

(1) デュアルエネルギーX線CTの医学利用に向けた基礎検討

馬場理香、米山明男

(株)日立製作所 中央研究所

1. はじめに

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、医療診断から工業製品の不良検査まで様々な分野で幅広く利用されている。この方法では、X線が被写体を透過する際に生じる吸収の大きさ(吸収係数)を検出しており、密度に関する情報が得られることから、被写体の外形など密度差が大きい領域を明瞭に可視化することができる。しかし、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はできなかった。

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。この方法は、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、2種類のエネルギーのX線で取得した画像から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。医療用CTにおいて、X線源であるX線管の電圧を高速に切り替えて2種類のエネルギーで撮影を行う方法やエネルギー分解能を有する検出器を用いた方法が開発されており、カルシウムと造影剤であるヨードとの分離の可能性などが示されている[1]。筆者等も放射光を用いた原理的な実験に着手しており、アクリルやアルミニウムなど各種の元素で構成された模擬被写体の元素同定に関する評価を行った[2]。また、生体試料を対象とした試用観察を行い、元素情報の取得が期待できる手法であることを確認している。本課題では医学利用に向けた基礎的な検討を目的として、ヌードマウスから摘出した腫瘍の断面像の取得を試みた。

2. 開発状況

2-1 撮影系

(1) 光学系

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して用いるビームラインBL-07にて行った。図1に、使用した実験装置を示す。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、 I_0 モニター用イオンチャンバーを経た後に試料に照射した。分光器の回折面をSi(111)にすることにより、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12 keVに設定した場合、36 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12 keVより数桁弱いことが分かっており、この光学系では高次光の影響はないと考えられる。

(2) 検出器

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300 Hzである。なお、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PILATUSとの距離(カメラ長)は配置上最短となる100 mmに設定した。

2-2 CT撮影

(1) 撮影条件

試料の位置決め及び回転には、ステップモータ駆動のXステージと回転ステージを用いた。画像の測定は、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、の手順で行う。④と⑤を試料の回転が360度になるまで繰り返し行うことにより、CT測定を実施した。回転の刻みは0.72度、投影数は500枚、使用したX線のエネルギーは12 keV、各投影における露光時間は4秒(1秒×4回、1回の露光では検出器が飽和

するため4回に分けて撮影を実施)とした。さらに、空間分解能を向上するために、画像検出器を画素サイズの1/n毎に動かすSPS (Sub-pixel shift) 法を用いた。今回の測定では、試料の位置を43 μm ずつ光軸と直交する方向に移動して複数のCT測定を行った。測定後に全データをマージして1個のCTデータセットとし、一般的なX線CTの再構成処理法であるフィルタードバックプロジェクション法 (FBP法) により断面像を作成した。

(2) 試料

試料には、ヌードマウス表在ガン (上皮ガン) を用いた。無菌下で飼育しているヌードマウスの皮下に細胞株を移植し、350 mm^3 程度の大きさに成長した段階で採取し、ホルマリンで固定した。測定時には試料の形状を円筒状に加工した後、専用のポリエチレン容器に封入し、さらにポリエチレンの袋に封入した。

2-3 結果

(1) 画像

図2に、12 keVのX線で測定した上皮ガン切片の断面像とボリュームレンダリング像を示す。高次

光の混入がなく単色X線による測定となっているため、ビームハードニングによる試料中心領域におけるCT値低下は見られず、定量化された断面像が得られている。また、SPS法による空間分解能の向上により、腫瘍内部の構造が詳細に可視化できており、壊死や血液の塊などが観察できる。

(2) 考察

今回の測定では、SPS法を用いることにより高い空間分解能を持つ断面像が得られた。しかし、断面像のS/Nが不足しており、正確な実効原子番号の断面像 (Zeff像) の取得には至らなかった。これは、試料を空気中で測定したことが原因と考えられる。X線のエネルギーが12 keVと比較的低いため、試料の領域ではX線が90%以上吸収される。一方で、背景領域ではX線の吸収がほぼ0であるために、試料と背景の領域間で非常に大きな強度差が発生する。このため、背景領域が飽和しない測定条件で測定すると試料領域の信号量が不十分となり、S/Nが低下した。次回は試料を密度がほぼ同じ溶液中に入れて測定を行い、背景領域と試料領域での吸収差を圧縮し、試料を十分な信号量で測定する予定である。

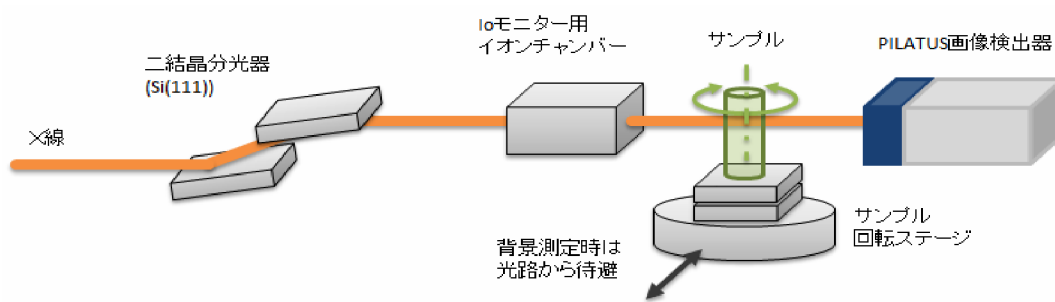
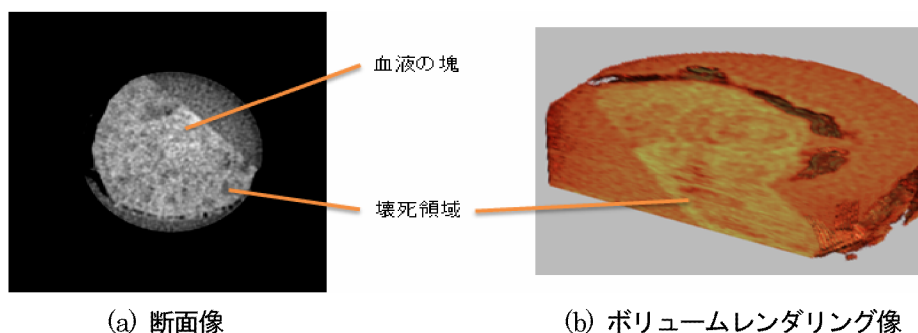


図1 実験装置



(a) 断面像

(b) ボリュームレンダリング像

図2 エネルギー12keVの測定で得られた表在ガンの画像

3. まとめ

本課題ではデュアルエネルギーX線CTの医学利用に向けた基礎的な検討を目的として、腫瘍の断面像の取得を試みた。単色器の回折面をSi(111)として高次エネルギーX線の混入を防ぐことにより、原理的に2次光が発生しない光学系を用いてCT撮影を行った。さらに、画像検出器を画素サイズの1/4毎に動かしてSPS法を実施することで、空間分解能を向上した。ヌードマウスから摘出した上皮ガンを12keVのX線エネルギーで撮影した結果、画素サイズ43 μm の断面像の取得に成功し、腫瘍の内部構造の可視化を実現した。しかし、試料を空気中で測定したために、検出器の飽和を回避すると試料領域の信号量が不十分となり、 Z_{eff} 値の算出に十分なS/Nを持つ断面像は得られなかった。このため、今回は密度がほぼ同じ溶液中に試料を設置し、背景領域との吸収差が小さい条件で測定を試みる。これにより、 Z_{eff} 像の取得に十分なS/Nの画像が取得できると考える。

参考文献

- [1]<http://www.innervision.co.jp/suite/philips/technote/100710/>
- [2] A. Yoneyama, K. Hyodo, and T. Takeda, Appl. Phys. Lett. 103, 204108 (2013)