

(様式第5号)

## 高分解能 X 線検出器を用いた デュアルエネルギー X 線 CT の基礎的な検討 Feasibility study of dual-energy X-ray CT using high resolution X-ray imager

馬場理香, 米山明男  
Rika Baba, Akio Yoneyama

(株) 日立製作所研究開発グループ  
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 利用情報の公開が必要な課題は、本利用報告書とは別に利用年度終了後2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)

デュアルエネルギー X 線 CT (以下 DECT) は、2 種類の異なるエネルギーの 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  $Z_{eff}$ )を表す像( $Z_{eff}$  像)を取得する新しい撮像法である。従来の X 線 CT で得られる密度情報に加えて、元素に関する情報も取得することができ、元素組成の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ている。本課題では、平行・単色・大強度という理想的な X 線源である放射光と、蛍光体に柱状 CsI を用いた高精細なファイバーカップリング式 X 線画像検出器(ピクセルサイズ 6.5 ミクロン)を組合せ、高空間分解能撮像における本法の原理的な検証を行った。エネルギー 10 及び 15 keV の単色 X 線で撮像したラット尾(軟部組織と骨が混在)の断面像を対象として、同法の原理に基づいて算出した実効原子番号から内部構造の識別(セグメンテーション)を行った結果、毛、筋組織、及び骨を鮮明に区別することが出来た。

### (English)

Dual-energy X-ray computed tomography (DECT) is a novel imaging technique providing an image of effective atomic number ( $Z_{eff}$ ) by a calculation using two sectional images obtained by different X-ray energies. DECT enables us to obtain not only density but also elemental information of samples, and provides a novel evaluation method based on elemental changes. To evaluate the feasibility of the method in high spatial resolution imaging, observations of rat tail were performed using 10-keV and 15-keV synchrotron radiation (SR) which has ideal properties (parallel, monochromatic, and high flux) for the evaluation, and fine X-ray imager consist of columnar crystal CsI and optical fiber. Obtained elemental map showed segmented regions such as hair, bone, and muscle more clearly than conventional density map obtained by mono energy X-ray.

## 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から製品の不良検査に至る様々な分野で幅広く利用されている。本法はX線が被写体を透過した際に生じた吸収の大きさ(吸収係数)を検出しており、密度に関する情報を得ることができる。このため、密度差に対応した構造等を明瞭に可視化することはできるが、被写体がどのような元素で構成されているか、元素組成に関する情報を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、2種類のエネルギーのX線で取得した画像から、各元素の線吸収係数がエネルギーに対して異なる変化率を示すことを利用して、演算により被写体の平均的な原子番号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切り替える方法やエネルギー分解能を有する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]。日立でも昨年度より放射光を用いた本手法の原理的な実験に着手しており、これまでにアクリルやアルミなどで構成された各種ファントムの元素同定に関する評価や、生体試料を対象とした試用観察を行い、元素情報の取得に十分資する手法であることを確認している[2]。本課題では画像検出器を従来使用していたPILATUS検出(画素サイズ172ミクロン)の代わりに、画素サイズが1/10以下となる6.5ミクロンの高精細なカメラを用い、高空間分解能撮像における原理的な効果の検証を目的とした。

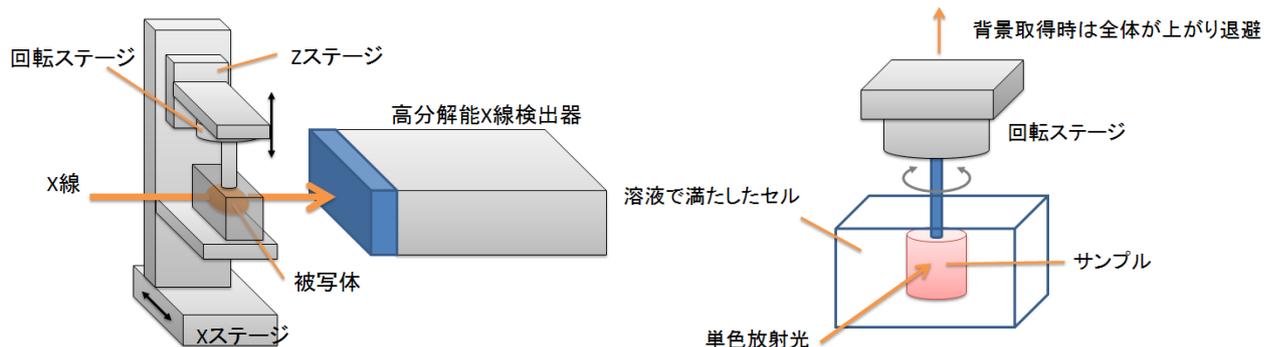
## 3. 実験内容(試料、実験方法、解析方法の説明)

測定はX線強度が強く、かつ高いエネルギーのX線を利用できるウィグラーを光源とするビームラインBL-07にて行った。図1に使用した光学系の配置を示す。光源から放射された白色X線を二結晶分光器(Si(111))により単色化し、 $\text{I}_0$ モニター用イオンチャンバーを経た後、試料に照射した。分光器の回折面を前回のSi(220)からSi(111)に変更したことにより、原理的に2次光は発生せず、基本波の次は3次光となる。このため、X線のエネルギーを10 keVに設定した場合、高次光として30 keVのX線が混入することになるが、光源のスペクトル分布から30 keV以上のX線は10 keVより数桁弱いことがわかっている。したがって、この光学系では高次光の影響はほぼないと考えられる。

試料を透過したX線は下流に設置した高精細な画像検出器(Andor製Zyla-5.5-HF)で検出した。本検出器のピクセルサイズは6.5ミクロン角、画素数は横2560、縦2160ピクセル、視野は横16.6 mm、縦14 mm、ダイナミックレンジは16 bits、フレームレートは100 Hzである。蛍光体は100ミクロンのCsIであるが、柱状構造のためにぼけが少なくなっている。蛍光体とCCD間はオプティカルファイバーで連結されており、レンズ系に比べてより少ない損失で可視光を伝送できる。本カメラは、ビーム発散による空間分解能の低下を抑えるために、試料との距離(カメラ長)を構成上最短となる100 mmの位置に設置した。

試料の位置決め及び回転は、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)背景像の測定、(3)試料を光路に設置、(4)試料像の測定、(5)試料の回転、の順番で行い、(4)と(5)を試料の回転が360度になるまで繰り返し行った。また、測定の最後に(1)と(2)を再度行い、背景像を取得した。回転の刻みは0.72度、プロジェクション数は500とした。使用したX線のエネルギーは10 keV及び15 keVで、各投影における露光時間は30秒(10 keV)及び3秒(15 keV)とした。

試料には、毛、骨、軟骨、及び骨が含まれたホルマリン固定されたラットの尾を用いた。背景領域との吸収差を小さくするために、図2に示すホルマリンで満たしたセルに入れ、このセルの中でサンプルを回転するようにした。これにより、背景(従来は空気)との吸収差が小さくなり、より高い線量での測定が可能になり、短い測定時間で高いS/Nの像が取得できるようになった。



#### 4. 実験結果と考察

前節の計測系を用いて 10 及び 15 keV の X 線を利用して取得したラット尾の断面像を図 3 (a)及び (b)に示す。10 keV の断面像では、骨の吸収が非常に大きいためアーチファクトが発生しているが、その他の領域では筋組織や毛などを鮮明に描出できている。一方、15 keV の断面像では骨の吸収が小さくなるために、アーチファクトもなく正常に可視化できている。(a)と(b)の断面像内における各画素の CT 値 (吸収係数) の比に基づいて各部位の領域分け (セグメンテーション) を行った結果を図 3 (c)に示す。毛 (黄色)、筋組織 (赤)、骨 (橙) の各領域に加えて、(a)や(b)の画像では識別できていない中心部 (軟骨の辺縁) も新たに描出できている。ミクロンオーダーの高空間分解能の計測においても本法が部位の識別に極めて有用であることが判った。なお、右上から左下に伸びている赤い線状の領域は(a)のアーチファクトによる影響である。

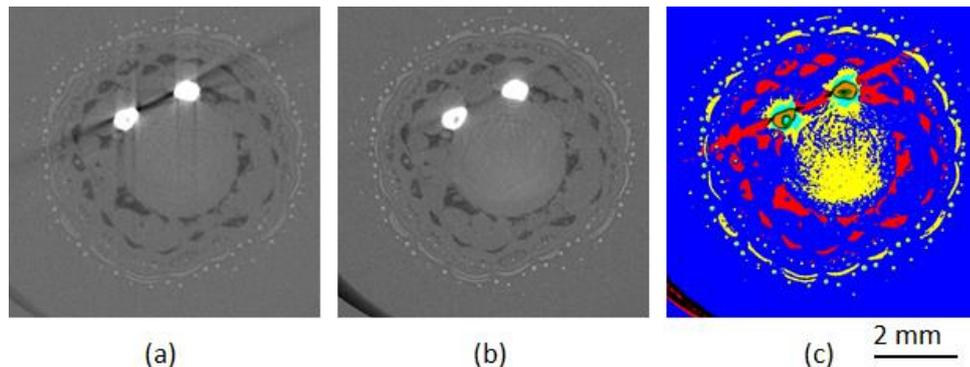


図3 エネルギー10 及び 15 keV で取得したラット尾の断面像 ((a)と(b)), 及び DECT の原理に基づいて(a)と(b)から算出した領域識別像 (c)。本法により軟骨の辺縁 (黄色) が新たに識別できていることが判る。

#### 5. 今後の課題

今回の実験結果から、単色化した X 線を複数用いた DECT は生体各部位の識別に極めて有用であることが判った。今後は、実験室系の光源と同様に準単色の X 線を利用した機能テストが、本法の実用化を進める上で重要であると考えられる。そこで、今後は結晶単色器の代わりに白色 X 線+金属フィルターで準単色化した X 線を用いて、DECT の機能確認、金属フィルターの最適化、及びエネルギー差 (デュアルエネルギーの差) の最適化などについて検証を行う予定である。

#### 6. 参考文献

- [1] <http://www.innervision.co.jp/suite/philips/technote/100710/>  
 [2] 米山 明男 他、「デュアルエネルギー X 線 CT による  $Z_{\text{eff}}$  イメージングの検討」、第 7 回九州シンクロトロン光研究センター研究成果報告会

#### 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 回九州シンクロトロ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, 実効原子番号

#### 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 (2015 年度実施課題は 2017 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。

② 研究成果公報の原稿提出

(提出時期: 2017 年 10 月)