

光リング共振器を用いた Lorentz不変性検証(1)

東大理^A, 国立天文台^B

酒井 譲^A, 武田紘樹^A, 道村唯太^A, 安東正樹^{A,B}

概要

- 光リング共振器を用いて、Lorentz不変性を検証
(特に、**片道光速の異方性**を探索)
- 先行研究では、**装置の回転による雑音**(振動?)が感度を制限
 - ✓ 振動そのものを低減するため、**連続回転**できるよう装置を改良
 - ✓ 振動感度を低減させるため、光学系を**セミモノリシック**に改良
- 改良された装置で、**安定的に光学系をロックした状態で装置を連続回転**することに初めて成功、ノイズレベルも低減

目次

1. イントロダクション
2. 先行研究からの改良点
3. 現在の感度
4. まとめ

1.1. 実験の目的

＜ 特殊相対性理論の2つの原理 ＞

光速不変の原理：光速はLorentz変換のもとで不変

特殊相対性原理：物理法則はLorentz変換のもとで共変

Lorentz不変性は宇宙の基本的な対称性の1つ

しかし！

量子重力理論の研究^[1]、宇宙マイクロ波背景放射の観測^[2]

⇒ Lorentz不変性が破れている可能性を示唆



より高い精度で、実験的にLorentz不変性を検証したい

[1] V. A. Kostelecký & S. Samuel, PRD **39**, 683 (1989). [2] C. H. Lineweaver *et al.*, Astrophys. J. **470**, 38 (1996).

1.2. Lorentz不変性の検証

➤ Mansouri-Sexl理論・・・特殊相対性理論の検証理論の1つ

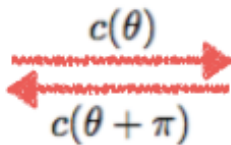
- ✓ 「絶対静止系の存在」「絶対静止系における等方性」を仮定
- ✓ Lorentz変換からのずれをいくつかのパラメータで表す

⇒ Lorentz不変性が破れている場合、絶対静止系ではない系にいる観測者から見ると、**光速に異方性が現れる**

➤ 2種類の光速の異方性

片道光速の異方性 (odd-parity)

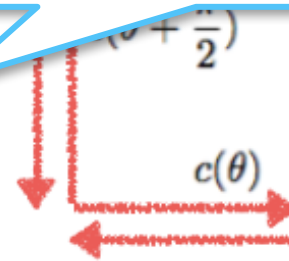
$$c(\theta) \neq c(\theta + \pi)$$



$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 6 \times 10^{-15}$$

Y. Michimura *et al.*, PRL **110**, 200401 (2013).

「片道光速の異方性」
をより高い精度で
検証する

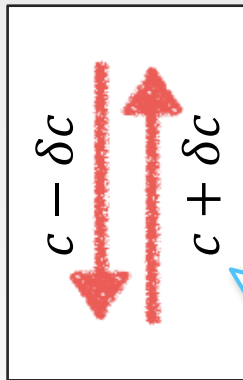
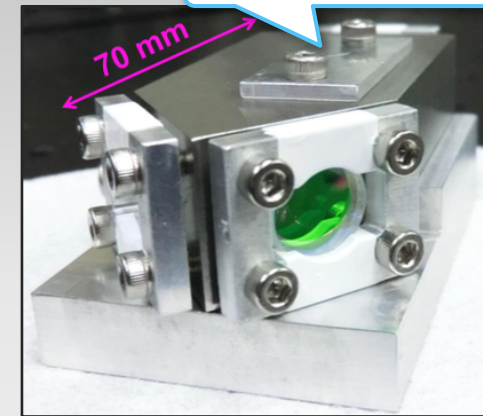


$$\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 1 \times 10^{-18}$$

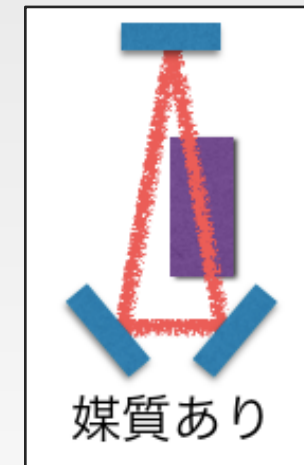
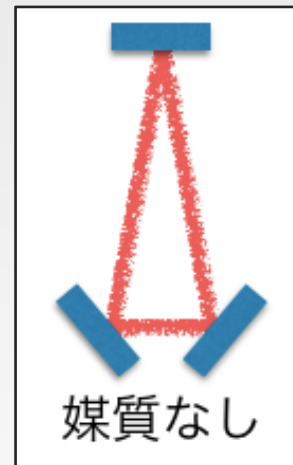
M. Nagel *et al.*, Nat. Commun. **6**, 8174 (2015).

1.3. 片道光速の異方性の測定原理

- 光路の一部に媒質(シリコン/ $n = 3.69$)を入れた非対称光リング共振器
- 片道光速の異方性がある場合
 - ⇒ 両周りの共振周波数 ($\nu_{L/R}$) が逆方向にずれる
 - ⇒ 両周りの共振周波数の差 ($\nu_L - \nu_R \propto \delta c$) を測定

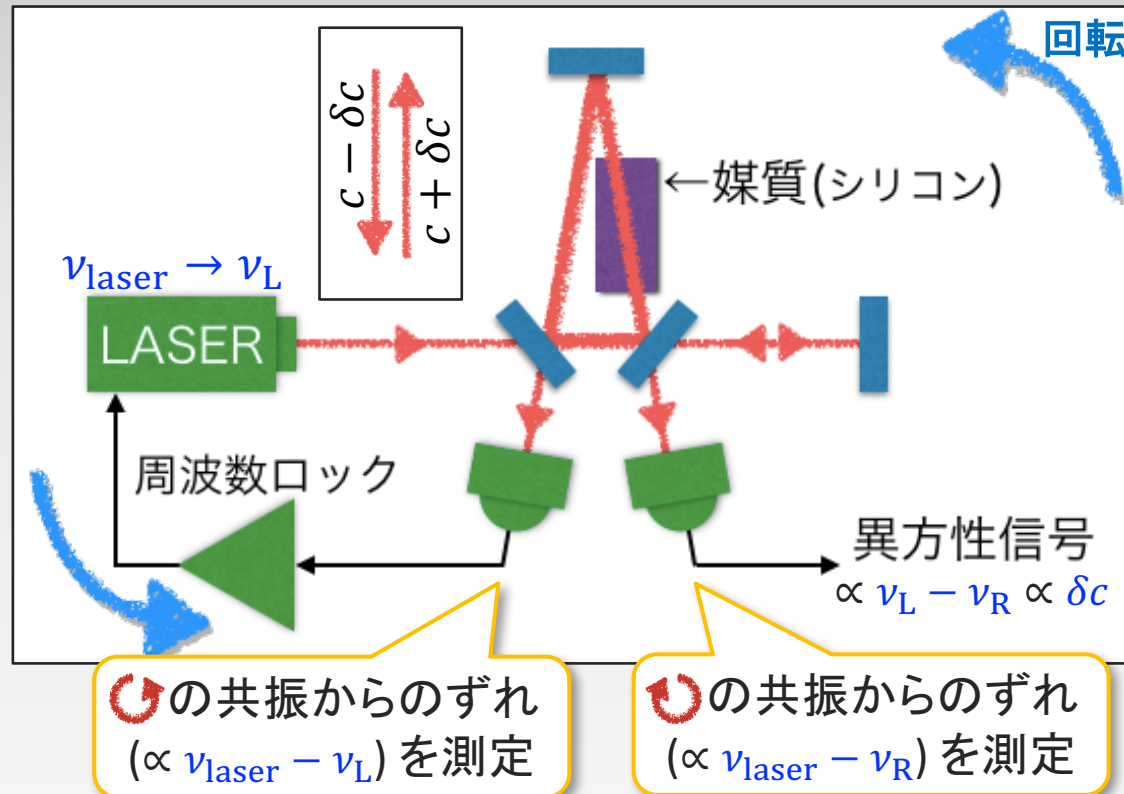


片道光速の
異方性が
ある場合



左回りの共振周波数	$\nu_L = \nu_0$	$\nu_L = \nu'_0 + \delta\nu$
右回りの共振周波数	$\nu_R = \nu_0$	$\nu_R = \nu'_0 - \delta\nu$

1.4. 実験装置

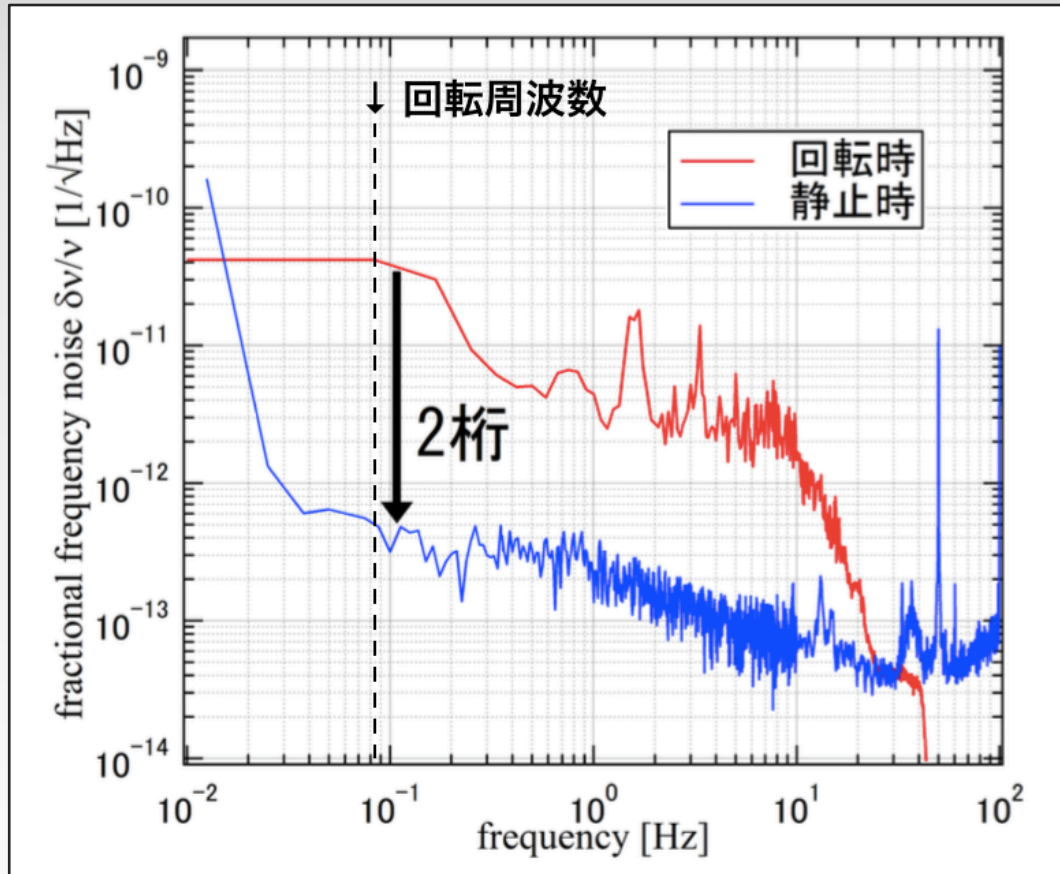


- ▶ **左回りの光**
 - … 共振状態にロック
(レーザー周波数 $\nu_{\text{laser}} \rightarrow \nu_L$)
 - ↓
 - 透過光を再び共振器へ
 - ↓
- ▶ **右回りの光**
 - … 共振からのずれを測定
 $\propto \nu_L - \nu_R \propto \delta c$
= 異方性信号

装置全体を水平方向に回転させることで、異方性信号を変調
 ⇒ 異方性は装置の回転周波数に現れる

2.1. 先行研究とそのノイズ源

- 片道光速の異方性で世界最高精度 $\left| \frac{\delta c}{c} \right| \lesssim 6 \times 10^{-15}$ を達成



静止時と回転時で“異方性信号”のノイズレベルを比較

主なノイズ源は回転により生じる雑音 (振動?)



回転によるノイズを静止時のノイズレベルまで下げれば、2桁感度上昇！



今後の目標感度: $\sim 10^{-17}$

2.2. 雑音低減のための装置の改良

- 先行研究の感度は振動で制限されていると考えられる
⇒ 回転時のノイズを静止時のレベルまで下げるため、次の2種類の装置改良を行った

改良点Ⅰ：装置の回転機構

[目的] 振動そのものを低減する

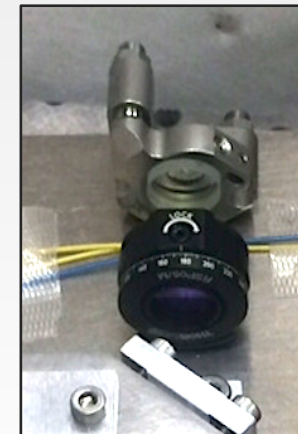
[改良点] 1回転ずつ左右交互に回転
→ 一方向に連続回転



改良点Ⅱ：光学系

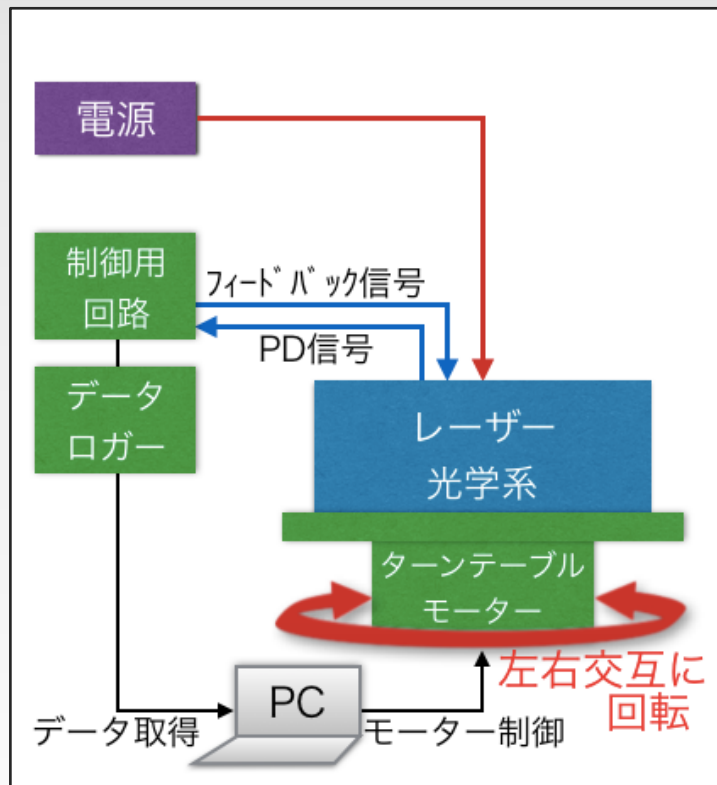
[目的] 振動感度を低減する

[改良点] ペDESTAL光学系
→ セミモノリシック光学系

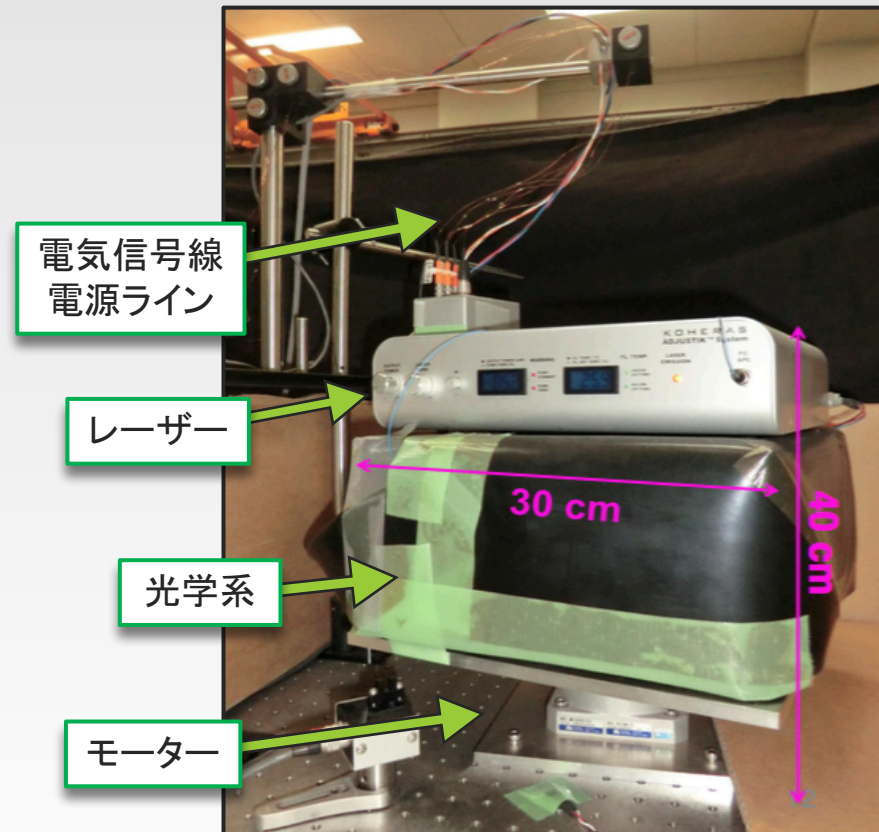


2.3. 改良点 I : 回転機構 (1/2)

- 先行研究・・・電気配線上の都合で**連続回転できなかった**
(右回りと左回りを1回転ずつ交互に繰り返していた)
⇒ **回転と停止を繰り返すので、どうしても振動が大きくなる**

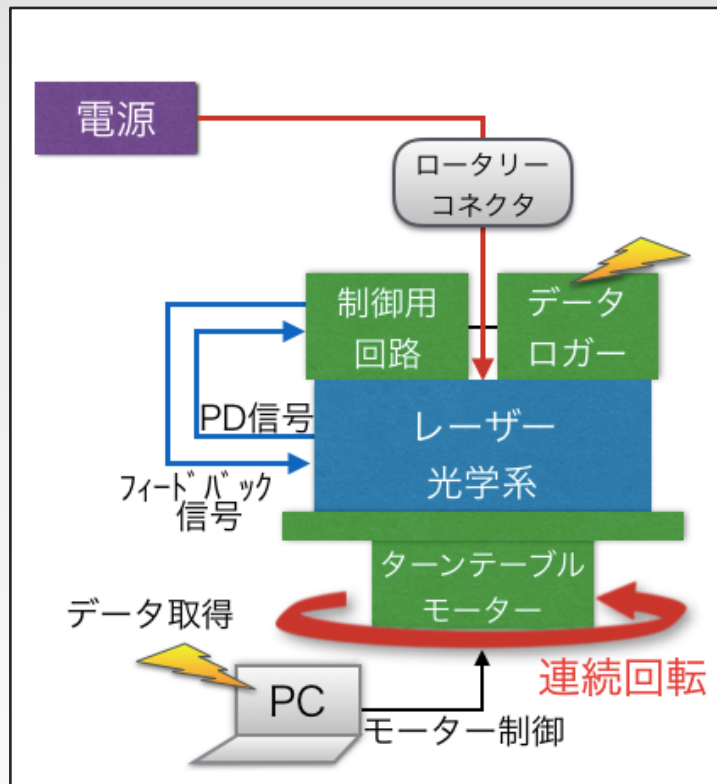


先行研究のセットアップ



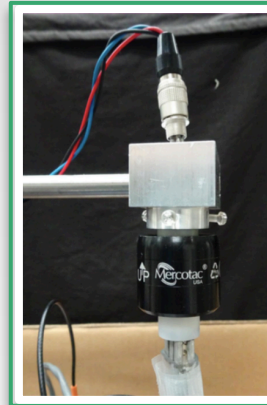
2.3. 改良点 I : 回転機構 (2/2)

- 電源用のロータリーコネクタ、データ取得用の無線データロガーを導入し、**連続回転を実現** ⇒ **回転の安定性向上** !

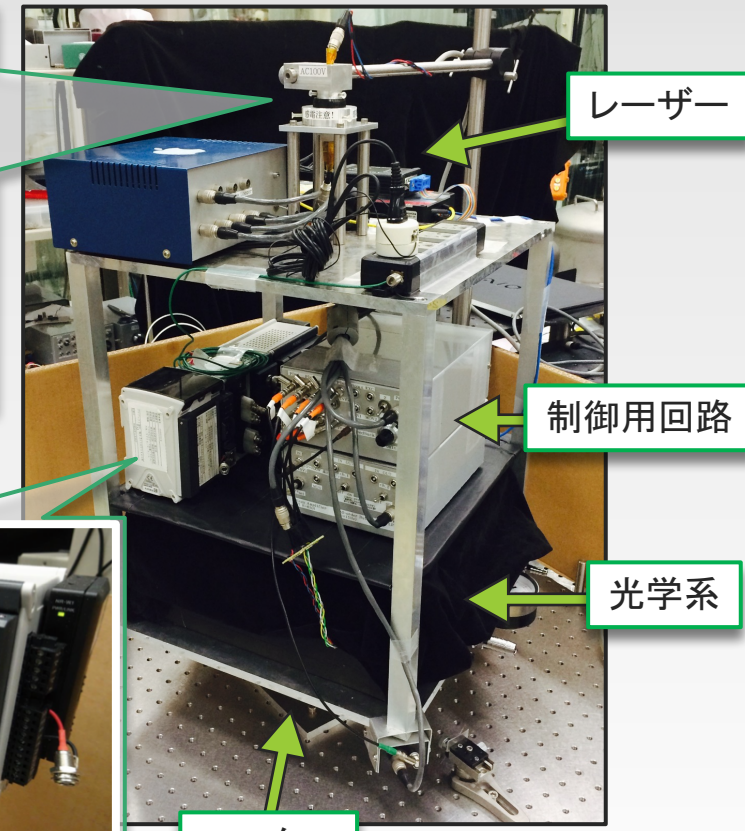
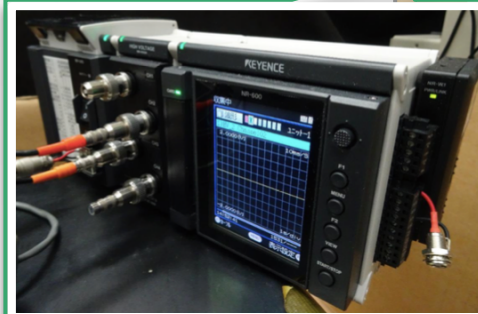


現在のセットアップ

ロータリーコネクタ

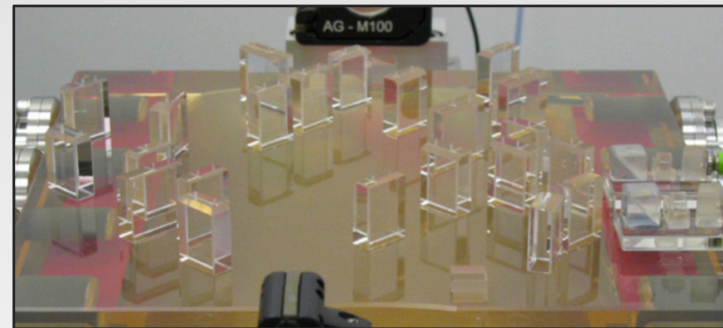
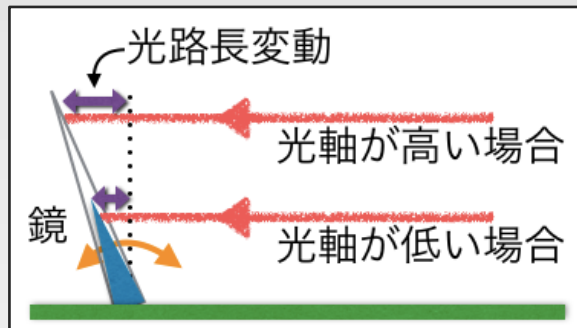


無線データロガー



2.4. 改良点Ⅱ：光学系 (1/2)

- 最終目標：モノリシック光学系 (光学素子を板の上に直接接着)
 - ✓ 光軸を低くすることで振動感度を低減
 - ✓ 光学素子が板と一体になって動くため同相雑音除去が効く



D. I. Robertson *et al.*, Class. Quantum Grav. **30**, 085006 (2013).

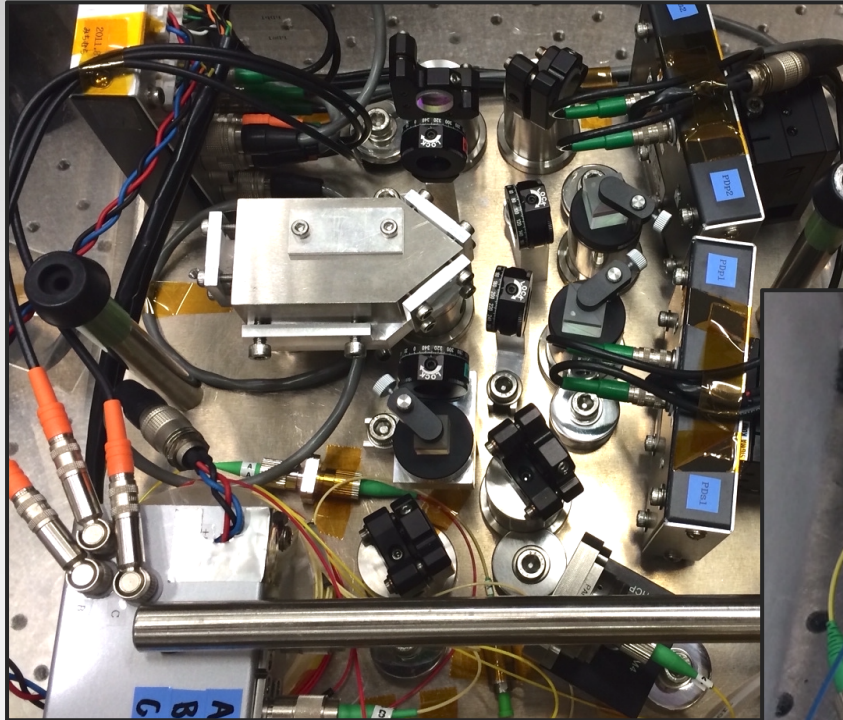
- モノリシックは調整が難しいため、その前段階として“セミモノリシック光学系”を製作
 - ✓ 振動感度を低減
 - ✓ アライメント調整方法の確認
 - ✓ 光学素子の接着手順の検討

ミラーホルダ
を板に直接
ネジ止め



※ モノリシック光学系開発について次の武田くんが発表

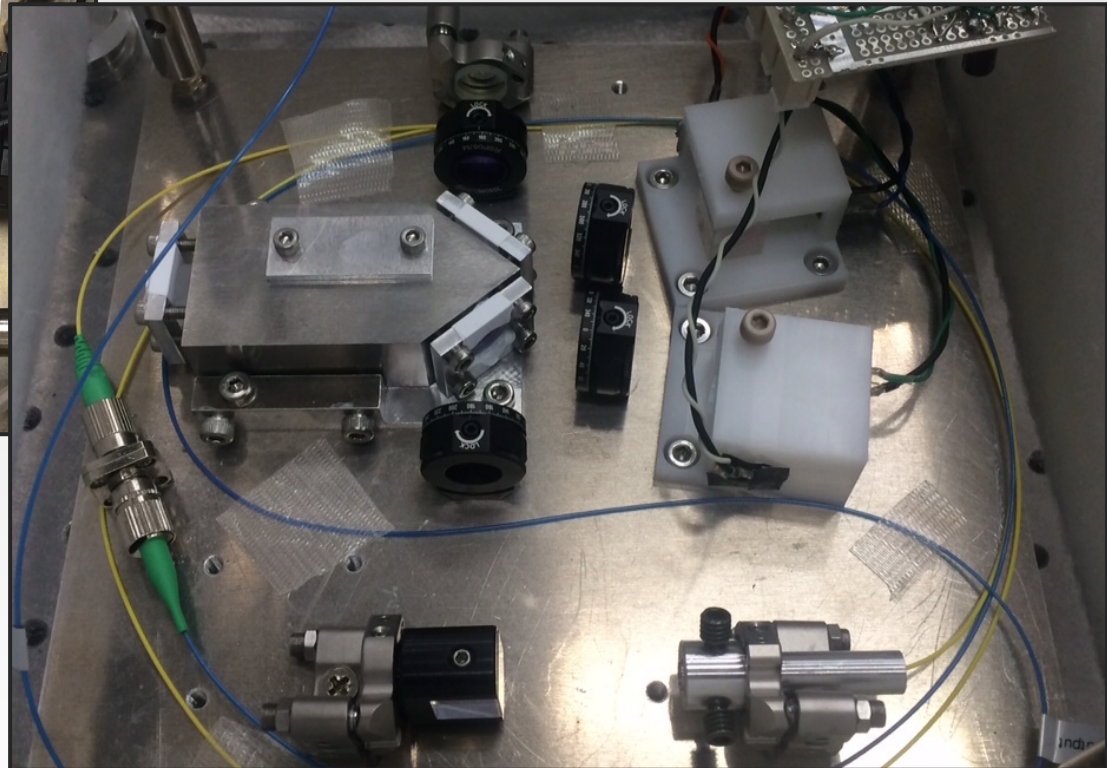
2.4. 改良点Ⅱ: 光学系 (2/2)



先行研究の光学系
(ペデスタル光学系)

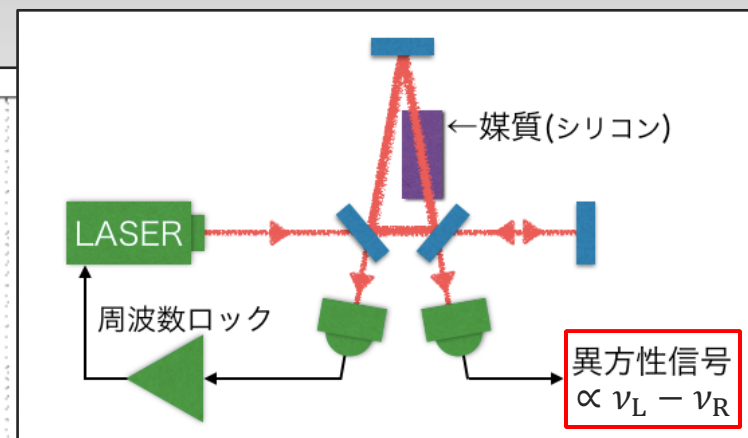
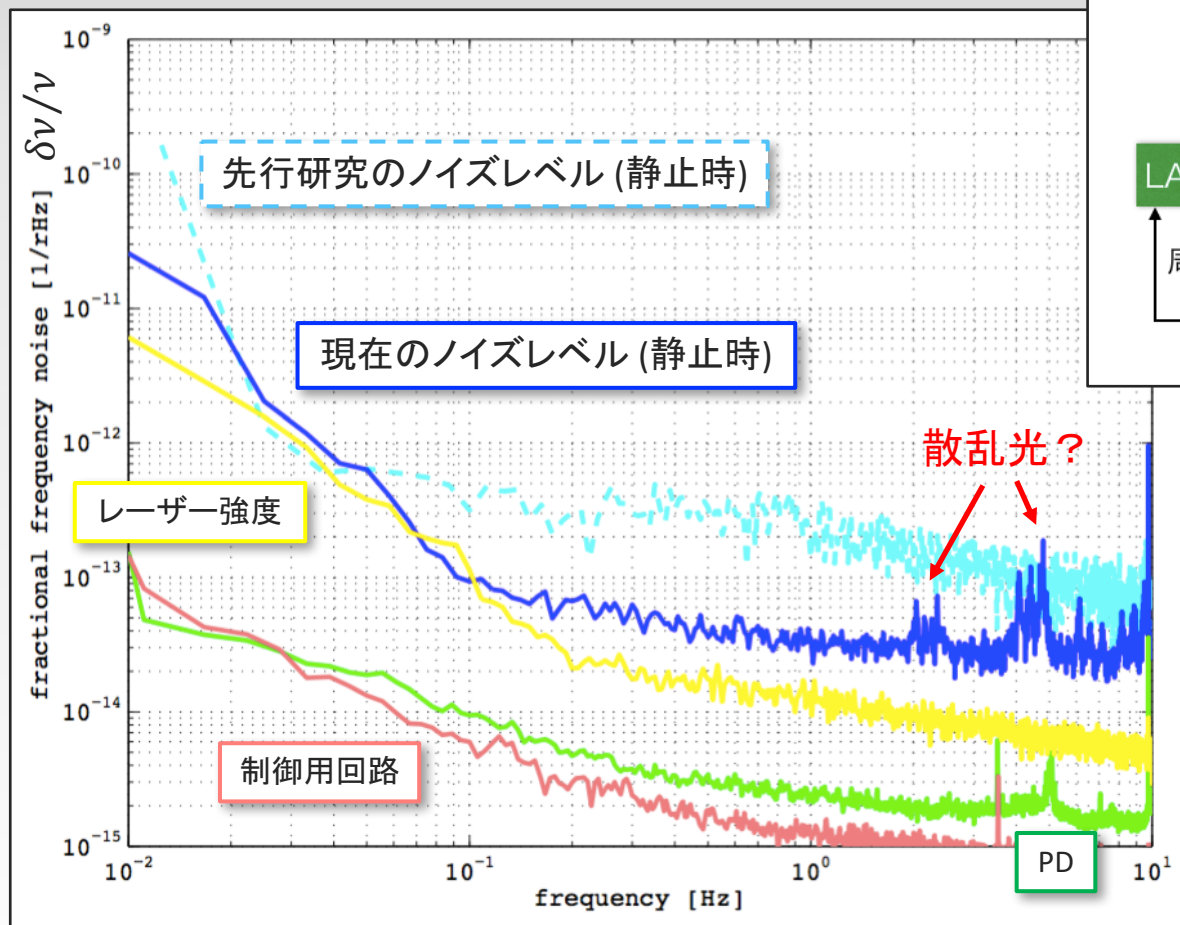


現在の光学系
(セミモノリシック光学系)



3.1. 静止時のノイズレベル

➤ 静止時について“異方性信号”のノイズレベルを比較

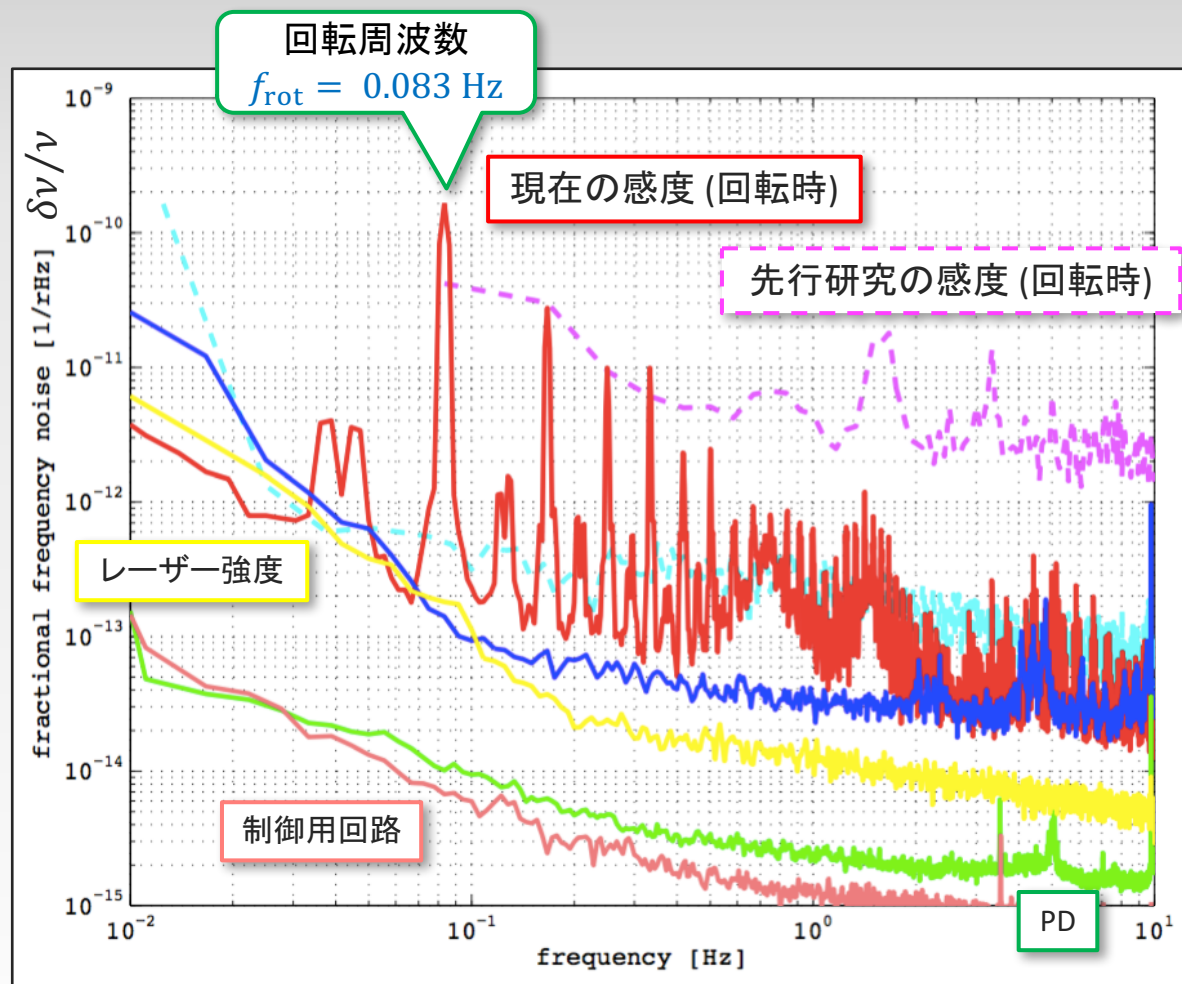


装置の回転周波数
($f_{\text{rot}} \sim 0.1 \text{ Hz}$) 前後で、
ノイズ低減に成功！

主に散乱光対策の効果
(まだ応急処置のみ)

3.2. 回転時のノイズレベル

- 回転時のノイズレベル (片道光速の異方性測定の感度) を比較



- ◎ 光学系をロックした状態での連続回転に初成功

※ 回転したままの状態、数時間以上安定的にロックが続くことも確認

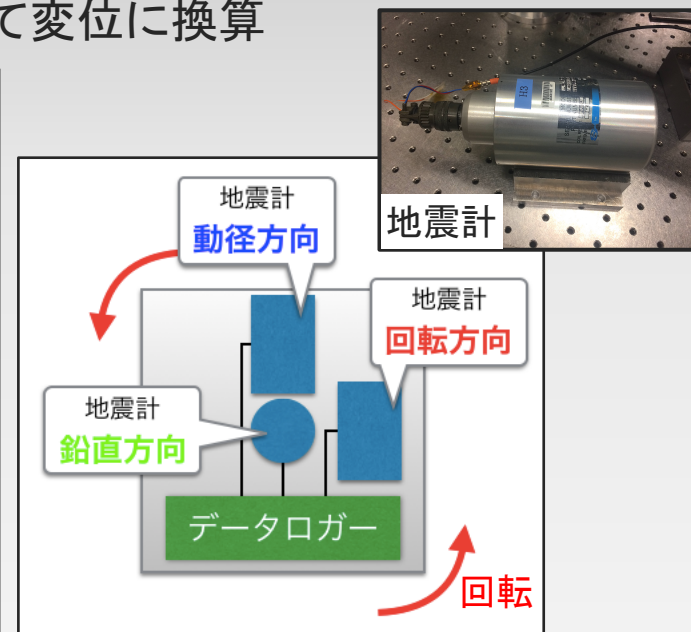
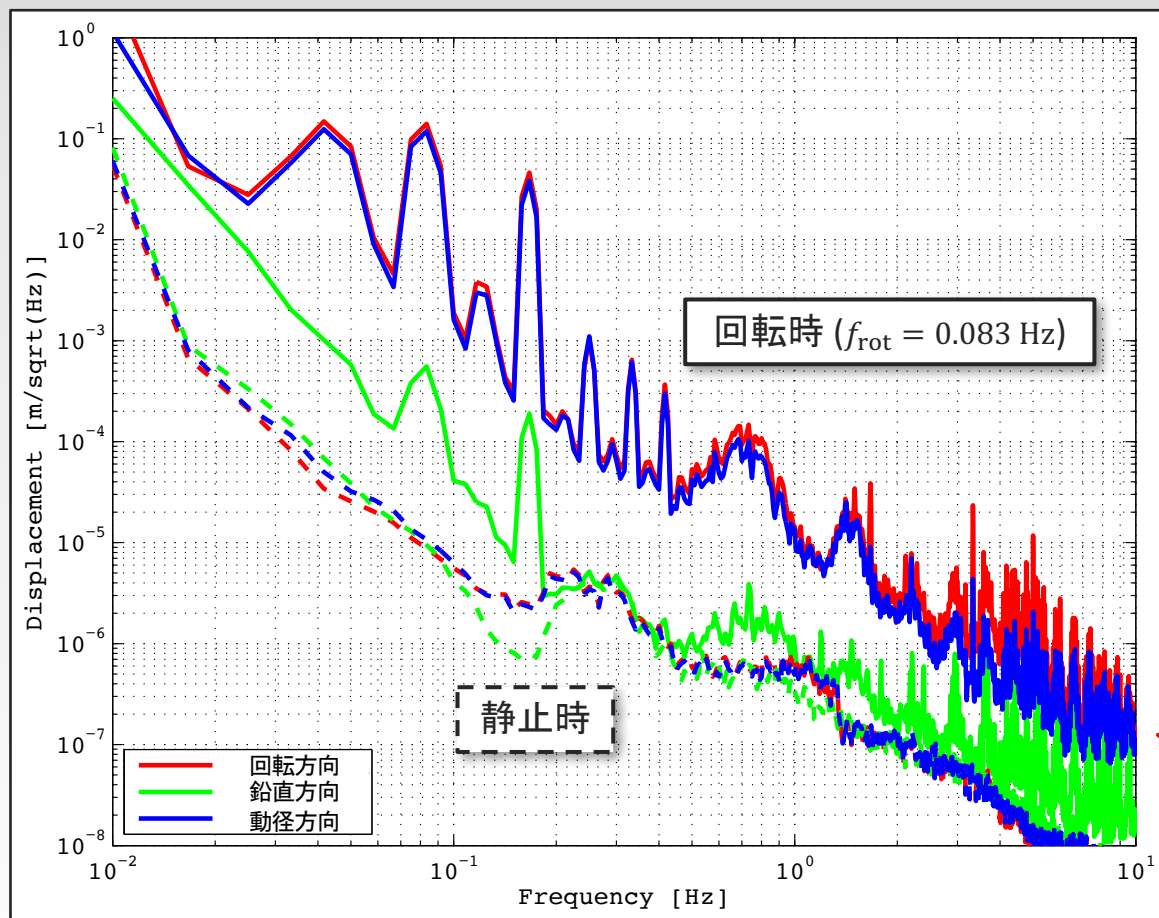
- ◎ フロアレベルは目標としていた先行研究の静止時のノイズレベルまで低減

- △ 回転周波数にピークが出ている

異方性は回転周波数に現れる

3.3. ターンテーブルの振動レベル

- 感度を制限するノイズ源を調べるため、**ターンテーブルの振動レベル**を測定 --- **地震計**(=速度計)で測定して変位に換算



振動測定のセットアップ
(ターンテーブルを真上から見た図)

装置を回転させると、
特に**水平方向の振動**
が大きくなる

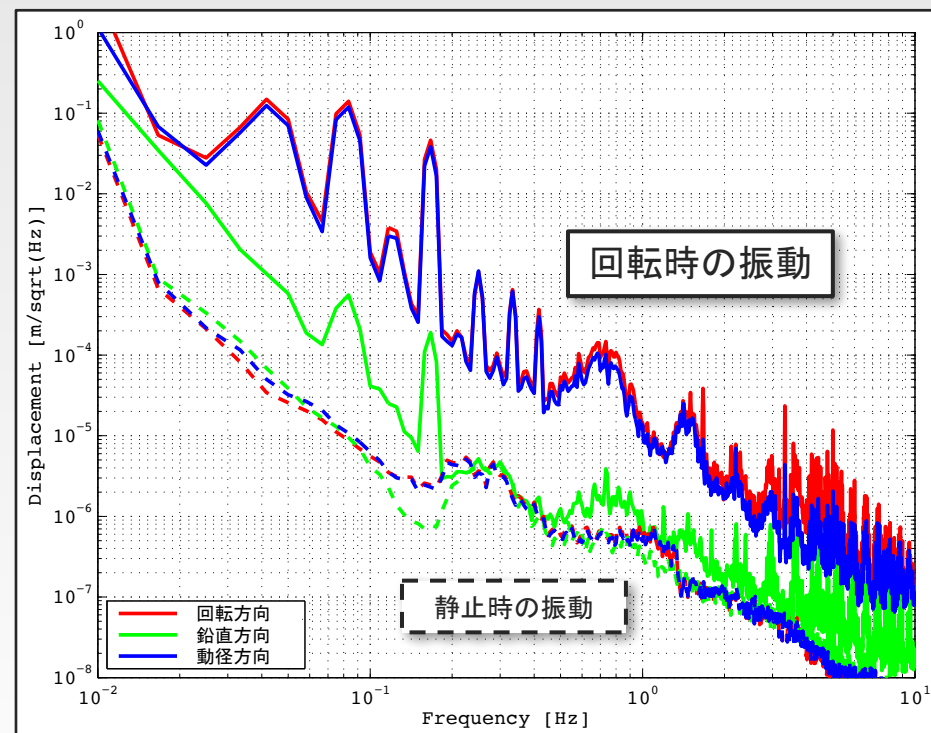
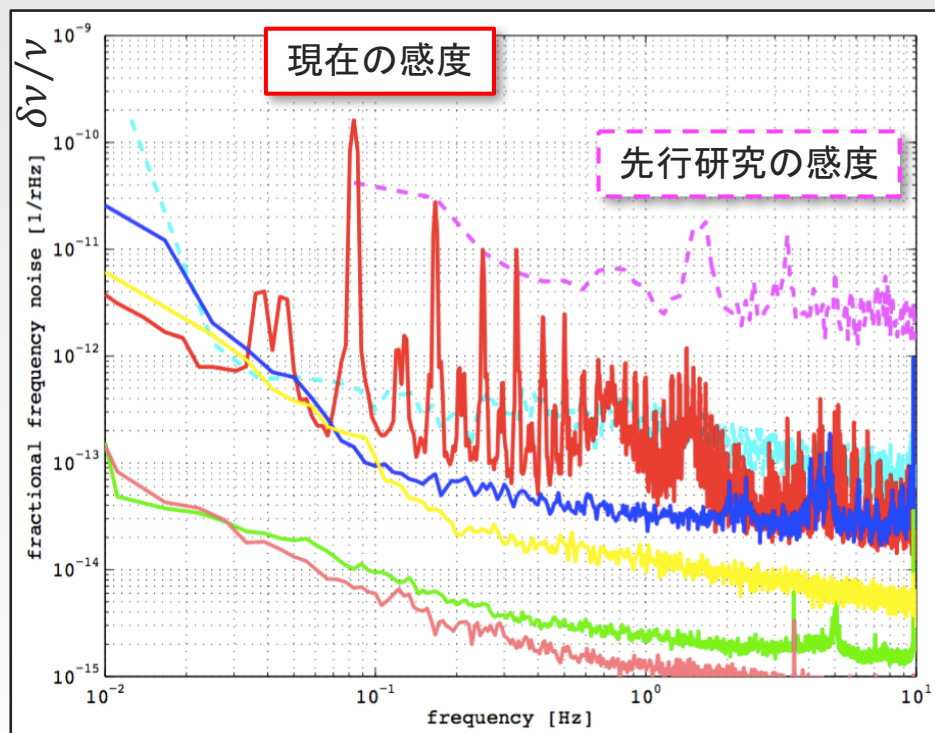
3.4. 現在の感度を制限するノイズ源

➤ 1Hz前後によく似たスペクトル構造

⇒ 先行研究・現在とも振動により感度が制限されている

⇒ 装置の改良により振動の影響を減らすことに成功

※ どこを經由してノイズになっているかは不明 --- 共振器長変動？ 散乱光？



3.5. 回転周波数に生じるノイズ

- 回転周波数ノイズの原因 → まだ特定できていない

光速の異方性は装置の回転周波数に現れるので、
原因を特定してノイズを低減する必要がある

- これまで調べたもの

候補	ノイズになる原因	調査方法
装置の回転軸 の傾き	ターンテーブル上の人から見ると 重力の方向が回転周波数で変動	装置が乗っている光学定 盤ごと傾ける
環境磁場 (地磁気など)	磁場中を電気信号線が走ることで 誘導起電力が生じて回転周波数で変動	ヘルムホルツコイルで装 置全体に磁場をかける
ロータリーコネ クタ(電源ライン)	コネクタ内の抵抗値の非一様性などで 電源ラインに回転周波数ノイズが入る	回転時の電源ラインの ノイズを測定

⇒ いずれも今のところ主な原因とはなっていない

4. まとめ

- 先行研究で感度を制限していた「装置の回転により生じる雑音」を低減するための改良を行った。
 - ✓ 振動そのものを低減するため、連続回転できるよう装置を改良
 - ✓ 振動感度を低減させるため、光学系をセミモノリシックに改良
- 改良された装置を用いて、安定的に光学系をロックした状態で装置を連続回転することに初めて成功
- 装置の改良により、ノイズレベルが低減
- 今後は回転周波数に現れるノイズの原因を特定し、低減する必要がある

発表は以上です
ありがとうございました

以下補足

回転周波数ノイズの候補

➤ これまで調べたもの

- ✓ 回転軸の傾き
- ✓ 環境磁場
- ✓ ロータリーコネクタ

⇒ 今のところ回転周波数ノイズの主たる原因にはなっていない

➤ 他に考えられる候補

- ✓ 散乱光経由

回転周波数で変動する原因は分からないが、散乱光自体があることはわかっているので、ビームダンプ・遮光などの対策が必要。

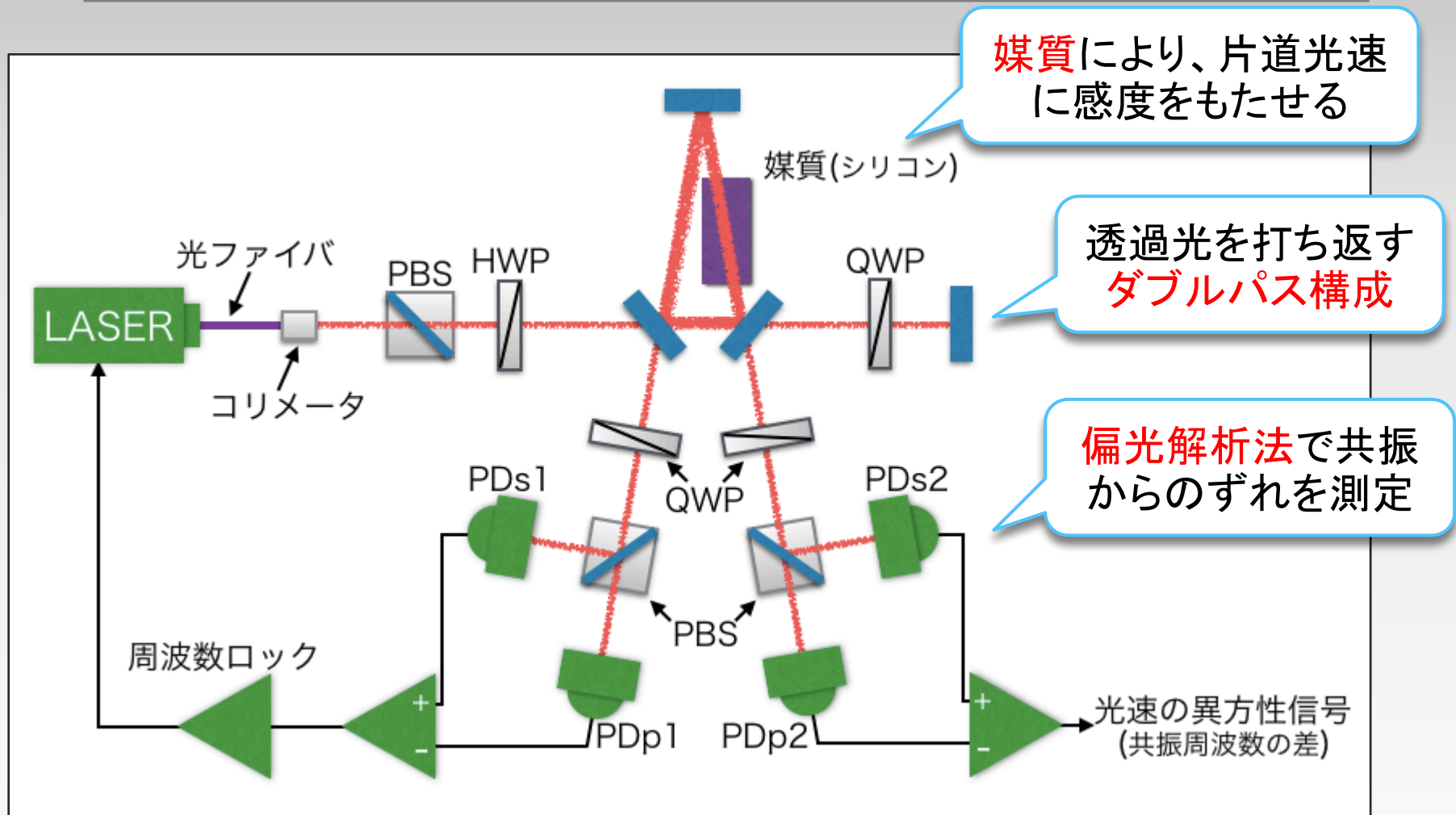
- ✓ 光学系のひずみ

現状光学系はターンテーブル上に直接固定されている。ターンテーブルに軽く力を加えると異方性信号がドリフトすることが分かっている。光学系の固定方法を見直す必要があるかも。

- ✓ 回転速度変動

装置の重心の回転軸からずれなどにより、回転速度が回転周波数で変動。遠心力変動やSagnac効果によってノイズになる。

光学系の詳細



Mansouri-Sexl理論

- Mansouri-Sexl理論・・・特殊相対性理論の検証理論の1つ
 - ✓ 「絶対静止系の存在」と「絶対静止系における等方性」を仮定
 - ✓ Lorentz変換からのずれをいくつかののパラメータで表す

- Mansouri-Sexl理論によると、光速は次のように表される。

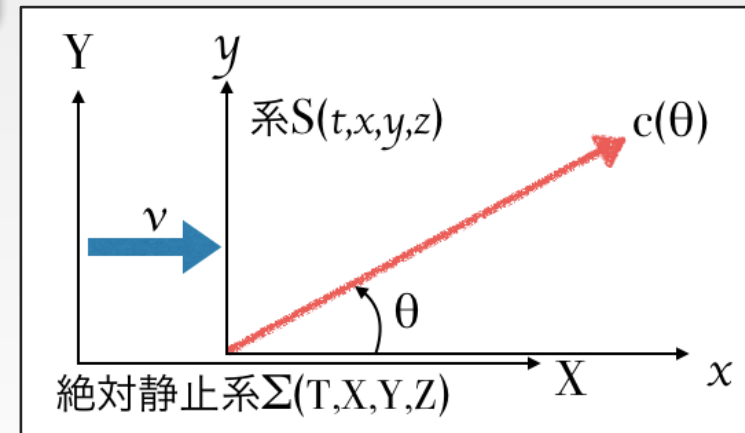
$$c(\theta) = 1 - (2\alpha + 1)v \cos \theta - \left(\beta + \delta - \frac{1}{2} \right) v^2 \sin^2 \theta - (\alpha - \beta + 1)v^2 + \mathcal{O}(v^3)$$

片道光速の異方性

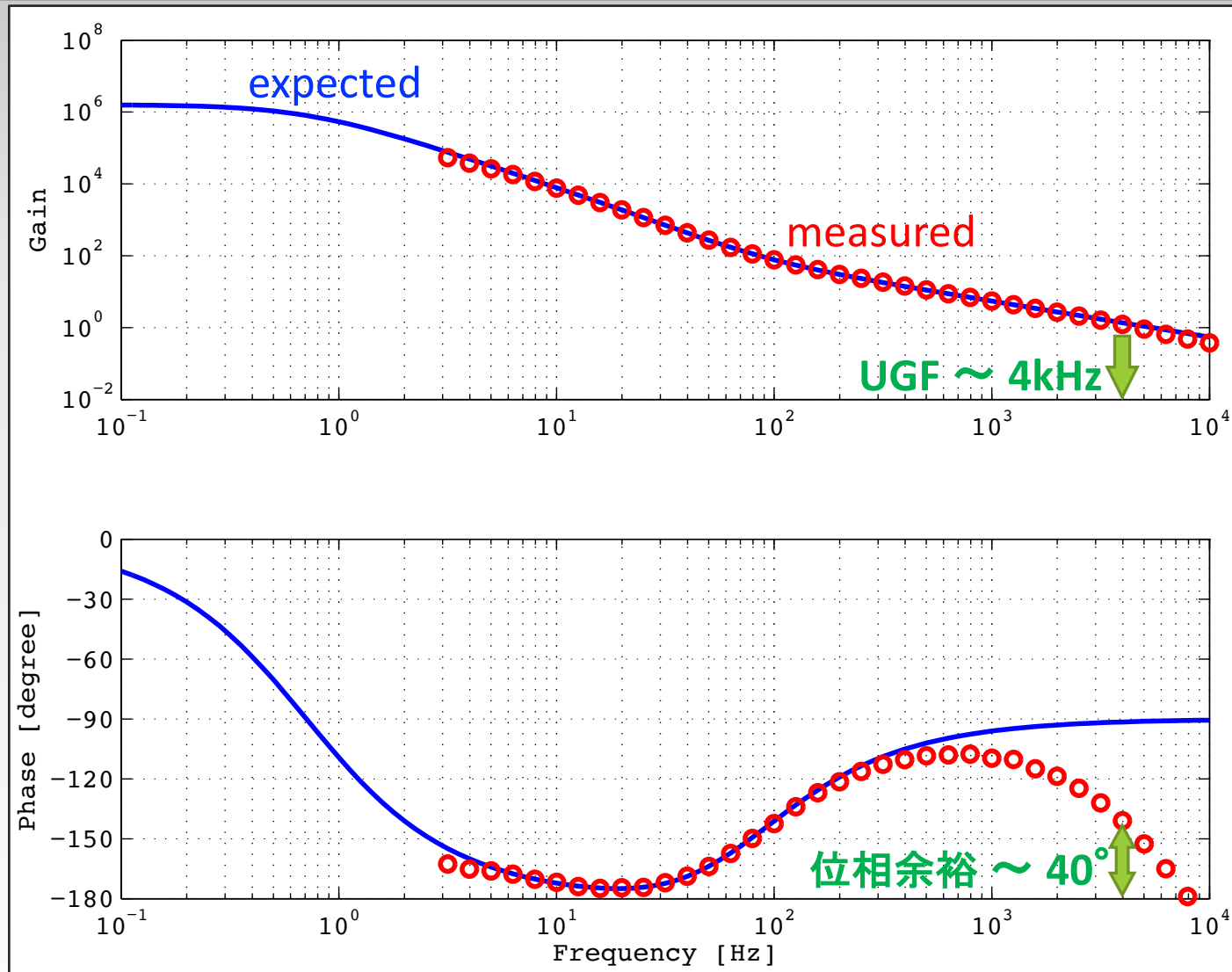
往復光速の異方性

ただし、

- α, β, δ ・・・Lorentz変換からのずれ
(特殊相対論では $\alpha = -\frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{2}$, $\delta = 0$)
- v ・・・絶対静止系から見た観測者の速さ
- θ ・・・光の進む方向

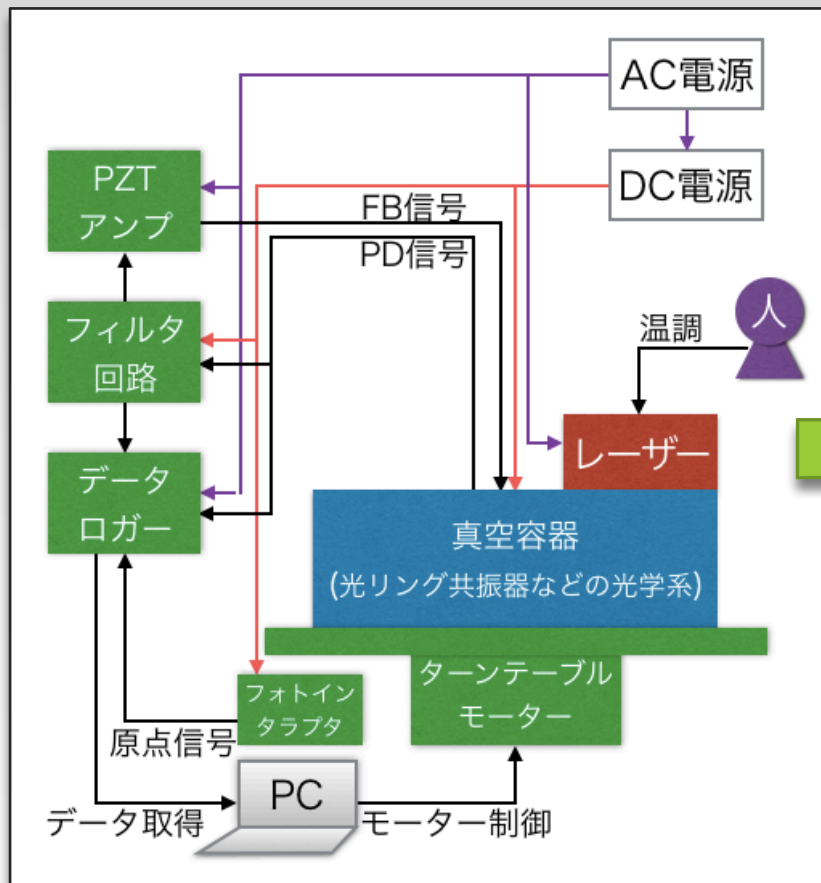


周波数制御のループ伝達関数

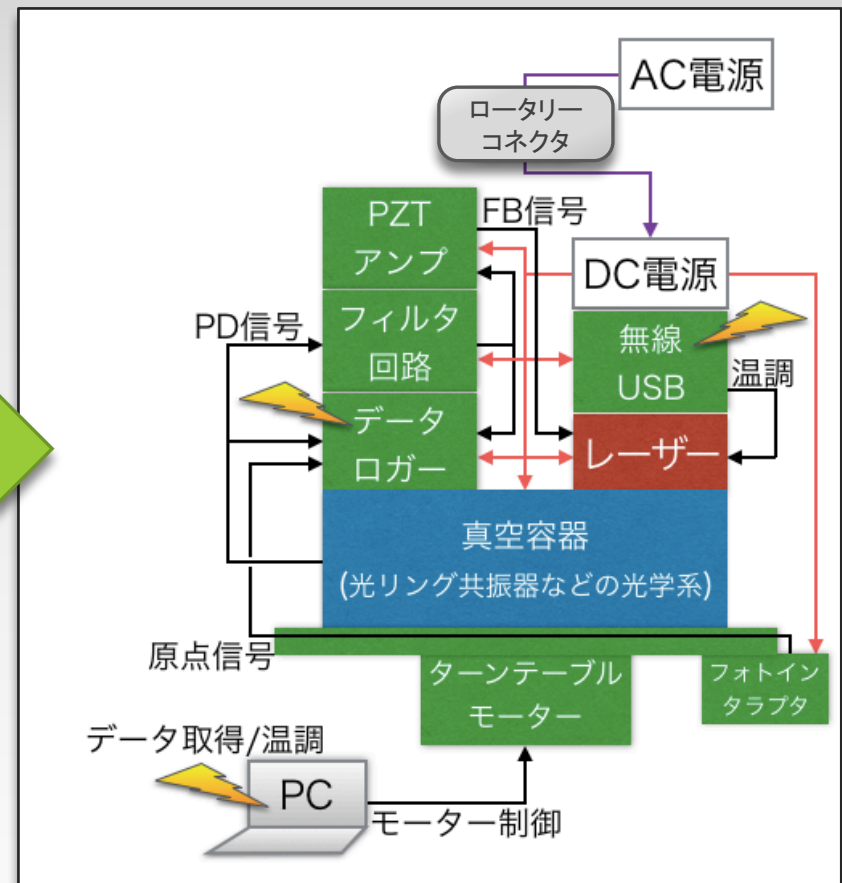


連続回転実現のための改良の詳細

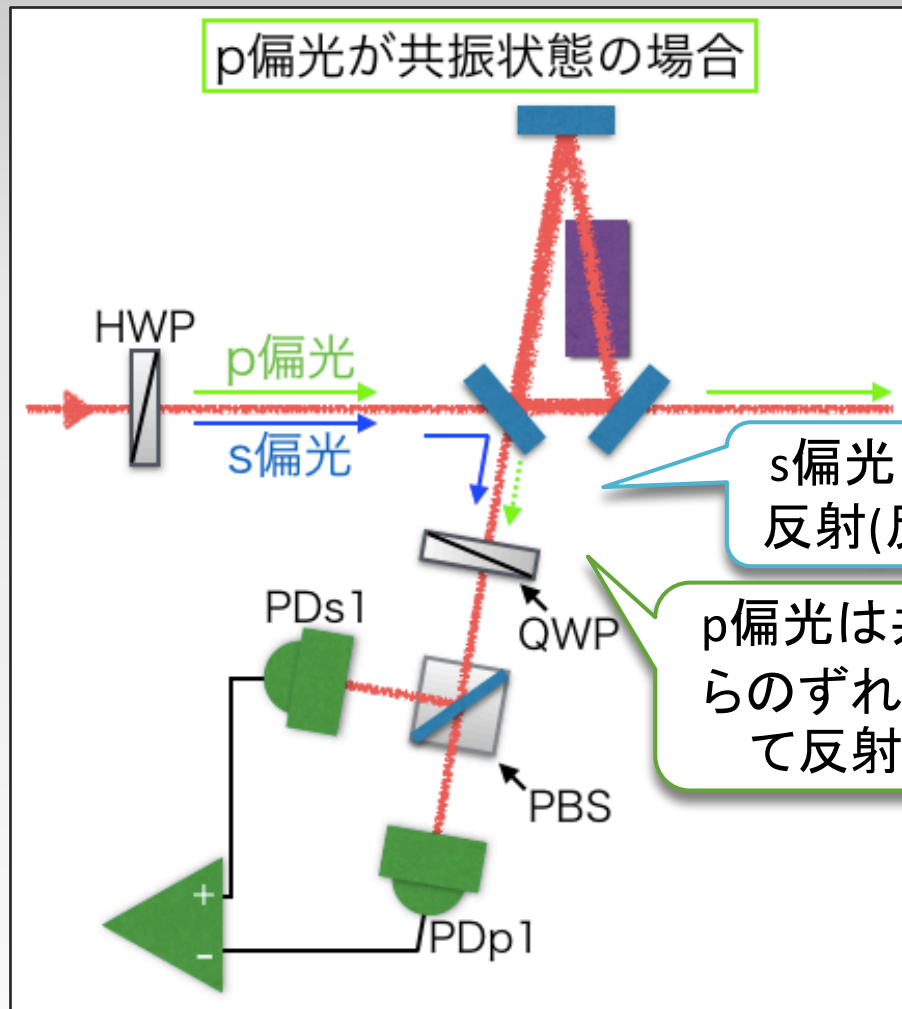
Before (～2013年)



After



偏光解析法



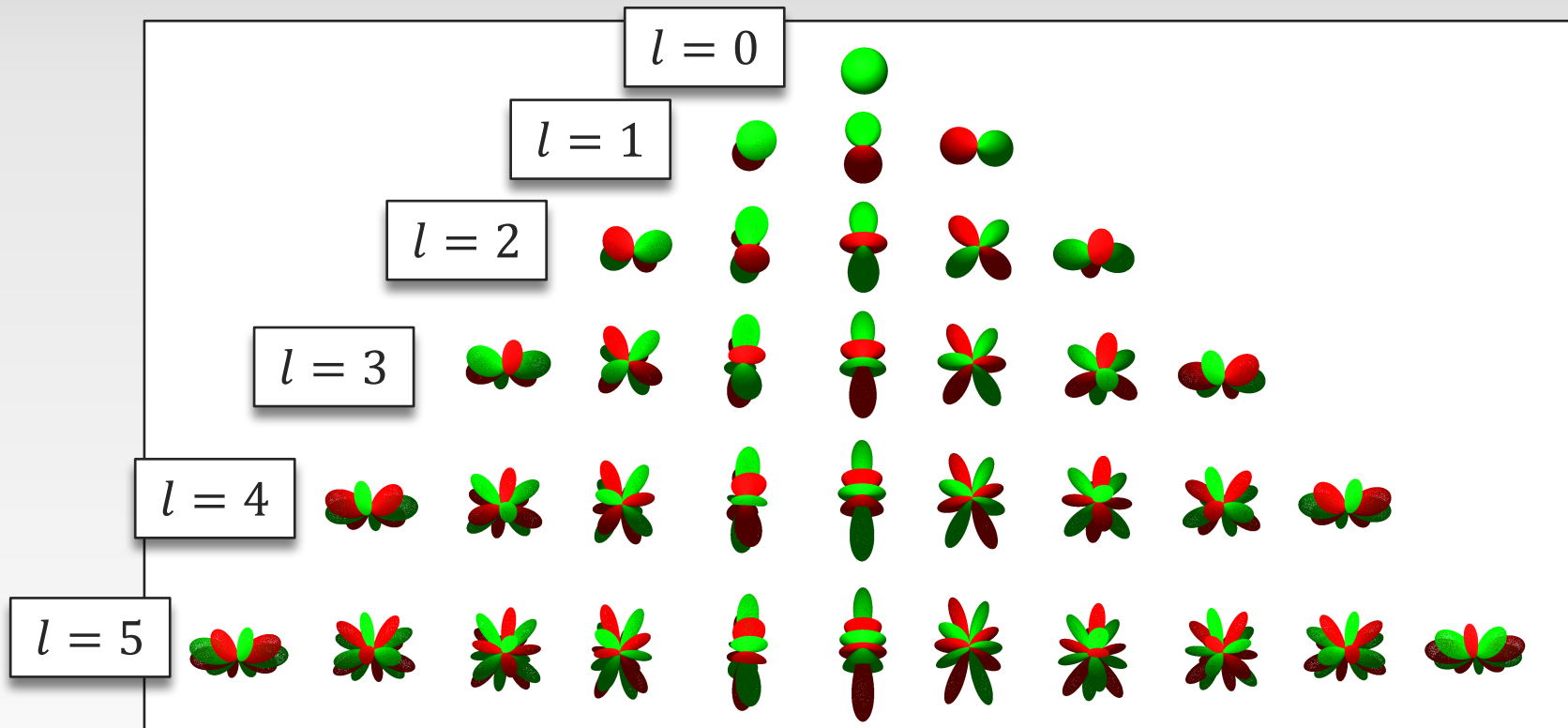
鏡が奇数枚のリング共振器には偏光選択性がある

⇒ p偏光が共振のとき、s偏光は反共振

これらを波長板で干渉させると、共振からのずれがわかる

球面調和関数による展開

- 光速の異方性は球面調和関数で展開できる。
- “片道光速の異方性”は $l = \text{奇数}$ の成分に対応する。



パラメータの一覧

- 回転周波数 $f_{\text{rot}} \sim 0.1 \text{ Hz}$ (未定)
⇒ 本測定をする前に色々な速さで回してみte最適な回転周波数を決める
- レーザー波長 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、 周波数 $\nu = 1.9 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- 入力パワー $P \sim 40 \text{ mW}$
- フィネス $F \sim 50$ 、 FSR $\sim 1.5 \text{ GHz}$ 、 FWHM $\sim 30 \text{ MHz}$
- 共振器長 $L = 140 \text{ mm}$
- 媒質の長さ $d = 20 \text{ mm}$ 、 媒質の屈折率 $n = 3.69$
- CMB静止系に対する太陽系の速さ $v = 369 \text{ km/s}$
(地球の公転の速さ 30 km/s 、 地球の自転の速さ 0.4 km/s)

参考文献

- [1] V. A. Kostelecký & S. Samuel, PRD **39**, 683 (1989).
Spontaneous Breaking of Lorentz Symmetry in String Theory
- [2] C. H. Lineweaver *et al.*, Astrophys. J. **470**, 38 (1996).
The Dipole Observed in the COBE DMR Four-Year Data
- [3] R. Mansouri & R. U. Sexl, Gen. Relative. Grav. **8**, 497 (1977).
A Test Theory of Special Relativity: I. Simultaneously and Clock Synchronization
- [4] Y. Michimura *et al.*, PRL **110**, 200401 (2013).
New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity
- [5] M. Nagel *et al.*, Nat. Commun. **6**, 8174 (2015).
Direct terrestrial test of Lorentz symmetry in electrodynamics to 10^{-18}
- [6] D. I. Robertson *et al.*, Class. Quantum Grav. **30**, 085006 (2013).
Construction and testing of the optical bench for LISA passfinder

以下春季学会の磁場の話

A.1. 環境磁場によるノイズ

➤ 「回転による雑音」を低減するための改良

- ① 制御系・光学系の改良
- ② 連続回転の実現

当初、「回転による雑音」は**回転の安定性が原因**だと考えていたため、①と②を改良すれば感度が改善すると考えていた。

➤ しかし、その原因は回転の安定性だけでなく、装置の回転により**環境磁場**(地磁気など)が**雑音**になることが判明

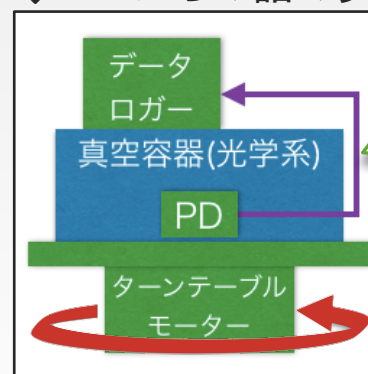


➤ ここからは、

- ③ **環境磁場による雑音**の対処方法の確立

について発表する。

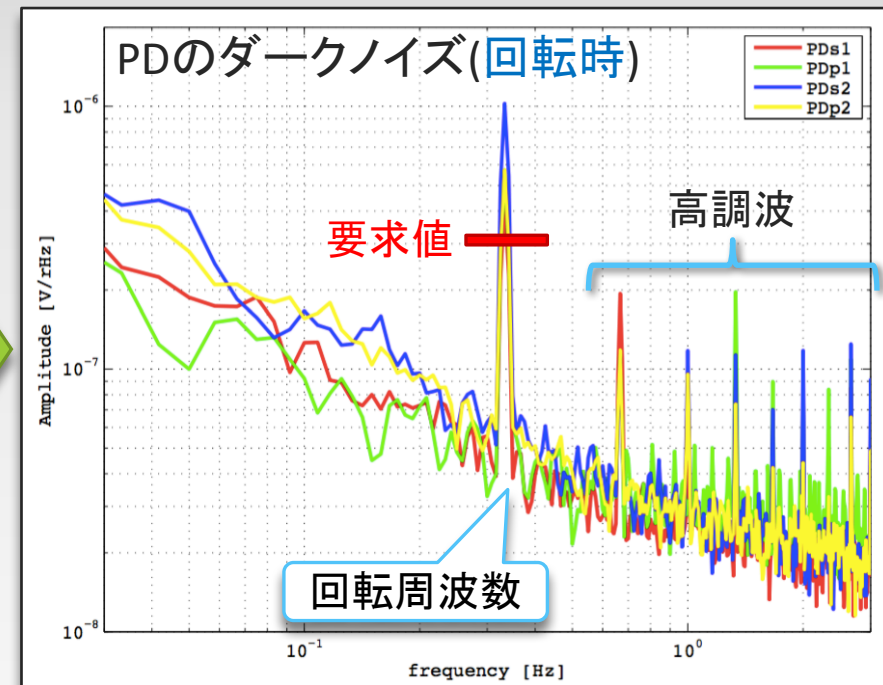
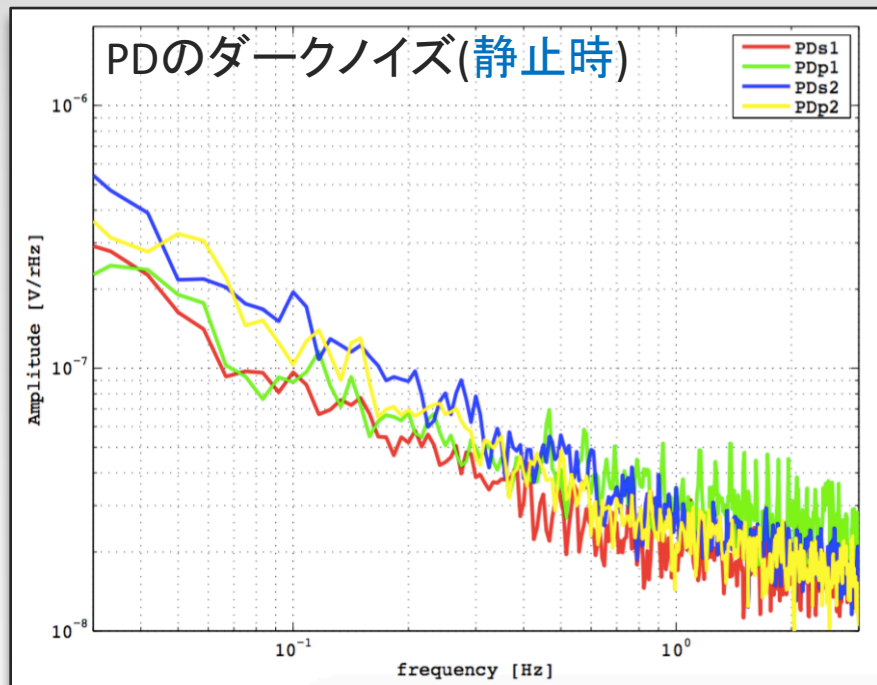
↓ ここからの話の実験セットアップ



PDのダークノイズを測定
(ここからの話ではレーザーは使用しない)

A.2. 回転周波数ノイズ

- 装置を回転させると回転周波数とその高調波にノイズが出る
(装置内にあるPD4つ分をプロット)



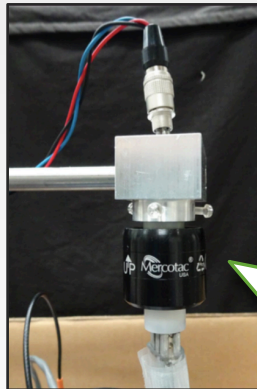
片道光速の異方性信号は回転周波数(とその高調波)に現れる
⇒ これらのノイズの原因を特定し、低減する必要がある

A.3. 回転周波数ノイズの原因 (1/3)

＜原因として考えられたもの＞

①ロータリーコネクタから電源ラインにノイズが入る？

⇒ ロータリーコネクタを使わなくても回転周波数ノイズに変化はないので、**原因ではない**



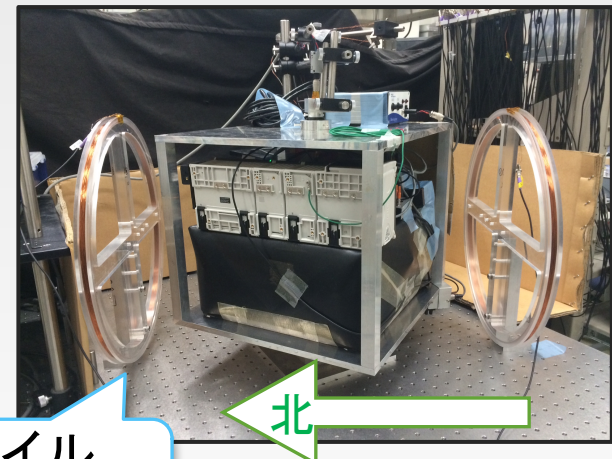
ロータリーコネクタ

外からターンテーブル上に電源を供給

※ **唯一電氣的に外とつながっている**

②環境磁場(地磁気など)の影響？

⇒ これをチェックするために、環境磁場を打ち消す向きにコイルで磁場をかけてみる

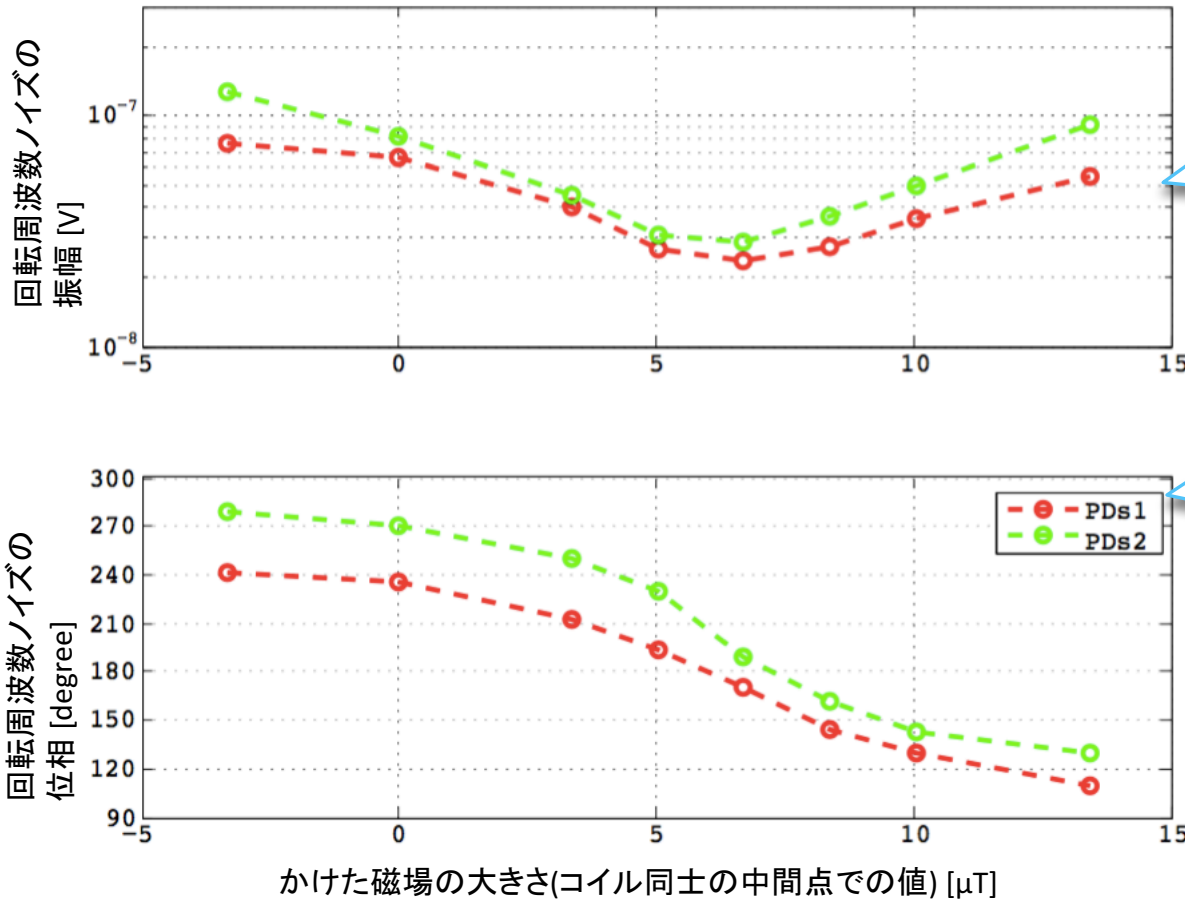


コイル
(直径40cm)

→ **結果は次のページ**

A.3. 回転周波数ノイズの原因 (2/3)

➤ 環境磁場を打ち消す向きにコイルで磁場をかけてみた結果



環境磁場と同程度の磁場をかけたときにノイズは最小

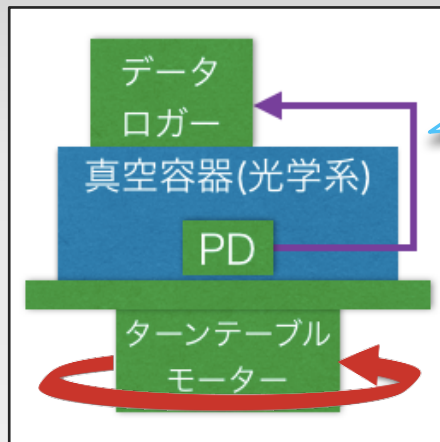
最もよく環境磁場を打ち消す点を境に位相が逆転



以上のことから**環境磁場**(地磁気など)が**原因**と考えられる。

A.3. 回転周波数ノイズの原因 (3/3)

➤ どこから環境磁場の影響が入るのか？



PD信号取得用のケーブル

← このケーブルから磁場の影響が入ると考えられる

ケーブルが磁場を横切ると、誘導起電力

$$V = \int_{\text{ケーブル}} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad \text{が生じる。}$$

⇒ 磁場 $\vec{B}$ が一様の場合でも、 $\vec{v}$ が回転するので回転周波数にノイズが生じる。

➤ ノイズの大きさを見積もってみると...

- ・ ケーブルの速さ $v \sim 0.3 \text{ m/s}$
- ・ 環境磁場の大きさ $B \sim 20 \text{ } \mu\text{T}$
- ・ ケーブルの長さ $l \sim 0.3 \text{ m}$
- ・ 同相雑音除去比 1/10



$V \sim 0.2 \text{ } \mu\text{V}$ になり、測定された回転周波数ノイズの振幅と同じオーダーになる。

A.4. 回転周波数ノイズを消す方法 (1/2)

< 方針 >

磁場によるノイズが入ったまま異方性信号を取得・・・ (a)

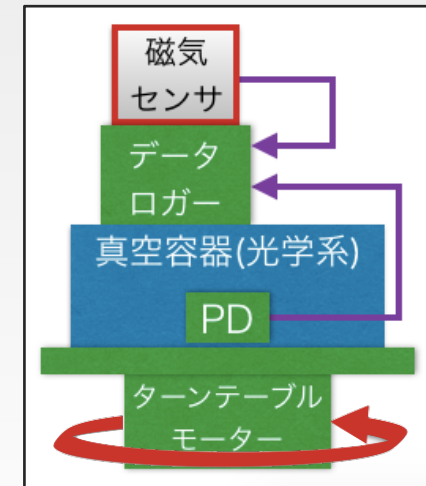


得られた異方性信号のうち、磁場の寄与を計算・・・ (b)



(a) - (b) によって、真の異方性信号を求める

- そのための方法
 - ・・・ 磁気センサをターンテーブルにのせる
 - ⇒ 他の装置と一緒に回転させて
2セットの測定を行う。
 - ➡ 予備測定 + 本番



A.4. 回転周波数ノイズを消す方法 (2/2)

1セット目の測定(予備測定)

PDのダークノイズと磁場を同時に測り、磁場から電圧への
伝達関数を求める。



2セット目の測定(本番)

レーザー光を入れて異方性
信号を取得する。同時に磁場
も測定する。

伝達関数 G は、

$$y(t) = x(t) + \hat{G}B(t)$$

ロガーに記録
されるデータ

真のPD
の出力

磁場による寄与

とおくと、 $G(f) = \frac{P_{yB}^*(f)}{P_{BB}(f)}$ で求められる。

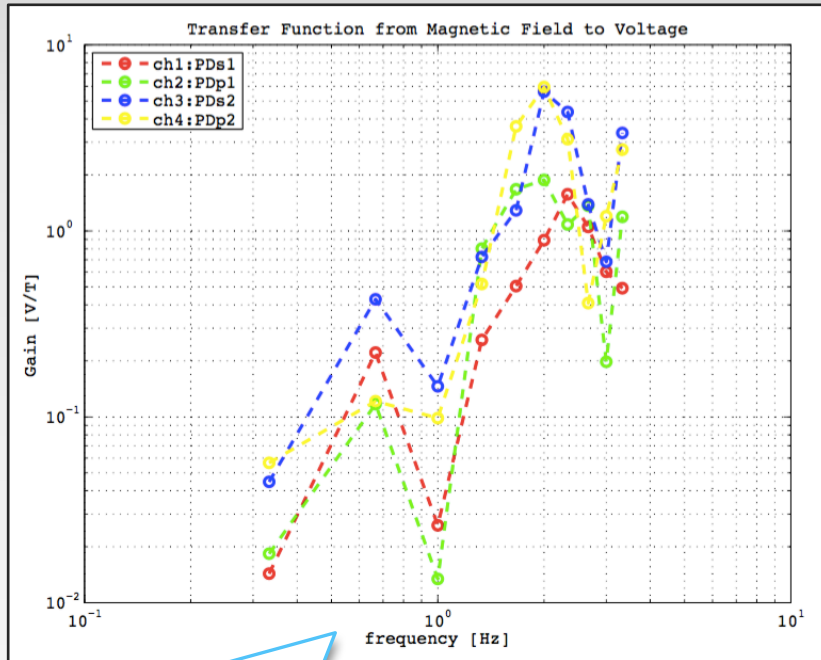
※ 今回は異方性信号ではなく、
2セット目もPDのダークノイズを測定

- 1セット目に求めた伝達関数と2セット目に測定した磁場から、磁場による寄与を求めることができる。

A.5. 計算結果 (1/2)

1セット目(予備測定)の結果

磁場から電圧への伝達関数

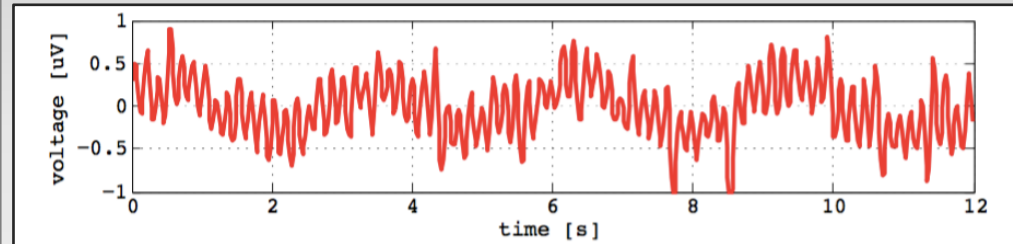


予備測定からデータから

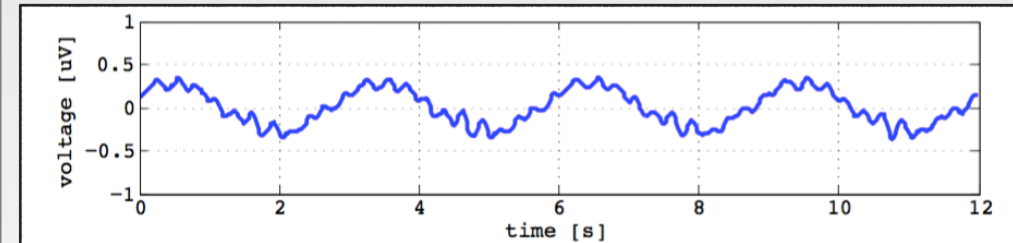
$$G(f) = \frac{P_{yB}^*(f)}{P_{BB}(f)} \text{ により計算}$$

2セット目(本番)の結果

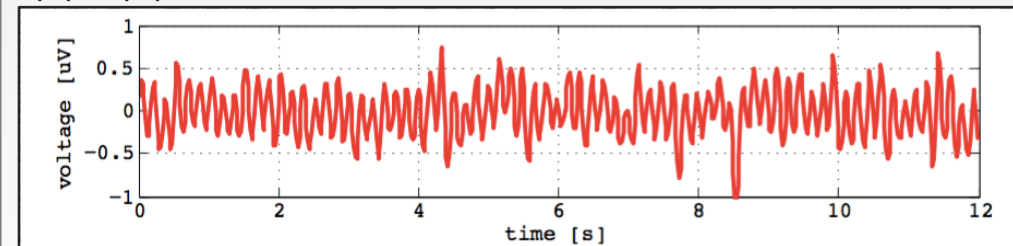
(a) ロガーに記録されたダークノイズの時系列データ



(b) 伝達関数と測定された磁場から計算した磁場の寄与



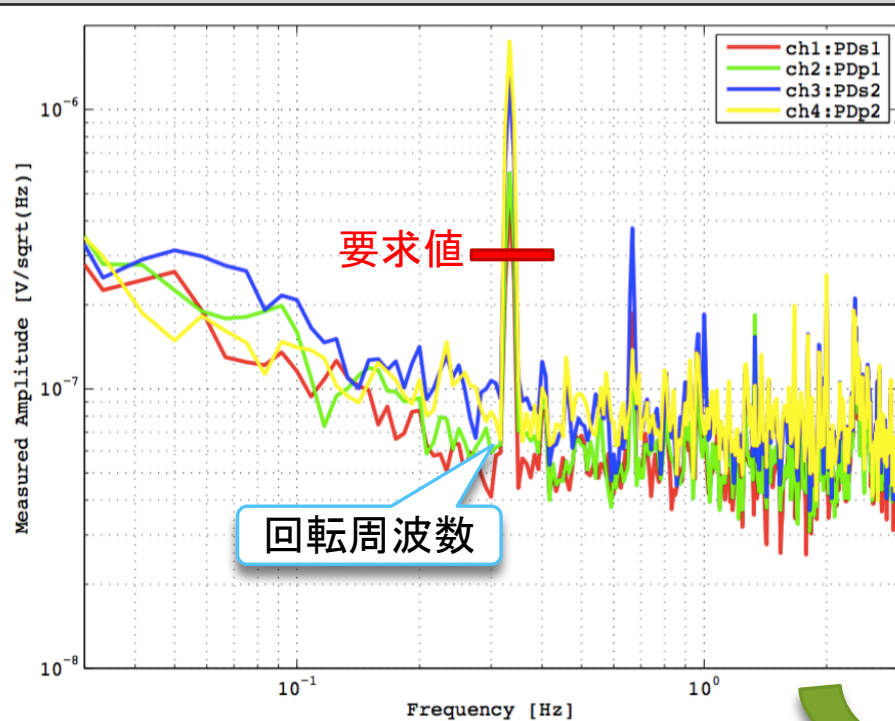
(a) - (b)



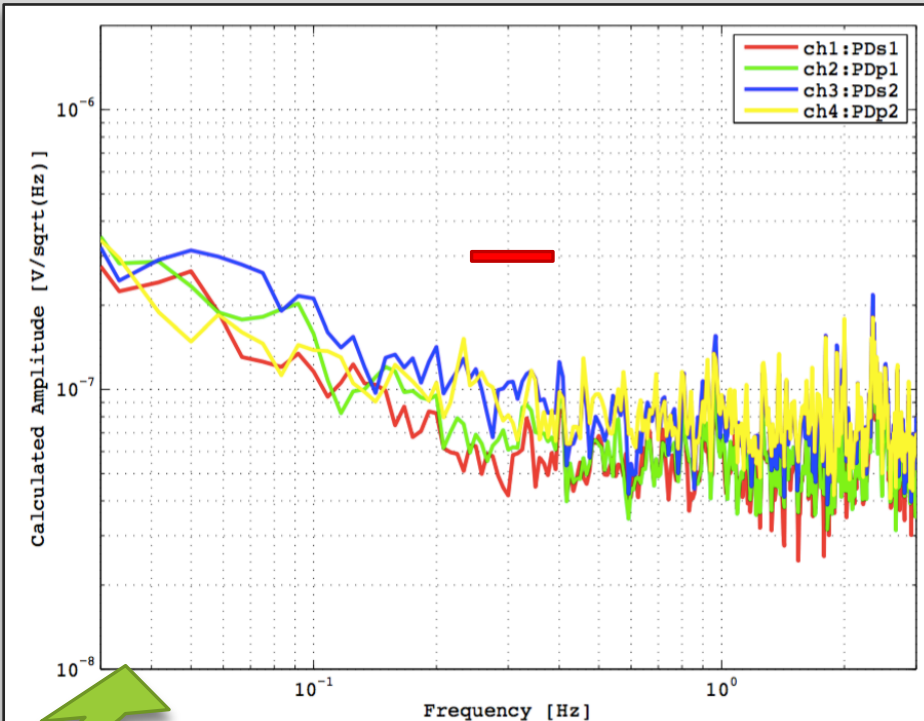
ターンテーブル4周分のデータ

A.5. 計算結果 (2/2)

PDのダークノイズ(回転時の生データ)



PDのダークノイズ(計算結果)



磁場の寄与を引き算

➤ 計算によって磁場の効果をキャンセルすることができる！

コイルで磁場を打ち消さない理由

➤ コイルで直接磁場を打ち消す場合のデメリット

△ 今持っているコイル(直径40cm)では小さすぎる。

- ※ 装置付近で一様な磁場を作るには直径 $\sim 1.4\text{m}$ のコイルが必要。
- ※ 仮に大きなコイルを準備できても“完全に”一様な磁場はできない。

△ “完全に”一様な磁場を作れたとしても、回転周波数成分のノイズは消せるが、高調波のノイズは消せない。

- ※ 高調波のノイズは磁場の非一様成分で生じる。
- ※ “完全に”一様な磁場は作れないので、むしろ高調波ノイズは増える。

△ 地磁気の時間変化に対応する方法を考えなくてはならない。

伝達関数の導出

$$y(t) = x(t) + \hat{G}B(t) \xrightarrow{\text{フーリエ変換}} X(f) = Y(f) - G(f)B(f)$$

ロガーに記録
されるデータ

PDの
真の出力

地磁気
による寄与

※ 以下では引数は全て f なので省略する。

x のパワースペクトルは、

$$\begin{aligned} P_{xx} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X|^2}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|Y - GB|^2}{T} \\ &= P_{yy} - 2\text{Re}[GP_{yB}] + |G|^2 P_{BB} \end{aligned}$$

これを最小にする伝達関数は、 $G = \frac{P_{yB}^*}{P_{BB}}$

このとき、
$$P_{xx} = P_{yy} - \frac{|P_{yB}|^2}{P_{BB}} = P_{yy}(1 - C_{yB})$$

※ $C_{yB} = \frac{|P_{yB}|^2}{P_{yy}P_{BB}}$: コヒーレンス (0~1の値をとり、相関の程度を表す)

測定された y のパワースペクトルから、磁場 B と相関のある分だけ引いた形になる。

なぜ磁場1成分だけで良いのか？

疑問：磁場は3成分あるので、

$$y(t) = x(t) + \hat{G}_1 B_1(t) + \hat{G}_2 B_2(t) + \hat{G}_3 B_3(t)$$

ロガーに記録
されるデータ

PDの
真の出力

地磁気
による寄与

とすべきでは？

3成分を全て使うとうまいかない理由

磁場を3成分使っても同様にクロススペクトルなどから伝達関数を求める方法はある。

⇒ しかし、回転周波数付近で特に、**磁場の各成分同士の相関が非常に強くなる**。相関が強いと**伝達関数の不定性が大きくなり、正しく伝達関数を求められない**。

⇒ うまく回転周波数ノイズをキャンセルできない。

1成分だけで十分である理由

ターンテーブル付近で**磁場が十分一様とみなせるため**。

⇒ その場合、

- ▶ **水平2成分**は回転周波数で十分に相関がある。
- ▶ **鉛直成分**は回転により変化しない。

⇒ 実質1自由度しかなく、1成分だけ測れば十分である。

なぜ高調波にノイズが生じるのか？

➤ 環境磁場を①②③の成分に分解

①「**時間的に一様**」かつ「**空間的に一様**」な成分
→ 回転周波数にノイズが出る

②「**空間的に一様**」かつ「**周波数 f で時間変化する**」成分
→ 周波数 $|f - f_{\text{rot}}|$, $f + f_{\text{rot}}$ にノイズが出る
※ 磁場がランダムに時間変化する場合ピークにならない

③「**時間的に一様**」かつ「**空間的に $2n$ 重極成分をもつ**」成分
→ 周波数 $(n \pm 1)f_{\text{rot}}$ にノイズが出る
※ n は整数なのでノイズスペクトルにピークを作る
高調波に生じるノイズの原因と考えられる

高調波に生じるノイズの例

➤ 高調波のノイズは磁場の非一様性でできる

(例) 磁場の向きは一樣で、大きさに四重極成分がある場合

- (1) 中心軸の周りを一回転すると、磁場の大きさは $\sin(2\omega_{\text{rot}}t)$ で変化する。
- (2) 慣性系から回転系への座標変換によって(1)に $\sin(\omega_{\text{rot}}t)$ がかけられる。

$$\frac{\sin(2\omega_{\text{rot}}t)}{(1) \text{ 非一様性の寄与}} \times \frac{\sin(\omega_{\text{rot}}t)}{(2) \text{ 回転の寄与}}$$

回転周波数と3倍波成分が生じる

