

(様式第5号)

## 造影剤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 contrast agent

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)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(トライアルユースを除く)。
- ※3 実験に参加された機関を全てご記載ください。
- ※4 共著者には実験参加者をご記載ください(各実験参加機関より1人以上)。

### 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Zeff)を表す像(Zeff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、医療診断で一般に利用されているヨウ素造影剤と骨、軟骨、筋組織、及び毛から構成されたラット尾を対象として、ヨウ素の吸収端前後のエネルギーで撮像し、取得した像からヨウ素を含めた各領域をより高い精度で分離(識別)が可能か評価した。その結果、単一エネルギー(30 或いは 34 keV)の像だけでは分離が難しかった骨とヨウ素を、両エネルギーの像を用いることで鮮明に区別できることがわかった。

### (English)

Dual-energy X-ray computed tomography (DECT) is a novel imaging technique providing an image of effective atomic number (Zeff) by a calculation using two sectional images obtained by different X-ray energies. Therefore, DECT enables us to obtain not only density but also elemental information of samples, and gives a novel evaluation method based on elemental changes. To evaluate the feasibility of the method using contrast agent, observations of rat tail with tubes filled with iodine contrast agent were performed using 20-, 30- and 34-keV synchrotron radiation (SR), which has ideal properties (parallel, monochromatic, and high flux) for the evaluation. A calculated elemental map from sectional images obtained 30- and 34-keV X-ray showed the segmented regions such as bone and iodine clearly.

### 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減弱の大きさ(吸収係数)を検出しており、電子密度に依存した情報を得ることができる。このため、骨など密度差が大きな構造等は明瞭に可視化することはできるが、生体軟組織など密度差が小さい領域の識別は難しかった。さらに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つた。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ウ素の分離が可能などが示されている[1]。日立でも一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]。本課題では医療診断で一般に利用されているヨウ素造影剤と骨、軟骨、筋組織、及び毛から構成されたラット尾を対象として、ヨウ素の吸収端前後のエネルギーで撮像し、取得した像からヨウ素を含めた各領域をより高い精度で分離（識別）が可能か評価した。

### 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に測定に利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。なお、分光器の回折面としてSi(111)を利用した。本回折面では原理的に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20 keVに設定した場合、高次光として60 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20 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PILATUS 100Kで検出した。本検出器のピクセルサイズは172ミクロン角、画素数は横487、縦196ピクセル、視野は横84 mm、縦34 mm、ダイナミックレンジは20 bits、フレームレートは100 Hzである。本検出器は、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。また、ピクセルサイズが174ミクロンでは詳細な観察が難しいために、走査数 $n$ が4のサブピクセル走査法（Sub-pixel scanning method (SPS)、検出器を横方向に $n$ 回スキャンすることで計算上のピクセルサイズを $1/n$ とする方法）[3]を採用した。

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、の順序で行い、（4）と（5）を試料の回転が360度になるまで繰り返して行った。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0.5度、プロジェクション数は720とした。サブピクセル走査法を適用するために、上記の断面像測定後に更に検出器を横方向に43ミクロン（ $172/4=43$ ミクロン）移動し、同様の測定を3回繰り返して行った。使用したX線のエネルギーは20, 30, 及び34 keVで各投影における露光時間はそれぞれ1.5秒、3秒、3.5秒とした。

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とヨウ素造影剤を封入したポリスチレン製の細管（直径1 mm）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。

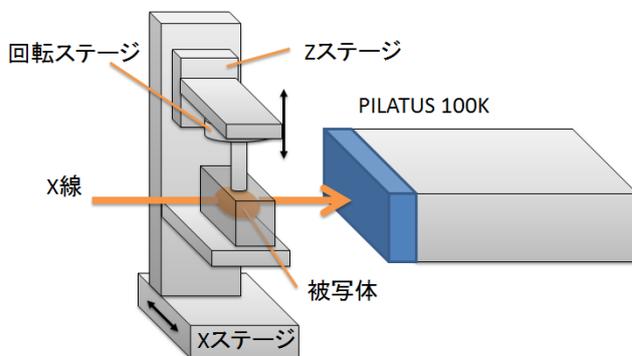


図1 使用した光学系の配置図

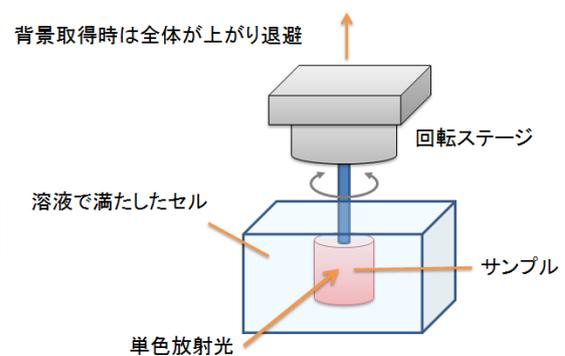


図2 サンプル周辺の構成図

### 4. 実験結果と考察

図3にエネルギー20 keV のX線を利用して取得したラット尾と造影剤チューブの断面像を示す。

エネルギーが 20 keV と前回の測定(10 keV)に比べて高いために、軽元素で構成されている部位（毛及び筋組織）の吸収が非常に小さく、可視化できていない。一方、ヨウ素造影剤を封入したポリスチレンチューブや骨は吸収が大きいため鮮明に描出できている。

図 4(a)には、20 と 30 keV の断面像において、画素毎に計算した CT 値の比をコントラストとした画像を示す。吸収端とは無関係のエネルギー領域であるために、骨を主に構成するカルシウムも造影剤のヨウ素も比に大きな違いはなく、両者を識別できずに同じ色調（緑）になっている。一方、図 4 (b) は 30 と 34 keV の断面像から同様に算出した画像である。ヨウ素の吸収端前後のエネルギーで取得しているために、カルシウムとヨウ素の吸収係数の比は大きく異なる。このために、両者を明瞭に区別（水色と緑）できていることがわかる。

以上から、デュアルエネルギーCT では造影剤の吸収端を利用することで、より明瞭に各部位を識別可能になると考えられる。

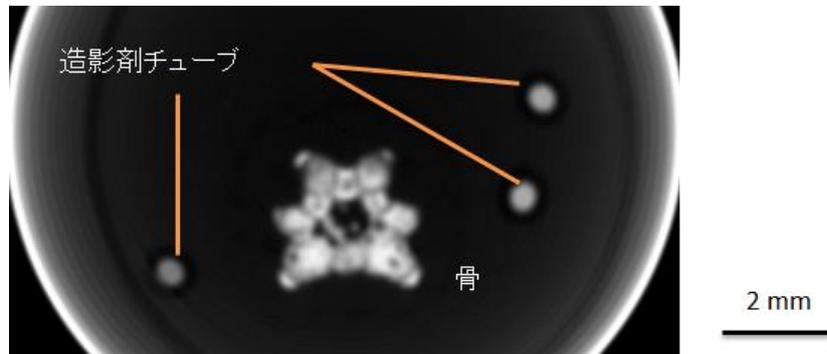


図 3 エネルギー20 keV で取得したラット尾の断面像。エネルギーが高いために、軽元素から構成された筋組織等は可視化できていない。

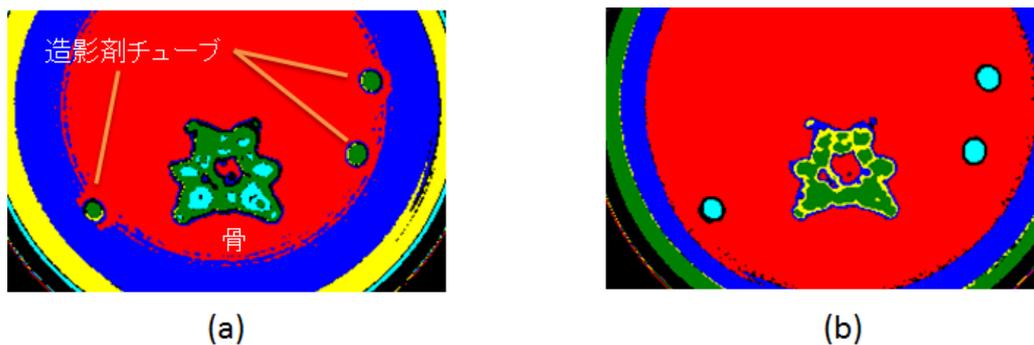


図 4 エネルギー20 keV と 30 keV の断面画像から算出した像(a)と、30 keV と 34 keV の画像から算出した像(b)。吸収端(33 keV)前後でヨウ素の吸収係数が大きく変化し、カルシウムなど他の元素とは比が異なるために、(b)では骨と造影剤を識別（緑と水色）できている。

## 5. 今後の課題

今回の実験結果から、造影剤と DECT を組み合わせた測定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
- [3] A. Yoneyama, R. Baba, K. Sumitani, and Y. Hirai, Appl. Phys. Lett. 106, 084102 (2015).

## 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（2016年度実施課題は2018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：2018年 3月）**