

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 4 年 4 月 1 日～令和 5 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
 - ・ COM①-1: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
- (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:秒の再定義に向けた国際連携と国際アピール
- (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、縦励起ラムゼー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)ー国立天文台(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機の想定ユーザに対してヒアリングを実施し、標準時用途向けおよび通信用途向けシステムの規格設定を完了した。また、商用プロトタイプ機の開発に着手し、構成要素の試作を完了した。

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として多波長化薄膜と低散乱研磨技術を活用し、波長帯域別プリズムの製品化や、高反射・高消光比のミラーなどの製品開発を進めている。また更なる小型化を図るためファイバーキャビティなどの試作、検証を開始した。小型光学モジュールの実用化は、光源シャッター及び光学ユニットなどの製品調査を進めている。第2世代光格子時計の商用プロトタイプ機としてリング共振器は非磁性化対策を実施し、レーザー光源ユニットは信頼性評価から改良機の製作を行った。また小型・堅牢化のリジット型共振器として低膨張ガラス筐体の設計、及び試作を開始した。

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を確認した。さらに和光ー水沢の 560 km ファイバ NW を用いた光周波数伝送系を構築した。和光・水沢及び3中継局舎では 1.5 ミクロン帯光リピータ装置 1 号機の運用を開始した。また、光格子時計システムの更なる小型化を目的に、周期分極反転光学結晶(PPLN)を用いた 1.4 ミクロン帯から 700 nm への波長変換回路や改良型波長合波・パワー分岐回路等を検討、作製に着手した。通信クロック応用に向けて光格子時計に同期した光周波数コムと RF 変換システムを接続し、10 MHz の周波数安定度評価を進めた。

相対論的測地応用(RG)グループは、理研ー厚木を結ぶ 100 km 超級リンクによる相対論的測地を実証する際に比較対象として用いる標高差を、2通りの測地学的手法で決定した。また、理研ー水沢を結ぶ 1000 km 超級リンクの実証に向け、標高差の測地学的な計測手法の検討を進めるとともに、GNSS 測量を実施した。

秒の再定義促進(RS)グループは、国際原子時計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、NICT の Sr 光格子時計(NICT-Sr1)、および、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それぞれ、5 回(NICT)、5 回(NMIJ)ずつ行った。また、NMIJ-Yb1 と、同じく TAI に貢献している Cs 原子泉時計(NMIJ-F2)の長期周波数比較により、超軽量暗黒物質の探索を行うとともに、Yb 時計遷移の絶対周波数測定を行った。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 2030 年の秒の再定義を目指す旨の決議文策定作業に貢献し、2022 年 11 月の国際度量衡総会に

において、採択に至った。

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に際し、特許・論文・グラントのデータベースを活用した機械的探索手法によって光格子時計がアプローチ可能な社会課題に関連する直近の研究事例を抽出した。さらに人的探索においてはデータドリブン SF プロトタイピングの手法を用い、目指すべき遠い未来のビジョンを定めたうえで、機械的散策によって得た研究事例を参考に、光格子時計が作り出す未来の応用展開ストーリーを40案考案した。また、人的探索に関しては今後本プロジェクト関係者やクリエイタを招集する応用展開ワークショップを実施する想定であるが、今年度は第1弾として東大香取研究室の学生を対象としたワークショップを開催した。

【代表的な原著論文情報】

- [1] Masao Takamoto, Yoshiyuki Tanaka and Hidetoshi Katori,
“A perspective on the future of transportable optical lattice clocks”,
Applied Physics Letters, Vol. 120, 140502 (2022).
- [2] Yoshiyuki Tanaka and Yosuke Aoki,
“A Geodetic Determination of the Gravitational Potential Difference Toward a 100-km-Scale Clock Frequency Comparison in a Plate Subduction Zone”,
International Association of Geodesy Symposia (2022).
- [3] Takumi Kobayashi, Akifumi Takamizawa, Daisuke Akamatsu, Akio Kawasaki, Akiko Nishiyama, Kazumoto Hosaka, Yusuke Hisai, Masato Wada, Hajime Inaba, Takehiko Tanabe and Masami Yasuda,
“Search for Ultralight Dark Matter from Long-Term Frequency Comparisons of Optical and Microwave Atomic Clocks”,
Physical Review Letters, Vol. 129, 241301 (2022).