

光輻射圧による 鏡の光学浮上技術の開発(6)

東大宇宙線研、東大理^A、東北大学際研^B、東北大通研^C
長野晃士、和田祥太郎^A、川崎拓也^A、道村唯太^A、
牛場崇文、松本伸之^{B,C}、安東正樹^A



概要

- 重力波検出器の量子雑音低減実証や、巨視的量子力学の検証のためにサンドウィッチ型光学浮上という方法を提案した。
- この構成によるmgスケールの微小鏡の安定浮上の実験的実証に向けた研究を行っている。
- サンドウィッチ型光学浮上では、偏光と偏光ビームスプリッター(PBS)を用いて、それぞれの共振器の透過光をモニターできるようにする計画である。
- ただし、浮上に必要なパワーを得るために、光損失が9000 ppm以下であることが要求されている。
- PBSを持つ光共振器の損失を、実際に共振器を構築して評価した。PBSの往復光損失は 160 ± 90 ppmと測定され、要求値を満たすことを確認した。

目次

1. イントロダクション
2. サンドウィッチ型光学浮上実証実験における
実験セットアップ
3. 偏光ビームスプリッターの光損失評価
4. まとめ

目次

1. イントロダクション
2. サンドウィッチ型光学浮上実証実験における
実験セットアップ
3. 偏光ビームスプリッターの光損失評価
4. まとめ

イントロダクション

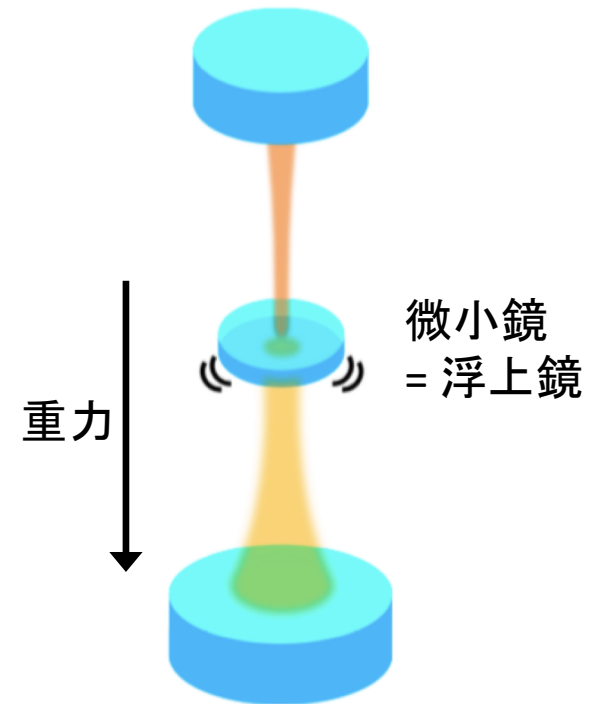
- 我々は、世界初のmgスケールの巨視的な系における量子力学の検証や、重力波検出における量子雑音低減方法の実証のための実験を行っている。
- 特に我々は、サンドウィッチ型光学浮上によって微小鏡を支持することで懸架系熱雑音を導入を回避するなどの工夫により古典雑音の低減することで、標準量子限界への到達を目指している。

イントロダクション

サンドウィッチ型光学浮上

- 曲率を持った微小鏡 (~ 1 mg)
を、適切な共振器長を持った
共振器で挟むことで、微小鏡
が自発的に安定した状態で浮
上する。
- 標準量子限界に到達可能。
- 理論的には実証されている [1]
が、実験的には未実証。
-> 実験的に実証する必要がある。

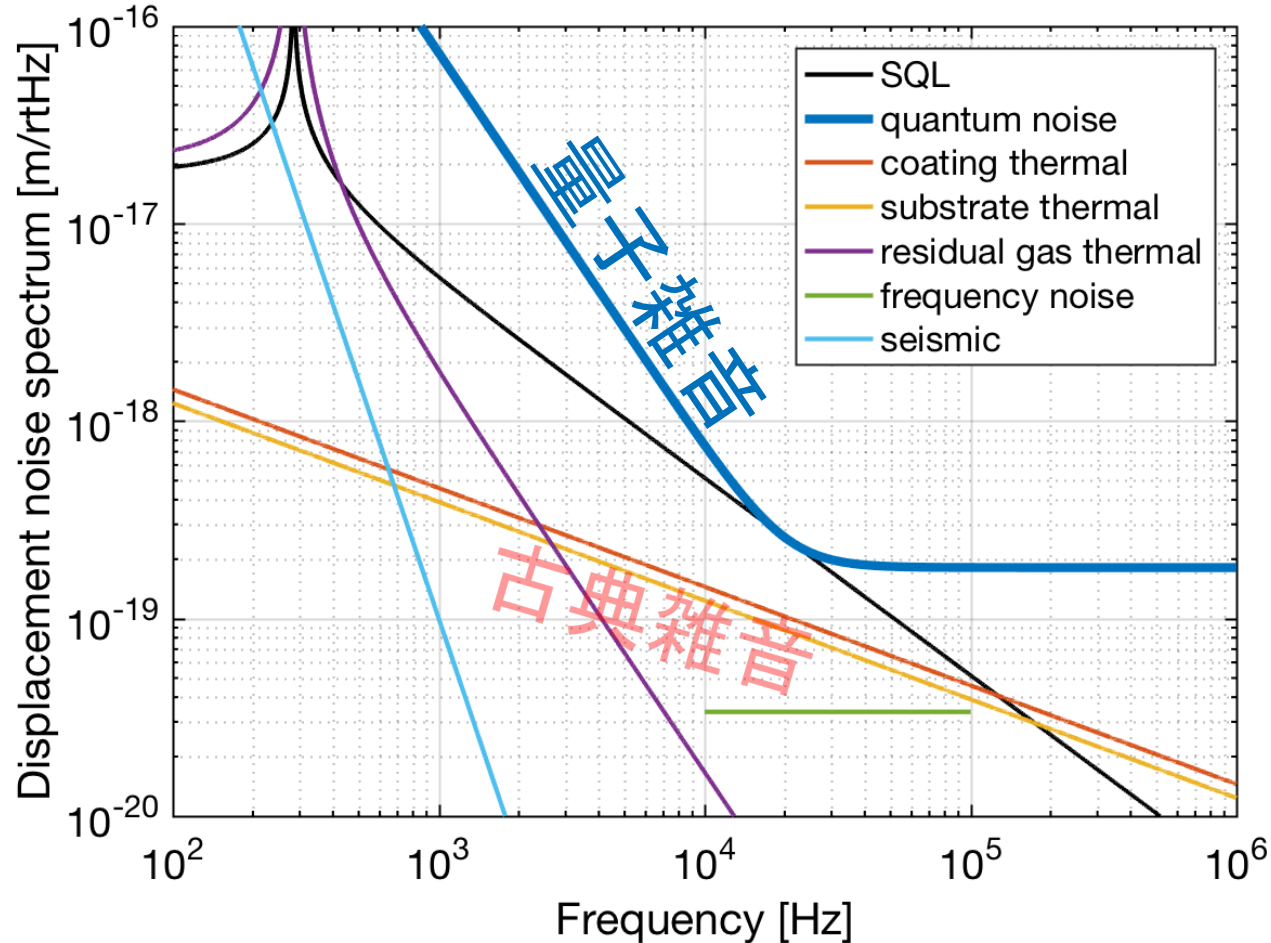
[1] Y. Michimura et al., *Opt. Express*, 2017.



サンドウィッチ型
光学浮上の概念図。

イントロダクション

• サンドウィッチ型光学浮上実験の感度



サンドウィッチ型光学浮上実験における感度曲線の例。

研究計画

光学浮上実験の研究計画

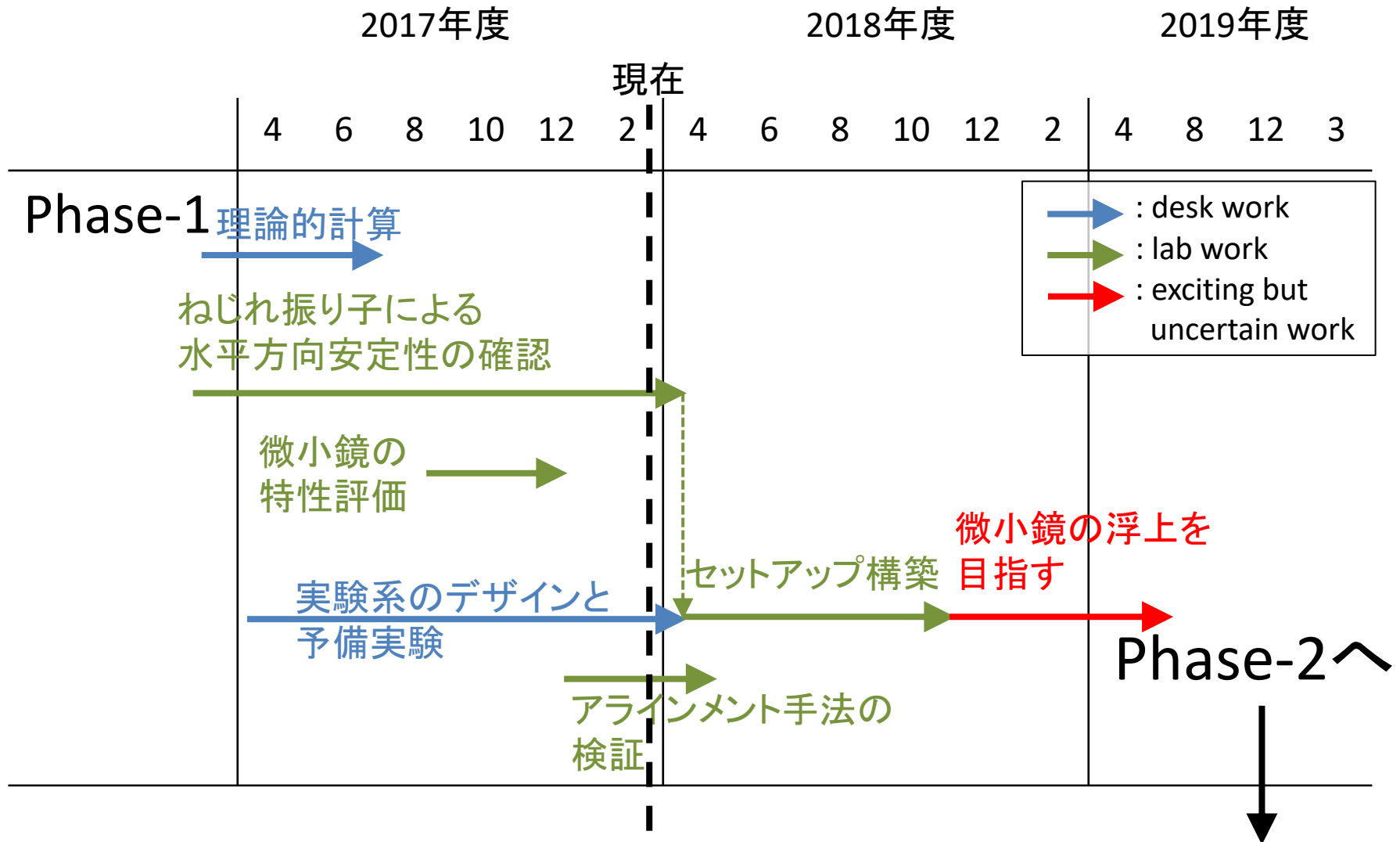
- Phase-1 (現在): 光学浮上の原理検証 (感度の要求なし)
 - サンドウィッチ型光学浮上の安定性の検証
 - 理論的計算
 - ねじれ振りをを使った水平方向復元力の検証
 - 浮上可能な実験セットアップの構築
 - 微小鏡の製作と特性評価
 - 光学設計
 - 防振装置の設計
 - アライメント技術の確立
- Phase-2: 標準量子限界への到達
- Phase-3: 巨視的量子力学の検証と量子雑音低減法の開発

研究計画

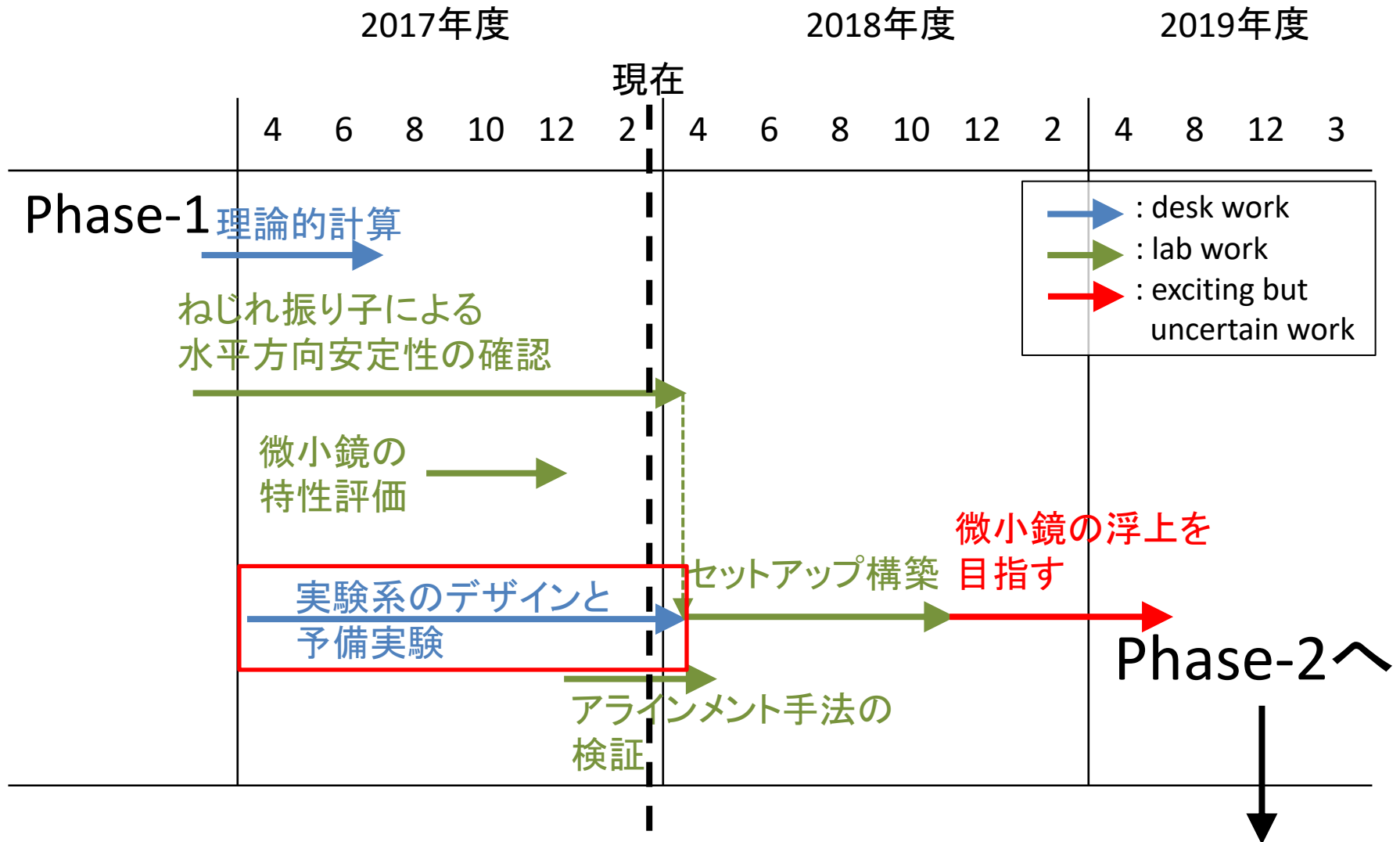
光学浮上実験の研究計画

- Phase-1 (現在): 光学浮上の原理検証 (感度の要求なし)
 - サンドウィッチ型光学浮上の安定性の検証
 - 理論的計算◎ (Y. Michimura *et. al.*, *Opt. Express*, 2017)
 - ねじれ振子を使った水平方向復元力の検証 ← 和田君・川崎君の発表
[25pK308-7, 25pK308-8]
 - 浮上可能な実験セットアップの構築
 - 微小鏡の製作と特性評価○
 - 光学設計 ← 私の発表
 - 防振装置の設計○?
 - アライメント技術の確立△
- Phase-2: 標準量子限界への到達
- Phase-3: 巨視的量子力学の検証と量子雑音低減法の開発

研究計画



研究計画

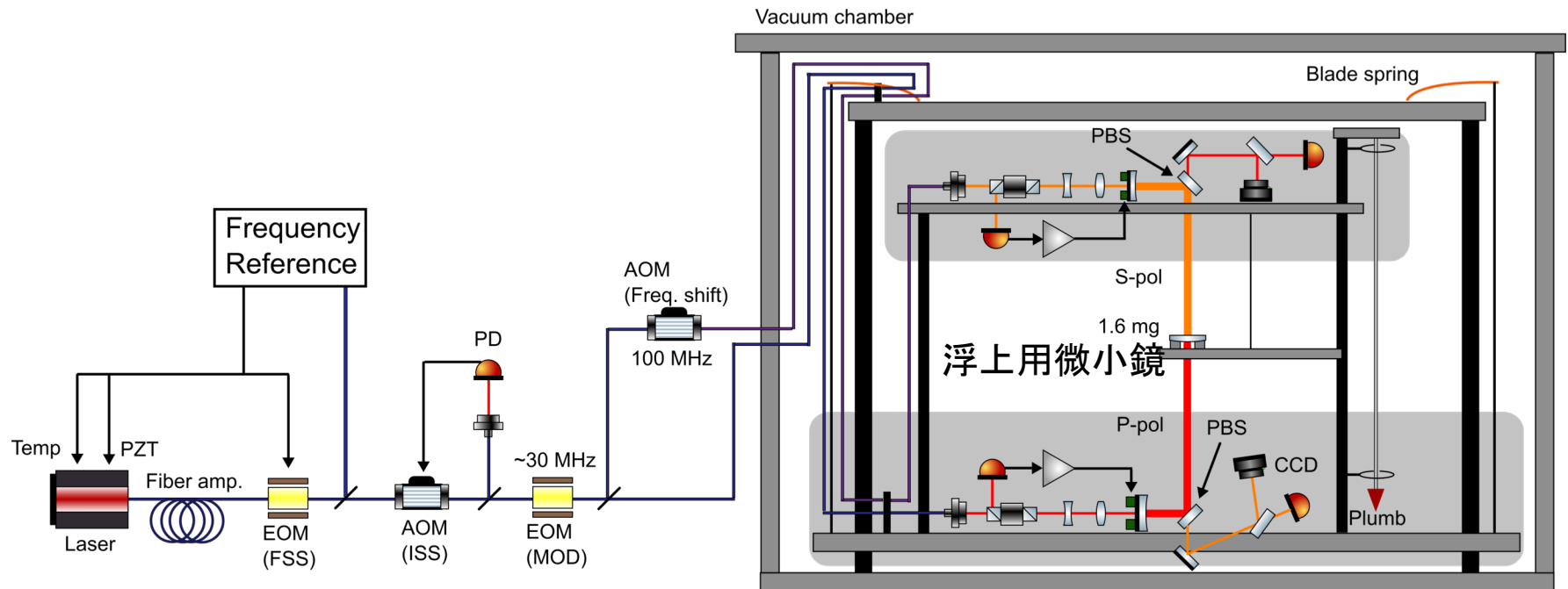


目次

1. イントロダクション
2. サンドウィッチ型光学浮上実証実験における
実験セットアップ
3. 偏光ビームスプリッターの光損失評価
4. まとめ

光学浮上実証用の実験セットアップ

• 光学浮上の原理検証のための実験セットアップ

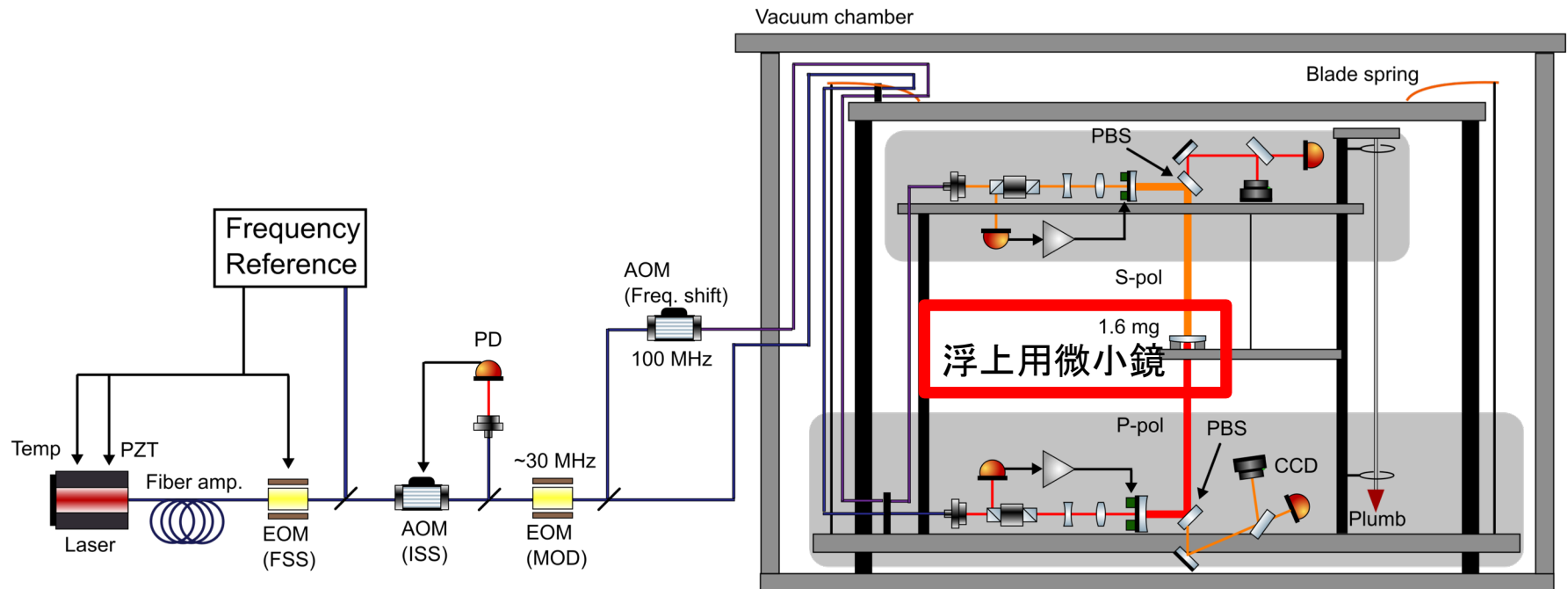


- 波長: 1064 nm
- 共振器フィネス: 700 (上下とも)
- 入射パワー: 8.5 W (下側)
2.6 W (上側)

- 微小鏡質量: 1.6 mg
 - 直径 3 mm, 厚さ 0.1 mm
 - 曲率半径 30 mm (平凸鏡)

光学浮上実証用の実験セットアップ

• 光学浮上の原理検証のための実験セットアップ

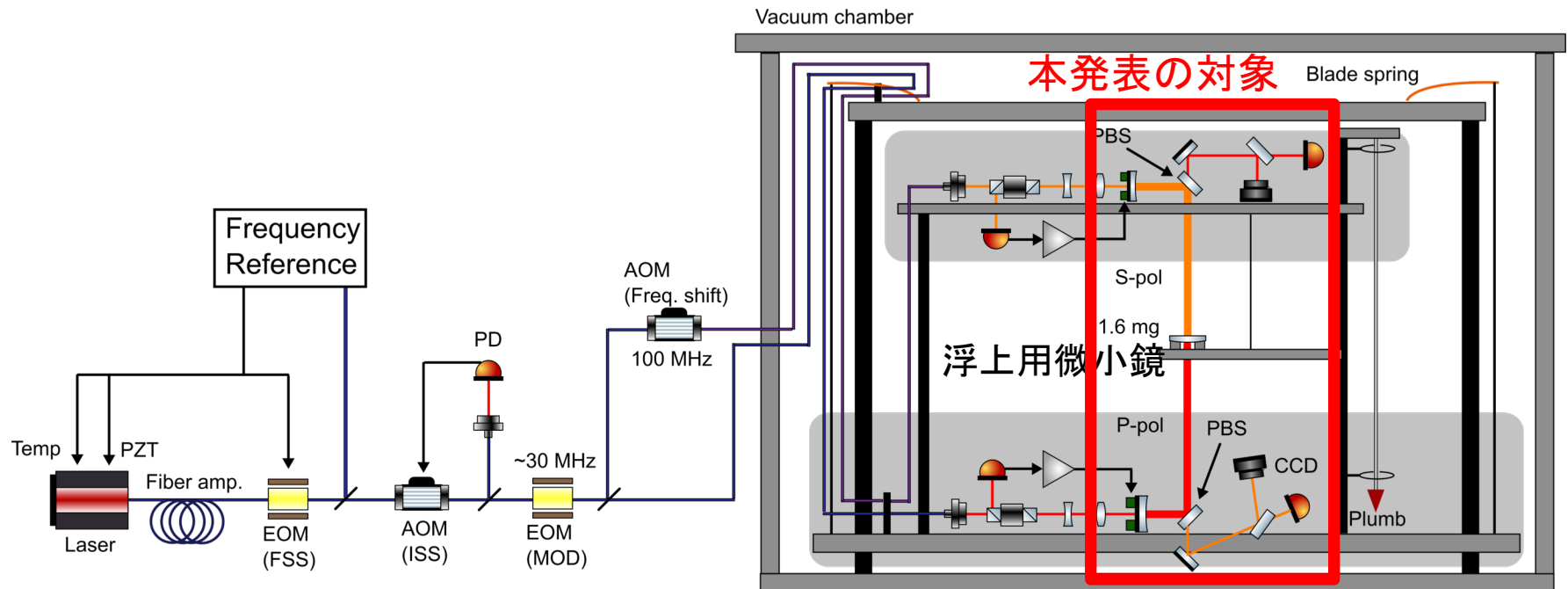


- 波長: 1064 nm
- 共振器フィネス: 700 (上下とも)
- 入射パワー: 8.5 W (下側)
2.6 W (上側)

- 微小鏡質量: 1.6 mg
 - 直径 3 mm, 厚さ 0.1 mm
 - 曲率半径 30 mm (平凸鏡)

光学浮上実証用の実験セットアップ

• 光学浮上の原理検証のための実験セットアップ

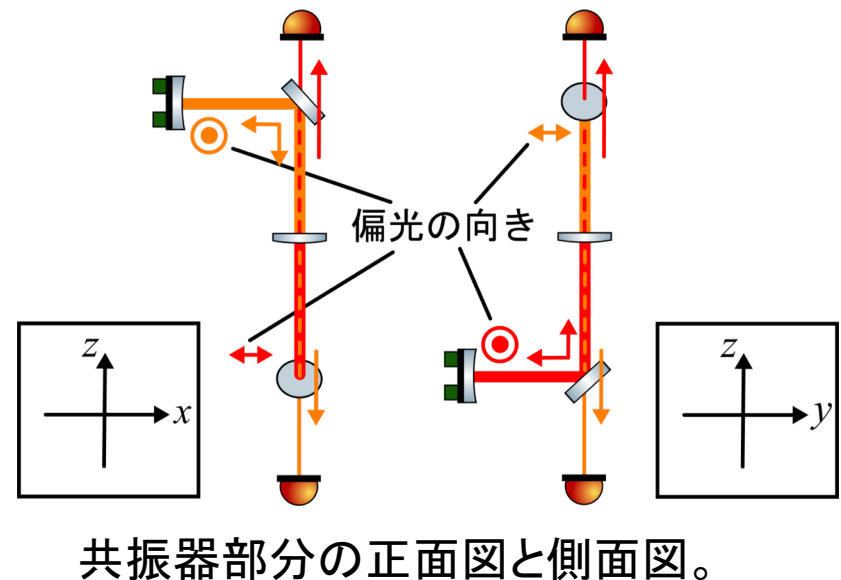
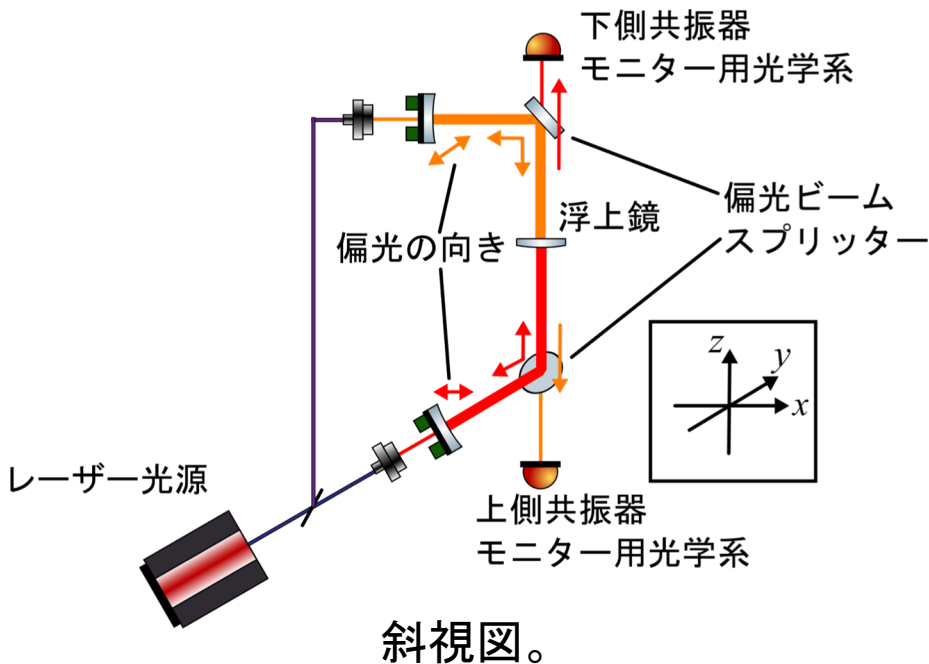


- 波長: 1064 nm
- 共振器フィネス: 700 (上下とも)
- 入射パワー: 8.5 W (下側)
2.6 W (上側)

- 微小鏡質量: 1.6 mg
 - 直径 3 mm, 厚さ 0.1 mm
 - 曲率半径 30 mm (平凸鏡)

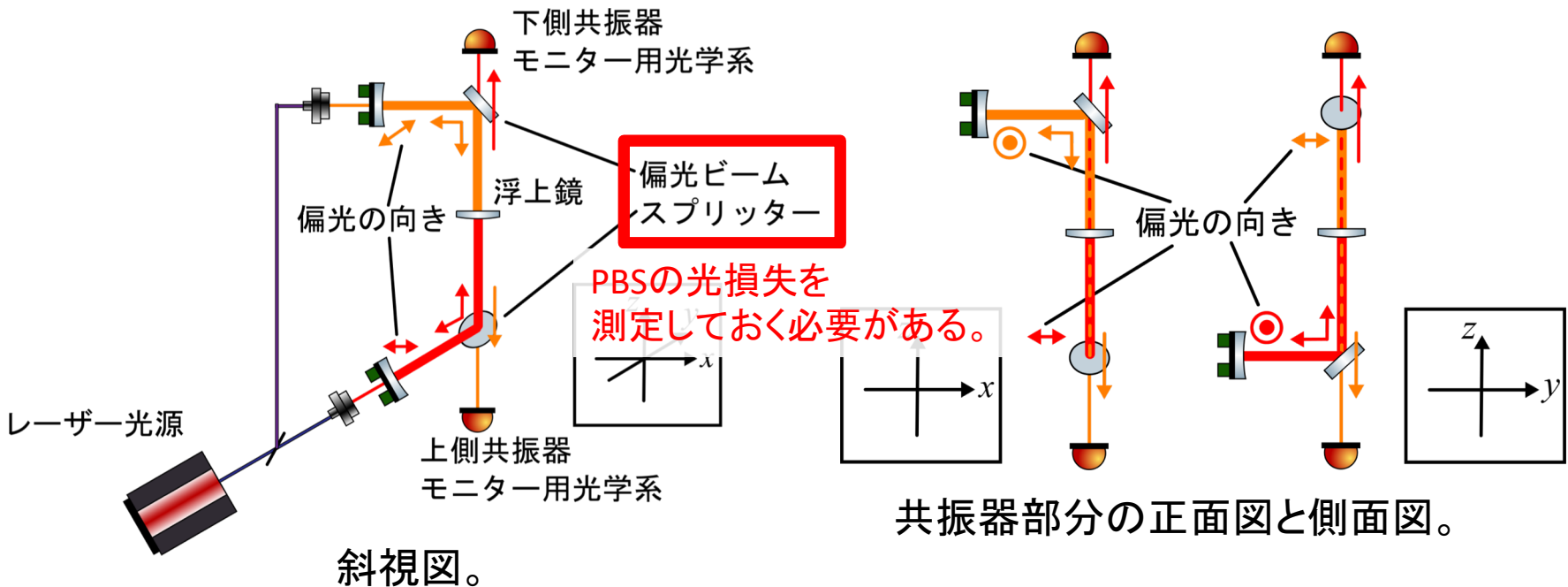
共振器部分の詳細

- 下図のように偏光と偏光ビームスプリッター(PBS)を使って上下の共振器を分離する。
→共振器の運用や設計をシンプルにできる。
- フィネスの設計値: 700
→共振器内の往復光損失の要求値: 9000 ppm以下



共振器部分の詳細

- 下図のように偏光と偏光ビームスプリッター(PBS)を使って上下の共振器を分離する。
→共振器の運用や設計をシンプルにできる。
- フィネスの設計値: 700
→共振器内の往復光損失の要求値: 9000 ppm以下

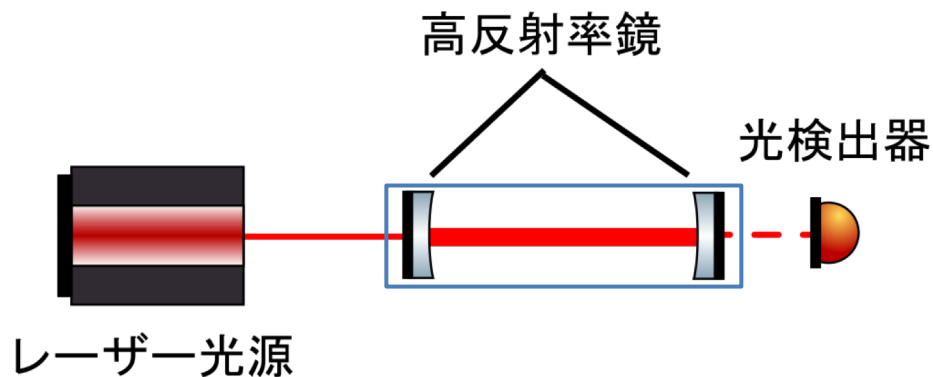


目次

1. イントロダクション
2. サンドウィッチ型光学浮上実証実験における
実験セットアップ
3. 偏光ビームスプリッターの光損失評価
4. まとめ

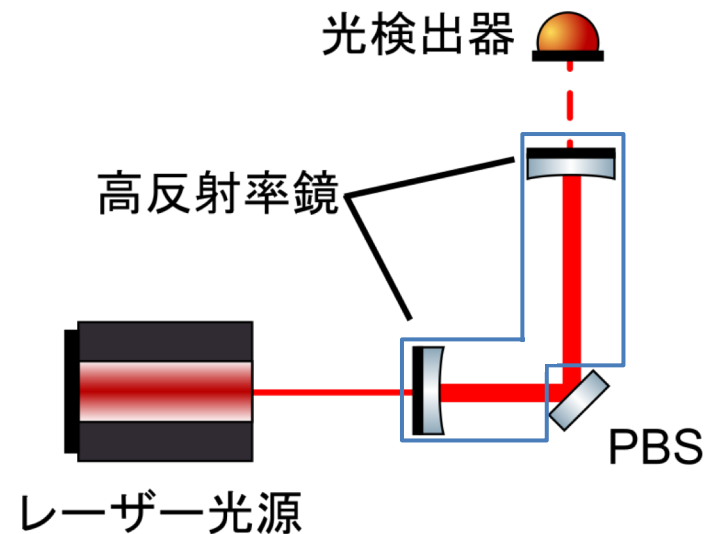
実験セットアップ

- PBSを実際に低光損失共振器に組み込んで、PBSの光損失を測定した。
- また、予備測定としてPBSなしの共振器の光損失も測定した。



予備測定のセットアップ。

全損失 = 鏡*2 + 空気による減衰等

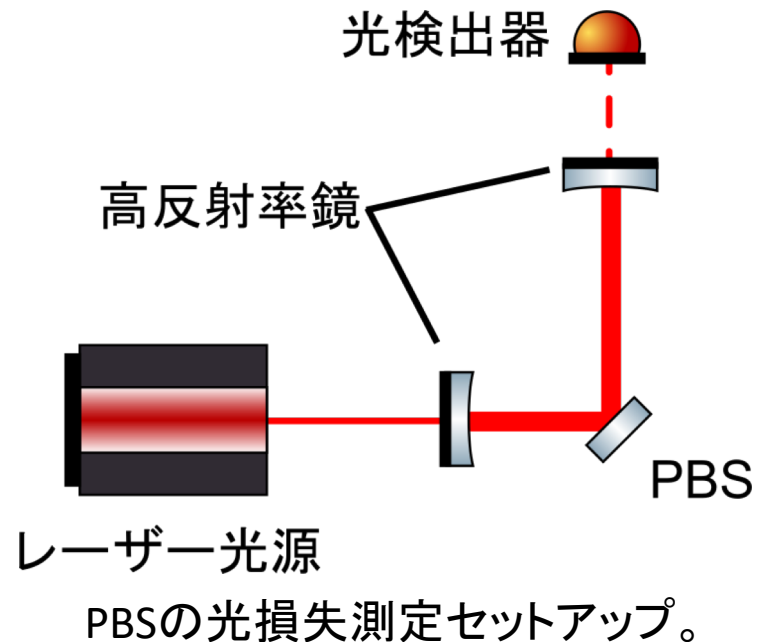


PBSの光損失測定セットアップ。

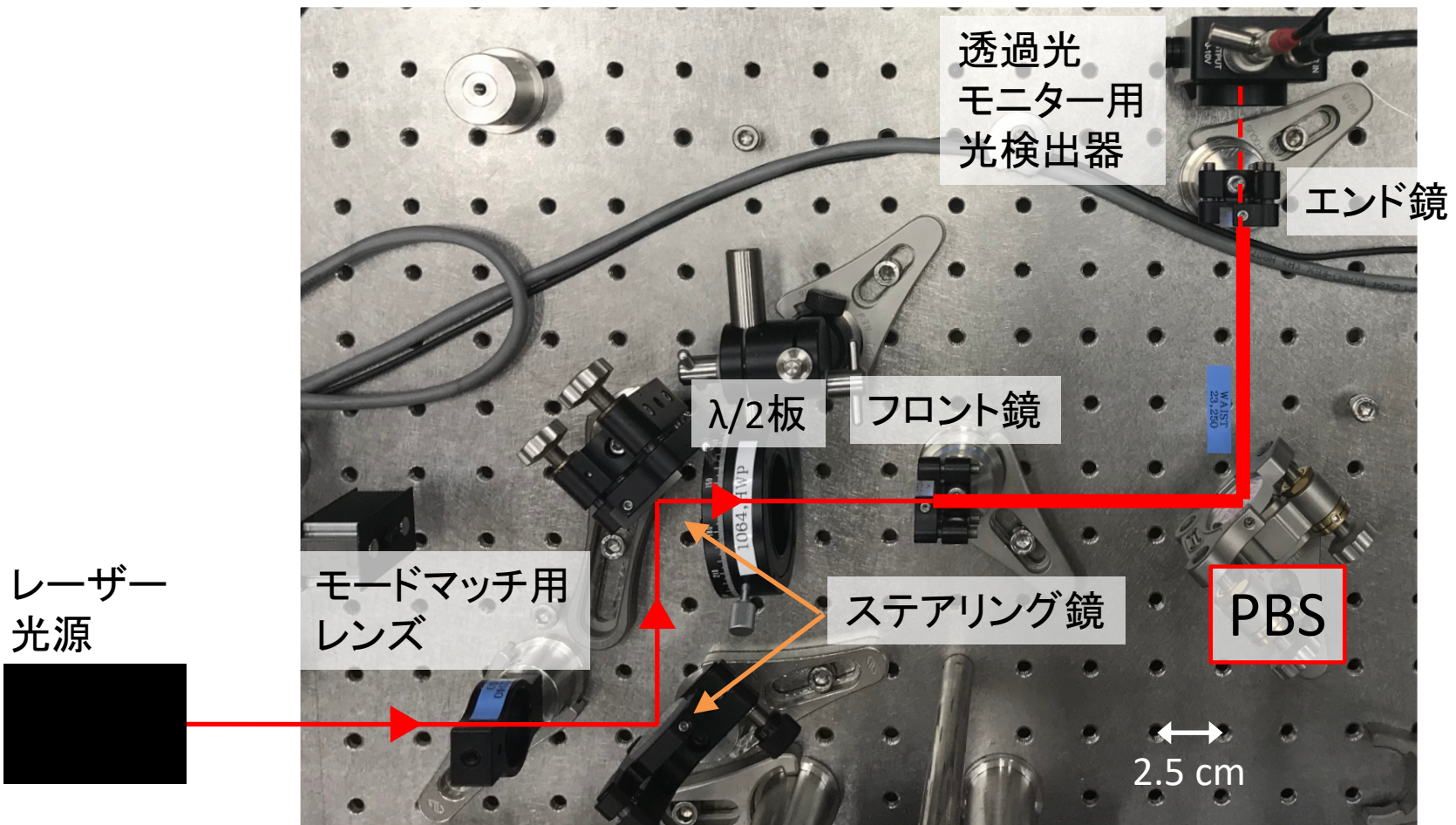
全損失 = PBS*2 + 鏡*2 + 空気による減衰等

実験セットアップ

- 共振器長 19.7 cm
(PBS挿入時 19.8 cm)
 - 高反射率鏡:
 - 強度反射率 $>99.995\%$
(光損失 <50 ppm)
 - 曲率半径 50 cm
 - PBS: PBSW-1064 (Thorlabs)
 - スペック値:
 - P偏光透過率: 0.993
 - S偏光透過率: 5.5×10^{-5}
- 往復光損失110 ppmに相当。



実験セットアップ



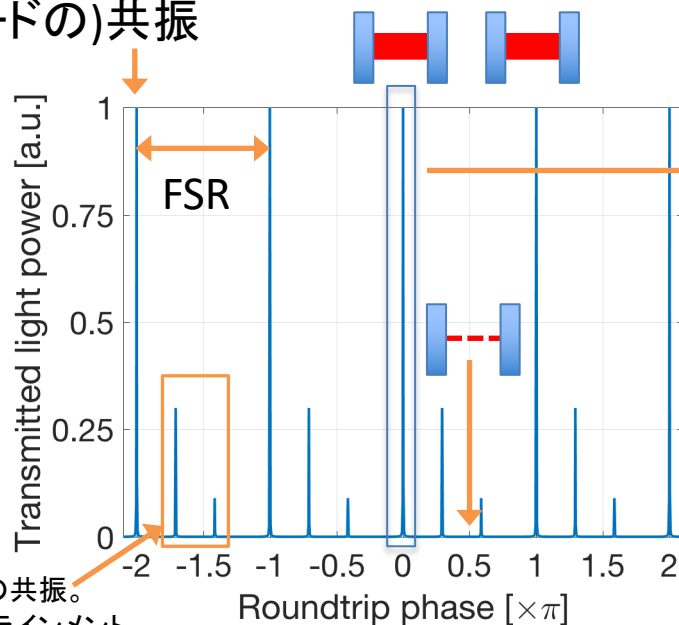
光損失の測定方法

- 共振器のフィネスから、共振器の往復光損失を求める。

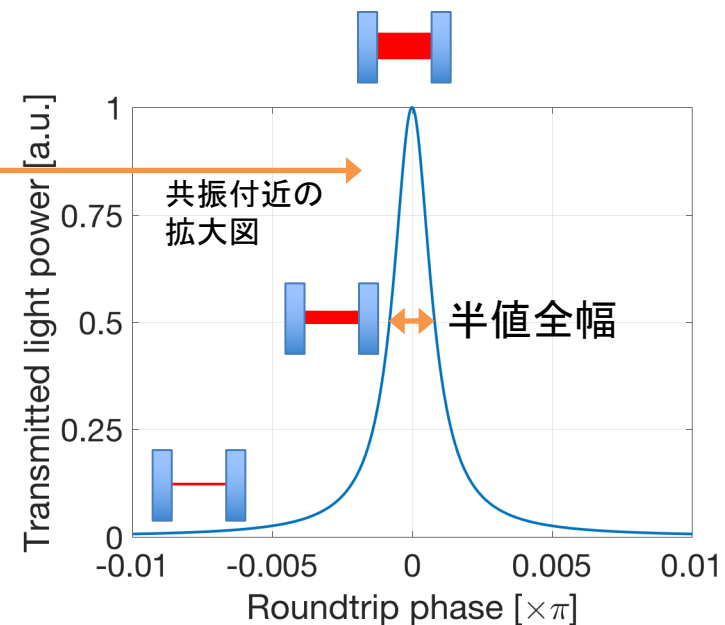
- フィネス = $\frac{\text{FSR}}{\text{半値全幅}} = \frac{2\pi}{\text{往復光損失}}$

フィネス: 共振器の共振の鋭さを表す無次元量。
FSR(フリースペクトラルレンジ): 共振器の隣り合う共振周波数の差。

(基本モードの)共振



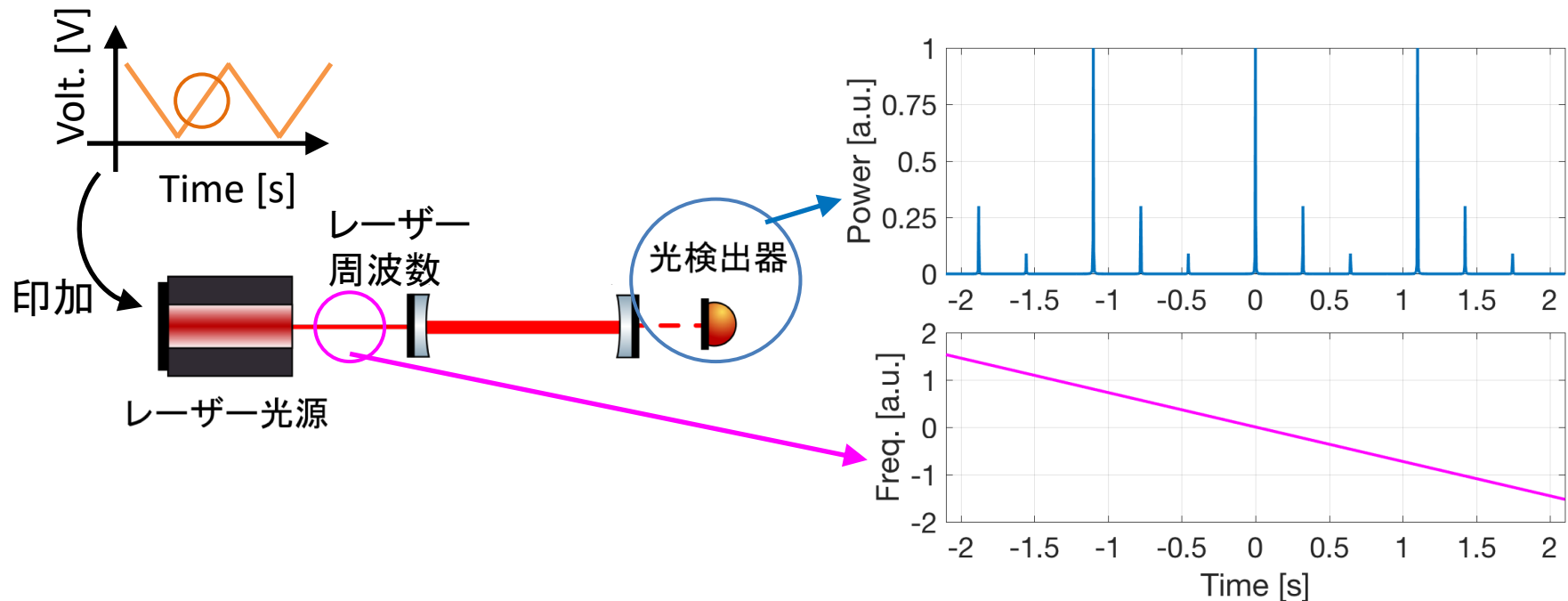
高次モードの共振。
共振器のアライメント
等が不完全だと生じる。



光共振器の往復位相変化に対する透過光強度の変化。

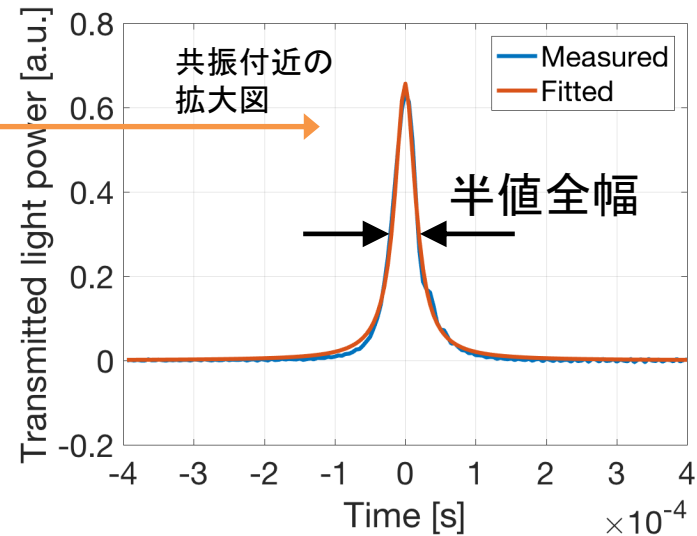
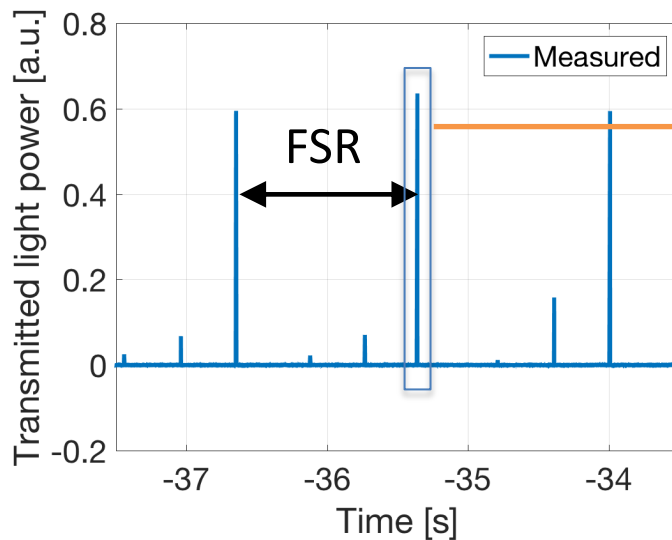
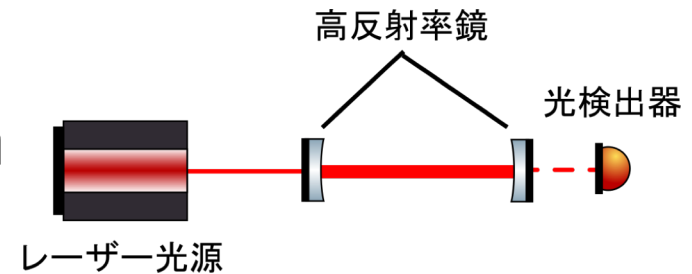
光損失の測定方法

- フィネスはキャビティスキャンによって測定。
- キャビティスキャン: 光共振器に入射するレーザー周波数(あるいは共振器長さ)を走査すること。
- 今回は三角波を使いレーザー周波数を線形に走査した。



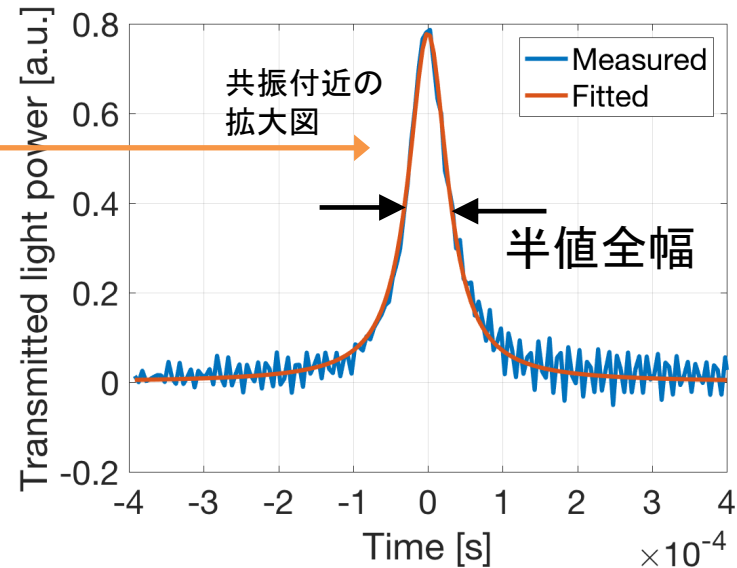
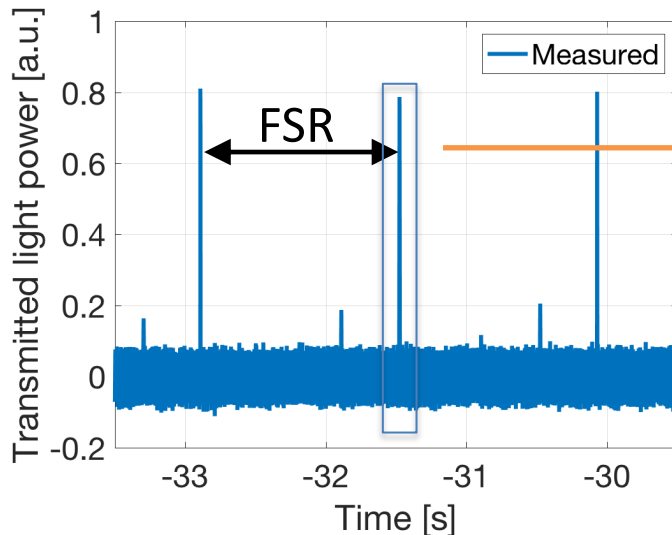
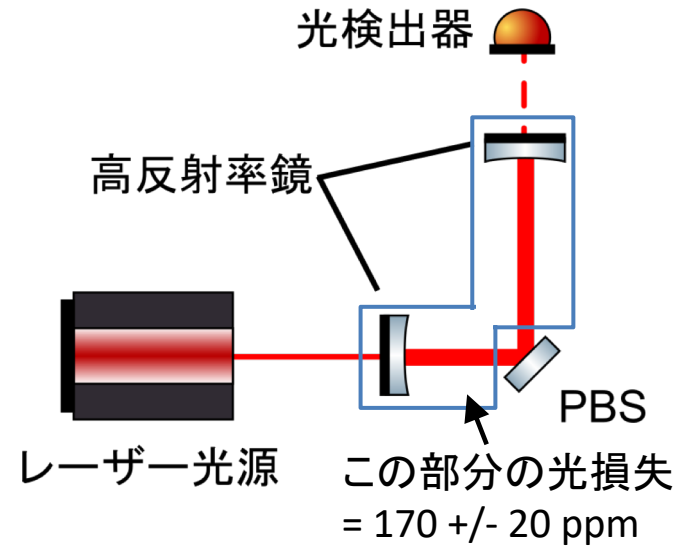
予備測定結果

- フィネス: $(3.6 \pm 0.4) \times 10^4$
- 往復光損失: 170 ± 20 ppm



本測定結果

- フィネス: $(1.9 \pm 0.5) \times 10^4$
- 往復全光損失: 330 ± 90 ppm
→ 往復PBS光損失: 160 ± 90 ppm
 < 9000 ppm (要求値)
 – スペックシートの値(110 ppm)と矛盾しない。



目次

1. イントロダクション
2. サンドウィッチ型光学浮上実証実験における
実験セットアップ
3. 偏光ビームスプリッターの光損失評価
4. まとめ

まとめ

- 標準量子限界到達を目指し、サンドウィッチ型光学浮上の実験的実証をすすめている。
- サンドウィッチ型光学浮上で用いる、PBSを持つ光共振器の光損失を測定した。
- 要求値 9000 ppm以下に対して、 160 ± 90 ppmと測定され、要求値を満たすことを確認した。
- 今後は、水平方向の安定性が実証され次第、実際の浮上実験用セットアップを構築し、サンドウィッチ型光学浮上の原理実証を行う。

補遺

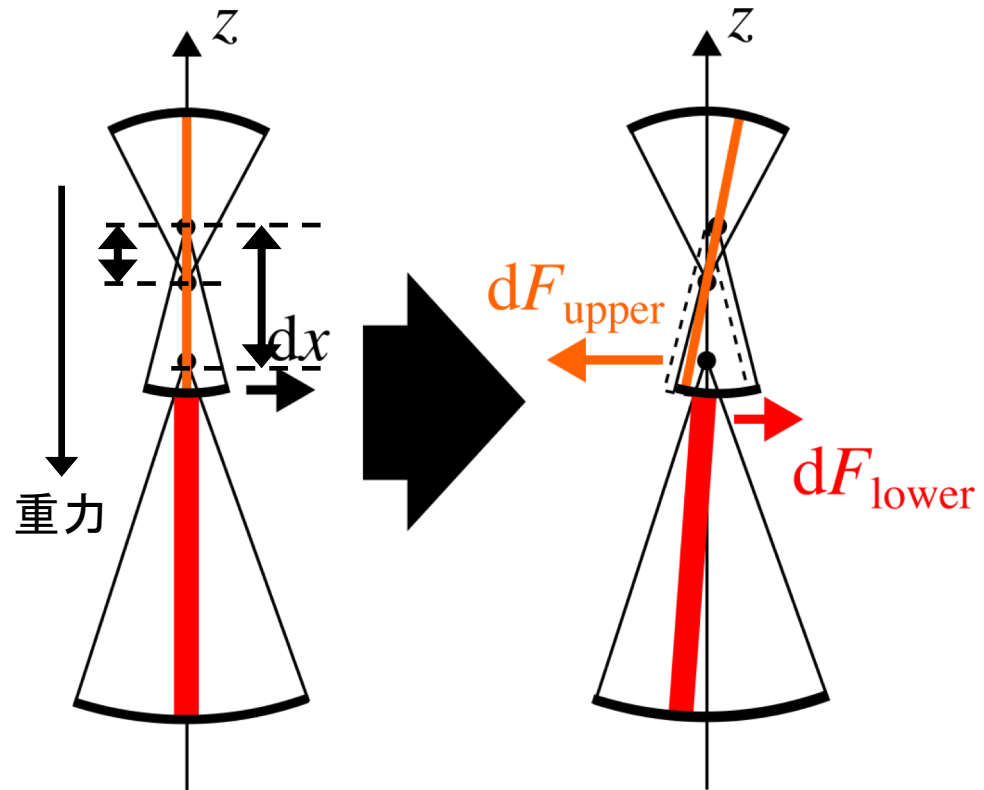
イントロダクション

サンドウィッチ型光学浮上における水平方向安定性

ポイント

1. 浮上のために下側の共振器内パワーの方が大きい。
2. 浮上鏡に曲率がある。
3. 上側の共振器の曲率中心間の距離を下側に比べて近づける。

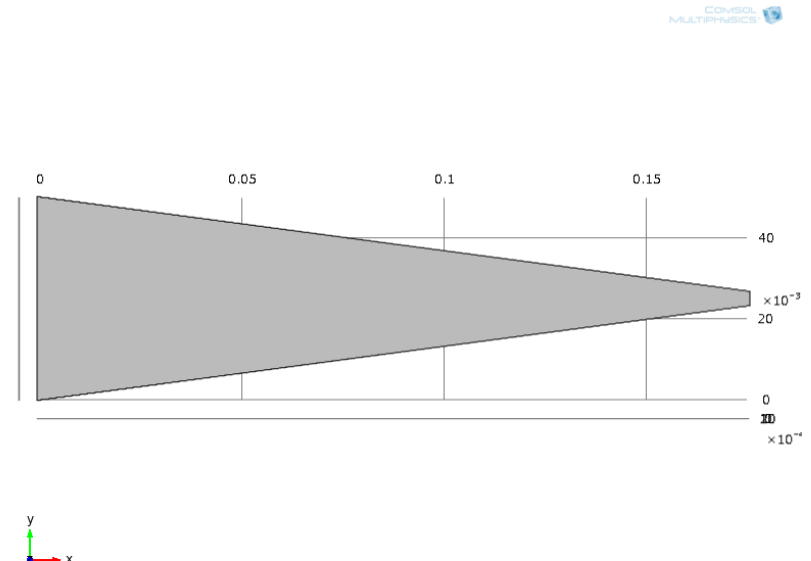
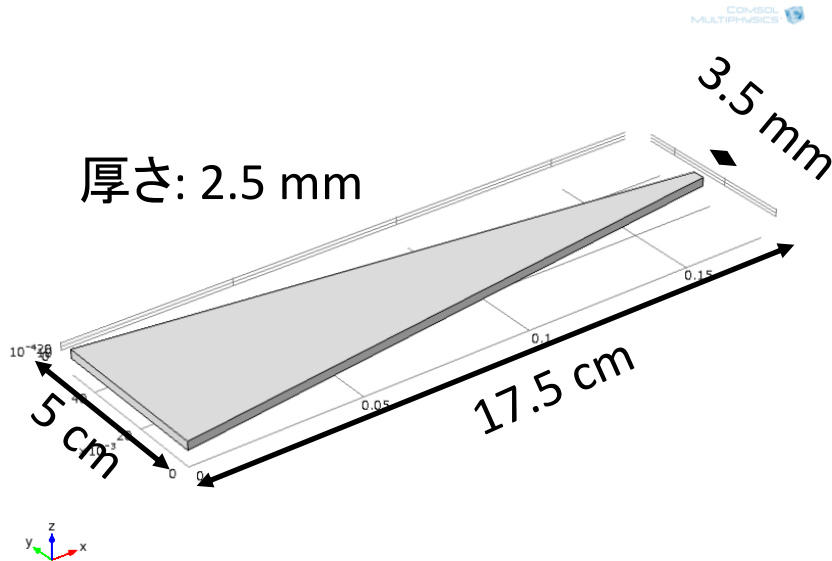
→ すると、浮上鏡が水平にずれた時に、上側共振器の共振器軸の方が大きく傾き、全体としては復元力がはたらくことになる。



サンドウィッチ型光学浮上の水平方向安定性の模式図。

Blade spring design

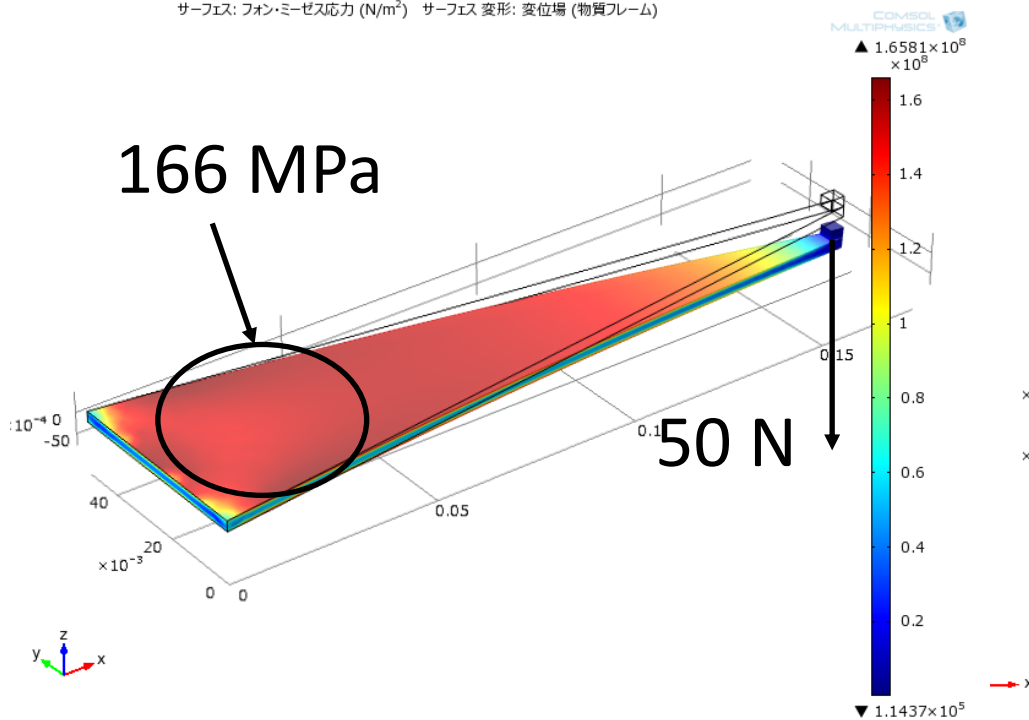
- Design of blade spring with COMSOL
 - 材質: ベリリウム銅
 - 厚さ: 2.5 mm, 長さ: 17.5 cm, 幅: 5 cm (根本), 3.5 mm (先端)
 - 一枚あたりの荷重: 5 kg (4本で20 kgを懸架)



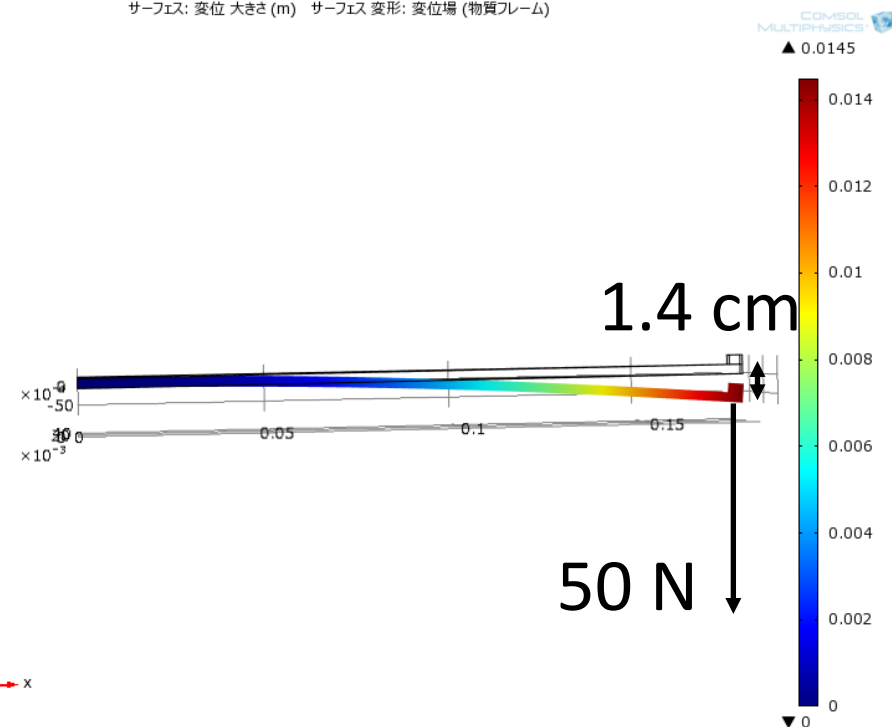
Blade spring design

- 5 kgを懸架したときの最大応力と変位量
 - 最大応力: 166 MPa, 変位量: 1.4 cm
- (CuBeのバネ限界値 >500 MPa)

サーフェス: フォン・ミーゼス応力 (N/m²) サーフェス 変形: 変位場 (物質フレーム)



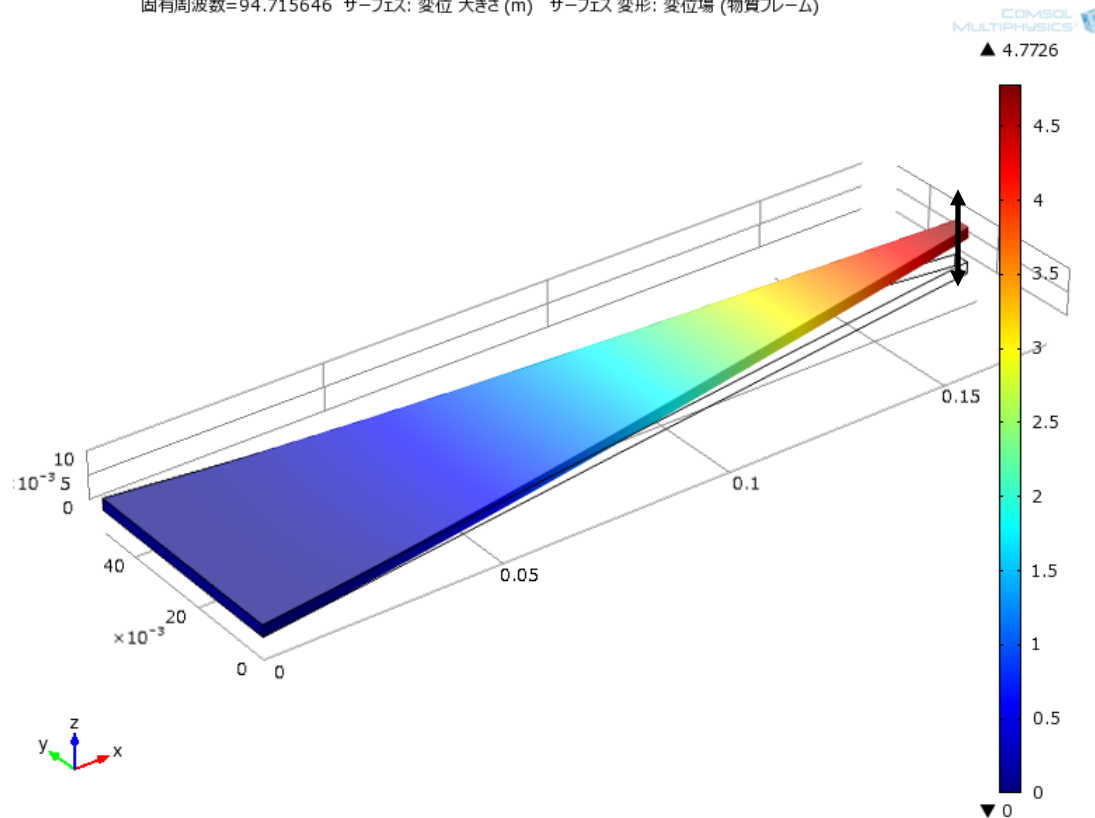
サーフェス: 変位 大きさ (m) サーフェス 変形: 変位場 (物質フレーム)



Blade spring design

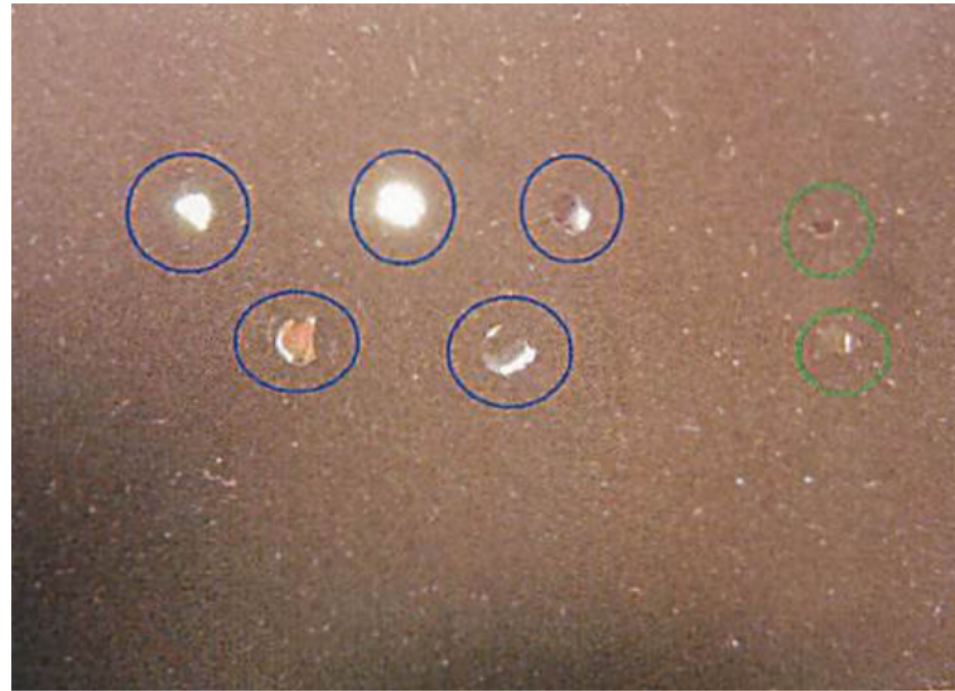
- 5 kgを懸架したときの基本モード周波数変化
– 無荷重時: 95 Hz → 5 kg荷重時: 4 Hz

固有周波数=94.715646 サーフェス: 変位 大きさ (m) サーフェス 変形: 変位場 (物質フレーム)



微小鏡の特性評価

- 微小鏡の設計値
 - 質量: 1.6 mg (直径: 3 mm、厚さ: 0.1 mm)
 - 曲率半径: 30 mm (平凸)
 - 強度反射率: 0.9995
- 微小鏡は既に納品されているが、このような小さい鏡は特性評価が難しい。
 - 製作も難しかったため、欠けなく納品されたのは1枚のみ。



コーティング後の微小鏡の写真。7枚中1枚のみ欠けがない。
7枚中4枚は一部が、7枚中2枚は半分以上欠けている。

Experimental configuration in Phase-2

- wave length: 1064 nm
- finesse: 100 (lower, upper)
- input power: 10 W (lower)
2.1 W (upper)
- lev. mirror mass: 0.2 mg
- int. reflectivity: 0.975 (lev.)
0.962 (l, u)
- freq. ref. : asymmetric FMI
- Passive stabilizing cavity (double pass)
 - length: 3 m (FSR: 100 MHz)
 - finesse: 3×10^4
 - cavity pole: 1.6 kHz
 - Intracavity power: ~ 300 kW!!

