

X線CT装置による MEMSの3次元形状測定と構造解析

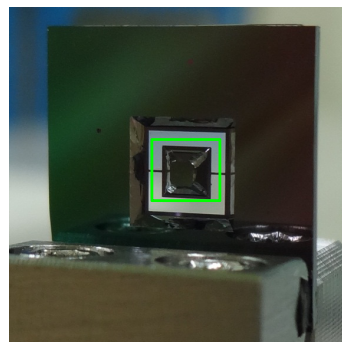
大竹 豊

東京大学大学院 工学系研究科
精密工学専攻

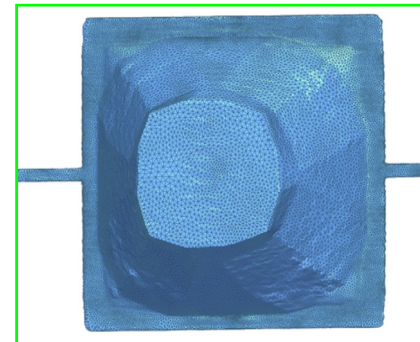
yu-ohtake@den.rcast.u-tokyo.ac.jp

現物MEMSの形状データからの シミュレーションへ向けた取り組み

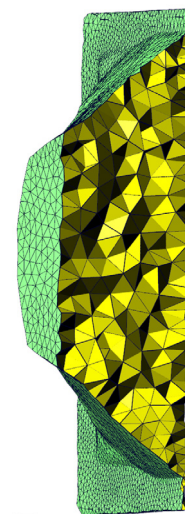
- X線CT装置による3次元形状計測
- 有限要素法用の解析メッシュ生成



シリコンMEMS
(枠内約2mm)

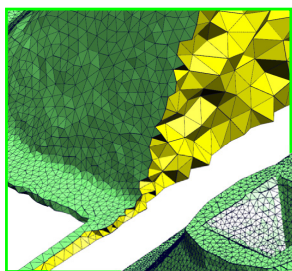


表面形状と解析メッシュ

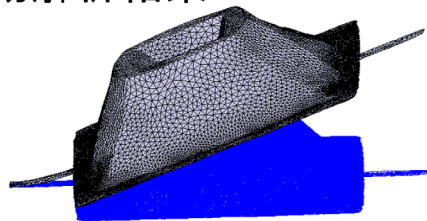


設計データでなく実物データに基づく MEMSの機械的性質の解析

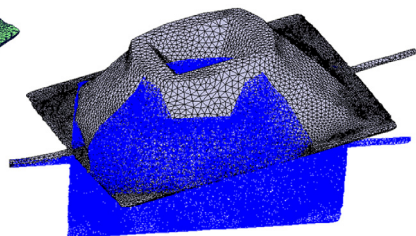
- MemsONE による振動解析結果



解析メッシュ



1次
モード



2次
モード

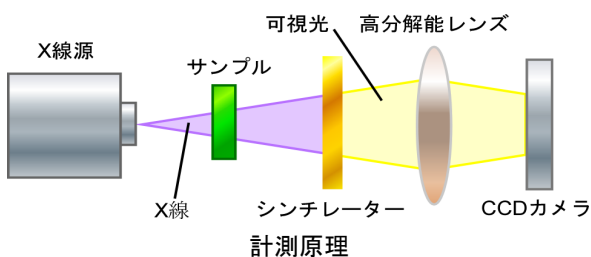
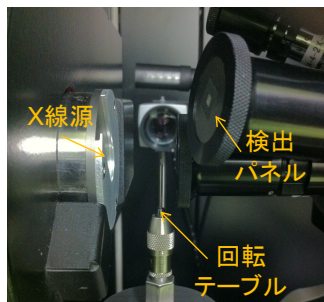
X線 CT スキャナ (コーンビームタイプ)



X線CT装置 (MNOIC設備)

• MicroXCT-400 (Xradia社製)

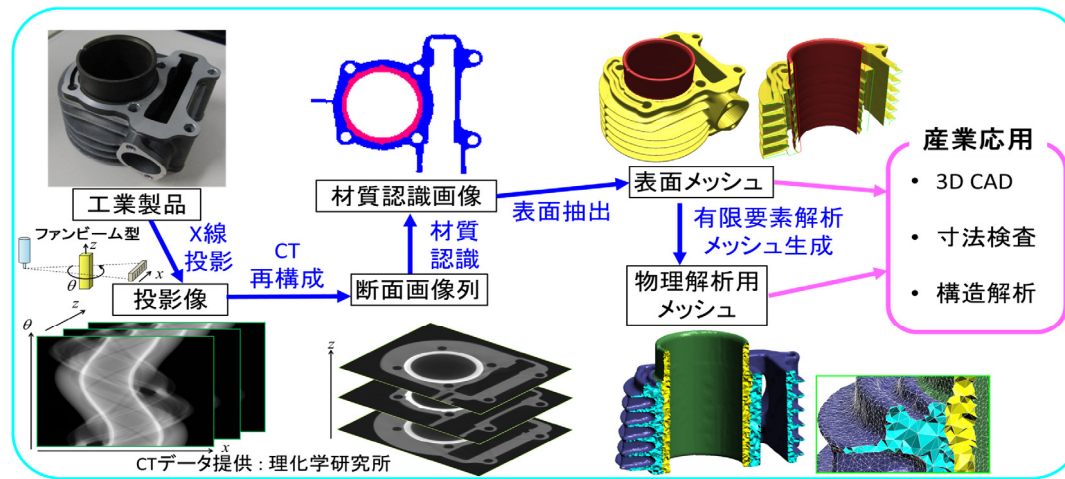
- X線を可視光に変更
 - 像を拡大して計測
- 集光レンズを変更
 - 解像度と視野を変更



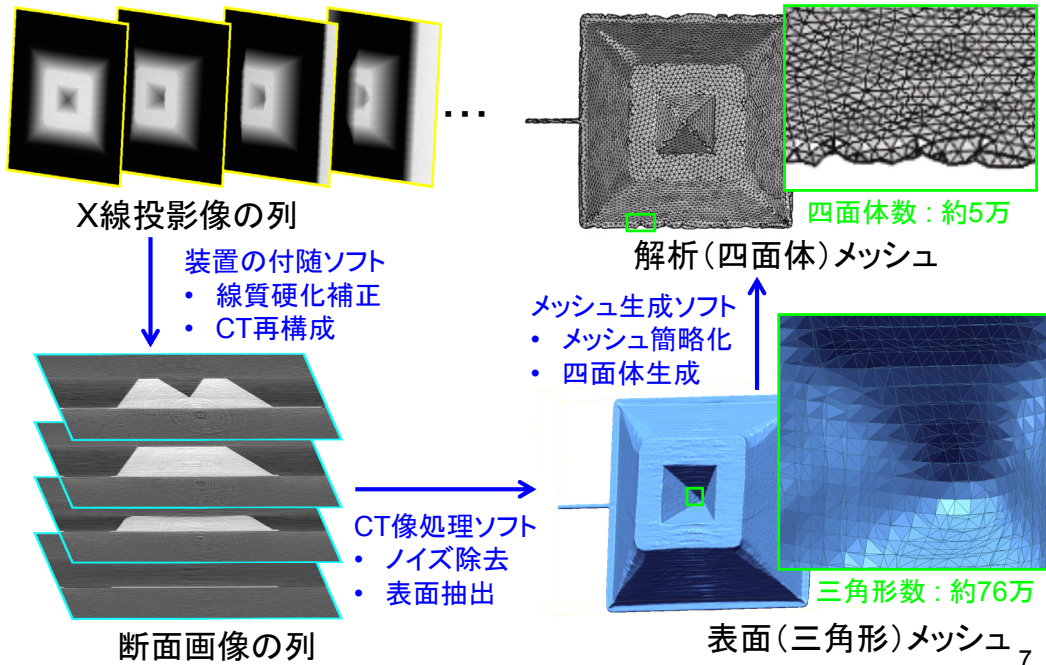
倍率 [X]	分解能 [μm]	視野 [mm]
2	6.0	12
4	5.0	6.0
10	2.5	2.7
20	1.5	1.3
40	1.0	0.7

産業用X線CT装置による形状計測

- 解析メッシュを生成するまでに、
数多くのデータ処理を要する



MEMSサンプルによるデータ処理例



紹介する新技術のポイント

- 解析メッシュ生成の工数を減らしたい
 - X線投影画像列からのダイレクトメッシュ生成
- 高精度な3次元形状を生成したい
 - 質量保存則によるX線の線質硬化手法

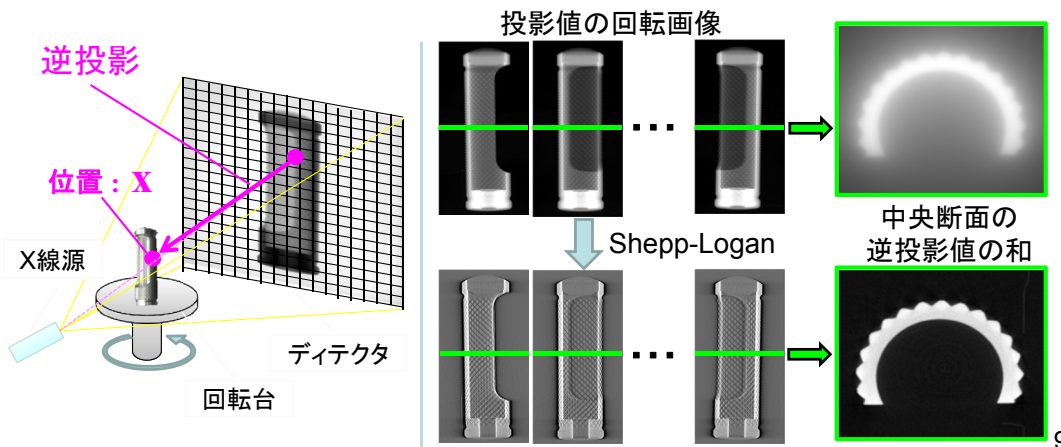
投影像からの断面像(CT)再構成

- フィルターされた投影像を逆投影する

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

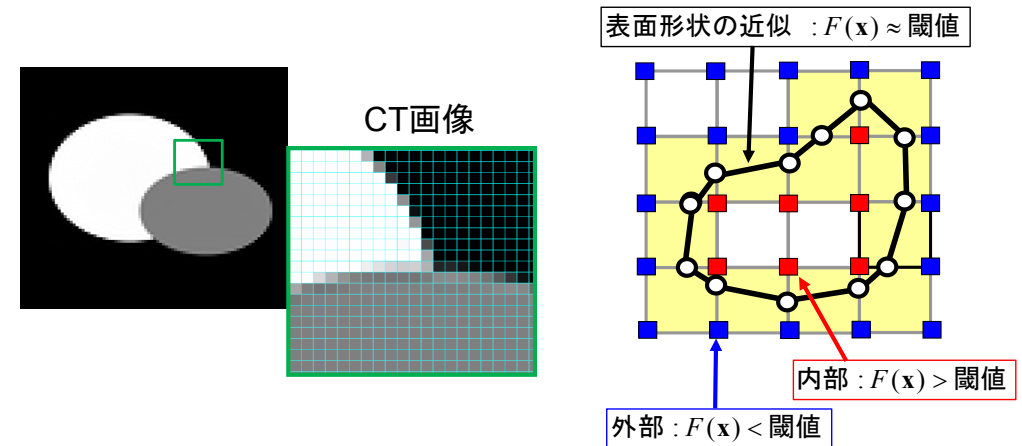
投影値 : $-\ln(\text{X線の透過率}) = \text{光線上の減弱係数の和}$

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



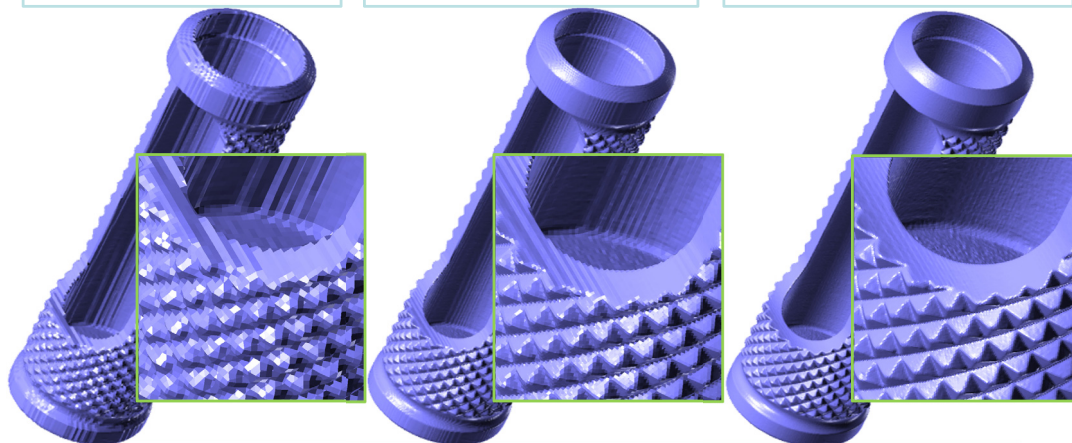
従来法の問題点

- 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

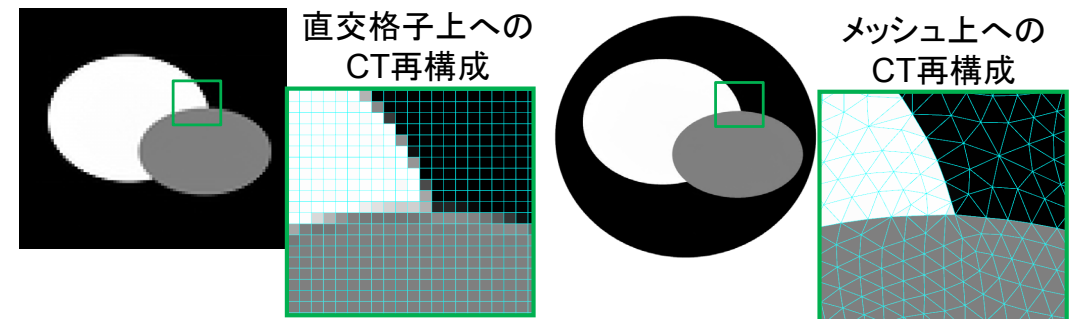
135万ポリゴン, 0.1mm間隔



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

提案する解決策

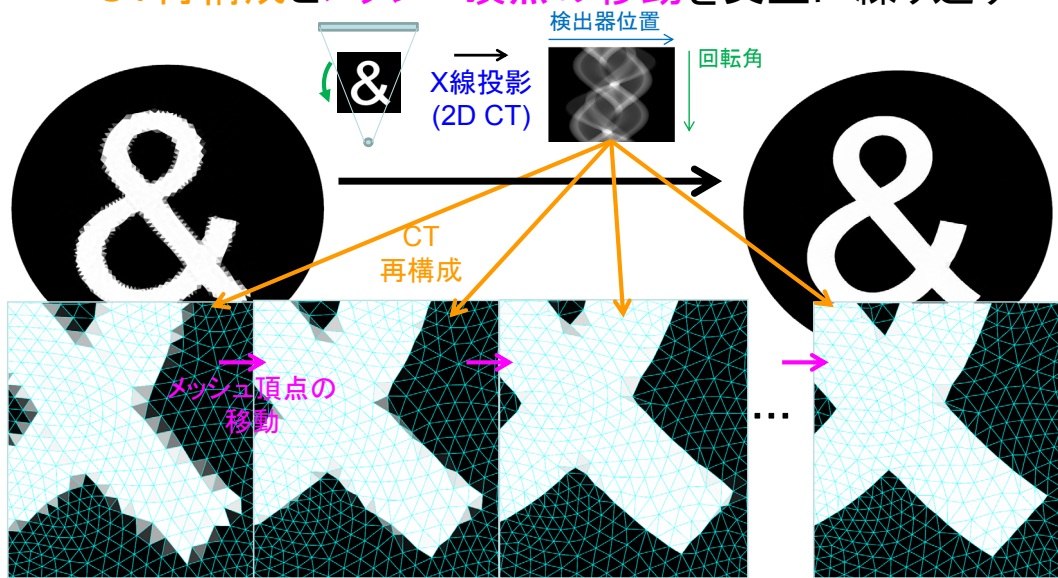
形状抽出の高精度化を目的として、
形状に沿ったメッシュを用いてCT再構成を行う



- CTの値 $F(x)$ は連続な関数
 - 評価点 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

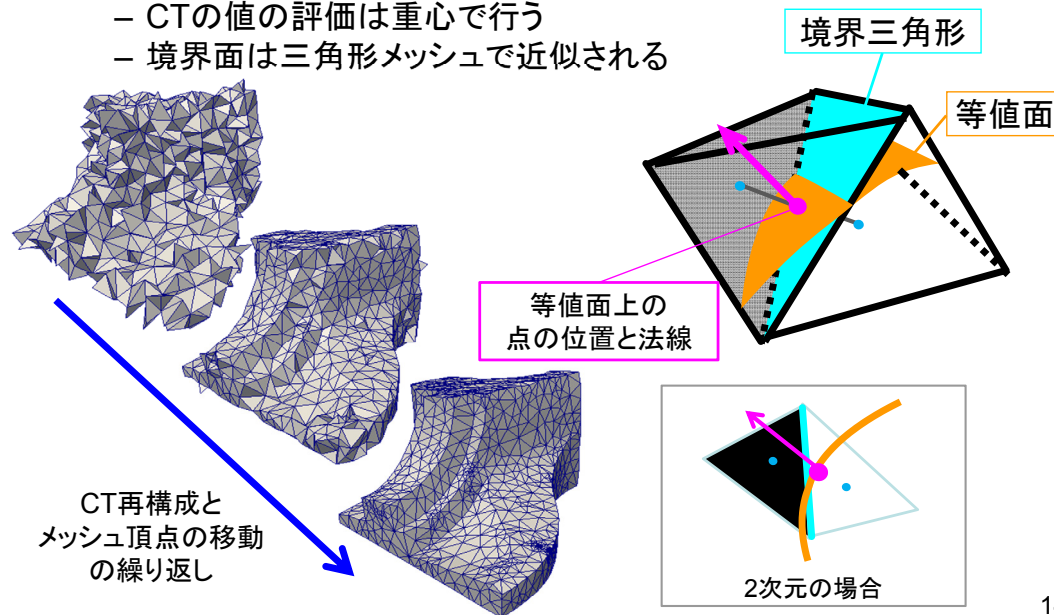
提案法の計算処理の概要 (2次元)

- CT再構成とメッシュ頂点の移動を交互に繰り返す

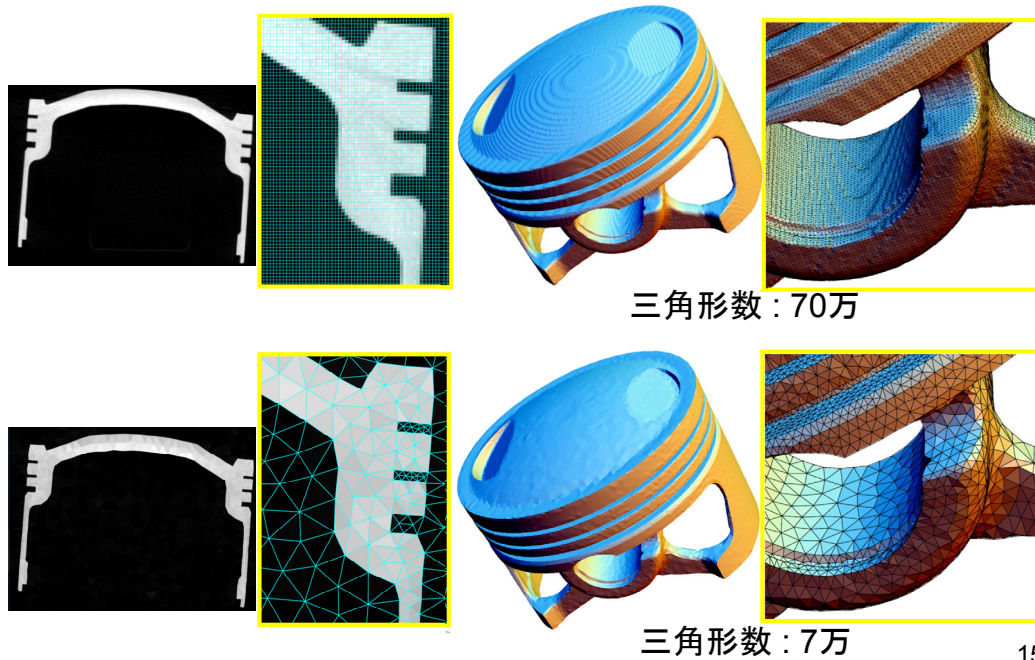


3次元の計算処理の概要

- 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

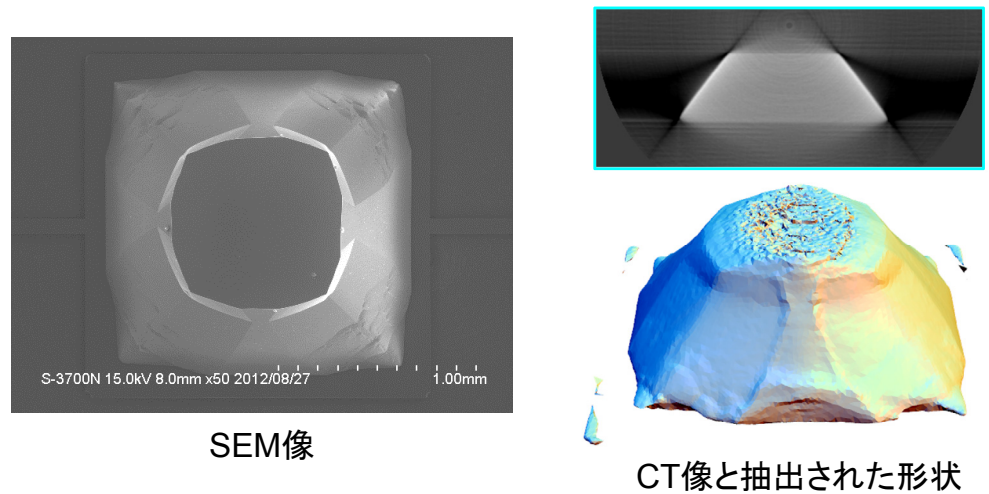


従来法と提案法の比較

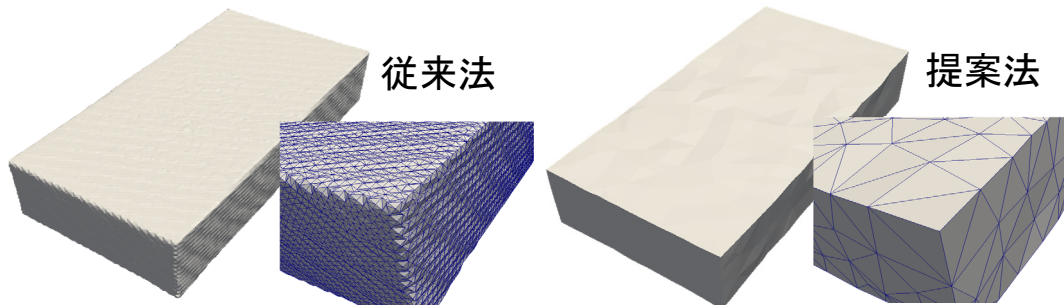


MEMSサンプルの結果

- 線質硬化のため得られる形状は実物と大きく異なる
 - ※ XRadia の装置上で適切なパラメータ指定により補正は可能です



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

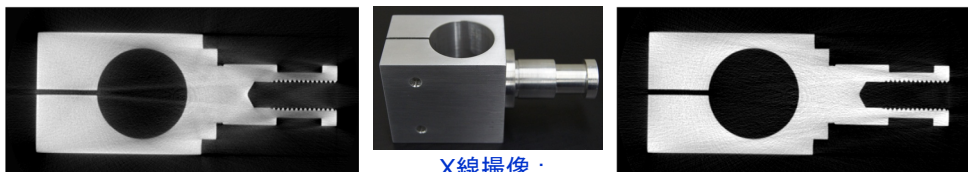
ただし投影画像画素サイズ約0.04mm
 に対し、0.1mmは大きすぎる
 → 線質硬化が原因

紹介する新技術のポイント

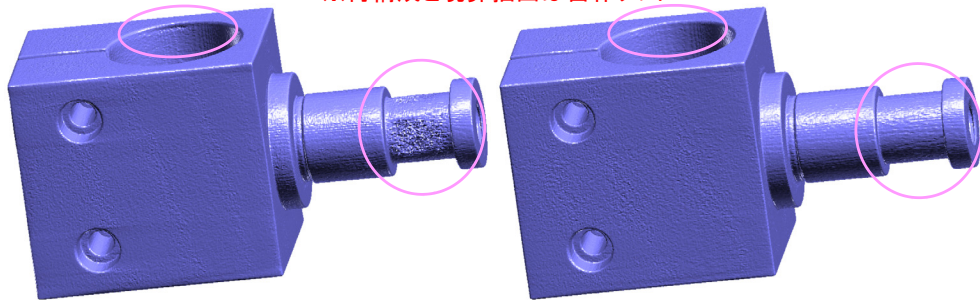
- 解析メッシュ生成の工数を減らしたい
 - X線投影画像列からのダイレクトメッシュ生成
- 高精度な3次元形状を生成したい
 - 質量保存則によるX線の線質硬化手法

線質硬化補正の効果

- 補正により正しいCT像を再構成でき、
 正しい形状を得ることが可能となる



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



シリコンチップの厚さ計測

赤:補正前
 緑:補正後

緑線断面の様子

	厚さ(mm)
実測値	0.50
補正なし	0.546
補正あり	0.499

厚さの定量評価

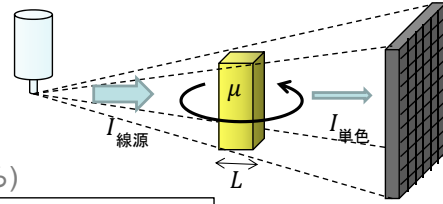
赤いところは厚く
 青いところは薄く
 補正されている

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)

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

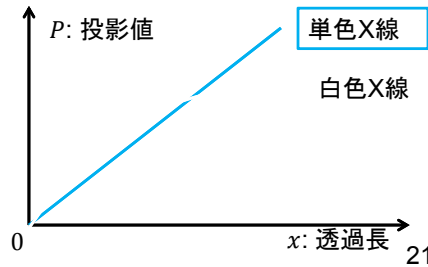
[$W(E)$: エネルギー E のスペクトル分布 (総和は1とする)]

※ 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

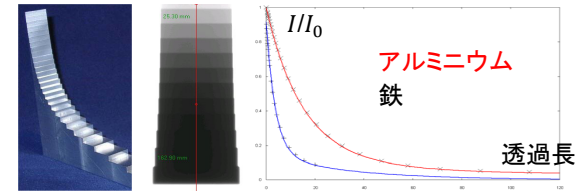
投影値: $P = -\ln(I/I_{\text{線源}})$
 単色の場合: $P = \mu L$

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



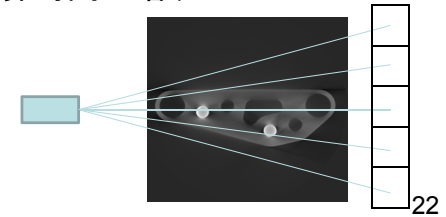
線形化の代表的な先行研究

- 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.
(XRadia 社ではこの方法を利用)



提案する補正方法

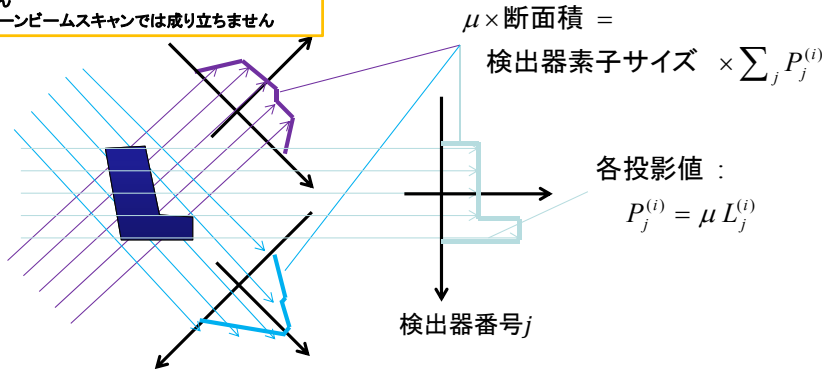
透過長 \propto 投影値のときに成立する保存則☆を
できるだけ満たすように補正関数を行う

保存則☆: 計測物が視野に収まっているならば

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

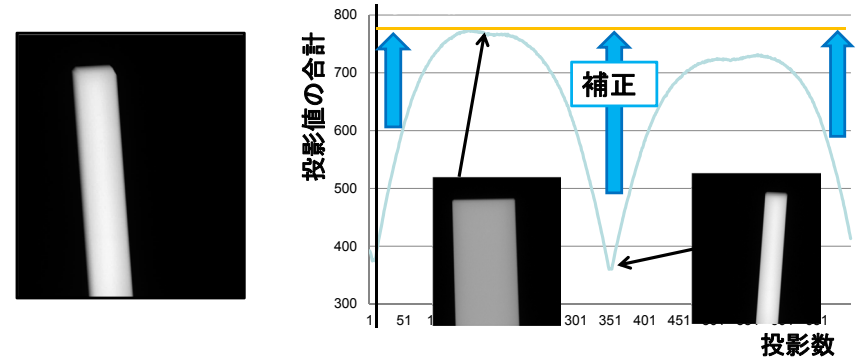
[$P_j^{(i)}$: i 番目の投影における j 番目の検出器の投影値]

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



実データにおける 投影値の合計の変化


- 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



線質硬化補正による寸法精度の向上


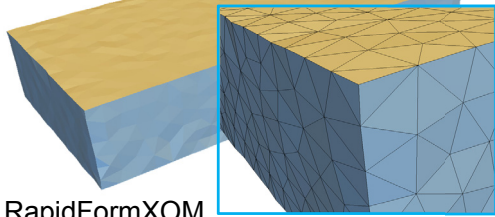
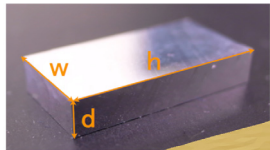
誤差	補正前 ⇒ 補正後
h	+0.06 ⇒ -0.00
w	+0.08 ⇒ -0.01
d	+0.12 ⇒ -0.01

投影像
画素サイズ:
約 0.04



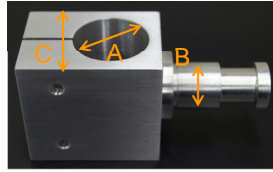
誤差	補正前 ⇒ 補正後
円筒径A	-0.09 ⇒ +0.02
円筒径B	+0.09 ⇒ -0.00
面間C	+0.27 ⇒ -0.03

投影像
画素サイズ:
約 0.16

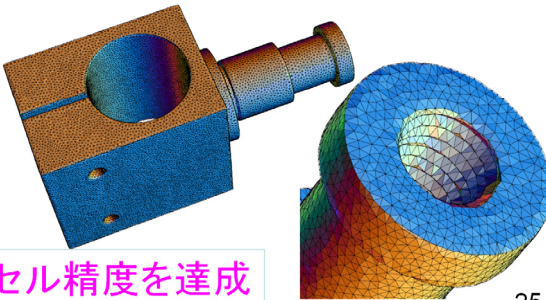



RapidFormXOM
で評価

サブ投影像ピクセル精度を達成

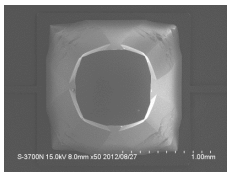


実測値は目盛 0.05
のノギスで計測
A = 30.0
B = 20.0
C = 40.0

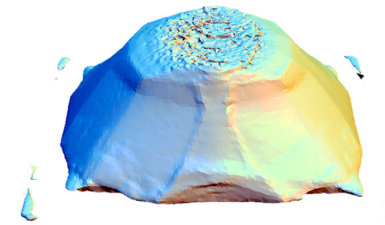
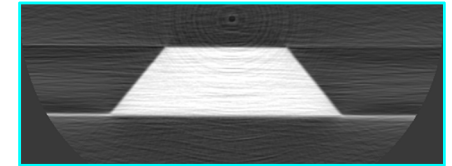
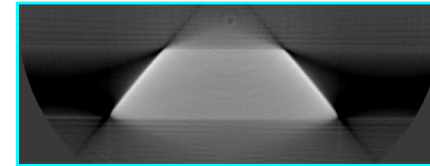


25

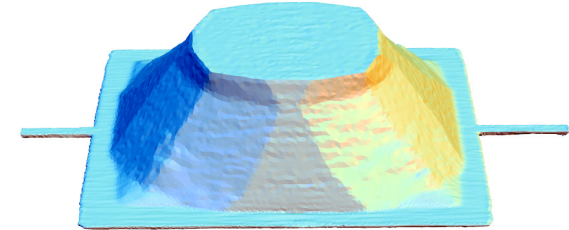
MEMSサンプルの結果



- 補正により薄い部分やエッチング面が正しく抽出できた



補正なし

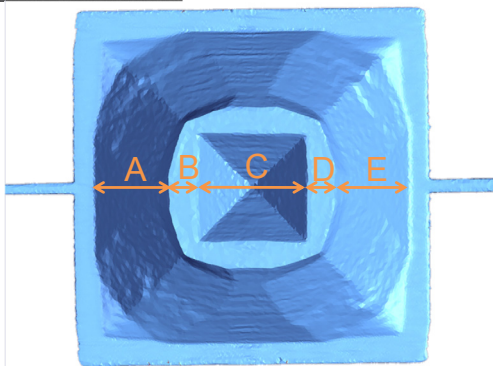
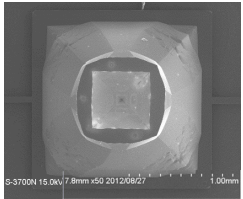


補正あり

26

寸法計測の結果

- X線投影像のピクセルサイズ10μmに対して、ほぼ目標精度を達成できた



計測箇所	レーザー顕微鏡[μm]	CT装置[μm]
A	631	628
B	139	136
C	563	562
D	144	138
E	598	615

赤字の箇所は目標精度より寸法の差が大きい

27

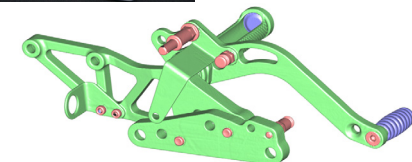
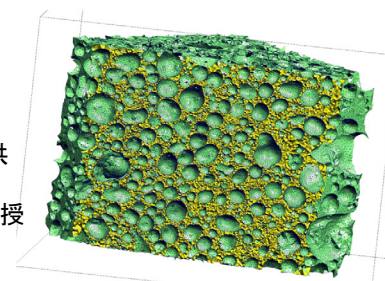
まとめと今後の予定

- 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

1月22日、23日にMNOICIにてX線CTの実習プログラムが開催されます



サンプル提供
群馬大
半谷禎彦准教授



28