

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540415

研究課題名（和文） 低熱雑音光共振器を用いた超安定化レーザーの開発

研究課題名（英文） Development of ultra-stable lasers using low-thermal-noise optical cavities

研究代表者

保坂 一元 (HOSAKA KAZUMOTO)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：50462859

研究成果の概要（和文）：

光共振器における熱雑音の影響を抑制するためには、長い共振器が有効であるが、この場合、実験室の振動の影響を大きく受け、レーザーの短期周波数安定度が光共振器の変形によって制限される可能性がある。この問題を解決するために、できるだけ剛性が高く、室温付近で熱膨張が小さな材料が望まれる。

我々は、低熱膨張セラミックをスペーサーに用いた光共振器を作製し、セラミックの熱的特性を詳細に調べた。この結果、このセラミックは熱膨張係数が 0 になる温度（zero crossing temperature: ZCT）が、室温付近に存在すること。また、ZCT 近傍で温度変化に対する熱膨張係数の変化が、低熱膨張ガラス（ultralow expansion glass: ULE glass）に比べて約 5 倍大きいことが分かった。このセラミックは、高い剛性を備え、熱膨張が比較的小さいことから、熱雑音軽減を目的とした長い光共振器に極めて有望な材料であることが明らかになった。

共振器長の長いセラミック光共振器が垂直方向の加速度を受けた時、鏡中心の共振器軸方向の変位を有限要素法により計算し、その影響を見積もった。この結果、セラミック光共振器の垂直加速度に対する感度は、ULE ガラス光共振器のそれと比べて、約半分であることが分かった。このセラミックを用いて、ブラウン運動の効果を抑制し、熱雑音を低減した次世代光共振器の開発が可能になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：

A long spacer for an optical cavity should help to reduce the thermal noise on the optical cavity relatively. However, a long cavity would be sensitive to the seismic noise in laboratories, with the result that the frequency stability of the laser at a short averaging time could be limited by cavity deformation. To address the issue, there is a need for a new material with high specific rigidity and very low thermal expansion at room temperature.

We have developed a Fabry-Pérot etalon with an ultralow expansion ceramic spacer and investigated the thermal properties of the ceramic. We found that the ceramic cavity has a “zero crossing temperature (ZCT)” at room temperature where the thermal expansion coefficient crosses zero. The sensitivity of the thermal expansion coefficient of the ceramic to temperature change is about five times greater than that of ultralow expansion (ULE) glass at around the ZCT. Nevertheless, owing to the high specific rigidity and relatively low thermal expansion at room temperature, the ceramic should be an attractive material for long optical cavities that can reduce the effect of the thermal noise relatively.

A finite element based analysis has been employed to calculate the long ceramic cavity deformation when loaded. The response to the vertical acceleration is estimated

from computations of the axial displacements at the centre of the mirror surface. A reduction in the response of the ceramic cavity to the vertical acceleration by a factor of 2 comparing with an ULE cavity has been shown. Through careful design with the ceramic, it will be possible to reduce the effect of the Brownian motion, and a “next generation” optical cavity will be developed in which thermal noise is suppressed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス、光格子時計、光共振器、超安定化レーザー

## 1. 研究開始当初の背景

レーザーの発明以来、発振スペクトル線幅の狭窄化は、常に重要テーマの一つである。例えば、原子・分子に対するレーザー共鳴分光では、スペクトル密度の高い単色光が高分解能での分光を可能にした。その中でも、次世代周波数標準と期待される光時計（超安定化レーザーを原子の非常に弱い遷移を用いて更に安定化し、短期・長期ともに極めて安定な周波数標準を実現する。）は、究極の精密測定と言えるであろう。

現在、光時計の開発は各国間で熾烈な競争を展開しており、最近では  $10^{-17}$  のオーダーあるいはそれ以下の精度で議論されるようになった。この開発競争は、各国の標準研究所が、近い将来の「秒の再定義」を念頭に置いている事と無縁では無い。このような状況下で、東京大学の香取教授が提案し実証した「光格子時計」は、次世代1次標準の最も有力な候補と目されている。その証拠として、提案から数年の後には Sr 光格子時計が秒の2次表現のリストに加えられた事は記憶に新しい。一方、2009年5月、我々は Yb 光格子時計の開発に成功し、 $^{171}\text{Yb}$  の  $1S_0 - 3P_0$  遷移の周波数値は、国際度量衡局傘下の諮問委員会において、推奨される周波数値として採択された。その後、2012年9月、Yb 光格子時計も秒の2次表現のリストに加えられた。Yb 光格子時計もまた有力な候補の一つである事にもはや疑いの余地はない。すなわち、Sr 光格子時計のみならず Yb 光格子時計においても、日本は先導的な役割を担っている。

時計遷移励起用レーザーは光時計の基幹要素の一つで、如何に短期安定度に優れたレーザーを開発できるかが光時計高精度化の鍵となると言っても過言ではない。すなわち、時計遷移励起用レーザーの狭線幅化の成功なくして、光時計の更なる高精度化は望めない。現在、各国で開発されている時計遷移励起用レーザーの安定度は、1秒で  $1 \times 10^{-15}$  程度であるが、これは、高フィネス光共振器に使われる鏡の基材とコーティングの熱雑音によってほぼ制限されている事が明らかになった。

光共振器における熱雑音自身を小さくするには、機械的 Q 値の高い材質を採択するか、温度 T を下げる必要がある。また、長い共振器長を採用する事、あるいは、高反射ミラー反射面でのビームスポットサイズを大きくする事で、実行的に熱雑音の効果の抑制が可能となる。より高安定なレーザーを実現するには、この熱雑音自身あるいは、熱雑音の影響の低減は必要不可欠であるが、光共振器に影響を与える他の外乱（例えば、温度の揺らぎ、振動など）の影響を現在と同レベルに抑えつつ、さらに熱雑音を軽減する事は極めて難しく、この問題を克服する独創的アイデアが必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、熱雑音の影響を抑えた光共振器を開発し、この光共振器に対してレーザーを安定化することを目的とした。具体的には、共振器長を長くする事で熱雑音を低減するといった方針で、研究を進めることにした。

長い共振器の採用は、光共振器を冷却する方法と比較して、システムが単純になるばかりか、冷凍機や冷媒の沸騰による振動の影響を考慮する必要がない。また、冷媒などのランニングコストが必要とならないといった利点がある。一方、問題となるのが、共振器長を長くしたために、微小振動の影響を受けやすくなることである。これまで各国で開発されてきた高安定化レーザーは、過去 20 年以上にわたり、Corning 社が開発した  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  低熱膨張ガラス (Ultra low expansion (ULE) ガラス) で作られた高フィネス光共振器に対して周波数安定化の手法が主流であった。ULE ガラスは、剛性がそれほど高くないため、長い光共振器を作った場合、振動による共振器の変形は避けられない。つまり、剛性が高く、室温付近で熱膨張が十分小さく、オプティカルコンタクトが可能な程度に研磨できる新たな材料が必要となる。

我々は、低熱膨張セラミックに着目し、この材料で長い光共振器スペーサーを作製し、機械的 Q 値の高い熔融石英を鏡基材として用いる事で、熱雑音を大きく低減した光共振器の実現を目指した。しかしながら、低熱膨張セラミックが、狭線幅レーザーのための光共振器に使われた例はこれまでなく、熱膨張や ZCT 等を正確に評価する必要がある。我々は、先ず、低熱膨張セラミックの熱的特性を詳細に評価し、また、この低熱膨張セラミックを使用した場合、どの程度の長さの光共振器が可能になるかをシミュレーションによって明らかにする事を優先して行った。

### 3. 研究の方法

低熱膨張セラミック (NEXCERA) をスペーサーとして用いた光共振器 (共振器長 75 mm、鏡の基材 ULE ガラス) を開発し、Nd:YAG レーザー (1064 nm) をこの光共振器に安定化することにより、光共振器の特性を評価した。また、新しい材料の熱膨張係数の温度依存性を評価するために、光共振器を約 7°C から 40°C までの範囲で温度調整できるよう、チラーとヒーターを組み合わせた温度調整システムを構築した。

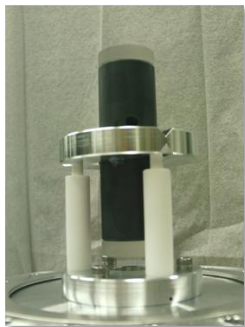


図 1 セラミック光共振器。

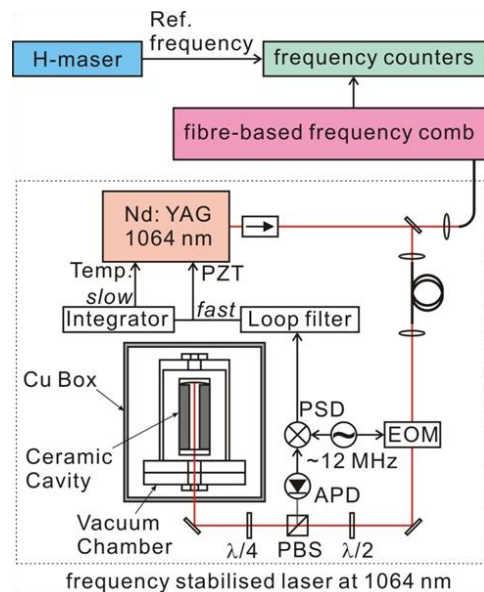


図 2 セラミック光共振器を評価するための光周波数計測システム

光共振器は、室温変動の影響を遮断するために、真空槽内に設置され、温度調整は、この真空槽と真空槽を囲む銅製の箱を用いて 2 重にコントロールされる。光共振器は熱的に隔離されているために、設定温度を変えても、光共振器の温度が熱平衡状態に達するまでには、1 日程度の時間が必要となる。光共振器に安定化したレーザーに対して、光周波数コムを安定化し、繰り返し周波数にフィードバックすることにより、長時間の連続測定が可能となった。

### 4. 研究成果

このセラミックを用いた光共振器の共鳴周波数の変化、すなわち共振器長の変化の温度依存性を、図 3 に示す。ZCT は 16.4(1)°C に存在することが明らかになった。

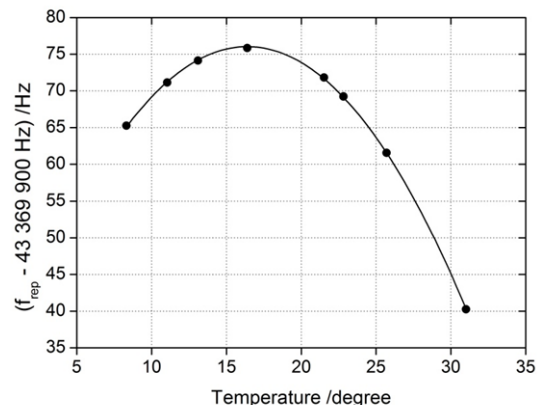


図 3 セラミック光共振器の温度に対する共鳴周波数の変化。

ZCT 付近の共鳴周波数の変化を ULE ガラスと比較すると、熱膨張係数の温度変化に対する感度は、ULE ガラスと比較して、5 倍程度大きい (図 4)。

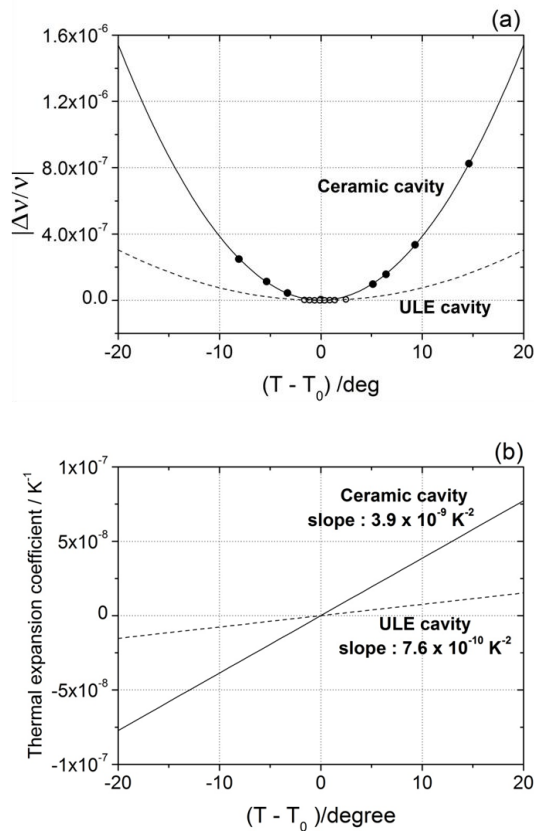


図 4 セラミック光共振器と ULE ガラス光共振器の比較。比較を容易にするために、ZCT を規格化している。(a) 温度に対する共振器長の変化。(b) 熱膨張係数の温度依存性。

このセラミックを用いて、長い共振器スペーサーを作製した場合、振動に対する影響がどの程度になるかを、有限要素法を用いてシミュレーションした。代表的な結果を、図 5 に示す。長さ 0.6 m、直径 0.2 m のスペーサーに垂直方向の重力加速度が加えられた時の端面中心の軸方向の変位 (鏡反射面中心の軸方向の変位) を計算した。スペーサーの重量を抑えるために、両端は円錐形としている。また、共振器の下の部分を一部カットした形状になっている (ここでは、計算時間短縮のため、ビームが通る穴は無視して計算を行った)。図では支持点の位置を軸方向 (y 方向) に変化させたときの、変位を示している。ULE ガラス光共振器と比較すると、セラミック光共振器では、変異の量は約半分である。また、軸方向の変位が 0 となる支持点周辺で、支持点の位置変化に対する感度も ULE ガラス光共振器と比較して半分程度である。

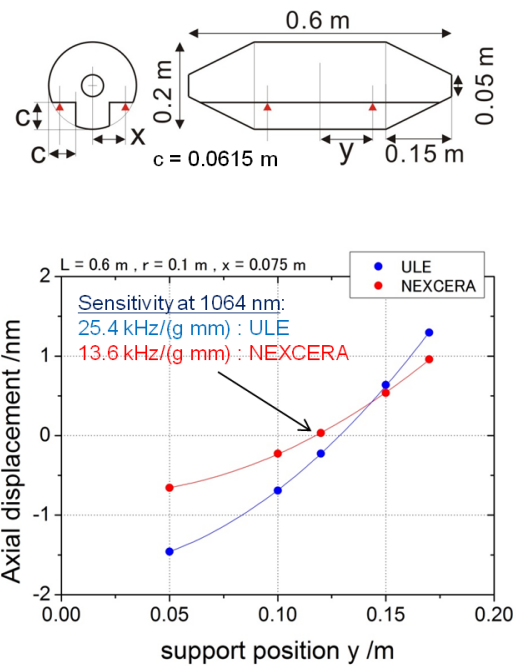


図 5 光共振器が垂直方向の重力加速度を受けた際の、鏡反射面中心の軸方向の変位を支持点位置の関数としてあらわした。軸方向の変位が 0 になる支持点位置が存在することが分かる。

セラミックスペーサーを用いた場合の、この感度は、 $13.6 \text{ kHz}/(\text{g mm})$ と見積もられ、この値は十分に小さいことが分かった。(光共振器の振動に対する感度に関して、これまで報告された値の中で最小のものと同程度である。)

本課題では、ULE ガラスに代わる光共振器スペーサー材料として、これまで使われたことのない低熱膨張セラミックを用いて、光共振器を作製し、セラミックの熱的特性を調べた。熱膨張係数の温度変化に対する感度は、ULE ガラスと比較して大きいものの、光共振器として使用することが十分可能であることが明らかになった。また、有限要素法によるシミュレーションから、この低熱膨張セラミックを光共振器スペーサーに用いた場合、長さが 0.6 m 程度まで大きくしても、振動に対する影響は十分に小さいことが示された。このセラミックを使って 0.6 m 程度の光共振器を作製し、1064 nm のレーザーを安定化すると、平均時間 1 秒の周波数安定度は、 $1 \times 10^{-16}$  以下になると予想される。セラミック材料の入手に予想以上の予算が必要になり、本課題期間中に  $\sim 0.6 \text{ m}$  の光共振器を作製することは出来なかったが、世界最高の周波数安定度を達成できる全く新しい光共振器の設計を完了させた意義は大きい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① K. Hosaka, H. Inaba, D. Akamatsu, M. Yasuda, J. Sugawara, A. Onae, and F.-L. Hong, “A Fabry-Perot Etalon with an Ultralow Expansion Ceramic Spacer”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 52, 2013, 032402-1-4,  
DOI: 10.7567/JJAP.52.032402

[学会発表] (計4件)

- ① K. Hosaka, H. Inaba, D. Akamatsu, M. Yasuda, J. Sugawara, A. Onae, and F.-L. Hong, “Towards a new clock laser system using a ceramic cavity and laser linewidth transfer technique”, The 2013 Joint UFFC, EFTF, and PFM Symposium, 2013年07月22日～2013年07月25日, Prague, Czech Republic.
- ② 保坂一元, 稲場肇, 赤松大輔, 安田正美, 菅原潤, 大苗敦, 洪鋒雷, 低熱膨張セラミックを用いた光共振器の開発, 2013年第60回応用物理学会春季大会, 2013年03月27日～2013年03月30日, 神奈川工科大学(神奈川県).
- ③ K. Hosaka, H. Inaba, D. Akamatsu, M. Yasuda, J. Sugawara, A. Onae, and F.-L. Hong, “An application of an ultra-low expansion ceramic to optical cavities for narrow linewidth lasers”, Workshop on the Optical Frequency Standards, 2013年02月07日～2013年02月08日, 独立行政法人情報通信研究機構(東京都).
- ④ K. Hosaka, “Optical cavities for ultra-narrow-linewidth lasers”, Workshop on Optical Comb, Clock and Related Devices, 2012年10月03日～2012年10月03日, 独立行政法人産業技術総合研究所(茨城県).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

保坂一元 (HOSAKA KAZUMOTO)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：50462859

### (2) 研究分担者

稲場肇 (INABA HAJIME)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：70356492

渡部謙一 (WATABE KENICHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：50358389