KAGRA用 アウトプットモードクリーナの開発 V 0926修正版

日本物理学会 2017 年秋季大会@宇都宮大学

<u>粕谷 順子</u>, John Winterflood, Ju Li, 宗宮 健太郎 東工大, UWA

Contents

KAGRA OMCの概要
 出射光学系レイアウト

3 OMC防振系

- 要求値計算
- ・ ブレッドボード
- 防振装置

4 今後の課題 5 まとめ

KAGRA OMCの概要

OMC(Output mode-cleaner)

KAGRAでは信号抽出にDCreadoutを採用 参照光から高次モード光・RFSBの除去が必要 →DCPD前にOMCを設置



量子雑音を減らすため detune phase 3.5 deg Dcreadout phase 132 deg

→参照光が1 mWと小さく 厳しい設計

KAGRA OMCデザイン参照光1 mW周回共振器長1500 mmFinesse780Gouy phase55.4 deg

KAGRA OMC進捗状況

OMCの光学デザイン 完了(2014 条田さん) OMC PDH制御実験@東工大 完了(2014-2016条田さん, 矢野さん) OMC Dither制御実験@東工大 進行中 出射光学系のレイアウト 完了 防振要求値の計算 完了 防振装置の開発 進行中 アルミ定盤OMCの製作 2017年度内に製作 アルミ定盤OMCのインストール 2018年予定 シリカ定盤のOMC製作 シリカ定盤のOMCインストール

出射光学系レイアウト



- Output Mode Match Telescope(OMMT)2つ
- 透過型Output Faraday Isolator(OFI)
- Output Steering Mirror(OSTM)1つ
- OSTMは2インチミラーを検討
- ・OSTMの透過光取出し経路を検討中

出射光学系レイアウト







- 角度制御用のQPDを2つ配置
- DCPDは2つ配置
- DCPD Beam Dumpの定盤上への 配置を検討

2017/9/26

Junko Kasuya

OMCが揺れると以下の問題が起こる:

(1) モード不整合で重力波信号の透過率が落ちる

(2) 参照光に変調がかかり雑音を生む

(3) OMCの共振器長が変わり重力波信号の透過率が落ちる

(1)(2)についてミラーマップを使用したFINESSEシミュレーション で防振要求値を計算 (3)はブレッドボードの共振が原因

防振要求値の計算



- 透過光雑音は水平方向の揺れにセンシティブ
- スタック上の揺れは鉛直方向が大きい
- 鉛直方向についても水平方向の要求値を課すのがよい
- 20Hzで1/100の防振比を要求値とした

OMCブレッドボードの選定

シリカブレッドボード 最終版OMCはシリカブレッドボードを使用 共振による共振器長変化がOMC性能の問題となる 固有振動数・重さ・防振装置の製作・作業など総合的に評価し 200x500x50mm(11kg)に決定



Fused silica 物理特性

ヤング率	70	GPa
ポアソン比	0.16	-
比重	2.201	g/cm^3

OMCブレッドボードの選定

アルミ ブレッドボード

第一弾としてミラーの接着が容易なアルミブレッドボードのOMCを製作 最終版のシリカへの交換を考慮し,重さを同じに設定 厚さが10mm減り,200x500x40mm(11kg)

アルミは熱膨張の影響による共振器長変化が大きい → レンジの広いピエゾで対応

	石英	アルミ(A6061)
比重	2.201g/cm^3	2.7g/cm^3
厚さ	50mm	40mm
質量	11kg	10.8kg
熱膨張	0.6ppm	24ppm
1次共振	1138Hz	812Hz
2次共振	1691Hz	1154Hz
3次共振	2968Hz	2166Hz

OMC防振装置概要

- ブレッドボード11kg+光学素子その他2kg =13kg
- 防振比の要求値 20Hzで1/100
- 板バネ3本吊り1段振り子 板バネ



OMC防振装置概要

- 共振を下げるためにフレームを低く設計
- OMCブレッドボードの下にダンピング用マグネットを設置



板バネの開発

- 無荷重時直線,荷重をかけた際円弧を成す板バネを設計
- マルエイジング鋼使用
- 目標安全率3
- 縦横カップリング最小になるデザインを採用
- 現在加工完了し,時効処理中





2017/9/26

Junko Kasuya

板バネの開発

板バネ設計パラメータまとめ

材質	MAS-1	
荷重	4.3 kg	
板バネの長さ	220 mm	
幅	~52.5 mm @bottom	
厚み	1.3 mm	
初期角度	45 deg	
板バネ半径	190 mm	
板バネ個数	3	
許容応力	661 MPa	
共振周波数	2.23 Hz	
安全率	3	

今後のスケジュール

10月 板バネの防振性能測定 防振装置の細部設計

- ダンピング機構
- ・フレーム

11月 ブレッドボードとミラーの貼り付け治具の製作

12月 OMCミラーの貼り付け&測定

インストール手順の確認



1出射光学系のレイアウトを決定

- 2防振装置の要求値を計算
- 3 共振周波数を考慮しブレッドボードを選定
- 4防振装置を開発中
- 5 第一弾としてアルミ定盤OMCを製作予定

ありがとうございました



板バネの縦横カップリング

- OMC防振装置に回転対称性がないことや、予測困難な揺れを防ぐために縦横 カップリングが最小になるデザインを採用
 - 先端のワイヤーリリースポイントが水平でない



15

Junko Kasuya

②防振システム

板バネの解析計算

②防振システム

- 1つの板バネにかかる荷重4.3 kg
- 板厚1.5 mm以下を使用



the strain $\epsilon = dx/\Delta x$ is simply given by

€ →

Now the stress σ induced in a material is directly related to the strain ϵ it undergoes by Young's modulus **Ey** by the following relationship:

 $\sigma \rightarrow \epsilon Ey;$

曲がった板バネにかかる応力 σ $\sigma = \frac{Et}{2R}$

動作点での安全率よりRを選択 荷重から板バネの幅wを決定[1]

$$w(x) = \frac{12R^2mg}{Et^3}\sin\frac{x}{R}$$

板バネの共振周波数

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R(\theta \sin \theta + \cos \theta - 1)}}$$

E: ヤング率 *t*: 板厚 *R*: 板の半径 θ: 初期取り付け角度

ブレッドボード上のクランプ位置 ②防振システム

- ブレッドボードの重心位置が3点の重心 と重なるように決定
- 光路や光学素子のサイズを考慮し干渉しないように設置
- ブレッドボード上面にはワイヤが出る 小さい穴があるだけ





3本吊り or 4本吊り 問題

- 第一弾としてアルミブレッドボードを使用したOMCを製作する
- LIGOのVOPO等板バネ3本吊りの例も存在する(新井さん)
- 正三角形に近いなら可(新井さん)
- 正三角形ではなく三角形が大きいほど良い(John@UWA)
- クランプ位置についての議論はまだ
- 結論として最初の提案と同じ3本吊りを採用

3本の利点	4本の利点
 バランス取りやすい 構造が少なく予測不可能な	 対称性によりカップリング
モードが出にくい	が少ない

ワイヤ径 for Piano Wire

- "Conceptual design of an interferometer with a sub-SQL sensitivity ver. 2.0" 参照
- ピアノワイヤを使用 7.85 g/cm^3
- バイオリンモードが出現する周波数はワイヤの半径に依存し、以下の式で表される

$$\Omega \simeq \frac{1}{d_w \ell} \sqrt{\frac{\pi m g}{2\rho}} ,$$

いま,最初のバイオリンモードが1kHzになるようなワイヤ径を選ぶと, dw~450um もしくはそれ以下

板バネが3本吊りなので,最悪の場合全ての荷重が 1本のワイヤにかかると仮定し安全率3以上

→piano wire 300um 安全率 3.9 最初のバイオリンモード 1530Hz に決定



ワイヤの振り子共振

- Piano wire 200mm
- 1.1 Hz *T* =

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

ブレッドボードの向き

• フレームの製作難易度と共振をおさえることを重視し,共振器面が上の構造を採用





<u>OMCの光学要求値のブレークダウン</u>

参照光の光量を1mWとして

- ① 重力波信号の損失を2%以下
- ② RFサイドバンドによるショットノイズ悪化を2%以下
- ③ 空間高次モードによるショットノイズ悪化を1%以下

とすれば、全体で5%以下におさえられる。

- ① ⇒ 各鏡の損失を40ppmとしてフィネス800以下
- ② ⇒ フィネスを800として<u>共振器長は75cm以上</u>
- ③ ⇒ <u>Gouy位相</u>を適切に選択する

ティルトの要求値



- 水平方向からティルトへのカップリングを1/100m として計算したもの
- ミスセンタリングの方が要求値が厳しい

<u>KAGRA OFIの概要</u>



特注 高真空対応 Faraday Rotator CUSTOM - HIGH POWER FREE SPACE ROT, 12MM, 1010-1080, VAC

Vacuum compatible magnet assembly o Magnets inside the housing are electroless-nickel plated (AMS 2404 CLASS 1) NdFeB rare-earth o Endplates and tube are 6061-T6 Aluminum o Housing is electroless-nickel plated steel Base plate and clamp, un-anodized 6061-T6 TRA BOND 2151 adhesive

Faraday Rotator

- EOT社製Pavos φ12mm 高真空対応、重量700g程度
- 無電解ニッケルめっきNdFeB磁石
- T>98%

PBS (TFP)

- Precision Photonics社製
- φ1インチ、t0.25インチ
- 消光比5000:1 (37dB)

HWP

- IFIの予備がある
- いまのところ使わない予定

防振系

- FRとTFPをアルミ定盤に搭載 して一段振り子で懸架する

<u>OMCの角度制御</u>

防振に加えて、低周波の角度制御が必要である ※aLIGOでは角度制御の制御帯域を0.5Hzとしているとのこと



QPD1をOBS1から25cm、QPD2をOBS1から60cm 離れたところに配置して、FINESSEで光学ゲインを 計算すると、

H:misc	misc.	tilt	gain	noise
QPD1	1	0.23	6.73W/m	2.5e-11W/rtHz
QPD2	1.72	1	3.41W/rad	2.5e-11W/rtHz

V:misc	misc.	tilt	gain	noise
QPD1	1	1.19	51.1W/m	2.5e-11W/rtHz
QPD2	0.91	1	57.0W/rad	2.5e-11W/rtHz

OBSより下流のレイリーレンジは約55cm、ウェストは OMC1よりOMC2側に18cmほど進んだところにある

<u>OMCの角度制御</u>



水平方向のセンタリング制御が もっとも厳しく、サーボゲイン の周波数特性をf^-1.5として、 制御帯域を2Hz以下にしないと いけないことがわかった。

レイアウトの詳細をつめた結果、 QPD1/2の位置が少し異なるため、 再計算が必要だが、それほどは 変わらないと考えている



利点

- 石英に接着する前の予行練習になる
- PDマウントはねじ止めで済ませられる
- サスペンション用の穴あけ加工も簡単

難点

 アルミの熱膨張率は23ppm/KでPZTのレンジが3.3um(±15%)、共振器長が1.5mなので、 PZT2つで制御しようとしても0.2度の温度変化でアンロックしてしまう

→対策:積層ピエゾを使う NAC2124→NAC2124-H08 (UHV compatible)

	NAC2124	NAC2124 -H08
height	2mm	8mm
stroke	3.3um	9.9um
Capacitance	510nF	1380nF
Operating V	200V	200V

製作手順:初期OMC

- 1. ネジ穴を開けたアルミ定盤を設計・発注 (コスモテック)
- 2. 冶具を製作
 OMC1側とOMC2側の2枚を合わせる。
 冶具は最終版でも同じものを用いる予定。
- PZTマウントの製作と曲率鏡の接着
 →エアベーク:LIGOでは94度で2.5時間
 ※小型の恒温器を東工大で購入する予定
- 東工大クリーンルーム(クラス100~1000) 内にクラス100の作業スペースを作って
 2液エポキシでプリズムを接着。 PD/QPD/BD/PZTマウントはネジ留め



KAGRAにおけるDC readout

KAGRA感度 (detuned RSE)



- 重力波信号=位相信号 ⇒ 通常は位相方向に参照光を合わせて計測 ⇒ 輻射圧がある場合だと最適方向が異なる
- 位相方向の計測だと40mW程度の参照光を用いる が、最適方向にするには1mW程度しか用いられない ⇒ KAGRA OMCの要求値は他の望遠鏡より厳しい

Amp

Blade Spring Measurement

- We would like to measure the transfer function of our blade spring as we measured in UWA
- Hopefully in October at UWA
- We also want to add the eddy current damping system at this time
- Can we use the shaking table we made?
- Do we need to make another shaking table?
- Is there other large sized shaking table in UWA?

Or other large shaking table?



Total Performance Measurement

- We also want to measure roll, yaw, pitch isolation performance
- Using accelerometer or laser and QPD
- Using aluminum plate of the same size and weight as silica bread board
- We plan to do it in Tokyo



References

LIGO BLADE SUS

[1] "Design Equations for Initially Flat Blade Springs at Arbitrary Mounting Angles" T0900324-v2

LIGO OMC

[2] "Output Mode Cleaner Suspension (OMCS) Assembly Instructions" T080117

- [3] "OMCS Installation Procedure" E070271-v2
- [4] "OMC Assembly Procedure" E1300201-v1

KAGRA TMS

[5] KAGRA20170314_UraguchiF_TMSVISDesignReview

[6] KAGRA20170213_UraguchiF_BladeSpringDesignNote