

2025年度卒業研究
鏡像光てこ法への応用を目指す分割
型フォトダイオードによるレーザー
ビーム位置検出

高エネルギー物理学研究室
指導教員：宮林 謙吉
学籍番号：22310255 氏名：原田 鈴華

目次

- 概要・目的
- 研究背景・本研究の対象
- **Split photo detector**の雑音評価・ラインレーザーを用いたキャリブレーション結果
- **SPD**の鏡像光てこ法への応用と試験結果
- まとめ

概要・目的

- 宇宙重力波望遠鏡では外力雑音が十分低いことが求められる。そこで、地上試験時の外力センサとして**鏡像光てこ (Mirrored Oplev)**の開発を目指す。
- 本研究では、Mirrored Oplevのレーザービームの位置検出に**分割型フォトディテクター (SPD)**を用いて**雑音評価**を行い、さらに**ラインレーザー**にも応用できることを確認した。
- また、SPDを用いてMirrored Oplevの試作品を作成し大気中で試験を行なった。

目次

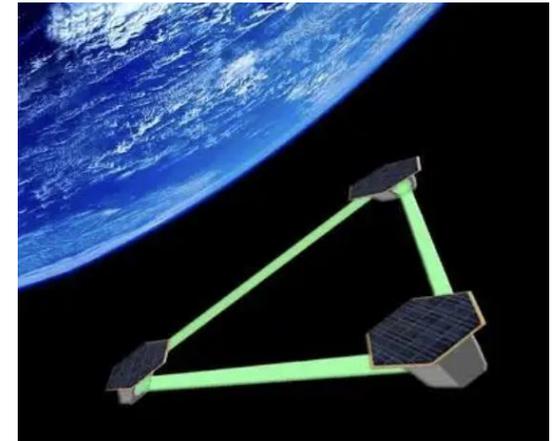
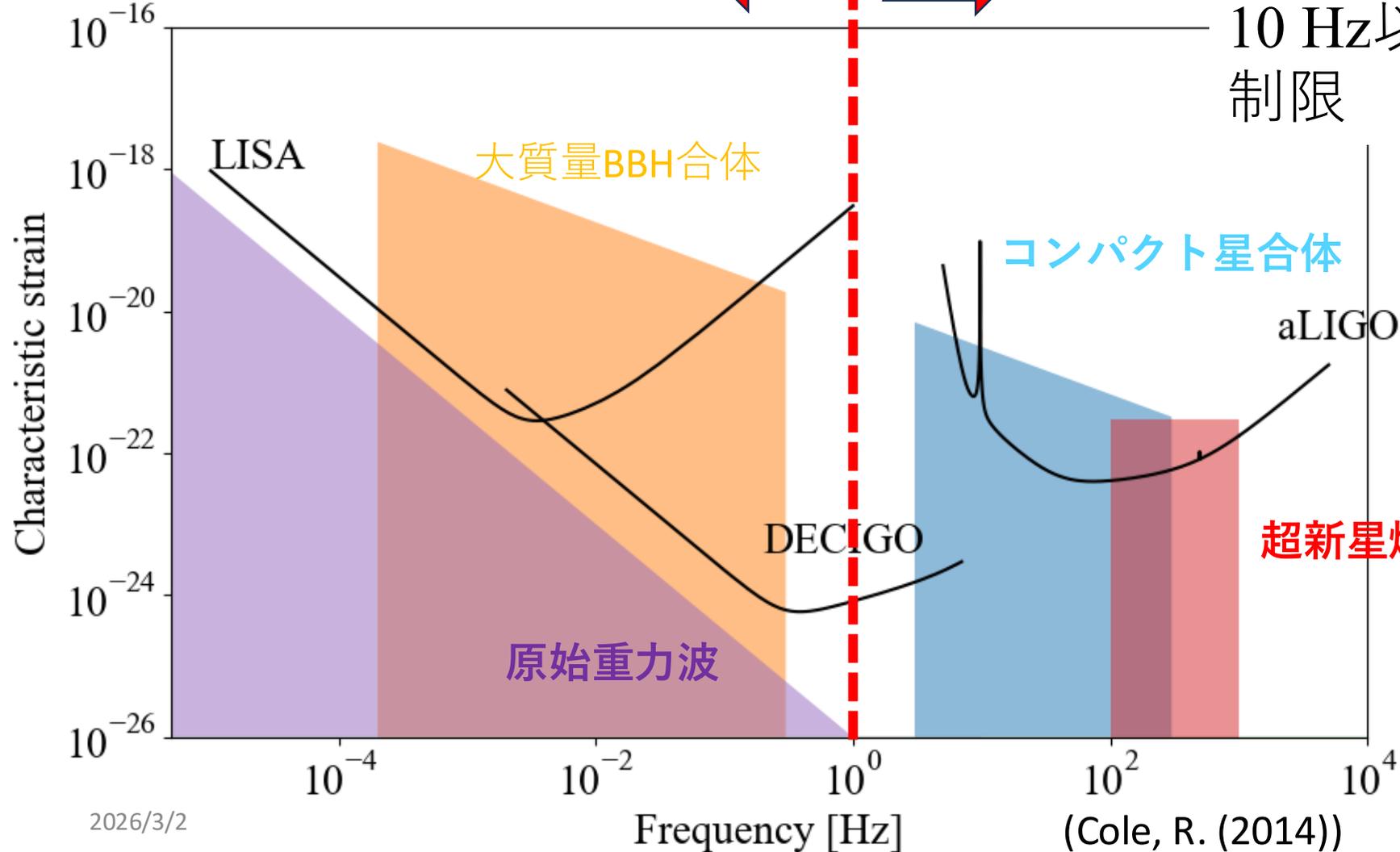
- 概要・目的
- 研究背景・本研究の対象
- Split photo detectorの雑音評価・ラインレーザーを用いたキャリブレーション結果
- SPDを用いた鏡像光てこ法の試験結果
- まとめ

宇宙重力波望遠鏡で低周波を観測

宇宙重力波望遠鏡
低周波観測

地上重力波望遠鏡

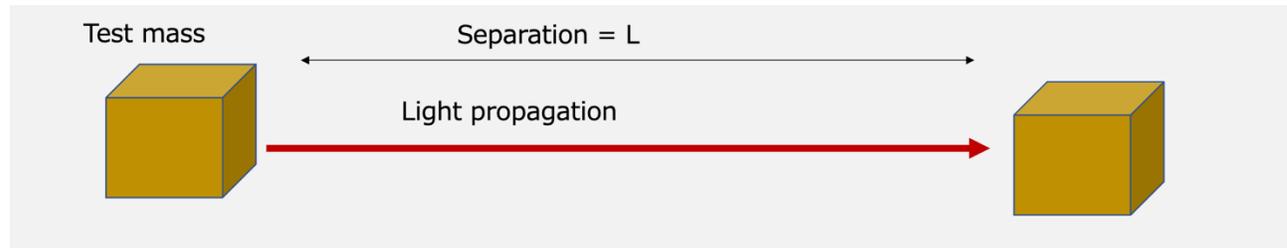
10 Hz以下は地面振動で制限



DECIGO
S.Sato(U.Hosei)

宇宙重力波望遠鏡には慣性基準が必須

※慣性基準（外力を受けない自由落下のテストマス）



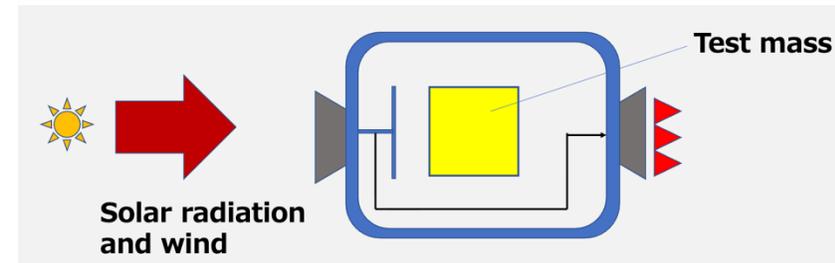
K.Izumi(JAXA)

テストマス間の距離の変化を測定

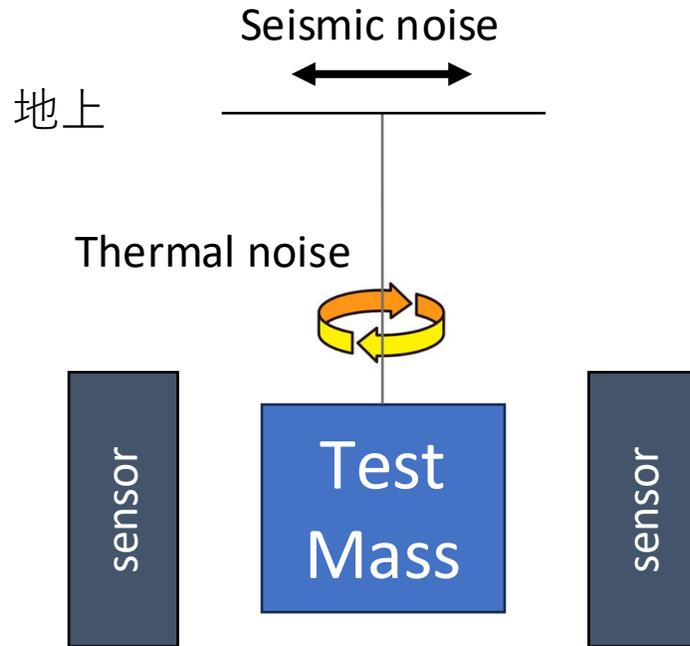
- **テストマスが慣性運動なら：**
 - 距離変化 = 重力波による時空の歪みだけ
- **テストマスが外力で動く場合：**
 - 距離変化 = 重力波 + 外力
- 外力による衛星の変位と重力波を区別できない



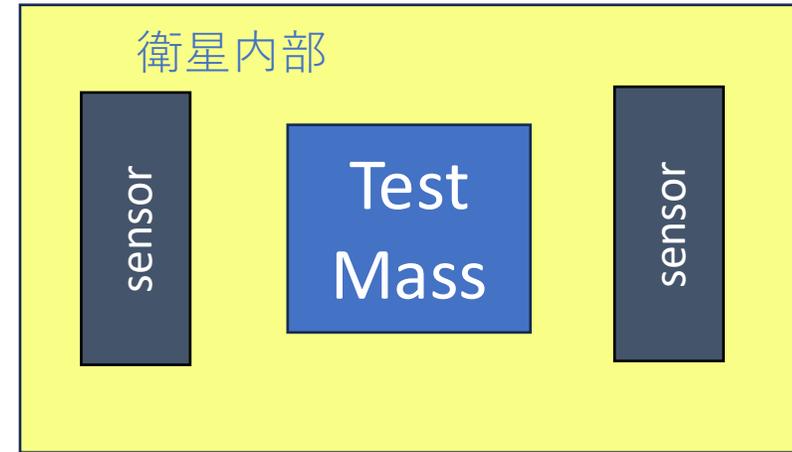
外力を測定・テストマスの制御が必要



宇宙空間は「低擾乱」「微小重力」環境を持つ絶好の精密測定環境



宇宙

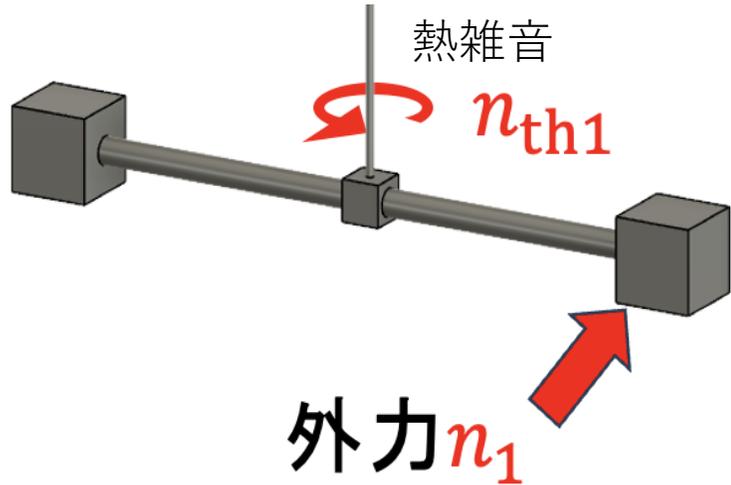


試験質量は浮遊し、懸架系を必要としない
→低周波で支配的な地面振動や懸架系の熱雑音から解放

ただし、打ち上げ後の修正が極めて困難
→試験質量の制御を担う外力センサは、地上で十分な性能実証を行う必要がある

外力測定の精度向上には低雑音角度センサ・ワイヤーの熱雑音低減が必要

従来の微小外力測定 (LISA 地上試験)

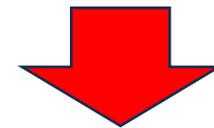


ねじり振り子

Y. Okuma et al. 2025

- 宇宙実験の前段階として地上での模擬環境による実証実験が必要
- 地上では浮遊環境がないため、**ねじり振り子**を使って実証試験を行っている

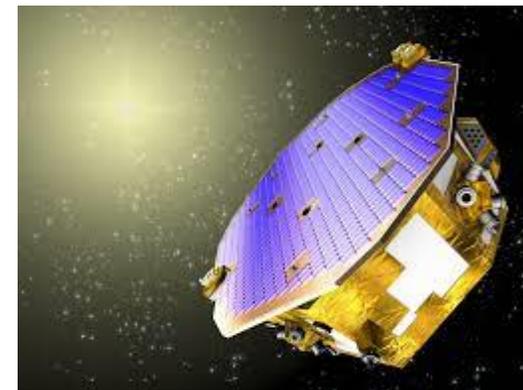
ϕ_1 **理由**：柔らかい応答を持っていることと、回転方向の地面振動が計測例がないほどに小さい



- ねじり振り子では質量の変位を角度から読み出すため、高精度計測には**低雑音角度センサ**が必要
- **ワイヤーの熱雑音の低減**も必須

LISA※地上実証試験の結果

※LISA:ESA (欧州宇宙機関) 主導の宇宙重力波望遠鏡

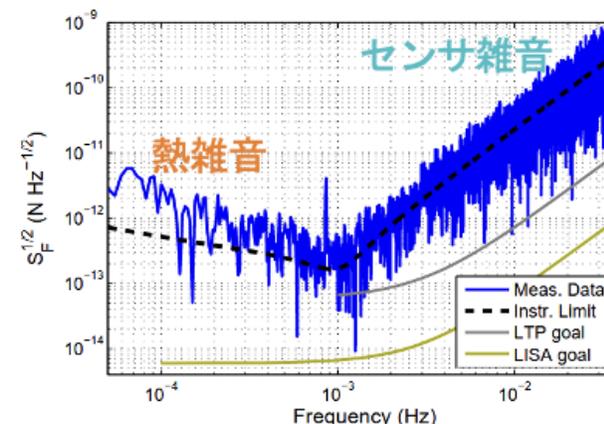


目標: 浮遊質量に働く外力が重力波望遠鏡の要求値を満たすことを示す

課題:

低雑音センサへの地上試験には本来宇宙空間で達成されるはずの低擾乱環境が要求される

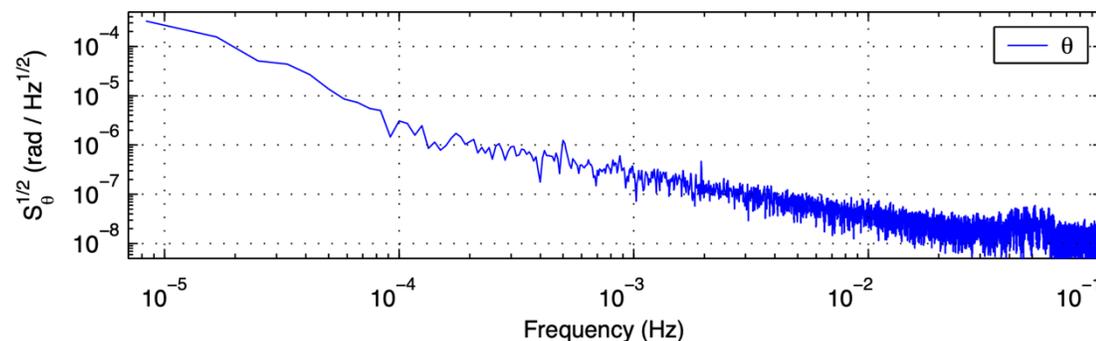
結果: センサー雑音・熱雑音により地上では要求値を達成できず、最終的にLISA pathfinderを打ち上げて軌道上で実証を行った (開発期間10年、総費用500万ユーロ)



目標値まで
10倍以上の差
(Carbone et al., 2006)

→LISA Pathfinder ($10^{-8} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) の性能を上回る性能 ($10^{-9} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) を目指し、本研究では新たな装置を開発する

※ $\sqrt{S_F} \propto \sqrt{S_\phi}$



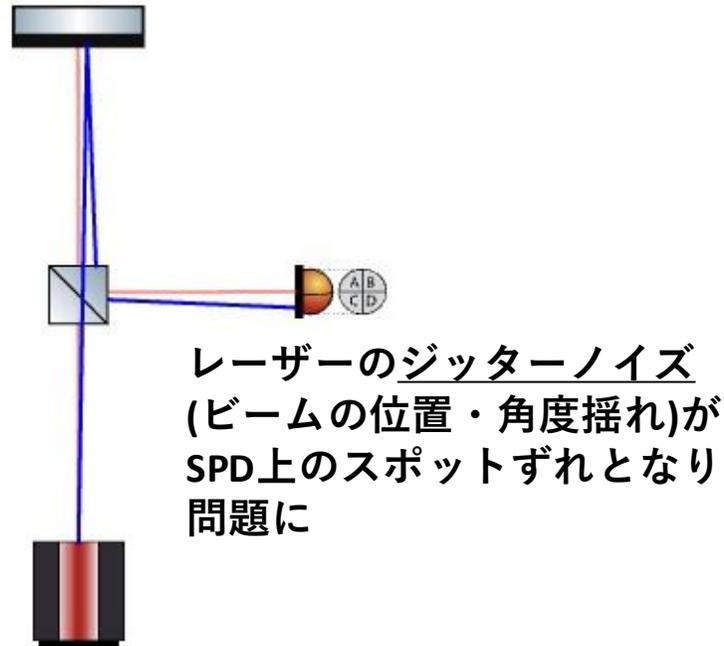
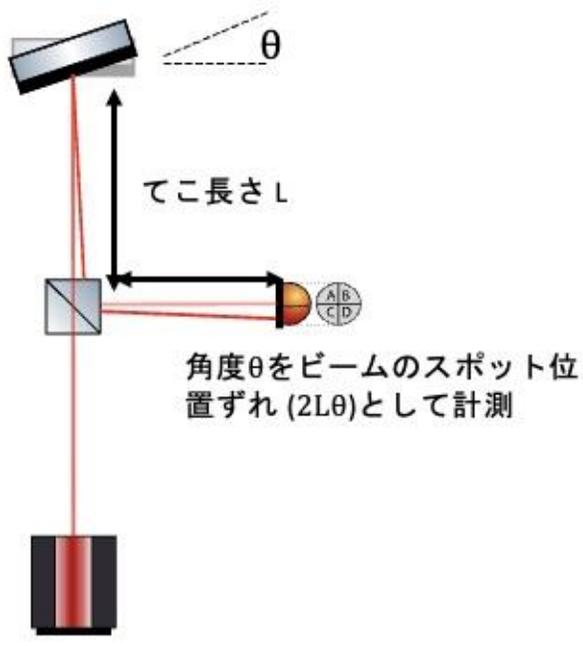
研究背景まとめ

- 宇宙重力波望遠鏡による低周波重力波観測が目指されている
- 宇宙重力波望遠鏡には慣性基準が必須
- 慣性基準の実証には**精密力測定**が必要
- 外力測定の精度向上には**低雑音角度センサ**（←本研究の対象）
・ ワイヤの熱雑音低減が必要

光てこ法を用いた角度測定

光てこ法

反射したレーザービームの位置変化を利用して、対象のわずかな角度変化を高精度に読み取る測定法



Ex) $L=0.20\text{m}$

ジッターによってSPD上のレーザーの位置変化が

$$x_{\text{jitter}} = 1 \times 10^{-6} \text{ m (大気中)}$$

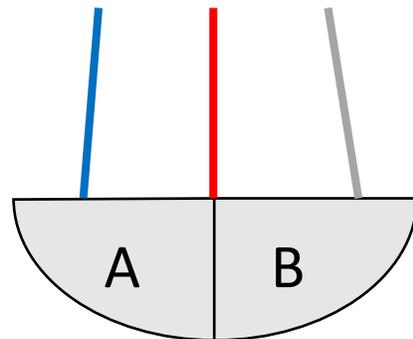
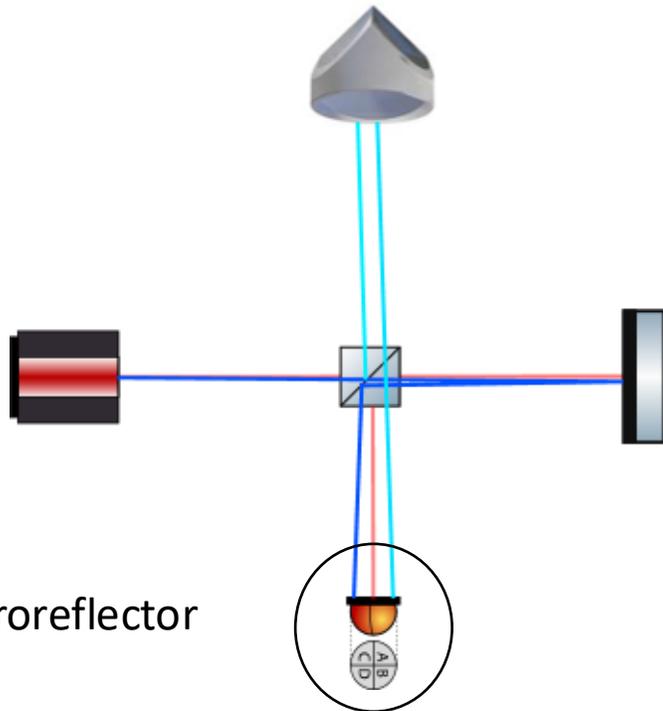
とすると...

$$\theta_{\text{jitter}} = \frac{x_{\text{jitter}}}{2L} = \frac{10^{-6}}{0.4} = 2.5 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

$$\rightarrow \theta_{\text{jitter}} > \theta_{\text{target}} (1 \times 10^{-9})$$

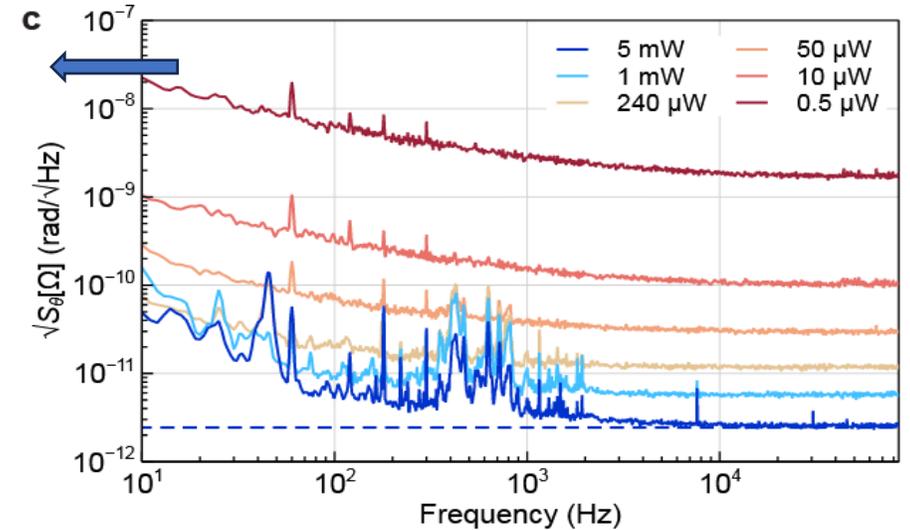
Mirrored Optical Lever

- 新しく提案された [Mirrored Optical Lever](#) (Shin et al. 2025) はジッター雑音を除去できる
- 本実験の低周波帯の雑音性能は未検証



A-Bの信号を取ることでジッター雑音を除去

本実験の測定帯域



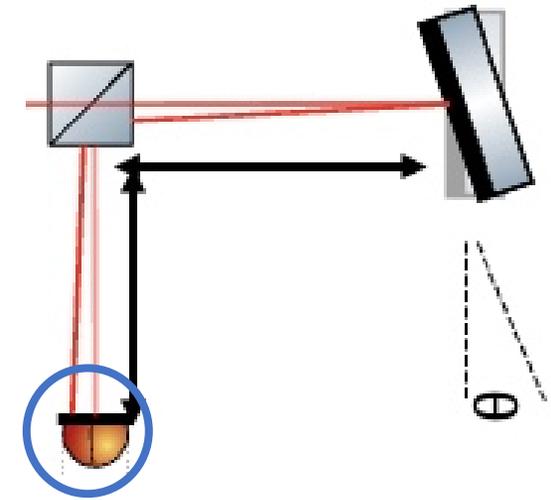
Mirrored Oplevによる角度測定雑音 (Shin et al., 2025)

目次

- 概要・目的
- 研究背景・本研究の対象
- **Split photo detector**の雑音評価・ラインレーザーを用いたキャリブレーション結果
- SPDを用いた鏡像光てこ法の試験結果
- まとめ

Mirrored Oplev で高感度な角度測定をするには低雑音のフォトディテクターが必須

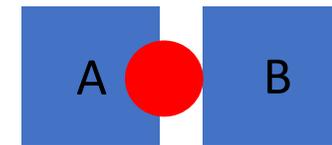
- 鏡の角度変化は**ビーム横変位**として読み出される
- その横変位を検出するために検出面が分割された**Split Photodiode (SPD)** を使用



問題：

SPDの読み出し回路の雑音が目標角度感度の要求値を制限しないか？

→SPD読み出し回路の雑音評価を確認。

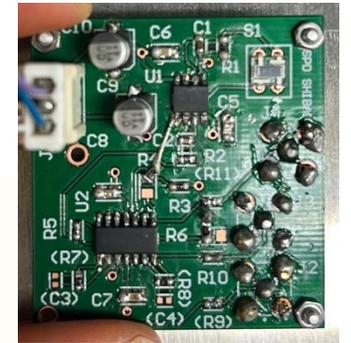


(受光面Aに入る光量) - (受光面Bに入る光量) $\propto \Delta x$

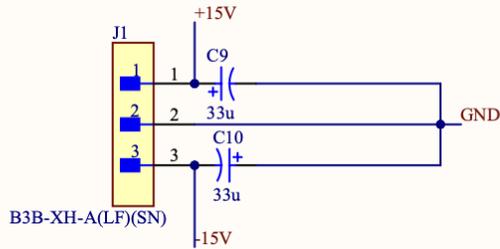


HAMAMATSU : S4204

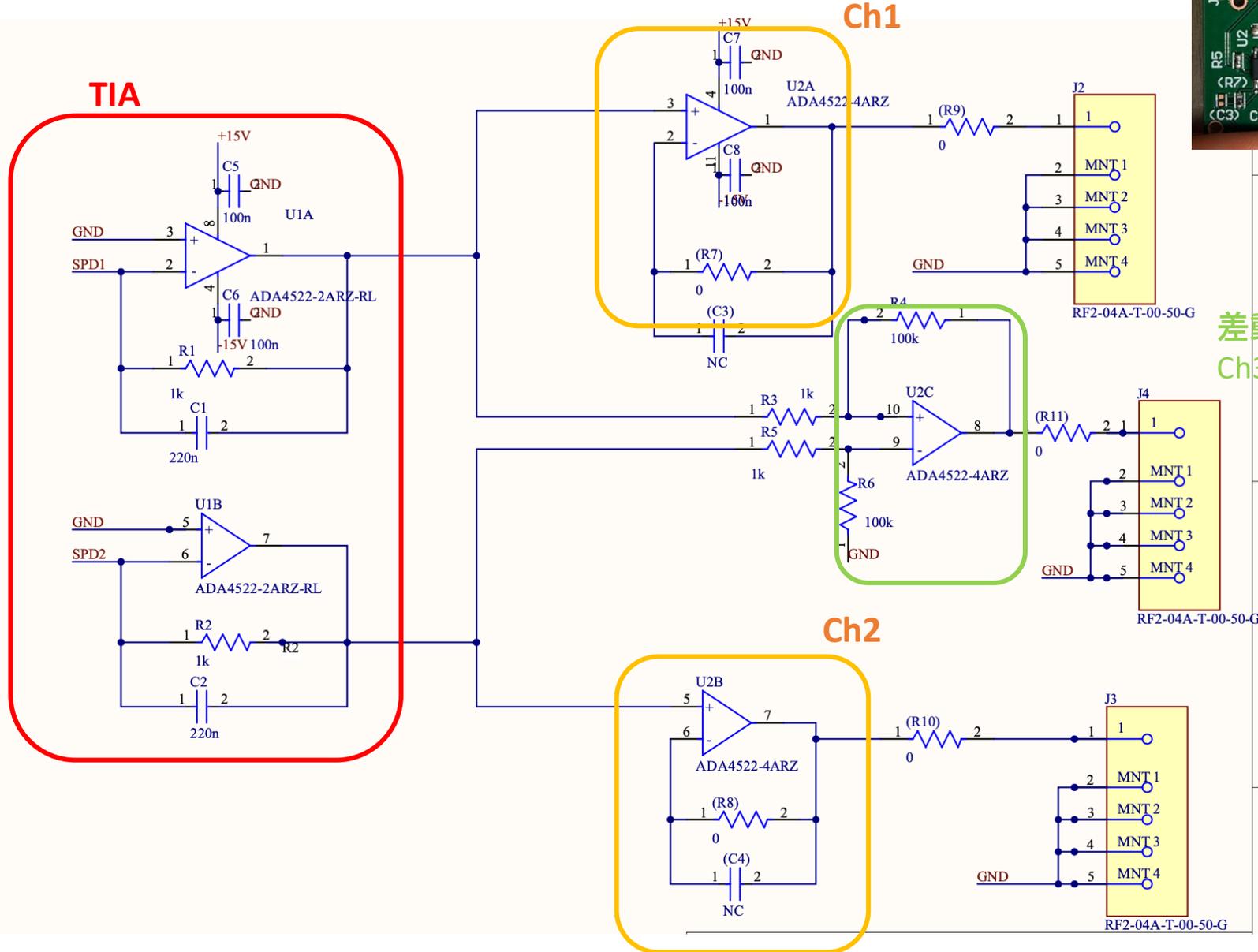
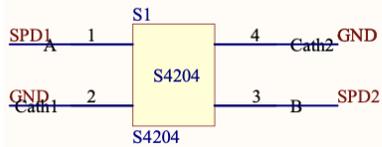
Split Photo Detector (SPD) の回路構成



電源電圧



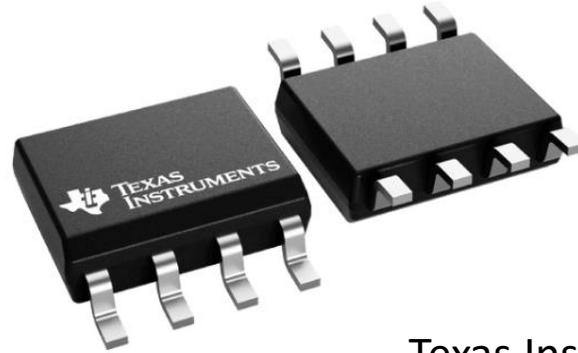
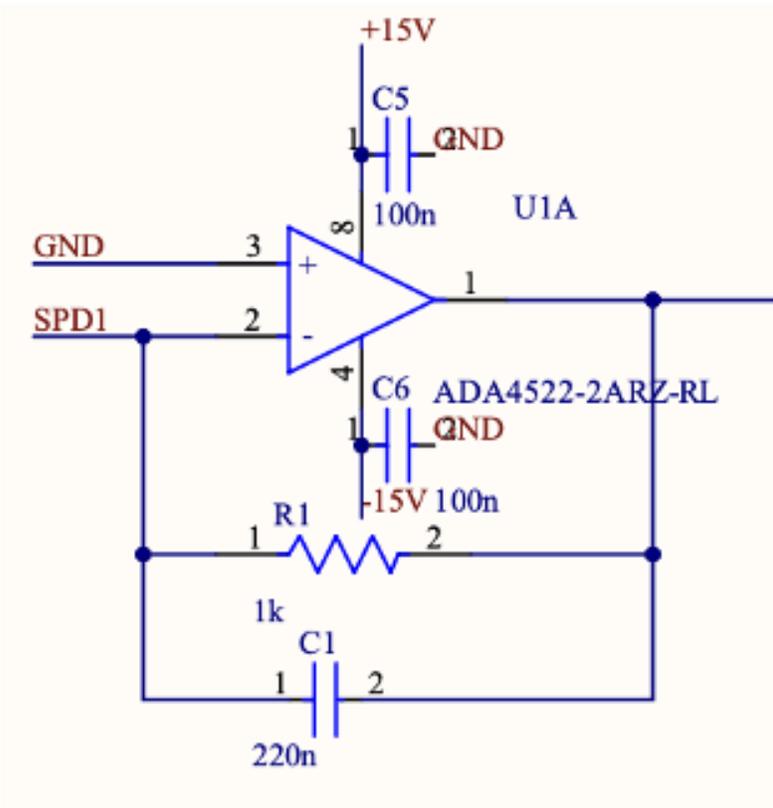
SPD



差動チャンネル
 $Ch3 = (ch1 - ch2) \times 100 \propto \Delta x$

読み出しは
 データロガー
 or オシロ

トランスインピーダンスアンプ (TIA)



Texas Instruments製 : OPA2187IDR

- フォトダイオードから出力される**微小光電流**を**電圧信号へ変換**
- **動作原理**

TIAはオペアンプ+フィードバック抵抗で構成される

$$V_{\text{out}} = -R_{\text{fb}} I_{\text{pd}}$$

I_{pd} : フォトダイオード電流

R_{fb} : フィードバック抵抗

ノイズ評価のセットアップ

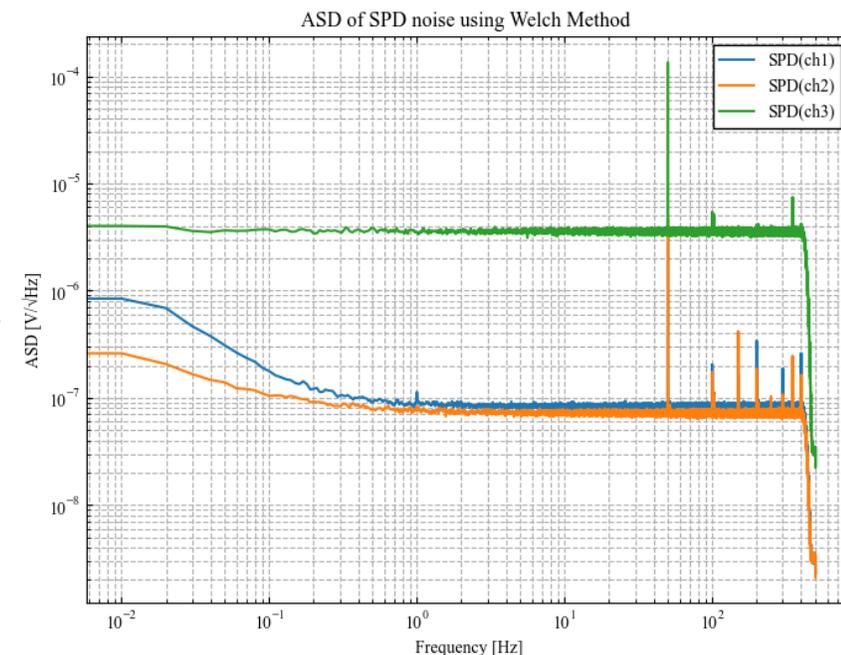
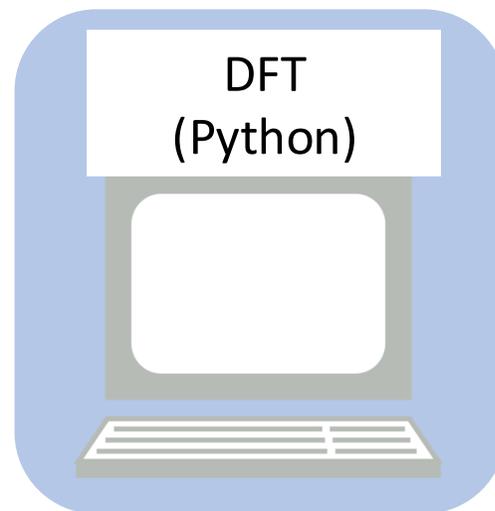


PD



白山工業株式会社 LT-7700

サンプリング周波数：**1 kHz**

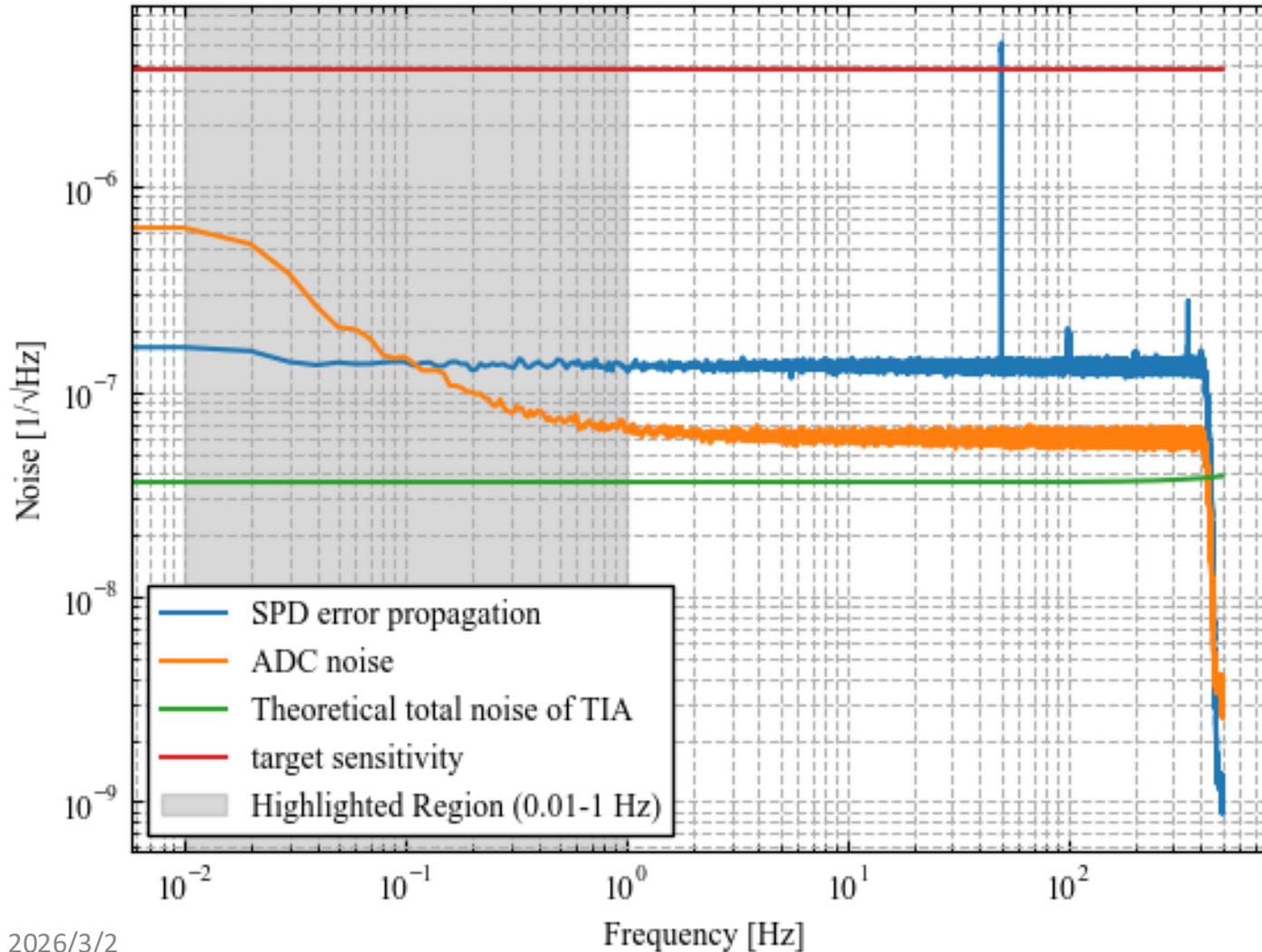


スペクトル解析

$V(t) \rightarrow \text{PSD} [V^2/\text{Hz}] \rightarrow \text{ASD} [V/\sqrt{\text{Hz}}]$

- nperseg : 100000
- Welch overlap: 5000

SPDの回路ノイズは十分に低いことが分かった



← 角度目標値[rad/vHz] → [1/vHz]

この値よりもSPDによる電子ノイズが下回っていることが条件

← SPD error propagation

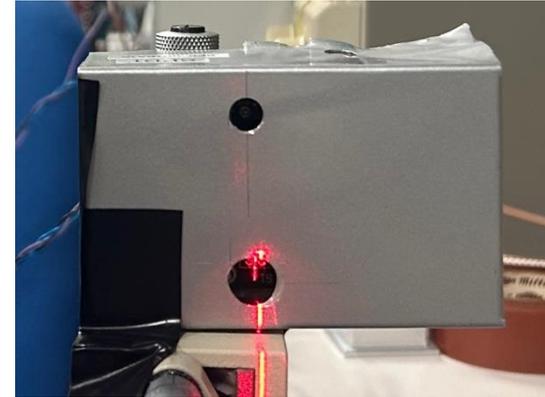
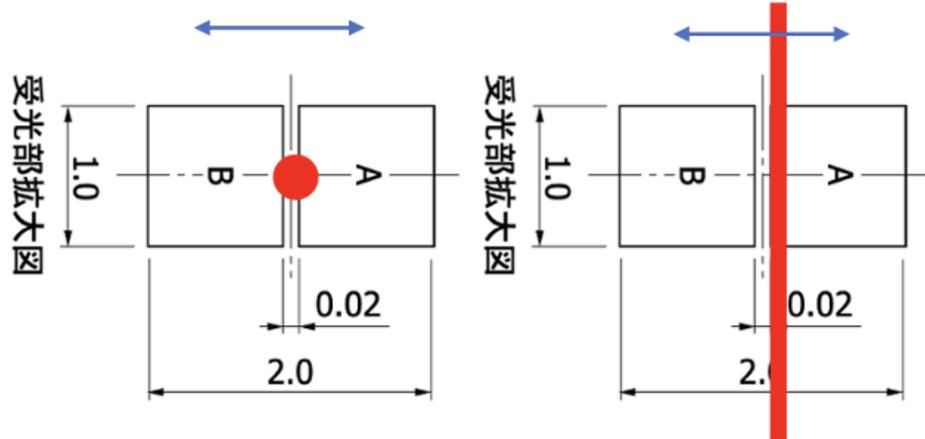
← データロガー ADC error propagation

← TIAのノイズの理論値

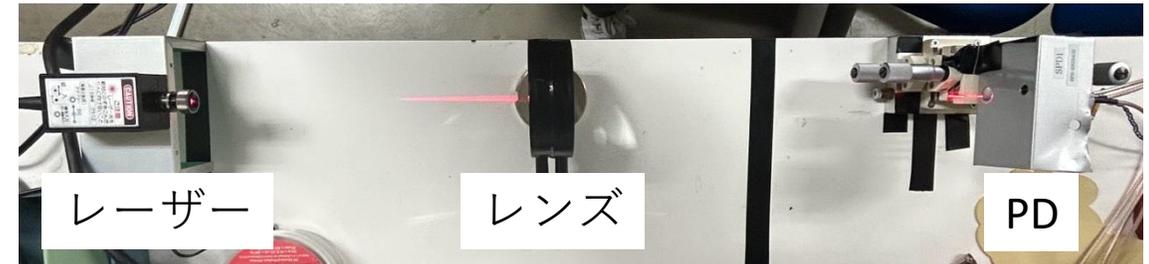
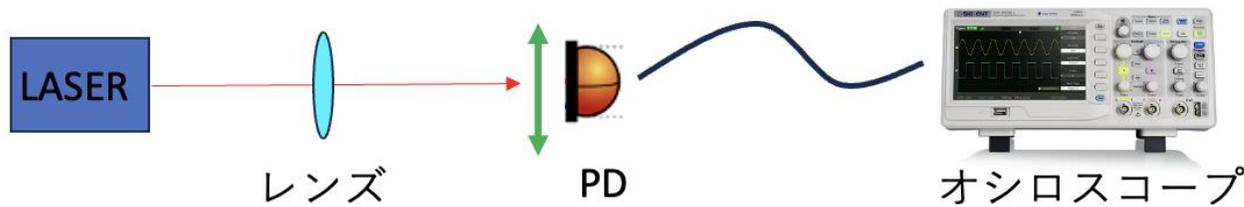
ラインレーザーによるSPDの位置検出感度測定



内田洋行：DL-8SA

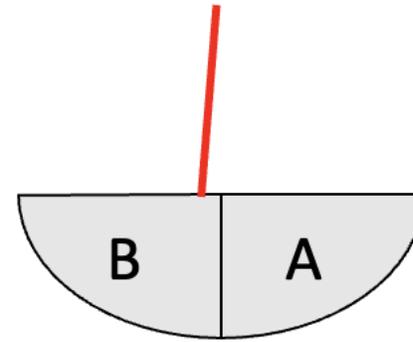
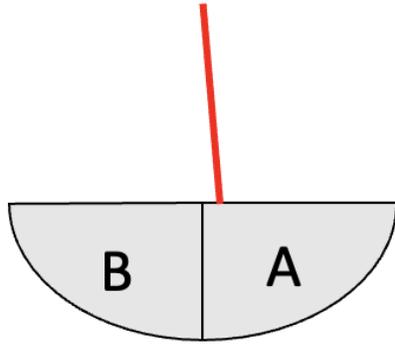


測定と評価方法



1. SPDの位置を変化させながら、各PDの出力(ch1,ch2)と差動チャンネル(ch3=(ch1-ch2) × 100)の電圧を測定
2. $ch3/(ch1+ch2)$ をプロット(全光量でnormalize)
3. 線形区間の傾き=感度S × 100

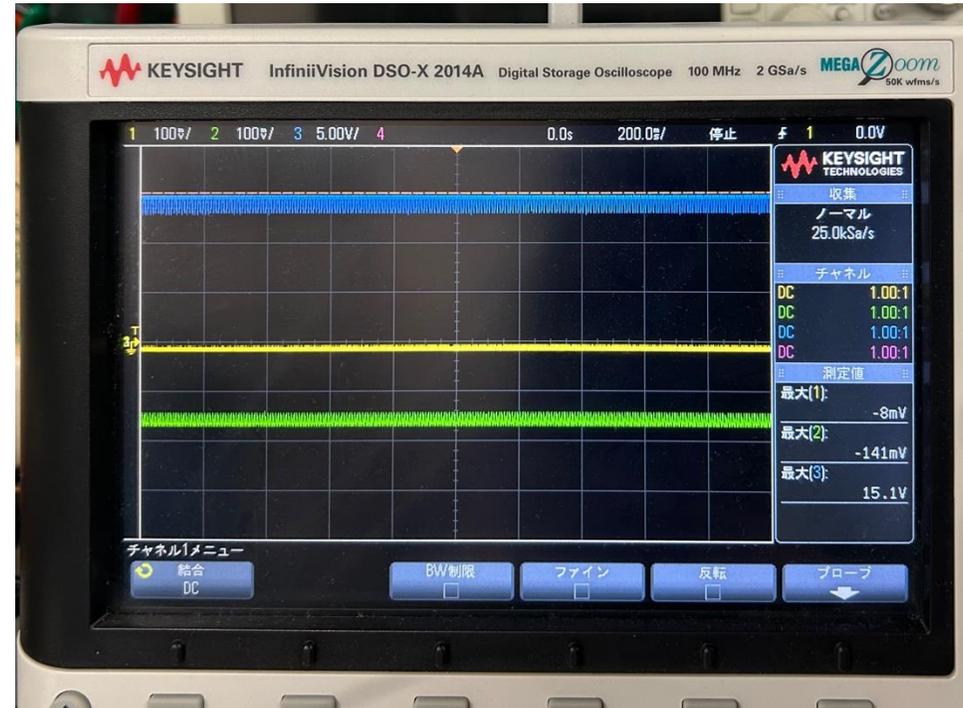
SPDに光を照射しオシロスコープで見てみた



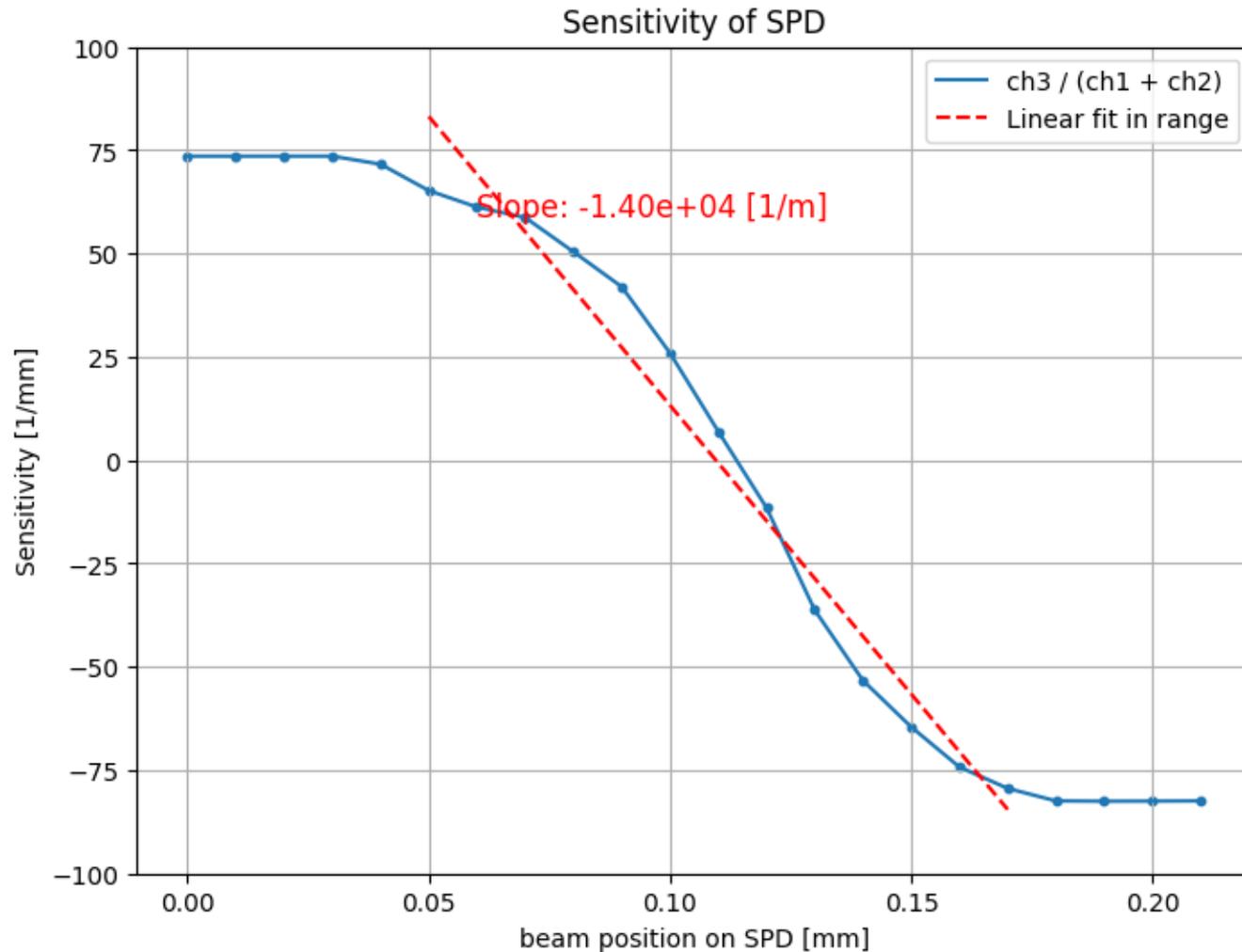
B
A
差分



差分
A
B



結果：高感度なSPDであることが分かった



- $\Delta x = 0.1\text{mm} = 1 \times 10^{-4} \text{ m}$
のとき、
 $\Rightarrow \Delta\text{Signal} = 1.4 \times 10^4 \times 10^{-4} = 1.4$

0.1 mmの微小変位でも、1.4の信号変化を与える

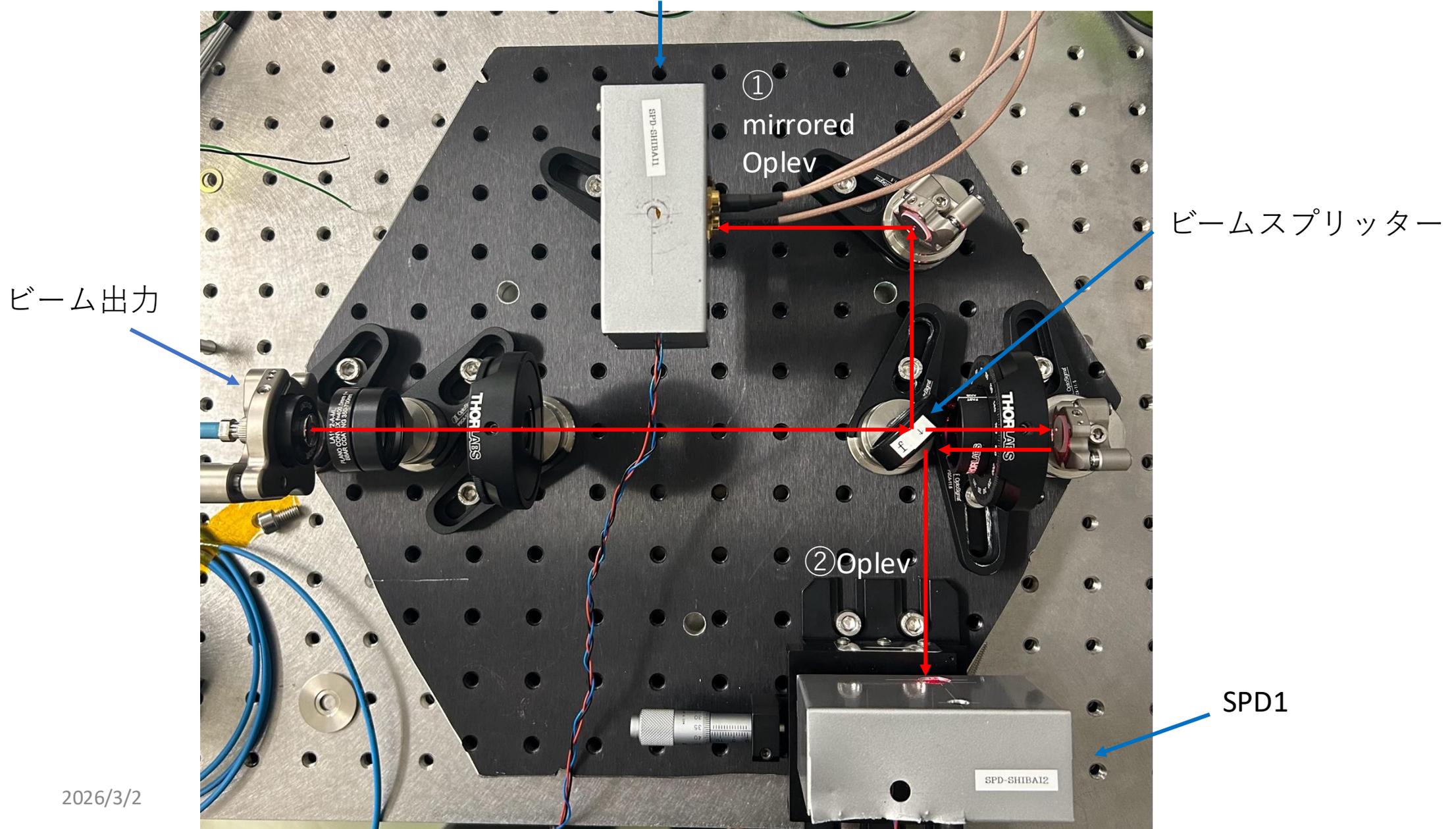
※検出可能な最小変位の評価には、出力信号の雑音レベルとの比較が必要

理由：ラインレーザーはライン上（一次元）にフォトンが集中しているため、SPDでの位置変化に対して感度が高い

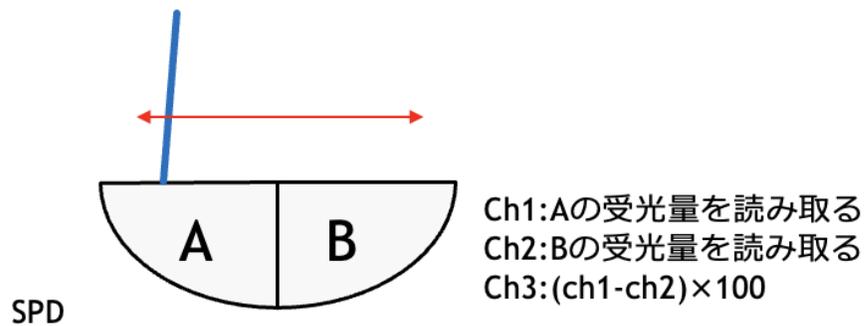
目次

- 概要・目的
- 研究背景・本研究の対象
- Split photo detectorの雑音評価・ラインレーザーを用いたキャリブレーション結果
- **SPD**を用いた鏡像光てこ法の試験結果
- まとめ

Mirrored Oplev実装

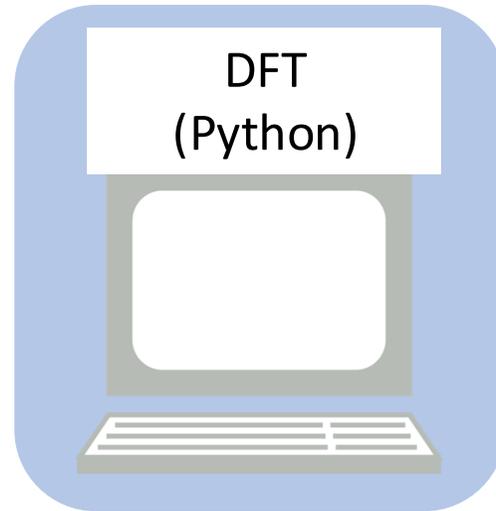


データ評価方法



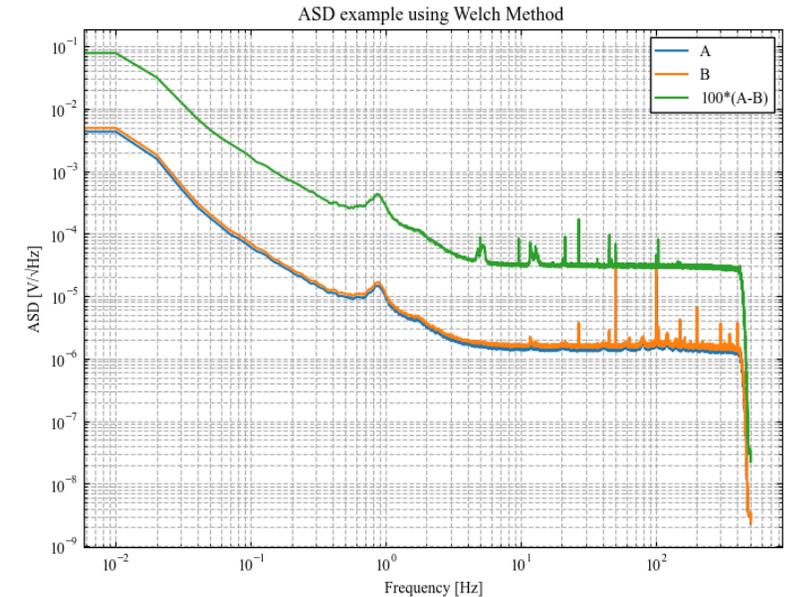
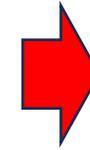
電圧値として計測(データロガー)

Time series



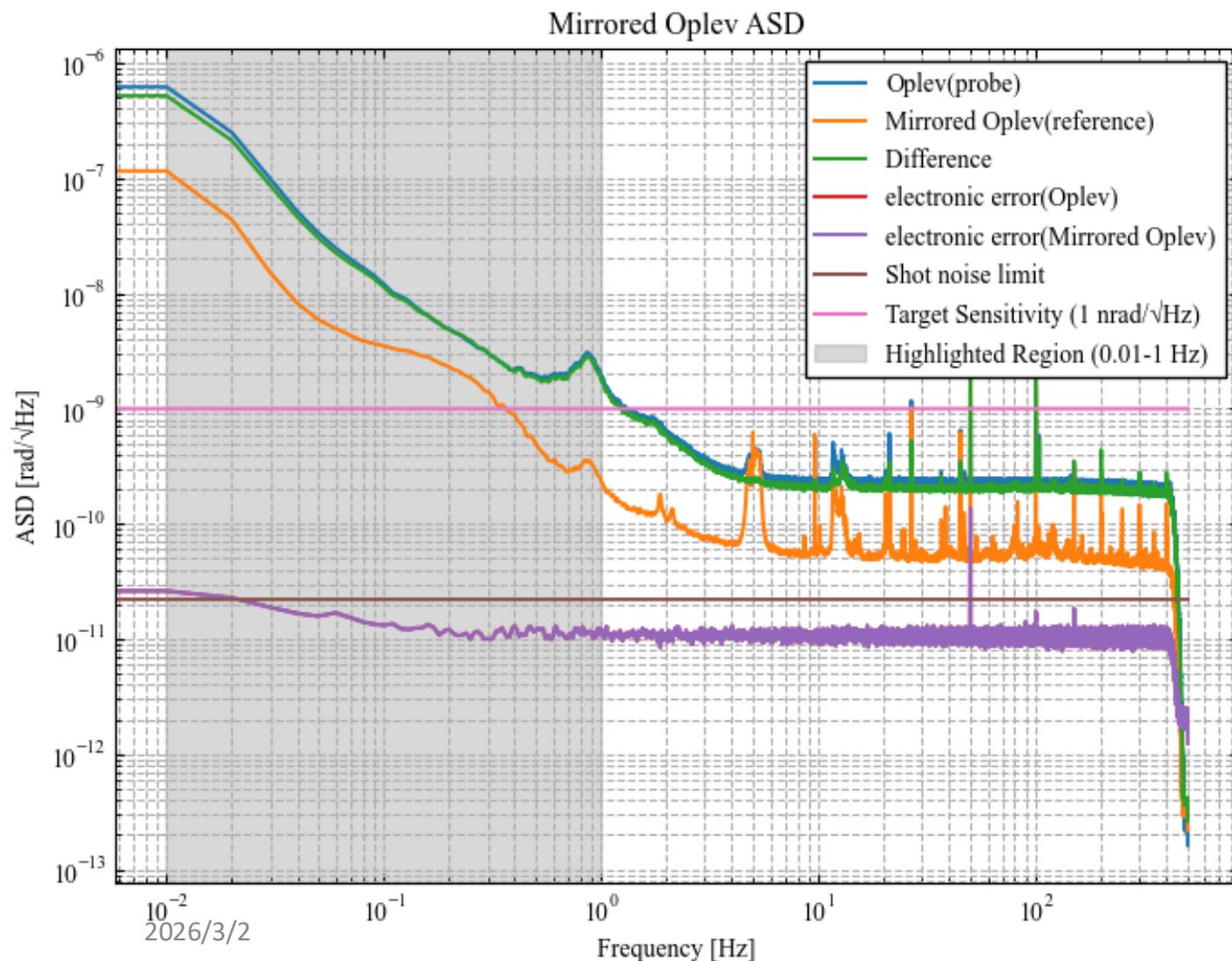
V(time)→PSD(freq)→ASD

- nperseg : 100000
- Welch overlap:5000



Frequency series

結果：目標感度(10^{-9} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$)に届かず ジッターノイズはわずかに減少



← 目標感度

縦軸[rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$]
横軸[Hz]

青：Oplev信号(見たい信号)
橙：Mirrored Oplev信号(リファレンス信号)
緑：Oplev信号 - Mirrored Oplev信号

目次

- 概要・目的
- 研究背景・本研究の対象
- Split photo detectorの雑音評価・ラインレーザーを用いたキャリブレーション結果
- SPDを用いた鏡像光てこ法の試験結果
- まとめ

SPD：理論雑音値に到達・ラインレーザーにも適応可

Mirrored Oplev：角度読み出しの目標分解能に未到

SPD：

- 差動チャンネルの雑音は目標感度を制限しない
- ラインレーザーにも適応できることが分かった

Mirrored Oplev：

- 試作を構築した
- 観測対象バンドでは要求感度に未到達
→ 主因は空気揺らぎの影響と考えられる
- 今後：
 - 測定系全体を真空槽に入れて空気流による雑音の低減を狙う

バックアップ

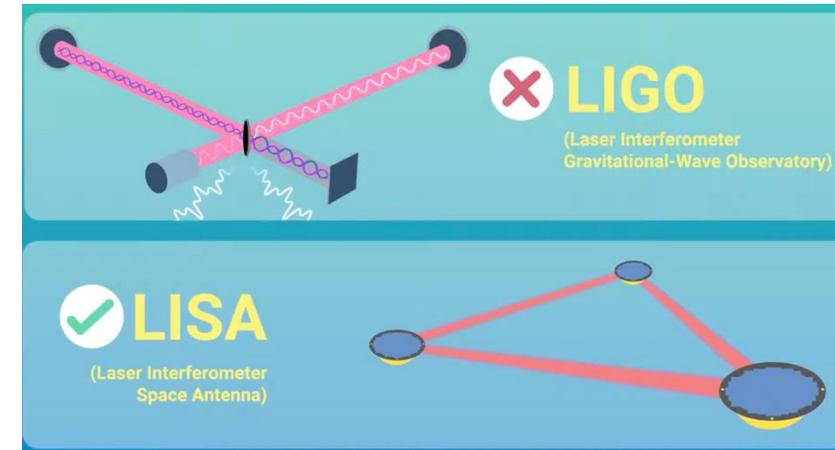
低周波重力波の観測で期待される科学成果

地上観測の成果（10–1000 Hz）

- Advanced LIGO などの地上レーザー干渉計により**90例以上**の重力波イベントを検出
恒星質量ブラックホール連星、中性子星連星

宇宙観測で期待される成果

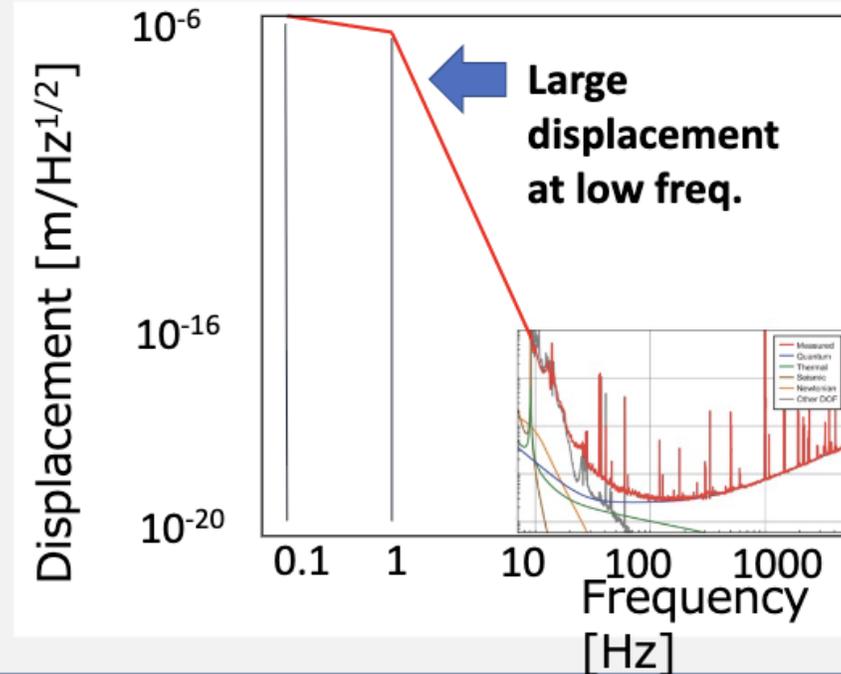
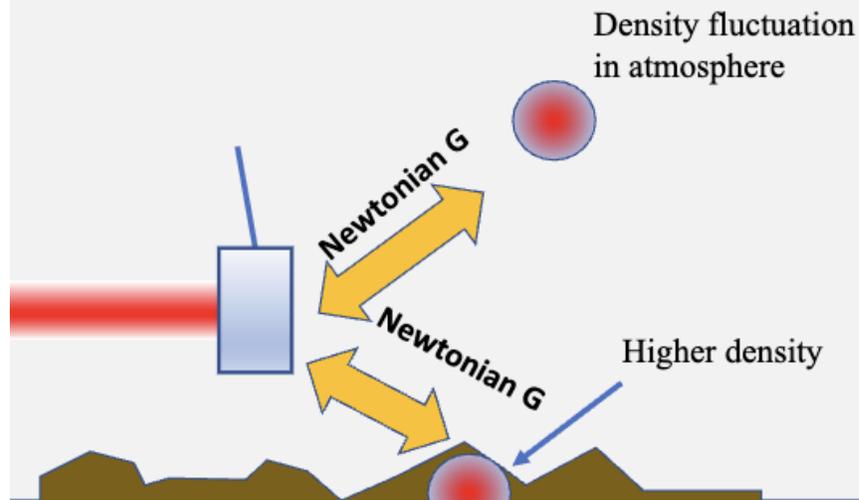
- 超大質量ブラックホール（銀河中心BH進化の解明）
- 中間質量ブラックホールの観測
- 中性子星連星を**合体の数ヶ月前から発見**
- 原始重力波の直接検出（インフレーション理論の検証）



地上検出で問題となる主なノイズ源

地上試験ではテストマスを吊るすが...

- ▶ Seismic noises below 10 Hz
- ▶ Gravity gradient noise can not easily be reduced



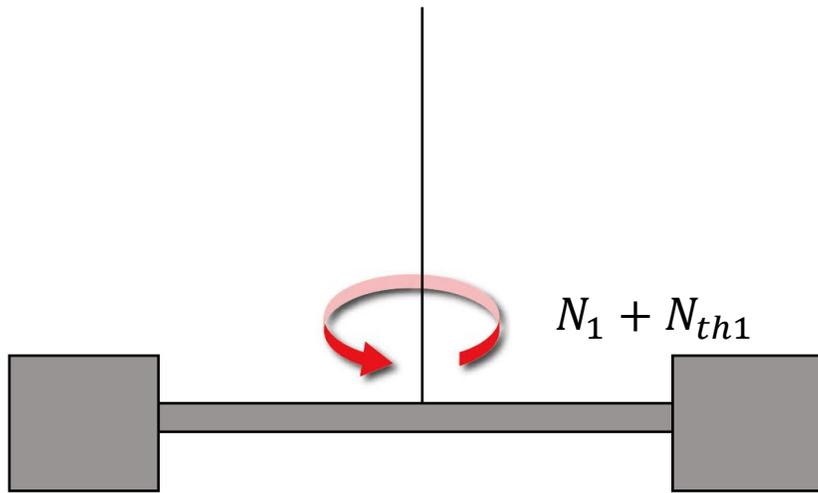
地面が揺れる → 地面の密度が変わる → 質量分布が変わる

→ 検出器の鏡にかかる重力が変わる (=重力勾配)。

→ 鏡が重力で引っ張られる。

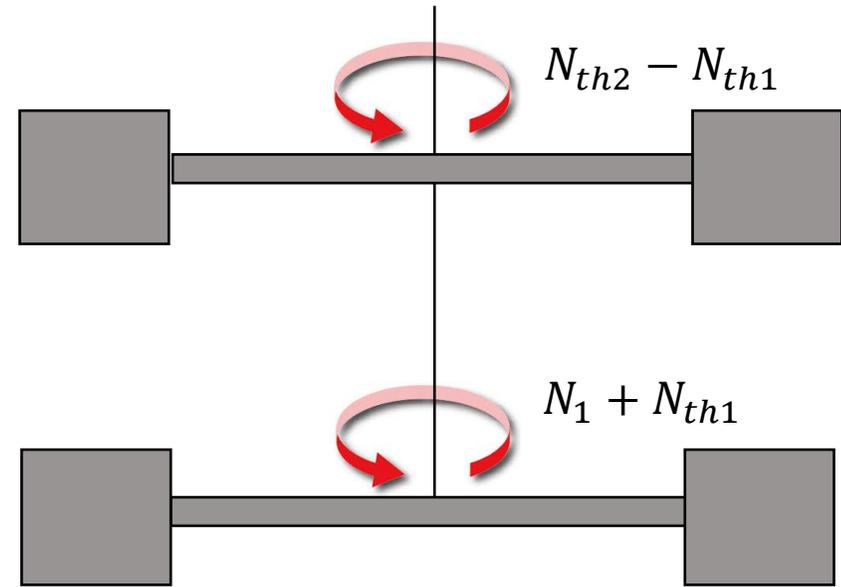
相関処理を用いて熱雑音を低減

従来の微小外力測定 (LISA 地上試験)



微小外力 N_1 に対してワイヤーの熱雑音 N_{th1} が雑音を制限

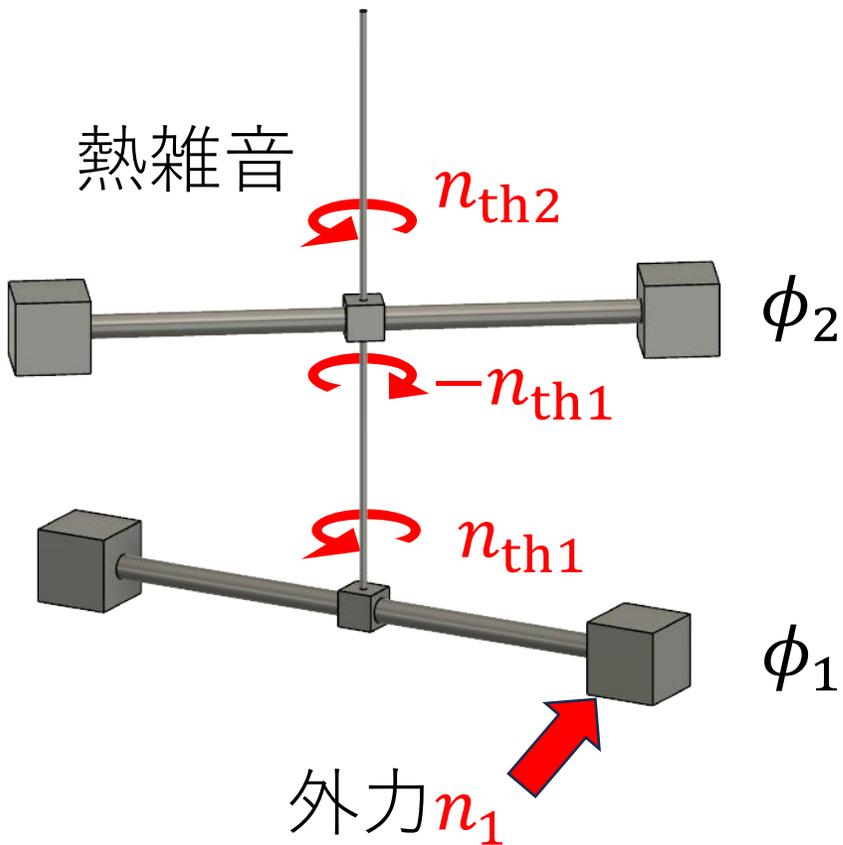
相関外力測定



ワイヤーからの熱雑音 N_{th1} が上段と下段に逆相で働く
2段ねじれ振り子の上下段の相関を取って熱雑音を除去

相関処理による熱雑音の低減

考える3つの力成分



運動方程式：

$$\begin{pmatrix} \tilde{\Phi}_1 \\ \tilde{\Phi}_2 \end{pmatrix} = \hat{M} \begin{pmatrix} \tilde{N}_1 + \tilde{N}_{th1} \\ \tilde{N}_{th2} - \tilde{N}_{th1} \end{pmatrix}$$

ねじり振り子の応答

⇒ 3変数に対して観測量2つ

⇒ \tilde{N}_1 について解けない

$$\begin{pmatrix} \tilde{N}_1 + \tilde{N}_{th1} \\ \tilde{N}_1 + \tilde{N}_{th2} \end{pmatrix}$$

のデータを作ると、相関をとることにより
無相関な成分を除去、外力のスペクトルを
抽出可能

※位相情報は失う

相関処理の表式

知りたい変数

$$\hat{M} \begin{pmatrix} \tilde{N}_1 + \tilde{N}_{th1} \\ \tilde{N}_{th2} - \tilde{N}_{th1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{\Phi}_1 \\ \tilde{\Phi}_2 \end{pmatrix}$$

ねじり振り子の応答

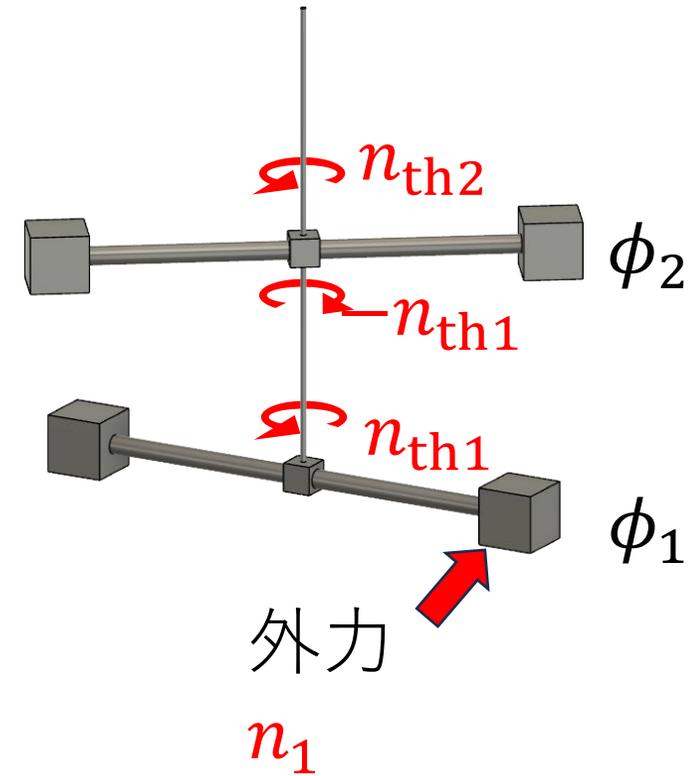
線形操作

$$\begin{pmatrix} \tilde{N}_1 + \tilde{N}_{th1} \\ \tilde{N}_1 + \tilde{N}_{th2} \end{pmatrix} = \hat{A} \begin{pmatrix} \tilde{\Phi}_1 \\ \tilde{\Phi}_2 \end{pmatrix}$$

相互相関
⇒無相関な成分を除去

$$S_{11}^N = \alpha_{11} S_{11}^\Phi + \alpha_{12} S_{12}^\Phi + \alpha_{21} S_{21}^\Phi + \alpha_{22} S_{22}^\Phi \quad (S_{ij}^\Phi \equiv \langle \tilde{\phi}_i^* \tilde{\phi}_j \rangle)$$

外力のPSDは角度信号のPSD,CSDを用いて推定できる



スペクトル解析：PSD・ASD／Welch法／コヒーレンス

• PSD と ASD

- PSD (Power Spectral Density : 信号のパワーの周波数分布) : (信号単位)²/Hz

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi i f t} dt$$

$$\rightarrow PSD(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X(f)|^2$$

- ASD (Amplitude Spectral Density) : (信号単位)/√Hz

$$ASD(f) = \sqrt{PSD(f)}$$

• Welch法

- データを **重ね合わせながら分割**
- 各区間でFFT → PSD計算
- **平均して分散を低減**
- 分解能 ↔ 分散のトレードオフあり (区間長が長い = 分解能↑、平均回数↓)

• コヒーレンス (Coherence)

- 2信号間の周波数ごとの相関度

$$\gamma^2(f) = \frac{|S_{12}(f)|^2}{S_{11}(f)S_{22}(f)}$$

※ クロススペクトル密度 : $S_{12}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} X(f)Y(f)^*$

- 0~1の値
 - 1に近い → 同じ起源の信号成分
 - 0に近い → 無相関

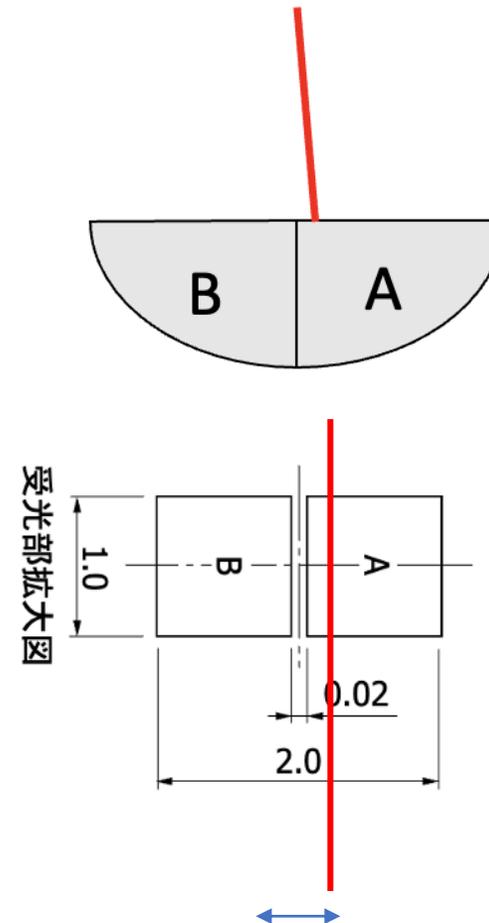
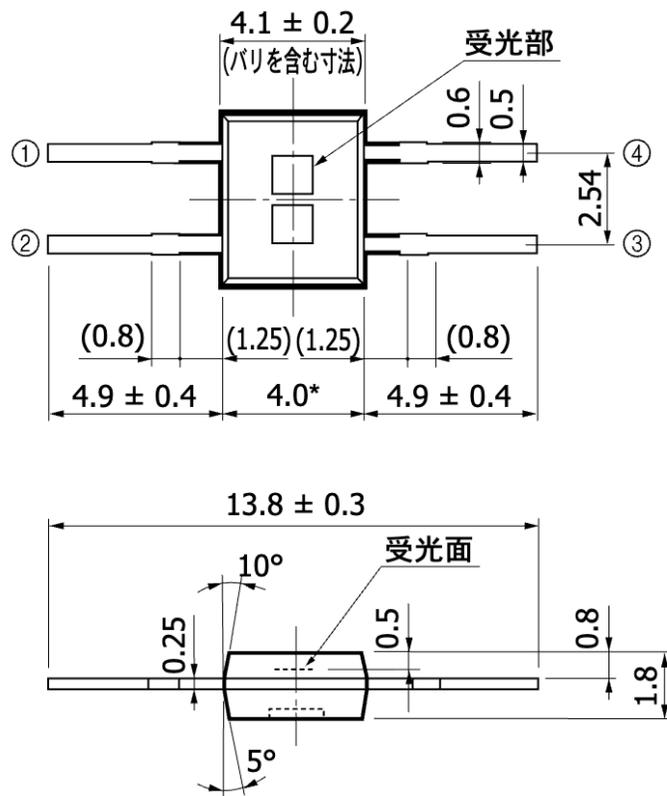
ショットノイズリミット (shot noise limit)

- 光は波であると同時に **粒 (フォトン)**
フォトンの到着は完全に一定ではなく、**統計的なゆらぎ**
(**ポアソン統計**) を持つ
- 平均で 1 秒に N 個の光子が来る
- でも実際には
 \sqrt{N} くらいのゆらぎが必ず乗る
- このゆらぎが **ショットノイズ**。

スプリットフォトダイオード : S4204



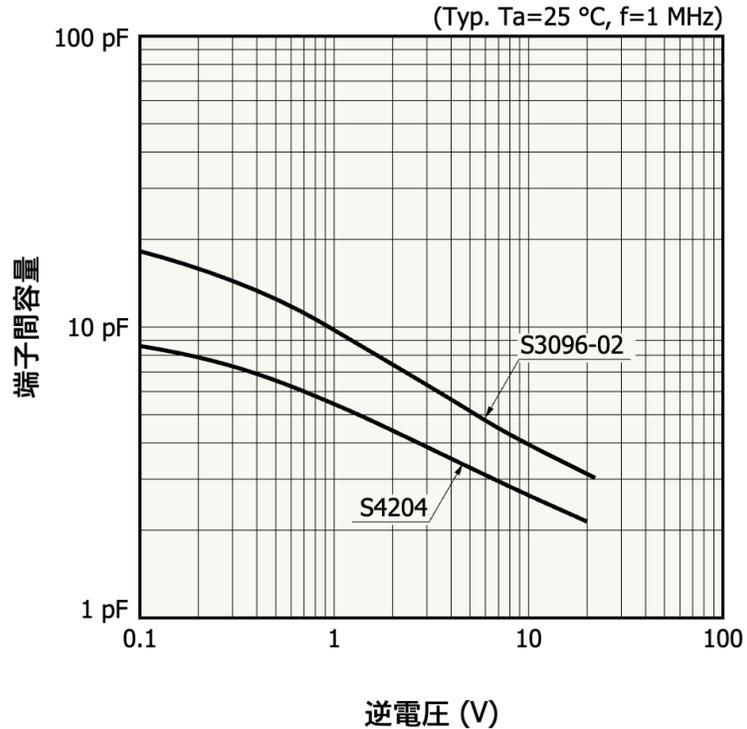
HAMAMATSU : S4204



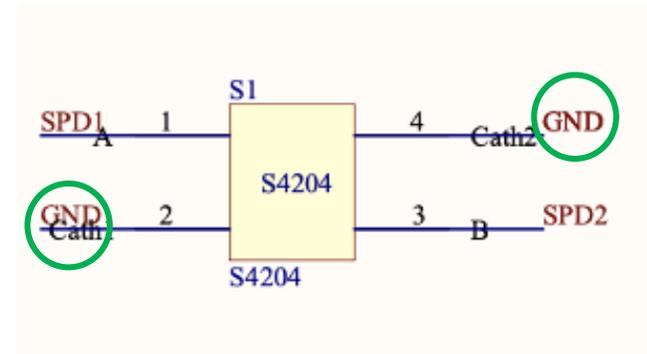
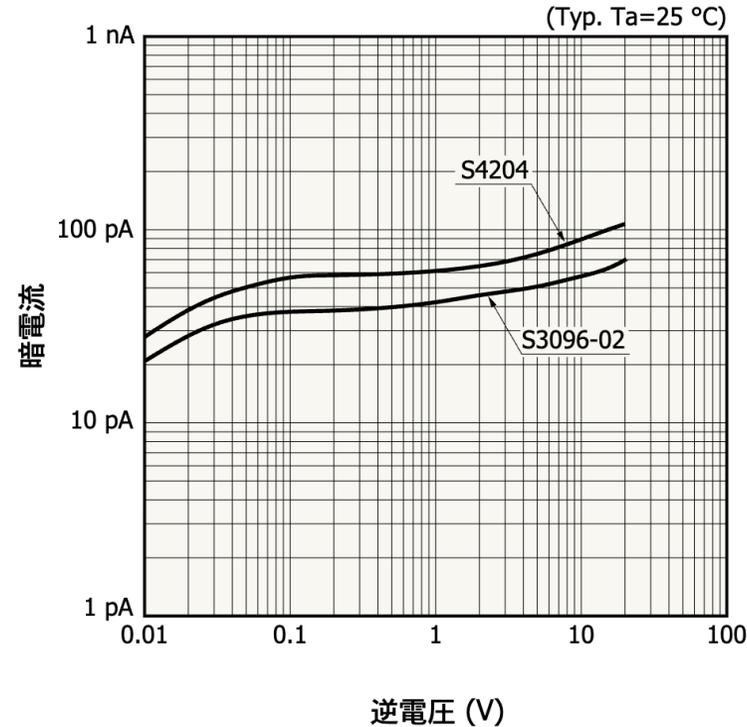
S4204：ノイズ減少を優先し逆電圧はかけない



端子間容量 - 逆電圧



暗電流 - 逆電圧



- 端子間容量と暗電流はトレードオフ
- 鏡像光てこはショットノイズを下げる方が優先

→逆電圧はなし

$$W \propto \sqrt{V_{bias}}$$

- 空乏層幅 W が広がる
- 応答速度が上がる
- 端子間容量が減る

$$C \propto \frac{1}{W}$$

暗電流はショットノイズを生む：

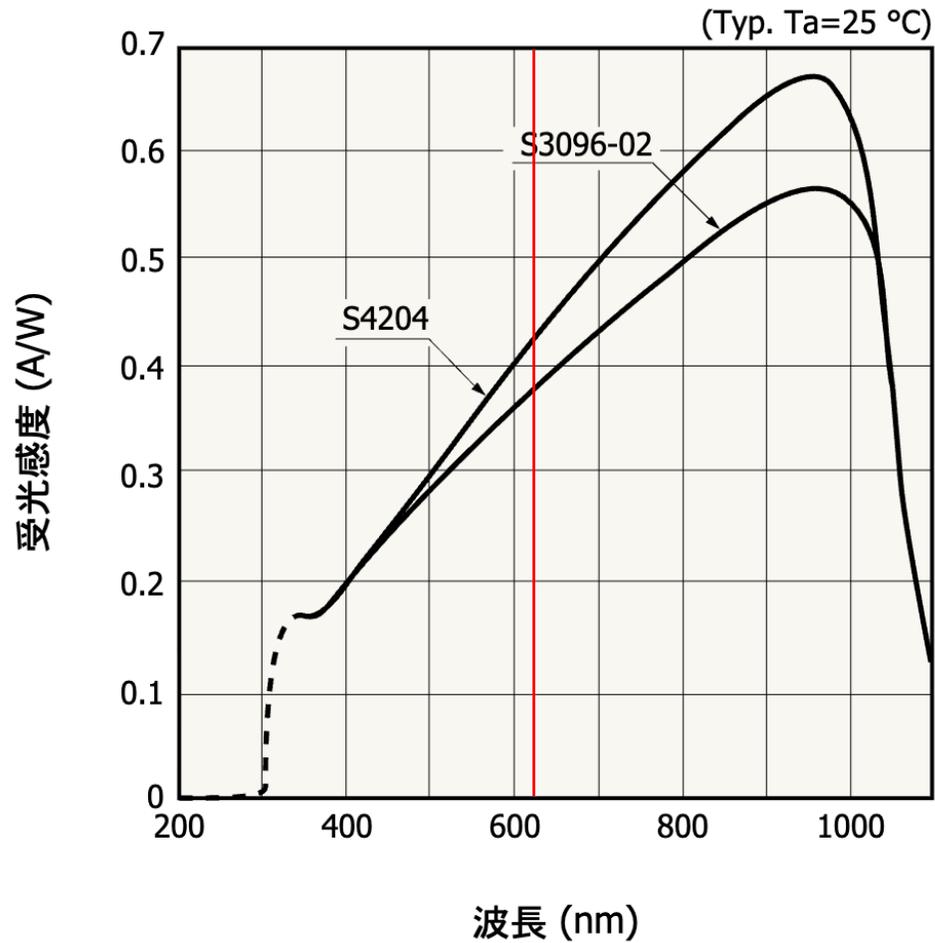
$$i_n = \sqrt{2qI_{dark}}$$

暗電流が増えると：
電流ノイズ増大
ASDフロアが上がる

※ショットノイズ：光(フォトン)の統計的揺らぎ

SPDデータシート (浜松ホトニクスS4204)

分光感度特性



25°Cでの波長366nmの時、受光感度は約0.42[A/W]

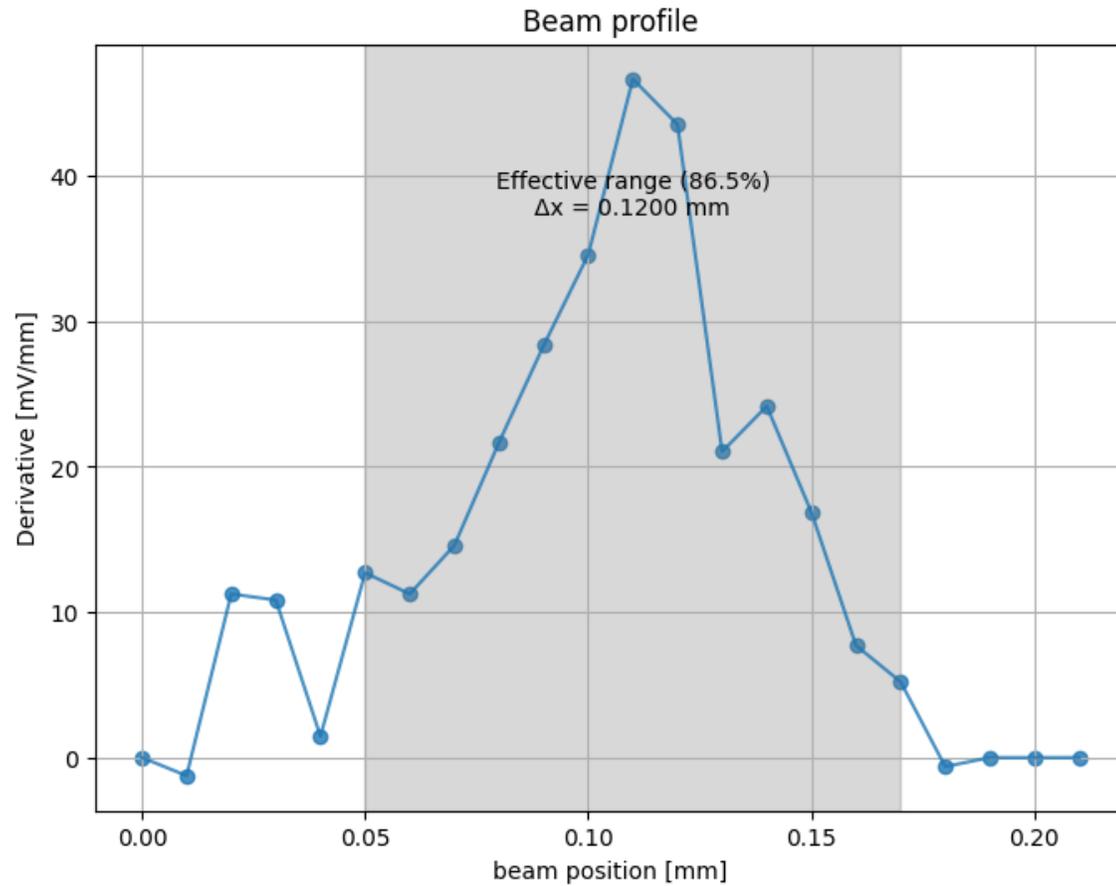
使用したレーザー



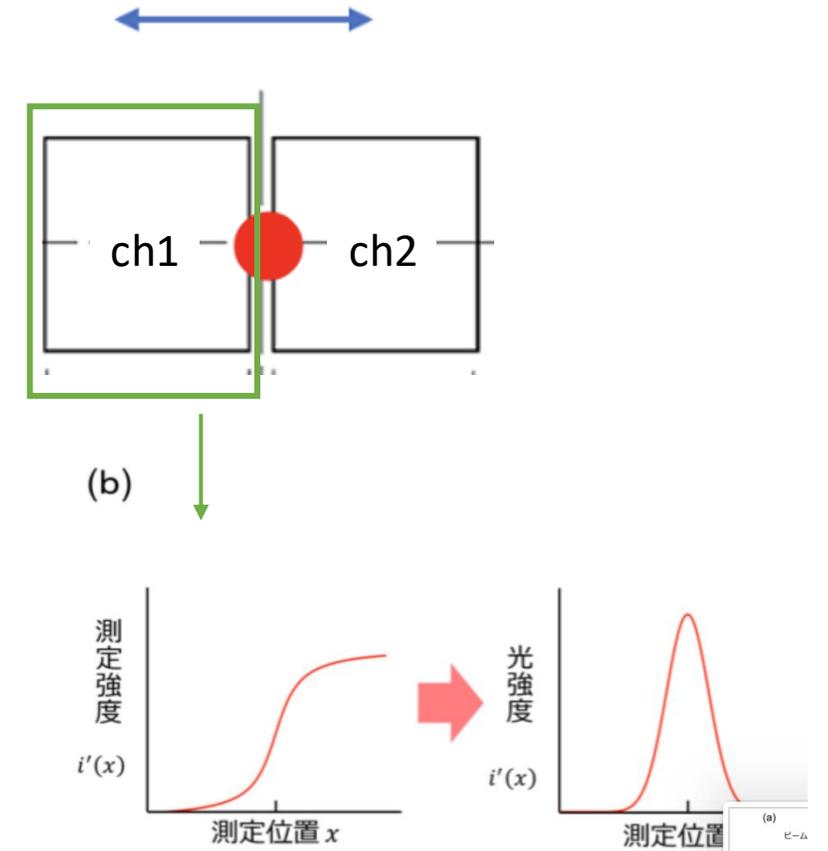
連続レーザー
可視光
波長：約635nm

内田洋行：DL-8SA

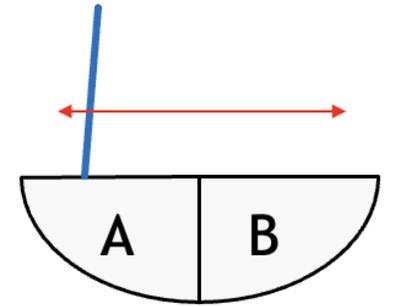
ラインビームの有効径の算出



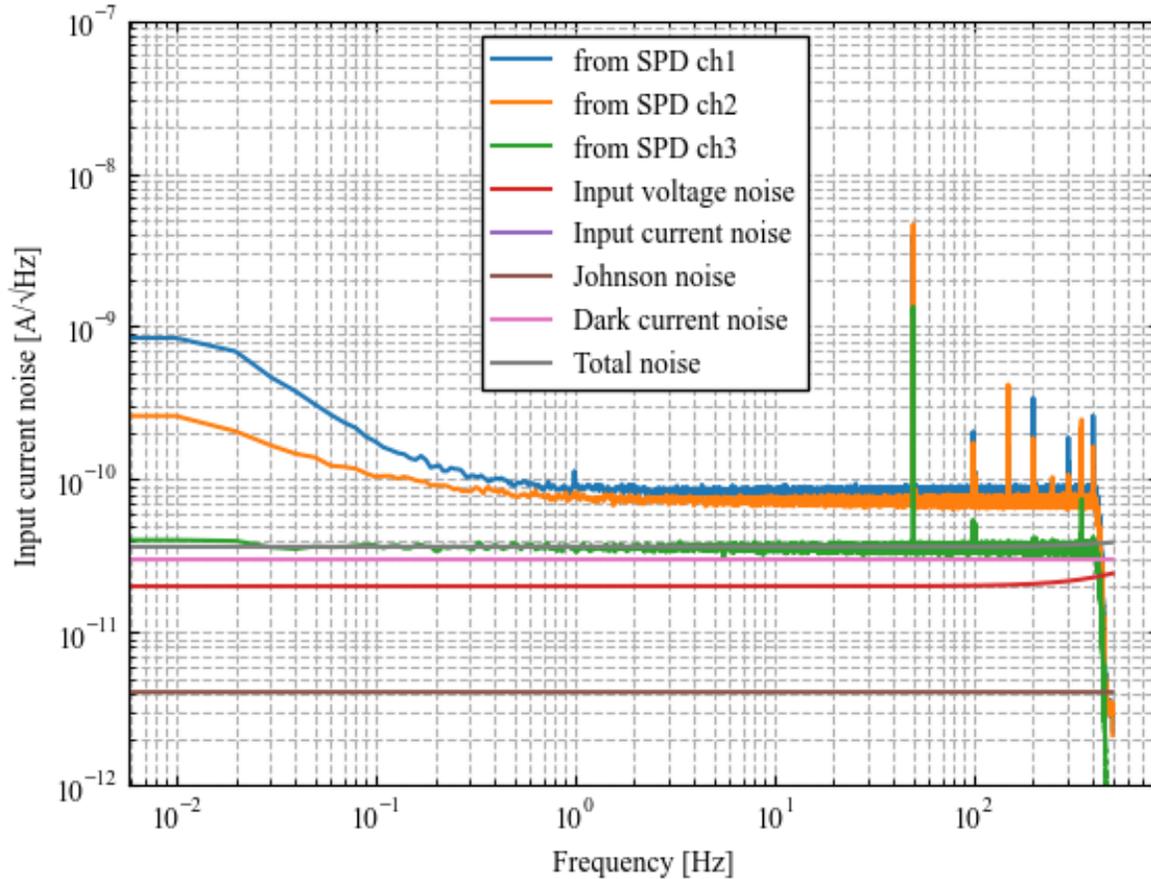
青：ch1の測定結果で算出



結果：差動チャンネルは理論値に到達



Noise estimate



① Input voltage noise

$$i_p(\omega) = \frac{1 + j\omega C_T R_{fb}}{R_{fb}} e_n$$

② Input current noise

i_n (スペック値)

③ Johnson noise

$$i_j = \sqrt{\frac{4k_B T}{R_{fb}}}$$

④ Dark current noise

i_{dark} (スペック値)

⑤ Total noise

$$i_{\text{tot}}(\omega) = \sqrt{i_p^2(\omega) + i_n^2 + i_j^2 + i_{\text{dark}}^2}$$

Ch1, Ch2 → ゲイン1倍：ロガーの分解能によりリミット

2026/8/2 Ch3 → ゲイン100倍：total noise(理論値)に到達

TIAの電流雑音の理論モデル

①入力電圧雑音の電流換算

オペアンプ固有の電圧雑音 e_n はフォトダイオード容量 C_d とフィードバック抵抗 R_{fb} を介して入力換算電流雑音へ変換される。

$$i_p(\omega) = \frac{1 + j\omega C_T R_{fb}}{R_{fb}} e_n$$

$C_T = C_d + \text{その他容量}$

②オペアンプ入力電流雑音

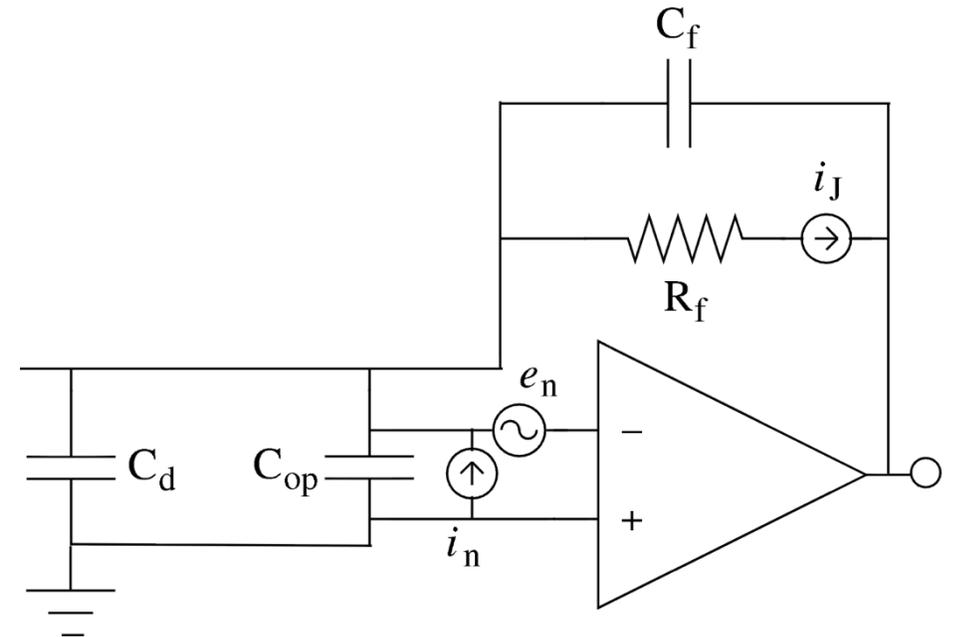
i_n : 回路や素子がもともと持っている電流ゆらぎ

③フィードバック抵抗の熱雑音 (ジョンソン雑音)

$$i_j = \sqrt{\frac{4k_B T}{R_{fb}}}$$

④フォトダイオード暗電流ノイズ

i_{dark} : 暗電流によるショットノイズ



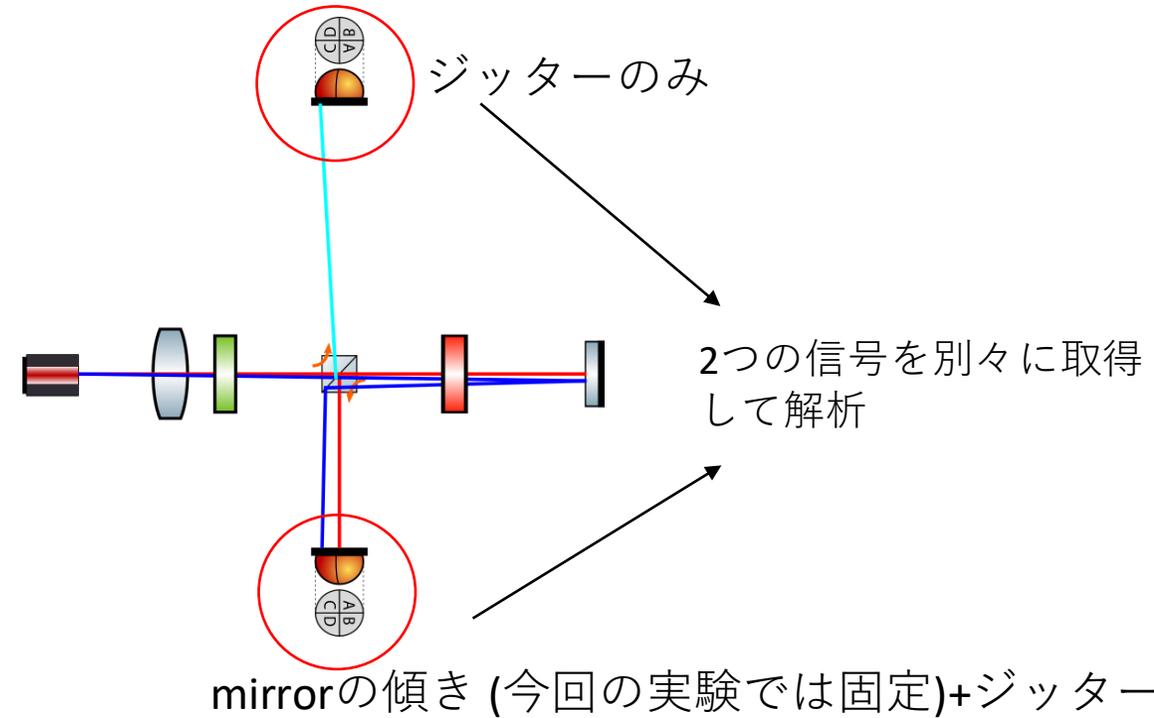
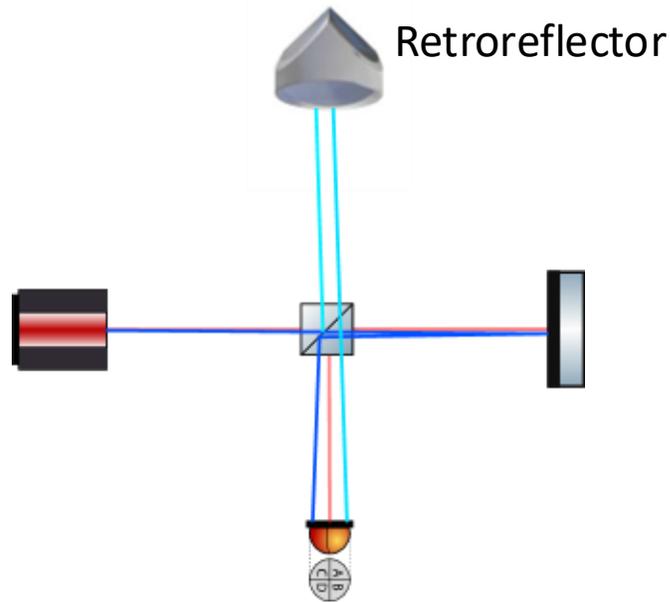
総入力換算電流雑音

$$i_{\text{tot}}(\omega) = \sqrt{i_p^2(\omega) + i_n^2 + i_j^2 + i_{\text{dark}}^2}$$

設計上のアップデート

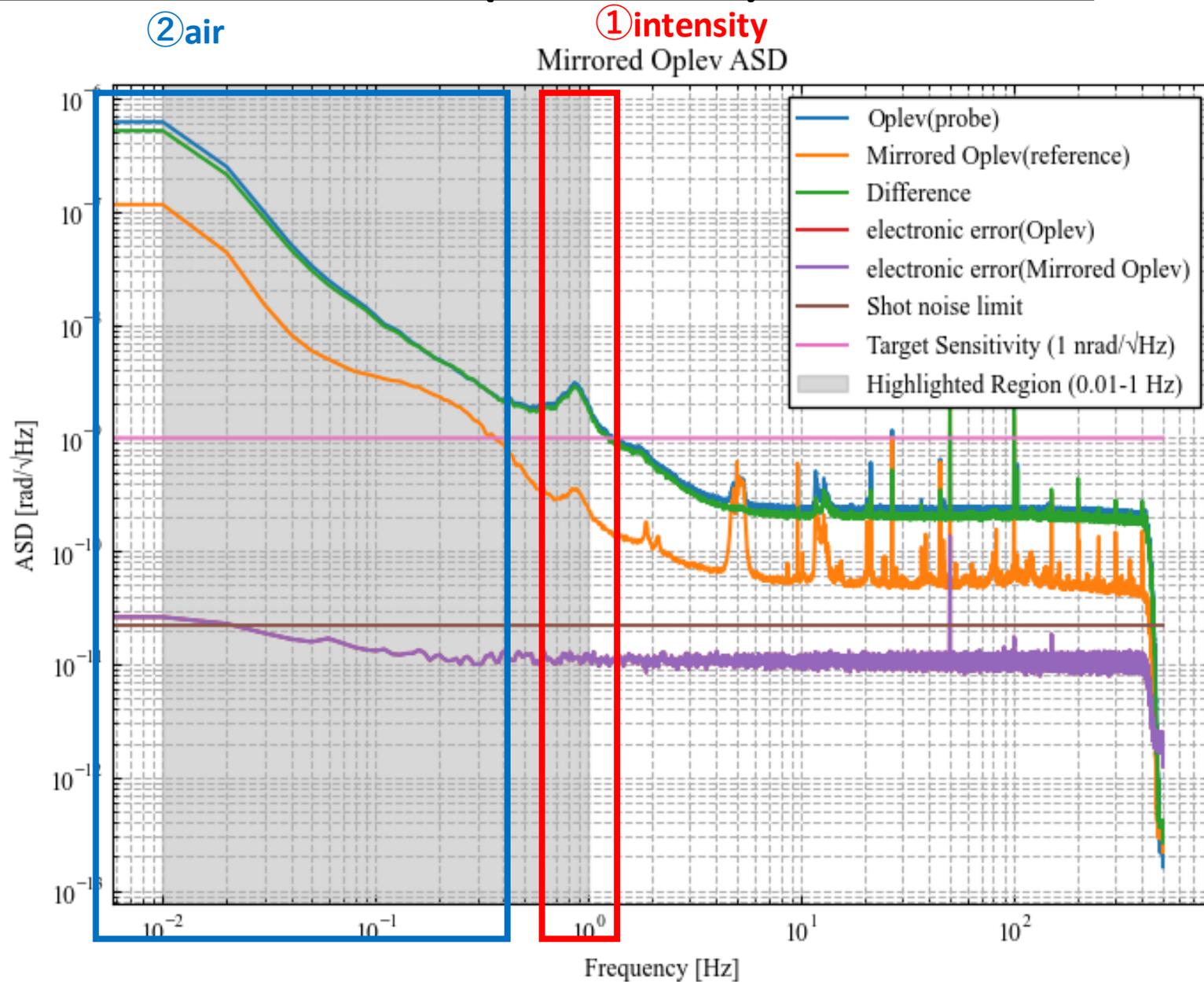
- 旧デザイン
 - レトロリフレクターでの偏光の変化
 - SPDを固定して使用する

- 新規デザイン

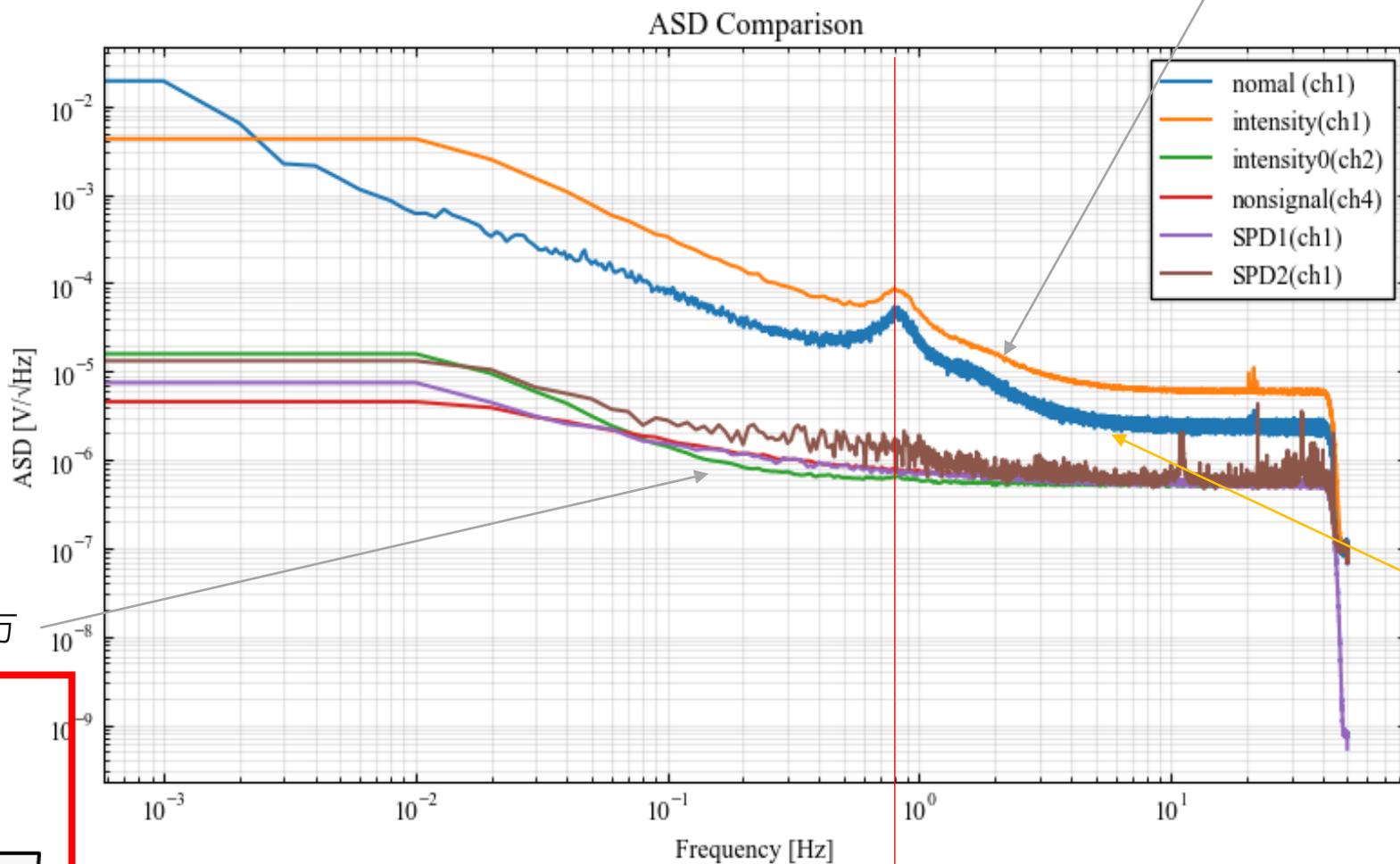


- レトロリフレクターを使用しない。
- SPDを移動できるため、ステージでアライメントを調節可能

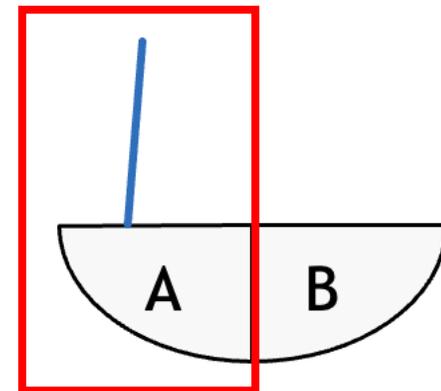
改善が見られたノイズ(①・②)について



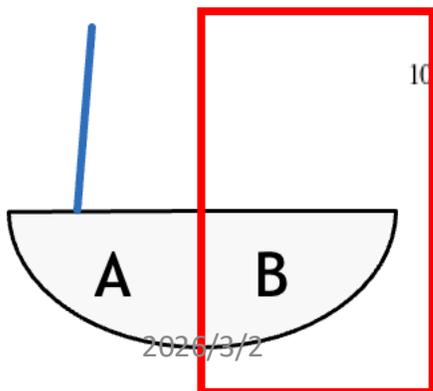
①0.8Hz→強度ゆらぎ



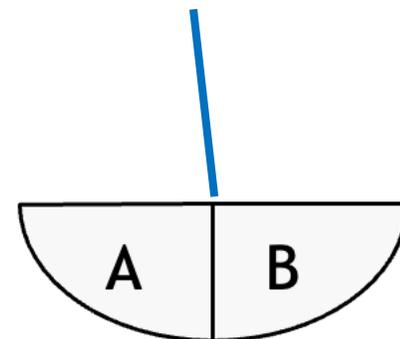
SPD片側のみに
レーザーを当てた



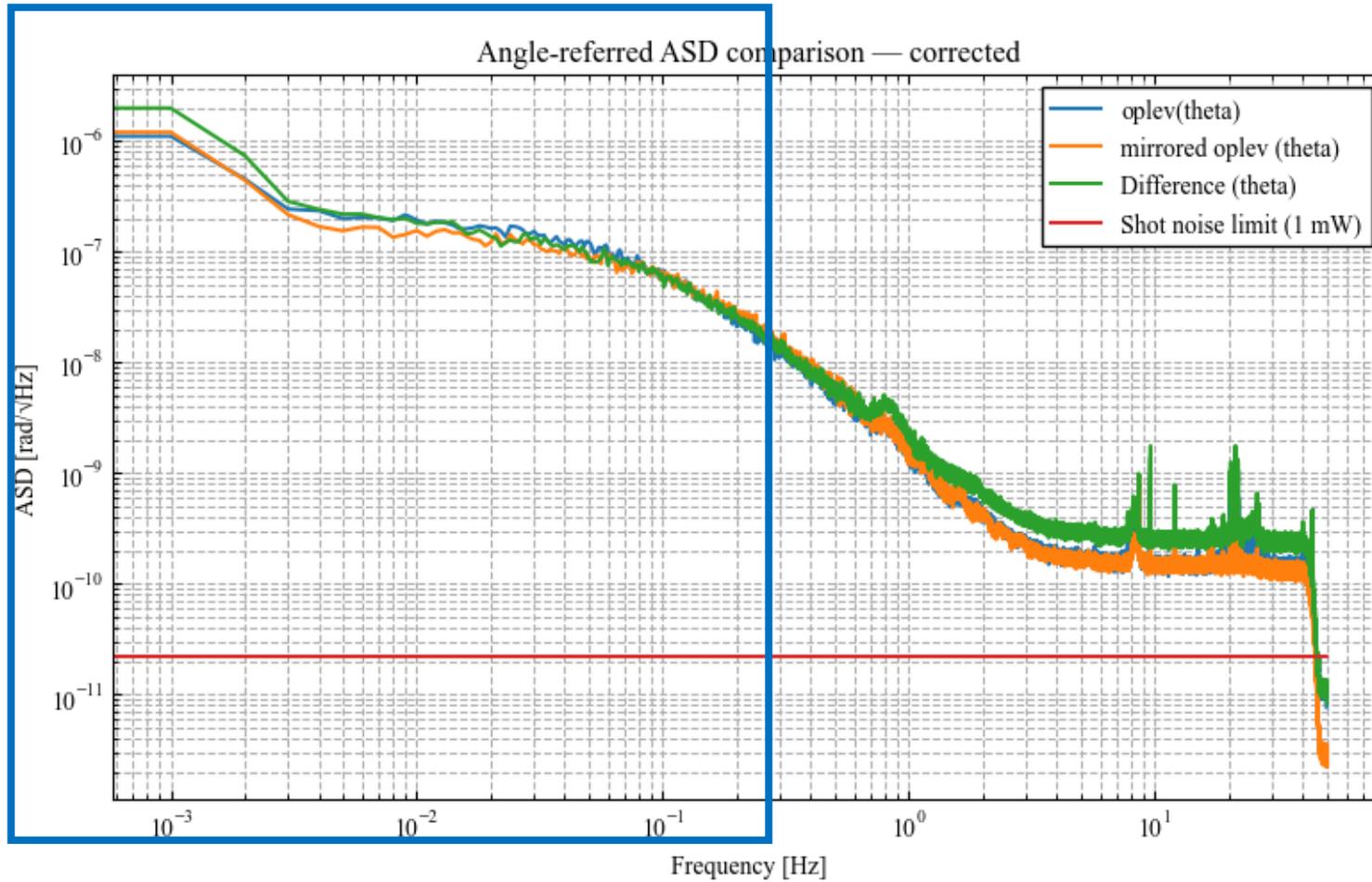
当たっていない方



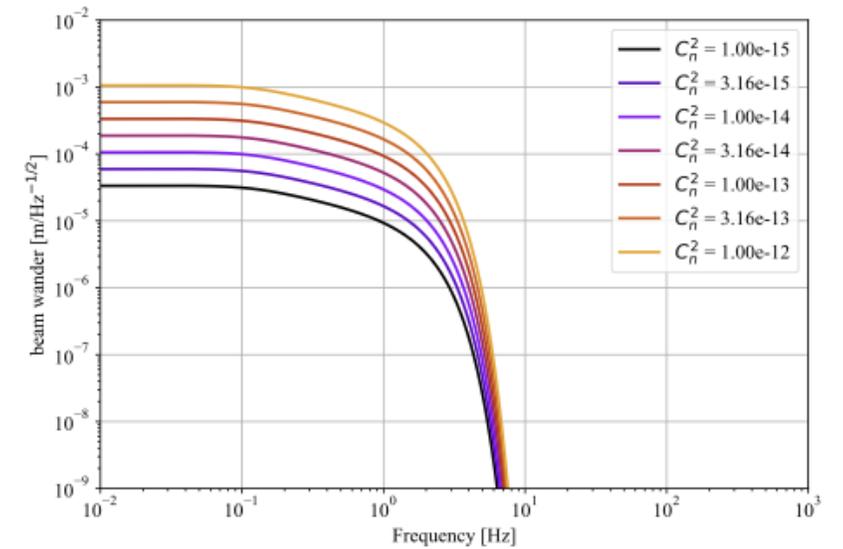
SPDの左右に満遍なく
レーザーを当てた



②低周波→大気揺らぎ



In air



Beam wander
(kiwamu izumi report2024)

②箱に入れてみた...



② In air vs In-box

低周波側が減少

