

# 論文の内容の要旨

論文題目：

## Laser Frequency Stabilization with a Cryogenic Optical Cavity

(極低温光共振器を用いたレーザー周波数安定化)

氏名：牛場 崇文

重力波検出器や光格子時計などの精密測定分野では、レーザーの周波数安定度がそれらの性能を決める。特に世界最高水準の光格子時計ではプローブレーザーの周波数雑音が時計の安定度を制限しており、より高性能な時計を作るにはレーザーの周波数安定度を向上させる必要がある。

本研究ではより高性能な光格子時計開発のために、レーザー周波数の安定化を行っている。光格子時計では原子の遷移周波数測定にかかる時間が1秒程度であるため、1秒付近のレーザー周波数の安定度がディック効果を介して時計の性能を制限する。

1秒付近の周波数基準として現在最も安定なものは光共振器である。しかしながら、世界最高水準の光共振器に安定化されたレーザーの安定度は原理的な雑音の一つである光共振器の熱雑音レベルに到達している。したがって、レーザーの周波数安定度をより向上させるには光共振器の熱雑音低減が必要不可欠であり、(1)共振器長の長い光共振器を使用する、(2)機械的 $Q$ 値の高いコーティングを使用する、(3)低温化した共振器を利用する、などの対策が行われている。図1は近年の主要な周波数安定化レーザーの周波数安定度の結果を示している。

世界最高の光共振器に安定化されたレーザーの安定度は1秒のアラン標準偏差で $1 \times 10^{-16}$ の安定度を実現しており、その共振器の熱雑音限界近くまで到達している。そのため、の周波数安定度を目指した更なる熱雑音低減のためには、20 K以下の極低温光共振器を用いることが必要不可欠である。現在いくつかの研究グループが安定な極低温光共振

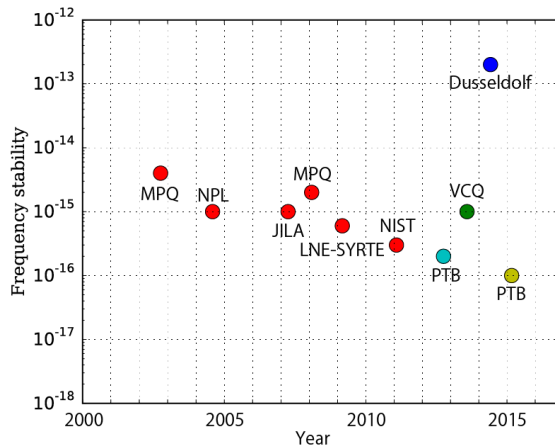


図1 近年の主要な周波数安定化光源の安定度  
赤は常温、黄色は約48 cm、緑は新しいコーティング材、水色は120 K付近、青色は24 K以下の光共振器を用いた周波数安定化の結果を表す。

器の製作を試みているが、70 K以下の温度領域に到達するためには新たな雑音源となりうる冷凍機を用いる必要があるため、未だ $10^{-16}$ 以下の安定度は報告されていない。ドイツのグループのみが極低温の光共振器に安定化したレーザーの周波数安定度を報告しており、そのアラン標準偏差は1秒付近で $2 \times 10^{-13}$ 、1000秒付近で $2 \times 10^{-14}$ である。この共振器の熱特性によって決まる安定度の限界は $2 \times 10^{-17}$ とされているが、現在の安定度を制限する要因についてはわかっていない。そこで、本研究では極低温の光共振器を構成してその性能および雑音を評価することによって、低温での光共振器の構築において問題となる雑音の特定を行った。

本実験では高い温度安定性と静寂な環境を実現するため、ヘリウムガスの凝縮を利用したパルスチューブ冷凍機を用いている。また、高い温度安定性の確保のためにガラス球を用いた多段のスタック構造を用いている。さらに、地面振動や冷凍機の振動が光共振器に伝わらないように受動防振と能動防振を組み合わせた防振装置を用いている。加えて、ドップラー雑音除去やレーザーの強度安定化などの雑音低減措置もとられている。

また、この周波数安定化システムを用いて安定化したレーザーの周波数安定度を評価し、図3の結果を得た。得られた周波数安定度は最も安定度の高い時間スケール(0.8秒)で $\sigma_y = 7.03^{+0.38}_{-0.34} \times 10^{-15}$ となっており、この結果は極低温の光共振器を用いたレーザー周波数安定化として1秒付近で最も高い安定度が実現されている。また、地面振動や温度揺らぎなどの雑音の寄与を定量的に調べることにより、私たちの周波数安定度が共振器に加わる加速度の影響によって制限されていることを示した。

本研究で開発されたレーザー光源は世界最高レベルの周波数安定度には到達していないが、熱雑音の小さい共振器の開発において、光共振器を極低温まで冷却するという手法は必要不可欠な技術であるため、本研究は今後の低熱雑音光共振器開発のための重要なステップである。

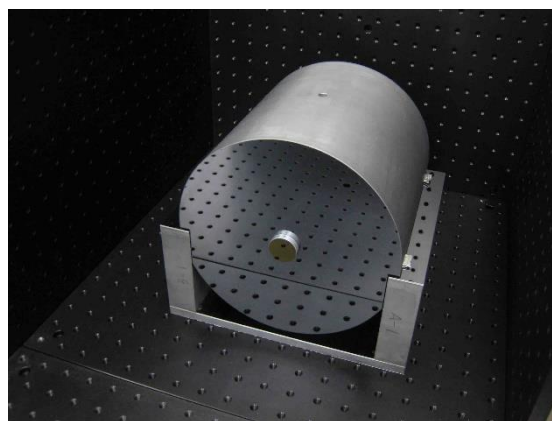


図 2 本研究の単結晶シリコン光共振器

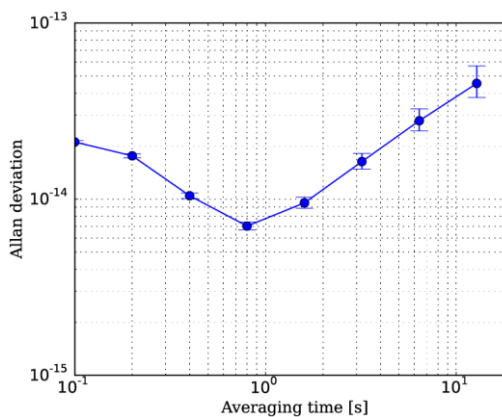


図 3 本研究で得られた周波数安定度  
エラーバーは $\chi^2$ 統計の95%信頼区間を表す。