

ERATO 香取創造時空間プロジェクト事後評価（予備評価）報告書

【研究総括】 香取 秀俊（東京大学 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ており、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ている。

その結果として、プロジェクト発足当初の主要な目標であった、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ている。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間の実現と、それらの高精度な比較に関しても成果を次々と創出している。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を期待される。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ポテンシャルを示し、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実験による成果や、相対論的測地の実験結果を示すなど、光格子時計の社会インフラ化へのポテンシャルを示している。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。

これらの一連の主要な成果は、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ている。香取研究総括ならびに光格子時計が当該分野において現在十分国際的な中核的な役割を果たしており、今後も同様な役割が期待される。

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ており、かつ今後にも十分期待できると評価できる。

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るといえる。

この着想は、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、光格子時計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」に着目し基礎研究の展開を図ってきた。魔法波長でのシフトのない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。その当時は実現されていなかったものの、 1×10^{-18} の不確かさを実現すれば、時計の同期の概念は一変し、秒の再定義がなされるような科学的・社会的な課題と結びつく。また、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、つまり局所重力の違いや変化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ている。

「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ている。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ている。香取研究総括が提案しERATO開始当時実現されていた15桁の精度の光格子時計を凌駕する性能として、積算時間1秒で 10^{-18} の精度を持つ光格子時計を実現するため、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るとあり、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、後者で紫外レーザー光源開発である。さらに、積算時間1秒で現状では究極とも言うべ

¹ <http://www.jst.go.jp/pr/info/info766/shiry02-2.html>

き性能を実現するために2つの課題がある。それらは、使用するレーザーの雑音の低減、および、捕捉原子数の増大である。また、レーザーの低雑音下に向けて、レーザー周波数の安定化のために長光共振器化、および、低温化の2つの取り組みが計画された。さらには、雑音の無いレーザー、すなわち中空光ファイバーからの超放射レーザーのアイデアが計画された。そして、捕捉原子数増大による積算時間短縮を目指し、中空光ファイバーを用いた。一方、時間標準の定義に資するため、実現した周波数の18桁の比較がなされた。具体的には、光コムを用いた異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ー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「積算時間1秒で18桁の精度で実現し、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ている。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ている。

1-3. プロジェクトの運営

創造時空間プロジェクトは第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研究グループからなる。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ている。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、全体で初めてプロジェクトの目標を成し遂げられるように構成されている。

第1Gにて低温動作型Sr,Yb光格子時計の開発を行った。5年間にわたり時計の精度を向上させる地道な努力が要求されている。第2Gにて中空光ファイバーへの捕捉と分光、超放射レーザーの開発を行い、時計の応用の模索・検証を目指す。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、あるいは新規に開発した光源の導入によりはじめてプロジェクトの目的を完遂することができる。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ー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ー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、運営されている。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がっている。GLは全員30代の若手であり、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をとっている。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機構の研究者と協力関係の体制がとられている。海外連携では紫外レーザー光源の開発が、特に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ている。広く国際的には競争関係にある中で、情報交換等により欧米間で行われているような研究機関間の協力関係の構築にも着手している。今後さらに、海外に対しても門戸を開き協力し研究を効率化しつつ、より世界全体をリードすることが期待される。

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として、高い正確さと安定度が両立できる 18 桁の光格子時計を作ることにある。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、ステファン・ボルツマン則にもとづき、環境温度を 95K にまで下げ、空洞放射の影響のほとんどない小さな領域をつくり、黒体輻射の抑制を実現した。さらに、Sr 光格子原子を出し入れする独創的手法を開発し、実際に「クライオ光格子時計」の世界で初めての構築に成功した。特に、準備された 2 台の Sr クライオ光格子時計間で周波数比較を行い、18 桁の相対不確かさまで確認されたことのインパクトは非常に大きい。さら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、独自の方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。

さらに、すでに Yb に対しても低温動作 Sr 光格子時計と同様な方法にて同様の冷却型光格子時計が構築されている。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を比較し、約 1000 秒の積算時間で 17 桁に達する周波数測定に成功した。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 16 桁の精度という世界最高の短期安定度を得た。レーザー光源が改良されれば 18 桁の測定も可能であろう。光格子時計間での周波数比較は、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も大きな特徴である。異なる原子種間の周波数比の高精度なマトリックスも構築されつつあり、微細構造定数の恒常性の検証への貢献も期待できる。一方、高次光シフトが主要な不確かさ要因であることが強く示唆されると予想され、本期間内にこの高次光シフトの問題を解決する方向性を示せることも望まれる。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る。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、現段階で既に重要かつレベルの高い成果が複数得られている。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つつあるとあってよい。

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ー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ている。光格子時計は、多数個の原子を 1 個

ずつ各格子サイトにトラップし原子間の衝突による周波数シフトを抑え、高い安定度を短い積算時間で獲得でき、およそ1秒間で 10^{-18} の安定度が得られると見積もられている。実際にレーザー光を高Q光共振器に安定化することでレーザースペクトル線幅を抑圧し事前に十二分に安定度をあげておくことが求められる。この際に光共振器を構成するミラーの熱雑音のため十二分にスペクトル線幅を抑圧することが原理的に難しい。また、自由空間での光格子群の大きさは、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る。そのため1秒での 10^{-18} の安定度達成は従来の手法では非常に困難である。そこで、時計遷移に関与する原子数を増加し高精度化を実現する可能性を持つ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ーに注目しファイバー中に光格子を形成して冷却Sr原子をトラップする、「次世代の光時計」と呼べる全く新しい手法に着手した。コア径の太いファイバー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7.8kHzの分光を得た。さらに原子を拡散させても周波数シフトや広がりが生じないことを確認した。

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、用いた中空フォトニック結晶ファイバー中の冷却原子系が、原子集団を振動子として用いることにより熱雑音リミットからの回避が可能な特殊な形態の超放射レーザーと呼ばれるレーザー光源に適していることに着目した。理論検討の後、実験的に中空ファイバー中にトラップした冷却Sr原子集団による超放射現象の観測に成功し、超放射レーザー実現に向けた一步を踏み出し、「時計遷移での超放射レーザーの実現」を彷彿とさせるに至った。本技術の実現により、原子時計遷移で発振ししかも十二分に短期安定度の高い光源を獲得できると予想されている。この方法は、短期安定度の高い光源の提供だけに留まらず、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結果であり、「次世代光格子時計」としての高い新規性を持ち、極めて高く評価できる。一方、超放射レーザーの今後の実現が将来の光格子時計の性能に与えるインパクトの定量化についても、期間内に議論を深められることが期待される。また、レイリー長を超えた光格子が実装できるか、光格子の原子数増大が可能か、狭線幅レーザーとして利用可能かなどの課題への取り組みや、また、研究期間中に実用化の可能性を判断することも望まれる。これらの将来の光格子時計のために重要な新規課題に果敢に取り組む段階的に進めている状況であり残りの期間での結果が期待される。

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ている。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る。

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} のオーダーであり、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。共振器作製材料や種々の動作環境について検討がなされ、最終的に光共振器の熱雑音による制限に到達した。この熱雑音限界を低減することに対して本グループは、1. 光共振器の大型化により、FSR (free spectral range) を小さくし熱揺らぎの光周波数変動への寄与を縮小する、2. 光共振器を極低温に冷却し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。これらはいずれも設計や重要部品の作製を国内で行っている。

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による原子時計の候補として、Hg について、海外委託研究をもとに寿命 3 ヶ月程度の光源を開発し光格子時計を実現した。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でいる。Cd 用の紫外レーザー冷却用光源として波長 229nm、出力 50mW でのレーザーの発振に成功している。このような短波長での高出力の報告は初めてである。この Cd 用の紫外レーザー光源を用いて磁気光学トラップまで達成した。各レーザーの長期安定動作にも重点をおいている。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 18 桁の精度の光格子時計の実現が期待される。

原子時計の根幹を担う光コムを作製を産総研チームに委託し、それを実際にシステムに組み込み安定動作部分を本グループが実施した。双方の連携がうまく奏功し高度な周波数リファレンスシステムが完成し、光周波数コムを最大限に利用したレーザーの周波数制御を行っている。紫外から近赤外の幅広い波長域を用いた光格子時計実験が可能な自作のレーザー光源を有し、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。完全ではないものの既に欧米レベルに近い共振器開発技術が国内に立ち上がっている。

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）の光ファイバー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ー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、光ファイバー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ー伝送に適した波長に変換していたが、その場合には光コム精度である 16 桁程度に周波数精度が制限されていた。本成果では 1397nm の波長を用い、光コムを介さずに直接結合し高精度の周波数比較に成功した。現在、世界で行われているファイバーリンクと比較して 1 桁以上良い。一方、一般相対論によると、重力ポテンシャル中では時間の進み方が遅くなり、18 桁の遠隔周波数比較は、1cm の重力ポテンシャルの差を測定することに相当する。実際、理研と東大の高度差は約 15m であるが、両者の Sr 光格子時計の周波数差を測定し 0.71Hz を得た。測定の不確かさは 0.1Hz 程度であり、国土院の測定値と 20mHz の範囲内で一致し、相対論的測地が成功したことを示した。原子時計の遠隔地周波数比較は光ファイバー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。長距離の光ファイバーリンクや、原子時計による標高差測定は原理自体に新規性を見出しにくいのが、本結果は既報告の遠隔地周波数比較の不確かさをおよそ一桁向上している。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、産総研等に委託した関連技術を含め、3 グループが参加し、本プロジェクトの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ー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ている。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ろう。現在の所 2 点間の Peer-to-Peer

の接続に留まっているが、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とから、3点以上の遠隔地を同期して結んだネットワークの早期な実現が望まれる。

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、順調に進行していると評価できる。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前進している。

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。過去4年間の研究では、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とお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は、非常に高いものと評価できる。一方、一部は一流科学誌に投稿中であるが、4年間に研究発表した論文数は投稿中のものを含めても決して多くはない。非常に高精度で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。今後の残りの期間中に論文数は増加すると推定され、継続して研究成果論文を世界に発信する努力が望まれる。

本プロジェクトは既に目標の18桁の精度に達し、十分な成果を得ているが、最終的な積算時間1秒の目標に対する研究が進展途上であり、一步でも近づくために残り期間を有効に活用することも望まれる。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るが、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・開発も望まれる。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Peer-to-Peerの小規模なものではあるが具体的に実現しつつあり期待される。一方では、現段階で、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、世の中に示すことも望まれる。プロジェクトの英知を結集し、新たな発想のアプリケーションを残された1年で見だし、それを研究成果として得られるように研究総括が導くことを期待する。さらに次の段階として、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可能性がある。

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る。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内にさらに増大している。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証明する、遠隔地にある2台の光格子時計の周波数を同期系で17桁で評価できるシステムを構築するなどの顕著な成果を創出している。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ており、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ていると認められる。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。時間は重要な基礎物理量の一つであり、その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。

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ていると思われる。一方、本プロジェクトの研究分野の性格上、論文の数を絞り込まざるをえないことは、研究戦略としては正しい選択だと思われるが、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、若干心配な点がある。この点の一つ一つの論文に十分なインパクトがあることを考えると、キャリアパス支援には実質的な成果が反映されるよう今後とも長期的なケアを要すると考えられる。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す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いる。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る。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ていることも特筆される。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といえる。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ている。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ーリンク、中空フォトニック結晶ファイバー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ー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。すでに周波数標準の明確なロードマップが打ち出されていた中、光格子時計という全く新しい概念を打ち出し、ロードマップを塗り替えつつある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な関係を築き、成果をもたらしている。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および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。海外の有力な量子光学研究拠点でハイレベルの研究用装置開発技術者が時間をかけて養成され論文には見えない研究の屋台骨になっていることから、今後、国内の他研究組織と連携したオールジャパンで高度な光共振器技術を長期的に育成するという方向性を考えることも有用であろう。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ー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、光格子時計に限らず様々な分野において、現在世界の色々な研究機関から新たな研究テーマとして提案・実証が起りつつあるホットな研究トピックである。本プロジェクトの成果はナノフォトニクスと光格子時計という新たな方向性を日本発で提案しインパクトを有する観点でも価値が高い。ナノフォトニクス構造の作製技術は、日本が得意な微細加工技術が活きる分野であり、今のタイミングで本来の国内の高い技術ポテンシャルを育成することが日本の光科学の分野にとって重要な意味を持つであろう。

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るであろうと評価する。

以上