証実験が慎重に行われたことの証左である。一方、研究のアウトリーチの観点から、報道発表に関する記事掲載の件数は注目に値する。予備評価時点で4年間で46件の記事掲載があったが、その後の2年余の間に101件もの記事掲載がなされている。この数字は関連する分野の中では傑出する大きな数であろう。本プロジェクトが世の中に与えているインパクトの大きさを如実に示しており、この点についても高く評価される。

本プロジェクトは既に目標の18桁の精度に達し、十分な成果を得ており、「秒の再定義」のロードマップに大きく貢献した。積算時間1秒の目標に対して、プロジェクト期間中で、超放射レーザーの新たな道筋を付け、次世代の科学技術に寄与するレーザー技術として今後の展開が予想される。Hg光格子時計の開発については、物理定数の恒常性の検証のために、今後18桁での長期間に渡る周波数比較の実現が期待される。また光格子時計のポータブル化とその実用化が期待され、これらに向けた取り組みも着実に進展している。また、小型化へのアプローチとして中空ファイバによる光格子時計を目指した研究や、全システムを家庭用冷蔵庫サイズに小型化する試みも着実に進展した。可搬化への道のりとしてその技術の困難さを考えると、十分な成果が出ている。Cd光格子時計を用いる場合の紫外レーザー開発などを含め、産業界との連携研究・開発は今後も重要であろう。さらに、完成した光格子時計を用いた新しい相対論的周波数計測時代のインフラに関わる研究の展開がプロジェクト終了後も期待される。

香取研究総括が本プロジェクトの構想段階から提唱してきた「光格子時計ネットワークによる相対論的時空間情報インフラ」は、本プロジェクトの成果により具体的に実現しつつあり期待さ

れる。これらの結果は、本研究総括が提案する光格子時計ネットワークを用いたアプリケーションへ向けた第一歩であり、光格子時計が時間標準に留まらない高いインパクトを持つことを実証した。一方では、この新しい情報インフラにより将来的に可能となるサービスやキラーアプリケーション、または基礎科学をより具体化・定量化し、世の中に示すことが今後も望まれる。さらに次の展開として、面的なネットワークに拡大するステージでは、必要なリソースが雪だるま式に増大していくことも予想され、その際にそのインフラを将来必要とするスポンサーやユーザーが現れれば技術開発が一気に加速され、社会に大きなインパクトを与える成果に結実することが期待される。

〔研究の達成状況および得られた研究成果〕 a+（十分に高い水準にある）

3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

3-1. 科学技術への貢献

光格子時計は香取研究総括が自らアイデアを提唱し、実証したものであり、それを受けて本プロジェクトスタート時点ですでに世界中の複数の機関が研究に参入し、現在までに次世代の時計標準の候補として活発な研究がなされていた。その意味で本プロジェクトスタート前から香取研究総括の研究は、国際的に高く評価される先導的、独創的なものであり、大きな科学技術上のインパクトを有していたが、そのインパクトは本プロジェクト期間中にさらに増大した。期間中に、黒体輻射シフトを実験的に評価し黒体輻射シフトのない低温動作の2台の光格子時計の周波数が18桁で一致することを示し、異種原子の光格子時計比較を17桁で行い、さらには、遠隔地にある2台の光格子時計の周波数比較を18桁で行うことで、センチメートルレベルの相対論的測地を実証するなどの顕著な成果を創出した。このように、光時計研究の世界的な激しい競争の中で、本プロジェクトは先端的、独創的な研究成果を出し続け、引き続きこのテーマを世界的に先導し、新たな技術の芽や新しい流れを生み出したと認められる。純国産の技術が、周波数標準として採用される可能性が高くなった今、光格子時計が世界のインフラとなる日も近いものと予想される。その意味において社会的かつ経済的影響が今後10年以上のスパンで期待できる。以上のように、科学技術への貢献は非常に大きい。

3-2. 社会・経済への貢献

光格子時計によって、現在の原子時計による時間標準よりも1000倍高い精度が実現しつつあり、次世代の時間標準への採用が議論されている。本プロジェクトの一連の研究成果に触発され、世界の多くの周波数標準研究所で光時計の研究開発が加速的に行われたことから、遂に、本研究の最大の課題であった「秒の再定義」へ向け、時間・周波数委員会の責任者らによりロードマップが設定された。発表されたロードマップのうち2条件は本研究で既にクリアされたことになる。さらに、周波数リンクの精度18桁の実現、可搬型装置の作成による18桁の実現、原子時の作成への常時寄与などの条件をクリアすることにより、2026年度に光時計による「秒の再定義」を行うとしている。本プロジェクトでは、残りの条件をクリアするための準備も着々と進められており、2026年度の「秒の再定義」に大きく寄与することが期待できる。

基礎物理量の中核をなす時間標準の精度を高める技術は、それ自体人類の知の礎としての基礎科学に対する大きな貢献を意味する。しかも、時間標準は現在の情報化社会において、GPSやグローバルなネットワーク管理、証券取引など様々な産業で重要な役割をしており、基礎科学にとどまらず社会、経済に対する貢献が十分期待される。特に、香取研究総括が提唱している「光格子時計ネットワークによる相対論的時空間情報インフラ」は、地球上のあらゆる地点における相対論的な時空間情報をユーザーが自由に利用できる状況を実現できることから、現在予想もされ

ていないような新たなサービス、アプリケーションにつながる可能性を持っており、その意味でさらに大きな社会、経済への貢献のポテンシャルを秘めている。現状では具体的なサービスイメージにまで至っていないが、たとえば可搬型重力ポテンシャル計の量産などで、国内の関連産業を活性化する道筋を示すなどの可能性が期待される。また、最先端の基礎科学でありながら、大きな産業応用の可能性も同時に持つ稀有な研究テーマとして高く評価できる。

〔科学技術への貢献〕〔社会・経済への貢献〕 a+（十分な貢献が期待できる）

4. その他特記すべき事項

4-1. 若手研究者支援

本プロジェクトでは複数の若い研究者がチームリーダーをまかされ、世界的な激しい競争の中で香取総括のリーダーシップの元で、高いレベルの研究成果を達成しており、研究者として他ではなかなか得難い貴重な価値ある経験を積み重ねている。その意味で、チーム内の若手研究者は確実に大きく成長し、その多くがプロジェクト中に新たな研究職を得ていることは大いに評価できる。一方、本プロジェクトの研究分野の性格上、初期の段階で論文の数を絞り込んだことは、研究戦略として正しい選択であったといえる。若手研究者のステップアップに向けたある程度の数の論文が必要になることが多いアカデミアの現状を考えると、若干心配な点があったが、プロジェクト終了時には多くのインパクトある論文が出版されるにいたり、この点の不安も払拭された。一つ一つの論文に十分なインパクトがあることが評価され、それぞれの研究者が研究ポジションに順調に栄転を果たした。これらの若手研究者が今後各々の場所で活躍することが期待されており、オールジャパンでの光格子時計の展開を狙う体制ができつつある。このことは本プロジェクトの若手支援としての大きな成果といえる。キャリアパス支援に向け今後とも長期的なケアをして頂きたい。若手研究者が、本プロジェクト終了後、本プロジェクトの経験をもとにそれぞれが新たな研究を開拓し独立し研究組織を運営し研究ができるように一層成長し、また、2026年の秒の再定義に大きく貢献できる成果を挙げることも期待される。

4-2. アウトリーチ活動

香取研究総括は数多くの機会で様々な聴衆を前にアウトリーチ活動をしており、光格子時計とそれに基づく新しい世界を一般の人や学生等に紹介してきた。その講演の内容は最先端の科学技術が未来に向かってどのように発展し、そこにどのような新たな世界が開かれていくかというイメージをビビッドに聴衆の頭の中に喚起するもので、分野外の素人をも魅了する見事なものであった。立花隆氏の著書において、光格子時計の技術がタイトルエポックとして紹介されたことも特筆される。また、その研究業績に対して、多くの賞を受賞しており、本プロジェクトのアウトリーチ活動に関して、総じて極めて優れたレベルにあると高く評価される。

5. 総合評価

本プロジェクトは、開始後4年の間に、2つのSr光格子時計の周波数において 10^{-18} のレベルでの一致が確認され、クライオ光格子時計による18乗台の時間精度が達成されたことにより、プロジェクトの大きな目的が達成された。この成果は原子時計の研究全体に大きなインパクトを与えるもので、秒の再定義への寄与も期待される。また物理定数の恒常性の検証などの基礎物理にかかわる実験系としても重要である。数ある物理量の基準の中で周波数標準は最も高精度な基準であり、科学技術全般に大きく貢献するものである。さらに、遠隔地間の光格子時計の光ファイバリンク、中空フォトニック結晶ファイバ内光格子による原子の長寿命捕獲など、当初計画で目標

としていた成果を着実に達成したとともに、中空フォトニック結晶ファイバ内の冷却原子による超放射の実現などの当初計画以上の興味深い成果も得られた。また、19桁精度の光格子時計を実現する新たな戦略、実効的魔法周波数の概念（特許申請中）が提案され、今後のさらなる展開の方向性を打ち出している。

近代的な時計技術の開発により、英国が7つの海を支配した歴史からもわかるように、標準技術に関する研究は、その後の巨大なインフラも含めて国の利潤がぶつかりあうため、基礎研究の場においても熾烈な競争がなされることが多い。新しい周波数標準が模索されていた中、光格子時計という全く新しい概念を打ち出し、次世代の光周波数標準をめざしたロードマップの設定に寄与した香取研究総括による本プロジェクトの業績は極めて高い。さらに特筆すべき点として、世界中の周波数標準研究機関が、光格子時計の重要性を認識し、いわゆる **Friendly competition** を展開する状況を研究総括自身が作り上げたことがあげられる。レーザー技術等においても、世界の研究グループと友好的関係を築き、成果をもたらした。まさに「互いの強みを活かし相互補完しながら研究を進め、当該研究を世界の潮流へと至らしめた」といえる。

一方、目に見える成果のみならず、日本国内に高いレベルの時間標準研究拠点を確立するための鍵となるであろうと期待される高精度な光共振器の作製技術、狭線幅高安定レーザー技術等の基盤技術、開発された LD モジュールの準製品化、長寿命化紫外光源の開発が行われ、それらのノウハウを持つ研究員が着実に育っている点も注目される。国費により運営される事業の目的からも国内メーカーによる技術の立上げも高い評価に値する。本プロジェクトが国内に立ち上げつつある高性能光共振器作製技術は、欧米の強力な研究機関との光時計研究の競争に打ち勝つために、また、分野の技術の底上げにも重要な意味を持っている。

フォトニック結晶ファイバと冷却原子による新たな光プラットフォームのような、ナノフォトニクスと物質科学分野の融合は、今後研究者を志す人達に対しても魅力的なテーマともなり、本プロジェクトにおける研究アプローチは、長期的な日本における日本の原子・分子・光科学分野 (AMO) / 量子光学研究に重要な意味を持つ。

以上のとおり、ERATO 香取創造時空間プロジェクトは、卓越した研究水準を示し、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」に資する十分な成果が得られた。

〔総合評価〕 A+（十分な成果が得られた）

以上