

国立研究開発法人 科学技術振興機構  
戦略的創造研究推進事業  
ERATO  
追跡評価用資料

「香取創造時空間」プロジェクト  
(2010.10～2017.3)

研究総括：香取 秀俊

2023年3月



## 目次

|  |    |
|--|----|
| 要旨 .....   | 1  |
| 第 1 章 プロジェクトの概要.....                                     | 4  |
| 1.1 研究期間.....  | 4  |
| 1.2 プロジェクト発足に至った背景.....                                  | 4  |
| 1.3 プロジェクトのねらい.....                                      | 5  |
| 1.4 研究体制.....  | 6  |
| 1.5 プロジェクト終了時点での研究成果.....                                | 6  |
| 1.5.1 セシウム原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ、新しい原理の原子時計「光格子時計」の実現..... | 6  |
| (1) 2 台の低温動作ストロンチウム光格子時計による 18 桁精度の周波数一致 ..              | 6  |
| 1.5.2 異種原子光格子時計の開発.....                                  | 7  |
| (1) 秒の定義の実現精度を超える水銀光格子時計の実証.....                         | 7  |
| (2) 秒の定義の実現精度を超えるイッテルビウム光格子時計の実証.....                    | 8  |
| (3) 3 種類の異原子光格子時計周波数比マトリックスの完成 .....                     | 9  |
| 1.5.3 光格子時計の小型化、可搬化技術の開発.....                            | 10 |
| (1) 超放射レーザーや高安定光格子時計の実現にむけた光ファイバ中の原子の高精度分光 .....         | 10 |
| 1.5.4 光格子時計の相対論的測地への応用.....                              | 11 |
| (1) 理研－東大の遠隔(光ファイバ長 30km)周波数比較による相対論的測地の実証 .....         | 11 |
| 第 2 章 プロジェクトの終了から現在に至る状況.....                            | 13 |
| 2.1 プロジェクトの終了後の状況に関する基礎データ .....                         | 13 |
| 2.1.1 調査方法 .....   | 13 |
| (1) 基礎データ調査の方法.....                                      | 13 |
| 2.1.2 競争的研究資金の獲得状況.....                                  | 14 |
| 2.1.3 論文の発表状況.....                                       | 15 |
| (1) 本プロジェクトの成果論文.....                                    | 15 |
| (2) 本プロジェクト終了後の発展論文.....                                 | 16 |
| 2.1.4 特許の出願状況.....                                       | 16 |
| 2.1.5 受賞状況 .....   | 17 |
| 2.1.6 ベンチャー企業の設立状況.....                                  | 17 |
| 2.2 プロジェクト終了後の発展状況.....                                  | 18 |
| 2.2.1 19 桁精度の光格子時計実現に向けた研究開発 .....                       | 18 |

|  |    |
|--|----|
| (1) 19桁精度の時計の実現に向けたストロンチウム光格子時計の実効的魔法条件<br>の決定 ..... | 18 |
| (2) 光格子時計の19桁精度の実現に最適な原子種の探索.....                    | 19 |
| 2.2.2 光格子時計の小型化、可搬化技術の開発.....                        | 21 |
| (1) 18桁精度の可搬型光格子時計の開発 .....                          | 21 |
| (2) カドミウム光格子時計の魔法波長の決定.....                          | 22 |
| (3) 超放射レーザー実現に向けた中空ファイバ導波路内における超放射現象の挙<br>動の解明 ..... | 23 |
| 2.2.3 光格子時計の相対論的測地への応用展開.....                        | 25 |
| (1) 超高精度光周波数の長距離ファイバ伝送技術の開発.....                     | 25 |
| 2.2.4 次世代時間標準化に向けた要素技術の開発.....                       | 27 |
| (1) イッテルビウム光格子時計の長期高稼働率運転システムの開発.....                | 27 |
| (2) HgとYbの光格子時計の周波数比の直接測定とHg/Yb/Srループの完成 ...         | 29 |
| 2.3 プロジェクト参加研究員の活動状況.....                            | 30 |
| 第3章 プロジェクト成果の波及と展望.....                              | 31 |
| 3.1 科学技術への波及と展望.....                                 | 31 |
| 3.1.1 光格子時計開発の潮流の創成.....                             | 31 |
| 3.1.2 物理学の根源的な問題提起の可能性.....                          | 33 |
| 3.2 社会経済への波及と展望.....                                 | 33 |
| 3.2.1 次世代時間標準への貢献.....                               | 33 |
| 3.2.2 時刻同期方法の革新.....                                 | 34 |
| 3.2.3 相対論的測地による防災や地下資源探索への応用.....                    | 35 |

## 要旨

本資料は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 ERATO の「香取創造時空間」プロジェクト(2010年10月～2017年3月、以後本プロジェクトと記載)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST 事業および事業運営の改善などに資するために、追跡調査を実施し、結果をまとめたものである。

本プロジェクトの目標は、極低温原子操作、量子制御技術、最先端のレーザー制御技術の高度化を行うことで、現在の秒の基準であるセシウム(Cs)原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ、新しい原理の原子時計「光格子時計」を実現させることであった。「光格子時計」は、現在の「秒」の基準である Cs 原子時計の精度を超える可能性のある技術として香取が 2001 年に世界で初めて提案した日本発の独創的な技術である。本技術による高精度な光格子時計の実現は、「秒の再定義」を迫るだけでなく、従来の時計の概念を超える新しい応用の可能性を秘めている。それは、離れた場所にある 2 台の光格子時計の重力による相対論的な時間の遅れを検出することで、土地の高低差を測る「相対論的な測地技術」への展開のほか、物理定数の 1 つである微細構造定数の恒常性の検証など、新たな基盤技術の創出や新しい基礎物理学的な知見をもたらすことなどである。

本報告書の第 1 章では、本プロジェクト研究期間中の成果をまとめた。

本プロジェクトでは、①Cs 原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ、新しい原理の原子時計「光格子時計」の開発、②物理定数の 1 つである微細構造定数の新たな基礎物理学的知見を得ることが期待できる異種原子光格子時計の開発、③光格子時計の実用化に向けた小型化、可搬化技術の開発、④防災や地下資源探索への活用が期待される光格子時計の相対論的測地の実証等に関する研究が進められた。

その結果、①については、ストロンチウム(Sr)原子光格子時計を開発し、Cs 原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ 18 桁精度で 2 台の Sr 原子光格子時計を世界で初めて一致させた。②については、水銀(Hg)及びイッテルビウム(Yb)光格子時計を開発し、Sr 光格子時計をリファレンスとした「秒」の定義の実現精度を超える世界最高精度の周波数比較に成功した。さらに、Sr、Hg、Yb 原子 3 種類の光格子時計同士の周波数比マトリックスを世界で初めて完成させた。③については、光格子時計の小型、可搬化につながる技術として超放射レーザーや高安定光格子時計の実現にむけた光ファイバ中の原子の分光において、従来の精度を遙かに上回る高精度な分光に成功した。④については、理化学研究所－東京大学間(光ファイバ長 30km)での光格子時計の遠隔周波数を比較し、cm レベルの標高差測定に世界で初めて成功させるなどの研究成果を上げた。

第 2 章では、本プロジェクト研究終了後から現在に至るまでの研究成果の発展についてまとめた。

本プロジェクト終了後、科学研究費助成事業(科研費)特別推進研究「超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓」(2016～2020 年度)及び JST 未来社会創造

事業(大規模プロジェクト型)「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」(2018～2027年度)で上記①～④の研究成果をさらに発展させ、加えて⑤光格子時計の次世代時間標準化に向けた要素技術に関する研究開発が進められた。

①については、世界で未だ実現されていない 19 桁精度の時計の実現に向けた Sr 光格子時計の実効的魔法条件の決定や 19 桁精度の実現に最適な原子種を探索した。②については、世界初となる Hg と Yb の光格子時計の周波数比の直接測定に成功した。③については、18 桁精度の可搬型 Sr 光格子時計の開発や室温動作の可能性のあるカドミウム(Cd)光格子時計の魔法波長の決定に世界で初めて成功した。また、超放射レーザーの実現に向けた中空ファイバ導波路内における超放射現象の挙動の解明を進めた。④については、超高精度光周波数の長距離ファイバ伝送技術を開発し、 $1 \times 10^{-18}$  の周波数精度を保持したまま 200km 級の伝送が可能であることを世界で初めて実証した。⑤については、Yb 光格子時計の半年間にわたる高稼働率運転や 3 つの異なる光時計周波数比閉包測定による SI 秒を上回る精度の Hg/Yb/Sr ループを世界で初めて達成するなど、世界に類をみない研究成果を上げた。これらのように本プロジェクト研究終了後においても光格子時計技術の高度化や社会実装に向けた検討が着実に進められている。

第 3 章では、科学技術的および社会経済的な観点から、本プロジェクトが与えた波及効果についてまとめた。

科学技術への波及と展望については、光格子時計の潮流の創成、物理学の根源的な問題提起の可能性等、社会経済への波及と展望については、次世代時間標準確立への貢献、相対論的測地による防災や地下資源探索や時刻同期方法の革新等への応用展開に道筋をつけた。今後、光格子時計の可搬化やネットワーク技術の進展に伴う従来にない桁違いの時空間情報の拡充は、現時点では予想のできない新たな用途の発見につながる可能性がある。

ERATO「香取創造時空間」プロジェクト まとめ図

| 戦略目標、達成目標/プロジェクトの目標 (ねらい)   | インプット  | アクティビティ/アウトプット   | アウトカム (short/mid-term) |           | アウトカム (long-term) / インパクト |    |    |    |     |     |   |    |    |    |   |   |  |    |   |   |  |  |  |
|---|--|--|------------------------|-----------|---------------------------|----|----|----|-----|-----|---|----|----|----|---|---|--|----|---|---|--|--|--|
|   |  |  | ～追跡調査時点                | 今後予想される展開 | 今後想定される波及効果               |    |    |    |     |     |   |    |    |    |   |   |  |    |   |   |  |  |  |
| <p><b>目的・目標</b></p> <p>戦略目標：<br/>「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」</p> <p>達成目標<br/>極低温原子操作、量子制御技術、最先端のレーザー制御技術の高度化を行うことで、セシウム原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ、新しい原理の原子時計「光格子時計」を実現させる。</p> <p>具体的目標<br/>1.積算時間1秒で<math>10^{-18}</math>の安定度を実現する。<br/>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。<br/>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。<br/>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。</p> | <p><b>研究体制</b></p> <p>研究総括：<br/>香取秀俊<br/>(東京大学大学院工学系研究科物理学専攻教授/理化学研究所 香取量子計測研究室 招聘主任研究員 兼 光量子工学研究領域 エクストリームフォトニクス研究グループ 時空間エンジニアリング研究チーム チームリーダー)</p> <p><b>研究体制</b></p> <p>1.光格子時計実験グループ (高本将男)<br/>2.物理応用グループ (高野哲至)<br/>3.先端レーザーグループ (大前宣昭)</p> | <p><b>研究成果のまとめ</b></p> <p>&lt;ERATOでの成果&gt;<br/>1. セシウム原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ、新しい原理の原子時計「光格子時計」の実現<br/>(1)2台の低温動作ストロンチウム光格子時計による18桁精度の周波数一致<br/>2. 異種原子光格子時計の開発<br/>(1)秒の定義の実現精度を超える水銀及びイッテルビウム光格子時計の実証<br/>(2)3種類の異原子光格子時計周波数比マトリックスの完成<br/>3. 光格子時計の小型化、可搬化技術の開発<br/>(1)超放射レーザーや高安定光格子時計の実現に向けた光ファイバ中の原子の高精度分光<br/>4. 光格子時計の相対論的測地への応用<br/>(1)理研-東大の遠隔周波数比較による相対論的測地の実証</p> <p><b>論文</b></p> <table border="1"> <tr> <td>成果論文</td> <td>59</td> </tr> <tr> <td>発展論文</td> <td>25</td> </tr> </table> <p><b>特許出願・登録</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">出願</th> <th rowspan="2">国内</th> <th>期間中</th> <th>終了後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>登録</td> <td>国内</td> <td>5</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>海外</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>アウトリーチ活動</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・プロジェクトHPでの情報発信</li> <li>・市民講座</li> <li>・高校生のサマースクール</li> <li>・新聞取材対応</li> <li>・広報誌対応</li> </ul> | 成果論文                   | 59        | 発展論文                      | 25 | 出願 | 国内 | 期間中 | 終了後 | 7 | 13 | 登録 | 国内 | 5 | 2 |  | 海外 | 4 | 0 | <p><b>プロジェクトから生み出された研究成果トピックスとその展開</b></p> <p>&lt;ERATO後の成果&gt;<br/>1. 19桁精度の光格子時計実現に向けた研究開発<br/>(1)19桁精度の時計の実現に向けたストロンチウム光格子時計の実効的魔法条件の決定<br/>(2)光格子時計の19桁精度の実現に最適な原子種の探索<br/>2. 光格子時計の小型化、可搬化技術の開発<br/>(1)18桁精度の可搬型光格子時計の開発<br/>(2)カドミウム光格子時計の魔法波長の決定<br/>(3)超放射レーザー-実現に向けた中空ファイバ導波路内における超放射現象の挙動の解明<br/>3. 光格子時計の相対論的測地への応用展開<br/>(1)超高精度光周波数の長距離ファイバ伝送技術の開発<br/>4. 次世代時間標準化に向けた要素技術の開発<br/>(1)イッテルビウム光格子時計の長期高稼働率運転システムの開発<br/>(2)HgとYbの光格子時計の周波数比の直接測定とHg/Yb/Srループの完成</p> <p><b>科学技術的および社会・経済的な波及効果</b></p> <p><b>科学技術の進歩への貢献</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・光格子時計開発の潮流の創成</li> <li>・物理学の根源的な問題提起の可能性</li> </ul> <p><b>社会・経済への貢献</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・次世代時間標準確立への貢献</li> <li>・時間同期方法の革新</li> <li>・相対論的測地による防災や地下資源探索への応用</li> </ul> <p><b>展開</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・科研費特別推進研究「超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓」(2016～2020年度)</li> <li>・JST未来社会創造事業(大規模プロジェクト型)「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」(2018～2027年度)</li> <li>・CCTF傘下の一次二次周波数標準作業部会が、Yb光格子時計(NMIJ)を国際原子時計校正に使用できる時計として認定</li> </ul> <p><b>受賞/人材育成・成長等</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ブレークスルー賞等の著名な賞を含む多数の賞を受賞</li> <li>・後継プロジェクトで一部研究者との研究継続</li> </ul> |  | <p>想定される科学、社会、経済的な波及について記入</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・量子科学や物理学の新たな知見の発見</li> <li>・秒の再定義への貢献</li> <li>・相対論的測地による防災や地下資源探索への応用</li> <li>・超高精度な時間空間情報を活用した、現時点では予想のできない新たな用途の発見</li> </ul> |
| 成果論文  | 59   |  |                        |           |                           |    |    |    |     |     |   |    |    |    |   |   |  |    |   |   |  |  |  |
| 発展論文  | 25   |  |                        |           |                           |    |    |    |     |     |   |    |    |    |   |   |  |    |   |   |  |  |  |
| 出願  | 国内   | 期間中  | 終了後                    |           |                           |    |    |    |     |     |   |    |    |    |   |   |  |    |   |   |  |  |  |
|   |  | 7  | 13                     |           |                           |    |    |    |     |     |   |    |    |    |   |   |  |    |   |   |  |  |  |
| 登録  | 国内   | 5  | 2                      |           |                           |    |    |    |     |     |   |    |    |    |   |   |  |    |   |   |  |  |  |
|   | 海外   | 4  | 0                      |           |                           |    |    |    |     |     |   |    |    |    |   |   |  |    |   |   |  |  |  |

## 第 1 章 プロジェクトの概要

ERATO「香取創造時空間」プロジェクトの概要を下記に示す。

### 1.1 研究期間

研究期間：2010年10月～2017年3月（特別重点期間2016年4月～2017年3月含む）

### 1.2 プロジェクト発足に至った背景<sup>1</sup>

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った。

光格子時計の着想は、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～2002年度）期間中の2001年に遡る。香取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、魔法波長などの一連の研究成果に端を発する。光格子時計の提案の後、香取は実際に<sup>87</sup>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」に着目し基礎研究を展開した。「魔法波長でトラップの摂動を相殺する」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。この精度が達成されると、現在の秒の基準であるCs原子時計の精度を凌駕することとなり、秒の再定義への機運の高まりや、同時刻の概念に相対論的な時空間が登場し、科学的・社会的な課題とも結びつく。物理定数の1つである微細構造定数の恒常性の検証や、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」の下で発足した。

---

<sup>1</sup> ERATO 香取創造時空間プロジェクト事後評価（最終）報告書、  
[https://www.jst.go.jp/erato/evaluation/posteriori/jigo/jigo2010\\_katori.pdf](https://www.jst.go.jp/erato/evaluation/posteriori/jigo/jigo2010_katori.pdf)

### 1.3 プロジェクトのねらい<sup>2</sup>

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物理定数の 1 つである微細構造定数の時間変化の有無をとらえること、また相対論的測地学、つまり重力ポテンシャル差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た。

「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た。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た。香取が ERATO 開始当時実現していた 15 桁の精度の光格子時計を 3 桁凌駕する性能を実現するため、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、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、光格子時計の高安定度を実現するために 2 つの課題がある。それらは、使用するレーザーの周波数雑音の低減、および、量子射影雑音を低減するための捕捉原子数の増大である。レーザーの低雑音化に向けて、レーザー周波数の安定化に用いる光共振器の長尺化、および、低温化の 2 つの取り組みが計画された。さらには、ミラーの熱雑音に影響されないミラーレス・レーザー、すなわち中空光ファイバからの超放射レーザーのアイデアが計画された。一方、時間標準の定義に資するため、実現した周波数の 17 桁の周波数比計測が計画された。具体的には、異種原子から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 1 つである微細構造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「18 桁の精度の光格子時計を実現し、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た。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であった。

---

<sup>2</sup> ERATO 香取創造時空間プロジェクト事後評価（最終）報告書、  
[https://www.jst.go.jp/erato/evaluation/posteriori/jigo/jigo2010\\_katori.pdf](https://www.jst.go.jp/erato/evaluation/posteriori/jigo/jigo2010_katori.pdf)

## 1.4 研究体制<sup>3</sup>

本プロジェクトでは以下 3 研究グループで相互に連携しながら研究が進められた(表 1-1)。

- (1) 光格子時計実験グループ(最高精度の光格子時計の実現)
- (2) 物理応用グループ(光格子時計手法の表面プローブ、測地計測への応用)
- (3) 先端レーザーグループ(光格子時計の実験に必須な先端的レーザー開発)

表 1-1 研究グループと人員および実施場所(2016 年 11 月時点)

| グループ名 | 光格子時計実験グループ | 物理応用グループ | 先端レーザーグループ  | メンバー               |
|-------|-------------|----------|-------------|--------------------|
| 実施場所  | 理化学研究所      | 東京大学     | 東京大学・理化学研究所 |                    |
| リーダー  | 高本 将男       | 高野 哲至    | 大前 宣昭       | 研究員：(7)<br>技術員：(1) |
| 総計    | 8 名         |          |             |                    |

## 1.5 プロジェクト終了時点での研究成果

本プロジェクトで得られた主要な研究成果の概略を以下に示す。

### 1.5.1 セシウム原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ、新しい原理の原子時計「光格子時計」の実現

#### (1) 2 台の低温動作ストロンチウム光格子時計による 18 桁精度の周波数一致<sup>4</sup>

高精度と安定度を両立する 18 桁精度<sup>5</sup>の光格子時計の実現には、一番の劣化要因である、黒体輻射光による時計遷移周波数のシフト(黒体放射シフト)の抑制が必要である。このため、低温冷却した恒温槽中で時計分光を行う装置を開発した。ここでは、環境温度を 95K にまで下げ、空洞放射の影響を室温の 1/100 に低減するクライオ・チャンバーの導入により、黒体放射シフトの抑制を実現した。さらに、Sr 原子をクライオ・チャンバーに導入する手法を確立し、「クライオ光格子時計」を世界で初めて実証した。

<sup>3</sup> ERATO「香取創造時空間プロジェクト」研究終了報告書

<sup>4</sup> JST プレスリリース(共同発表)「次世代時間標準「光格子時計」の高精度化に成功～2 台の時計が宇宙年齢 138 億年で 1 秒も狂わない再現性を実証～」(2015 年 2 月 10 日)

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20150210-2/>

<sup>5</sup> 時計の精度は、ある時間経過した後の時間のずれで評価する。例えば、月差 10 秒の腕時計なら、(10 秒) / (ひと月はおおよそ 2,600,000 秒) から計算される、おおよそ  $4 \times 10^{-6}$  が時計の精度である。これを指数の数字を取って、6 桁の精度の時計という。本研究が目指している  $1 \times 10^{-18}$  精度は、 $1 \times 10^{18}$  秒(おおよそ 300 億年)の間測定するとやっと 1 秒ずれる精度である。このような時計の精度は、時計の振り子の振動数の精度で決まる。

このような黒体輻射シフトを抑制する低温動作ストロンチウム光格子時計を 2 台開発、同じ高さに設置し、これらを比較することで  $2 \times 10^{-18}$  の精度で一致することを確認した(図 1-1、図 1-2)。

次世代の原子時計の有力候補の一つである単一イオン時計では、量子揺らぎ誤差のため 10 日以上積算時間が必要だったが、今回開発した光格子時計では、わずか 2 時間で 18 桁の比較精度に到達した(宇宙年齢 138 億年で 1 秒も狂わない再現性)。2 台の時計の再現性がこの精度で達成されたことは世界初となり、独自技術による本光格子時計の優位性を実証した。

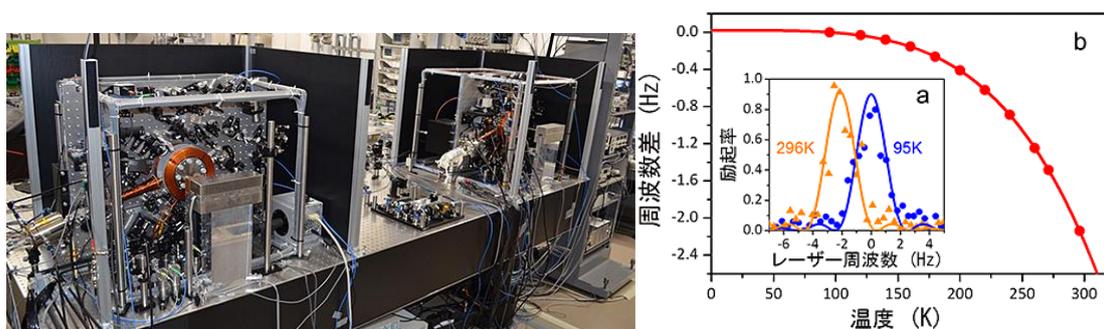


図 1-1 開発した 2 台の低温動作・光格子時計と黒体輻射による時計の周波数シフトの直接測定結果

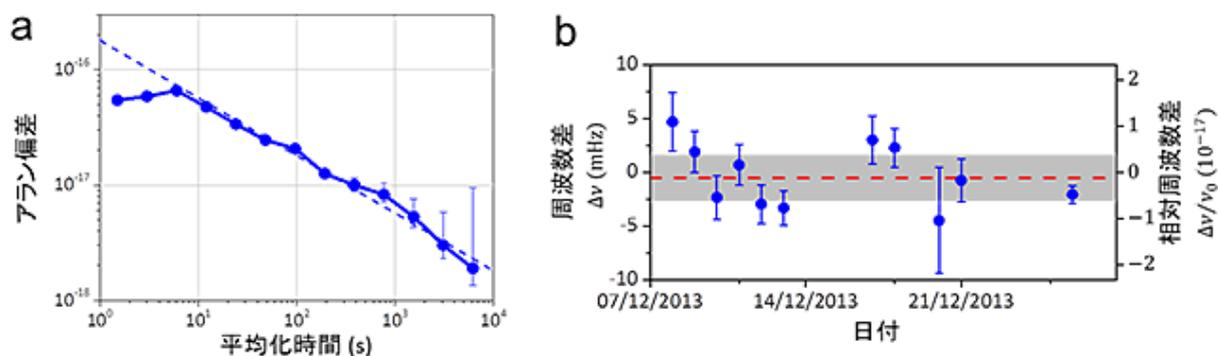


図 1-2 2 台の時計の周波数差の測定

## 1.5.2 異種原子光格子時計の開発

### (1) 秒の定義の実現精度を超える水銀光格子時計の実証<sup>6</sup>

これまで光格子時計に用いられてきた Sr や Yb 原子に比べて、黒体輻射の影響を受けにくい Hg 原子を用いた光格子時計を新たに開発した。

<sup>6</sup> JST プレスリリース(共同発表)「水銀・ストロンチウム光格子時計の高精度直接比較に成功～次世代時間標準に向けて「光格子時計」の優位性を示す～」(2015 年 5 月 27 日)  
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20150527/index.html>

Hg 光格子時計の実現には原子のレーザー冷却、時計遷移のプローブ、魔法波長の光格子用の複数の高安定な紫外レーザー光を必要とし技術的に難しいことから、これまで「秒」の定義の精度を超える Hg 光格子時計は実現されていなかった。ここでは、紫外レーザーの長期安定動作技術を確立し、高精度の Hg 光格子時計を実現した。

高精度の Hg 光格子時計の評価では、同等以上の精度を持つ時計との比較が必要であるため、本プロジェクトで開発した世界最高精度の低温動作 Sr 光格子時計とエルビウムファイバの光周波数コムを用い評価した。その結果、これまで実現された Hg 光格子時計に比べ、約 80 倍の精度である  $8 \times 10^{-17}$  の不確かさの実現に成功し、現在の「秒」の定義の実現精度を超える周波数精度の Hg 光格子時計を世界で初めて実現した (図 1-3)。

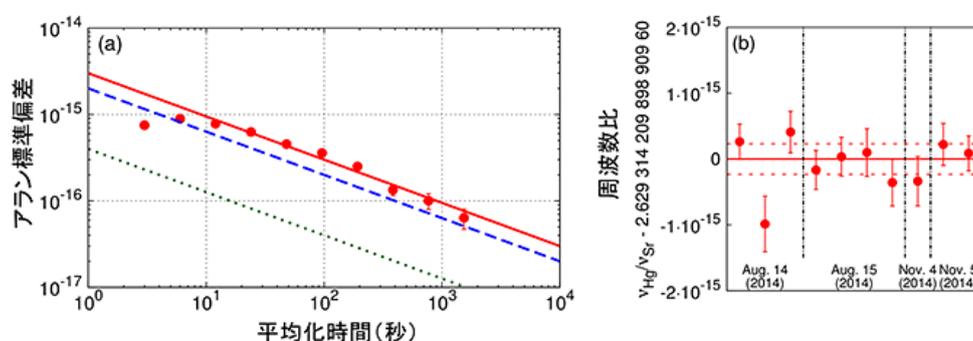


図 1-3 水銀、ストロンチウム光格子時計の周波数比の測定

## (2) 秒の定義の実現精度を超えるイッテルビウム光格子時計の実証<sup>7</sup>

Yb 原子に対しても Sr 同様のクライオ光格子時計を構築した。Yb 光格子時計で周波数シフトを精密に評価することで、現在の秒の定義の実現精度をはるかに上回る  $4.6 \times 10^{-17}$  の不確かさで周波数比を決定し、これまでの異なる原子時計比較の精度の最高記録を更新した。また、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比測定では、光周波数コムを用い Sr 原子用と Yb 原子用の時計遷移プローブレーザーを共有し、2 台同時照射で同相雑音を相殺する同期比較法を適用することで、量子限界  $4 \times 10^{-16}/\sqrt{\tau/s}$  の高安定度を実現した。この安定度は、わずか 150 秒の平均化時間で  $5 \times 10^{-17}$  に達することを可能とし、単一の水銀イオン時計とアルミニウムイオン時計の周波数比の測定との比較では、90 倍の高速化が実現された。(図 1-4)。

<sup>7</sup> JST プレスリリース (共同発表) 「異なる原子の光格子時計を短時間で比較することに成功～周波数比の高速かつ超精密な測定は新しい物理への窓を開く～」 (2016 年 3 月 1 日)  
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20160301/>

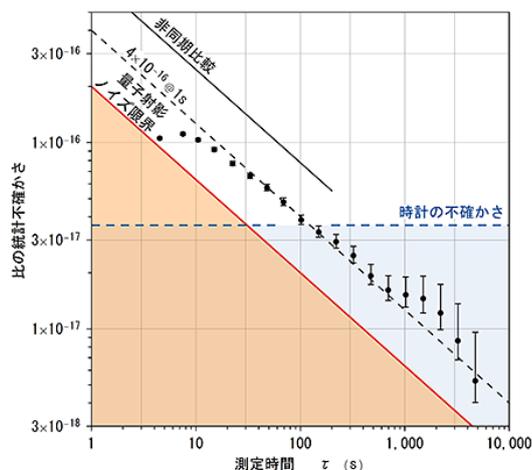


図 1-4 測定時間に対する統計不確かさの改善<sup>8</sup>

### (3) 3 種類の異原子光格子時計周波数比マトリックスの完成<sup>9</sup>

異種原子光格子時計での直接周波数比較は、現行の周波数標準である Cs 周波数標準の精度に制限されず精度測定が可能になるものである。Sr、Hg、Yb 光格子時計の性能向上によって、現在の SI 秒の定義の実現精度を有意に超える 17 桁精度の、異なる原子種間の周波数比マトリックスを世界で初めて完成させた (図 1-5)。これらは、微細構造定数の恒常性の検証にも貢献するものである。

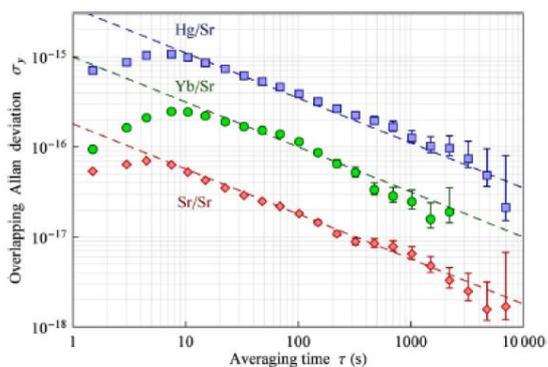


図 1-5 Sr、Hg、Yb 光格子時計の周波数比の測定

<sup>8</sup> 150 秒の平均化時間でイッテルビウム時計の不確かさで決まる限界まで到達。さらに長時間平均化させることにより安定度は改善し、5,000 秒の平均化により不確かさは  $5 \times 10^{-18}$  まで減少。黒い線は、2 台の独立した時計を独立した励起レーザーで励起した場合に推定される安定度を示す。同期比較によって、不確かさが半分になり、4 倍の高速測定が可能となっている。下の赤色の線は、理論上の安定度限界を示す。

<sup>9</sup> Takamoto, M., Ushijima, I., Das, M., Nemitz, N., Ohkubo, T., Yamanaka, K., Ohmae, N., Takano, T., Akatsuka, T., Yamaguchi, A., Katori, H. Frequency ratios of Sr, Yb, and Hg based optical lattice clocks and their applications (2015) *Comptes Rendus Physique*, 16 (5), pp. 489–498.

### 1.5.3 光格子時計の小型化、可搬化技術の開発

#### (1) 超放射レーザーや高安定光格子時計の実現にむけた光ファイバ中の原子の高精度分光

1011

光格子時計の高い安定度を実現するには、時計遷移分光用レーザーのスペクトル幅の狭線化が重要であるが、時計遷移分光用レーザーのスペクトル幅は、大型共振器の熱雑音限界により制限される。これに対し、超放射レーザーは、放射される周波数が原子集団によって決められるため、原理的に熱雑音の影響を受けにくく、熱雑音限界を打破する技術として期待できる。

超放射レーザーでは、超放射現象によって多数個の原子を1つの振動子としてレーザー発振させる。したがって、原子数が多く、コヒーレンス時間の長い原子集団が、単一のモードと相互作用するような系が超放射レーザーに適している。光ファイバ中の冷却原子は、光軸方向にトラップ体積を延伸することにより、原子間衝突によるデコヒーレンスを起こさずに原子数を増やすことが可能であり、光ファイバ中の冷却原子は超放射レーザーの実現に適していると考えられる。また、光ファイバを用いる超放射レーザーは、大型共振器を用いる必要がなく、装置の小型化も期待できる。

また、光格子時計は、対向するレーザー光による1次元の定在波に、魔法波長の半分の間隔で原子を並べる1次元光格子が使われている。自由空間中での1次元格子は、光の回折による広がりのため、光の焦点近辺の領域でしか原子を捕獲できず観測可能な原子数を制限する。一方、ファイバ中に光格子を形成して冷却Sr原子をトラップし、時計遷移の観測に寄与する原子数を増加させることで、時計の高安定・高精度化が期待できる。

このような超放射レーザーや高安定光格子時計の実現に向け、まず、光ファイバへの原子の導入とファイバ中での遷移分光を行い、原子数を保ったまま原子間衝突を抑制する技術の開発を進めた。

コア径の太いファイバを用いることで壁との相互作用、原子間の衝突を抑制、さらに光格子の一区画に原子が複数捕獲される課題に対し、原子を一旦拡散し光格子で再捕獲する手法を考案、捕獲原子数をほぼ1個以下とし原子間相互作用による周波数シフトや広がりを除去することに成功した(図 1-6)。その結果、従来報告の10倍である原子のトラップ寿命350msを達成し、原子の自然幅のスペクトルに迫る線幅7.8kHzの共鳴スペクトルを得た。これは、従来のファイバ中で観測された最も狭いスペクトル線幅をさらに1/1000近く低減した大きな研究成果である。

<sup>10</sup> Okaba, S. et al. Lamb-Dicke spectroscopy of atoms in a hollow-core photonic crystal fibre. Nat. Commun. 5:4096 doi: 10.1038/ncomms5096 (2014).

<sup>11</sup> JST プレスリリース(共同発表)「次世代時間標準として注目の「光格子時計」の小型化へ前進～将来の高精度化と可搬化による応用にも期待～」(2014年6月17日)  
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20140617/index.html>

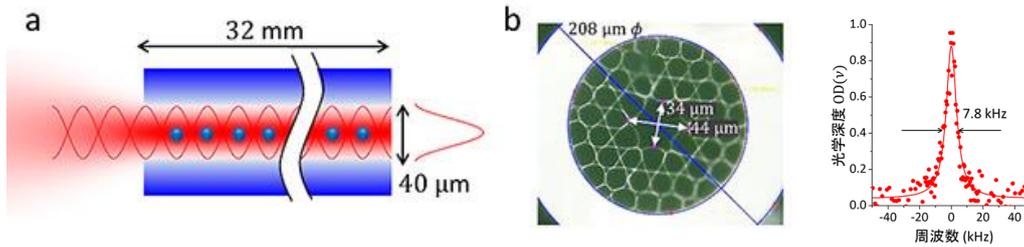


図 1-6 実験装置の概要及び中空コアファイバ中で観測された原子スペクトル

#### 1.5.4 光格子時計の相対論的測地への応用

##### (1) 理研－東大の遠隔(光ファイバ長 30km) 周波数比較による相対論的測地の実証<sup>12</sup>

遠隔地での迅速で高精度の相対論的測地を目的に、東京大学(東大)と理化学研究所(理研)間(30km)の光ファイバリンクシステムを構築した。東大と理研にそれぞれクライオSr光格子時計を光ファイバ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で、17桁台の精度での周波数比較に成功した(図 1-7)。

通常、周波数比較には、光コムを介して行うが、光コムの周波数安定度、連続運転時間が制限となる。ここでは、Sr光格子時計の時計遷移のプロブレーザーのサブハーモニクス光である1397nmの波長を用いることで、光コムを介さずに光リンクを構成した。これにより、東大と理研のSr光格子時計の時計遷移プロブレーザーを共有し、同相雑音を相殺する同期測定を実現させた。

一般相対論によると、重力下では時間の進み方が遅くなり、18桁の遠隔周波数比較では、1cmの重力ポテンシャルの差を測定可能にする。理研と東大の光格子時計の相対周波数差は $1652.9 \times 10^{-18}$ だけ周波数が低く測定され、相対論的測地により2地点の標高差15.16m(誤差6cm)が得られ、時計の誤差の範囲で国土地理院の水準測量による標高差と一致した。さらに、同期測定法により、理研と東大それぞれで独立に時計を運転した場合と比較して、同じ測定精度を得るために必要な平均化時間は約1/100となり、測定時間の大幅な短縮にも成功した。本研究成果は、同時期にヨーロッパ(ドイツ・フランス)で行われた測地精度を1桁凌駕する成果であり、遠隔時計比較によるcmレベルの標高差測定の世界で初めての成功例となった。

<sup>12</sup> JST プレスリリース(共同発表)「超高精度の「光格子時計」で標高差の測定に成功～火山活動の監視など、時計の常識を超える新たな応用に期待～」(2016年8月16日)  
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20160816/>

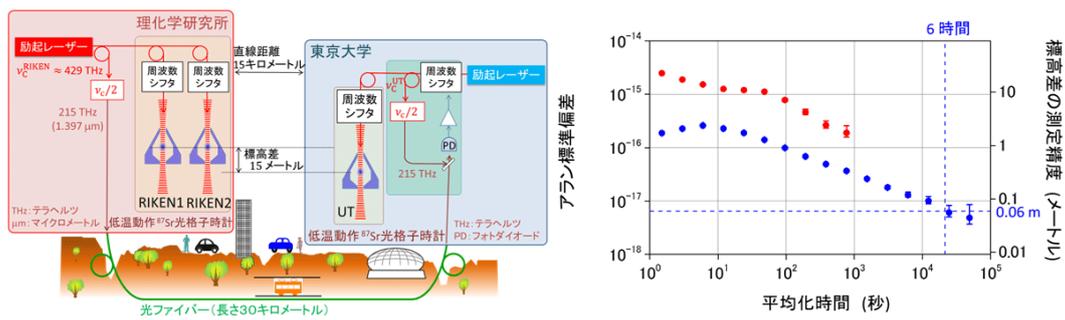


図 1-7 実験装置の概要と平均化時間に対する到達精度(アラン標準偏差)<sup>13</sup>

<sup>13</sup> 同期比較法有り(青点)、無し(赤点)で約 10 倍改善、6 時間の平均時間で 6cm 精度に到達

## 第 2 章 プロジェクトの終了から現在に至る状況

### 2.1 プロジェクトの終了後の状況に関する基礎データ

#### 2.1.1 調査方法

文献調査(プロジェクト報告書、解説、原著論文など)、インターネットによる調査、各種データベースによる業績(論文・特許・受賞他)調査からなる基礎データ調査を行った。これに基づき、本プロジェクト研究期間中の成果、研究終了後から本調査時点までの発展状況、波及効果についてまとめた。

##### (1) 基礎データ調査の方法

基礎データ調査については、研究総括、プロジェクトリーダーを主な対象として、プロジェクトの研究成果に関連した、プロジェクト研究終了後の発展状況について、競争的研究資金の獲得状況、論文、特許、受賞などの調査を行った。各項目について利用したデータベースと調査範囲を示す。

##### ① 競争的研究資金の獲得状況

研究総括、プロジェクトリーダーを対象として、本プロジェクトの研究内容に関連している研究課題について、研究代表を務め、獲得資金の総額が1千万円以上のものを調査した。

調査は、調査対象者の所属する研究室の Web サイトおよび KAKEN 科学研究費助成事業データベースなどの競争的研究資金に関する検索サイト、Web 検索サイトを利用した。

##### ② 論文

本プロジェクト研究期間中の論文は、2010年～2017年に発表されたもの、およびプロジェクトの終了報告書に成果論文としてリストアップされている論文とした。成果論文リストの中で *in press*、*submitted* などと表記があり、その後発表されたものについても基本的には期間中の論文とした。以下、これらの論文を「成果論文」とした。

本プロジェクト研究終了後の論文は、2017年4月以降に発表され、かつ研究総括、プロジェクトリーダーが著者になっている論文を収集した(ただし、上記の成果論文は除く)。収集した論文の中で、本プロジェクトとの関連を Abstract、引用関係などで確認し、関連のあるものを関連論文としてリストアップした。以下、これらの論文を「発展論文」とした。

データベースには、主としてエルゼビア社の Scopus を利用した。各論文についての評価の一つである FWCI、およびジャーナルの指標となる CiteScore についても収集した。

##### ③ 特許の出願状況

本プロジェクト研究期間中の特許はプロジェクト終了報告書の成果リスト記載の特許とし、本プロジェクト研究終了後の特許は2017年4月以降に出願された特許とした。特許検索のデータベースとして、主にPatentSquareを利用し、補助的に特許情報プラットフォームとEspacenetを利用した。

#### ④ 受賞

本プロジェクト研究終了後の受賞実績を調査対象者の所属する研究室のWebサイトや、Web検索サイトで調査した。

#### ⑤ベンチャー

Web検索サイトを用いて調査した。

#### ⑥参加研究者の動静

研究総括、プロジェクトリーダーに対し、プロジェクト参加時、終了時、および現在の所属、職位を調査した。

### 2.1.2 競争的研究資金の獲得状況

本プロジェクト研究期間中から現在までの研究総括、プロジェクトリーダーが研究代表を務め、総額が1千万円以上の競争的資金の獲得状況を表2-1に示す。

表 2-1 競争的資金の獲得状況

| 研究期間<br>(年度)  | 研究種目                        | 研究課題                          | 研究代表者                         | 獲得状況 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 金額<br>(百万円) |                     |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|---------------------|
|               |                             |                               |                               | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |             |                     |
| 2010<br>～2016 | ERATO                       | 香取創造時空間                       | 香取 秀俊                         | ●    | ●    | ●    | ●    | ●    | ●    | ●    | ●    | ●    | ●    | ●    | ●    | ●           | 1,637               |
| 2016～<br>2020 | 科研費<br>特別推進研究               | 超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓 | 香取 秀俊<br>(共同研究者：高本将男)         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |             | 588                 |
| 2018～<br>2027 | JST<br>未来社会創造事業(大規模プロジェクト型) | クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築        | 香取 秀俊<br>(プログラムマネージャー補佐：高本将男) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |             | (699) <sup>14</sup> |

調査日 2021年12月21日

<sup>14</sup> 2020年度までの金額

### 2.1.3 論文の発表状況

成果論文および発展論文の全論文の Field-Weighted Outputs in Top Citation Percentiles<sup>15</sup>の論文数を表 2-2 に示す。

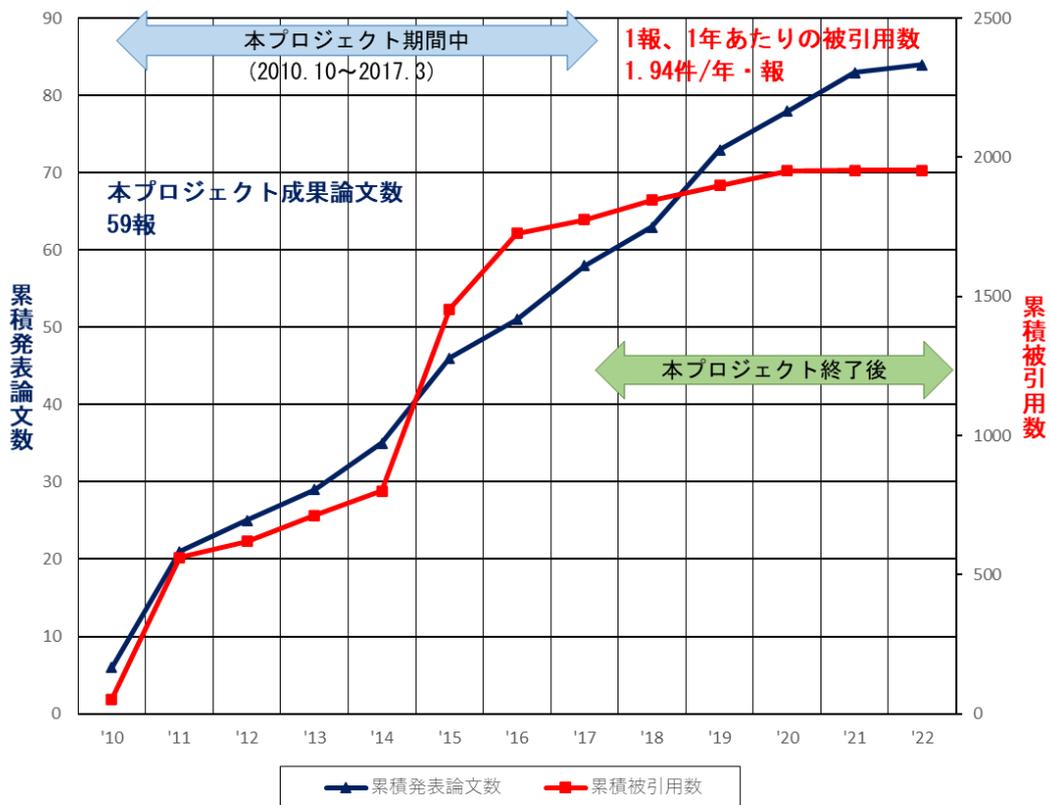
表 2-2 プロジェクトの論文投稿状況<sup>16</sup>

| 成果論文数 | 発展論文数 | FWCI TOP0.01% |      | FWCI TOP0.1% |      | FWCI TOP1% |      | FWCI TOP10% |      | FWCI TOP10%圏外 |      |
|-------|-------|---------------|------|--------------|------|------------|------|-------------|------|---------------|------|
|       |       | 成果論文          | 発展論文 | 成果論文         | 発展論文 | 成果論文       | 発展論文 | 成果論文        | 発展論文 | 成果論文          | 発展論文 |
| 59    | 25    | 0             | 0    | 1            | 0    | 1          | 1    | 13          | 5    | 44            | 15   |

検索日 2022年5月18日

#### (1) 本プロジェクトの成果論文

成果論文数とその被引用数の推移を図 2-1 に示す。



<sup>15</sup> Field-Weighted Citation Impact (FWCI)は該当論文の被引用数を、同じ分野・出版年・文献タイプの文献の世界平均で割ったもの。FWCIが1より大きいとは、該当論文が世界の平均より多く引用されていることを意味し、例えば1.48は、平均より48%多く引用されていることを意味する。Field-Weighted Outputs in Top Citation Percentilesは、FWCIがトップX%の文献。0.01%は、0.01%以内に含まれる論文の数を示し、0.1%は、0.01%より大きく、0.1%以内のものを示す。

<sup>16</sup> 発展論文のうちFWCIが未定のもの4件。

図 2-1 成果論文の論文数と被引用数の推移  
(2022年5月18日時点)

(2) 本プロジェクト終了後の発展論文

発展論文の論文数と被引用数の推移を図 2-2 に示す。

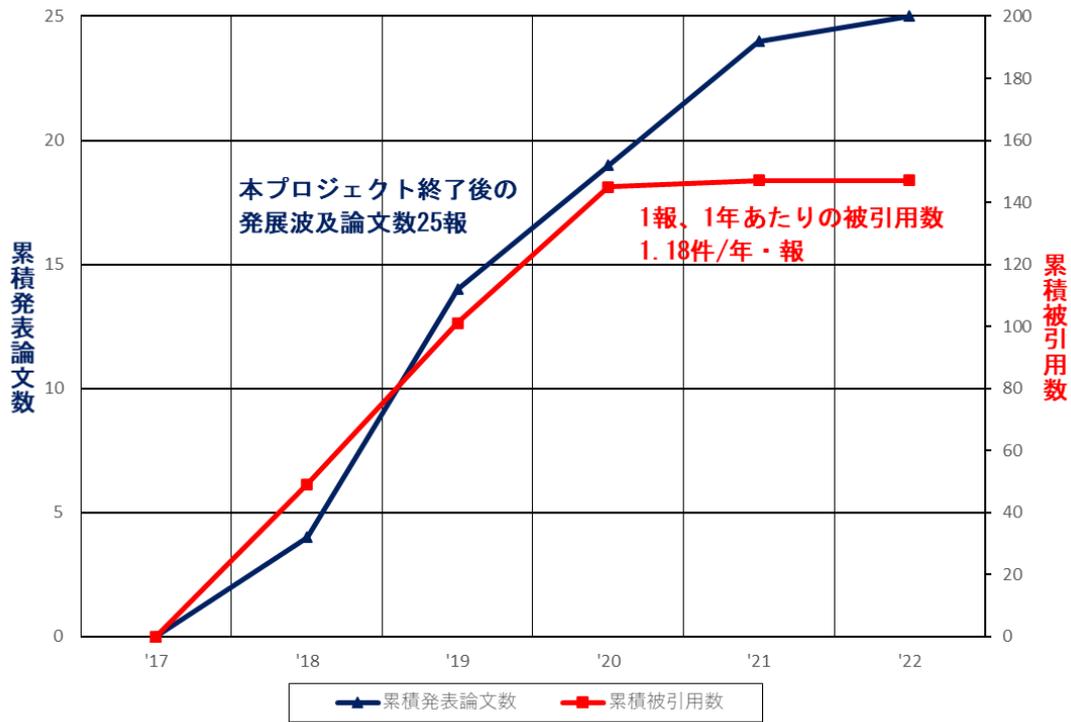


図 2-2 発展論文の論文数と被引用数の推移  
(2022年5月18日時点)

2.1.4 特許の出願状況

特許の出願状況を表 2-3 に示す(公開特許のみ)。

表 2-3 プロジェクトの特許出願状況一覧

|           | 出願件数            |    | 登録件数            |    |
|-----------|-----------------|----|-----------------|----|
|           | 国内              | 海外 | 国内              | 海外 |
| プロジェクト期間中 | 7 <sup>17</sup> | 6  | 5 <sup>18</sup> | 4  |
| プロジェクト終了後 | 13              | 3  | 2               | 0  |
| 合計        | 20              | 9  | 7               | 4  |

2022年5月18日時点

<sup>17</sup> 実用新案 1 件を含む。

<sup>18</sup> 実用新案 1 件を含む。

## 2.1.5 受賞状況

受賞状況の一覧を表 2-4 に示す。

表 2-4 受賞状況

| No. | 受賞者                         | 賞名   | 授与機関                               | 受賞年  |
|-----|-----------------------------|--|------------------------------------|------|
| 1   | 香取秀俊                        | Distinguished Guest Professorship<br>(2017-2022) | Tubingen University                | 2017 |
| 2   | 香取秀俊                        | 第 14 回江崎玲於奈賞                                     | 茨城県科学技術振興財<br>団、つくばサイエンス・<br>アカデミー | 2017 |
| 3   | 香取秀俊                        | 第 90 回服部報公会「90 周年特別賞」                            | 服部報公会                              | 2020 |
| 4   | 高本将男、牛島<br>一朗、大前宣<br>昭、香取秀俊 | 理研栄峰賞  | 理化学研究所                             | 2020 |
| 5   | 香取秀俊                        | Micius Quantum Prize                             | Micius Quantum<br>Foundation       | 2020 |
| 6   | 香取秀俊                        | 2022 BREAKTHROUGH PRIZE                          | Breakthrough<br>Initiatives        | 2021 |
| 7   | 高本将男                        | 第 3 回晝馬輝夫 光科学賞                                   | 光科学技術研究振興財<br>団                    | 2021 |

研究総括の香取は、プロジェクト終了後「21 世紀のノーベル賞」とも呼ばれる BREAKTHROUGH PRIZE を含む、多数の著名な賞を受賞している。

## 2.1.6 ベンチャー企業の設立状況

なし。

## 2.2 プロジェクト終了後の発展状況

香取は、2016年度から科研費特別推進研究の競争的資金を獲得し、研究課題「超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓」の研究代表者として研究を実施した。また、2018年度からは、JST 未来社会創造事業(大規模プロジェクト型)における研究課題「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」のプログラムマネージャーとして研究を開始し、現在も推進中である。これらのプロジェクトで現在までに得られている主な成果の概要を以下に示す。

### 2.2.1 19桁精度の光格子時計実現に向けた研究開発

#### (1) 19桁精度の時計の実現に向けたストロンチウム光格子時計の実効的魔法条件の決定<sup>19</sup>

レーザー光で原子を捕獲すると、レーザー光の電磁場の影響で原子の共鳴周波数が変化(光シフト)する。17桁精度の領域では、光シフトを光強度に比例した変化量と近似した魔法周波数<sup>20</sup>の光格子で光シフトをゼロにすることができる。18桁以上の精度では、原子の電気四重極子/磁気双極子や超分極<sup>21</sup>相互作用によって、光シフトはレーザー強度に対して非線形に応答し、かつ原子の振動量子状態<sup>22</sup>にも依存し精度が劣化する。

本プロジェクトの研究期間において、上記作用の理論検討から19桁超の精度での動作を可能にする「実効的魔法条件」の概念を提案していたが微小効果であるため、これまで整合の取れた測定結果は得られていなかった。

本研究では、光共振器によって光格子のレーザー光強度を従来の約20倍に増幅し、超分極による非線形な光シフトの高精度計測を成功させ、さらに光格子中の原子の振動量子状態を操作することで、電気四重極子/磁気双極子効果による光シフトの高精度計測に成功した(図 2-3)。これらの結果から、光シフトの影響を最小とする Sr 光格子時計の実効的魔法条件が、トラップの深さが光子反跳エネルギーの72倍となる光格子レーザーの強度、電気双極子相互作用のみを考慮した魔法波長に対して5.3MHz 高い周波数であることを実験的に見いだした(図 2-4)。本実効的魔法波長は、波長微調整と30%程度の不確かさの光強度調整で実現でき、実用に際しても容易に設定可能であるため、19桁精度(およそ3000億年で1秒のずれ)の光格子時計実現に向けた重要な研究成果となった。

<sup>19</sup> JST プレスリリース(共同発表)「ストロンチウム光格子時計の実効的魔法条件の決定～19桁精度の時計の実現に向けて～」(2019年1月18日)

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190118-3/index.html>

<sup>20</sup> H. Katori, V. D. Ovsiannikov, S. I. Marmo, and V. G. Palchikov, (2015) "Strategies for reducing the light shift in atomic clocks" Phys. Rev. A 91, 052503.

<sup>21</sup> 電場によって誘起される原子の電気双極子の応答の度合いを分極率という。電場に線形な応答が(通常の)電気分極率である。電場の3乗に比例する電気分極率を超分極率という。超分極による光シフトは、光の電場の大きさの4乗に比例する。

<sup>22</sup> 光格子トラップの中において有限温度で運動(振動)する原子のエネルギーの大きさは、振動量子数で表される離散的な値をとる。このような離散的なエネルギーで振動する原子の状態を振動量子状態という。

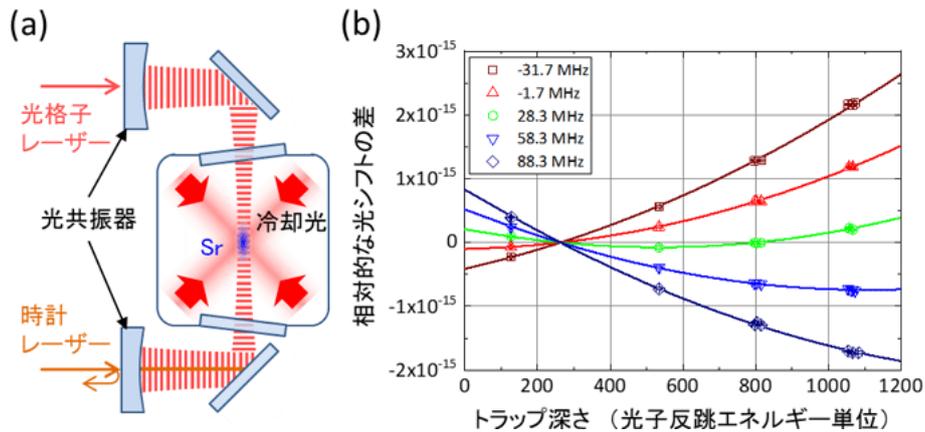


図 2-3 (a)高次の光シフト測定のために開発した Sr 光格子時計の概略図。光共振器により光格子のレーザー光強度を従来の約 20 倍に増幅した。(b)光シフトの光強度と周波数依存性<sup>23</sup>

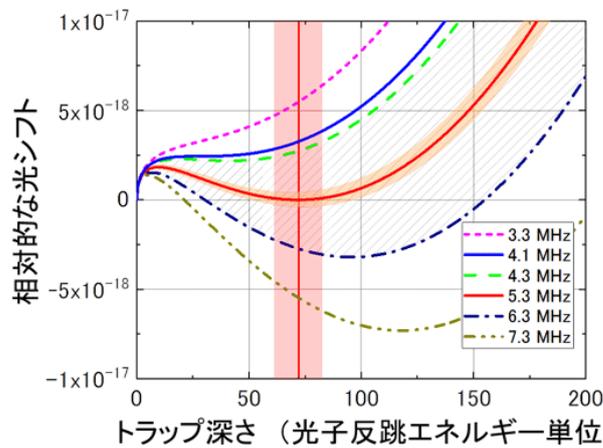


図 2-4 高次の効果を含めた光格子の光シフトと実効的魔法条件<sup>24</sup>

## (2) 光格子時計の 19 桁精度の実現に最適な原子種の探索<sup>25</sup>

光格子時計では、レーザーの偏光依存性を低減するために、電子の軌道角運動量がゼロ ( $J=0$ ) となる 2 状態  $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$  をクロック遷移に使う。この結果、アルカリ土類金属原子など、最外殻軌道まで全て電子で満たされた原子が候補になる。

<sup>23</sup> 凡例中の数字は、光格子レーザーと原子の電気双極子 (E1) 相互作用のみを考慮した E1 魔法周波数との周波数差を表す。横軸のトラップの深さは光強度に比例する量である。光子反跳エネルギーの 263 倍となるトラップ深さでの光シフトとの差から光シフトを評価した。超分極の効果による光シフトの非線形な光強度依存性が観測された。光シフトは、Sr 原子の共鳴周波数 (429 THz) で規格化することにより、相対的な光シフト (縦軸) として示されている。

<sup>24</sup> 得られた超分極率と電気四重極子/磁気双極子の分極率を用いて計算された Sr 原子の光格子光シフト。赤曲線で示された実効的魔法条件は、光格子レーザーの E1 魔法周波数からの離調 5.3 MHz、および光子反跳エネルギーの 72 倍のトラップ深さを持つ光強度の光格子で実現される。このとき、相対的な光シフトを 19 桁のレベルに低減できる (赤縦線と赤曲線が交わった点)。実効的魔法条件では、光格子の光シフトがトラップ深さに鈍感になるため、トラップ深さが 30% 変化しても 19 桁精度の動作が保証される (赤陰影部)。

<sup>25</sup> 科学研究費助成事業「超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓」研究成果報告書、<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-16H06284/16H06284seika.pdf>

表 2-5 の原子候補の中で、 $^{25}\text{Mg}$  は、複雑なレーザー冷却の構成が必要で、 $^{43}\text{Ca}$  は、自然存在比が 0.14% しかないため候補として除外され、残る有力候補は、 $^{87}\text{Sr}$ 、 $^{111}\text{Cd}$ 、 $^{171}\text{Yb}$ 、 $^{199}\text{Hg}$  となる。重い電子ほどスピン軌道相互作用が大きく 2 段階冷却に用いる  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$  遷移のスピン禁制が弱くなる結果、レーザー冷却温度が上昇する。一方、軽い原子では遷移の禁制が強すぎて効率的な冷却が難しくなる。Sr は、この中間に位置する。

可視域から近赤外スペクトルを持つ原子では、その波長域での分極率が大きいため、室温の黒体輻射（中心波長は約  $10\ \mu\text{m}$ ）による光シフト（黒体輻射シフト）が大きい。一方、紫外域にスペクトルを持つ原子を使えば、赤外域の分極率を小さくできるため、黒体輻射シフトが低減する。この結果、Mg、Cd、Hg を使えば、Yb や Sr に対して黒体シフトが 1 桁低減する。しかし、19 桁の精度を狙う場合は、光シフトの超分極効果と多重極効果の高次項の寄与が支配的になる。分極率が小さく黒体輻射シフトで有利な原子では、魔法波長での分極率  $\alpha^{\text{E1}}(\omega_m)$  も小さいものの、一般的に原子温度が高く、原子の捕獲に強い光電場  $|E(\omega, r)|^2$  が必要になる。この結果、 $|E(\omega, r)|^4$  に比例する超分極効果が顕著になる。この電場強度を低減するには、効果的な冷却が可能な原子種が有利になる。これらのトレードオフから、可視光を使って極低温まで冷やせる Sr 原子が現時点での最適原子種となる。

さらに、可視から近赤外のスペクトルを持つ Sr は、信頼性の高い半導体レーザーと光ファイバなどの光学部品を利用可能なため、ラボ外運用可能で高精度な可搬型光格子時計の開発に向けては合理的な第一選択肢となる。

表 2-5 光格子時計が適用可能な原子種と各種物性

| 原子  | $^{25}\text{Mg}$ | $^{43}\text{Ca}$ | $^{87}\text{Sr}$ | $^{111}\text{Cd}$ | $^{171}\text{Yb}$ | $^{199}\text{Hg}$ |
|---|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 核スピン  | 5/2              | 7/2              | 9/2              | 1/2               | 1/2               | 1/2               |
| 魔法波長 (nm)   | 468              | 735              | 813              | 420               | 759               | 361               |
| クロック波長 (nm)                                       | 458              | 660              | 698              | 332               | 578               | 266               |
| 1 次冷却波長 (nm)                                      | 285              | 423              | 461              | 229               | 399               | 185               |
| 2 次冷却波長 (nm)                                      | 457              | 657              | 689              | 326               | 556               | 254               |
| 冷却温度* ( $\mu\text{K}$ )                           | 1.8              | 0.5              | 0.2              | 1.6               | 4.4               | 31                |
| 黒体輻射シフト** ( $10^{-16}$ )                          | -3.9             | -26              | -55              | -2.8              | -26               | -1.6              |
| 超分極率 ( $\mu\text{Hz}/(\text{kW}/\text{cm}^2)^2$ ) | ---              | 500              | -200             | -5                | -300              | -2                |

(\* ) 光子反跳温度  $E_R/k_B$  または第 2 段階冷却のドップラー温度  $\hbar\gamma/(2k_B)$  で算出。(\*\*) 300K での黒体シフトのクロック周波数に対する相対値。

## 2.2.2 光格子時計の小型化、可搬化技術の開発

### (1) 18桁精度の可搬型光格子時計の開発<sup>26</sup>

株式会社島津製作所と共同で、実験室の大型光学定盤上のレーザー光源等光学系や時計分光用真空槽の磁気遮蔽シールド、冷却装置、制御系を含めた実装を小型化・可搬化し容積800Lの装置を開発した。また、長時間安定動作のため合計17台のレーザー装置の周波数制御の自動化およびインターネット経由での遠隔操作が可能なシステムを構築した。これにより、精度を劣化させることなく実験室外の環境でも18桁の精度を持つ可搬型Sr光格子時計の開発に世界で初めて成功した(図2-5)。

本光格子時計を東京スカイツリーの地上階と展望台の2か所に設置し、約450mの標高差を与えた。2か所の時計は、レーザー分配器で分岐された光ファイバでつなぎ、レーザー冷却、時計遷移のプローブ、魔法波長の光格子用の各々のレーザー周波数を共有できるようにした。

これらの2台の光格子時計の周波数差を測定することで、重力赤方偏移を求めた。また、GNSS(全球測位衛星システム)測量、水準測量、レーザー測距などによる標高差測定と相対重力計による重力測定を組み合わせることで、2台の時計のおかれた地点間の重力ポテンシャル差(単位質量あたりの位置エネルギー差)を求めた。求めた重力赤方偏移と重力ポテンシャル差を比較することで、一般相対性理論の検証実験を行った。

本検証実験では、450mの標高差で原子共鳴スペクトルがおよそ21Hz分ずれていることが観測され、cmレベルの精度で標高差を計測することに成功した(図2-6)。

それぞれの時計の共鳴周波数の差をおよそ1週間の平均化で相対周波数が $\Delta\nu/\nu = (49337.8 \pm 4.3) \times 10^{-18}$ だけ高い(時間が早く進んでいる)ことが計測された。その後、2台の時計を理化学研究所に持ち帰り、同じ高さに設置して測定した結果、相対周波数差は $(-0.3 \pm 4.7) \times 10^{-18}$ となり、光格子時計は18桁の精度で一致していることが検証された。

2台の光格子時計の標高差 $\Delta h$ を、GNSS測量および水準測量とレーザー測距の2つの方法で測定し、相対重力計を使って重力加速度 $g$ を測定した結果、2台の重力ポテンシャル差 $g\Delta h/c^2 = (49337.1 \pm 1.4) \times 10^{-18}$ を得た。

一般相対論によれば、重力赤方偏移は、重力ポテンシャル差に等しくなる。光格子時計で得られた重力赤方偏移と、従来の測定手法によって得られた重力ポテンシャル差を比較することで、この予言を $(1.4 \pm 9.1) \times 10^{-5}$ の精度で検証したことになる。これは、およそ1万kmの高低差を利用するロケット/人工衛星を使った相対論検証実験に迫る精度となる。従来よりも1万倍高精度な光格子時計を使うことで、宇宙実験に比べて1万倍以上少ない高低差で、同等の実験が可能になったことを意味する。

<sup>26</sup> JST プレスリリース(共同発表)「18桁精度の可搬型光格子時計の開発に世界で初めて成功～東京スカイツリーで一般相対性理論を検証～」(2020年4月7日)  
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200407/>

今後、光格子時計の実用化に向けて、さらなる時計の小型化、可搬化が加速され、新たな測地技術への応用が期待される。



図 2-5 開発した 2 台の可搬型光格子時計

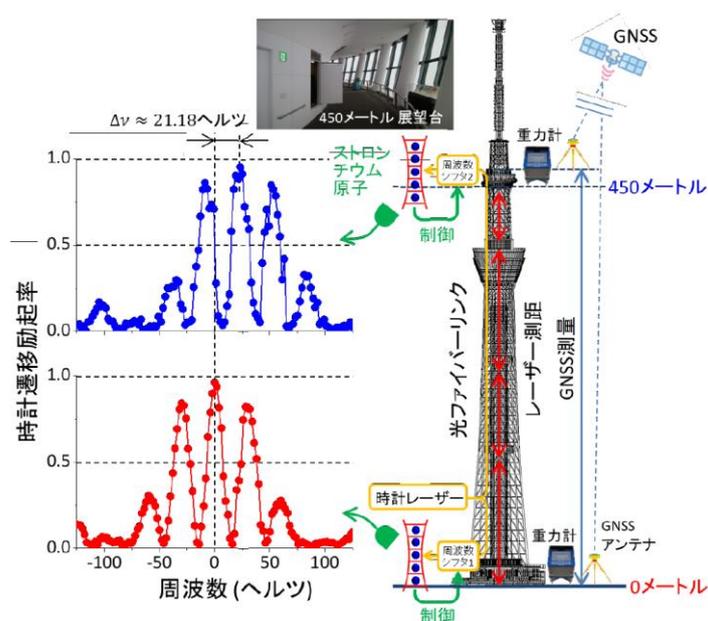


図 2-6 東京スカイツリーでの一般相対論検証実験の概要

## (2) カドミウム光格子時計の魔法波長の決定<sup>27</sup>

Sr 原子や Yb 原子の光格子時計では、黒体輻射光による時計遷移周波数のシフト(黒体輻射シフト)を抑えるために、冷凍機を使った低温環境を用意し、18 桁の精度を達成した。これに対して、Cd 原子は、黒体輻射シフトが極めて小さいため、室温のシンプルで小型な装置で同レベルの精度が期待される。しかし、Cd 光格子時計は、開発の難しい深紫外波長のレーザー光源を多数用意する必要があるため、今までほとんど研究が行われていなかった。

<sup>27</sup> 理化学研究所研究成果(プレスリリース)「カドミウム光格子時計の魔法波長を決定—室温で 18 桁の精度を持つ小型・可搬型光格子時計の実現に道筋—」(2019 年 9 月 14 日)  
[https://www.riken.jp/press/2019/20190914\\_1/](https://www.riken.jp/press/2019/20190914_1/)

本研究では深紫外波長のレーザー冷却光源を開発し、Cd 原子の熱運動を、温度換算で  $6\mu\text{K}$  まで抑え、Cd 光格子時計の魔法波長を導出した(図 2-7)。その結果、理論計算とも矛盾せず、魔法波長は  $419.88\pm 0.14\text{nm}$  であることを世界で初めて実験的に見いだすことができた。実験結果に基づいて、Cd 光格子時計の黒体輻射シフトを理論計算した結果、Sr、Yb 原子に比べ黒体輻射シフトが 1 桁小さいことが分かった。これは、室温付近で温度が 0.1 度揺らいでも、精度が 19 桁目でしか変化しないことを意味し、室温で 18 桁の精度を持つ小型・可搬型光格子時計の実現につながる重要な成果となった。

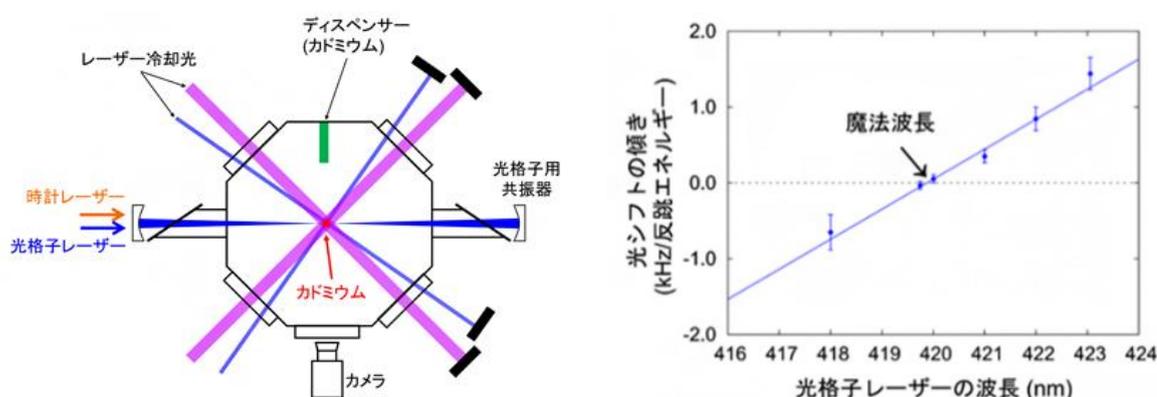


図 2-7 Cd 光格子時計の魔法波長決定のための実験系概念図と結果 ( $419.88\pm 0.14\text{nm}$  と決定)

### (3) 超放射レーザー実現に向けた中空ファイバ導波路内における超放射現象の挙動の解明<sup>28</sup>

光格子時計の高い安定度を実現するには、時計遷移分光用レーザーのスペクトル幅の狭線化が重要であるが、時計遷移分光用レーザーのスペクトル幅は、大型共振器の熱雑音限界により制限される。

これに対し、超放射は、原子集団内の原子が自発的に位相を揃えて光を放射する現象で、その放射光のピーク強度が原子数の 2 乗に比例し、原子集団の空間分布の長手方向に集中的に光が放射されるものである。放射光の周波数は、原子集団自身が決めているという特徴から、原理的に熱雑音の影響を受けにくく、安定した周波数で十分な強度の光を放射できる超放射レーザーとしての応用が期待できる。

超放射は、光格子時計の光源としての応用以外にも、量子情報分野において、量子メモリ、単一光子源の実現など様々な分野で用いることができるため、その性質を解き明かすことは量子物理の分野において重要な意味を持っている。

<sup>28</sup> 東京大学プレスリリース(共同発表)「中空ファイバ導波路内における超放射現象の挙動を解明—超小型・超放射レーザー実現の基盤技術を確立—」(2019年11月20日)  
[https://fs.hubspotusercontent00.net/hubfs/20511701/press-release/2019/setnws\\_201911201339208908030823\\_100005.pdf](https://fs.hubspotusercontent00.net/hubfs/20511701/press-release/2019/setnws_201911201339208908030823_100005.pdf)

本研究では、中空のコアを持つフォトニック結晶ファイバ導波路中に極低温 Sr 原子を導入し放射光の特性を実験的、理論的に解明した。

ここでは、中空ファイバ中に極低温に冷却された Sr 原子を、中空ファイバ中の伝播光で作った光格子に閉じ込め、原子の熱運動や原子とファイバ壁との衝突によって生じる擾乱を抑制した。光格子の定在波は魔法波長の偏光で構成し、原子の遷移周波数シフト、線幅増大を抑制した。この原子に対して、励起光を照射することで励起状態にし、原子が基底状態に戻るときに放射される光のうち、中空ファイバを導波するものだけを測定した。

放射光の特性を測定した結果、放射光の周波数シフトは、原子数密度  $\rho$  の増大によって、負の周波数シフトが生じるが、励起光の離調（励起光の周波数と原子の共鳴周波数との差）にはほとんど影響を受けないことが観測できた。これは、原子集団が放射する光の周波数は励起光ではなく、原子集団自身によって決まっていることを示している（図 2-8 (a)）。

全放射光パワーのうち、中空ファイバを通して検出器に到達した光パワーの割合は、原子数  $N$  が 20 万を超えると、結合効率がほぼ 1 でほぼ全量の放射光が導波されていることが分かった（図 2-8(b)）。シミュレーションで計算した周波数や結合効率は、実験結果と矛盾しない結果が得られており、シミュレーションの妥当性を検証できた。

ここで用いられた手法や研究結果は、非常に狭いスペクトルをもつ超放射レーザーの実現の重要な基盤技術となる。

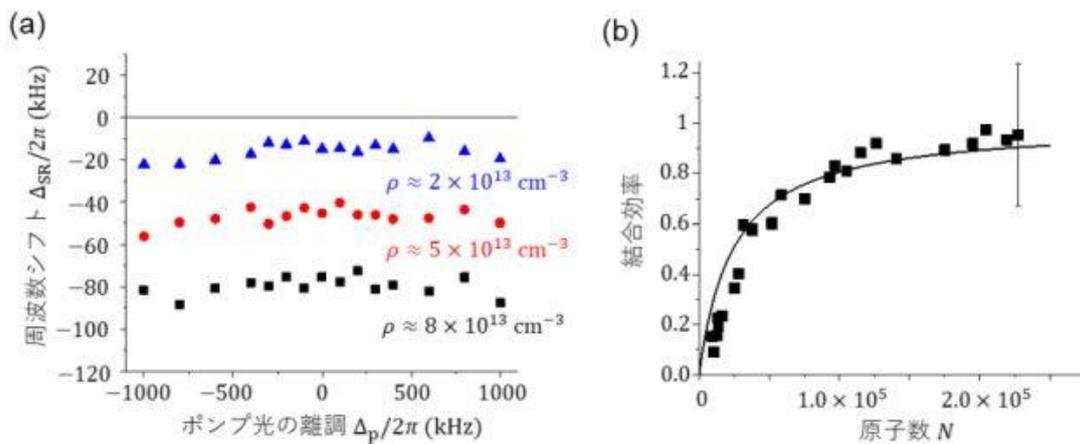


図 2-8 超放射光の特性  
 (a) 超放射光周波数のポンプ光の離調に対する依存性  
 (b) 超放射光の中空ファイバへの結合効率

## 2.2.3 光格子時計の相対論的測地への応用展開

### (1) 超高精度光周波数の長距離ファイバ伝送技術の開発<sup>29</sup>

複数の遠隔地に設置した光格子時計を光ファイバで接続し、その周波数差を遠隔比較する相対論的測地は、光格子時計の大きな特徴である。

これは、従来の原子時計ではできない精度 1cm レベルの水準点や、地震、噴火の前兆現象につながるわずかな地殻変動の日常監視などを可能とする。しかし、光ファイバは、敷設環境からの温度変化、振動での伸縮、屈折率変化による光路長変化でドップラーシフトを引き起こし、受信光周波数を変動させる。1cm レベル精度の測地を達成するためには、原子の共鳴周波数情報を持つレーザー光が光ファイバ伝送後においても 10000 秒以下のデータ積算時間で 18 桁の周波数安定度を持つ必要がある。

本プロジェクトで実施された東大・理研間光ファイバリンクシステムの手法では、伝送距離は 100km までで制限されるため、全国規模の敷設を想定した場合、光ファイバでの伝送可能距離の延伸化が必須となる。

本研究では、日本電信電話株式会社 (NTT)、東日本電信電話株式会社 (NTT 東) と共同で、石英系平面光波回路 (PLC) 技術を用いた光ファイバ雑音補償機能と再生中継機能を備えた光周波数中継装置 (リピーター) を開発し (図 2-9)、本リピータのカスケード接続で超高精度光周波数ファイバ伝送網を構築、 $1 \times 10^{-18}$  の周波数精度を保持したまま 200km 級の伝送が可能であることを世界で初めて実証した。

本実験では、理研に設置している超低膨張ガラス共振器に安定化した波長 698nm (429THz) の超狭線幅レーザー (Sr 光格子時計が提供する時計遷移のプロープによる光周波数基準を想定) を、波長変換デバイスを用い 1397nm (215THz) に通倍することで、光ファイバで伝送が可能な波長帯に変換した。

本リピータの光ファイバ雑音補償機能は、リピータ受信光の一部を一つ前のリピータに送り返し、伝送路で生じた位相雑音を検出、それを抑制する位相補償を送信側リピータのレーザーに施し、受信側リピータに超高精度光周波数のレーザー光を送信することで実現した。本リピータは、リピータレーザーの位相同期用と光ファイバ雑音検出用の干渉計を差動出力検波で検出感度が倍増できる差動検波型マッハツェンダーとし、それらを PLC ワンチップに集積実装した。光路長が精密に設計された干渉回路を PLC チップ内に作り込むことで、従来の空間光学系や光ファイバカプラを用いた光干渉計で問題であった温度等の環境変動にも強く、光干渉計自体に由来する雑音を極限まで低減することができた。

理研から東大へ光ファイバ伝送した 215THz 光周波数基準を東大及び局舎 A のリピータにより中継して NTT 厚木に送り、NTT 厚木からはもう 1 本のファイバを使って、局舎 B のリピータで中継して、東大まで戻す本郷-厚木-本郷の 240km ループ網を構築した (図 2-10)。

<sup>29</sup> NTT プレスリリース「超高精度光周波数の 240km ファイバ伝送に成功～平面光回路 (PLC) を用いた光中継装置カスケード伝送～」(2020 年 3 月 18 日)  
<https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/03/18/200318a.html>

東大から送った光周波数と、ループ網により戻ってきた光周波数の差を検出することで、光ファイバリンク伝送の周波数安定度を評価した。その結果、周波数安定度は、2600 秒のデータ積算時間で  $1 \times 10^{-18}$  が確認できた(図 2-11)。

現在、光格子時計の全国規模の光ファイバネットワーク化を想定し、より多中継で安定な運用が可能なリピータの開発を進め、1000km 級まで拡張した実証実験環境の構築も予定している。

図5: 平面光波回路(PLC)技術によりワンチップ化した光中継装置用の集積型干渉計

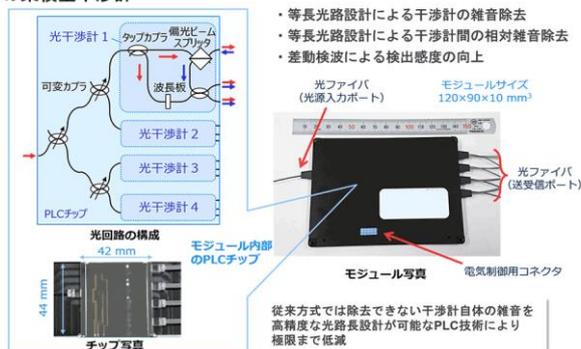


図 2-9 PLC 技術によりワンチップ化した光中継器用の集積型干渉計

図2: 和光一本郷一厚木超高精度光周波数配信ファイバリンク

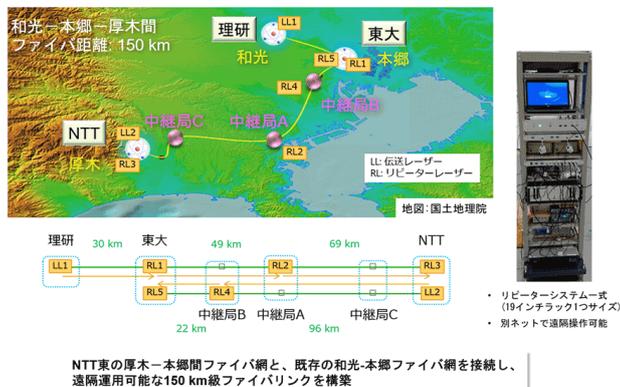


図 2-10 和光-本郷-厚木超高精度光周波数配信ファイバリンク

図3: 本郷-厚木-本郷ループ測定による周波数伝送安定度の評価

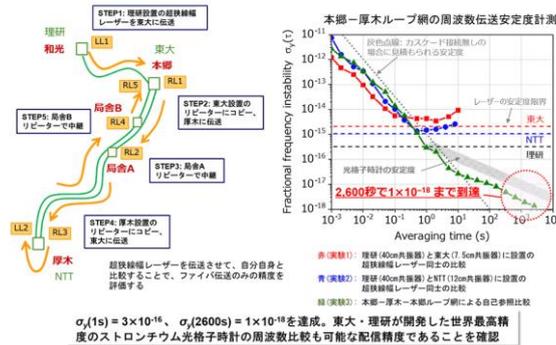


図 2-11 和光-厚木-本郷ループ測定による周波数伝送安定度の評価

## 2.2.4 次世代時間標準化に向けた要素技術の開発

### (1) イッテルビウム光格子時計の長期高稼働率運転システムの開発<sup>30</sup>

2018年にCCTF(Consultative Committee for Time and Frequency)WGSP(時間周波数諮問委員会戦略企画作業部会)にて、秒の再定義のための必要条件が挙げられた。その中に、国際原子時(TAI)が刻む歩度を、秒の二次表現リストに掲載された光時計の光周波数標準の運用データを取り入れ調整し、定常的に校正できること、それによりTAIに貢献することというのがある<sup>31</sup>。

TAIの校正に貢献するための要件として、CCTFの一次二次周波数標準作業部会の審査において、周波数標準の系統誤差等の提示や、過去の協定世界時(UTC)を校正した実績値等周波数標準の性能など、TAIへのリンク性能に問題ないことが認められる必要がある。

本研究では、2018年度から実施しているJST未来社会創造事業の秒の再定義促進グループで、光格子時計を用いた秒の再定義に向け、研究・開発、国際連携と国際アピールを行っている。その中で、国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)、国立大学法人横浜国立大学と共同で、Yb光格子時計の半年という長期間にわたる高稼働率運転を世界で初めて達成した。

Yb光格子時計は、核スピンの小さいためにエネルギー準位が単純で制御しやすいといった利点があるが、原子減速用(399 nm)、原子冷却用(399 nm、556 nm)、光格子用(759 nm)、時計遷移のプローブ(578 nm)など多種多様なレーザーを高精度で制御する必要がある。従来方法では、わずかな気温や気圧の変化、振動や音響ノイズなどの外的要因により制御が中断し運転時間を短くする要因となっていた。

<sup>30</sup> 産総研プレスリリース「光格子時計の半年間にわたる高稼働率運転を世界で初めて達成—世界で最も安定な運用が可能な光格子時計周波数標準器を開発—」(2020年11月3日)

[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2020/pr20201103/pr20201103.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/pr20201103/pr20201103.html)

<sup>31</sup> 洪 鋒雷、安田 正美、「時間の単位「秒」についての基礎解説と最新動向」、産業技術総合研究所 計量標準総合センターウェブサイト

[https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/SI\\_9th/pdf/3\\_SI\\_%E7%A7%92.pdf](https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/SI_9th/pdf/3_SI_%E7%A7%92.pdf)

本研究では、各レーザーの周波数オートリロック機能を開発した(図 2-12)。この機能は、各レーザーの周波数ロックが何らかの理由で中断しても、その異常を瞬時に検知して自動で元の周波数に戻すというものであり、無人で長期安定運転が可能になるものである。

これにより、2019年10月～2020年3月までの半年間(185日間)の稼働率は80.3%に達した。1か月では、稼働率90%を超える高稼働率運転を実現している月もあり、時間周波数国家標準の周波数揺らぎをリアルタイムで観測できた(図 2-13)。185日間はこれまでの記録の大幅な更新となる。また、高稼働率運転の実現により、衛星リンクを介して行われる遠距離比較精度も大きく改善され、16桁の精度でTAIの監視を実現できた。

これまで困難であった光格子時計の無人運転を実現したことで、現在、国際原子時の運用に大きく貢献しているセシウム原子泉方式一次周波数標準器などと同様に、光格子時計が高い稼働率を継続して国際原子時へ寄与できることを示した。

CCTF 傘下の一次二次周波数標準作業部会にて、絶対周波数測定、高稼働率データ等の一連の実績が認められ、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して認定された<sup>32</sup>。また、このYb 光格子時計は、既にTAIの校正への貢献を開始している<sup>33</sup>。

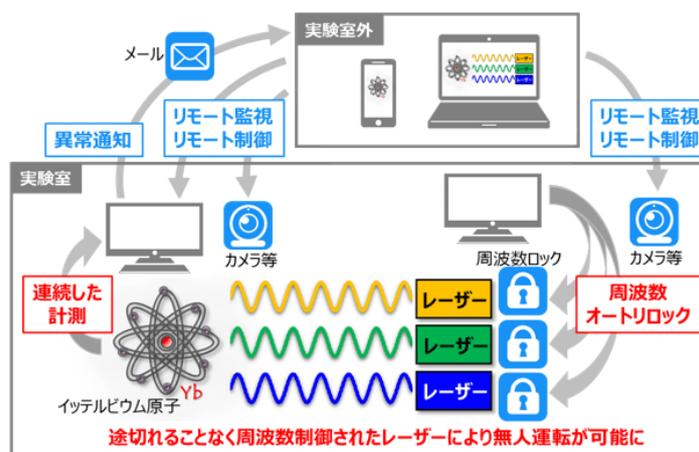


図 2-12 イッテルビウム光格子時計の周波数オートリロック機能の概念図

<sup>32</sup> JST 未来社会創造事業(大規模プロジェクト型)「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」2020年度年次報告書

[https://www.jst.go.jp/mirai/jp/uploads/annual2020/JPMJMI18A1\\_2020.pdf](https://www.jst.go.jp/mirai/jp/uploads/annual2020/JPMJMI18A1_2020.pdf)

<sup>33</sup> BIPM ウェブサイト

<https://www.bipm.org/en/-/2021-12-21-record-tai>

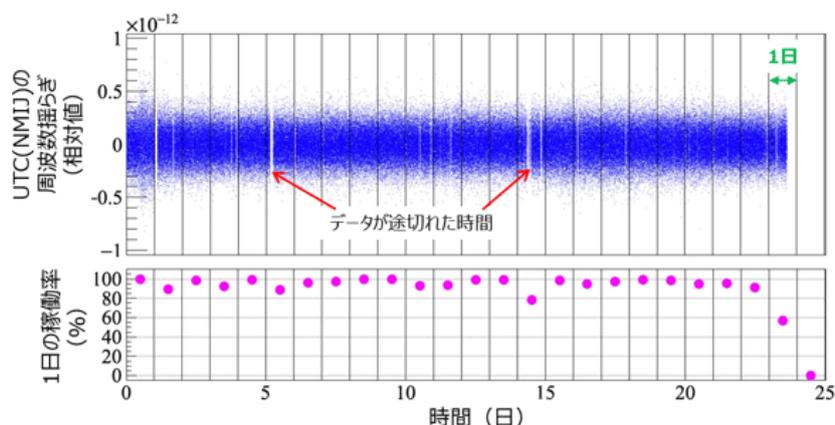


図 2-13 イッテルビウム光格子時計の高稼働率運転データの一例 (25 日間の測定)

## (2) Hg と Yb の光格子時計の周波数比の直接測定と Hg/Yb/Sr ループの完成<sup>34</sup>

香取の新たな光標準の光格子時計の手法が優位性をもつ時間標準となりうることを実験的に明らかにしたことで、2006 年に、国際度量衡委員会 (CIPM) の秒の再定義候補である秒の二次表現リストに  $^{87}\text{Sr}$  の時計遷移周波数が採択となった。また、同時期に、マイクロ波時計の  $^{87}\text{Rb}$  および光時計の  $^{88}\text{Sr}^+$ 、 $^{199}\text{Hg}^+$ 、 $^{171}\text{Yb}^+$  も採択となった。

2018 年には CCTF WGSP にて、秒の再定義のための必要条件が挙げられた。その中の評価手法の一つとして、少なくとも 3 つの異なる光時計が Cs 原子時計よりもおよそ 2 桁小さな不確かさで周波数比閉包(loop closure relation)測定などで示されることというのがある<sup>35</sup>。

本研究では、 $^{199}\text{Hg}$  と  $^{171}\text{Yb}$  の光格子時計の周波数比を世界で初めて直接測定し、 $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Yb}}=2.177\,473\,194\,134\,565\,07(19)$ 、その不確かさは  $8.8 \times 10^{-17}$  であることを明らかにした。この比は、本プロジェクトで得られた  $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$  と  $\nu_{\text{Yb}}/\nu_{\text{Sr}}$  からの予想とよく一致しており、完成したループは、 $(\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Yb}})(\nu_{\text{Yb}}/\nu_{\text{Sr}})(\nu_{\text{Sr}}/\nu_{\text{Hg}})-1=0.4(1.3) \times 10^{-16}$  となった。これは SI 秒の実現精度を上回る”Loop closure relation”の初めての適用となった。

本成果は、秒の再定義に向けた重要なステップになるものと考えられる。

<sup>34</sup> 科学研究費助成事業「超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓」研究成果報告書、<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-16H06284/16H06284seika.pdf>

<sup>35</sup> 洪 鋒雷、安田 正美、「時間の単位「秒」についての基礎解説と最新動向」、産業技術総合研究所 計量標準総合センターウェブサイト

[https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/SI\\_9th/pdf/3\\_SI\\_%E7%A7%92.pdf](https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/SI_9th/pdf/3_SI_%E7%A7%92.pdf)

### 2.3 プロジェクト参加研究員の活動状況

研究総括の香取秀俊は、現在、複数の機関の役職を兼務している。一つは、東京大学であり、2010年に大学院 工学系研究科 物理工学専攻 教授に就任し、現在に至る。他の機関としては、理化学研究所であり、2011年に香取量子計測研究室 主任研究員、2014年には、光量子工学研究センター時空間エンジニアリング研究チームのチームリーダーに就任し、現在に至る。さらに、2014年には、チュービンゲン大学（ドイツ）Distinguished Guest Professorとして招聘され、現在に至る。

その間、2010～2016年度まで本プロジェクトの研究総括として、光格子時計の研究を行った。2016～2020年度には、科研費特別推進研究「超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓」において、研究代表者として本プロジェクトの成果をさらに発展させた。2018～2027年度には、JST 未来社会創造事業(大規模プロジェクト型)「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」において、プログラマナーとして、本プロジェクトの成果をさらに発展させている。

光格子時計実験グループのリーダーを務めた高本将男は、本プロジェクト終了後も理化学研究所の専任研究員として、光格子時計の研究を継続している。2016～2020年度には、科研費特別推進研究「超高精度光格子時計による新たな工学・基礎物理学的応用の開拓」の共同分担者として、研究代表者である香取とともに、本プロジェクトの成果をさらに発展させた。2018～2027年度には、JST 未来社会創造事業(大規模プロジェクト型)「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」において、プログラマナー補佐として、プログラマナーである香取とともに、本プロジェクトの成果をさらに発展させている。

先端レーザー開発グループのリーダーを務めた大前宣昭は、本プロジェクト終了後、2017年に理化学研究所、2020年に福岡大学に異動し、同大学理学部で研究を継続している。2018～2020年度には、科研費挑戦的研究(萌芽)「レーザー冷却分子干渉計を用いた反物質消失機構解明の新しい研究手法の開拓」の研究分担者として、レーザーに関する本プロジェクトの成果をさらに発展させた。2018～2027年度には、JST 未来社会創造事業(大規模プロジェクト型)の「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」において、共同研究者として、プログラマナーである香取とともに、本プロジェクトの成果をさらに発展させている。

物理応用グループのリーダーを務めた高野哲至は、本プロジェクト終了後、2017年に日亜化学工業株式会社に転身した。こののち2022年4月には、京都大学理学系研究科の特定准教授に着任した。

## 第 3 章 プロジェクト成果の波及と展望

### 3.1 科学技術への波及と展望

#### 3.1.1 光格子時計開発の潮流の創成

時を掌握することは、国家の命運を握る重要な技術である。フランスは、セシウム原子泉を開発して以来、SI 秒の実現ではトップを走り、それにアメリカとドイツが比肩する。1978 年、アメリカは原子時計を搭載した GPS 衛星の打ち上げを開始し、1983 年に GPS を民生利用に開放した。多くの携帯電話、スマートフォンや自動車に搭載される GPS ナビで、アメリカのタイムベースの傘下に留まっている。このため、欧州連合、ロシア、中国は自国の GPS 衛星を整備し、日本も GNSS を補完する準天頂衛星「みちびき」を投入した。これらのように、より精度の高い時計の開発は、国家戦略の中核を担う重要な技術として、世界各国がしのぎを削っている。

このような背景の中、現在の秒の定義に重要な役割を果たしている原子時計の研究は、レーザーの発明、レーザー冷却、原子ボーズ凝縮の実現、イオントラップと分光法、光周波数コムの開発と、20 人のノーベル賞受賞者を輩出する、現代物理学のハイライトであり、欧米を中心に進められてきた。

香取は、新しい原子時計のコンセプトとして、2001 年に世界で初めて「光格子時計」を提案し、到達目標として  $1 \times 10^{-18}$  (宇宙年齢 138 億年で 0.4 秒しか狂わない) 精度の実現を掲げ、2003 年に Sr 原子を用いた基礎実験に世界で初めて成功した。このような香取らの研究成果を受け、世界中で光格子時計の研究が活発化し、2006 年には、日米仏の世界 3 極で 14 桁での精度での周波数が合致したことをきっかけに、CIPM において「秒の二次表現」の新しい秒の定義の候補の一つに採択された。その後、光格子時計の開発は、世界で約 20 か国に拡がりを見せ、競争が激化している<sup>36</sup>。

このような状況において、香取は、本プロジェクトにおいて、①Cs 原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ、新しい原理の原子時計「光格子時計」の開発、②物理定数の 1 つである微細構造定数の新たな基礎物理学的知見を得ることが期待できる異種原子光格子時計の開発、③光格子時計の実用化に向けた小型化、可搬化技術の開発、④防災や地下資源探索への活用が期待される光格子時計の相対論的測地の実証等に関する研究を進めた。

その結果、①については、ストロンチウム(Sr)原子光格子時計を開発し、Cs 原子時計の精度を遙かに凌駕する精度を持つ 18 桁精度で 2 台の Sr 原子光格子時計を世界で初めて一

---

<sup>36</sup> JST CREST 研究領域「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」追跡評価用資料(2017 年 3 月)

[https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/evaluation/follow/h28/h28\\_01\\_CD.pdf](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/evaluation/follow/h28/h28_01_CD.pdf)

致させた。②については、水銀(Hg)及びイッテルビウム(Yb)光格子時計を開発し、Sr 光格子時計をリファレンスとした「秒」の定義の実現精度を超える世界最高精度の周波数比較に成功した。さらに、Sr、Hg、Yb 原子 3 種類の光格子時計同士の周波数比マトリックスを世界で初めて完成させた。③については、光格子時計の小型、可搬化と高精度化につながる技術として超放射レーザーの実現にむけた光ファイバ中の原子の分光において、従来の精度を遙かに上回る高精度な分光に成功した。④については、理化学研究所－東京大学間(光ファイバ長 30km)での光格子時計の遠隔周波数を比較し、cm レベルの標高差測定に世界で初めて成功させた。

この現在の秒の基準である Cs 原子時計の精度を凌駕する精度の実現は、秒の再定義の機運を大きく高めた成果である。また、この精度の時計が実現したことで、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、測定可能になることも実証できた。本成果は、光格子時計を、相対論的效果を利用して測地学に活かすという、応用面からも世界に大きなインパクトを与えた。また、異種原子で SI 秒の精度を超える光格子時計の実現は、物理定数の 1 つである微細構造定数の恒常性を検証する上で、基礎科学上の大きな進歩と言える。

本プロジェクト終了後においても、香取は、上記①～④の研究成果をさらに発展させ、加えて⑤光格子時計の次世代時間標準化に向けた要素技術に関する研究開発が進めた。

その結果、①については、世界で未だ実現されていない 19 桁精度の時計の実現に向けた Sr 光格子時計の実効的魔法条件の決定や 19 桁精度の実現に最適な原子種の探索を考察した。②については、世界初となる Hg と Yb の光格子時計の周波数比の直接測定に成功した。③については、18 桁精度の可搬型 Sr 光格子時計の開発や室温動作の可能性のあるカドミウム(Cd)光格子時計の魔法波長の決定に世界で初めて成功した。また、超放射レーザーの実現に向けた中空ファイバ導波路内における超放射現象の挙動の解明を進めた。④については、超高精度光周波数の長距離ファイバ伝送技術を開発し、 $1 \times 10^{-18}$  の周波数精度を保持したまま 200km 級の伝送が可能であることを世界で初めて実証した。⑤については、Yb 光格子時計の長期高稼働率運転システムの半年間にわたる高稼働率運転の開発や 3 つの異なる光時計周波数比閉包測定による SI 秒を上回る精度の Hg/Yb/Sr ループを世界で初めて達成等の、世界に類をみない研究成果を上げた。

このように、本プロジェクト終了後においても、香取は、この分野の最先端を行く研究者として、光格子時計の開発をリードし続けている。その意味で、香取は、2001 年の世界初となる「光格子時計」の提案から現在に至るまで、光格子時計開発の潮流を先取りし、創成してきたと言える。

### 3.1.2 物理学の根源的な問題提起の可能性

18～19桁精度での異種原子の光格子時計の超精密時計比較は、既存の手法では観測できなかった物理現象の探索を可能にする。異種原子の周波数比を測定し、もし周波数比の経時変化が見つければ、物理法則に普遍的に現れ、時間とともに変化しないとされている基礎物理定数のプランク定数  $h$ 、素電荷  $e$ 、微細構造定数  $\alpha$  など現在の物理学の体系を根底から覆す可能性が出てくる。

また、宇宙の質量の大半を占めながら観測されていないダークマター(暗黒物質)は基礎物理定数を変化させる可能性が指摘されており、異種原子時計の周波数比の変化として検証可能である。時計周波数は微細構造定数  $\alpha$  の値と関係しており、光格子時計のネットワークのある時計に、もし  $\alpha$  の値を変動させるほどのダークマターが横切った場合、その時計の時間だけずれることになる。

微細構造定数の値  $\alpha (=e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c)$  は、真空中の荷電粒子の振る舞い ( $\epsilon_0$ ) を含む電磁 ( $e$ ) 相互作用に関して、相対論的な性質 ( $c$ ) と量子論的な性質 ( $\hbar$ ) を結びつけており、時間変動すると、原子の遷移周波数  $\nu_0$  もそれに応じて時間変動する。 $\alpha$  の時間変動に対する遷移周波数変動の感度は、用いる原子の原子番号  $Z$  の 2 乗に比例するため、微細構造定数の時間変動の評価は、異なる原子種を用いた原子時計間の比較により可能となる。

## 3.2 社会経済への波及と展望

### 3.2.1 次世代時間標準への貢献

香取が世界で初めて提案した Sr 光格子時計は、現在の秒の定義である Cs 原子時計に対しその性能を今後上回る候補として、2006年にCIPMにより「秒の2次表現」として採択された。

現在、CIPMは、中性原子を用いた  $^{87}\text{Sr}$ 、 $^{171}\text{Yb}$  および  $^{199}\text{Hg}$  の3種の光格子時計、 $^{88}\text{Sr}^+$  や  $^{171}\text{Yb}^+$  などイオンを用いた原子時計の5種類、計8種類の光による原子時計を従来のCs原子時計を上回る精度を有する「秒の2次表現」として採択している(表3-1)。

本プロジェクトのその後の研究成果の発展により、 $^{199}\text{Hg}$  と  $^{171}\text{Yb}$  の光格子時計の周波数比を世界で初めて直接測定し、 $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Yb}}=2.177\,473\,194\,134\,565\,07(19)$ 、その不確かさは  $8.8\times 10^{-17}$  であることを明らかにした。これにより、完成したループは、 $(\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Yb}})(\nu_{\text{Yb}}/\nu_{\text{Sr}})(\nu_{\text{Sr}}/\nu_{\text{Hg}})-1=0.4(1.3)\times 10^{-16}$  となり、秒の再定義のための必要条件の一つである”Loop closure relation”の初めての適用となった。また、Yb 光格子時計の長期間にわたる高稼働率運転を世界で初めて達成し、CCTF傘下の一次二次周波数標準作業部会にて、Yb 光格子時計が国際原子時計校正に使用できる時計と認定され、TAIの校正に貢献するまでに至った。

これらの研究成果や引き続き進められている研究開発が、2026年のCIPMで予定されている秒の再定義決議で、光格子時計の次世代時間標準につながる可能性が高い。

表 3-1 国際度量衡委員会(CIPM)で採択された「秒の2次表現」リスト(2020年1月時点段階)<sup>37</sup>

| 原子種  | 遷移  | 周波数(Hz)                 | 不確かさ                  | 概要       |
|--|---|-------------------------|-----------------------|----------|
| ルビジウム( <sup>87</sup> Rb)                     | ground-state  | 6 834 682 610.904 312 6 | $6 \times 10^{-16}$   | マイクロ波    |
| ストロンチウムイオン( <sup>88</sup> Sr <sup>+</sup> )  | 5s <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> - 4d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub>   | 444 779 044 095 486.5   | $1.5 \times 10^{-15}$ | 単一イオン光時計 |
| 水銀イオン( <sup>199</sup> Hg <sup>+</sup> )      | 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> - 5d <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup> <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub>           | 1 064 721 609 899 145.3 | $1.9 \times 10^{-15}$ | 単一イオン光時計 |
| イッテルビウムイオン( <sup>171</sup> Yb <sup>+</sup> ) | 6s <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> (F = 0, m <sub>F</sub> = 0) - 5d <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> (F = 2, m <sub>F</sub> = 0) | 688 358 979 309 308.3   | $6 \times 10^{-16}$   | 単一イオン光時計 |
| イッテルビウムイオン( <sup>171</sup> Yb <sup>+</sup> ) | 6s <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> - 4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup> <sup>2</sup> F <sub>7/2</sub>                           | 642 121 496 772 645.0   | $6 \times 10^{-16}$   | 単一イオン光時計 |
| アルミニウムイオン ( <sup>27</sup> Al <sup>+</sup> )  | 3s <sup>2</sup> <sup>1</sup> S <sub>0</sub> - 3s3p <sup>3</sup> P <sub>0</sub>  | 1 121 015 393 207 857.3 | $1.9 \times 10^{-15}$ | 単一イオン光時計 |
| 中性ストロンチウム原子 ( <sup>87</sup> Sr)              | 5s <sup>2</sup> <sup>1</sup> S <sub>0</sub> - 5s5p <sup>3</sup> P <sub>0</sub>  | 429 228 004 229 873.0   | $4 \times 10^{-16}$   | 光格子時計    |
| 中性イッテルビウム原子 ( <sup>171</sup> Yb)             | 6s <sup>2</sup> <sup>1</sup> S <sub>0</sub> - 6s6p <sup>3</sup> P <sub>0</sub>  | 518 295 836 590 863.6   | $5 \times 10^{-16}$   | 光格子時計    |
| 中性水銀原子( <sup>199</sup> Hg)                   | 6s <sup>2</sup> <sup>1</sup> S <sub>0</sub> - 6s6p <sup>3</sup> P <sub>0</sub>  | 1 128 575 290 808 154.4 | $5 \times 10^{-16}$   | 光格子時計    |

### 3.2.2 時刻同期方法の革新

5Gの普及やITサービスの多様化、高品質化に伴い、モバイル分野は元より時刻同期の応用分野は拡大しその要求精度は厳しくなっている。時刻同期を行い、タイムスタンプを基準としたトランザクション処理を行うITシステムが必要とされる業界は、5G網や放送業界の他にも、電力、金融、工場、交通、医療、計測、安全保障分野など幅広くミッションクリティカルな分野が多い。

例えば、5Gネットワークは、上りと下り通信で同じ周波数帯を用いる時分割複信方式が採用されており、基地局間で無線フレームのタイミングを正確に合わせなければ、電波干渉が生じる。放送システムでは、送受信側で映像・音声の位相と時刻を合わせる同期信号によって乱れない映像を編集し視聴できるようにしている。スマートファクトリーでは工作機械・産業ロボットの制御のために、時刻同期を用いリアルタイム性を高めている。電力用通信網では、系統監視・安定化、事故除去など、広域において測定の同時性や電流・電圧の振幅・位相の高い同期精度が必要になる。金融では、株や仮想通貨などAIを駆使した高頻度取引、ブロックチェーンなどの分散型台帳技術で取引成立の証明として、正確な時刻履歴が必要となる。上記の応用は、将来的に自動運転車やIoTデバイスなど、5G、6Gなど無線通信で同期制御を行うものが大量に、広域に渡り社会の隅々に普及した場合、より高精度な時刻同期が求められるようになる。

ITシステムの時刻同期のための時刻情報取得方法は、日本標準時を決定・維持している情報通信研究機構(NICT)等が提供する時刻供給サービスを使う方法とGPS/GNSS(全球測位衛星システム)信号から得る方法がある。前者は、インターネットを介して日本標準時を時刻配信している。一般的に使用されているNTP(Network Time Protocol)方式では、インターネットの遅延の影響により100ms程度まで誤差が生じ、PTP(Precision Time Protocol)方式では、1μs以下程度でネットワーク内に時刻情報を管理・配信するための機能が必要になる。後者は、測位衛星からの信号をGNSS受信機で取得して測位演算を行うことで時刻

<sup>37</sup> Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF)の19, 20, 21回ミーティングレポートに基づき作成

を算出する。一般的な方式で UTC との誤差は $\pm 1 \mu s$  以下程度であり、数千万円と高価で高性能な水素メーザなどを配備した受信機で ns オーダーとなる。また、衛星の信号が非常に弱く散雷や妨害電波に弱い、民間で利用できる衛星は限られ衛星を捕捉できない信号ロストの時間帯が存在する、衛星の信号は暗号化されていないため、なりすまし攻撃や改ざんが容易であることなどの問題がある。

一方、今後、光格子時計の小型化やネットワーク化が進み、GNSS に依存しない光格子時計が世間に普及すれば、上記のような GNSS のリスクも解消され、時刻の精度に関しても、30 年間運転しても ns もズレないため、製品を出荷してから 30 年も同期を取らずに正確な時間を刻む自律した時刻同期が可能である。

現在でもタイムサーバ(時刻情報を取得・配信するサーバ)やタイムマネジメントのサービスは数百億円規模の市場として存在している。今後のさらなる 5G の普及や IT サービスの進展で、このような分野にも、光格子時計のような、より高精度な時刻同期が求められていくことになると予想される。

### 3.2.3 相対論的測地による防災や地下資源探索への応用

従来の水準測量は、2 地点に標尺を置き、その間に水準儀を置き、それぞれの標尺の目盛差を読み、それを繰り返すことで、2 地点間の高低差を求める。このため、測定距離による累積誤差が生じ、数日から数か月にわたる測定時間が必要となる。また、従来の GNSS 測量は、縦方向の精度が十分でないため数 cm 精度の計測に 1 日を要し、電波が届かない海底などは測定が不可能になる。一方、本研究成果の光格子時計は、cm 以下の地点間の高低差やその変動を短時間で検出できる。

重力ポテンシャル<sup>38</sup>の測定では、従来は平均海水面に最も近く、重力等のポテンシャル面であるジオイドを基準とし、測量による高さ測定と重力加速度測定から重力ポテンシャルを求めているが、水準測量と同様に誤差の蓄積と測定時間が長いという問題がある。GNSS と重力場モデルを利用する方法は、測量の測定値に不一致があることが分かっている<sup>39</sup>。本研究成果の光格子時計による相対論的測地は、これら従来技術の問題が無く、高精度、短時間測定が可能であり高い優位性がある。

本研究成果の 18 桁以上の精度を持つ光格子時計を各地に設置した光格子ネットワークによる相対論的測位が可能になればその適用範囲はさらに広がる(図 3-1)。様々な地点に設置した光格子時計を光ファイバまたは衛星を用いてネットワーク化し、互いに周波数差を測定すれば各地点の重力ポテンシャルの測定が可能になる。地点間の重力ポテンシャル差は、水が流れる方向を決めるため、海岸防災、水資源管理などに重要な情報を与えることに

<sup>38</sup> ある点における単位質量あたりの重力による位置エネルギー

<sup>39</sup> T. Gruber, C. Gerlach, and R. Haagmans, " Intercontinental height datum connection with GOCE and GPS-levelling data, " Journal of Geodetic Science 2, 270(2012).

なる。また、地下資源探査、地下空洞、マグマ溜まり、地殻変動も、従来にはない精度で短時間に検出できることになる。例えば、火山の噴火前膨張では 1cm/24h という例もあるため、防災・減災用途での活用や、大規模地震による地域レベルでの地盤沈下や地盤隆起、ビル等建築物の初期段階での地盤安定性の確認、大深度地下利用などにおける厳密な深度管理なども可能であり、広範で多様な応用が期待される。

また、従来にない桁違いの時空間情報は、現時点では予想のできない新たな用途を生む可能性がある。

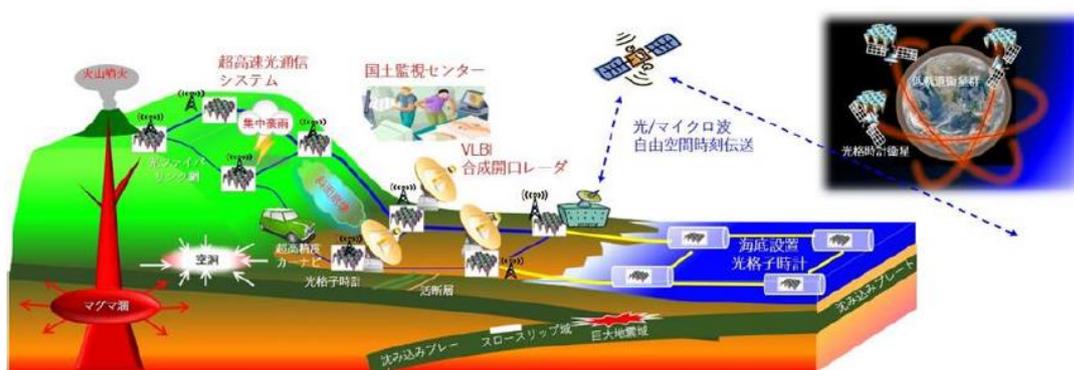


図 3-1 光格子時計ネットワークによる相対論的測位のイメージ<sup>40</sup>

以上

<sup>40</sup> JST 「通信・タイムビジネスの市場獲得等につながる超高精度時間計測」  
[https://www.jst.go.jp/mirai/jp/uploads/saitaku2018/JPMJMI18A1\\_katori.pdf](https://www.jst.go.jp/mirai/jp/uploads/saitaku2018/JPMJMI18A1_katori.pdf)