

産業用X線CTスキャナによる 高精度3次元形状抽出

大竹 豊 鈴木 宏正

東京大学
精密工学専攻

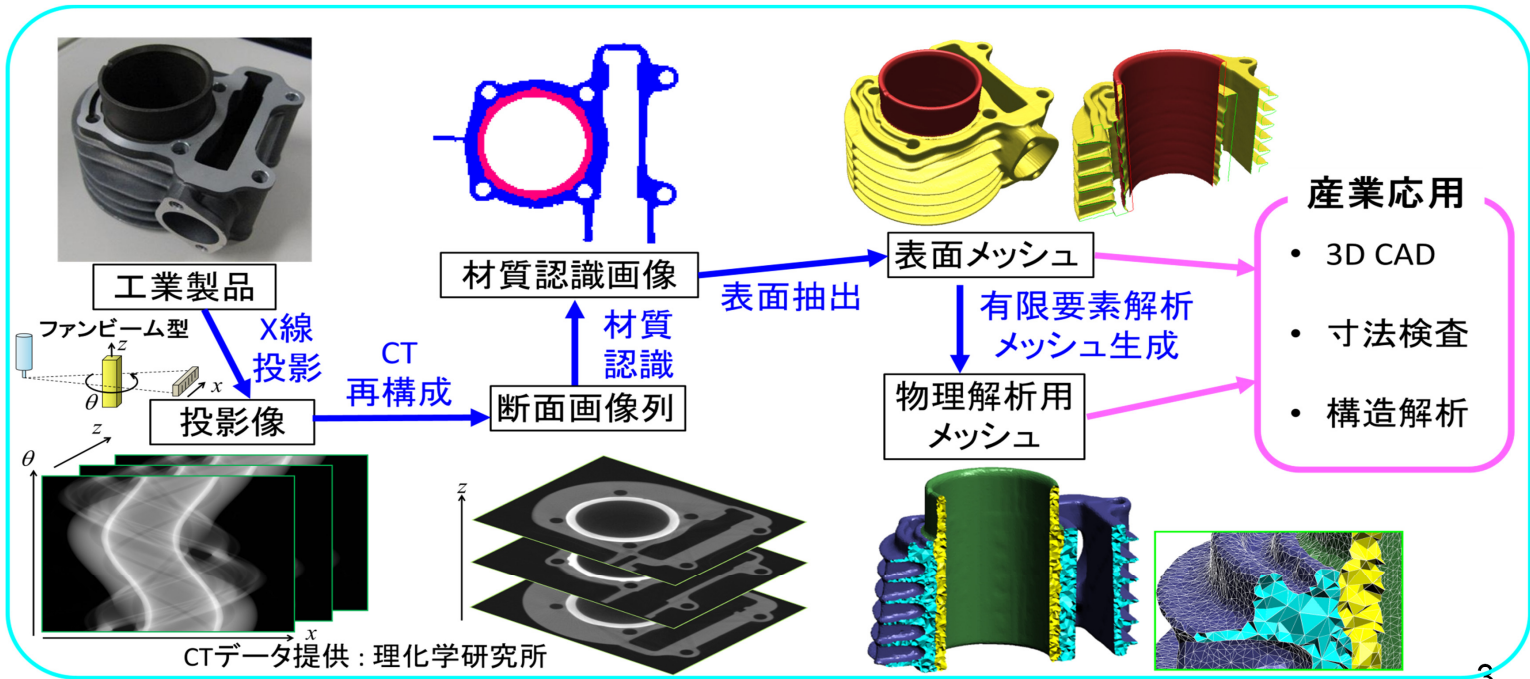
[yu-ohtake,suzuki}@den.rcast.u-tokyo.ac.jp](mailto:{yu-ohtake,suzuki}@den.rcast.u-tokyo.ac.jp)

X線 CT スキャナ (コーンビームタイプ)



Dimensional X-CT装置 のデータの流れ

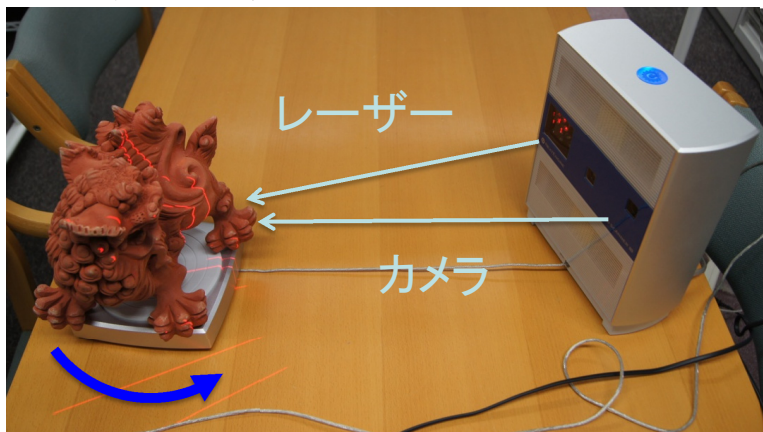
- 現物の形状を高精度にデジタル化することを
目標にデータ処理を行う



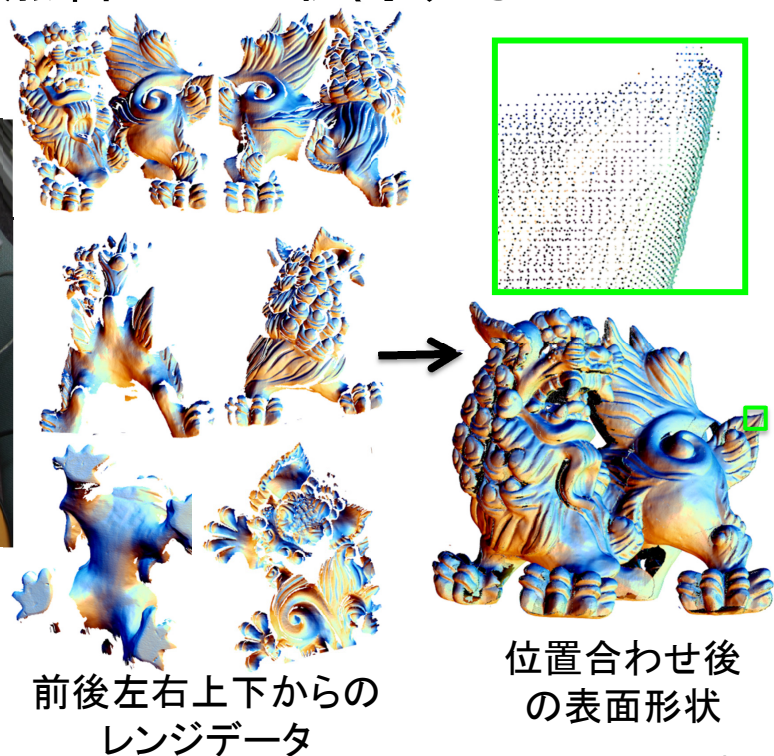
表面スキャニング技術

- 三角測量の原理を基に、
物体表面の位置を点群として取得する

一般的な光切断方式スキャン



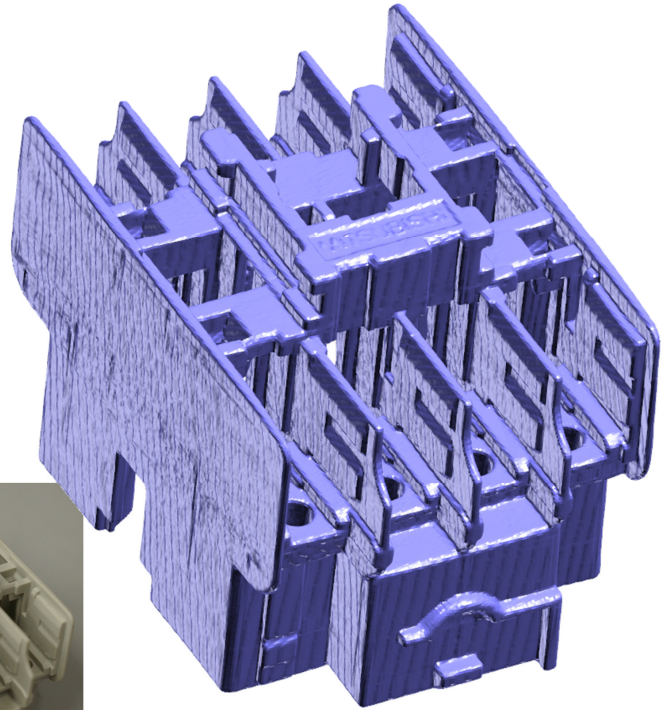
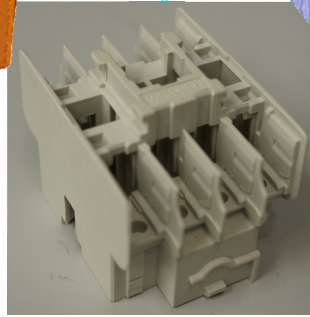
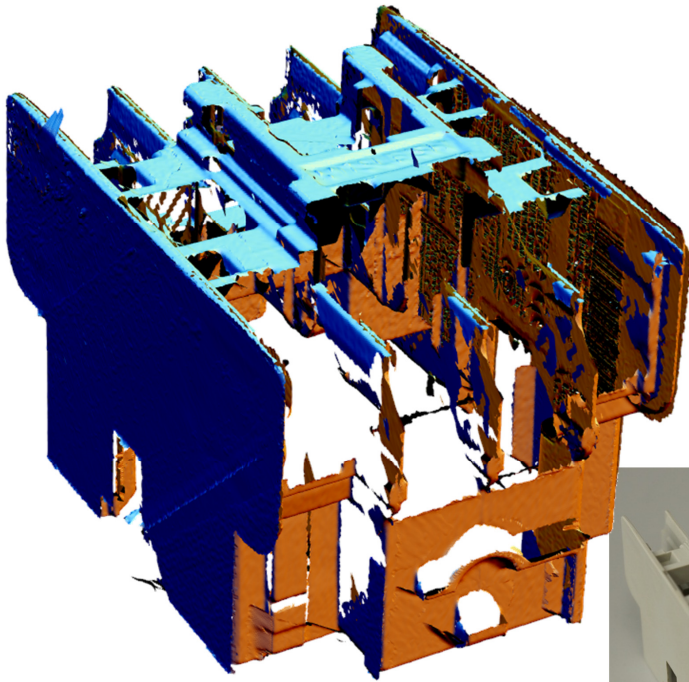
回転台



表面スキャン v.s. CTスキャン

外側から見えない箇所は
スキャンできない

内部の複雑構造もスキャンできるが
精度に問題がある(と言われている)

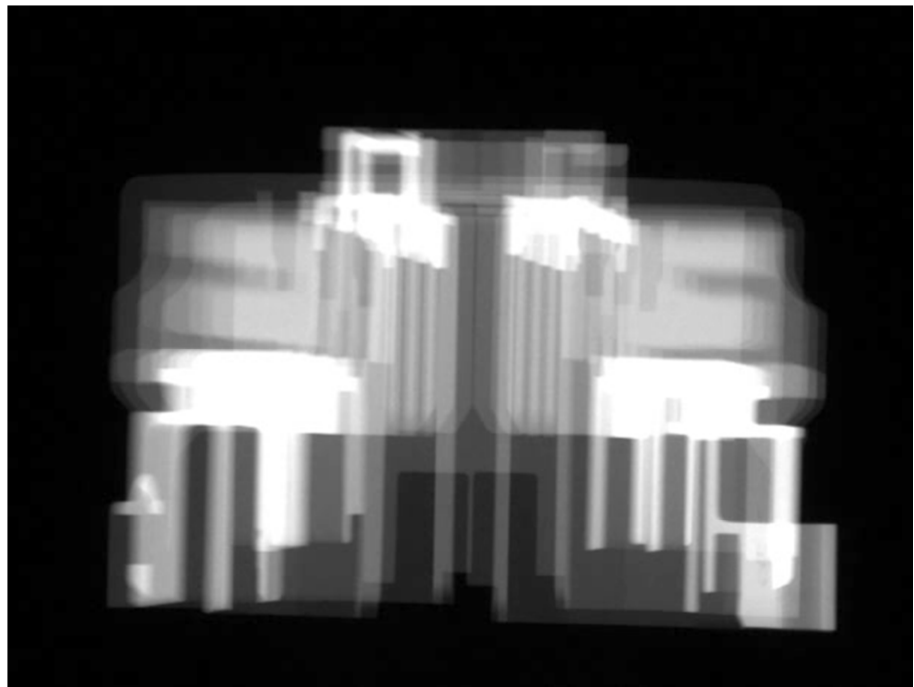
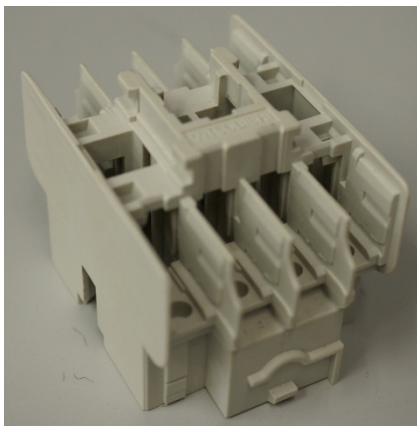


5

産業用X線CTスキャナ

- ハードウェア(X線管・検出器)の技術向上により、
非常に鮮明な投影像を得ることができる

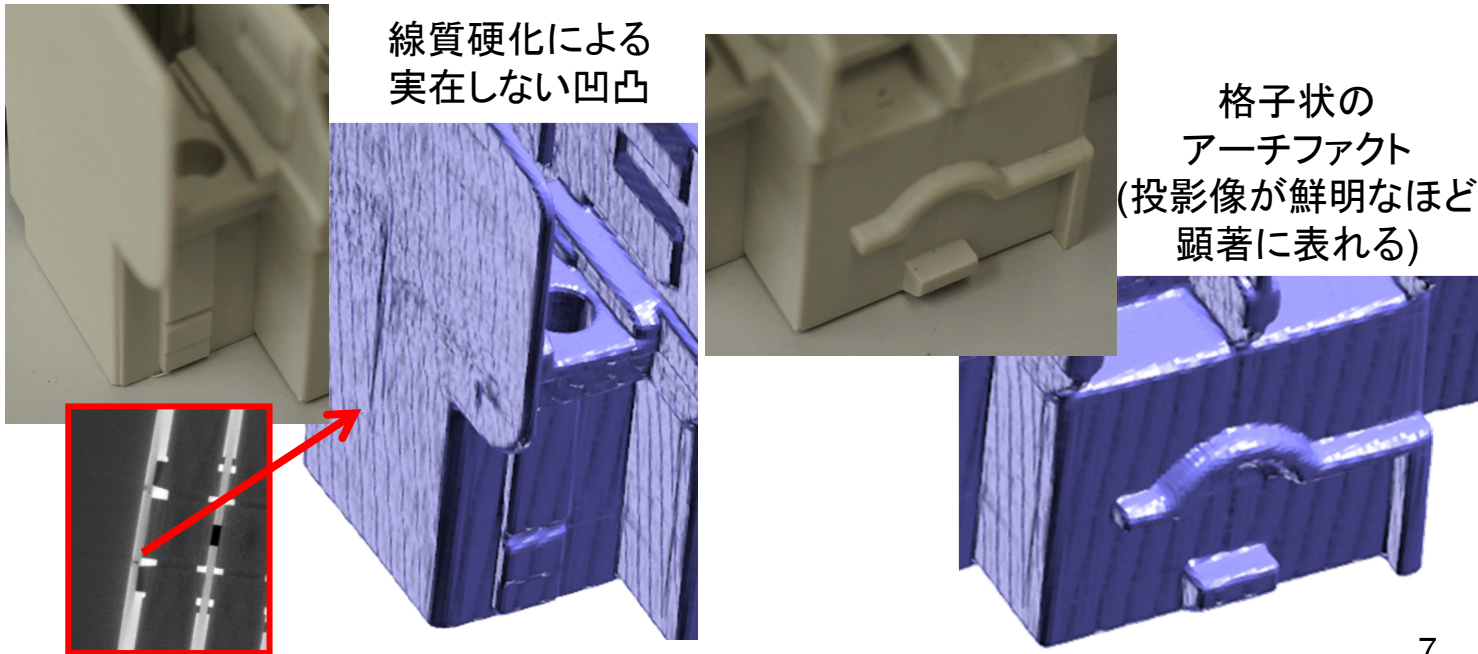
※ これは CG ではありません



6

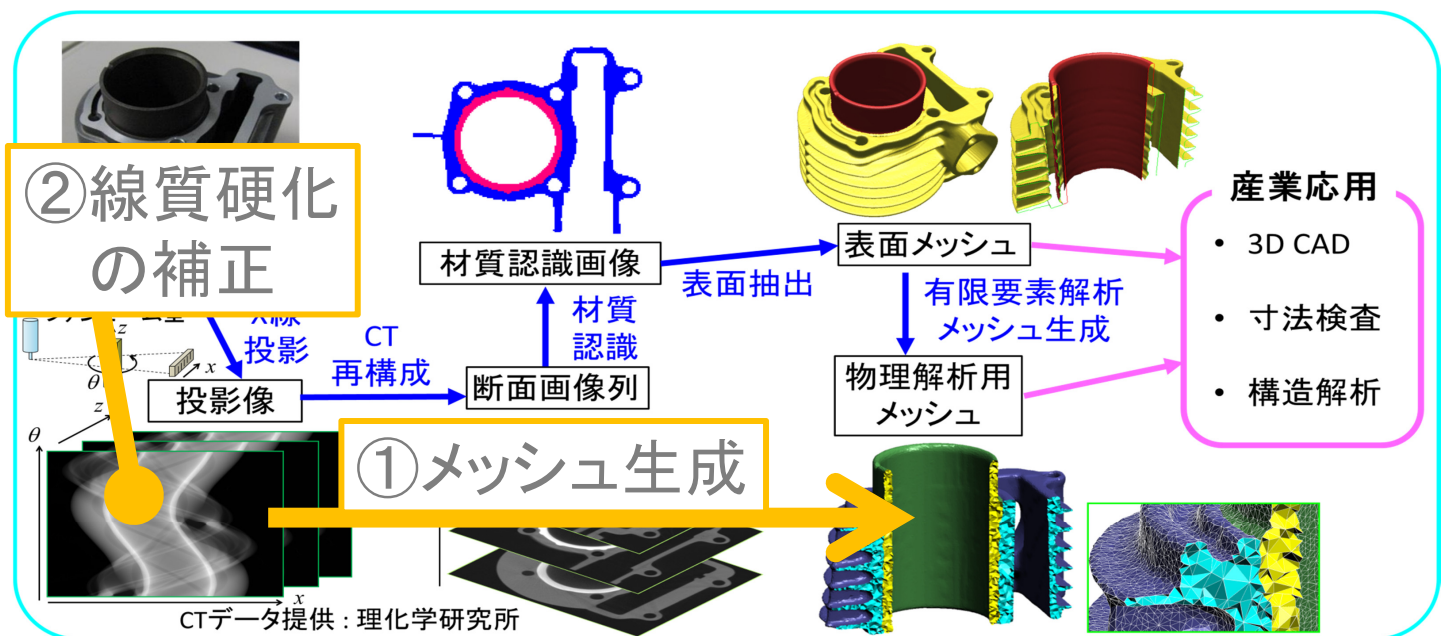
本研究の目的

- CTスキャナのポテンシャルを最大限に活かす、
形状抽出アルゴリズムの高精度化
- 製品の非破壊検査・構造解析



精度向上のためのデータ処理技術

- ➔ ① 投影像からの直接形状抽出
- ② 高速で簡便な投影像の線質硬化補正



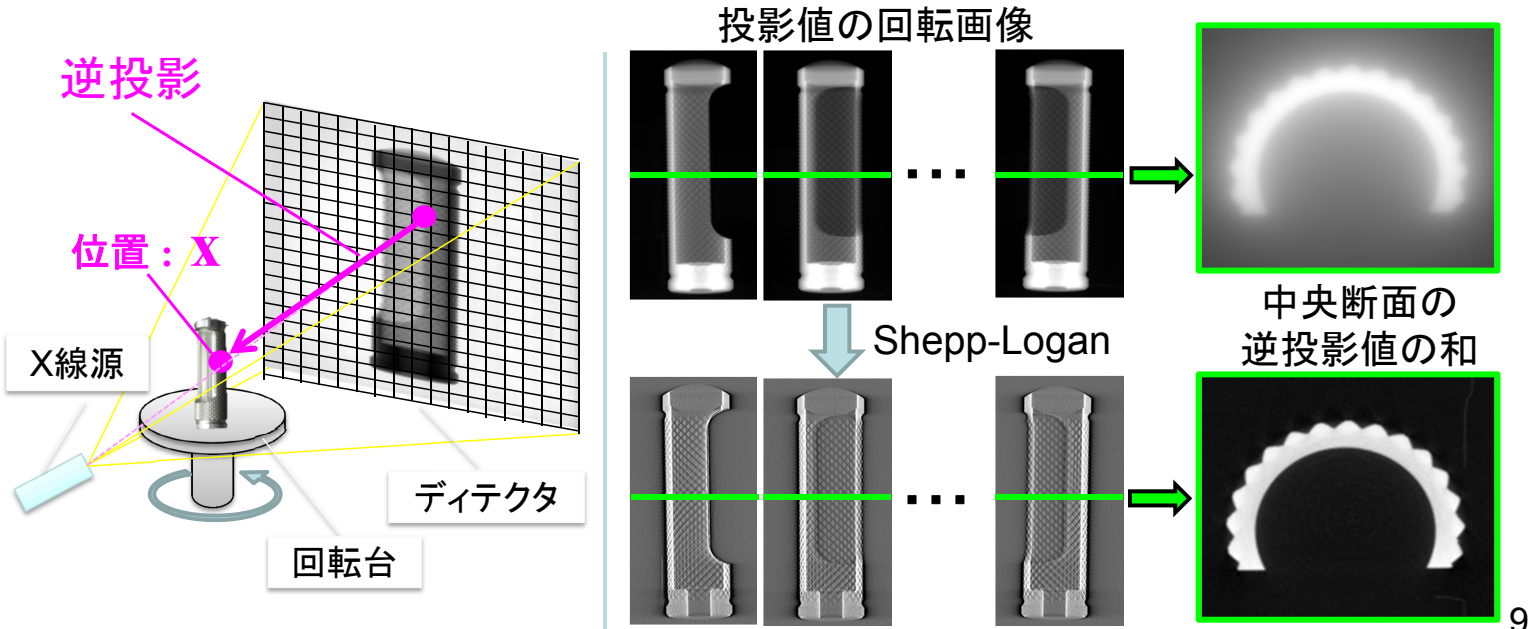
投影像からの断面像(CT)再構成

- フィルターされた投影像を逆投影する

CT像の値 : $F(x) = \int_{-\text{回転}} (\text{投影値を畳込積分した 値を } x \text{ へ逆投影}) d\text{回転角}$

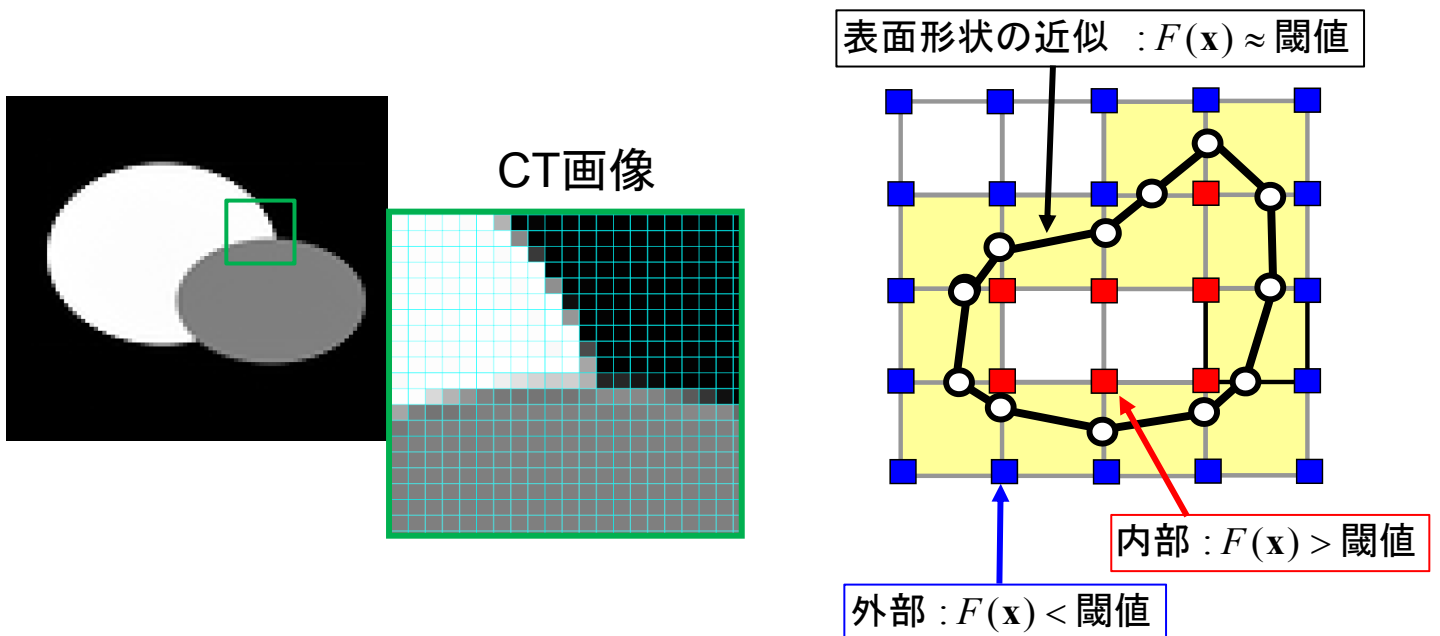
投影値 : $-\ln(\text{X線の透過率}) = \text{光線上の減弱係数の和}$

畳込みの関数 : Shepp - Logan フィルタなど (ボケ除去フィルタ)



従来の形状抽出

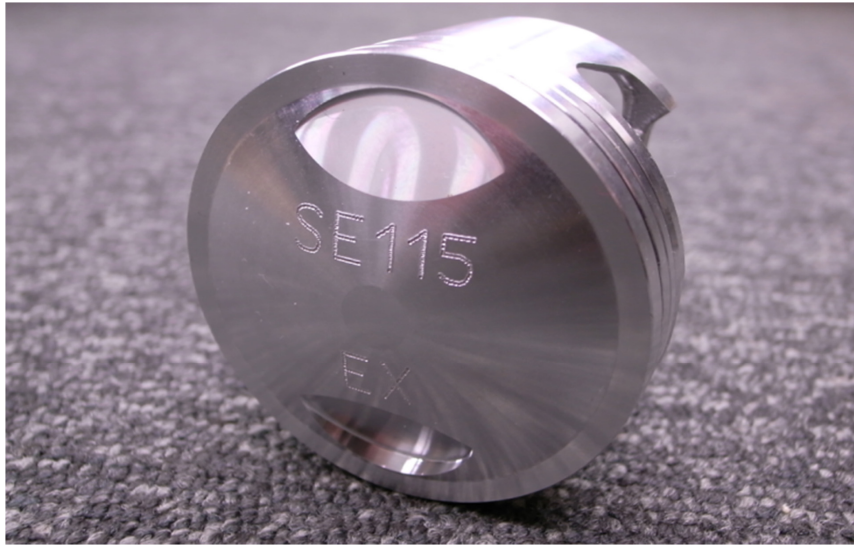
1. 画像として断面像を再構成
2. 閾値処理により形状を抽出



従来法の計算機デモ

- ・ ピストンヘッド
- 直径：約100mm

X線撮像：METROTOM800



X線投影像のピクセルサイズ：約 0.25 mm (回転軸位置)
※ デモ用に投影像サイズを半分に落としています。

11

12

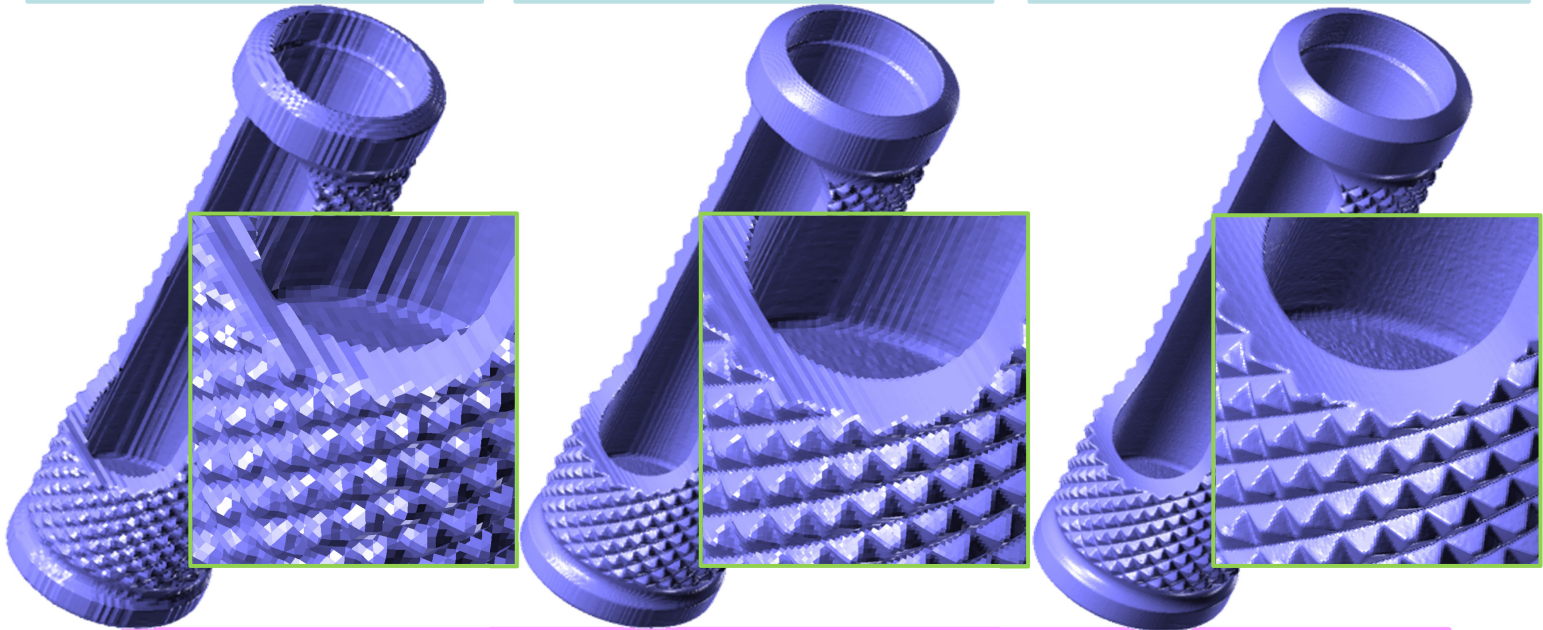
従来法の問題点

- 高精度な形状を得るには高解像度な格子が必要
- 格子状の凸凹(エリアシング)が発生する

8万ポリゴン, 0.4mm間隔

33万ポリゴン, 0.2mm間隔

135万ポリゴン, 0.1mm間隔



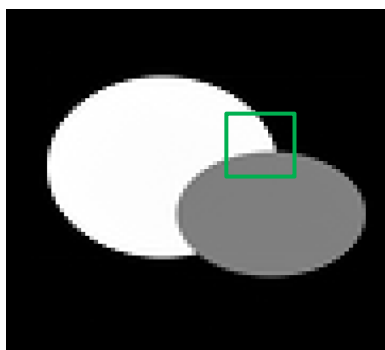
少ないサンプリングで高精度な形状を得ることを目指す

13

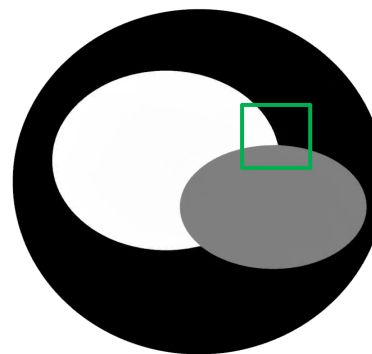
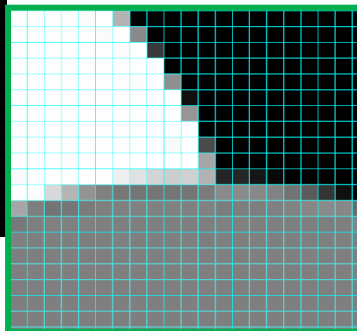
我々の解決策

※ 特願出願済み

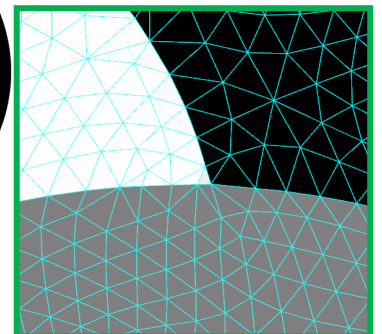
形状抽出の高精度化を目的として、
形状に沿ったメッシュを用いてCT再構成を行う



直交格子上への
CT再構成



メッシュ上への
CT再構成

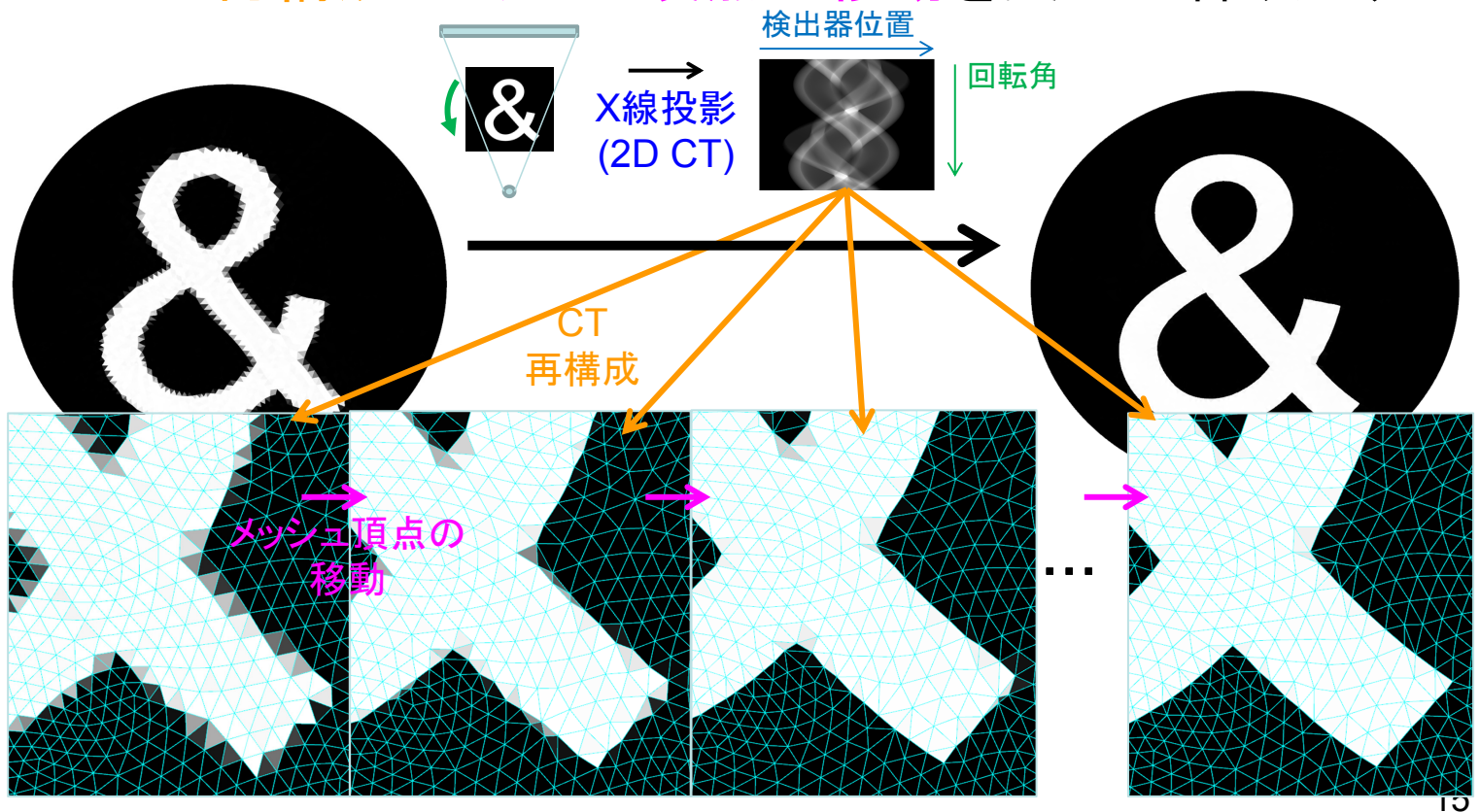


- CTの値 $F(\mathbf{x})$ は連続な関数
 - 評価点 \mathbf{x} は直交格子状の点に限らずにどこでもよい
 - 形状抽出が目的なので、CT「画像」は必要ない

14

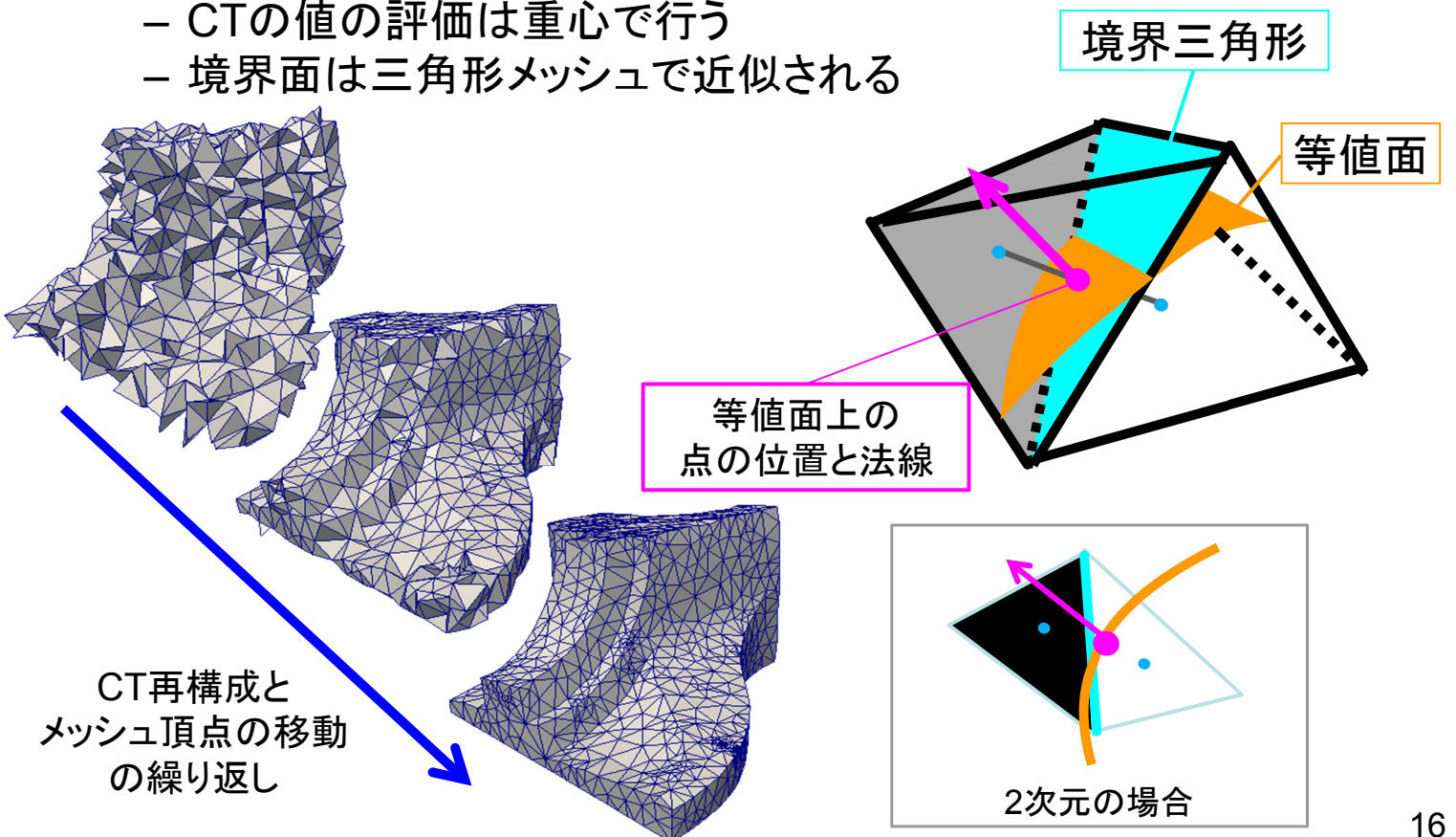
提案法の計算処理の概要 (2次元)

- CT再構成とメッシュ頂点の移動を交互に繰り返す



3次元の計算処理の概要

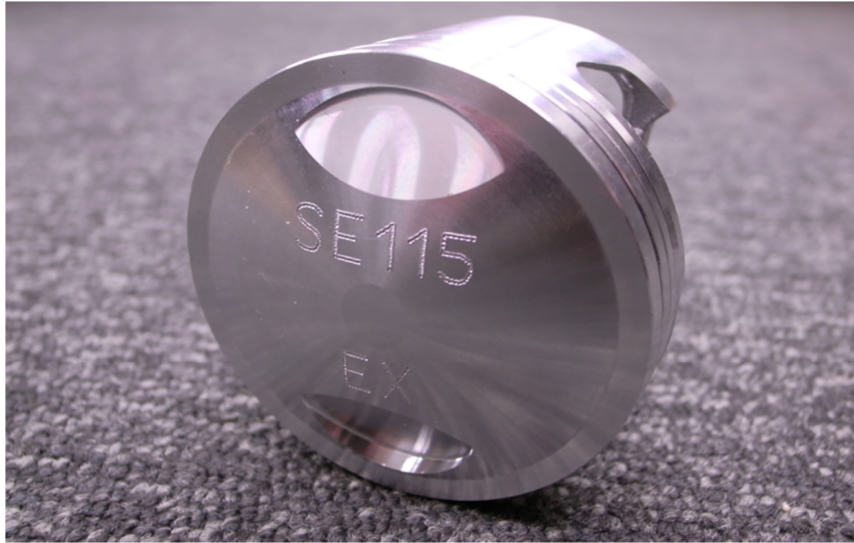
- 四面体メッシュを使う
 - CTの値の評価は重心で行う
 - 境界面は三角形メッシュで近似される



提案法の計算機デモ

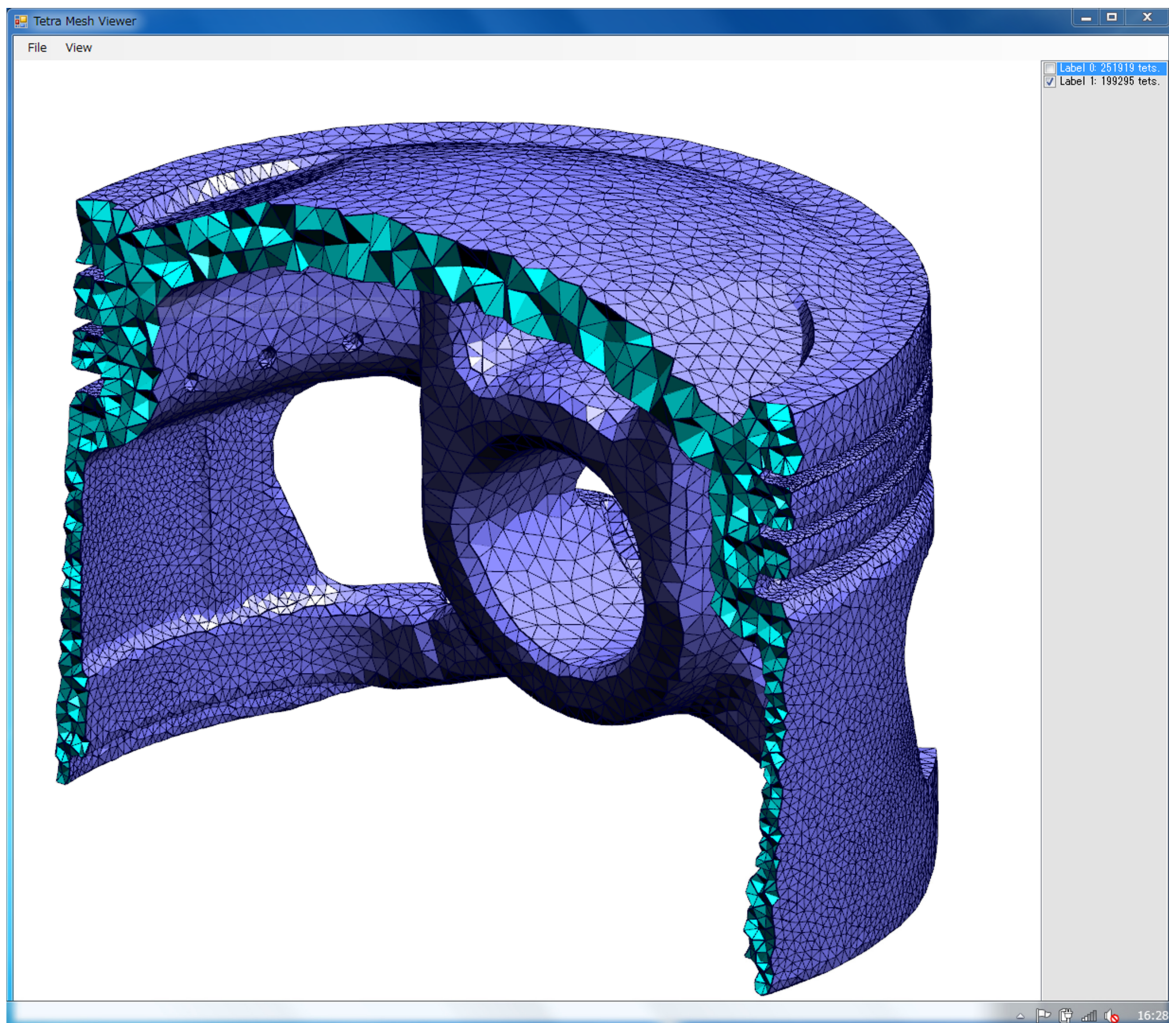
- ピストンヘッド
- 直径：約100mm

X線撮像：METROTOM800



X線投影像のピクセルサイズ：約 0.25 mm (回転軸位置)
※ デモ用に投影像サイズを半分に落としています。

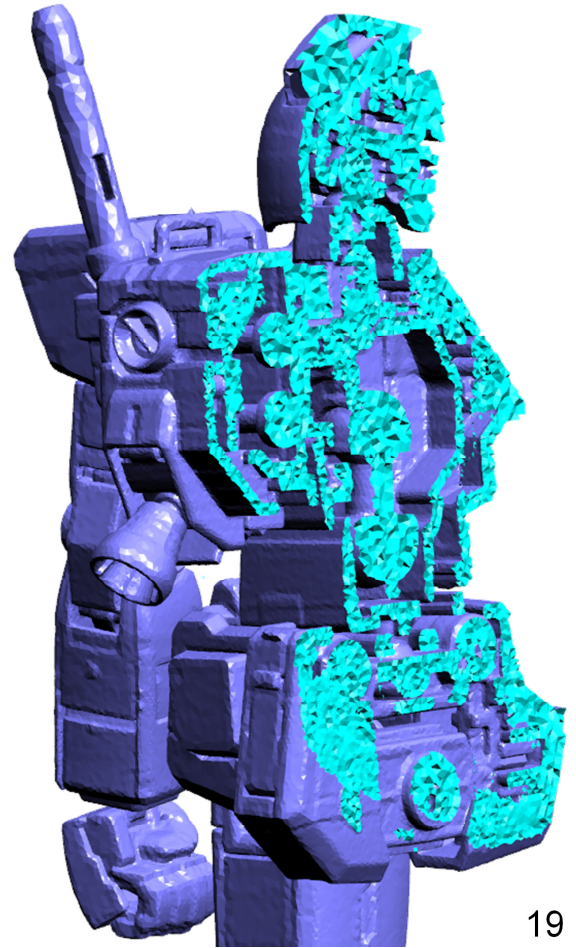
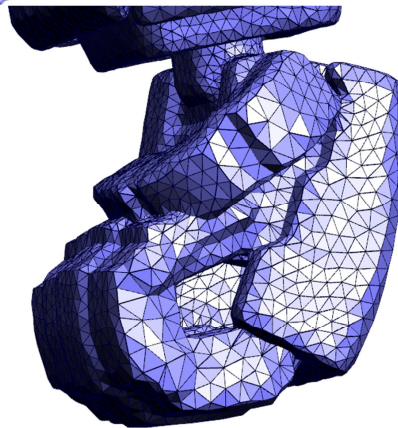
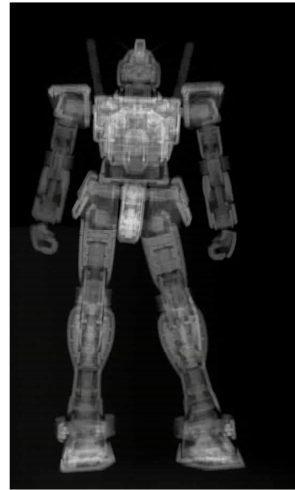
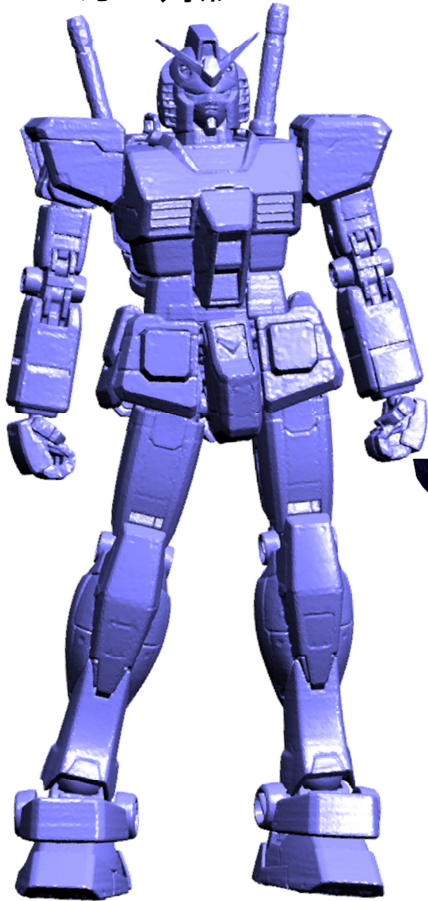
17



18

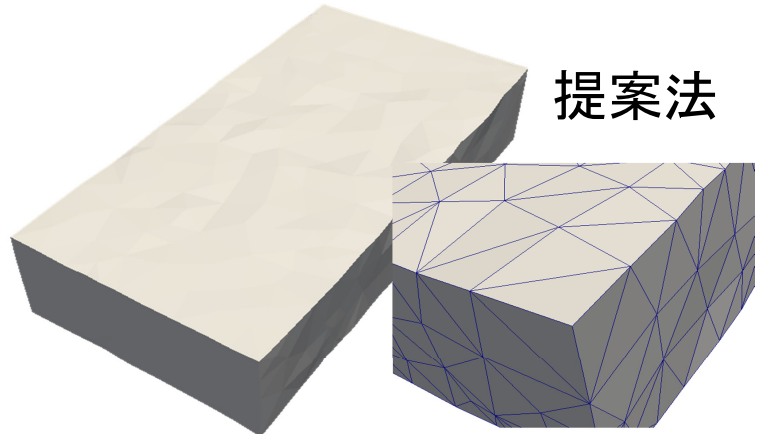
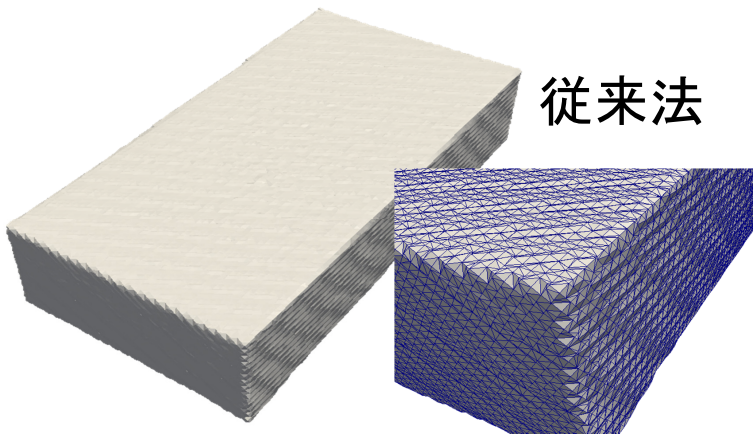
計算時間30分程度
1000万四面体
100万三角形

結果:樹脂製の模型

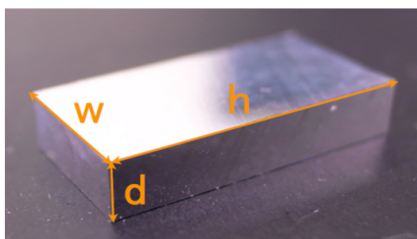


19

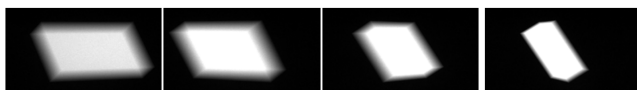
実データによる精度確認



少要素数でも同程度の精度を達成



	実測値	従来法	提案法
h	15.0	+0.10	+0.058
w	7.5	+0.1	+0.08
d	3.0	+0.11	+0.12



X線撮像:

Carl Zeiss社 METROTOM800

※従来法の再構成と境界抽出は自作ソフト

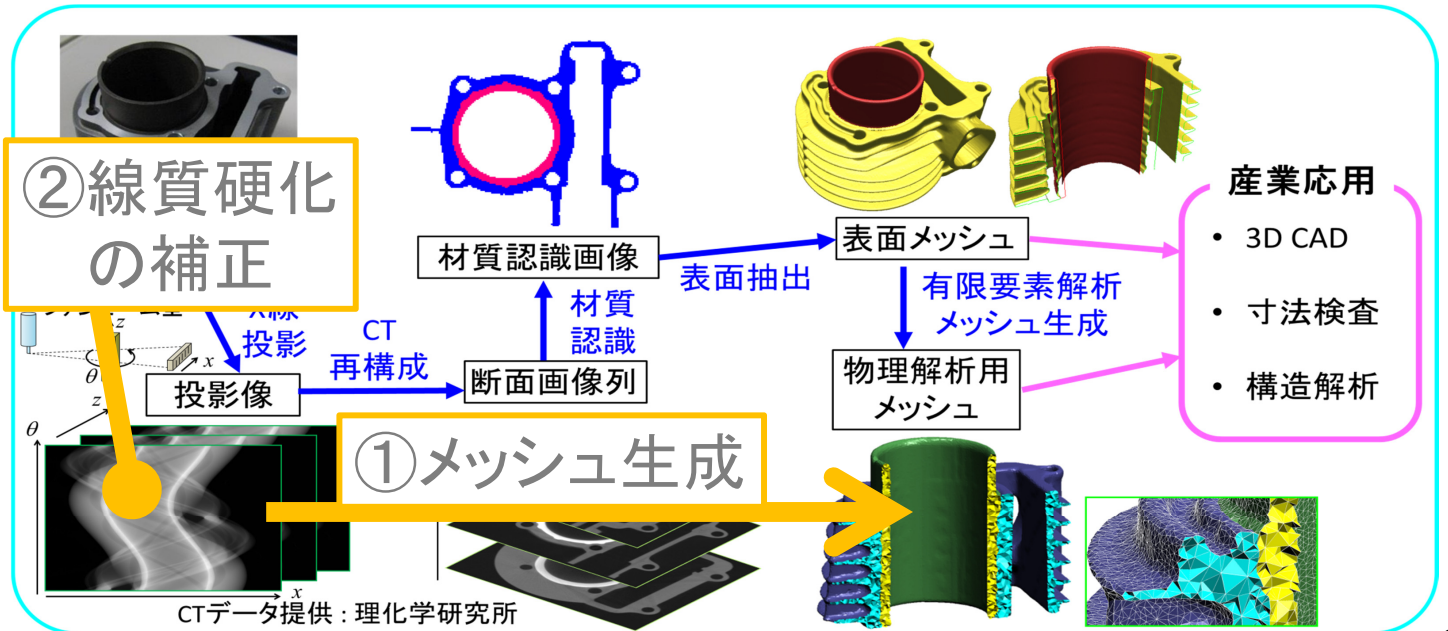
ただし投影画像画素サイズ約0.04mm
に対し、0.1mmは大きすぎる
→ 線質硬化が原因

20

精度向上のためのデータ処理技術

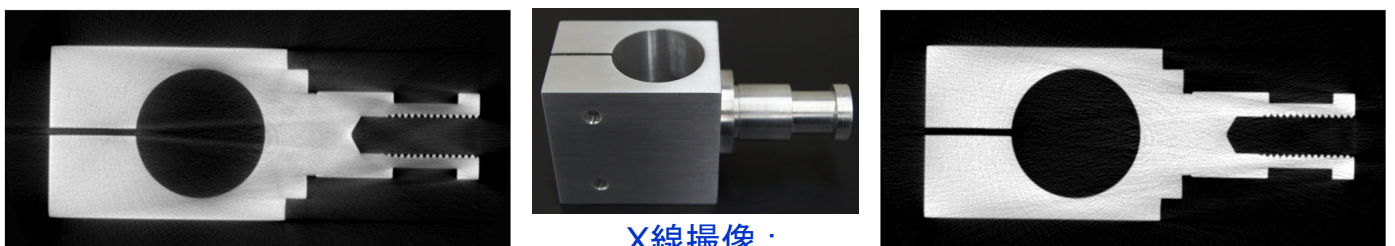
① 投影像からの直接形状抽出

→ ② 高速で簡便な投影像の線質硬化補正



21

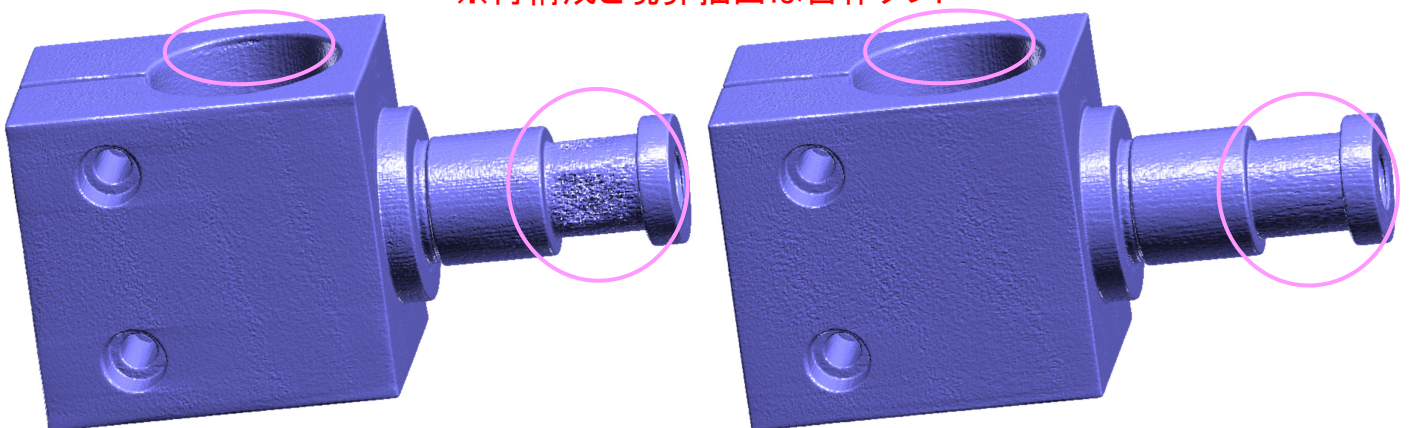
線質硬化補正の効果



補正なし

X線撮像：
Carl Zeiss METROTOM800
※再構成と境界抽出は自作ソフト

補正あり



22

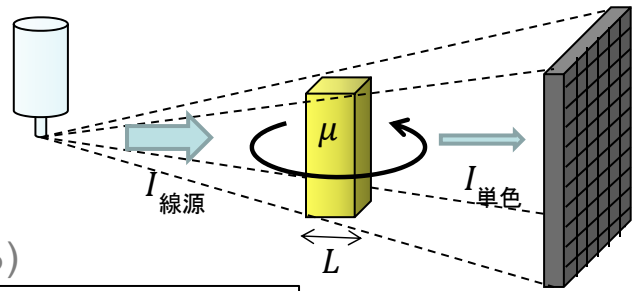
線質硬化について

- 単一材質の場合のX線の減弱

- 単色X線の場合

$$I_{\text{単色}} = I_{\text{線源}} \exp(-\mu L)$$

[μ : 減弱係数, L : 透過長]



- 白色X線の場合 (多くの装置X線源はこちら)

$$I_{\text{白色}} = I_{\text{線源}} \int_E W(E) \exp(-\mu(E)L) dE$$

[$W(E)$: エネルギー E のスペクトル分布 (総和は1とする)]

※ μ は一般的に E が大きくなると小さくなる

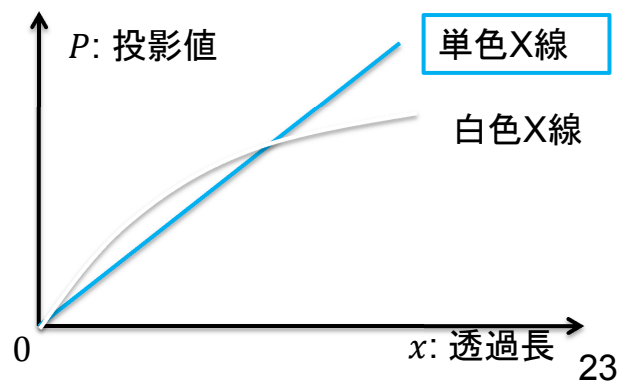
- 通常のCT再構成は

透過長 $L \propto$ 投影値 P を仮定している

投影値 : $P = -\ln(I/I_{\text{線源}})$

単色の場合 : $P = \mu L$

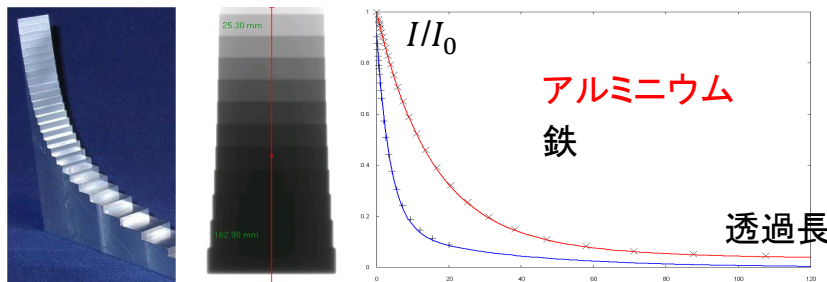
実際の現象と計算上の仮定が異なるため
CT再構成でアーチファクトがでる



線形化の代表的な先行研究

- ステップウェッジを用いた線形化 [Kasperl2005]

- 事前実験が必要, 計測条件が同じ必要がある.

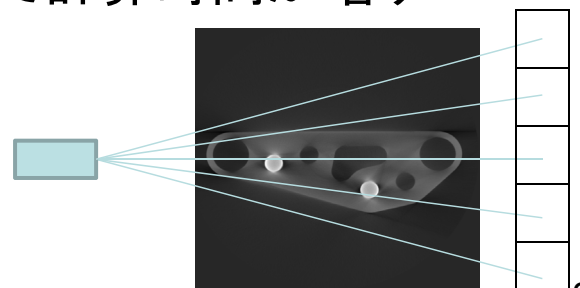


- 再投影法との組み合わせ [Krumm2008]

- 再構成とレイトレーシング処理で計算時間が増す.

- ユーザ指定の補正関数

- 経験と勘が必要となってくる.



我々の方法

※ 特願出願済み

透過長 \propto 投影値のときに成立する保存則 \star を
できるだけ満たすように補正関数 F を決める

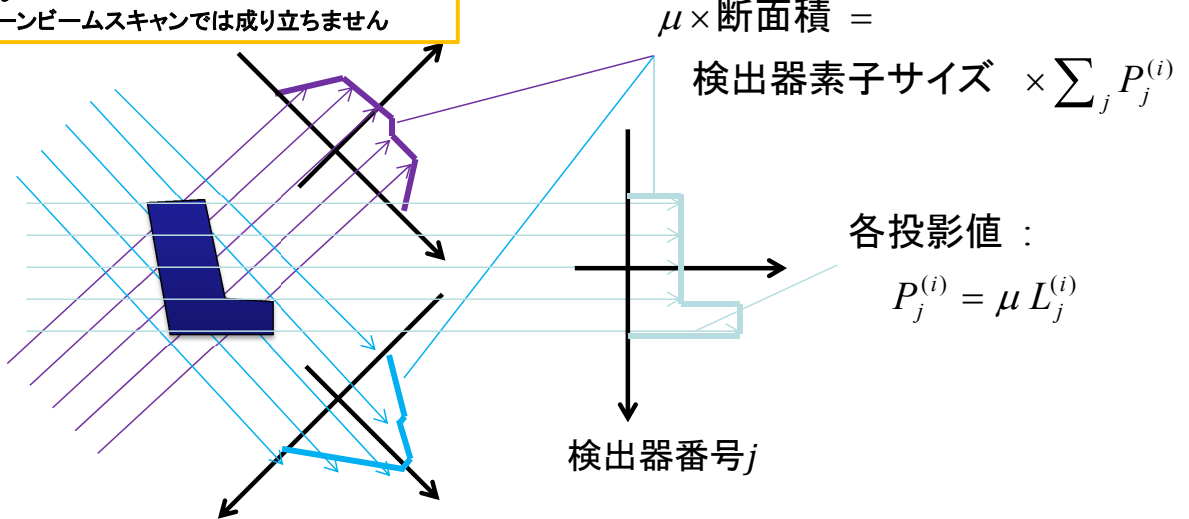
保存則 \star : 計測物が視野に収まっているならば

$$\sum_j P_j^{(1)} = \sum_j P_j^{(2)} = \dots = \sum_j P_j^{(i)} = \text{定数}$$

[$P_j^{(i)}$: i 番目の投影における j 番目の検出器の投影値]

注1: 逆は成り立ちません

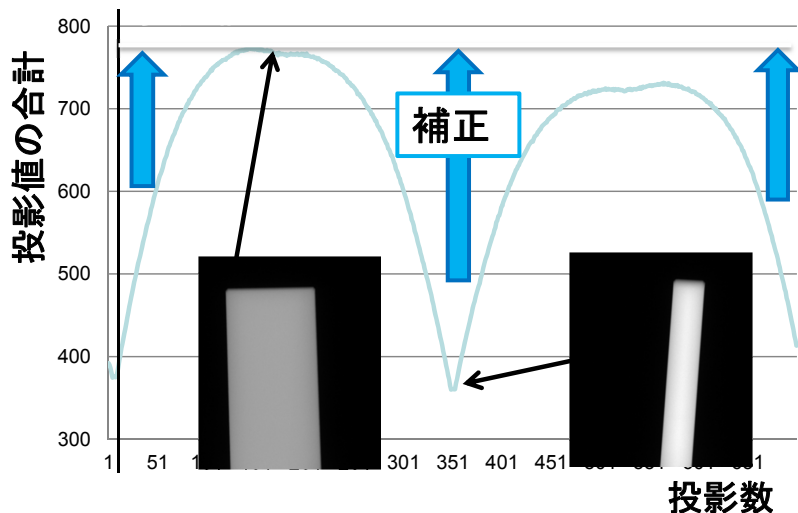
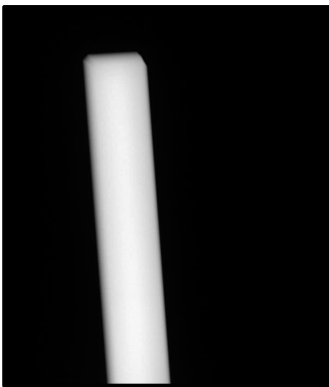
注2: 厳密にはファン・コーンビームスキャンでは成り立ちません



25

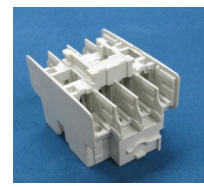
実データ

- 実際には線質硬化の影響で
透過長が長いほど投影値が落ち込む

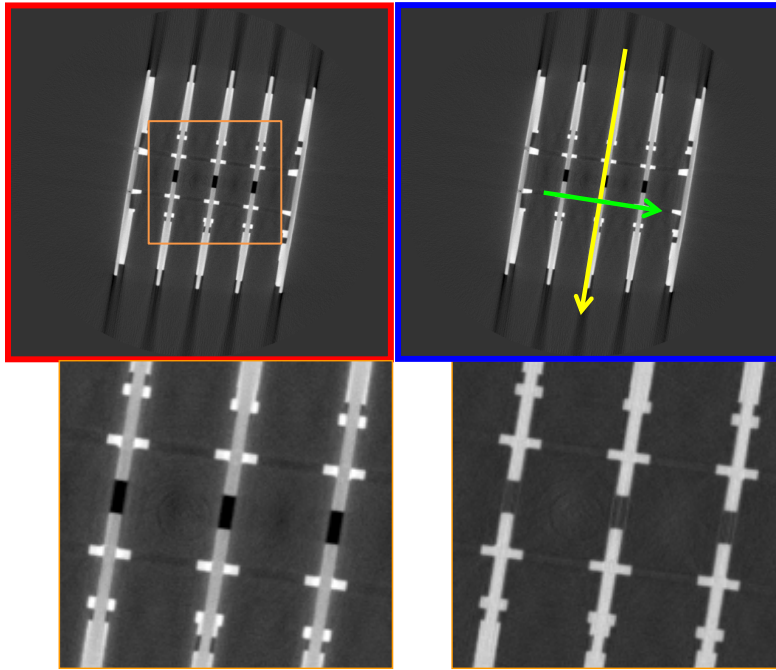


26

樹脂部品のCT画像

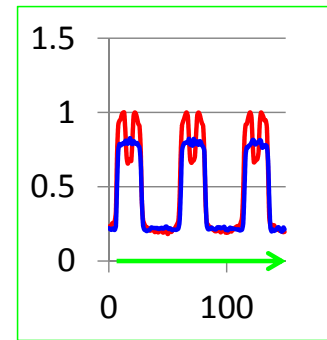
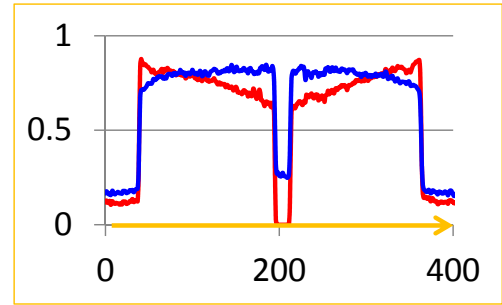


- 対象材質中の輝度のバラつきが解消された

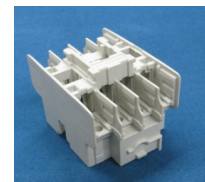


補正なし

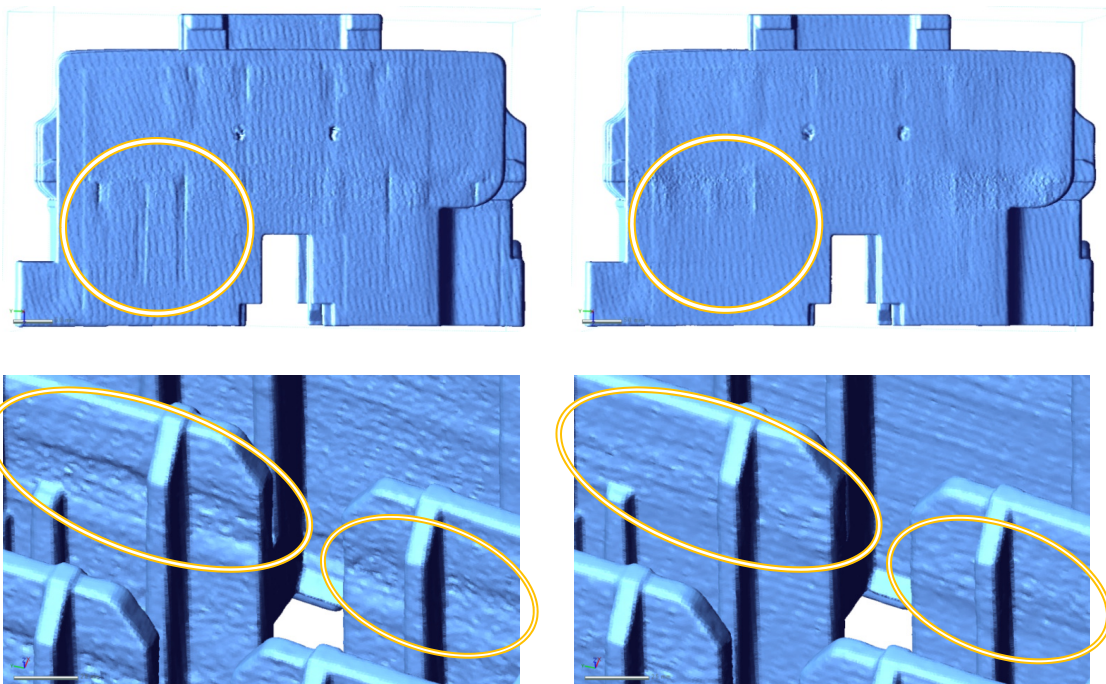
補正あり



樹脂部品の形状



- 補正によりへこみが解消され
平面に近づいたのが分かる



補正前

補正後

線質硬化補正による寸法精度の向上

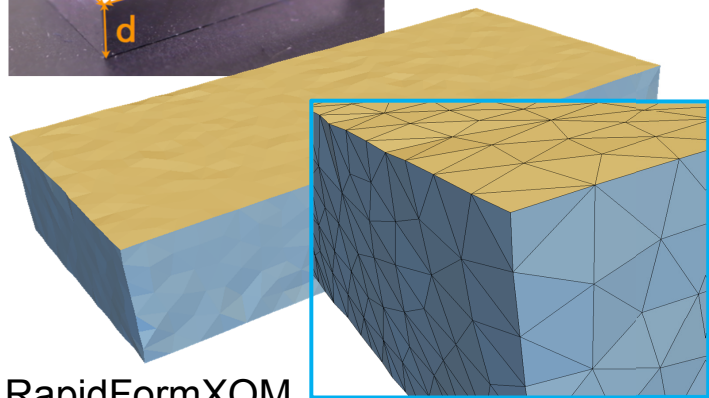
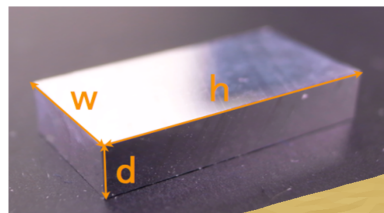
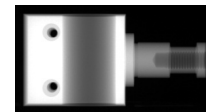
誤差	補正前 ⇒ 補正後
h	+0.06 ⇒ -0.00
w	+0.08 ⇒ -0.01
d	+0.12 ⇒ -0.01

投影像
画素サイズ:
約 0.04

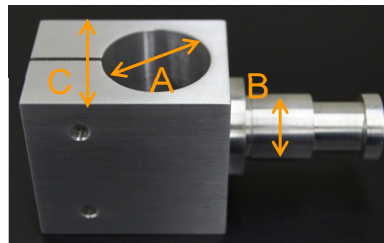


誤差	補正前 ⇒ 補正後
円筒径A	-0.09 ⇒ +0.02
円筒径B	+0.09 ⇒ -0.00
面間C	+0.27 ⇒ -0.03

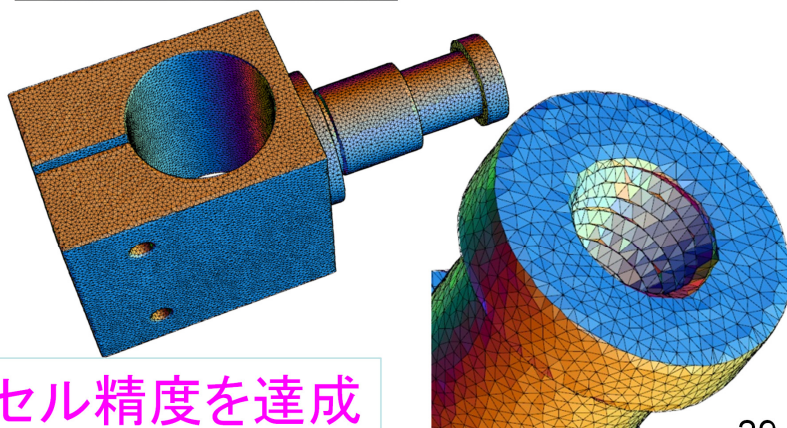
投影像
画素サイズ:
約 0.16



RapidFormXOM
で評価



実測値は目盛 0.05
のノギスで計測
A = 30.0
B = 20.0
C = 40.0

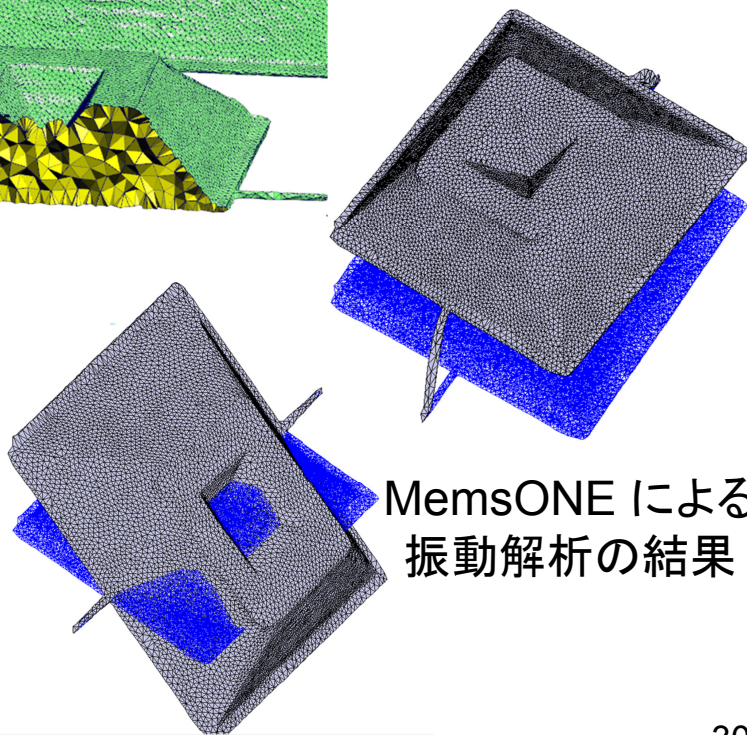
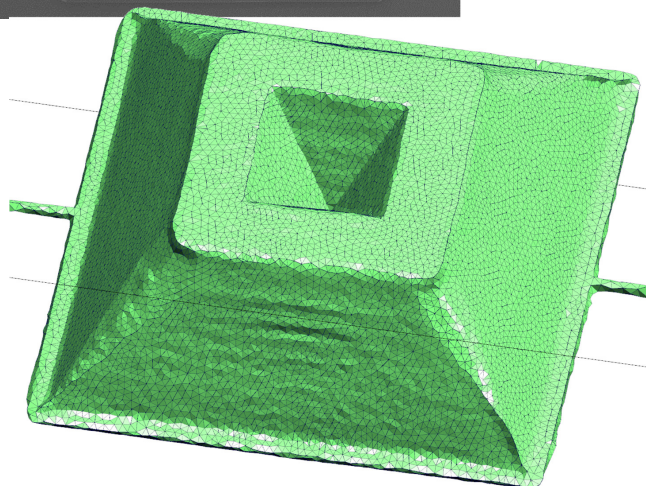
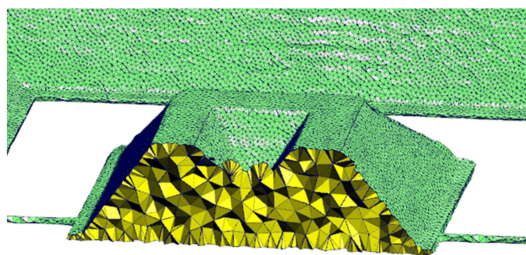
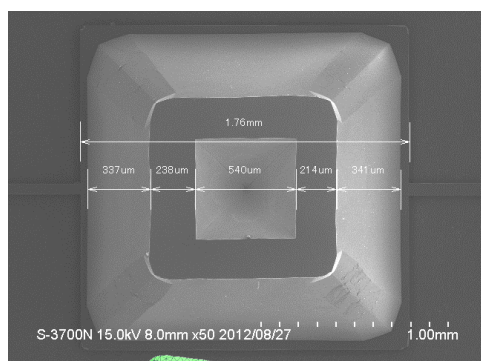


サブ投影像ピクセル精度を達成

29

有限要素法解析への応用

- シリコン製微小部品 (大きさ2mm程度)



MemsONE による
振動解析の結果

30

まとめと今後の予定

- X線CT装置による高精度形状抽出
 - 画像を介さない形状抽出法
 - 簡便で高速な線質硬化手法
- 今後の開発予定
 - 複数材質のデータ処理
 - 超複雑構造への対応



サンプル提供
群馬大
半谷禎彦准教授

