

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型
年次報告書

平成30年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名:香取 秀俊]

[東京大学大学院工学系研究科・教授]

[研究開発課題名:クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築]

実施期間 : 令和6年4月1日～令和7年3月31日

§1. 研究開発実施体制

(1)「光格子時計システム開発(OC)」グループ(東大／理研／電通大／福岡大学グループ)

- ① 研究開発代表者・主たる共同研究者:香取 秀俊 (東京大学大学院工学系研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・ OC①:光格子時計システムの小型・堅牢・高信頼化
 - ・ OC②:光格子時計のネットワーク技術の全国展開、相対論的測地
 - ・ OC③:秒の再定義に向けた国際連携と国際アピール
 - ・ OC④:超高精度時空間インフラの潜在的アプリケーションの探索と権利化

(2)「光エレクトロニクスモジュール開発(OM)」グループ(島津グループ)

- ① 主たる共同研究者:東條 公資 ((株)島津製作所 基盤技術研究所 先端分析ユニット、副ユニット長)
- ② 研究項目
 - ・ OM①-3:光格子時計制御システムの開発
 - ・ OM①-4:光格子時計システムの実用化・応用検討

(3)「小型光学モジュール開発(COM)」グループ(シグマ光機グループ)

- ① 主たる共同研究者:多幡 能徳 (シグマ光機株式会社、取締役)
- ② 研究項目
 - ・ COM①-3:光学コンポーネントの実用化
 - ・ COM①-4:小型光学モジュール実用化

(4)「ファイバネットワーク化(NW)」グループ(NTT 研究所グループ)

- ① 主たる共同研究者:寒川 哲臣 (日本電信電話(株) NTT 先端技術総合研究所、常務理事 基礎・先端研究プリンシパル)
- ② 研究項目
 - ・ NW②-6: 厚木ー本郷ー水沢 1000km 級ファイバ網を用いた光格子時計 NW 及び相対論的測地応用の実現
 - ・ NW②-7: 通信波長帯光リピータ装置プロトタイプ機の開発
 - ・ NW②-8: PLC 光配線技術の開発及び光格子時計への応用
 - ・ NW②-9: 光格子時計のファイバ伝送 NW 技術の通信アプリケーション探索

(5)「相対論的測地応用(RG)」グループ(東大理グループ)

- ① 主たる共同研究者:田中 愛幸 (東京大学大学院理学系研究科、准教授)
- ② 研究項目
 - ・ RG②:相対論的測地応用

(6)「秒の再定義促進(RS)」グループ(NICT/NMIJグループ)

① 主たる共同研究者:井戸 哲也 (情報通信研究機構電磁波研究所、室長)／安田 正美(産業技術総合研究所計量標準総合センター、研究グループ長)

② 研究項目

- ・ RS③-1: 首都圏光格子時計 NW の構築(NICT)
- ・ RS③-5: 光格子時計 NW による時系ステアリング(NICT)
- ・ 光格子時計による TAI への定期的貢献(NMIJ)
- ・ RS③-6:光時計 NW のアジア圏への拡張 (NICT)←2024 年度
- ・ RS③-7:光格子時計による TAI への定期的貢献(NMIJ)←2024 年度

(7)「社会実装調査研究(SI)」グループ(アスタミューゼグループ)

① 主たる共同研究者:永井 歩 (アスタミューゼ株式会社、社長)

② 研究項目

- ・ SI④-1:光格子時計インフラの潜在的アプリケーション探索
- ・ SI④-2:光格子時計インフラの潜在的アプリケーション権利化

§2. 研究開発成果の概要

「光格子時計」をネットワーク展開・社会実装することで、次世代の超高精度・時空間情報の共通プラットフォームを構築する。GNSS (Global Navigation Satellite System) に用いられる原子時計の精度を 1000 倍以上改善する光格子時計のリンクにより、超高精度クラウド・クロック環境を実現し、通信の高速・大容量化や位置情報サービスの高度化を目指す。

光格子時計システム開発(OC)グループは、縦励起分光法を導入した第 3 世代光格子時計の開発に向けて、磁場トラップ内で冷却され、光格子に連続的に捕獲された冷却原子に対し、狭線幅で時計遷移の観測に成功した。小型・高精度可搬型次世代機の開発では、第1世代機との周波数比較により高精度な相対不確かさで時計周波数の一致が確認できた。光格子時計の測地応用では、理研(和光)と国立天文台(水沢)の遠隔時計を高い安定度で遠隔比較することに成功した。装置の長寿命化に向けた原子線偏向器の設計、検討や可搬型の高安定時計レーザー光源、光周波数コムの開発も並行して進めた。

光エレクトロニクスモジュール開発(OM)グループは、早期商用化(社会実装)に向けて、光格子時計装置の完成度を高めることを目標とし、前年度の評価結果を踏まえた商用プロトタイプ機の改良を事業部門と共同で進め、性能評価及び製品レベルの試験評価を実施した。信頼性やメンテナンス性、コストに関しても検討を実施した。また、マスタークロック用途の分野において、商用プロトタイプ機を用いて予備実験に着手した。

小型光学モジュール(COM)グループは光学コンポーネントの実用化に関して、赤外域薄膜技術を活用した高反射ミラーの製品化と、高真空非磁性製品のシリーズ開発を行った。第 2 世代光格子共振器用の光学素子は商用プロトタイプでの実機搭載による寿命評価より、薄膜材料の積層構成の改良や特性変化の対策検証を実施した。また第 3 世代向けの小型ファイバキャビティなどは、レンズやファイバ端面の表面粗さと薄膜条件の改良、及び検証を進めた。

小型光学モジュールのレーザー光源ユニットは、商用化対応として品質安定と生産性を考慮し、接着・溶接工程や調整、固定方法の更なる改善を実施した。また第 2 世代光格子共振器の物理パッケージは、新規調整機構の追加改良により操作性の向上を図った。堅牢化のリジット型共振器は性能評価と改良検証を進めた。

ファイバネットワーク化(NW)グループは、和光ー本郷ー厚木の 190 km ファイバ NW を用いた波長 1.4 ミクロン帯の光格子時計の遠隔周波数比較実験、並行して OC グループと連携して、和光ー水沢の 574 km の 1.5 ミクロン帯長距離光格子時計比較実験を継続して進めた。また、光格子時計システムの更なる小型化・高安定化を目的に、周期分極反転光学結晶(PPLN)と平面光回路(PLC)を組み合わせた波長変換回路の試作検証と、原子冷却・トラップ(磁気光学トラップ)用のスイッチ付き PLC 波長合波・パワー分岐回路を試作し磁気光学トラップできることを確認した。通信クロック応用に向けては、光格子時計の生成する光基準周波数による通信アプリケーションへの応用デモンストレーションに向けて、光基準周波数の通信波長帯への変換性能を検証し、光格子時計の生成した光基準周波数を通信波長帯に転写するのに十分な性能があることを確認した。

相対論的測地応用(RG)グループは、理研ー水沢間のポテンシャル差を測地的により厳密に評価するためのジオイド測量を完了するとともに、潮汐・プレート沈み込み・マントル流動・地下水流動等の地球物理学的現象に伴うポテンシャルのダイナミックな変化を評価するための地殻変動・重力観測を実施し、データを蓄積した。これらのデータを用いて 18 桁の周波数比較の測地的検証が可能である。VLBI 応用を推進するための基礎実験として、水沢 VLBI 観測所の水素メーザーを光格子時計に置き換えた VLBI 試験観測を行い、良好なデータを取得できることを実証した。

秒の再定義促進(RS)グループは、国際原子時校正に使用できる周波数標準として国際的に認定されている、産総研の Yb 光格子時計(NMIJ-Yb1)を用いて国際原子時(TAI)のオンタイム校正を 3 回行った。また、高稼働率の光格子時計で世界最高水準の時刻系を生成するとともに、TAI を通じた世界中の Cs 原子泉時計とのリンクにより、最高精度で Yb 時計遷移の絶対周波数を決定した。NICT では週平均 1 回以上の光格子時計の運用を継続し、このデータを用いて日本標準時を協定世界時に対して 2ns 以内を維持し、またこの標準時信号に光ファイバを用いて東京大学に精度劣化無く伝送出来ることを確認した。また、NMIJ では、外場に感度を持つ Yb の新しい時計遷移の光格子分光に成功した。その他、国際度量衡委員会時間周波数諮問委員会及びその企画戦略作業部会での議論に貢献し、秒の再定義へのロードマップを改訂した。

社会実装調査研究(SI)グループは、短期の時間軸を中心とする光格子時計の応用展開の検討と、知財化の検討を実施した。具体的には、光格子時計と RG グループの技術を組み合わせた場合の応用可能性と知財化の方向性の検討において、2025 年度に出願を行うために必要な情報収集と RG グループとの議論を行った。さらに、中長期の時間軸での車載化を見据えた応用可能性の検討や、長期軸での超精密時間インフラのビジョン、技術ポートフォリオ及びバリューチェーンの素案を作成した。

【代表的な原著論文情報】

- ・ Hisaaki Shinkai, Masao Takamoto, and Hidetoshi Katori, Transportable optical lattice clocks and general relativity, *International Journal of Modern Physics D*, doi: 10.1142/s0218271825400127.
- ・ Tanaka, Y., Nishiyama, R., Araya, A. et al. (2025), A possibility of fluid migration due to the 2023 M6.5 Noto Peninsula earthquake suggested from precise gravity measurements, *Earth Planets Space*, 77, 32, doi: 10.1186/s40623-025-02153-5.
- ・ T. Jike, T. Oyama, A. Yamauchi, H. Ujihara, R. Ichikawa, M. Sekido, H. Munekane, B. Miyahara, T. Kobayashi, H. Takeuchi, H. Imai, Confirmation of sensitivity for detecting anisotropy of atmospheric delay using high-sensitivity delay measurement, 13th IVS General Meeting Proceedings, 171-175, NASA/CP-20250002586.