

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 大久保 拓哉

現在の秒の定義はセシウム (Cs) 原子のマイクロ波遷移によって与えられ、Cs 原子時計では 16 桁の不確かさが実現している。秒の定義の不確かさの低減を目指して、原子やイオンの光遷移を用いた原子時計 (光時計) の研究が 1980 年代に始まった。1990 年代後半の光周波数コムを用いた光周波数計測技術の確立とも相俟って、2000 年代以降、光時計の研究は急速に進展した。この結果、現在では数種類の光時計で Cs 原子時計よりも小さい不確かさが実現され、「秒の再定義」が現実的な問題として議論されるようになった。

このような光時計の実現方法の一つが光格子時計である。光格子時計では多数個の中性原子を光格子に捕獲し同時観測することで、光時計の量子限界の安定度を大幅に改善する。この結果、わずか数時間の平均時間で Cs 原子時計の不確かさを大幅に凌駕する 17 桁超の周波数計測が可能になった。

これまでにストロンチウム (Sr)、イッテルビウム (Yb)、水銀 (Hg) 原子を用いた光格子時計が実現され、なかでも Sr 原子と Yb 原子を用いた光格子時計は、将来の「秒の再定義」の有力候補である「秒の二次表現」に採択されている。この 2 種類の光格子時計に共通する不確かさ要因は、原子を囲む環境からの黒体輻射による時計遷移の周波数シフト (黒体輻射シフト) である。これまで、Sr 原子を用いた光格子時計では黒体輻射を低減する低温動作光格子時計が開発され、18 桁の周波数不確かさが実現している。

本論文では  $^{171}\text{Yb}$  原子を用いた低温動作光格子時計を開発し、その周波数計測を行っている。 $^{171}\text{Yb}$  原子では核スピンの  $1/2$  であり、広く研究されている  $^{87}\text{Sr}$  原子 (核スピン  $9/2$ ) に対してスピン偏極の容易さ、テンソルシフトの消失、などの優位性があり、将来有望な光格子時計の適用原子種の 1 つである。本論文では系統不確かさを  $3.5 \times 10^{-17}$  と評価し、これまで報告された Yb 光格子時計の中で最も小さい系統不確かさを実現した。

さらに、現行の秒の定義の実現精度を凌駕する周波数計測のために、系統不確かさ  $5.8 \times 10^{-18}$  の低温動作 Sr 光格子時計遷移周波数 ( $\nu_{\text{Sr}}$ ) との比、 $R = \nu_{\text{Yb}}/\nu_{\text{Sr}}$  を測定した。この結果、時計遷移周波数比の値を

$$R = 1.207\,507\,039\,343\,337\,749(55) \quad (\text{相対不確かさ } 4.6 \times 10^{-17})$$

と決定した。これまで報告された異原子種時計の周波数比較の中で、この値は、最も不確かさが小さい結果を与えている。またこの比の測定では、時計分光に用いるレーザー光の周波数ノイズを打ち消す同期比較の手法を採用し、高安定 ( $4.6 \times 10^{-16}/\sqrt{\tau/s}$ ,  $\tau$  は平均時間) な測定を実現した。

本論文は7章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では本論文の導入として、原子時計の研究の歴史、光格子計の位置づけについて議論している。その後低温動作光格子時計、Yb原子を用いた光格子時計および周波数比の測定の意義について説明し、本論文の構成を示している。

第2章では本論文で用いた実験装置が説明されている。特にYb原子とSr原子の物性値（蒸気圧、スペクトル）の類似性に着目し、先行して開発された低温動作Sr光格子時計と共存可能な低温動作Yb光格子時計の開発を進めたことが述べられている。

第3章ではYb原子を光格子に捕獲するまでのレーザー冷却を記述している。遷移強度の異なる2種類の遷移を用いた2段階冷却、原子気体の温度測定や原子数の見積もりを詳述している。

第4章では光格子中での時計遷移分光とその結果を説明している。励起率の測定法、時計遷移のサイドバンドスペクトル、サイドバンド冷却について述べた後、狭線幅分光のスペクトルとスピン偏極を議論し、時計遷移へのレーザー周波数の安定化手法について説明している。

第5章では開発した低温動作Yb光格子時計の系統不確かさ評価を述べている。特に光格子レーザー由来の周波数シフト（光シフト）について詳細な見積もりを行っている。この他に黒体輻射、原子間衝突、磁場の影響などについて評価している。

第6章では低温動作Sr光格子時計との比較による時計遷移周波数比測定を議論する。2台の光格子時計の時計レーザーを光周波数コムでリンクし、同期比較における安定度および各種の系統不確かさについて述べている。また測定結果から周波数比の値を相対不確かさ $4.6 \times 10^{-17}$ で算出している。

第7章では本研究の結果をまとめ、今後の展望を述べている。

以上のように、本論文は低温動作Yb光格子時計を開発し、詳細な系統不確かさ評価を行った。さらに低温動作Sr光格子時計をリファレンスとして周波数測定を行い、17桁で周波数比 $R = \nu_{\text{Yb}}/\nu_{\text{Sr}}$ を決定した。この成果は、Cs原子時計による秒の定義の限界を如実に示し、秒の再定義に向けた重要なマイルストーンとなる成果であり、今後の理工学の発展に大きく寄与すると期待される。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認められる。