

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型  
年次報告書

令和2年度  
研究開発年次報告書

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：平成2年4月1日～令和3年3月31日

## § 1. 研究実施体制

### (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)「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、所長)

#### ② 研究項目

- ・ NW②-1:  $10^{-18}$ 精度 100 km 級遠隔地間光格子時計周波数比較の検証
- ・ NW②-2: ファイバノイズ・キャンセラ装置の開発
- ・ NW②-3: 厚木・本郷・水沢江刺 1000 km 級超長距離ファイバNWの構築
- ・ NW②-4: 光格子時計NWの高精度化・高安定度化に向けた光配線技術の開発
- ・ NW②-5: 通信クロック応用に向けた光周波数の高精度 RF 変換技術の開発(2020 年度より追加)

### (3)「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

- ・ OM①-1: マルチチャンネルレーザー制御エレクトロニクスの開発
- ・ OM①-2: 光学系モジュールの開発

### (4)「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

### (5)「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: 秒の再定義に向けた国際連携と国際アピール

### (6)「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

- ・ COM①-1: 光学コンポーネントの開発
- ・ COM①-2: 小型光学モジュール開発

## § 2. 研究実施の概要

「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。

本年度、光格子時計システム開発グループは、第 1 世代光格子時計の車載化を実現し、実験室設置の時計と比較することで、センチメートル精度の標高計測が可能であることを実証した。この第 1 世代機をベースに、更に小型・堅牢化した第 2 世代光格子時計の開発を行っている。本年度は、小型時計分光用真空槽を用いて冷却原子の生成を実現し、並行して堅牢化した小型レーザーモジュールの開発も行った。さらに、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を行った。

ファイバネットワーク化グループは、和光-本郷-厚木の長距離(100km 級)用 1.4 ミクロン帯光ファイバ NW を利用した遠隔時計周波数比較実験を実施し、時計光に室内用光配線技術を適用する等の開発を進めた。また、1.5 ミクロン帯では、厚木-本郷-和光-水沢の超長距離(1000 km 級)光ファイバ NW の構築、および、通信クロック応用に向けた光周波数の高精度 RF 変換技術の開発を開始した。

光エレクトロニクスモジュール開発グループは、小型・堅牢化を目指した第 2 世代光格子時計用の制御モジュール(電子回路)および小型光学系モジュールの試作を完了し、機能単位モジュール(光学系)の開発を開始した。制御モジュールでは計画で目標体積としていた 150L に対して 1/3 以下の 47L への小型化を達成し、小型光学系モジュールは可動鏡を廃止したファイバ結合型モジュール化により、従来比 60%の小型化を達成した。また、制御モジュールと機能単位モジュールを統合した第 2 世代光格子時計用のモジュールシステム筐体についても試作を完了し、従来の 256L から 81L への小型化を実現する目途を得た。

相対論的測地応用グループは、理研及び NTT 物性科学基礎研究所の光格子時計設置点間のポテンシャル差を測量データに基づいて決定し、得られた結果の不確かさを評価した。さらに、それら2機関の屋上に GNSS アンテナを設置し、GNSS データ取得を開始した。また、国立天文台水沢 VLBI(Very Long Baseline Interferometry)観測所において、ファイバネットワーク化グループと共同で車載光格子時計との比較観測を行うための光ファイバを敷設した。

秒の再定義促進グループは、第 22 回国際度量衡委員会時間周波数諮問委員会(CCTF)に参加した。また、2017 年以降の絶対周波数測定、高稼働率データ等の実績により CCTF 傘下の一次二次周波数標準作業部会にて、産総研の Yb 光格子時計が国際原子時校正に使用できる時計と認定された。また、UTC(NICT)の基準周波数を光ファイバ経由で東大香取研究室へ定期的送信することを目的に基準信号伝送システムを開発し、伝送距離 90km の 1 日平均値で周波数伝送は  $10^{-17}$ 、時刻(タイミング)で、 $10^{-16}$  台の安定度を達成した。さらに、NICT の Sr 光格子時計の 2016 年度以降の蓄積データをとりまとめ、 $1.8 \times 10^{-16}$  の不確かさで絶対周波数を決定した。

小型光学モジュールグループは、光格子時計用の多波長光学素子などの特性改善と溶接小型光源ユニットの開発を実施し、評価を開始した。また更なる小型・堅牢化対応として接着、溶接技術を使用したリジッド型光学モジュールの試作検証より実現性及び改善内容を把握し、第 2 世代の光格子用リング共振器の設計を開始した。

論文リスト

- [1] Masao Takamoto, Ichiro Ushijima, Noriaki Ohmae, Toshihiro Yahagi, Kensuke Kokado, Hisaaki Shinkai & Hidetoshi Katori,  
**“Test of General Relativity by a Pair of Transportable Optical Lattice Clocks”,**  
Nature Photonics (2020).
- [2] Noriaki Ohmae, Filippo Bregolin, Nils Nemitz, and Hidetoshi Katori,  
**“Direct measurement of the frequency ratio for Hg and Yb optical lattice clock and closure of the Hg/Yb/Sr loop”,**  
Optics Express, Vol. 28, Issue 10, pp.15112-15121 (2020).
- [3] M. Pizzocaro, M. Sekido, K. Takefuji, H. Ujihara, H. Hachisu, N. Nemitz, M. Tsutsumi, T. Kondo, E. Kawai, R. Ichikawa, K. Namba, Y. Okamoto, R. Takahashi, J. Komuro, C. Clivati, F. Bregolin, P. Barbieri, A. Mura, E. Cantoni, G. Cerretto, F. Levi, G. Maccaferri, M. Roma, C. Bortolotti, M. Negusini, R. Ricci, G. Zacchiroli, J. Roda, J. Leute, G. Petit, F. Perini, D. Calonico and T. Ido,  
**“Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry”,**  
Nature Physics volume 17, pages223–227(2021).