

デュアルエネルギーX線CTによる Z_{eff} イメージングの検討

米山 明男¹⁾, 馬場 理香¹⁾, 隅谷 和嗣²⁾, 平井 康晴²⁾

¹⁾ (株) 日立製作所中央研究所, ²⁾ 九州シンクロトロン光研究センター

X線イメージング法は物体に対するX線の高い透過能を利用して、被写体内部を非破壊に観察する方法である。X線の発見以来、レントゲン及びX線CTとして、医療から製品検査にわたる幅広い分野で利用されている。しかし、X線が被写体を透過する際に生じた強度の変化(線吸収係数)を単純に検出しているため、元素の種類や化学状態などに関する情報を得ることはできなかった。この問題を解決する方法として、異なるエネルギーのX線で測定した線吸収係数の比から実効的な原子番号元素(Z_{eff})に関する情報を抽出するデュアルエネルギーX線CTが近年注目されている。本研究では、結晶分光器で分光した純度の高い単色X線を用いて、本法の有効性に関して原理的な検証を行った。

線吸収係数は、被写体の密度と質量吸収係数の積で与えられる。異なるエネルギーのX線に対して、密度は一定であるのに対して、質量吸収係数は異なる値をとり、さらに、元素毎にその変化の比率が異なる。図1は各元素におけるエネルギー20 keVと30 keVの線吸収係数の比 α を計算した結果である。この結果から、原子番号15(リン)以下の領域において、比 α は原子番号に大きく依存し、かつ1:1に対応していることがわかる。したがって、比 α から被写体を構成する元素(化合物であれば実効原子番号)を推定することが可能になる。図2はBLO7において上記2つのエネルギーのX線で、アルミ、アクリル、水、及び人工骨から構成されたファントムを測定し、得られた断面像についてその比を計算した結果である。X線画像検出器にはPilatus 100Kを用いた。各領域で異なる値を示し、かつ理論的な実効原子番号とほぼ一致していることがわかる。以上から、デュアルエネルギーX線CTにより、 Z_{eff} イメージングが可能であることがわかった。

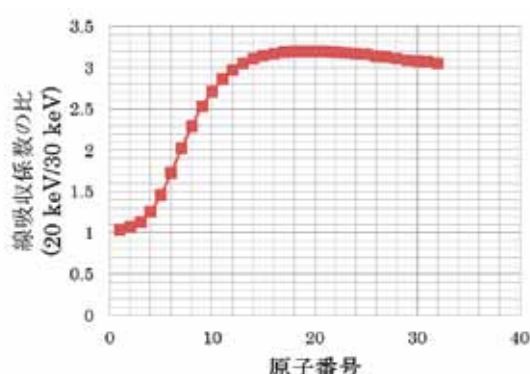


図1 各元素における線吸収係数の比

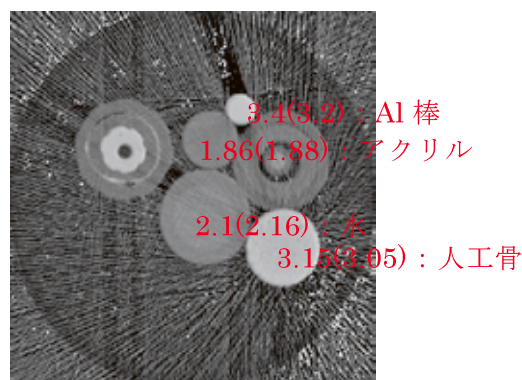


図2 ファントムのスライス断面像
(比 α を画像化)

デュアルエネルギーX線CTによる Zeffイメージング法の検討

(株)日立製作所中央研究所
米山 明男、馬場 理香
九州シンクロトロン光研究センター
舘谷 和嗣、平井 康晴

1. 物質によるX線の吸収



厚さ t と線吸収係数 μ は同時に求めることができない。

→ X線CT: μ の空間分布を測定

→ $\mu = \rho \times \text{質量吸収係数}$

密度の算出や物質の同定ができない。

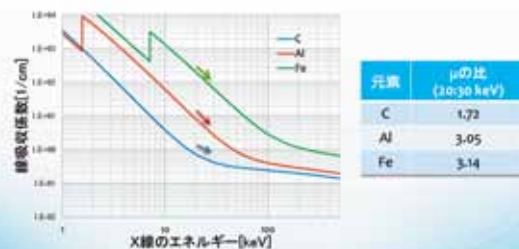
2. デュアルエネルギーX線撮像 —異なるエネルギーのX線で撮像—



両辺をそれぞれ割ると、厚さ t が打ち消されて、線吸収係数 μ の比のみが残る。

$$\frac{\mu_{1,t}}{\mu_{2,t}} = \frac{\ln\left(\frac{I_{0,1}}{I_1}\right)}{\ln\left(\frac{I_{0,2}}{I_2}\right)}$$

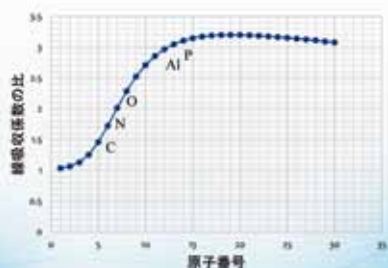
3. 各エネルギーのX線に対する物質の線吸収係数



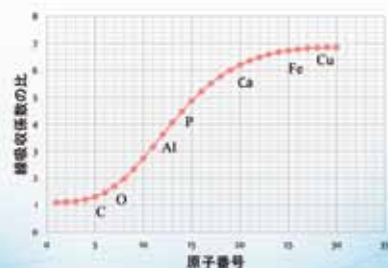
元素によって吸収係数の比 (変化する) が異なる。

→ 比から元素を推定することができる。

4. 原子番号と線吸収係数の比 I



5. 原子番号と線吸収係数の比 II



6. 実効原子番号 (Effective Atomic Number; Z_{eff})

化合物や混合物を単一の元素と見なしたとき、X線に対する平均的な原子番号¹⁾

$$Z_{eff} = \sqrt[2.94]{f_1(Z_1)^{2.94} + f_2(Z_2)^{2.94} + f_3(Z_3)^{2.94} + \dots}$$

f_n : n 番目の元素の電子数

全ての元素の電子数

Z_n : n 番目の元素の原子番号

例) H_2O

H: $f_1=2/10$, $Z_1=1$

O: $f_2=8/10$, $Z_2=8$

$$Z_{eff} = \sqrt[2.94]{0.2 \times 1^{2.94} + 0.8 \times 8^{2.94}} = 7.42$$

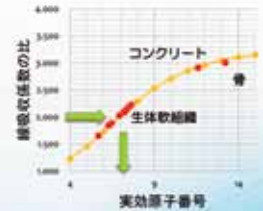
水は原子番号7.4の単一元素と同じ吸収を示す。

¹⁾W. Spinks, British Journal of Radiology, 16, 52-63 (1943)

HITACHI
Inspiring the World

7. 生体等の実効原子番号と線吸収係数の比

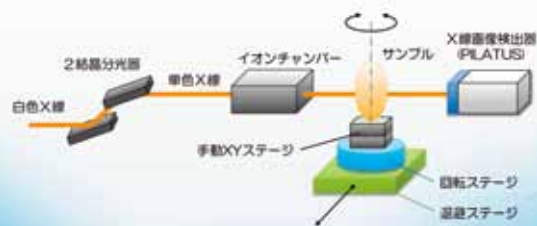
物質	Z_{eff}	μ の比
脂肪組織	6.391	1.841
乳房組織	6.932	2.027
脳組織	7.642	2.325
血液	7.443	2.167
眼珠	7.315	2.104
肺組織	7.485	2.180
筋肉組織	7.443	2.169
軟組織	7.434	2.165
骨	13.325	3.01
H_2O	7.417	2.157
PMMA	6.464	1.884
ポリスチレン	5.693	1.653
コンクリート	11.606	2.910



線吸収係数の比から実効原子番号 Z_{eff} を求めることができる!!!

HITACHI
Inspiring the World

8. BL07におけるイメージングシステム



HITACHI
Inspiring the World

9. 画像検出器「PILATUS 100K」の特徴



主な仕様

有効視野	83 × 33 mm ²
ピクセルサイズ	172 μm角
ピクセル数	487 × 195 pixels
ダイナミックレンジ	50 bits
転送レート	300 fps

軽元素と重元素から構成された複合材料でも、X線の飽和や露光不足を起こすことなく正確に強度を測定可能。

HITACHI
Inspiring the World

10. 測定条件とファントム

主な測定条件

X線エネルギー	15, 20, 25, 30 keV
CTの投影数	500枚/360度 (0.72度刻み)
露光時間	1秒: 15, 20 keV 3秒: 25, 30 keV



ファントムの外観

HITACHI
Inspiring the World

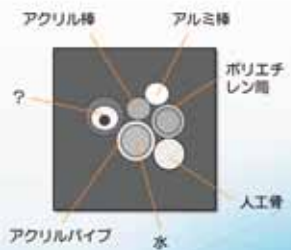
11. 測定結果 I エネルギー毎の断面像



20 keV



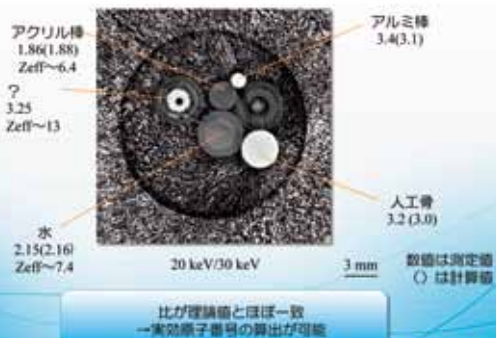
30 keV



ファントム断面模式図

HITACHI
Inspiring the World

12. 断面像の比の算出結果と計算値の比較



まとめと今後の課題

- 複数の異なるエネルギーのX線を利用した撮像法（デュアルエネルギーX線イメージング）の原理的な検討を行った。本法では、エネルギー毎に線吸収係数が異なることを利用して、実効原子番号 Z_{eff} を得ることができる。
- 佐賀L S B L O 7において、エネルギー15、20、25、30 keVのX線を用いて、ファントムを対象とした試用実験を行い、以下の結果を得た。
 - 20と30 keVで取得した断面像の比からアクリル、水、アルミ、および人工骨における吸収係数の比を取得することができた。
 - 上記測定で得られた比は理論値とほぼ一致し、実効原子番号の算出が可能であった。

今後は、マルチエネルギーへの対応を行うと同時に、生体試料や各種材料への適用を試みる。

HITACHI
Inspiring the World