

# 超高安定ファブリ・ペロー共振器を用いた 超狭線幅レーザーの研究

松島 隆敏

## 1. 序論

21 世紀の新しい天文学として重力波が注目されている。その検出を目指して 1990 年代に入り世界各国でマイケルソン・レーザー干渉計を用いた重力波検出器が建設された。そして次世代の検出器として宇宙での建設が計画されている DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory) では、地面振動がある地上では検出困難な 1 Hz 付近の重力波の検出を目指している。検出に要求されるレーザー光源の周波数安定度は  $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  で、それを実現するための周波数雑音の抑制値は、波長 1064 nm の光で  $3.0 \times 10^{-14}$  である。光共振器の共振周波数を用いた周波数安定化でこの抑制目標値を満たすためには、共振器長の相対変位が  $3.0 \times 10^{-14}$  以下でなければならない。共振器長が伸縮する原因は大きく分けて 2 つある。1 つが外部振動でのスペーサ材料の変形による共振器長の伸縮であり、宇宙での使用を考慮すると、我々の研究室で行ってきた従来の振り子式の共振器設置([1])では動作に不安がある。もう一つが 1 Hz 付近を目的とすることで今まであまり問題とならなかった熱雑音の影響([2])が大きくなることである。本研究ではこの 2 つの共振器長雑音の対策として、2 本の支持棒による外部振動の緩和実験、熱シールドを用いた共振器の温度制御実験を行った。

## 2. 2 本の支持棒による外部振動の緩和実験

周波数安定化には共振周波数の安定化が必要であり、そのために共振器長の安定化が最も重要となる。共振器に外部から力が加えられた場合、共振器のスペーサが変形し、共振器長が微小に変化する。これに対して本実験では、重力方向に対して垂直な方向に共振器を置き、下から 2 本の支持棒で支える設置方法をとった。この水平設置により、光共振器が光軸と垂直な方向から力を加えられたときの影響について検証

を行った。

## 2.1 共振器長変化測定の実験システム

共振器長の変化は Å 単位の非常に微小な変化のため直接その変位を測定することは困難である。そこで本実験ではレーザー光源の光を Fabry-Perot 共振器の共振周波数にロックしている状態で、ある周波数の振動を与え、その振動周波数をロック中の光の周波数ゆらぎとして確認し、その大きさを支持棒の位置ごとに比べる。そうすることによって最も共振器長の変化が緩和される位置を、つまり最も共振器長の変化が少ない位置を調べることができる。したがって実験システムの構成は、レーザー周波数安定化の実験系(図 2.1)、共振器全体に振動を与えられるような加振台(図 2.2)から成る。

### ・レーザー周波数安定化の実験系

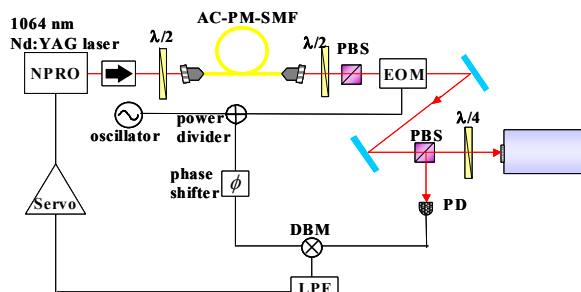


図 2.1 PDH 法による周波数安定化の実験系

Pound-Drever-Hall (PDH)法によりレーザー光源の発振周波数を共振器の共振周波数にロックすることで周波数安定化を行った。使用したレーザー光源は、LIGHTWAVE 社製半導体レーザー励起モノリシック型 Nd:YAG レーザー (NPRO:Non-Planar Ring Oscillator) で波長 1064 nm、最大出力 300 mW である。DECIGO の光源としては、衛星内ではスペースが限られるため光源部と周波数ロック部を上下に 2 段の

階層として分ける考えがある。そのため、レーザー光源から出た光をシングルモードファイバーに通し、そうすることでレーザー光源の出射口を移動し易くした。シングルモードファイバーへの結合効率は71.0%、最大出力213.0mWであった。また、光共振器は、オハラ社製のClearCeram®をスペーサとしたフィネス約10万の高フィネス共振器を用いた。

・加振台

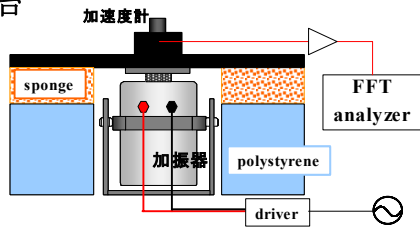


図 2.2 加振台の構造と伝達関数測定

加振台は加振器からの振動を伝え易く、更にブレッドボードがたわまないようにスポンジで挟んでいる。加振台を一定の amplitude で振動させ、台の上に置いた加速度計にてその応答関数(伝達関数)を測定したのを表したのが図 2.3 である。

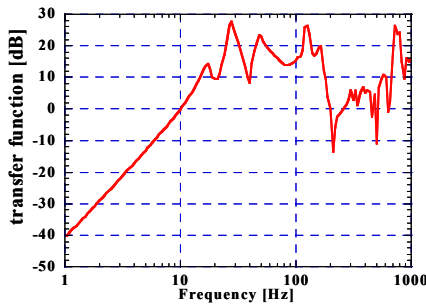


図 2.3 加振台の伝達関数

高周波での応答が不規則に変化をしているが、20 Hz 以下ではほぼ1次の微分曲線となっているため、DECIGO の感度ピークが0.1~10 Hz である事もふまえて、20 Hz 以下で振動を与えれば本実験の加振台として有効であると言える。

2.2 実験の結果

周波数安定化した光の周波数雑音上で加振周波数が周波数ゆらぎ(ピーク)となって見えるグ

ラフを図 2.4(a)に示す。ただし指示棒の位置が  $d=20$  mm のときで、支持棒の位置  $d$  mm は、共振器長 110 mm の外側から支持棒までの位置を  $d$  mm と置いた。

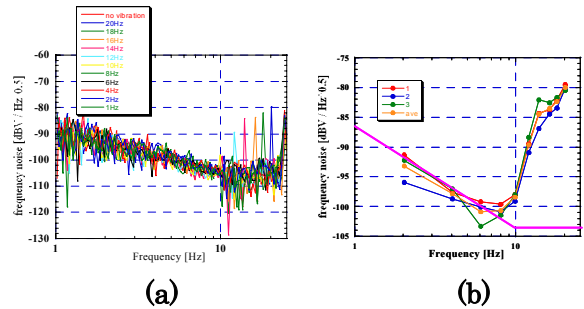


図 2.4  $d=20$  mm 時の周波数雑音スペクトル

各加振周波数ごとに、周波数雑音がピークの様子を示していることがわかる。このピークのみを取り出したグラフを図 2.4(b)に示した。数回の測定とその平均の周波数雑音ピークを表している。10 Hz 以下では雑音レベルに埋もれてしまい測定できなかったため、10 Hz 以上のみを重点的に測定した。支持棒の位置  $d$  mm と周波数雑音のピークの関係を示したのが図 2.5 である。

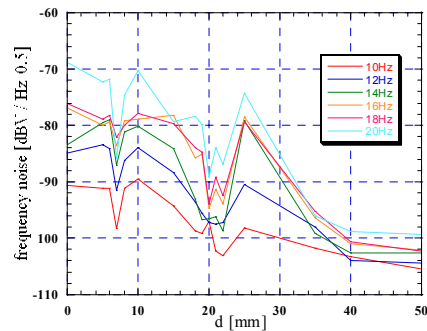


図 2.5 周波数雑音の PSD

図 2.5 は横軸が支持棒の位置  $d$  mm、縦軸が周波数雑音のパワースペクトル密度(PSD: Power Spectral Density)である。右肩下がりで周波数雑音が小さくなっているが、これは支持棒の距離が縮まり、1本の支持棒で支えている様な状態で、2本で支えている時よりも振動自体の伝達しやすさが低くなっているからではないかと考えられる。しかし、1本の支持棒で支えている状態

を考えた場合、共振器の設置法として長期的な安定度に不安があり、更に本実験の振動方向以外の振動(共振器の光軸方向など)に対しては脆弱な設置法になると考えられるため適しているとは言えない。また、 $d=7\text{ mm}$  と  $d=22\text{ mm}$  付近で周波数雑音が小さくなっている。これは支持棒で差支えられている共振器のたわみにより、共振器の形状がそれぞれU字、M字のモード(図 2.6)となって安定しているときで振動の影響が抑えられていると考えられる。

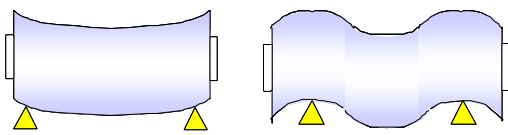


図 2.6 共振器の形状モード

### 2.3 加速度に対する評価

重力波干渉計用のレーザー光源としては、レーザー周波数安定化システムが受ける外部からの振動を加速度に換算して、加速度に対してどれくらいの安定度を保てるか、という評価をするのが一般的である。10~20 Hz の加振周波数毎の加速度を求め、その加速度で校正した周波数雑音の PSD を表したグラフを図 2.7 に示す。

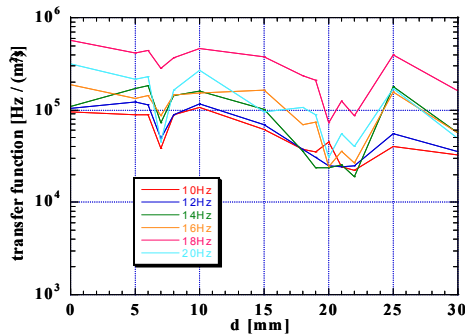


図 2.7 加速度に対する周波数雑音の PSD

加速度に対する周波数雑音はおおよそ  $10^4 \sim 10^6\text{ Hz}/(\text{m}/\text{s}^2)$  の範囲に収まっている。 $d=7\text{ mm}$  と  $d=22\text{ mm}$  のディップでは  $10^4$  オーダーという結果が得られた。

重力波干渉計において、試験マスを直接揺らす影響が雑音にならないためには、衛星の加速

度雑音への要求値は、 $4 \times 10^{-8}\text{ (m/s}^2)/\sqrt{\text{Hz}}$  となっている。これは、太陽の輻射圧雑音やスラスタ雑音よりも緩い要求値で、今のところ十分達成可能だと考えられる。これらから計算すると、衛星の加速度雑音が周波数雑音として出てくる上限値は、 $1.2 \times 10^{-3}\text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  となる。したがって今回得られた結果は検出用干渉計の周波数安定化レーザーのシステムとして十分な値であると言える。

また  $d=7\text{ mm}$  と  $d=22\text{ mm}$  を比べた場合、ディップの大きさが  $d=22\text{ mm}$  のほうが大きく、絶対的な安定度が高く、さらに支持棒の位置許容範囲が広いため  $d=22\text{ mm}$  を本実験の最適値とした。

### 2.4 光軸方向振動に対する検証

$d=22\text{ mm}$  で、光軸方向と水平な方向から振動を与えた場合についての検証を行った。光軸方向に揺れるようにセットアップし、その加振台の伝達関数を図 2.8 に示す。

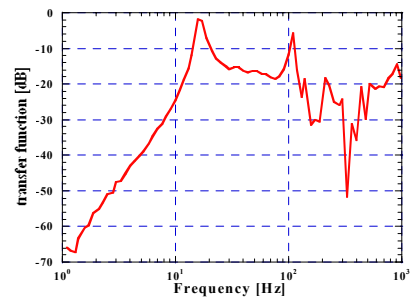
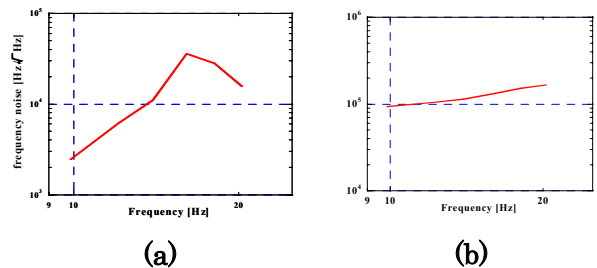


図 2.8 光軸方向振動の加振台の伝達関数

この加振台を用いて振動を与えそのときの周波数雑音を測定した。その測定結果を図 2.9 の(a)、(b)に示した。



(a)

(b)

図 2.9 周波数雑音の PSD

図 2.9(a)は周波数雑音のパワースペクトル密度で(b)は加振周波数毎の加速度によってそれを較正したグラフを表している。

(b)のグラフをみると、ほぼ  $10^5 \text{ Hz}/(\text{m/s}^2)$  で一定である。これは、他研究室で行われている光軸方向と水平に共振器を設置して振動を与えた場合([3])と比べて1桁ほど悪い値である。この1桁の差は、共振器とそれを支える設置部分にダンパーを挟んでいる事から生じるものであると考えられるため、現在の設置法に更にダンパーなどを追加した設置法が必要である。

### 3. 熱シールドによる共振器の温度制御

共振器の温度が変化すると、共振器が伸縮し、共振周波数が変化する。これは共振周波数へロックして周波数安定化を行う実験では安定度を下げる原因となってしまう。その対策として本実験では2つの対策を行った。一つが、光共振器のスペーサとして、オハラ社製の ClearCeram という熱膨張率が非常に小さい特殊なガラスを用いる事で、もう一つが熱シールドで、共振器を恒温層内に入れた上で温度制御を行う事である。目標の周波数安定度  $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  を達成するためには、温度変化量が  $10^{-3}\text{C}$  程でなければいけない。熱シールド内に入れた ClearCeram の温度を能動的に制御することでこの要求値を満たす事を目的として実験を行った。また、温度制御が可能となった後に、実際の共振器長の伸縮評価としてヘテロダイン検出によるビート周波数観測をして最終的な温度制御の実験システム評価とした。

#### 3.1 ClearCeram の特性

ClearCeram の温度と熱膨張率の関係を図 3.1 に示す。本実験では、ClearCeram 55 の線熱膨張率が0となる温度が  $25\text{C}$  付近とほぼ室温で最適温度への引き込みが容易である考えこちらを

使用した。

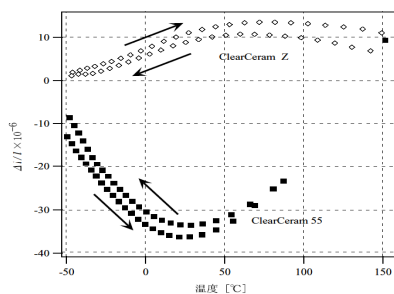


図 3.1 ClearCeram の相対熱膨張率

ClearCeram 55 の相対熱膨張率の曲線は、

$$\frac{\Delta l_0}{l_0} = 4.49 \times 10^{-9} T^2 - 2.19 \times 10^{-7} T - 3.41 \times 10^{-5}$$

で表され、周波数雑音の抑制値は波長  $1064 \text{ nm}$  の光で  $3.0 \times 10^{-14}$  であることから、求められる共振器の最適温度と制御オーダーは、

$$T + \Delta T = 24.886 + 0.003 \text{ } ^\circ\text{C}$$

と求まった。

#### 3.2 熱シールドの設計

共振器を  $10^{-3} \text{ K}$  以下で温度制御するために熱シールドを設計・製作した。熱シールドは、アルミ製の真空チャンバーと金メッキの二重銅箱から成る(図 3.2)。真空チャンバーは、光共振器を真空に入れる共振器内部及び周囲の空気ゆらぎをおさえ、光路長のゆらぎ、共振器への熱伝導を抑える。二重の銅箱は、熱対流を防ぎ、さらに共振器の熱輻射を抑える。この共振器を熱的に孤立させた状態で温度制御素子のペルチェで能動的に温度制御を行った。また真空チャンバーでは  $1.0 \times 10^{-8} \text{ Torr}$  以上の真空度が保たれ、空気ゆらぎを抑制するのは  $10^{-7} \text{ Torr}$  以上のため十分な真空度が得られた。

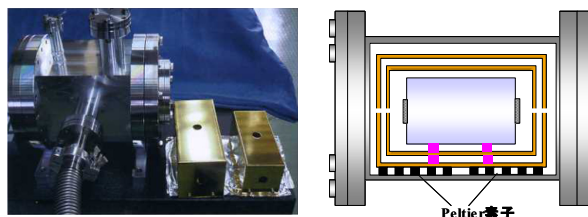


図 3.2 熱シールドの構造

### 3.3 温度制御の実験

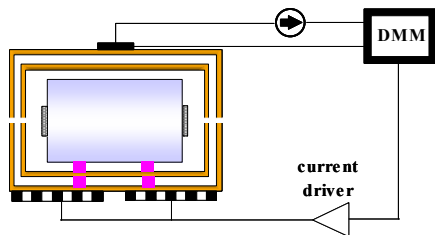


図 3.3 温度制御機構の概念図

図 3.3 のような温度制御機構を構成し、ある温度で一定の状態から温度設定を変え、違う温度に変えて、温度が一定に収束するまでを測定したグラフを図 3.4(a)に示す。また、温度を一定に保ったまま、温度変動のある大気中に熱シールドを置いた状態で長時間の温度変動を測定した。測定結果を図 3.4(b)に示す。

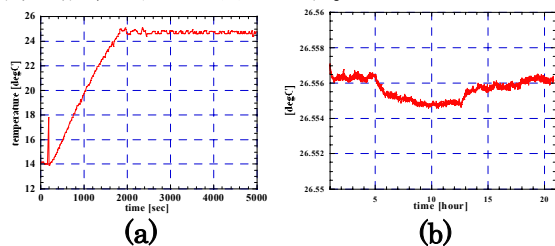


図 3.4 温度制御

図 3.4(a)のグラフは、初期温度を約 14°C に設定し、十分に一定となった状態から設定温度を約 25°C にした。この設定温度には特に積極的な意味はない。なお 200 sec 付近の特異点は設定を切り替える時に得たものである。温度設定を変えてから、約 1600 sec で設定温度になり、更に 800 sec 後くらいで温度が収束していることが分かる。実際にはこれほど大きく温度変化させる事はないのでこの温度制御機構は有効であると言える。

図 3.4(b)のグラフは、温度を一定にしてから約 20 時間の温度変動を測定した。グラフより温度変動は最大でも約  $2.5 \times 10^{-3} \text{ K}$  という値が得られた。前述したとおり周波数雑音の抑制値は  $3.0 \times 10^{-14}$  であり、それに対する共振器の温度制御オ

ーダーは  $3 \times 10^{-3} \text{ K}$  なのでそれを満たし、熱シールドとして十分に機能していると言える。

### 3.4 共振器最適温度の実測

実際の共振器長の伸縮について調べ、共振器の最適温度についての実測を行った。その方法として光ヘテロダイン干渉法を用いたビート周波数測定を行った。ビート周波数を得るには同程度の周波数安定度を持つ 2 台のレーザーシステムが必要である。本研究の共振器を用いた周波数安定化レーザーを参照光、周波数標準として中川研究室のモードロックチタンサファイア (Ti:Sapphire) レーザーを用いた。図 3.5 にビート周波数測定の実験系を示した。

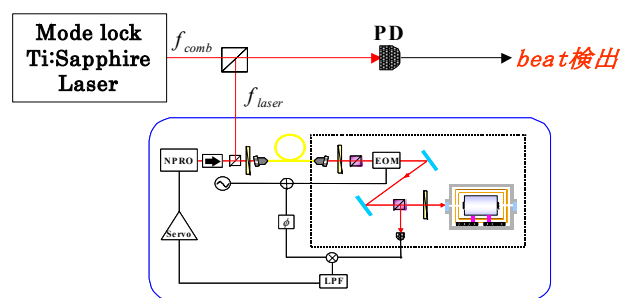


図 3.5 ビート周波数測定の実験系

参照光には本実験の共振器の共振周波数にロックした安定化レーザー、周波数標準として中川研のモードロックチタンサファイアレーザーを用いてビートを発生させ、そのビート周波数を RF スペクトルアナライザで観測した。その状態で共振器の温度を変化させていき、温度毎のビート周波数を測定した。温度変化は低い方から高い方へと上げていった。またこの時、測定結果を図 3.6 に示す。

図 3.6 より、温度上昇と共にビート周波数も大きくなり、26°C を過ぎたところからまた小さくなっている。これは、図 3.1 の ClearCeram の相対熱膨張率のグラフで示したとおり共振器スペーサの線膨張が 0 となる温度があることを証

明している。

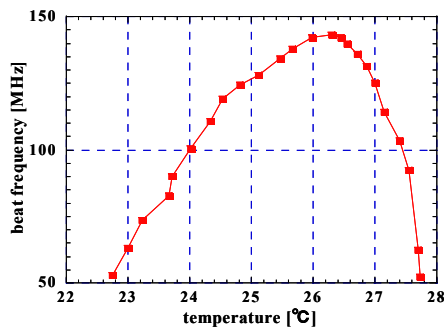


図 3.6 共振器温度とビート周波数の変化

この線膨張が 0 となる最適温度を求めるために、最適温度付近のビート周波数の変化が鈍くなっている部分だけを取り出しフィッティングをかけて得られた曲線は、

$$f_{beat}(T) = -31.26T^2 + 1638.7T - 21332$$

と表され、線膨張が 0 となるのはこの式の微係数が 0 となるときなので計算すると、最適温度 26.21°C が求まった。

## 結論

本研究は、次世代重力波検出器 DECIGO のレーザー光源として特に周波数安定化の部分を中心に研究してきた。要求される 1 Hz での周波数安定度は  $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  で、それを実現するための周波数雑音の抑制値は、波長 1064 nm の光で  $3.0 \times 10^{-14}$  である。これは共振器長の相対変位が  $3.0 \times 10^{-14}$  以下でなければならない。1 Hz で共振長が伸縮する原因は大きく分けて 2 つあり、スペーサ材料の変形による共振器長の伸縮、もう 1 つが共振器温度の変化による共振器長の伸縮である。この 2 つの雑音原因の対策として 2 本の支持棒による外部振動の緩和実験、熱シールドを用いた共振器の温度制御実験を行った。

2 本の支持棒による外部振動の緩和実験は、ロック中の共振器に光軸方向と垂直な向きに振動を与える事で測定できる周波数雑音ピークの、支持棒の位置依存性を測定した。実験に使用し

た共振器の長さが 110 mm で外側から支持棒までの距離を  $d$  mm と置くと、周波数ゆらぎが他より小さくなる条件として  $d=7$  mm、 $d=22$  mm という結果が得られた。この 2 つを比べた場合、 $d=22$  mm のほうが絶対的な周波数ゆらぎが小さく、さらに  $d$  の範囲も広く支持棒の許容範囲が大きいため  $d=22$  mm を最適値とした。このときの周波数ゆらぎを、振動によって共振器が受けた加速度に対して評価するとほぼ  $10^4 \sim 10^5 \text{ Hz}/(\text{m/s}^2)$  の範囲に収まる結果となった。これは衛星の加速度雑音が  $4 \times 10^{-8} (\text{m/s}^2)/\sqrt{\text{Hz}}$  になる予定であることを考慮すると十分な値である。また  $d=22$  mm の時の光軸方向振動についても検証を行った結果、 $10^5 \text{ Hz}/(\text{m/s}^2)$  となった。

熱シールドを用いた共振器の温度制御実験では、室温付近で線膨張率が 0 となる ClearCeram 55 をスペーサ材料として使用し、さらに共振器を熱シールドに入れて温度制御を行った。熱シールドは、金メッキの二重銅箱とそれを入れるアルミ製真空チャンバーから成っている。熱シールド内に入れた ClearCeram55 の温度を能動的に制御することで、約 20 時間に温度変動が最大  $2.5 \times 10^{-3} \text{ K}$  という結果が得られ、これは要求値  $3.0 \times 10^{-3} \text{ K}$  以下を満たしている。また、ビート周波数測定により共振器最適温度の実測を行った結果、最適温度 26.21°C という結果が得られた。

今後の展望としては、本研究のレーザー周波数安定化のシステムを完成させ、その安定度の評価を行うことが必要である。

## 参考文献

- [1] M. Musha Opt. Comun. **180** (2000) 166
- [2] S.A. Webster, PHY.REV.A **77**, 033847 (2008)
- [3] S.A. Webster PHY.REV.A **75**, 011801 (2007)