

戦略的創造研究推進事業 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」

研究課題

「極低温原子を用いる量子計測法の開拓」

研究終了報告書

研究期間 平成17年10月～平成23年3月

研究代表者: 香取 秀俊
(東京大学大学院工学系研究科、教授)

§ 1 研究実施の概要

極低温原子を用いた新たな量子計測・量子情報処理のツール「光格子時計」、「シュタルク原子チップ」の手法を確立し、その工学的・理学的応用を目指す。特に、「光格子時計」の研究では、Sr、Yb、Hgの原子のうち、2種以上の原子で16桁を上回る相対精度でスペクトルの相互比較を行い、次世代の時間標準としてのフィジビリティを評価するとともに、微細構造定数の恒常性/揺らぎの検証に挑戦することを目標として研究を開始した。この研究プロジェクトの過程で、光格子時計の開発は、世界的な競争の渦に巻き込まれていった。これを受け、研究プロジェクトの2年目からは、「シュタルク原子チップ」の研究を半ば停止し、「光格子時計」開発に全力を傾注することとした。

「光格子時計」手法は、本研究代表者が2001年に提案した新たな原子時計手法であり、「魔法波長」と名付けた原子に特有なレーザー波長で光トラップを構成すると原子の2準位のエネルギーシフトが等しくなることを利用する。魔法波長で構成した光格子トラップに数千から百万個の原子を捕獲し時計遷移を観測することにより、次世代原子時計として最も有望視されていた「単一イオン光時計」に比べて、原理的には数十倍から千倍の安定度の向上が可能になる。2003年に東大グループで「魔法波長」の実証が行われ、2005年には東大・産総研グループで「光格子時計」の最初の実証がなされた。

本CREST研究の開始直後の2006年になると、米国、仏国グループでも光格子時計を実現し、その研究開発は世界で20を超えるグループが参入する世界的な潮流となった。

この研究の世界情勢の中で、我々は、光格子時計の原理検証、その量子力学的設計の最適化、適用する原子固有の問題提起とその解明を行い、この原子時計手法の18桁の原子時計としてのフィジビリティを検証した。具体的には、

- 原子の量子統計性と光格子の幾何学を考えた光格子時計の最適設計
- Sr、Yb、Hgによる異種光格子時計の実現・提案 (Hg)
- 多重極相互作用まで考慮に入れる「魔法波長」の概念の拡張
- 最適設計された2台の光格子時計による光格子時計の相互評価
- 同期比較法による、光格子時計における「量子射影雑音限界」の到達

を実証した。とりわけ最後の項目ではおよそ10分の積分時間で 1.6×10^{-17} の安定度に達し、光格子時計が、従来手法「単一イオン光時計」と比肩する性能をもつとともに、原子数の優位性を初めて実証した。この一方で、産総研の協力による光格子時計の国際原子時の高精度リンクは、光格子時計の国際比較を可能にした。この結果、Sr光格子時計は2006年に秒の再定義の有力候補である「秒の二次表現」に採択された。2009年現在、Sr光格子時計の国際比較の不確かさは 1×10^{-15} に達し、事実上、現在の秒の定義であるCs原子の不確かさに制限されるだけとなった。また産総研では ^{171}Yb による光格子時計を開発し、競合するNISTグループに先駆け論文発表を行った。

光格子時計は、このプロジェクト中に十分に工学に貢献できるレベルに仕上がったと言える。この一方で、プロジェクト中には、光格子時計を国際比較し合う米国JILA、仏国SYRTEとSr/Cs原子時計の周波数比を3年間にわたって計測し、微細構造定数の恒常性、物理定数の重力との結合がないことを計測不確かさの範囲で示し、基礎物理学の見地からのデモンストレーションも行った。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

《研究開始時に目指した目標や立案した5年間の研究計画・進め方の概要、を簡潔に記述してください。》

【背景】 Paul、Dehmelt らによって先駆的研究のなされたイオントラップ (Paul トラップ) は、単一量子ダイナミクスの実験的基礎を確立する上で、原子物理学において最も成功を収めたツールの一つであった。そして今日では、次世代の原子時計として期待される単一イオン時計、少数個イオンでの量子コンピューティングの実現等、量子精密計測のツールとして不動の位置を占めている。

イオントラップの誕生当時、強力なローレンツ力を用いた運動制御性のよさは、イオンを用いる最大の利点であった。ところが、精密計測をその極限にまで推し進めていくとき、イオン間、イオンと環境との強いクーロン相互作用は、多数個イオンのトラップを困難にする結果、単一イオン時計の安定度の量子力学的限界、イオンコンピューティングの拡張性大きな制限をもたらすことが現実的な問題となってきた。

【研究のねらい・着眼点】 本研究代表者は、これらイオントラップを用いる量子計測の制約の解消をめざし、

- イオントラップ周波数標準に比べて3桁の安定度向上を期待できる「光格子時計」、
- 固体基板上で Paul トラップ類似の電場操作によって中性原子のコヒーレントな運動制御を実現する「シュタルク原子チップ」

の手法を提案し、本 CREST 提案に先立ちその原理の検証実験を行ってきた。本研究では、これら2つのツール、「光格子時計」と「シュタルク原子チップ」の応用実験を展開し、これらが工学的・理学的な見地から真に役立つ手法であること、そして、これらのツールがこれまで量子光学実験の主役の位置を占めてきたイオントラップ以上のパフォーマンスをもつことを実証することを目標にする。

「光格子時計」の研究では、現在研究を進めている Sr 原子光格子時計に加え、Yb または Hg 光格子時計を構築し、これらの2種の光格子時計周波数の相互比較および SI 秒とのリンクを行う。これによって、

- SI 秒の再定義を念頭に、光格子時計スキームの次世代の時計としてのフィジビリティを評価し、これと並行して
- 異種原子光格子時計間の時間比較によって、微細構造定数の揺らぎ・恒常性の最も厳密な評価を行う。一方、
- 光格子時計の優れた短期安定度・18桁の時計精度を使う新しい計測手法(例えば、重力シフトを利用する高度計・リモートセンシング等)の探索を行う。

これらを、共同研究機関として産業技術総合研究所・計測標準研究部門をパートナーとして進める。

「光格子時計」は本研究代表者の提案した“摂動のエンジニアリング”という新しい概念に基づく原子時計手法である。このため、最終的な不確かさは、制御しきれない高次の摂動によって決定される。これらの高次の摂動のうちいくつかは、理論的予測が難しく、この回避のためには本手法の適用可能な原子について実験的検討が不可欠である。光格子時計手法が適用可能な原子種のうち、本研究で取り上げる Sr 原子、Yb 原子、Hg 原子は実現可能性が高く、この3原子の実験的な評価を行うことで、実質的な光格子時計の実現可能性がすべて尽くされる。従って、これらの実験を網羅的に行う本研究によって、秒の再定義に向けた「光格子時計」のフィジビリティについて実験的見地から結論を下すことが可能になる。本研究の重点項目として展開する3種の光格子時計の周波数の相互比較には2つの意義がある。

- 国際原子時 (TAI) を通して SI 秒とリンクし3種の光格子時計の絶対周波数を計測する。これは、実質的には、より高安定な光格子時計が SI 秒の揺らぎをモニタすること

に相当する。これによって、秒の再定義に向けた布石を作る。

- 従来手法の原子時計(Cs 時計、Hg+・Yb+単一イオン時計)を用いた実験に比べて、一桁高い相対精度 10^{-16} /年のレベルで微細構造定数の時間揺らぎ/恒常性を評価する。これは、物理学の基礎の検証、統一理論へ向けた実験的アプローチとしての貢献が期待される。

【将来展望】本研究が目指す高精度な時間標準は、長期的には、長さ/時間標準の高度化及び光通信分野への高精度な標準の実現・供給として我が国の高度情報通信社会に貢献する。光格子時計で到達可能な安定度は、1秒の計測時間で 10^{-18} 台を見込んでおり、これは正確さ・安定度の両面にわたって現在の時間標準を2~3桁改善できることに相当する。光格子時計の特長である優れた短期安定度を利用すれば、重力場中での時計の位置1cmの違いによる周波数シフト(10^{-18})を1秒という短時間で観測可能になる。これは、将来、実時間での地殻変動の検出やジオイド面の高精度計測といった新技術の開発に利用できる可能性がある。

(2)新たに追加・修正など変更した研究構想

◀研究を進めていく中での新展開から生まれた新たな研究計画や目標等、あるいは修正を行った点など、簡潔に記述してください。▶

CREST 研究開始直後より、世界での光格子時計研究は一層激しさを増し、当初目標としていた「16桁を上回る精度」を超え、 1×10^{-17} の不確かさに研究の照準を合わせることが急務となった。これに対応すべく、

- 4次の光シフトを低減する「青方離調魔法波長」の提案
- 原子の多重極相互作用を取り入れた「魔法波長」の概念の拡張
- 光格子時計の「量子射影ノイズ限界」に迫るための2台の原子時計の同期比較法の実証
- 1×10^{-17} の比較で主要な系統誤差の要因となる黒体輻射の除去を目指す「クライオジェニック光格子時計」の開発

を最優先の課題として進めることとした。

これにマンパワーを割くために、当初計画していた「シュタルク原子チップ」の研究を中止することとした。

§3 研究実施体制

(1)「東大」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
香取 秀俊	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	教授	H17.10～
高本 将男	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	助教	H17.10～
高野 哲至	東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構光量子科学研究 センター	研究員	H21.04～
于 得水	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	外国人特別研 究員	H21.11～
橋口 幸治	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	D1	H20.04～
牛島 一朗	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2	H21.04～
野中 理	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2	H21.04～
大谷 直也	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M1	H22.04～
久保 肇	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M1	H22.04～
山中 一宏	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M1	H22.04～
坂本 幸男	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	技術員	H17.10～
蜂須 英和	JST	CREST 研究員 (離脱当時)	H17.10～ H22.08
彭 瑜	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	特別研究生(離 脱当時)	H21.10～ H22.09
Clayton Locke	University of Western Australia	研究員(離脱当 時)	H21.05～ H21.11
戸塚 健一郎	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2(離脱当時)	H20.04～ H22.03
西埜 咲紀	JST	事務員(離脱当 時)	H17.10～ H21.10
小川 京子	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	研究補助員	H21.10～
赤塚 友哉	東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構	特任研究員	H17.10～ H20.10
東 亮一	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	D4	H17.10～ H20.03
中川 雄介	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2	H19.04～ H21.03
林 健司	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2(離脱当時)	H17.10～ H18.03

山内 暁	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2 (離脱当時)	H17.10～ H18.03
谷野 陽一	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2 (離脱当時)	H17.10～ H19.03
山下 公平	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2 (離脱当時)	H17.10～ H19.03
濱田 健一	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2 (離脱当時)	H18.04～ H20.03
宮岸 浩太郎	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2 (離脱当時)	H18.04～ H20.03
中花 健太郎	東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻	M2 (離脱当時)	H19.04～ H20.12

② 研究項目

研究実施項目 1 : Sr、Hg/Yb 光格子時計の構築と精度評価

概要 : 現在行っている Sr 光格子時計の高精度化をはかるとともに、新たに Hg または Yb 光格子時計の実験系を構築し、2 種の光格子時計の同時運転を行う。2 種の光格子時計の周波数比較をサブヘルツレベルで実現することにより、相対精度 $10^{-16} \sim 10^{-17}$ で光格子時計の不確かさの評価を行うとともに、微細構造定数の恒常性の検証を行う。

研究実施項目 2 : シュタルク原子チップの研究

概要 : Sr 原子(Hg/Yb 原子)を用いるシュタルク原子チップの開発を行う。qubit のデコヒーレンスの評価、原子のエンタングル状態の操作を通して、極限量子計測と量子情報処理技術との接点を探る。

(2) 「産総研」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
洪 鋒雷	時間周波数科 波長標準研究室	室長	H17.10～
安田 正美	時間周波数科 波長標準研究室	主任研究員	H17.10～
今江 理人	時間周波数科 周波数システム研究室	室長	H17.10～
藤井 靖久	時間周波数科 周波数システム研究室	契約職員	H17.10～
大嶋 新一	時間周波数科	審議役	H17.10～
河野 託也	JST	CREST 研究員 (離脱当時)	H18.04～ H22.03
保坂 一元	時間周波数科 波長標準研究室	主任研究員	H19.05～
雨宮 正樹	時間周波数科 周波数システム研究室	主任研究員	H19.10～

中嶋 善晶	時間周波数科 波長標準研究室	産総研特別研 究員	H19.11～
稲場 肇	時間周波数科 波長標準研究室	主任研究員(離 脱後、再登録)	H21.04～
赤松 大輔	時間周波数科 波長標準研究室	研究員	H21.04～
石川 純	時間周波数科 波長標準研究室	主任研究員(離 脱当時)	H17.10～ H19.03
大苗 敦	時間周波数科 波長標準研究室	室長(離脱当 時)	H18.04～ H19.03
稲場 肇	時間周波数科 波長標準研究室	主任研究員(離 脱)	H18.4～H 20.4

② 研究項目

研究実施項目 1 : Yb 光格子時計の構築と精度評価

概要 : Yb 原子時計遷移分光用の 1 Hz スペクトル線幅の光源 (578nm) を開発し、Yb 光格子時計の実験系を構築する。魔法波長を決定した上で、光周波数コムを用いて遷移周波数の精密測定を行う。さらに、つくば (産総研) - 本郷 (東大) 間の高精度周波数計測ネットワークを利用して、Yb-Sr、Yb-Hg の光格子時計同士で相互比較を行う。

研究実施項目 2 : 高精度周波数計測ネットワークの研究

概要 : 光周波数コムの高精度化を行うことにより、正確さと安定度を損なわずに、光-光、光-マイクロ波の周波数リンクを実現する。GPS 搬送波位相方式周波数比較法により、つくば (産総研) - 本郷 (東大) 間において、高精度な (10^{-15} @3h) 周波数比較法を構築する。

§ 4 研究実施内容及び成果

[※以下の引用文献は § 5(1) 原著論文発表の文献番号を示す]

《東大グループ研究成果》

4. 1 ストロンチウム光格子時計の高精度化と相互比較

(1) 研究実施内容及び成果:

4. 1. 1 光格子時計の最適設計・実現と相互周波数比較 [文献 4]

超高精度原子時計を実現する上での大きな挑戦の一つは、原子間の相互作用を徹底的に排除することである。衝突シフトの原因となる原子間相互作用を決定付けるのは粒子のもつ量子統計性である。さらに光格子時計では、「原子の全軌道角運動量が、光格子を作るレーザーの偏光と結合する」ことを考え合わせることで、我々は、究極の光格子時計の実現手法が、①スピン偏極フェルミ粒子を用いる 1 次元光格子時計、②ボーズ粒子を用いる 3 次元光格子時計、の 2 通りに限られることを議論した。そこで、我々は、これらをストロンチウム原子のフェルミ同位体 ^{87}Sr とボーズ同位体 ^{88}Sr を用いて実現し、それらの相互比較により、性能評価を行った。

「スピン偏極 1 次元光格子時計」では、1 次元光格子を用いて複数個の原子をパンケーキ状のポテンシャルに捕獲し、「パウリの排他律」として知られるフェルミ粒子の量子力学的な性質を巧みに利用することで、原子間の相互作用を排除する(図 1a)。我々は、ストロンチウム原子のフェルミ同位体 ^{87}Sr を用いた。1 次元光格子中に捕獲された基底状態の原子 ($^1\text{S}_0$) に対し、 $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_1$ 遷移に共鳴する σ^+ (もしくは σ^-) 偏光の光を用いて、 $m_F=+9/2$ (もしくは $-9/2$) の状態にスピン偏極させる(図 1d)。このスピン偏極した原子に対し、時計遷移 ($^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$) の励起を行い、原子の励起率に基づいて、レーザー周波数を原子の共鳴周波数に対して安定化を行う。またこの時、 $^1\text{S}_0(m_F=+9/2)\text{-}^3\text{P}_0(m_F=+9/2)$ と $^1\text{S}_0(m_F=-9/2)\text{-}^3\text{P}_0(m_F=-9/2)$ の遷移を交互に励起し、その周波数の平均をとることによって、1 次のゼーマンシフトおよびベクトル光シフトを除去する手法を確立した[文献 1]。

このように実現した 1 次元光格子時計に対して、GPS リンク(詳細は 4. 7 および[文献 1])、光ファイバリンク(詳細は 4. 8 および[文献 5])を用いて、国際原子時に基づいた絶対周波数測定を行った。その結果、ほぼ国際原子時の不確かさで周波数測定が行われ、3 グループ(東大-産総研(日)、JILA(米)、SYRTE(仏))の時計の周波数の一致は 6×10^{-16} に達した[文献 5]。これは、現在の国際原子時の時系の不確かさにも匹敵し、光格子時計の更なるパフォーマンス評価には、光格子時計同士の周波数比較が必須となった。

一方、「3 次元光格子時計」では、3 次元光格子によって 1 サイト 1 個の原子捕獲を実現してボーズ粒子のバンチング特性に起因する衝突を排除する一方で、基底状態に核スピンをもたない原子を用いることにより、3 次元光格子によって生じるベクトル光シフトを抑制する。我々は、 ^{88}Sr 原子を 3 次元光格子時計に冷却捕獲し、時計遷移へのレーザー安定化を行って 3 次元光格子時計を構築した。位相が安定な 3 次元光格子をつくるために 1 次元光格子を折り畳んで直交させるような構成にし、光格子の偏光面と磁場を平行にすることで光シフトの偏光依存性を抑えた。2.34 mT の磁場を印加して 400 mW/cm^2 のプローブ光を入射すると時計遷移のラビ周波数は 9 Hz となる。これを 60 ms の π パルスで観測してほぼフーリエ限界である線幅 13 Hz の時計遷移スペクトルを得た。このスペクトルを用いてプローブ光の周波数を安定化し、3 次元光格子時計として稼働させた。

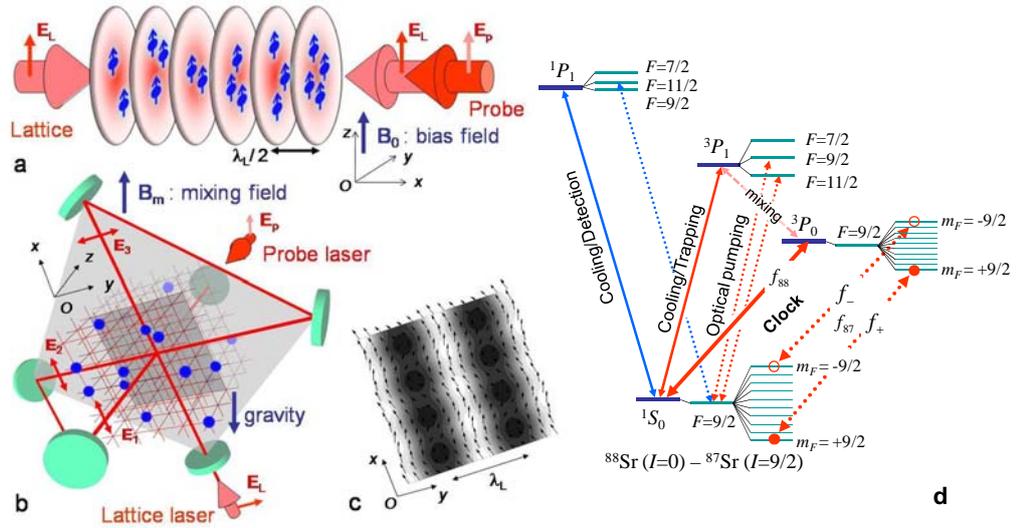


図 1: 光格子時計の幾何学的形状 (a) スピン偏極 1 次元光格子時計 (b) 3 次元光格子時計 (c) 3 次元光格子電場のベクトルプロット (d) ^{87}Sr , ^{88}Sr 原子のエネルギー準位図。

1 次元光格子時計と 3 次元光格子時計の性能を評価するために、これらを並列運転させて周波数比較を行った(図 2(a))。このように 2 台の光格子時計間で相互周波数比較を行うことで、国際原子時による制限を受けずに光格子時計の安定度を評価することができる。我々は、60ms の π パルスで励起した 13Hz の遷移スペクトルを用いて(図 2(b))、時計レーザー周波数を、それぞれの原子 ^{87}Sr , ^{88}Sr の遷移周波数に安定化し、周波数差 $f_{88} - f_{87}$ の評価を行なった。その結果、2,000 秒の積算時間で、アラン分散は 5×10^{-16} まで低減し(図 3(a))、同位体シフトを $f_{88} - f_{87} = 62,188,138.4(1.3)$ Hz と決定した。この 2 台の超高精度原子時計の並列運転により、セシウム原子時計を経由することなく、2 つの光格子時計の周波数比 $f_{88}/f_{87} = 1.000000144883693(3)$ を決定した[文献 4]。これは、光格子時計の相互評価という観点では世界初の試みである。

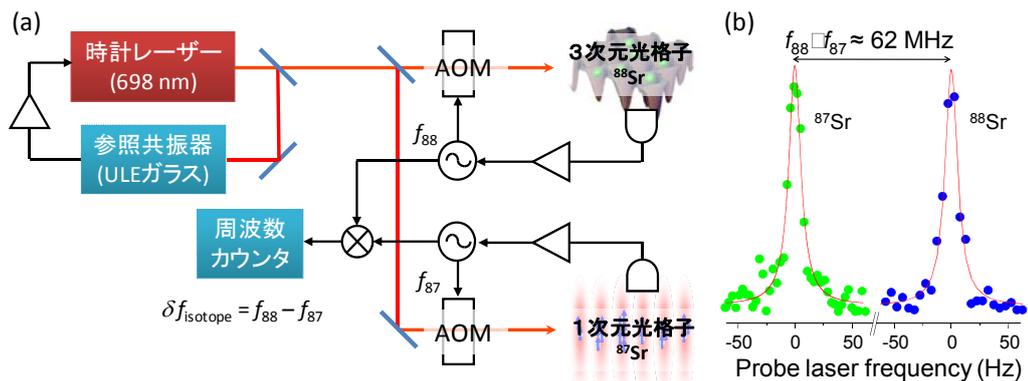


図 2:(a) Sr の 2 つの同位体を用いた 2 台の光格子時計の周波数比較。(b) 同位体の時計遷移のスペクトル。およそ 62MHz の同位体シフトのオフセットを加えている。遷移周波数 429THz に対し、スペクトル線幅 13Hz で時計遷移の分光を行った。

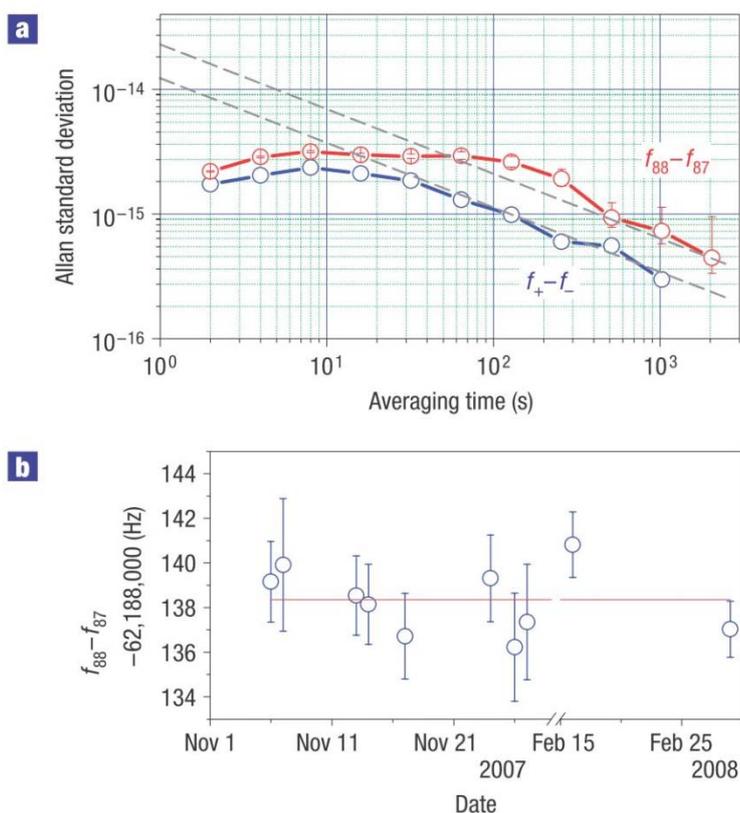


図 3: (a) ^{87}Sr 偏極 1 次元光格子時計と ^{88}Sr 3 次元光格子時計の周波数比較 (赤線) と $\pm 9/2$ にスピン偏極した ^{87}Sr 偏極 1 次元光格子時計の周波数比較 (青線) のアラン分散。現在の国際原子時の不確かさを優位に上回る $(3-5) \times 10^{-16}$ の安定度 (@1000 秒) を実現した。(b) ^{87}Sr と ^{88}Sr の同位体シフト測定の結果。1.3 Hz の不確かさで同位体シフトを測定した。

Contributor	^{87}Sr (1D)	^{88}Sr (3D)
	Correction (Uncertainty) Hz	Correction (Uncertainty) Hz
Lattice scalar light shift	-0.22 (0.33)	-0.23 (1.09)
Lattice vector light shift	0 (0.01)	0 (0.014)
Lattice 4 th order light shift	-0.017 (0.015)	-0.12 (0.10)
Probe light shift	0.03 (0.001)	7.48 (0.36)
Blackbody shift	2.4 (0.2)	2.4 (0.2)
2nd order Zeeman shift	0.772 (0.01)	128.61 (0.31)
Collision shift	0.4 (0.3)	-0.034 (0.3)
Systematic total	3.37 (0.49)	138.11 (1.25)
Isotope shift $f_{88} - f_{87}$	62,188,138.4 (1.3)	

表 1: 1 次元-3次元光格子時計の周波数比較の不確かさのリスト。

(2)研究成果の今後期待される効果

光格子時計のパフォーマンスは、国際原子時の不確かさを凌駕しており、その評価には、光格子時計の相互比較が唯一の手段となっている。本研究項目によって確立された周波数比較の手法は、複数の光格子時計を用いた精密測定実験(例えば、4.2 のクライオジェニック光格子時計や 4.4 の水銀光格子時計、4.7 の産総研光格子時計と Sr 光格子時計との比較実験)の技術的基盤を与える。

現在我々は、1.3Hz の同位体シフト測定の不確かさの低減に取り組んでいる。[文献 4] の論文公表当時、もっとも不確かさを制限していたのは、3 次元光格子時計の光格子の光シフトの不確かさ 1.09 Hz であった。これを低減するため、光格子レーザー周波数のさらなる安定化や光シフトの測定に取り組み、現在ではこの不確かさを 100mHz 以下まで抑えることが可能になった。さらに、3 次元光格子時計における 2 次ゼーマンシフト・プローブ光シフトの抑制を行い、現状では 0.4Hz 程度まで不確かさを低減させることが可能と見積もられる。

4. 1. 2 レーザー安定化共振器の熱的揺らぎ限界での Sr 光格子時計の実現と安定度評価

(1)研究実施内容及び成果:

光格子時計の相互周波数比較によって、光格子時計の安定度が、時計遷移励起レーザーの安定度によって制限されていることが分かった(4. 1. 1 および[文献 4])。一方で、励起レーザーの安定度は、周波数安定化を行う光共振器に加わる外乱雑音で制限されており、2007 年当時、主要な雑音源は、地面振動による共振器長の揺らぎであった。そこで我々は、振動雑音感度の低い光共振器(カットアウト共振器)を設計、導入した。図 4 に、共振器の軸方向の支持点間の距離に対する、測定された振動感度を示す。適切に支持点を配置することによって、最小で 6 kHz/(m/s²)の低振動感度共振器を実現した。

この共振器に安定化されたレーザーを用いた光格子時計の相互周波数比較の結果を図 5 に示す。この結果より、レーザーの安定度は参照光共振器の母材(ULE、超低熱膨張ガラス)の熱揺らぎに制限される熱的雑音限界である $\sigma_y=1 \times 10^{-15}$ (共振器長 10cm、積算時間 1-10 秒)に達した。この高安定化レーザーを用いて、光遷移スペクトルを 2.7Hz(@429THz)の狭線幅で観測し、2 台の光格子時計の相互比較では、1000 秒の平均時間で 2×10^{-16} の安定度 [$\sigma_y(\tau) = 6 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$] を達成した。

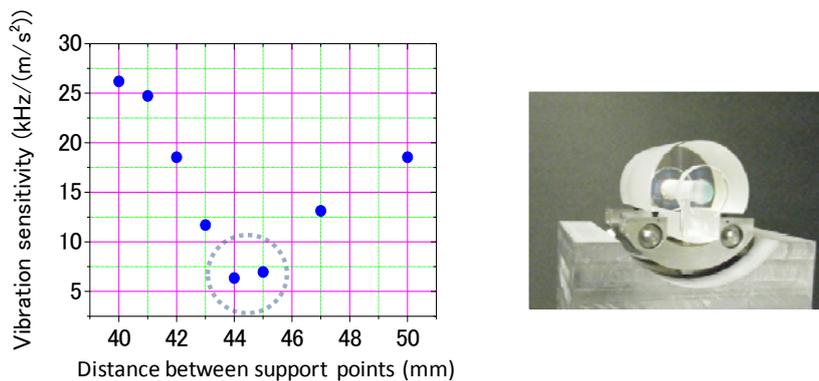


図 4: (左図) 支持点間距離(軸方向)に対する振動感度依存性。支持点間距離 44 mm で最小振動感度 6 kHz/(m/s²)を得た。(右図) 低振動感度カットアウト光共振器。

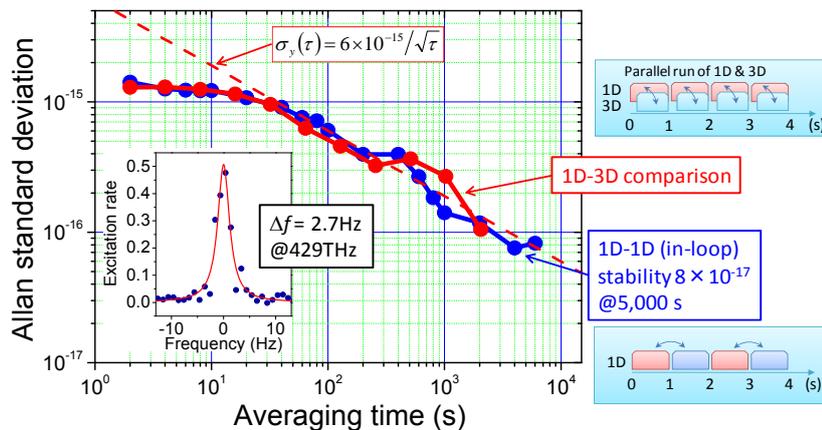


図 5: 低振動感度光共振器に周波数制御された高安定な時計レーザーを用いた周波数比較。青線：1次元光格子の安定度評価。赤線：1次元—3次元光格子時計間の周波数比較による安定度評価。内挿図：線幅 2.7Hz の時計遷移分光スペクトル。

(2)研究成果の今後期待される効果

共振器の熱的揺らぎ限界を達成したことにより、2 倍の安定度改善を達成できたが、光格子時計の量子射影ノイズ限界という観点では、さらに 2–3 桁の安定度改善の余地がある。これは、高安定な光格子時計実現に向けた時計レーザーの開発においては、共振器の熱的な揺らぎを抑えることが重要であることを示唆する。そのためには、高い機械的Q値を有する材質の使用、長い共振器、もしくは、低温共振器の開発が必要となる。

4. 1. 3 1次元光格子中のスピン偏極フェルミ粒子 ^{87}Sr の時計遷移のラビ振動とコヒーレンス

(1) 研究実施内容及び成果:

フェルミ粒子を用いる 1次元光格子時計の衝突シフトの低減のためには、パウリブロッキングを機能させるため、偏極フェルミ粒子の均一な時計遷移の励起が大きな関心事となる。我々は、非偏極フェルミ粒子の除去による、高偏極フェルミ粒子の生成手法を開発し[文献 9]、その原子を空間的に均一なプローブ光で励起することにより、99%以上の時計遷移 π パルス励起を達成した(図 6)。このとき観測されたラビ振動は、重力によるワニエシュタルク状態による格子間トネリングの抑制、振動準位に依存したラビ周波数、レーザーコヒーレンス、衝突による原子コヒーレンス等を取り入れた、光ブロツホ方程式によるラビ振動のシミュレーション結果と良い一致を示した[文献 9]。

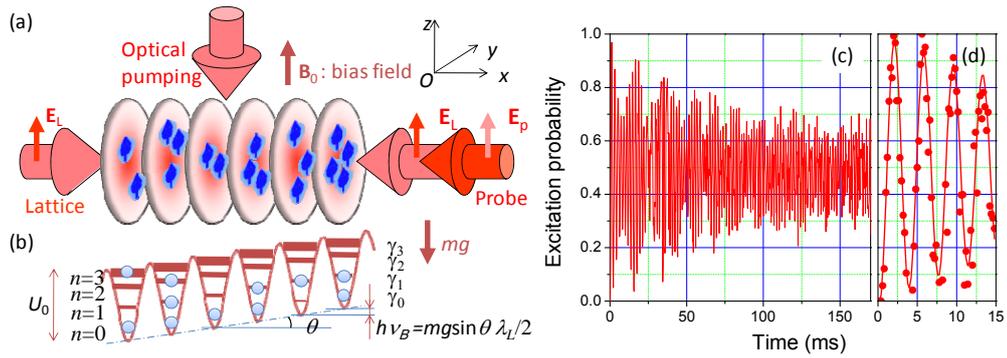


図 6: (a) スピン偏極 1 次元光格子時計実験配置。(b) 光格子ポテンシャル。光格子が重力に対して傾くとき、光格子のブロッホバンド幅は格子間の重力ポテンシャル差によって抑制される。(c) 時計遷移のラビ振動。原子は光格子の振動準位に熱的に分布し、ラビ周波数は振動準位に依存する結果、ラビ振動の崩壊と回復 (collapse and revival) が現れる。(d) ラビ振動の拡大図。光格子時計に用いる最初の π パルスでは、99%以上の原子が励起されている。

(2) 研究成果の今後期待される効果

光格子中での原子のトンネリングの観測、ワニエシュタルク状態によるトンネリングの抑制等、固体中の電子系のシミュレーション (量子シミュレーション) の実験を魔法波長・光格子中での高分解能分光実験を通して観測する可能性を示唆している。

4. 1. 4 レーザーノイズを同相除去する新たな光格子時計評価の提案と実現

(1) 研究実施内容及び成果:

安定化を行う共振器ミラーに由来する熱的レーザーノイズ限界を超える時計比較の安定度—光格子中の原子集団 (原子数 10^6 個、線幅 10Hz) の量子射影ノイズ限界 $\sigma_y(\tau) = 2 \times 10^{-17} \tau^{-1/2}$ の安定度—を実現するため、2 台の光格子時計の同期運転による同相レーザーノイズ除去の手法を開発した。これまで 2 台の光格子時計比較 (4. 1. 1 および [文献 4]) では、光格子時計を交互に運転して周波数比較を行った。これに対し、2 台の光格子時計を時間的に同期させて運転し、同一の周波数ノイズ相関をもった時計レーザーで 2 台の時計の原子遷移を励起することで、レーザーノイズを同相ノイズとして除去することが可能になる。これによって、光格子時計の量子射影ノイズのみで制限されるような低雑音 (高安定) な周波数比較が実現できることを提案し、シミュレーションおよび実験により、その有効性を実証した。

この手法を用いた 1 次元 (^{87}Sr)—3 次元 (^{88}Sr) 光格子時計の周波数比較結果を図 7 に示す。図 7(a) は、1 次元、3 次元光格子時計の周波数差 $\delta f = f_{88} - f_{87}$ である。同期比較でレーザーノイズを除去することによって、短時間の積算時間で相対周波数にして 10^{-16} レベルの変化が検出できるようになった。この周波数差から、相互比較の安定度を計算したのが、図 7(b) (青線) である。安定度は、非同期での比較 (赤線) に対しておよそ 1 桁改善した $\sigma_y(\tau) = 4.5 \times 10^{-16} \tau^{-1/2}$ を達成し、770 秒間積算することによって、 1.6×10^{-17} の安定度を達成した。この安定度は、実際の実験パラメータであるスペクトル線幅 4 Hz、原子数 10^3 個での光格子時計の量子射影ノイズ限界 (青点線) にほぼ一致することから、レーザーノイズの同相除去手法による量子射影ノイズ限界での相互周波数比較が実現した。

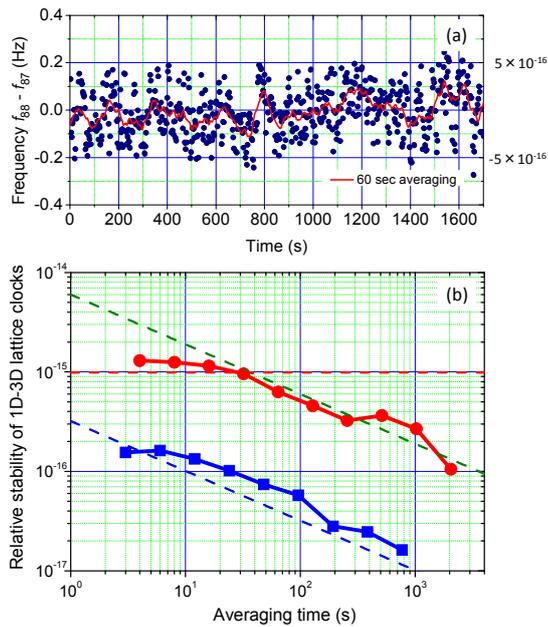


図 7：光格子時計の同期周波数比較（実験結果）(a) 1次元 - 3次元光格子時計の周波数差 $\delta f = f_{88} - f_{87}$ (同位体シフトはオフセットとして引いている) (b) 光格子時計の相対周波数安定度。同相除去により、同期周波数比較(青線)は、非同期周波数比較(赤線)に対しておよそ 1桁安定度が向上し、量子射影ノイズで制限される安定度(青点線)を達成した。

(2)研究成果の今後期待される効果

この高安定な周波数比較の手法は、高安定な光ファイバーリンク・光コムを用いて、遠隔地間での周波数比較に適用することによって、ジオイド差の短時間精密測定へ応用が可能である。今回達成された安定度が遠隔地間で実現できれば、数分の積算時間で約 30 cm の高低差が計測可能となる。また、この手法は、異原子種間 (Sr/Yb、Sr/Hg 光格子時計間) の周波数比較においても有効であり、基礎物理定数の恒常性の検証への応用が期待される。

4.2 クライオジェニック光格子時計の開発

(1)研究実施内容及び成果:

Sr 光格子時計の 10^{-17} 台での不確かさ評価では、黒体輻射シフトの評価が主要な不確かさになり、 10^{-18} の不確かさ実現には、黒体輻射シフトの抑制が最大の課題である。黒体輻射シフトは原子を取り巻く環境の温度の 4 乗に比例するため、Sr では 293 K で 2.4 Hz のシフトは、77 K の液体窒素温度下では 10 mHz にまで低減する。このため、温度を 0.1 K の不確かさで評価できれば黒体輻射シフトの不確かさは 10^{-19} 程度となる。

本研究項目では、黒体輻射シフトを抑制することで不確かさを向上したクライオジェニック Sr 光格子時計を開発するとともに、これまで理論的に評価されてきた室温での黒体輻射シフトを実測する。これまでに、図 8a に示した液体窒素による低温タンクを開発し、これを 90 K 程度まで冷却できることを確認した。移動光格子の手法により、Sr 原子をこの低温タンク内に輸送する。低温タンク内での黒体輻射シフトは原子が見る液体窒素温度の壁と室温の壁の立体角の比から 40 mHz 程度と見積られる。これまでの実験[文献 4]と同様に温度を ± 5 K で評価すれば、黒体輻射シフトを 10^{-17} の不確かさで評価できる。さらに厳密に温度を ± 0.1 K で評価できれば、このシフトの不確かさは 10^{-19} レベルまで抑えることができる。

これまでに研究が進められてきた室温動作 Sr 光格子時計と今回開発したクライオジェニック Sr 光格子時計との間で時計遷移の周波数比較を行う。室温動作の時計を基準にすることで、クライオジェニック光格子時計の低温タンク冷却前後での時計遷移の周波数シフトを測定する。このシフトから、室温での黒体輻射シフトの評価を行う。これまでのクライオジェニック Sr 光格子時計開発により、室温状態ではあるものの、移動光格子の手法により原子をタンク内に輸送し時計遷移を分光した(図 8b)。さらに、原子の時計遷移スペクトルに時計遷移励起レーザーの周波数を安定化し、クライオジェニック光格子時計が原子時計として動作することを確認した。さらに、予備実験段階ではあるが、室温動作 Sr 光格子時計とクライオジェニック Sr 光格子時計の時計遷移の周波数比較が行えるようになった。今後、クライオジェニック光格子時計の性能を向上し、室温動作 Sr 光格子時計との比較実験を通して、室温の黒体輻射シフトの測定を目指す。

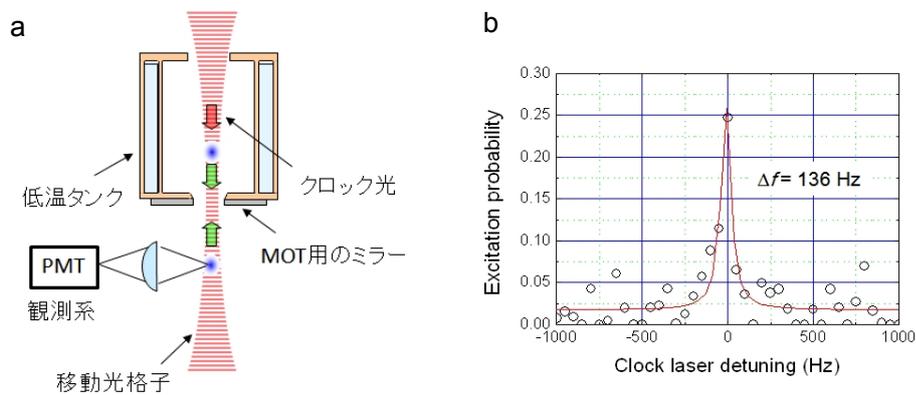


図 8: a クライオジェニック Sr 光格子時計の実験配置。b 室温条件でのクライオジェニック Sr 光格子時計の時計遷移スペクトル。

(2)研究成果の今後期待される効果:

Sr 光格子時計の不確かさが 10^{-17} レベルになってくると、室温環境下で時計を動作させる限り、黒体輻射シフトがこの時計の不確かさの大きな要因になってくる。黒体輻射シフトは原子の周囲温度の 4 乗に比例するため、このシフトの抑制には低温環境下での分光が効果的である。したがって、今回開発を進めているクライオジェニック Sr 光格子時計の基本アイデアは、高精度 Sr 光格子時計の標準手法になると期待される。

4. 3 Sr 原子中赤外遷移を用いるレーザー冷却手法の確立

(1)研究実施内容及び成果

偏光勾配冷却法の冷却限界を決める光子の反跳エネルギーは遷移波長の二乗に反比例することから、冷却遷移波長が中赤外域になる(およそ $2.9\mu\text{m}$) Sr 原子の $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ の遷移では、可視波長の偏光勾配冷却温度に対し、およそ 1 桁以上の到達温度の低減が期待できる。これは温度にして 10nK 程度となる。

このレーザー光源としては光パラメトリック共振器(OPO)を用い、その安定化を、Er ドープファイバを用いたファイバコムを用いて行った(図 9(a))。安定化したレーザー光を用いて $^3P_2 - ^3D_3$ の遷移遷移周波数の測定を行い、求めた周波数を用いることで、磁気光学トラップ(MOT)生成に成功した(図9(b))。温度測定を行い、現在ドップラー冷却限界にまで到達したことが確認された。

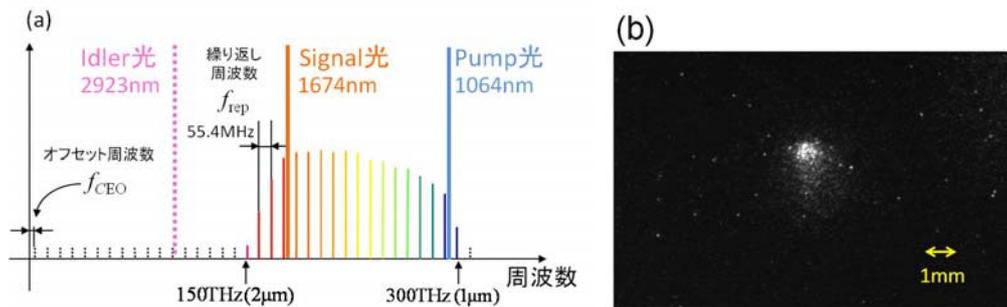


図 9: (a) コムと OPO の周波数の関係図。(b) Sr 原子の $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ の遷移を用いた MOT の観測。

(2)研究成果の今後期待される効果

レーザー光源の改善、磁場の調整などを行い、より偏光勾配冷却が作用するようにできれば、数 ms で冷却原子の生成が可能になる。これは高繰り返しの光格子実現のための基盤技術となり得る。

4. 4 Hg 原子の磁気光学トラップと光格子時計への展望

(1)研究実施内容及び成果:

原子パラメータを大きく異なる原子種による光格子時計の実現と相互比較は、光格子時計手法の評価に不可欠であるばかりか、特に、原子核電荷 Z が大きく異なる 2 種の原子時計の精密比較は、それらのスペクトルの相対論的補正項 $\propto \alpha^2 Z^2$ を通して、微細構造定数 α の恒常性の実験的議論が可能になるため物理的にも興味深い。我々は、 Z の大きな水銀原子に着目し研究を開始し、19 年度には、光格子時計実現に向けた最初のステップである、磁気光学トラップによる極低温水銀原子の生成に世界で初めて成功した。このときの実験系を図 10a に示す。MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) レーザーにより、波長 1015 nm の光を 1 W 程度得た。この光を基本波とし、2 段の SHG 共振器により 4 倍波の波長 254 nm の紫外光を 10 mW 程度得た。これを冷却光とし、Hg 原子の磁気光学トラップに成功した。さらに冷却光を周波数掃印し、ボゾンとフェルミオンを含む 6 つの安定同位体を分離して観測した (図 10b)。

Hg 原子を光格子時計の原子種に選んだもう一つの理由は、これまでに光格子時計の実現が報告されている Sr 原子や Yb 原子に比べて、水銀原子は室温での黒体輻射シフトが小さいことである。室温の黒体輻射のスペクトルは $10 \mu\text{m}$ にピークを持つため、時計遷移に選んだ各エネルギー準位の各遷移波長が $10 \mu\text{m}$ から離れている原子種の場合、黒体輻射シフトが小さい。可視域に主要な遷移を有する Sr 原子や Yb 原子に対し、Hg 原子の主要な遷移波長は紫外域にある。この結果、Hg 原子の室温での黒体輻射シフトは Sr, Yb 原子に比べて約一桁小さく、そのシフト量は理論的に 180 mHz 程度であると評価され [文献 3]、光格子時計に最適な原子種の一つとして非常に有望である。

(2)研究成果の今後期待される効果:

これまでに実現している Sr, Yb 原子の光格子時計では、その不確かさ向上には黒体輻射シフトの抑制対策がいずれ不可欠となる。これに対し、Hg 原子の場合は室温での黒体輻射シフトが先行 2 原子の光格子時計に比べて一桁小さいため、高精度光格子時計を実現する点において大きな利点となる。また、図 10(b) のように Hg 原子は豊富な安定同位体を持っているため、混合量子縮退系などへの応用も期待できる。さらに、Hg 原子はこれまでにレーザー冷却された原子種の中でも、安定同位体としては最大の核電荷 Z をもつ原子であり、 Z の大きさを武器とする微細構造定数の恒常性検証や EDM 測定等の精密計測

の観点からも、この成功の意義は大きい。

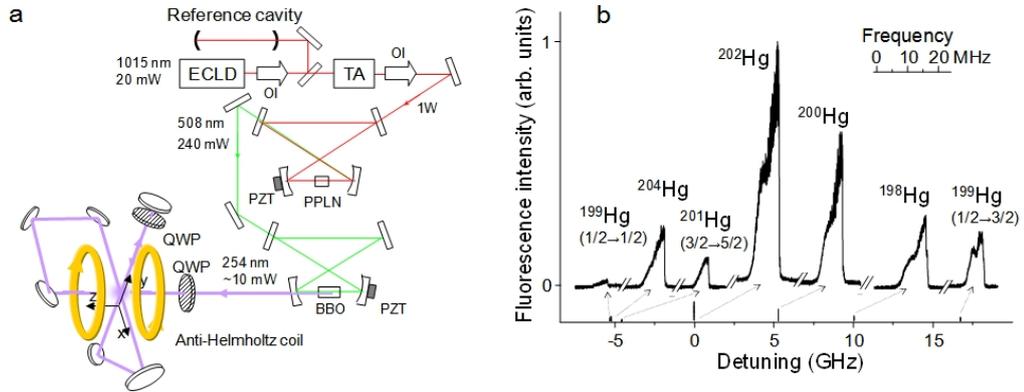


図 10:(a) Hg 原子磁気光学トラップの実験配置。(b) Hg 原子の磁気光学トラップスペクトル。ボソン、フェルミオンを含む 6 種の安定同位体を 50 μ K まで冷却、分離トラップしている。

4. 5 魔法波長の再定義

4. 5. 1 青方離調魔法波長の決定

(1) 研究実施内容及び成果：

「魔法波長・光格子」で相殺することができない 4 次以上の高次の光シフトに対しては、原子を光の定在波の節に捕獲する高周波（青方）離調の光格子が有効であり、これに対応する魔法波長の決定を行った[文献 13]。図 11(a)に青方離調光格子の構成を示す。原子の共鳴に対して高周波側に離調した周波数のレーザー光から、原子は斥力を感じるため、3 次元的な干渉で作る光格子で原子を捕獲した場合、原子はその節に捕獲される。一方、4 次の光シフトは光強度の 2 乗に比例するため、原子を青方離調の光格子で節に捕獲することによって、高次の光シフトを大幅に抑えることができる。厳密には、原子の波動関数の広がり を考慮すると、光強度を赤方離調の場合に比べ約 1/10 に抑えることができるため、4 次の効果は 1/100 程度まで軽減することができる。図 11(b)は時計遷移 $^1S_0-^3P_0$ の上下準位の光シフトの計算結果である。 $^1S_0-(5s5p) ^1P_1$ 遷移の共鳴の高周波側の裾と $^3P_0-(5s6d) ^3D_1$ 遷移の高周波側の裾が、390 nm 近辺で交点を持つことが分かる。この魔法波長を決定するために、波長 390 nm 近辺のレーザー光によって引き起こされる光シフトの測定を行った。この測定には、従来の赤方離調の 1 次元光格子中に捕獲した原子に対して、390 nm 近辺のレーザー光を照射し、時計遷移の光シフトを観測した(図 12)。その結果、青方離調光格子の魔法波長 $\lambda_0=389.889(9)$ nm を決定した。

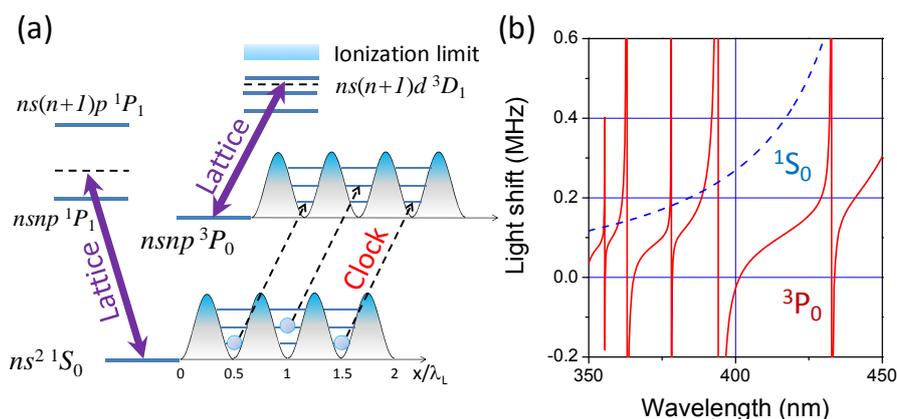


図 11: 青方離調魔法波長で構成する光格子時計。(a) 原子を光の定在波の節に捕獲することにより、高次の光シフトの影響を大幅に低減できる光格子時計。(b) ストロンチウム原子の $1S_0$ 、 $3P_0$ 状態の光シフトの波長依存性の計算値。390 nm 近辺で両準位の光シフトが交差する。この交点の波長が青方離調光格子時計の魔法波長となる。

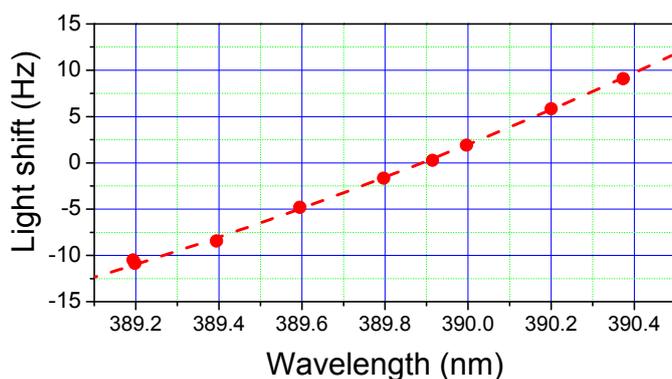


図 12: 青方光格子の魔法波長 (390 nm) 近辺のレーザー (光強度 $I = 4.5 \text{ W/cm}^2$) によって引き起こされる光シフトの測定。上図に示されるとおり、 $\lambda_0 = 389.889(9) \text{ nm}$ に時計遷移の光シフトがゼロとなる魔法波長が存在する。

(2)研究成果の今後期待される効果

この魔法波長で光格子時計を構成することによって、 ^{87}Sr 原子の場合、4 次の光シフト、2 光子イオン化の影響を 2×10^{-19} まで低減することができる (ポテンシャルの深さを $10 \mu\text{K}$ と仮定した場合)。また、この青方離調魔法波長の光格子時計は、アルカリ土類様原子を用いるすべての光格子時計に適用できる。特にここで用いた Sr 原子の場合、魔法波長 λ_0 で原子を捕獲すると、原子間距離は $\lambda_0/2 = 195 \text{ nm}$ となり、中赤外領域の遷移 ($5s5p \ ^3P_0 - 5s4d \ ^3D_1$ 遷移波長 $2.6 \mu\text{m}$ 、4.3 参照) で生成可能な長距離相互作用と組み合わせることにより、今後、魔法波長光格子ベースの量子情報実験系を構築する可能性を切り拓くものと期待される。

4. 5. 2 多重極相互作用を入れた魔法波長の定義

(1)研究実施内容及び成果:

光格子電場と原子の電気双極子相互作用を考える限りにおいては、この手法は非常に有効に思われるが、光と原子の多重極相互作用まで検討するとき、必ずしも理想

的ではないことを発見した。我々は、磁気双極子、電気四重極子まで入れた光シフトを理論的に検討することで、特定の光格子の幾何学的配置に対しては、「原子運動に依存する周波数シフトが生じない」光格子時計を構築可能であることを示した[文献 12]。

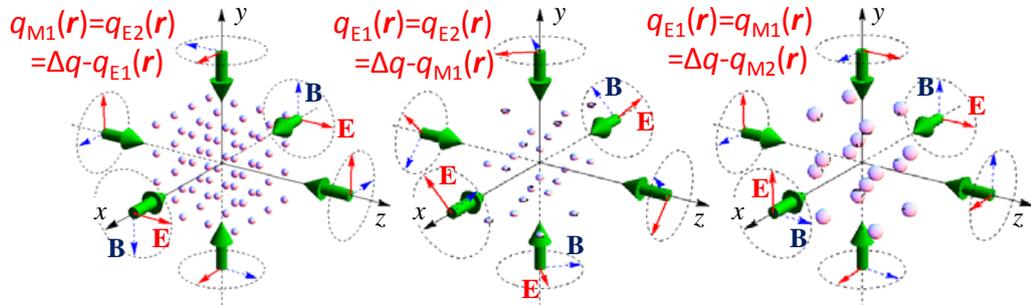


図 13：原子運動に依存しない光格子時計の構築。上図に示した偏光のレーザー電磁場により光格子を形成するとき、電気双極子(E1)、磁気双極子(M1)、電気四重極子(E2)相互作用による光シフトのうち、2 つは同相となり、残りは 90° 位相がずれ、空間的に均一な光シフトとして補正可能になる。

(2)研究成果の今後期待される効果

この多重極相互作用の考察は、低周波離調を含むすべての光格子時計での厳密な「魔法波長」の定義を与え、 10^{-18} のレベルの光格子時計の実験で重要な役割を演じる。

4. 6 シュタルク原子チップ

(1)研究実施内容及び成果

ストロンチウム 3P_2 準安定状態原子を量子ビットとして用いるシュタルク原子チップの開発を目指した。この実現に向けて必要な技術要素は、(1) 3P_2 状態原子のシュタルクトラップの実現、(2)単一原子観測と2準位間の状態制御、(3)シュタルクトラップされた原子のシュタルク原子チップ平面内での輸送、である。また、シュタルクトラップのトラップ周波数は電極間距離の2乗に反比例するため、数ミクロンの電極間距離では TTL レベルでの電圧でトラップ駆動を可能にするため、制御性の向上を目的にトラップサイズの微細化にも取り組んだ。

(1)の実現に向けて、 3P_2 状態原子の生成、シュタルク原子チップへの光ピンセットによる原子ロード手法の開発を進めた。シュタルク原子チップは、図 14(a)のように磁場原子チップとシュタルク原子チップを複合させ、シュタルクトラップが格子状に並んだものを設計した。また、将来この原子チップ上で単一原子観測を実現するため、観測系を工夫した。単一原子観測には迷光を可能な限り抑制する必要があるため、光ファイバーを原子チップ上に取り付け、ここからプローブ光を原子に照射することでプローブ光の照射位置揺らぎを抑えた。さらに、原子チップをサファイア基板上に作製し、その基板裏面から対物レンズを近付けることで大きな NA を実現し、原子からの蛍光信号を効率よく得ることを考えた。これまでに実現したシュタルク原子チップは、電極間距離 $50 \mu\text{m}$ 、駆動電圧 $\pm 200 \text{ V}$ であった。制御性の向上を目的に、本研究では電極構造を微小化した。先行実験と同程度のトラップ深さが見積もられる電極間距離 $10 \mu\text{m}$ 、駆動電圧 $\pm 32 \text{ V}$ で設計した。原子チップ作製は、東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻中尾・濱口研究室長藤圭介助教に依頼した(図 14(b))。ストロンチウム原子の2段階冷却により数 μK 程度の基底状態原子を生成した。これにポンピング光を照射して 3P_2 状態原子を生成した。この原子を(i)レーザーピンセット光にロードし、図 14(a)の電場・磁場複合原子チップ近傍に輸送する。ここで(ii)電場・磁場複合

原子チップを構成している磁場原子チップを駆動し、原子を磁場トラップに移す。(iii)磁場トラップのトラップ位置を磁場により制御し、シュタルク原子チップにロードする。上記のトラップスキームを設計し、予備実験として、レーザーピンセット光の位置制御に導入するガルバノミラーのテスト運転を行った。またこれと並行して、光ファイバプローブ光の電極、サファイア基板による散乱光ノイズ評価を行った。

(2)として、先行の電極間距離 $50\ \mu\text{m}$ 原子チップを使って、基底状態原子の単一原子観測を試みた。まず、原子チップへのロード原子数を抑制し、数個の原子観測を試みた。図 15(a)は、シュタルク原子チップにトラップされた数個原子の蛍光信号である。図 15(b)は、図 15(a)と同様な 141 データの少数原子集団の重心位置を二次元ヒストグラムで示したものである。これと、図 15(c)の数 100 原子シュタルクトラップしたときの蛍光空間分布と比較し、図 15(a)は確かに原子からの蛍光信号であることを実証した。今後はさらに検出精度を上げ、単一原子観測実現を目指す。

(3)として、数値解析により、シュタルク原子チップの動的トラップ平面内での原子輸送の実現を検討した。今後は有限要素法により、所望のポテンシャル形状が得られる実際の電極構造を設計する。

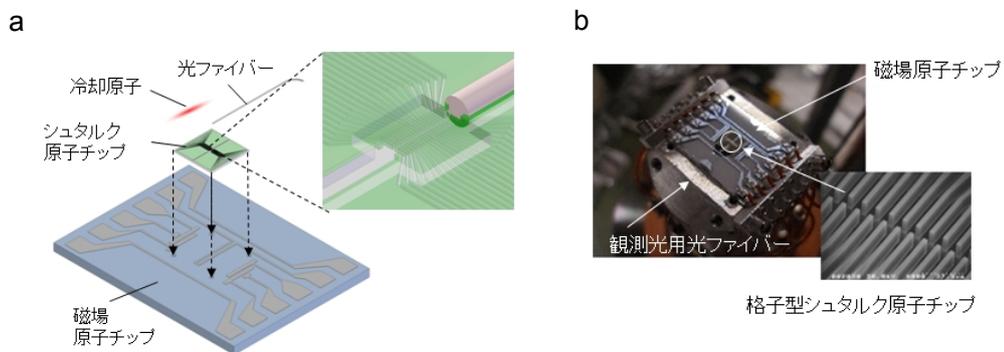


図 14:a 電場・磁場複合原子チップの構成。シュタルク原子チップに原子をロードするために、磁場原子チップを利用。散乱光ノイズ抑制を目的にプローブ光用光ファイバーを原子チップ基板に取り付けた。b 電場・磁場複合原子チップの写真。磁場トラップ用ワイヤは、幅 $200\ \mu\text{m}$ 、厚さ $20\ \mu\text{m}$ 。シュタルク原子チップ用電極サイズは、電極間距離 $10\ \mu\text{m}$ 、電極幅 $5\ \mu\text{m}$ 、電極厚 $20\ \mu\text{m}$ 。

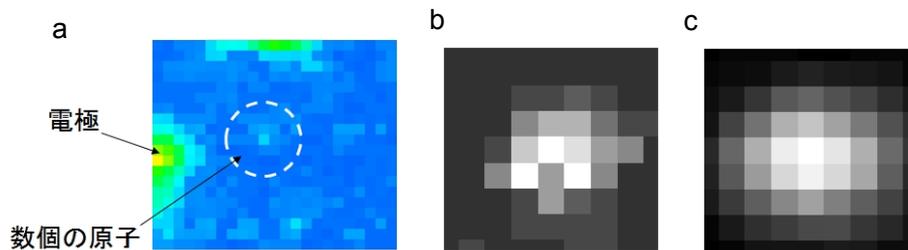


図 15:a シュタルク原子チップにトラップされた数個原子。b 図 2:a の測定を繰り返し、計 141 データの少数原子集団の重心位置の二次元ヒストグラム。c シュタルク原子チップにトラップされた数 100 原子集団の蛍光信号。

(2)研究成果の今後期待される効果:

現代のエレクトロニクスは電子を自在に制御できるようになり、今日の社会に必要不可欠

な技術となった。これに対し、原子チップでは、より豊富な自由度を持つ原子を個体基板上で制御することを目的にしている。そのため、原子チップ実現によりさらに高度な応用技術が期待される。本研究のシュタルク原子チップでは、従来手法に比べて外乱の影響を受けにくいことを特徴とする。電極の微細化により、TTLレベルで原子トラップが可能になるため、エレクトロニクスと相性も良く、将来、エレクトロニクスと原子回路が複合した系の実現も期待される。低電力での駆動は時代の流れにも適している。本研究では、このような原子回路実現に向け、基本技術要素の開発を試みた。

《東大・産総研グループ共同研究成果》

4.7 偏極光格子時計の絶対周波数計測

(1) 研究実施内容及び成果:

東大(本郷)と産総研(つくば)との間の高精度時間周波数比較手段として、GPS 衛星 2 周波搬送波位相方式の構築を進めた。システムの構成を図 16 に示す。比較精度は、平均化時間 1×10^4 秒で 10^{-15} 台、1 日平均で 3×10^{-15} 程度を実現した。この際に用いた解析ソフト GIPSY(米国 JPL が開発)は、オフラインでの解析であり、処理のために GPS 衛星の精密暦や大気遅延推定などの各種データを必要とするため、比較結果を得るために 3 週間程度を要した。このため、現在、基線長が短い(50 km 程度)場合、GPS 衛星から実時間で提供されている放送暦を用い、実時間データ解析が可能な解析ソフトを開発し、ほぼ実時間で東大—産総研間の比較が可能なシステムを構築した。

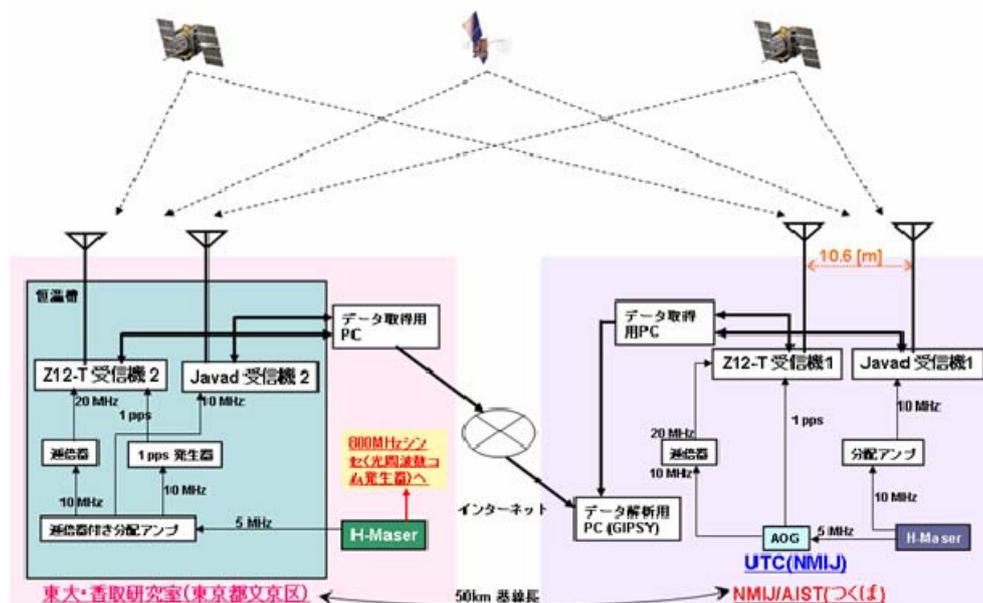


図 16: GPS 搬送波位相方式を用いた東大(本郷)—産総研(つくば)間高精度周波数比較システム

GIPSY による高精度時間周波数比較システム、水素メーザー周波数標準器及び光コムにより Sr 光格子時計の周波数測定を行い、国際原子時に基づいて Sr「偏極光格子時計」の絶対周波数を 9×10^{-15} の不確かさで決定した(図 17)[文献 1]。この測定結果が 2006 年 9 月にパリで開催された国際度量衡委員会の時間標準である秒の再定義に関するワーキンググループに報告され、秒の再定義の候補となる「秒の二次表現」に採択された。米国 JILA、仏国 SYRTE のグループが相次いで Sr 光格子時計の測定結果を報告し、日・米・仏の 3 グループが整合性のあるデータを示したことが採択の決定的要因となった。なお、本論文の成果がその時点でもっとも信頼される最新のデータであった。

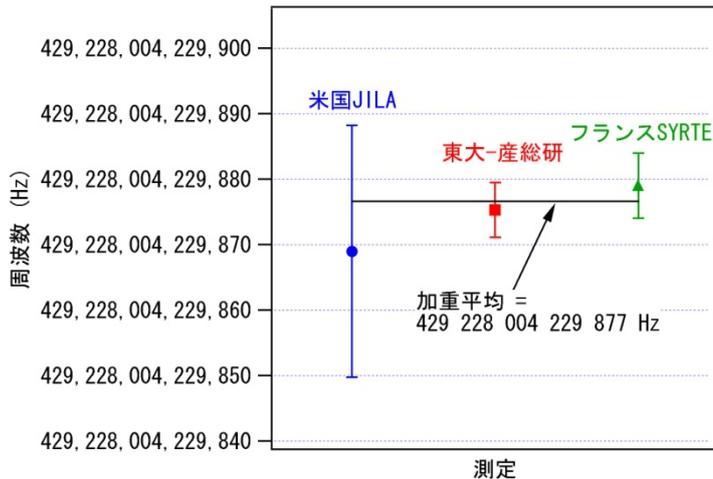


図 17: Sr 光格子時計絶対周波数の測定結果(2006年)。東大・産総研チーム、米国 JILA、仏国 SYRTE の3つのグループの測定結果がよく一致し、かつ東大・産総研チームの測定不確かさが最も小さい。

また、つくば-東大間の GPS 搬送波位相による周波数リンクは、データ処理の自動化と高安定水晶発振器制御パラメータの最適化の試行を行い、遠隔サイトの発振器を UTC (NMIJ) に位相同期させる系の自動化に目処を立てた。さらに、東大-産総研間の周波数比較リンクの強化のため、光ファイバーによるマイクロ波周波数比較技術の開発と適用実験を行った。特に長距離光ファイバー伝送路の損失を補償し、良好な信号対雑音比 (SNR) を実現すべく双方向の光増幅器を開発し、フィールドでの安定動作を確認した。

(2)研究成果の今後期待される効果

Sr 光格子時計は現在世界で 10 以上の機関で研究されており、研究のすそ野が広がっている。今後、国際度量衡委員会などで議論される秒の再定義においてこれらの測定結果は重要な役割を果たす。

4. 8 高精度ファイバーリンクによる光格子時計の絶対周波数計測

(1)研究実施内容及び成果:

東大(本郷)と産総研(つくば)との間の高精度時間周波数比較手段として、光ファイバー(120km)による周波数リンクを導入した。このファイバーリンクを用いて、光周波数キャリアによる周波数基準信号の伝送実験を行った。伝送の際、制御なしのときの周波数安定度が平均時間 1 秒で 8×10^{-13} であるのに対して、光ファイバー長の制御を施すことにより、平均時間 1 秒での周波数安定度が 8×10^{-16} に達した(図 18) [文献 5]。

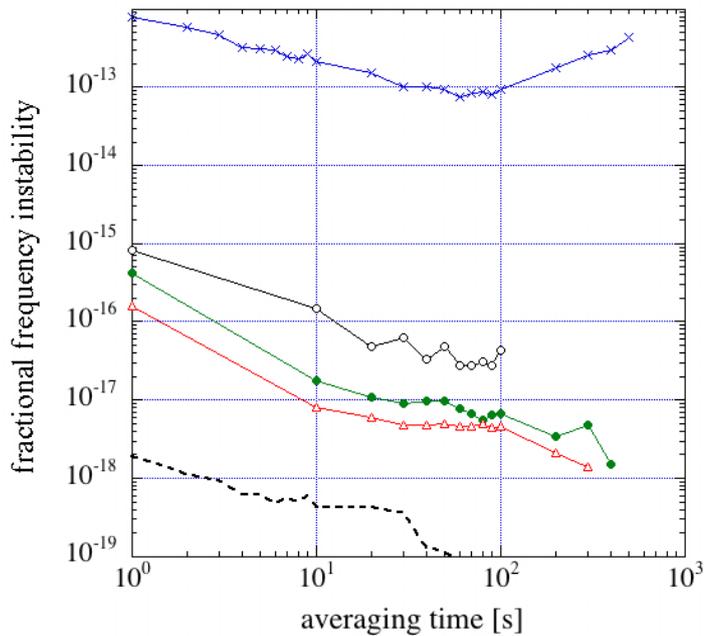


図 18: ファイバーリンクの周波数安定度。図中、×は安定化されていない場合、○は安定化されている場合の周波数安定度。平均時間 1 秒での周波数安定度が 8×10^{-16} に達した。また、●と△はそれぞれ、110km と 120km の光ファイバーのラウンドドリップ光を安定化に使った場合のインループ信号評価による周波数安定度。120km の光ファイバーのほうがより安定度が高いのは、ファイバーがより静かなところを通っていることが考えられる。点線は、光リピーターによる付加雑音のレベルを表している。

このファイバーリンクを用いて、光周波数キャリア伝送による Sr 光格子時計の周波数測定を行った。水素メーザーだけではなく、原子泉方式のセシウム原子時計、ファイバコム及び光ファイバー長制御装置など高精度周波数計測の道具を総動員して、Sr 光格子時計の絶対周波数計測システムを構築した(図 19)。その結果、産総研の水素メーザーによる東大の Sr 光格子時計の周波数計測において、 $4.7 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ のアラン分散が得られた(図 20(a))。また、わずか数時間の測定で 5.6×10^{-15} の不確かさで東大の Sr 光格子時計の絶対周波数を決定することができた。これで、米国 JILA 研及びフランス SYRTE 研の測定値との合致が 6×10^{-16} に達した(図 20(b)) [文献 10]。

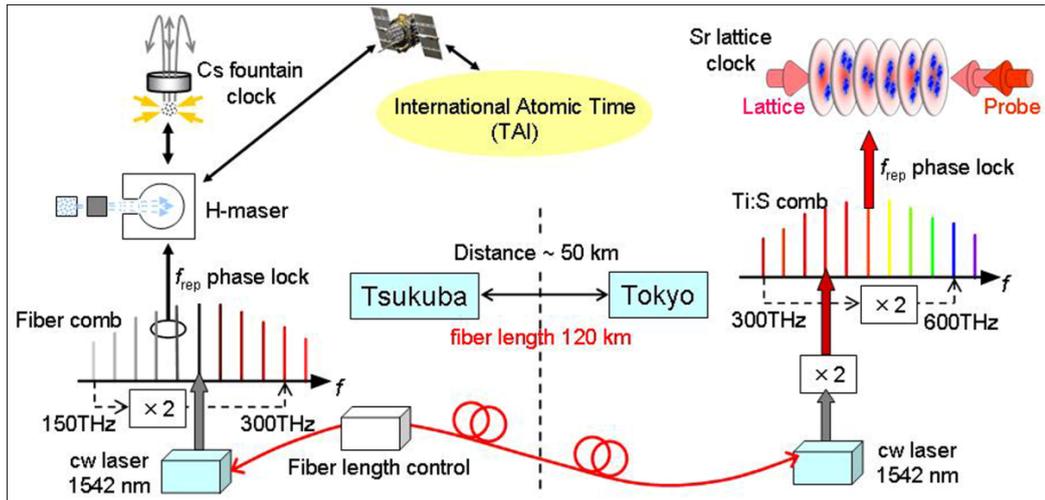
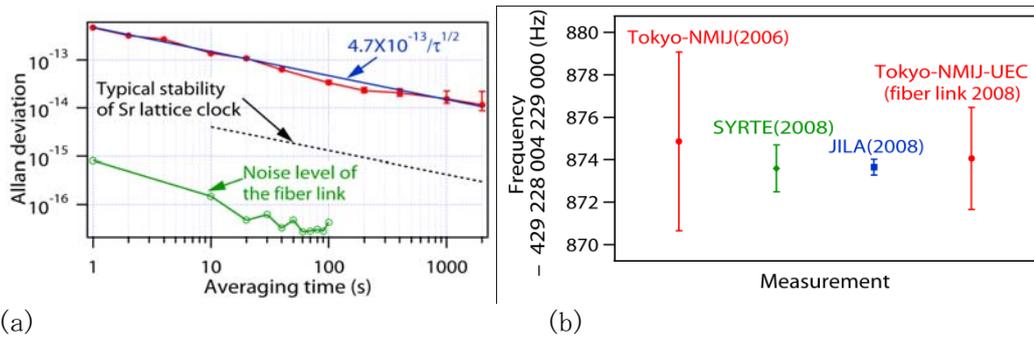


図 19: 光周波数キャリア伝送による光ファイバーリンクを用いた東大ー産総研(つくば)間の高精度周波数計測。



(a) 産総研の水素メーザーによる東大の Sr 光格子時計の周波数計測のアラン分散。
 (b) 今回の測定値とフランスの SYRTE 研究所及び米国の JILA 研究所の測定値の比較。
 6×10^{-16} の合致が得られている。

(2)研究成果の今後期待される効果:

この測定結果は、国際度量衡委員会に公告され、2009 年の「秒の二次表現」の改訂に寄与した。その結果、Sr 光格子時計の勧告周波数不確かさは秒の二次表現の中で最も小さくなり、ほぼセシウム原子時計の不確かさで制限されていることがわかった。これで、秒の再定義への道筋をつけたことができ、国際計量標準へ大きく貢献した。

《産総研グループ研究成果》

4. 9 Yb 光格子時計の構築と精度評価

(1)研究実施内容及び成果:

Sr 原子に次いで光格子時計に適用可能な原子種として注目されてきた Yb 原子を用いて光格子時計を構築し、精度評価を行う。Yb 原子の特徴として、核スピンの $I = 1/2$ と小さいこと (^{171}Yb の場合。 ^{87}Sr の場合は、 $I = 9/2$)、室温の黒体輻射シフトが Sr 場合の半分などが挙げられ、より高性能な時計となる可能性を秘めている。また原子番号が $Z = 70$ と大きいものであり、Sr 光格子時計との比較により微細構造定数の時間変化の検証に用いることもできる。

4. 9. 1 Yb 原子冷却・捕獲系の開発

Yb 原子をレーザー冷却・捕獲するための超高真空装置を整備し、Yb 放電管を用いた飽和吸収分光法によって周波数を安定化した波長 399nm の外部共振器付半導体レーザー (図 21) によって、第一段階のレーザー冷却を行った [文献 7]。引き続き、ファイバコムに安定化した波長 556nm レーザー光源を用いて、第二段階の冷却となるスピン禁制遷移磁気光学トラップの安定的な生成に成功し、この光源が 5 日間連続運転可能であることを実証した [文献 19]。また、飛行時間法により、極低温原子の温度測定を行い、FORT 光による ^{171}Yb 原子の捕獲を確認した。

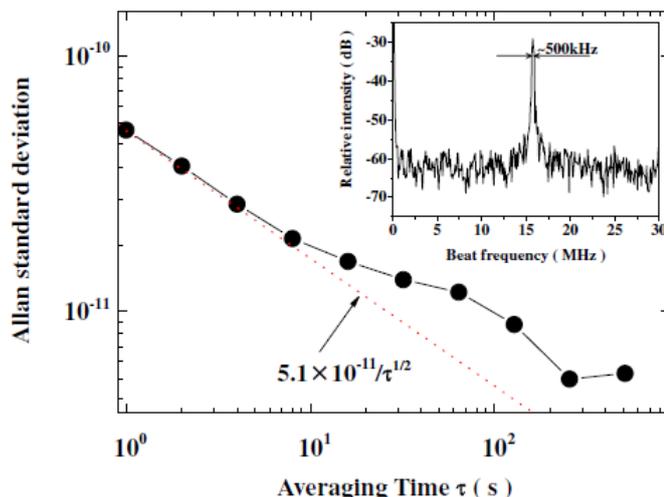


図 21: 光周波数コムを用いて評価した 399nm の外部共振器付半導体レーザーの周波数安定度。図の差し込みは半導体レーザーの測定結果である。

4. 9. 2 時計遷移分光用狭線幅レーザーの開発

Yb:YAG (1030nm) と Nd:YAG (1319nm) レーザーの和周波により波長 578nm の光を生成し [文献 11]、高フィネス ($\sim 400,000$) の縦置き光共振器に対して安定化した (図 22(a))。光共振器の熱膨張係数が 0 になる温度を測定し、光共振器は現在この温度 (21.6°C) に温度制御されている。光周波数コムを用いてこの光源を評価し、周波数安定度は 10 秒で約 2×10^{-14} であることが分かった [文献 15]。これは位相変調をかけた際の残留強度変調によって制限されていると考えられる。このレーザーを用いて、Yb 原子の時計遷移分光に成功した。また、別の Nd:YAG レーザーを用いて、波長 1064nm の光を高フィネスの縦置き光共振器に対して安定化した。上述の狭線幅化されたファイバコムをこの 1064nm のレーザーに対して安定化することで、広帯域にわたるローカルオシレーターの開発に成功した。これを用いて、波長 578nm の光源の評価を開始した。

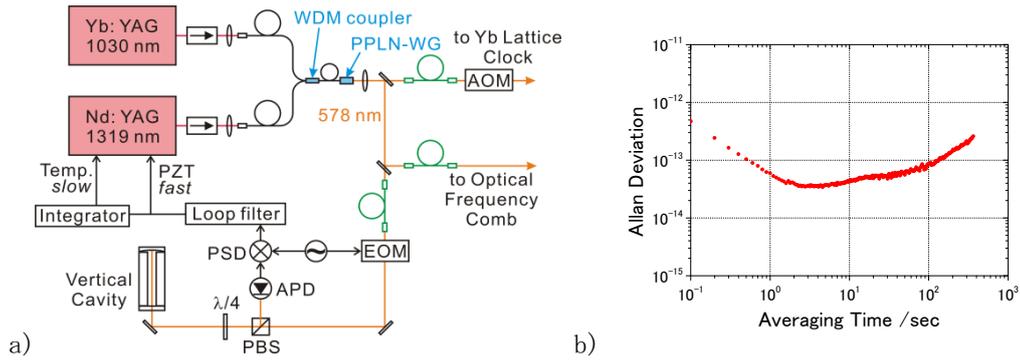


図 22: (a) Yb 光格子時計のためのレーザー光源と安定化方法。(b) 光周波数コムによって測定された光源の安定度。

4. 9. 3 Yb 光格子時計の時計遷移分光実験、及び、絶対周波数計測

極低温 ^{171}Yb 原子を光格子に捕獲し、狭線幅レーザーを用いて、その時計遷移を分光することに成功した (図 23)。また、魔法波長を実験的に求め、759.353(3) nm と決定した。その上、光周波数コムを用いて時計遷移の絶対周波数計測に成功した [文献 14]。時計遷移の中心絶対周波数は、4 本のスペクトル (図 23 b) のピーク周波数をそれぞれフィッティングにより求め、それらの平均値とした。

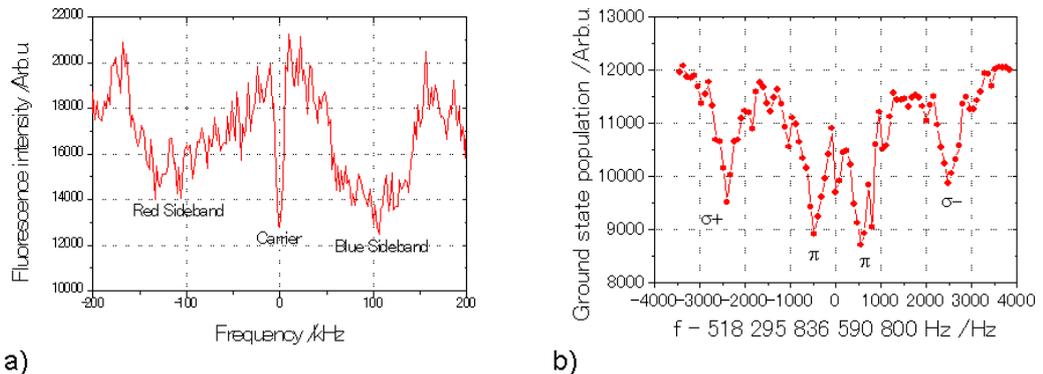


図 23: (a) 観察された時計遷移スペクトル。(b) キャリア成分の拡大図。

図 24 は、時計遷移 $^1\text{S}_0 (F = 1/2) - ^3\text{P}_0 (F = 1/2)$ の 12 回の絶対周波数計測結果である。さらに各種の不確かさ要因を分析した結果 (表 2)、 ^{171}Yb 原子の時計遷移の絶対周波数は、518 295 836 590 864(28) Hz と決定した (相対不確かさ: 5.4×10^{-14}) [文献 14]。この測定値が、2009 年 6 月に国際度量衡局で行われた時間・周波数諮問委員会において周波数標準のリストに新規追加された。これにより、Yb 原子光格子時計も秒の二次表現として採択される道が開かれた。

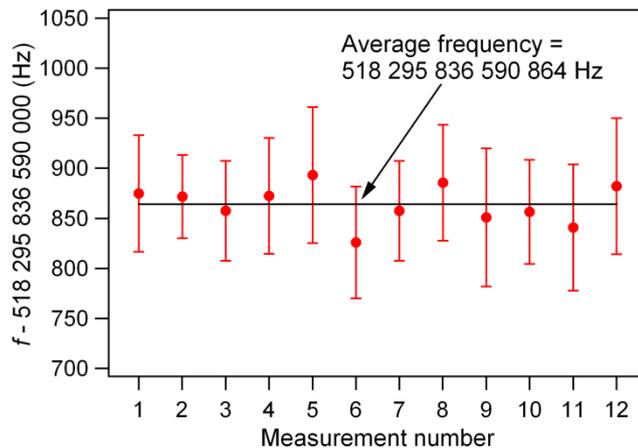


図 24: Yb 光格子時計の絶対周波数測定。

Effect	Correction (Hz)	Uncertainty (Hz)
Blackbody radiation shift	+1.32	0.13
Gravitational shift	-1.19	0.03
2nd order Zeeman shift	+0.4	0.05
Scalar light shift	0	14
Clock laser light shift	-0.04	<0.01
Paper lock error	0	23
UTC (NMIJ)	0	5
Total	+0.49	27

表 2: 171Yb 光格子時計の周波数補正及び周波数不確かさのリスト。

(2)研究成果の今後期待される効果:

更なる不確かさの低減に向けた努力をばらい、我が国からは Sr に次いで 2 件目となる、秒の 2 次表現リストへの掲載を目指す。

4. 10 Yb/Sr 光格子時計周波数比の測定に向けて

(1)研究実施内容及び成果:

Yb 光格子時計の評価のために、Sr 光格子時計の開発に着手した。これにより、マイクロ波を介さない、光-光比較が可能となり、迅速な評価が可能となる。また、Yb/Sr 光格子時計周波数比の測定は、現在の秒の定義であるセシウム原子時計の精度を超える形で周波数比較を可能にする。さらに、微細構造定数の恒常性の実験的検証も可能となると考えられる。具体的には、新たな光学テーブルを購入し、真空装置を組み立てた。また、1次冷却に必要な光(461 nm)のための光源(922 nm)を開発し、PPLN-WG ベースの冷却用光源を用いて、スピン許容遷移を用いた Sr 原子の磁気光学トラップに成功した。リポンプレーザーの周波数安定化には光コムを用いたが、これは、スピン禁制遷移による磁気光学トラップの光源開発にも応用する事が出来る強力な手法である。また、同一真空槽内において Sr/Yb の同時磁気光学トラップにも成功した (図 25)。

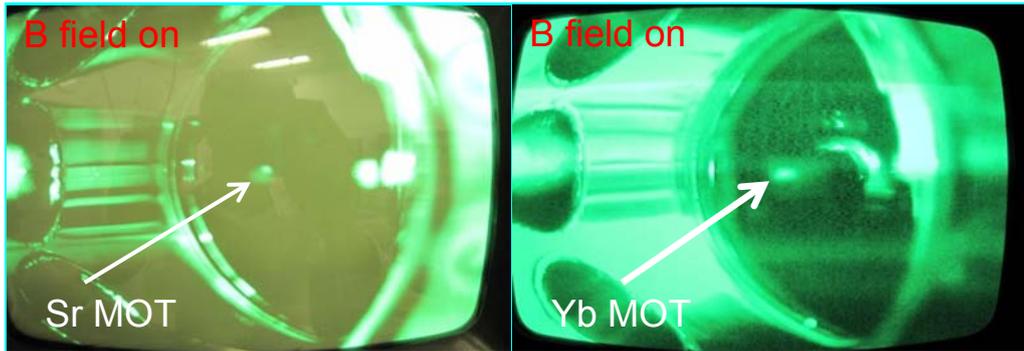


図 25: 同一真空槽内において実現された Sr と Yb の磁気光学トラップ。

(2)研究成果の今後期待される効果:

Sr/Yb の時計遷移周波数比を、Cs 原子時計の精度を越えて決定し、米国 JILA/NIST 研究所における測定データとの比較を行う。この周波数比データ比較は、直接的な光ファイバーリンクが無くとも、光周波数計測結果比較を可能にするという意味で画期的なものとなる。

4. 11 光周波数計測・レーザー周波数安定化・レーザー線幅転送用ファイバコムの開発

(1)研究実施内容及び成果:

長期稼働性に優れるファイバーレーザーを用いた光周波数コム「ファイバコム」を Yb 光格子時計の時計遷移観察用レーザー (578 nm) に適用し、その絶対周波数測定を行った。また、ファイバコムを時計遷移レーザーの線幅評価などに用いるため、ファイバコムの狭線幅化を行った。その結果、1 Hz 以下の相対線幅を得た (図 26) [文献 16]。

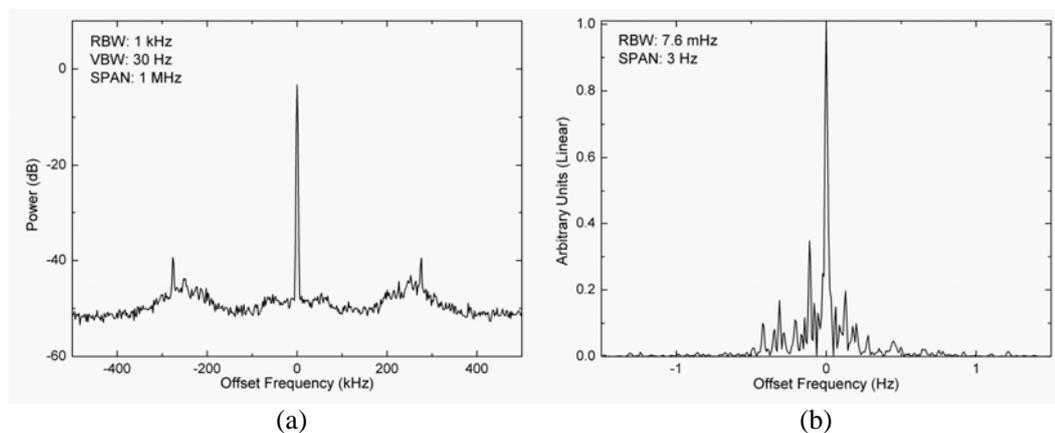


図 26: 二つのファイバコムの比較によって評価されたファイバコムの相対線幅。ファイバコムの相対線幅が 1Hz 以下に達した。

(2)研究成果の今後期待される効果:

レーザー線幅の伝送は、光格子時計の実験にとって大変重要で、実験の効率を大幅に上げることができる。また、ファイバコムはレーザーの周波数計測だけではなく、レーザーの周波数制御にも応用ができ、冷却原子や量子情報などの実験にも欠かせない道具である。

§ 5 成果発表等

(1) 原著論文発表

1. Masao Takamoto, Feng-Lei Hong, Ryouchi Higashi, Yasuhisa Fujii, Michito Imae, and Hidetoshi Katori, "Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic ^{87}Sr Isotope," *J. Phys. Soc. Jpn.* 75, 104302 (2006).
2. Vitaly D. Ovsiannikov, Vitaly G. Pal'chikov, Alexey V. Taichenachev, Valeriy I. Yudin, H. Katori, and M. Takamoto, "Magic-wave-induced $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$ transition in even isotopes of alkaline-earth-metal-like atoms," *Phys. Rev. A* 75, 020501(R) (2007).
3. H. Hachisu, K. Miyagishi, S. G. Porsev, A. Derevianko, V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, M. Takamoto, and H. Katori, "Trapping of Neutral Mercury Atoms and Prospects for Optical Lattice Clocks," *Phys. Rev. Lett.* 100, 053001 (2008).
4. Tomoya Akatsuka, Masao Takamoto, and Hidetoshi Katori, "Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions," *Nat. Phys.* 4, 954 (2008).
5. Mitsuru Musha, Feng-Lei Hong, Kenichi Nakagawa, and Ken-ichi Ueda, "Coherent optical frequency transfer over 50-km physical distance using a 120-km-long installed telecom fiber network," *Opt. Express* 16, 16459 (2008).
6. S. Blatt, A. D. Ludlow, G. K. Campbell, J. W. Thomsen, T. Zelevinsky, M. M. Boyd, J. Ye, X. Baillard, M. Fouche, R. L. Targat, A. Brusch, P. Lemonde, M. Takamoto, F. L. Hong, H. Katori and V. V. Flambaum, "New Limits on Coupling of Fundamental Constants to Gravity Using ^{87}Sr Optical Lattice Clocks," *Phys. Rev. Lett.* 100, 140801 (2008).
7. Takuya Kohno, Masami Yasuda, Hajime Inaba, and Feng-Lei Hong, "Optical Frequency Stability Measurement of an External Cavity Blue Diode Laser with an Optical Frequency Comb," *Jpn. J. Appl. Phys.* 47, 8856 (2008).
8. Jun Ye, H. J. Kimble, and Hidetoshi Katori, "Quantum State Engineering and Precision Metrology Using State-Insensitive Light Traps," *Science* 320, 1734-1738 (2008).
9. Masao Takamoto and Hidetoshi Katori, "Coherence of Spin-Polarized Fermions Interacting with a Clock Laser in a Stark-Shift-Free Optical Lattice," *J. Phys. Soc. Jpn.* 78, 013301 (2009).
10. F.-L. Hong, M. Musha, M. Takamoto, H. Inaba, S. Yanagimachi, A. Takamizawa, K. Watabe, T. Ikegami, M. Imae, Y. Fujii, M. Amemiya, K. Nakagawa, K. Ueda, and H. Katori, "Measuring the frequency of a Sr optical lattice clock using a 120 km coherent optical transfer," *Opt. Lett.* 34, 692 (2009).
11. Feng-Lei Hong, Hajime Inaba, Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda, and Atsushi Onae, "Doppler-free spectroscopy of molecular iodine using a frequency-stable light source at 578 nm," *Opt. Express* 17, 1652 (2009).
12. H. Katori, K. Hashiguchi, E. Yu. Il'inova, V. D. Ovsiannikov, "Magic Wavelength to Make Optical Lattice Clocks Insensitive to Atomic Motion," *Phys. Rev. Lett.* 103, 153004 (2009).
13. M. Takamoto, H. Katori, S. I. Marmo, V. D. Ovsiannikov, and V. G. Pal'chikov, "Prospects for Optical Clocks with a Blue-Detuned Lattice," *Phys. Rev. Lett.* 102, 063002 (2009).
14. Takuya Kohno, Masami Yasuda, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima and Feng-Lei Hong, "One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Fermionic ^{171}Yb Isotope," *Appl. Phys. Express* 2, 072501 (2009).
15. Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Yoshiaki Nakajima, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, "Evaluation of the clock laser for an Yb lattice clock using an optical fibre comb", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 57, 606-612 (2010).

16. Y. Nakajima, H. Inaba, K. Hosaka, Kaoru Minoshima, A. Onae, M. Yasuda, T. Kohno, S. Kawato, T. Kobayashi, T. Katsuyama, and F.-L. Hong, "A multi-branch, fiber-based frequency comb with millihertz-level relative linewidths using an intra-cavity electro-optic modulator," *Opt. Express* 18, 1667 (2010).
17. Tomoya Akatsuka, Masao Takamoto, and Hidetoshi Katori, "Three-dimensional optical lattice clock with bosonic ^{88}Sr atoms," *Phys. Rev. A* 81, 023402 (2010).
18. F. L. Hong and H. Katori, "Frequency Metrology with Optical Lattice Clocks," *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, 080001 (2010).
19. M. Yasuda, T. Kohno, H. Inaba, Y. Nakajima, K. Hosaka, A. Onae, and F.-L. Hong, "Fiber-comb-stabilized light source at 556 nm for magneto-optical trapping of ytterbium," *J. Opt. Soc. Am. B* 27, 7, 1388-1393 (2010).

(2)その他の著作物(総説,書籍など)

1. 香取秀俊, 「究極の原子時間を計る—原子時計の新しい潮流」, 岩波書店【科学】Vol.76 No.10, (2006).
2. 香取秀俊, 「超精密原子時計と原子チップ—アルカリ土類原子のレーザー冷却が可能にした新技術」, 科学立国日本を築く極限に挑む気鋭の研究者たち, 榊裕之監修,財団法人丸文研究交流財団選考委員会編, 日刊工業新聞社, pp291-299(2006).
3. 洪鋒雷, 大苗敦, 「メートルの定義の実現と光コム」, 光アライアンス vol.17, No. 11, p. 42-44 (2006).
4. H. Katori, M. Takamoto, R. Higashi and F.-L. Hong, "An optical lattice clock: ultrastable atomic clock with engineered perturbation", *Proceedings of The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-TOKYO'05)* World Scientific, p. 276-281(2006).
5. 洪鋒雷, 「光コムによる光周波数メトロロジー」, 光学, Vol. 36, No. 2, p. 60-67 (2007).
6. 香取秀俊, 「高精度原子時計が切り開く新たな世界」【第4章 自然の学】学問の扉—東京大学は挑戦する, p. 310-320, 講談社, ISBN-10: 4062140691(2007).
7. 香取秀俊, 「18桁の精度を目指す次世代時間周波数計測—光格子時計・光周波数コム・光リンカー」, *OPTRONICS* 315, p. 167-177 (2008).
8. 洪鋒雷, 「周波数安定化レーザーと光周波数標準」, 光技術コンタクト, 45, 565-570(2007).
9. 洪鋒雷, 「ヨウ素安定化レーザーの現状と動向」, レーザー研究, 35, 235-239(2007).
10. 洪鋒雷, 大嶋新一, 大苗敦, 「標準は今—長さと時間—」, *パリティ*, 22, 48-53 (2008).
11. 安田正美, 「光を用いた次世代原子時計の研究について」, *計量ジャーナル*, 27, 1, 12-15 (2007).
12. M. Yasuda, F. -L. Hong, T. Kohno, H. Inaba, K. Hosaka, C. Willis, T. Kurosu, A. Onae, S. Ohshima, "Present status of the development of a Yb optical lattice clock at NMIJ/AIST", in *Time and Frequency Metrology*, edited by R. Jason Jones, *Proceedings of SPIE Vol. 6673* (SPIE, Bellingham, WA, 2007) 66730D.
13. 香取秀俊, 18桁の精度を目指す次世代時間周波数計測—光格子時計・光周波数コム・光リンカー, *OPTRONICS* 315, 167-177 (2008).
14. 香取秀俊, 「標準は今—光格子時計—」, *パリティ* 23, 96-102, (2008).
15. 洪鋒雷, 「総括:光周波数標準とその発展」, 光アライアンス, Vol.19, No. 9, 1-3, (2008).
16. 香取秀俊, 「時を駆けるロマン」, (社)銀行協会銀行倶楽部, 談話室 p. 2-6, (2009).
17. 香取秀俊, 「わかる時間」, ニュートン別冊, p. 148-149 (2009).
18. 香取秀俊, 「光格子時計による超高精度・時間計測の実現」, *科研費NEWS*, Vol.2, p 9(2009).
19. 香取秀俊, 「光格子時計:硬い原子と柔らかい地球」, *O plus E*(2009).
20. M. Takamoto, T. Akatsuka, and H. Katori, "Optical lattice clocks with single occupancy bosons and spin-polarized fermions," *Proceedings of the 19th International Conference on Laser Spectroscopy* (2009).

21. M. Takamoto, T. Akatsuka, H. Hachisu, H. Katori, "Optical lattice clocks toward 10^{-17} uncertainty," *Proceedings of SPIE*7431, 17 (2009).
22. 香取秀俊, 「光格子時計の発明—そのインパクトと展望—」, レーザー研究 38, 480-487 (2010).
23. 洪鋒雷, "秒の再定義に向けての原子時計の新しい進展—「秒の二次表現」," 日本物理学会誌,65, 2, 80 (2010).
24. 洪鋒雷, "光コム—光科学のイノベーション—," 応用物理,79, 6, 546 (2010).
25. 安田正美, 河野託也, 保坂一元, 稲場肇, 洪鋒雷, "イッテルビウム光格子時計の開発," 自動車技術,64, 6, 99-100.
26. 安田正美, 河野託也, 保坂一元, 稲場肇, 洪鋒雷, " ^{171}Yb 光格子時計の開発," レーザー研究,38, 7, 500-504 (2010).

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表招待講演

① 招待講演

1. 香取秀俊(代理:高本将男), "Optical Lattice Clock," CPT2006, 東京飯田橋カンファレンスセンター,2006年1月11日.
2. 高本将男, "光格子時計の絶対周波数測定," レーザー学会学術講演会第26回年次大会, 埼玉県大宮ソニックシティ, 2006年2月9日.
3. 洪鋒雷, "周波数安定化レーザーから光時計へ," ジョン・ホール博士ノーベル賞記念シンポジウム,電気通信大学, 2006年4月5日.
4. M. Takamoto and H. Katori, "Optical Lattice Clock: Towards Frequency Measurement at 10^{-18} Level," CLEO/QELS and PhAST Conference 2006, Long Beach Convention Center, Long Beach, CA, USA, 22-25 May 2006.
5. T. Akatsuka, M. Takamoto, R. Higashi, F.-L. Hong, and H. Katori, "Optical Lattice Clock: Precision Frequency Measurement", 2006 IEEE International Frequency Control Symposium, Hyatt Regency Hotel, Miami Florida, USA, 3-9 Jun 2006.
6. F.-L. Hong, "Precision measurement and optical frequency metrology," US-Japan Workshop on Quantum Information Science, Wailea Marriot Resort, Hawaii, USA, 16-19 Oct 2006.
7. F.-L. Hong, "Laser frequency control and measurement with an optical comb," 7th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Indian Institute of Technology-Madras, Chennai, India, 4-7 Dec 2006.
8. 香取秀俊, "光格子時計の実現と性能評価," 独立行政法人日本学術振興会産業計測第36委員会研究会, 弘済会館, 千代田区麴町, 2007年5月23日.
9. H. Katori, "Frequency comparison between optical lattice clocks with different lattice geometry," 388. WE-Heraeus-Seminar on Atomic Clocks and Fundamental Constants - ACFC 2007, Physikzentrum Bad Honnef, Germany, 4-7 Jun 2007.
10. Hidetoshi Katori, Masao Takamoto, Tomoya Akatsuka, and Ryoichi Higashi, "Optical Lattice Clocks with Non-Interacting Bosons and Fermions," POSCO International Center, POSTECH, Pohang, Korea, 24 Aug 2007.
11. Hidetoshi Katori, Masao Takamoto, Tomoya Akatsuka, and Ryoichi Higashi, "Frequency Comparison between Optical Lattice Clocks," The 7th Pacific Rim Conference On Lasers and Electro-Optics, CLEO®-Pacific Rim 2007, COEX, Seoul, Korea, 28 Aug 2007.
12. Hidetoshi Katori, Masao Takamoto, Tomoya Akatsuka, and Ryoichi Higashi, "Frequency Comparisons between Optical Lattice Clocks," SPIE Optics East 2007, Seaport World Trade Center, Boston, USA, 11 Sep 2007.
13. H. Katori, "Optical Lattice Clocks with Non-Interacting Bosons and Fermions," International Symposium on Strongly-Correlated Applied Physics, Takeda Hall, Univ.Tokyo, Japan, 27-29 Sep 2007.
14. H. Katori, M. Takamoto, "Frequency comparison of optical lattice clocks with

- non-interacting atoms,” 2nd ESA International Workshop on Optical Atomic Clocks, ESA/ESRIN, Frascati, Rome, Italy, 11 Oct 2007.
15. 香取秀俊, “次世代型原子時計「光格子時計」の開発と要求スペック,” 新世代ネットワーク基盤技術の最先端, 独立行政法人情報通信研究機構本部4号館2階大会議室, 2007年12月20日.
 16. H. Katori, “Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions,” The 6th Asia Pacific Laser Symposium, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, 30 Jan 2008.
 17. 香取秀俊, “光格子時計の研究最前線,” 応用光学懇親会 第136回講演会「時を正確に刻む技術とその応用, 島津マルチホール(島津製作所関西支社内), 大阪, 2008年3月14日.
 18. F.-L. Hong, Y. Fujii, M. Imae, M. Takamoto, R. Higashi, H. Katori, “Frequency measurement of an optical lattice clock,” IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, Embassy Suites Hotel, Portland, OR, USA, 23-25 Jul 2007.
 19. Michito Imae, Yasuhisa Fujii, Feng-lei Hong, Masao Takamoto, Ryoichi Higashi and Hidetoshi Katori, "Precise time and frequency transfer link used for the uncertainty evaluation of Sr. optical lattice clock," SPIE conference on Time and Frequency Metrology, San Diego, Aug 2007.
 20. 洪鋒雷, “光コムと分子時計への応用,” 日本物理学会第62回年次大会, 北海道大学, 2007年9月22日.
 21. 洪鋒雷, “光コムによる光周波数メトロロジー,” 計測標準フォーラム第5回合同講演会, 大田区産業プラザ PiO, 東京, 2007年11月22日.
 22. 洪鋒雷, “レーザーで実現する超精密な物差しと時計,” 応用物理学会量子エレクトロニクス研究会公開講演会, 明治大学, 2007年12月23日.
 23. 洪 鋒雷, “Measurement and control of laser frequency using an optical comb,” エクストリームフォトンクスセミナー, 理研, 和光市, 2008年4月24日.
 24. Hidetoshi Katori, “Optical Lattice Clocks with Non-Interacting Bosons and Fermions”, 2008 IEEE International Frequency Control Symposium, Hilton Hawaiian Village Hotel, Honolulu, Hawaii, USA, 19-21 May 2008 .
 25. Hidetoshi Katori, “Optical lattice clocks with bosonic/fermionic Sr and with the other atomic elements,” The Search for Variations of Fundamental Couplings and Mass, Perimeter institute for theoretical Physics, Waterloo, Canada, Jul 2008.
 26. 香取秀俊, “Optical lattice clocks with bosonic/fermionic Sr and with the other atomic elements,” 量子情報未来テーマ開拓研究会, 沖縄県知念村, ホテルサンライズ知念, 2008年9月5日.
 27. 香取秀俊, “光格子時計の実現と展望,” 第3回量子ICT運営会議, メルパルク東京「瑞雲」, 2008年9月29日.
 28. Hidetoshi Katori, “Optical lattice clocks: Progress in 7 years and next steps,” 7th Symposium on Frequency Standards and Metrology, Asilomar Conference Grounds Pacific Grove, California, USA, 5-11 Oct 2008.
 29. Masao Takamoto, Tomoya Akatsuka and Hidetoshi Katori, “Optical Lattice Clocks with Single Occupancy Bosons and Spin-Polarized Fermions,” Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency (ATF 2008), Mercure Convention Center, Jakarta, Indonesia, 1 Nov 2008.
 30. F.-L. Hong, M. Musha, M. Takamoto, H. Inaba, S. Yanagimachi, A. Takamizawa, K. Watabe, T. Ikegami, M. Imae, Y. Fujii, M. Amemiya, K. Nakagawa, K. Ueda, and H. Katori, “Absolute Frequency Measurement of Sr Optical Lattice Clock Using Coherent Optical Fiber Link Over a 120-km Fibre,” ATF2008, INDONESIA, 1 Nov 2008.
 31. Hidetoshi Katori, “Optical atomic clocks,” COAST/CORAL Autumn School on Advanced Laser Science, Hotel Villa Fontaine Shiodome, Tokyo, Japan, 22 Nov

- 2008.
32. Hidetoshi Katori, “Optical lattice clocks and optical networks”, 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 光量子科学研究センター 発足記念国際シンポジウム, 東京大学理学部, Tokyo, Japan, 1 Dec 2008.
 33. 香取秀俊, “光格子時計と光ネットワーク,” 第1回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム, 小柴ホール, 東京大学, 2009年1月23日.
 34. Hidetoshi Katori (代理: 高本将男), “Optical lattice clock,” 2009 JOINT RESEARCH SEMINAR BETWEEN INDUSTRIAL TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE AND THE UNIVERSITY OF TOKYO, 台湾工業技術研究院, Taiwan, 25 Mar 2009.
 35. Masao Takamoto, Tomoya Akatsuka, Hidekazu Hachisu, Tetsushi Takano, Kenichiro Totsuka, Hidetoshi Katori, “Optical lattice clocks with single occupancy bosons and spin-polarized fermions toward 10^{-17} accuracy,” 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LASER SPECTROSCOPY, 北海道屈斜路, 8-12 Jun 8-12 2009.
 36. Hidetoshi Katori, “Optical Lattice Clocks Toward 10^{-17} Uncertainty”, Cold atoms and molecules: Collisions, Field-effects, and Applications, Kyoto University, Kyoto, 23-26 Jun 2009.
 37. Hidetoshi Katori (代理: 高本将男), Tomoya Akatsuka, Hidekazu Hachisu, “Optical lattice clocks toward 10^{-17} uncertainty,” SPIE Optics+Photonics 2009, San Diego Convention Center, USA, 2 Aug 2009.
 38. Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Atsushi Ihara, Masami Yasuda, Kazumoto Hosaka, Takuya Kohno, Kaoru Minoshima, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, “Fiber-based frequency combs for an Yb optical lattice clock,” SPIE, Optics + Photonics 2009 (San Diego Convention Center, San Diego, USA, 5 Aug 2009.
 39. Hidetoshi Katori, “Optical Lattice Clocks Toward 10^{-17} Uncertainty”, 8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2009), Shanghai International Convention Center, Shanghai, China, 30 Aug -3 Sep 2009.
 40. Hidetoshi Katori, “Optical Lattice Clocks Toward 10^{-17} Uncertainty,” Ultracold Group II Atoms 2009 Workshop, Joint Quantum Institute (JQI), NIST, and the University of Maryland, Maryland, USA, 17-19 Sep 2009.
 41. Hidetoshi Katori, “Stories behind developing Optical Lattice Clocks: simulating trapped-ion physics with neutral atoms and beyond,” KOLLOQUIUM, MAX PLANCK INSTITUT FÜR QUANTENOPTIK, Garching, Germany, 20 Oct 2009.
 42. F.-L. Hong, “From lasers to combs,” APMP-TCL Workshop on Interferometry and Comb Measurements, Kuala Lumpur, Malaysia, 13 Dec 2009.
 43. 香取秀俊, “atomic clock,” 第4回日仏先端科学シンポジウム, ENSMA ホール, フランス, 2010年1月22日~24日
 44. H. Katori, “Optical lattice clocks and frequency comparisons”, Symposium on "Physics and Chemistry of Coherently Controlled Quantum Systems," Meitetsu Inuyama Hotel, Aichi, 18 Mar 2010.
 45. Hidetoshi Katori, “Optical lattice clocks and optical networks: a new probe for science,” John L. Hall 先生 若手研究者との集い, 東京大学 本郷キャンパス 理学部 1号館, 小柴ホール 2009年3月25日.
 46. 香取 秀俊, “Atomic clocks: Past limit, present, and feature, ” 物理学教室コロキウム, 東京大学理学部 4号館 2階 1220号室, 2009年5月22日.
 47. 香取秀俊, “光格子時計とネットワーク—18桁の時間計測を目指して—「実験物理学の挑戦」,” 東京理科大学理工学部物理学科, 野田キャンパス, 2009年7月10日.
 48. 洪鋒雷, “レーザー一周波数計測と次世代原子時計,” 青山学院物理・数理コロキウム, 青山学院大学, 2009年11月13日.
 49. 高本将男, “光時計の紹介と今後の展望について,” 重力波研究交流会, 東京大学本郷キャンパス理学部 1号館, 2009年12月4日.

50. 香取秀俊, “光格子時計,” 量子エレクトロニクス研究会『量子情報の最前線と今後 10 年の展開』, 上智大学軽井沢セミナーハウス, 2010 年 1 月 8-10 日.
51. 香取秀俊, (招待講演), “2 台の光格子時計の比較による原子時計の性能評価,” レーザー学会学術講演会第 30 回年次大会, 千里ライフサイエンスセンター, 大阪, 2010 年 2 月 3 日.
52. H. Katori, “Five years’ progress in optical lattice clocks,” 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 9 Apr 2010.
53. **(Tutorial)** H. Katori, “Optical Lattice Clocks toward 10^{-17} Uncertainty,” CLEO/QELS: 2010 Laser Science to Photonic Applications, San Jose McEnergy Convention Center in San Jose, California, 17 May 2010.
54. **(Plenary talk)** Hidetoshi Katori, “Optical Lattice Clocks and Frequency Comparisons,” 2010 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Daejeon convention center, Daejeon, Korea, 13-18 Jun, 2010.
55. Hidetoshi Katori, “Optical Lattice Clocks & Frequency Comparisons,” 22nd International Conference on Atomic Physics, Cairns, Tropical North Queensland, Australia, 25-30 Jul 2010
56. Masao Takamoto, Tetsushi Takano, and Hidetoshi Katori, “Optical lattice clock,” International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2010), IWA3, Korston Hotel, Kazan, 23-26 Aug 2010.
57. Hidekazu Hachisu, Masao Takamoto and Hidetoshi Katori, “Measurement of The Blackbody Radiation Shift Using a Cryogenic SR Optical Lattice Clock,” 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10), A3b-5, Toyama International Conference Center, Toyama, 22-26 Sep 2010.
58. (スクール講演)香取秀俊, “量子計測量子情報処理プロジェクト 第 1 回夏期研修会,” 縄県知念村, ホテルサンライズ知念, 2010 年 8 月 22-23 日
59. Feng-Lei Hong, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Takuya Kohno, Masami Yasuda, Daisuke Akamatsu, and Atsushi Onae, “Optical Frequency Metrology with a Fiber-Based Frequency Combs and Optical Lattice Clocks,” Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, Hong Kong, MA1-4, 5 (2010), 4 Apr 2010.
60. Feng-Lei Hong, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Takuya Kohno, Masami Yasuda, Daisuke Akamatsu, and Atsushi Onae, “Fiber-Based Frequency Combs and Optical Lattice Clocks,” IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting, Playa del Carmen, Mexico, MC4.1, 2 (2010), 19 Jul 2010.
61. 洪鋒雷, “光コムー超精密計測標準研究部門と超短パルスの出会いー,” 第 71 回秋季応用物理学学会 特別シンポジウム「レーザー: 生誕から半世紀を経て, 新時代を切り拓く究極の光を求めて進化し続けるその魅力とは?」, 第 71 回応用物理学学会学術講演会, (長崎大学), 2010 年 9 月 15 日.
62. Masami Yasuda, Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Daisuke Akamatsu and Feng-Lei Hong, “IMPROVING THE PERFORMANCE OF THE 171YB OPTICAL LATTICE CLOCK AT NMIJ, AIST”, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10), A3b-5, Toyama International Conference Center, Toyama, 22-26 Sep 2010.
63. Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Kana Iwakuni, Masami Yasuda, Takuya Kohno, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, “DEVELOPMENT OF NARROW LINEWIDTH LASERS USING A FIBRE-BASED FREQUENCY COMB STABILIZED TO AN ULTRA STABLE LASER AT 1064 NM”, Ada-3, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10), A3b-5, Toyama International Conference Center, Toyama, 22-26 Sep 2010.
64. Feng-Lei Hong, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Takuya Kohno, Masami Yasuda, Daisuke Akamatsu, and Atsushi Onae, “APPLICATION

OF OPTICAL FREQUENCY COMBS FOR FREQUENCY STANDARDS”, DC2-1, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10), A3b-5, Toyama International Conference Center, Toyama, 22-26 Sep 2010.

65. Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Kana Iwakuni, Masami Yasuda, Takuya Kohno, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, “Low noise optical frequency synthesizer for optical lattice clocks,” International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA 2010 - Offshore, Sydney, Australia, 20 Sep 2010.

②口頭発表

1. 岡村幸太郎, 香取秀俊, “連続波極低温スカラー原子線源の特性評価Ⅱ,” 日本物理学会第 61 回年次大会, 松山大学, 2006 年 3 月 29 日.
2. 蜂須英和, 山下公平, 香取秀俊, “シュタルク・アトムチップ中の原子の時間・空間分解観測,” 日本物理学会第 61 回年次大会, 2006 年 3 月 29 日.
3. 高本将男, 東亮一, 香取秀俊, “光格子中の原子の精密分光実験,” 日本物理学会第 61 回年次大会, 松山大学, 2006 年 3 月 29 日.
4. 赤塚友哉, 山内暁, 東亮一, 高本将男, 香取秀俊, “3 次元光格子時計の開発,” 日本物理学会第 61 回年次大会, 松山大学, 2006 年 3 月 29 日.
5. 洪鋒雷, “周波数安定化レーザーと光周波数計測,” 通研共同プロジェクト研究会(超高速光パルス制御技術), 仙台, 2005 年 11 月 22 日.
6. 洪鋒雷, “超短パルス光コムと周波数安定化レーザー,” 第38回応用物理学会スクール B, 東京都, 2006 年 3 月 24 日.
7. 洪鋒雷, “光コムによるレーザー周波数の計測と制御,” 日本物理学会第 61 回年次大会, 松山大学, 2006 年 3 月 28 日.
8. F.-L. Hong, M. Yasuda, A. Onae, “L light source for the 1S0-3P0 optical clock transition in ytterbium,” CLEO/QELS and PhAST Conference 2006, LONG BEACH CONVENTION CENTER, Longbeach, CA, USA, 22-25 May 2006.
9. F.-L. Hong, M. Yasuda, H. Inaba, A. Onae, “Optical frequency metrology based on a sum-frequency generation,” Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Politecnico Di Torino, Torino, Italy, 9-14 Jul 2006.
10. 赤塚友哉, 高本将男, 東亮一, 香取秀俊, “3 次元光格子時計の開発Ⅱ,” 日本物理学会秋季大会 2006, 千葉大学, 2006 年 9 月 24 日.
11. 東亮一, 高本将男, 洪鋒雷, 今江理人, 藤井靖久, 香取秀俊, “ストロンチウム光格子時計の絶対周波数計測Ⅱ,” 日本物理学会秋季大会 2006, 千葉大学, 2006 年 9 月 24 日.
12. 安田正美, 洪鋒雷, 河野託也, 黒須隆行, 石川純, 大苗敦, 香取秀俊, “Yb 光格子時計の開発,” 日本物理学会秋季大会 2006, 千葉大学, 2006 年 9 月 24 日.
13. 笠井晶二, 藤井靖久, 今江理人, “放送暦を用いた中基線での GPS 搬送波位相利用精密時刻比較,” GPS/GNSS シンポジウム 2006, 東京海洋大学, 2006 年 11 月 16 日.
14. 赤塚友哉, 高本将男, 東亮一, 香取秀俊, “3次元光格子時計の開発Ⅲ,” 日本物理学会 2007 春季大会, 鹿児島大学, 2007 年 3 月 19 日.
15. 高本将男, 赤塚友哉, 東亮一, 香取秀俊, “ ^{87}Sr - ^{88}Sr 光格子時計の安定度評価,” 日本物理学会 2007 春季大会, 鹿児島大学, 2007 年 3 月 19 日.
16. 東亮一, 高本将男, 中川雄介, 宮岸浩太郎, 香取秀俊, “Sr/Yb デュアル光格子の実現,” 日本物理学会 2007 春季大会, 鹿児島大学, 2007 年 3 月 19 日.
17. 藤井靖久, 今江理人, 雨宮正樹, 鈴山智也, “GPS 搬送波位相解析精密時刻比較ソフトウェアの開発,” 電子情報通信学会 2007 年総合大会, 名城大学, 2007 年 3 月 21 日.
18. 蜂須英和, 宮岸浩太郎, 小林弘侑, 光田尚生, 高本将男, 香取秀俊, “光格子時計実現に向けた水銀原子の磁気光学トラップ,” 日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学, 2008 年 3 月 25 日.
19. 高本将男, 香取秀俊, “1次元光格子時計でのスピン偏極原子のコヒーレント操作,” 日本

- 物理学会第63回年次大会, 近畿大学, 2008年3月25日.
20. 赤塚友哉, 高本将男, 東亮一, 香取秀俊, “ ^{87}Sr - ^{88}Sr 光格子時計の周波数比較実験,” 日本物理学会第63回年次大会, 近畿大学, 2008年3月25日.
 21. 濱田健一, 蜂須英和, 長藤圭介, 香取秀俊, “微細電極・格子型シュタルクアトムチップの開発,” 日本物理学会第63回年次大会, 近畿大学, 2008年3月25日.
 22. F.-L. Hong, “Frequency measurement of an optical lattice clock using an optical comb,” NMIJ-BIPM Joint Workshop on Optical Frequency Comb, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 18 May 2007.
 23. M. Yasuda, F.-L. Hong, T. Kohno, H. Inaba, K. Hosaka, C. Willis, T. Kurosu, A. Onae, H. Katori, “Present status of the development of the Yb optical lattice clock at NMIJ/AIST” IEEE/LEOS, Portland, 23 Jul 2007.
 24. 藤井靖久, 今江理人, 鈴山智也, 雨宮正樹, 笠井昌二, 北田健, “短基線でのGPS搬送波位相を利用した高精度周波数比較システムの構築,” 電気学会電子回路研究会, 東京電機大学, 2007年9月7日.
 25. 安田正美, 洪鋒雷, 河野託也, 黒須隆行, 稲場肇, 保坂一元, 香取秀俊, “Yb光格子時計の開発II,” 日本物理学会第62回年次大会, 北海道大学, 2007年9月24日.
 26. 高本将男, “光格子中の極低温原子気体を用いた超精密計測,” 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学上田キャンパス, 2008 年 9 月 21 日.
 27. M. Amemiya, M. Imae, Y. Fujii, T. Suzuyama, F.-L. Hong, M. Takamoto, and H. Katori, “Bi-Directional Optical Amplifier Developed for Stable Time and Frequency Comparison,” ATF 2008 Indonesia, 31 Oct 2008.
 28. 橋口幸治, 蜂須英和, 稲場肇, 中嶋善晶, 高本将男, 香取秀俊, “ファイバコムで安定化した中赤外レーザーによる極低温原子の生成,” 日本物理学会第 64 回大会, 立教大学, 2009 年 3 月 29 日.
 29. 赤塚友哉, 高本将男, 香取秀俊, “Sr 光格子時計におけるディック効果の評価と改善,” 日本物理学会第 64 回大会, 立教大学, 2009 年 3 月 29 日.
 30. 蜂須英和, 中花健太郎, 高本将男, 香取秀俊, “低温動作 Sr 光格子時計による黒体シフト評価,” 日本物理学会第 64 回大会, 立教大学, 2009 年 3 月 29 日.
 31. M. Musha, K. Nakagawa, K. Ueda, F.-L. Hong, “Coherent Optical Frequency Transfer via 110-km Urban Fiber Network,” CPEM 2008, Bloomfield, 11Jun 2008.
 32. F.-L. Hong, H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, T. Kohno, K. Watabe, “An Iodine-Stabilized Yb: YAG Laser,” CPEM 2008, Bloomfield, 10 Jun 2008.
 33. K. Hosaka, M. Yasuda, H. Inaba, T. Kohno, A. Onae, and F.-L. Hong, “Development of a light source with a sub-hertz linewidth for an Yb optical lattice clock,” CPEM 2008, Bloomfield, 9 Jun 2008.
 34. M. Musha, K. Nakagawa, K. Ueda, F.-L. Hong, “Precision optical carrier transmission over 110km through urban fiber network,” URSI, Chicago, USA, 12 Aug 2008.
 35. 武者満, 中川賢一, 植田憲一, 洪鋒雷, “ファイバネットワークを用いた基準周波数信号の長距離精密伝送,” 第 69 回応用物理学会学術講演会, 名城大学, 2008 年 9 月 3 日.
 36. 洪鋒雷, 武者満, 高本将男, 稲場肇, 柳町真也, 高見澤昭文, 渡部謙一, 池上健, 今江理人, 藤井靖久, 雨宮正樹, 中川賢一, 植田憲一, 香取秀俊, “つくば-東京間の光周波数キャリア伝送による Sr 光格子時計の絶対周波数測定,” 第 69 回応用物理学会学術講演会, 名城大学, 2008 年 9 月 3 日.
 37. Yasuhisa Fujii, Michito Imae, “A REMOTE FREQUENCY SYNCHRONIZATION SYSTEM ANALYZING GPS CARRIER PHASE BASED ON COMMON-VIEW METHOD,” ATF2008, Indonesia, 29-31 Oct 2008.
 38. 洪鋒雷, 武者満, 高本将男, 稲場肇, 柳町真也, 高見澤昭文, 渡部謙一, 池上健, 今江理人, 藤井靖久, 雨宮正樹, 中川賢一, 植田憲一, 香取秀俊, “120km ファイバの光周波数キャリア伝送による Sr 光格子時計の絶対周波数測定,” 日本物理学会 2008 年秋季

- 大会, 岩手大学上田キャンパス, 2008年9月20日.
39. 河野託也, 安田正美, 稲場肇, 中嶋善晶, 保坂一元, 洪鋒雷, “全ファイバー化レーザーシステムによる Yb 原子 intercombination MOT の生成,” 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学上田キャンパス, 2008 年 9 月 20 日.
 40. F.-L. Hong, M. Musha, M. Takamoto, H. Inaba, S. Yanagimachi, A. Takamizawa, K. Watabe, T. Ikegami, M. Imae, Y. Fujii, M. Amemiya, K. Nakagawa, K. Ueda, and H. Katori, “Frequency Measurement of a Sr Optical Lattice Clock Using a Coherent Optical Link over a 120-km Fiber,” CLEO/IQEC 2009, Baltimore, USA, 6 Jun 2009.
 41. Yoshiaki Nakajima, Hajime Inaba, Kazumoto Hosaka, Atsushi Ihara, Kenichi Watabe, Atsushi Onae, Kaoru Minoshima, Sakae Kawato, Takao Kobayashi, Toshio Katsuyama, and Feng-Lei Hong, “A low-noise, octave-spanning optical frequency comb generated by a mode-locked fiber laser with an intracavity electro-optic modulator,” CLEO/IQEC 2009, Baltimore, USA, 6 Jun 2009.
 42. Masami Yasuda, Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Atsushi Onae, Hidetoshi Katori, and Feng-Lei Hong, “Development of an Yb optical lattice clock using a fermionic isotope,” SPIE, Optics + Photonics 2009 (San Diego Convention Center, San Diego, USA, 5 Aug 2009).
 43. Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Yoshiaki Nakajima, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, “A Narrow-Linewidth Laser at 578 nm for an Yb Optical Lattice Clock,” QuAMP09 (International conference on Quantum, Atomic, Molecular and Plasma Physics), Leeds, UK, 6-10 Sep 2009.
 44. 稲場 肇, 中嶋 善晶, 保坂 一元, 美濃島 薫, 河野 託也, 安田 正美, 洪 鋒雷, “光周波数コムを用いた狭線幅レーザーの光周波数変換 (1),” 応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009 年 9 月 10 日.
 45. 中嶋 善晶, 稲場 肇, 保坂 一元, 河野 託也, 河野 託也, 安田 正美, 美濃島 薫, 小林喬郎, 川戸 栄, 勝山 俊之, 洪 鋒雷, “光周波数コムを用いた狭線幅レーザーの周波数変換 (2),” 応用物理学会学術講演会, 富山大学, 2009 年 9 月 10 日.
 46. 保坂一元, 安田正美, 河野託也, 稲場肇, 中嶋善晶, 洪鋒雷, “Yb 光格子時計用狭線幅レーザー光源の開発,” 日本物理学会, 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009 年 9 月 25-28 日.
 47. 河野託也, 安田正美, 稲場肇, 中嶋善晶, 保坂一元, 洪鋒雷, “ ^{171}Yb 原子を用いた 1 次元光格子時計の絶対周波数計測,” 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009 年 9 月 25-28 日.
 48. 洪鋒雷, “次世代原子時計: 「秒の二次表現」について,” 日本物理学会, 2009 年秋季大会, 熊本大学, 2009 年 9 月 25-28 日.
 49. 高野哲至, 高本将男, 香取秀俊, “ ^{87}Sr - ^{88}Sr 時計遷移同位体シフト測定の不確かさの改善,” 日本物理学会 2010 年秋季大会 25aRF2, 大阪府立大学, 2010 年 9 月 25 日.
 50. Yoshiaki Nakajima, Hajime Inaba, Kazumoto Hosaka, Kana Iwakuni, Kaoru Minoshima, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, “All-fiber-based frequency comb with an intra-cavity waveguide electro-optic modulator,” The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2010, San Jose, CA, USA, 17 May 2010.
 51. Masami Yasuda, Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, and Feng-Lei Hong, “Yb Optical Lattice Clock at NMIJ, AIST,” The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2010, San Jose, CA, USA, 17 May 2010.
 52. Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Kana Iwakuni, Masami Yasuda, Takuya Kohno, Daisuke Akamatsu, Kaoru Minoshima, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, “A new clock laser system for an Yb optical lattice clock using a fiber-based frequency comb stabilized to a narrow linewidth laser at 1064 nm,” The Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) 2010,

- Daejeon, Korea, 14 Jun 2010.
53. Daisuke Akamatsu, Masami Yasuda, Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, and Feng-Lei Hong, "MAGNETO-OPTICAL TRAP OF STRONTIUM USING A WAVEGUIDE FREQUENCY CONVERTER," 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10), A3a-6, Toyama International Conference Center, Toyama, 22-26 Sep 2010.
 54. 安田正美, 河野託也, 保坂一元, 稲場肇, 中嶋善晶, 洪鋒雷, "One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Fermionic ^{171}Yb Isotope," 第 71 回秋季応用物理学会優秀論文賞受賞記念講演, 長崎大学, 2010 年 9 月 14 日.
 55. 稲場肇, 保坂一元, 安田正美, 赤松大輔, 大苗敦, 中嶋善晶, 洪鋒雷, "光周波数コムを用いた 633nm よう素安定化ヘリウムネオンレーザーの国際比較「CCL-K11」," 第 71 回応用物理学会学術講演会, 長崎大学, 2010 年 9 月 14 日.
 56. 保坂一元, 稲場肇, 中嶋善晶, 岩国加奈, 安田正美, 河野託也, 赤松大輔, 大苗敦, 洪鋒雷, "光格子時計のための新しい狭線幅レーザー光源," 第 71 回応用物理学会学術講演会, 長崎大学, 2010 年 9 月 14 日.
 57. 安田正美, 河野託也, 稲場肇, 中嶋善晶, 保坂一元, 赤松大輔, 洪鋒雷, " ^{171}Yb 光格子時計の高度化," 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 2010 年 9 月 25 日.

③ ポスター発表

1. 安田正美, 洪鋒雷, 大苗敦, 石川純, 香取秀俊, "Development of an optical lattice clock in NMIJ, AIST," IFCS, Miami FL, USA, 5 Jun 2006.
2. 安田正美, 洪鋒雷, 大苗敦, 石川純, 香取秀俊, "Development of an optical lattice clock in NMIJ, AIST," CPEM, Torino Italy, 13 Jul 2006.
3. M.Takamoto and H.Katori, "One-dimensional optical lattice clock with a spin-polarized fermionic ^{87}Sr isotope," The 10th US-JAPAN Joint Seminar (Beaver Run Resort & Conference Center, Breckenridge, Colorado, USA, 22-25 Aug 2006.
4. Yasuhisa Fujii, Michito Imae, "Development of the Precise Time Transfer Software Analyzing GPS Carrier Phase With Common-View Method," ATF2006 (INDIA, 12 Dec 2006.
5. Masao Takamoto and Hidetoshi Katori, "Optical Lattice Clocks with Single Occupancy Bosons and Spin-Polarized Fermions," The 21st International Conference on Atomic Physics (ICAP2008), The University of Connecticut, USA, 29 Jul 2008.
6. Kouji Hashiguchi, Hidekazu Hachisu, Yoshiaki Nakajima, Hajime Inaba, Masao Takamoto, Hidetoshi Katori, "LASER COOLING OF STRONTIUM ATOMS BY A MID-INFRARED LIGHT STABILIZED WITH A FIBER-BASED FREQUENCY COMB," 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LASER SPECTROSCOPY ICOLS 2009, Kussaharo, Hokkaido, Japan, 9 Jun 2009.
7. Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Yoshiaki Nakajima, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, "Development of an Ultra-Narrow-Linewidth Laser for Interrogating the $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ Clock Transition in Yb atoms," European Frequency and Time Forum (EFTF) and International Frequency Control Symposium (IFCS), Besançon, France, 20-24 Apr 2009.
8. Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Masami Yasuda, and F. L. Hong, "Absolute frequency measurement of the $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ optical clock transition in ^{171}Yb atom," 19th International Conference on Laser Spectroscopy," Kussaharo, Hokkaido, Japan, 7-12 Jun 2009.
9. 高本将男, 高野哲至, 香取秀俊, "ノイズ相関を持った時計レーザーによって励起された 2 台の光格子時計の安定度評価," 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010 年 3 月 21 日.

10. 高野哲至, 戸塚健一郎, 高本将男, 香取秀俊, “ ^{88}Sr 光格子時計の魔法波長の同定と周波数安定度の改善,” 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010 年 3 月 21 日.
11. 蜂須英和, 高本将男, 香取秀俊, “ストロンチウム光格子時計の黒体輻射シフト評価,” 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010 年 3 月 21 日.
12. 橋口幸治, 蜂須英和, 稲場肇, 中嶋善晶, 高本将男, 香取秀俊, “Sr 原子の中赤外遷移を用いた磁気光学トラップの生成,” 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010 年 3 月 23 日.
13. 牛島一朗, 吉峯功, 高野哲至, 高本将男, 香取秀俊, “原子デフレクタによる高輝度原子ビームの生成,” 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学, 2010 年 3 月 23 日.
14. Koji Hashiguchi, Hidekazu Hachisu, Yoshiaki Nakajima, Hajime Inaba, Masao Takamoto and Hidetoshi Katori, “Magneto-Optical Trapping of Sr atoms on the $3P_2$ - $3D_3$ transition at 2.9 μm ,” 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 8TH-12, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 8 Apr 2010.
15. Hidekazu Hachisu, Masao Takamoto and Hidetoshi Katori, “Measurement of the blackbody radiation shift using a cryogenic Sr optical lattice clock,” 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 8TH-14, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 8 Apr, 2010.
16. Tetsushi Takano, Kenichiro Totsuka, Masao Takamoto and Hidetoshi Katori, “Improvement of frequency uncertainty of 3D bosonic optical lattice clock towards 10^{-16} uncertainty,” 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 8TH-17, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 8 Apr 2010.
17. Masao Takamoto, Tetsushi Takano and Hidetoshi Katori, “Frequency comparison between two optical lattice clocks,” 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 8TH-18, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 8 Apr 2010.
18. Ichiro Ushijima, Isao Yoshimine, Tetsushi Takano, Masao Takamoto and Hidetoshi Katori, “Laser and evaporative cooling toward Fermi Degenerate ^{87}Sr ,” 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 8TH-19, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 8 Apr 2010.
19. Koji Hashiguchi, Hidekazu Hachisu, Yoshiaki Nakajima, Hajime Inaba, Masao Takamoto and Hidetoshi Katori, “Laser cooling of Sr atoms on the $3P_2$ - $3D_3$ transition at 2.9 μm ,” 22nd International Conference on Atomic Physics, Cairns convention center, Cairns, Australia, 24-28 Jul 2010.
20. Tetsushi Takano, Masao Takamoto and Hidetoshi Katori, “Frequency comparison between two optical lattice clocks towards 10^{-16} uncertainty,” 22nd International Conference on Atomic Physics, Cairns convention center, Cairns, Australia, 24-28 Jul 2010.
21. Masami Yasuda, Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Daisuke Akamatsu, and Feng-Lei Hong, “Improvement of the 171Yb optical lattice clock,” 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 8 Apr 2010.
22. Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Kana Iwakuni, Masami Yasuda, Takuya Kohno, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, “A highly stable laser system for optical lattice clocks using a fibre-based frequency comb stabilized to a narrow linewidth laser at 1064 nm,” 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 8 Apr 2010.
23. Daisuke Akamatsu, Masami Yasuda, Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, , and Feng-Lei Hong, “Development of the Sr optical lattice clock at NMIJ, AIST,” 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 8 Apr 2010.
24. Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Kana Iwakuni, Masami

- Yasuda, Takuya Kohno, Daisuke Akamatsu, Kaoru Minoshima, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, “Fiber-based frequency comb with millihertz-level relative linewidths for optical lattice clocks,” WeP-37, The Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) 2010, Daejeon, Korea, 16 Jun 2010.
25. Daisuke Akamatsu, Masami Yasuda, Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, and Feng-Lei Hong, “Toward the Yb/Sr Frequency Ratio Measurement: Development of the Sr optical lattice clock at NMIJ, AIST,” WeP-41, The Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) 2010, Daejeon, Korea, 16 Jun 2010.
26. Masami Yasuda, Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, and Feng-Lei Hong, “Improvement of the ^{171}Yb optical lattice clock at NMIJ, AIST,” WeP-42, The Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) 2010, Daejeon, Korea, 16 Jun 2010.

(4) 知財出願

- ① 国内出願総数 0 件, 平成 17 年度～H22 年度 無し
- ② 海外出願総数 0 件 平成 17 年度～H22 年度 無し
- ③ その他の知的財産権 平成 17 年度～H22 年度 無し

(5) 受賞・報道等

① 受賞

1. 香取秀俊, Julius Springer for Applied Physics 2005, Tucson, USA, “超精密光時計開発における先駆的な貢献,” 2005 年 10 月 17 日.
2. 香取秀俊, 財団法人 丸文研究交流財団 丸文学術特別賞, “「光格子時計」手法による超高精度原子時計の実現,” 2006 年 9 月 30 日.
3. 高本将男, 洪鋒雷, 東亮一, 藤井靖久, 今江理人, 香取秀俊, 社団法人 日本物理学会 JPSJ 注目論文 (Papers of Editors' Choice) 賞, 論文タイトル: Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic ^{87}Sr Isotope, 掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn., 75, 104302 (2006), 2006 年 10 月 10 日.
4. 香取秀俊, 第 20 回 日本 IBM 科学賞, “超高精度原子時計を実現する「光格子時計」の開発,” 2006 年 10 月 26 日.
5. 香取秀俊, IEEE International Frequency Control Symposium, 2008 RABI AWARD, “光格子時計の発明と開発における傑出した貢献に対して,” 2008 年 5 月 19 日.
6. 香取秀俊, 第 42 回 市村学術賞・特別賞, “光格子時計の提案・実証による新たな原子時計手法の確立,” 2010 年 4 月 28 日.
7. 河野託也, 安田正美, 保坂一元, 稲場肇, 中嶋善晶, 洪鋒雷, 第 32 回応用物理学会優秀論文賞, 「One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Fermionic ^{171}Yb Isotope」, 掲載誌: Appl. Phys. Express 2 072501 (2009), 2010 年 9 月 14 日.

② マスコミ(新聞・TV等)報道

1. “「光のものさし」誤差 100 億年で 1 秒以下”, 読売新聞, 2005 年 12 月 21 日.
2. “世界中の「1 秒」を決める!? 東大の光格子時計 標準器候補に浮上”, 読売新聞, 2006 年 10 月 9 日.
3. “偏極「光格子時計」実現 東大,産総研の研究グループ成功 Sr 原子の時計遷移周波数, 世界最高精度で決定”, 科学新聞, 2008 年 10 月 20 日.
4. “「世界標準」採用にしのぎ 東大の光格子時計が有力 100 億年で誤差 1 秒”, 四国新聞, 2006 年 10 月 30 日.

5. “工・香取助教授らの時計システム「一秒」の世界標準の候補に”，東京大学新聞，2006年10月31日.
6. “世界標準”採用にしのぎ 東大の光格子時計が有力 100億年で誤差1秒”，中部経済新聞，2006年11月4日.
7. “世界標準挑む光格子時計 日本チームが開発 夢は100億年で誤差1秒”，岩手日報，2006年11月4日.
8. “日本発「光格子時計」世界標準狙う 誤差,100億年で1秒”，静岡新聞，2006年11月5日.
9. “100億年で誤差1秒 光格子時計 日本発の計測技術 「世界標準」候補に”，信濃毎日新聞，2006年11月6日.
10. “「世界標準」採用 各国研究者がしのぎ 日本発の「光格子時計」有力 100億年で誤差1秒”，熊本日日新聞，2006年11月6日.
11. “東大・香取助教授ら開発 光格子時計 注目集まる 100億年で1秒の誤差「世界標準」採用にしのぎ”，山陰新聞，2006年11月7日.
12. “1秒間の世界標準 時計開発へ各国しのぎ 東大の新技术に注目 100億年で誤差1秒採用の可能性”，神戸新聞，2006年11月8日.
13. “日本生まれの光格子時計 宇宙年齢で誤差1秒 超精密時計にめど”，赤旗新聞，2006年11月12日.
14. “1秒の長さ「世界標準」採用にしのぎ 日本で研究 光格子時計が有力 理論上 誤差100億年で1秒”，山形新聞，2006年11月13日.
15. “ひらめきの瞬間 21世紀の担い手たち Vol.99 時を刻む”，日経サイエンス，2007年3月号.
16. “「原子」より10倍正確 光格子時計 東大グループが成功”，読売新聞，2008年10月27日.
17. “計測誤差,6000万年に1秒 東大,超高精度時計を開発”，日本経済新聞，2008年10月27日.
18. “「光格子」で秒が変わる 技術が刻む1秒の長さ”，日本経済新聞，2008年12月28日.
19. “100億年で時差1秒,世界標準へ刻一刻”，産経新聞，2009年4月20日.
20. “誤差60万年に1秒 産総研が新型原子時計「標準」採用目指す” 日経産業新聞 2009年7月13日.
21. “光格子時計による超高精度・時間計測の実現”，科学新聞，2010年1月22日.

③ その他

1. 日本科学未来館「deep_science」先端科学技術の情報発信サイト <http://www.miraikan.jst.go.jp/> ,
2. 洪鋒雷，“光コムでつなぐ時間と長さ”，JITA ニュースレター, No.12, p.3 (2007)
3. 香取秀俊，ラジオ出演：“光格子時計とは？”，デイリープラネット, TOKYO FM, 2009年1月14日.
4. 産総研プレス発表 “イッテルビウム光格子時計の開発に成功”，投げ込み（情報提供）2009年7月17日.

(6) 成果展開事例

① 実用化に向けての展開

<公開可能なもの>

- 光時計に関する研究の飛躍的な発展は、光時計の正確さが Cs 原子時計で制限される事態を招いた。光時計同士の直接比較によって光時計がより良い再現性を持っていることを示せても、秒の定義である Cs 原子時計以上の正確さで絶対周波数を決定することは原理的にできない。国際度量衡委員会は、このような状況を分析し、「秒の二次表現」という周波数リストを構築することを決めた。秒の二次表現を用いれば、光でもマイクロ波でも「秒」を実現することができる。本研究で得られた Sr 光格子時計の測定値は、国際度量衡委員会にて採用され、秒の二次表現という国際標準を決める上で大きく貢献した。秒の二次表現が進化し、その中からセシウムに取って代わる新しい秒の定義が登場することは間違いない。光格子時計の研究開発においては、各国の標準研究機関が多くのリソースの投入をしている。多くの研究者が光格子時計に将来性を見出していることは確かである。本研究は、まさに1つの研究領域を作り出し、新しい秒の定義の実現という究極の実用化に向けて展開している。

② 社会還元的な展開活動

- 得られた研究成果は、次のように国際的な報告書に用いられている。
 - (ア) 第 17 回国際度量衡委員会時間周波数諮問委員会報告書(2006 年 9 月 14-15 日)及び第 95 回国際度量衡委員会報告(2006 年 10 月):⁸⁷Sr 光格子時計の絶対周波数測定値[文献 1]。
 - (イ) 第 18 回国際度量衡委員会時間周波数諮問委員会報告書(2009 年 6 月 4-5 日)及び第 98 回国際度量衡委員会報告(2009 年 10 月):⁸⁷Sr 光格子時計の絶対周波数測定値の更新[文献 10]、⁸⁷Sr 光格子時計と⁸⁸Sr 光格子時計の周波数差[文献 4]及び¹⁷¹Yb 光格子時計の絶対周波数測定値[文献 14]。

§ 6 研究期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H18.8.3	茨城県立土浦第一高等学校見学(非公開)	東京大学 工学部6号館 大会議室	10	茨城県立土浦第一高等学校の生徒に香取秀俊が工学の研究について講演を行う。
H19.2.28	香取研セミナー「Sr 時計遷移の衝突シフト」	東京大学 工学部6号館 大会議室	20	講演者 井戸哲也(NICT・研究員)
H19.6.22	香取研セミナー「NPL における単一イオン光時計:Single Ion Optical Clocks at NPL」(非公開)	東京大学工 学部6号館計 数会議室	20	講演者 保坂一元(産総研・研究員)
H19.8.7	茨城県立土浦第一高等学校見学(非公開)	東京大学 工学部6号館 大会議室	10	茨城県立土浦第一高等学校の生徒に香取秀俊が工学の研究について講演を行う。
H19.10.29	「Atomic Clock Ensemble in Space: Mission Concept and Status」	東京大学 工学部6号館 大会議室	20	講演者 Luigi Cacciapuoti (European Space Agency・Research and Scientific Support Department)
H19.10.30	「Explore the potential of atomic Sagnac interferometers based on cold atoms」	東京大学工 学部6号館 376号室	20	講演者 Ernst Rasel(Ertmer 研)University of Hannover Department of Physics・研究員
H20.4.9	「Black body radiation and atomic clocks」	東京大学 工学部6号館 大会議室	20	講演者 Andrei Derevianko (University of Nevada-Reno/ Associate Professor of Physics)
H20.4.16	「TIME AND FREQUENCY INVESTIGATIONS AT VNIIFTRI」	東京大学 工学部6号館 大会議室	20	講演者 Vitaly Pal'chikov (VNIIFTRI, Russia・研究員)
H20.8.5	茨城県立土浦第一高等学校見学(非公開)	東京大学 工学部6号館 大会議室	10	茨城県立土浦第一高等学校の生徒に香取秀俊が工学の研究について講演を行う。
H20.8.11	香取研セミナー「Realization of Quantum Non-Demolition measurement of Nuclear Spin 1/2 of Cold Ytterbium Atom」(非公開)	東京大学 工学部6号館 大会議室	15	講演者 高野哲至 (京都大学理学研究科物理学第一教室 量子光学研究室博士課程4年)
H20.9.1	「Ultrafast Spectroscopy:From Atoms to Semiconductors」	東京大学 工学部6号館 物工会議室	20	講演者 Steven T. Cundiff (JILA/NIST, USA・研究員)
H21年 6月6日～	19 th International Conference on Laser	北海道、屈斜路 路プリンスホ	150	屈斜路プリンスホテルにて ICOLS2009 を主催運営。32名

12	Spectroscopy	テル		の著名な招待講演者を含む、国内外、約150人の研究者が参加した。
H21.12.16	香取研セミナー「冷却原子集団を用いた単一光子発生」	東京大学工学部6号館計数会議室	15	講演者 丹治はるか(Harbard univ., 研究員)
H22.8.5	茨城県立土浦第一高等学校見学(非公開)	東京大学工学部6号館大会議室	10	茨城県立土浦第一高等学校の生徒に香取秀俊が工学の研究について講演を行う。

§7 結び

本研究プロジェクト提案・開始の時点で、本邦で提案され唯一実現されていた「光格子時計」の原子時計としての位置付けは未知数であった。この5年間のプロジェクト期間中に、「光格子時計」は世界を巻き込む新しい研究の潮流を作り、工学的なツールである「原子時計」としての地位を確立した。とりわけ我々が中心として研究を進めたSr原子・光格子時計では、実効的に現在の国際原子時と等価な不確かさをもつことが、世界の三極で検証された。光格子時計をプローブとした、微細構造定数の恒常性、その重力場との結合の有無を検証する実験も日米仏のグループで行われた。

光格子時計の研究において、世界のグループの参入は非常に歓迎すべきことだが、その反面、研究開発競争はこの5年で当初予想もつかぬほどに激化した。このため、当初計画していた「シュタルク原子チップ」の研究の継続を断念し、光格子時計の開発に研究の先鋭化を図った。この計画変更は功奏し、CRESTでの研究は世界の光格子時計研究をリードしている。この報告書作成時点で、2台の光格子時計の比較の安定度はおよそ平均時間10分で 1.6×10^{-17} に達し、光格子時計の強みである「観測原子数の増大」による安定度向上が機能していること、不確かさについても従来手法の「単一イオン光時計」に遜色ないことを示した。また産総研グループでは ^{171}Yb の光格子時計をNISTグループに先駆け論文発表した。これら、CREST研究で世界に先行するSr、Yb光格子時計は、有望な次世代光標準候補になっている。

原子時計研究において、このように世界に伍する研究を行うチーム構成として、新規なアイデア・実験系の構築に興味を見出す大学（東大グループ）と、計量標準の供給をミッションとする標準研（産総研グループ）の連携は、相補的で最大限効率的に機能した。東大側は光格子時計技術を産総研グループに提供し、逆に産総研グループは周波数リンクを提供し、東大の光格子時計を国際原子時につなぐ大きな役割を担った。これらの、共同研究は各機関独自に到達できる研究レベルを大きく超え、CRESTの研究の枠組みは大きな意義をもった。

CRESTの研究成果は、FIRST量子情報処理プロジェクト（H21年度スタート）の量子標準サブグループへの研究につながった。このプロジェクトでは産総研・NICT・東大の3拠点で光格子時計ネットワークを構築することを目指している。一方、本CRESTの研究代表者は、H22年10月スタートのERATOプロジェクト総括として、さらに光格子時計研究の先鋭化に取り組むこととなった。本CREST研究は、光格子時計研究の世界的な展開と時期を合わせるようにスタートし、この間、日本の光格子時計研究を強力にサポートした結果、FIRST、ERATO等による、次の研究ステップへと結実した。この研究の流れが、2019年ともいわれる秒の再定義につながることを祈念したい。



写真 1: 東大グループメンバーの集合写真。

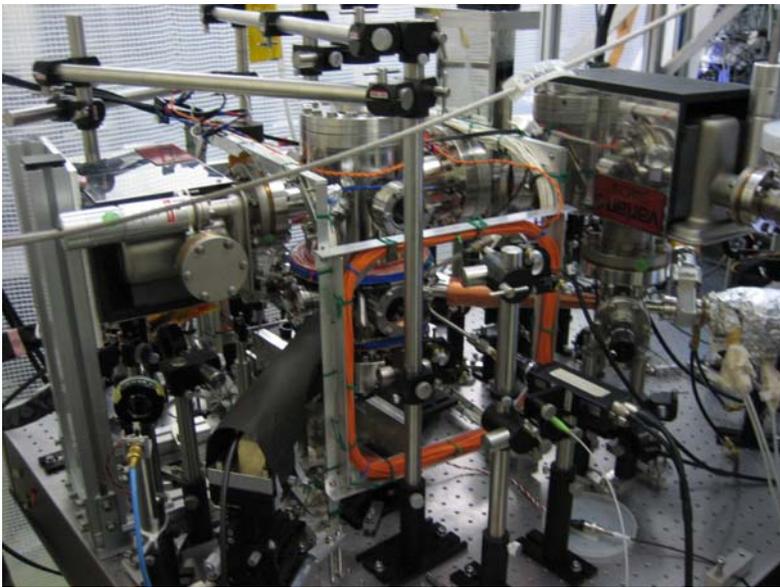


写真 2: 3次元光格子時計装置(東大)の写真。真空槽内に3次元光格子を構築し、ストロロンチウム原子を捕獲、分光する。

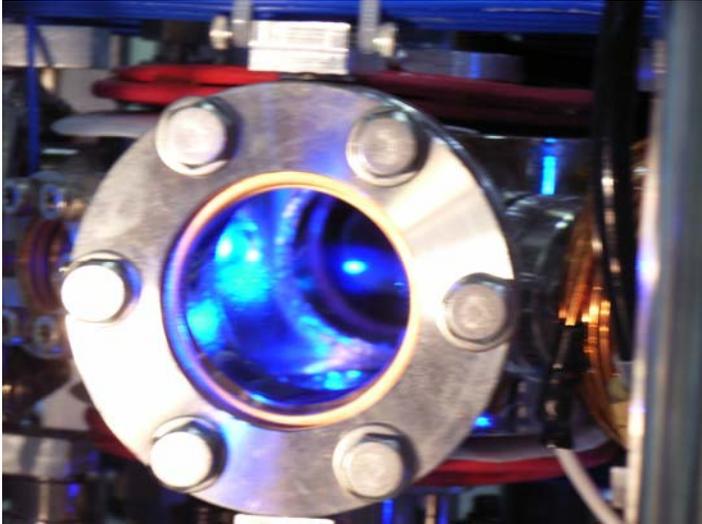


写真 3:磁気光学トラップにより数 mK まで冷却、捕獲された数千万個のストロンチウム原子の写真。

《また、公開して良い研究室の雰囲気が伝わるようなメンバーの集合写真、実験室や作製した主な研究設備のスナップ写真等あれば添付してください。》

写真、そのキャプション等、洪さん、高本君、2-3 枚ずつお願いします



写真 1: 産総研チームのメンバーが Yb 光格子時計の論文発表でお祝いのシャンパンを開けた。前列右から保坂一元、稲場肇、赤松大輔。後列右から中嶋善晶、安田正美、洪鋒雷、河野拓也、大苗敦。

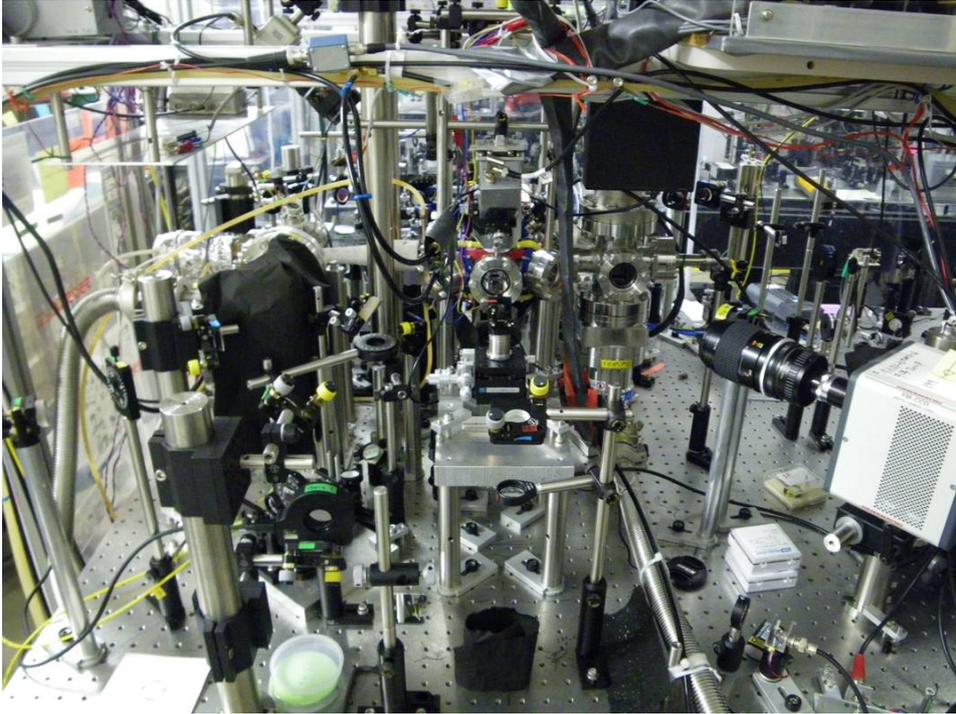


写真2: Yb 光格子時計真空装置の写真。左側から原子ビームを出して、真ん中のチェンバーでトラップ及び分光を行う。

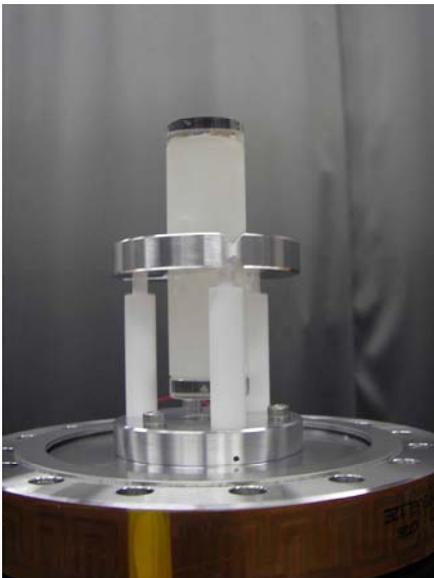


写真3: 狭線幅化時計遷移レーザーの心臓部。縦にマウントされた超高フィネス光共振器。