

# 高コントラスト X線 CT 技術 を用いた高分子材料研究

京都工芸繊維大学 西川幸宏

# Acknowledgement

- 京都工芸繊維大学 高橋雅興教授
- 修士学生 栗原卓也君、小升雄一郎君、武村健太君、向井夏彦君、飯塚峻吾君、太田直秀君、谷山弘行君、畠山康裕君、畑中雄介君、一刈昌太君、小来田知里君、小島匠吾君、西浦勇介君、審良勝啓君、高島建夫君、松本悠吾君、その他大勢。
- ビームセンス(株) 馬場末喜博士

# Outline

- 自己紹介
- X線CTの紹介と歴史
- “柔らかい”被写体の話
  - 高分子科学の話
  - 植物、昆虫、食べ物など
- Massive Computing Analysis in CT
  - CT based on Simulated Annealing Method (SACT)
  - SACTの医用展開について

# 京都工芸繊維大学は 国立大学です！



The screenshot shows the homepage of the Kyoto Institute of Technology. At the top, there is a navigation bar with the university's name in Japanese and English, a search box, and a Google logo. Below this is a horizontal menu with various categories like 'Introduction of the University', 'Admission Information', 'Education and Research', etc. The main content area features a large banner with the university's logo and the text '私たちのシンボルマークです。' (This is our symbol mark). Below the banner is another navigation bar for different user groups. The left sidebar contains several informational boxes, including one for '東日本大震災への対応' (Response to the Great East Japan Earthquake) and '入試情報 admissions'. The main content area has an 'イベント' (Event) section with a red box highlighting 'イベント情報一覧' (Event Information List). The featured event is 'OPEN CAMPUS 2011', with details for the first and second sessions. Below this, there are more event listings with dates and descriptions.

京都工芸繊維大学  
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Science and Art meet in Kyoto.

検索 powered by Google

データベース リンク サイトマップ 交通案内 お問い合わせ 学内専用 ENGLISH

大学の紹介 入試情報 教育・研究 産学官連携 キャンパスライフ 進路・就職 国際交流

KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

私たちのシンボルマークです。

対象者別メニュー 受験生の方 在学生の方 卒業生の方 研究者の方 企業の方 一般の方

東日本大震災への対応

入試情報 admissions

産学官連携

国立大学法人

イベント

イベント情報一覧

開催予定

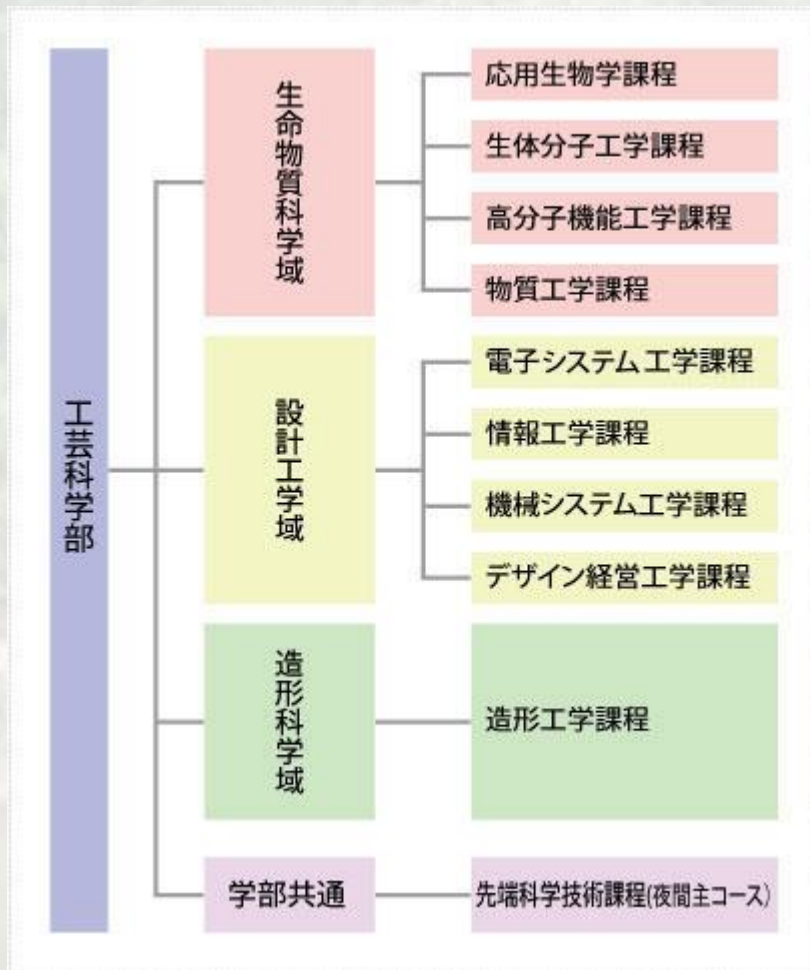
OPEN CAMPUS 2011

第1回 8月10日(水) 第2回 10月16日(日)

開催中 ベルギー木の匠の技(5/23~8/11)

開催中 建築家 白井晟一 精神と空間(5/23~8/11)

# Kyoto Institute of Technology



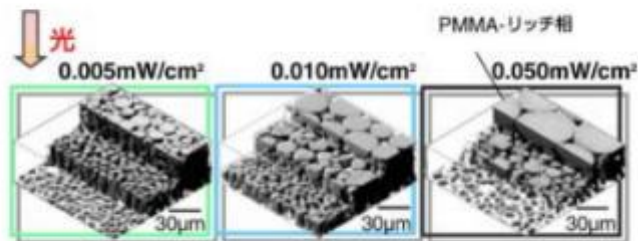
生物・化学・材料

電子・情報・機械

芸術・建築

後で専門を選択

新しい機能を備えた高分子材料の開発と、その機能を発現するメカニズムの解明を目標としています。そのため、有機化学や重合反応を用いたものづくりから、物質の物理的性質（力、熱、電、光など）を計測する研究までを行なっています。



光照射により、構造のない高分子混合物(A/B)に傾斜の構造が現れ、光の進行方向に沿って、水に対する透水性が異なる材料を作製できた。

### 独自の研究に取り組んで、画期的なモノの開発に挑戦。

高分子は重合体（ポリマー）ともい、非常に多くの単量体（モノマー）が繰り返して重合（結合）してできる大きな分子のことで、細長い鎖のような形をしているのが特徴です。その種類はさまざまですが、DNAやタンパク質などの生体高分子、プラスチックや合成ゴム、合成繊維などの合成高分子の二種類に大きく分けられます。

本課程では合成高分子を新たにつくり、その物性を実験やシミュレーションによって解析し、材料としての実用化を目指すという教育研究に取り組んでいます。合成高分子に関する本格的な研究は、スタートしてからまだ100年も経っていません。いいかえれば、まだたくさんの可能性が秘められた分野ということです。皆さんも高分子科学の基礎を身に付け、独自の研究に取り組むことで、たとえば絶縁体であるプラスチックを導電体に変換させたり、電磁波を完全に吸収する高分子材料を作製したり、レーザー発信が可能な高分子材料を実現したり、画期的なモノの開発にチャレンジしてください。



博士前期課程（修士課程）

#### 能力をもつ人材育成のために

れた製品は、身の回りの日常生活から最先端医療といった先端科学技術のさまざまな要求されます。高分子材料にはこの様々な分子の組み合わせと層構造によって高度な機能を発現するためには、材質を十分に理解した上で、応用研究が必要です。

学生が高分子材料の科学と工学の基礎知識を応用研究を通して、研究者や高度専門技術者につけられる教育・研究を行っている。合成、分析、物性評価、構造解析手法を通して、総合的かつ的確な理解が重ねられるように教育・研究プログラム。特に研究面では、自由な発想に基づき研究テーマを設定し、その中で論理的かつ奇人材を育成しています。

に、本専攻では、有機光機能素子材料研究・研究領域、高分子学際研究領域の3領域

1. 有機光機能素子材料研究領域  
光電子機能性有機・高分子材料の創製と構造・物性研究  
高性能デバイスを目指した単一分子分光法およびナノサイズ分光測定  
光機能性分子結晶などの分子凝集構造の構築と光機能性デバイス化
2. 多相系材料科学研究領域  
高分子凝集系の秩序構造とモロフォロジー制御  
高分子・無機複合材料の構造と物性  
多相系高分子材料の3次元構造解析とレオロジー  
高分子の熱的性質と緩和ダイナミクス
3. 高分子学際研究領域  
高分子の結晶成長と結晶相転移と高分子集合体の分子動力学  
液晶材料の物性、エレクトロレオロジー、感覚計測



# 交通の便がとても良いです！



京都市営地下鉄松ヶ崎駅  
より徒歩5分

阪急四條←→松ヶ崎  
地下鉄13分

JR京都駅←→松ヶ崎  
地下鉄17分

# 経歴

時期	所属	身分	内容	観察法	光源	スキル
1991-1992	京都大学	学部生	ブロックポリマーのマイクロ相分離構造をTEMで観察・解析	顕微鏡	電子線	ソフトウェア
1992-1994	京都大学 化学研究所	修士	ポリビニルシクロヘキサンの結晶・結晶転移をX線回折で観察・解析	回折	X線	ソフトウェア
1994-1998	JST ERATO	研究員	ポリマーブレンドの相分離構造を共焦点顕微鏡で観察・解析	顕微鏡	光	ソフトウェア
1999-2002	理研 SPring-8	ポスドク	タンパク質の溶液中の構造をX線小角散乱で観察・解析	散乱	X線	ハードウェア
2002-2006	京都工芸繊維大学	助手	電子線トモグラフィ法を開発	顕微鏡	電子線	ソフトウェア
2006-	京都工芸繊維大学	助教	ポリマーに最適な高コントラストX線CT装置を開発・応用	顕微鏡	X線	ソフトウェア・ハードウェア



Team Kiroi ようこそ

## Topics

西川幸宏の研究のページ [english pages are here ↑](#)

ようこそ！  
English pages  
AH - KIRO  
KIRO

ようこそ！！京都工芸繊維大学高分子機能工学部門助教の西川幸宏のページでございます。念のため断っておくと、うちの大学は国立大学です。知名度は低いですが、良い大学ですよ。

**ホームページあります。僕の名前で検索してください**

近々の公式予定！

- 2月17日～18日、修士論文公聴会、本学にて一般公開形式で開催。
- 2月21日、卒業研究発表会、本学にて一般公開形式で開催。
- 3月1日～2日、9th VietNam-KIT Joint Symposium in Ha-Noi



# 3D-scopy Concept in Polymer Science

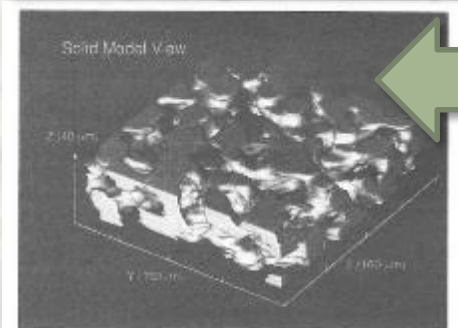
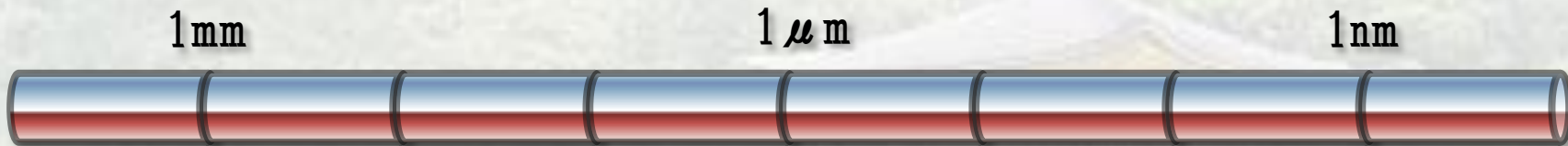
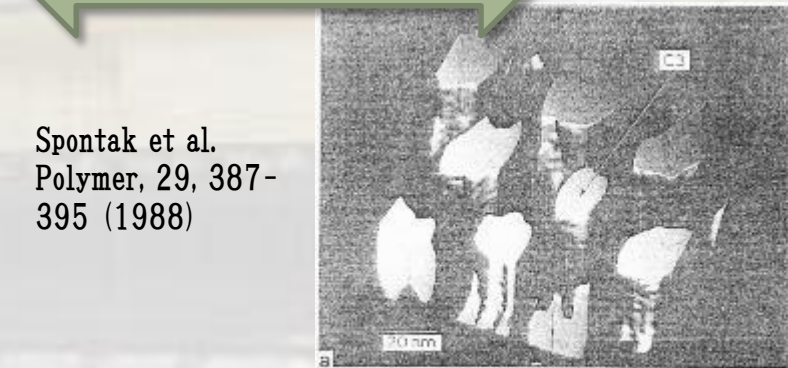


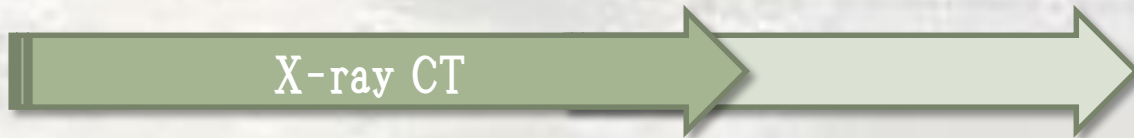
Figure 2. Solid modeling view of the SBRTB phase-separating structure, reconstructed from 40 slices of image-processed LSCM pictures. A three-dimensional image-processing technique was used in order to reduce unnecessary noise from the original binary image. The optical sectioning width for the objective is approximately 1 μm, so no interpolation has been done in stacking the LSCM images.

Jinnai & Nishikawa  
Macromolecules, 28,  
4782-4784 (1995)



Spontak et al.  
Polymer, 29, 387-  
395 (1988)

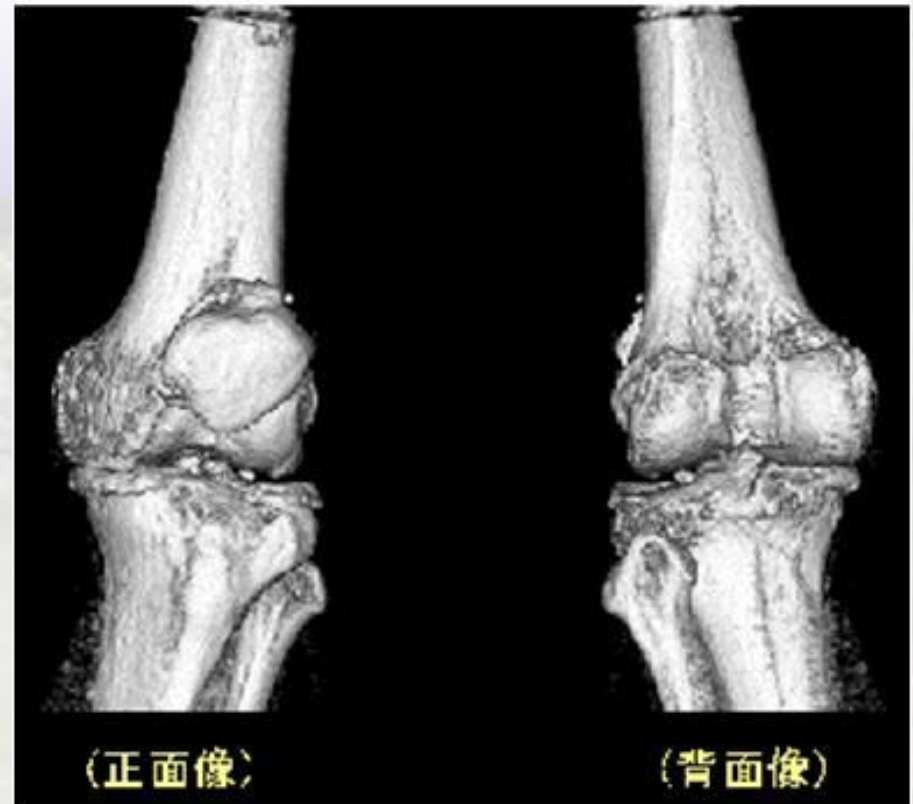
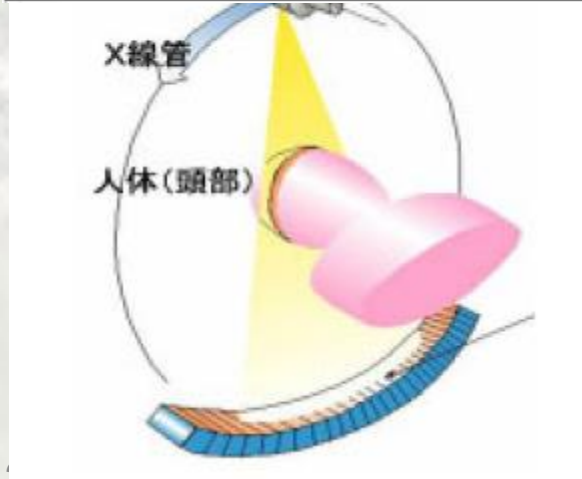
Figure 3. Three-dimensional reconstruction of well-ordered cylindrical hexagonal packing presents in (a), in which the cylinders exhibit two imp (note the flat upper and lower surfaces) and (2) they are oriented normal to detail in (b).



X-ray > Laser > Electron

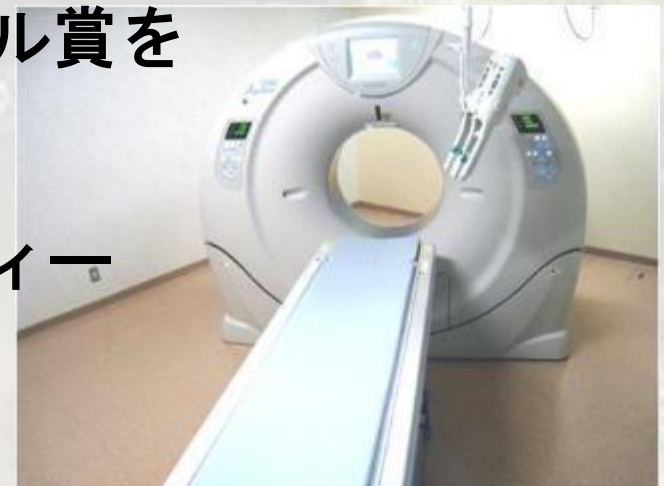
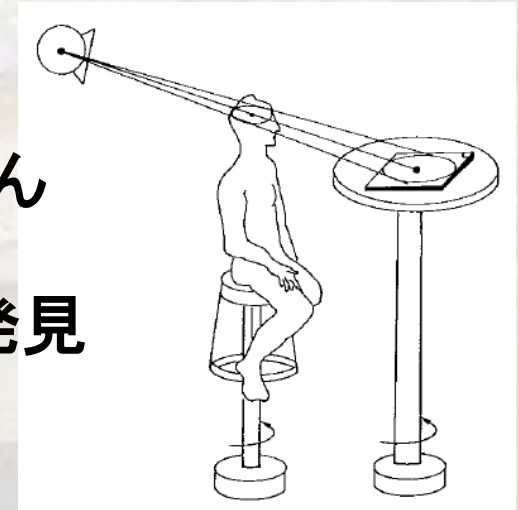
Laser < X-ray ~ Electron

# What's X-ray CT?



# Computerized Tomographyの歴史

- 1914 RadonによるRadon変換の発表
- 1940頃 非計算的なTomography。いろいろな方向の透視の重ね合わせ
- 1963&64 CormackによりCT原理が再発見された。
- 1971 HounsfieldがCT装置を発明した。
- 1971 Filtered back-projection法の発明
- 1979 CormackとHounsfieldがノーベル賞を受賞
- 医学利用の拡大
- 2000頃 X線マイクロトモグラフィー
- 2007~ 電子デバイスでの利用拡大



# 1914 RadonによるRadon変換の発表



*J. Radon*

## Johann Karl August Radon ヨハン・ラドン オーストリアの数学者

線積分の集合から、元の空間（画像）を復元できるということを数学的に示した。

線積分＝投影なので、  
その集合である投影像から  
元の物体の画像が復元できる、  
すなわち、CTのような技術の  
可能性を示していた。

でも、誰もその可能性に気付かなかった。

# 1963&64 CormackによりCT原理が再発見された



Allan McLeod Cormack  
アラン・コーマック  
南アフリカ出身の物理学者

CTの原理である再構成法の可能性を理論的に示した。  
一連のCT研究の出発点になった。

1963年と1964年にそれぞれ論文が出版されている。  
実はCTの原理には、2つのアプローチがある。

CormackはRadonの仕事を知らなかった。というか、かなり後になってからRadon変換とCormackの示したCTが同じものだと指摘された。

# 1971 HounsfieldがCT装置を発明



Godfrey Newbold Hounsfield  
ゴドフリー・ハウズフィールド  
イギリス出身のコンピューター技術者

英国EMI社の社員。Cormackの論文をきっかけにCT装置開発に乗り出した1人。  
1968年頃、**医療用**のX線CT装置の開発を宣言し、1971年にプロトタイプを完成させた。

CTには莫大な計算が必要だが、当時そのような計算が可能なコンピューターが存在しなかった。コンピューター技術者であったHounsfieldは、CT専用の計算機を作ることで、その問題を解決した。

EMIはビートルズの所属したレコード会社としても知られるが、ビートルズのレコード売り上げの大半をCT開発につき込んだと噂されている。

# 1971 Filtered back-projection法の発明

インド人の G.N. Ramachandran（ラマチャンドラン）と A.V. Lakshminarayana（ラクシミナラヤナン）が Filtered Back-projection（FBP）と呼ばれる CT 再構成の計算法を発表した。



FBPはCTの再構成計算の決定版であり、現在も主流である。

FBPの論文は、全く唐突に発表され、発表時点で十分に洗練されていた。

Hounsfieldの最初のX線CT装置の後に発表された。最初の装置はFBPではなく、Algebraic Reconstruction Technique (ART、代数的再構成法) が用いられていた。

# 1979 CormackとHounsfieldがノーベル賞を受賞

**医学生理学賞を受賞した。**

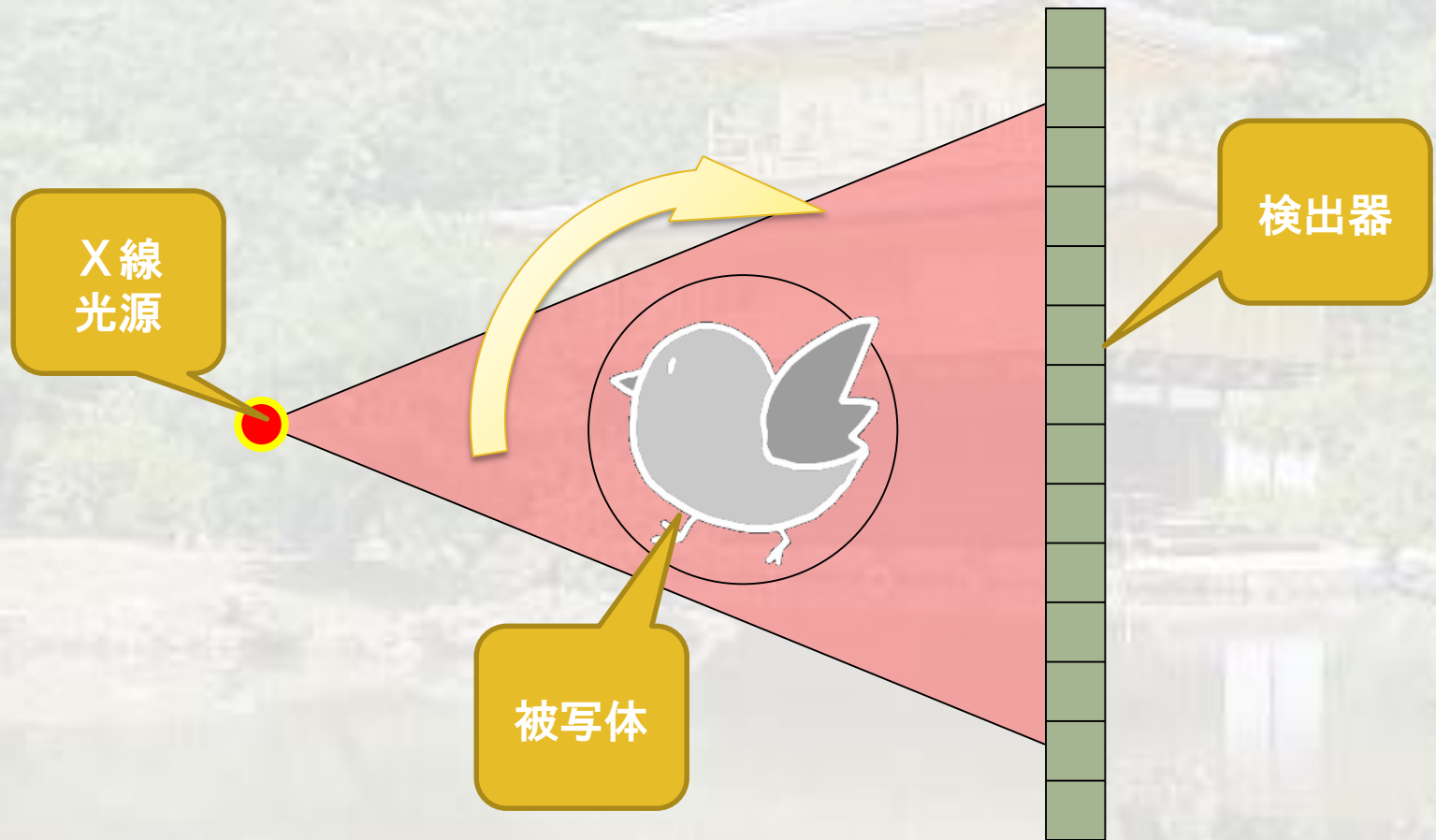
物理学者のCormackとコンピューター技師のHounsfieldが医学生理学賞を受賞したのはとても象徴的。

「革新的な技術は分野横断的にもたらされる。」

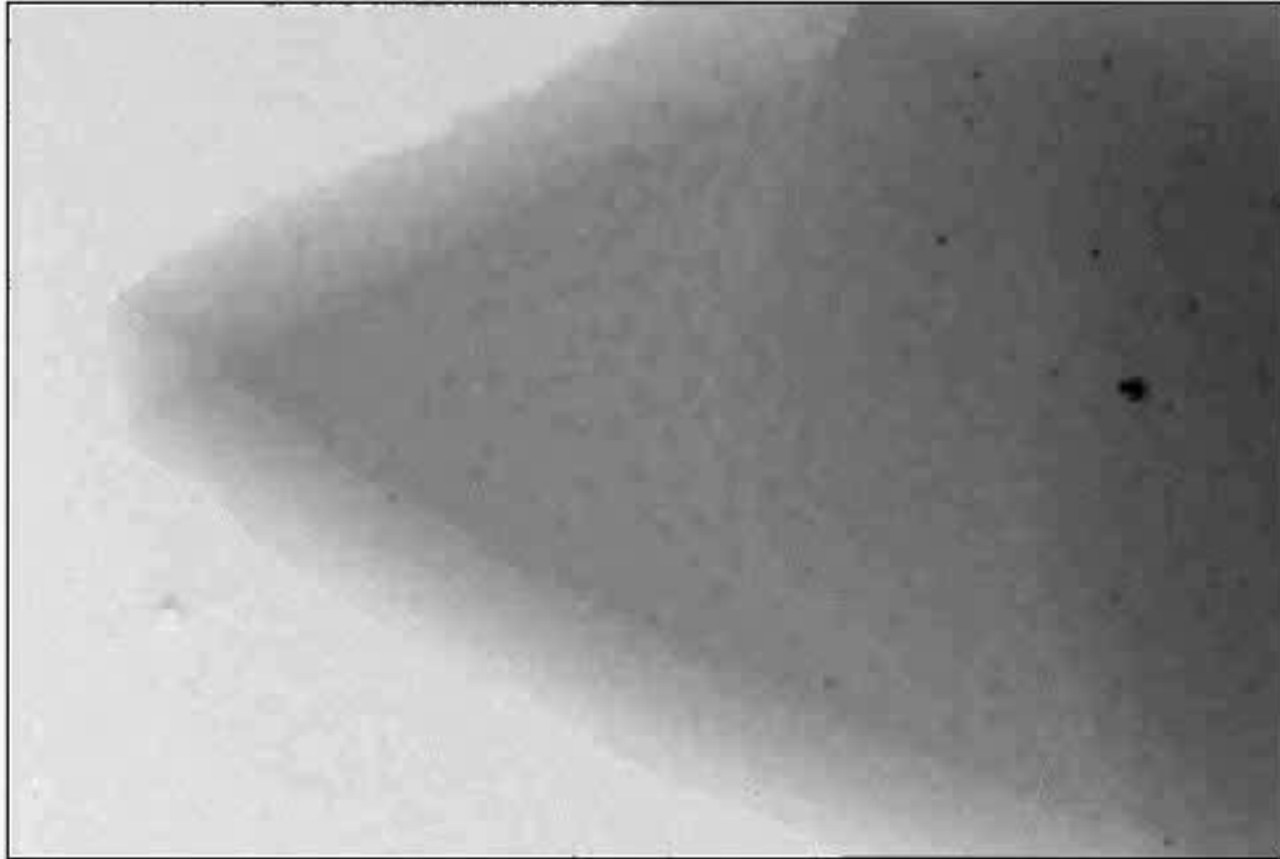




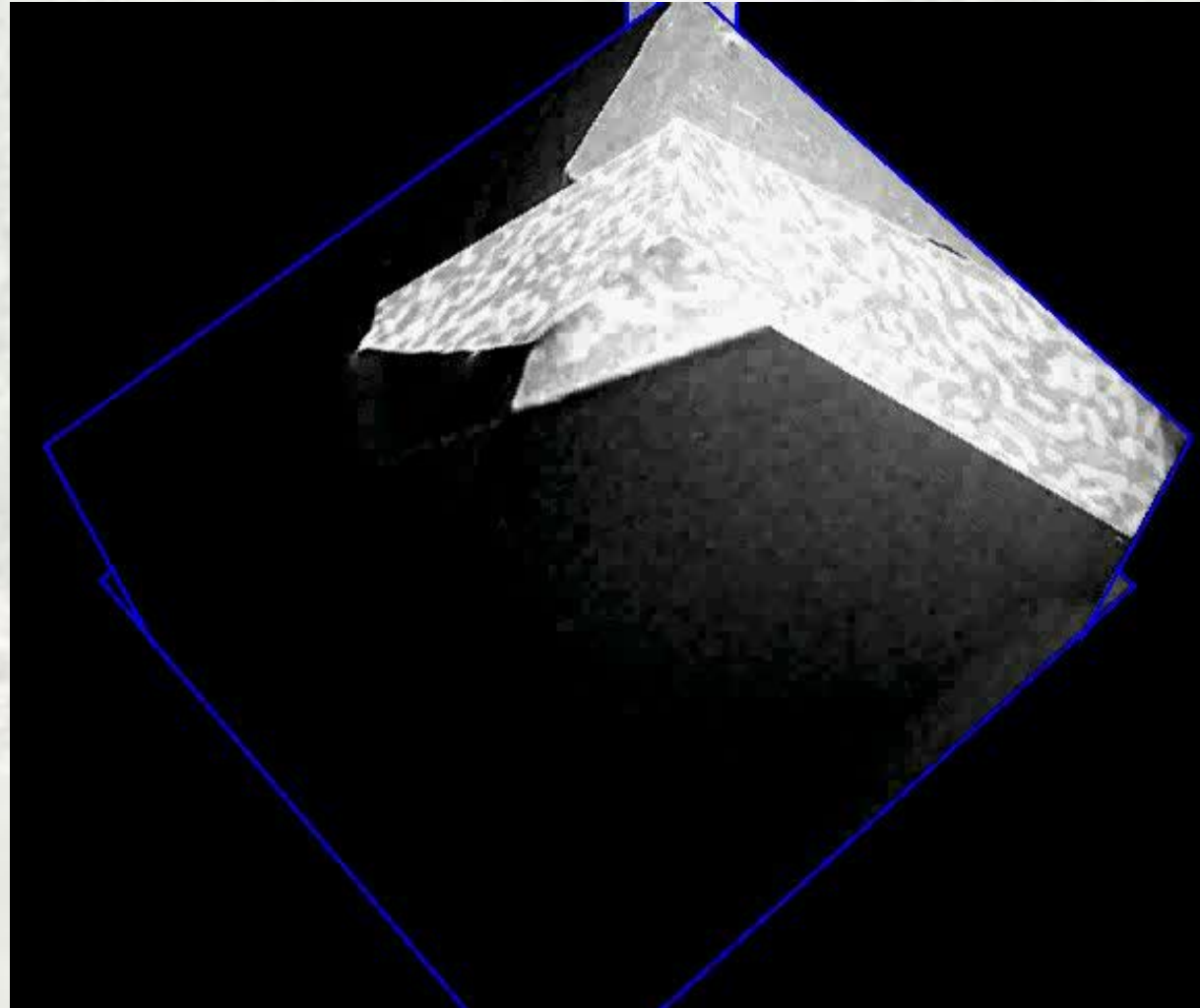
# Basic construction of industrial X-ray CT



# 透視像のムービー

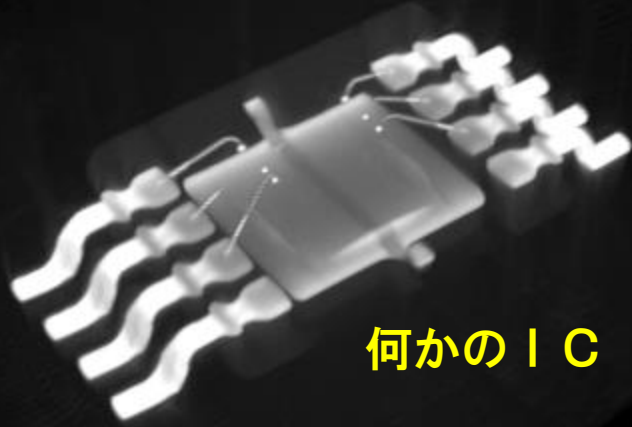


# 再構成するとこの通り！

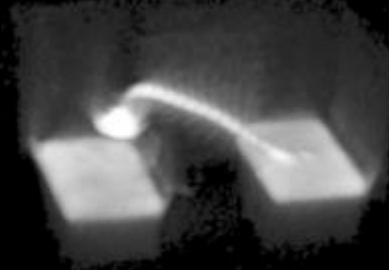


白い相：PMMA  
暗い相：PS

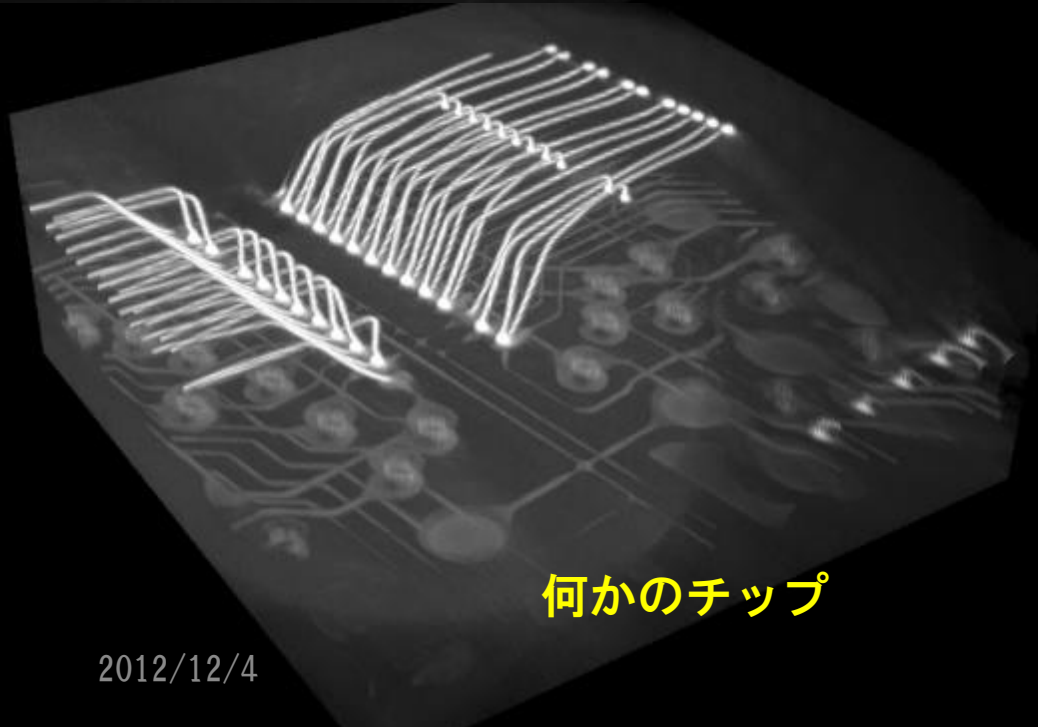
# Applications to Electronic Devices



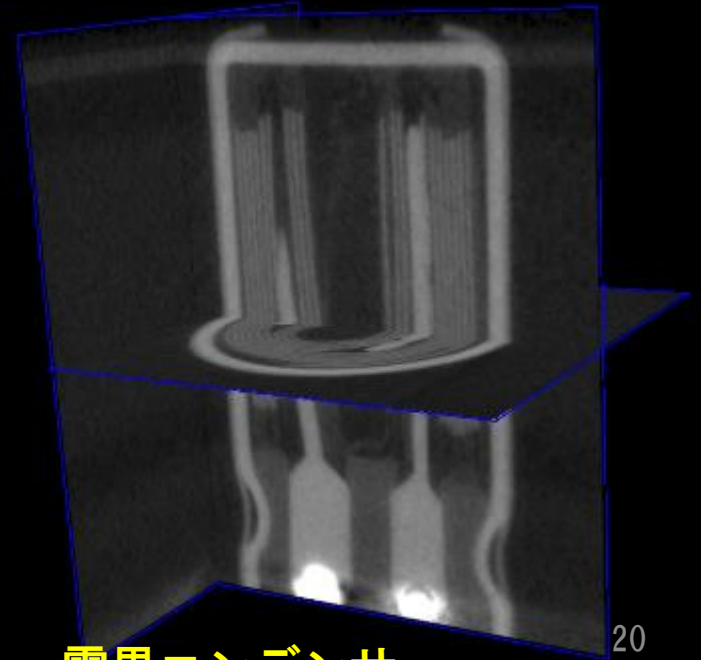
何かのIC



極小ダイオード



何かのチップ



電界コンデンサ

# Disadvantages in Soft Tissues

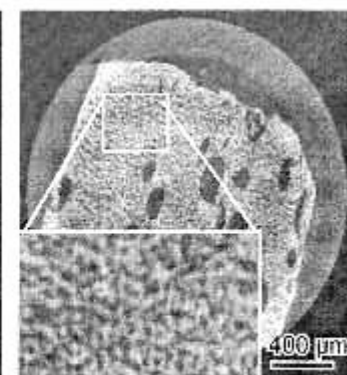
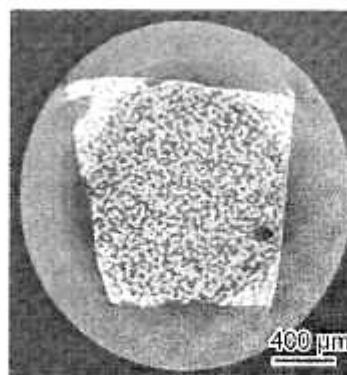
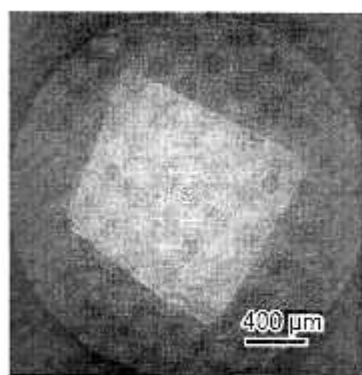
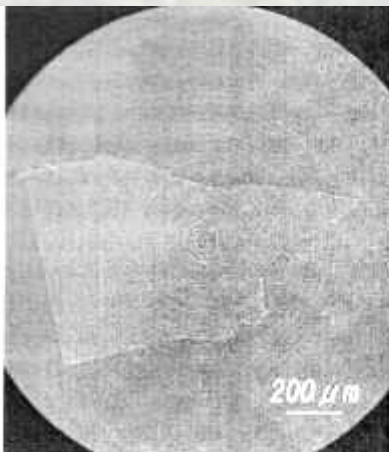
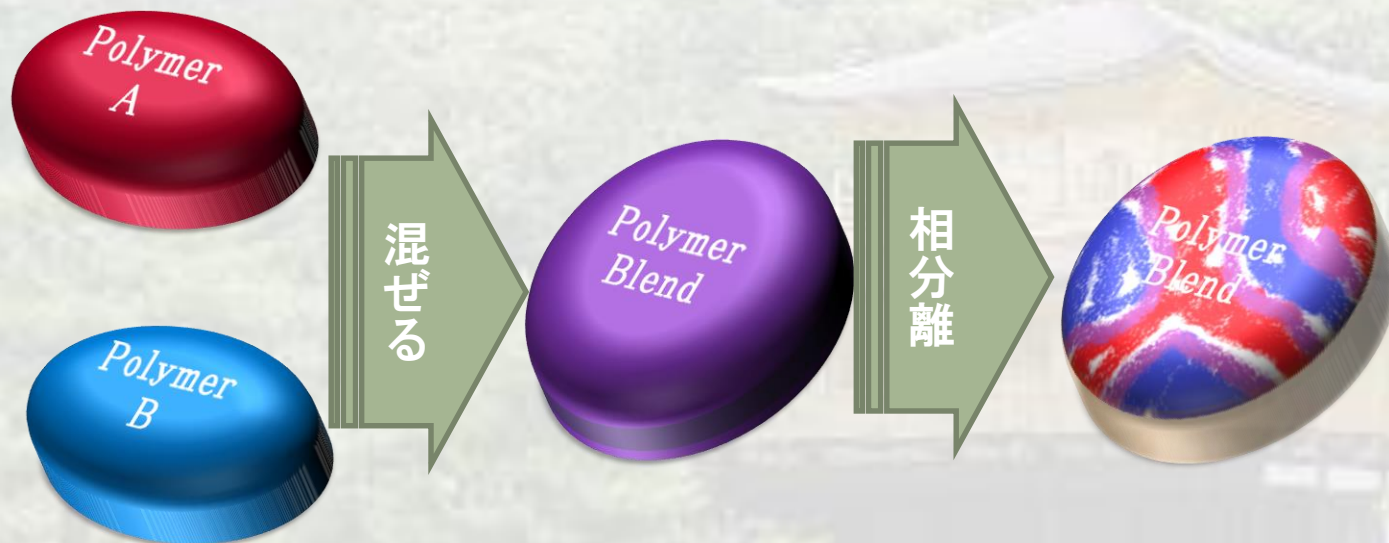


図7 臭素化率の異なる臭素化 PS/PMMA 混合物に対してX線CTで得られた断面図  
(a)臭素化率 10%, (b)30%, (c)50%

2012/12/4  
図2 X線CTで得られたPS/PMMA混合物の断面図

# Our Progress

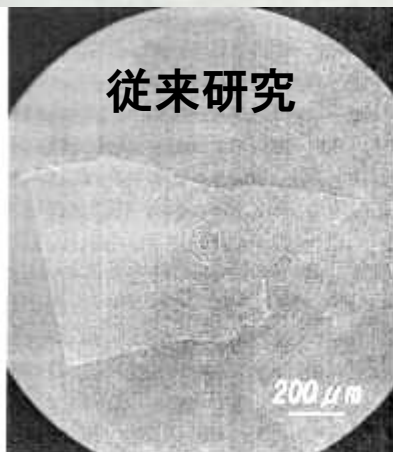
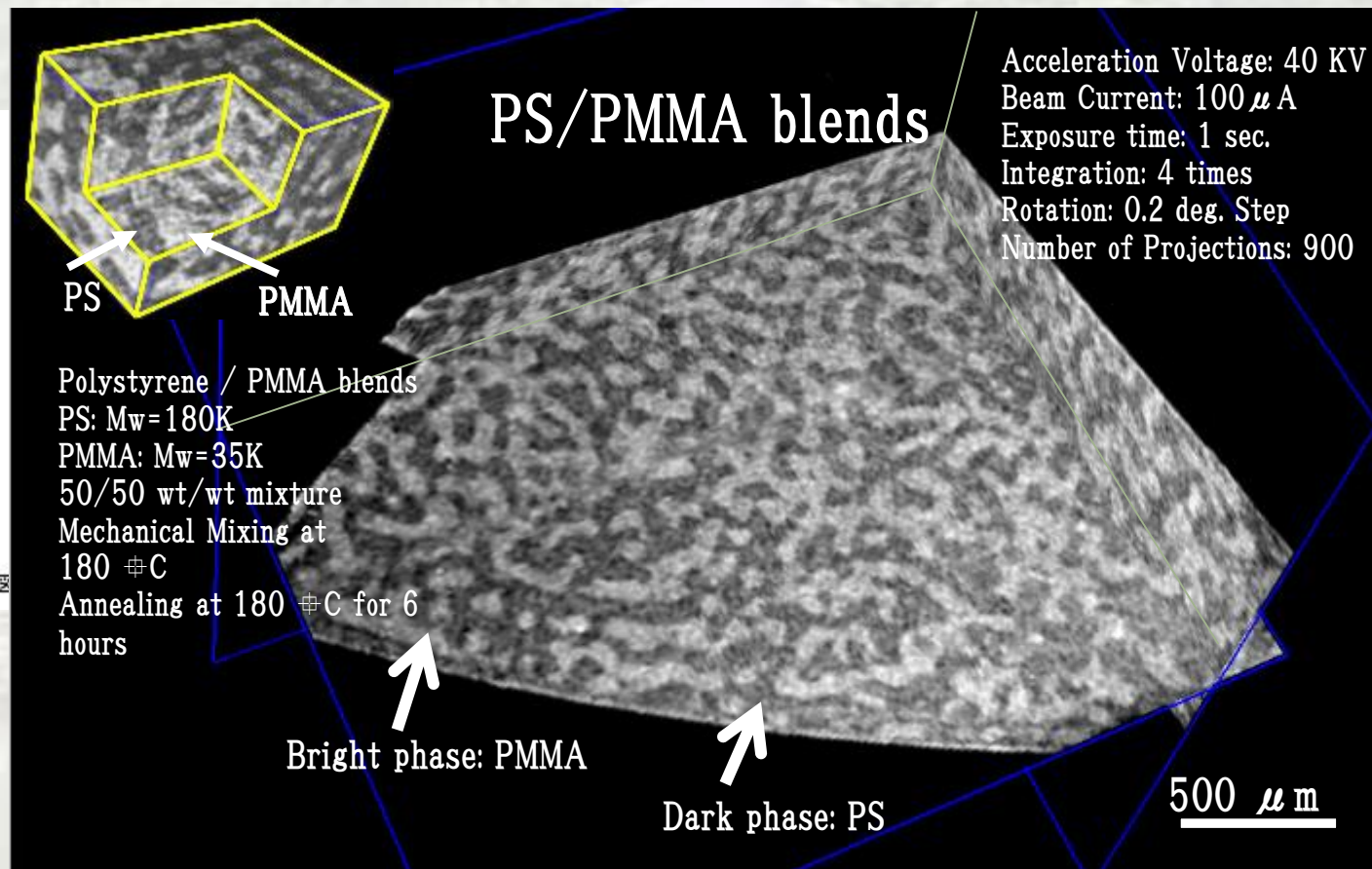


図2 X線CTで得られたPS/PMMA混合物の断面図

西川ら、機能材料,  
288, 18-24 (2005)  
より



# Specification of FLEX-M863-CT

- 型式：FLEX-M863-CT
  - Beamsense社との共同開発。商品化済。
- 光源：浜ホト製特注品
  - 密閉・反射型のマイクロフォーカス管
  - 加速電圧20~70KV、フォーカス径 $2\mu\text{m}$
  - 窓材：ベリリウム
- 検出器：Beamsense社製CCD
  - 画素サイズ： $20\mu\text{m}$
  - 画素数：1500x1000
  - シンチレータ：CsI
- 倍率：1.2~10倍 (通常は6倍まで)
  - 拡大後画素サイズ： $2\sim 18\mu\text{m}$
  - 空間分解能：およそ $3\mu\text{m}$



# X線CT技術

再構成  
理論

ハードウェア  
開発

アプリケーション

測定原理

アー  
ティ  
ファク  
ト除去

光学素  
子

設計

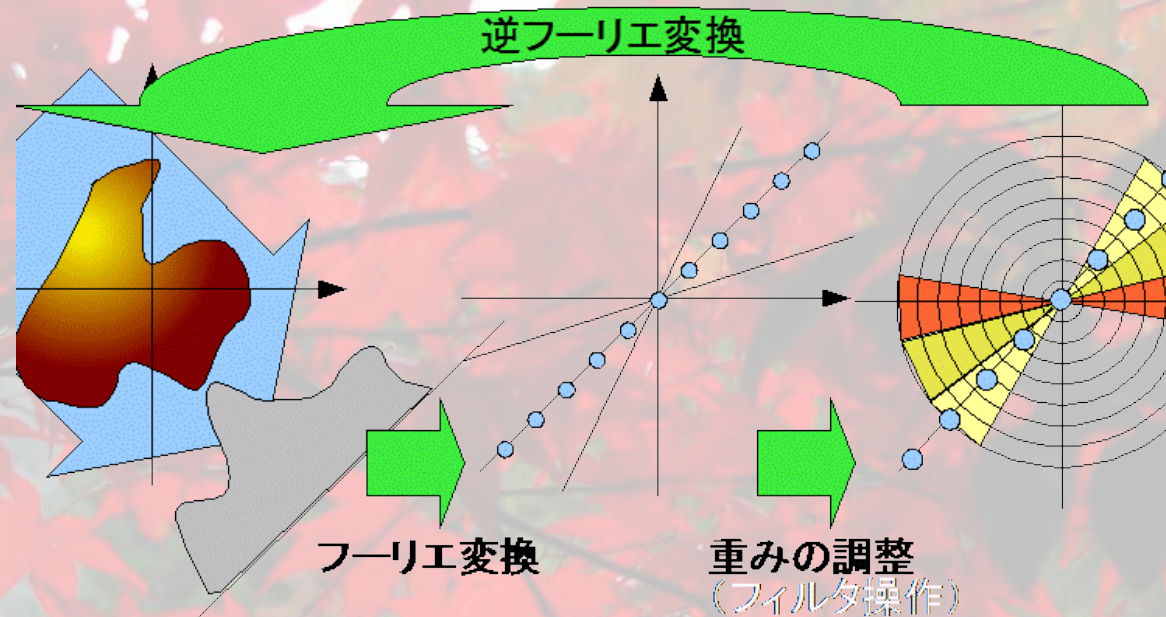
周辺ソ  
フト  
ウェア

画像解  
析

測定  
ノウ  
ハウ

材料科  
学





$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} p(r, \theta) e^{-irR} dr \right] R \left| e^{i(x \cos \theta + y \sin \theta)R} \right| dR \right] d\theta$$

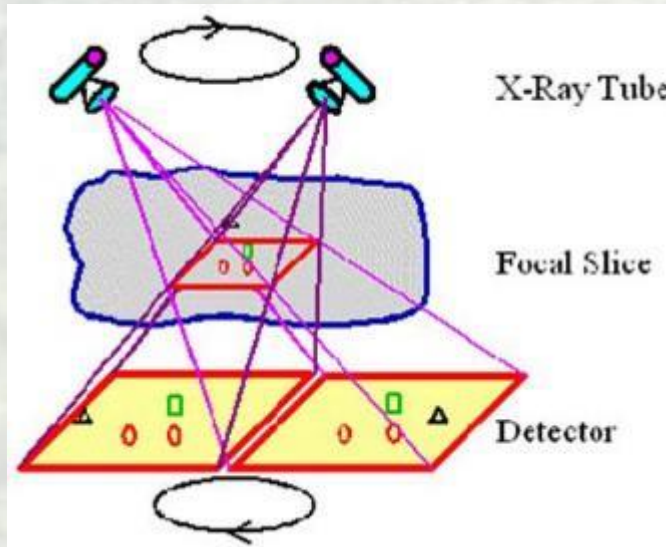
投影像

フィルタ(微分フィルタ)

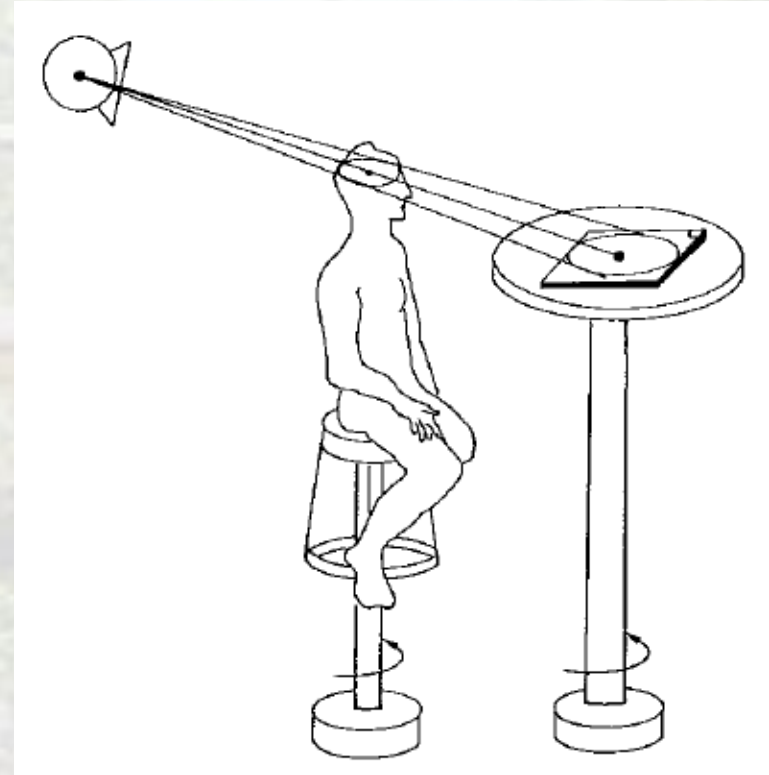
## 再構成の原理

なるべく数学を使わないで説明します・

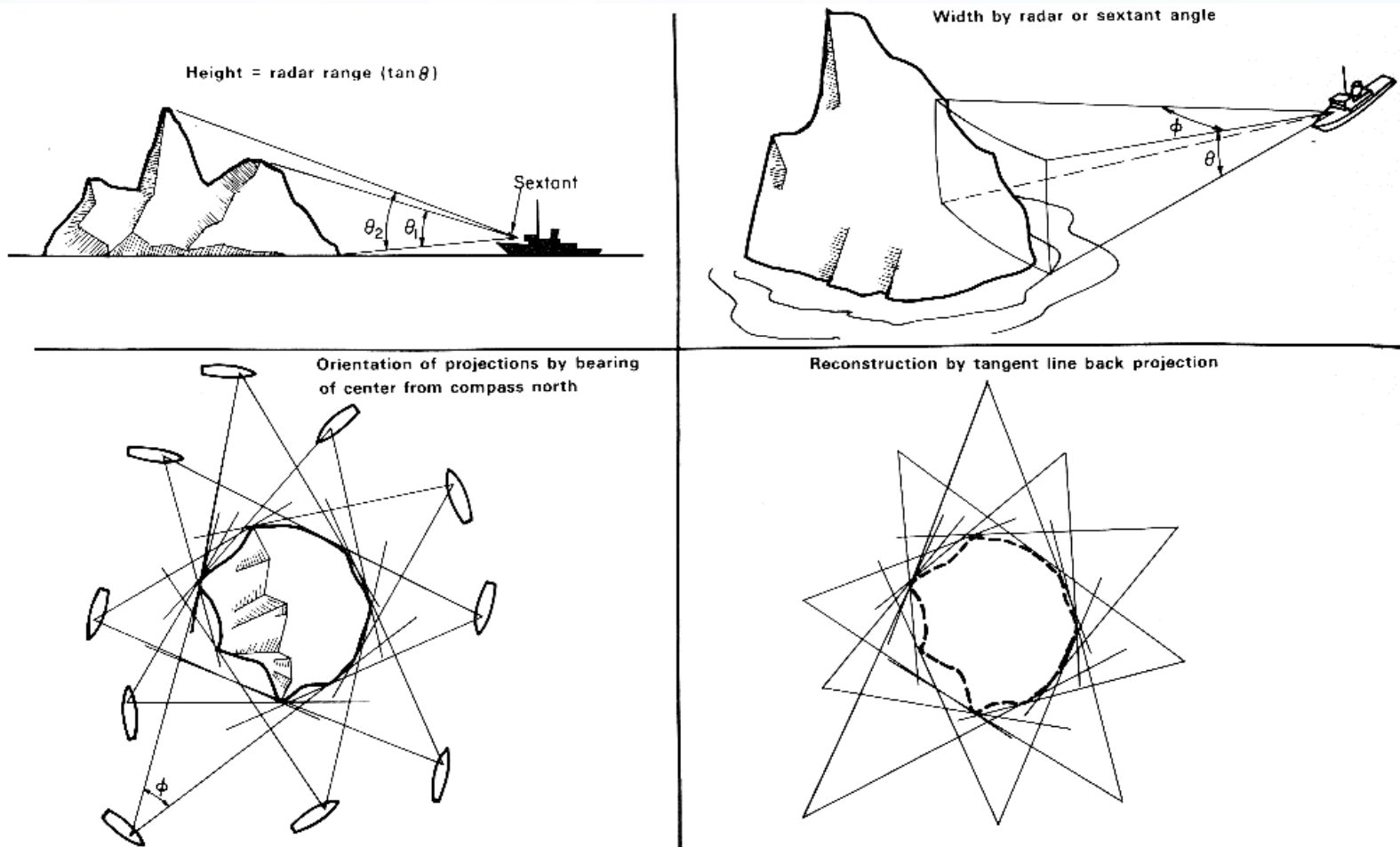
# 1940年頃



ラミノグラフィー

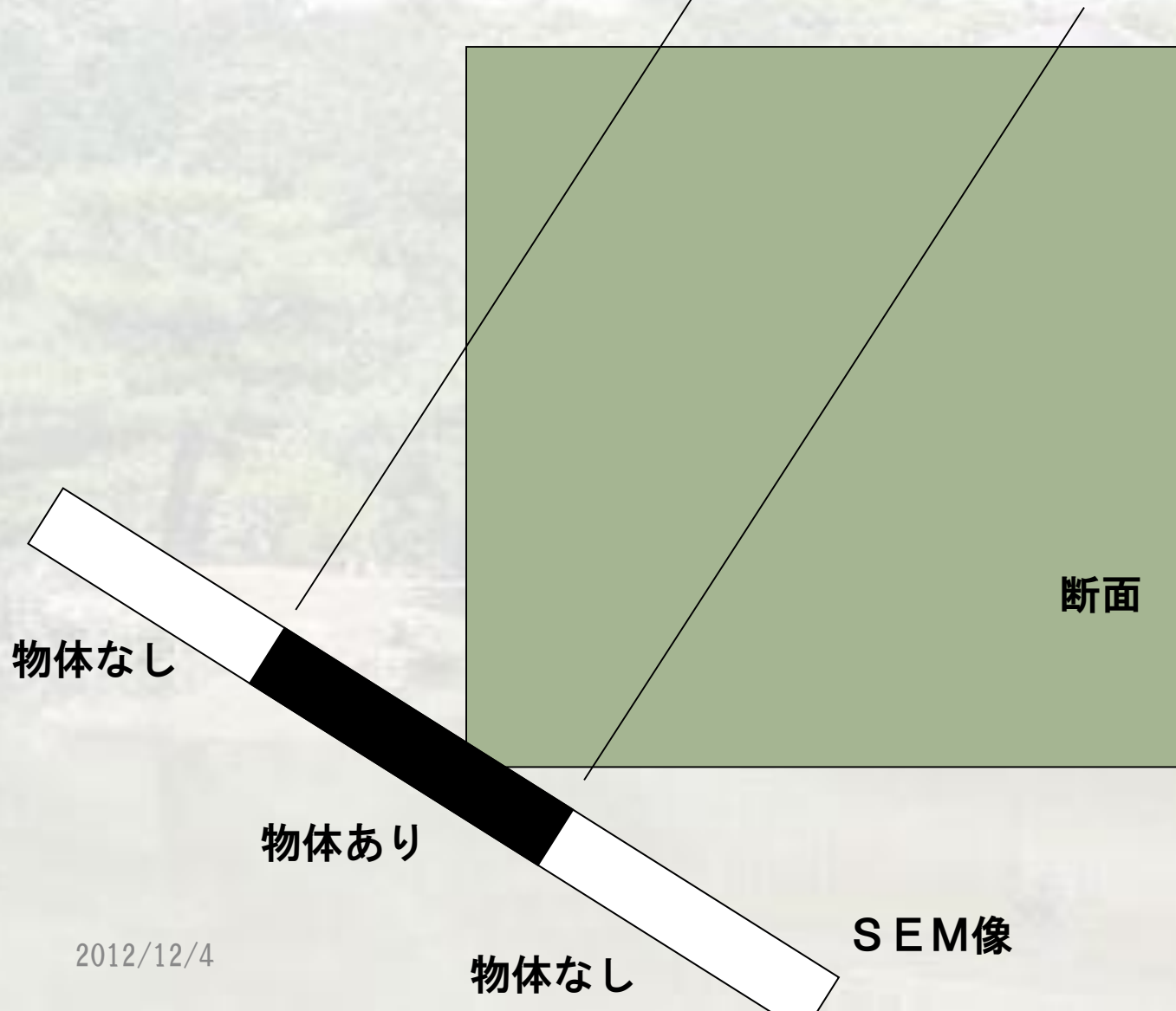


回転椅子式ラミノグラフィー

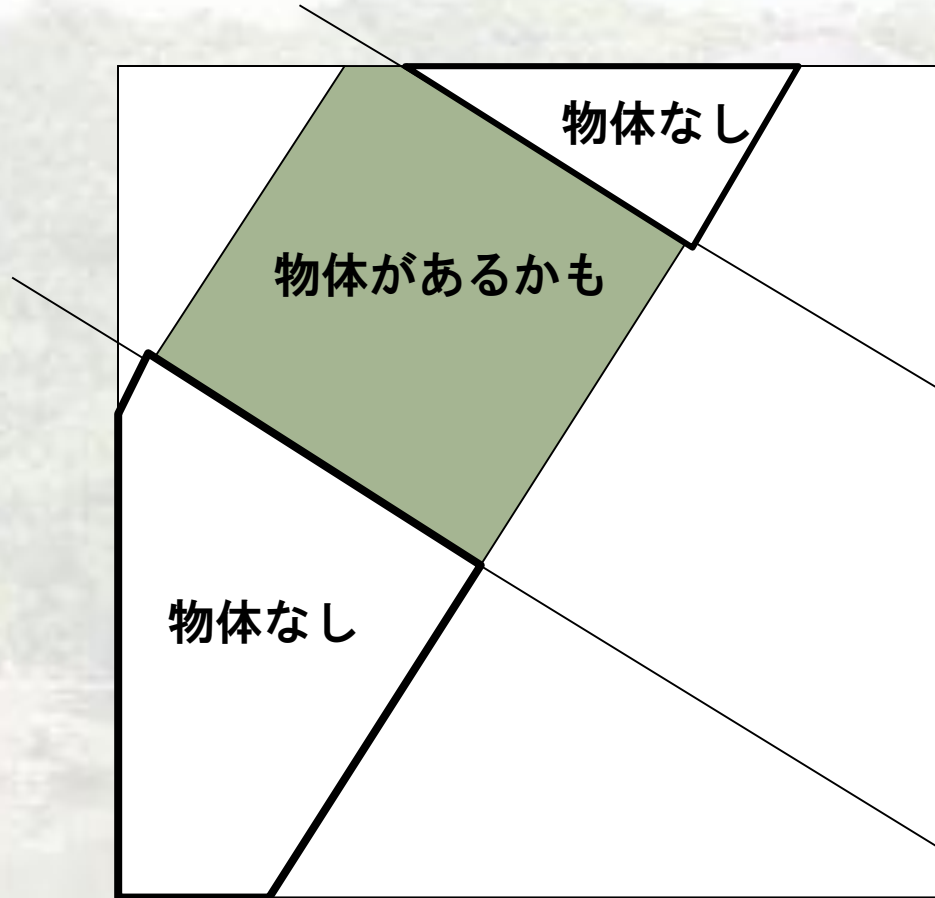


**Fig. 1.9.** Estimation of iceberg volume from projections. The projections in this example are somewhat different from the other examples in this chapter: essentially they are simple shadows. That is, the “estimated line integrals” in this case can have only two values: one indicating that the line goes through the iceberg and the other indicating that it does not. As the ship moves around the iceberg, its location relative to the iceberg is determined by radar (for measuring distance from the iceberg) and compass (for measuring orientation). The iceberg volume is estimated by the volume of its convex hull; i.e., the convex object which would cast the same shadows in the measured directions that the iceberg casts. Such reconstructions have been used to study the effect of mass and sail area on the movement of icebergs in the North Atlantic. (Illustration provided by Dr. T. F. Budinger.)

# 外形の立体構築

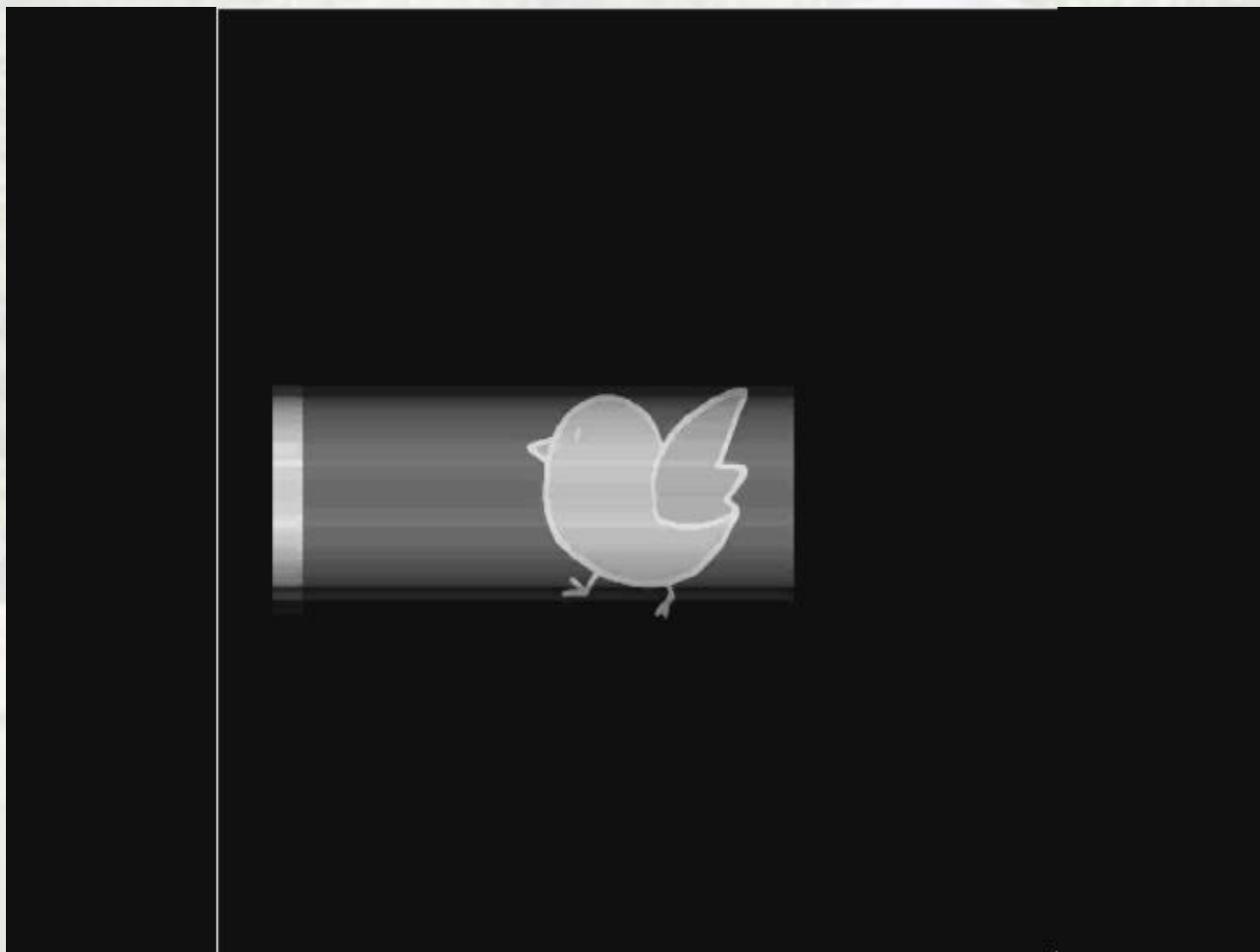


# 外形の立体構築

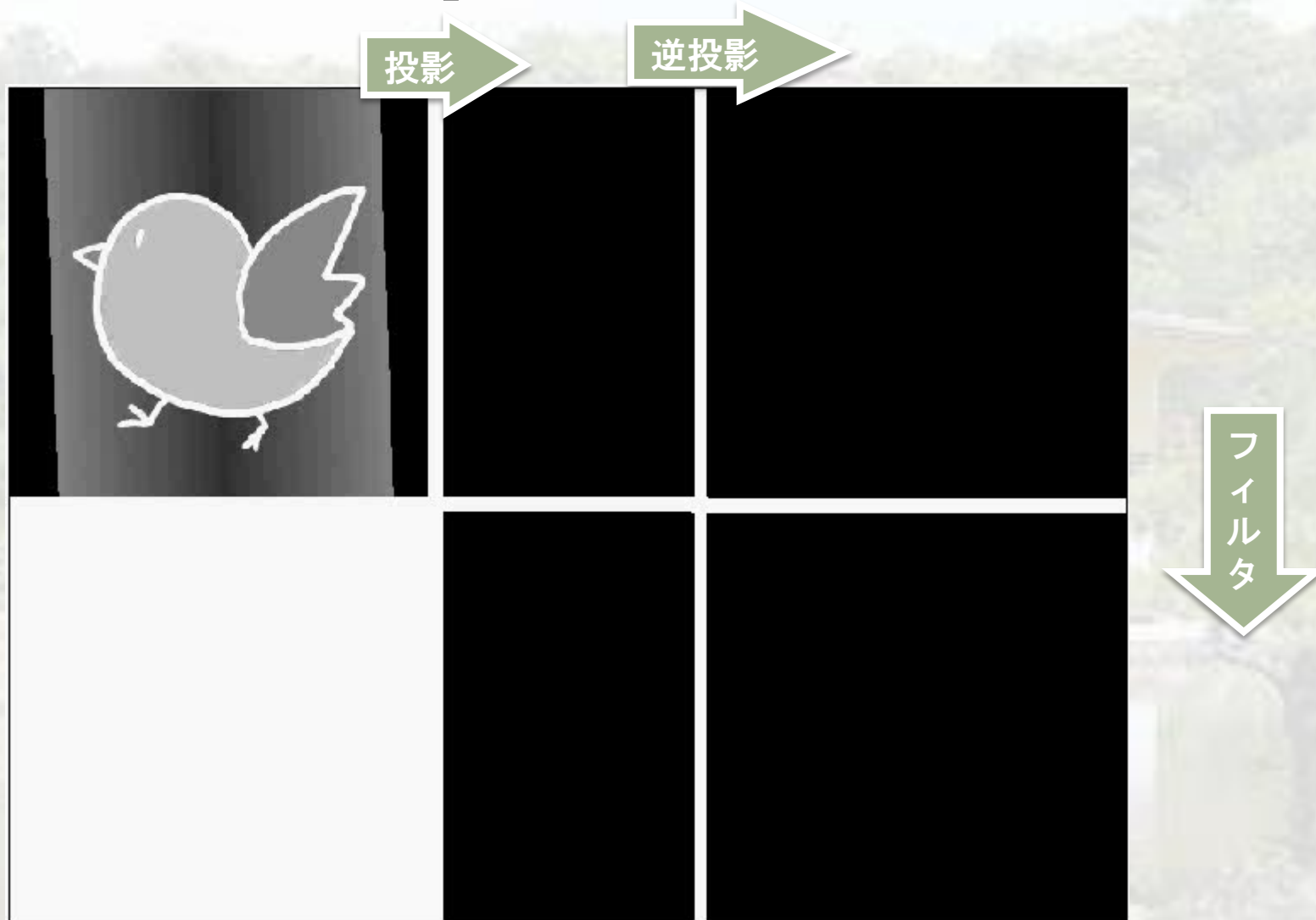


物体があるかないかを、消去法で求める

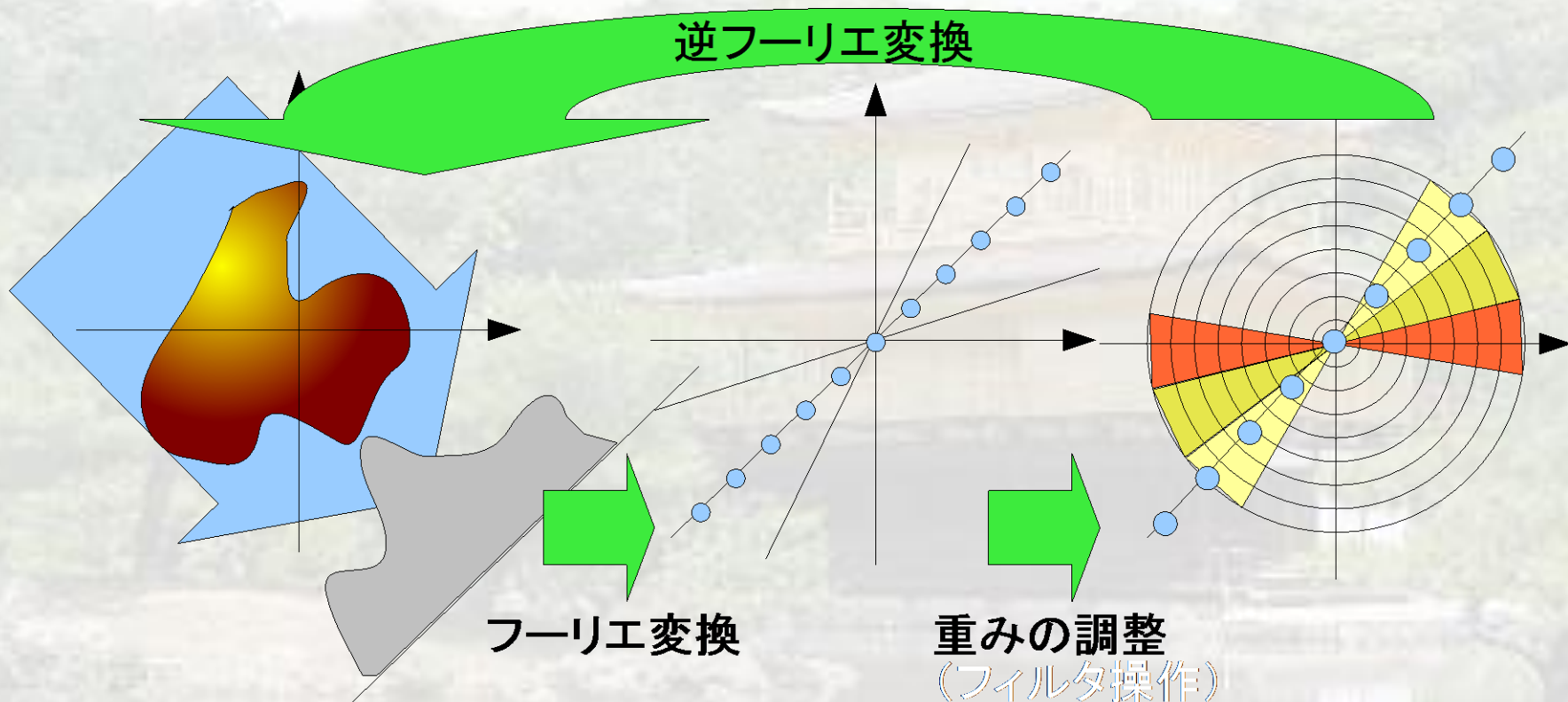
# もう少し進んだバックアッププロジェクトション法



# Filtered back-projection (FBP)



# 数式はちょっと難しいです

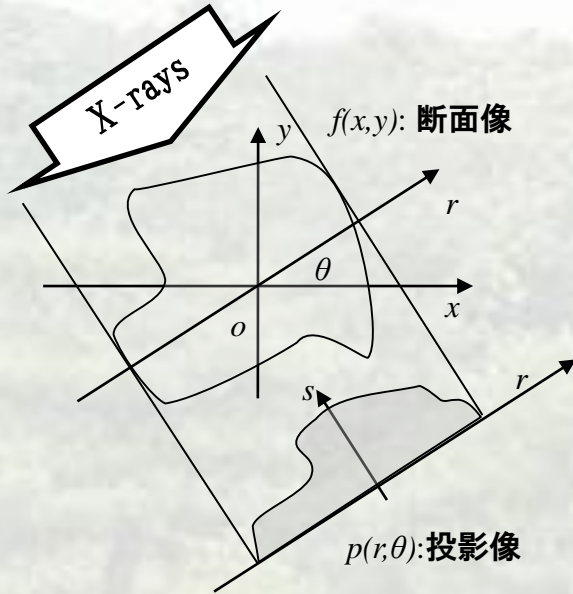


$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[ \int_{-\infty}^\infty \left[ \int_{-\infty}^\infty p(r, \theta) e^{-irR} dr \right] \underset{\substack{\uparrow \\ \text{フィルタ (微分フィルタ)}}}{|R|} e^{i(x\cos\theta + y\sin\theta)R} dR \right] d\theta$$

断面像                      投影像



# X線CTでは、何が見えるのか？



投影像を撮影して断面像を得る。

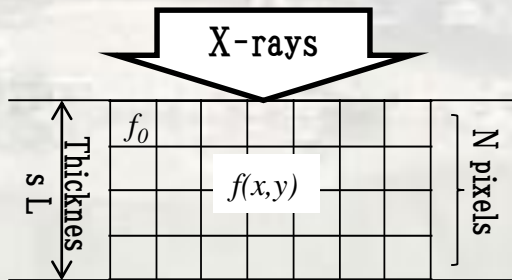
⇔ 投影像を再現する断面像を求める。

$$p(r, \theta) = \int f(r \cos \theta - s \sin \theta, r \sin \theta + s \cos \theta) ds$$

$$\tau(r, \theta) = e^{-p(r, \theta)}$$

画素値  $f_0$ 、画素数  $N$  の平板  $\tau = e^{-p(r, \theta)} = e^{-Nf_0}$

厚み  $L$ 、X線吸収係数  $\mu$  の平板  $\tau = e^{-\mu L}$



$$f_0 = \mu \frac{L}{N}$$

画素値は1画素あたりのX線吸収係数

# 再構成像の画素値は 画素あたりの線吸収係数

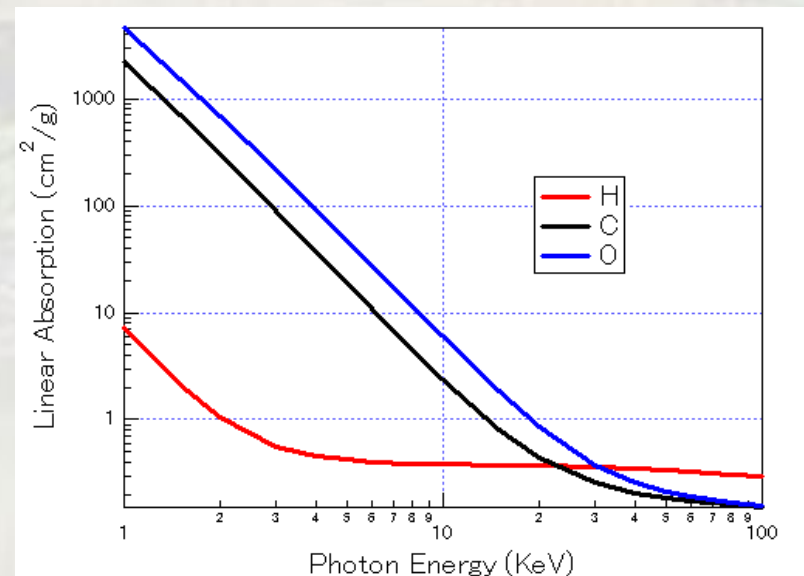
再構成像の画素値  $\mu(E)L$

$L$  1画素のサイズ

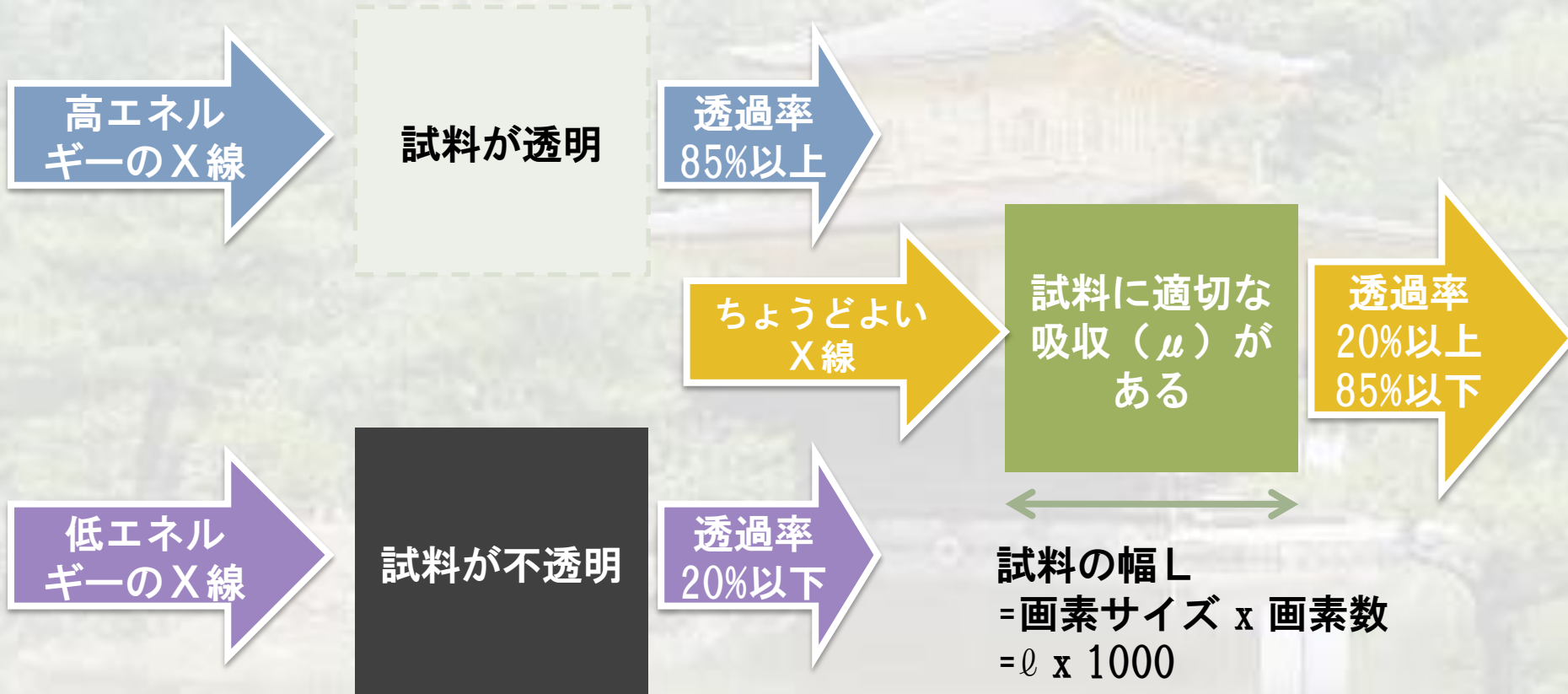
$$\mu(E) = \sum_i \frac{\mu_i(E)}{\rho_0} \rho_i$$

$\frac{\mu_i(E)}{\rho_0}$  元素iの質量級数係数

$\rho_i$  元素iの密度



# 適切なエネルギーのX線



試料の幅  $L$

= 画素サイズ  $\times$  画素数

=  $\ell \times 1000$

$-\ln 0.2 = 1.6 > \mu L = 1000 \mu \ell$

$> -\ln 0.85 = 0.16$

$1.6 \times 10^{-4} < \mu \ell < 1.6 \times 10^{-3}$

# どのくらい見えるのか？

- 樹脂サンプルによるX線吸収係数の測定
- コントラストクライテリアの決定
- ポリマーブレンドによる確認
- X線吸収係数計算機の紹介

# 実験①

# Neat Polymers

name	Density (g/cm <sup>3</sup> )	press condition
Polypropylene	0.90	200°C,20min
Low-density polyethylene	0.92	180°C,20min
High-density polyethylene	0.95	220°C,15min
Polystyrene	1.04	200°C,20min
Nylon12	1.02	200°C,20min
Nylon6	1.20	250°C,20min
Polycarbonate	1.20	230°C,20min
Poly(ethyl methacrylate)	1.11	200°C,30min
Poly(methyl methacrylate)	1.16	200°C,20min
Polyethylene terephthalate	1.38	280°C,15min
Poly(lactic acid)	1.26	180°C,20min

VACUUM DRY  
60°C,24h

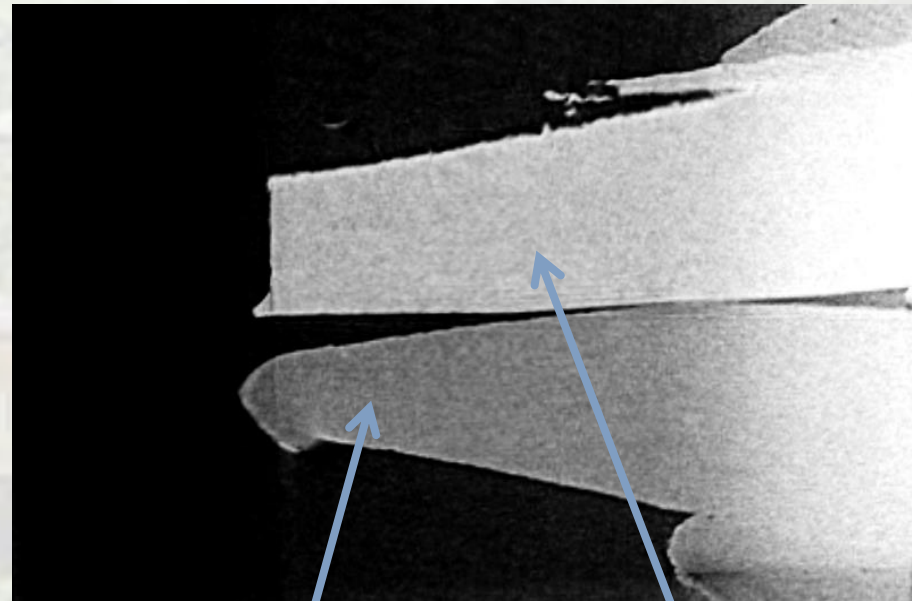
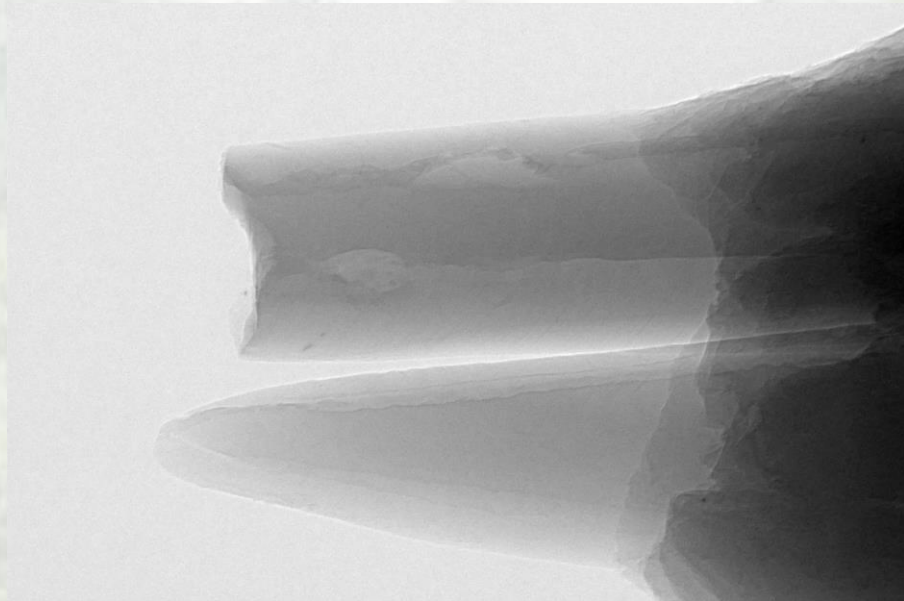


Press



5MPa

# HDPE / Nylon6の透視像とCT再構成画像



## Point

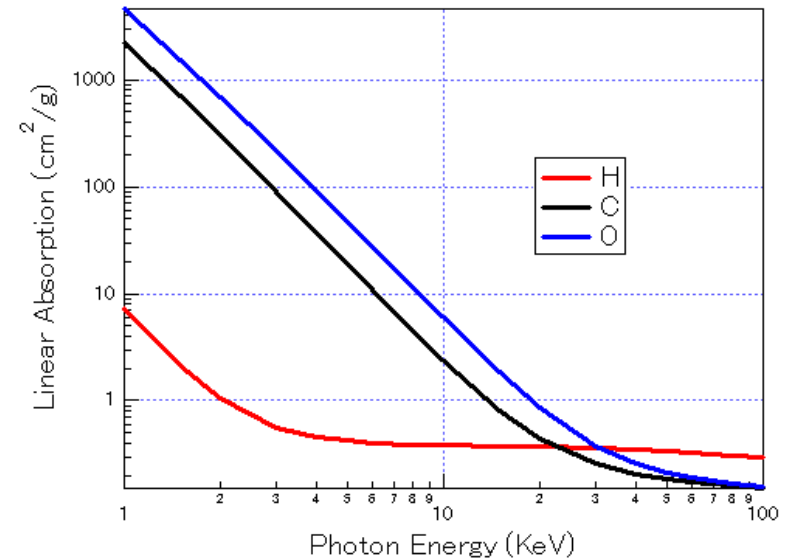
2つの試料を貼り合わせても透視像だけでは区別がつかない区別がつくように1 mm角の大きさを少し変えておく

再構成画像からピクセル値を読み込むことにより、実測値を求める

目視により区別する

# X線吸収係数の測定結果

試料名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	O+N (g/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (cm <sup>-1</sup> ) 実測値
PP	0.90	0.000	0.640
LDPE	0.92	0.000	0.647
HDPE	0.95	0.000	0.660
PS	1.04	0.000	0.766
Nylon12	1.02	0.155	0.827
Nylon6	1.20	0.319	1.071
PC	1.20	0.227	1.102
PEMA	1.11	0.312	1.114
PMMA	1.16	0.371	1.217
PET	1.38	0.460	1.429
PLA	1.26	0.560	1.436
ABS	1.04-1.07		0.840
AS	1.075- 1.10		0.868



$$\mu(E) = \sum_i \frac{\mu_i(E)}{\rho_0} \rho_i$$

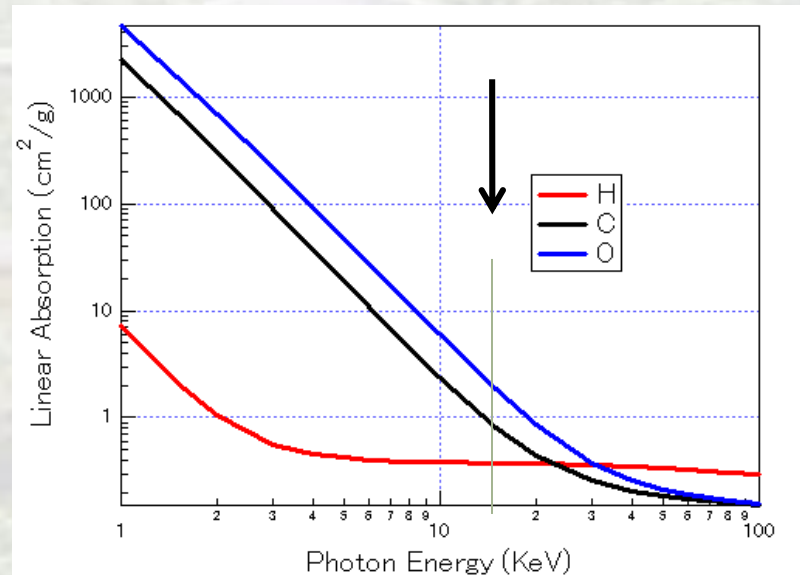
$\frac{\mu_i(E)}{\rho_0}$  元素iの質量級数係数

$\rho_i$  元素iの密度

# 15 KeVのX線吸収係数の意味

$$\mu(E) = \sum_i \frac{\mu_i(E)}{\rho_0} \rho_i$$

$\frac{\mu_i(E)}{\rho_0}$  元素iの質量級数係数  
 $\rho_i$  元素iの密度



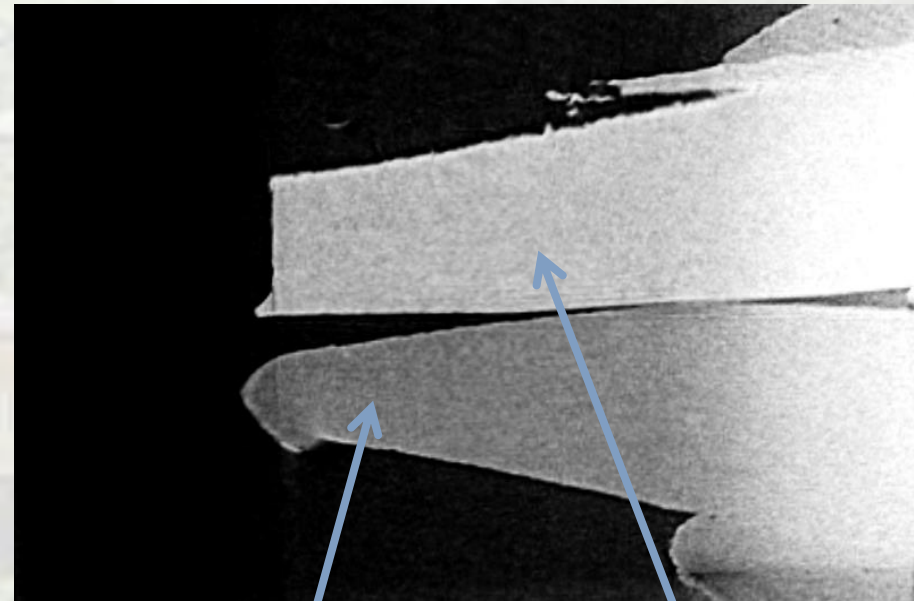
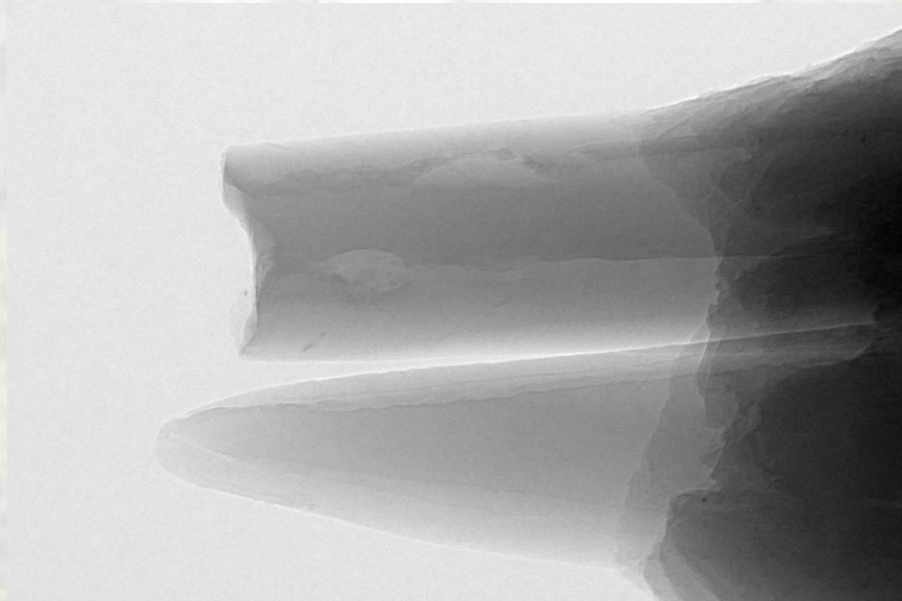
酸素の吸収係数は炭素の **2** 倍以上！

酸素や窒素の含有量の違いでコントラストが得られる。

**染色の必要がない！** ことが多い。



# HDPE / Nylon6の透視像とCT再構成画像



## Point

2つの試料を貼り合わせても透視像だけでは区別がつかない区別がつくように1mm角の大きさを少し変えておく

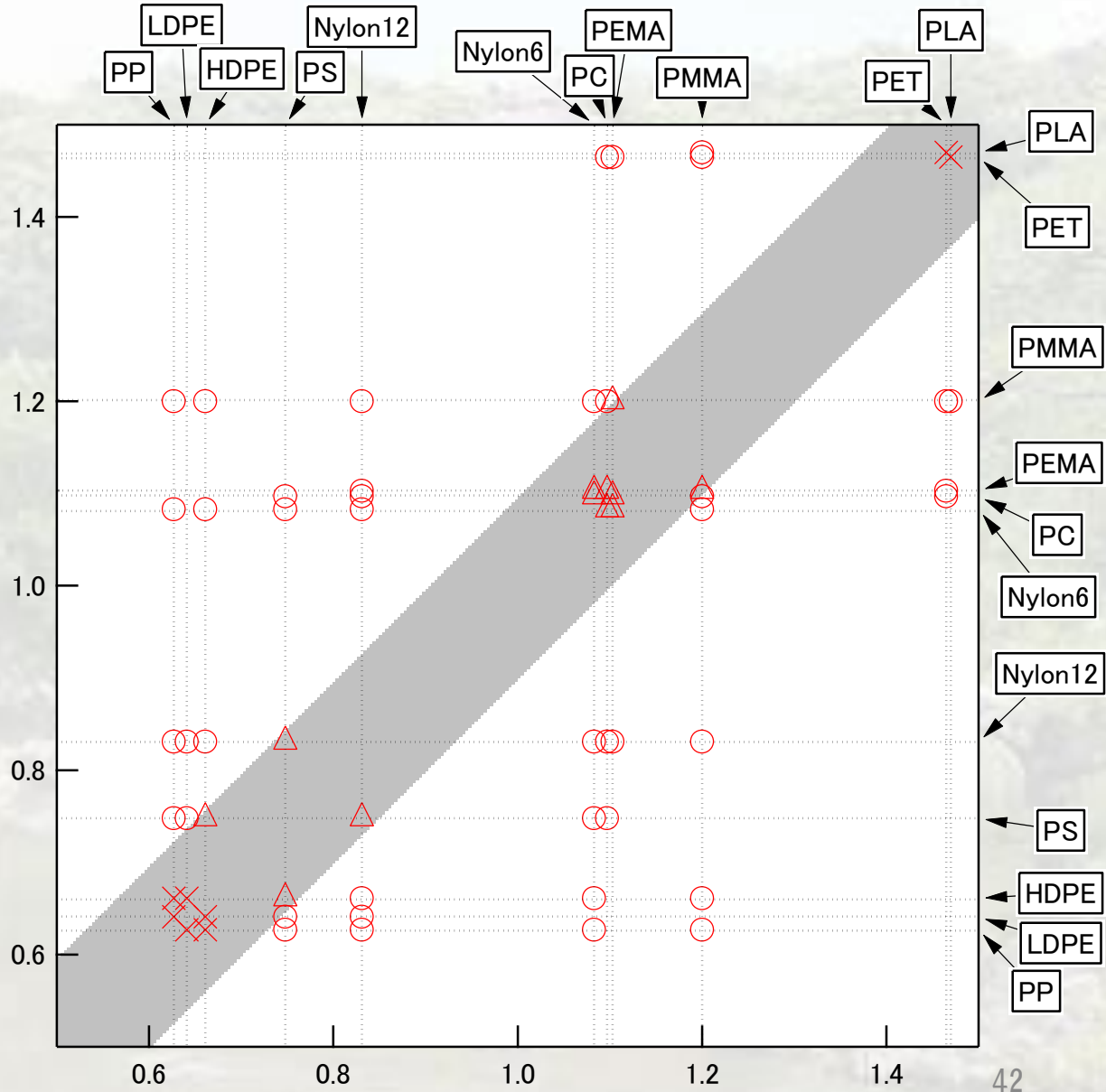
再構成画像からピクセル値を読み込むことにより、実測値を求める目視により区別する

# Polymerの区別がつくか？

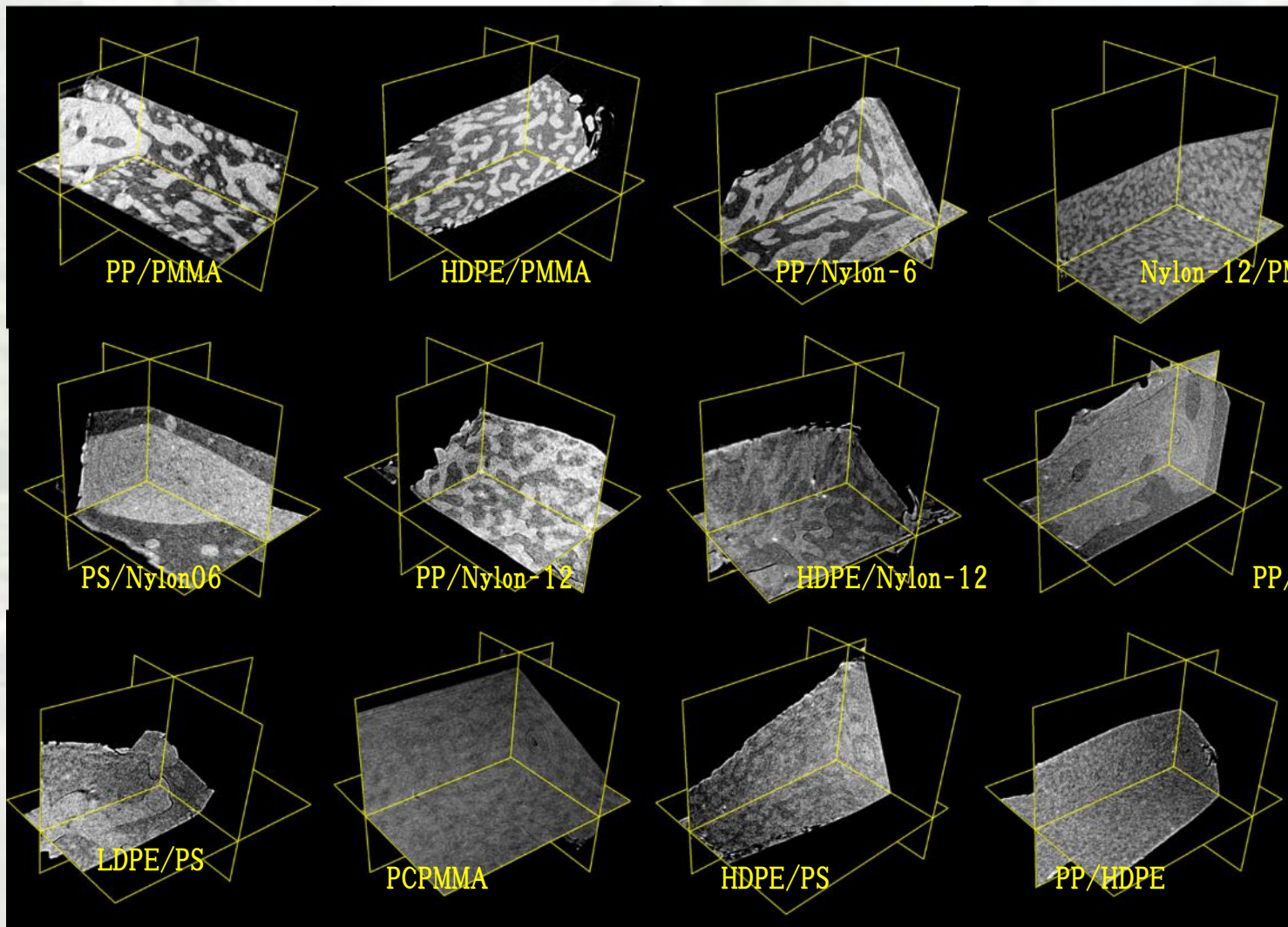
$\mu$  の値が近いグ  
レーで示した領域  
では区別が難しい

大半のポリマー間で  
観測可能なコントラス  
ト差が得られる  
ことがわかった

○ : 目視で区別可  
△ : 数値で区別可  
× : 共に区別不可



# Polymer blendsの観察結果



# X線吸収係数計算機

www.cis.kit.ac.jp/~kiro/research/modify.php?%A3%D8%C0%FE%B5%DB%BC%FD%B7%B8%BF%F4%B7%D7%BB%BB%

**X線吸収係数計算機**  
Top / X線吸収係数計算機

[ トップ ] [ 編集 | 凍結 | 差分 | バックアップ | 添付 | リロード ] [ 新規 | 一覧 | 単語検索 | 最終更新 | ヘルプ ]

**Topics**

ようこそ!  
English pages  
About Kiro  
About SACT  
装置開発  
関係者専用ページ  
共同研究について

**最新の20件**

2011-04-18  
修論・卒論2010

2011-04-04  
Team Kiro! ようこそ

2011-04-03  
プライベートな話  
原子炉のCT、できます

2011-03-10  
過去の公式行事

2011-02-15  
学部卒業要件チェック  
修士課程卒業要件チェック  
便利ツール

2011-02-09  
X線吸収係数計算機  
質量吸収係数表

2011-02-08  
学会発表2010  
学会発表2011  
研究発表

2011-01-26  
修論・卒論

**便利ツール** <sup>+</sup>

計算結果は概算なので、精密な数値が必要な時は自分で計算してください。

## X-ray Absorption Calculator

predefined polymers

Total density (g/cm<sup>3</sup>):

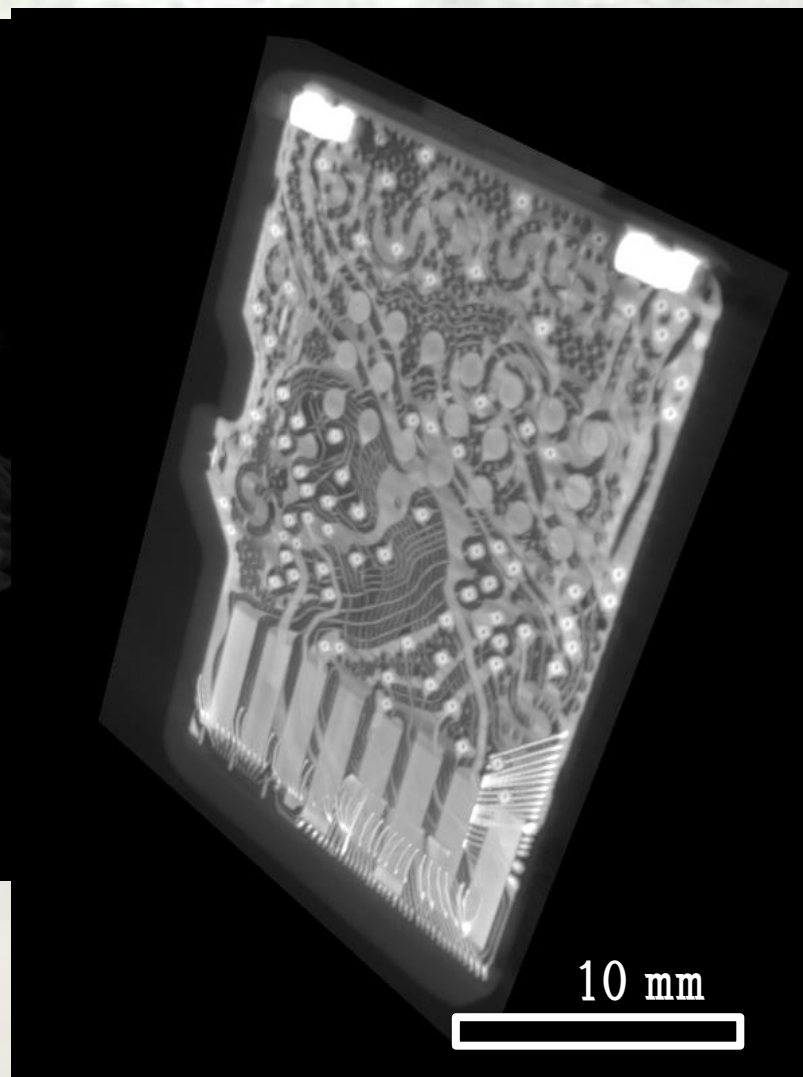
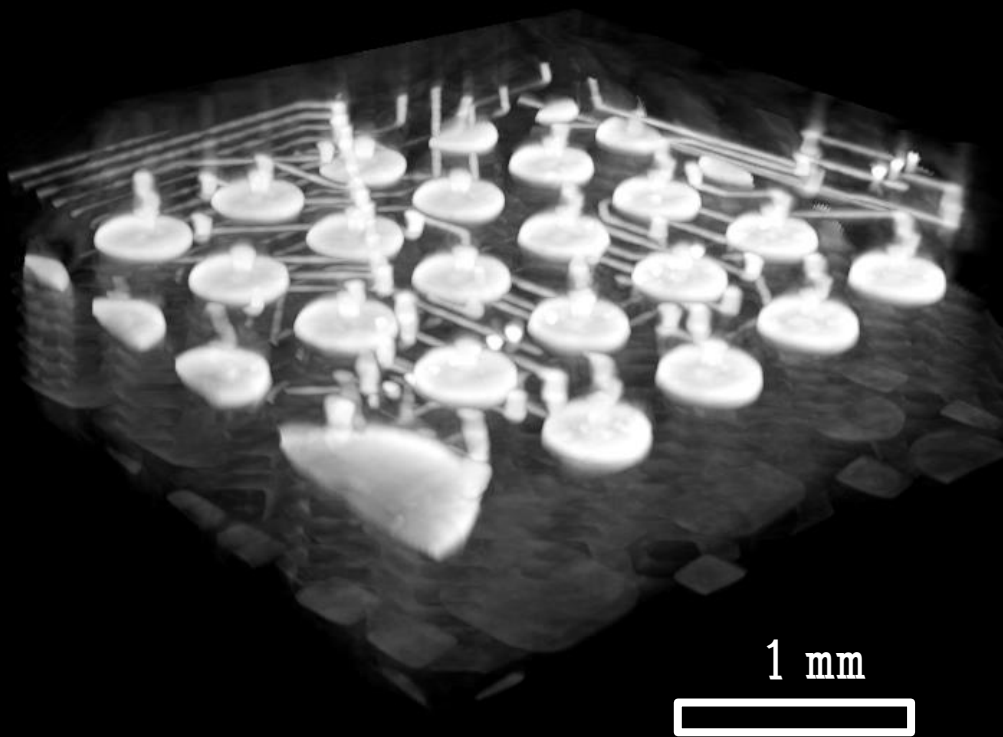
Photon Energy (KeV):

Number of Elements

Element	Number of atoms	atomic frac.	weight frac.	weight
C <input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="3"/>	0.33333	0.85714	36
H <input type="text" value="6"/>	<input type="text" value="6"/>	0.66666	0.14285	6
O <input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	0	0	0
N <input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	0	0	0
<b>Total</b>	<b>9</b>			<b>42</b>

**Calculated Absorption : 0.670962 cm<sup>-1</sup>**

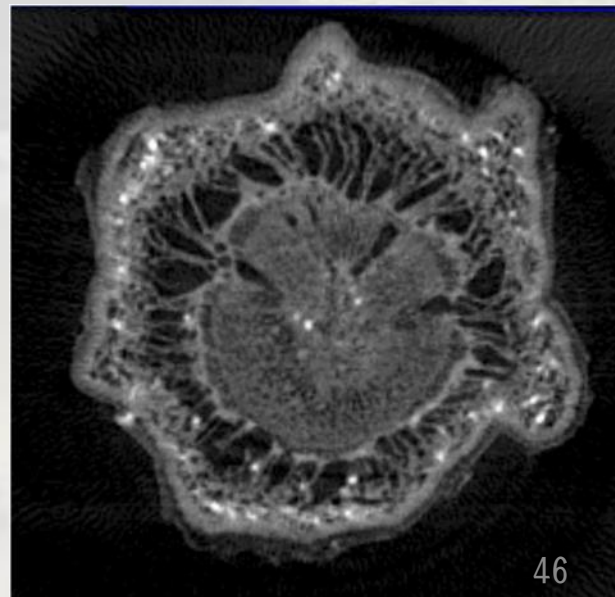
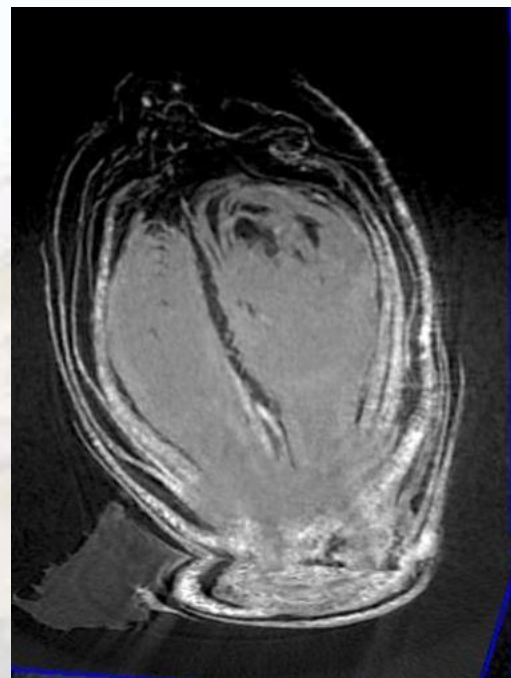
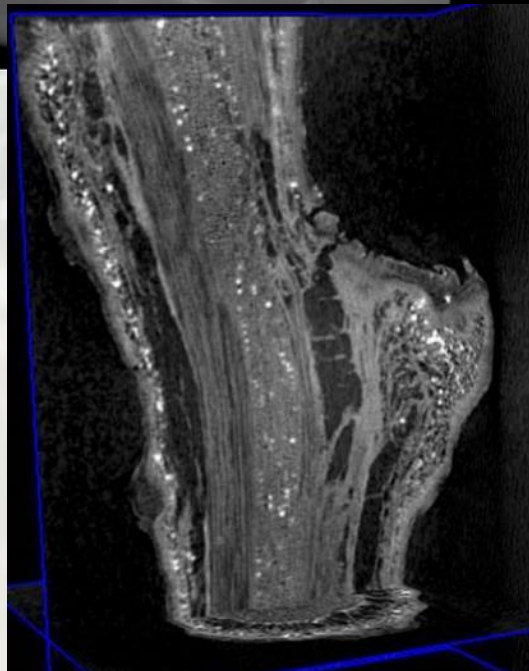
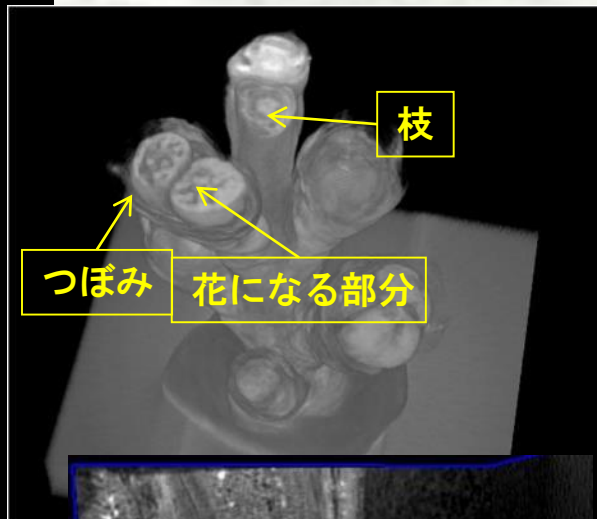
# Electric devices



# 桜の小枝

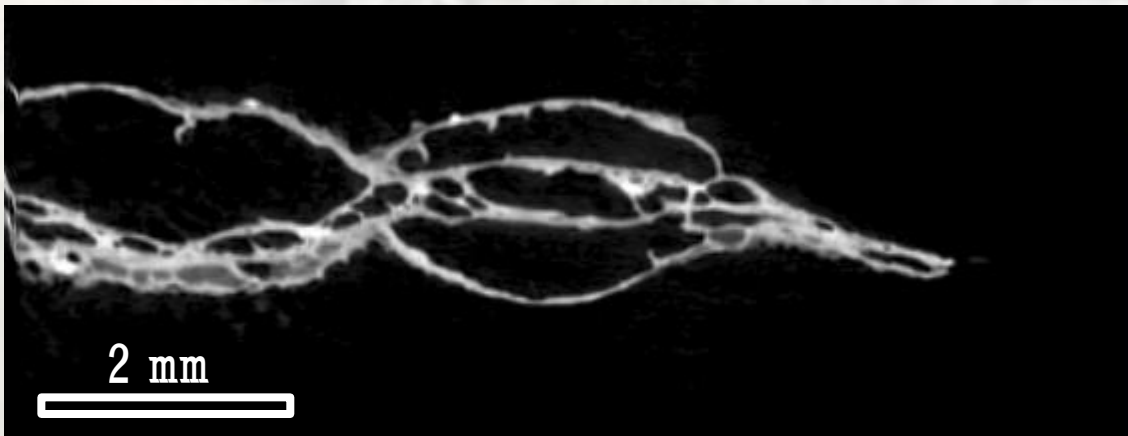
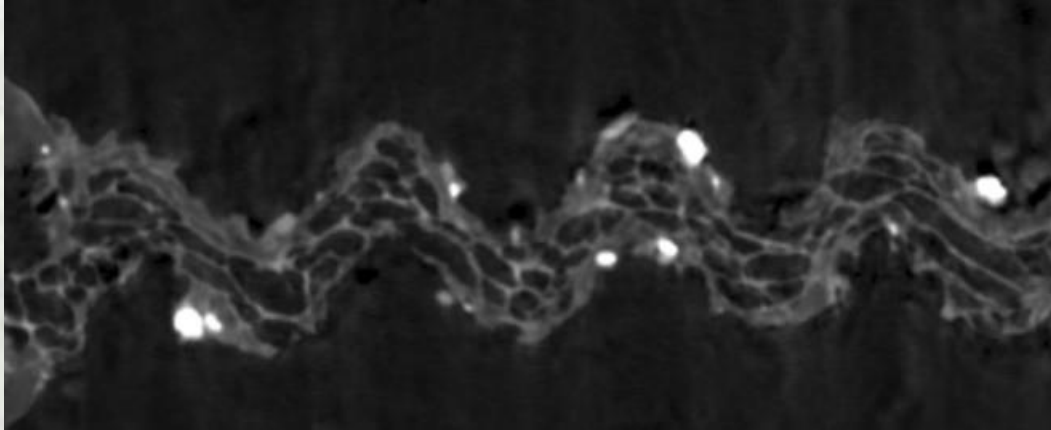


2012/12/4

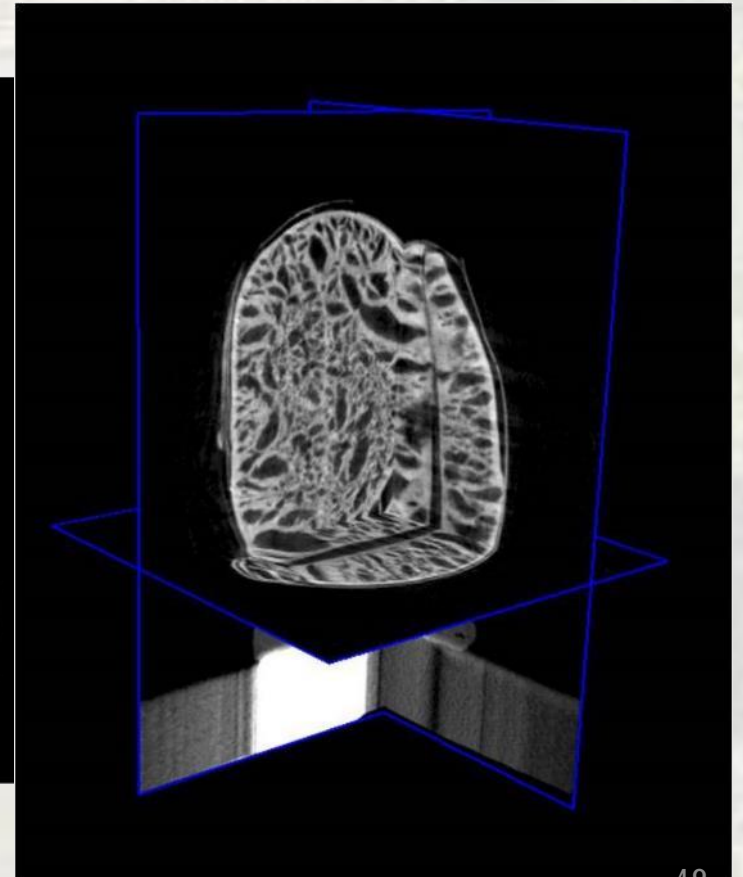
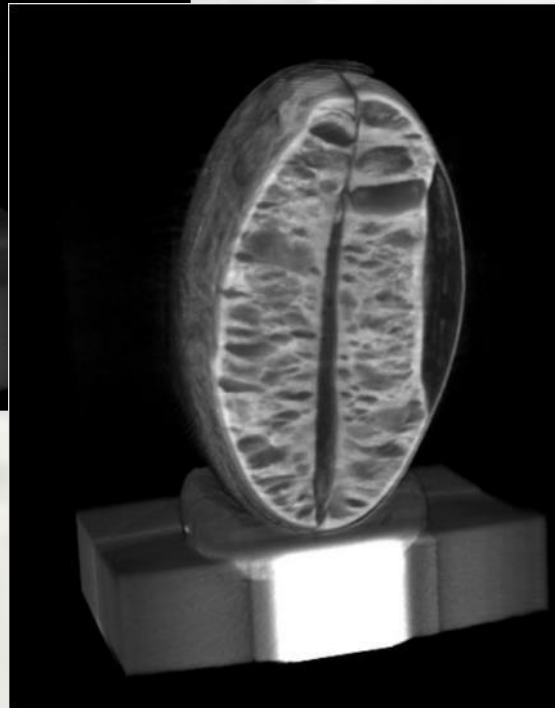
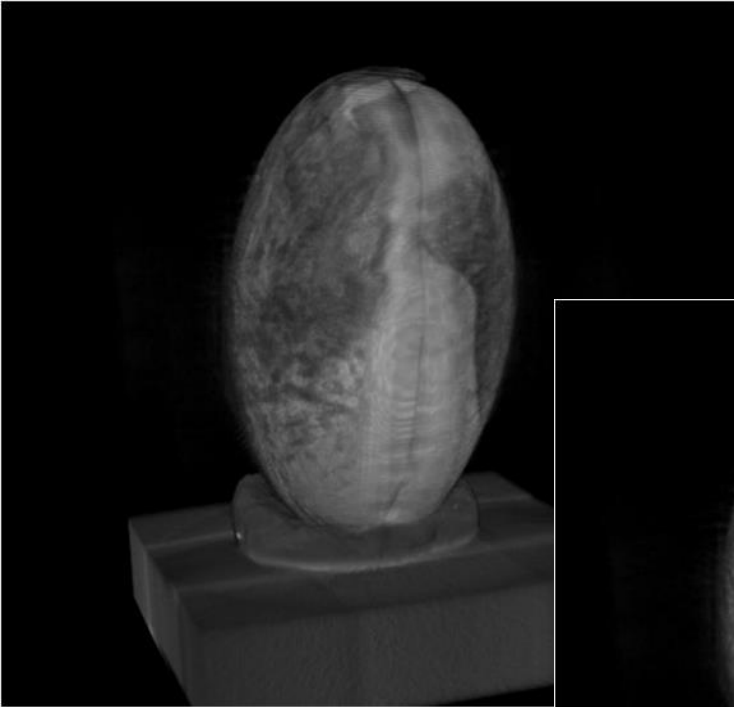


46

# Potato Chips

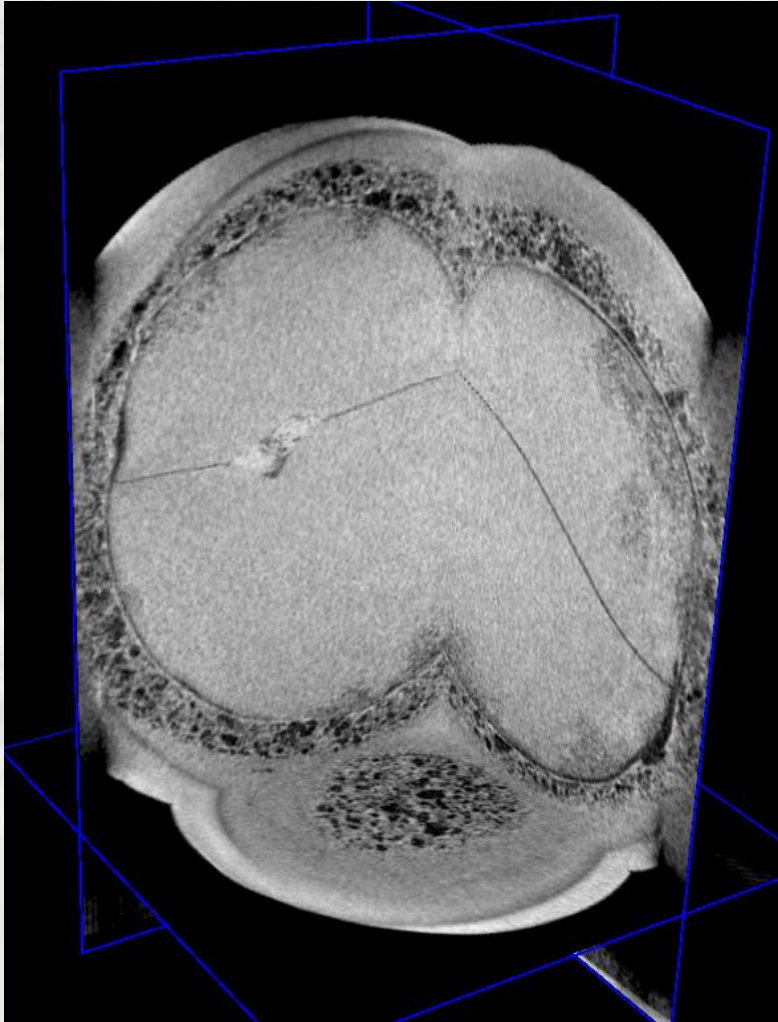


# 節分豆

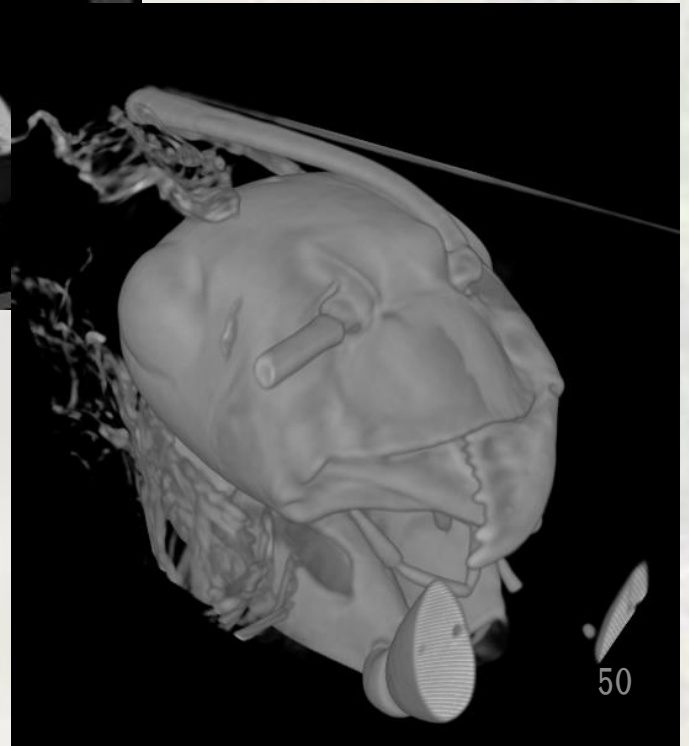
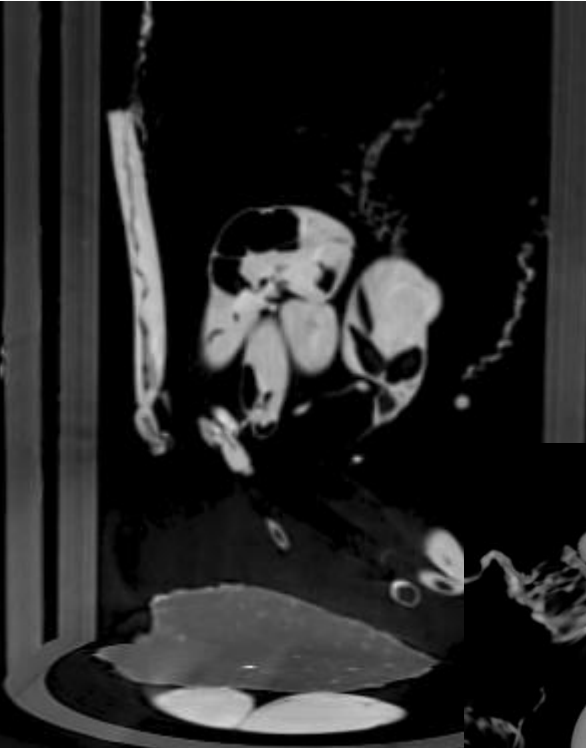
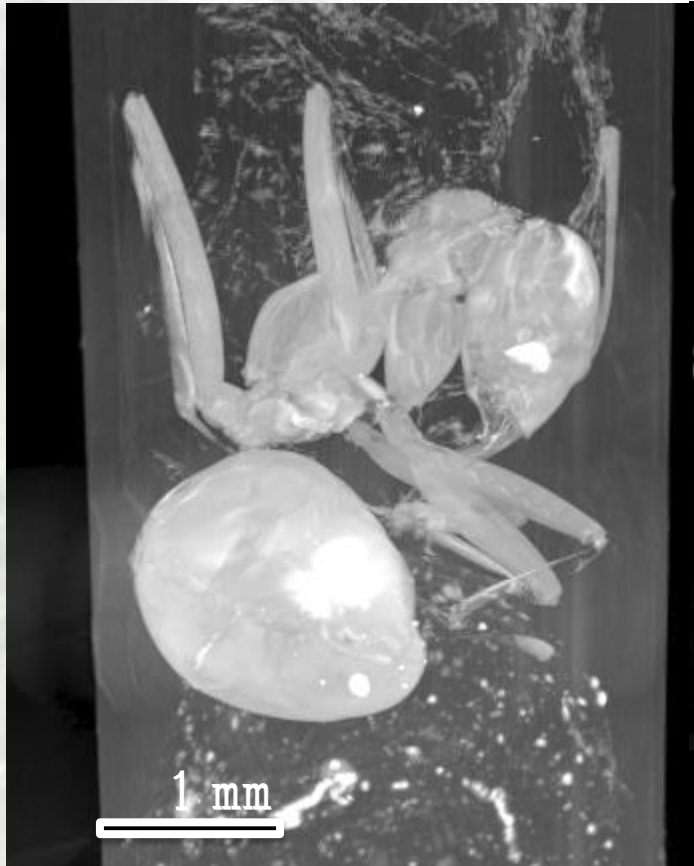




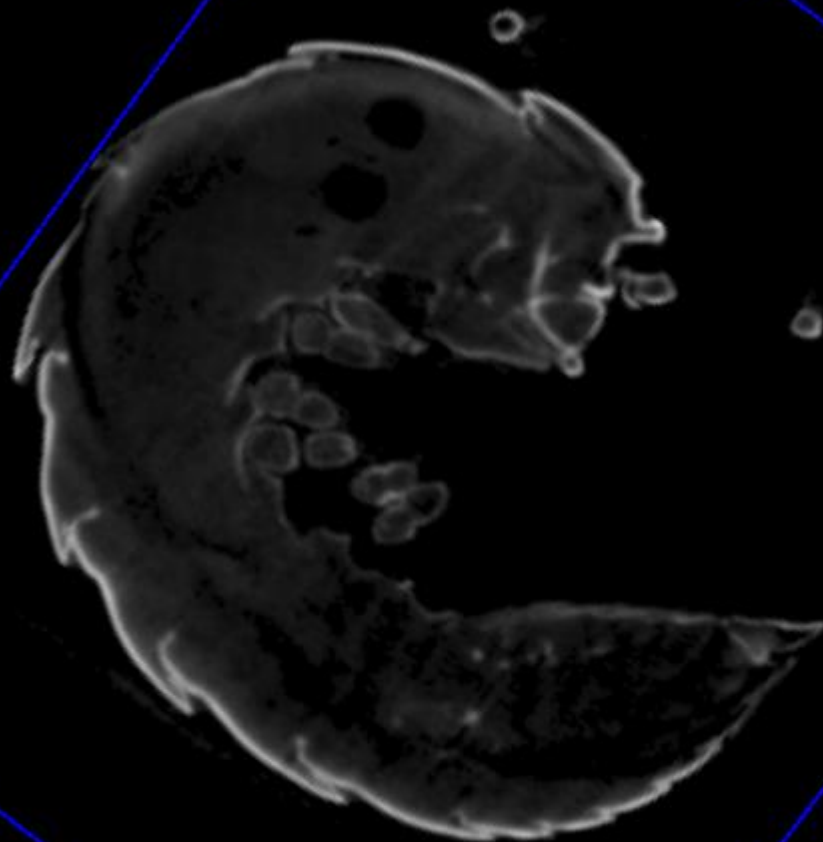
# チョコボール



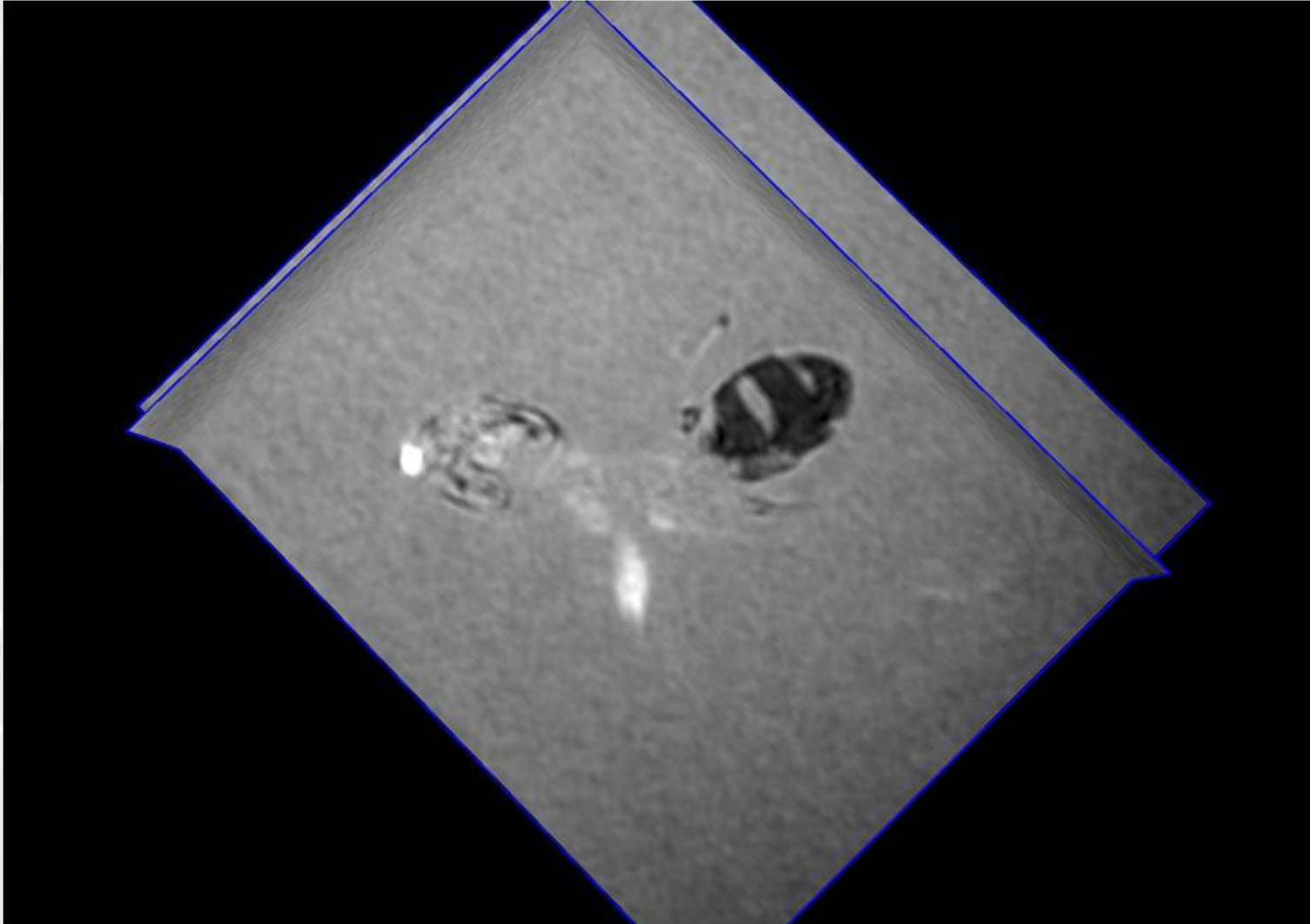
# Insects (ant)

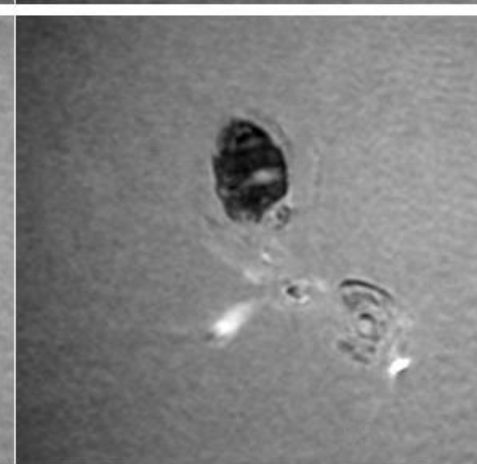
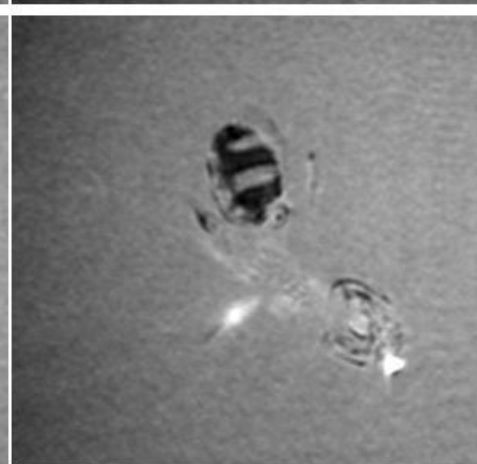
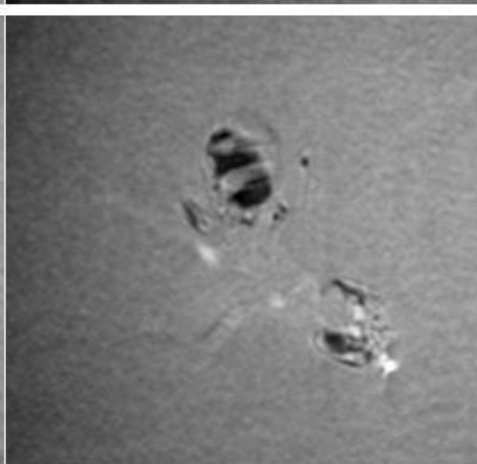
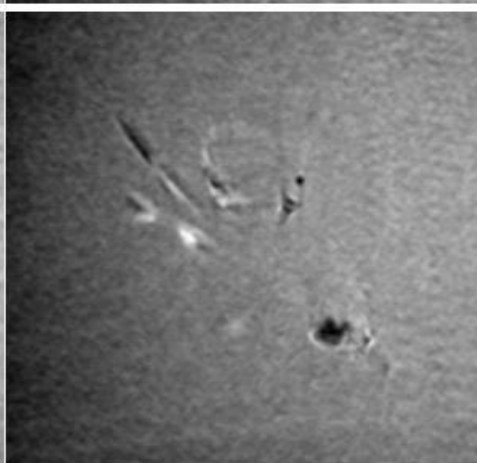
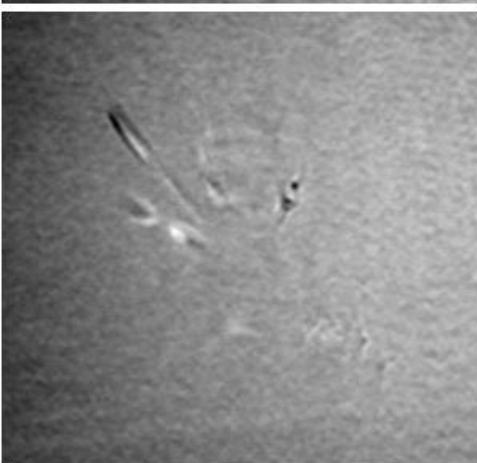
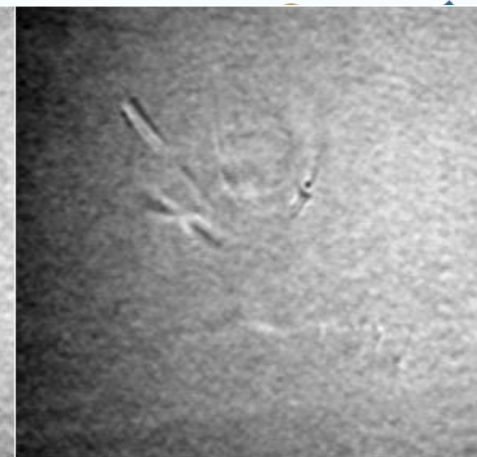
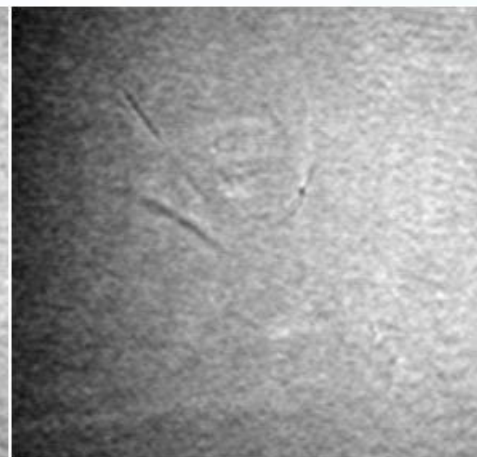
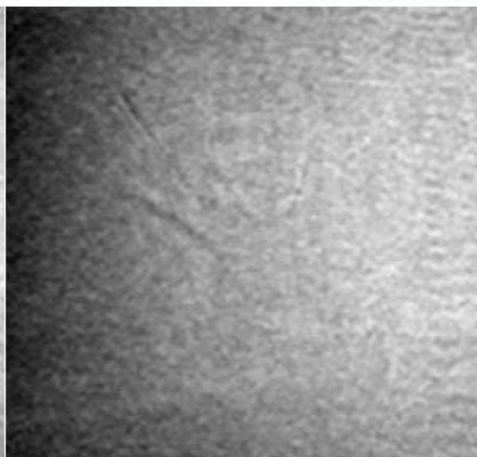
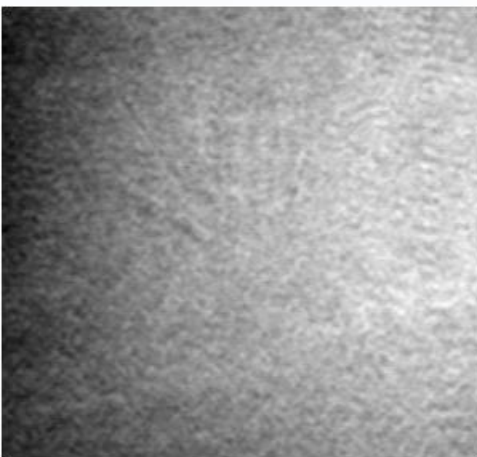


# ダンゴ虫

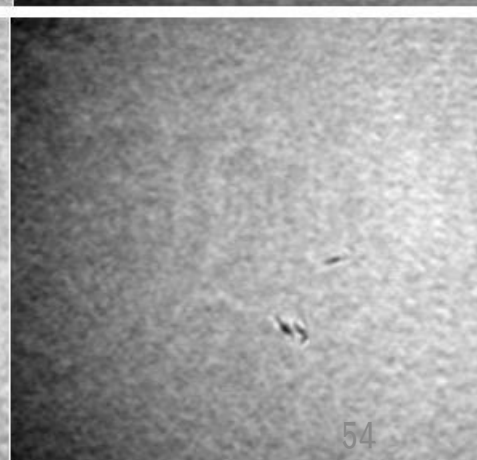
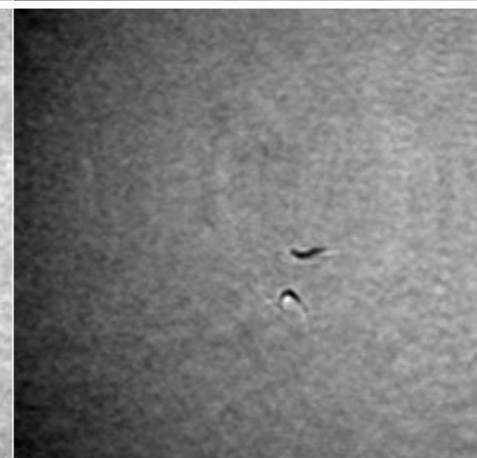
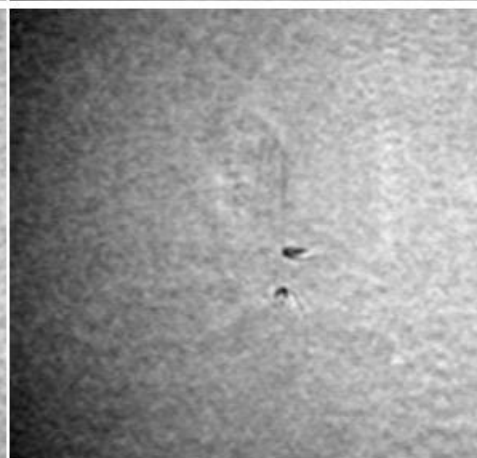
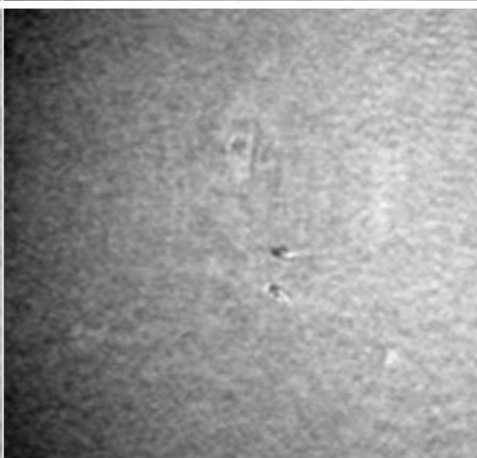
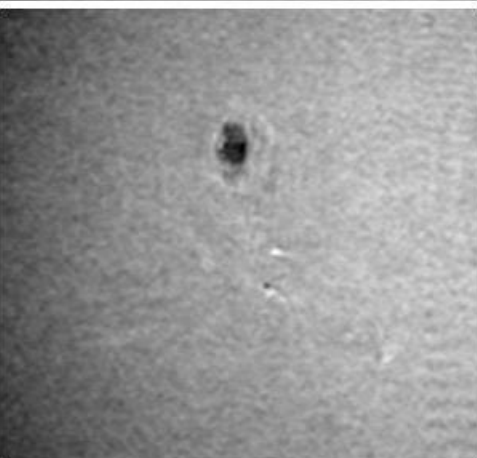
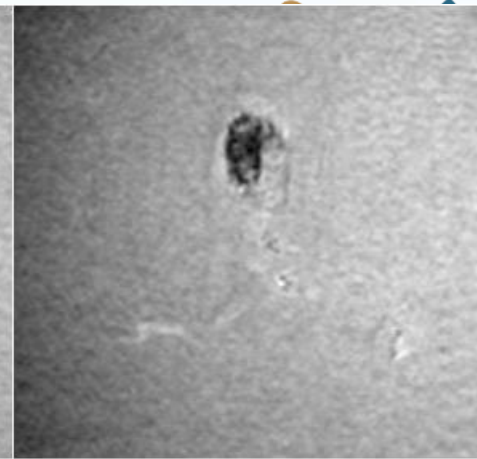
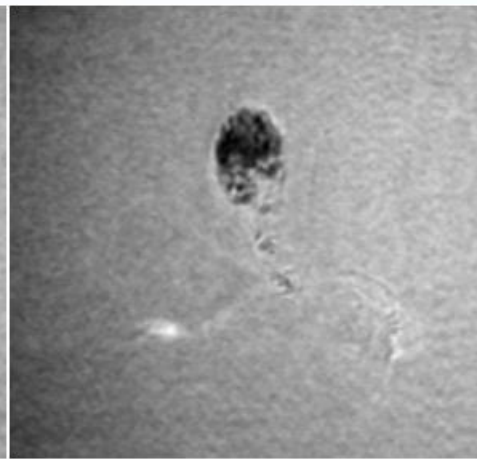
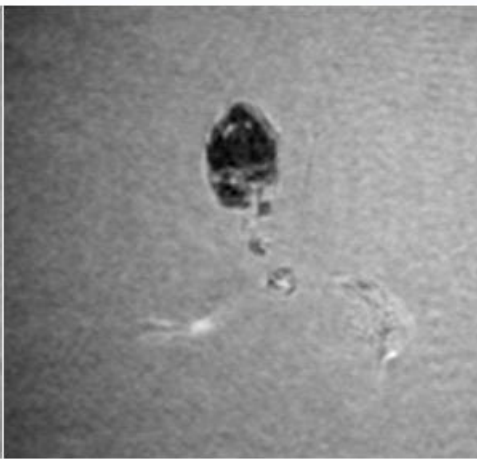
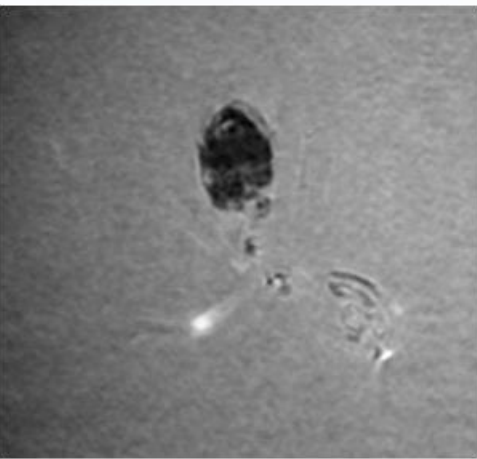


# Archeology (ant in amber)

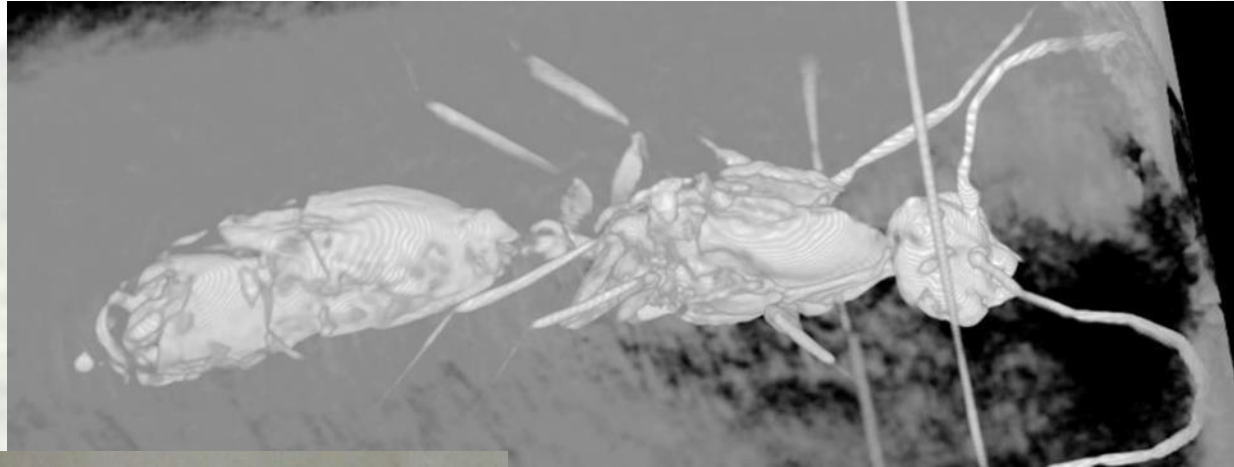




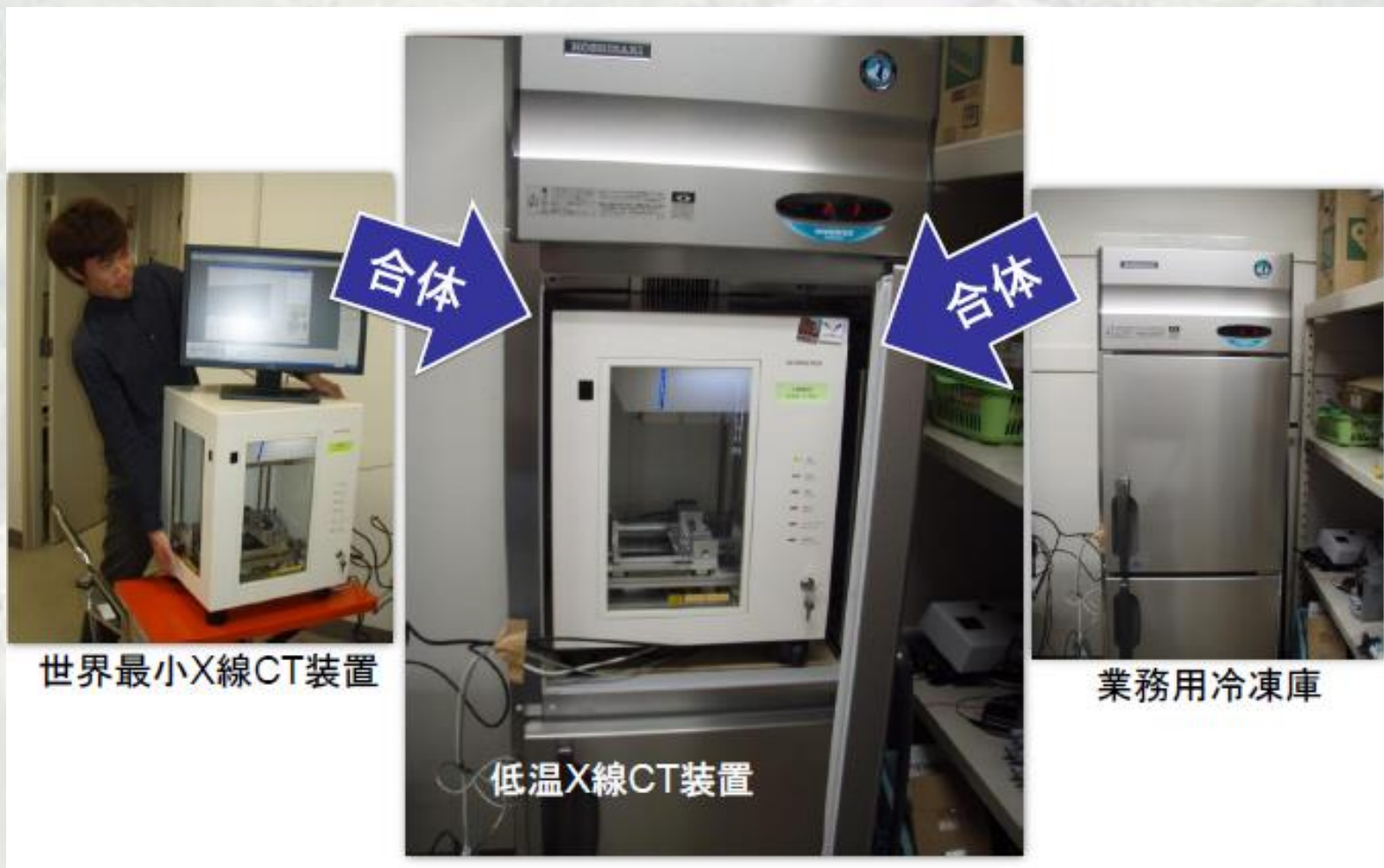
2012/12/4



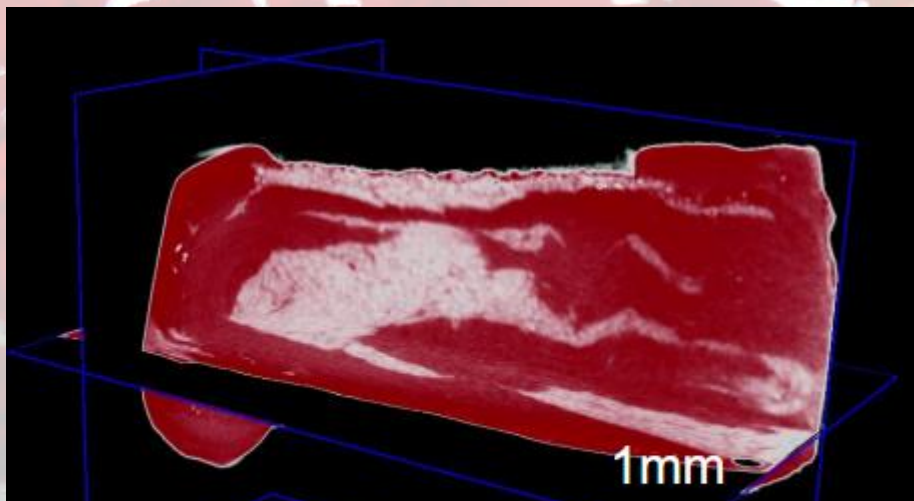
# Termite in amber



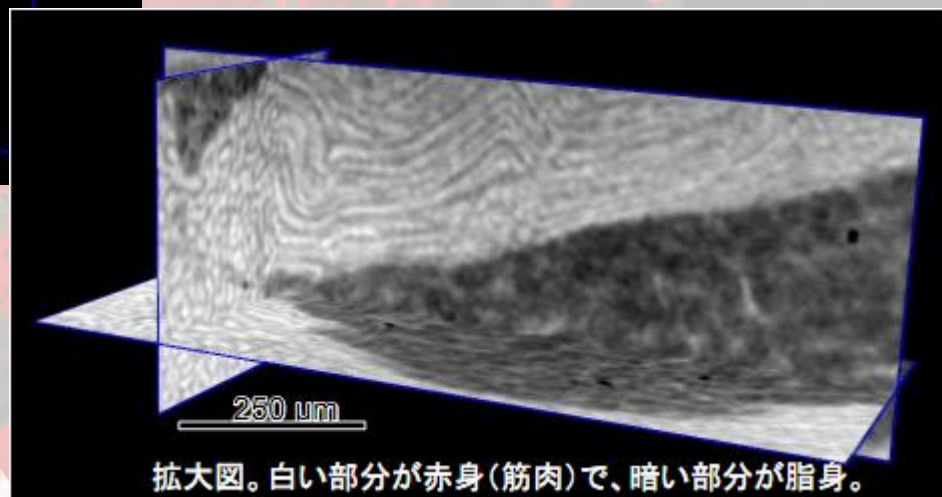
# 低温環境下でのX線CT







牛肉のX線CT結果の断面図表示。  
実際の牛肉と対応するように着色している。  
本来のX線CT像は白黒。



拡大図。白い部分が赤身(筋肉)で、暗い部分が脂身。

## 牛肉

冷凍して撮影しました。脂肪細胞や筋肉繊維まで見えます。

# リバーズエンジニアリング

- X線CTで撮影したポリマーブレンドの画像を光造形で模型化したもの。



# CT: 投影像→再構成像

- 詰まる所、CTは投影像から再構成像を“見つける”技術。
  - 投影像を再現する再構成像は何か？
  - データを再現するパラメータは何か？

# フィッティングの枠組みでCTを理解する

- データ（投影像の画素数）は1億個以上
- パラメータ（再構成像の画素数）は10億
- 問題点：
  - 規模が大きい。
  - パラメータ数がデータ数を超える。
  - 最小二乗法は使えない。

# “魔法級” 測定技術

- CONTIN
  - 動的光産卵 (DLS) の解析ソフトウェア
- X線反射率測定
  - Parallaxモデルを用いて、薄膜の厚み方向の密度プロファイルを算出
- タンパク質沈降係数
  - 超遠心分離の沈降係数カーブからタンパク質のサイズと形状を推定
- DAMMIN
  - タンパク質溶液散乱の1次元プロファイルから、タンパク質の3次元形状を推定
- 萩田先生のSAXS解析
  - 1次元のSAXSデータから、CB/ゴムの構造モデルを推定

# 共通するのは・・・

- 莫大な計算リソースをつぎ込んで、強引にモデル推定を行う。
- Massive Computing Analysis (MCA) と呼ぼう
- Maximum Entropy法、Monte Carlo / Simulated Annealing法、Genetic AlgorithmなどHeuristic（経験的）な反復フィッティングアルゴリズムを利用する。
- +適切な束縛条件（Projection on to Convex Set, POCS）

# CTにおけるチャレンジ

- **パラメータ > データ**
  - フィッティングの不安定化
  - 新たなアーティファクトの生成
  - ⇒強い安定化因子
  
- **莫大なデータ・パラメータ量**
  - DVD一枚分の情報をフィッティングで決定するというレベル。
  - 十分な高速化

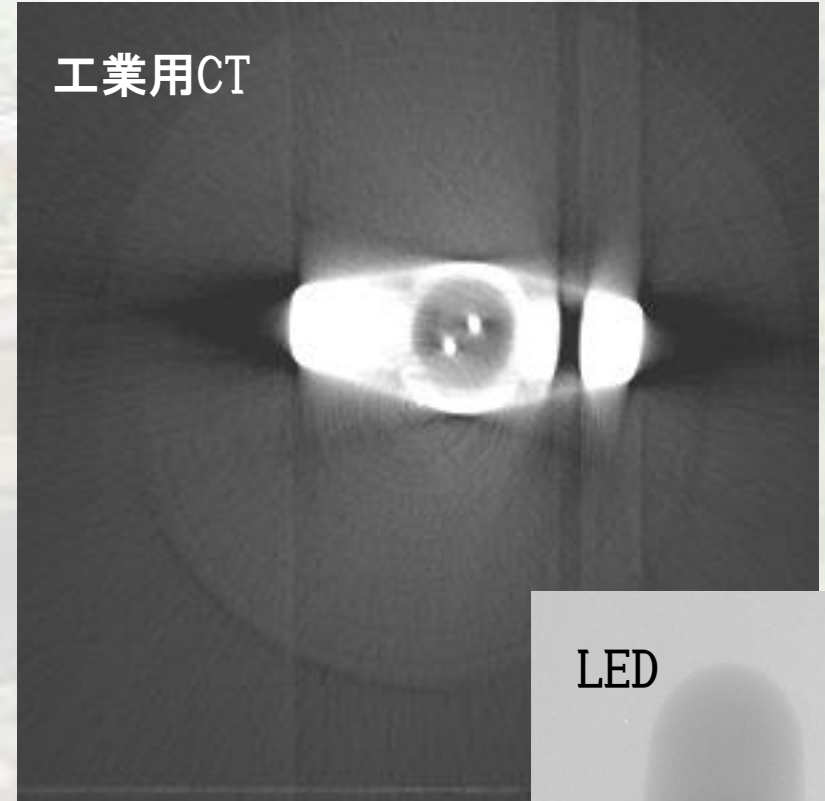
# メタルアーティファクト

歯科用CT

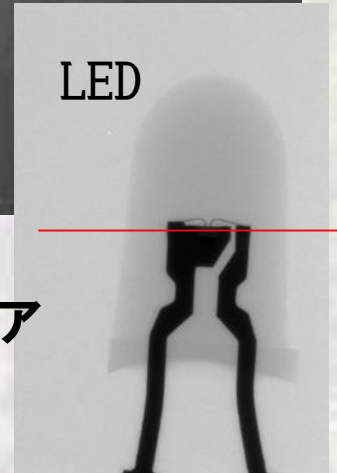


歯に冠があると、  
**X線が透過せず、**  
断面像が乱れる

工業用CT



LED

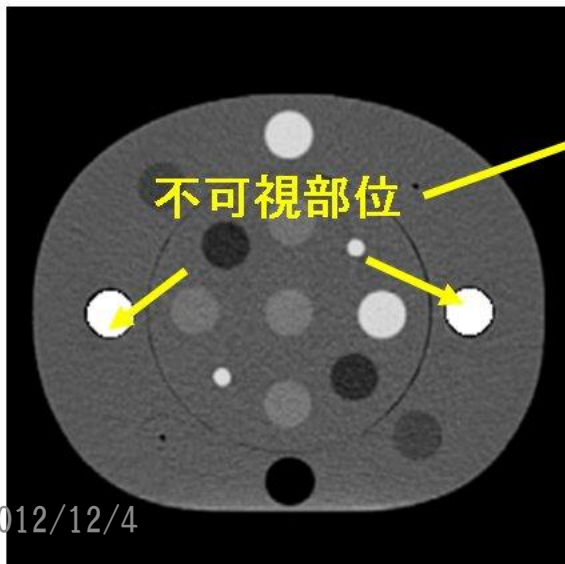
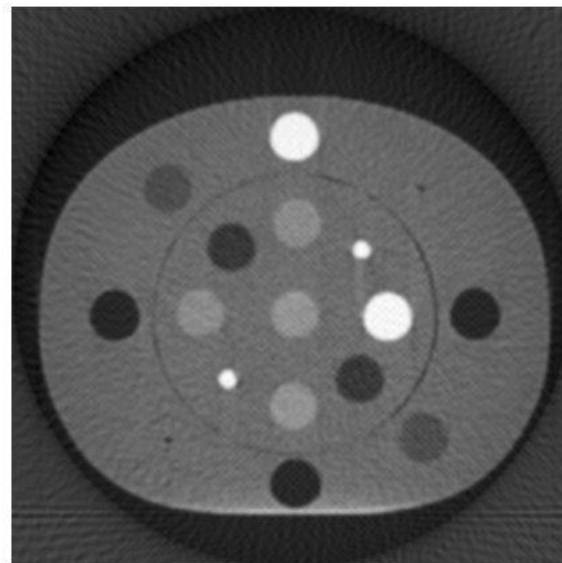
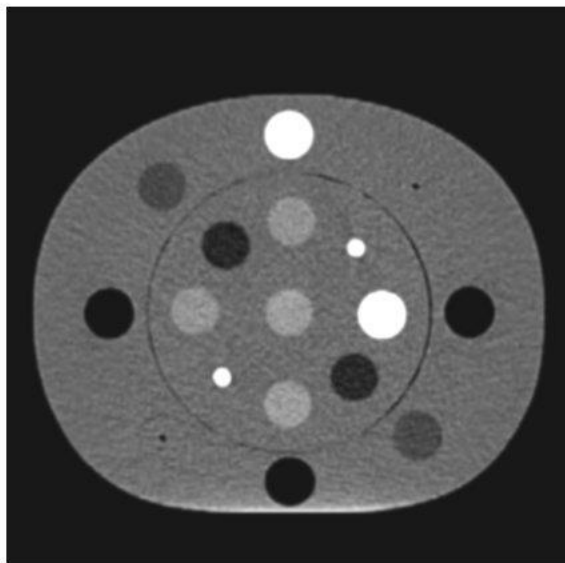


メタルアーティファクト  
によって、プラスチックのフードが見

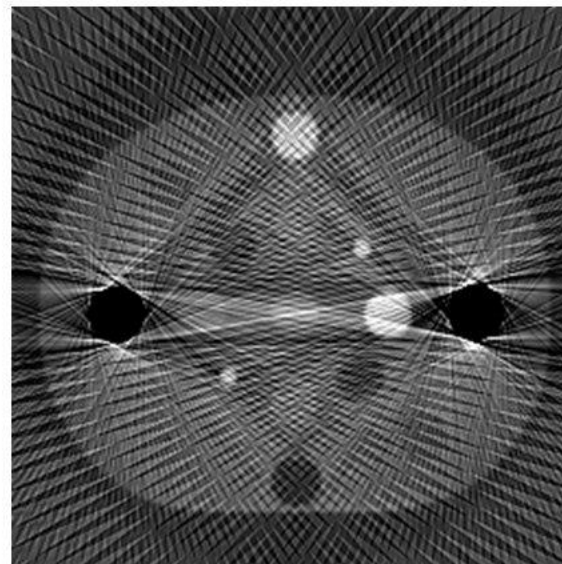
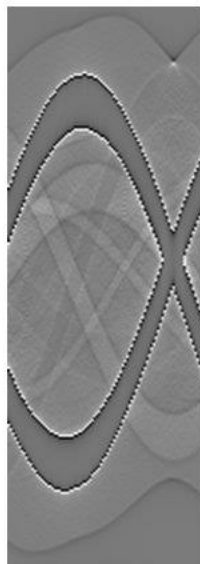


# 原因はFBP

投影  
(1)

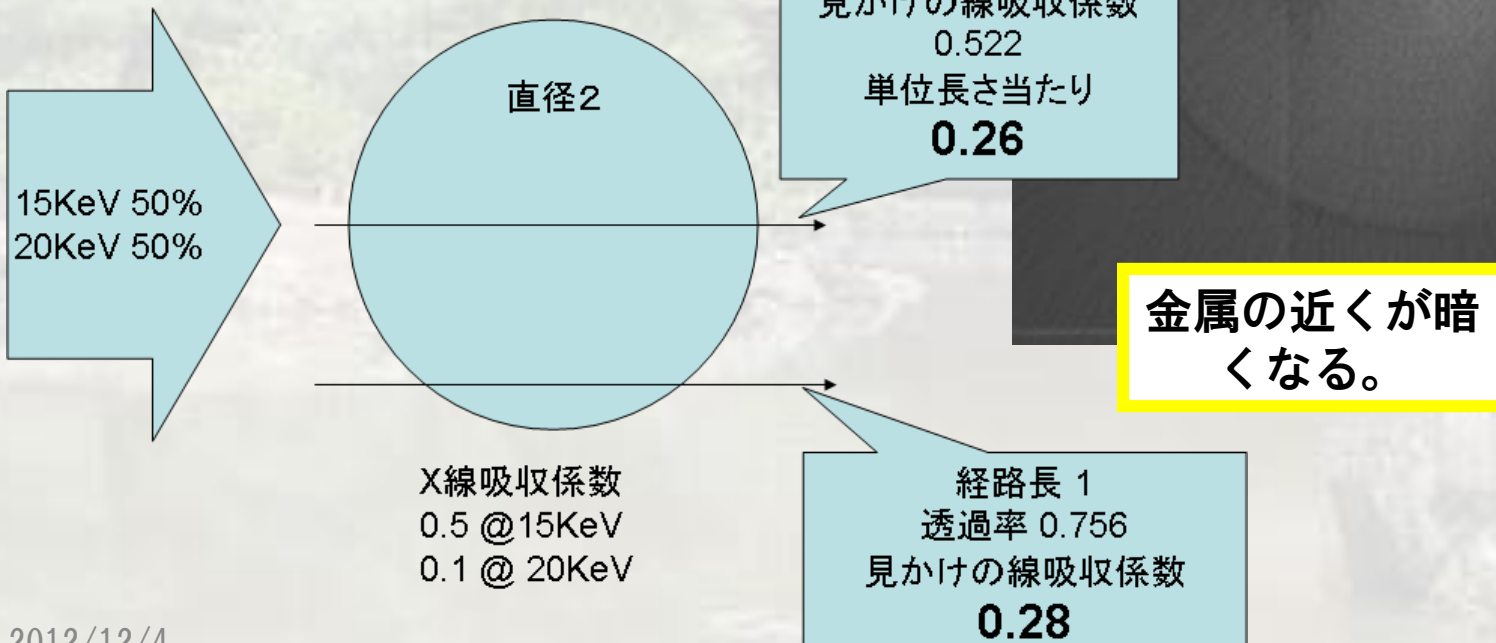


不可視部位



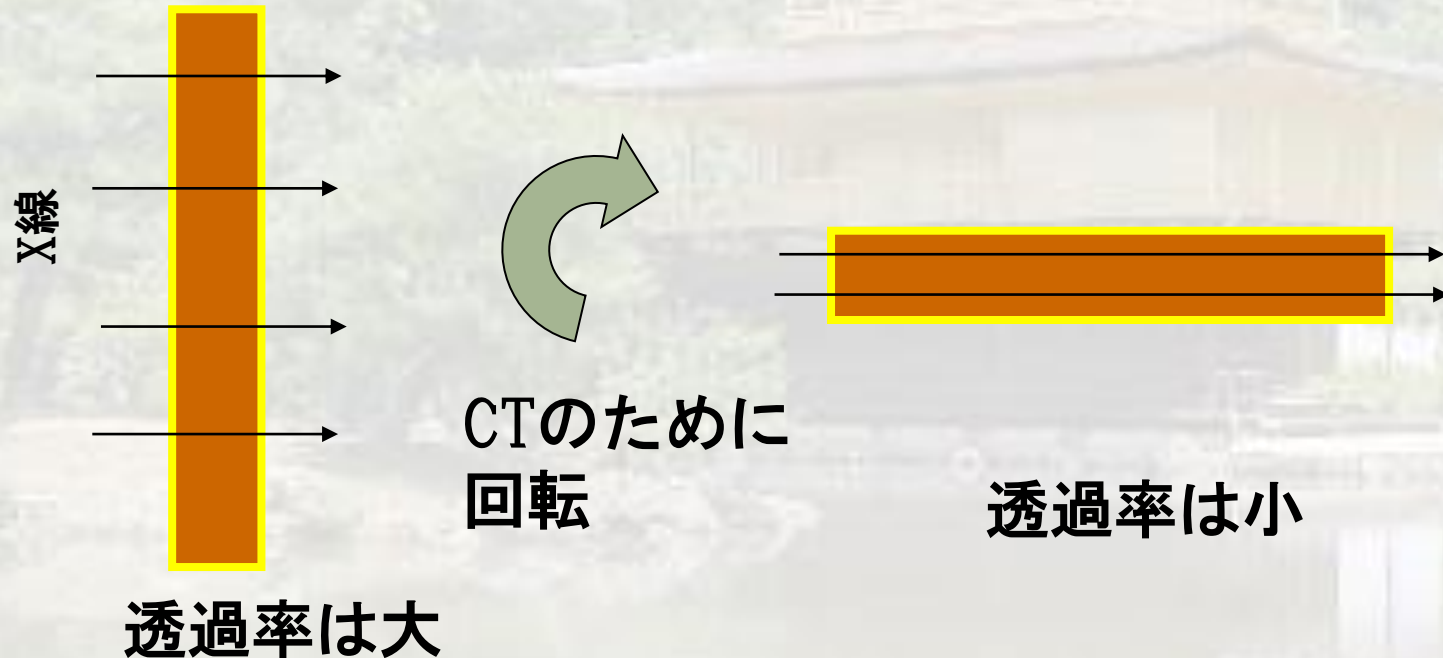
# ビームハードニング

- FBPはX線吸収係数が透過率に依存しないことを前提としている。が、通常条件（白色X線）では、そうではない。



# 板が苦手な理由

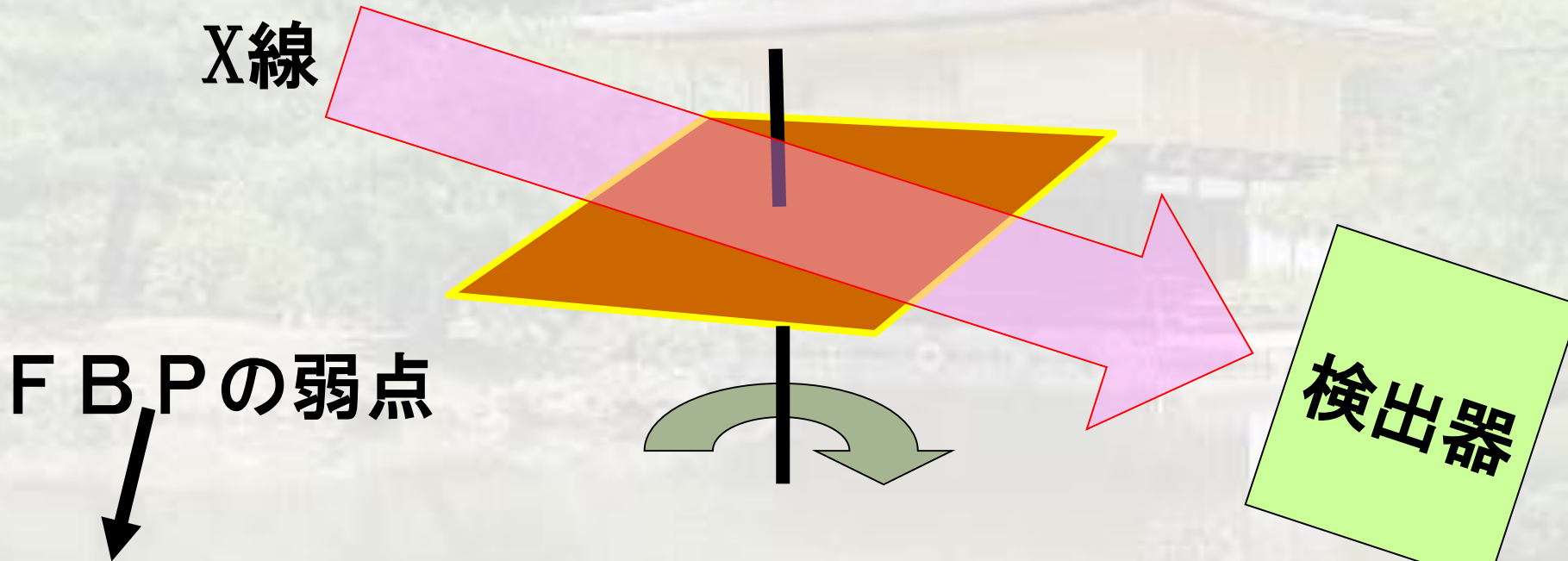
- CTはアスペクトが極端な被写体は苦手。
  - 体の輪切りはできるが、縦切りはできない。



**検出器のダイナミックレンジが厳しい！**

# 対策はあるが画質が悪い

- 斜めCT法：平板試料を、平板面内で回転させ、X線を斜めに入射して撮影する方法。



**不完全なデータセットしか得られず、画質の低下が著しい  
特にビームハードニングが顕著**

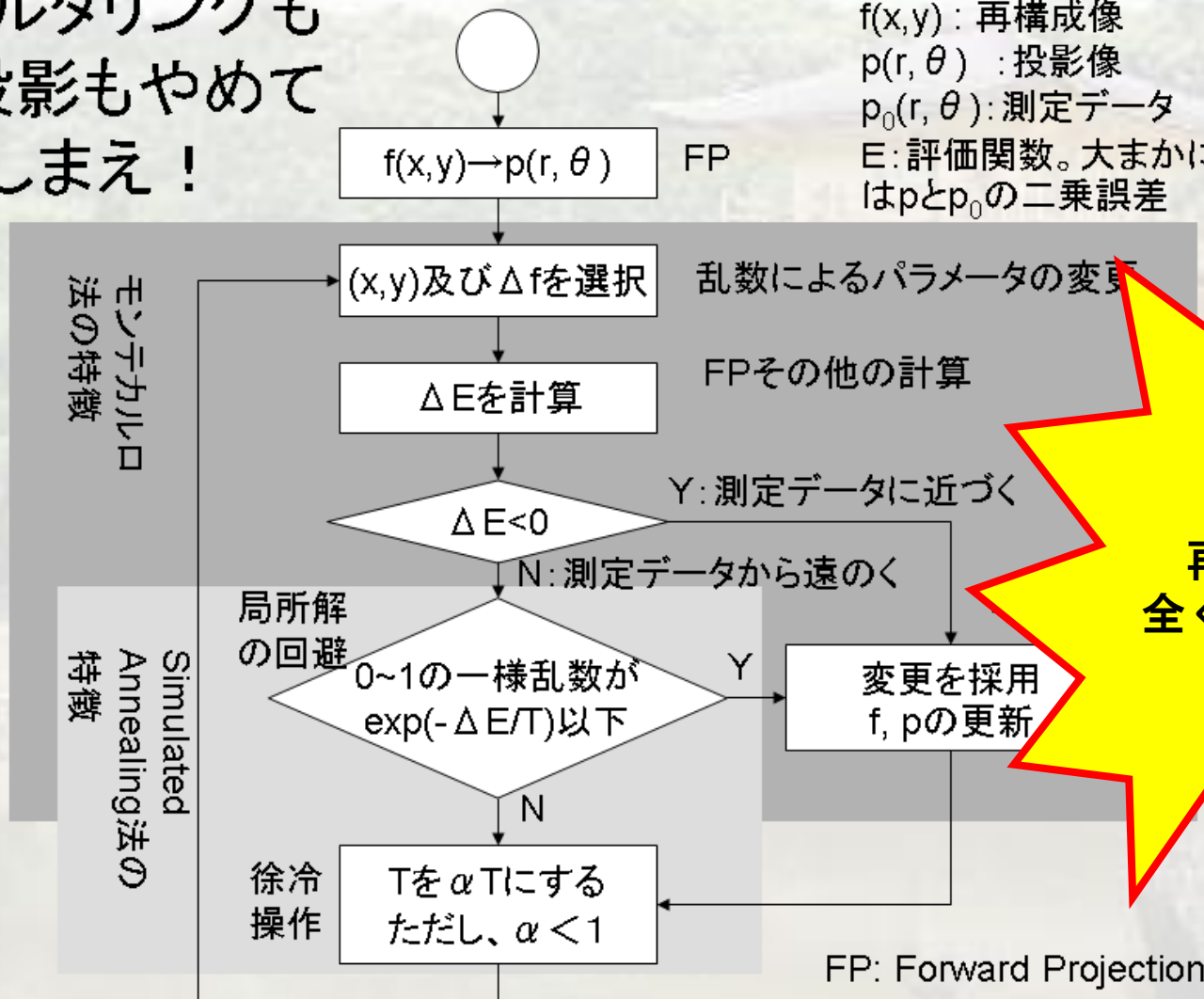
# 発想を転換し、FBPと決別する

フィルタリングも  
逆投影もやめて  
しまえ！

$f(x,y)$  : 再構成像  
 $p(r, \theta)$  : 投影像  
 $p_0(r, \theta)$  : 測定データ  
 $E$  : 評価関数。大まかには  $p$  と  $p_0$  の二乗誤差

**SACT**

Computerized Tomography based on Simulated Annealing



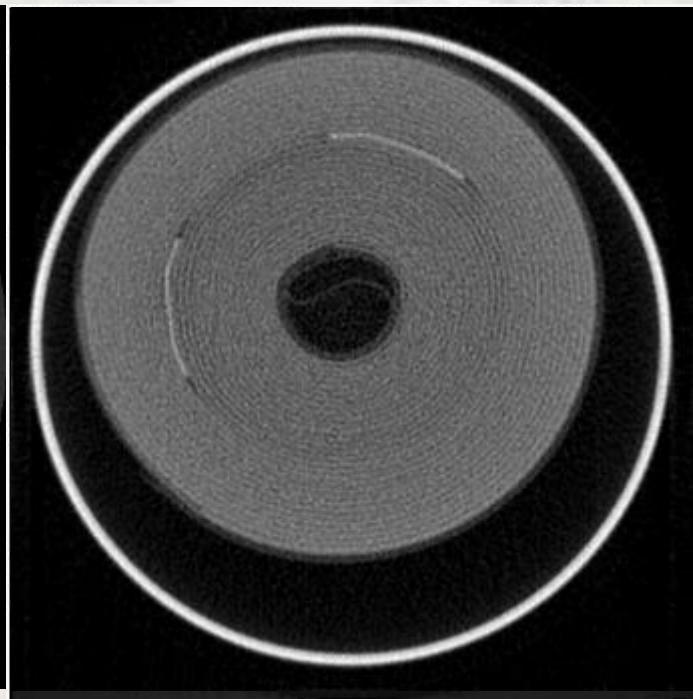
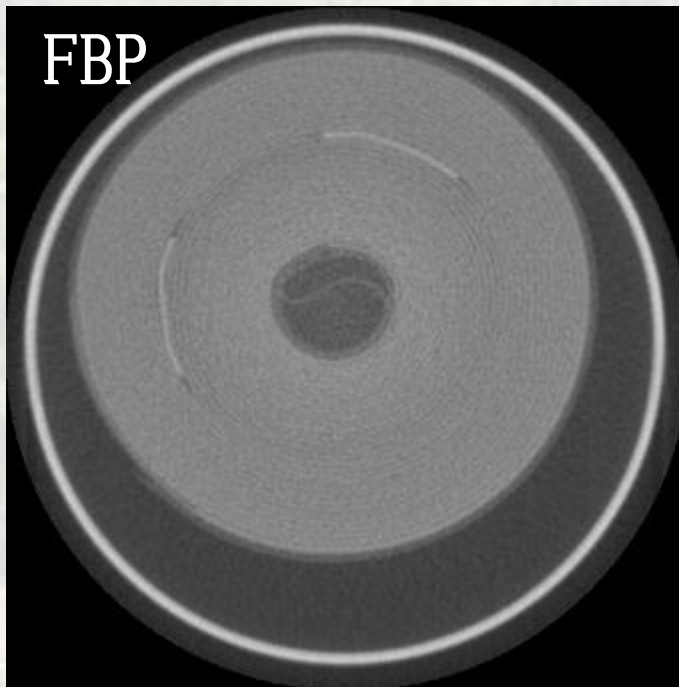
Forward  
Projection  
のみで  
再構成する  
全く新しい方法  
**SACT**

FP: Forward Projection

「サイコロを振る」なんてことで・・・

# ちゃんと再構成できる！

SACT



電解コンデンサの内部で、電極がグルグル巻きになっている。  
FBPでは電極の巻き具合は潰れて見えない。

しかも、「良い」画像が得られる！

# 「良い」画像を得る工夫

- 投影像の一致度  $H \equiv \sum_{r,\theta} [\{p(r,\theta) - p_0(r,\theta)\}^2]$

- 画像平滑化因子  $\sigma \equiv \sqrt{\langle f(x,y)^2 \rangle - \langle f(x,y) \rangle^2}$   
 - 自然な画像は滑らかであるべき

- 輝度値に関するエントロピー項  
 - 断面像の画素値に拡散効果を加える  

$$S \equiv \ln \frac{N!}{N_1! N_2! \cdots N_i! \cdots N_n!}$$

$$N_i: f(x,y) \text{の画素値のヒストグラム}$$

- トータルの仮想エネルギー関数  

$$E \equiv H - c_2 TS + c_1 \sigma$$
 T: 仮想温度

**熱力学を模した定式化**

# 「良い」画像とは何だったのか？

- 人間は、画像の良し悪しを「ノイズの量」「輪郭のボケ」を基準に判断している。

ノイズの量  
平滑化因子

輪郭のボケ  
エントロピー

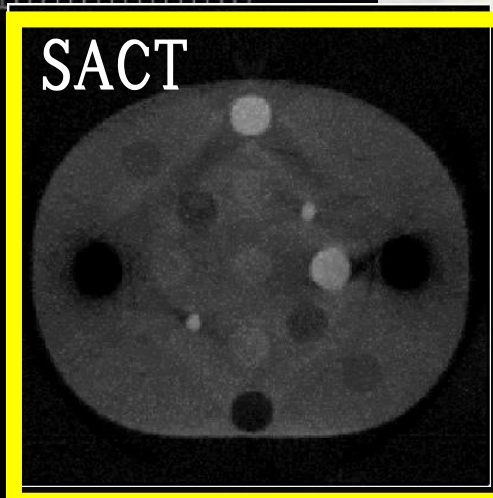
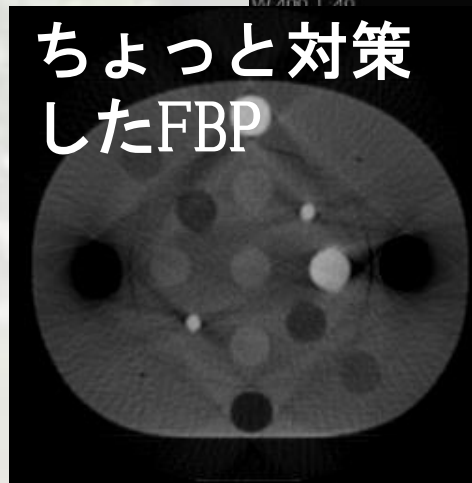
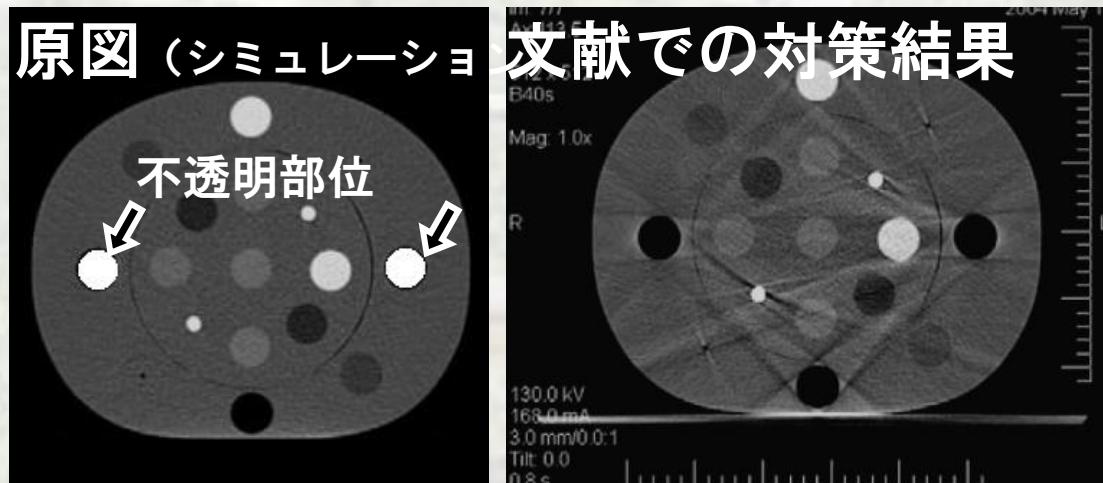
相反する項目の最適なバランスの探索

**熱力学（エントロピーとエンタルピー）に学んだ！**

他の技術との決定的な差になっている。



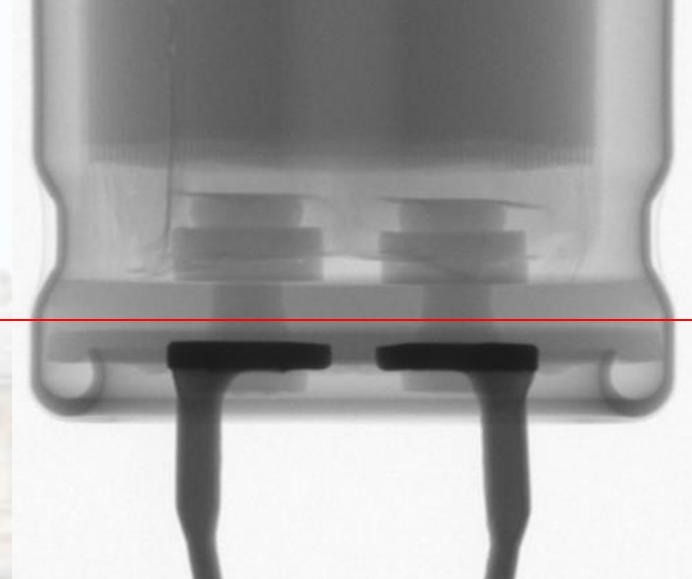
# メタルアーティファクト対策例



参考文献: M. Yazdia et al., Int. J. Radiation  
Oncology Biol. Phys. 62, 1224 (2005)

# 実データでの例

## 電解コンデンサの足の部分



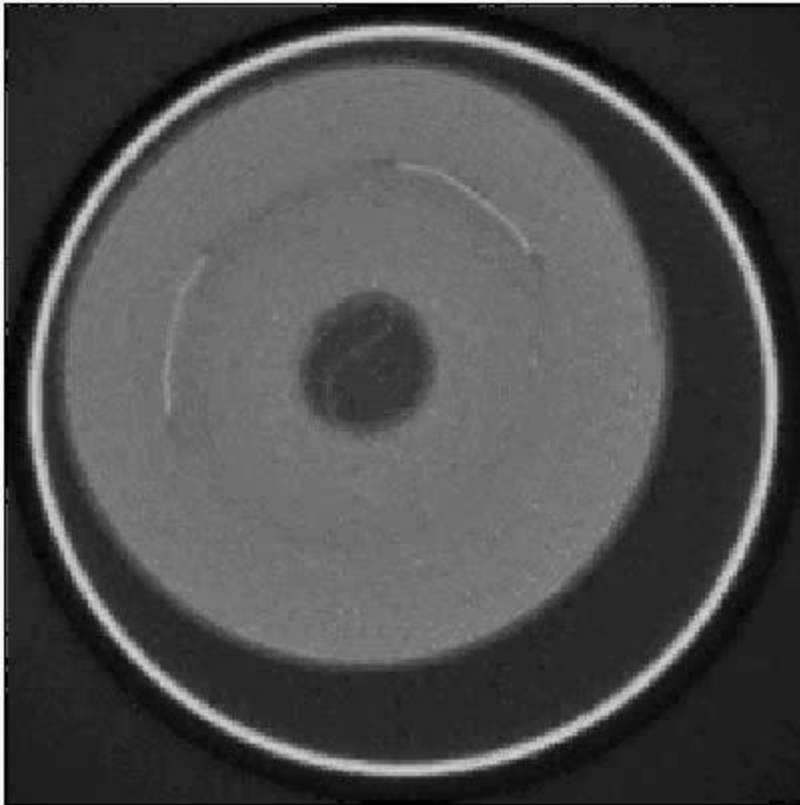
SACT

FBP

1mm

不可視域だけSACT

# 初期値はあったほうが良い

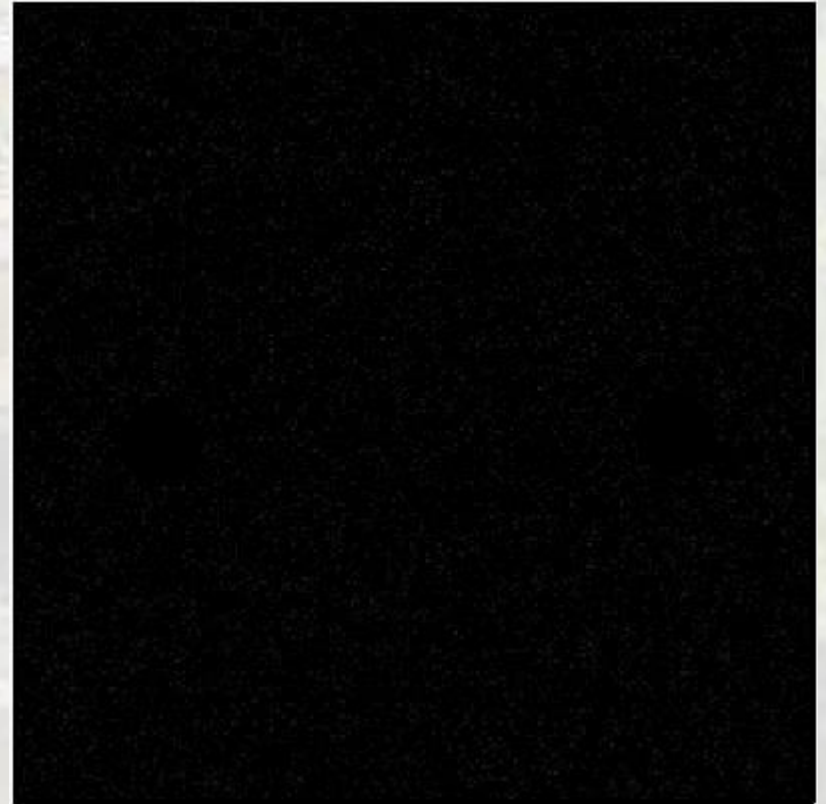
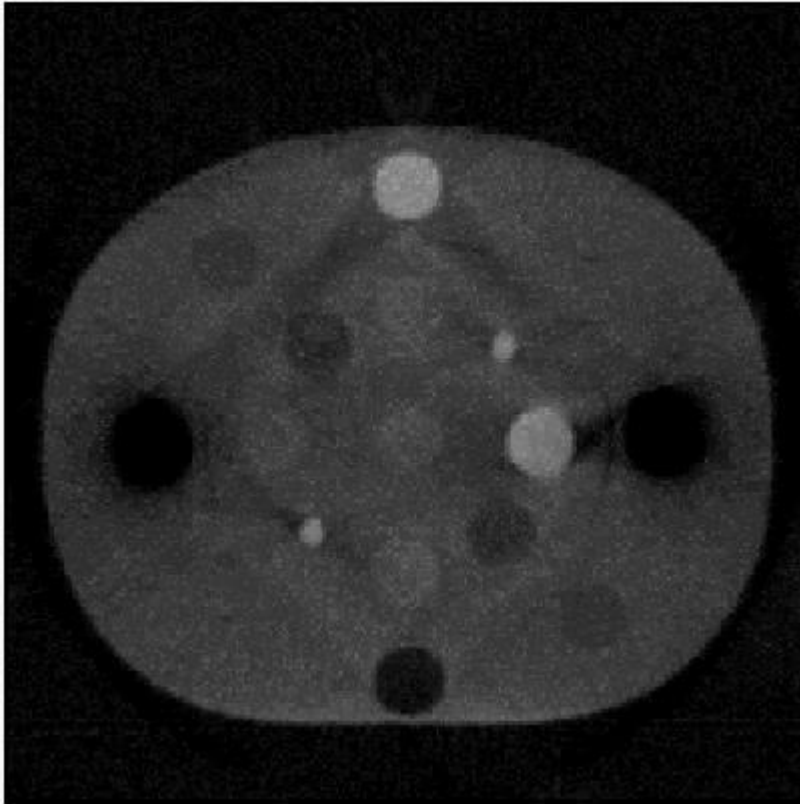


FBPの結果を初期値に使う

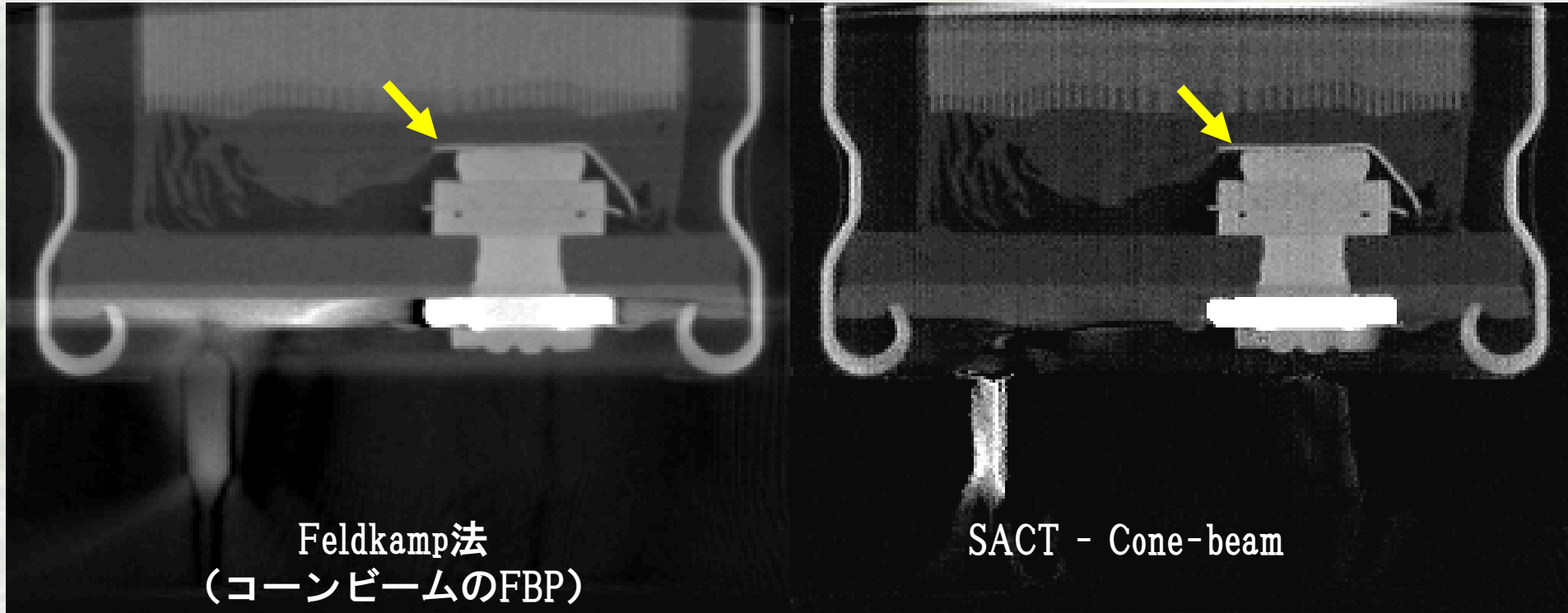


初期値なし

# 初期値はなくても良い



# コーンビームアーティファクト 対策例



3DのCTでは、ビームの開き角が原因となり、中央より上下に離れると、像がぼける。黄色矢印の平板の厚みを見ると、SACTの方がよりシャープで薄く、ビームの開き角によるアーティファクトが低減されていることがわかる。

# Missing-wedge対策例

原画



FBP

-60度~+60度  
2度ステップ



SACT

-60度~+60度  
2度ステップ



投影角度が制限  
されていること  
によるアーティ  
ファクト

(Missing-  
wedge) を改善し

2012/12/4

た。

FBP

-70度~+70度  
2度ステップ



SACT

-70度~+70度  
2度ステップ



# SACTの利点（FBPに比べて）

- 高コントラスト→**すべてのCTに効果**がある！
- 低アーティファクト→FBPにまつわるほとんど**すべてのアーティファクトで低減効果**が見られる。
- データの欠落に強い→コーンビームアーティファクト、メタルアーティファクト、Missing-wedge、斜めCT、被爆量の低減など。
- 多彩な光学系に対応できる→**従来にない測定法の可能性**。
- **欠点**：計算に時間がかかる→FBPの100倍以上必要となる。→計算機の性能向上により、数年で問題ではなくなるが、高速なアルゴリズムについての研究は常に行っている。

# エピローグ



# 革新的な技術は分野横断的にもたらされる

物理学者のCormackとコンピューター技師のHounsfieldが医学生理学賞を受賞したのはとても象徴的。

学際的（Interdisciplinary）研究は重要だ

けれどとっても難しい。

僕の場合は連敗中。

失敗：歯科用CT、気象CT

継続中：斜めCT、昆虫CT、昆虫琥珀

模索中：食品化学、組織検査

ヘルスサイエンスはどうか？

