

傾斜角積分法による非球面ミラーの 超精密形状計測法の研究

PF Seminar

2007年5月21日

高エネルギー加速器研究機構・機械工学センター

東 保男、久米 達哉、江並 和弘、上野 健治

大阪大学大学院工学研究科

遠藤 勝義、打越純一、鷹家 優一、森 勇蔵

発表内容

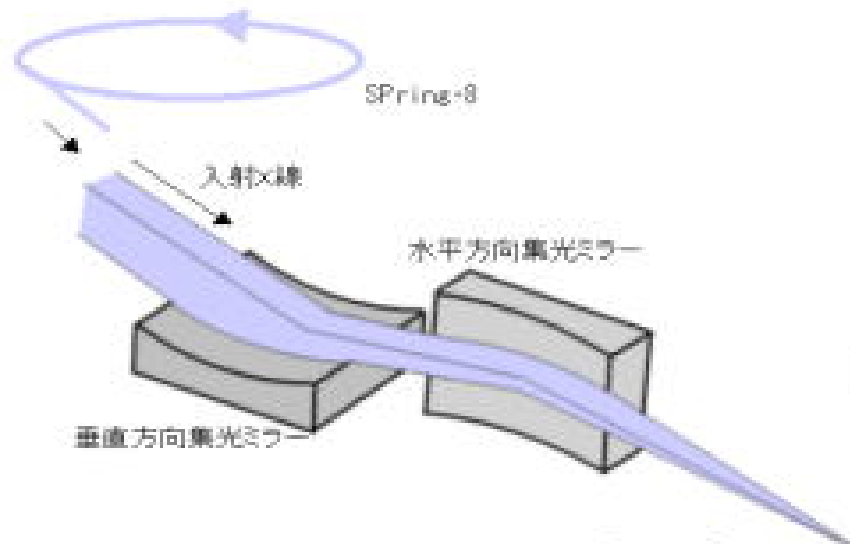
- 背景と目的
- 本測定原理と形状計測装置
- 形状計測装置の性能評価
- 平面、楕円、球面ミラー形状計測による性能評価
- 小型X線源計画に用いられる軸外し放物面ミラー計測への挑戦
- まとめ

本研究の背景と目的(1)

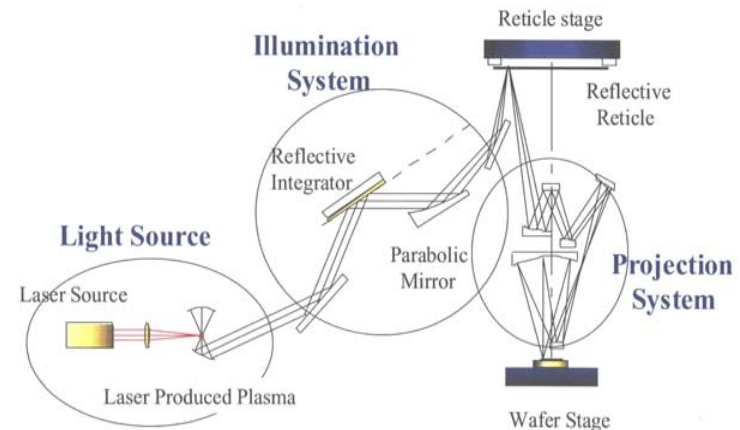
第3世代放射光施設の稼動

- ・ 高コヒーレントなレーザーに近いX線を扱えるようになった
- ・ 物性・生物・医学・製薬分野での幅広い利用が期待されている

X線集光光学系



EUV露光システム



- ・ X線ミラー、EUVL用ミラーにはPV1nmレベルの形状精度が要求される
- ・ 楕円面・トロイダル面といった非球面形状が必要である

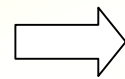
本研究の背景と目的(2)

加工

数値制御プラズマCVM
数値制御EEM

1nmオーダーの精度で
自由曲面を創成できる。

平面や球面を基準面とした干渉計測
スロープを計測するLTP(Long Trace Profiler)



非球面量の大きい形状の計測が困難
精度が不十分

参照面を用いず、自由曲面形状ミラーの法線ベクトルを
0.1 μ radの精度で測定することができる形状計測装置を開発する

本研究の歴史

- 本郷俊夫、加藤春夫(弘前大学 課長)、星野英夫(長岡科学技術大学)、東保男(KEK):

EEM (弾性放射加工)による放射光用ミラーの試作、
昭和55年(27年前)度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集、pp815-816. 北海道大学

- 森勇蔵(阪大名誉教授)、杉山和久(高知高専教授)、山内和人(阪大教授)、西川和仁、酒井啓至(シャープ技術研究所主任研究員)、本郷俊夫、東保男:

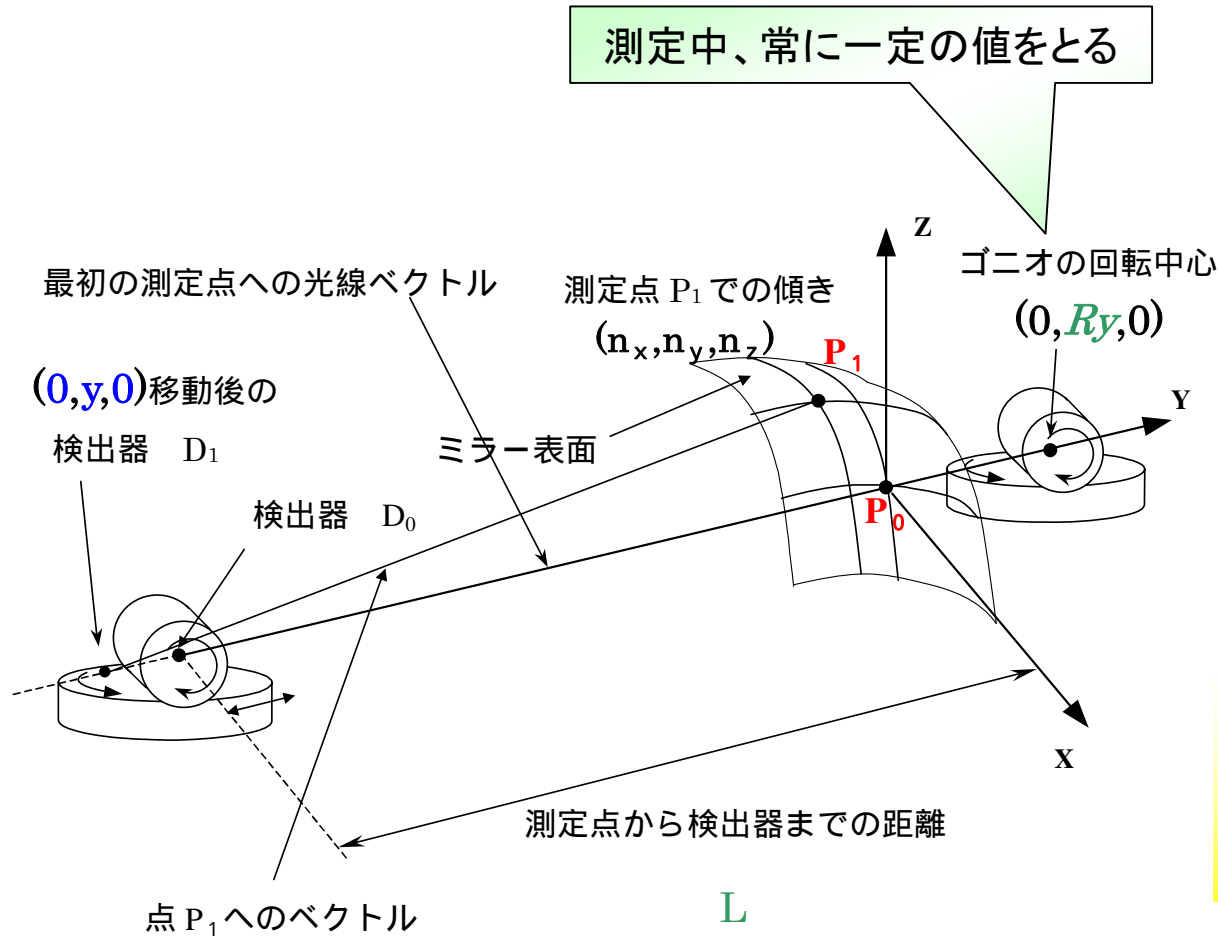
シンクロトロン放射光用ミラーの超精密形状測定装置の開発 —測定の基本原理解—、

昭和59年度(23年前)精機学会秋季大会学術講演会講演論文集、pp403-404. 東京大学

国内外での開発状況

- **Long Trace Profiler (BNL, LBL, Argonne, Spring8) 2-D**
Slope measurement: $0.5\mu\text{rad}$
- **Ultra-Precision 3D-CMM Based on 3-D Metrology Frame (NIKON) 400x400x100 mm**
測定再現性: 2.1nm (σ), 総合不確かさ: $\pm 19.5\text{ nm}$ ($K=2$)
- **原子間カプローブを用いた3D-CMM (松下電器産業(株))**
400x400x100 mm
測定精度: $\sim 50\text{ nm}$
- **3D-CMM (CANON)**
- **非球面干渉計システム(走査型)**
キャノンマーケティングジャパン (株)
- **Relative Angle Determinable Stitching System**
- **PDI (Point Diffraction Interferometry)**

超精密非球面形状測定法の原理



基本原理

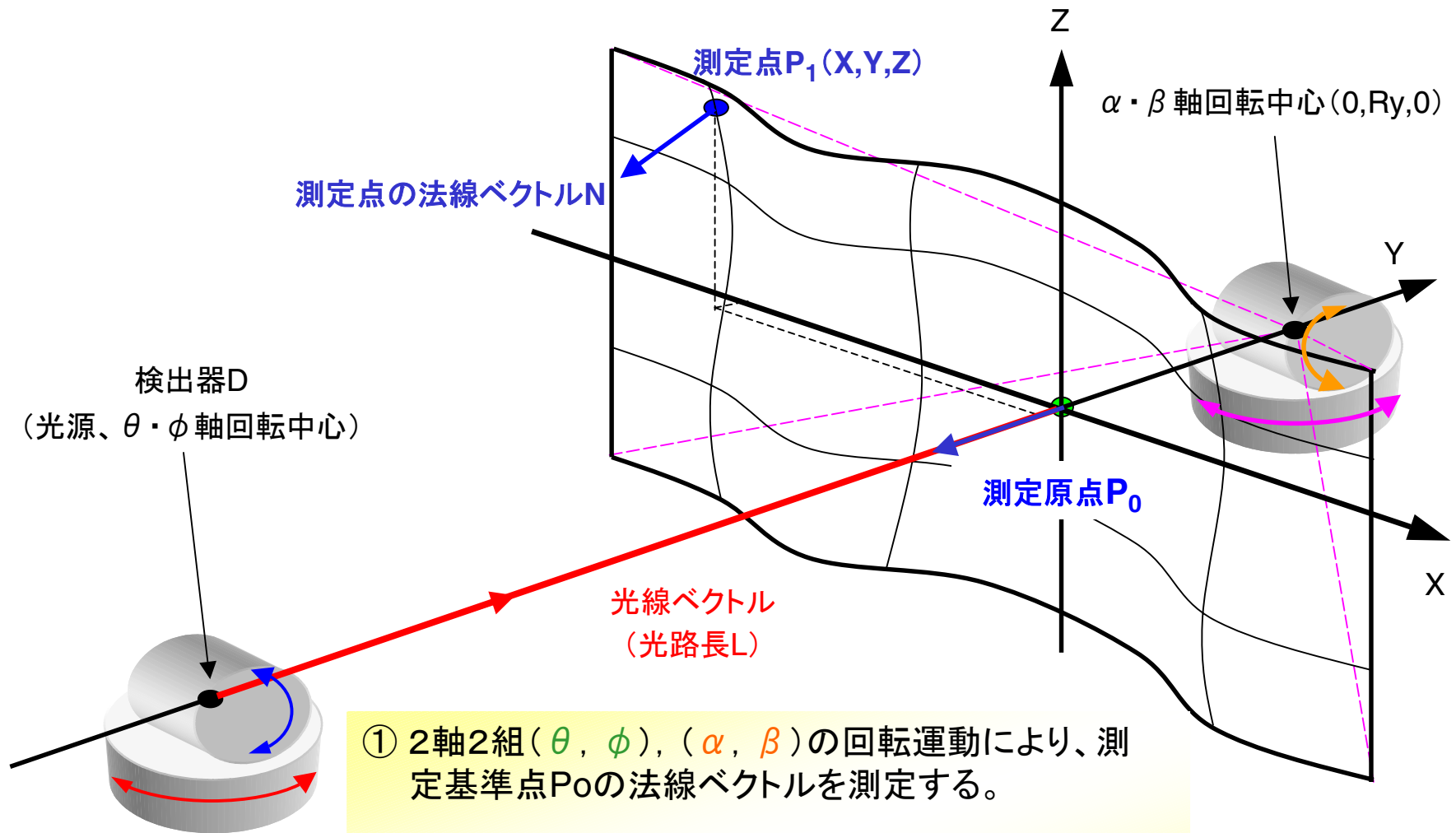
光の直進性を利用して、ミラー面上のある点での入射光と反射光を一致させることにより法線ベクトルを測定する。

特徴

- ・参照面を必要としない
- ・スロープを直接測定できる
- ・あらゆる形状を測定できる

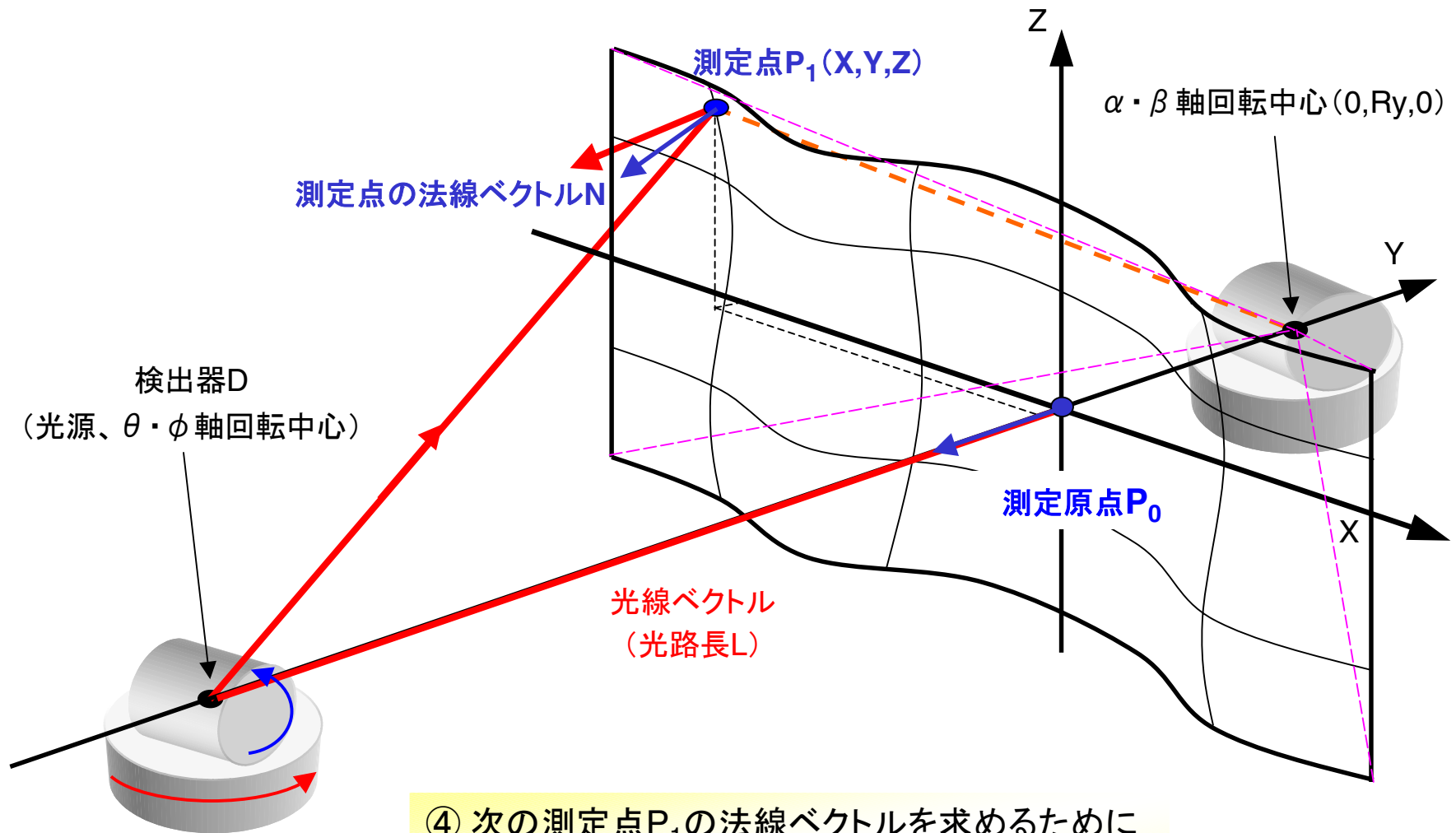
測定中、常に一定の値をとるように、1軸の微小な直進運動を用いて調整する。

超精密非球面形状測定方法



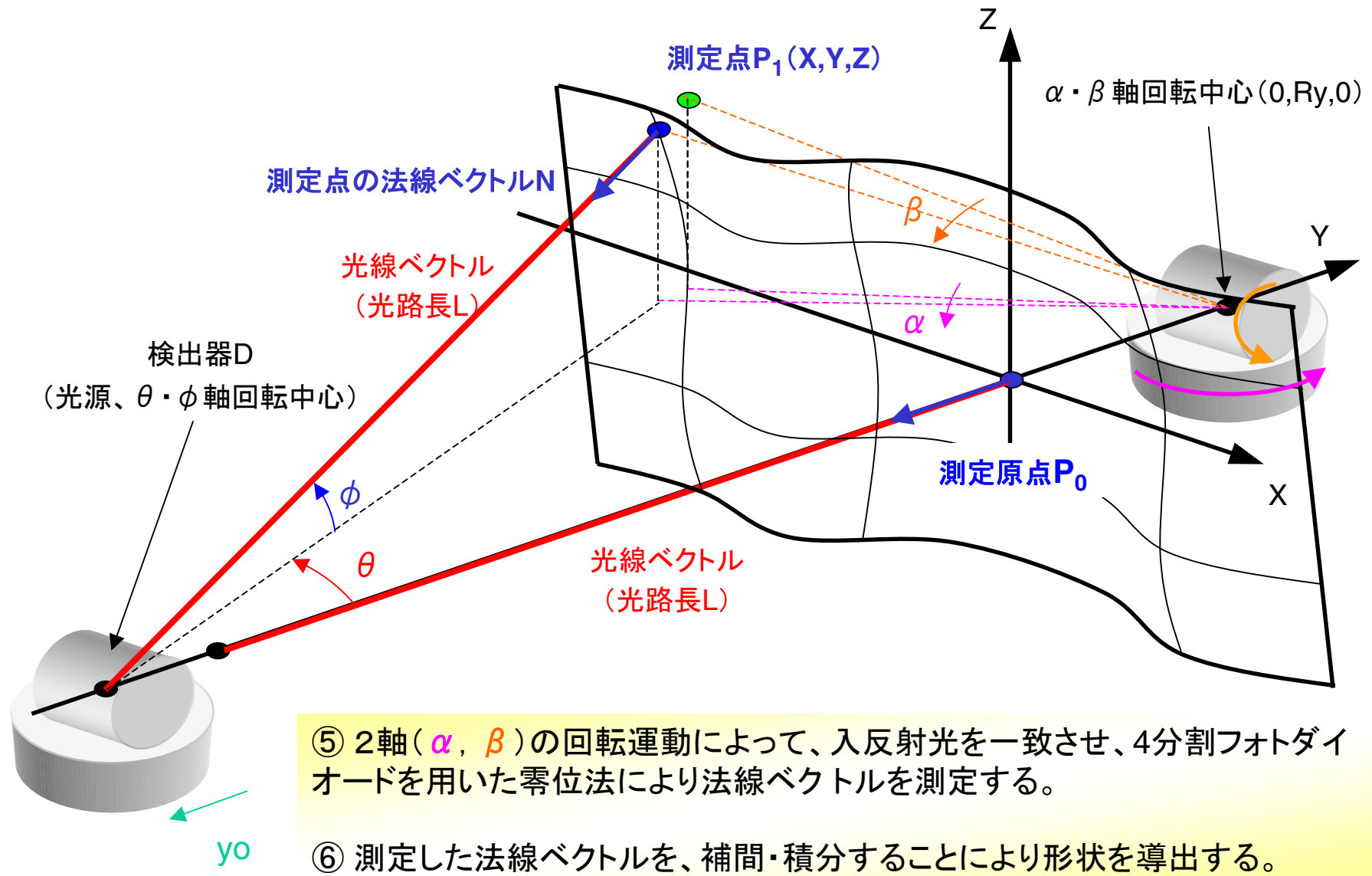
- ① 2軸2組(θ, ϕ), (α, β)の回転運動により、測定基準点 P_0 の法線ベクトルを測定する。
- ② P_0 を原点とした座標系を決定する。
- ③ 光路長 L および測定原点 P_0 と回転中心とのずれ R_y を別の測定機を用いて測定する。

超精密非球面形状測定方法

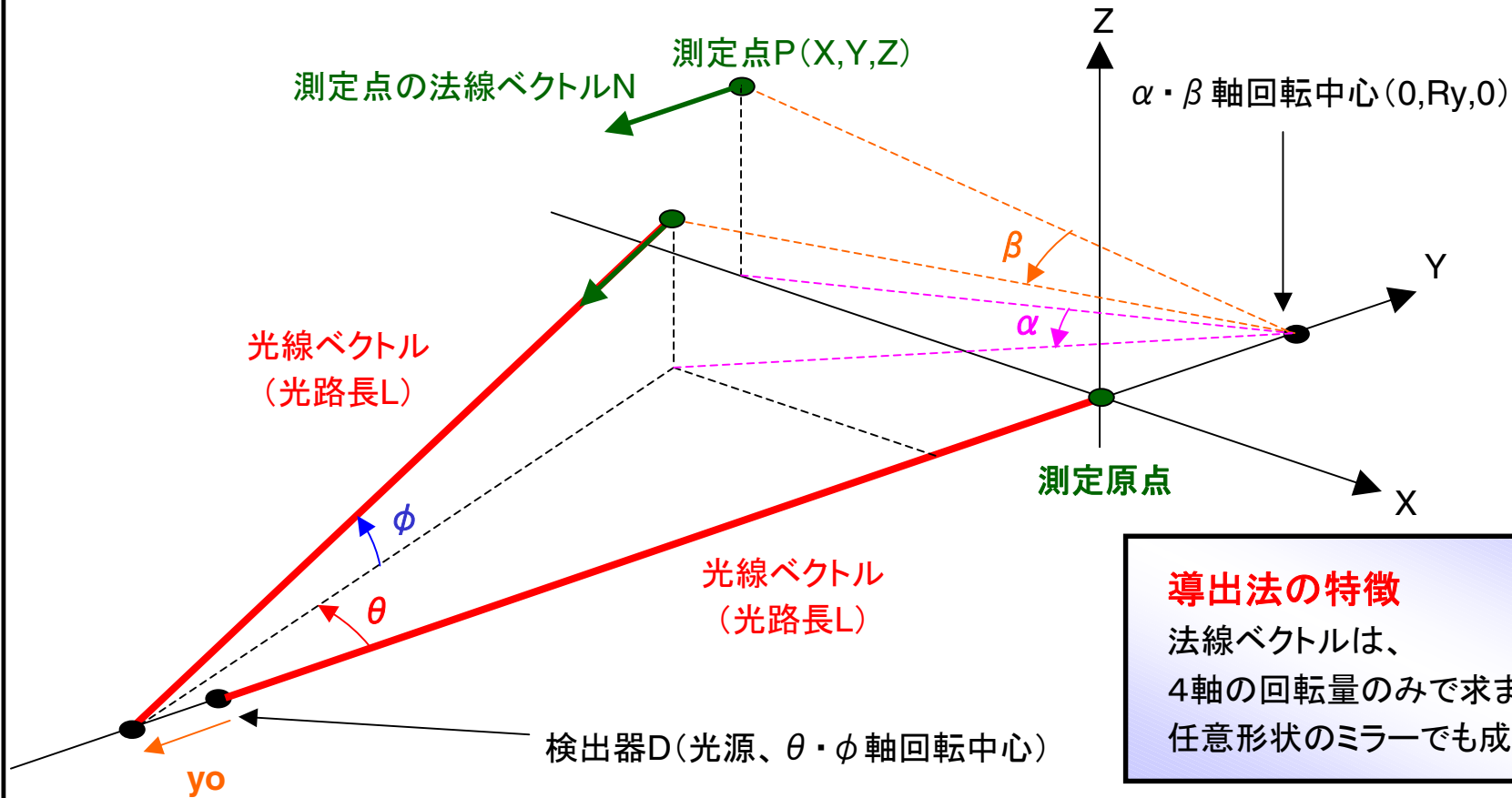


- ④ 次の測定点 P_1 の法線ベクトルを求めるために2軸(θ, ϕ)の回転運動で P_1 近傍に入射光がくるように調整する。

超精密非球面形状測定方法



超精密非球面形状測定方法



導出法の特徴

法線ベクトルは、
4軸の回転量のみで求まる。
任意形状のミラーでも成立する。

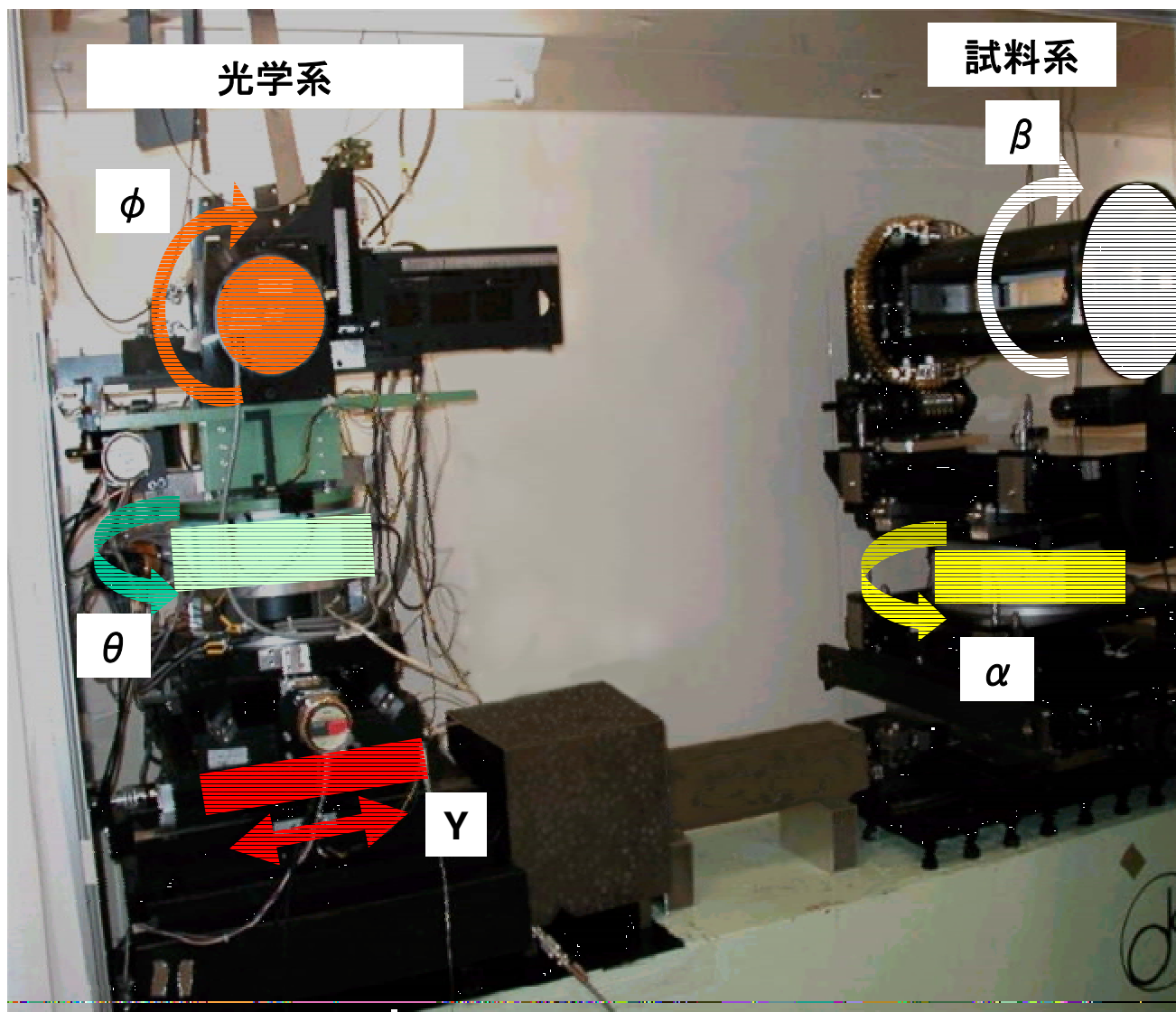
$$X_P = f(\theta, \phi, \alpha, \beta, y_0, L, R_y)$$

$$Y_P = g(\theta, \phi, \alpha, \beta, y_0, L, R_y)$$

$$Z_P = h(\theta, \phi, \alpha, \beta, y_0, L, R_y)$$

$$N = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan[\alpha - \theta] \\ 1 \\ \tan[\beta - \phi] \end{pmatrix}$$

形状測定装置



装置の性能

回転角度の読み取り精度

(ロータリーエンコーダ
の分解能)

1.745×10^{-8} rad

並進変位の読み取り精度

(リニアエンコーダ
の測定精度)

0.1 μ m

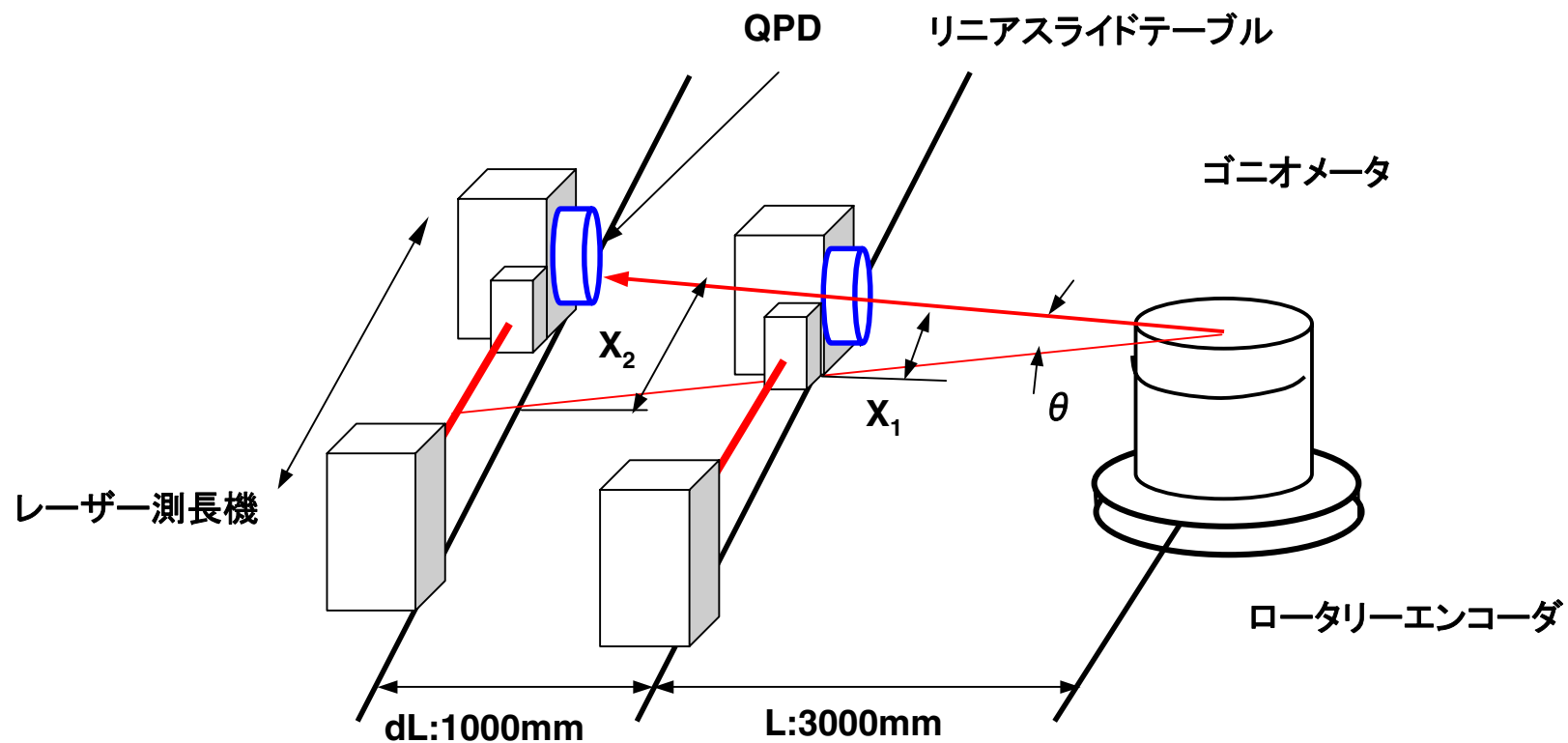
温度安定性

$\pm 0.2^\circ\text{C/hr}$

目標

スロープの
測定精度 0.1 μ rad

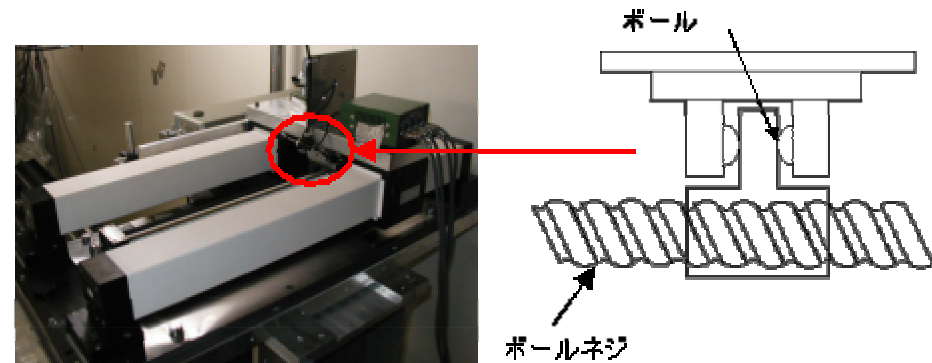
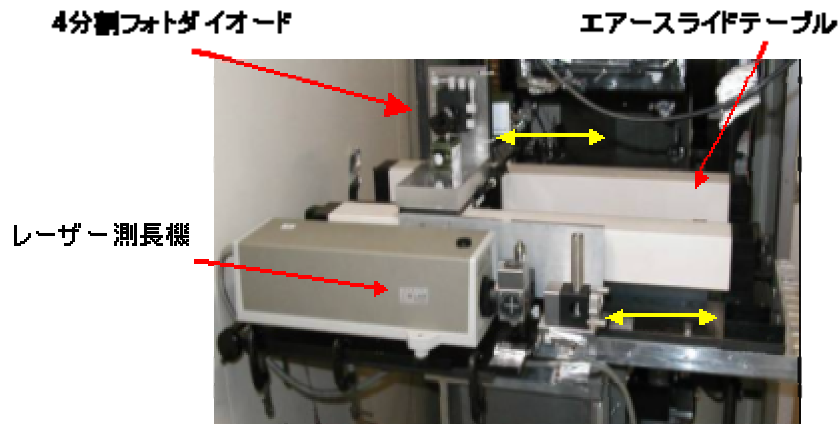
ゴニオメータ回転角度校正原理



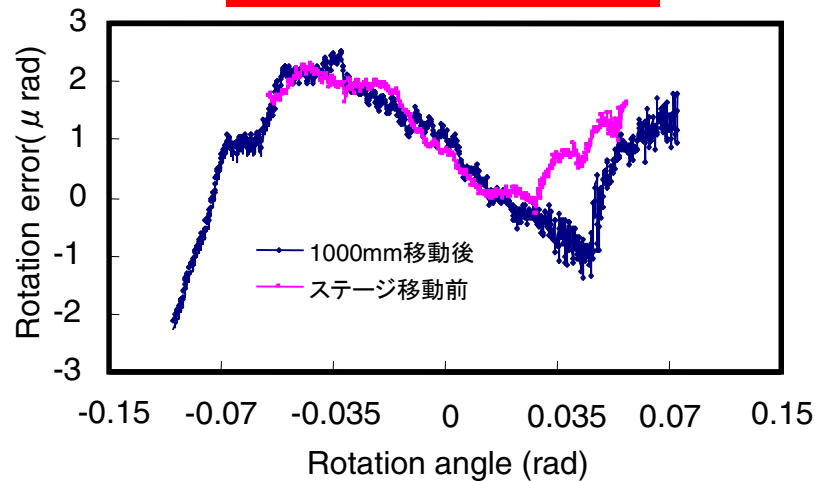
$$L = \frac{X_1}{(X_1 - X_2)} dL$$

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \frac{X_1}{L}$$

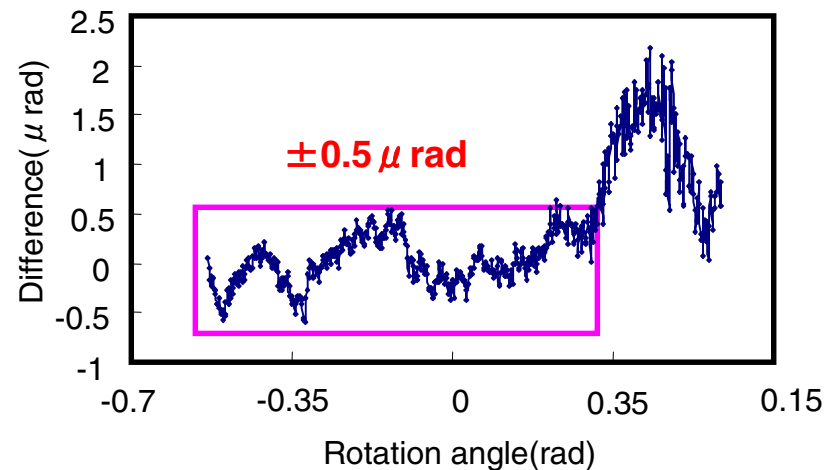
ゴニオメータ回転角度校正原理



ゴニオメータ校正結果



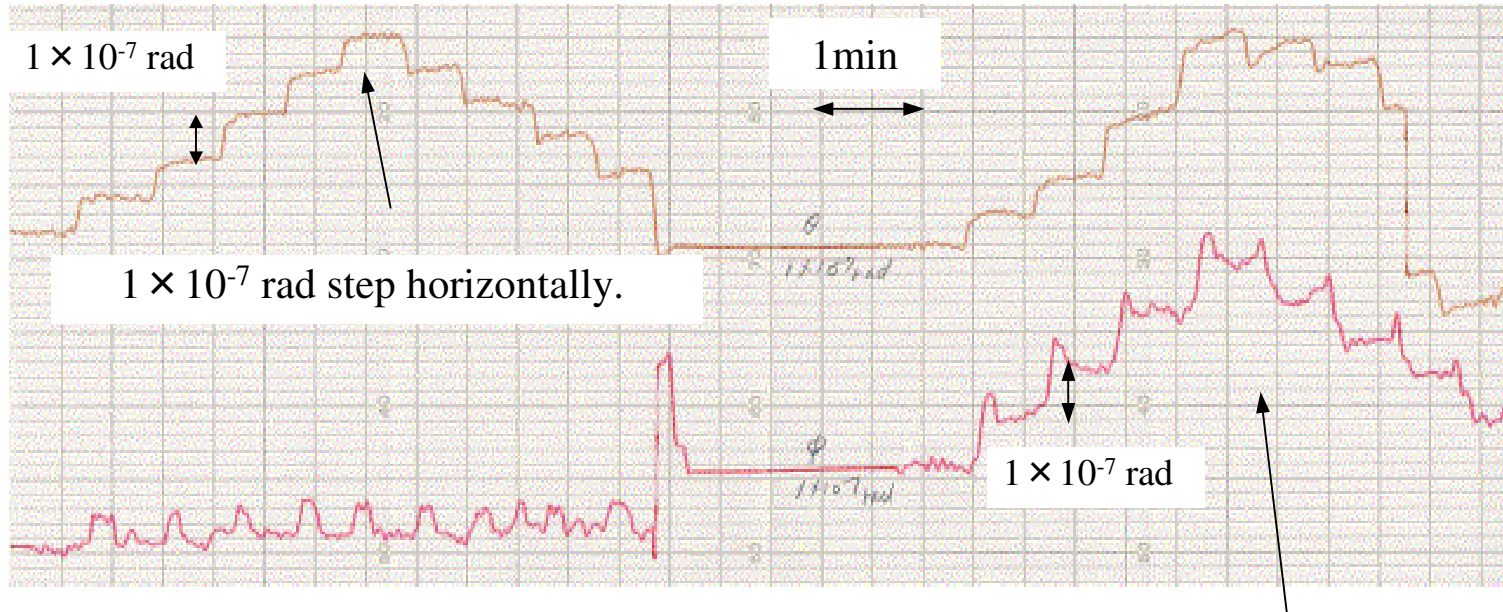
ステージ移動前後での誤差



ゴニオメータ0.08radの回転角度範囲(約400mm)を0.5 μ radの精度で校正ができた

1st Evaluation: Step angle increased by incremental steps of $0.1 \mu\text{radian}$

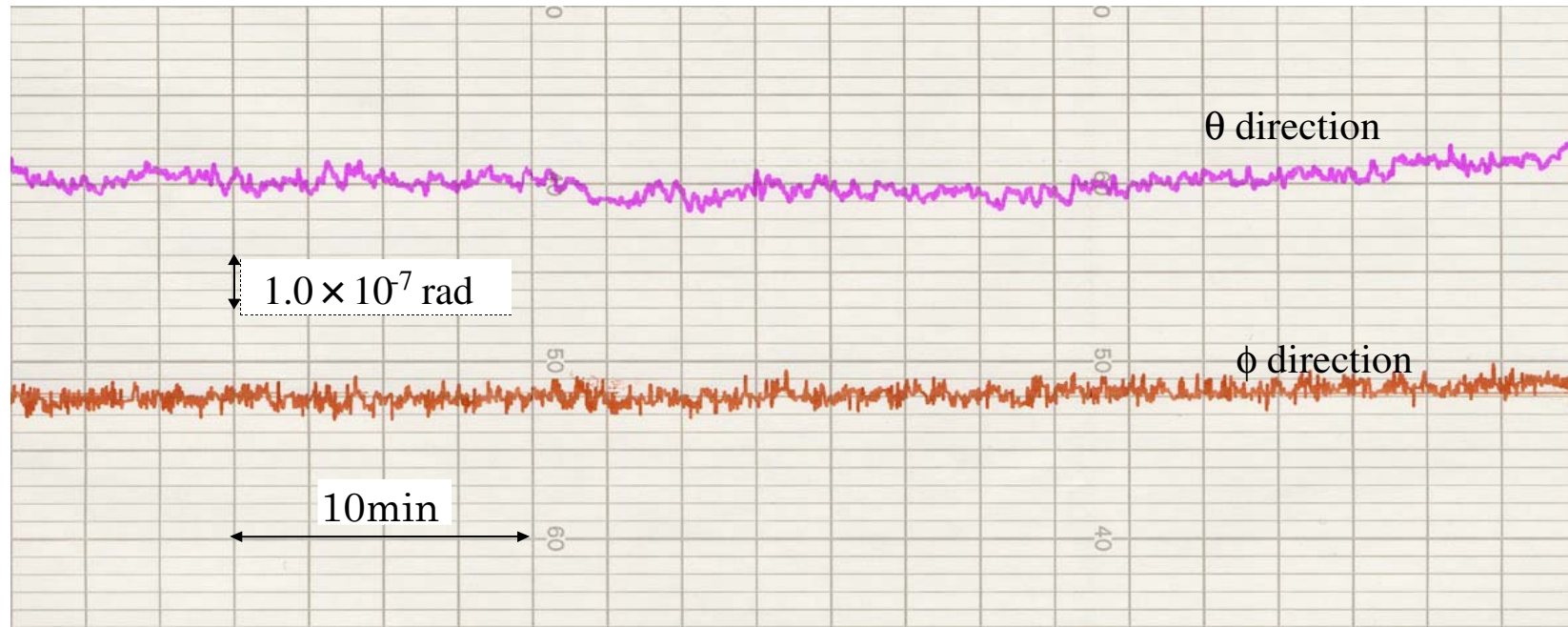
Incremental step feed tests of the Goniometers



1 $\times 10^{-7}$ rad step vertically.

A change of the normal vector of 1×10^{-7} rad can be read using the QPD.

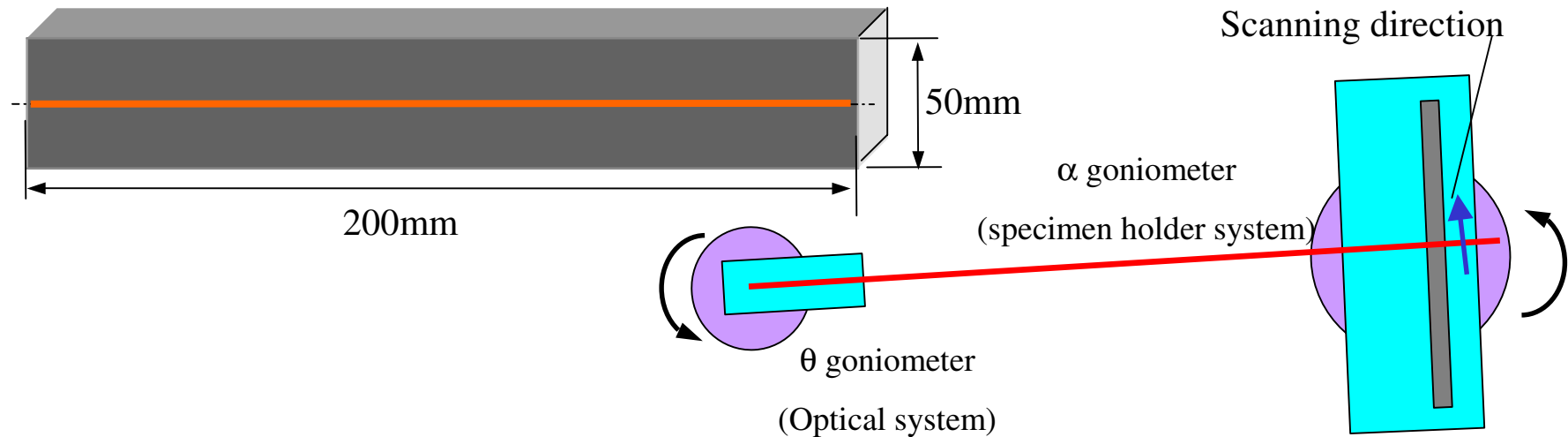
2nd Evaluation: Long term stability of normal vector measurement



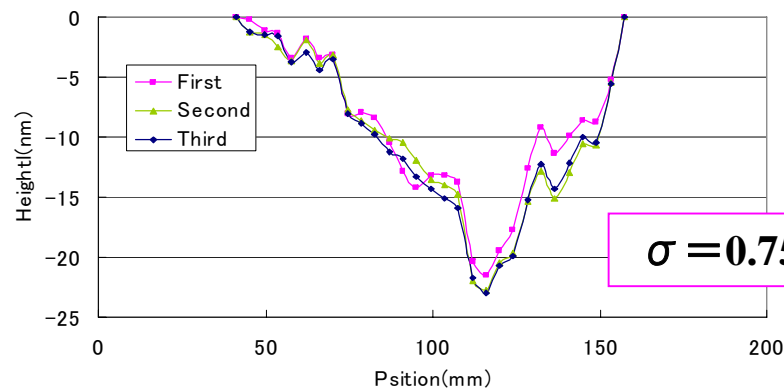
horizontal drift → Less than 1×10^{-7} rad

vertical drift → Less than 1×10^{-7} rad

3rd Evaluation: Repeatability of the 2-dimensional measurement



Measurement profile of flat mirror



Measuring condition

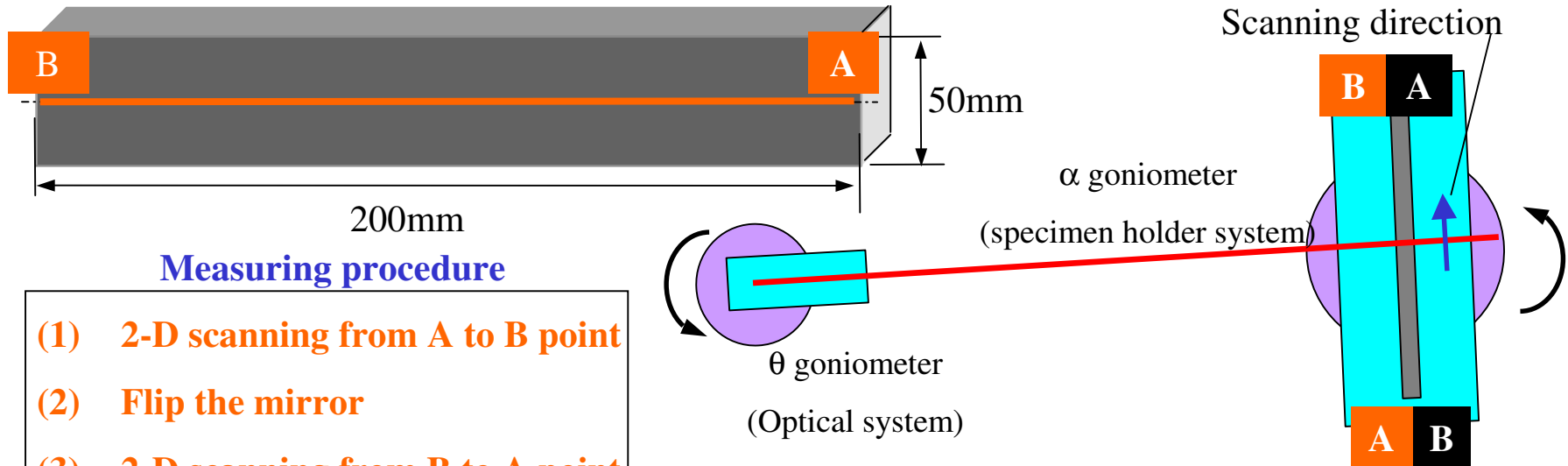
Measure Pitch: 4.2mm

Measuring length : 120mm

Measurement period : 20min

Measurement repeatability is less than P-V 5nm in 120 mm length

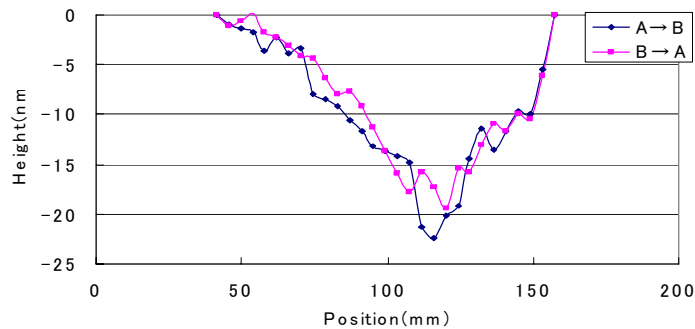
4th Evaluation: Normal vector measuring accuracy



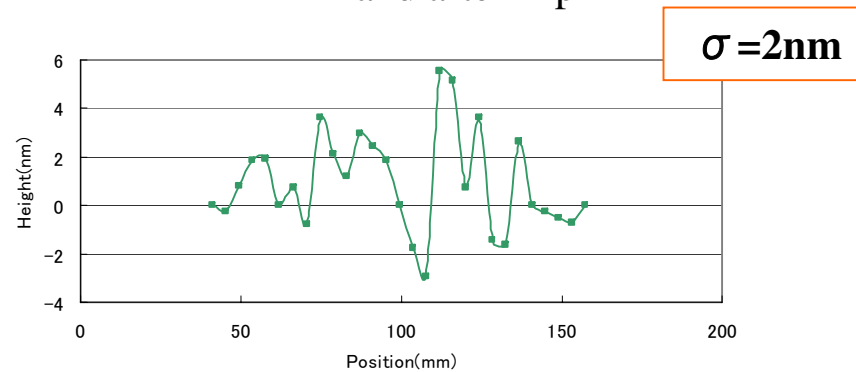
Measuring procedure

- (1) 2-D scanning from A to B point
- (2) Flip the mirror
- (3) 2-D scanning from B to A point

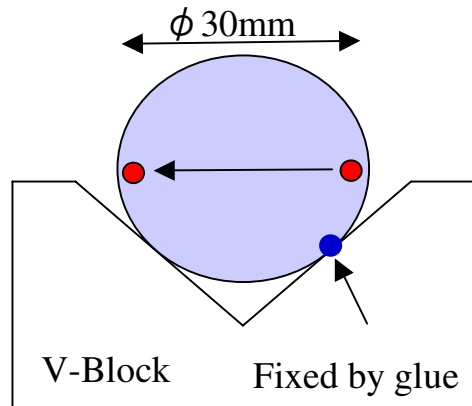
Comparison of surface profile between before flip and after flip



Differential surface profile between before flip and after flip

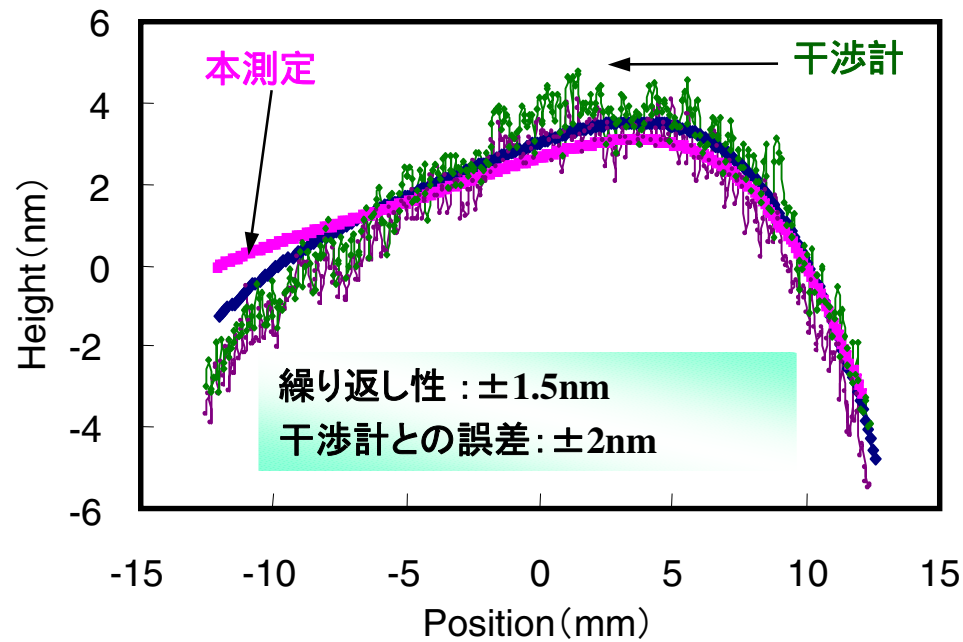


SiC平面ミラー測定による性能評価



測定条件

測定ピッチ	0.1mm
測定範囲	25mm
測定時間	1hour
レーザー径	6mm



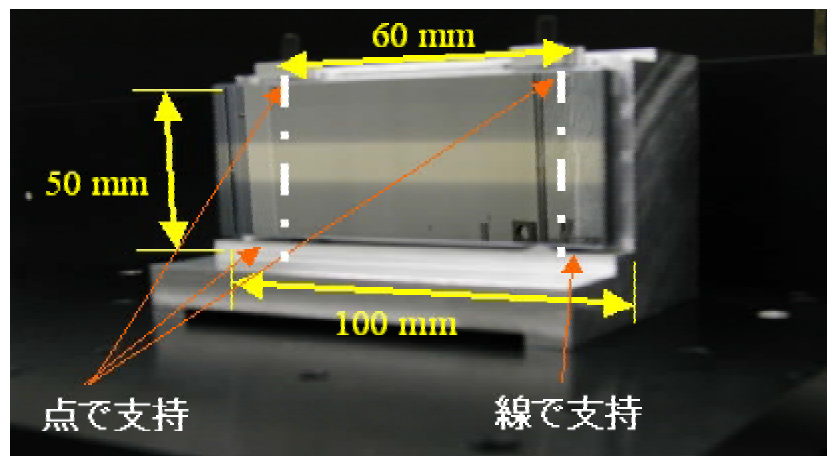
本装置により長周期の形状を捉えることができる

形状計測に用いた各種ミラーパラメーター

	ミラー(I)	ミラー(II)	ミラー(III)
材質	Si	SiO ₂	Si
形状	楕円	平面	球面
大きさ	100×50 ×10mm	1000×50 ×50mm	φ75mm R=304mm
表面コーティング	Pt	-	Al
表面粗さ	0.1nmrms	20nmrms	20nmrms
測定範囲	80mm	700mm	20mm

*φは直径表す

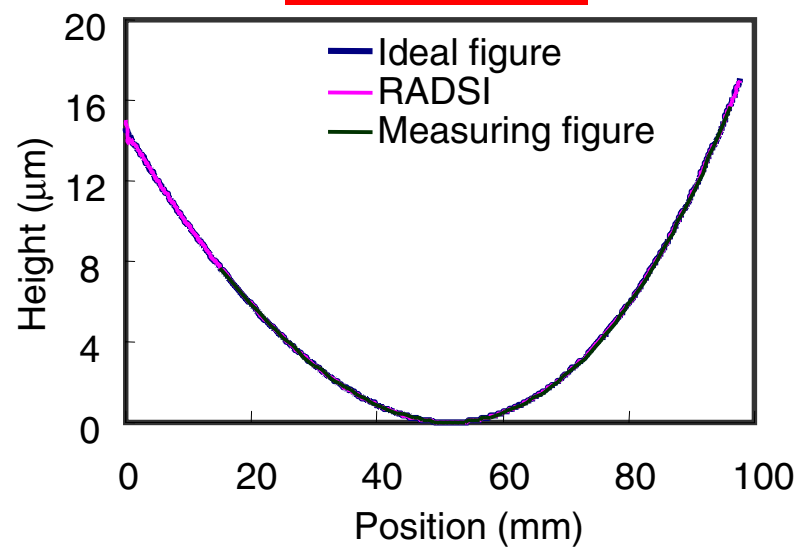
X線集光用楕円ミラーの測定結果



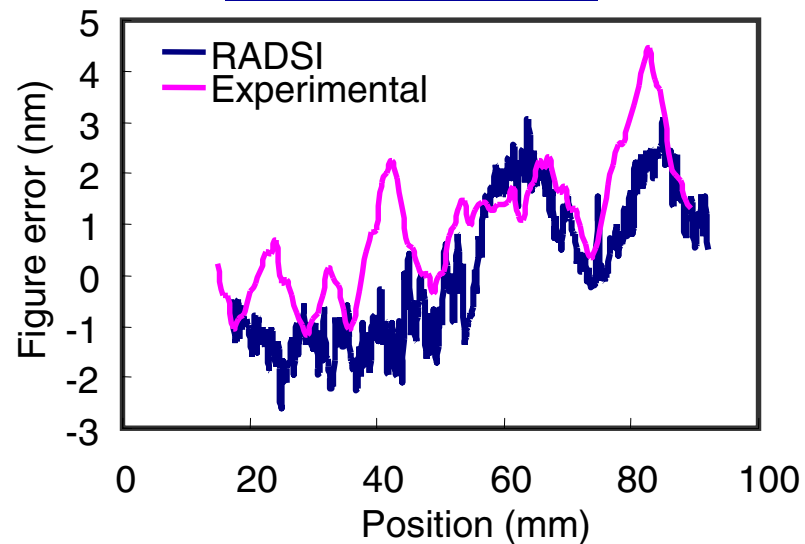
測定条件

レーザー径	3mm
光路長	4.85m
測定ピッチ	0.83mm
測定時間	40 min

X線ミラー形状

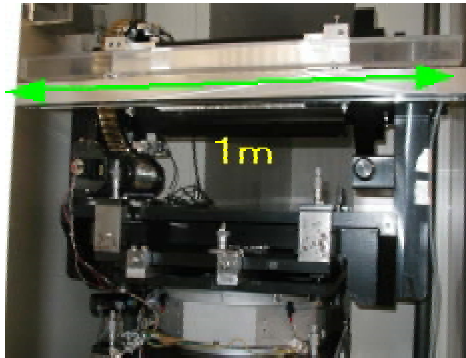


理想との形状誤差



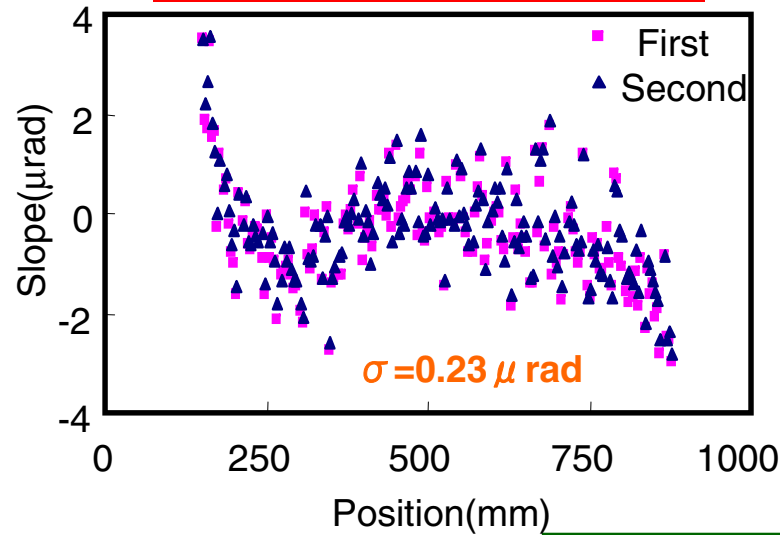
形状精度PV5nmを達成

1m 平面ミラー測定結果

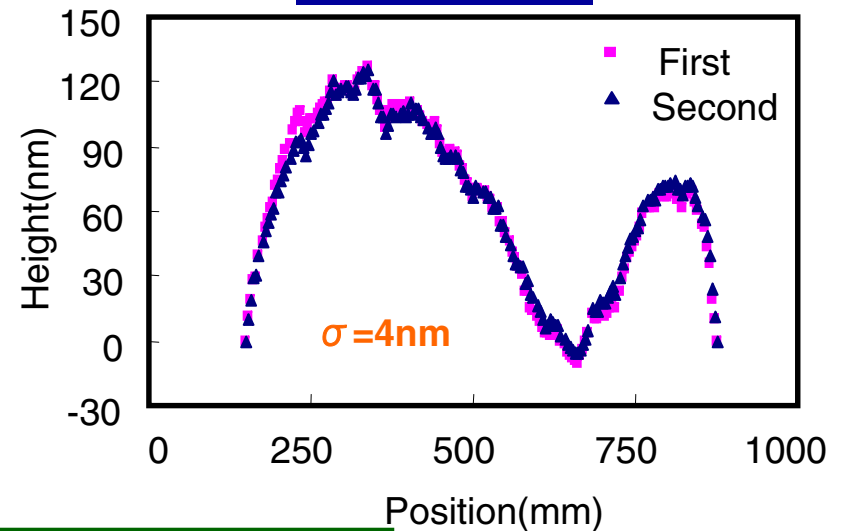


測定条件	
レーザー径	3mm
光路長	4.85m
測定ピッチ	4mm
測定時間	40 min

法線ベクトル測定繰り返し性



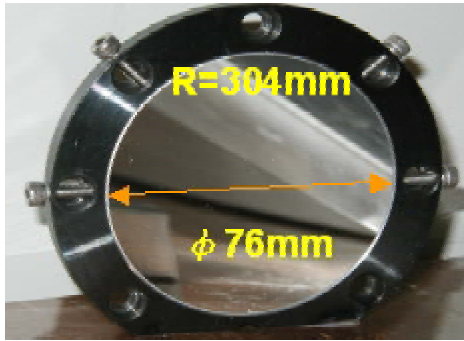
形状導出結果



測定繰り返し性

スロープ	: 0.23 μ radrms
形状	: 4nmrms

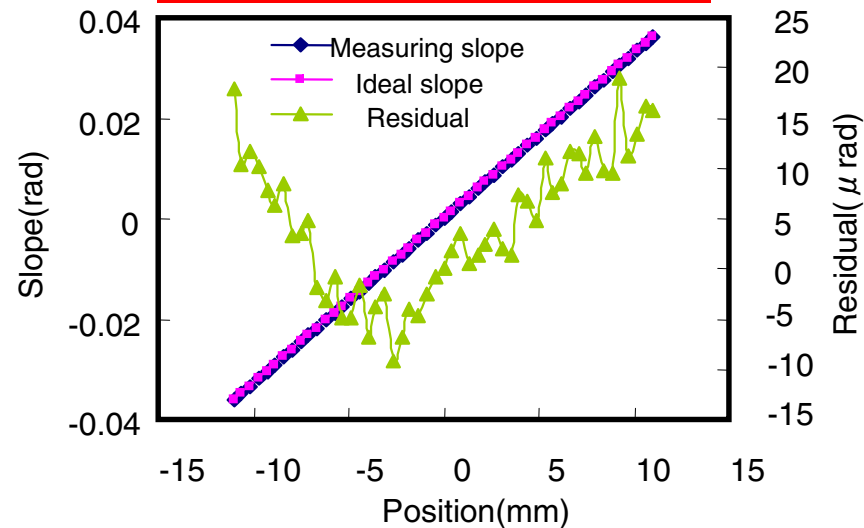
球面ミラー測定結果



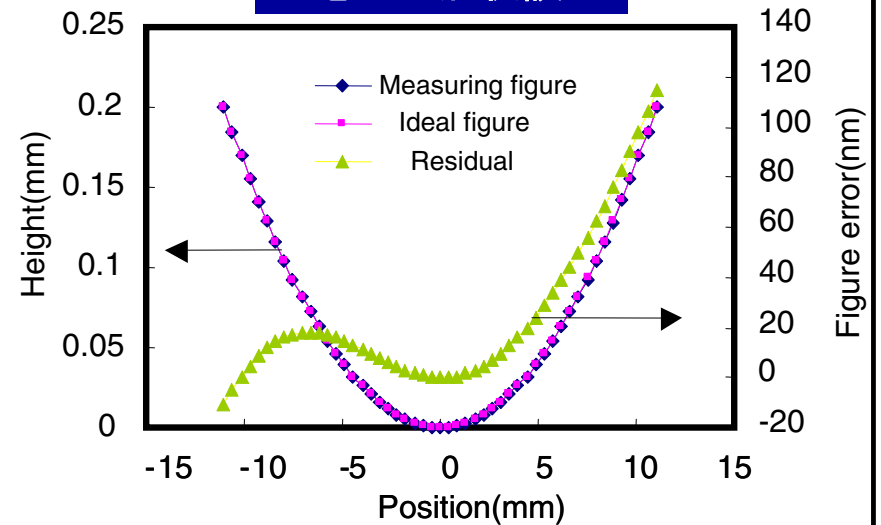
測定条件

レーザー径	2mm
光路長	4.65m
測定ピッチ	0.7mm
測定時間	40 min

測定スロープと理想スロープ



理想との形状誤差

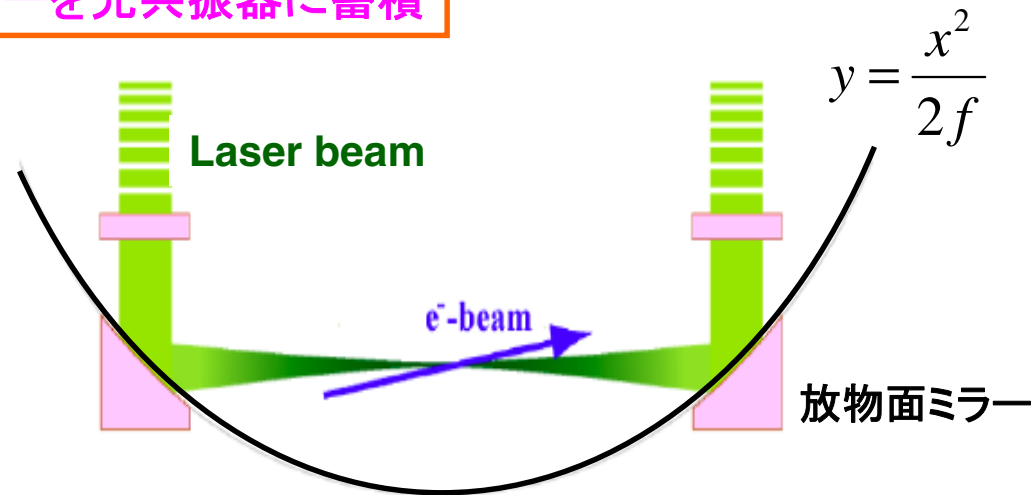


理想形状との誤差

スロープ誤差 : $\pm 15 \mu$ rad
形状誤差 : PV140nm

小型X線源計画に用いられる軸外し放物面ミラー

レーザーを光共振器に蓄積



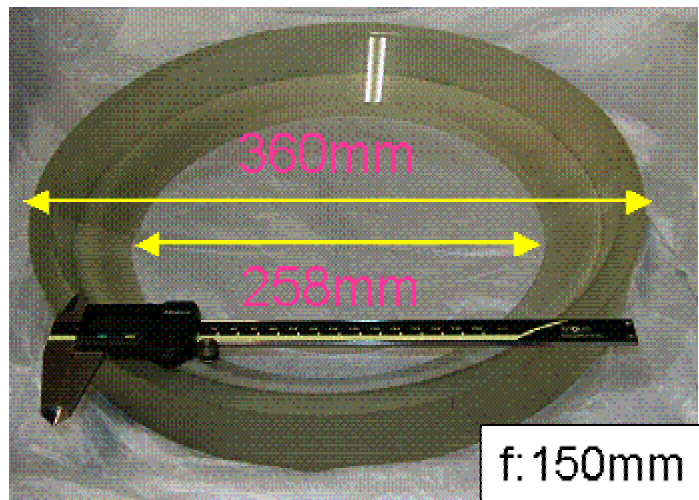
1大学・1研究室での高品質なX光源の開発

ピークパワーの高いレーザー光を共振器内に蓄積し、電子ビームと衝突させることによってレーザーコンプトン散乱によって高品質なX線を生成することが計画されている。

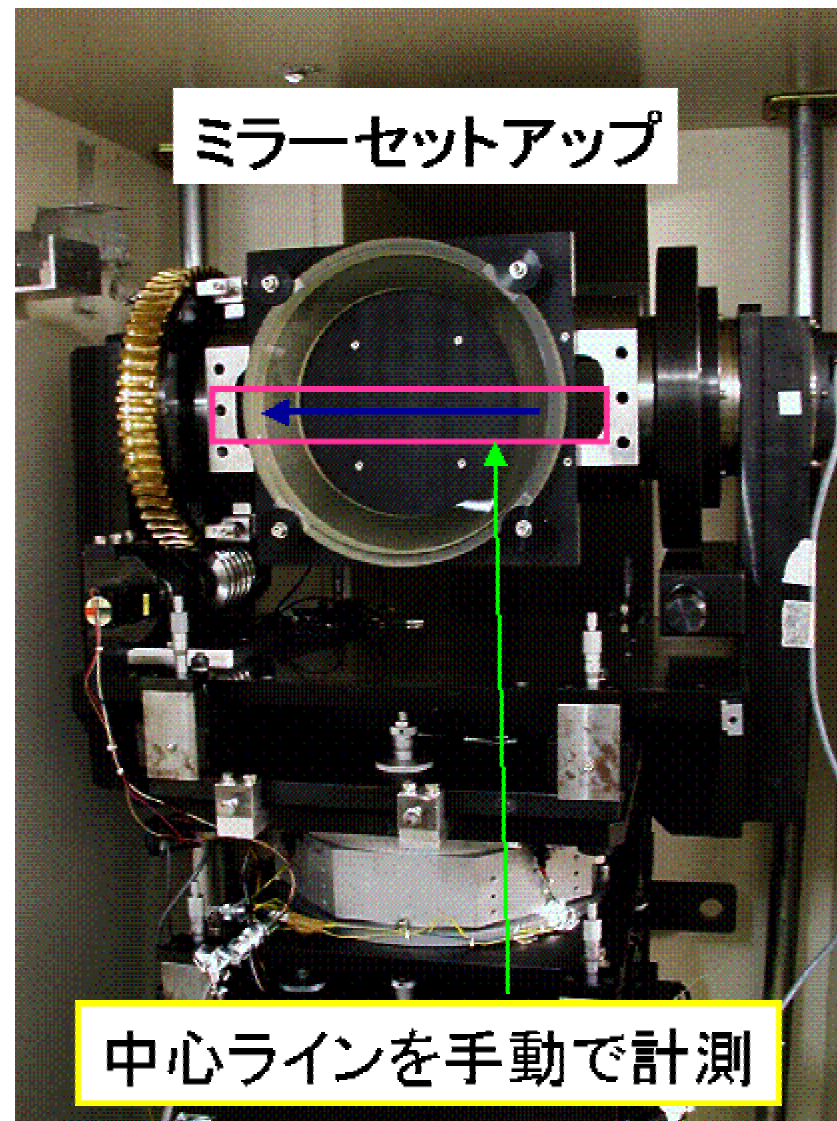
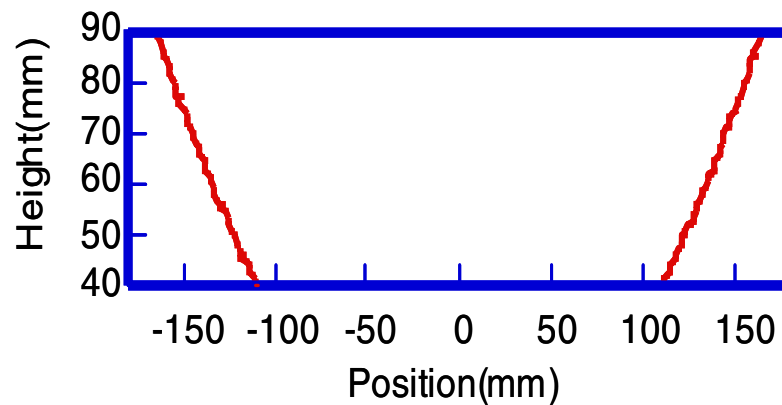
33keV付近のX線を電子ビームと1064nmレーザー光の散乱によって生成する。

放物面鏡の測定準備

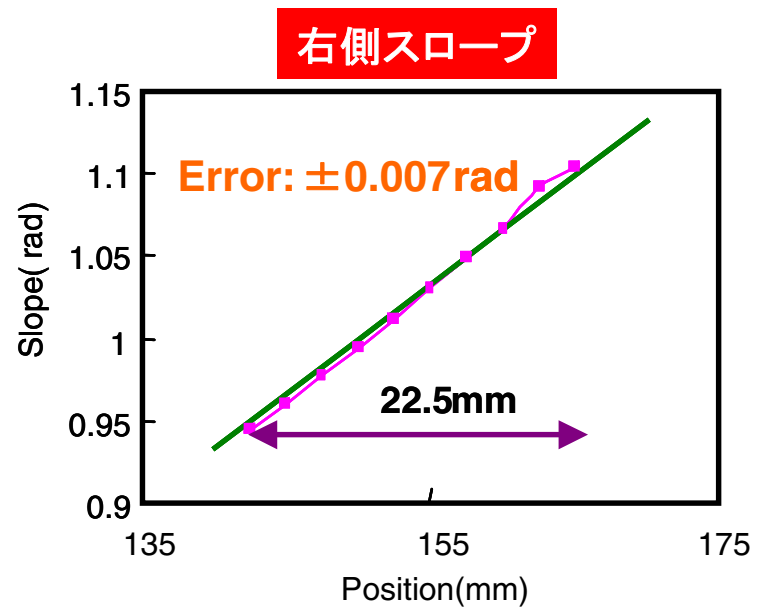
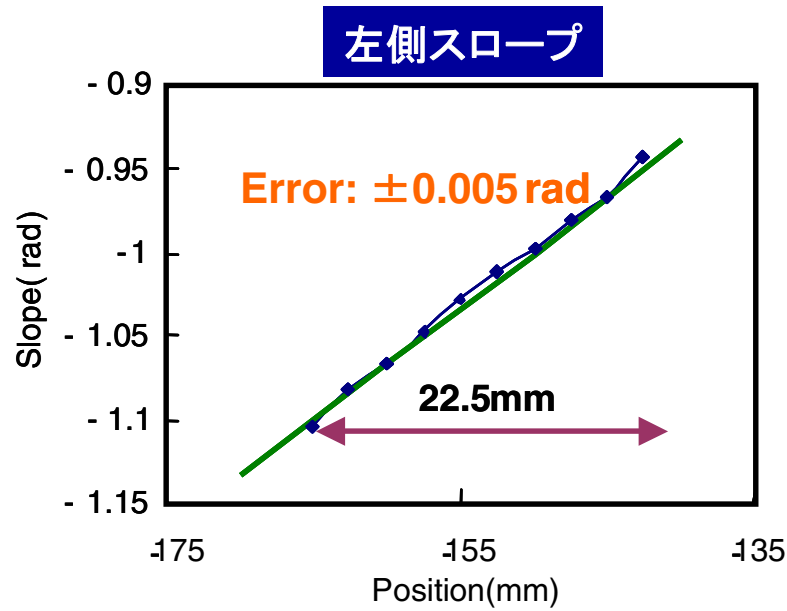
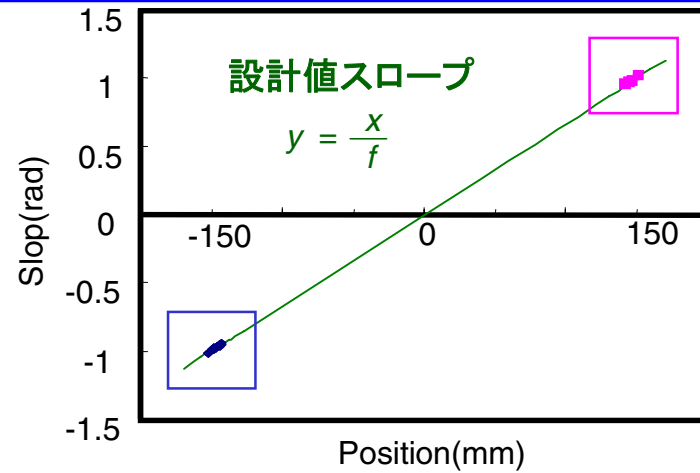
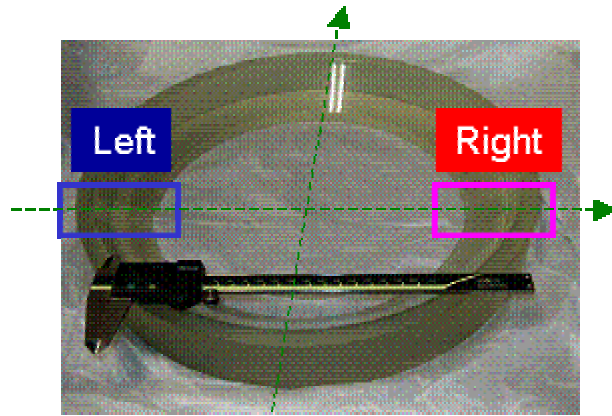
放物面: $y = \frac{x^2}{2f}$



断面形状

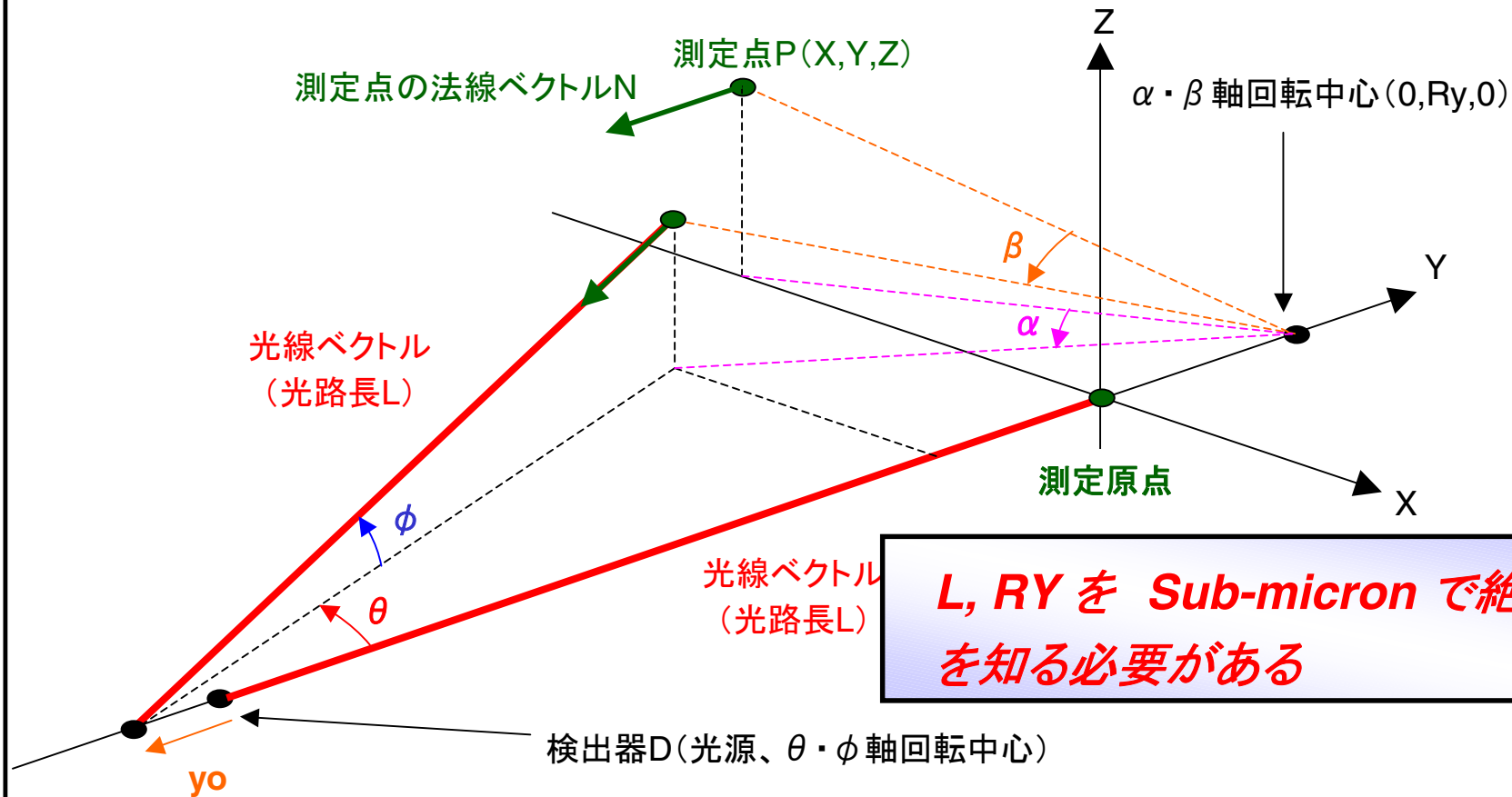


放物面ミラー計測



法線ベクトルの追跡に成功

F=150mmの放物面をナノメータで計測するには



L, Ry を Sub-micron で絶対値を知る必要がある

$$\begin{aligned}
 X_P &= f(\theta, \varphi, \alpha, \beta, y_0, L, Ry) \\
 Y_P &= g(\theta, \varphi, \alpha, \beta, y_0, L, Ry) \\
 Z_P &= h(\theta, \varphi, \alpha, \beta, y_0, L, Ry)
 \end{aligned}$$

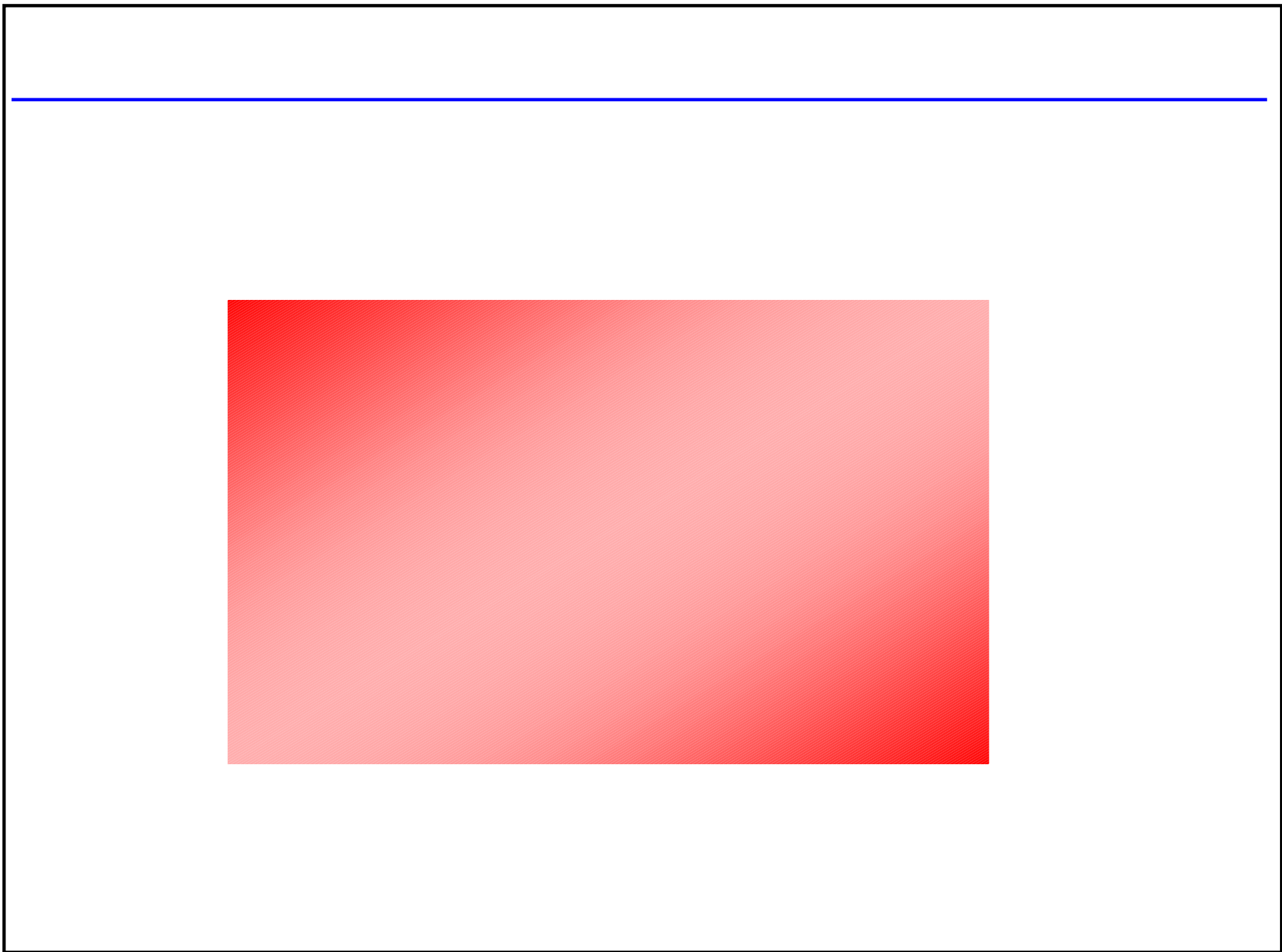
$$N = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan[\alpha - \theta] \\ 1 \\ \tan[\beta - \phi] \end{pmatrix}$$

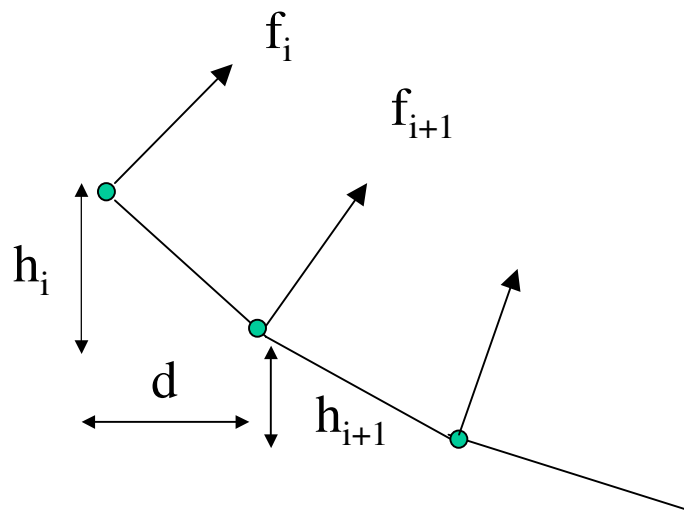
結言

- ・ゴニオメータの回転角度範囲 0.08rad に対して $0.5\ \mu\text{rad}$ の精度で校正できた
- ・絶対形状が 4nmPV 以上で補償されたX線集光ミラーの測定をおこなうことで本装置により 5nmPV での形状計測が可能であることを示した
- ・ 1m 級の平面ミラー、曲率半径 304mm の球面ミラー、軸外し放物面ミラーなど様々な形状のミラーに対して、法線ベクトルの測定に成功した
- ・横分解能に関する研究をすべきであり、今回の放物面計測には rY, L の絶対寸法を導出する方法の確立が不可欠

国内、国外での発表

- 国内学会発表
約 30件
- 国際会議発表
約 7件(査読あり 5件)
- 学位
論文博士 (本郷 先生、東 保男)
修士論文 3名(宮脇/ニコン、瀬戸口/トヨタ
自動車、鷹家/キャノン)





f_i : スロープ°
 d : サンプル間隔
 h_i : サンプル間隔高さ
 Δf : スロープ測定誤差
 Δd : 間隔誤差

$$h_i = f_i \cdot d \quad \Delta h_i = \sqrt{\left(\frac{\partial h_i}{\partial f_i} \Delta f\right)^2 + \left(\frac{\partial h_i}{\partial d} \Delta d\right)^2}$$

各測定点における高さを Y_n とすると

$$Y_n = \sum_{i=1}^n h_i$$

3次元測定器による放物面計測

ZEISS UPMC850

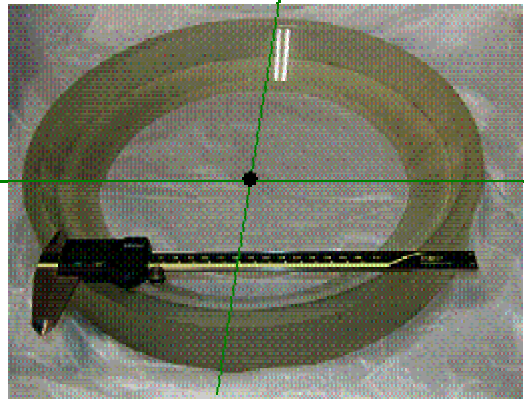
動作範囲 X : 850mm
Y : 1200mm
Z : 600mm

測定精度 $\pm 0.8 + L/600$ (μm)
分解能 $0.2 \mu\text{m}$

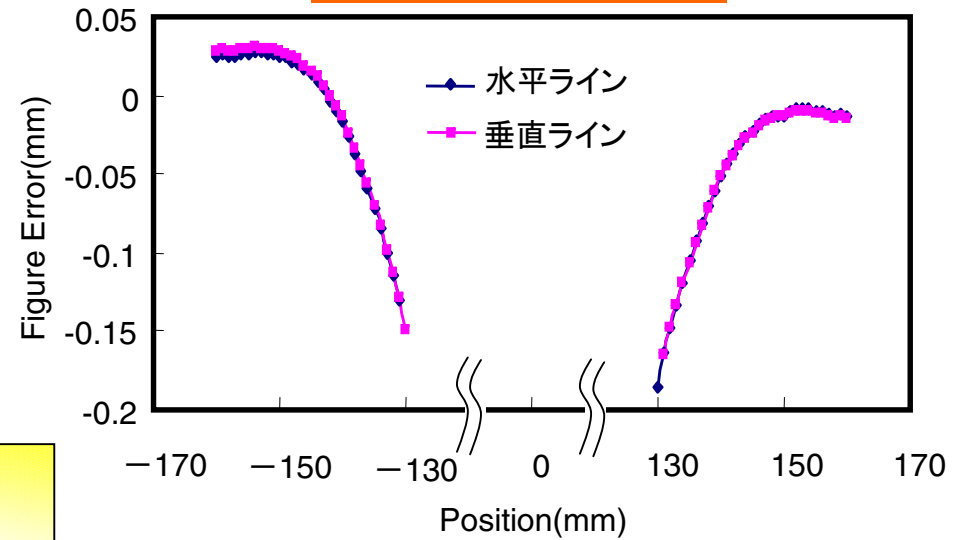


垂直ライン

水平ライン

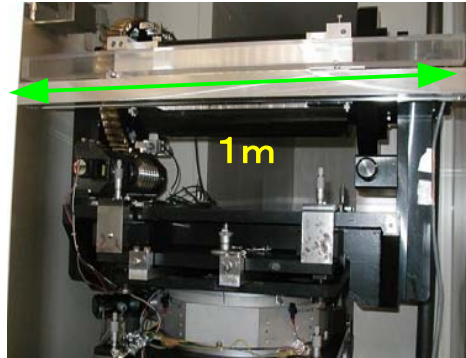


設計値形状との残差



数 $10 \mu\text{m}$ の形状誤差があると考えられる

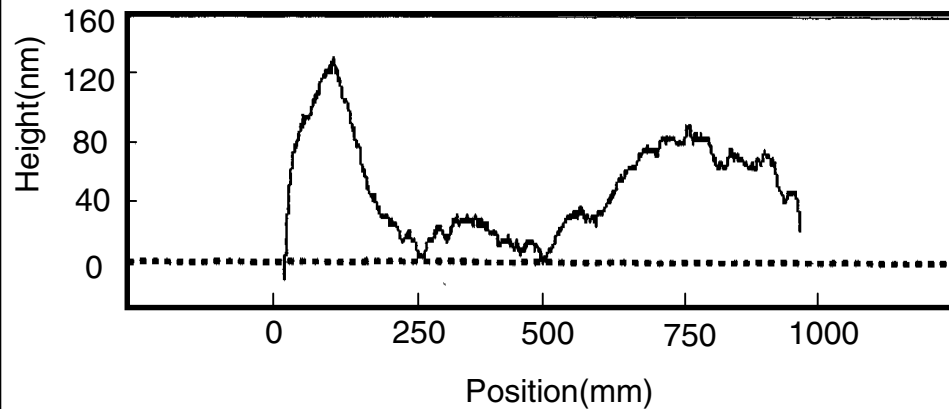
1m 平面ミラー測定結果



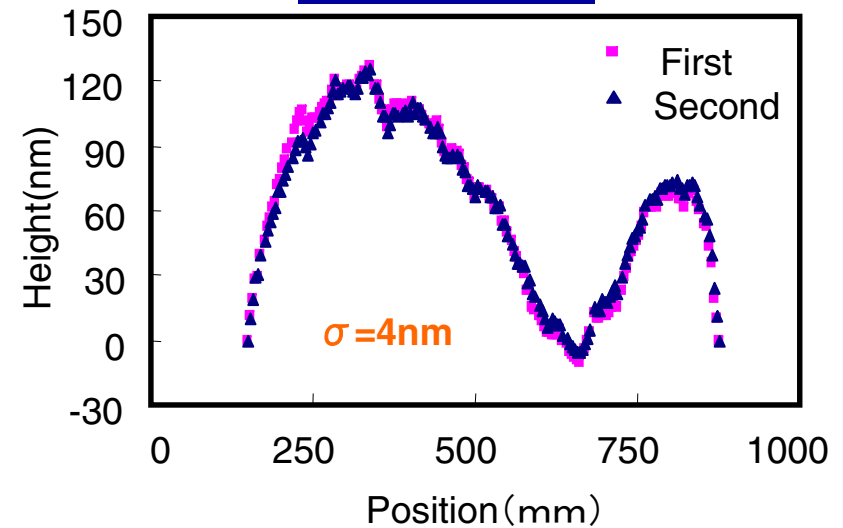
測定条件

レーザー径.	3mm
光路長	4.85m
測定ピッチ	4mm
測定時間	40 min

X-Cross Section PV: 0.137 wave



形状導出結果



測定繰り返し性 : PV20nm