

J-PARC muon g-2/EDM 実験 検出器アライメントモニターの開発

2018/03/24

日本物理学会第73回年次大会
@東京理科大学 野田キャンパス
24pK206-6

安田浩昌, 伊藤拓実^A, 川越清以^A, 久米達哉^B, 齊藤直人^C, 佐藤優太郎^C,
末原大幹^A, 高増潔^D, 堤裕樹^A, 東城順治^A, 西村昇一郎, 三部勉^C, 山中隆志^E,
吉岡瑞樹^E, 他 J-PARC muon g-2/EDM Collaboration
東大理, 九大理^A, KEK機械工セ^B, KEK素核研^C, 東大工^D, 九大RCAPPE^E

目次

- J-PARC における muon g-2/EDM 測定実験
- 陽電子飛跡検出器とEDM測定の系統誤差
- 検出器アライメントモニターの仕様と原理
- 繰り返し周波数の校正測定
- 長さ測定の不確かさとEDM測定への寄与の評価
- 今後の展望と結論

J-PARC muon g-2/EDM 実験 3

■ 極冷ミューオンビームを用いて先行実験の主要な系統誤差を排除

GOAL @ J-PARC E34

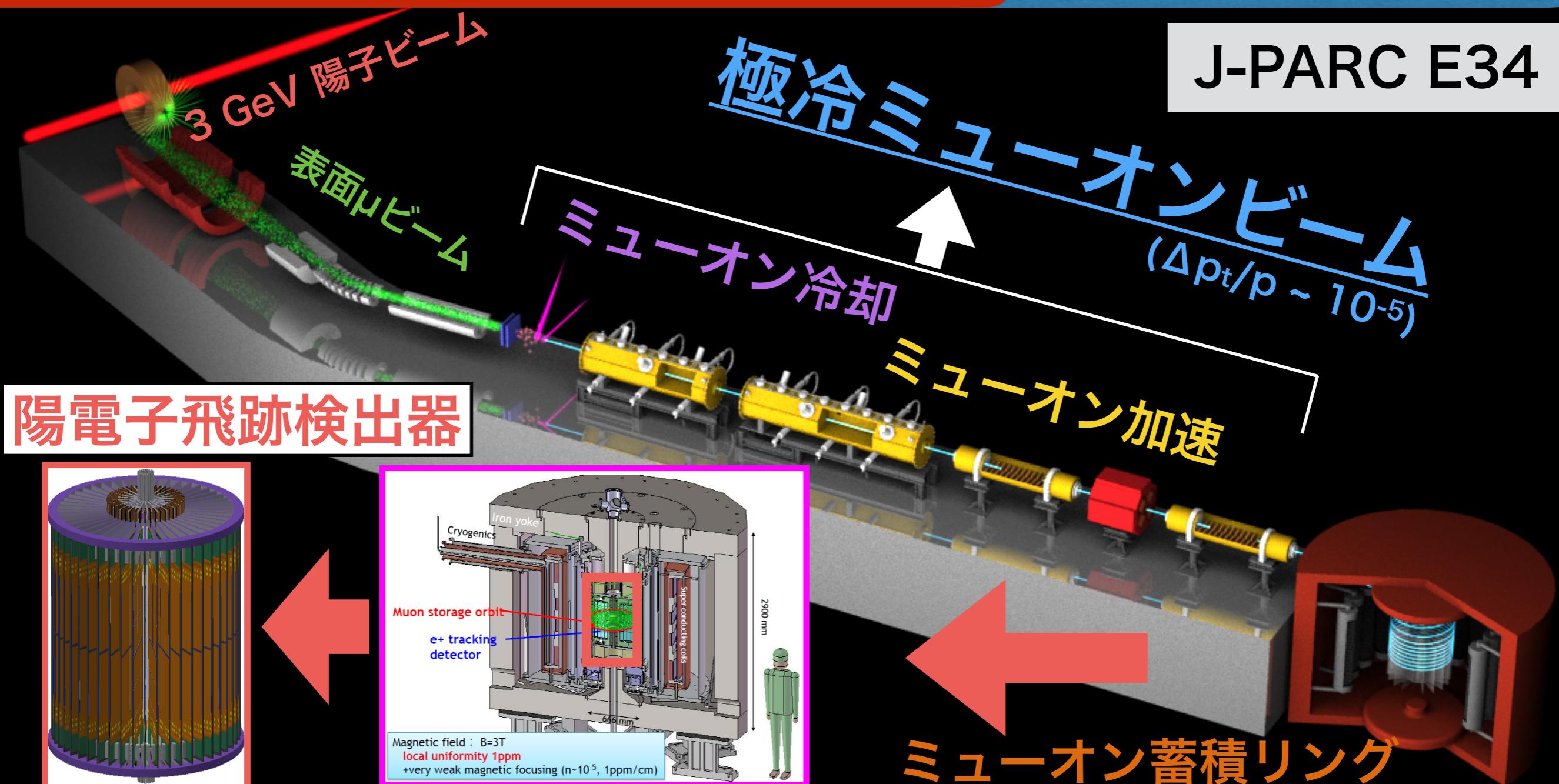
異常磁気モーメント(g-2) : 精度 0.1 ppm

電気双極子モーメント(EDM) : 感度 $10^{-21} e \cdot \text{cm}$

Physics

SMの検証(3.7σ @BNL)

CPの破れの探索



J-PARC muon g-2/EDM 実験 4

■ 極冷ミューオンビームを用いて先行実験の主要な系統誤差を排除

GOAL @ J-PARC E34

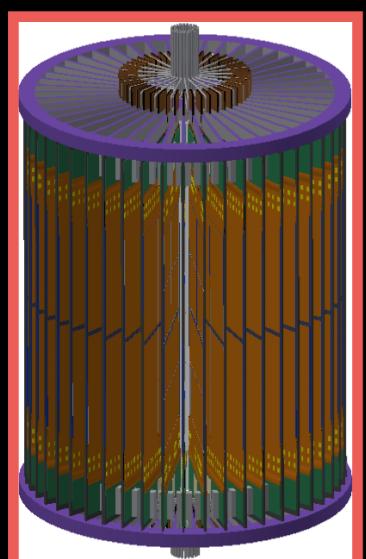
異常磁気モーメント(g-2) : 精度 0.1 ppm

Physics

SMの検証(3.7 σ @BNL)

電気双極子モーメント(EDM) : 感度 $10^{-21} e \cdot cm$

→ CPの破れの探索



陽電子飛跡検出器	
C _n	山中隆志 22pK206-1
Muon storag	伊藤拓実 22pK206-2
e+ tr	堤裕樹 22pK206-3
dete	須江祐貴 23pK206-1

ミューオン加速	
大谷将士	22pK607-7
中沢雄河	22pL402-1
北村遼	22pL402-2

ミューオン蓄積リング

J-PARC muon g-2/EDM 実験 5

■ 極冷ミューオンビームを用いて先行実験の主要な系統誤差を排除

GOAL @ J-PARC E34

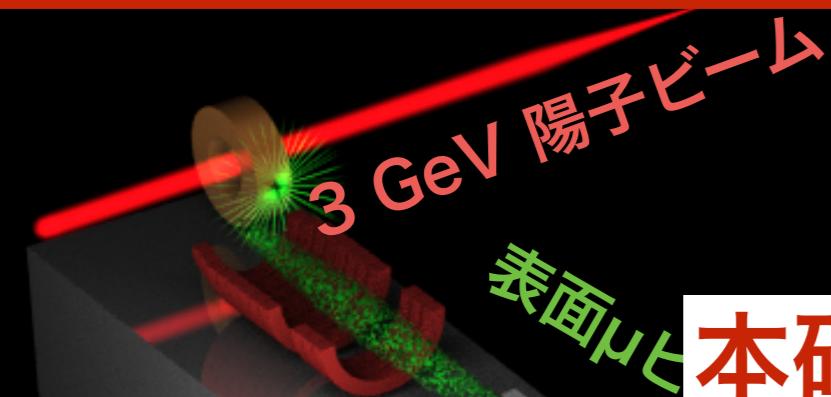
異常磁気モーメント(g-2) : 精度 0.1 ppm

Physics

SMの検証(3.7 σ @BNL)

電気双極子モーメント(EDM) : 感度 $10^{-21} e \cdot cm$

→ CPの破れの探索



超低速ミューオン源

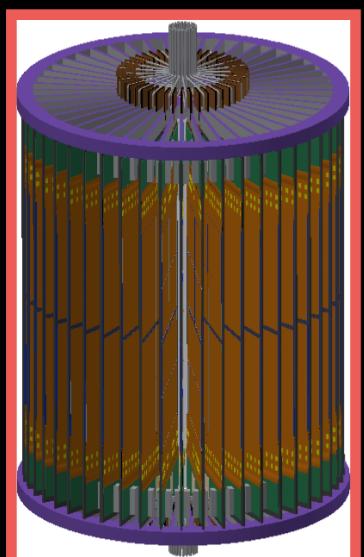
S. Li 22pL402-1

極冷ミューオン

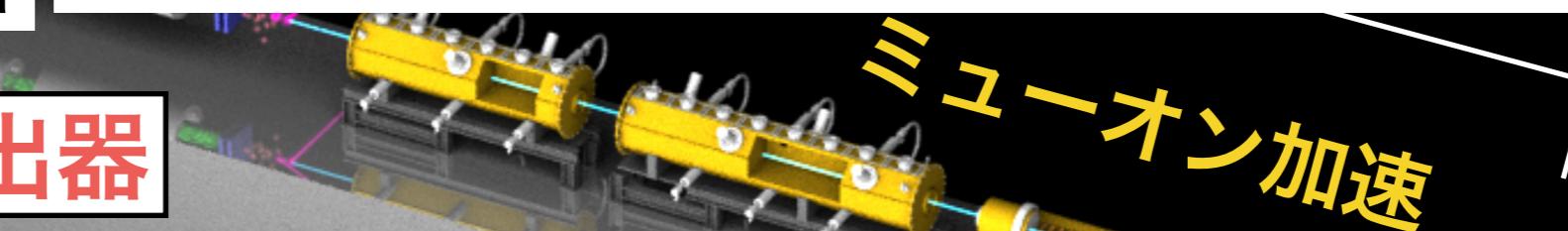
J-PARC E34

本研究：陽電子飛跡検出器の
検出器アライメントモニターの開発

陽電子飛跡検出器



ミューオン加速



陽電子飛跡検出器

山中隆志 22pK206-1

ミューオン加速

大谷将士 22pK607-7

Muon storag

伊藤拓実 22pK206-2

中沢雄河 22pL402-1

e+ tr
dete

堤裕樹 22pK206-3

北村遼 22pL402-2

須江祐貴 23pK206-1

ミューオン蓄積リング

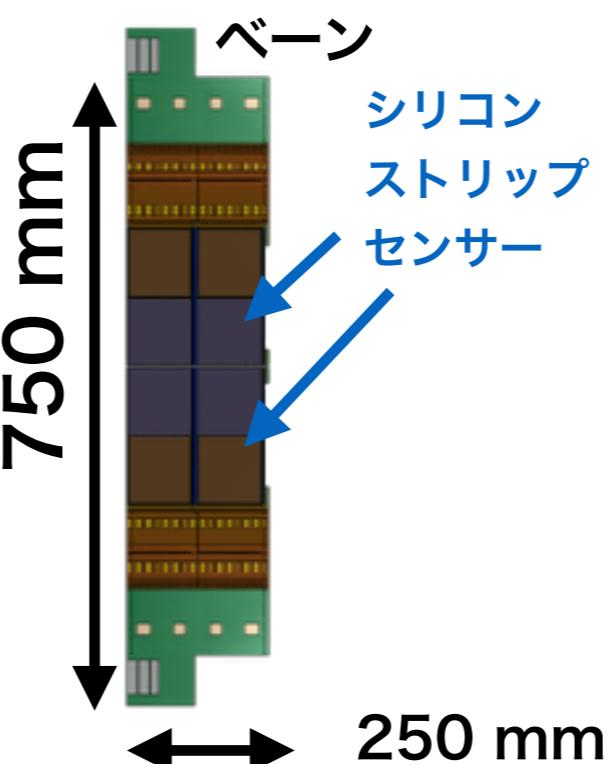
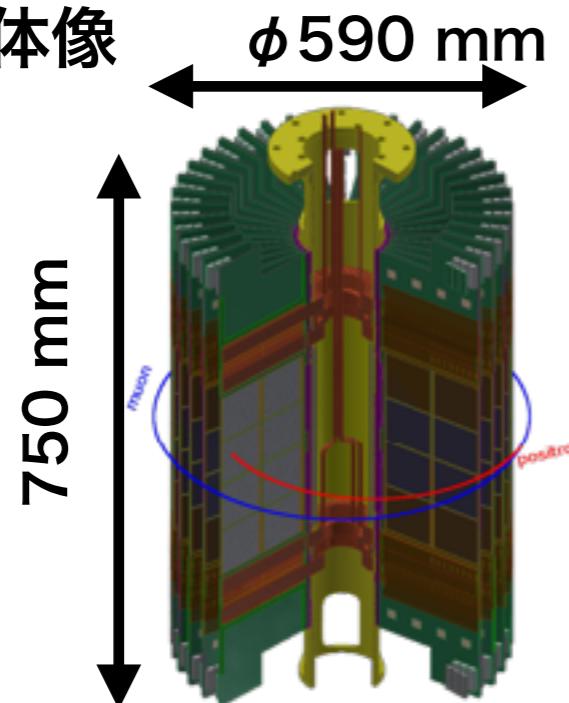
Magnetic field
local uniformity 1ppm
+very weak magnetic focusing ($n \sim 10^{-5}$, 1ppm/cm)

陽電子飛跡検出器とEDM系統誤差

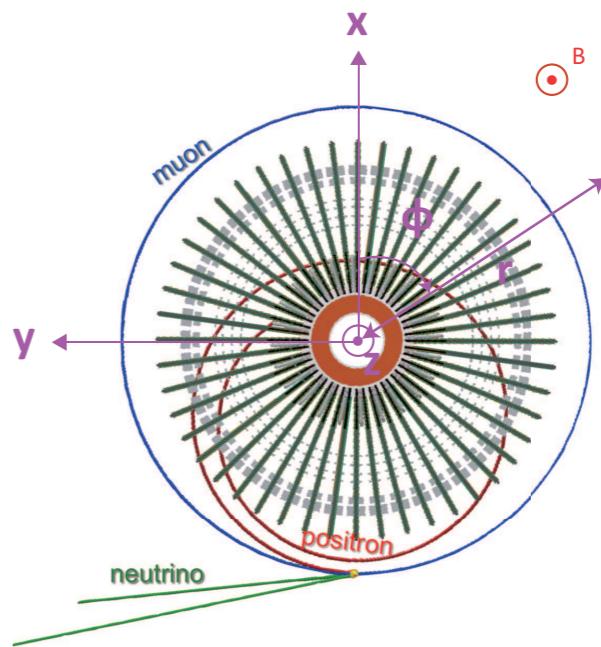
6

- 大強度パルスビームに対応した高速応答性, 高計数率での安定性(~1.4 MHz)
- ミューオン崩壊によって放出される陽電子の飛跡を検出してスピン振動を観測

検出器の全体像



トラッキングのイメージ



本研究の動機

EDMによるスピン

回転平面の傾き

区別できない

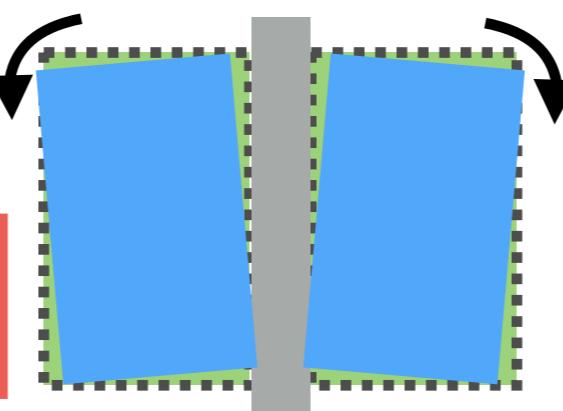
EDM 磁場 B

$\vec{\omega}_\eta$ $\vec{\omega}_a$

$\vec{\omega}$
 $g-2$

for $10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$
10 μrad 以内の回転

検出器の回転



EDM測定の系統誤差の見積もり

誤差要因	$d_\mu (\times 10^{-21}) [\text{e} \cdot \text{cm}]$
Axial E-field	10^{-3}
Radial B-field	10^{-5}
misalignment	(本研究の目的)
統計誤差	1.4

本研究の動機

検出器のミスアライメントを精密にモニターすることで
ミューオン電気双極子モーメントの系統誤差を抑制する。



検出器アライメントモニターの開発

■ 要求仕様

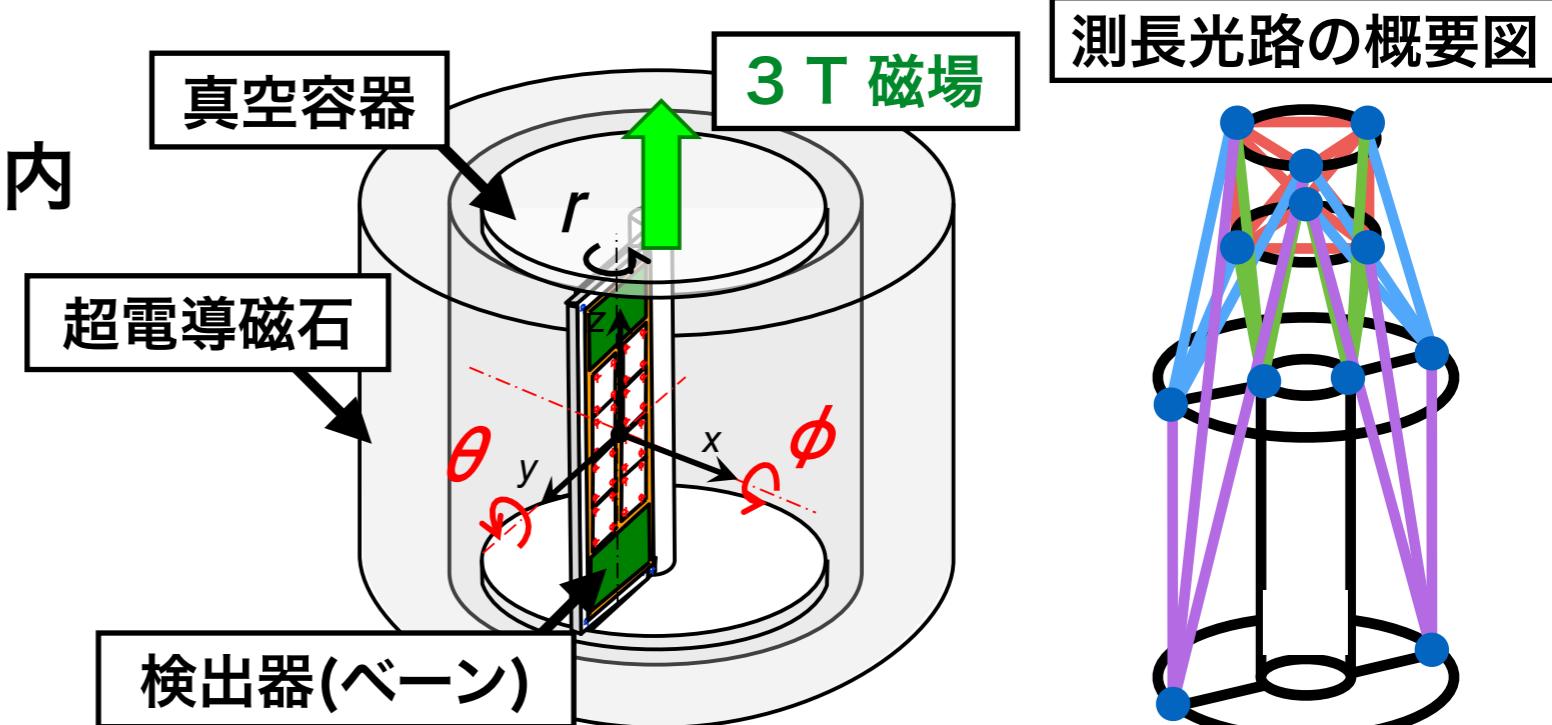
■ 長さ測定の精度が $1 \mu\text{m}$ 以内

■ 設置環境

■ 高磁場(3 T)

■ 長期間の利用(~1年)

■ 狹い設置スペース



光周波数コムレーザー + 光路差掃引式干渉計

光周波数コムレーザー

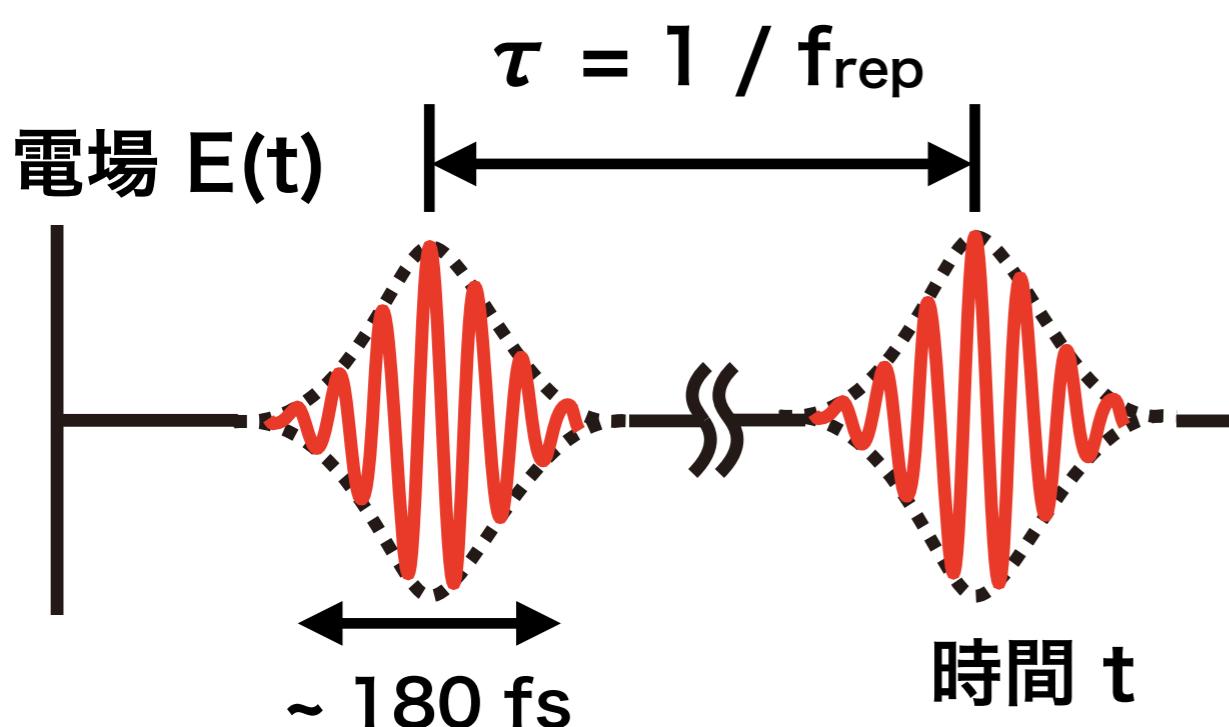
■ 光周波数コムレーザー（光コム）の特徴

- パルス幅がフェムト秒のパルスレーザー

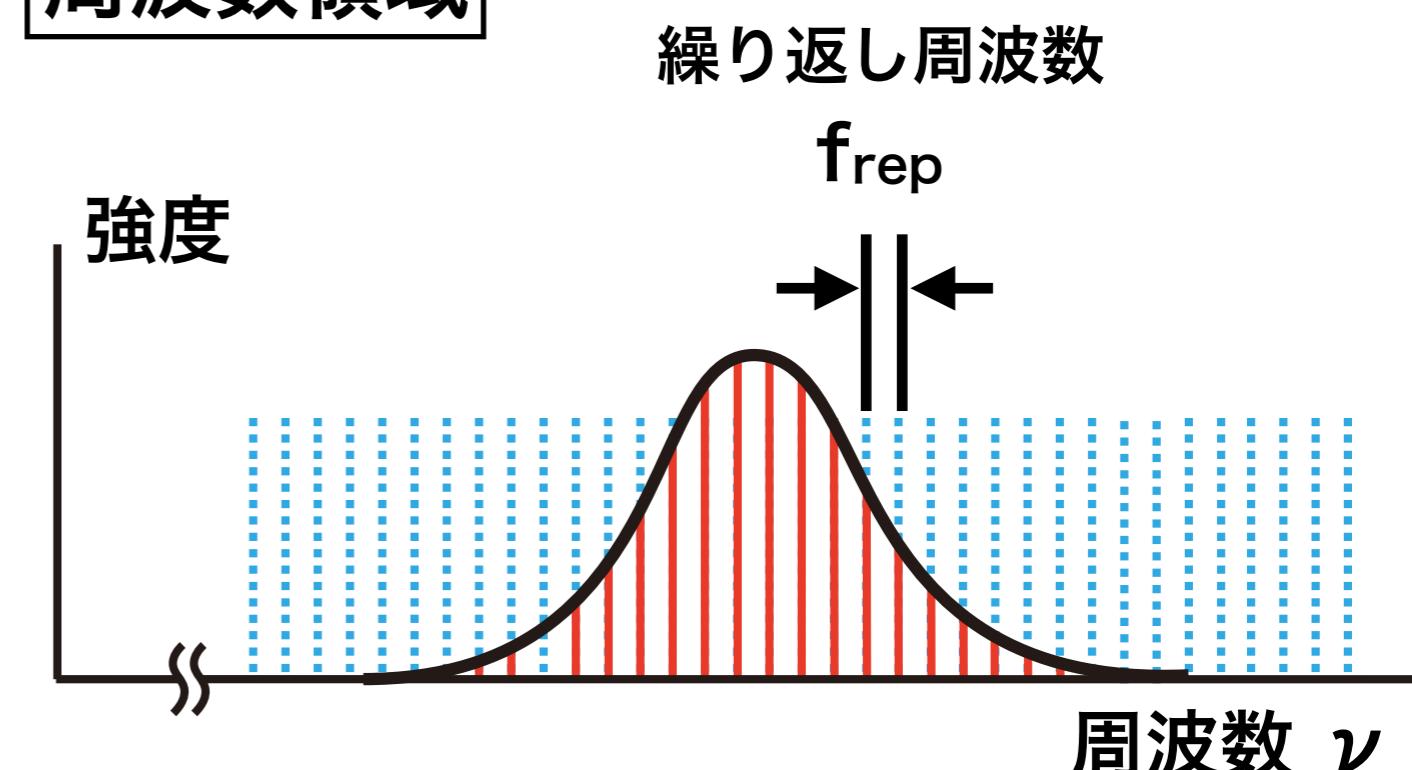
- 櫛(comb)状の周波数構造

- 外部基準周波数と同期することで安定した繰り返し周波数 f_{rep} を得られることに着目 ($\delta f_{\text{rep}}/f_{\text{rep}} \sim 10^{-12}$)

時間領域

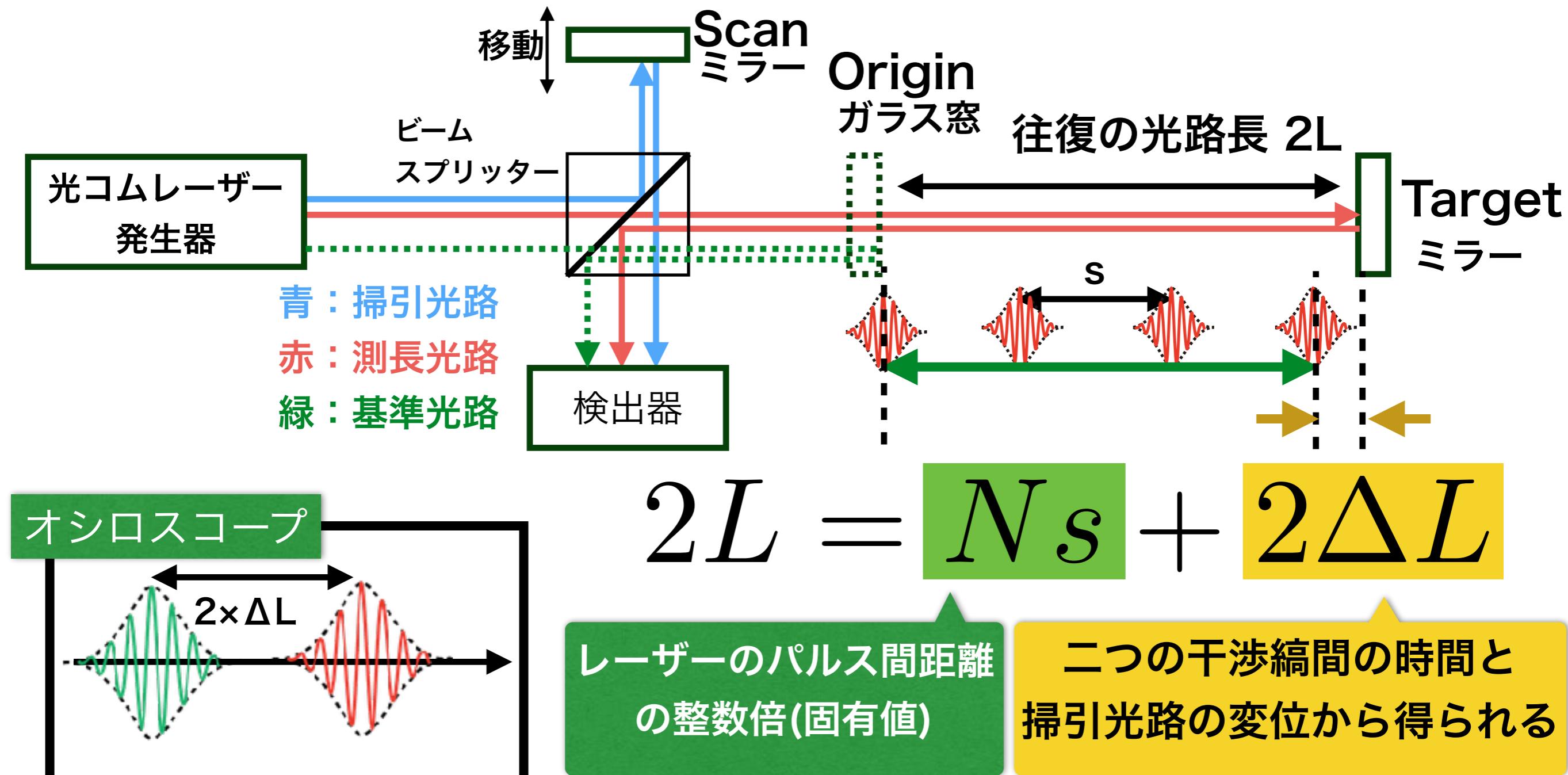


周波数領域



光路長掃引式干渉計

光路長を変化させることで干渉縞を発生させる。



(N : 整数 , s : パルス間距離)

検出器アライメントモニターの開発内容

- ミスアライメントによるEDM系統誤差のシミュレーション
- アライメントモニターのコンセプト決定
- 測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成
- 繰り返し周波数の校正
 - 各パラメータの測定 (n_{air} , L_{GB} , ΔL)
 - セットアップ再現性の測定

$$L = \frac{c}{2n_{\text{air}}f_{\text{eta}}} + \Delta L \quad \leftrightarrow \quad f_{\text{eta}} = \frac{c}{2n_{\text{air}}(L_{\text{GB}} - \Delta L)}$$

c : 光速, n_{air} : 空気中の屈折率, f_{eta} : 繰り返し周波数, ΔL : 二つの干渉縞間の距離

- 測定長さLの不確かさを評価

検出器アライメントモニターの開発内容

– ミスアライメントによるEDM系統誤差のシミュレーション

JPS2013秋
(西村)

– アライメントモニターのコンセプト決定

JPS2015春
(西村)

IWAA2016
(久米)

– 測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成

JPS2017春

– 繰り返し周波数の校正

– 各パラメータの測定 (n_{air} , L_{GB} , ΔL)

JPS2017春

JPS2017秋

– セットアップ再現性の測定

$$L = \frac{c}{2n_{\text{air}} f_{\text{eta}}} + \Delta L \quad \leftrightarrow$$

$$f_{\text{eta}} = \frac{c}{2n_{\text{air}}(L_{\text{GB}} - \Delta L)}$$

c : 光速, n_{air} : 空気中の屈折率, f_{eta} : 繰り返し周波数, ΔL : 二つの干渉縞間の距離

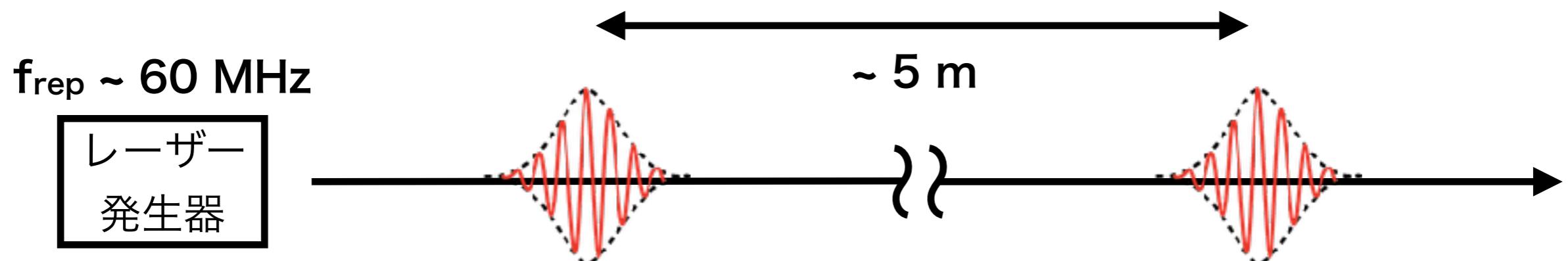
– 測定長さLの不確かさを評価

繰り返し周波数校正の動機

■ ファイバーエタロンの役割

利便性のためにパルス間隔を圧縮し、掃引光路を短くする

■ そのままでパルスの間隔が広く掃引光路が長くなる



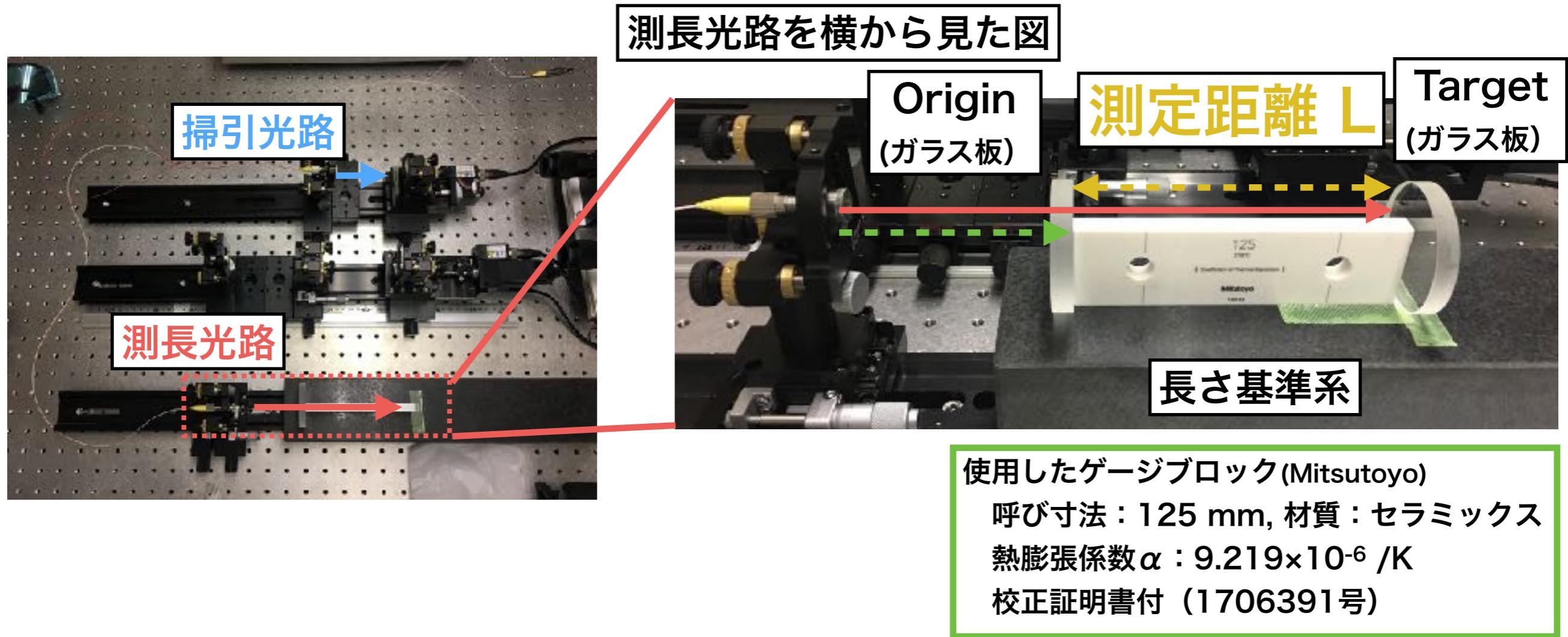
■ ファイバーエタロンを通すことで掃引光路を短くできる



-> しかし、エタロンの透過特性が未知なため、繰り返し周波数を校正する必要がある

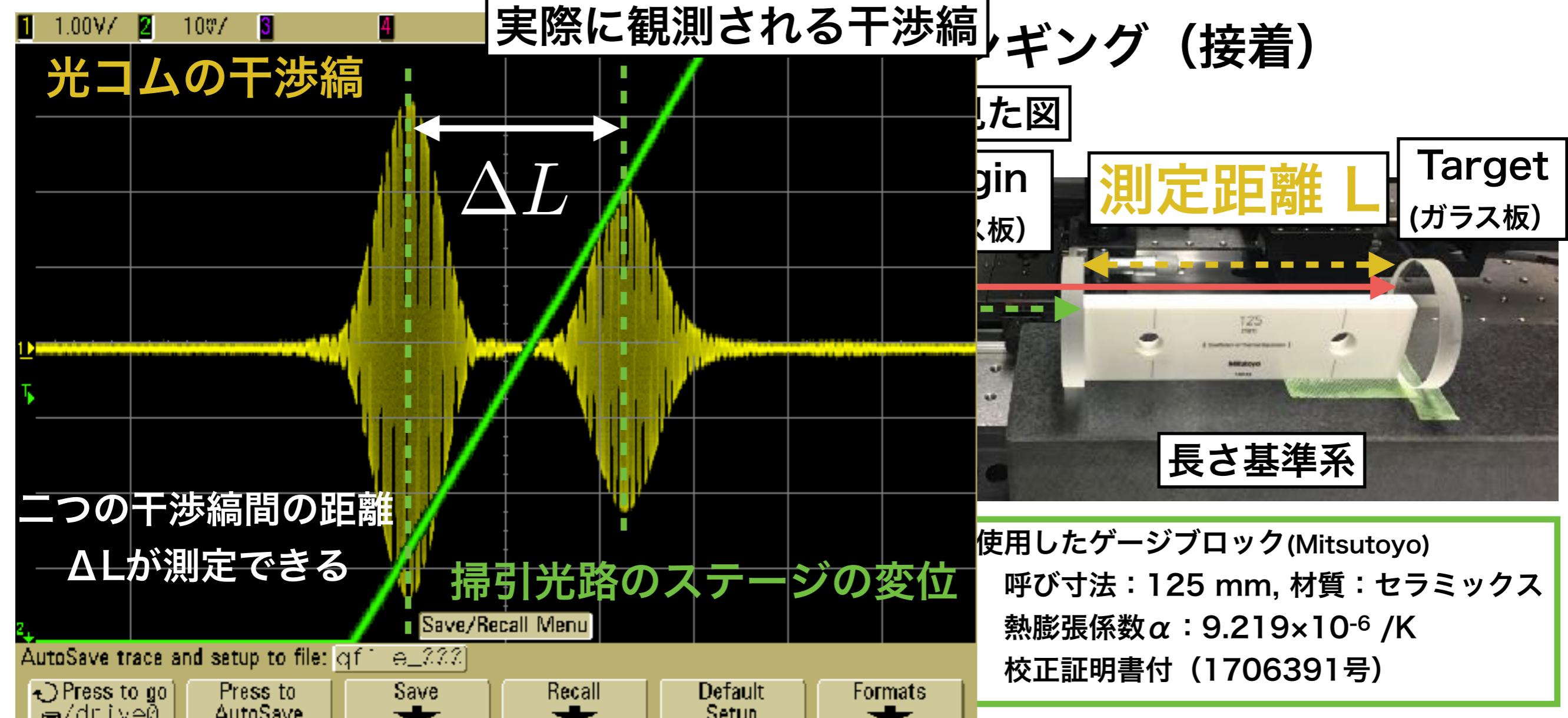
繰り返し周波数f_{eta}の校正

- 長さ基準利用し、繰り返し周波数f_{eta}を校正する。
- ゲージブロック (長さ基準 : 125 mm)
- 特徴 : 寸法が正確, 耐久性がある, 測定面が密着する
- ゲージブロックは0.03 μmの不確かさで校正されている。
- ゲージブロックの両端にガラス板をリングング (接着)



繰り返し周波数f_{eta}の校正

- 長さ基準利用し、繰り返し周波数f_{eta}を校正する。
- ゲージブロック (長さ基準 : 125 mm)
- 特徴 : 寸法が正確, 耐久性がある, 測定面が密着する
- ゲージブロックは0.03 μmの不確かさで校正されている。



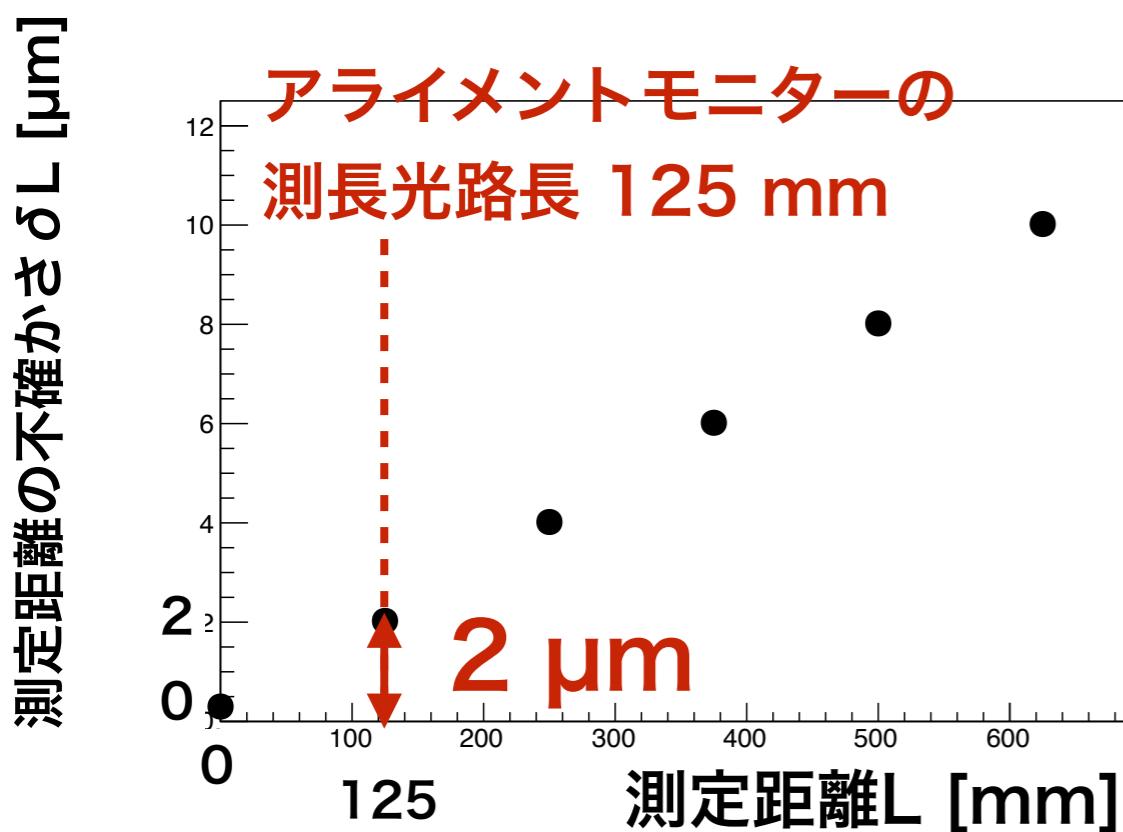
■ 繰り返し周波数校正における不確かさの要因

不確かさ要因	各不確かさ	f_{eta} 不確かさ [GHz]	寄与率 [%]
長さ基準系 L_{GB}	寸法差幅	0.03 μm	< 0.2
	校正不確かさ	0.017 μm	< 0.1
	熱膨張係数	0.008 μm	1.8×10^{-5} < 0.1
測定温度	0.2 μm		1.1%
<u>セットアップ再現性</u>	<u>1.9 μm</u>		<u>96.1%</u>
空気の屈折率 n_{air}	0.9×10^{-6}	1.1×10^{-6}	0.4%
干渉縞間の距離 ΔL	0.3 μm	2.9×10^{-6}	2.4%
合計		1.9×10^{-5}	(100%)

■ セットアップ再現性による不確かさが大きく影響

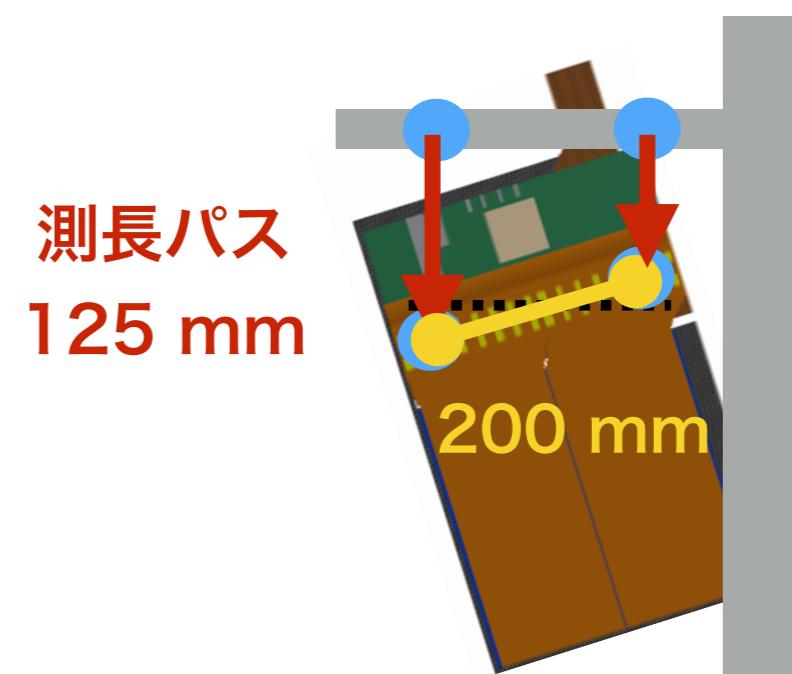
長さ測定精度 δL と EDM 系統誤差の評価 16

■ 測長長さ L の不確かさ δL



■ 測長パス(125 mm) の δL

$$\delta L(@125 \text{ mm}) = 2 \mu\text{m}$$



■ 長さ精度を角度精度に換算

$$\frac{2 \mu\text{m}}{200 \text{ mm}/2} = 20 \mu\text{rad}$$

■ Misalignmentによる系統誤差

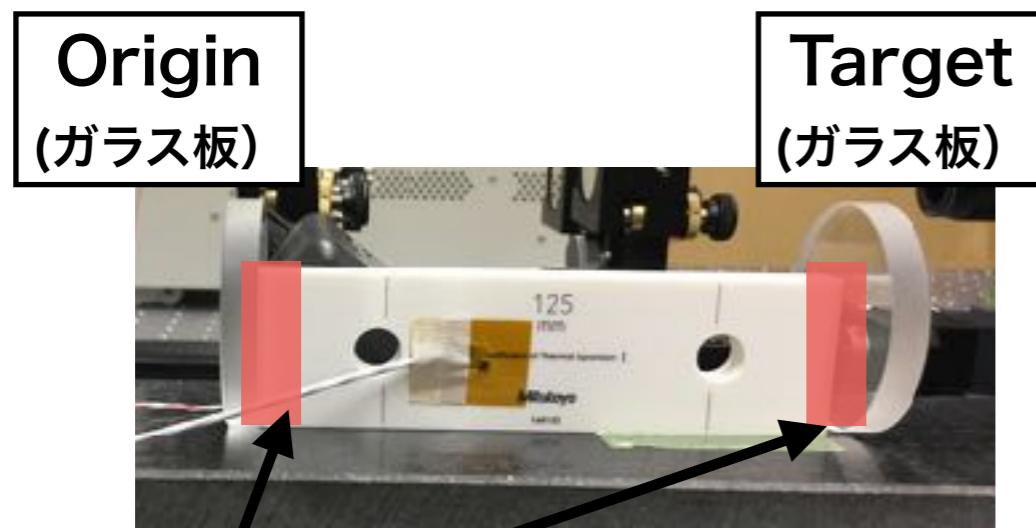
- ~ 統計誤差($10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$)
- 測定精度向上の必要有

誤差要因	$d_\mu (\times 10^{-21}) [\text{e} \cdot \text{cm}]$
Axial E-field	10^{-3}
Radial B-field	10^{-5}
Misalignment	2
統計誤差	1.4

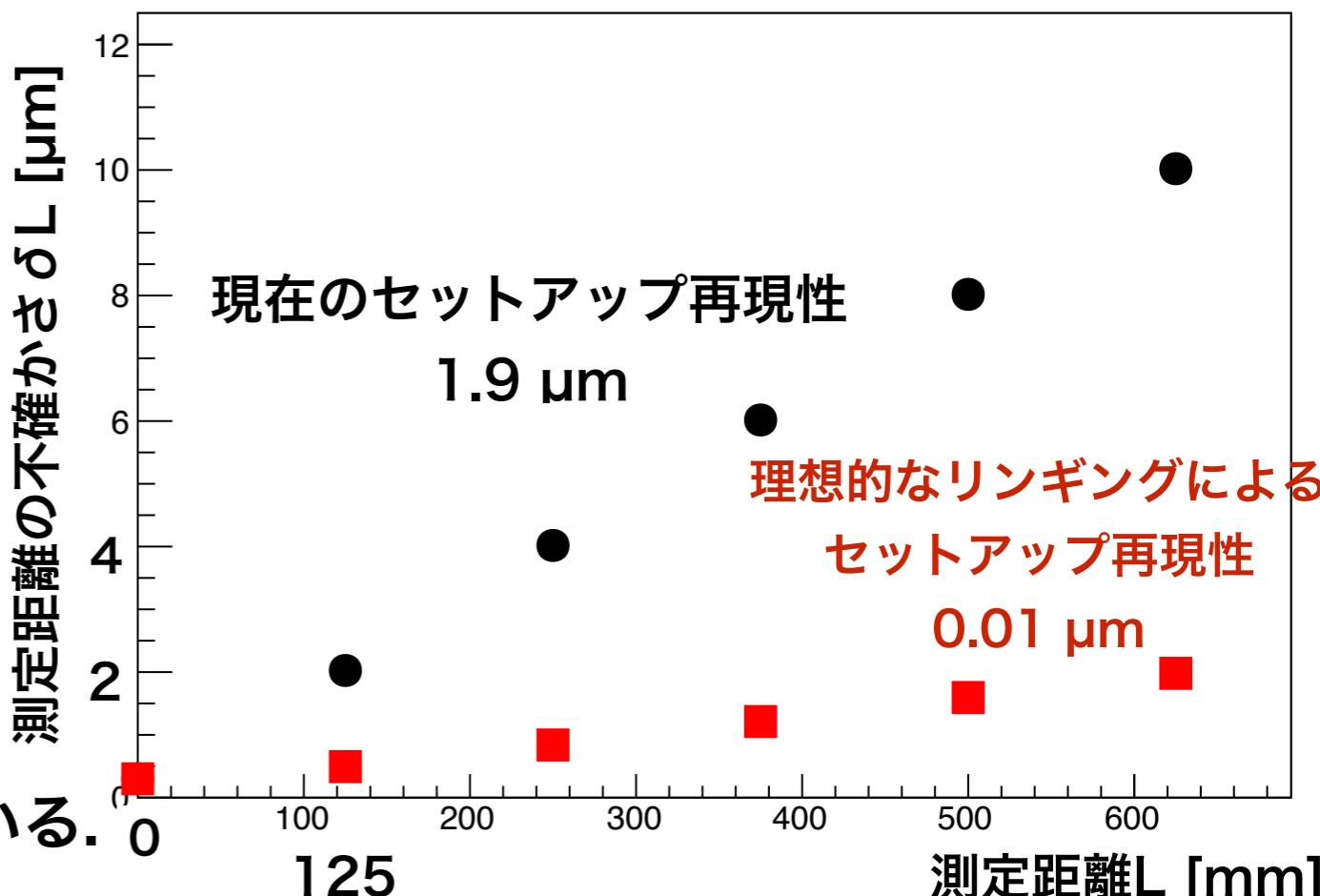
セットアップ再現性の考察

17

- ファイバーエタロン校正の不確かさのほとんどがセットアップ再現性
- セットアップの再現性は、**リング・環境・光軸のアライメント**に依存。



リング（密着）による不確かさは
0.01 μm 程度に抑えられることが知られている。



Ref. 小須田哲雄. ブロックゲージの基礎と応用.

精密工学会誌, Vol. 79, No. 8, pp.743–749, 2013

- セットアップ再現性改善によって得られる系統誤差

$$\frac{0.5 \mu\text{m}}{200 \text{ mm}/2} = 5 \mu\text{rad}$$

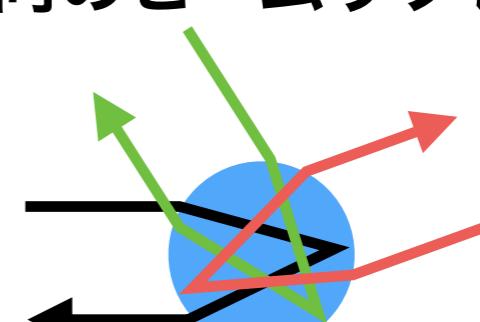
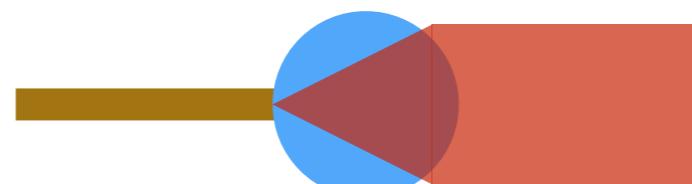
$$\delta d_\mu = 0.5 \times 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

■アライメントモニターの開発

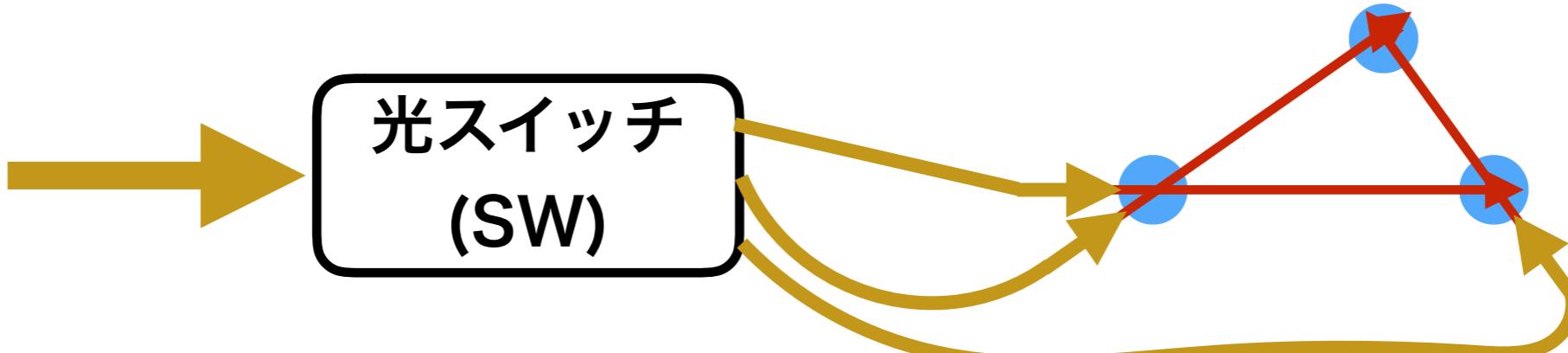
■長さ測定 L の精度評価（本研究）

■コンパクト化に向けたガラスボールレンズ干渉計の開発

複数方向のビームコリメータ 複数方向のビームリフレクター



■3次元測定に向けたスイッチングシステムの開発



■検出器ベースへの実装と試験

■本実験での稼働

本研究の目的

測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成し,
測定長さLの精度を評価する.

- ゲージブロックを利用してすることで f_{eta} を校正した.
- 校正によって期待される絶対距離L 測定の不確かさは,
$$\delta L (125 \text{ mm}) = 2 \mu\text{m}$$
- 検出器傾き精度と期待されるミューオンEDMの系統誤差.
$$\delta d_\mu = 2 \times 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$$
- セットアップ再現性を向上することで, 長さ測定の精度を向上できる.
- 今後は実機に向けた要素開発を行っていく.

BACK UP

■ 環境要因について、室内の環境と空気の屈折率の不確かさへの影響は以下の通りである。 [

ref. 寺田, 長さ標準：レーザー測長における真空及び待機の影響, J. Vac. Soc. Jpn., Vol 52, No.6, pp.347-350, (2009)]

■ 室温 : 1 ppm / °C

■ 気圧 : 0.27 ppm/hPa

■ 湿度 : 0.07 ppm/(10%)

■ 現在、モニターできている精度とそれに対する測定長さの不確かさ
(基準長さ 250 mmとして計算)

■ 室温 : 0.8 °C → 0.2 μm

■ 気圧 : 2 hPa → 0.18 μm

■ 湿度 : 4 % → 0.06 μm

■ これらはどれも、セットアップ再現性の不確かさ 2 μm に達していない。

-> 環境変化による空気の屈折率由来であることは考え難い。

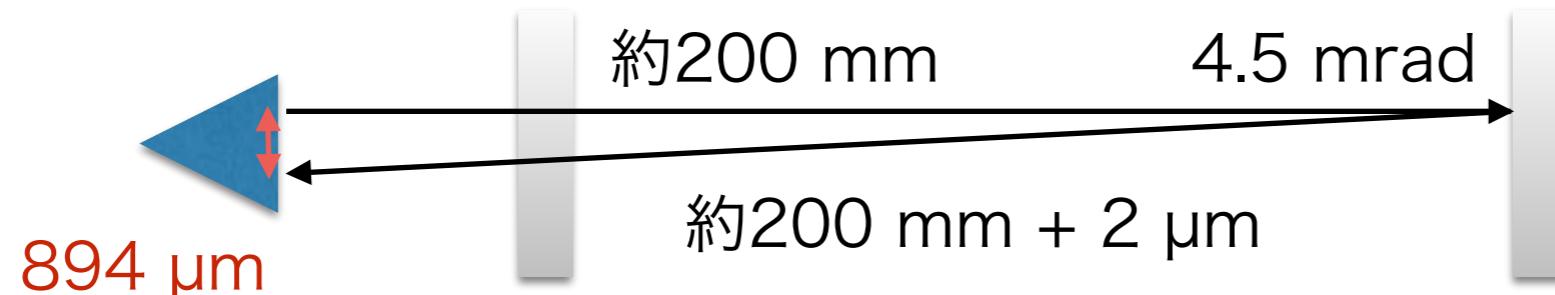
■ 掃引光路モニターなど、他の要素が環境の影響を受けている可能性がある。

■ セットアップ再現性の考察について

■ セットアップ再現性の約2 μmの不確かさについて、リングング・光軸のアライメント・環境要因の三つが原因であると考えた。

■ 光軸のアライメントについて

■ 約2 μmの影響によって光軸のアライメントが異なる場合は角度にして、



$$\sqrt{(200002 \mu\text{m})^2 - (200000 \mu\text{m})^2} = 894.4 \mu\text{m}$$

■ 平面板の平行度は3'以下であることから、4.5 mrad(= 15')よりも小さい。

-> ガラス板の平面度は2 μmの乖離に影響してこない。

■ コリメーターのあたり角度調整の分解能は0.39°/回転(=23')である。回転は調整ネジの回転を意味する。このため、あたり角の調整は15'よりも十分小さくできると考えている。

-> コリメーター角度の調整は2 μmの乖離に影響してこない。

■ 以上から、2 μmの不確かさは、光軸のアライメント由来であることは考え難い。

本研究の目的

■ 本干渉計で測定できる長さ L

$$L = \frac{Nc}{2n_{\text{air}} f_{\text{rep}}} + \Delta L$$

N : 整数, c : 光速, n_{air} : 空気中の屈折率,
 f_{rep} : 繰り返し周波数, ΔL : 二つの干渉縞間の距離

本研究の目的

測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成し,
測定長さ L の精度を評価する.

EDM測定の系統誤差要因

24

J-PARC E34 実験の特徴

ビーム広がりが小さい

-> 弱い収束磁場

-> 電磁場による系統誤差への影響が少ない

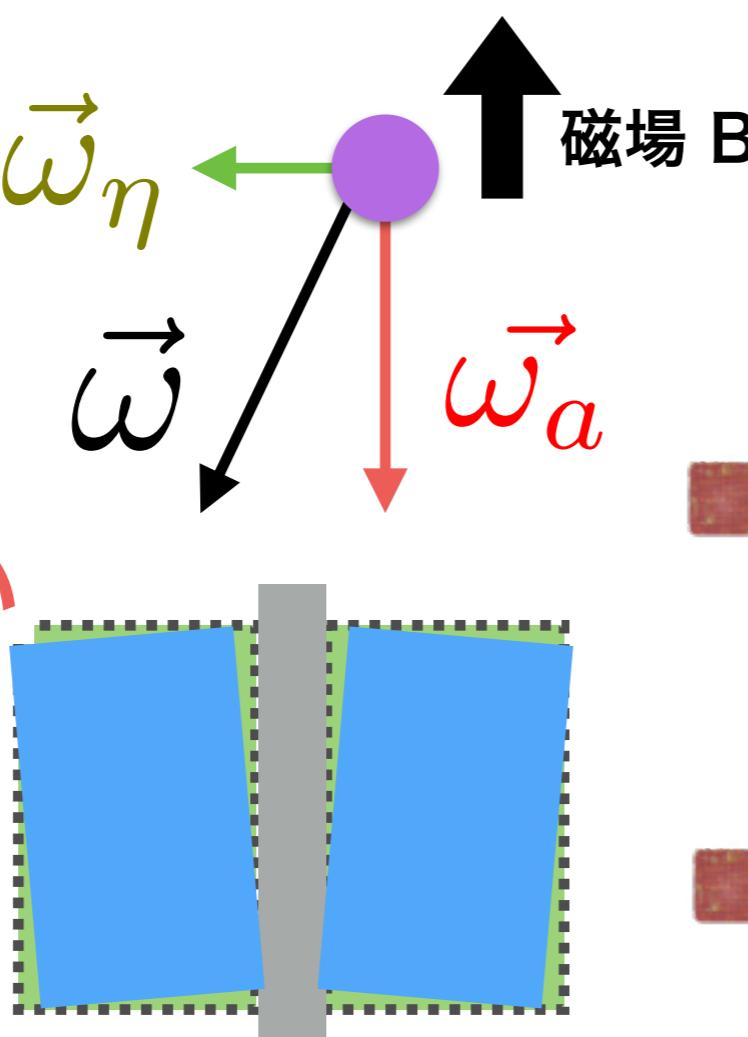
本研究の動機

EDMによるスピン回転平面の傾き

区別できない



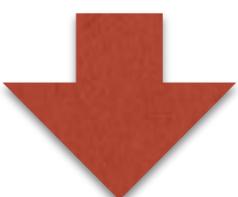
検出器の回転



EDM測定の系統誤差の見積もり

誤差要因	$d_\mu (\times 10^{-21}) [e \cdot cm]$
Axial E-field	10^{-3}
Radial B-field	10^{-5}
Detector misalignment	(本研究の目的)
統計誤差	1.4

EDM測定の系統誤差を理解する

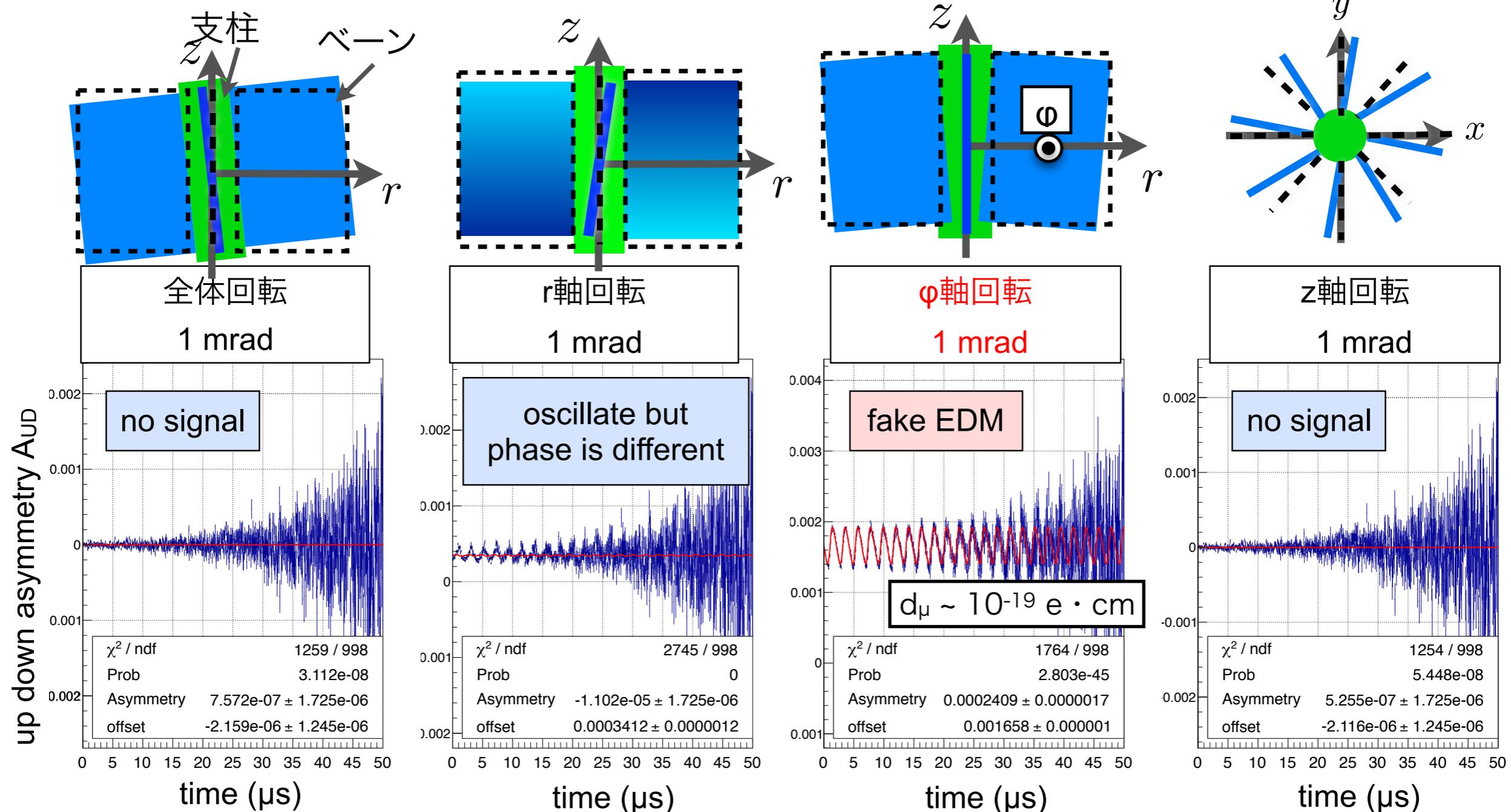


検出器の傾きを知る必要がある

■ 検出器の傾きによるEDM信号のシミュレーション

■ 目標EDM感度 $10^{-21} [\text{e} \cdot \text{cm}]$ に必要な傾きは ϕ 軸 $10 \mu\text{rad}$ 以内

Ref. 西村昇一郎, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2014)



■ 検出器位置の要求精度の見積もり

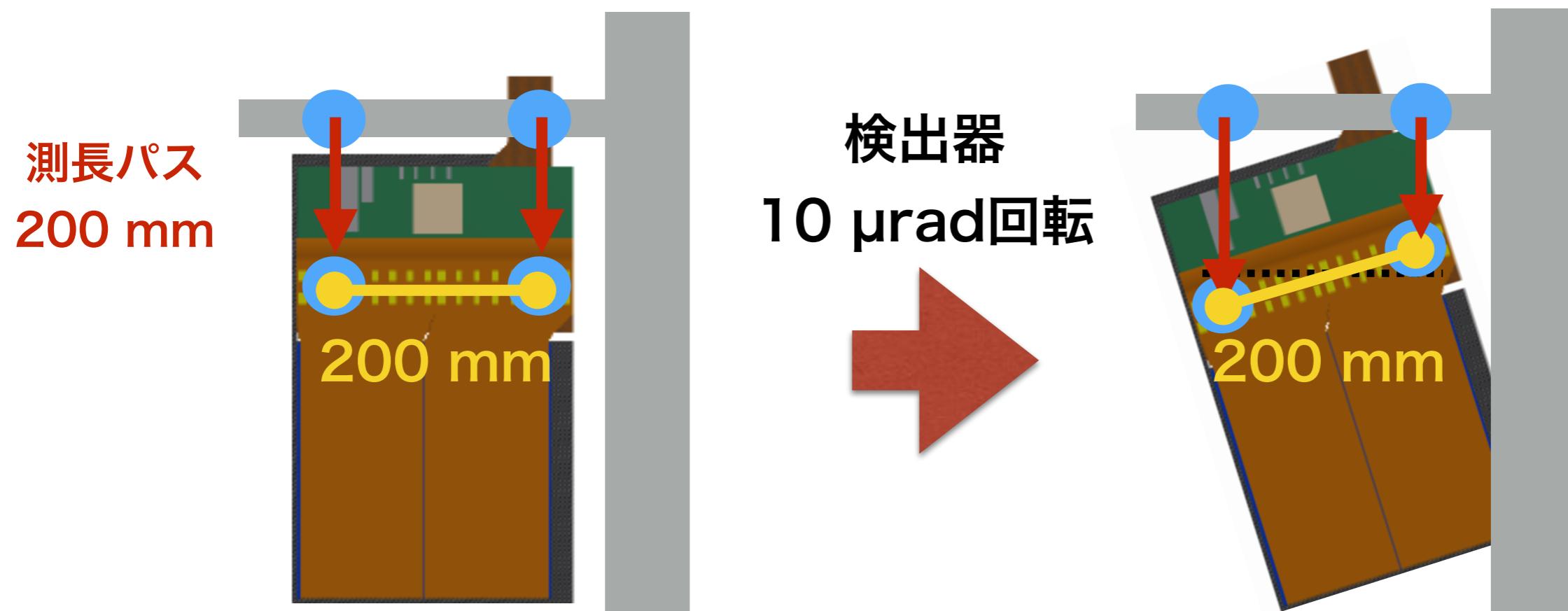
■ 検出器の傾き要求 $10 \mu\text{rad}$

■ 200 mm の検出器幅に対する検出器位置のズレは $1 \mu\text{m}$

$$10 \mu\text{rad} \times 200 \text{ mm}/2 = 1 \mu\text{m}$$

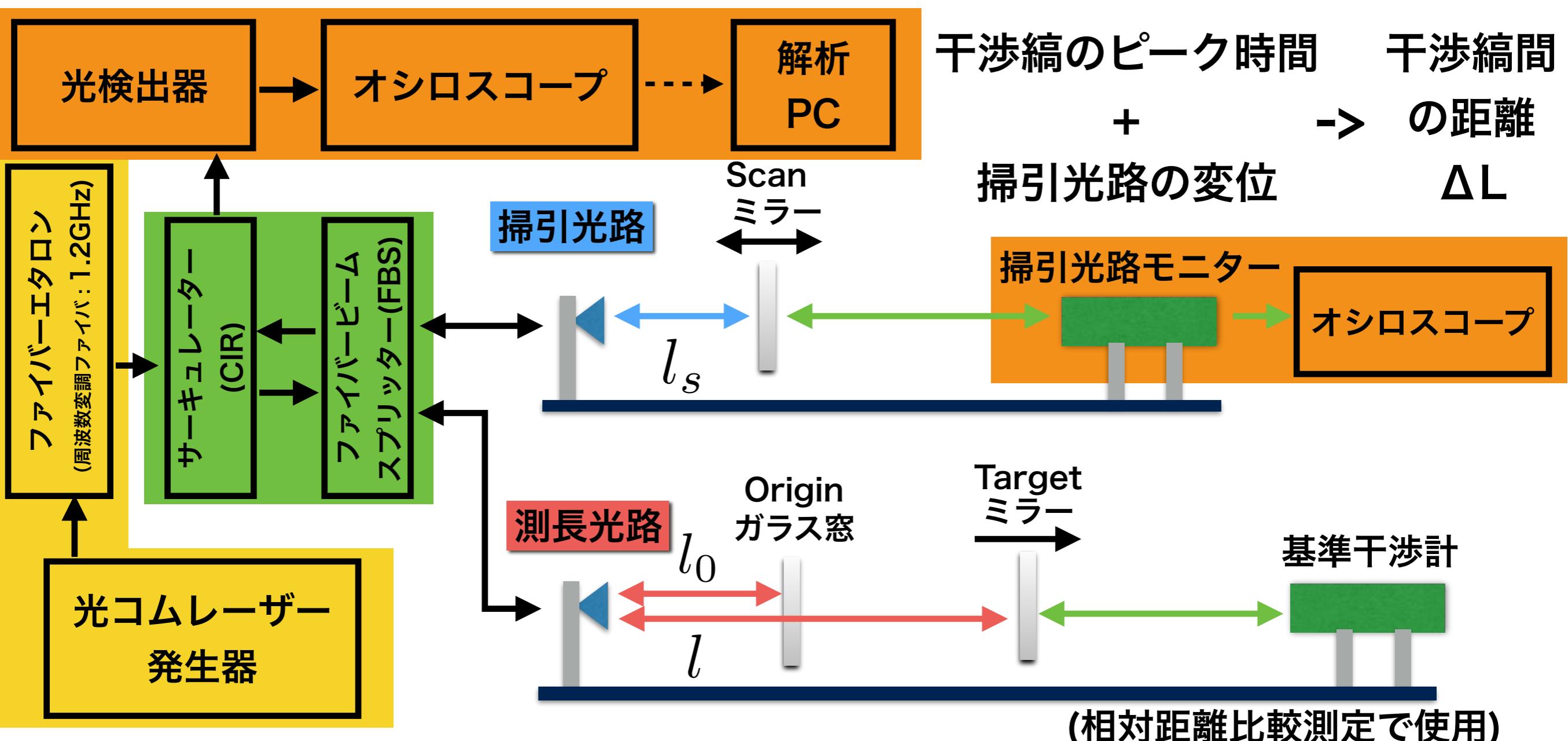
factor 2はベーン中心で傾いていると仮定

■ 200 mm 測長パスに対して $1 \mu\text{m}$ の測定精度が必要



セットアップ

- ファイバーエタロンによってパルス間隔を圧縮
- CIRとFBSがビームスプリッターの役割
- 掃引光路モニターでScanミラーの変位をモニター



セットアップの写真

掃引光路モニター

基準干渉計

Scanミラー

掃引光路

測長距離 L

Targetミラー

Origin : ガラス窓

測長光路

光コムレーザーの仕様

中心波長

1559.1 nm

発信出力

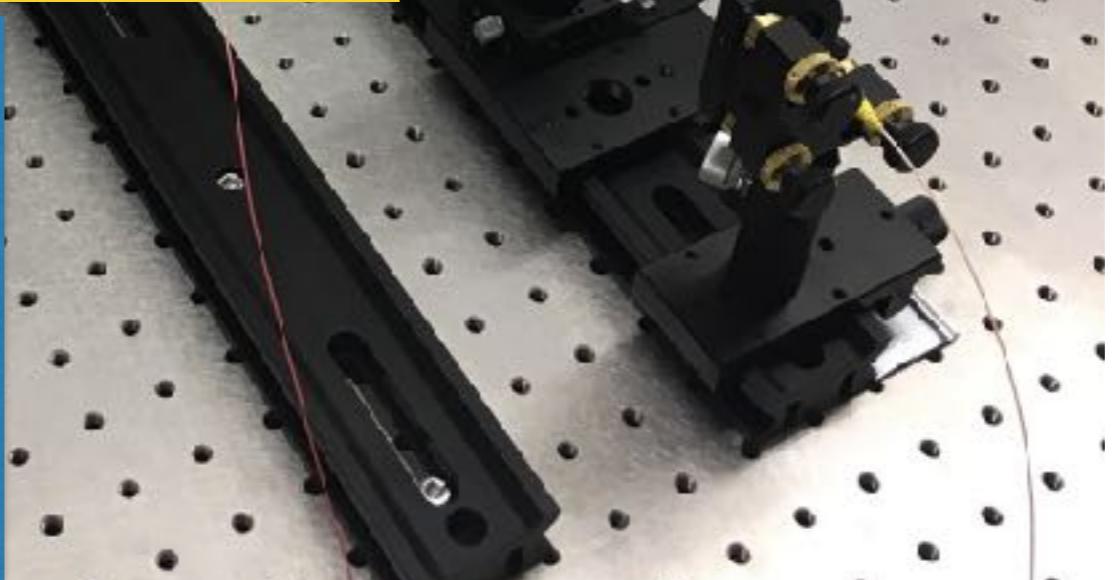
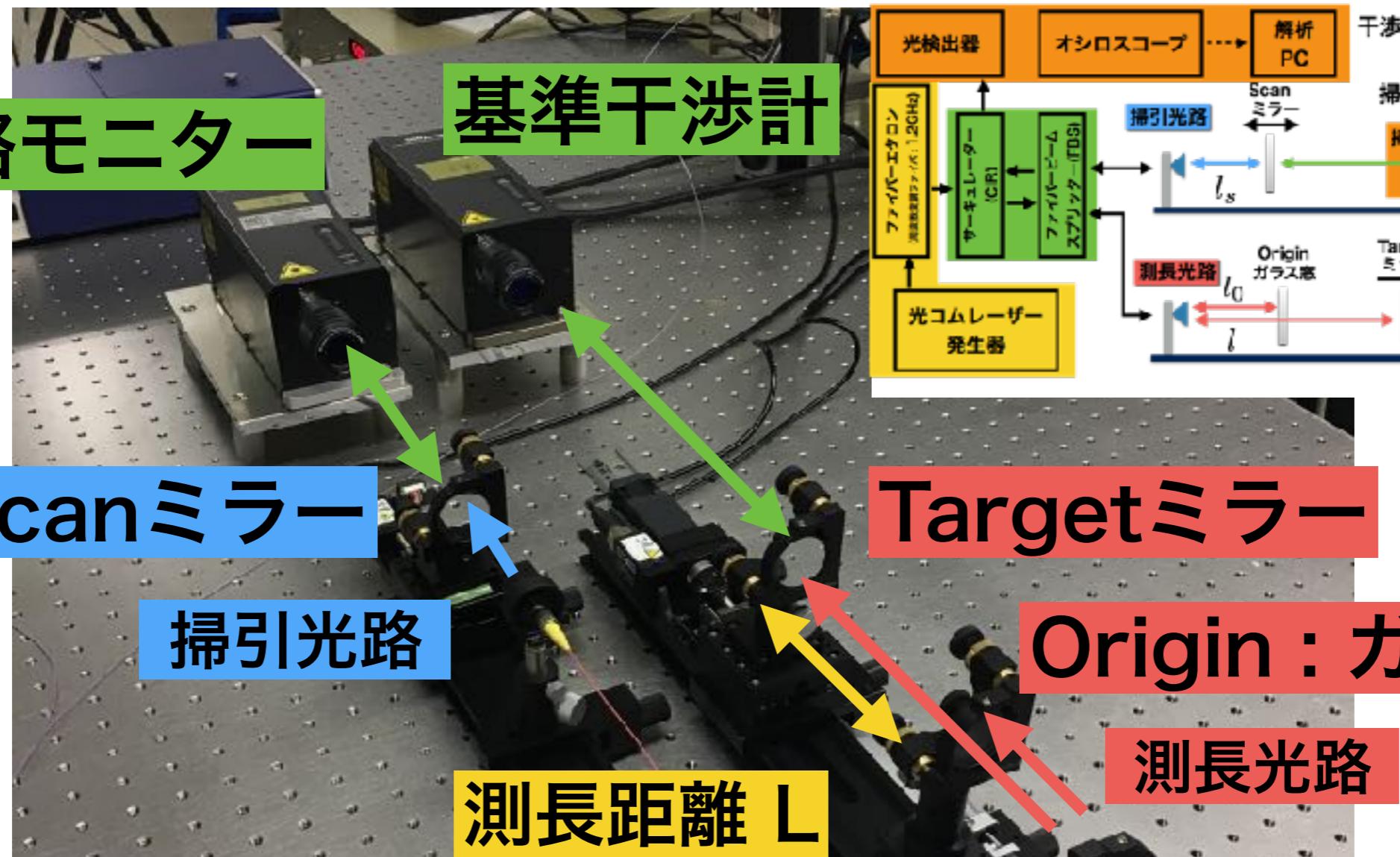
6.10 mW

繰り返し周波数

59.45 MHz

パルス幅

180 fs



■ 掃引光路モニターと掃引光路自動制御計

市販レーザー変位計と自動ステージを利用し、掃引光路の走査と変位測定を行う。

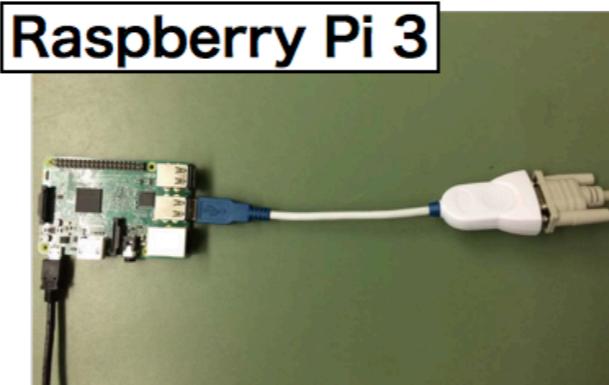
掃引光路自動制御系

制御用PC

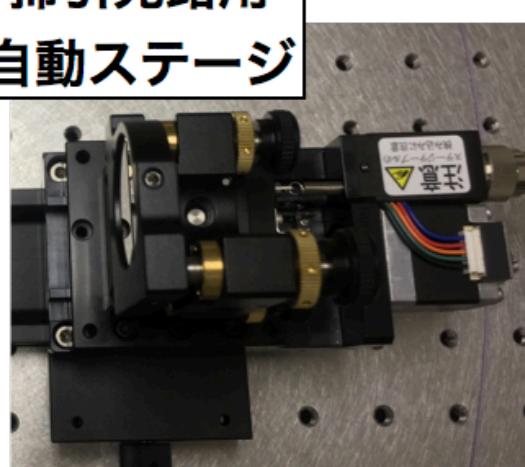


Raspberry Pi 3

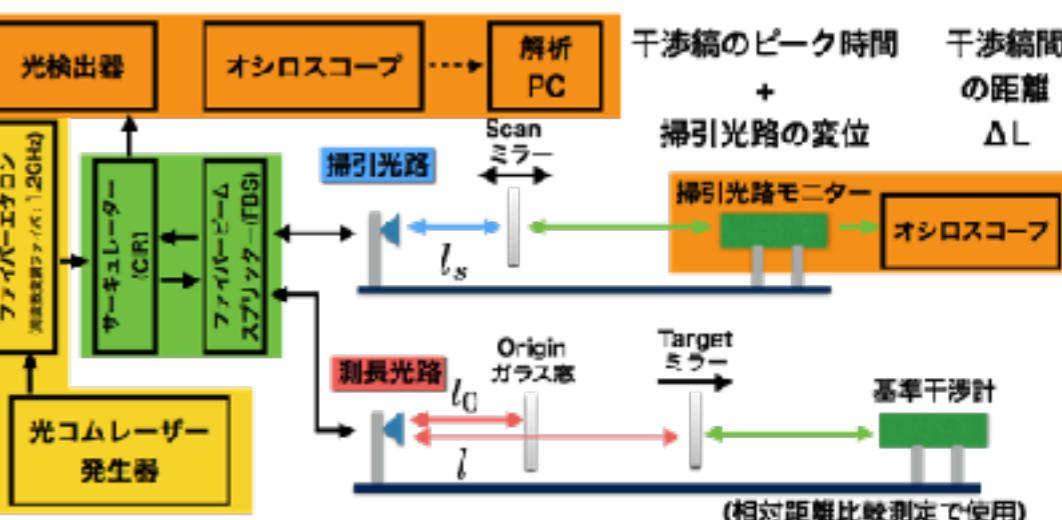
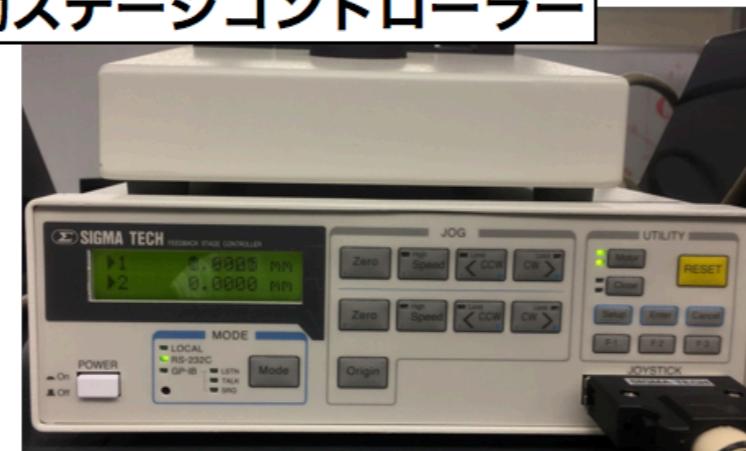
----->
SSH接続



掃引光路用
自動ステージ



自動ステージコントローラー



掃引光路モニター

掃引光路モニタユニット
(レーザー変位系)



掃引光路モニター



掃引光路

■ Fabry-Pérot 型ファイバーエタロン

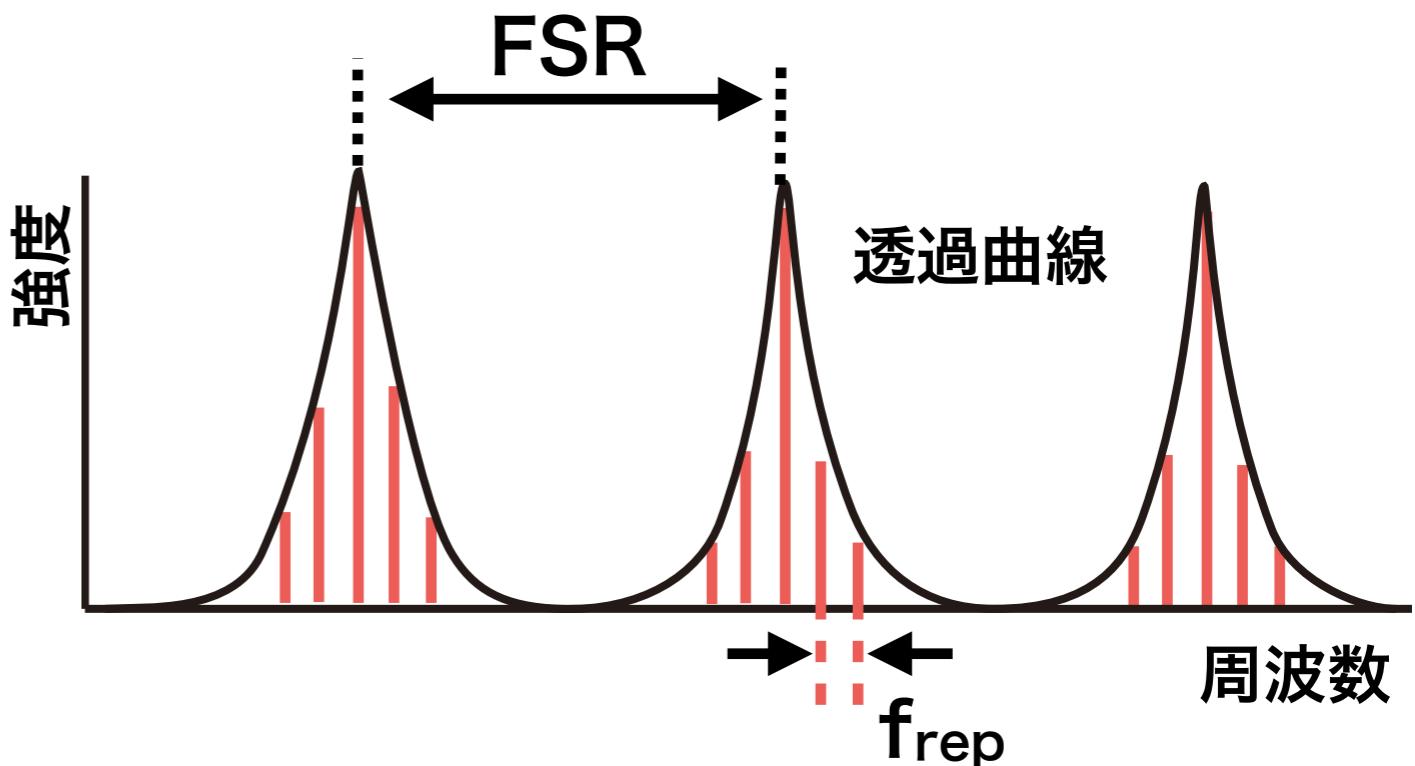
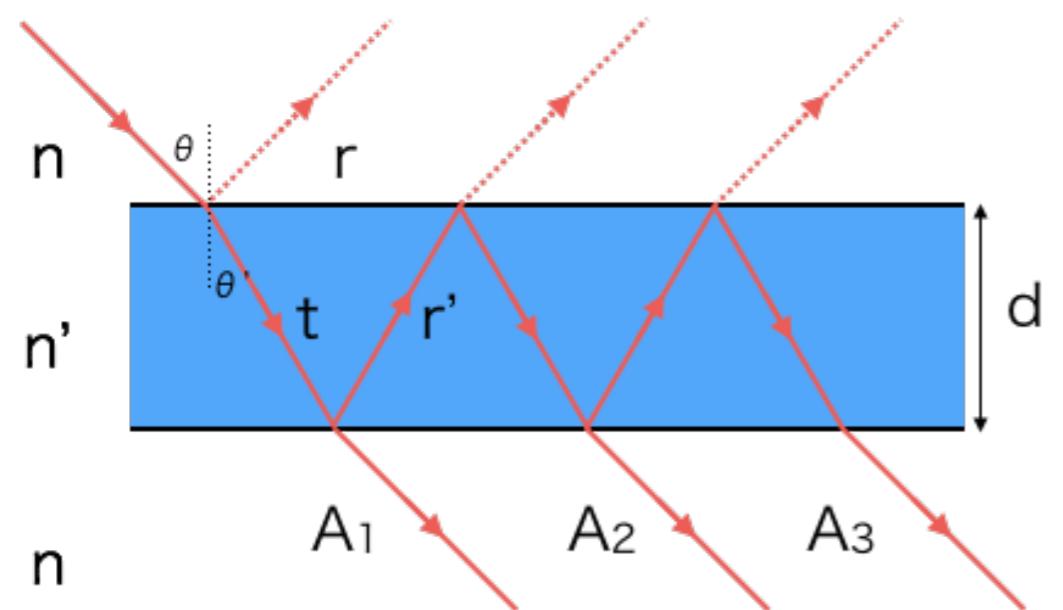
■ 両端に反射コーティングが施された光ファイバー

入射光 I_0 と透過光 I_t の強度比 (R :反射率, δ :位相差)

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad (F = \frac{4R}{(1 - R)^2})$$

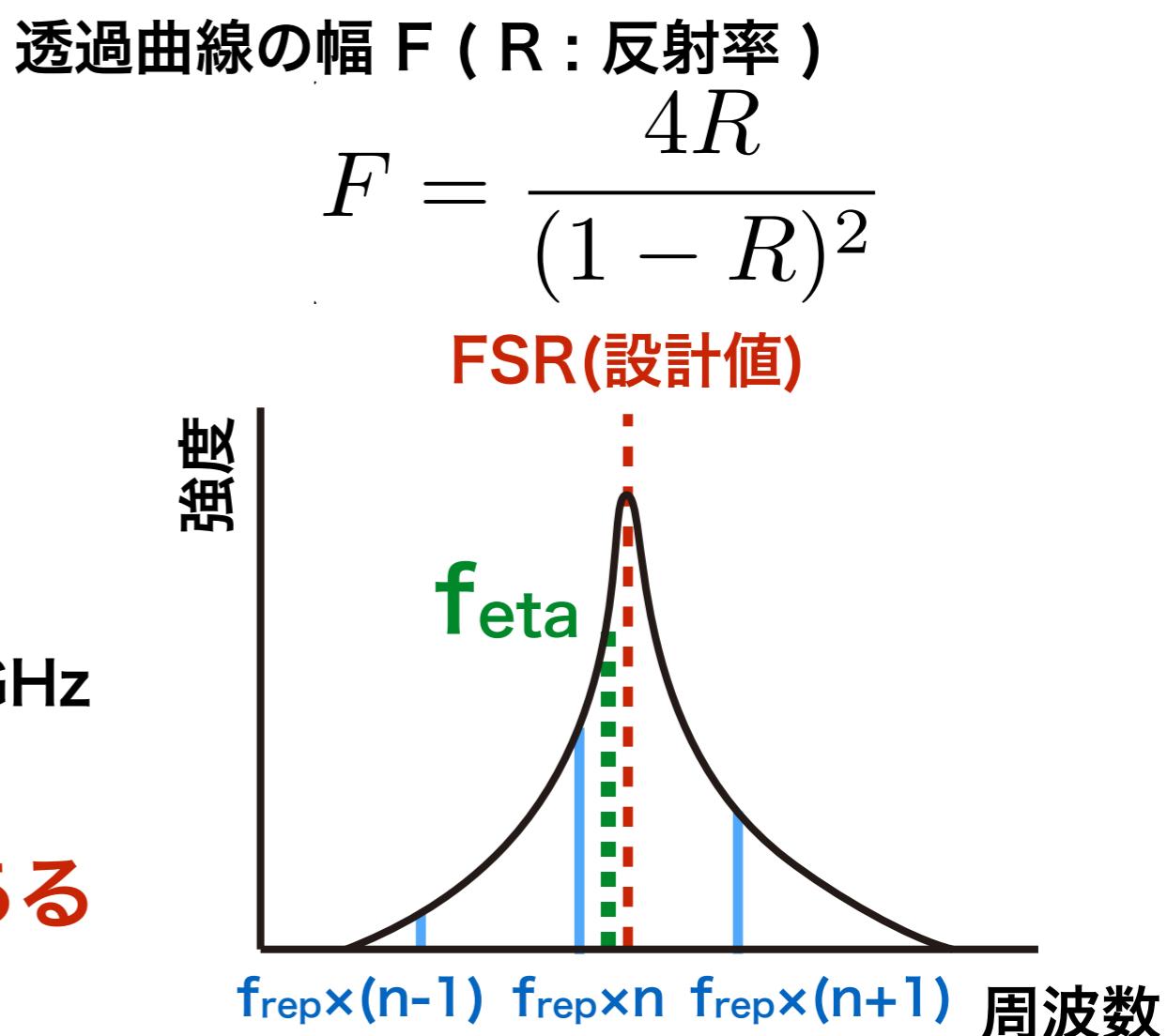
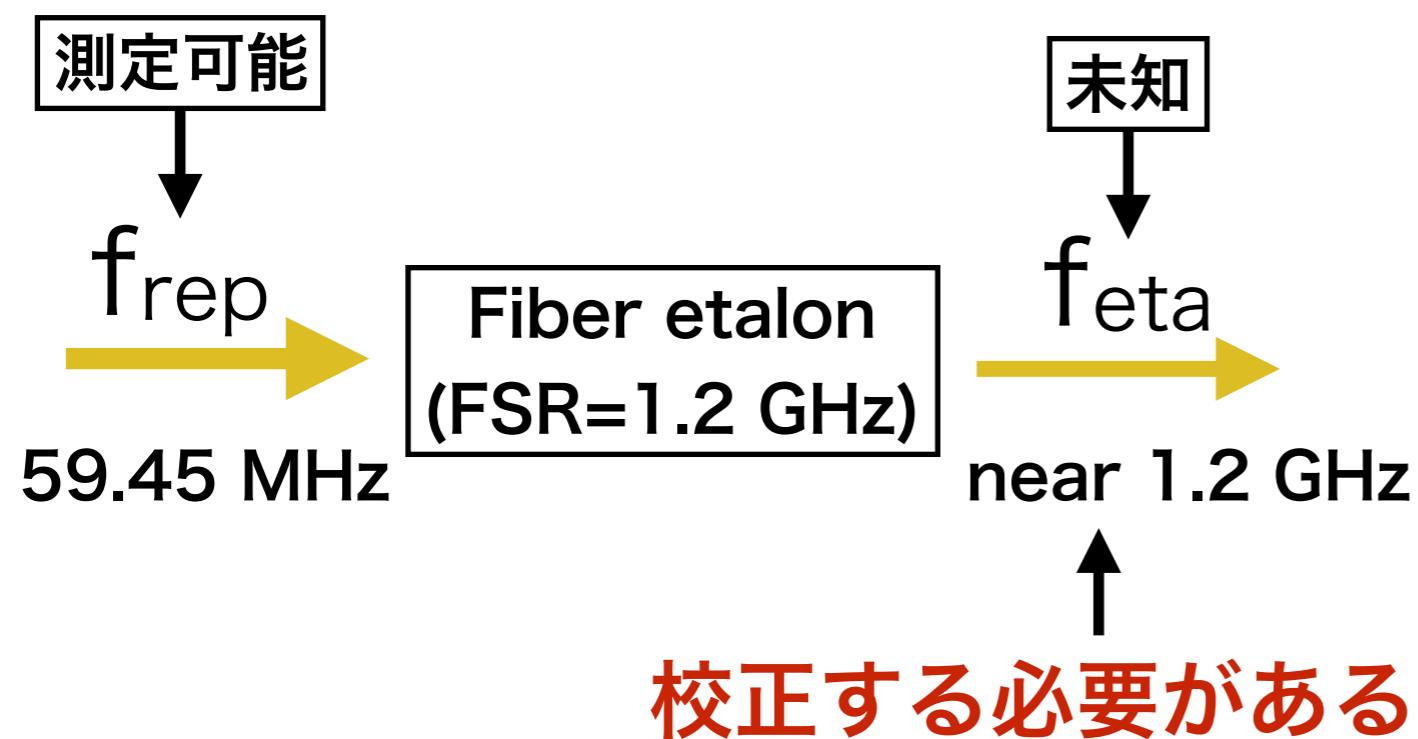
自由スペクトル幅(FSR)

$$FSR = \frac{c}{2nd}$$

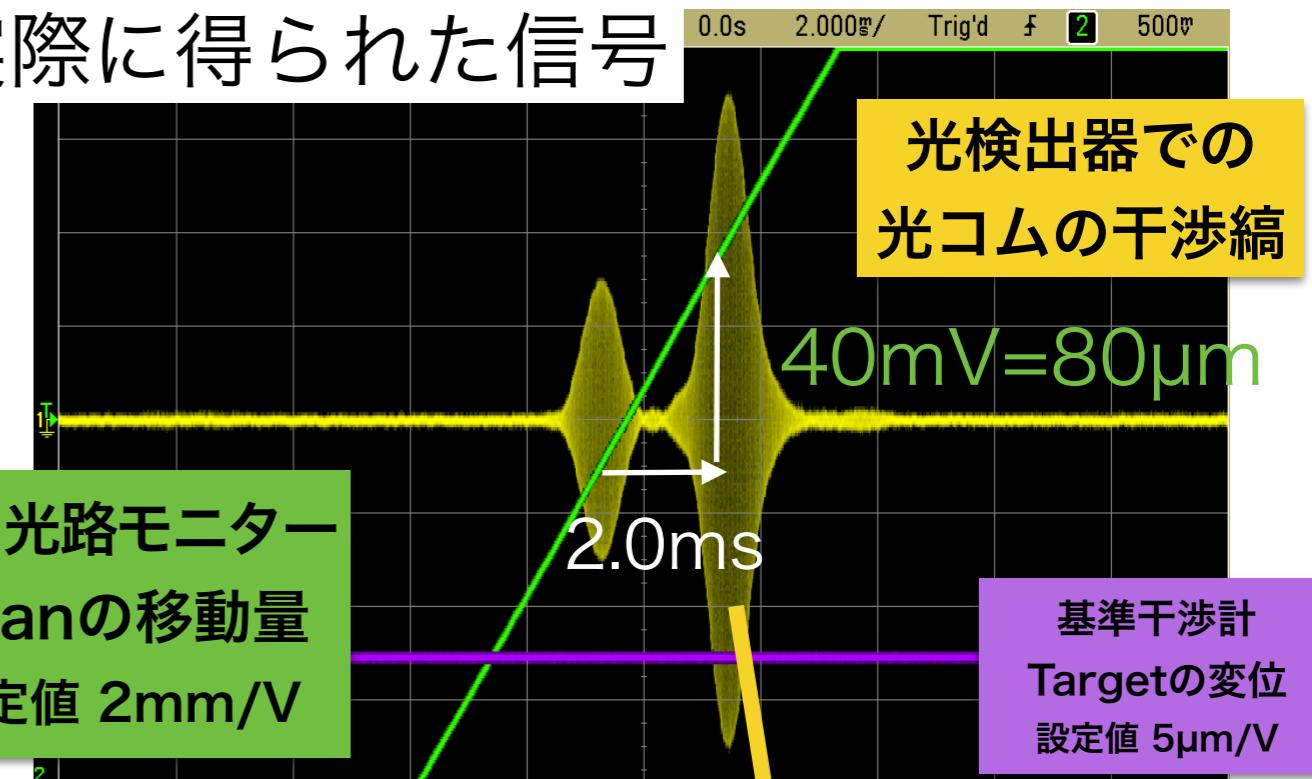


■ ファイバーエタロンを使うことで f_{rep} を高周波FSRにできる

- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数 f_{eta}
- 高反射率(~99%)を使用 → 透過光の強度が小さい
- 低反射率(85%)を使用 → 透過曲線の幅が広い
- 複数の周波数が影響 → f_{eta} の値を決める必要



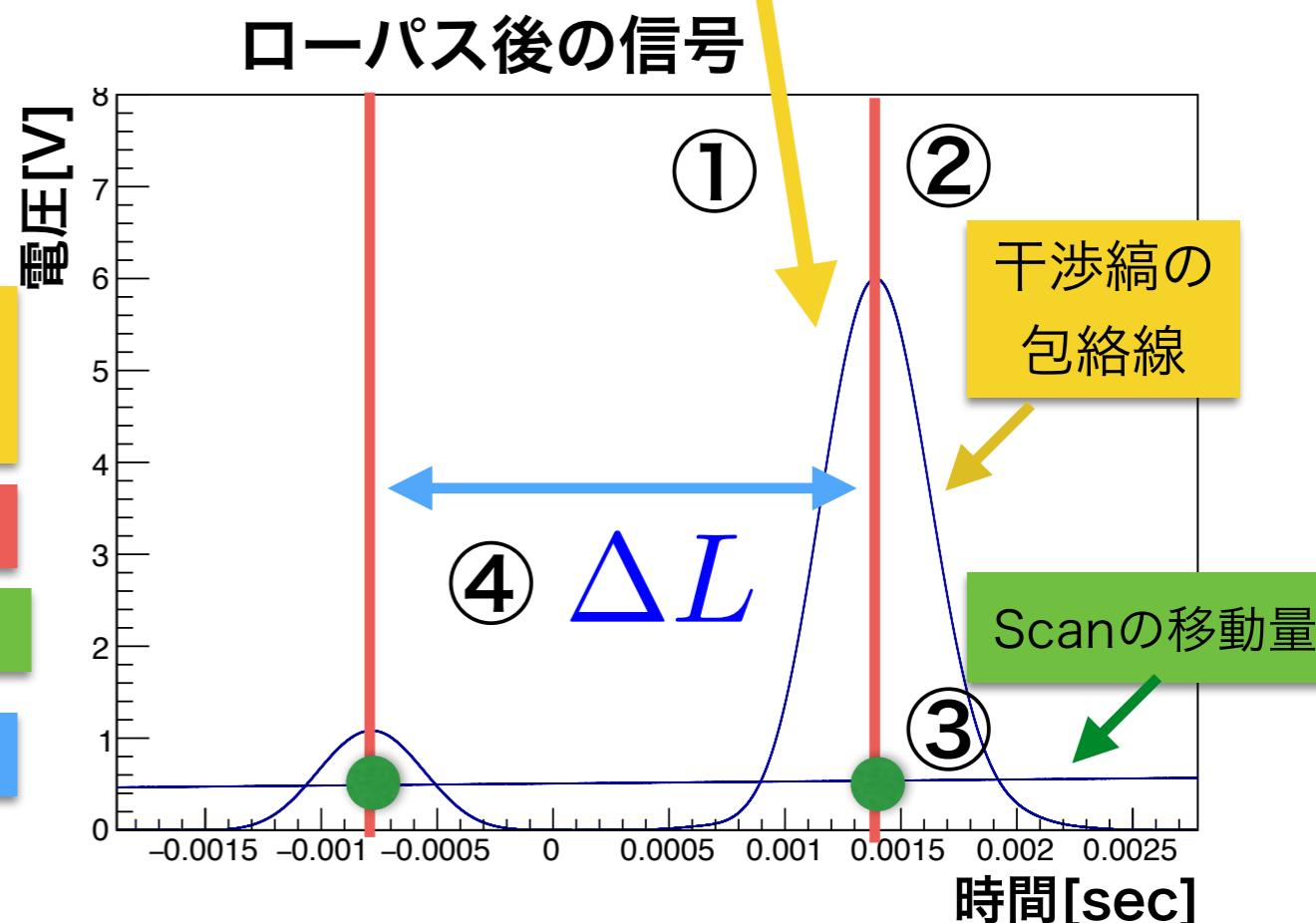
実際に得られた信号



- オシロスコープで得られる信号
- 掃引光路モニターと基準干渉計で測定した長さは、設定値に対応した電圧値として得られる。

解析手法

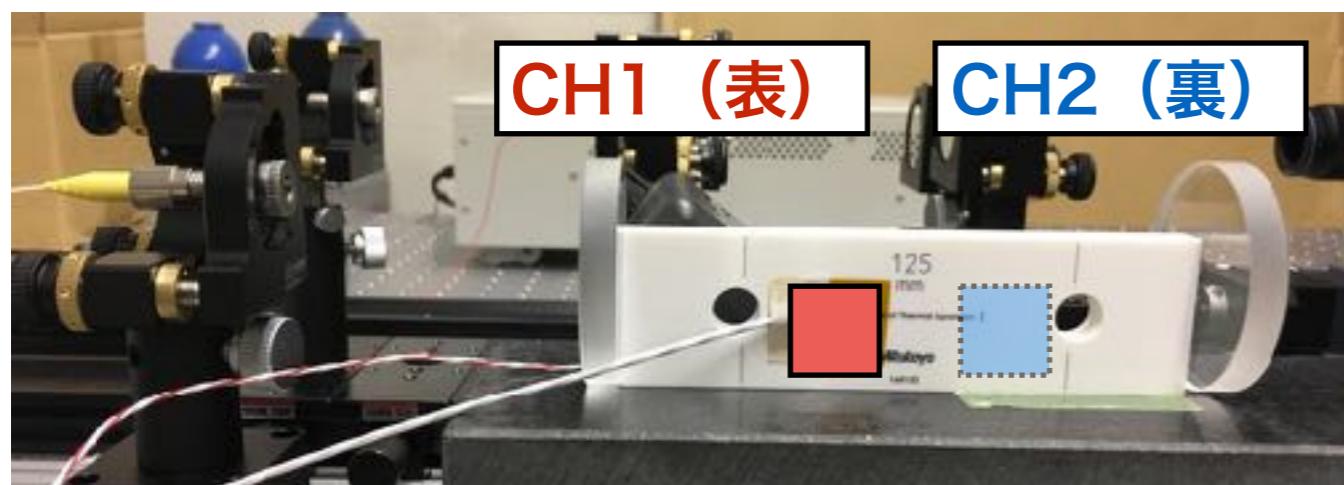
- ①干渉縞にFFTを行い、ローパスをかけることで包絡線を取り出す
- ②微分値が正から負になるピーク時間を求める
- ③ピークと同時刻のScanミラーの移動量を読む
- ④Scanミラーの移動量の差を ΔL を求めた



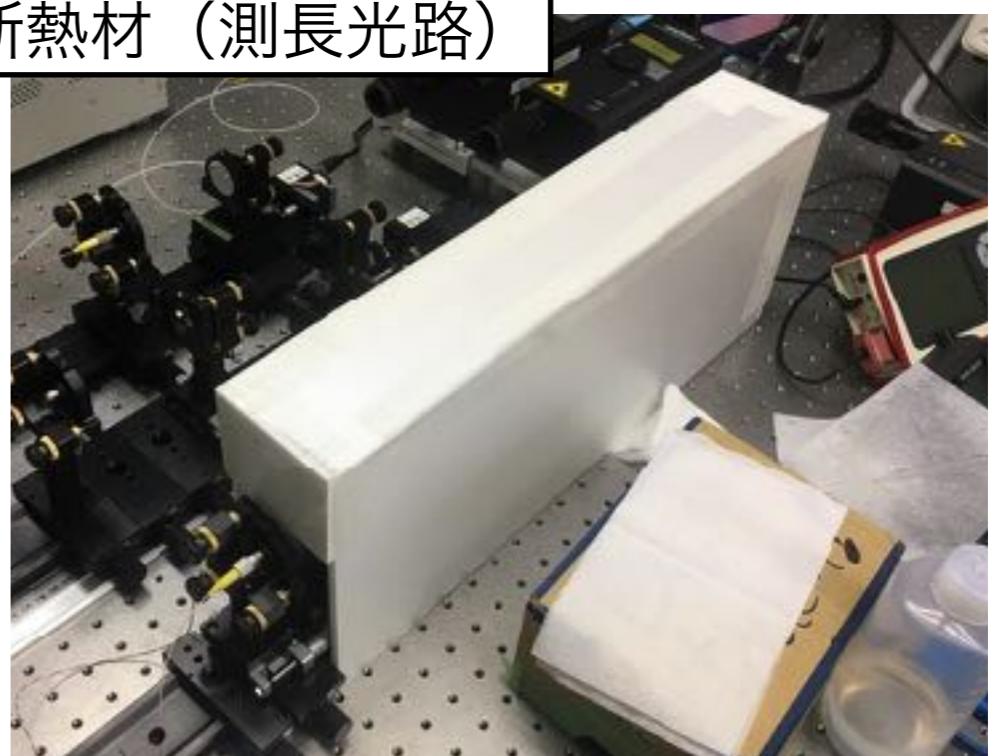
ゲージブロックの温度補正

33

- ゲージブロックは温度補正をして扱うものである。
- 今回使用するゲージブロックは $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ で $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度膨張するもの。
- 温度勾配も考慮するために2つの白金測温抵抗体を使用。
- 測定した結果、温度は $21.96 \pm 0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。



断熱材（測長光路）



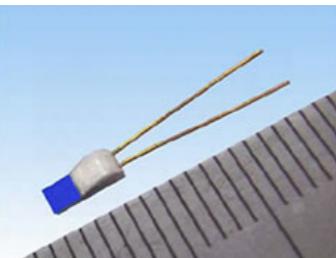
CH1

白金測温抵抗体

林電工製

RZM(TF)-1TF(001)+2TF(02)-A

JIS-A級相当



CH2

白金測温抵抗体

オメガエンジニアリング

SA1-RTD-120

JIS-A級相当



使用したゲージブロック(Mitsutoyo)

呼び寸法：125 mm , 材質：セラミックス

熱膨張係数 α : $9.219 \times 10^{-6} / \text{K}$

校正証明書付 (1706391号)

■ ゲージブロックの長さ

呼び寸法

中央寸法差

温度補正

$$L_{GB} = 125 \text{ mm} + 0.11 \mu\text{m} + 2.26 \mu\text{m} (@ 21.96 ^\circ\text{C})$$

■ 不確かさ要因の表(包含係数 k=1)

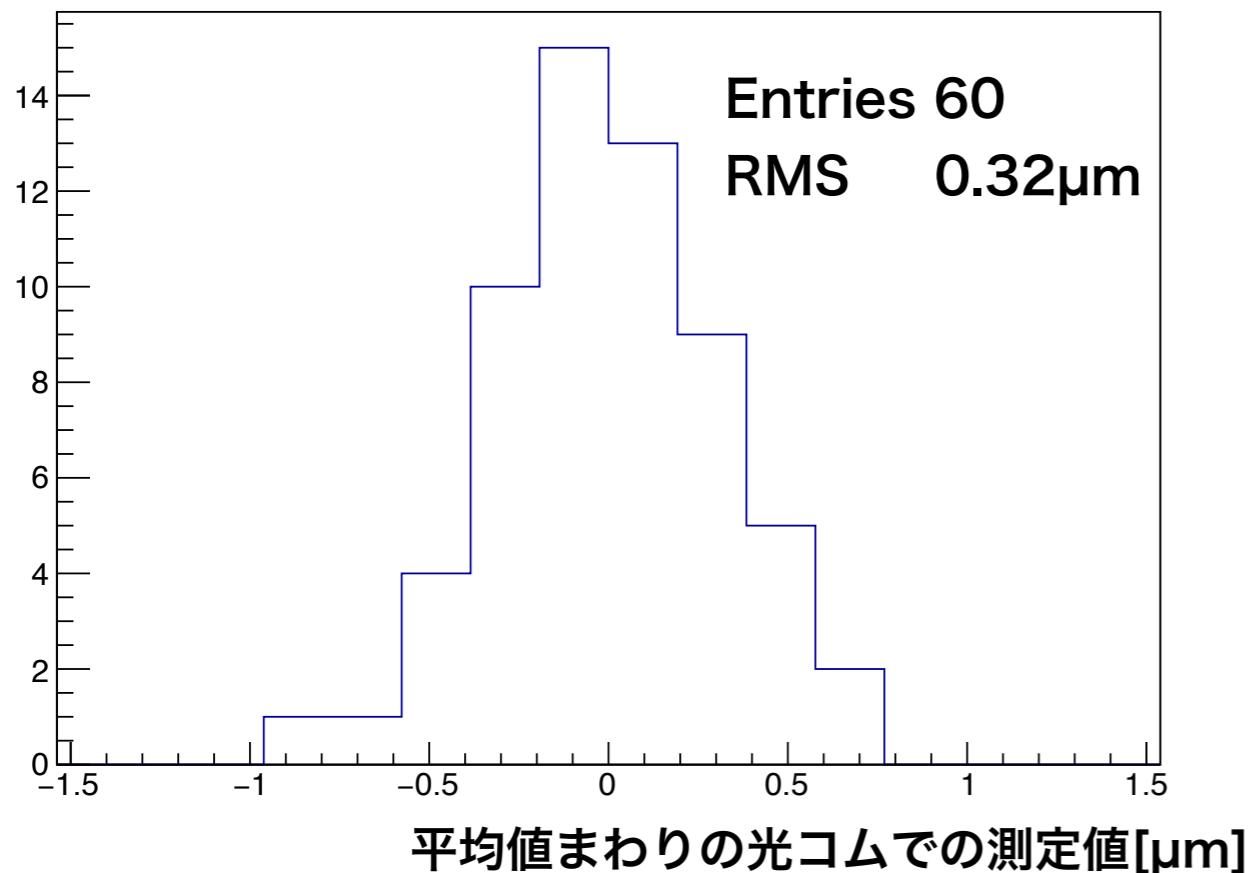
不確かさ要因	不確かさ	長さの不確かさ [μm]
寸法差幅	0.03 μm	0.03
校正不確かさ	0.017 μm	0.017
熱膨張係数の不確かさ(α)	$0.018 \times 10^{-6} / \text{K}$	0.008
測定温度の不確かさ(T)	0.17 K	<u>0.2</u>
合成標準不確かさ		0.2 (<目標値 1 μm)

$$\underline{L_{GB} = 125\ 002.4 \pm 0.2 \mu\text{m}}$$

■ 目標の不確かさ(1 μm)を満たす長さ基準を用意できた。

■ 相対距離比較測定で得られたデータを解析した結果

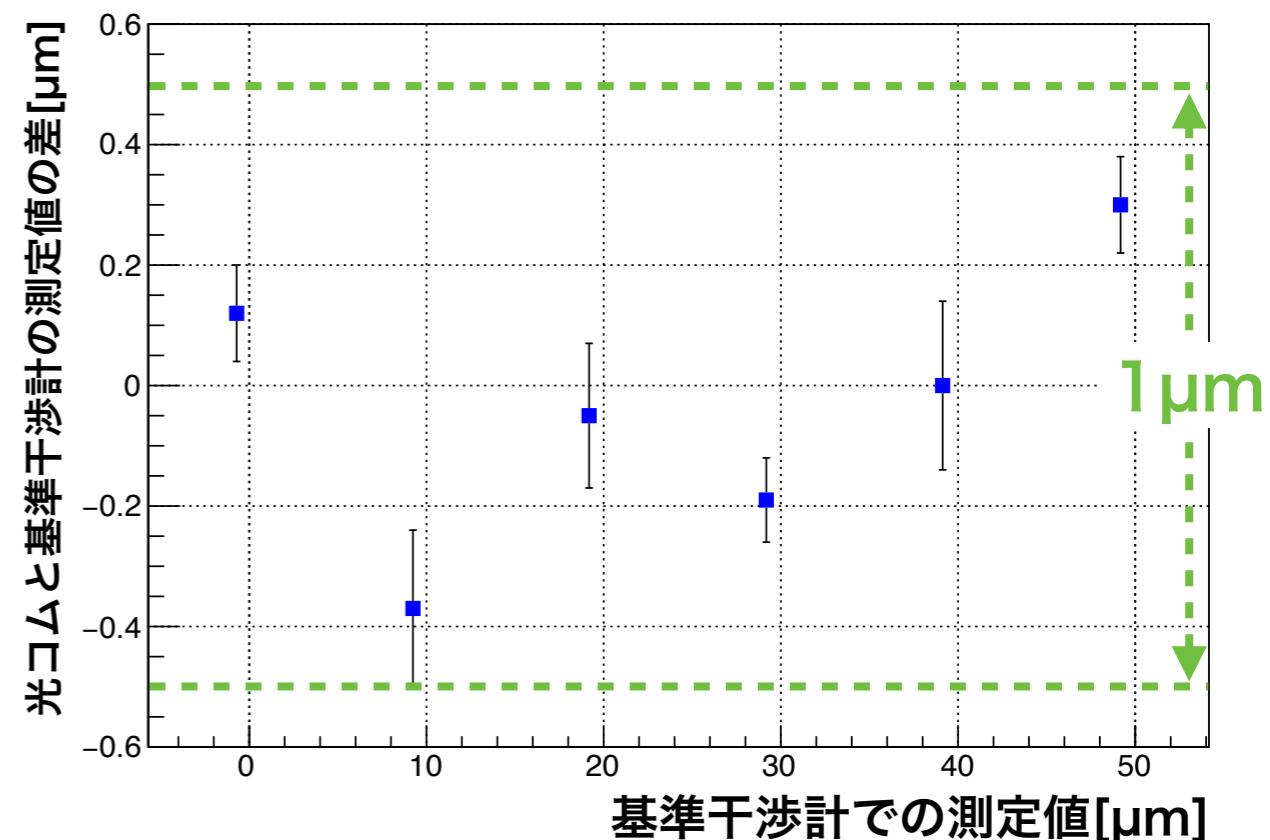
■ 光コムの測定データのバラつき



■ 標準偏差は $0.32 \pm 0.04 \mu\text{m}$

■ 1回当たりの測定(統計)精度は要求を満たしている。

■ 光コムと基準干渉計で測定した変位の差



■ 各測定点の間のRMSは $0.21 \pm 0.9\mu\text{m}$

■ 50 μm の可動域に対して、目標の精度を達している

■ 2つの干渉縞間の距離 ΔL の不確かさは $\sigma \Delta L = 0.3 \mu\text{m}$

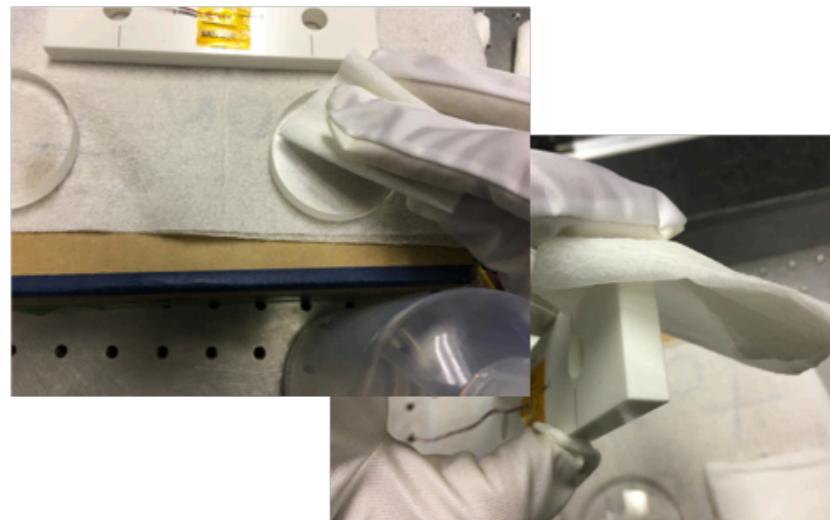
■ ゲージブロックのセットアップ再現性試験

■ 再現性を高めるため、以下の手順で組み立てた。

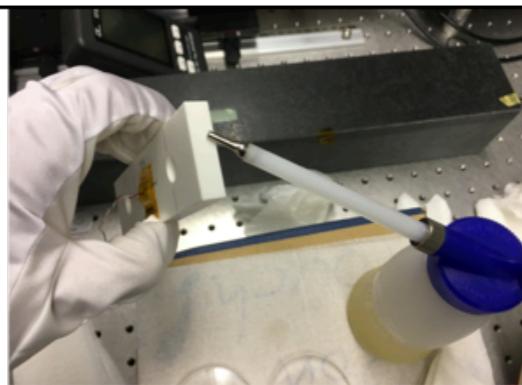
1、GBとガラス板を用意



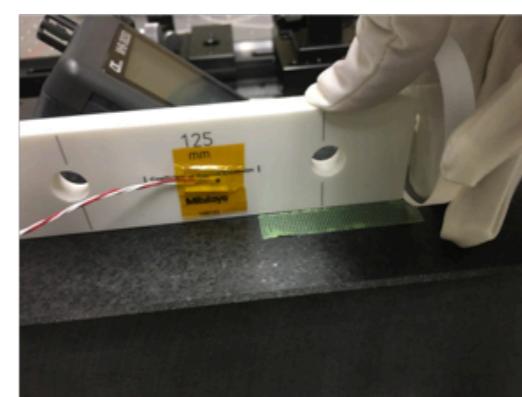
2、エタノールでGB及びガラス板を拭く



3、必要に応じて、GBに機械油を少量塗布し、2と同様の手法で拭く



4、GBとガラス板をリング（接着）する



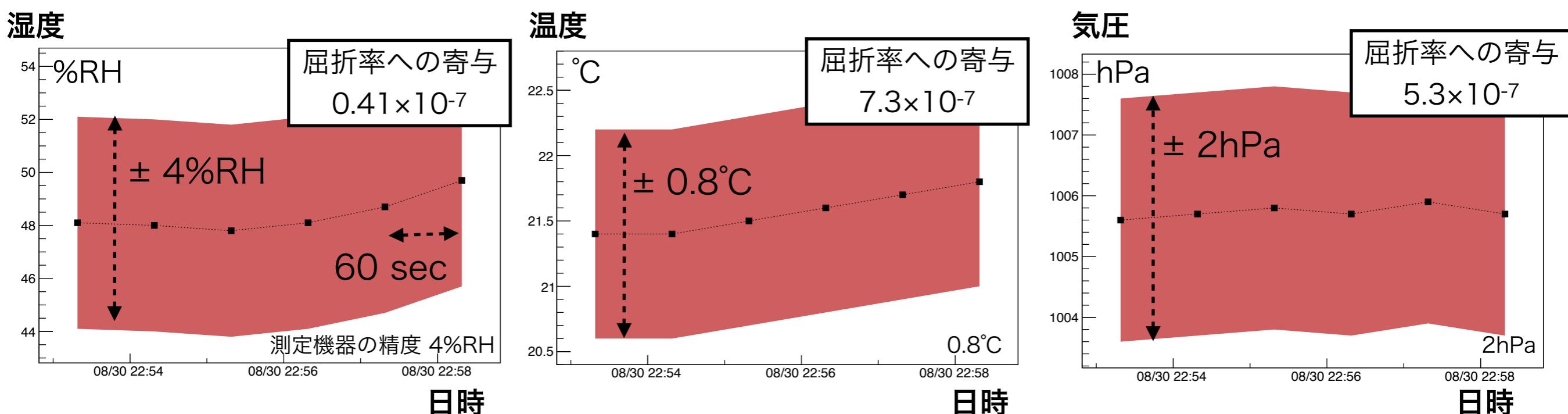
■ 5回測定を行い $1.9 \mu\text{m}$ (RMS) のばらつきがあった。

■ 長さ基準系の不確かさは $\delta L_{\text{GB}} = 1.9 \mu\text{m}$

空気中の屈折率 n_{air} の不確かさ

37

- 温度、湿度、気圧をモニターし、Ciddorの式から空気中の屈折率を求めた。(CO₂は 450 ppm (標準大気) と仮定)
- 温度・湿度・気圧計の不確かさが空気の屈折率の不確かさを占めている。



$$n_{\text{air}} - 1 = (264.7 \pm 0.9) \times 10^{-6}$$

$$\text{相対不確かさ } \sigma n_{\text{air}} / n_{\text{air}} = 0.9 \times 10^{-6}$$

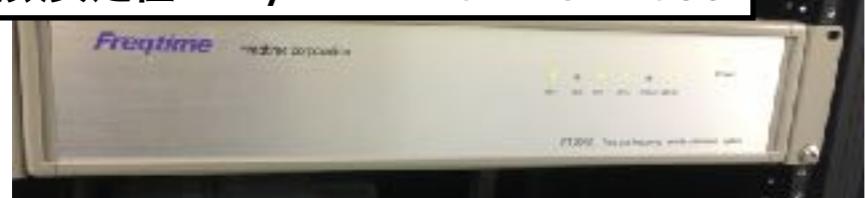
繰り返し周波数 f_{rep} の不確かさ

38

■遠隔時間校正標準器と同期することで、安定した f_{rep} を得ることができる。

遠隔時間校正標準器

周波数安定性 $\Delta f/f < 2 \times 10^{-12} @ 1 \text{ sec}$



クロックの同期
周波数カウンター

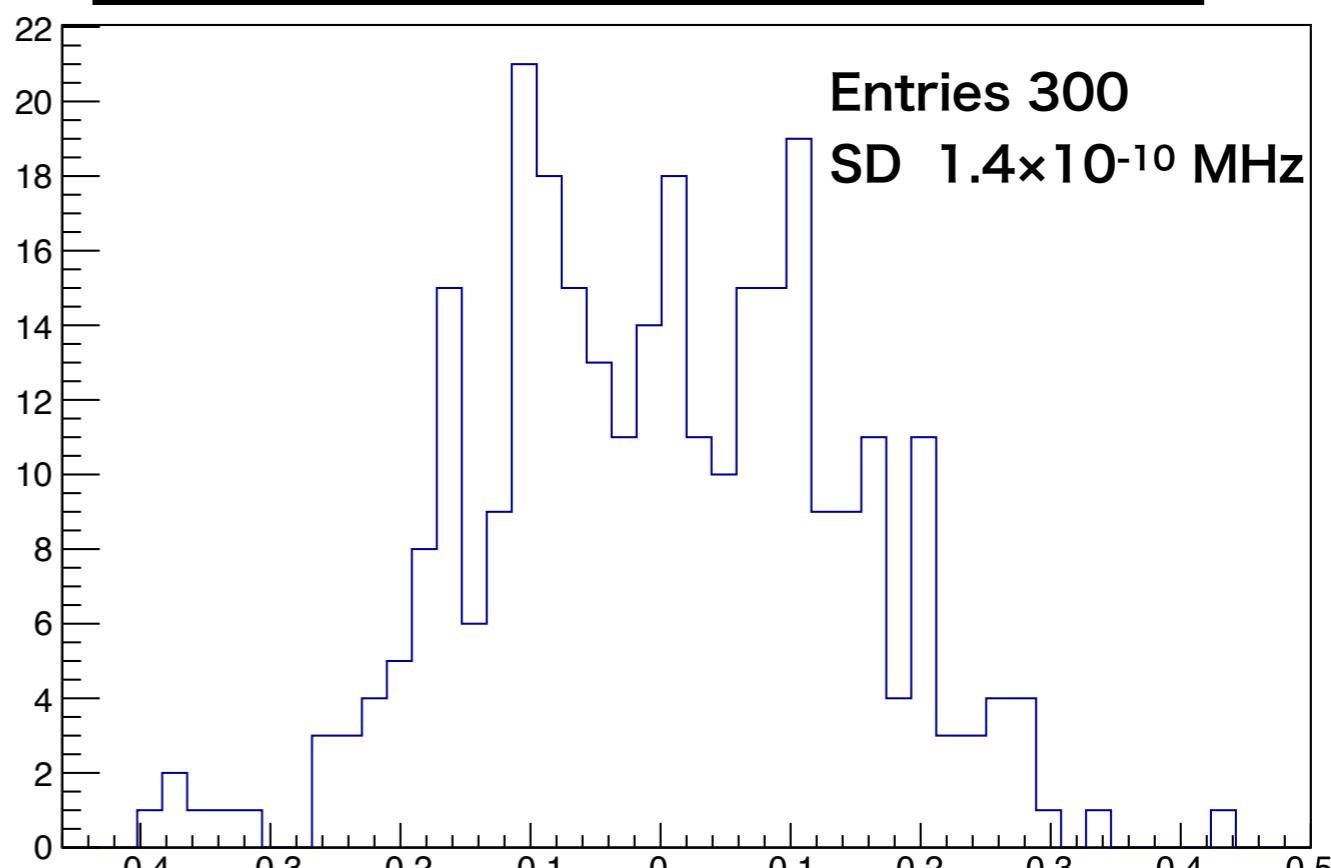
Signal Generator

内蔵PDからの信号
RF 同期信号

光コムパルスレーザー発生器



同期した繰り返し周波数 f_{rep} の分布



繰り返し周波数の中心値まわりの分布 [mHz]

光コムの繰り返し周波数 $59.452\ 439\ 999\ 98(14)$ [MHz]

相対不確かさ 3.0×10^{-12} $\rightarrow f_{\text{eta}}$ 校正に影響しない

■ モード同期法

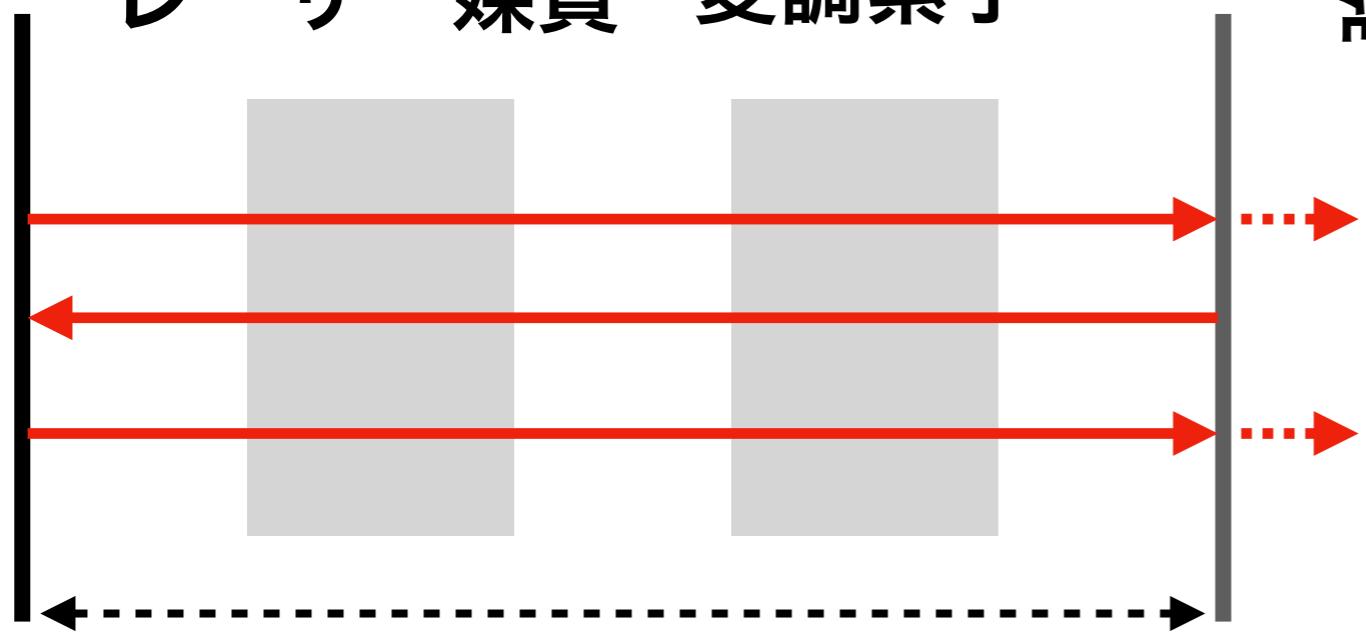
■ 広いスペクトル幅を持つレーザー媒質と共振器を利用

$$I = \frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + \frac{E_1 E_2}{2} \int_0^{\tau_D} dt \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1(t) - \phi_2(t)]$$

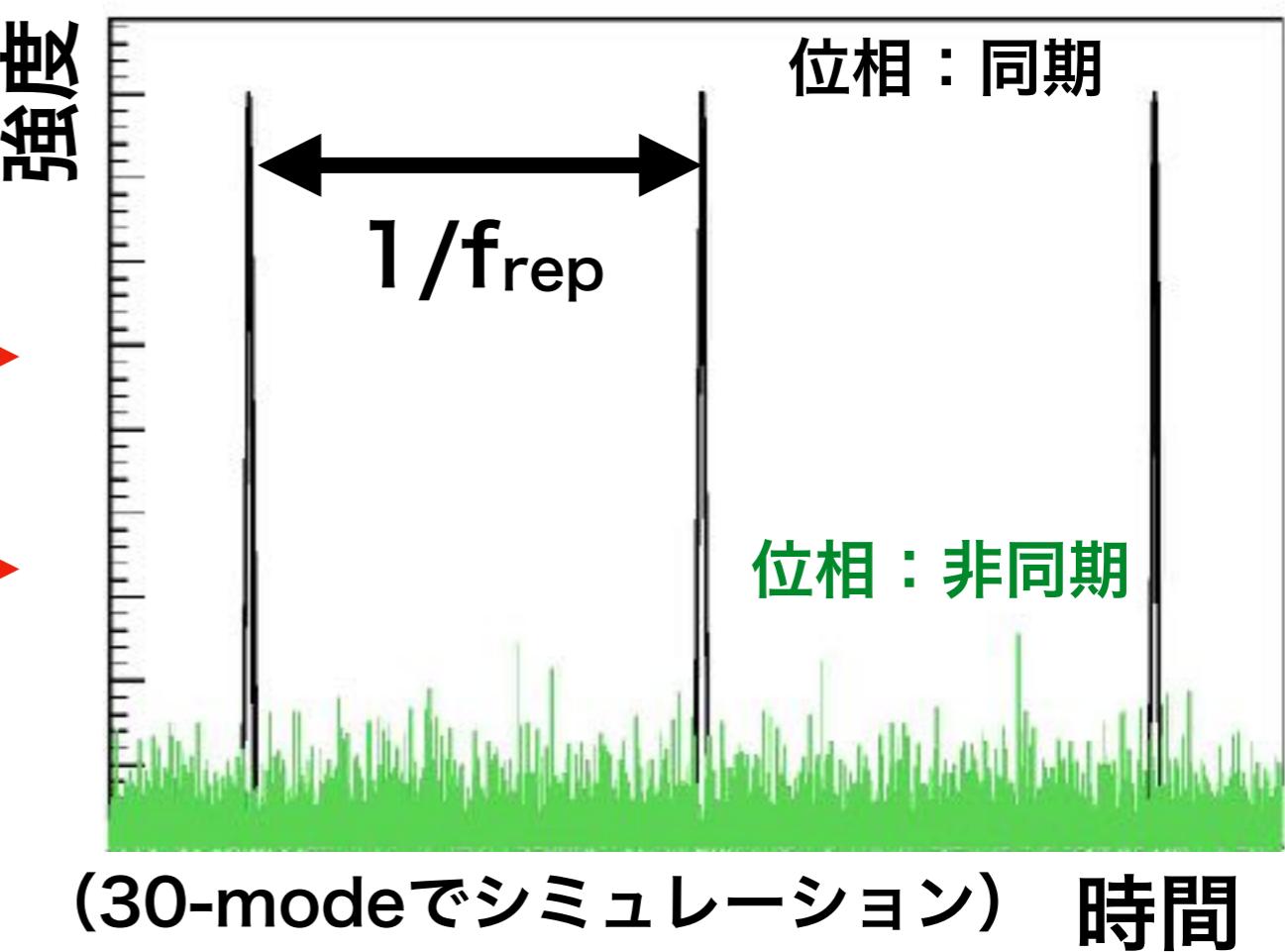
(2-modeの場合)

位相を同期することで
強いパルス光が得られる

レーザー媒質 変調素子



共振器長 L



(30-modeでシミュレーション) 時間

■ 電子の電気双極子モーメント $d_e(\text{SM})$, $d_e(\text{exp})$

$$d_e(\text{SM}) \sim 10^{-38} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

$$d_e(\text{exp}) < 0.87 \times 10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}, \text{CL} = 90\%$$

■ 電子EDMの上限から期待されるミューオンのEDM

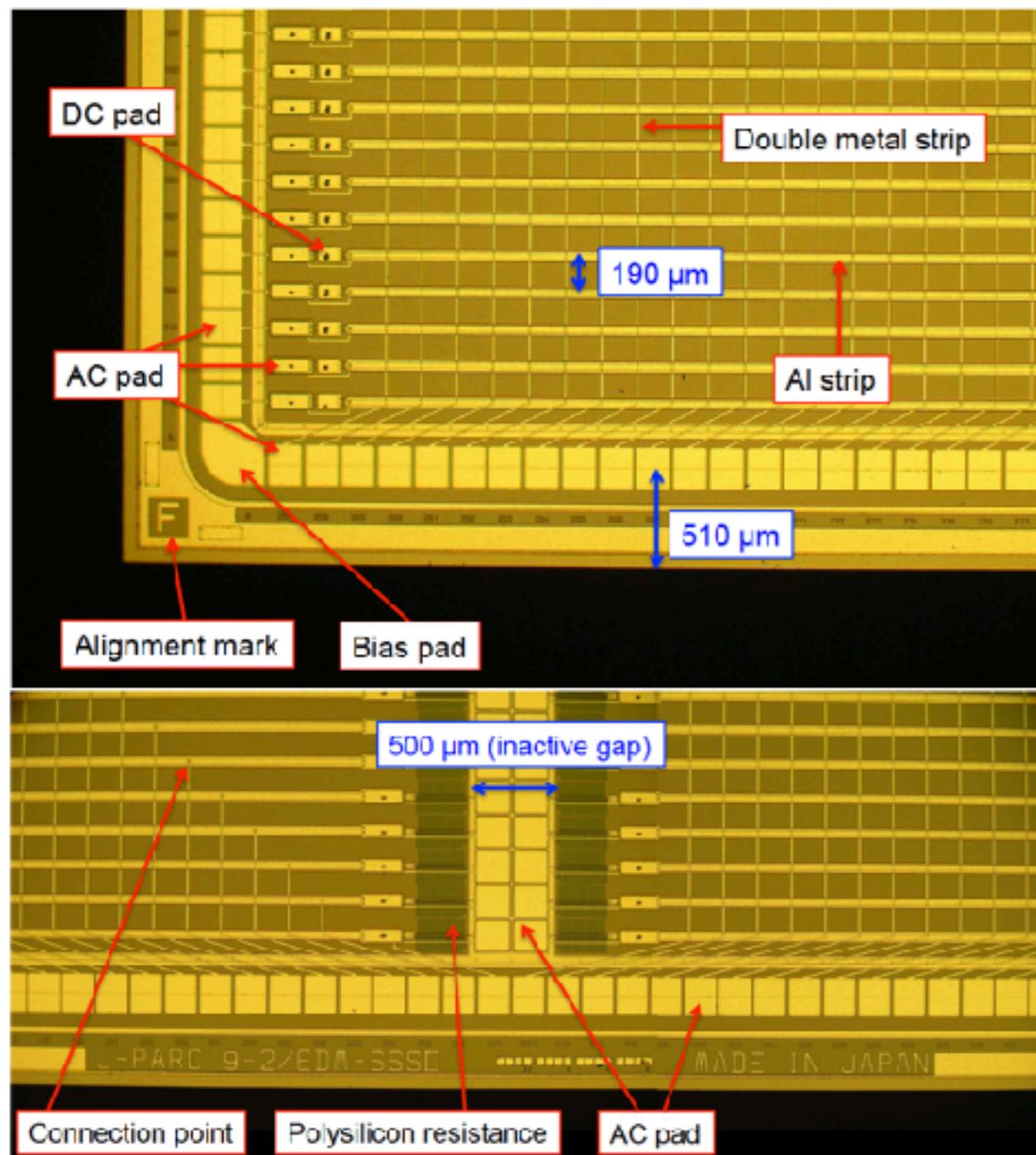
$$d_\mu(\text{exp}) < (m_\mu/m_e) d_e \sim 10^{-26}$$

$$d_\mu(\text{exp}) < (m_\mu/m_e)^2 d_e \sim 10^{-24}$$

$$d_\mu(\text{exp}) < (m_\mu/m_e)^3 d_e \sim 10^{-22}$$

■ 質量比の3乗でスケールされるならば発見できる可能性有

シリコンストリップセンサーの仕様 41



Block	Parameter	Value
Analog	conversion gain	90 mV/fC
	dynamic range	4 MIP
	pulse width	80 ns
	peaking time	25 ns
	time walk	<5 ns
	noise	< 1600 e ⁻
Digital	number of channel	128
	reference clock	200 MHz
	sampling period	5 ns
	event buffer length	8k (40.96 μs)
	serial outputs rate	100 Mbps
Mechanical	chip size	<9 mm × 5 mm
	thickness	~300 μm
	pad pitch	60 μm
Electrical	supply voltages	±0.9 V, 2.4 V, GND
	power consumption	<5 mW/ch

Table 10.5: Specifications of the Slit128A

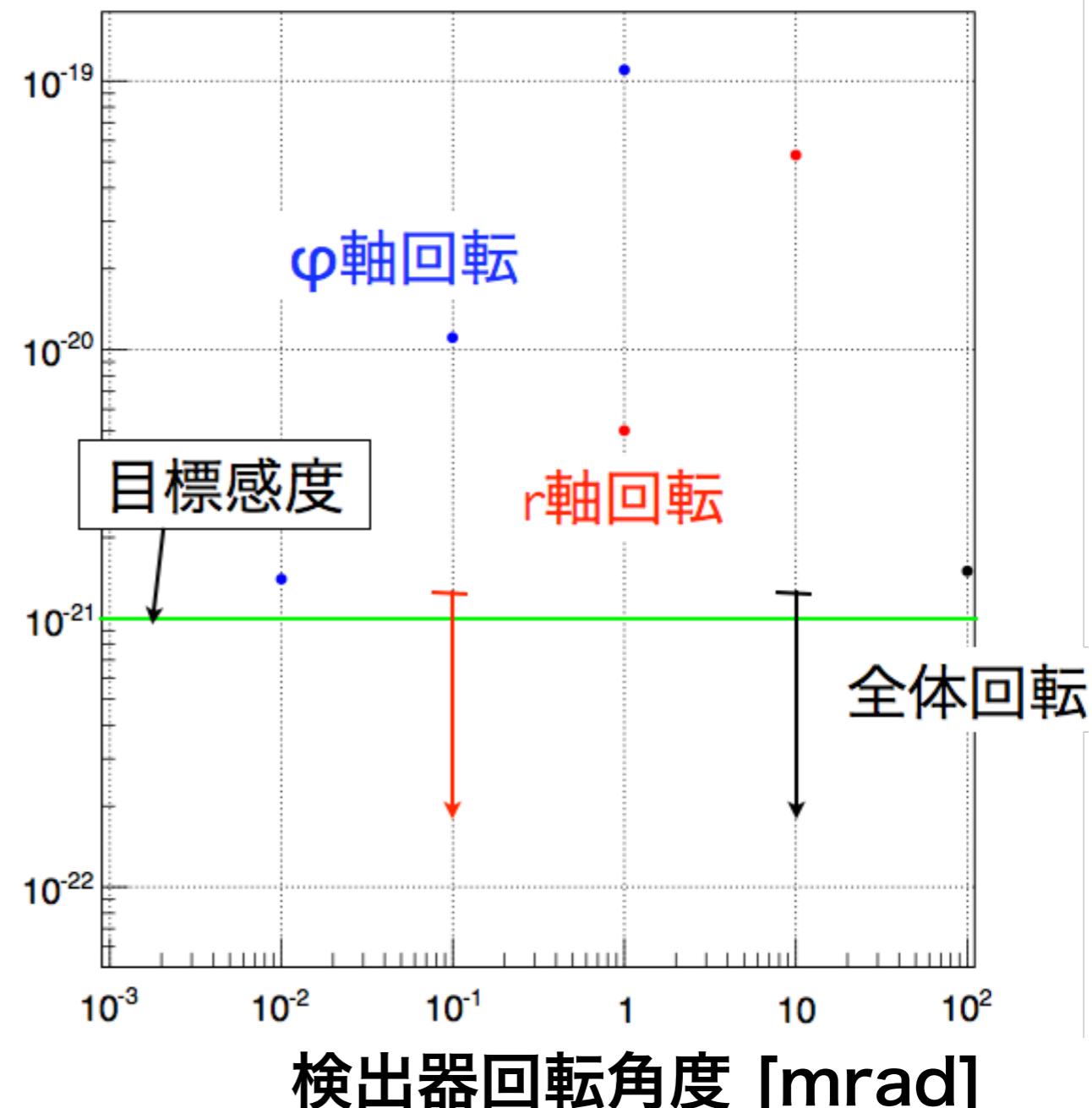
■ 4つのパターンの傾き方にて、検出器角度を変えてEDM信号の大きさをシミュレーションした。

■ 最も影響するのは、EDMによるスピン回転面の傾きと同じ ϕ 軸回転である。

■ 目標感度 $10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$ よりも低い偽EDM信号にするには $10 \mu\text{rad}$ よりも小さい傾きの必要がある。

傾き方	傾けた角度	A_{EDM}	相当する EDM の大きさ d_μ
検出器全体回転	100 mrad	$(3.2 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-21} \text{ e cm}$
	10 mrad	$(1.0 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	1 mrad	$(0.7 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
r 軸回転	1 mrad	$(-1.1 \pm 0.2) \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-21} \text{ e cm}$
	0.1 mrad	$(-0.6 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	0.01 mrad	$(0.4 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	0.001 mrad	$(0.5 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
ϕ 軸回転	1 mrad	$(2.41 \pm 0.02) \times 10^{-4}$	$1.10 \times 10^{-19} \text{ e cm}$
	0.1 mrad	$(2.46 \pm 0.17) \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-20} \text{ e cm}$
	0.01 mrad	$(3.0 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-21} \text{ e cm}$
	0.001 mrad	$(0.7 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
z 軸回転	100 mrad	$(0.05 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	10 mrad	$(0.5 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	1 mrad	$(0.5 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$

偽EDM信号の大きさ [$\text{e} \cdot \text{cm}$]



ref. 西村昇一郎, 修士論文, 東大理

- EDM信号は上方向と下方向に放出される陽電子数の非対称度 A_{UD} として得られる。

$$A_{UD} = \frac{N_{\text{up}} - N_{\text{down}}}{N_{\text{up}} + N_{\text{down}}}$$

- 非対称度の振動はg-2の信号と同じ周波数であるが、位相は $\pi/2$ ずれたものとして得られる。

$$A_{UD} = \frac{A_{\text{EDM}} \sin(\omega t + \phi)}{1 + A \cos(\omega t + \phi)}$$

- EDM測定の統計誤差 $1.3 \times 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$ に対応する A_{EDM} の大きさは $A_{\text{EDM}} \sim 1.6 \times 10^{-6}$

■ 必要なパスの数（見積もり）

■ 対向する1組2枚のベーン

- ベーン上の6点

- 6つの参照点

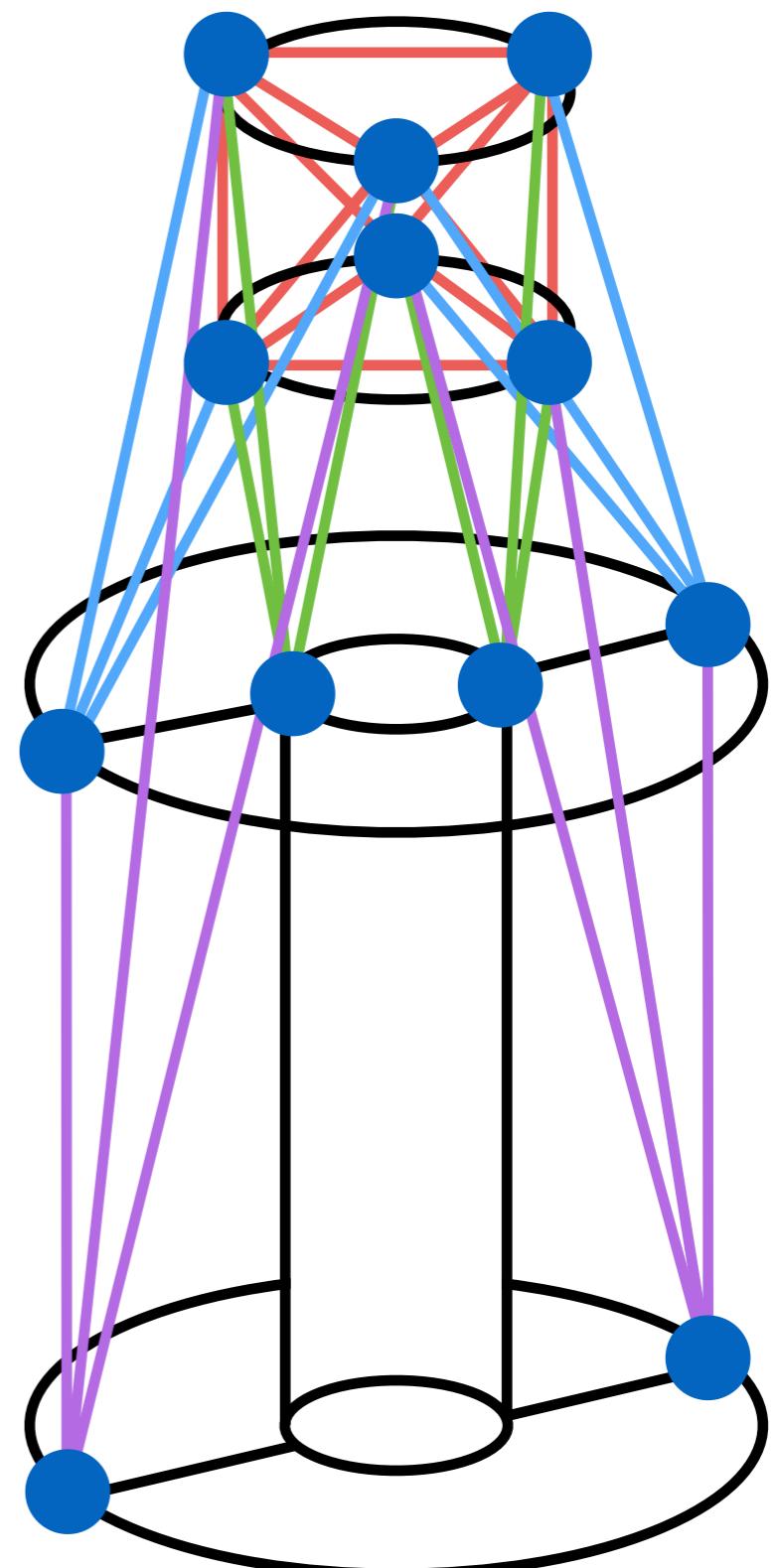
→ 12点, 30パス

■ 対向する24組48枚のパス

- ベーン上の6点 × 24

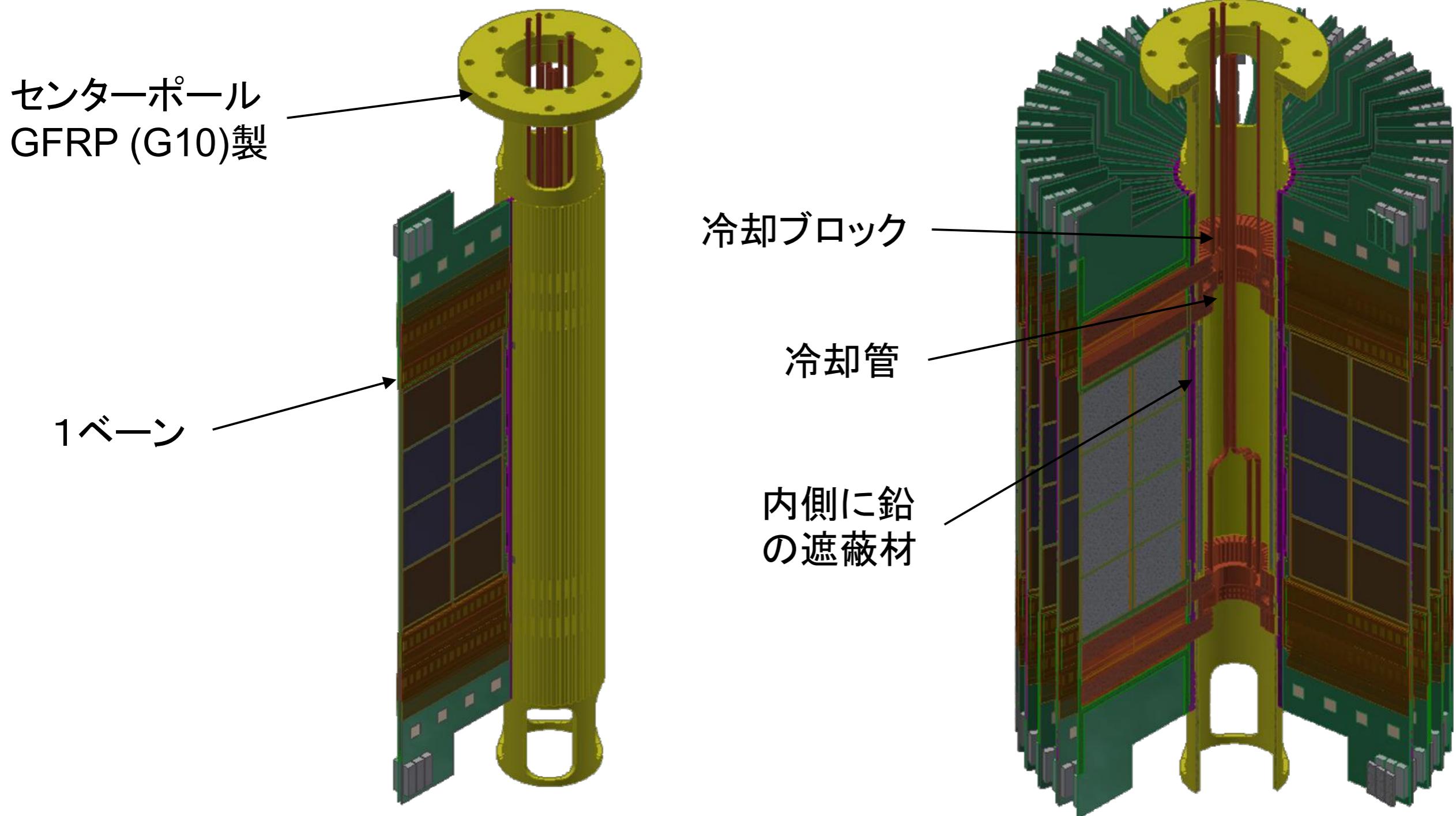
- 6つの参照点

→ 150点, 444パス



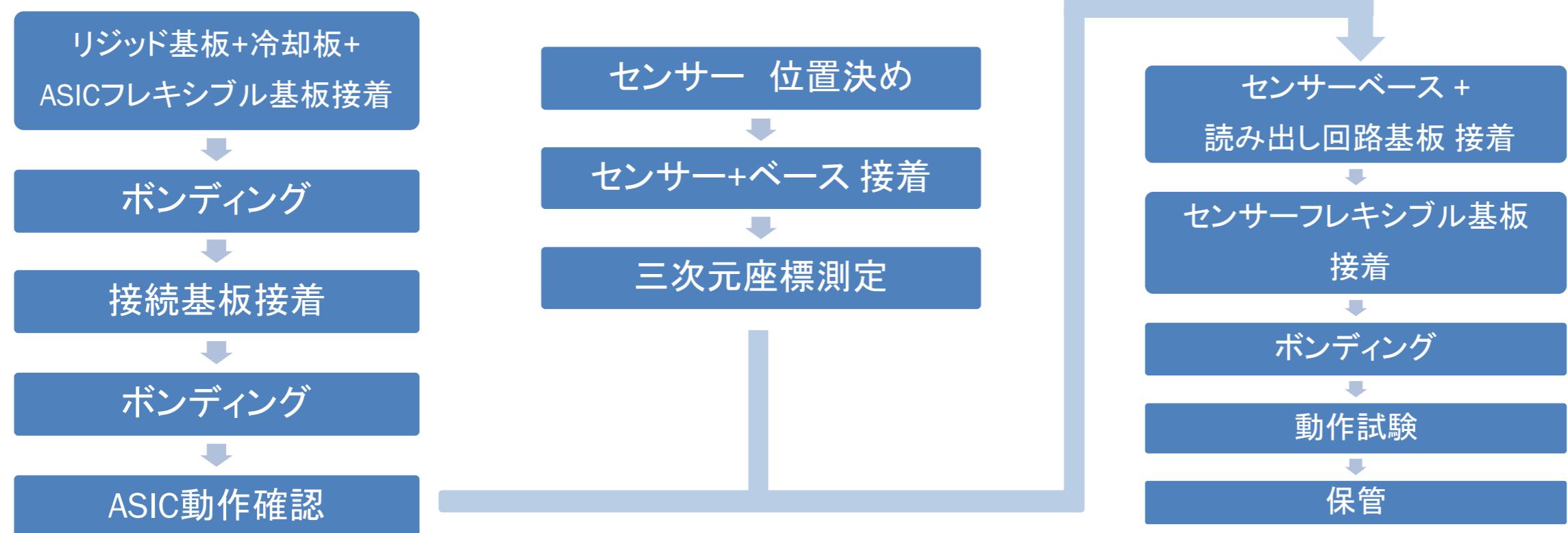
検出器構造

- 以上をもとに、実機の構造設計開始



組み立て工程の開発

- 実機の構造を踏まえて、組み立て工程の開発を行う
 - 最も厳しい要求はEDM測定での系統誤差を $10^{-21} \text{ e}\cdot\text{cm}$ 以下に抑えること→センサーの傾きを $10 \mu\text{rad}$ 以下に抑える
 - 検出器アライメントモニターの開発@安田(東大理),本学会 24pK206-6
 - これを~100 mmのサイズで実現するため、 $1 \mu\text{m}$ の精度を目指した検出器組み立て工程を開発中



- 1センサーから成る検出器を実機仕様の工程で組み立て → 組み立て治具の開発、組み立て精度の確認