

# 日本安全保障貿易学会 第19回研究大会

## X線CTによる リバースエンジニアリングと 3Dプリンティング

鈴木宏正

東京大学

suzuki@den.t.u-Tokyo.ac.jp

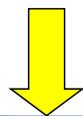
2015年 3月14日

### ものづくり と 情報



3次元形状モデル  
(ものの形の情報)

製品



情報の創造 と 情報の転写

3D CAD  
CADデータ



転写



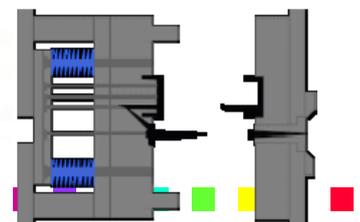
金型



転写

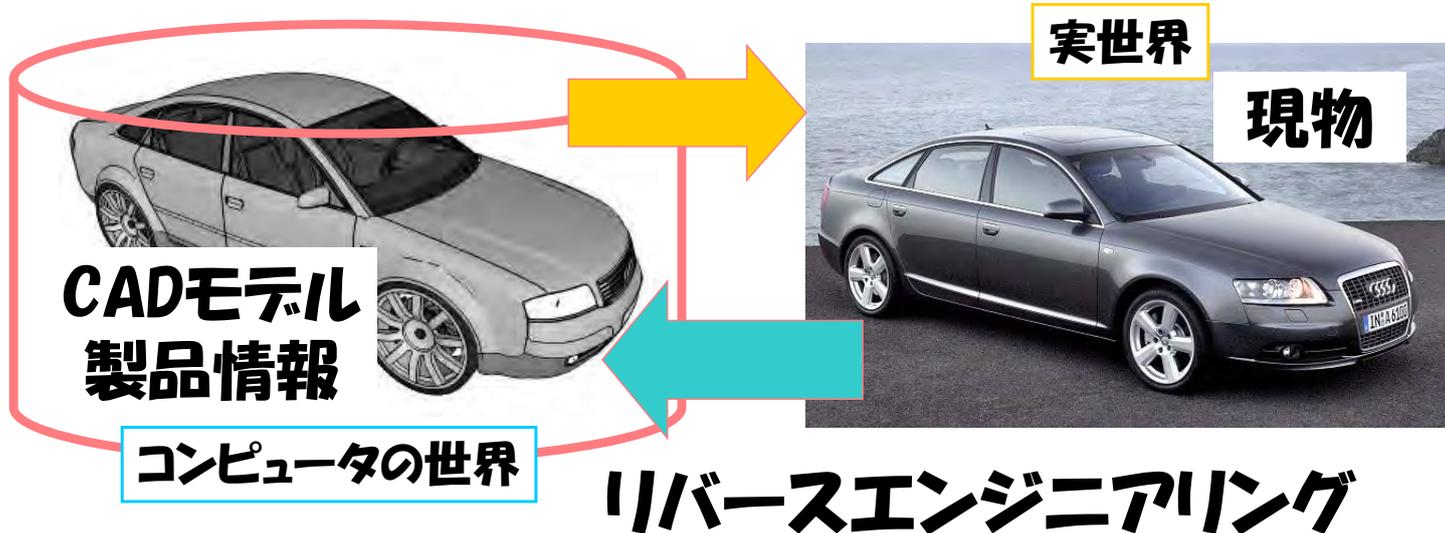


部品



# 現物融合型エンジニアリング

## デジタルエンジニアリング



(C) H. Suzuki, RCAST, U. Tokyo, 2008

4

## なぜ測るか？

### 現物検証

工程内で現物形状を計測し、形状・寸法を検証

各工程で型や製品を計測しCADと比較して問題点の洗い出し  
異なる製造条件による製品の形状比較による条件最適化  
製品のばらつきを求め、設計形状や寸法・幾何公差にフィードバック

### 現物融合設計

実体の形状を変形して設計し、デジタル化

クレイモデルからCADモデルを生成するリバースエンジニアリング  
型の手直し後にCADモデル生成  
現物しかないもののCADデータ作成

### 現物融合解析

実験とシミュレーションを同じ形で実施

現物の誤差要因＝スプリングバック、ヒケ・反り、手直し等  
現物による実験と現物を計測したモデルによるシミュレーション  
現物しかない(CADデータのない)もののシミュレーション

### 現物融合計画

現物のデータに基づく生産や設備の計画

素形材を計測してNC加工  
組立中の車体を計測してロボットの溶接経路を変更  
工場を計測して設備設計 (As Built モデリング)

# なぜ測るか？ 製造された部品形状を検査(寸法計測)

- 形状測定
  - 部品形状を計測した点群と、CADモデルを比較し、誤差を評価
  - カラーマップ表示
- GD & T (Geometric Dimensioning and Tolerancing)
  - 幾何公差や寸法の測定 (CAT, Computer Aided Testing)
- 3D単独図
  - 従来2次元図面に記述されていた、寸法や幾何公差の情報を3次元CADモデルに付与
  - その情報とスキャンデータを使って、自動的に寸法や幾何公差を測定

3D 譚族図関係企画  
ISO 16792  
JIS  
JEITA 3D 単独図規格ガイドライン  
JAMA/JAPIA 3D単独図ガイドライン



H. Suzuki, UTokyo, JAPAN. 2015

# なぜ測るか？ 粘土モデルでスタイルデザイン

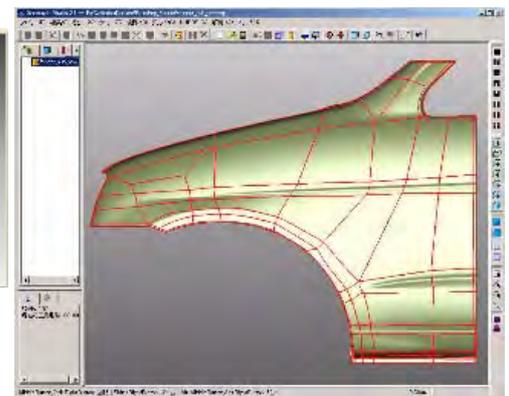
クレイモデル



測定点群



サーフェスモデル



日産自動車の匠 木村誠氏

<http://trendy.nikkeibp.co.jp/article/pickup/20081009/1019737/?P=2>

H. Suzuki, UTokyo, JAPAN. 2015

# なぜ測るか？

# 個人に合わせたオーダーメイド



## 耳型形状データ生成の流れ



## 補聴器のカバーデータ

オーダーメイド補聴器 リオネット夢耳工房 リオン(株)

© H. Suzuki, RCAST, Univ. Tokyo, 2012

# 3次元スキャン技術

接触式

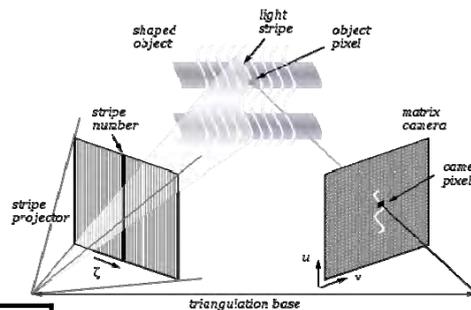
点



メーカー: ツアリス, ミットヨなど  
価格: 数百万から数千万

光学式

面

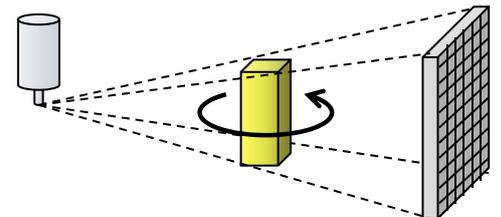


縞投影型  
(カメラと投影機)

メーカー: GOM, Steinbicklerなど  
価格: 数百万から3千万

X線CT

内



コーンビーム型  
(X線源とディテクタ)

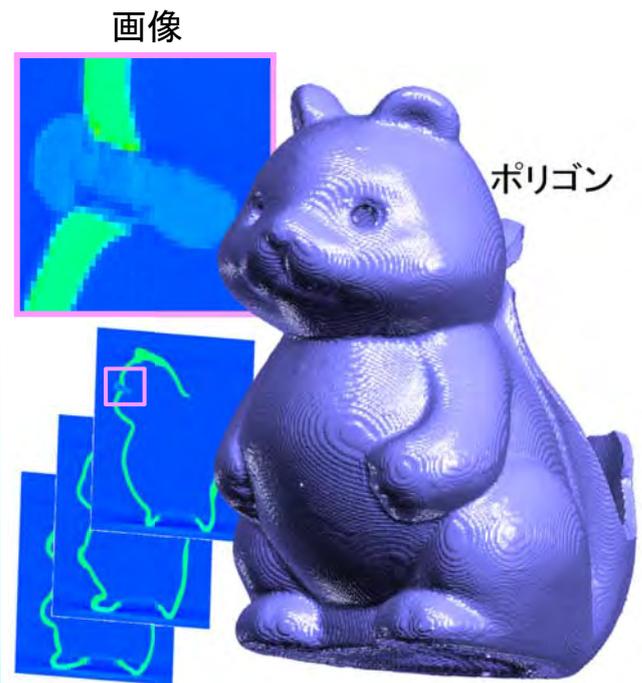
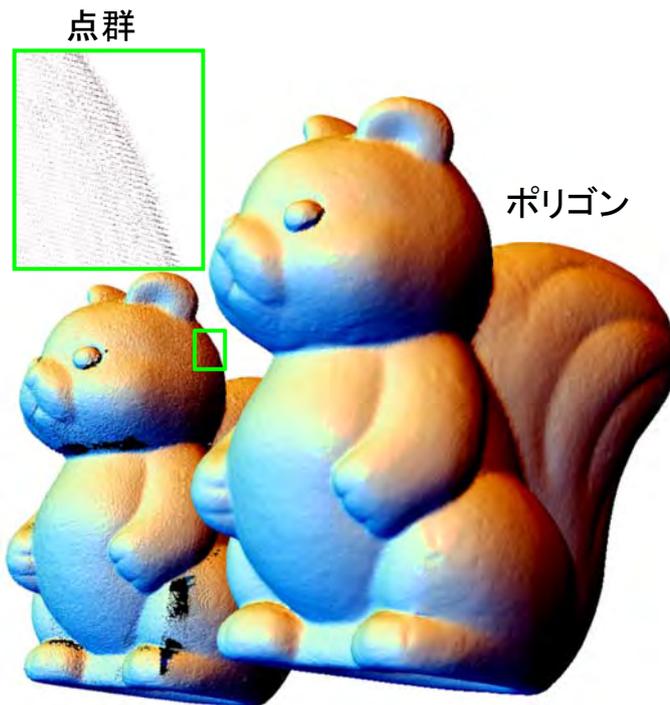
メーカー: X-Tek, Yxlon, 東芝, 島津など  
価格: 数千万から数億円

	X線CT	光学式	接触式
計測精度	○	○	◎
計測時間	○	○	×
内部計測	○	×	×

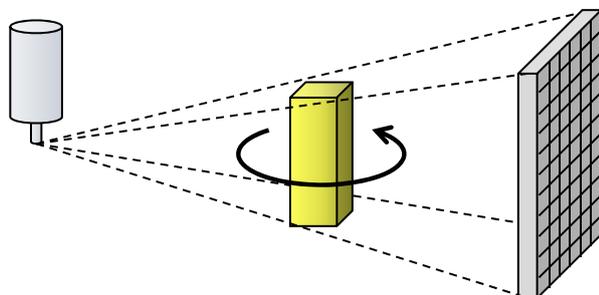
H. Suzuki, UTokyo, 2015

# 表面スキャン v.s. CTスキャン

大竹豊@東大



# コーンビームCT

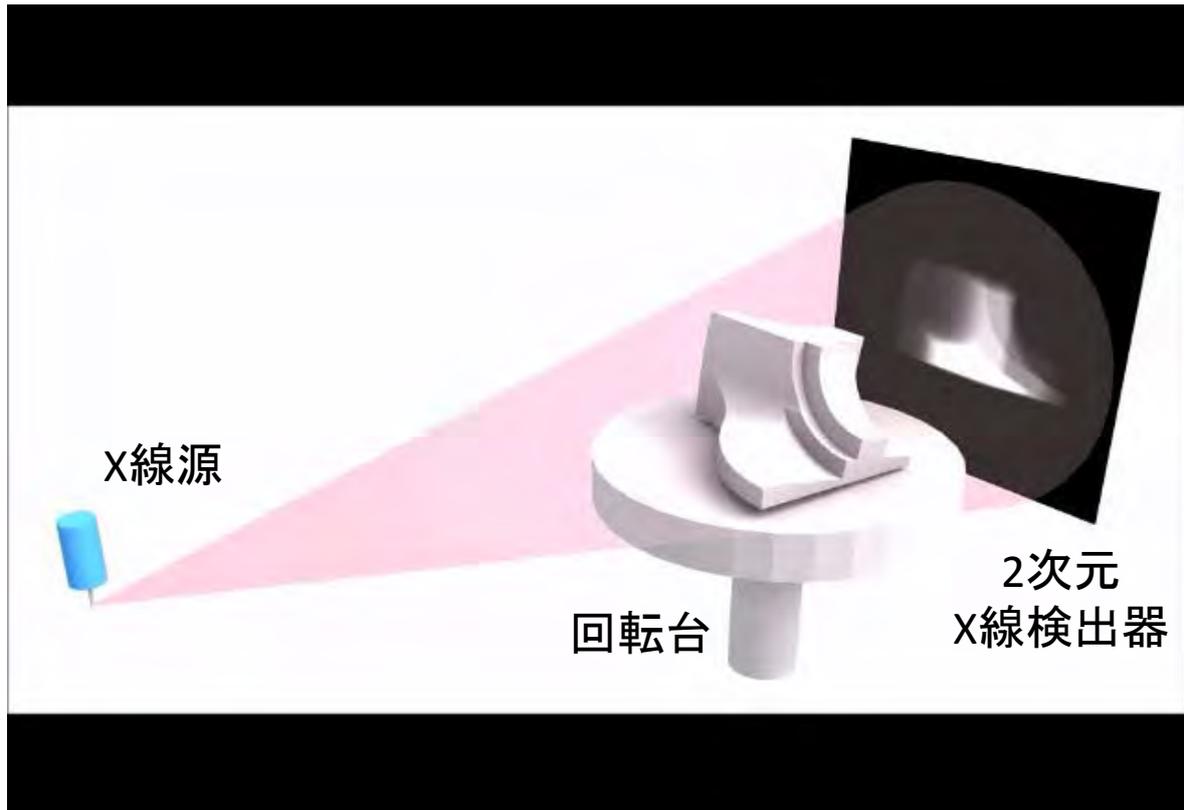


$\mu$ -focus XCT

FPD=フラットパネル検出器



# コーンビームCT

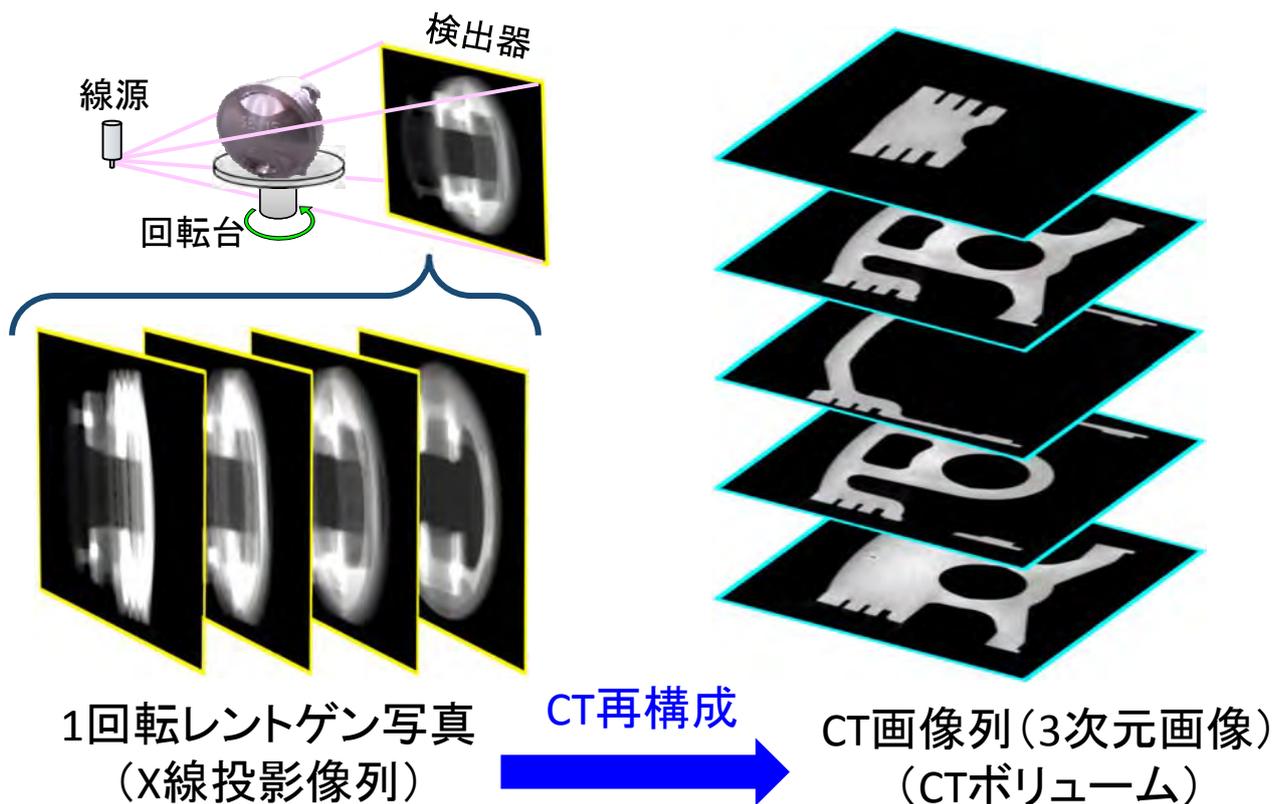


H. Suzuki, UTokyo, 2015

16

# CTスキャンからの3次元画像生成

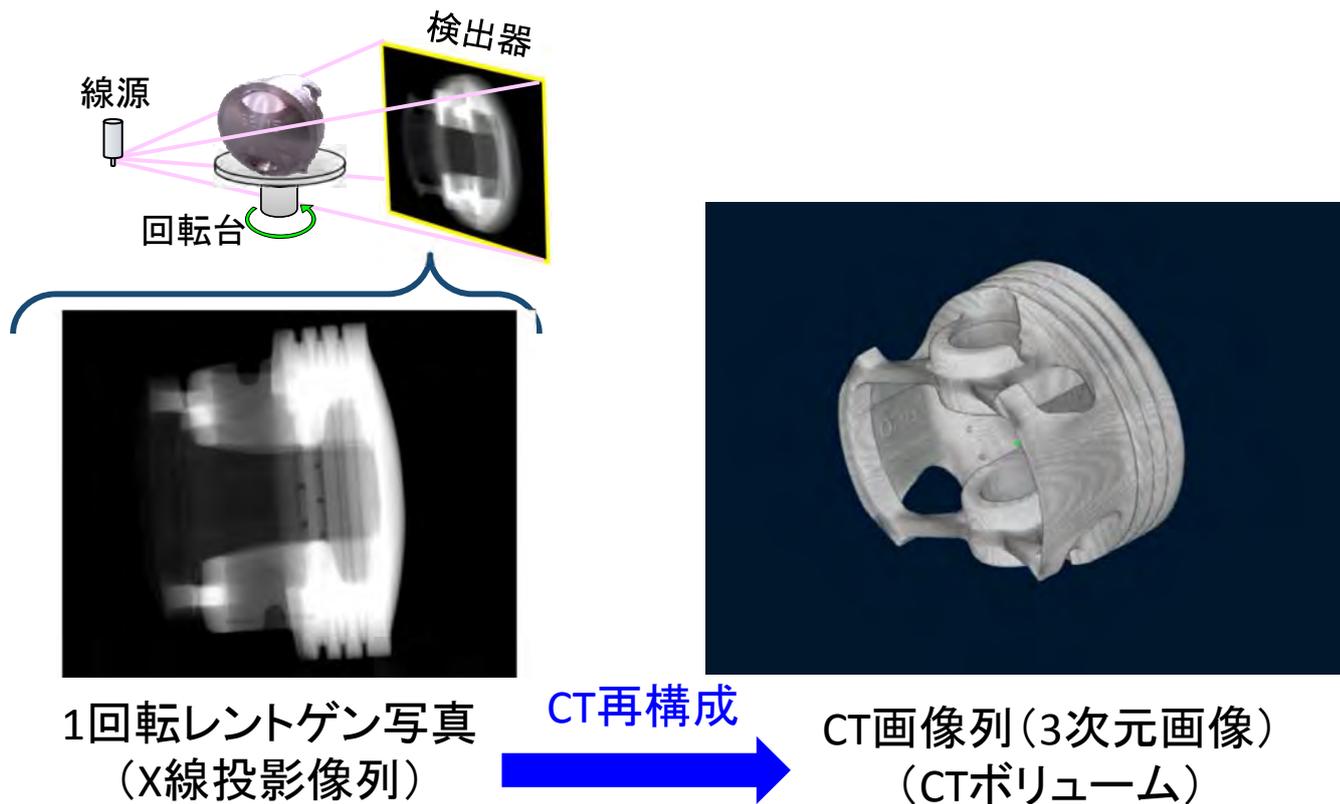
大竹豊@東大



H. Suzuki, UTokyo, 2015

17

# CTスキャンからの3次元画像生成

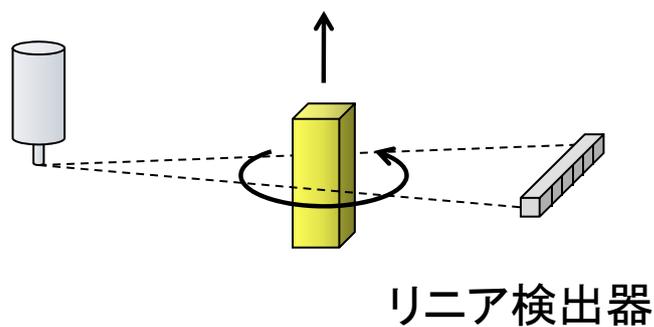


H. Suzuki, UTokyo, 2015

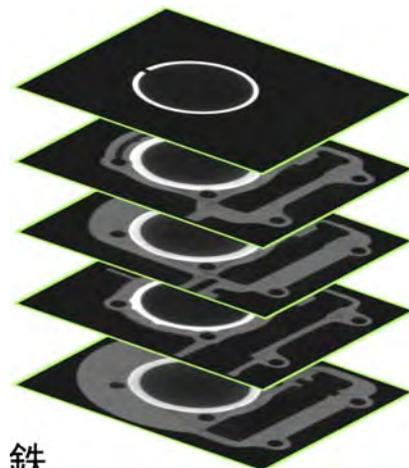
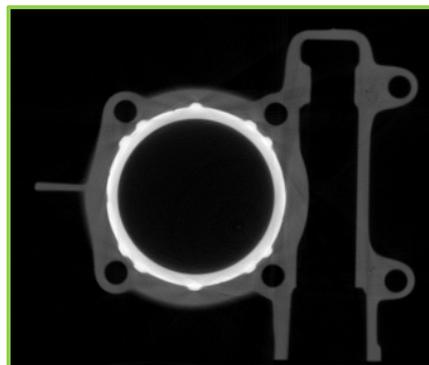
# ファンビーム方式



<http://www.yxlon.com/Products/Tire-inspection-systems/Y-CT-Tire>

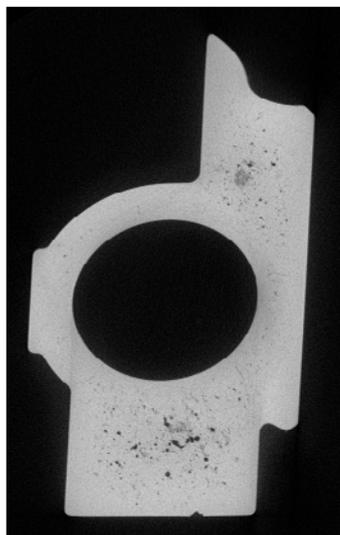


## 断面画像



黒：空気 灰：アルミ 白：鉄

H. Suzuki, UTokyo, 2015

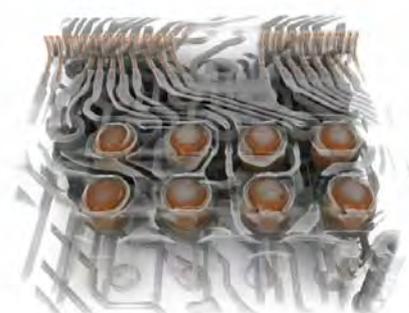


H. Suzuki, UTokyo, 2015

20

## Nano CT

- Xradia MicroXCT
  - 1.5  $\mu\text{m}$  resolution
  - 90 – 150 KeV source
  - Small to large samples
  - High contrast with Phase Enhanced Imaging



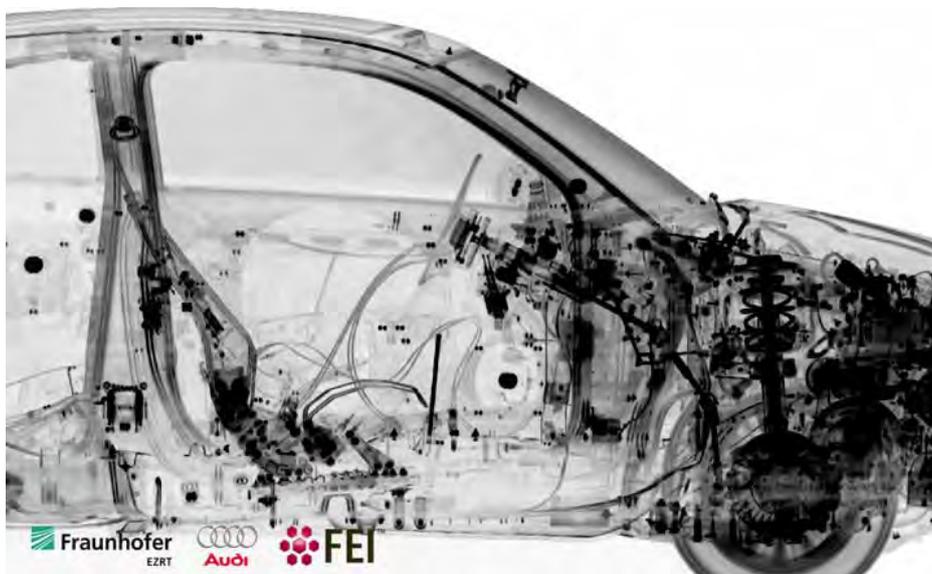
H. Suzuki, UTokyo, 2015

21



H. Suzuki, UTokyo, 2015

## 自動車丸ごとCT



H. Suzuki, UTokyo, 2015

## Dimensional XCT

- XCTの特徴(非破壊, 内部計測, 高速計測, 全面計測)の特長をもちつつ高精度化
- 座標計測装置の位置付け
  - 接触式CMMの代替を狙う
    - “CMM + XCT probe” (Werth社)
- 2008年頃から商品化
- 現状の適用分野
  - プラスチック及び軽金属の小物部品



Carl Zeiss IMT社  
Metrotom 1500



Werth社  
TomoScope HV500



Nikon Metrology社  
XT-H225

H. Suzuki, UTokyo, 2015

26

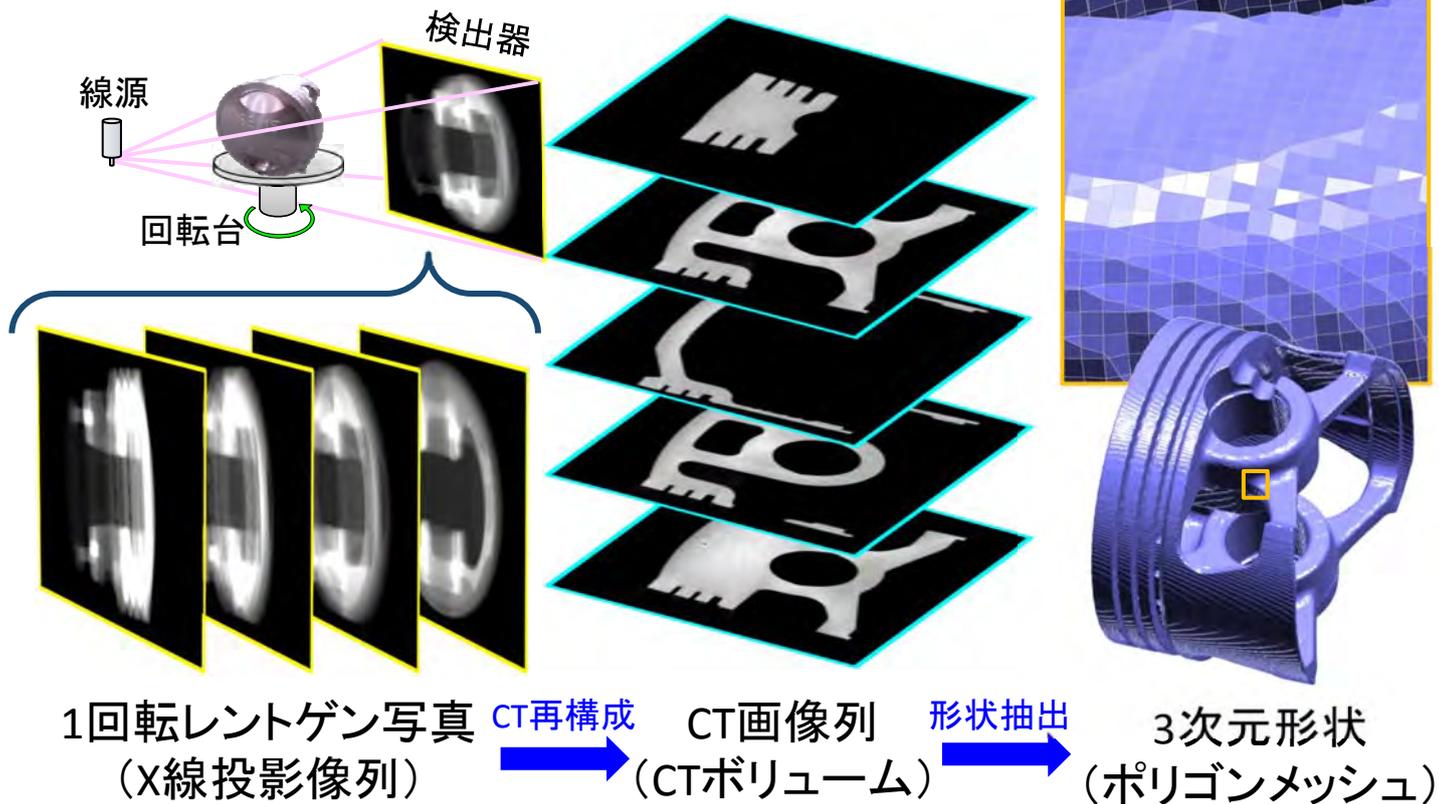


H. Suzuki, UTokyo, 2015

27

# CTスキャンからの3次元形状生成

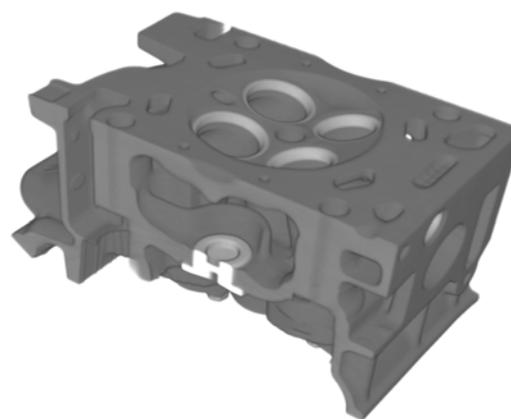
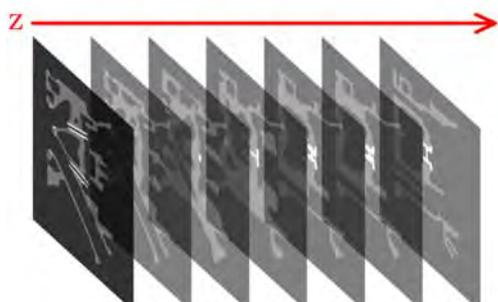
大竹豊@東大



H. Suzuki, UTokyo, 2015

28

## ボリュームモデル



ボリュームレンダリング

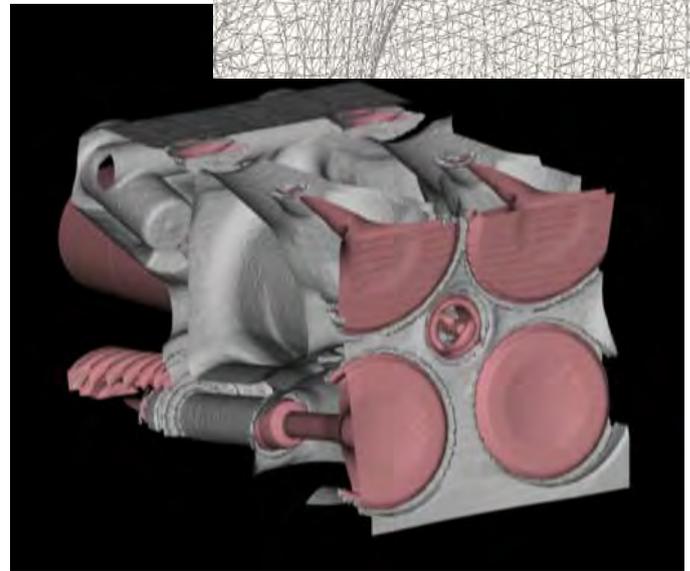
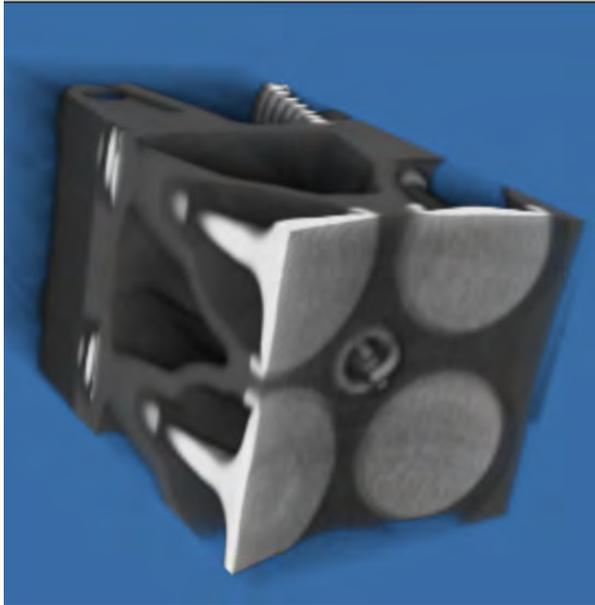
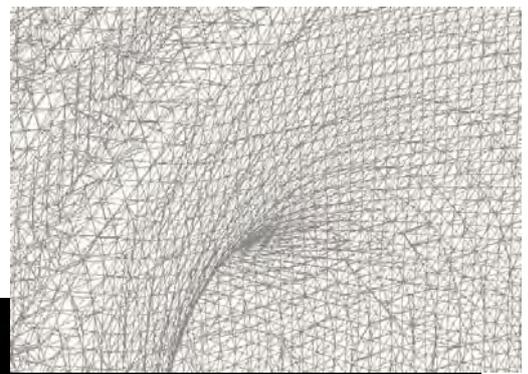
- 断面画像(スライス)の積み重ね
- ボリュームモデル=3次元画像
  - 3次元格子状に並んだボクセルが画素値をもつ

H. Suzuki, UTokyo, 2015

29

# 等値面生成

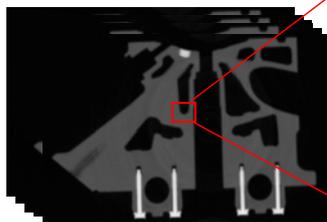
- ボリウムモデルからメッシュモデルへ



H. Suzuki, UTokyo, 2015

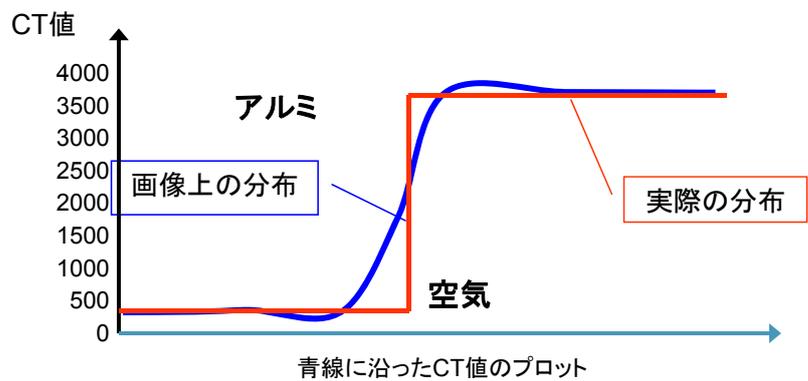
# CT画像 (CT値の画像)

大竹豊@東大

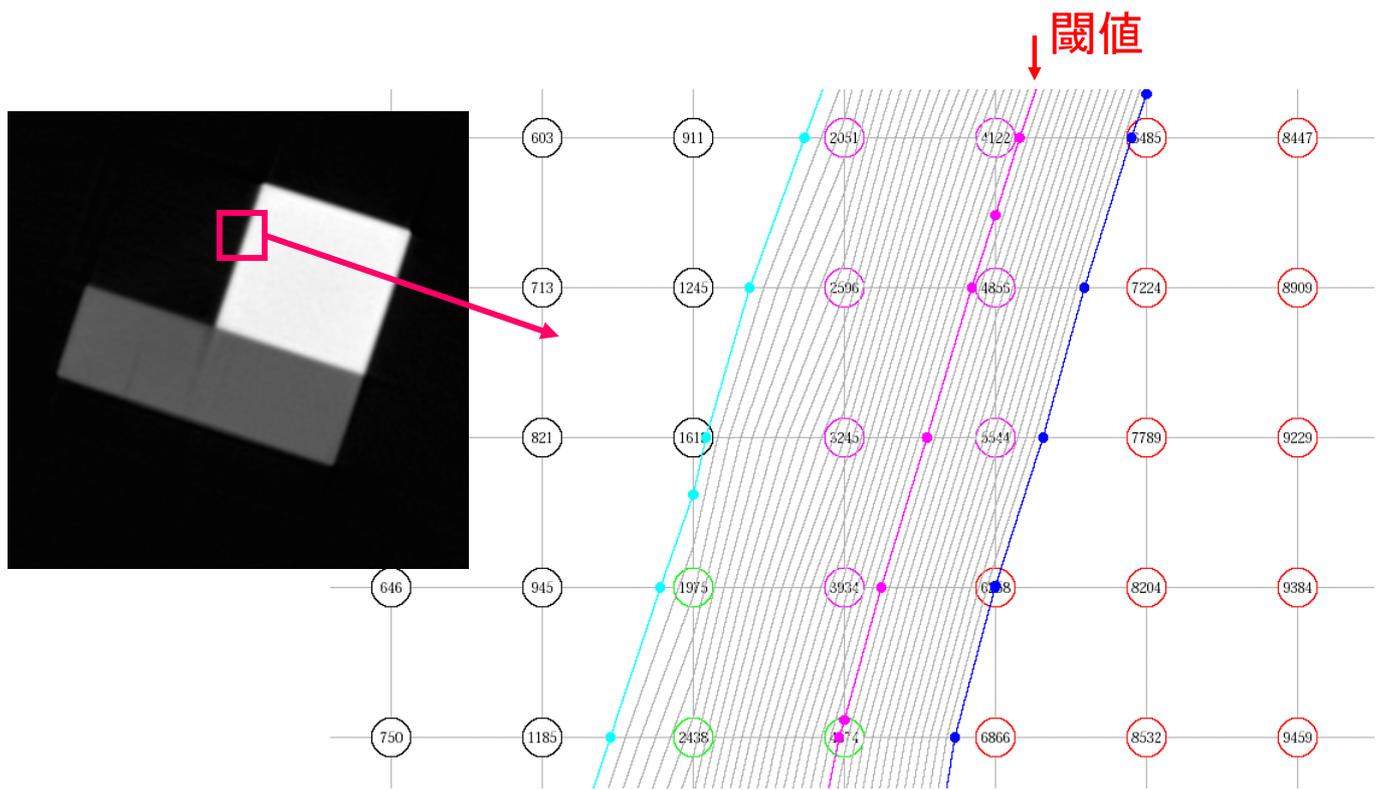


CT画像

1522	475	276	278	264	230	215	28	326	595	1808
1868	571	390	216	286	250	199	114	316	850	2335
2580	1240	495	303	241	297	323	298	585	1553	2897
3261	2221	1267	561	328	414	420	797	1397	2600	3218
3578	3214	2720	1822	1124	1106	1236	2029	2782	3276	3498
3700	3552	3482	3171	2730	2682	2894	3125	3429	3468	3547
3683	3655	3627	3595	3507	3624	3560	3434	3585	3527	3529
3532	3583	3568	3572	3656	3650	3496	3502	3597	3511	3487

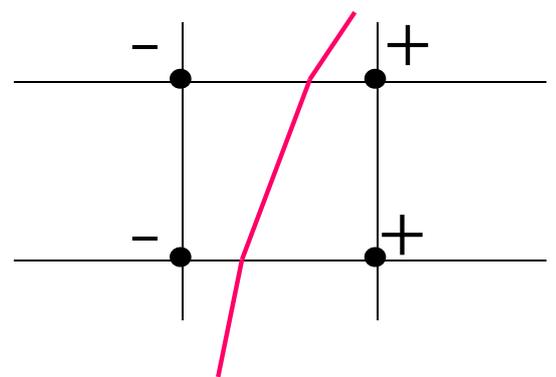
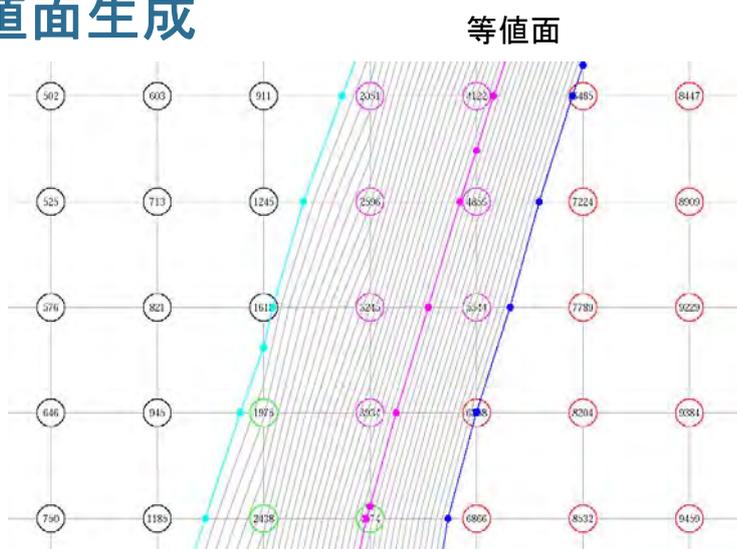


# 等値面生成



(C) H. Suzuki, UTokyo, 2015

# 等値面生成

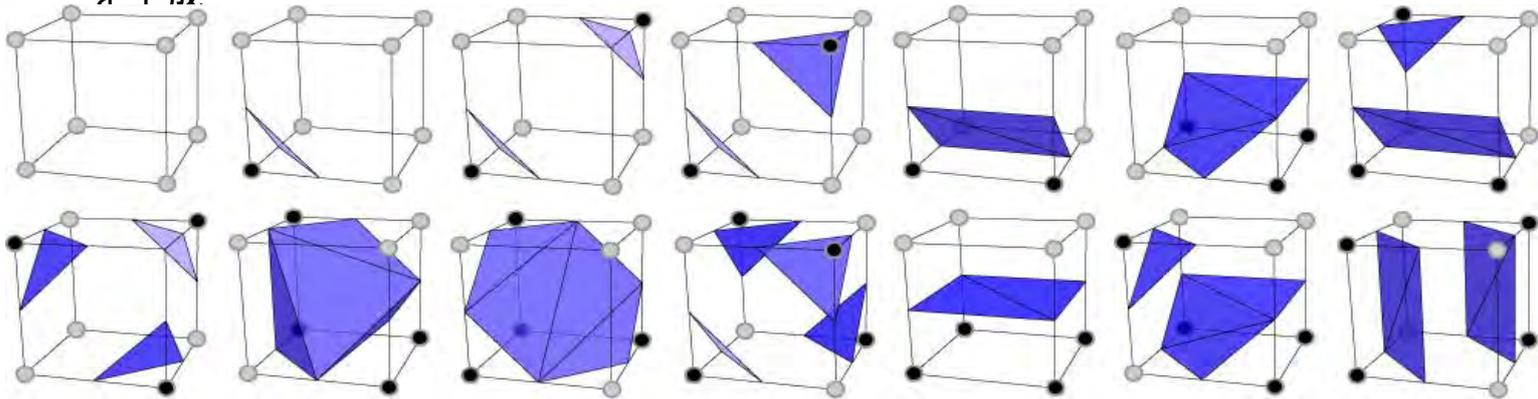
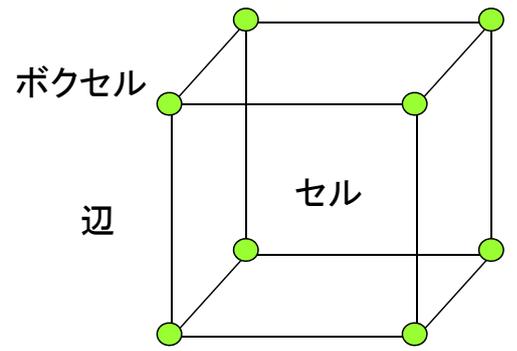


- 等値面 = 一定の値を取る面
- 等値面生成
  - 閾値を指定して等値面を生成する方法
  - マーチングキューブ法
- 材質の境界の閾値の値を取る面

H. Suzuki, UTokyo, 2015

# マーチングキューブ法

- マーチングキューブ法
  - [Lorensen 1987]の論文と特許
- セル、辺
  - 8ボクセルからなる直方体(立方体)
- 両端のボクセルの値が閾値に対して異符号になる辺に頂点を生成し、それらをつないで三角形面群を生成

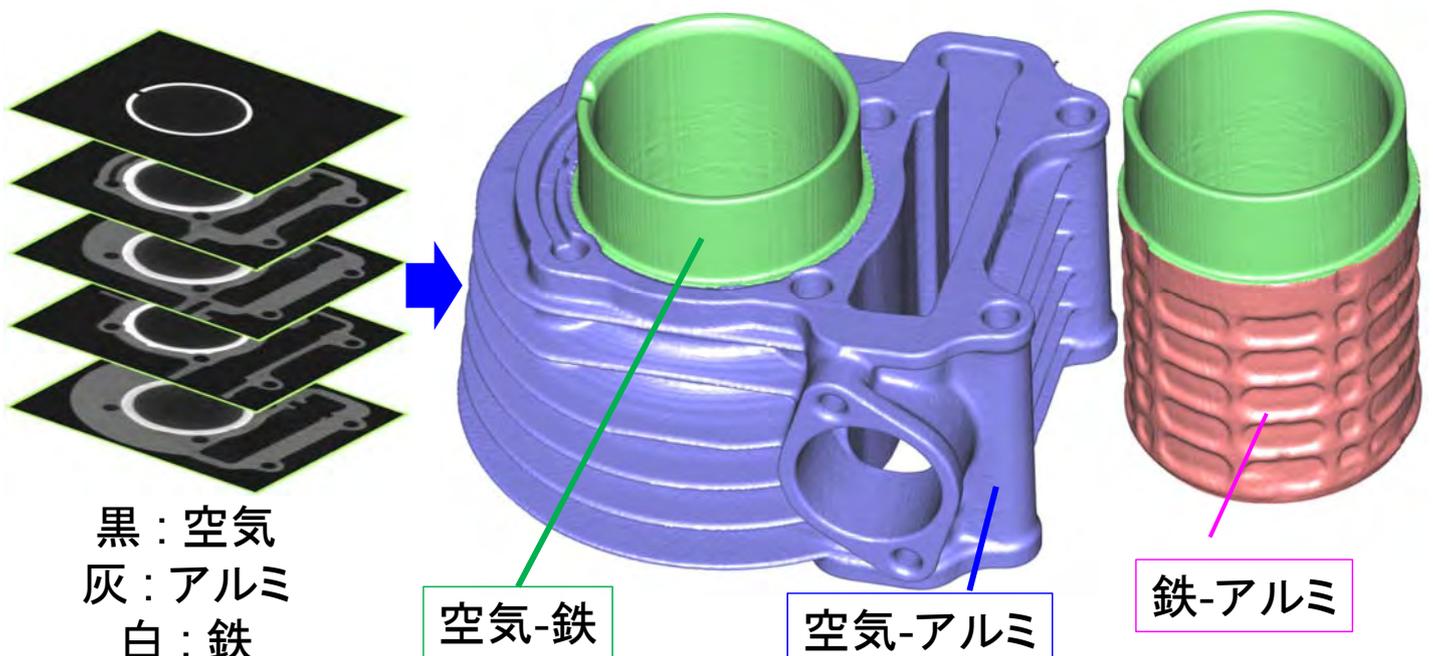


H. Suzuki, UTokyo, 2015

# 複数材質部品における形状抽出

大竹豊@東大

- 鉄・アルミ・樹脂などCT画像上の値が明らかに違う場合には自動抽出可能



黒 : 空気  
 灰 : アルミ  
 白 : 鉄

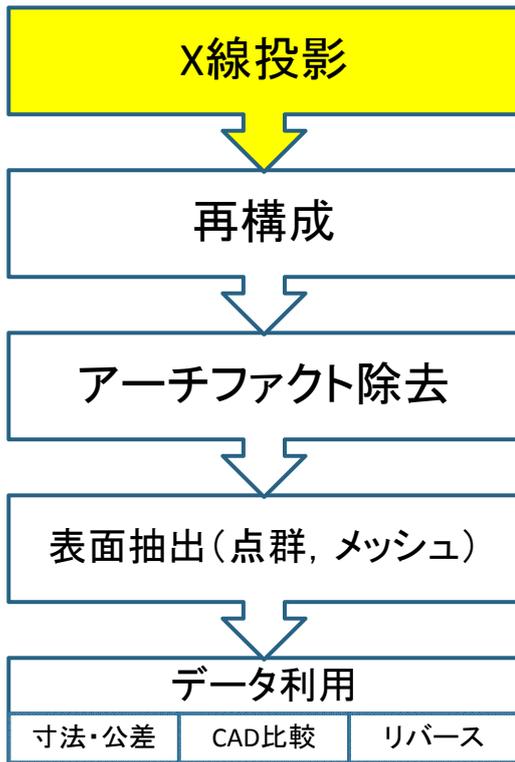
空気-鉄

空気-アルミ

鉄-アルミ

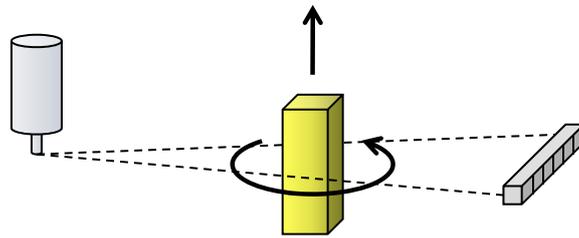
H. Suzuki, UTokyo, 2015

## CTの処理プロセス (1)



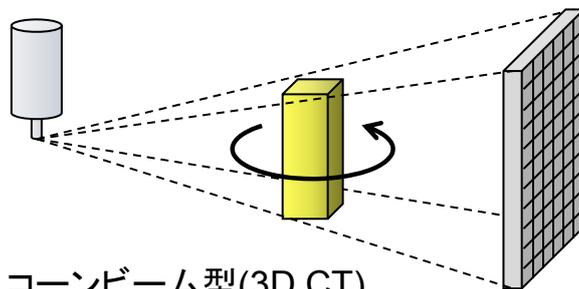
H. Suzuki, UTokyo, 2015

- 測定物を回転させ、多数の方向からの投影像を得る



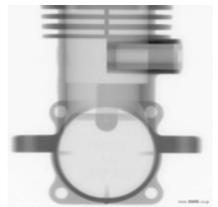
ファンビーム型 (2D CT)

回転とZ軸方向のシフトを繰り返す。スライス画像を重ねて3次元CT画像



コーンビーム型(3D CT)

1回転のみで3次元CT画像を生成



株式会社マイクロスコピックスキャン社

36

## 線減弱係数 (linear attenuation coefficient)



- 透過によるX線量(単色)の減衰率

- 同質の材料の場合

$$I = I_0 \exp\{-\mu L\}$$

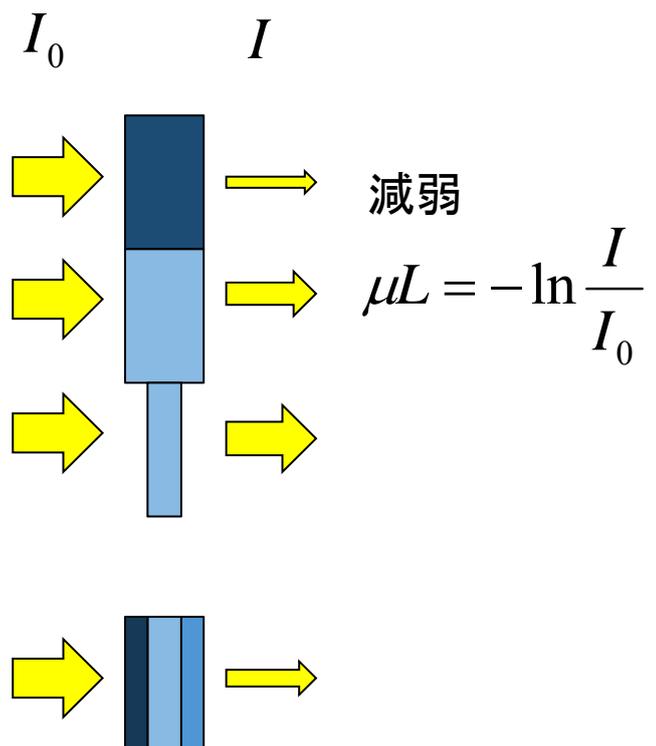
-  $L$  = 透過長

-  $\mu$  = 線減弱係数

単位長さ当たりの減弱を表す係数

- 場所によって $\mu$ が変わる場合

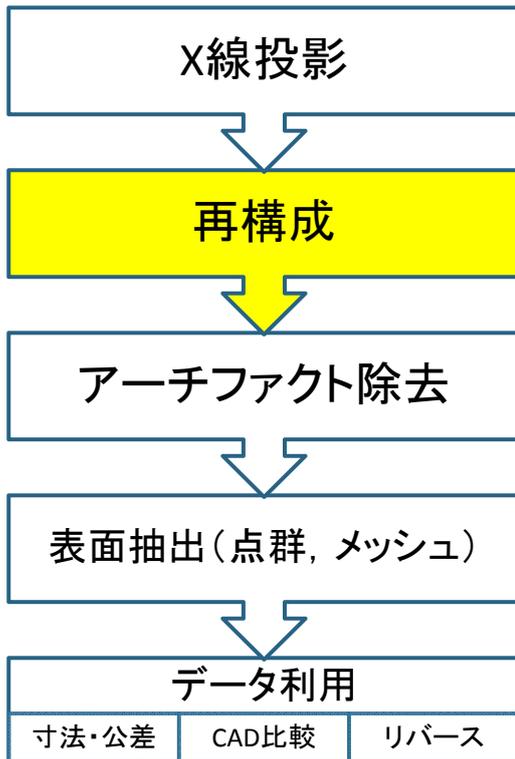
$$I = I_0 \exp\left\{-\int_{-\infty}^{\infty} \mu(x) dx\right\}$$



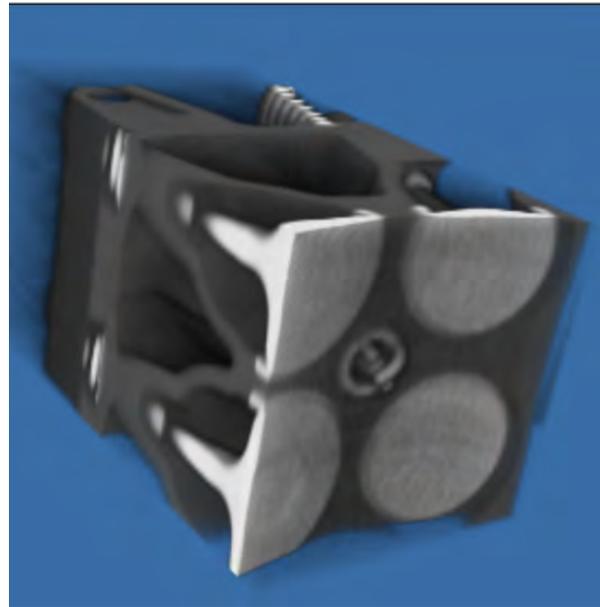
H. Suzuki, UTokyo, 2015

37

## CTの処理プロセス (2)



- 投影像から, CT画像としてスライス画像や3次元像(ボリュームデータ)を得る.

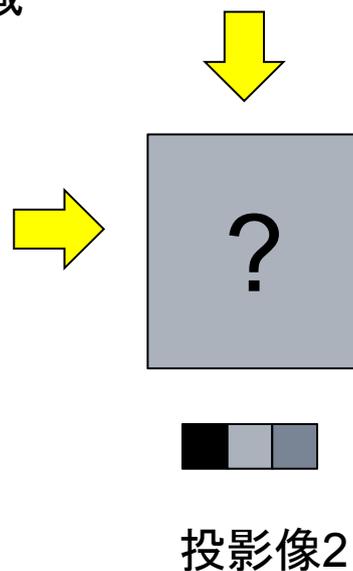


H. Suzuki, UTokyo, 2015

38

## 再構成アルゴリズム

- 多方向からの投影像から, 線減弱係数  $\mu$  の分布を求める
- 主流の方法
  - 逆投影法
    - FBP (Filtered Back Projection)
    - コーンビーム型のFeldkamp 法
- その他
  - 代数的再構成法 (Algebraic Reconstruction Technique (ART))



投影像1  
⇒ 減弱  $\mu L$  の分布



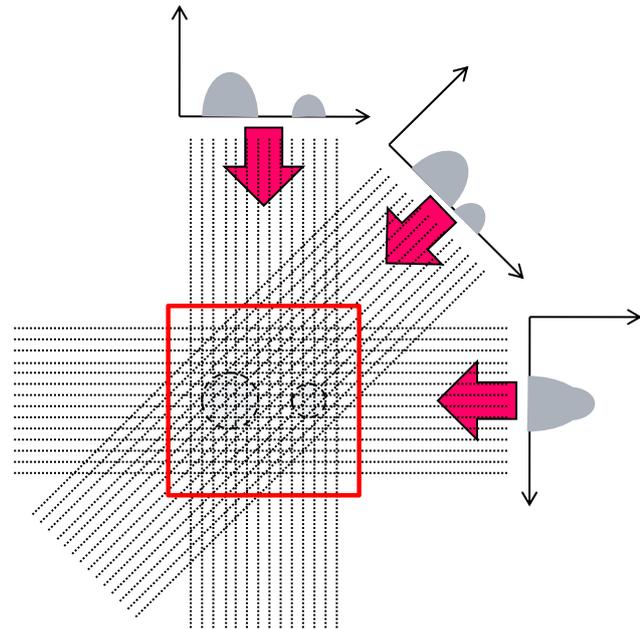
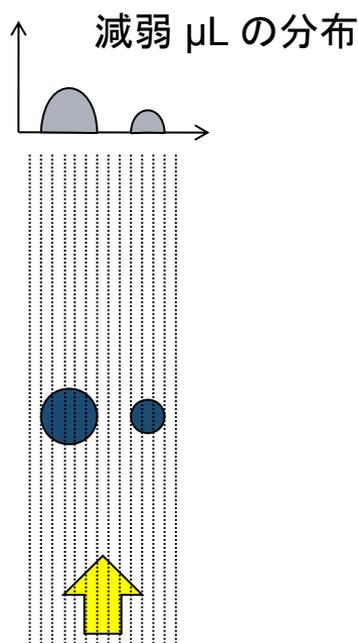
$$I = I_0 \exp\{-\mu L\}$$

$$\mu L = -\ln \frac{I}{I_0}$$

H. Suzuki, UTokyo, 2015

39

## 再構成（単純逆投影法の場合）



多数方向からの減弱  $\mu L$  の分布（投影）から、断面の各点における線減弱係数  $\mu$  を求める

H. Suzuki, UTokyo, 2015

40

## CT値（CT画像の画素値）

### ■ 線減弱係数

- 単色エネルギーのX線CTの場合には、このCT値は線源弱係数と一対一に対応する。

### ■ 密度

- X線と物質の支配的相互作用が、コンプトン散乱であるような高エネルギーCT（概ね1MV以上の最大エネルギーをもつCT装置）の場合には、「CT値」は物質の密度と概ね対応する。

### ■ ハウンズフィールド単位

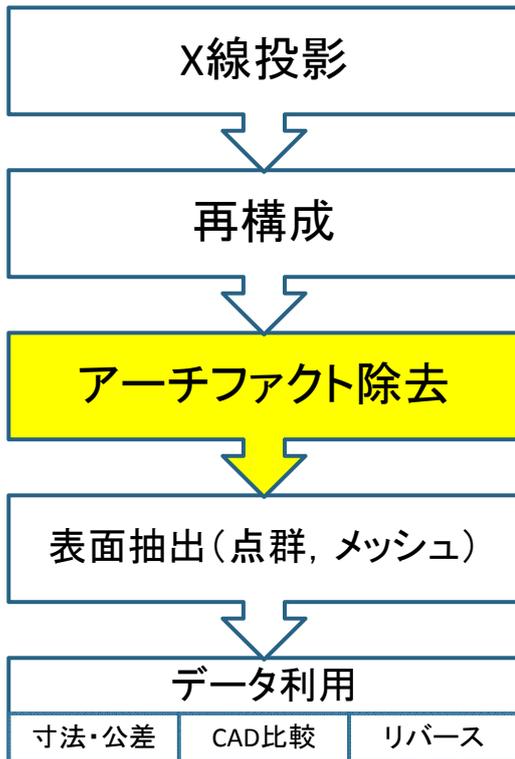
- 特に医療用CTの世界で、空気のCT値を-1000、水のCT値を0とするもの。

佐藤克利氏@日立

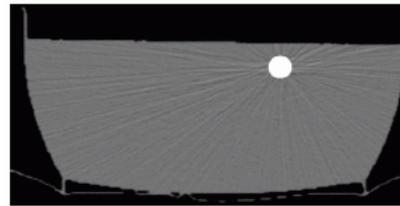
H. Suzuki, UTokyo, 2015

41

## CTの処理プロセス(3)

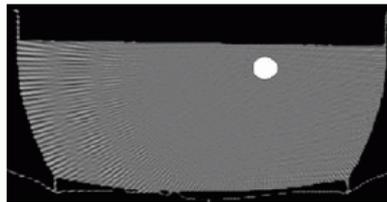


H. Suzuki, UTokyo, 2015

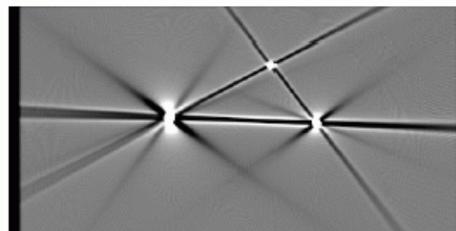


©Klaus Mueller  
Stony Brook University, USA

ノイズによるストリーキング



投影数(ビュー数)が少ないためのエリアシング

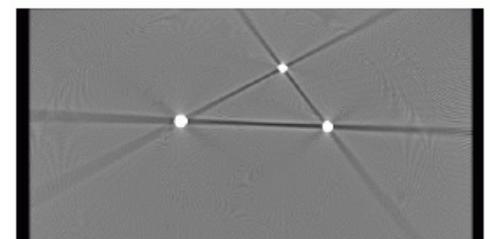


X線のエネルギーが不足し減衰が大きい場合の  
スキャッターリング

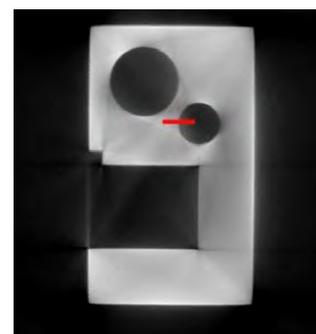
43

## ビームハードニングによるアーチファクト

- 主に2種類のアーチファクトを引き起こす
  - カッピングアーチファクト
    - 円柱の中央部の線減弱係数が低く求まる。平均透過長の長い中央部ほど、低めになる。
  - ストリークアーチファクト
- CT画像での表面抽出に大きな影響を与え、Dimensional XCTでは補正が必須



©Klaus Mueller  
Stony Brook University, USA

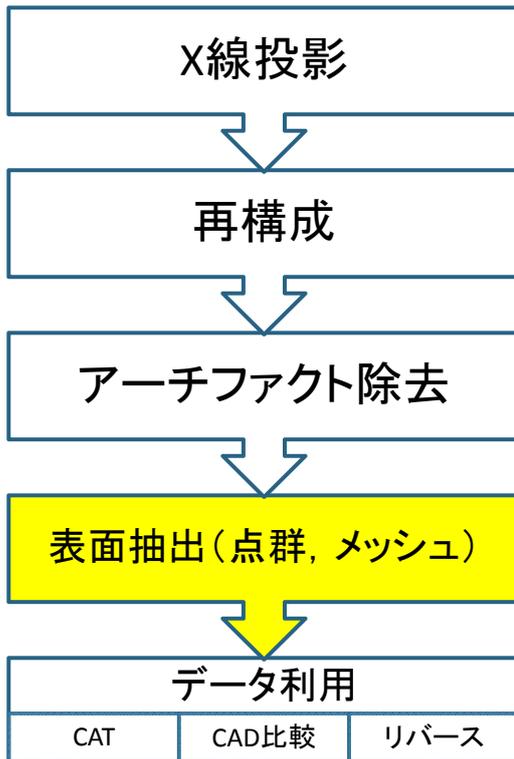


© S. Kasperl  
Fraunhofer EZRT

H. Suzuki, UTokyo, 2015

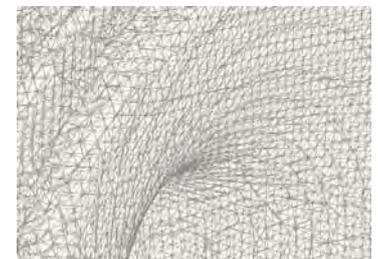
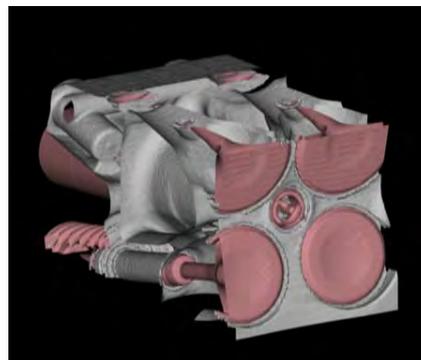
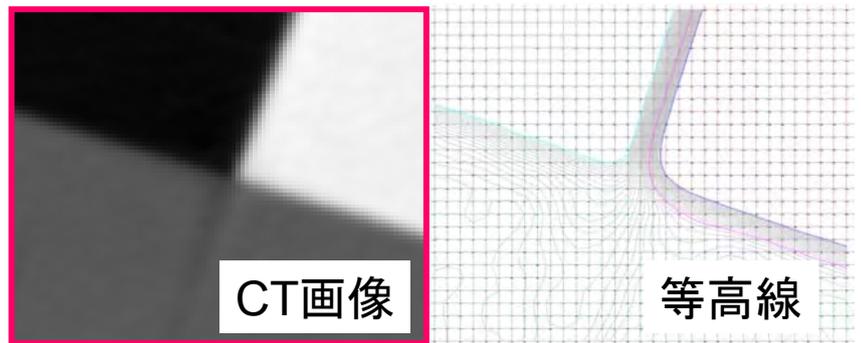
44

## CTの処理プロセス(4)



H. Suzuki, UTokyo, 2015

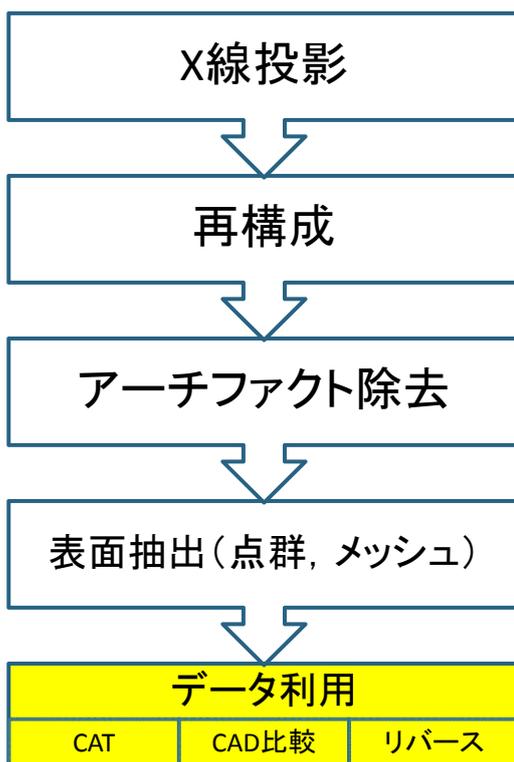
- 閾値処理(等値面生成)やエッジ抽出処理



表面メッシュ

45

## CTの処理プロセス(5)



H. Suzuki, UTokyo, 2015

- 現物融合型エンジニアリング
  - 3次元スキャニング (光学式, XCT)は多数の成功事例があり, その有効性は認知
- CAT
  - 寸法や幾何公差の評価
  - 計測機メーカー
    - 接触式CMMと同じソフトで処理
  - その他のCT バンドルソフト
    - VGStudio CATを含む豊富なCTデータ処理機能
- CADとの比較
  - ヒケ, ソリなどの歪みや変形の評価
- リバースエンジニアリング
  - CADデータを作成

46

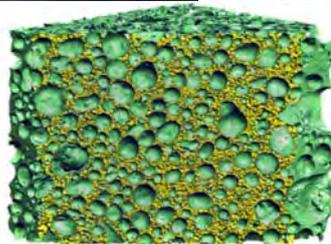
# X線CTスキャンのエンジニアリング応用

大竹豊@東大

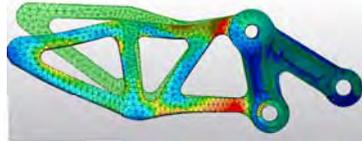
- 非破壊で内部構造を観察する応用
  - 亀裂や鑄巣の検出・内部構造の確認
- 高精度な形状測定が必要な応用
  - CAD (形状リバース) ・ CAE (シミュレーション) ・ CAT (寸法検査)



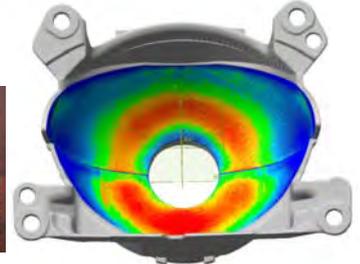
鑄巣の検出  
H. Suzuki, UTokyo, 2015



発泡アルミの  
内部観察



現物ベース  
シミュレーション



CADと現物の  
寸法比較

48

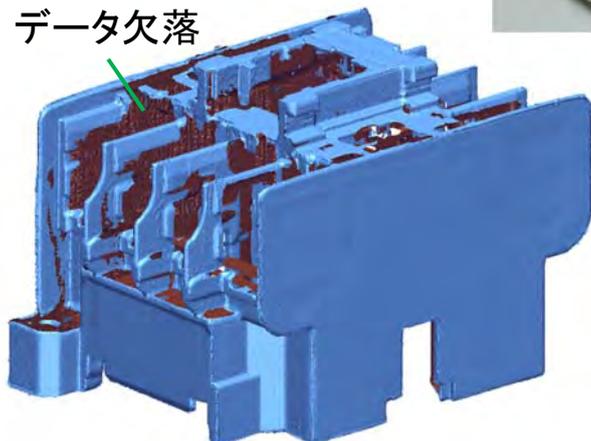
## 光学式スキャン vs. CTスキャン

大竹豊@東大

光学式スキャン:

- 数 $\mu\text{m}$ の精度で計測可能
- 入り組んだ形状の計測は難しい

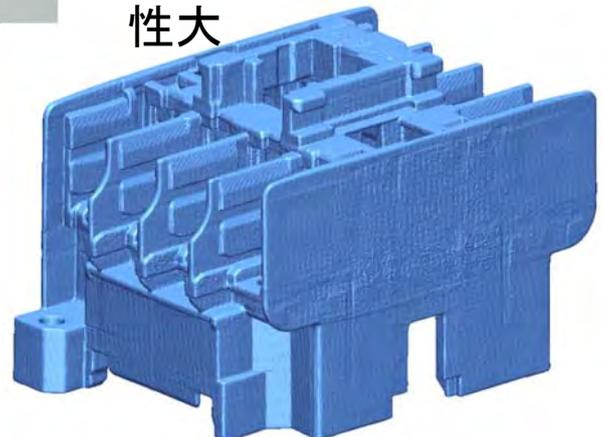
データ欠落



スキャン時間2時間, マニュアル操作が必要  
H. Suzuki, UTokyo, 2015

CTスキャン:

- 入り組んだ形状でも欠落なく計測可能
- 計測精度も良くなってきている
- 測定作業の効率大・安定性大



スキャン時間30分, 全自動

49

## 測定精度は？

- 表面の位置精度は、ボクセルサイズの数分の1から10分の1程度
  - 例) 直方体のボクセルのサイズ=200  $\mu\text{m}$  の時, 20  $\mu\text{m}$  ~ 50  $\mu\text{m}$   
画素数が1000<sup>3</sup>とすると測定範囲は200  $\mu\text{m}$  x 1000 = 200 mm<sup>3</sup>
- GD&Tでは形体の当てはめを行うので測定精度はこれよりも良い。
  - Nikon Metrology MCT225HA
  - 最大許容指示誤差 (VDI/VDE 2630準拠)  
MPE E = 3.8 + L/50mm



H. Suzuki, UTokyo, 2015

50

## 精度保証技術 計測標準

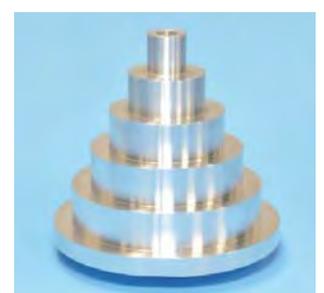
- 規格の目的
  - 装置のもつ形状や寸法の測定能力を評価する方法を定めることによって、
  - ユーザーは装置を比較することができ、
  - ベンダーはベンチマークの範囲に限定できる。
- 評価方法
  - 規格で定義されたファントムを計測し、その測定値を求める
    - ボールの中心位置による長さ、ボールの直径など
- Dimensional XCT の規格開発
  - 座標計測CMMの規格 ISO 10360
  - ドイツ VDI/VDE 2630
  - 日本も作業に参加
- JIS 産業用 X 線 CT 装置－用語
  - JIS B 7442 : 2013



写真:AIST



フォレストゲージ



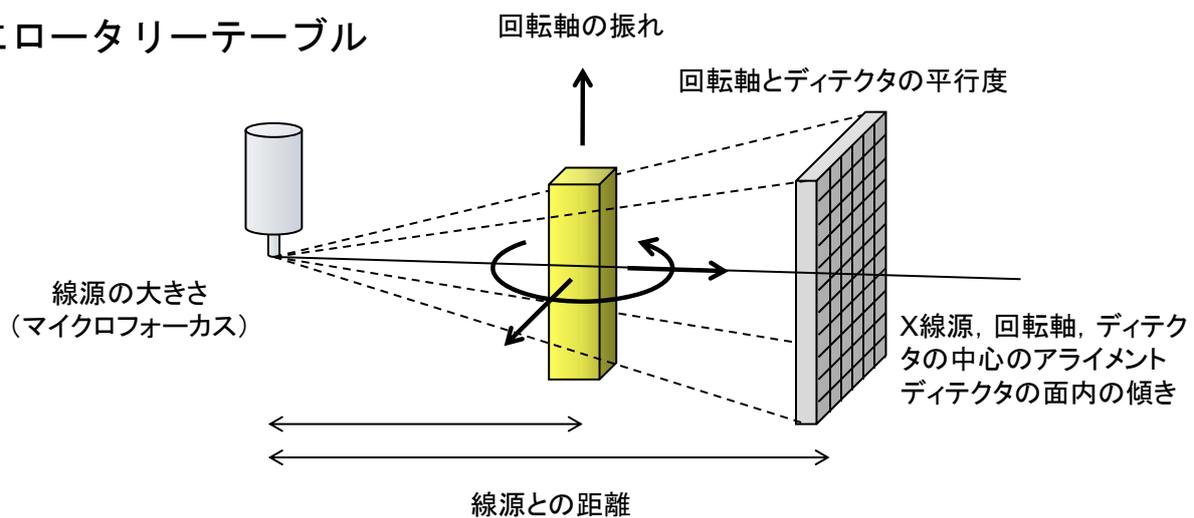
ステップゲージ

H. Suzuki, UTokyo, 2015

51

## Dimensional XCT の光学系幾何精度の重要性

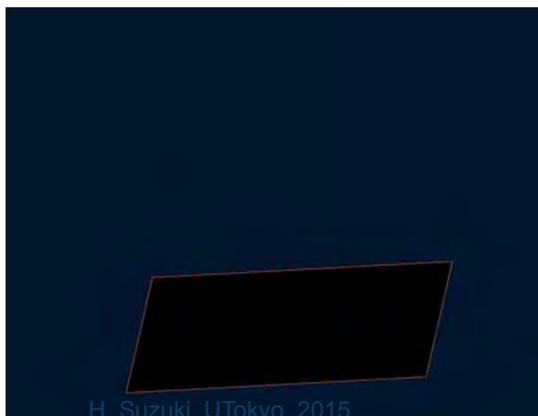
- Dimensional XCT でも一般的なアルゴリズム使用 (Feldkamp 法など)
- 高精度化には再構成アルゴリズムの前提となる光学系の幾何学的精度が重要
  - 測定機並みの機械構造とキャリブレーション
  - 特にロータリーテーブル



H. Suzuki, UTokyo, 2015

52

## XCT→3D Printer



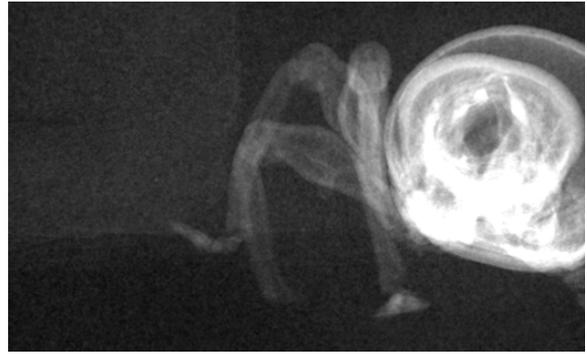
H. Suzuki, UTokyo, 2015

53

# クロカタゾウ虫の例



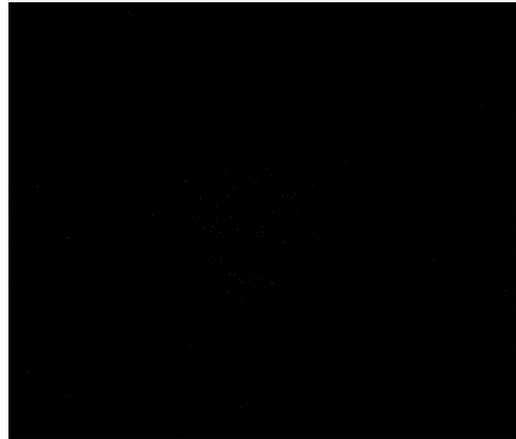
回転しながら  
レントゲン撮影



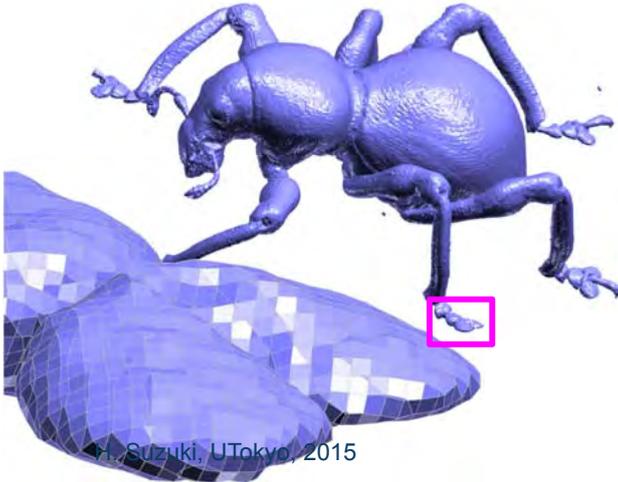
石垣島のお土産

写真 : <http://isohtaetori.exblog.jp/16900964>

断面画像を計算  
(Computed Tomography)



3次元の  
かたちを  
構築



H. Suzuki, UTokyo, 2015

# インクジェット方式の3Dプリンタ



石膏の粉の中に  
作られます



粉を払って  
接着剤で  
固めます



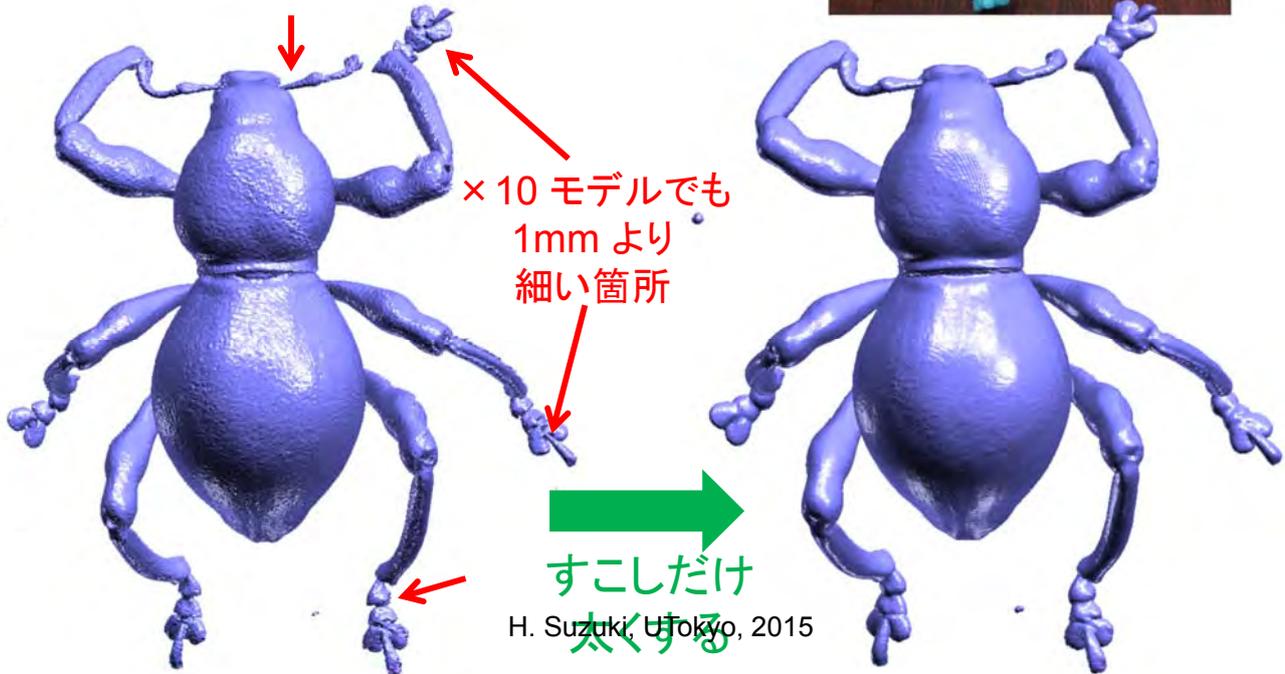
H. Suzuki, UTokyo, 2015

# 複雑形状に対する変形操作

- 壊れにくいように  
形状をオフセット操作する



×10で  
プリント



56

XCT→Sinogram Polygonizer→FEM→3DP



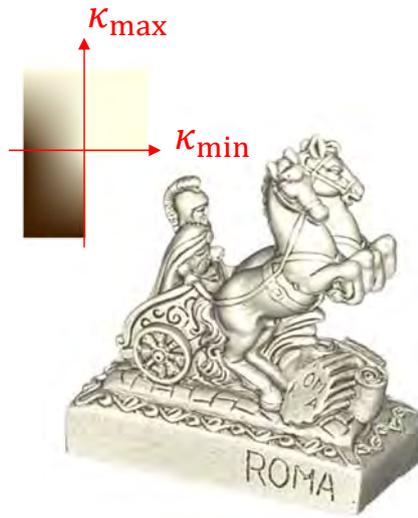
変形と歪  
の表示

四面体  
メッシュ

実物



現物  
色付けしてある



CG



3D Printing

主曲率による色付け

## 質量属性(重心、モーメント、重量)の再現

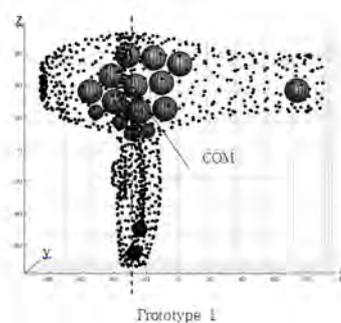
[Deepak 2014]



XCT計測による  
密度分布取得



おもりを組み込む



# Common properties of 3DP and XCT

	<b>3DP</b>	<b>XCT</b>
Layered operation	Layered manufacturing	Slice images (tomogram)
Inner structure	Print inaccessible inner structure	Scan inaccessible inner structure
Constant-Time Complexity	Printing time is independent to shape complexity	Scanning time is independent to shape complexity

H. Suzuki, UTokyo, 2015

60

## まとめ

- 産業用X線CT装置の紹介
- 産業用X線CT装置によって3次元形状を抽出するための技術の紹介
- スキャンデータの活用例の紹介
- 産業用X線CT装置による3次元データを用いた3Dプリンティングの紹介

H. Suzuki, UTokyo, 2015

61