

白色 X 線とエネルギー弁別型フotonカウン ティング検出器による Dual energy X-ray CT 撮像に関する研究

井村ゆき乃 森井久史 柳田拓人 青木徹

静岡大学 創造科学技術大学院
静岡大学 電子工学研究所

研究の背景：エネルギー情報を利用した X 線 CT

X 線 CT 撮像技術の応用分野 . . . 医療・セキュリティ・非破壊検査

Dual Energy X-ray CT (DXCT) . . . 異なる 2 つ以上のエネルギーの X 線 を用い
材質ごとに透過性が異なることを利用し材料識別

医療分野

生体が対象物 = 軽い元素で構成
想定される元素が限定



応用へ向けた研究

セキュリティ、非破壊検査

対象物が未知 広い範囲の元素



材料識別に課題

白色 X 線とエネルギー弁別型フォトンカウンティング検出器による DXCT

. . . 白色 X 線 (40 ~ 150 keV) で撮像し、検出器でエネルギー弁別
任意のエネルギーの組み合わせが選択可能



対象物が多岐に渡るセキュリティ・非破壊検査分野での応用が期待できる

DXCTによる材料識別

X線のエネルギー E における線減弱係数

$$\mu(E, Z) = \rho_e [Z^4 F(E, Z) + G(E, Z)]$$

ρ_e : 電子密度 [cm^{-3}]

Z : 実効原子番号

F : 光電吸収断面積 [cm^2]

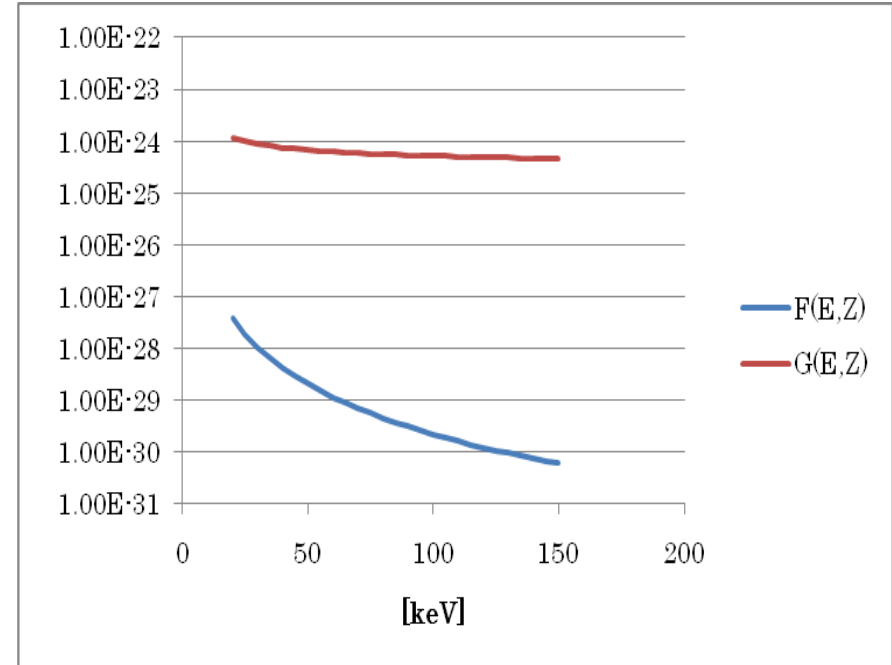
G : 散乱断面積 [cm^2]

エネルギー E_1 、 E_2 における線減弱係数を測定することで、次式より実効原子番号 Z_{eff} を得る。

$$Z_{\text{eff}}^4 = \frac{\mu(E_2)G(E_1, Z) - \mu(E_1)G(E_2, Z)}{\mu(E_1)F(E_2, Z) - \mu(E_2)F(E_1, Z)}$$

Z_{eff} を用い電子密度 ρ_e を算出する。

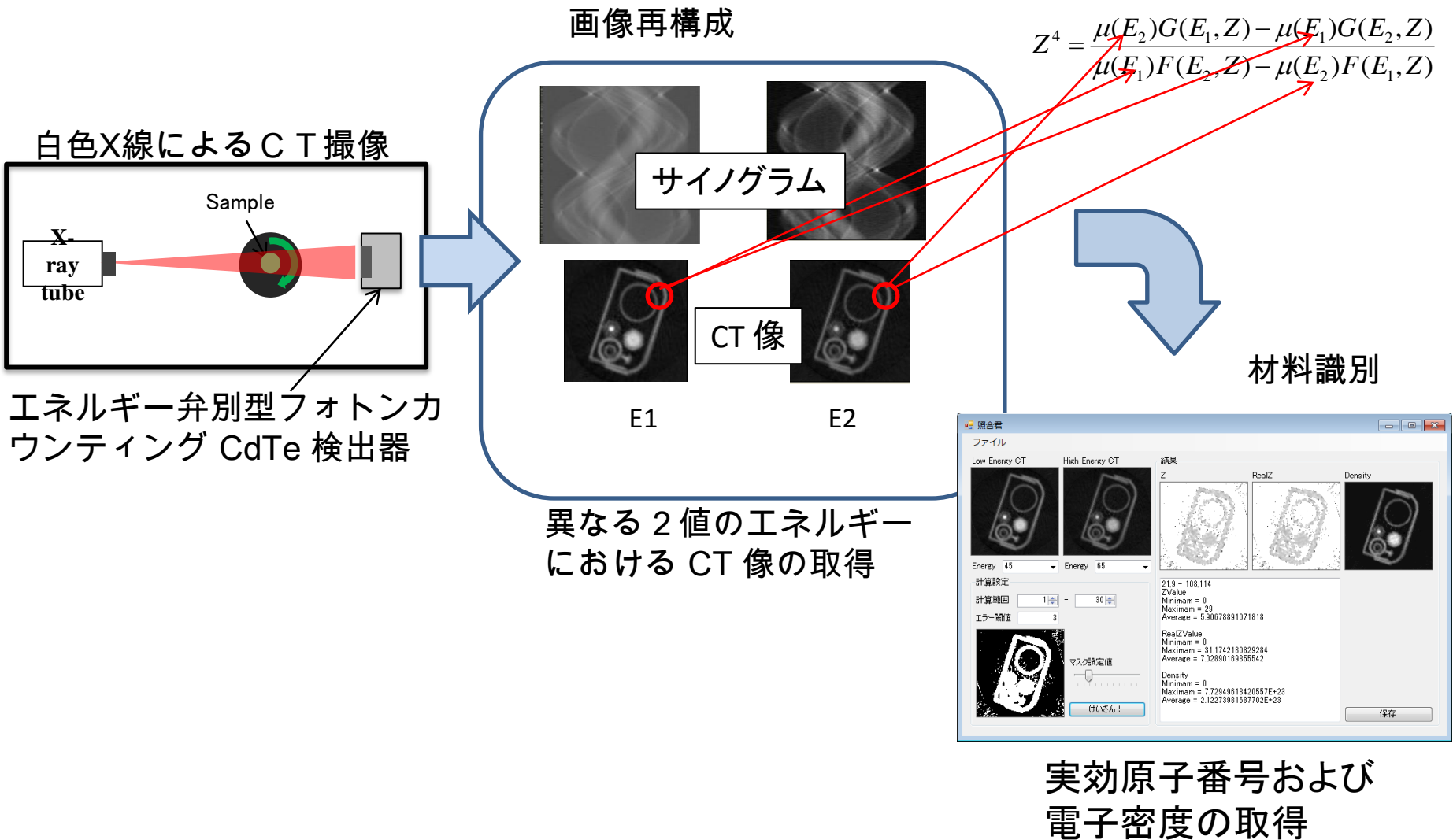
$$\rho_e = \frac{\mu(E_1)F(E_2, Z) - \mu(E_2)F(E_1, Z)}{F(E_2, Z)G(E_1, Z) - F(E_1, Z)G(E_2, Z)}$$



アルミニウム (Z = 13) の光電吸収、散乱断面積

$\mu(E)$ を正確に取得することが、実効原子番号および電子密度の精度向上に不可欠

DXCT による実効原子番号及び電子密度の測定



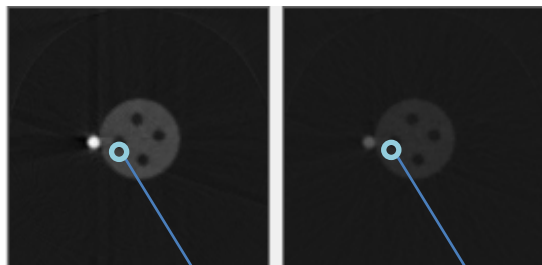
CT 値での材料識別

材料識別(例)

CT 像

40 keV

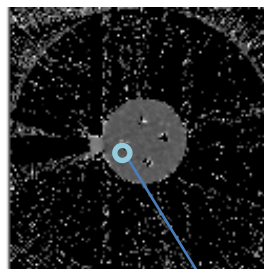
80 keV



1.7986

0.7144

実効原子番号分布



11.6

Al (13) の線減弱係数 40keV 1.535, 80 keV 0.5449

CT 値 \neq 線減弱係数

↓

CT値から線減弱係数のエネルギー分布を取得するために、CT値に影響する要素を特定し、線減弱係数から乖離するメカニズムを解明

本研究の目的

CT 値に影響する要素

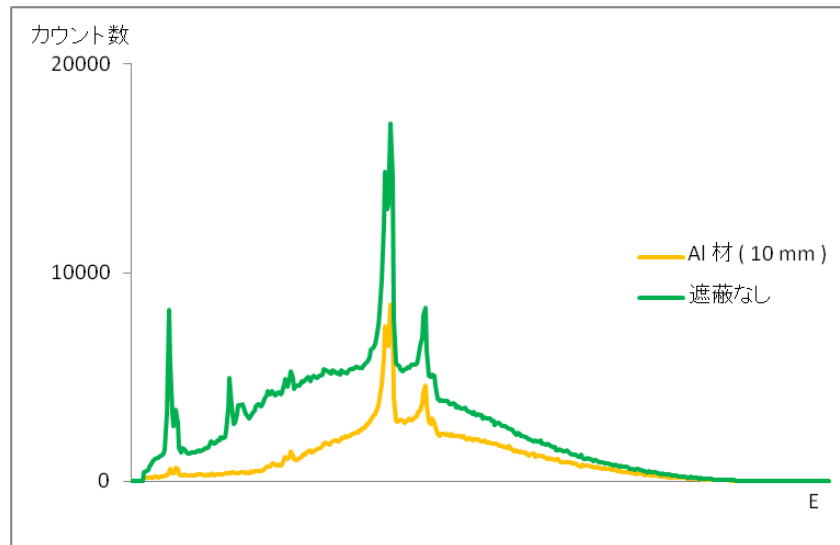
- ・ ビームハードニング
- ・ CdTe 検出器のエネルギー分解能
- ・ スペクトル分割のエネルギー幅
- ・ 画像再構成におけるフィルタ
- ・ 検出素子の検出効率のばらつき (ラインセンサ使用時)

目 的

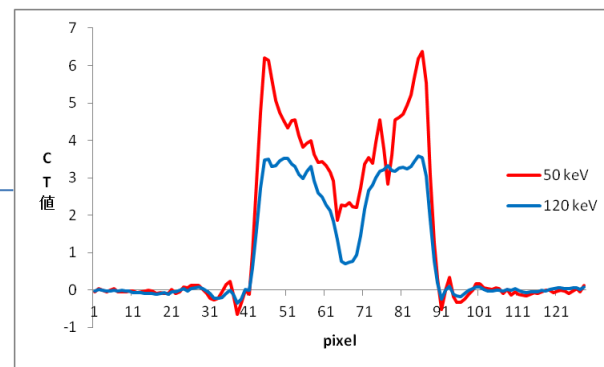
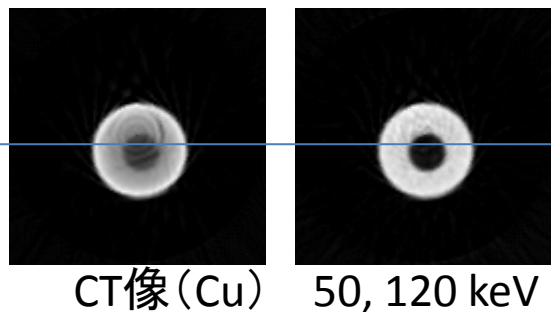
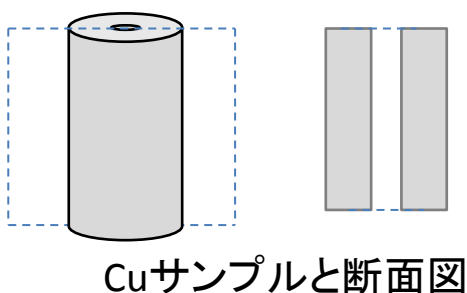
第一世代CTによるビームハードニングの影響の検出と、
サイングラム補正による影響の除去方法の検討

ビームハードニングの影響

- ・ 低エネルギー X 線は高エネルギー X 線に比べより被写体に遮られ、線量が減る(線質硬化)
- ・ 線質硬化により X 線の透過距離と減弱との間に線形性が保たれず線減弱係数が正しく取得できない
- ・ 低エネルギーの X 線での CT 像で被写体内部の CT 値が下がる
- ・ 材料識別を行うためには、低エネルギーでの CT 像が必要



➡ 低エネルギーのCT像からビームハードニングの影響を除去

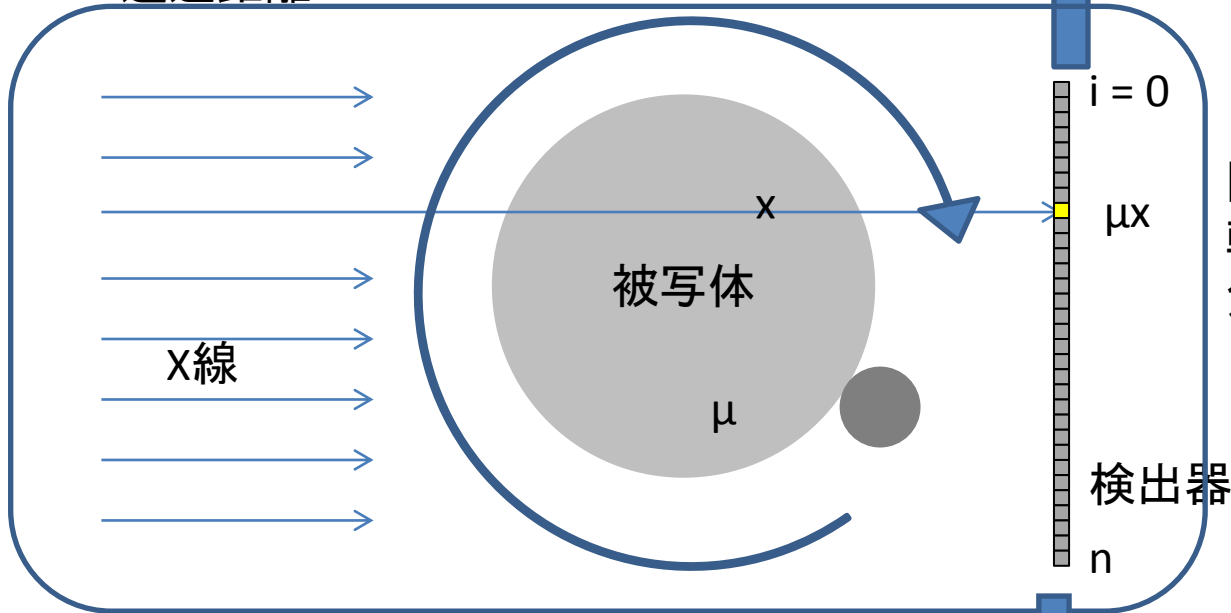


Cuサンプルのエネルギー別CT値

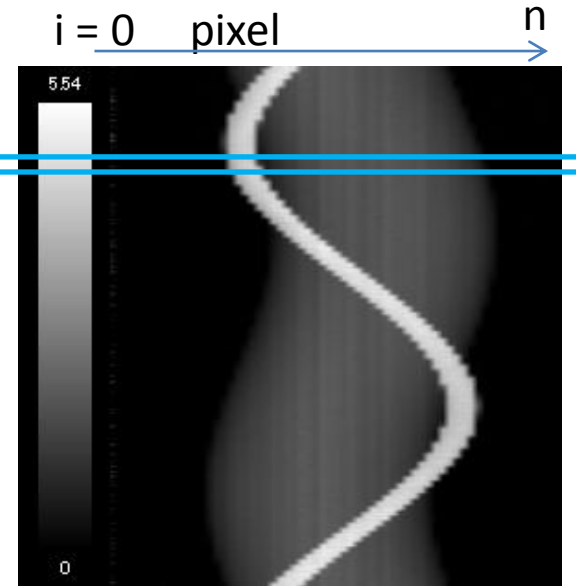
サイノグラム内の減弱と透過距離

μ : 被写体の線減弱係数

x : 透過距離



X線CTの概略



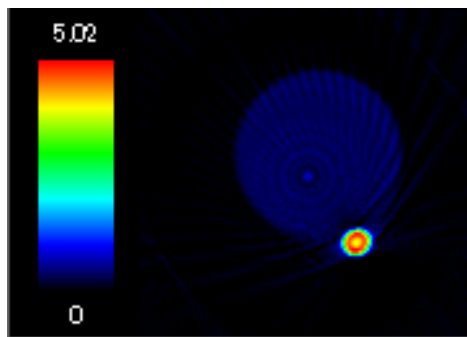
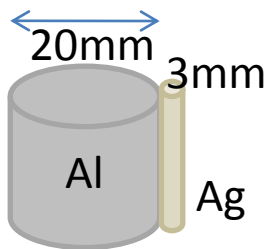
サイノグラム

合計

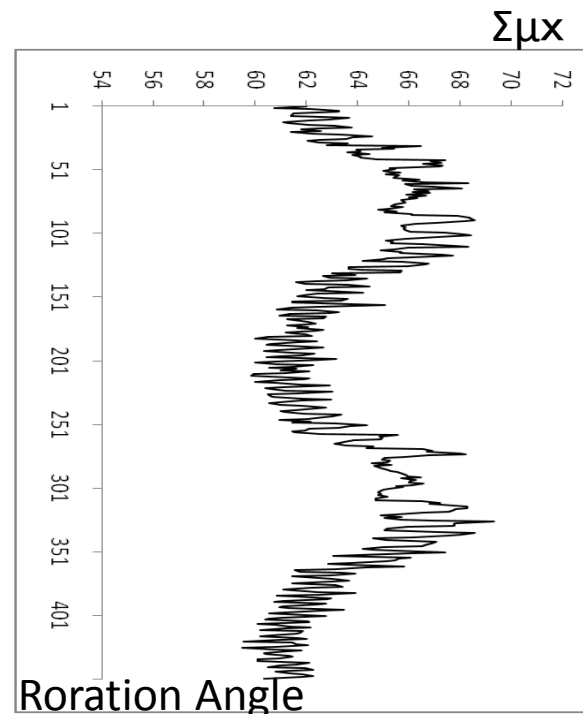
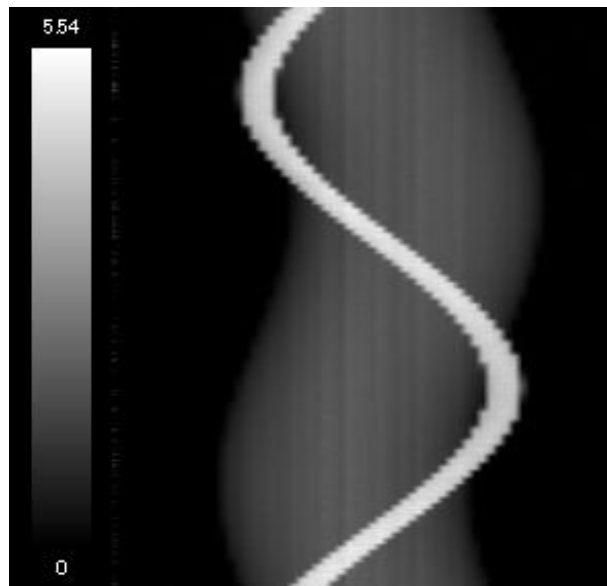
$$\sum_{i=0}^n \mu x$$

$\Sigma \mu x$ は、角度に依存せず一定

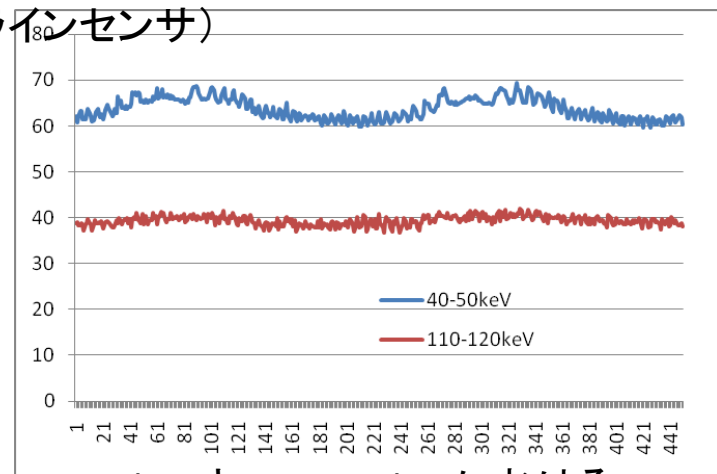
サイノグラムに現れるビームハードニング



(上) サンプル: アルミニウムと銀の円柱 (下) CT像 (64ch ラインセンサ)



40keV サイノグラム (左) と、 $\Sigma\mu x$ のグラフ (右)

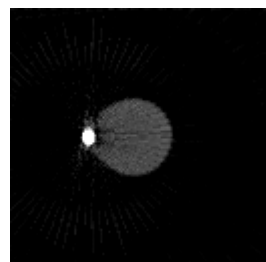
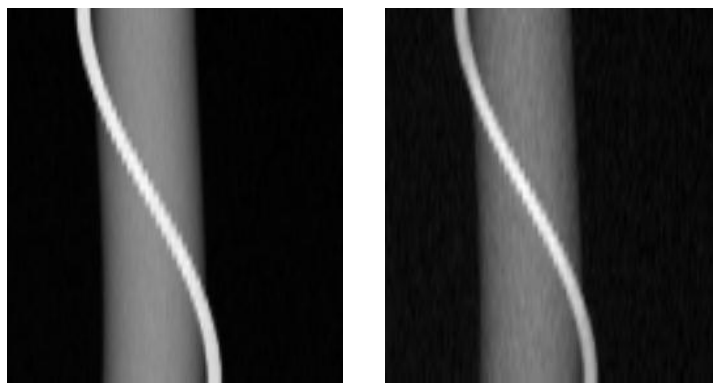
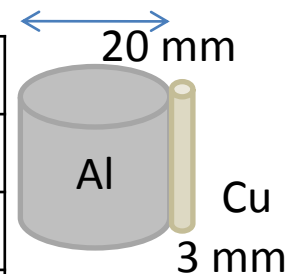


40-50keV と 110-120keV における $\Sigma\mu x$

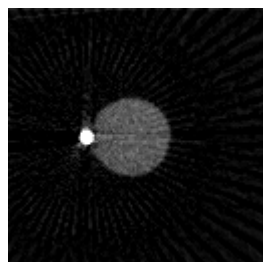
同時に取得できる各エネルギーのサイノグラムのうち、低エネルギー側のサイノグラムのみ、 $\Sigma\mu x$ の値に大小がみられる。

ビームハードニングの CT 像への影響

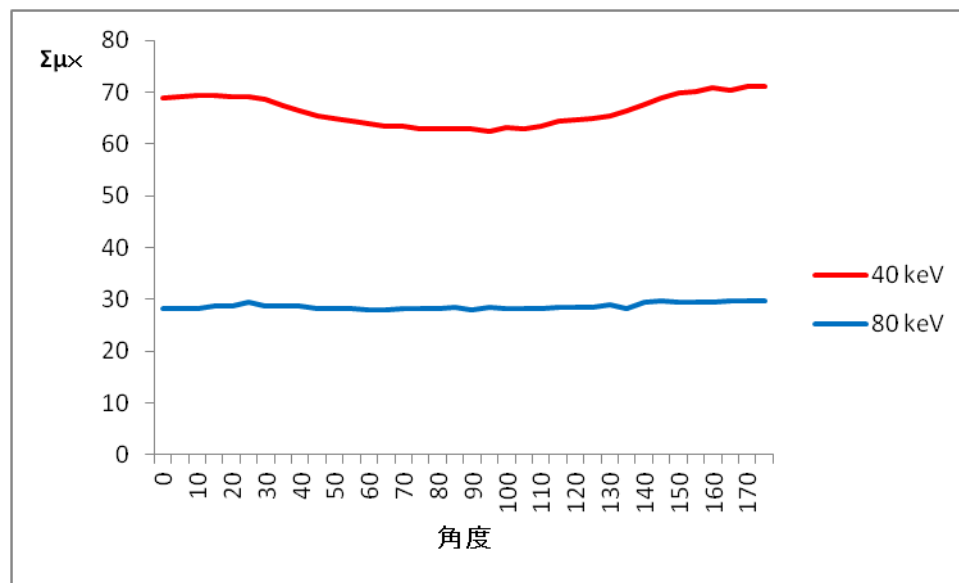
検出器	フォトンカウンティング型CdTe検出器
サンプル	アルミニウム柱(Φ=20mm)、銅柱(Φ=3mm)
X線	マイクロフォーカスX線源、150keV、40μA
回転角度	180°
画像再構成	FBP法



40 keV



80 keV

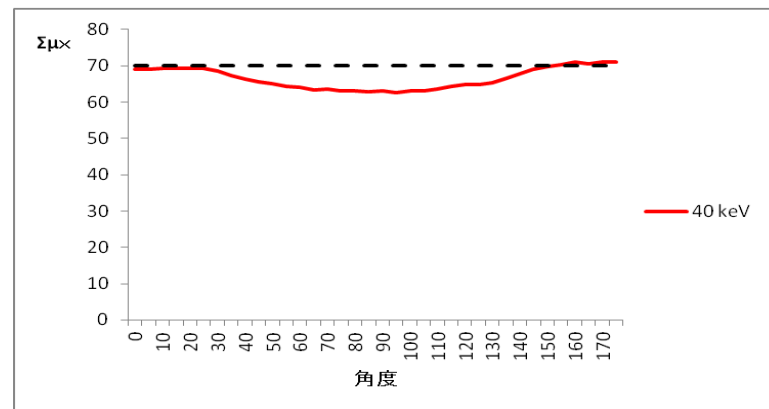


40 keVおよび 80 keV における $\Sigma\mu x$

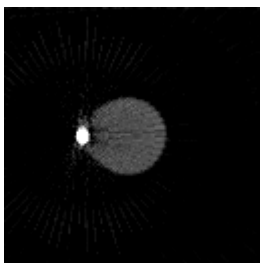
サイノグラム補正方法の検討

補正方法

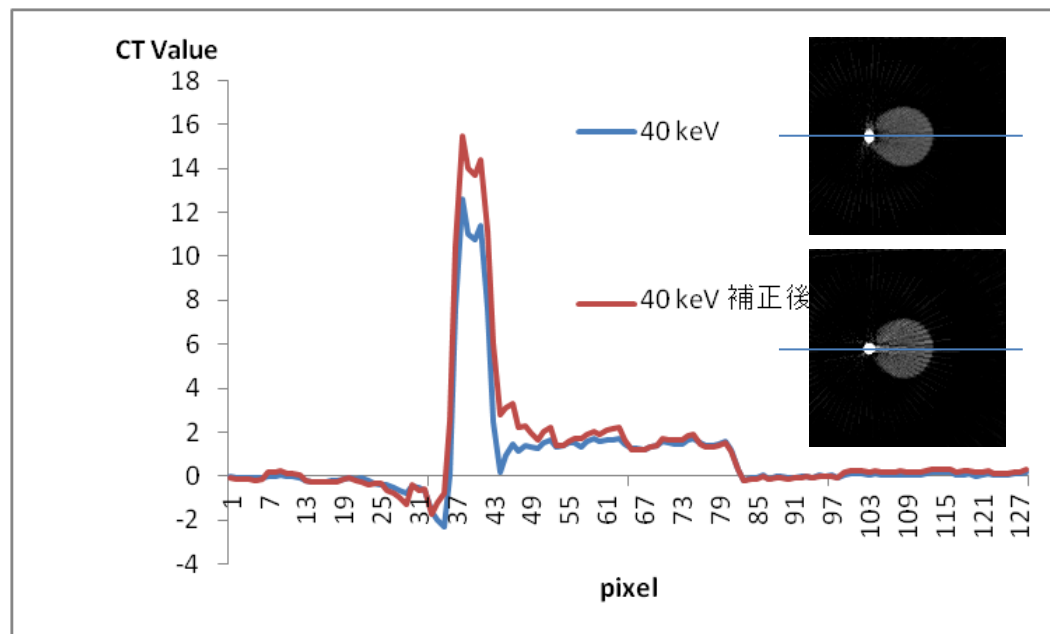
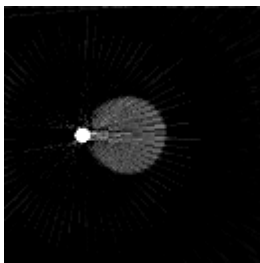
低エネルギー(40 keV)サイノグラムにおいて、
減弱の大きい部分を銅の透過分として特定
 $\Sigma\mu x$ の差分を配分



通常CT



サイノグラム
補正後



まとめ

- ・ 白色 X 線で撮像した CT 像の低エネルギーと高エネルギーにおけるサイノグラム $\Sigma\mu x$ を比較することで、ビームハードニングによる CT 値への影響の検出が可能である。
- ・ サイノグラムに現れる $\Sigma\mu x$ の矛盾を補正することで、ビームハードニングによる CT 値への影響を減少させ CT 値を線減弱係数へ近づけることができた。

今後の課題

- ・ 補正の適用方法の検証
- ・ より複雑な対象物に適用するための方法