

重力波研究交流会

Crackleノイズの測定

東京大学天文学専攻
国立天文台重力波プロジェクト推進室
ちんたん

Crackleノイズとは？

アルク英和辞書：

Crackle

【名】

1. ひび模様 {もよう}
2. パチパチいう音
3. 《医》パチパチ音、クラックル◆肺の異常音

結局、どういう
ノイズ???

例：

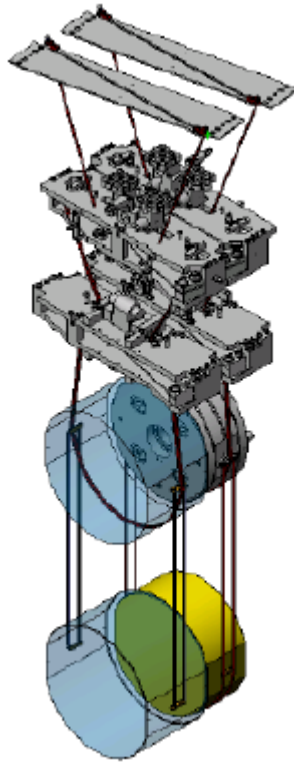
- 地球の地盤変化によっておこる断続的な地震
- しわくしゃの紙が出すような音
- 磁性体が外部磁場によって磁化されていくときのノイズばるくはうぜん(Barkhausen Noise)

実際に聞けるサイト→<http://www.simscience.org/crackling/>

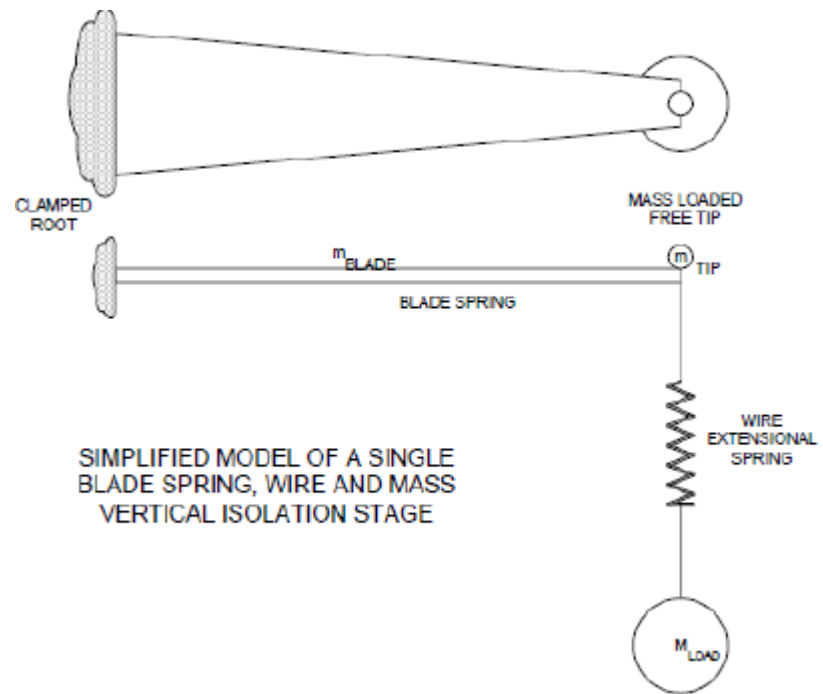
エネルギーの非線形的な変換によるノイズ

Crackleノイズとは？

重力波検出器のどこに現れる???



a-LIGOのsuspension system



鏡などを吊るための板バネ

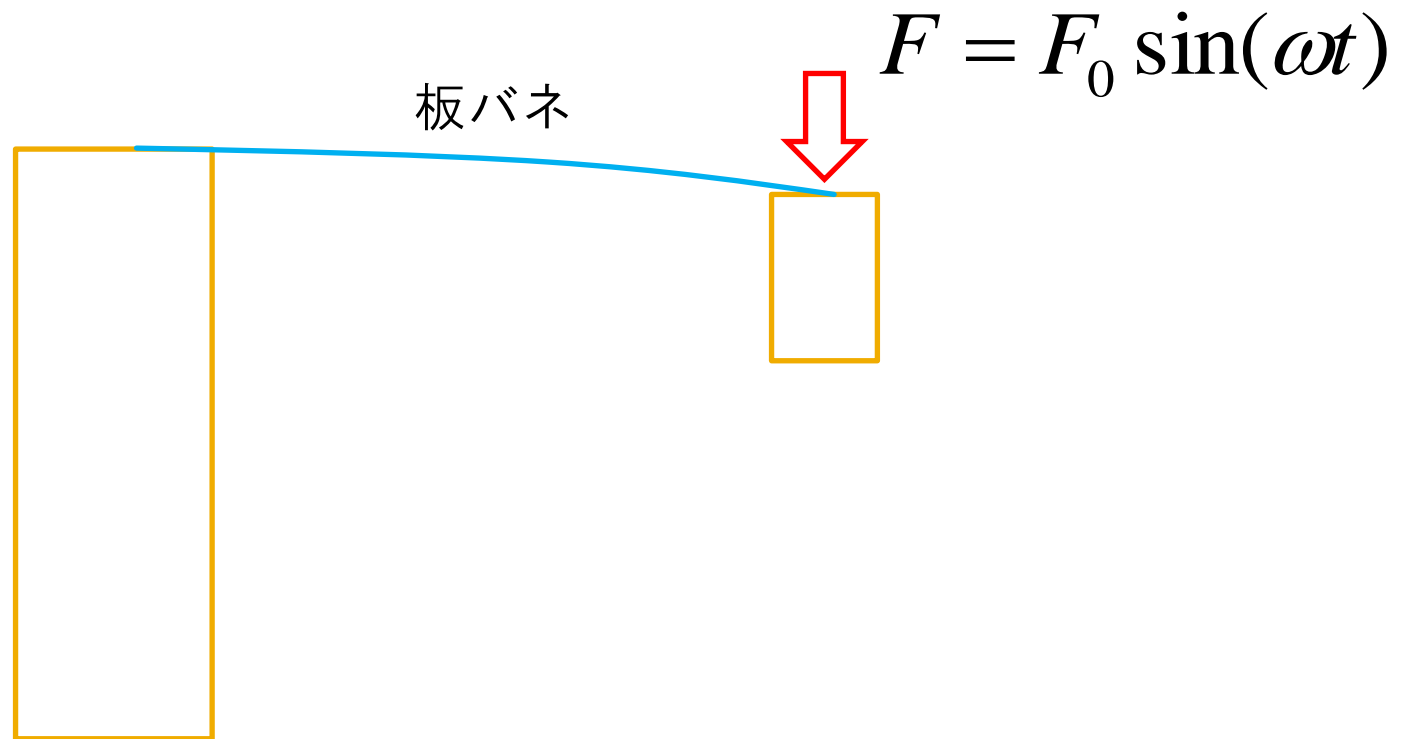
板バネが低周波で動くと、
高周波でCrackleノイズが発生？

まだ誰も見たことはない

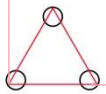


実験的に見たい

実験的にCrackleノイズを見るには



板バネに力を加えて、吊られているマスの位置変化をみる



どういう位置変化が見れる？

modeling :

板バネの垂直成分のみを考える。

板バネに力を加えると、

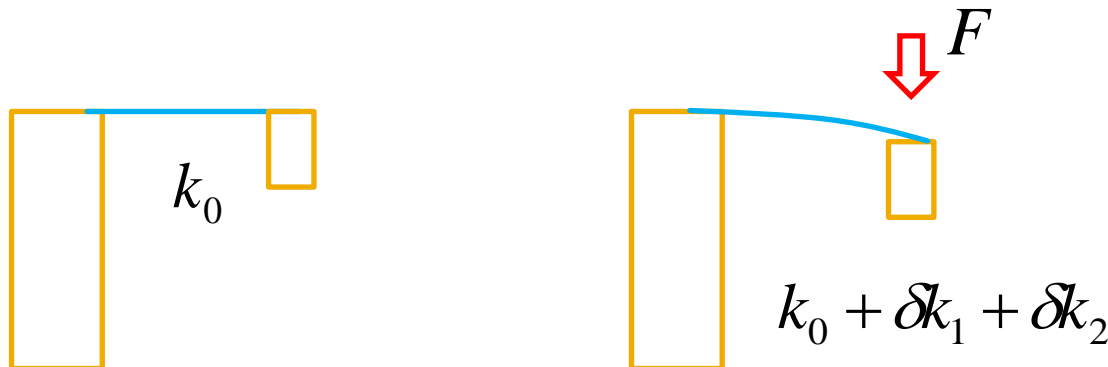
1. 力に比例してバネ定数 k が線形に変化する。
2. 力の時間変化に比例してバネ定数 k が線形に変化する。

$$k_1 = k_0 + \delta k_1 = k_0 + n(t)F\alpha \quad \Longrightarrow \quad \text{Stress Crackle noise}$$

$$k_2 = k_0 + \delta k_2 = k_0 + n(t)\frac{dF}{dt}\beta \quad \Longrightarrow \quad \text{Jerk Crackle noise}$$

$n(t)$: $-1 \sim 1$ の乱数

α 、 β がCrackleノイズの寄与を表わす係数



どういう位置変化が見れる？

$$k_1 = k_0 + \delta k_1 = k_0 + n(t)F\alpha \quad \Longrightarrow \quad \text{Stress Crackle noise}$$

$$k_2 = k_0 + \delta k_2 = k_0 + n(t)\frac{dF}{dt}\beta \quad \Longrightarrow \quad \text{Jerk Crackle noise}$$

マスの位置変化

Crackle noiseなし：

$$z_0 = \frac{F}{k_0} = \frac{F_0}{k_0} \sin(\omega t)$$

Stress Crackle noise：

$$z_1 = \frac{F}{k_1} = \frac{F_0 \sin(\omega t)}{k_0 + n(t)F_0 \sin(\omega t)\alpha}$$

Stress Crackle noise：

$$z_2 = \frac{F}{k_2} = \frac{F_0 \sin(\omega t)}{k_0 + n(t)F_0 \omega \cos(\omega t)\beta}$$

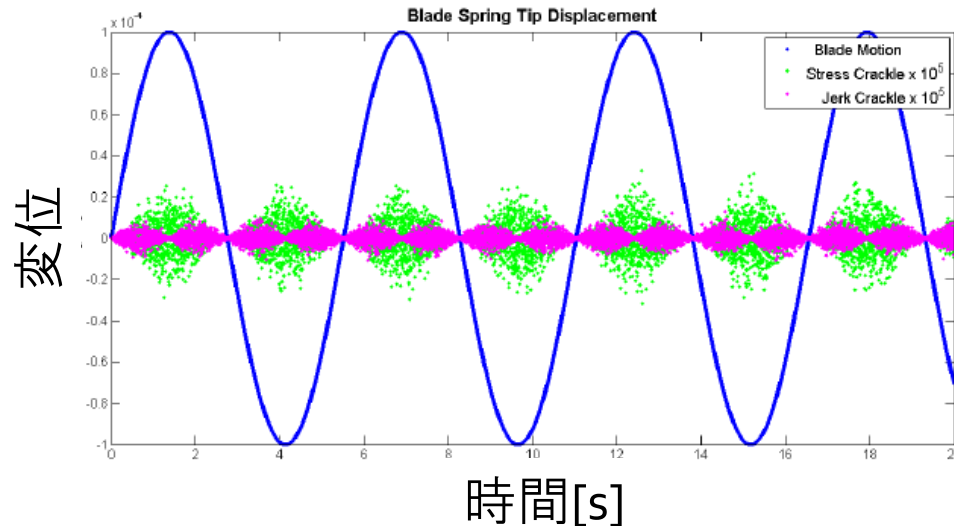
どういう位置変化が見れる？

ノイズだけ抜き出すと

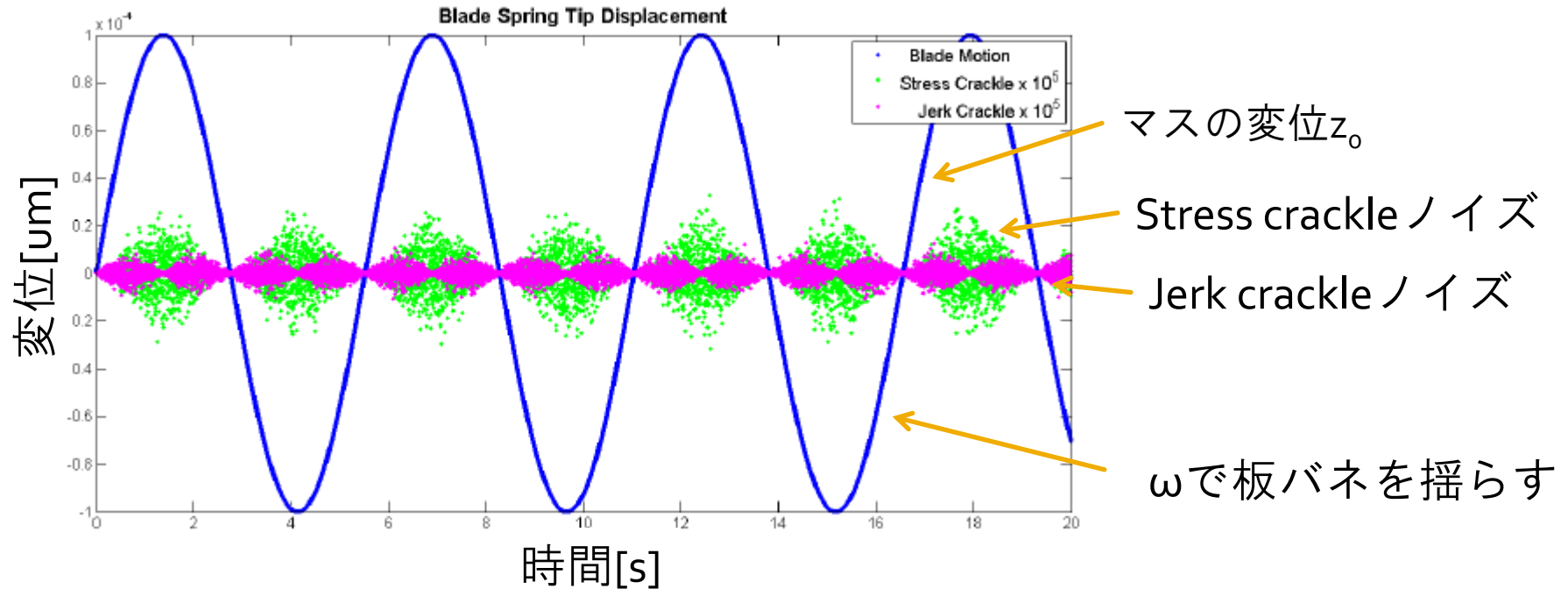
$$\text{Stress Crackle noise: } z_{c1} = z_2 - z_0 = \frac{-F_0^2 n(t) \alpha \sin^2(\omega t)}{k_0^2 + k_0 n(t) \alpha F_0 \sin(\omega t)}$$

$$\text{Jerk Crackle noise: } z_{c2} = z_2 - z_0 = \frac{-\frac{1}{2} F_0^2 n(t) \omega \beta \sin(2\omega t)}{k_0^2 + k_0 n(t) \beta F_0 \omega \cos(\omega t)}$$

これらを z_0 とともにplotする。 α 、 β 、 F_0 には適当な数字を代入。



どういう位置変化が見れる？

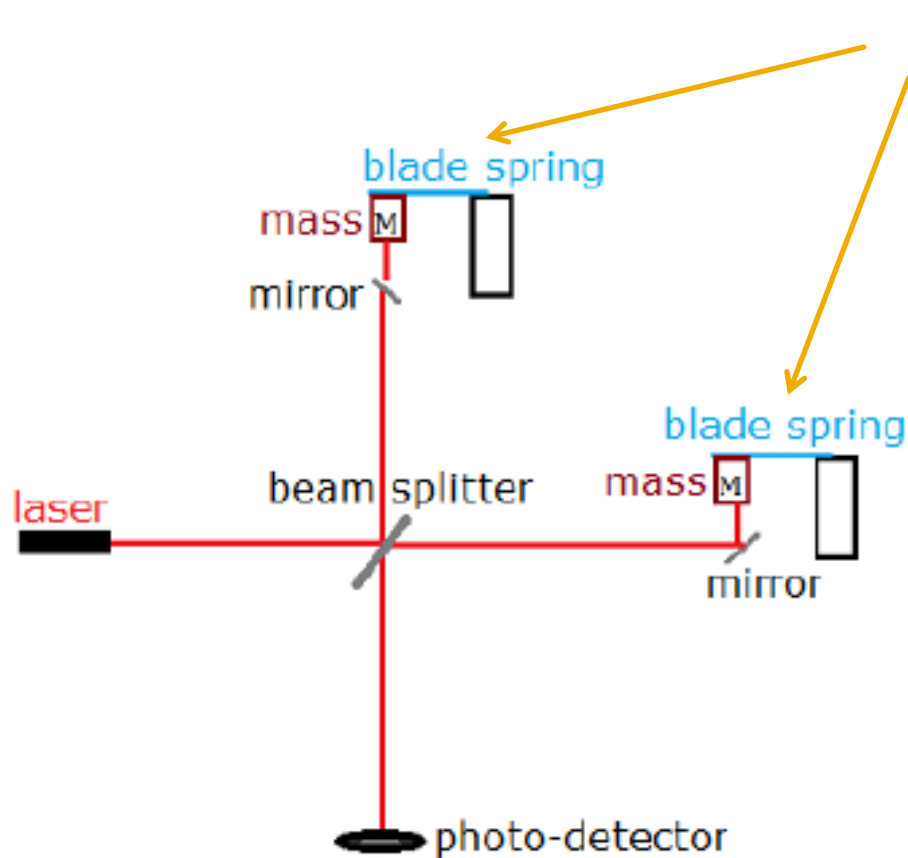


モデルが正しければ、二乗して 2ω , 4ω で復調すれば、Crackleノイズを抜き出すことができる。

実験結果からCrackleノイズまで

復調後の信号 \Rightarrow Crackleノイズの寄与 α , β \Rightarrow Crackleノイズの大きさ

測定の基本デザイン

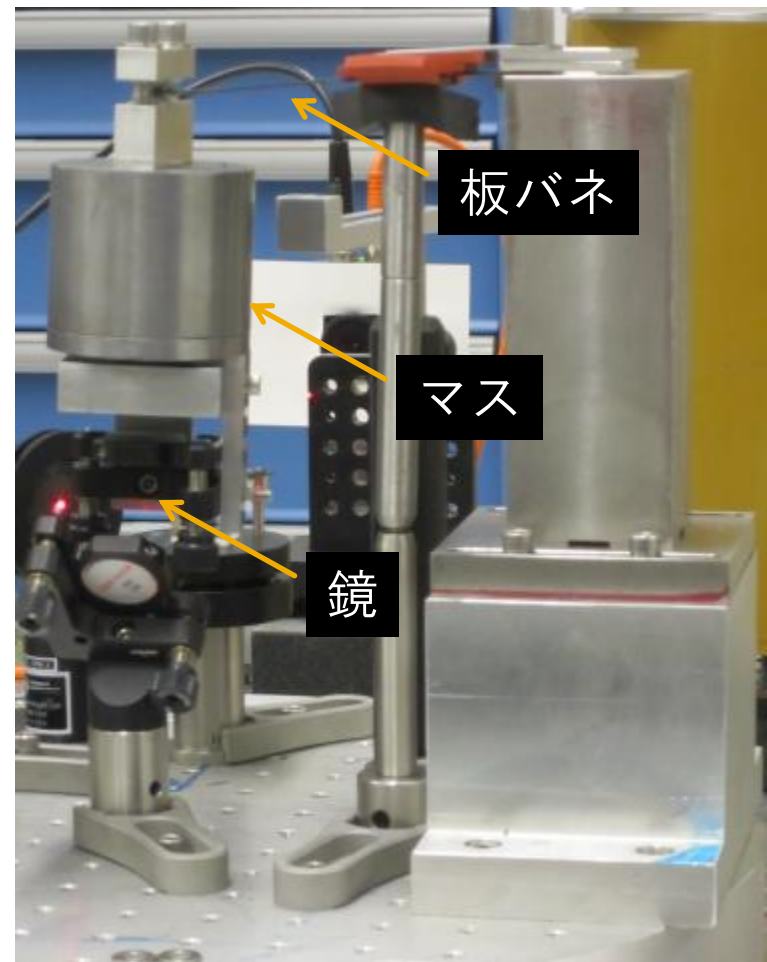
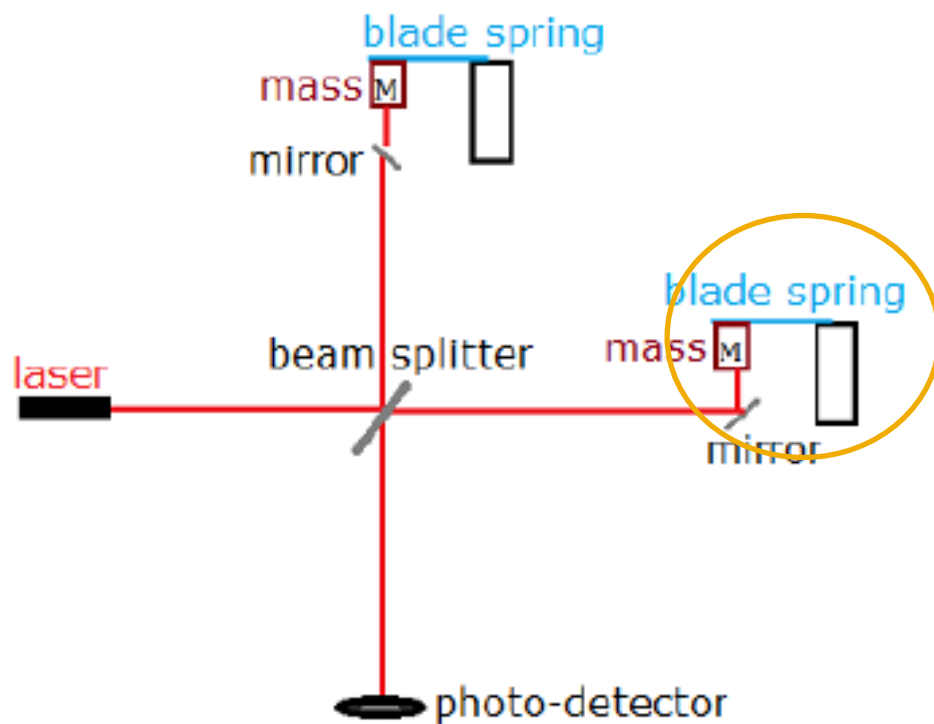


2つの板バネを同時に同じだけ動かしながら Michelsonをlockし、Crackleノイズをみる。

Massの上にはコイルマグネットアクチュエータがついている

測定の基本デザイン

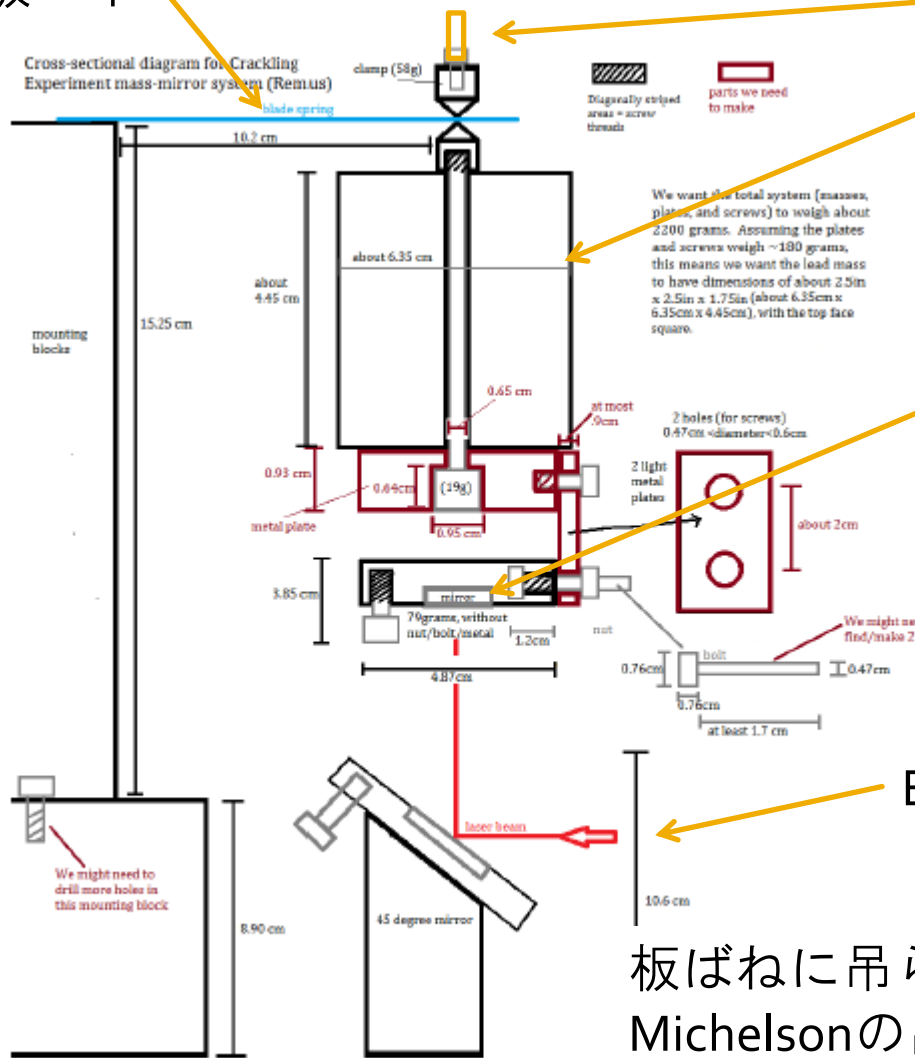
実際の写真



設計図

板バネ

コイルマグネットアクチュエータ



マス

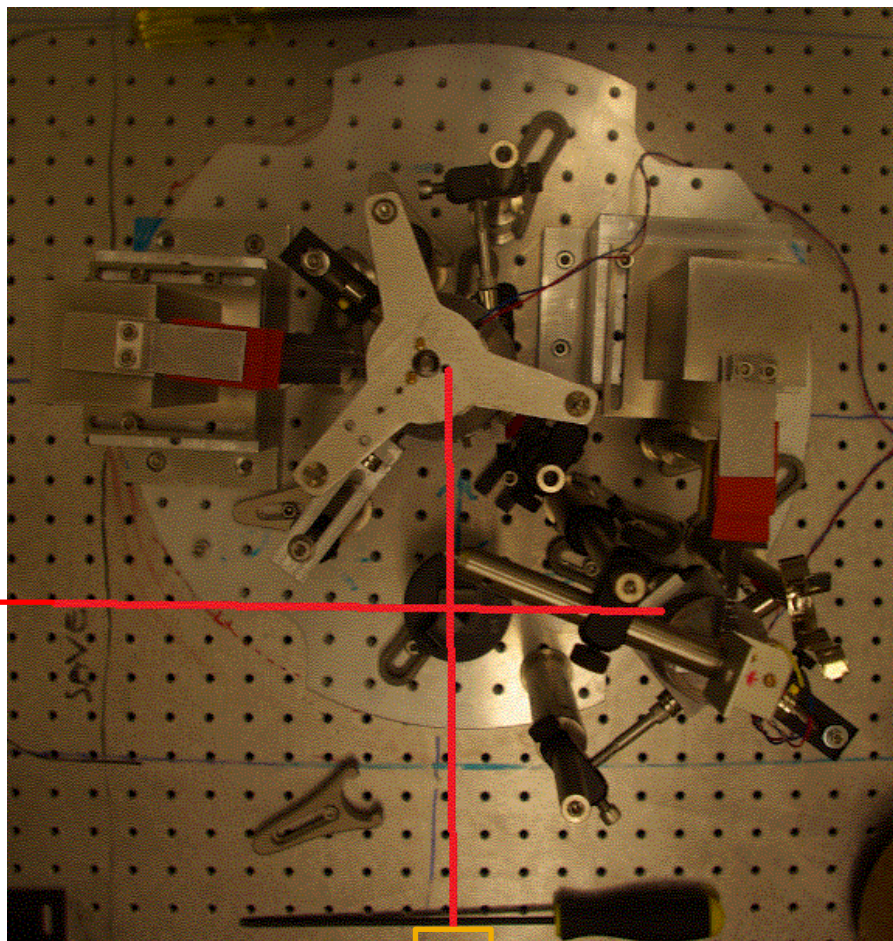
鏡(Michelsonのend mirror)

BSからのレーザー光

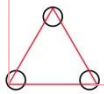
板ばねに吊られている鏡の位置が変動することで Michelsonの出力が変化する

組み立ててみた

レーザー源

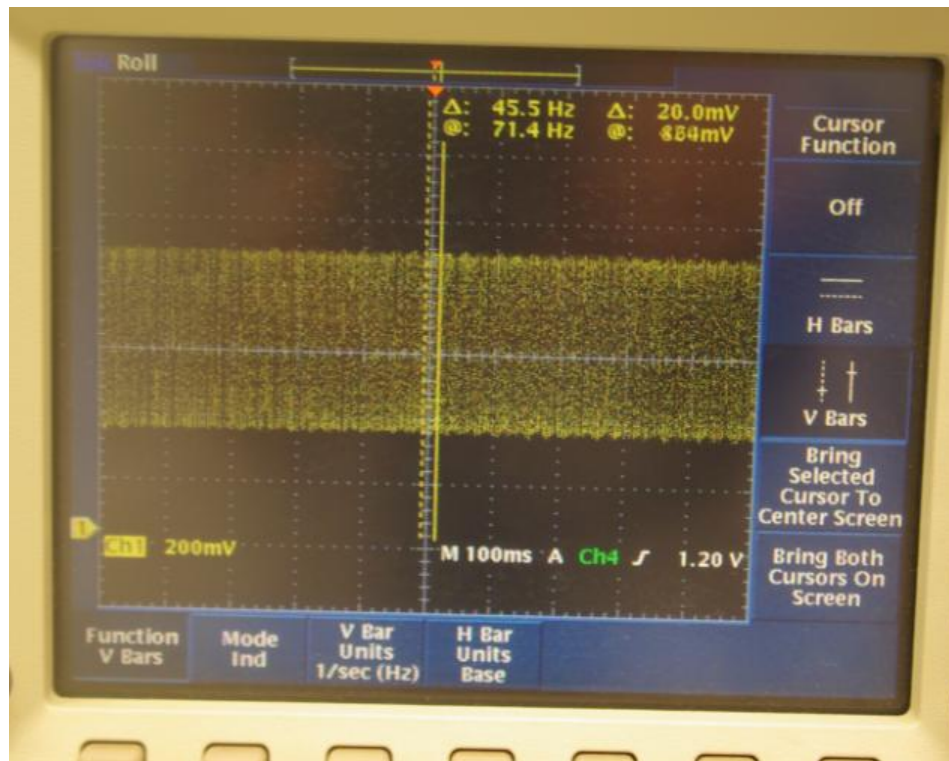


PD



Michelsonをlockしようとして

設計図通りに組み立て、lockを試みたが、lockできず。



Michelsonのerror signal

いろいろな共振がlockを邪魔していた。



1個ずつ共振の原因を探し、抑えていく。

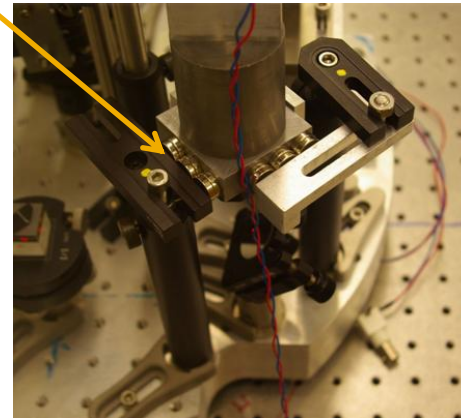
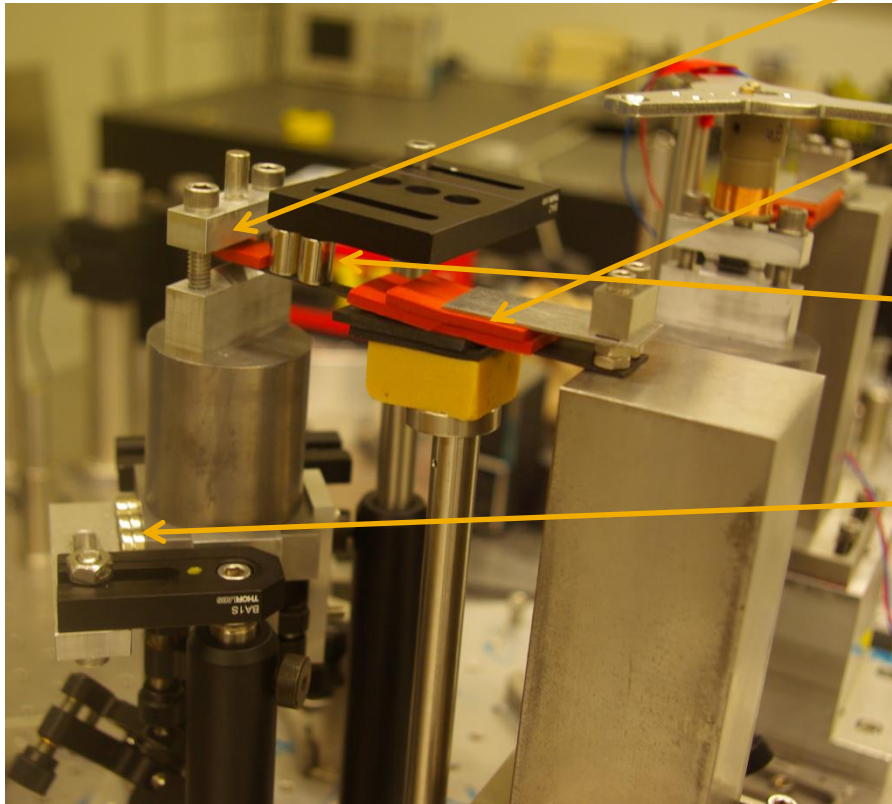
Michelsonのlockのために

金属で板バネを挟むのではなく、
ゴムを敷いておくだけ

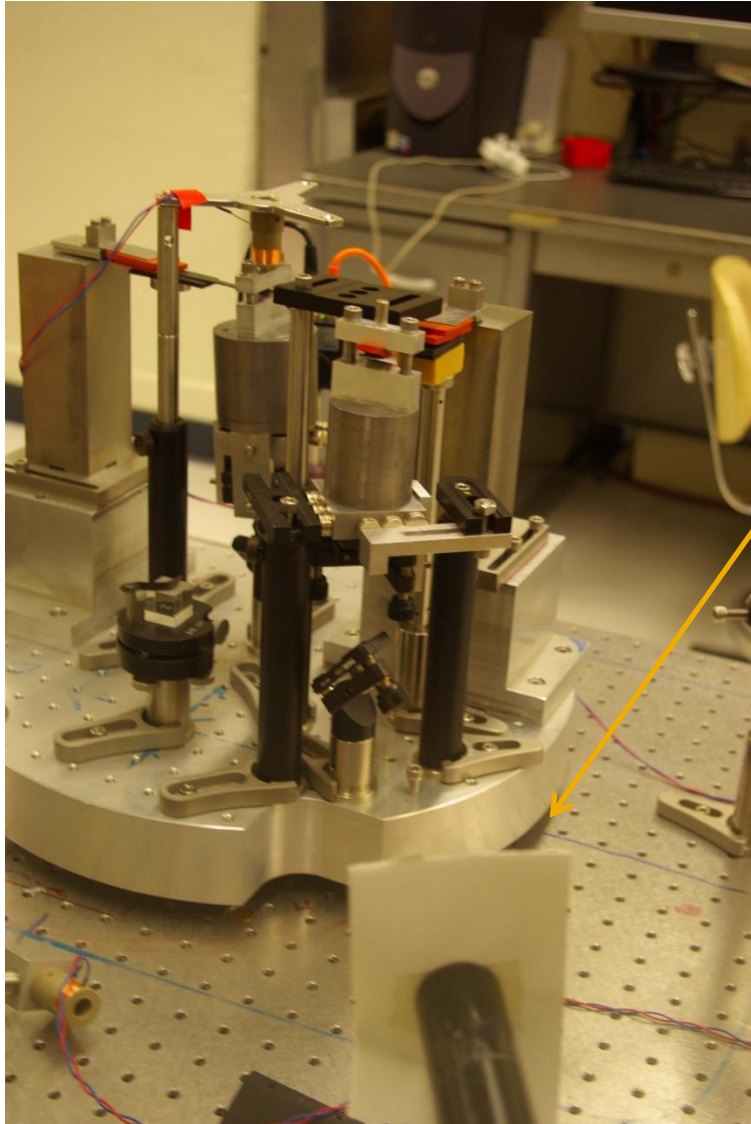
ゴムで板バネを挟む

板バネに磁石を置き
エディカレントダンピング

ネオジウム磁石をいっぱい使って
エディカレントダンピング



Michelsonのlockのために



地面振動の影響を減らすために
スタックを組んだ。

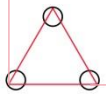
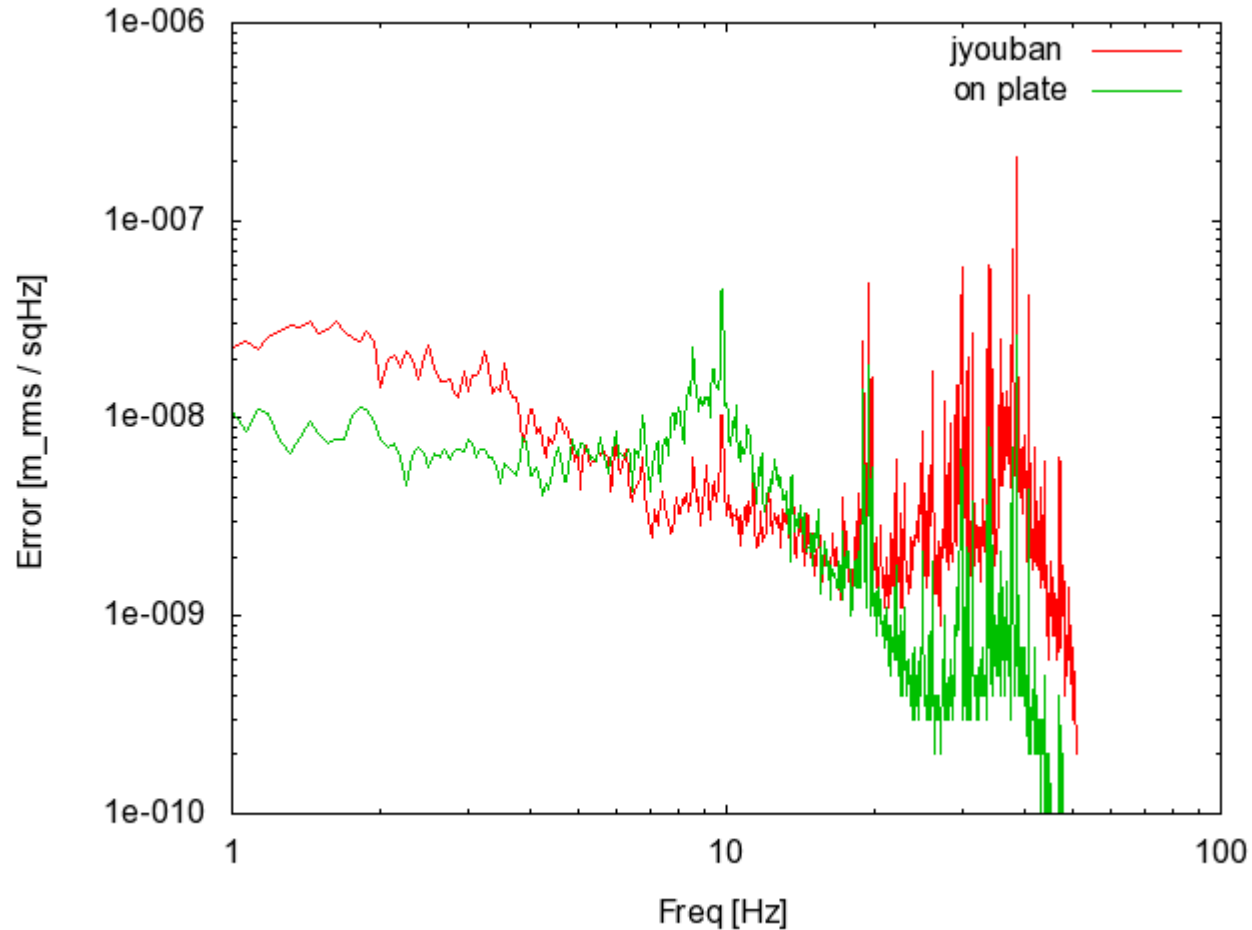
ゴムの足を4つ置いて、
その上に装置全体を置いた。

最終的には2段にした。



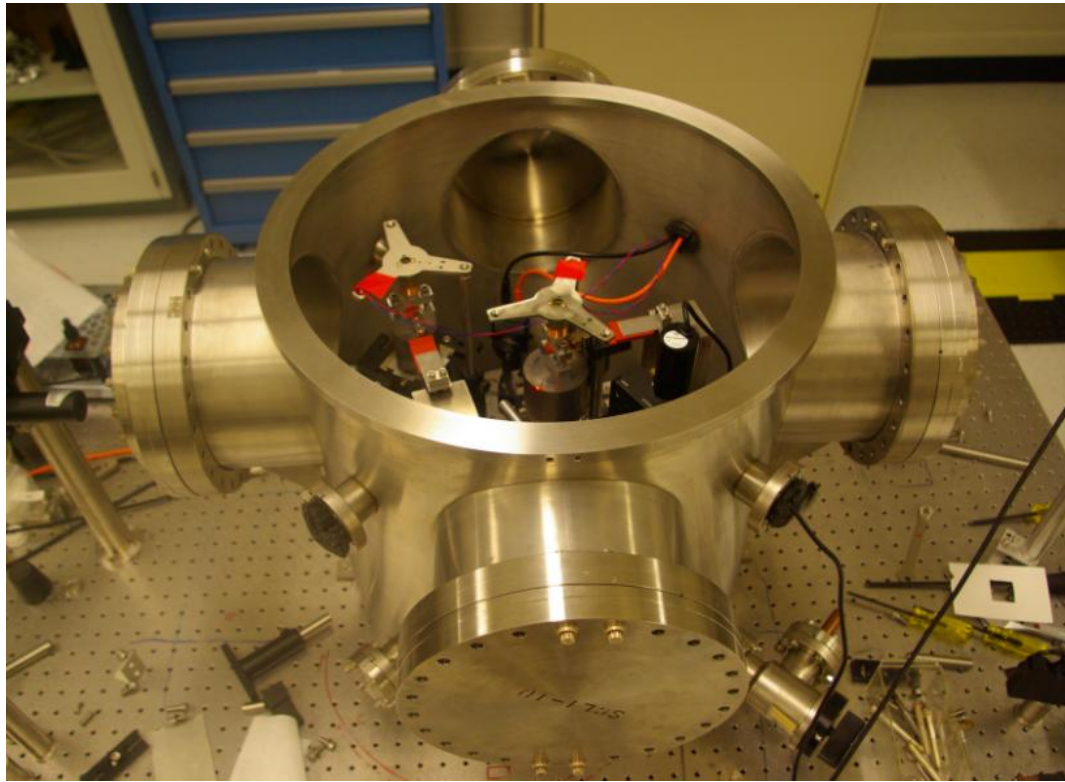
Michelsonのlockのために

地震計を使ってテーブルと、スタック(1段)の上での地面振動を測定

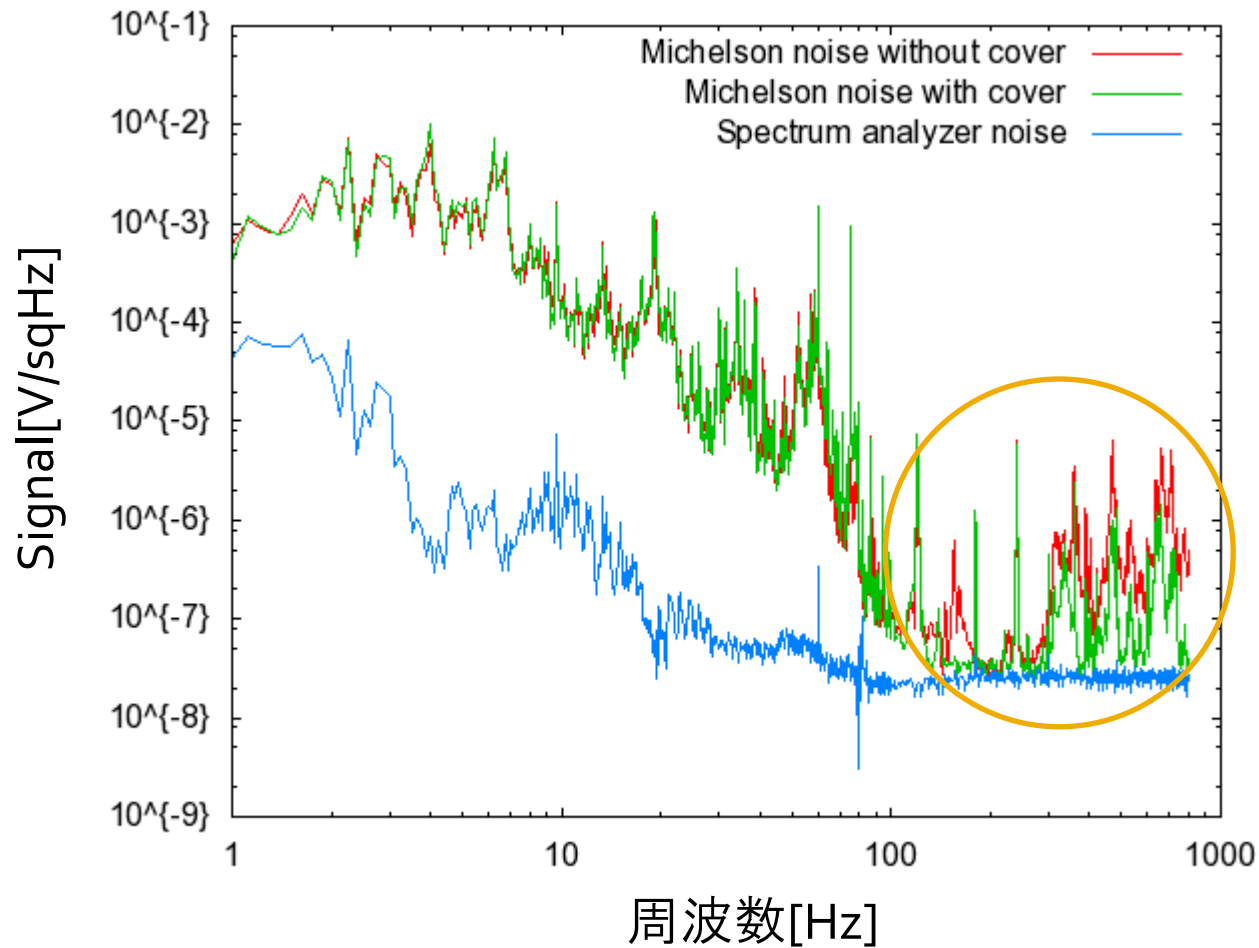


Michelsonのlockのために

音響ノイズを抑えるために装置全体を真空槽の中に入れた。



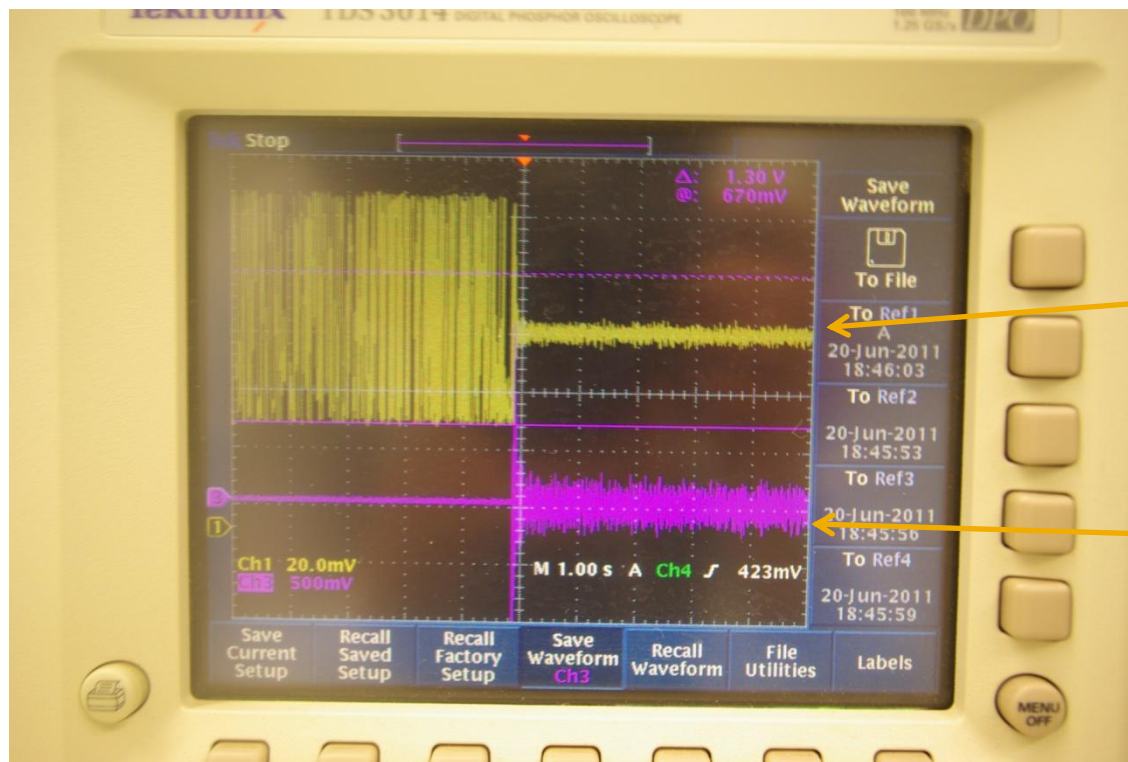
Michelsonのlockのために



高周波のノイズが改善された

Michelsonのlock

ノイズハンティングに数日を費やし、なかなか制御できなかったが、
やっとlockできた。



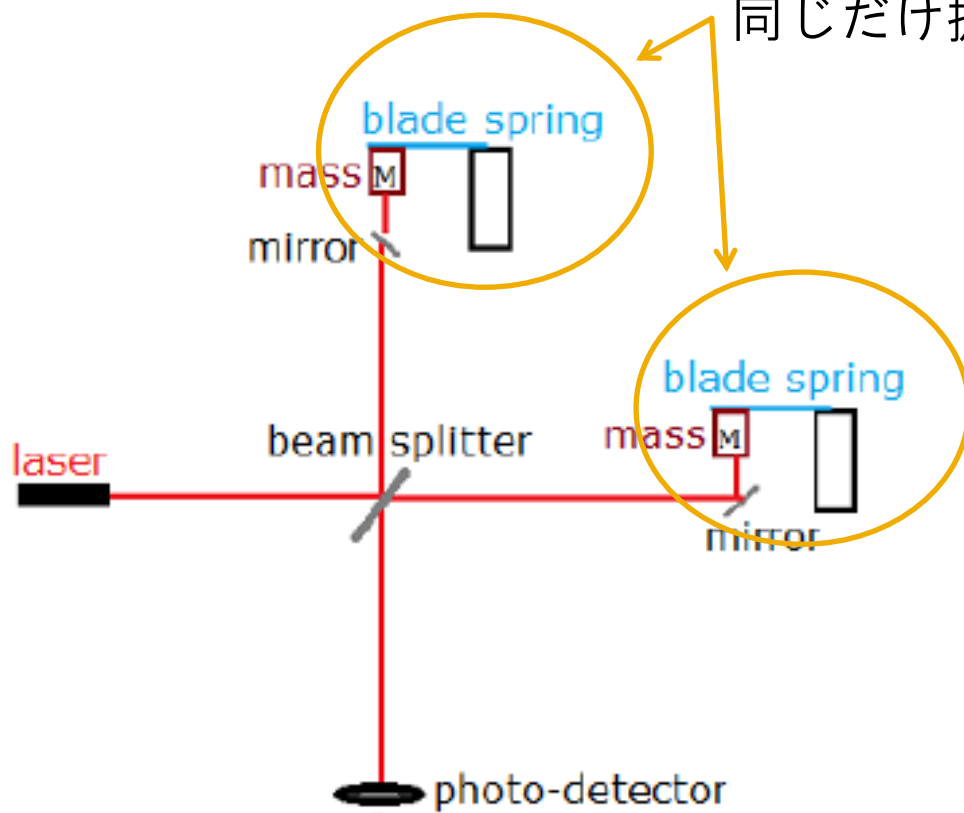
Michelson error signal

Feed back signal

両腕を振らないでlock

振りながらlock

同じだけ振りながら、Michelsonをlockした。



振幅： $30\mu\text{m}$
周波数： 0.2Hz

振幅は片方のマスに
Shadow sensorを付け、測定。

解析

板バネに力を加えることで、バネ定数 k_0 が次のように変化すると仮定

$$k_1 = k_0 + \delta k_1 = k_0 + n(t)F\alpha$$

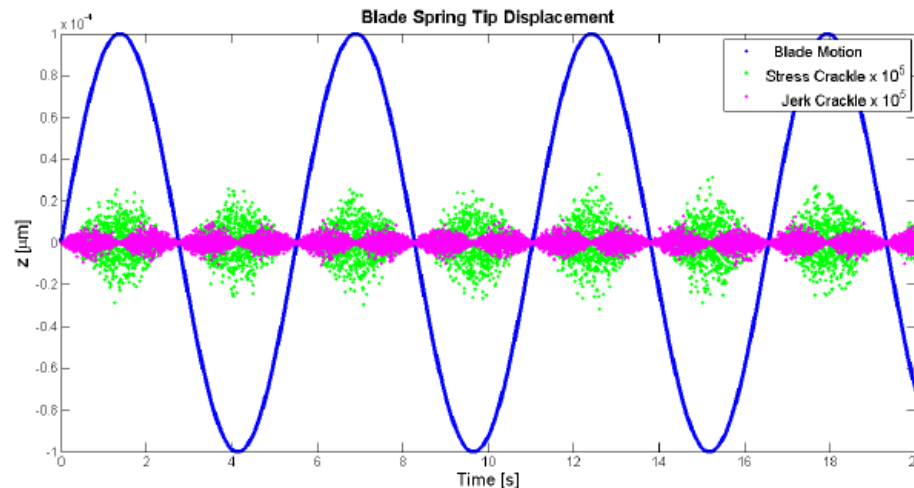
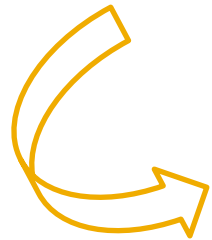


Stress Crackle noise

$$k_2 = k_0 + \delta k_2 = k_0 + n(t)\frac{dF}{dt}\beta$$

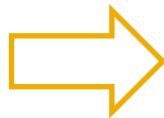


Jerk Crackle noise



実験結果からCrackleノイズまで

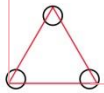
復調後の信号



Crackleノイズの寄与 α 、 β

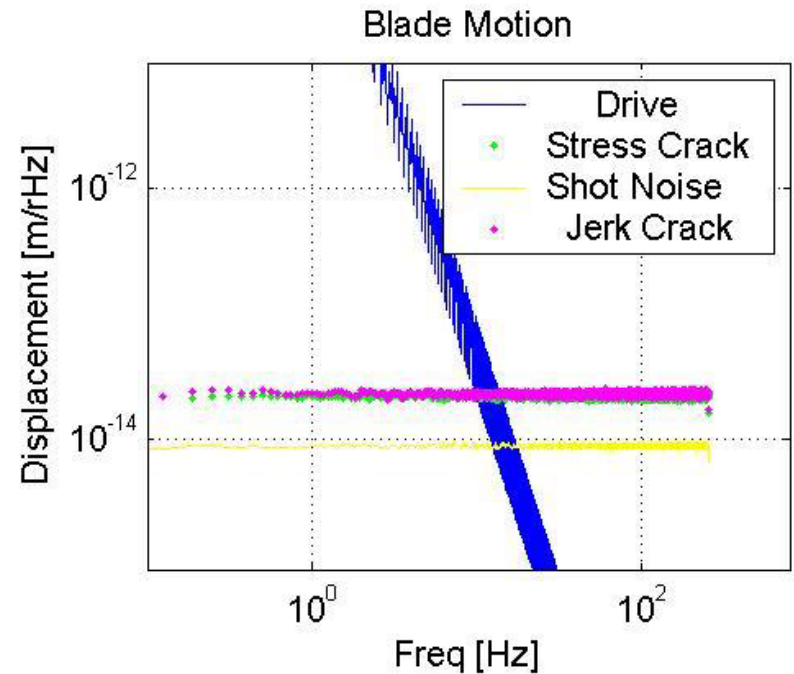
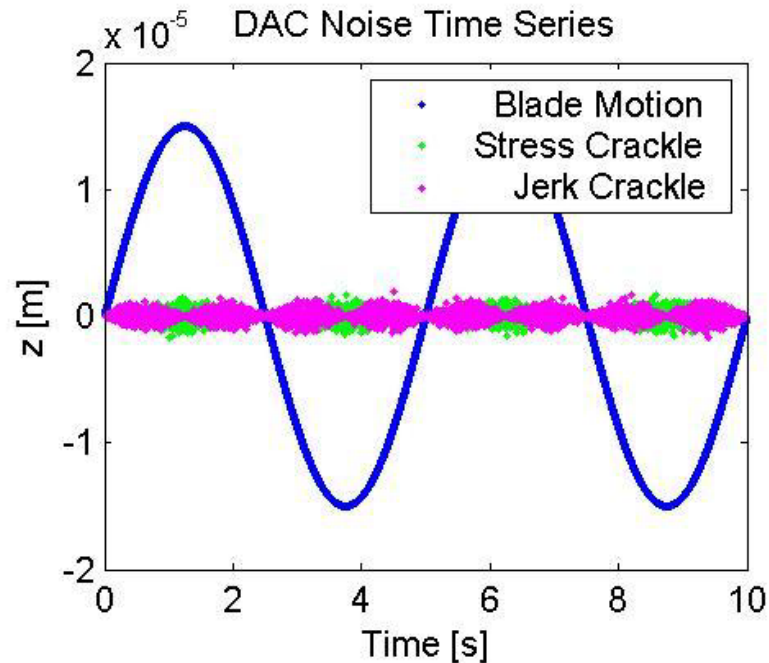


Crackleノイズの大きさ



解析

α, β の値を計算し、Crackleノイズがどれくらい出てくるかを計算。



理論の仮定が正しければ、

$2 \times 10^{-14} [m/\sqrt{Hz}]$ のCrackleノイズが存在する

今回のMichelsonの感度はあと1-2桁足りず、直接は見えなかった。

まとめ

1. 板バネに低周波の力を加えると、高周波でもCrackleノイズが発生する？
2. Michelson干渉計によって、Crackleノイズの測定を試みた。
3. 外力によって板バネのバネ定数 k が変化すると仮定しシミュレーションを行った。

$$k_1 = k_0 + \delta k_1 = k_0 + n(t)F\alpha$$

$$k_2 = k_0 + \delta k_2 = k_0 + n(t)\frac{dF}{dt}\beta$$

1. Michelsonの出力を板バネを揺らしている周波数の2倍、4倍で復調すると、Crackleノイズの成分を抜き出すことができる。
2. その値から、 α 、 β を計算することができ、さらにはCrackleノイズの予想値が計算できる。
4. 今回の実験ではCrackleノイズの予想値として、 $2 \times 10^{-14} [m/\sqrt{Hz}]$ が得られた。今回のMichelsonの感度では直接は見ることはできなかった。

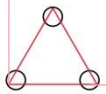
おまけ

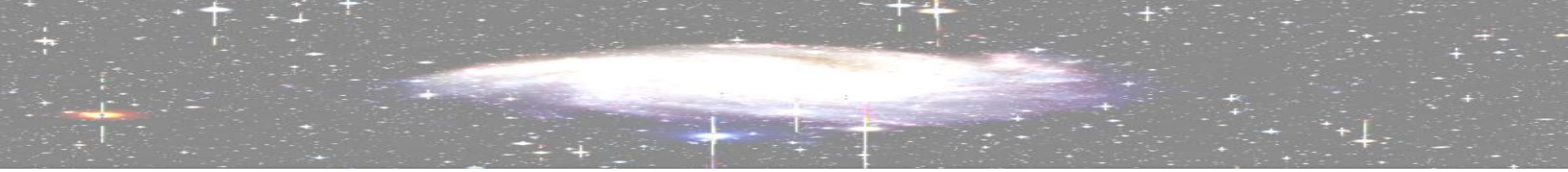


ハンティントン公園内の美術館にあった一枚

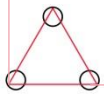
参考文献

- LIGO Summer 2011:Crackling Noise in Blade Springs Final Paper
- <http://www.simsience.org/crackling/>



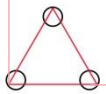
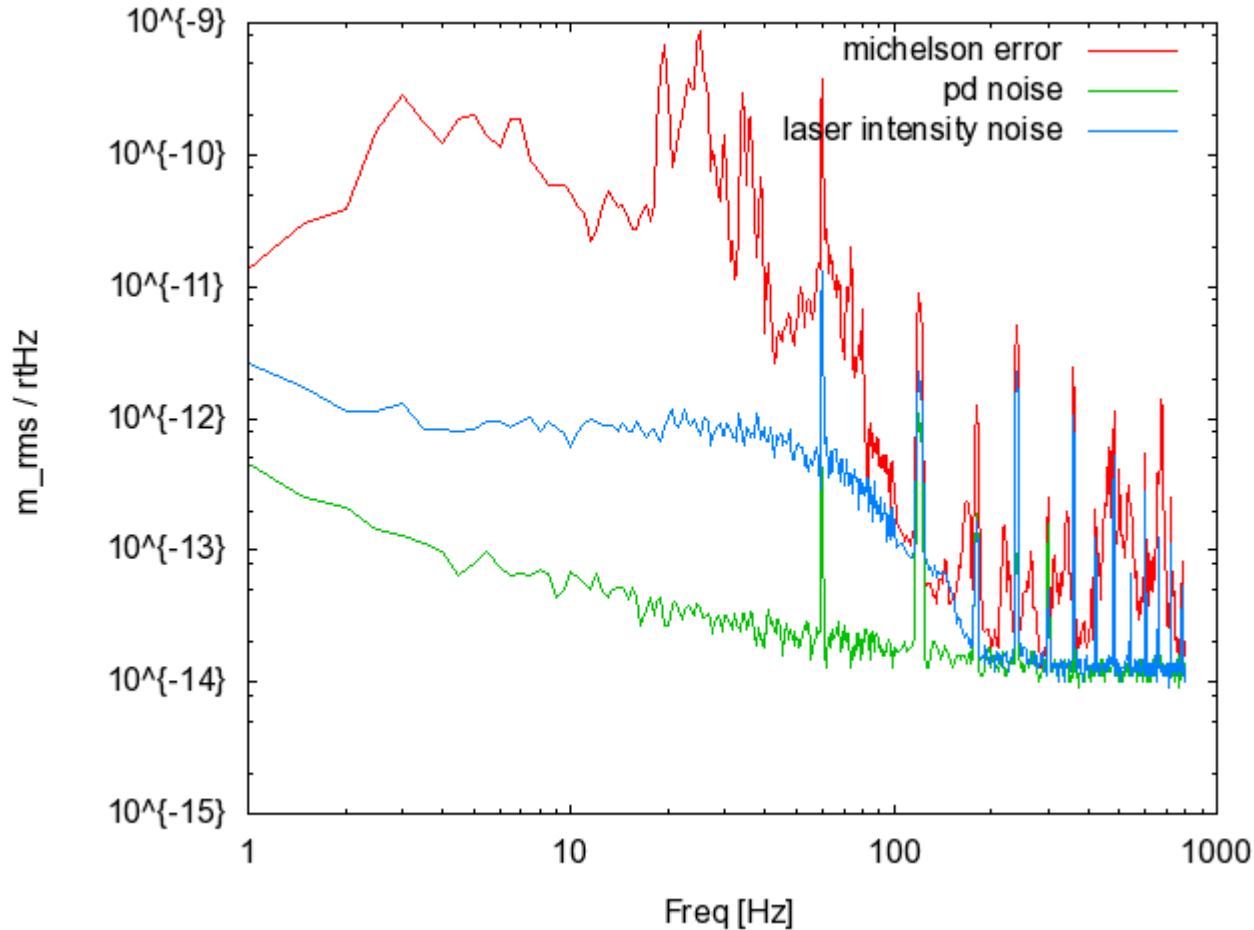


おわり

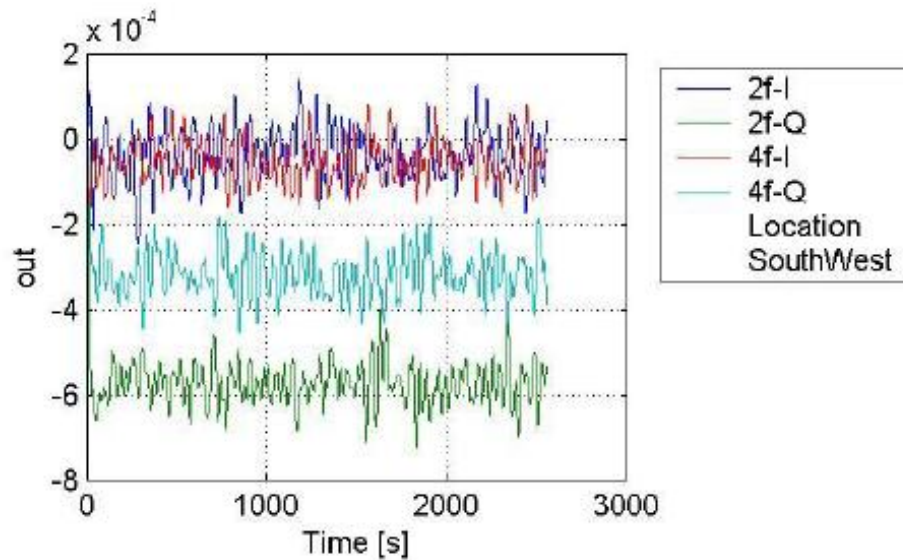
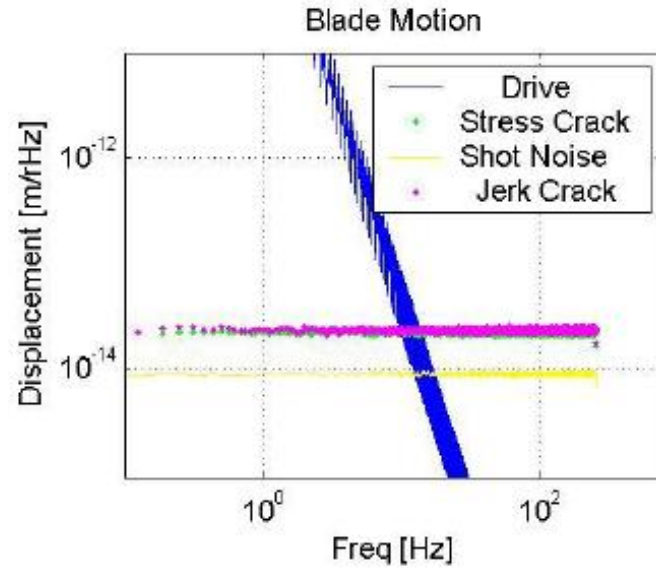
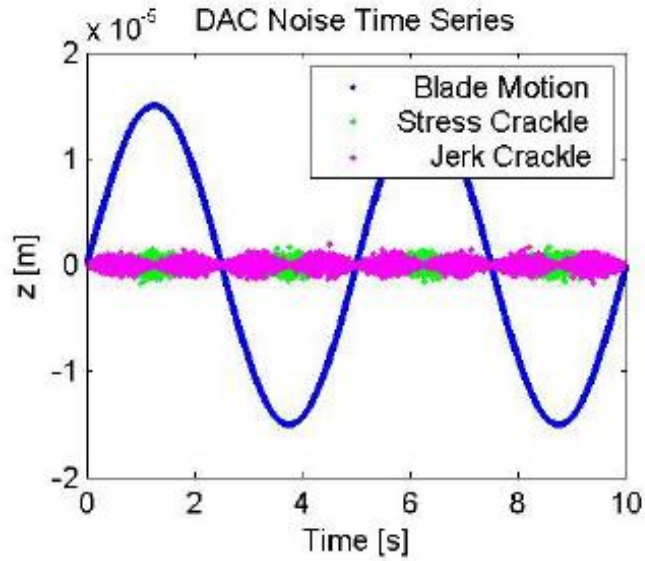


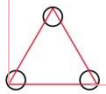
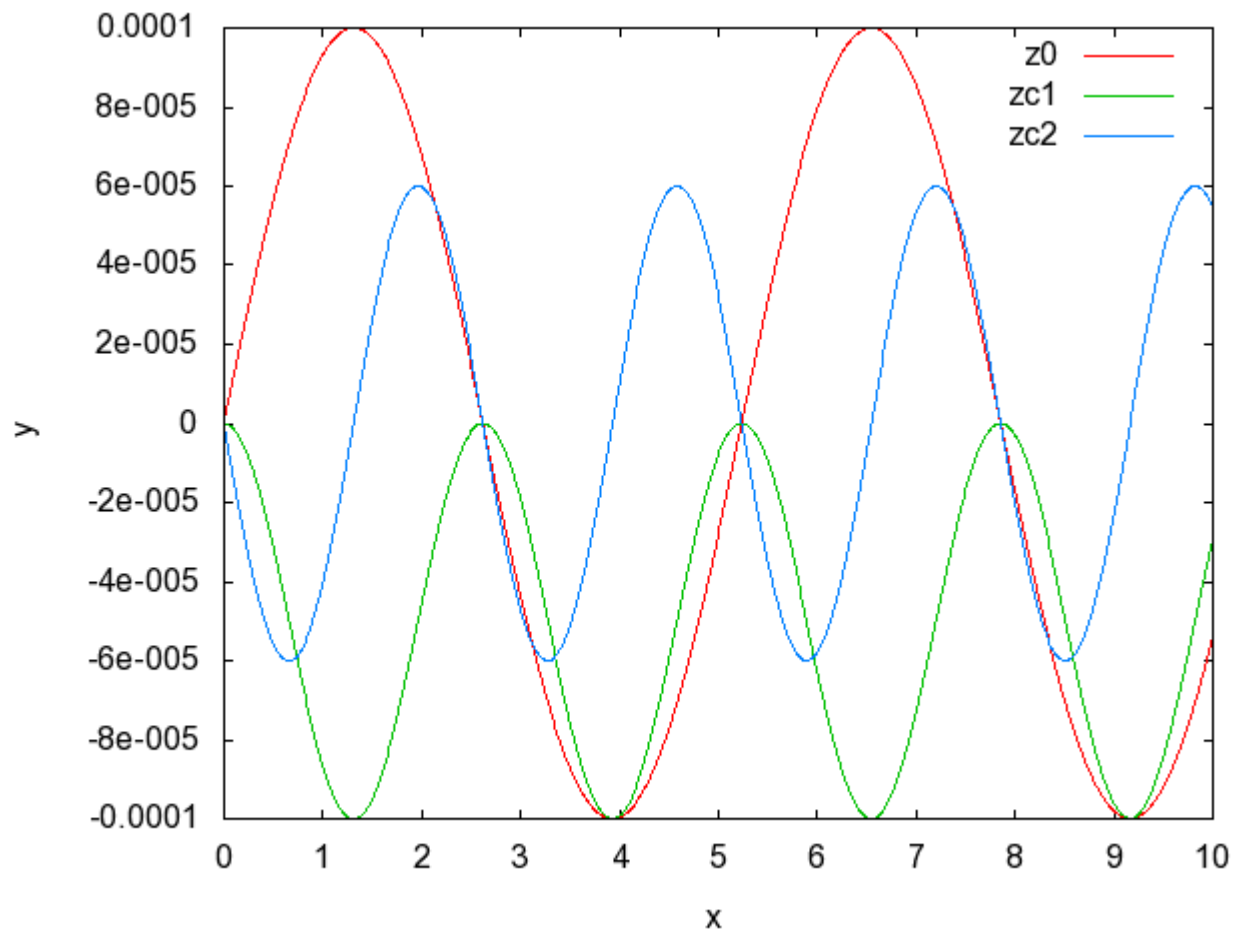
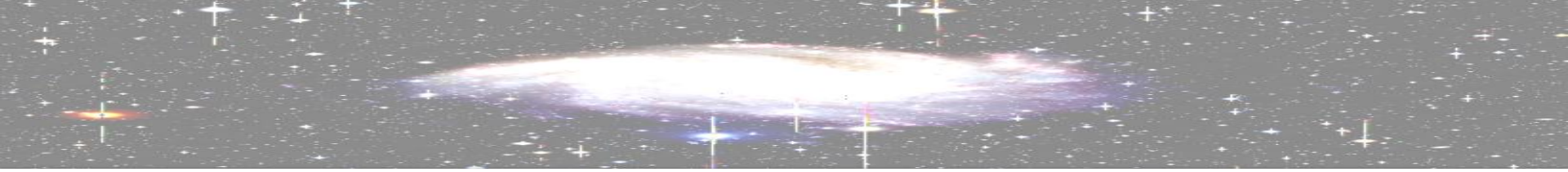
Michelsonのノイズ

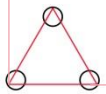
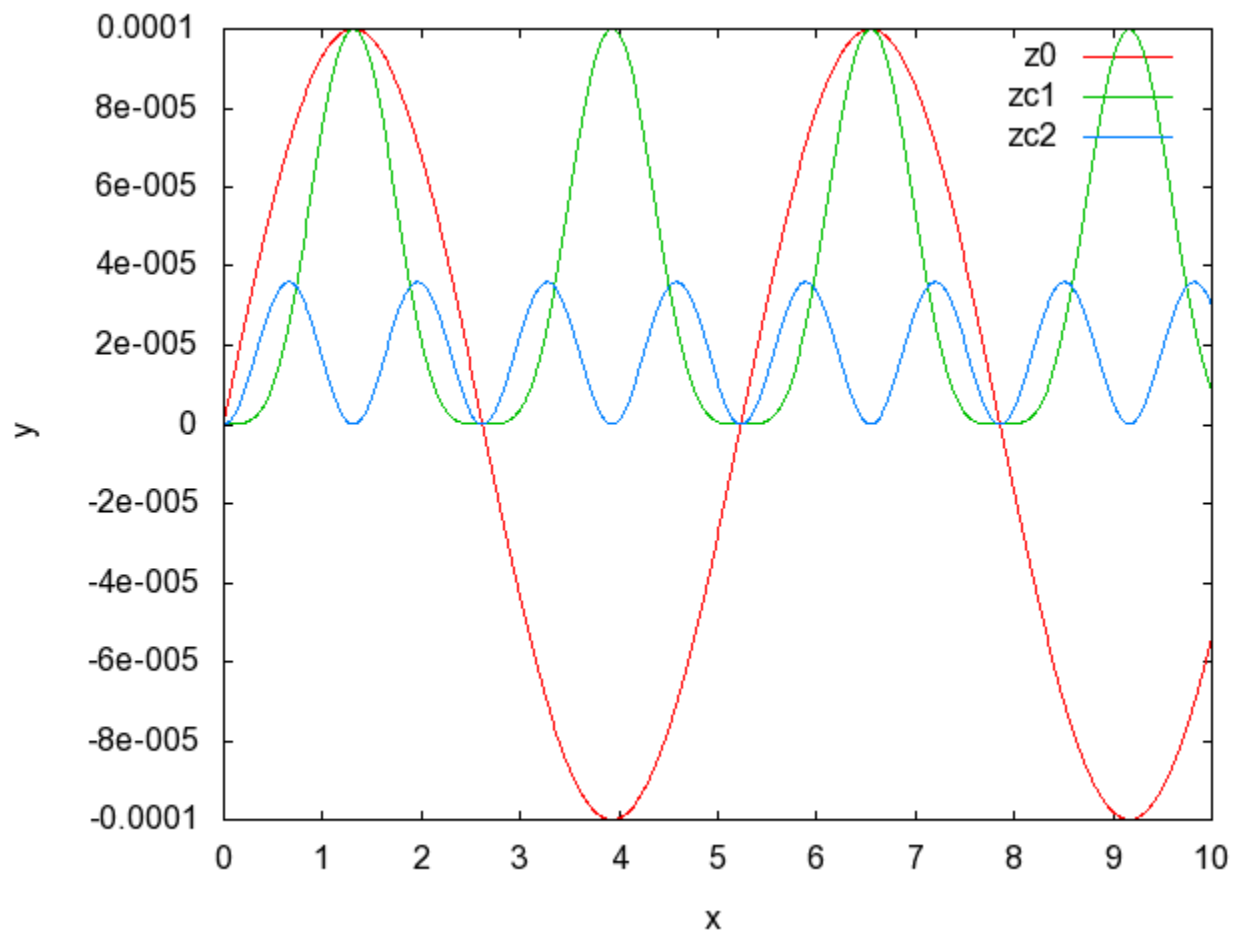
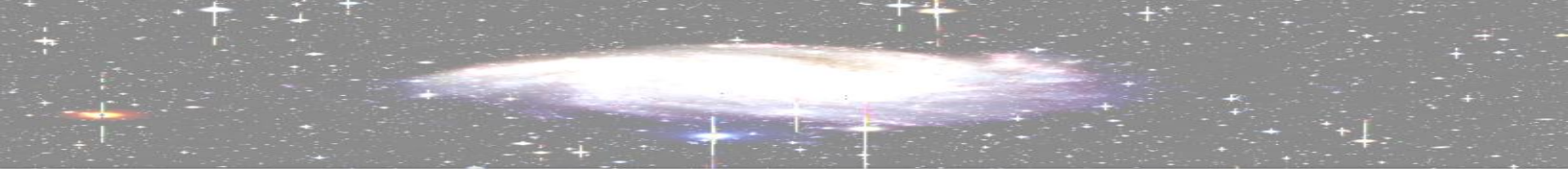
PDノイズとレーザーの強度ノイズ



解析







Open loop 伝達関数

