

# 外乱振動の影響を低減できる 光学式傾斜計

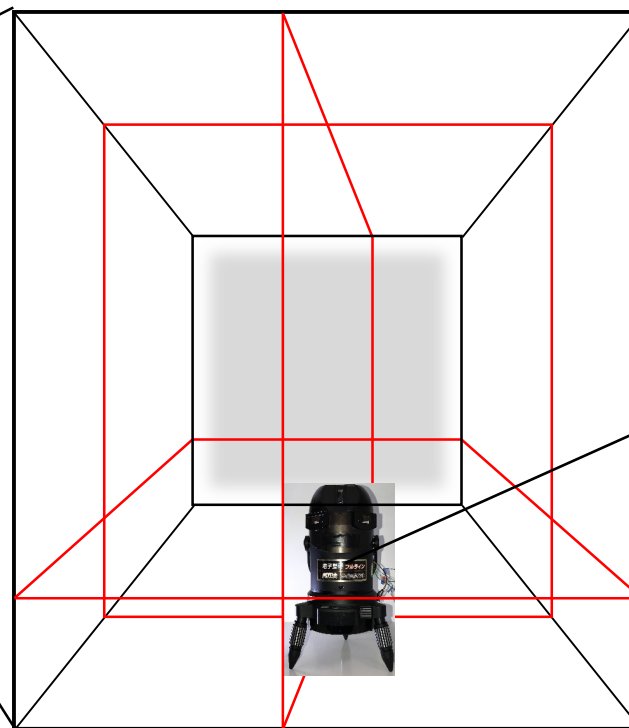
東京電機大学 理工学部理工学科 機械工学系  
准教授 松谷 巖

2022年11月10日

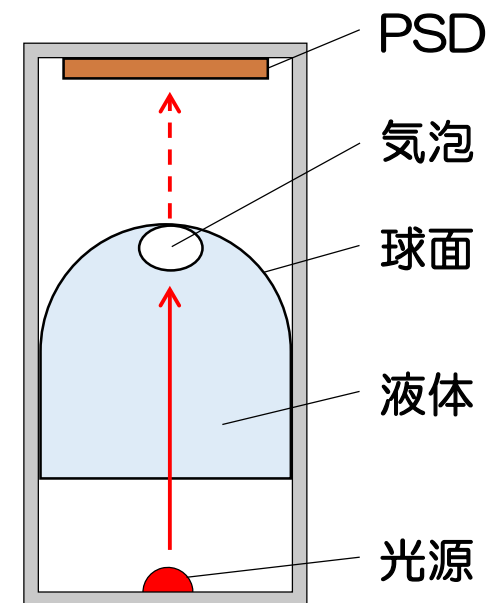
## 傾斜計とは？



建設中の建物（@ジブリパーク）



レーザ墨出し器

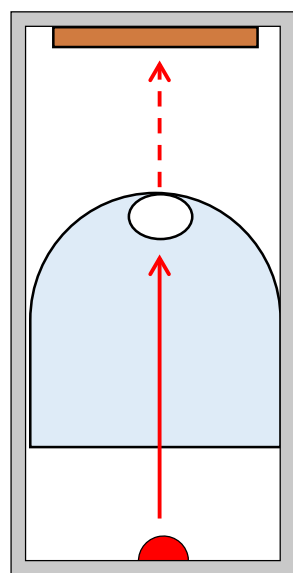


傾斜計（気泡管センサ）

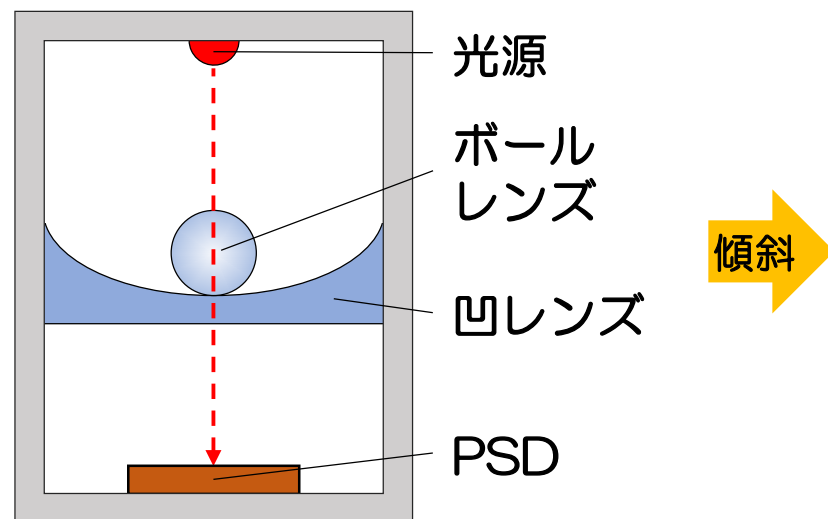
## 問題点

レーザ墨出し機の傾斜計は、高感度なため電氣的フィルタで除去しきれないほど**外乱振動**を拾ってしまう。角度のDC成分は高分解能が求められている。

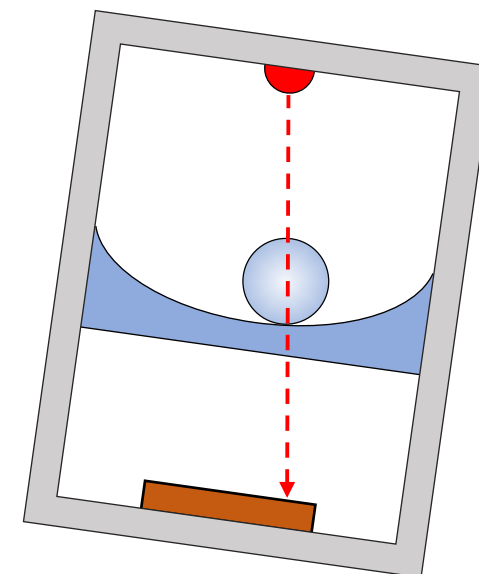
気泡管センサの振り子を利用した鉛直線の検出原理は踏襲し、新構造を提案



気泡管センサ

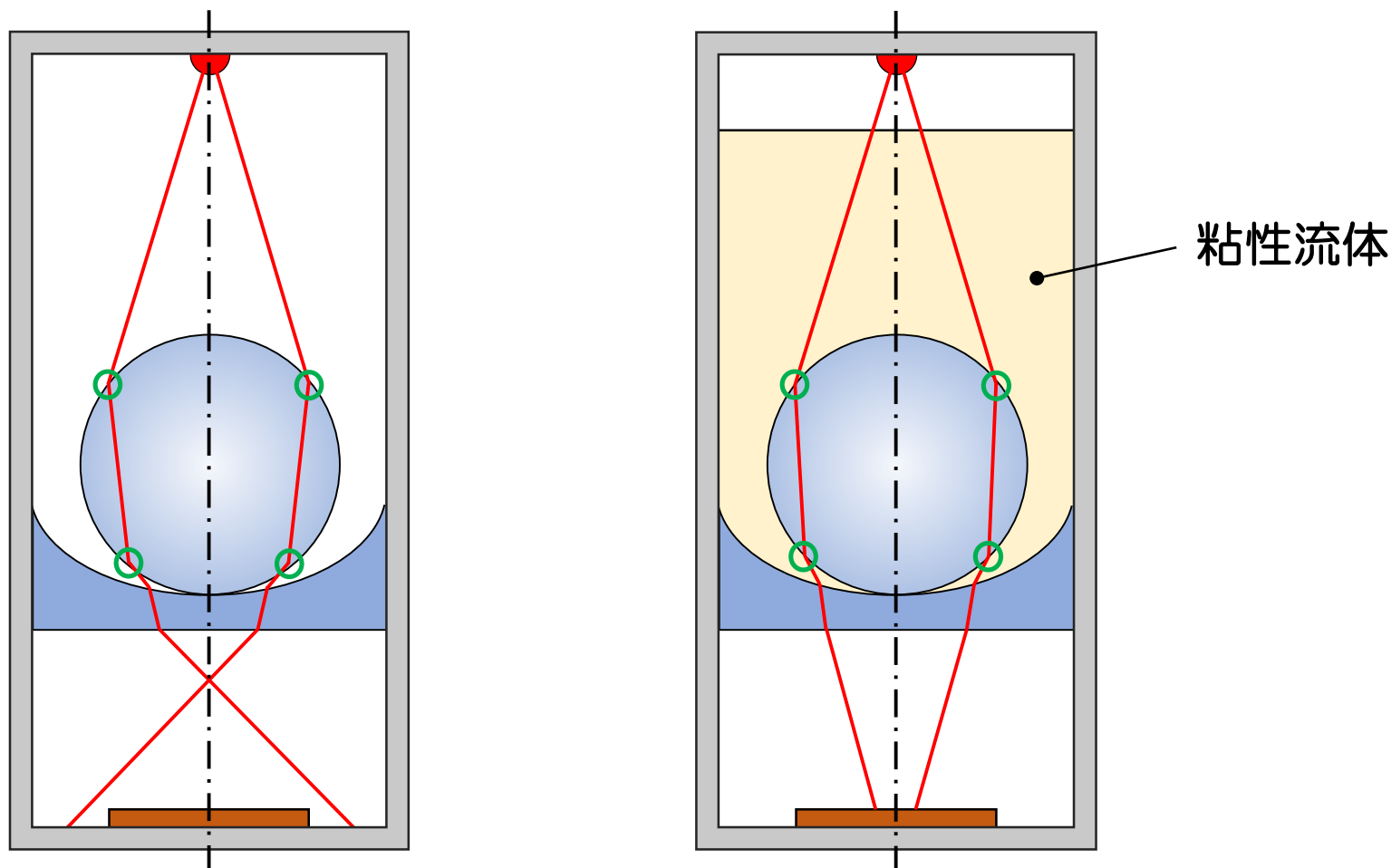


ボールレンズ傾斜計



## 研究目的

DC成分については高分解能だが、外乱振動を除去できる傾斜計を開発する  
(0.005° 以下) (1Hz以上)



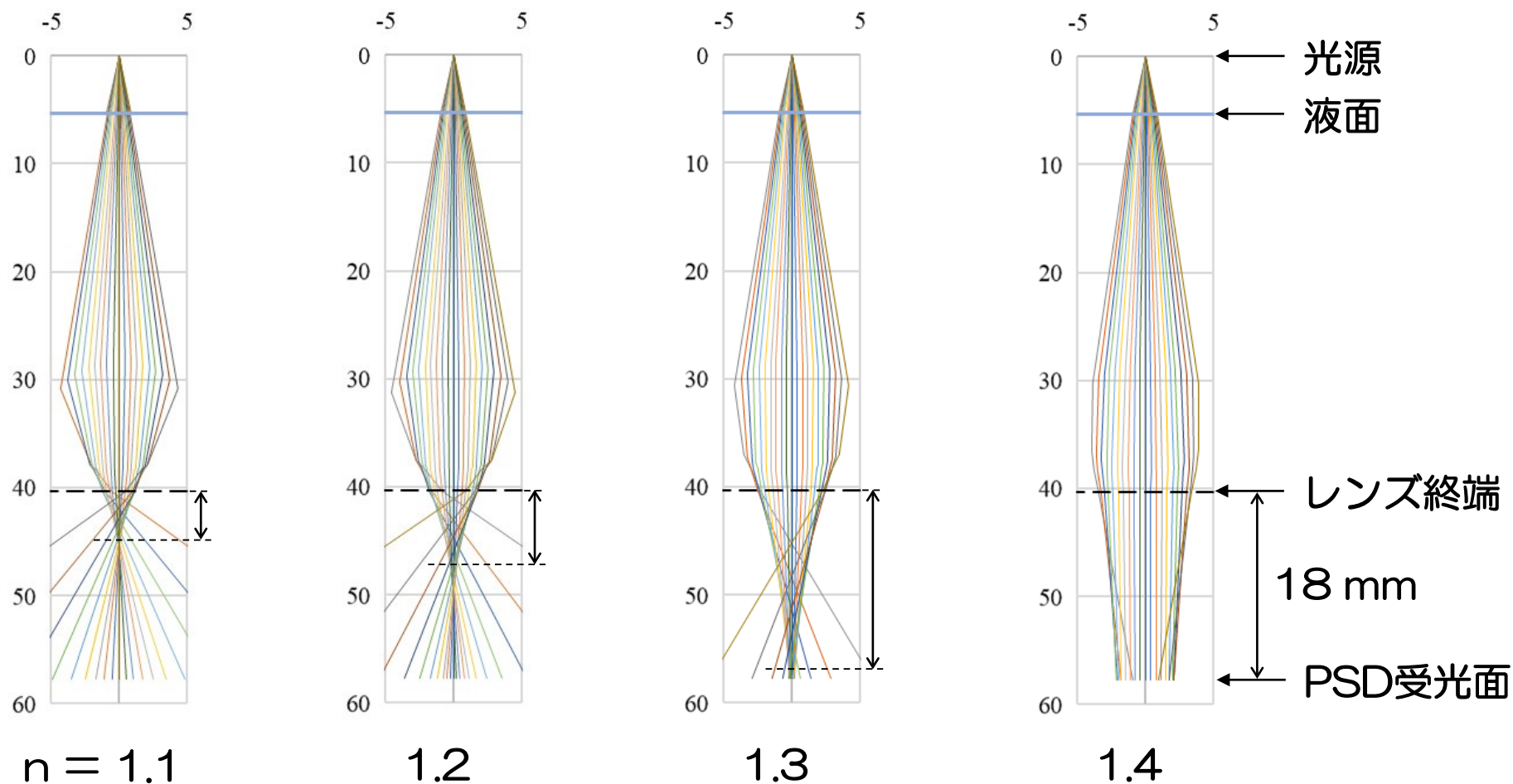
傾斜計断面図

屈折率は空気=1、ガラス=1.5。屈折率差の大きさが短焦点の原因

→ 液体（ $1 < \text{屈折率} < 1.5$ ）を注入し屈折率の差を緩和すれば良い

→ 外乱振動によるボールレンズの振動も抑制可能と考えられる

ボールレンズ周囲を液体で満たし、長焦点距離化＝分解能向上を狙う



ボールレンズ周囲の屈折率を変えたときの光線追跡

屈折率が高いほど焦点距離が長く高感度で光線のばらつきが小さい  
現在のケースサイズの制約から1.4前後がベスト

選定した液体：グリセリン

選定理由

- 入手が容易、かつ安価
- 純水で希釈を行うことにより、様々な粘度・屈折率の液体を設定可能

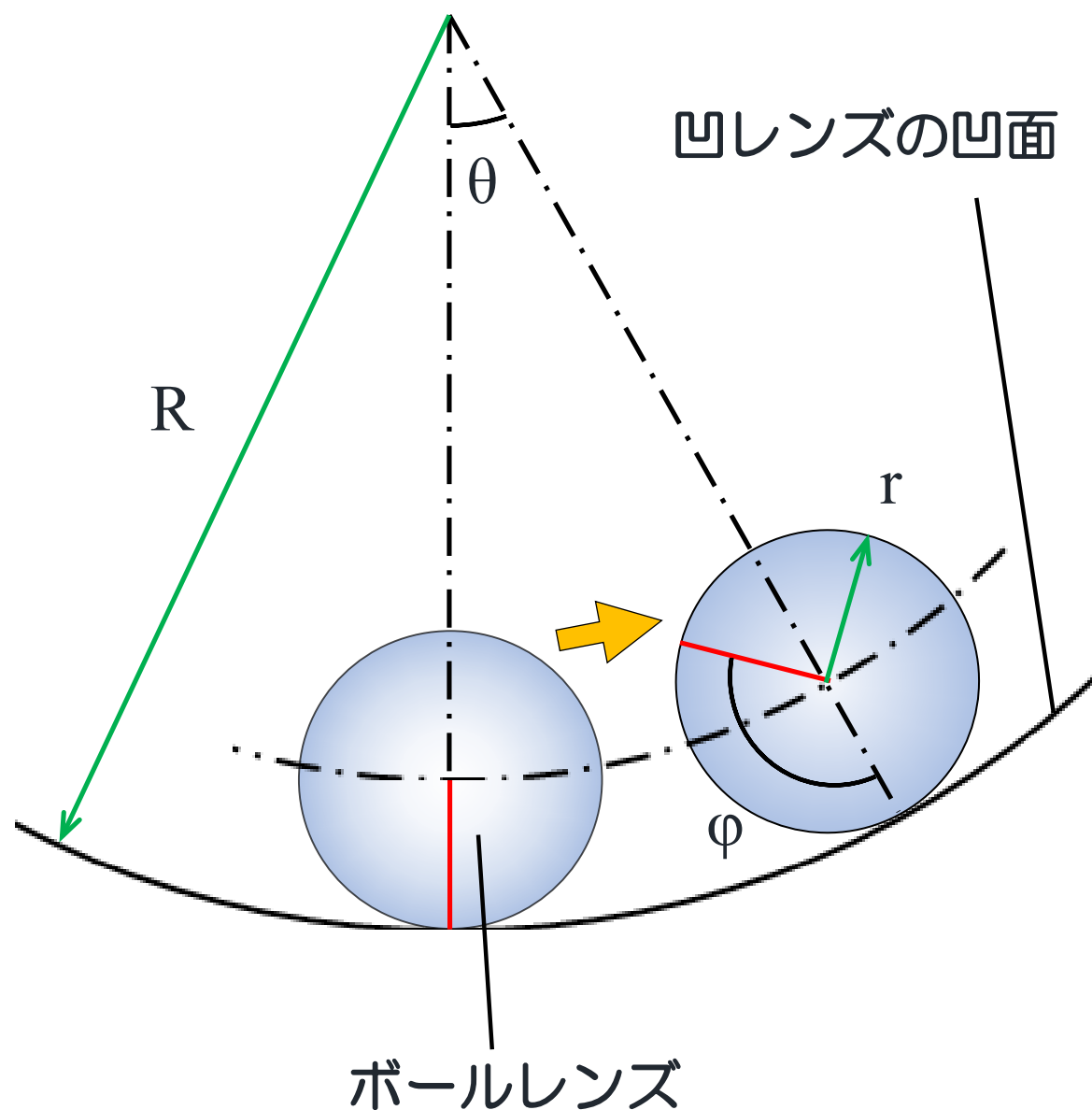
| 流体    | 濃度 % | 粘度 mPa・s | 屈折率   |
|-------|------|----------|-------|
| 純水    | —    | 1.00     | 1.333 |
| グリセリン | 20   | 1.76     | 1.357 |
|       | 50   | 6.00     | 1.398 |
|       | 80   | 60.1     | 1.443 |
|       | 100  | 1410     | 1.474 |

参照：米国・グリセリン生産者協会の資料による

光線追跡結果を踏まえ、屈折率1.398のグリセリン50%水溶液を選定する

# ボールレンズの運動方程式①

粘性流体を使用することで、外乱振動の低減（ローパスフィルタ）効果を狙う



$m$  [kg] : ボールレンズ質量

$g$  [m/s<sup>2</sup>] : 重力加速度

$r$  [mm] : ボールレンズ半径

$R$  [mm] : 平凹レンズ曲率半径

$F$  [N] : 摩擦力

$\theta$  [rad] : 傾斜角度

$\phi$  [mm] : ボールレンズの変位角

$\eta$  [Pa·s] : 流体の粘度

$\xi$  : 減衰比

$\omega_n$  [Hz] : 固有振動数

$\omega$  [Hz] : 入力振動数

$F_0$  [N] : 入力振幅

$\theta_0$  [rad] : 初期変位

$\omega_0$  [rad/s] : 初期角速度



凹面上におけるボールレンズの並進と回転に関する運動方程式を立てる

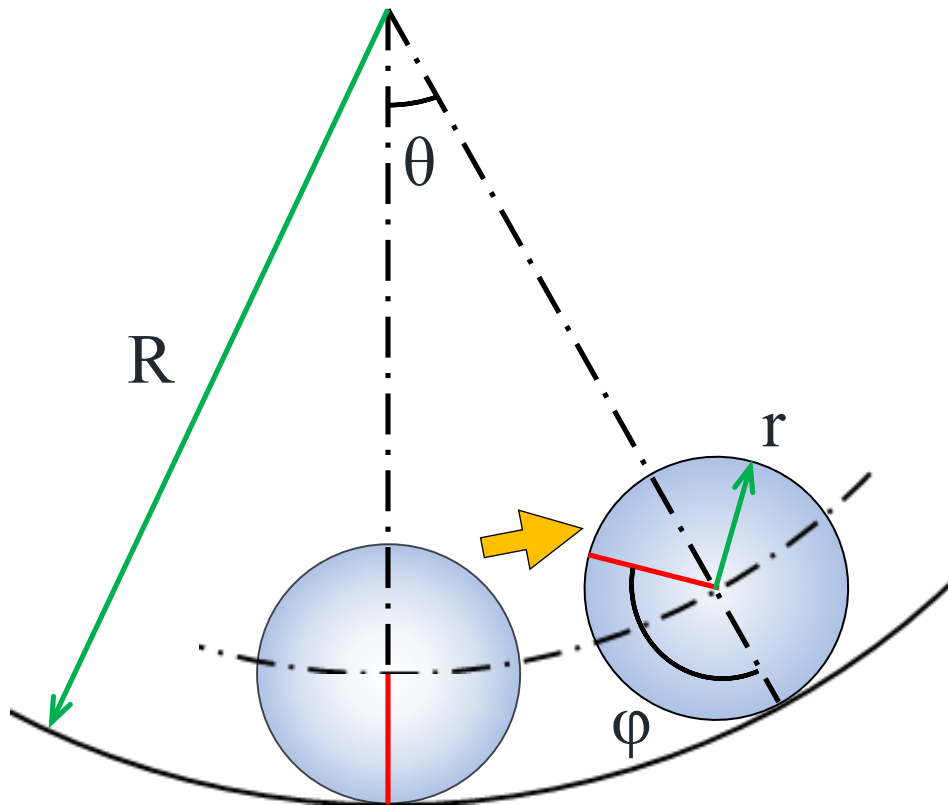
●前提条件

減衰のある1自由度系

角度  $\theta$  に対して微小角近似

外力（外乱振動）として  $F_0 \sin \omega t$  を仮定

粘性抵抗として  $S \cdot A$  の式



ボールレンズの並進運動方程式

$$m(R - r)\ddot{\theta} + 6\pi\eta r\dot{\theta} = \mp F - mg\sin\theta$$

ボールレンズの回転運動方程式

$$\frac{2}{5}mr^2\ddot{\phi} \mp Fr + 8\pi\eta r^3\dot{\phi} = 0$$

各運動より求めた運動方程式

$$m\ddot{\theta} + \frac{\{3 + 4(R - r)\}10\pi\eta r}{7(R - r)}\dot{\theta} + \frac{5mg}{7(R - r)}\theta = F_0 \sin \omega t$$



各運動より求めた運動方程式

$$m\ddot{\theta} + \frac{\{3 + 4(R - r)\}10\pi\eta r}{7(R - r)}\dot{\theta} + \frac{5mg}{7(R - r)}\theta = F_0\sin\omega t$$

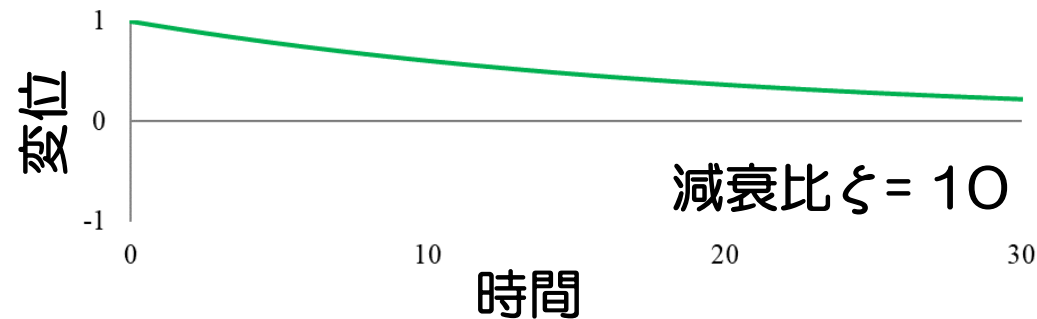
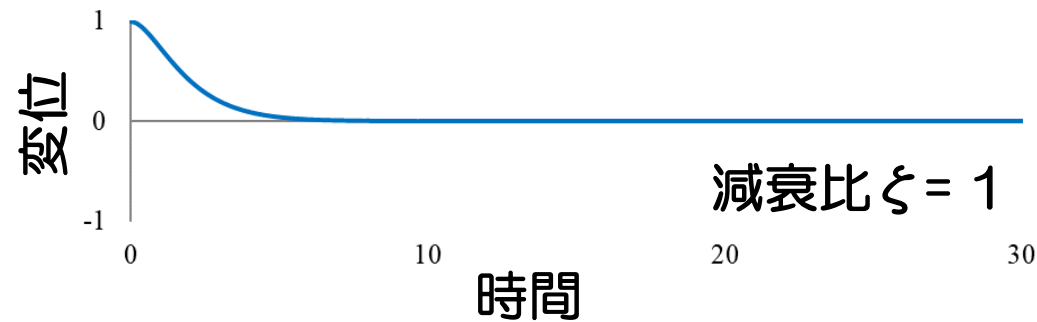
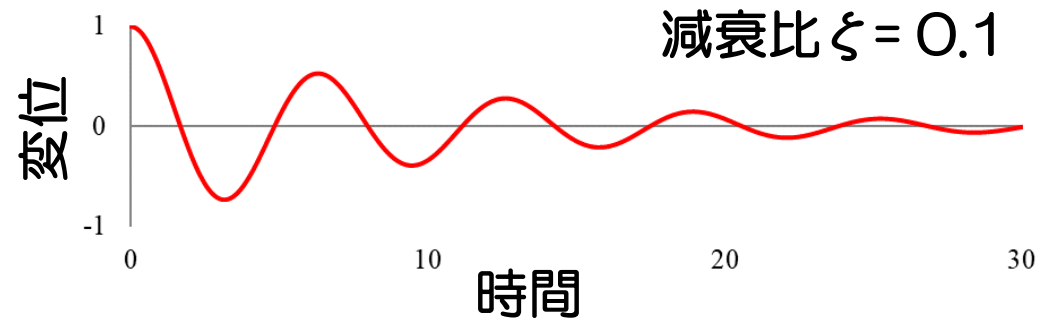
BL傾斜計の減衰比  $\zeta$  (無次元)

$$\zeta = \frac{\{3 + 4(R - r)\}5\pi r}{m\sqrt{35g(R - r)}}\eta$$

| 流体           | 粘度 mPa・s | 減衰比      |
|--------------|----------|----------|
| 空気           | 0.0182   | 0.000714 |
| 水            | 1        | 0.0392   |
| グリセリン (50%)  | 6        | 0.235    |
| グリセリン (75%)  | 35.5     | 1.39     |
| グリセリン (100%) | 1410     | 55.3     |

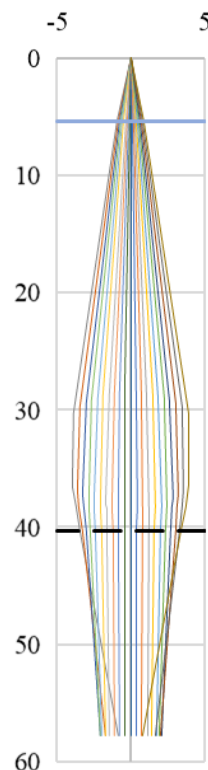
グリセリンの濃度が高いほど減衰比が大きく、外乱振動を低減する効果が高い

# 減衰比と減衰振動

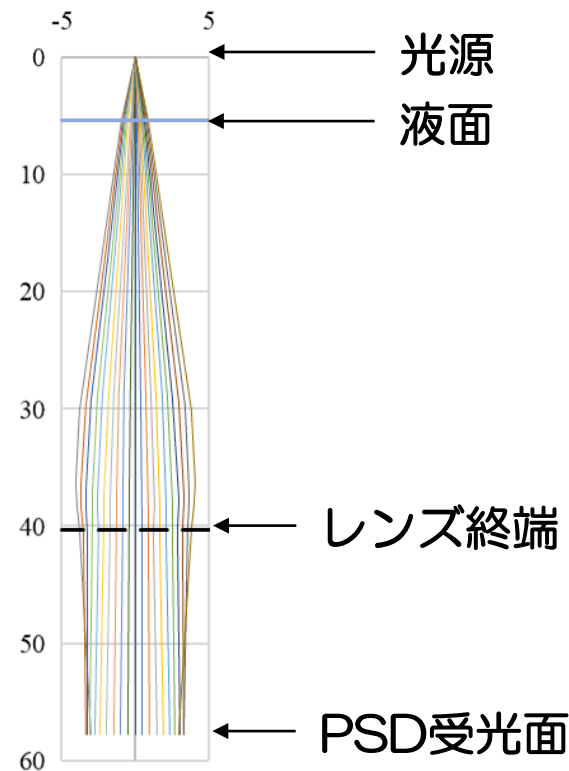


外乱振動を低減するために、臨界減衰（ $\zeta=1$ ）、過減衰（ $\zeta>1$ ）を狙う

# 減衰比と光線の集光に関する検討



グリセリン (50%)

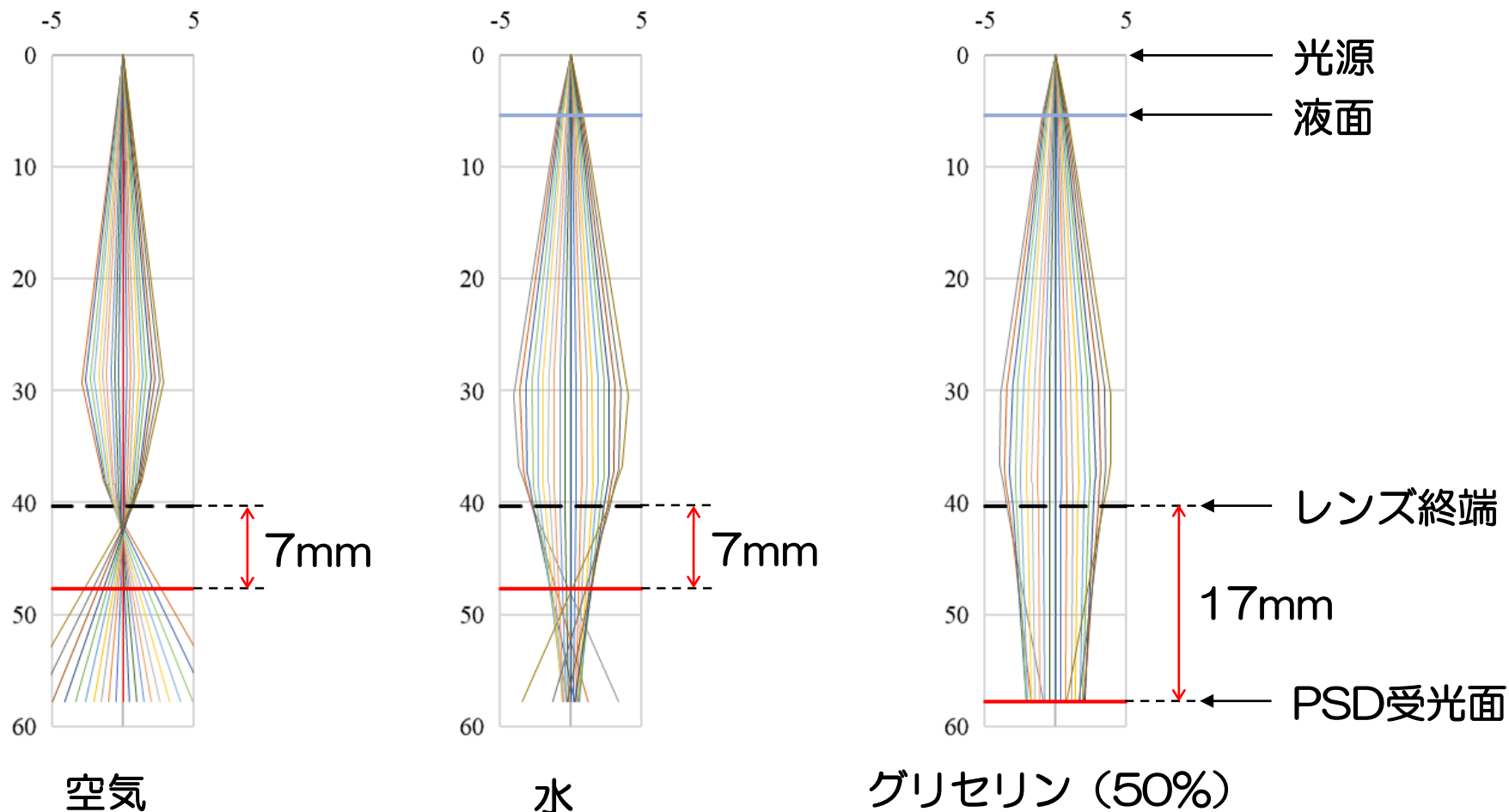


グリセリン (75%)

| 流体           | 粘度 mPa・s | 減衰比   | 屈折率   |
|--------------|----------|-------|-------|
| グリセリン (50%)  | 6        | 0.235 | 1.398 |
| グリセリン (75%)  | 35.5     | 1.39  | 1.453 |
| グリセリン (100%) | 1410     | 55.3  | 1.474 |

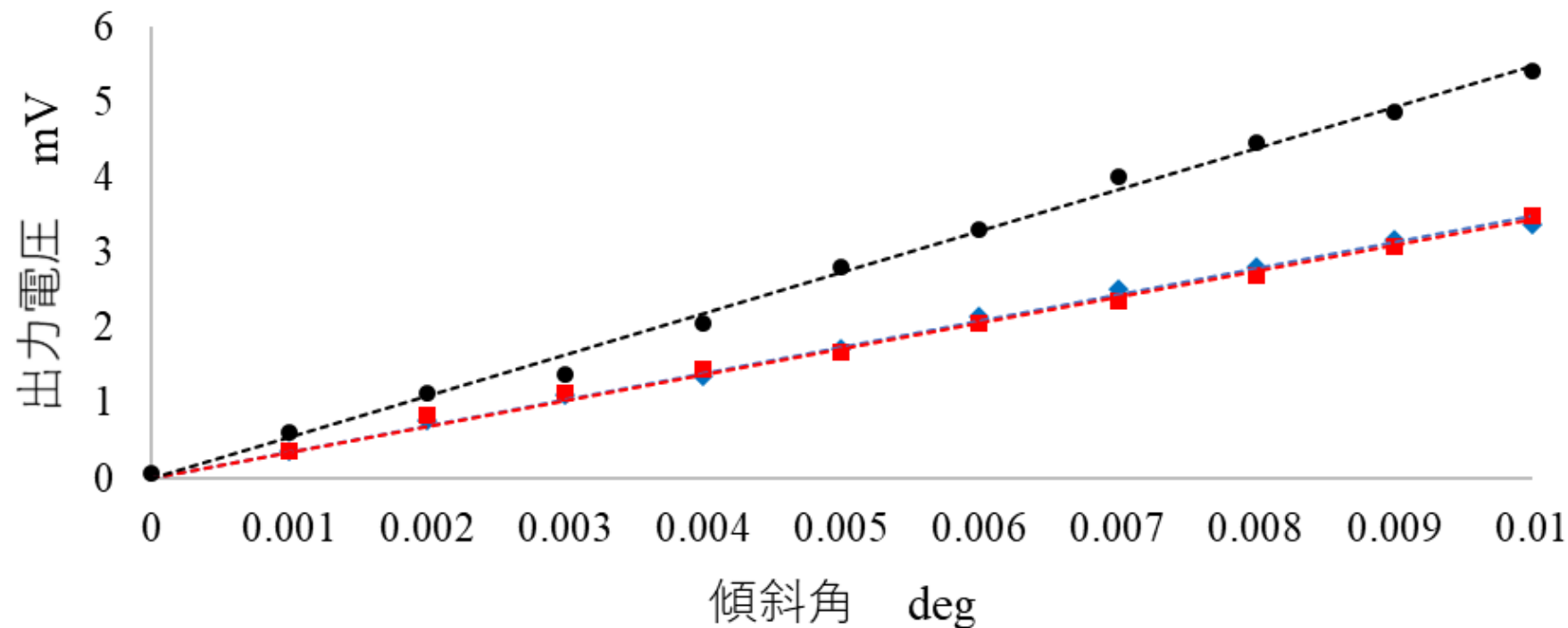
減衰比が大きいほど外乱振動除去の効果が高いが、大きすぎると屈折率も大きくなるため集光できなくなる。それらを考慮するとグリセリン50%がベスト。

三種類の液体（空気、水、グリセリン（50%））を用いてBL傾斜計を構築



光線追跡結果

0° から0.01° 傾斜させた時の傾斜計出力を調査する



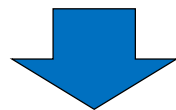
傾斜角度に対するセンサ出力

| 記号 | 流体          | 感度 mV/deg | 分解能 deg | 標準偏差 |
|----|-------------|-----------|---------|------|
| ◆  | 空気          | 350       | 0.00251 | 1.11 |
| ■  | 水           | 345       | 0.00254 | 1.10 |
| ●  | グリセリン (50%) | 549       | 0.00153 | 1.74 |

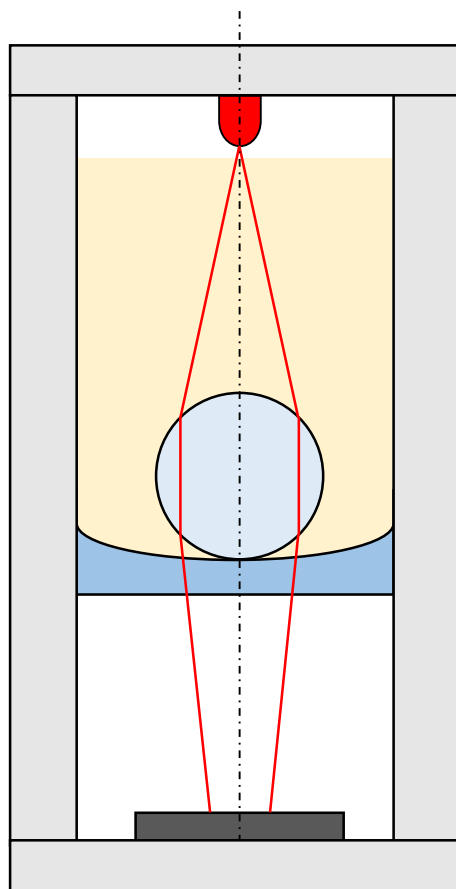
焦点距離が最も長いグリセリン光学系が、最も高い分解能を実現。  
目標であった分解能 $0.005^{\circ}$  以下も達成。

現傾斜計は構成要素の最適な配置が不明・未検証

→各要素のパラメーターを変更し、光線追跡を実施



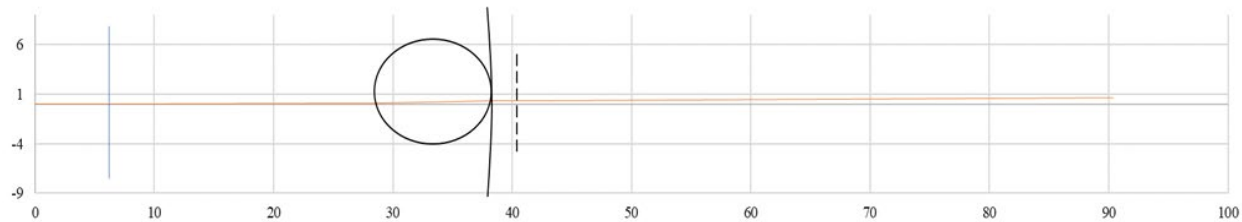
従来より高い分解能が期待出来る



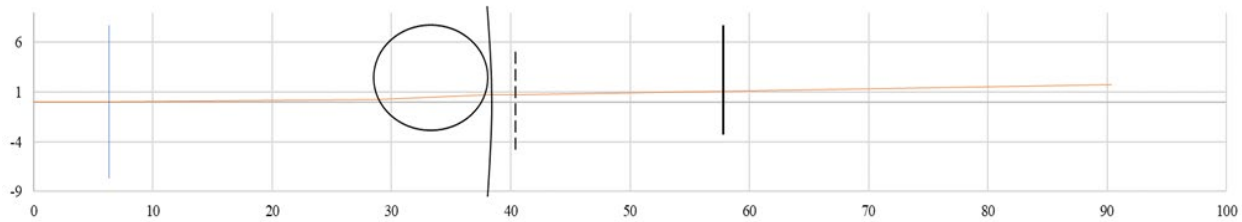
## 検討内容

- 光源変更
- 粘性流体の充填率
- 光源-レンズ系距離
- レンズ系の相対屈折率

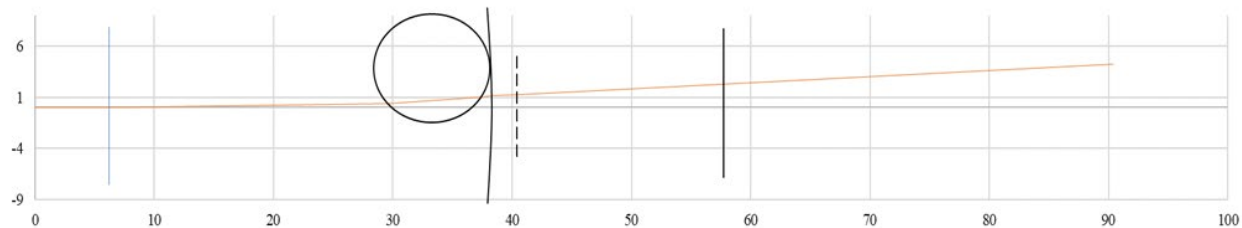
LED拡散光をレーザー等の直線光に変更し、1～5degの範囲で実施



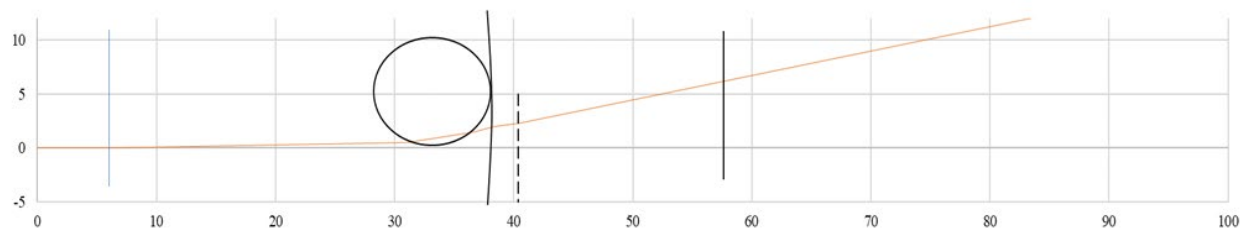
1deg



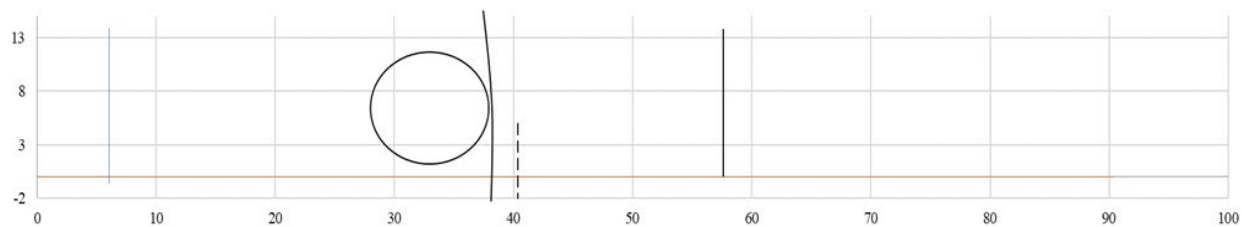
2deg



3deg



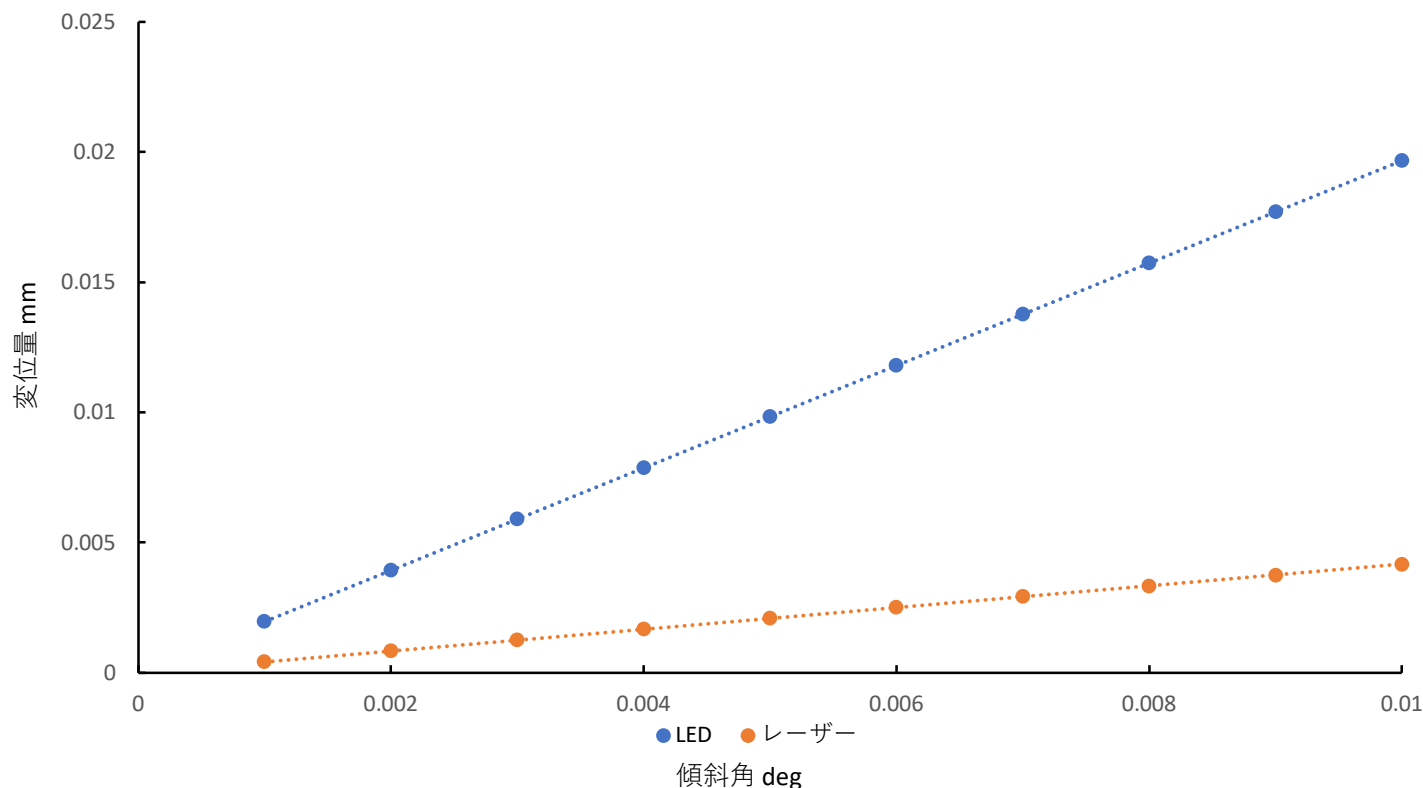
4deg



5deg



測定範囲0.001~0.01degで感度比較

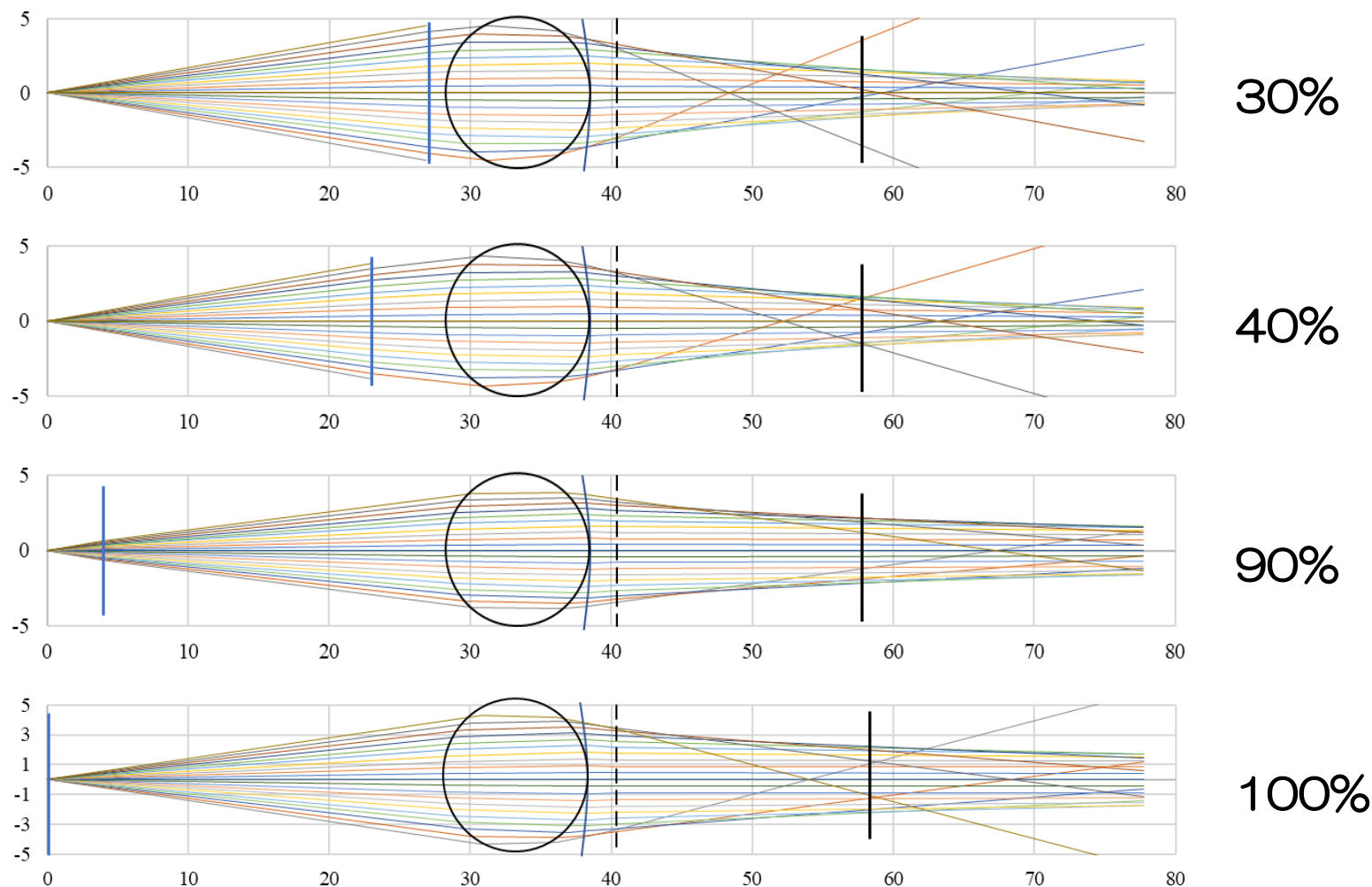


| 光源 | 拡散光LED | レーザー光 |
|----|--------|-------|
| 感度 | 1.977  | 0.417 |

## 結論

レーザー光は傾斜5degで光線がボールレンズから外れる  
拡散光LEDの方が高感度で計測範囲が高い

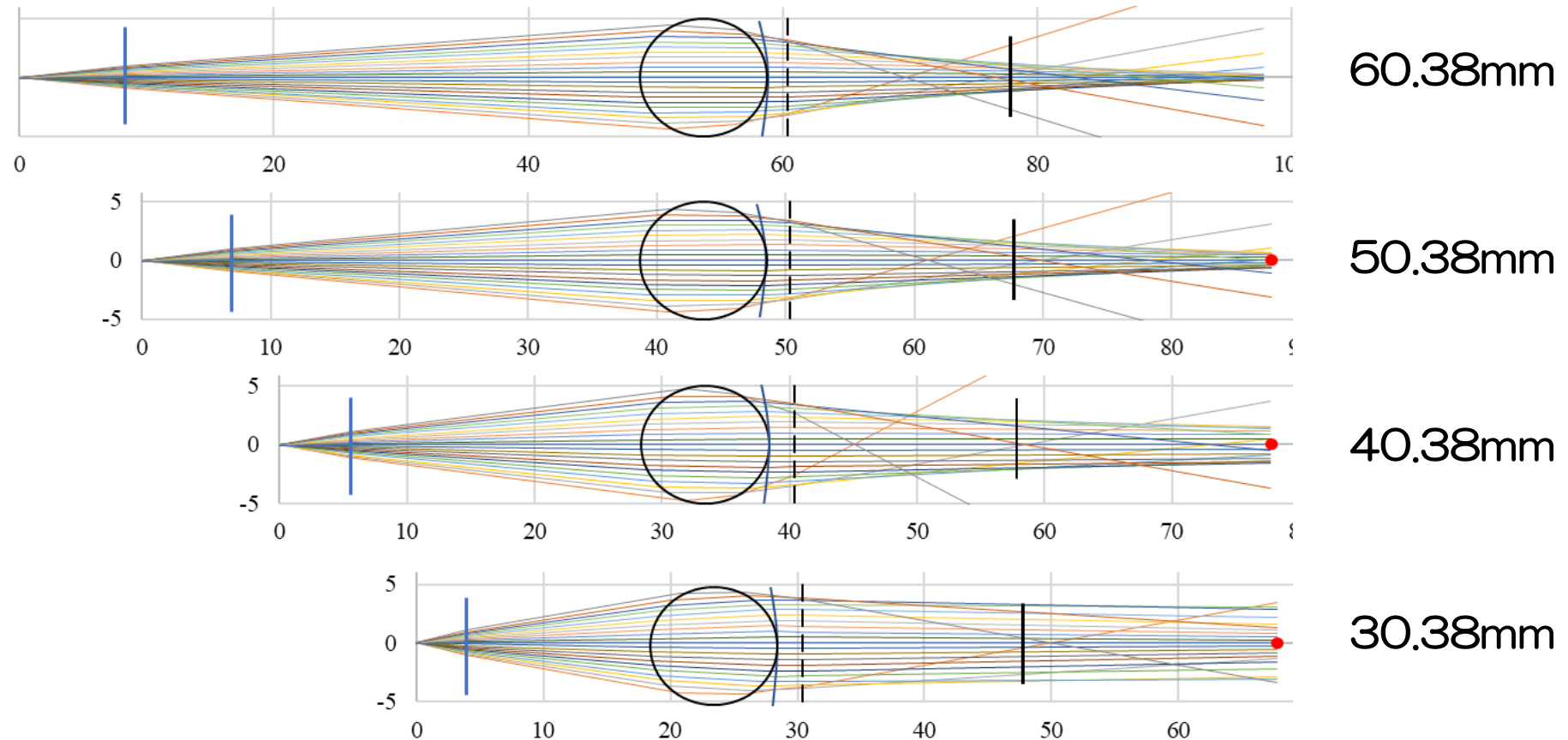
グリセリンの充填率を変更し、30%~100%の範囲で実施



結論

充填率を増加させると焦点距離が延びる  
充填率は40~90%の範囲とする事が妥当

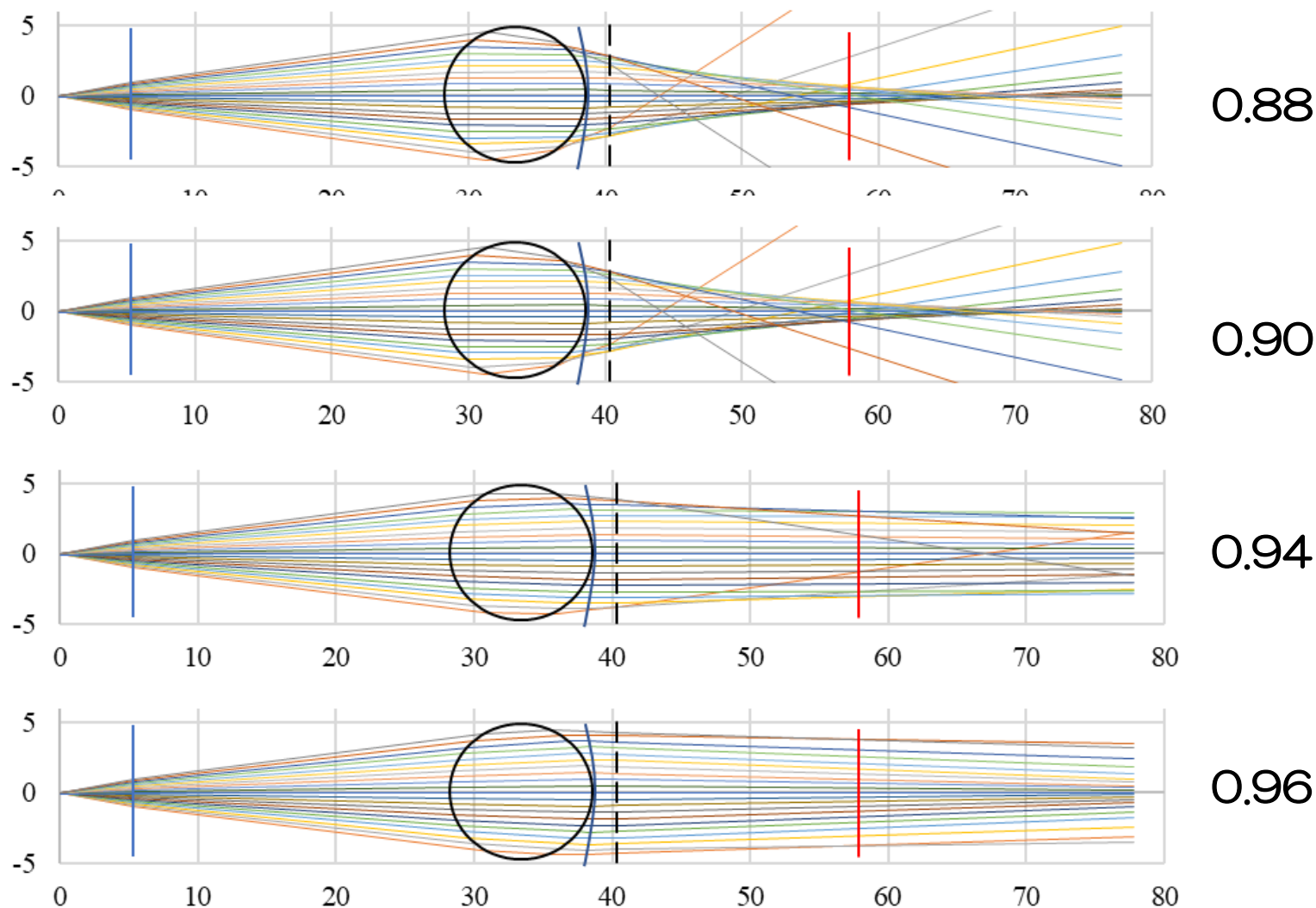
光源-レンズ系距離を実験系40.38mmを基準に30.38~60.38mmの範囲で実施



## 結論

光源-レンズ系距離を延ばすと、焦点距離は短くなる  
距離を近づけると発散光を抑えられる

相対屈折率：0.88（水）～1.00（空気・ガス）の範囲で光線追跡



## 結論

0.88～0.90の範囲では発散光が多く、0.96では光が集光しない  
相対屈折率は0.88～0.94の範囲が妥当

# 新技術の特徴・従来技術との比較

- 高分解能な傾斜計はノイズ信号も敏感に測定してしまうことが問題だった。本技術は高分解能は維持したまま、周波数の大きい外乱振動は減衰させる構成を実現した。

## 想定される用途

- 通常の高分解能な傾斜計としての用途
- 細かい外乱振動が多い現場での傾斜測定  
(例えば建設中の建築構造物内部)

## 実用化に向けた課題

- 使用する粘性流体が現状のグリセリンだと温度による粘度変化が大きいことが問題
- シリコンオイルやPAOなどでも傾斜計が構成できるか否かの調査
- 粘性流体によるダンピング効果を実際に評価すること

## 企業への期待

- 評価試験などの設備を補って頂くこと
- 温度変化による粘性流体の粘度、屈折率の変化など
- 粘性流体によるダンピング効果を評価するために、ボールレンズの挙動をカメラ撮影



## 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 傾斜角度測定器
- 出願番号 : 特願2022-135443
- 出願人 : 東京電機大学
- 発明者 : 松谷巖、古屋治

# お問い合わせ先

**東京電機大学**

**研究推進社会連携センター 産官学連携担当**

**TEL 03-5284-5225**

**FAX 03-5284-5242**

**e-mail [crc@jim.dendai.ac.jp](mailto:crc@jim.dendai.ac.jp)**