

(様式第 5 号)

## マルチエネルギー X 線 CT の基礎的な検討 Feasibility test of multi-energy X-ray CT

馬場理香、米山明男  
Rika Baba and Akio Yoneyama

(株) 日立製作所中央研究所  
**Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.**

- ※ 1 先端創生利用（長期タイプ、長期トライアルユース、長期産学連携ユース）課題は、実施課題名の末尾に期を表す（Ⅰ）、（Ⅱ）、（Ⅲ）を追記してください。
- ※ 2 利用情報の開示が必要な課題は、本利用報告書とは別に利用年度終了後二年以内に研究成果公開（論文（査読付）の発表又は研究センターの研究成果公報で公表）が必要です。（トライアルユース、及び産学連携ユースを除く）

### 1. 概要（注：結論を含めて下さい）

マルチエネルギー X 線 CT はエネルギーの異なる複数の X 線で取得した断面像から、演算によりサンプルの平均的な原子番号（実効原子番号  $Z_{\text{eff}}$ ）を取得する方法である。従来の X 線 CT と同様にサンプルの密度に関する情報に加えて、元素組成に関する情報も得ることができ、組成変化という新しい指標に基づいた各種評価が可能になると期待される。本課題では上記撮像法の基礎的な検討として、デュアルエネルギー X 線（エネルギーの異なる 2 種類の X 線）利用における実効原子番号の検出精度について評価を行った。試料には生体軟組織を用い、サンプルを透過した X 線の検出にはダイナミックレンジが 20 bit と極めて広い PILATUS 画像検出器を用いた。エネルギー 20 及び 30 keV の単色放射光により取得した断面像に対して、各ピクセルの CT 値の比から近似計算を行うことにより、 $Z_{\text{eff}}$  をコントラストとする像を算出した。この結果、脂肪と筋組織を明瞭に可視化することができ、さらに各組織領域で求めた値は元素組成から算出された理論値と 8% 以内で一致することが分かった。

### (English)

Multi-energy X-ray computed tomography (CT) enables us to obtain not only conventional density image but also elemental image of samples, and provides a novel evaluation method using elemental changes as an indicator. Feasibility observation of a biomedical sample was performed using different energy X-rays to evaluate the accuracy of measured effective atomic number ( $Z_{\text{eff}}$ ). Conventional absorption-contrast CT images were detected by a PILATUS detector having large dynamic range of 20 bits. The  $Z_{\text{eff}}$ -contrast image was calculated from the ratio of CT values in sectional images obtained using 20- and 30-keV X-rays. The image visualized the inner structure of the sample clearly, and the  $Z_{\text{eff}}$  values of fat and muscle regions corresponded to theoretical value within 8%.

### 2. 背景と目的

X 線 Computed Tomography (CT) は、被写体内部を非破壊で三次元的に可視化できる撮像法として医療診断や製品の不良検査などに広く利用されている。本法は被写体による X 線の吸収の大きさ（線吸収係数）を検出しており、近似的には密度に関する情報を得ることができる。しかし、被写体の元素種やその組成に関する情報は得ることができなかった。この問題を解決する方法として、デュアルエネルギー X 線 CT が近年注目されている。本法は、各元素の線吸収係数がエネルギー変化に対して異なる変化率を示すことを利用して、エネルギーの異なる X 線で取得した複数の画像から演算により

被写体の元素組成に関する情報を求める方法である。現在、医療用 CT を中心に開発が進められており、線源である X 線管の電圧を高速に変化する方法やエネルギー分解能を持った検出器を用いた方法により、カルシウムと造影剤であるヨードとの分離が可能などなどが示されている [1]。また、単色放射光を用いた原理実験では、有機溶液を対象として、実効原子番号に加えて正確な電子密度も同時に算出できることが示されている [2]。

本課題では、3 種類以上のエネルギーの X 線を利用するマルチエネルギー X 線 CT の基礎的な検討として、放射光を用いた上記デュアルエネルギー X 線 CT の性能評価を目的とし、実効原子番号の検出精度に関する評価を行った。

### 3. 実験内容 (試料、実験方法、解析方法の説明)

測定は、高いエネルギーの X 線を利用できるウィグラーのビームライン BL-7 にて行った。光学系の配置を図 1 示す。光源から放射された白色 X 線を二結晶分光器 (Si(220)) により単色化し、 $I_0$  モニター用イオンチャンバーを経た後、試料に照射した。試料を透過した X 線は下流に設置した PILATUS 100K 検出器で検出した。本検出器のピクセルサイズは  $172 \mu\text{m}$  角、画素数は横 487 ピクセル、縦 195 ピクセル、視野は横 84mm、縦 34mm、ダイナミックレンジは 20bits、フレームレートは 300Hz である。また、試料と PILATUS 検出器との距離 (カメラ長) は 300 mm である。

試料の位置決め及び回転には、ステッピングモータ駆動によりリモートで制御できる X ステージ及び回転ステージを用いた。CT による断面像の測定は本ステージ群を用いて、(1) 試料を光路から待避、(2) 背景像を測定、(3) 試料を光路に設置、(4) 試料像を測定、(5) 試料を回転、の手順で行い、(4) と (5) を試料の回転が  $360^\circ$  になるまで繰り返し行った。また、測定の最後に (1) と (2) を行い、再度、背景像を取得した。回転の刻みは  $0.72^\circ$ 、プロジェクション数は 500 投影とした。各プロジェクションにおける露光時間は 20 keV では 2 秒、30 keV では 10 秒とした。

断面像の再構成計算には、一般の X 線 CT で利用されているフィルタードバックプロジェクション法 (FBP 法) を用いた。この際、フィルター関数には Shepp-Logan (SL) 関数を利用した。また、実効原子番号を表す像は、20 keV で取得した断面像を、30 keV で取得した断面像で除算した比  $r$  から近似計算により求めた。

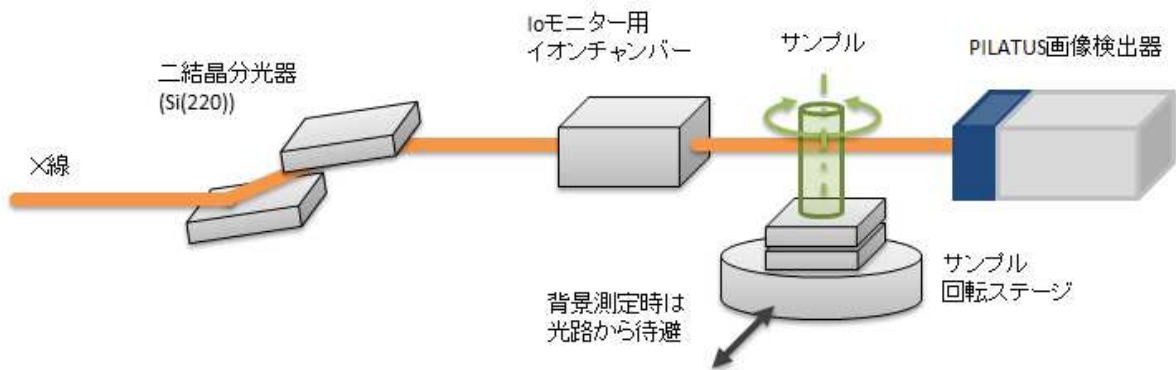


図1 BL7における光学系の配置図

### 4. 実験結果と考察

前節の計測系において、20 keV 及び 30 keV の X 線を利用して得られた生体軟部組織 (牛肩の筋組織) の断面像を図 2 に示す。エネルギー純度の高い単色 X 線であること、及び画像検出器のダイナミックレンジが広いことなどにより、脂肪と筋組織が明瞭に区別できていることが分かる。なお、サンプルは直径 12 mm のチューブに詰めて測定した。図中のサンプル外側に見えている円はこのチューブであり、更にその外側に現れている円状の細い線はチューブを封入したビニール袋である。

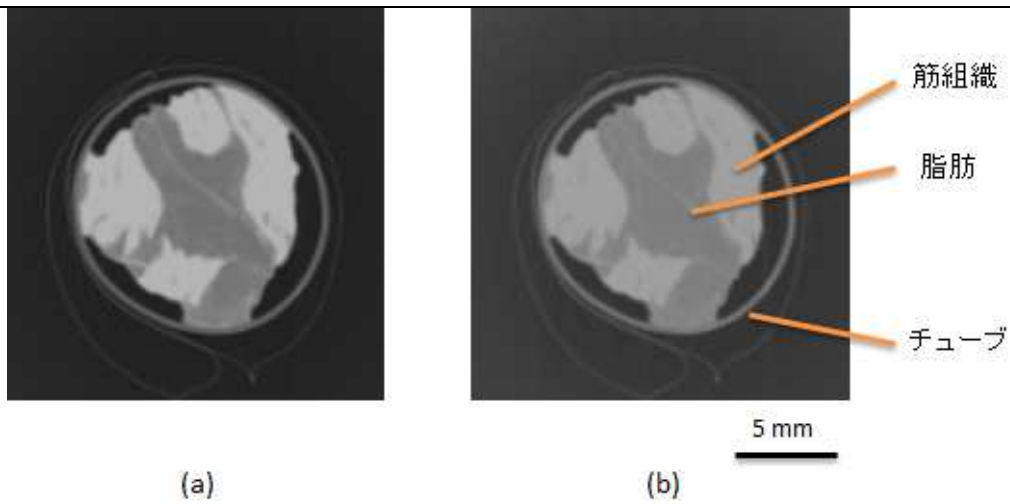


図2 (a)20 keV 及び(b)30 keV の測定で得られた牛肩組織切片の断面像

図3には、図2の2つの断面像の比から算出した実効原子番号  $Z_{\text{eff}}$  をコントラストとする像 ( $Z_{\text{eff}}$  コントラスト像) を示す。各ピクセルの  $Z_{\text{eff}}$  値は理論的な計算により求めた近似式を用いて算出した。この結果から、 $Z_{\text{eff}}$  コントラスト像でも脂肪と筋組織を鮮明に描出できていることがわかる。脂肪組織における  $Z_{\text{eff}}$  値は  $6.5 \pm 0.3$  で、ICRU Report 44 で定義されている一般的な脂肪組織の元素組成から算出した理論値 6.57 とほぼ一致した。一方、筋組織における  $Z_{\text{eff}}$  値は  $8.0 \pm 0.2$  で、同様に組成から算出した理論値 7.4 とは 8%ほど異なった値となった。この原因としては、入射X線の強度変動による影響を十分に低減できていないことなどが考えられる。なお、背景領域に現れている輝度の高いランダムな点は、0 値による除算によって生じたノイズである (背景領域において CT 値 (線吸収係数) は 0 となるため)。

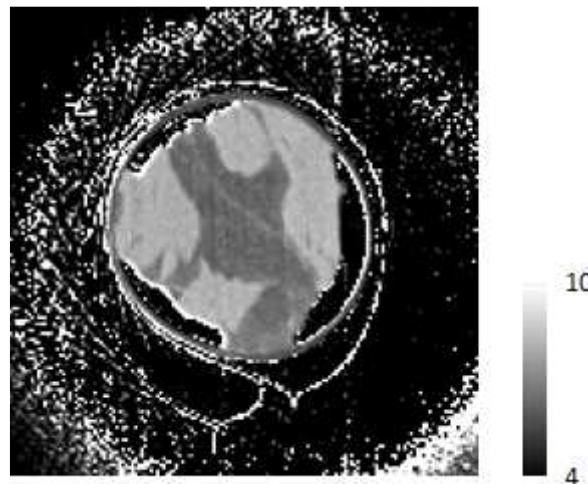


図3 図2の断面像より算出した  $Z_{\text{eff}}$  コントラスト断面像

## 5. 今後の課題

前節に記述したように、 $Z_{\text{eff}}$  値の検出精度は現在のところ 8%程度である。今後、本法をバイオメディカルのみならず材料の解析等に適用していくためには、精度の向上が不可欠である。今後は背景像の計測をより頻繁に行い、入射X線の強度変動による影響の低減を試みる。また、同時に各種の材料への適用を進め、本法の有用性について検討を行う。

## 6. 参考文献

- [1] <http://www.innervision.co.jp/suite/philips/technote/100710/>
- [2] Masami Torikoshi et al, Phys. Med. Biol. 48, 673(2003)

## 7. 論文発表・特許 (注: 本課題に関連するこれまでの代表的な成果)

- [1] R. Baba et al., 11th International Conference on Biology and Synchrotron Radiation.
- [2] A. Yoneyama et al., 第7回九州シンクロトン光研究センター合同シンポジウム
- [3] A. Yoneyama, K. Hyodo, and T. Takeda, Appl. Phys. Lett. 103, 204108 (2013)

**8. キーワード**（注：試料及び実験方法を特定する用語を2～3）

デュアルエネルギー、X線CT、単色X線

**9. 研究成果公開について**（注：※2に記載した研究成果の公開について①と②のうち該当しない方を消してください。また、論文（査読付）発表と研究センターへの報告、または研究成果公報への原稿提出時期を記入してください（2013年度実施課題は2015年度末が期限となります。）

長期タイプ課題は、ご利用の最終期の利用報告書にご記入ください。

**① 論文（査読付）発表の報告**

**（報告時期： 2016年 3月）**