

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]

[国立大学法人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 5 年 4 月 1 日～令和 6 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)

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)

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)

(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

## § 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た原子を移動光格子に連続的に注入することで、光格子に捕獲された冷却原子を連続的に生成することに成功した。可搬型光格子時計の測地応用に向けては、NW グループが構築した理研(和光市)―国立天文台(水沢江刺)間の 1000 km 級長距離光ファイバリンクを用いて、可搬型光格子時計の遠隔時計比較に着手した。また、可搬型光格子時計を欧州の標準研究所に輸送し、秒の再定義に向けて光格子時計の国際比較を行った。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、早期商用化を目指し、第 2 世代光格子時計をベースとした商用プロトタイプ機の開発を行い、試作装置を用いて EMC 試験および環境(温度)試験を実施し、課題の洗い出しを完了し、改良開発に着手した。また、光格子時計の自動復帰アルゴリズムを開発し、1 週間の無人連続運転を達成した。

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薄膜と低散乱研磨技術を活用した高反射・高消光比ビームスプリッターと、高真空非磁性の製品開発を行った。また第 2 世代商用プロトタイプ機の各光学素子は、薄膜材料と設計を見直して装置の長寿命化に向けた対策改善を行った。更なる小型化を進めているファイバキャビティは、再基礎検証含めた課題把握と改善対策を実施した。小型光学モジュールのレーザー光源ユニットは、商用化に向けた接着・溶接工程の改善と見直しを実施して安定生産の向上を行い、また商用化の製品仕様を決定した。リング共振器の非磁性化対策は、チタン合金を主材料とした改善機の製作と評価を実施した。また小型・堅牢化のリジット型共振器は低膨張ガラス筐体の試作開発と、製造性及び評価確認を行った。

ファイバネットワーク化(NW)グループは、和光―本郷―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を継続実施し、18 桁台の周波数安定度の再現性を確認した。並行して昨年度から進めていた和光―水沢の 574 km の 1.5 ミクロン帯のファイバリンク用リピータ装置を改良し、OC グループと長距離光格子時計比較実験に着手した。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検討と、原子冷却・トラップ(磁気光学トラップ)用の改良型 PLC 波長合波・パワー分岐回路を試作し、光格子時計動作に十分な原子数を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、TDD(Time Division Duplex: 時分割複信)モバイル通信の高信頼化への適用検討として、光格子時計・光周波数コム&光電変換装置・時刻基準装置を介した時刻のホールドオーバー実証評価を開始した。

相対論的測地応用(RG)グループは、理研―水沢を結ぶ 1000 km 超級リンクによる相対論測地を実証するため、静的な標高差を2通りの測地学的手法を用いて18桁の不確かさで決定した。加えて、潮汐によるダイナミックなポテンシャル差を検証するため、計算と観測から測地データ(ポテンシャル変化の時系列データ)を構築した。

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 2 回行った。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を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、Yb の新しい時計遷移の探索と世界初の絶対周波数測定に成功した。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、光格子時計の展開先領域の探索を継続して実施した。これまでに考案した応用展開案に加え、今年度新たに追加したものを含め、機能起点×価値起点の 2 軸のマッピングを行い、各応用展開案の機能(時間精度 or 重力ポテンシャル測定精度)と価値(情緒的価値 or 機能的価値)を整理した。さらに、光格子時計が社会実装された際に利用する立場となる人物を対象とした、相対論的時間が創り出す新しい世界に関するワークショップを実施し、固有時間に対する情緒的価値に強い関心があることが確認された。また、プロジェクトメンバーワークショップでは、参画組織それぞれが期待する光格子時計の応用についてヒアリングをした。

#### 【代表的な原著論文情報】

- [1] S. Okaba, R. Takeuchi, S. Tsuji and H. Katori,  
“Continuous generation of an ultracold atomic beam using crossed moving optical lattices,”  
Physical Review Applied 21, 034006 (2023).
- [2] Tanaka, Y., V. Klemann, Z. Martinec,  
“An Estimate of the Effect of 3D Heterogeneous Density Distribution on Coseismic Deformation  
Using a Spectral Finite-Element Approach”,  
International Association of Geodesy Symposia (2023).
- [3] N Dimarcq, M Gertszov, G Mileti, S Bize, C W Oates, E Peik, D Calonico, T Ido, P Tavella, F Meynadier, G Petit, G Panfilo, J Bartholomew, P Defraigne, E A Donley, P O Hedekvist, I Sesia, M Wouters, P Dubé, F Fang, F Levi, J Lodewyck, H S Margolis, D Newell, S Slyusarev, S Weyers, J-P Uzan, M Yasuda, D-H Yu, C Rieck, H Schnatz, Y Hanado, M Fujieda, P-E Pottie, J Hanssen, A Malimon and N Ashby,  
“Roadmap towards the redefinition of the second”  
Metrologia 61, 012001 (2024)