

## 共同研究テーマ5

# 圧縮機のデジタルツイン化と組立精度評価への応用

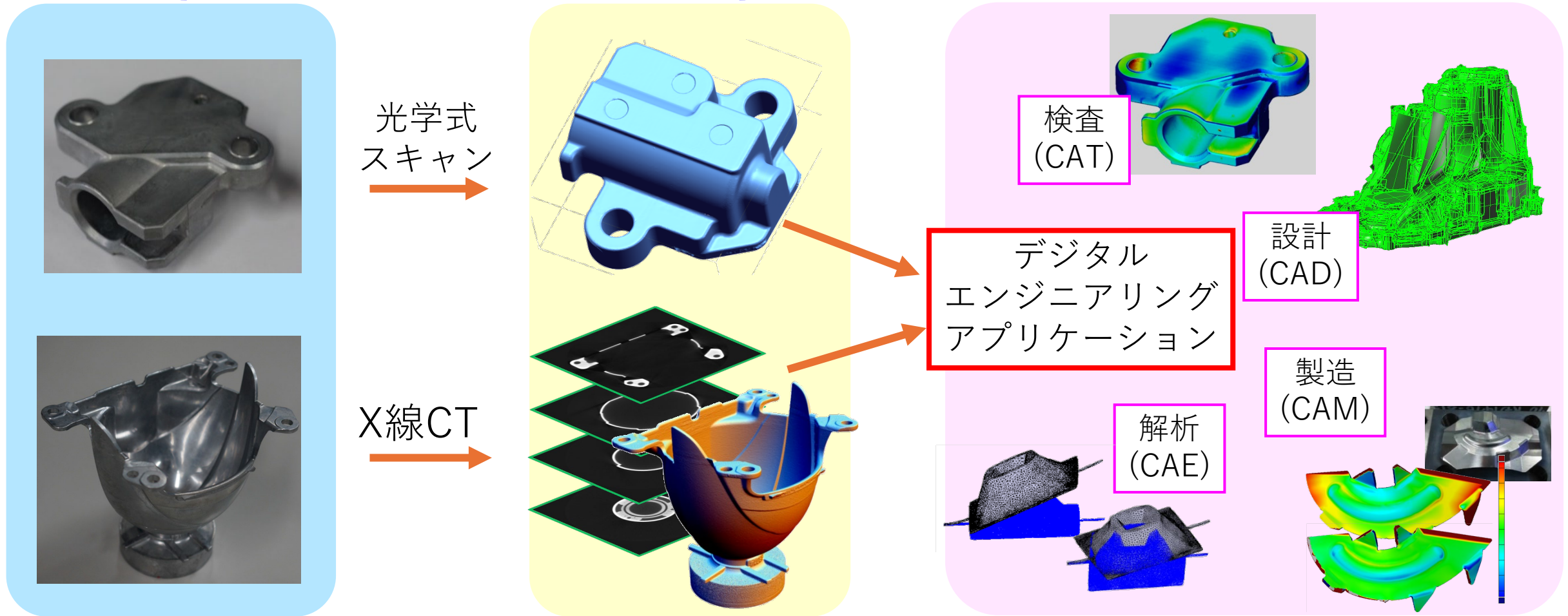


大竹 豊  
教授

共同研究者@2024  
東京大学：浅見 颯斗[M1]  
ダイキン工業：西澤 孝行、松本 暢二

※1 D3：Digital triplet  
※2 SoS層：System of Systems

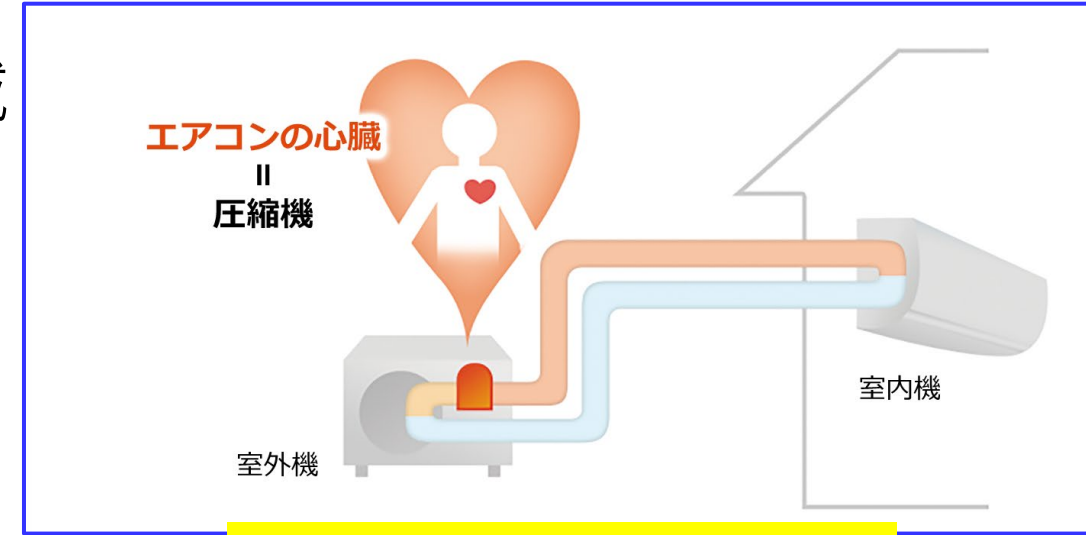
# 形状のデジタルツイン化とその活用



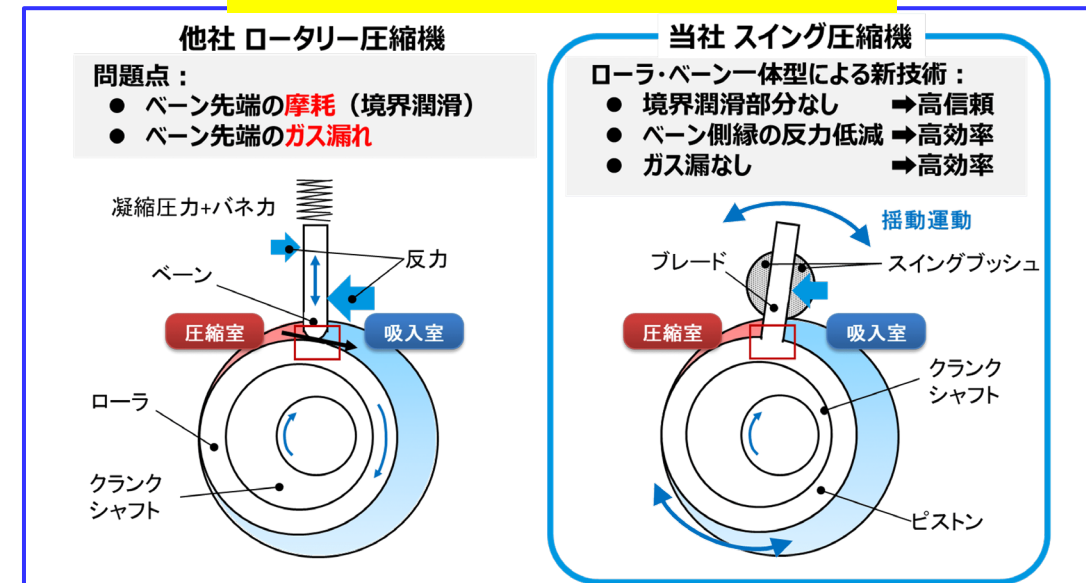
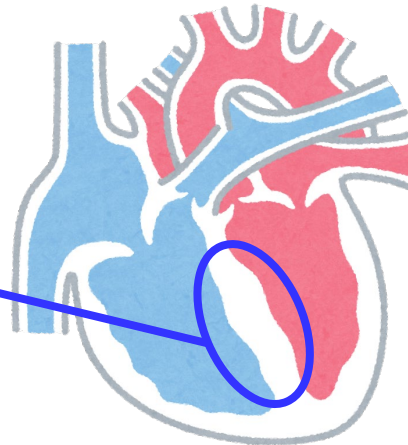
※ 3Dスキャン技術により現物の形状をデジタル化する

# エアコンの圧縮機

- 3Dエアコンの「心臓」であり精密機械
  - **1000分の1mm台**の寸法精度を要求
- 性能向上による省電力化の貢献大
  - エアコンの消費電力：



引用: [ダイキンWebページ](#)



ダイキン製スイング式圧縮機の機構



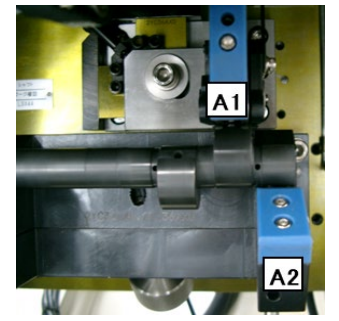
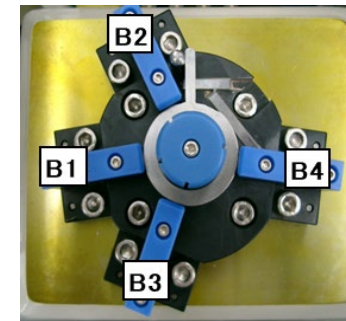
# ダイキンの圧縮機組立技術

- インライン部品寸法測定 + 自動マッチングを実装済

10個分のピストン、シリンダ、クランクを並べた写真  
+ マッチングのイメージを共有する



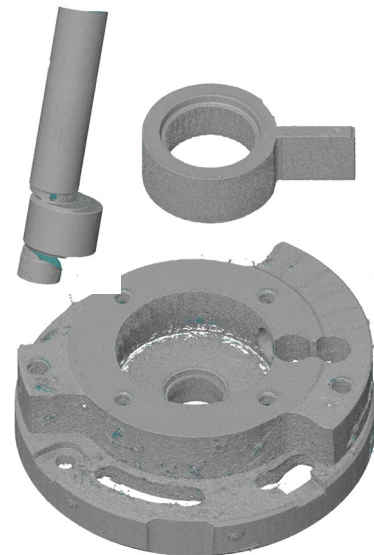
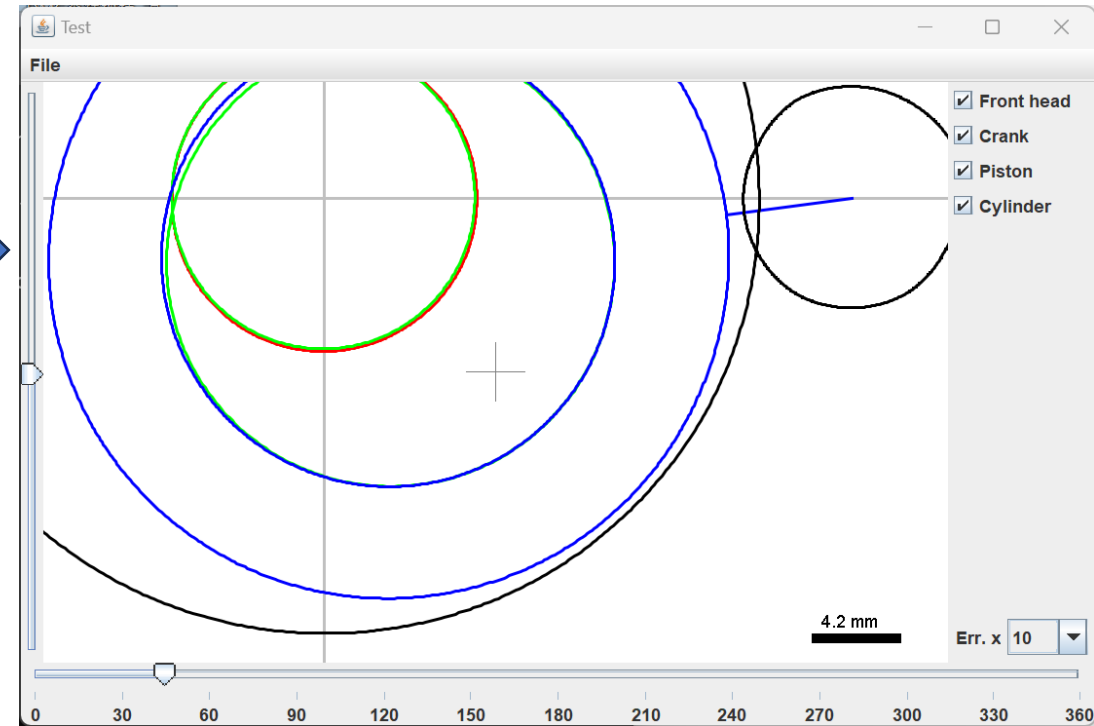
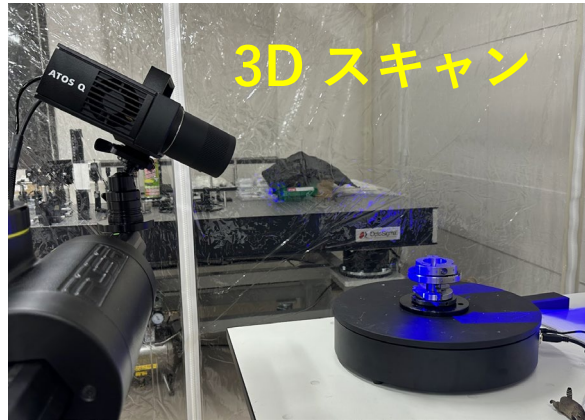
現状の部品寸法測定：  
エアマイクロメータによる  
ポイント測定



本研究テーマでは  
3Dスキャンにより更なるデジタル化の推進を図る

# 本テーマの目的・その先の展開

- (インラインで)  
**1000分の1mm台精度**の3D形状スキャン技術を確立



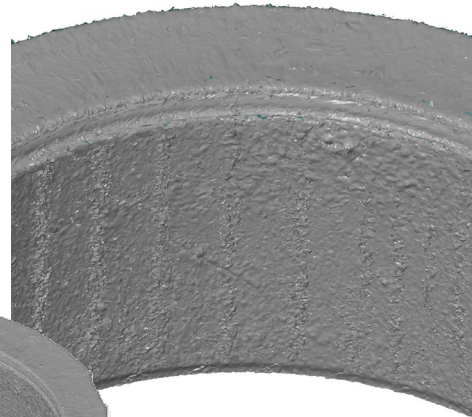
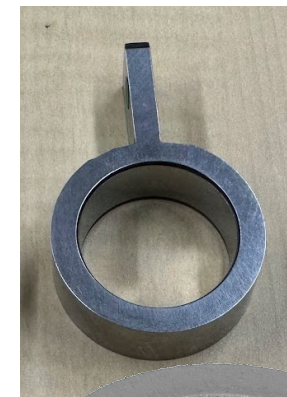
スキャン対象

スキャンデータ

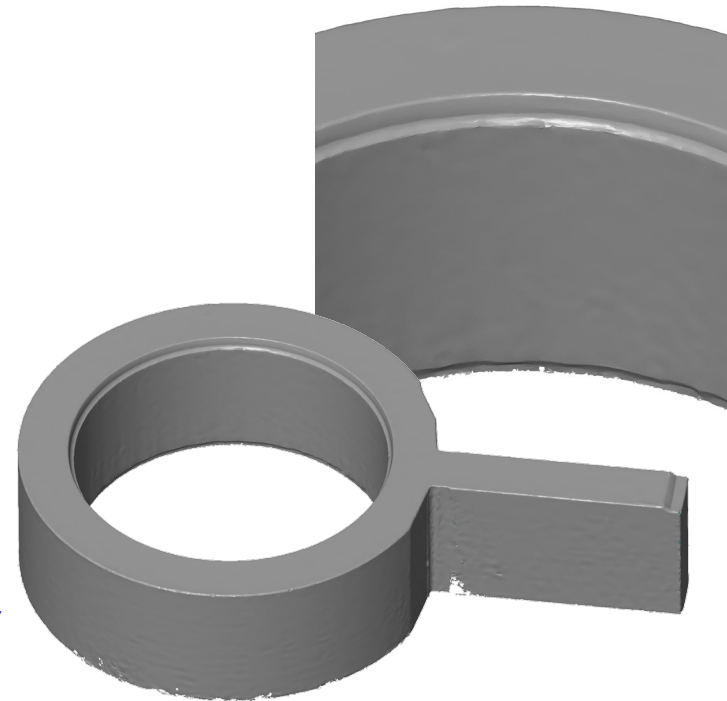
- シリンダ組付け位置の確認
- ピストン-シリンダ隙間3D寸法解析
- 現物ベースシミュレーション

# 一般的な3Dスキャナへの期待値

- 100mm 程度のワークに対して**100分の1mm台**程度
  - 画像センサアレイのピクセル数は2K~4K (10の3乗オーダー)
  - 画素サイズに対して**10分の1**程度

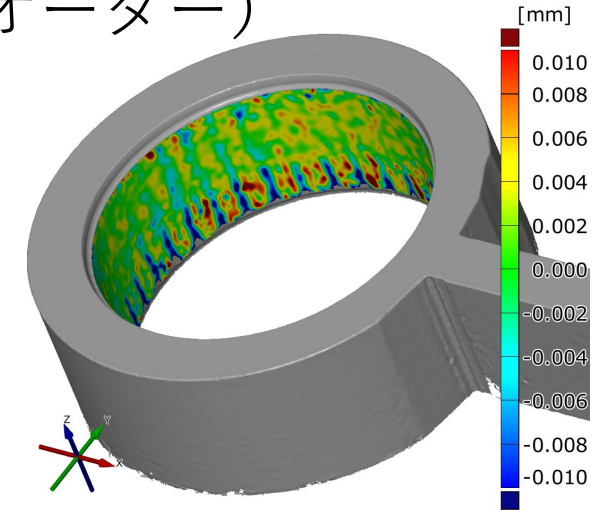


多方向からの  
スキャンを統合

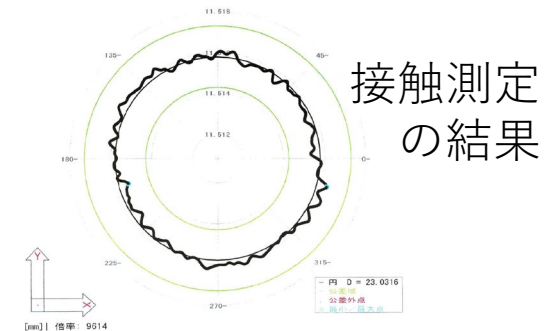


スキャンの生データ

三角形メッシュ



円筒から  
 $\pm 0.01\text{mm}$ 程度のばらつき  
嘘：実物は $\pm 0.001\text{mm}$ の精度

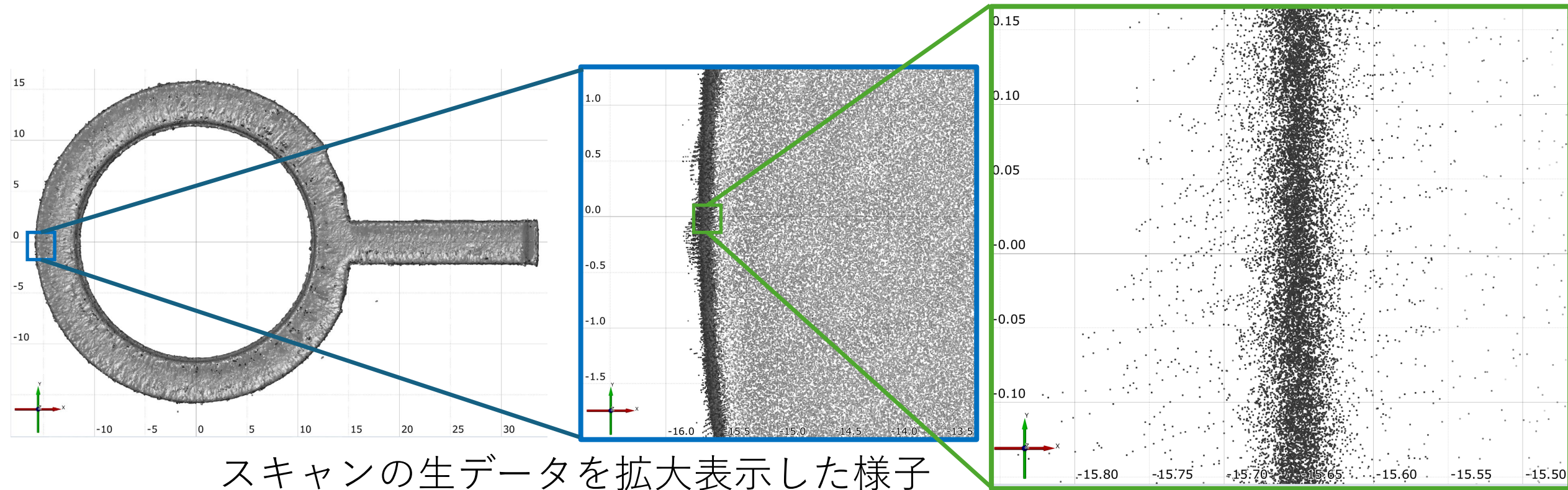


従来手法の問題点：メッシュ生成（面張り）の際に円筒面であることを利用しておらずノイズの影響大



# スキヤンの生データの観察・解決策

- 生データは Triangle Soup (バラバラの三角形群)



提案する解決策：大規模三角形群を直接使い  
想定するモデル（歪んだ円筒面）を当てはめる

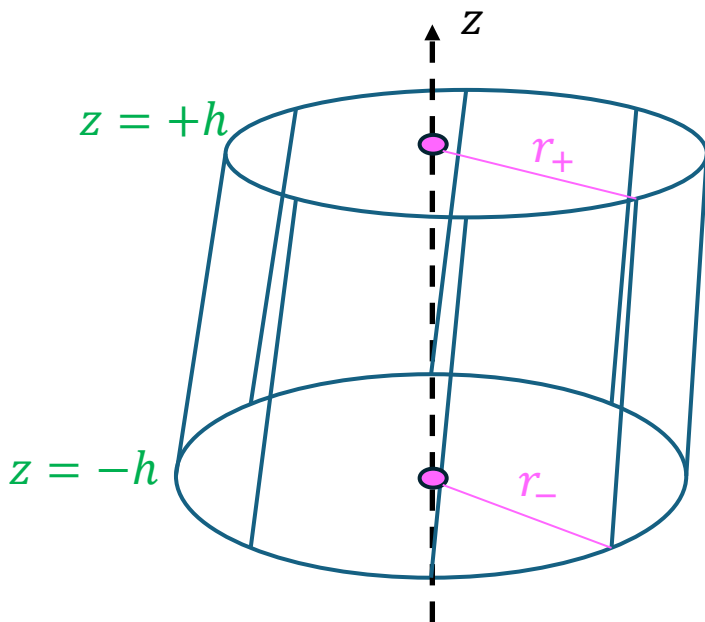
0.1 [mm]  
クラウド厚

# 歪んだ円筒面のモデル化とあてはめ

- 軸に平行な断面線（プロファイル）は直線または放物線とする
- 上面と下面の半径がパラメータとなる

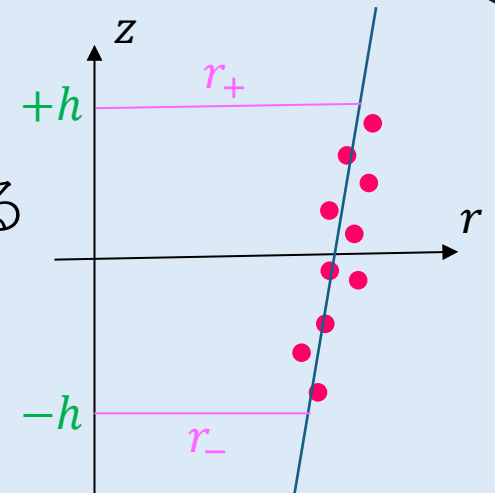
曲面上の点の座標：
$$S(\theta, z) = \begin{pmatrix} r(\theta, z) \cos \theta \\ r(\theta, z) \sin \theta \\ z \end{pmatrix}, 0 \leq \theta < 2\pi, -h \leq z \leq +h$$

直線のケースの半径：
$$r(\theta, z) = \frac{1}{2}(r_+(\theta)(z+h) + r_-(\theta)(z-h))$$



プロファイル計算法：

1. 範囲  $\theta \pm \epsilon$  にある **三角形重心** を集める
2. 各点において  $z$  軸から距離  $r$  を計算
3.  $r-z$  平面上で点群に **プロファイル** をフィットする

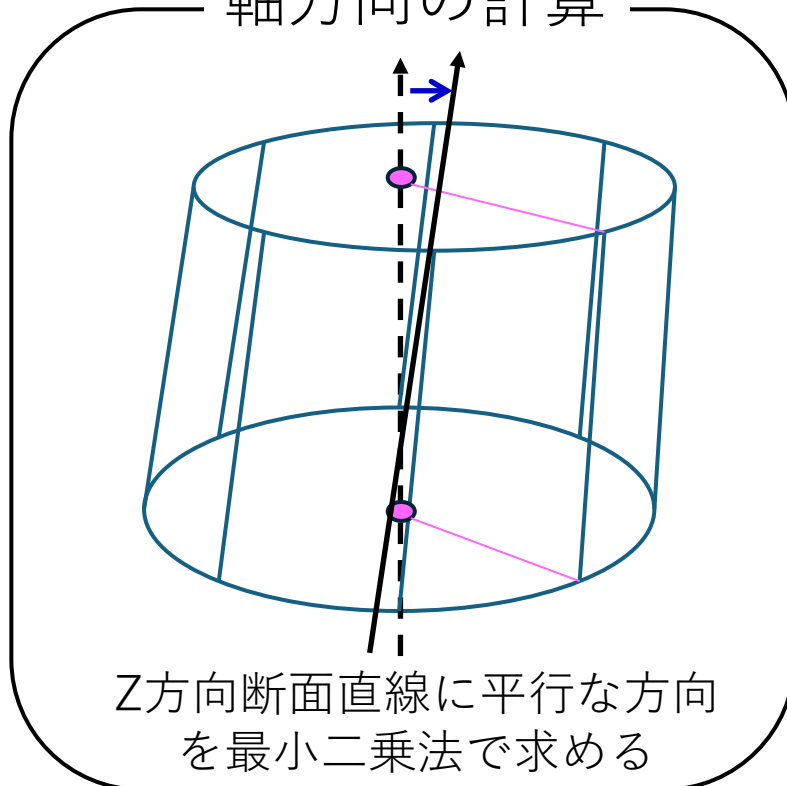




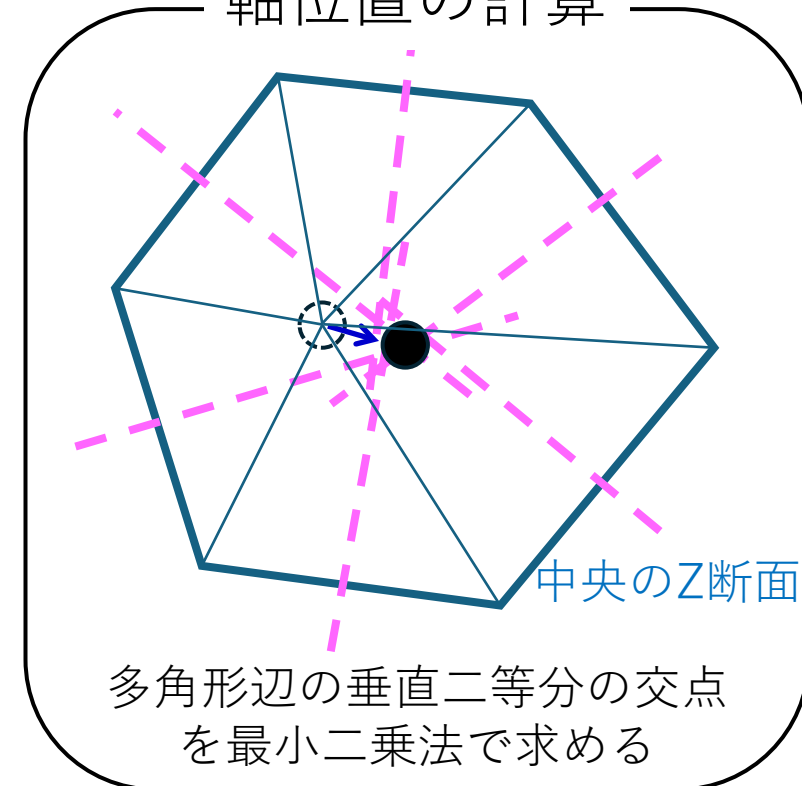
# 円筒軸の位置・方向の計算法

1. CAD面の軸位置・方向を初期値として設定
2. 大規模三角形群へ円筒面をあてはめ
3. あてはめた円筒面の軸方向・軸位置を**更新**
4. 2に戻る

軸方向の計算



軸位置の計算



# プロファイルの検討

## • L2-1

- 直線を最小二乗あてはめ

## • L2-2

- 放物線を最小二乗あてはめ

## • L1-1

- 直線をL1ノルム最小化あてはめ

## • L1-2 (CAD曲線ライク)

⇒ 拡張により様々な誤差モードに対応可能

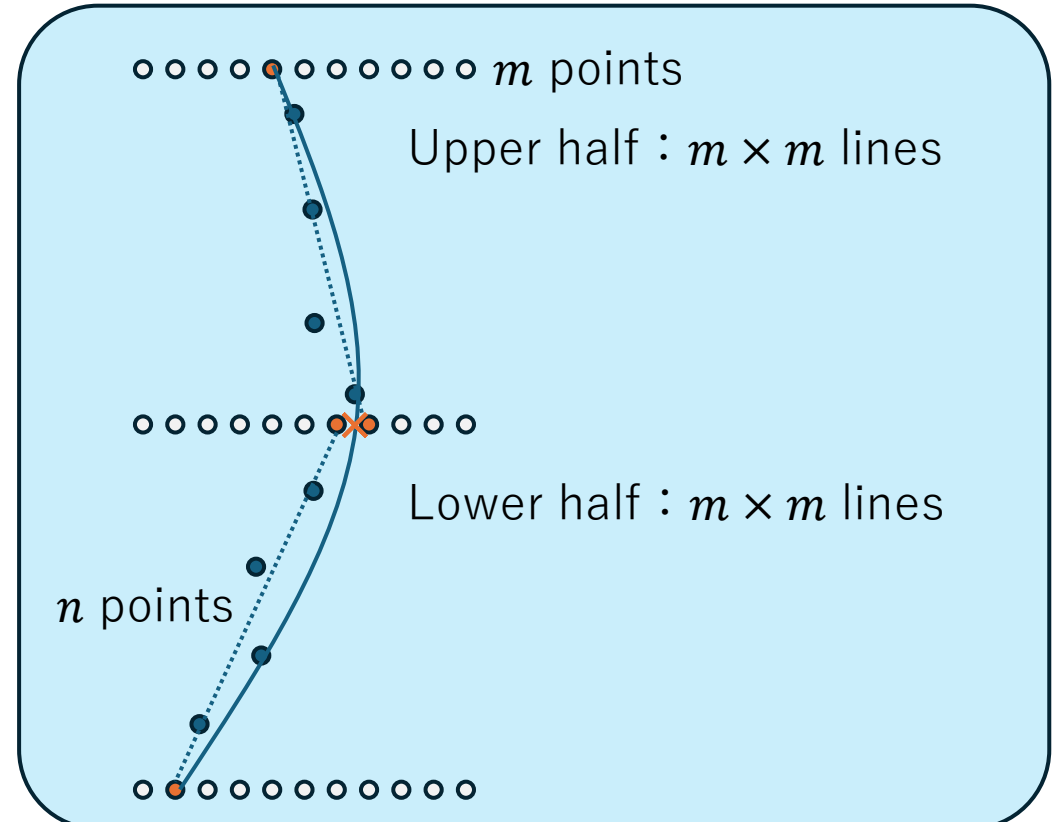
- 上下に分けて2直線をL1ノルム最小化あてはめして、
- その後に放物線をあてはめる

L2 norm : Fast optimization calculation

$$L_2 = \sum_i (az_i + b - r_i)^2$$

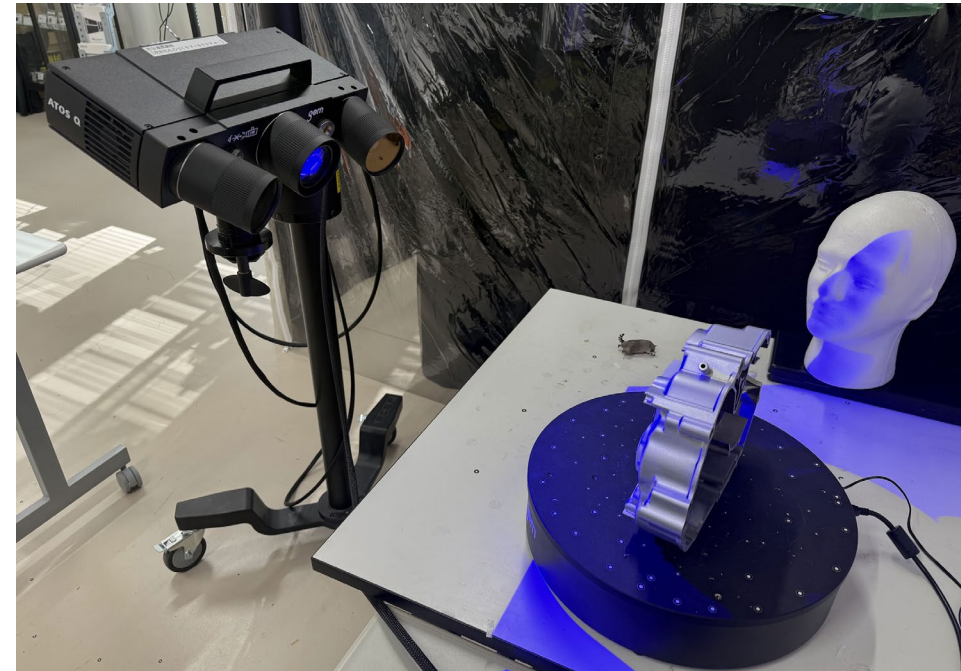
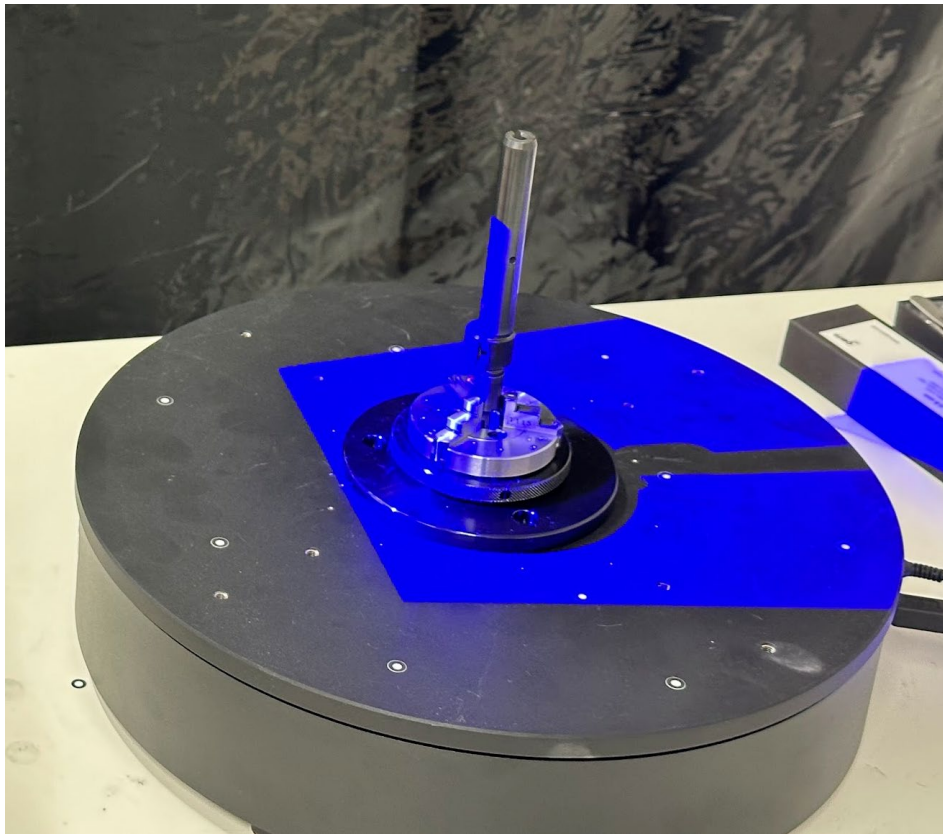
L1 norm : Robust to noise

$$L_1 = \sum_i |az_i + b - r_i|$$



# 本研究で使用した3Dスキャナ

- ATOS Q (ZEISS製) : インダストリアル用途でものづくり分野に普及
  - 二眼 + 青色縞投影方式 (三角計測)
  - 画像センサ : 12M (4K×3K) ピクセル
  - 視野 : 170mm (350mm, 500mm のカメラも準備)

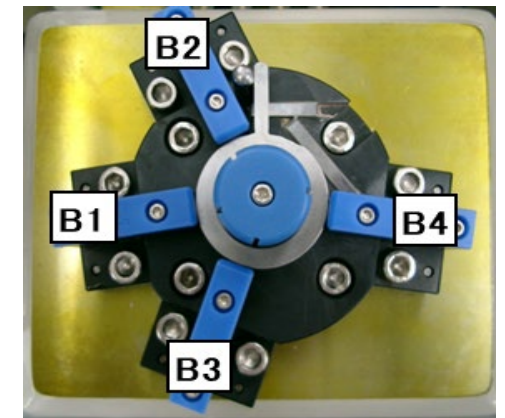
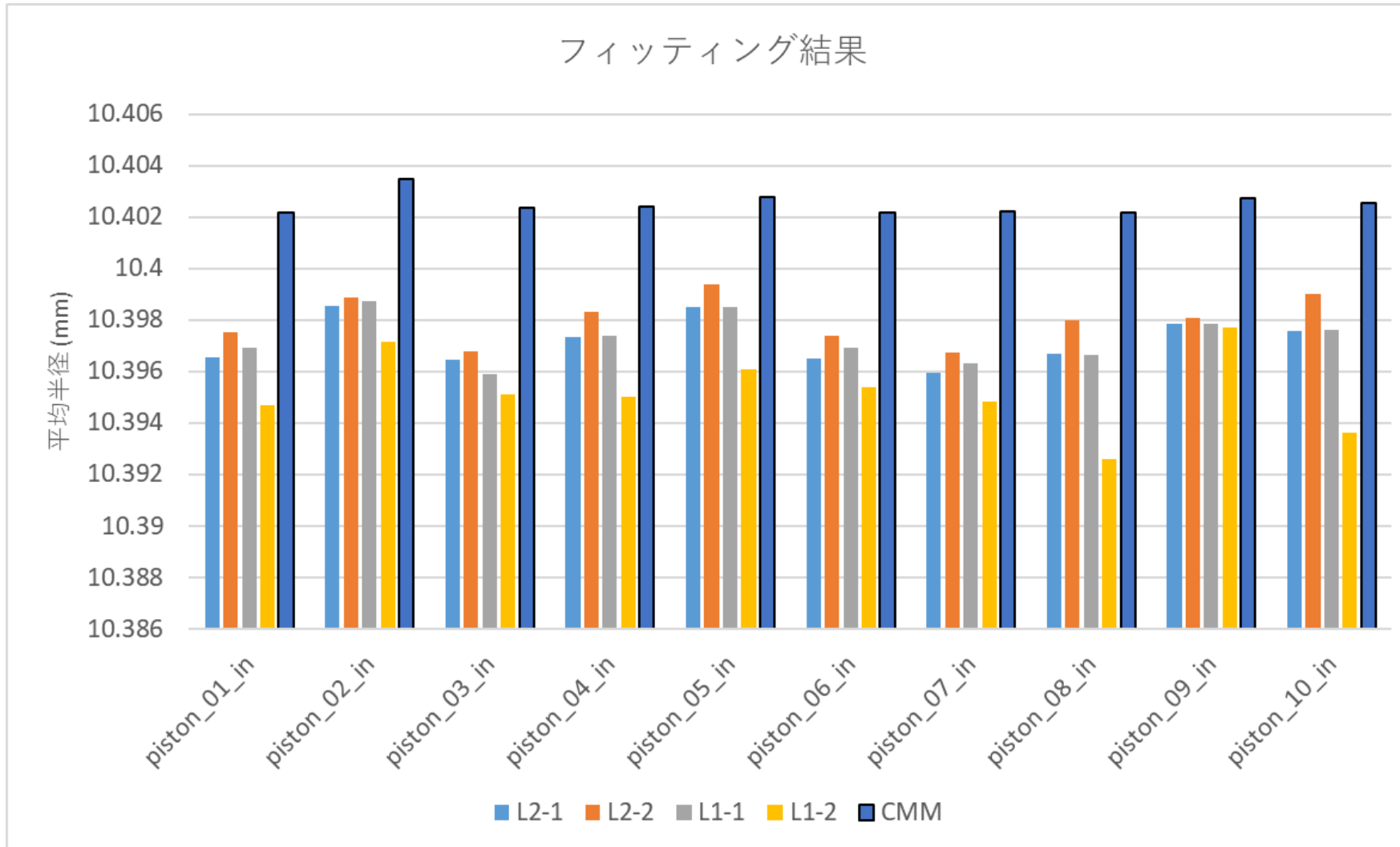


東京大学工学部の共用施設に設置  
デジタル関連の教育・研究にて広く活用



# 測定結果1：ピストン内面

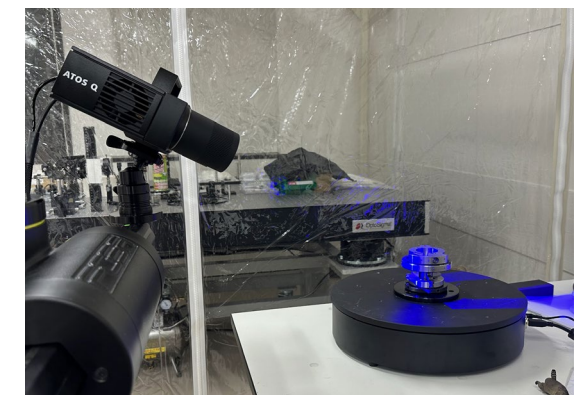
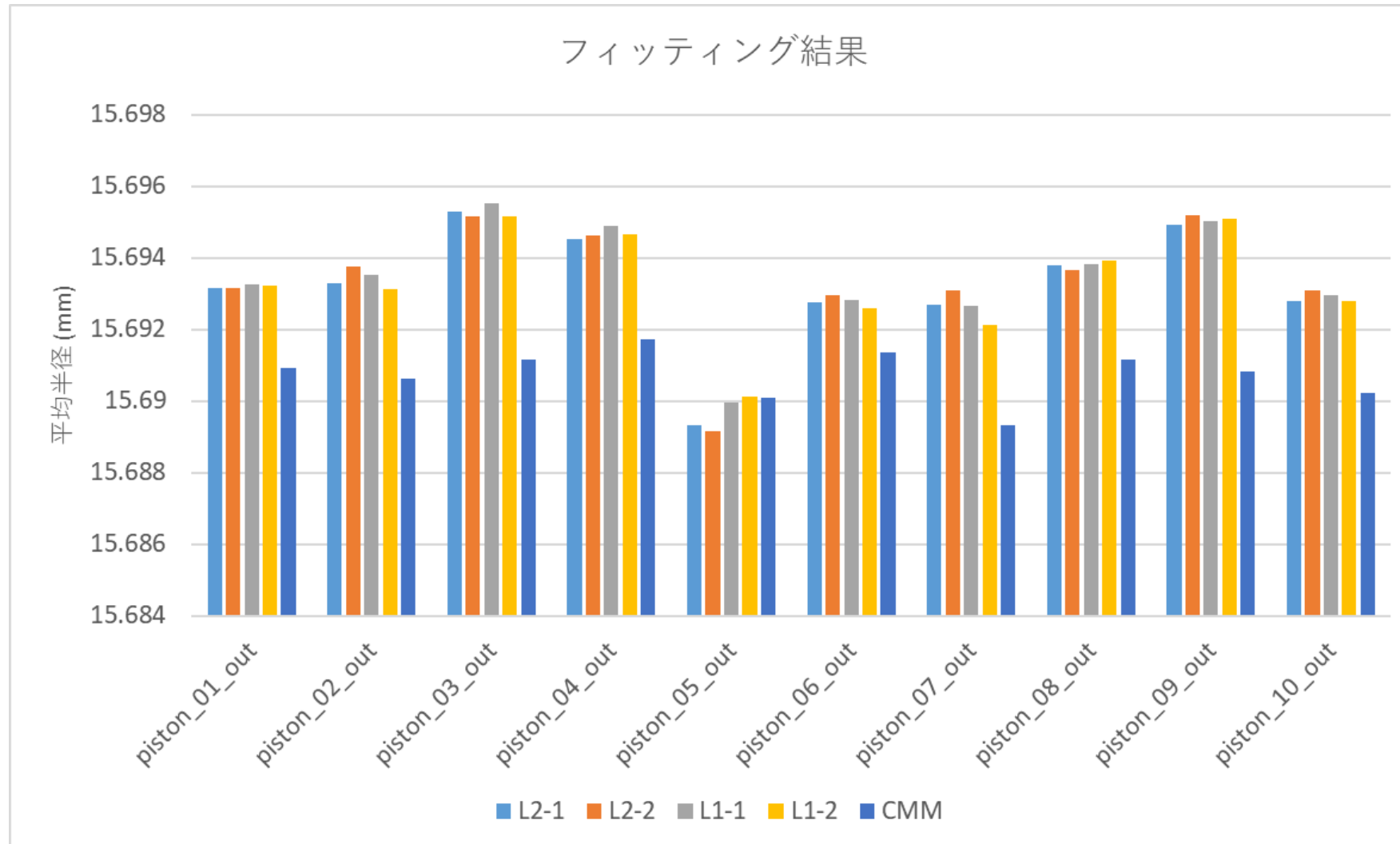
- 一律小さい寸法となっているが、バラツキは真値と同程度。
- エアマイクロの値を基にスケール校正で解決見込み



エアマイクロによる  
接触測定

# 測定結果2：ピストン外面

- 一律大きい寸法となっているが、バラツキは真値と同程度（内面よりはる）
  - 今回の実験では、前回と逆で外面の方がうまくスキャンできていない。

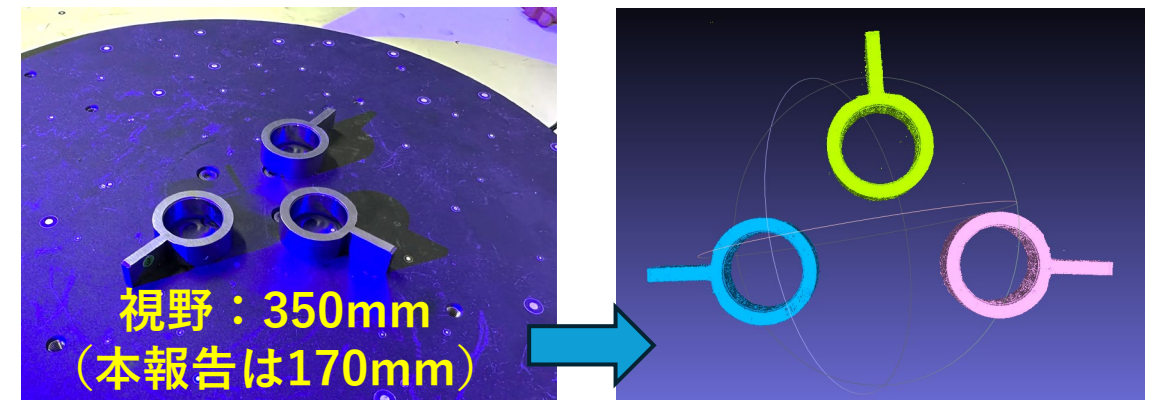


スキャン角度・露光時間の最適化が必要

まとめと今後の予定：

# つくったものを正確かつ素早く デジタルツイン化する方法

- 精密デジタルツイン化の方法
  - **【技術的ブレークスルー】**  
想定される形状モデルを生データに直接あてはめる
  - 円筒面のケースでは1000分の1mm台の精度を出せる見込み大
- インライン適用を想定した  
タクトタイムの短縮を検討中
  - 方針：N個撮り



- **デジタルトリプレットにおける技術活用**
  - 精密な現物の見える化により、製造・設計のコミュニケーションツール
  - シミュレーション技術との統合により、更なる情報提供ツール