

# 微小流量計測装置に用いる細管の 光を使った内径計測手法の開発

Development of an optical internal diameter measurement  
method using light for microflow measurement devices

---

# contents

---

## □ 研究背景・目的

Research Background and Objectives

## □ シミュレーション方法

Simulation Method

## □ 内径 100 $\mu\text{m}$ の場合の結果

Results for an inner diameter of 100  $\mu\text{m}$

## □ 結言

Conclusion

# Background

## 微小流量 micro flow

- 一般的に1L/minより低い流量  
Flow rate generally lower than 1L/min
- 測定原理は容積式、熱式、電磁式、超音波式等々  
The measuring principles are volumetric, thermal, electromagnetic, etc.
- 薬液等を取り扱う化学プラント、微量制御を必要とする半導体製造過程に用いられる  
Used in chemical plants that handle chemicals, etc.

- **小型化に伴うμオーダーの微小流量計測に対するニーズが高まる**  
Increasing need for μ-order micro flow measurement with miniaturization

- マイクロスケールでの計測手法の開発
  - 2次元あるいは3次元的な画像計測  
Image measurement is attracting attention as a measurement method at the microscale
- 再現性や安定度の向上
  - 計測機器の精度  
(実用上、メーカーの初期キャリブレーションが保証した精度を頼りにしている)  
Improving reproducibility and stability is essential



ex) 点滴  
成人用ルートで20滴≒1ml  
1秒間に1滴のペースで落とした場合、  
流量は1分間に約3ml (約3ml/min)  
1秒間に3.3滴というやや速めのペース  
で落とした場合、  
流量は1分間に約10ml (約10ml/min)



細管画像 内径2mm

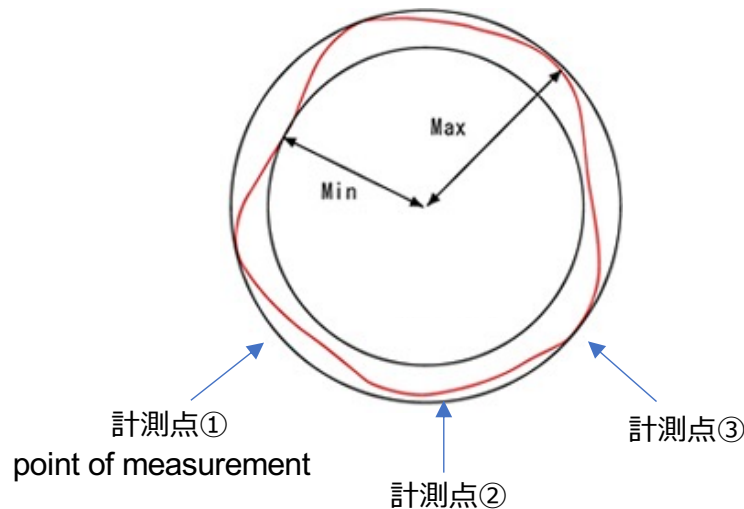
$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot u \times 10^{-3} \times 60$$

Q: 流量[ml/min]  
d: 内径[mm]  
u: 界面速度[mm/s]

# Background

## 流量計測に用いられる細管の構造 Structure of a thin tube used for flow measurement

- 計測に用いる細管は真円ではない
    - 内外径ともに多少偏心している
- The small tube used for measurement is not a perfect circle.



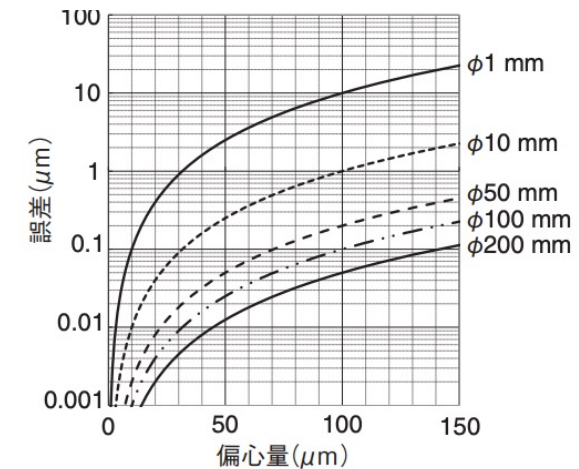
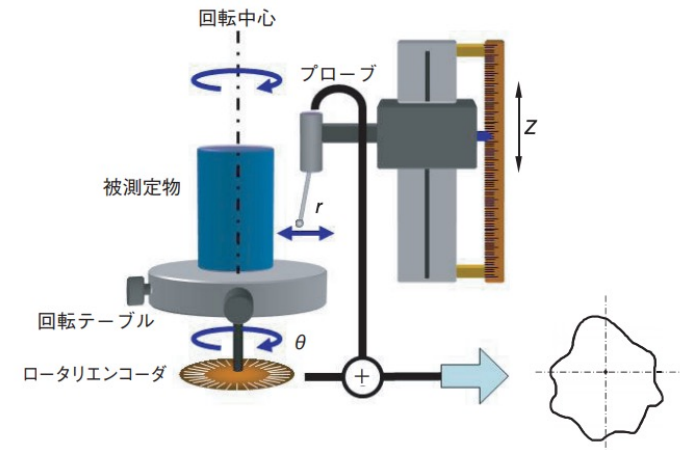
## 2次元画像処理計測を行う際の問題点

Issues in performing 2D image processing measurements

**計測点により内径が異なる**

Inner diameter varies depending on the measurement point

Configuration of roundness measuring machine<sup>[1]</sup>



Error due to workpiece volume and eccentricity<sup>[1]</sup>

[1] An Introduction to Roundness Measurement/Yoshiyuki OMORI(2016)

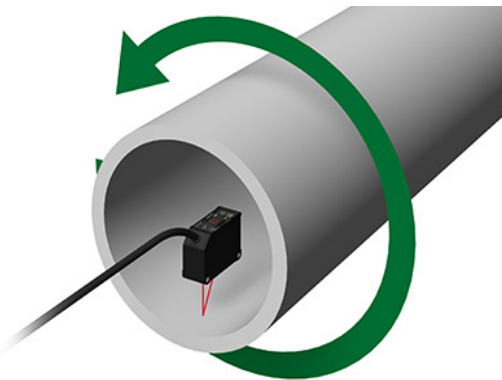
# Issue

## 実用的な円管内径計測手法

A Practical Method for Measuring the Inner Diameter of a Circular Tube

- 接触・非接触の2種類
  - 管内部に計測機器を挿入  
(計測範囲は数mmオーダー)

Inserting a measurement device into the inside of a pipe



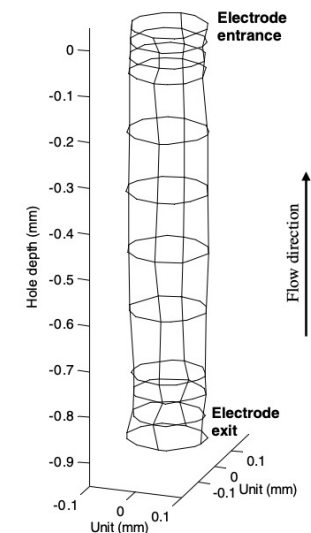
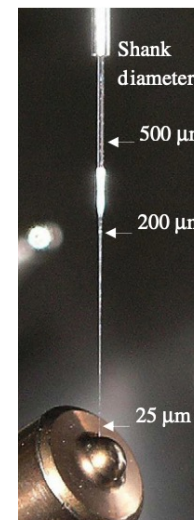
## 細管の形状計測手法<sup>[2]</sup>

- 極細プローブによって管内の形状変化を定量化

Quantifying shape changes in microtubules with an ultra-fine probe

Setup of micro-hole measurement

3D wireframe representation of hole



マイクロスケールの2次元画像処理計測を行う測定系において、任意の計測点の内径を求めることは困難

It is difficult to obtain the internal diameter of an arbitrary measurement point in a measurement system that performs 2-D image processing measurement

# Objective

---

## 微小流量計測の二次元画像処理計測に使用する細管の内径を任意の計測点から取得する手法の開発

Development of a method to obtain the inner diameter of a small tube from an arbitrary measurement point for two-dimensional image processing measurement of micro-flow rate measurement

- 光学的な内径計測研究の妥当性確認  
Validation of optical bore measurement studies
- シミュレーションプログラムの作成  
Create a simulation program
- 光学系設計および実験  
Design the optical system and Conduct an experiment

# Prior Study

## Inner Radius Measuring Method of Transparent Capillary(kozima et al., 1998 )

透明細管の管軸に対し垂直に平行光線を照射し, 2 種類の光線の光強度を測定

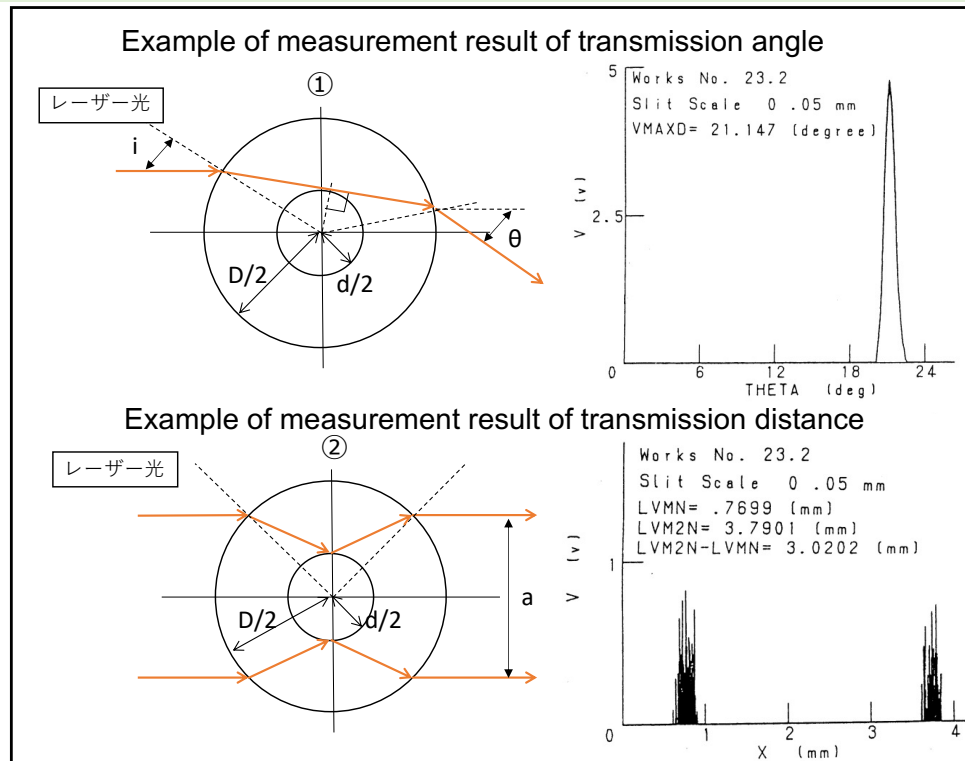
A parallel light beam is irradiated perpendicular to the tube axis of a transparent tube, and the light intensities of two types of light beams are measured.

### ①透明細管内を内径に接して透過する光線

Light rays transmitted through the transparent tube in contact with the inner diameter

### ②内径面上の一点で反射し平行光線の光軸に平行に透過する光線

Light ray reflected at a point on the inner diameter surface and transmitted parallel to the optical axis of the parallel beam

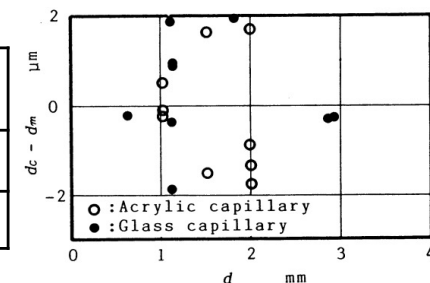


n: 屈折率 Index of refraction  
D[mm]: 管の外径 Outer diameter of tube  
d[mm]: 管の内径 Inner diameter of tube  
a[mm]: 透過距離 Through Distance  
θ[deg]: 透過角 Through the corner

$$\textcircled{1} : \left( n^2 - 2n \cos \frac{\theta}{2} + 1 \right) d^2 - D^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} = 0$$

$$\textcircled{2} : \{ n^2 (D^2 - a^2) - a^2 \} d^2 + 2a^3 d - a^2 D^2 = 0$$

計測時条件 Measurement conditions	
D	5.8~7.8
d	0.6~3.0



保証精度 ±1/500

Guaranteed accuracy

# Preparing for the simulation

光は電磁波の性質を持ち,その性質はマクスウェルの方程式により記述される

微分形

$$\text{div}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \frac{\rho(\mathbf{r},t)}{\epsilon_0}$$

... ガウスの法則

$$\text{div}\mathbf{B}(\mathbf{r},t) = 0$$

... 単磁化が存在しない

$$\text{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = -\frac{\partial\mathbf{B}(\mathbf{r},t)}{\partial t}$$

... 電磁誘導

$$\text{rot}\mathbf{H}(\mathbf{r},t) = \mu_0\mathbf{i}(\mathbf{r},t) + \epsilon_0\mu_0\frac{\partial\mathbf{E}(\mathbf{r},t)}{\partial t}$$

... アンペールの法則

$D$ : 電束密度

$B$ : 磁束密度

$E$ : 電場

$H$ : 磁場

$\mu_0$ : 透磁率

$i$ : 電流密度

$\epsilon_0$ : 誘電率

$\rho$ : 電荷密度

波動方程式を求め,異なる媒質間の光(偏光)の振る舞いを記述した式を導く

$$t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

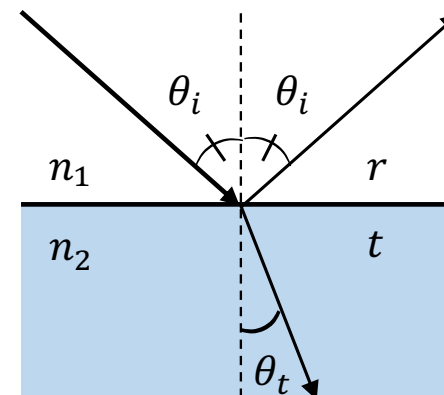
$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$T_j = |t_j|^2 \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i}$$

$$R_j = |r_j|^2 \quad (j = P, S)$$

$$R_j + T_j = 1$$

電場と磁場の振動方向が規則的な光



$n_i$ : 媒質*i*の屈折率

$\theta_i$ : 入射角

$\theta_t$ : 屈折角

$r$ : 反射率

$t$ : 透過率

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

それぞれの偏光の光強度を取得

Obtain the light intensity of polarized light

光線の光路を取得

Obtain the optical path of a light beam



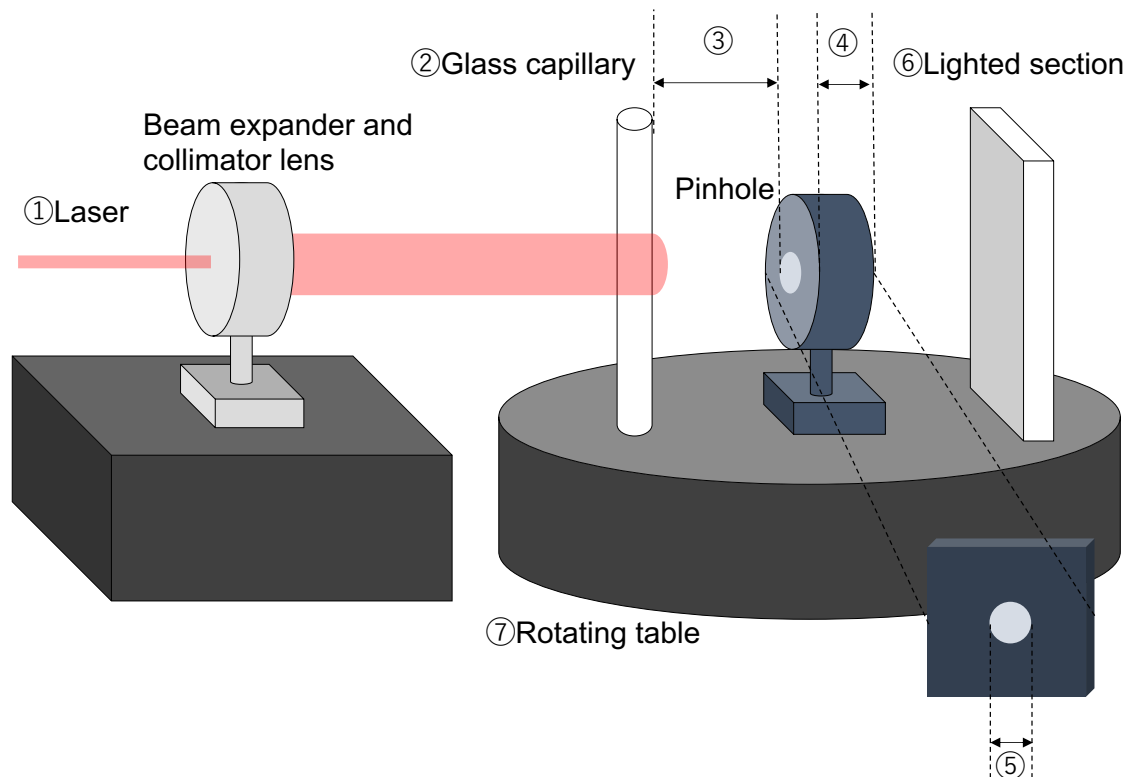
# Preparing for the simulation

μスケールでも先行研究と同様の手法で測定可能かを確かめるため、  
シミュレーションを実施

In order to confirm whether the same method can be used for μ-scale measurements,  
we performed Simulation

②細管外径及び、③細管-ピンホール間の距離を変化させる

Varying the distance between the tube and the pinhole, and the outer diameter of the tube



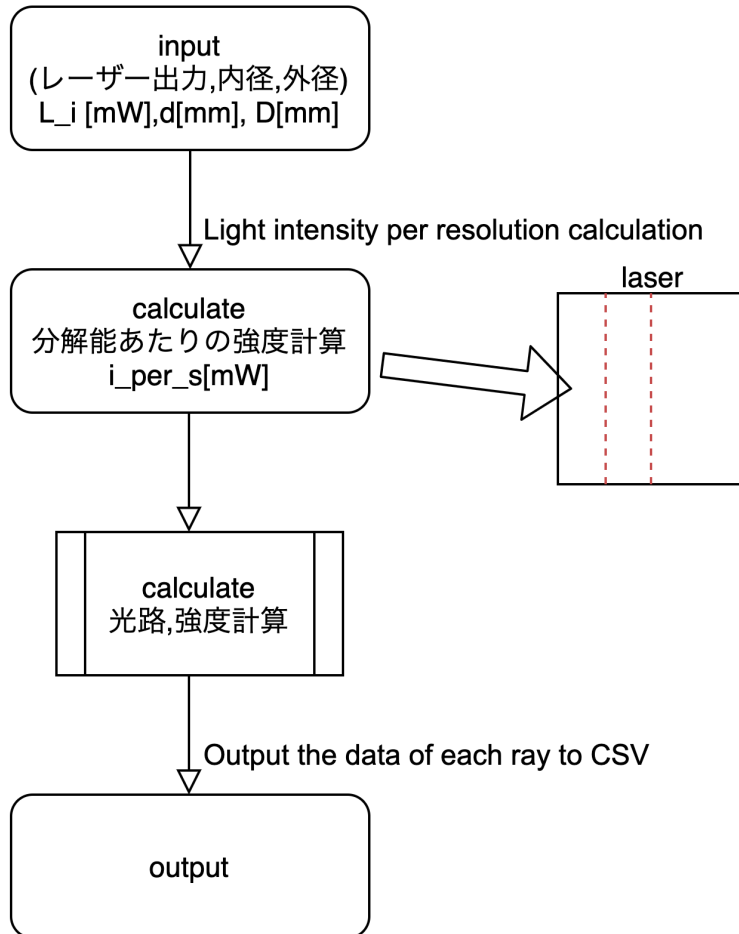
①laser	Beam radius[mm]	2.0
	Beam power[mW]	2.0
	Wavelength[nm]	630
②Grass capillary	Inner diameter[mm]	0.1
	External diameter[mm]	0.15-
③Distance[mm]	0.1 ~ 1.0	
Pinhole	④Thickness[mm]	1.0
	⑤Diameter[mm]	0.05
⑥Light receiving section	Minimum detectable illuminance [lx](data sheet)	0.1
⑦Rotating table[deg]	0.01	

# Flowchart of the simulation program

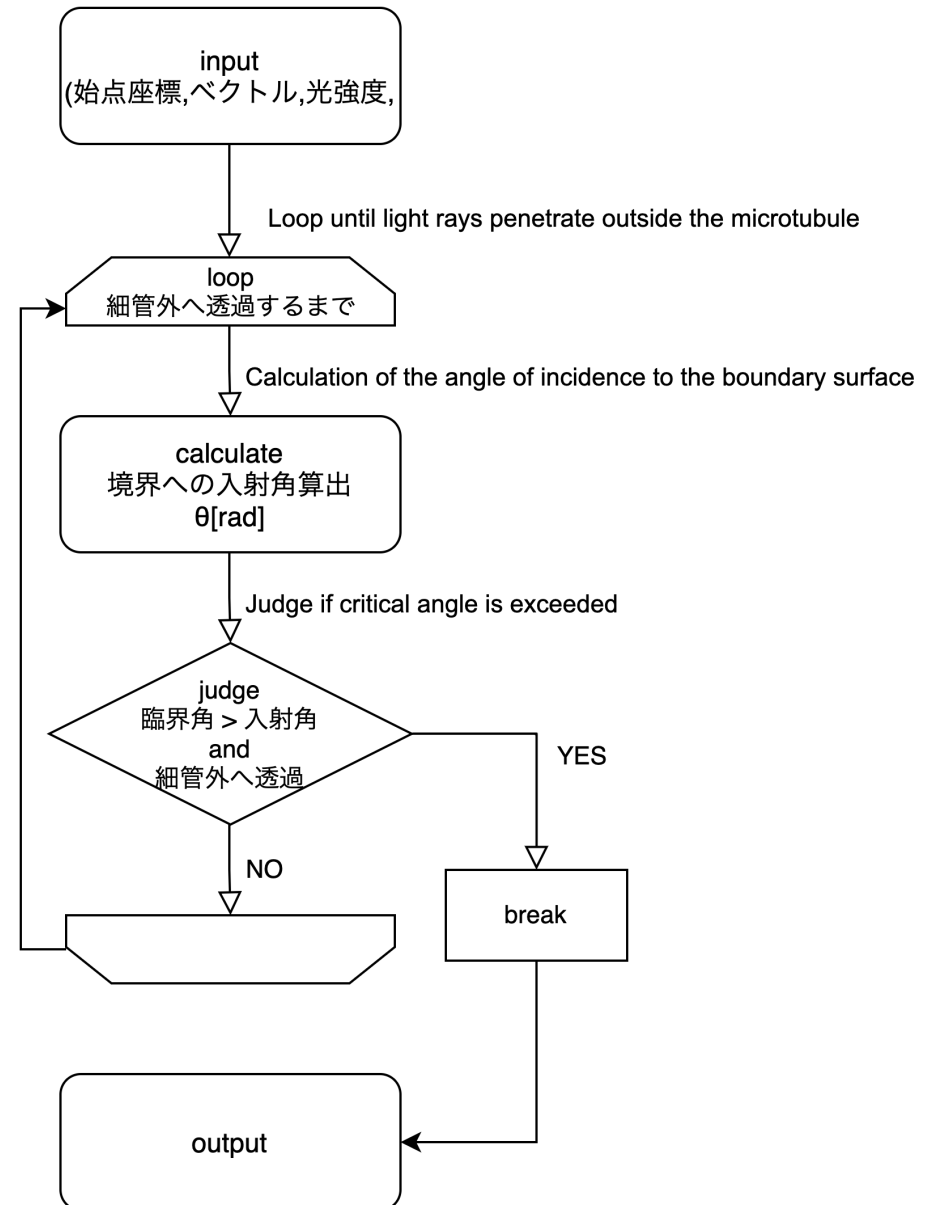
## 前提

- ・レーザーの出力分布は一様であると仮定
- ・レーザー光は一応な正方形に補正
- ・空間分解能: $10^{-6}$ [mm]
- ・光強度分解能: $10^{-9}$  [W]

光路及び光強度取得



## 光路,強度計算

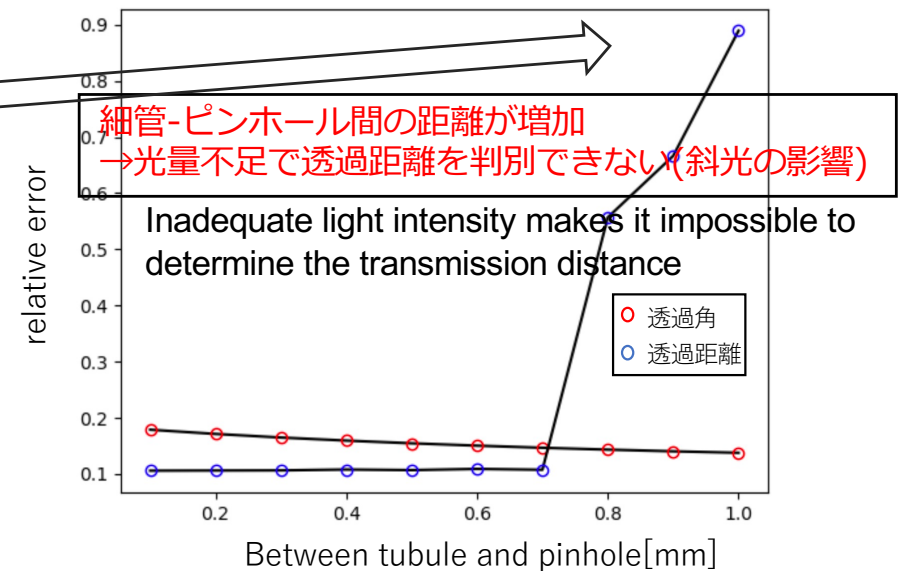
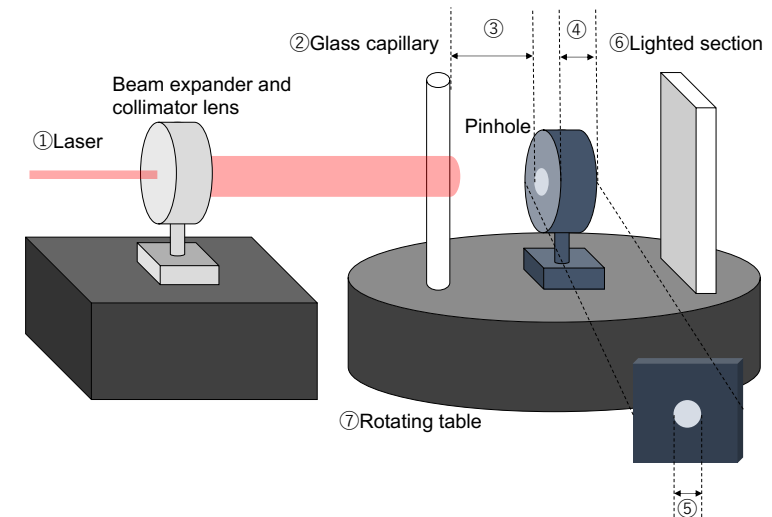
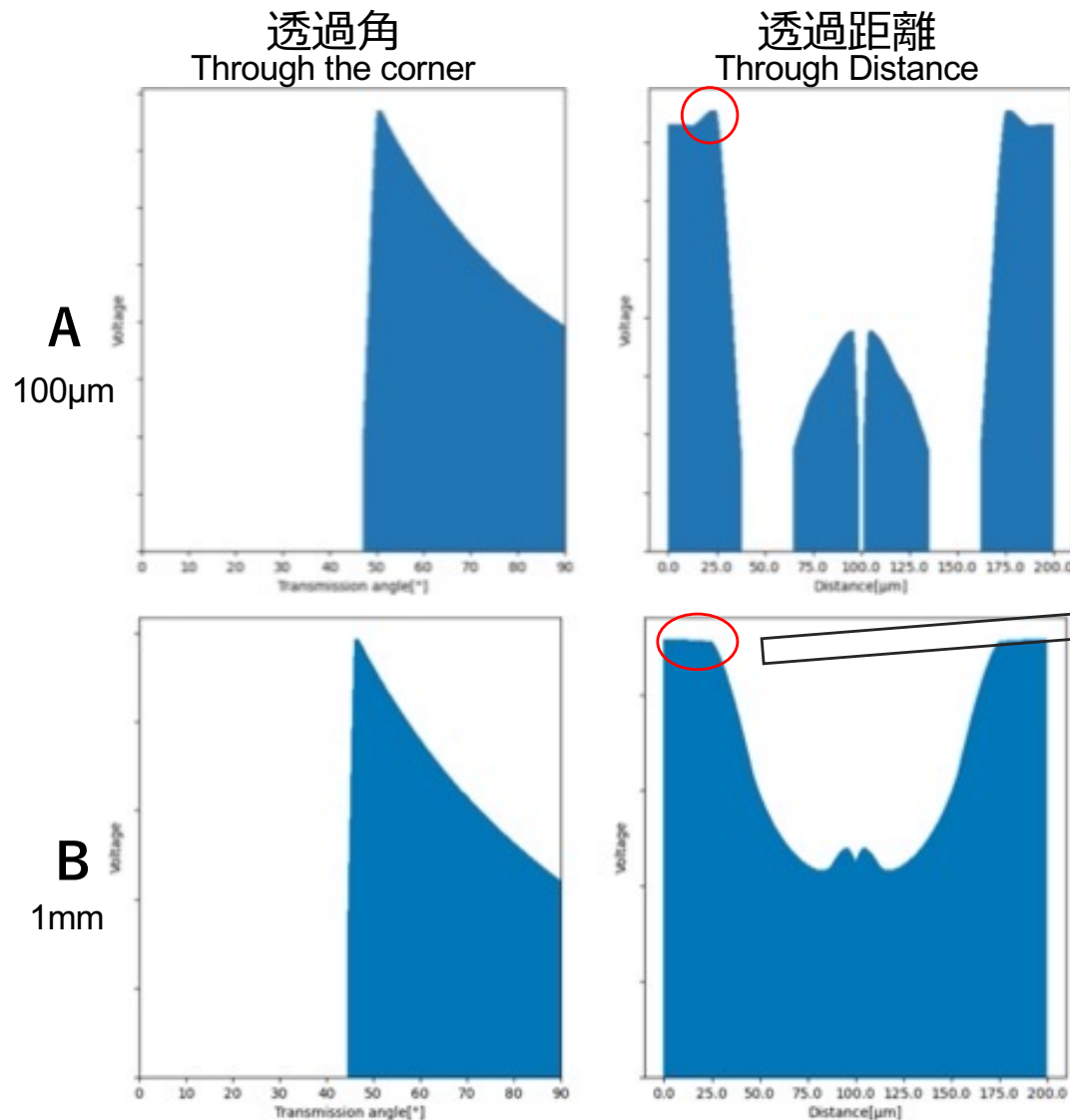


# Result

Inner diameter = 100 $\mu$ m Outer diameter = 200 $\mu$ m

## ③細管-ピンホール間の距離を変化させた結果 (A:100 $\mu$ mとB:1mmの比較)

Results of varying the distance between the microtubule and the pinhole (A: 100  $\mu$ m vs. B: 1 mm)



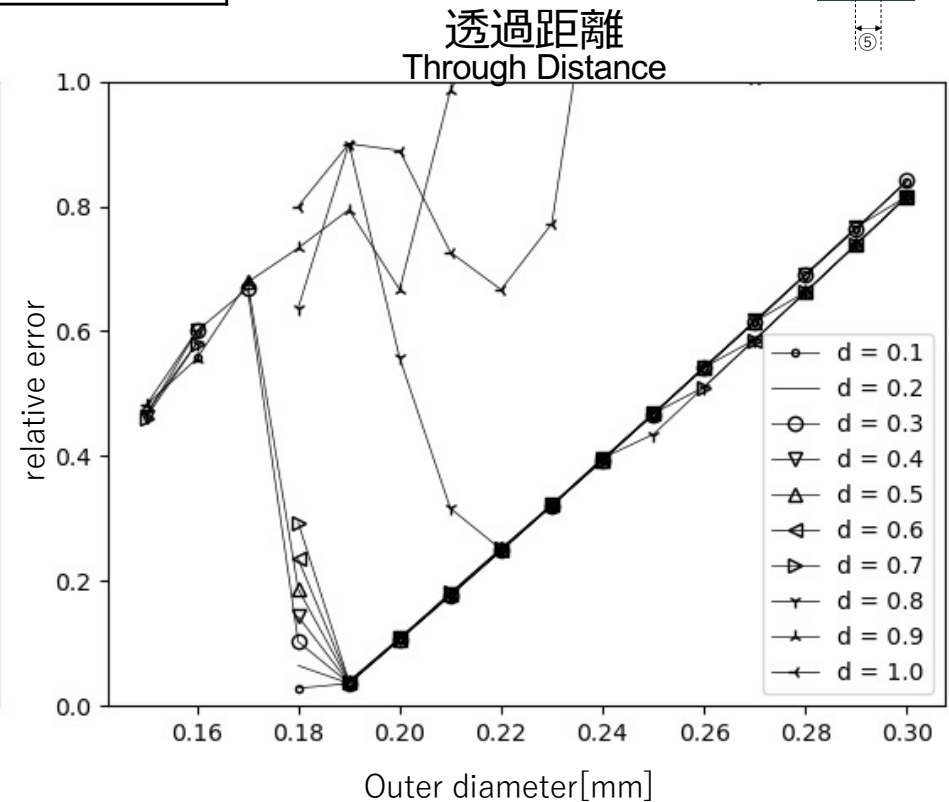
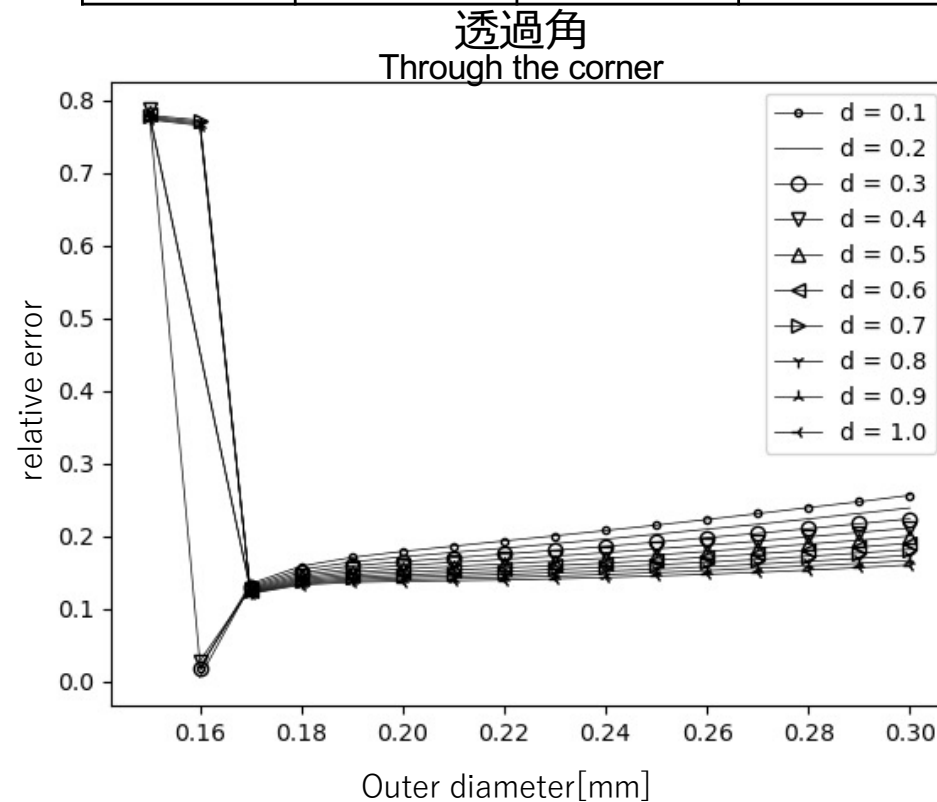
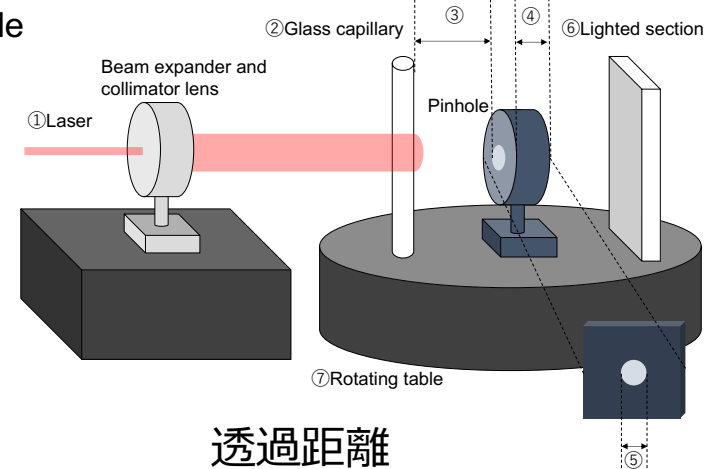
# Result

Inner diameter = 100 $\mu$ m

## 外径ごとに細管-ピンホール間の距離を変化させた結果

The results of varying the distance between the narrow tube and the pinhole for each outer diameter.

	細管-ピンホール間 Between tubule and pinhole		外径 outer diameter	
	小	大	小	大
透過角	誤差大 high error rate	誤差小 small error rate	誤差小	誤差大
透過距離	誤差小	誤差大	誤差小	誤差大



# Conclusion

## 微小流量計測の二次元画像処理計測に使用する細管の内径を任意の計測点から取得する手法の開発

Development of a method to obtain the inner diameter of a small tube from an arbitrary measurement point for two-dimensional image processing measurement of micro-flow rate measurement

- 先行研究の理論をもとにシミュレーションを行なった結果,内径100 $\mu\text{m}$ の細管でも適切な実験体系を設計することにより内径計測が可能であることを確認した

As a result of the simulation based on the theory of the previous study, it was confirmed that the inner diameter measurement was possible even for a thin tube with an inner diameter of 100  $\mu\text{m}$  by designing an appropriate experimental system.

### Future Plan

- 実際に光学系の設計及び内径の計測を行い, $\mu$ スケールの場合でも内径計測可能であることを確認する

Actually design the optical system and measure the inner diameter to confirm that the inner diameter can be measured even in the case of  $\mu$  scale.