

(様式第2号)

PILATUS を用いた吸収コントラスト X 線イメージング法による エネルギー分解 CT Energy-resolved CT by absorption contrast imaging method using PILATUS

馬場 理香, 米山 明男
Rika Baba, Akio Yoneyama

日立製作所 中央研究所
Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

1. 概要 (注：結論を含めて下さい)

吸収コントラスト X 線イメージング法は、X 線がサンプルを透過する際に生じる強度変化を画像化する撮像法であり、単色 X 線を利用してもサンプルの正確な密度を求めることが難しいという課題を持つ。これに対し、エネルギー分解能を有した検出器を用いることにより散乱 X 線による影響を除去し、サンプルの密度を正しく測定する手法を考案した。本課題では、手法の原理的な検証を行うために、BL07 において超電導ウィグラーから放射された高いエネルギー(18keV)の X 線と、エネルギー分解能を有した画像検出器 (PILATUS) を用いて吸収 X 線 CT の測定を行った。この際、PILATUS の閾値を入射 X 線のエネルギーより低く設定 (9 および 17keV) することで、入射 X 線よりエネルギーが低い散乱 X 線を除去した画像を検出することを試みた。実験の結果、PILATUS 検出器のエネルギー分解能は 1keV と一般的な半導体検出器に比べて大きく、入射 X 線とのエネルギーの差がより小さい (~100eV) 散乱 X 線を除去することは難しいことが分かった。

次に、複数のエネルギーの X 線を用いて取得した画像データから、計算により散乱 X 線の影響を取り除く手法の検討を行った。第 1 段階として、異なる 2 種類のエネルギーの X 線で取得した画像の比から平均的な原子番号を示す像を算出するイメージング法を試みた。エネルギー 20keV と 30keV の X 線を用いて取得したファントムの断面像について比を計算した結果、ファントムを構成するアルミニウム棒、人工骨、アクリルパイプなどを明瞭に可視化することができた。画像上の各領域の平均値は理論値にほぼ一致しており、比から平均的な原子番号を算出可能ながわかった。本法により、正確な電子密度に加えて実効的な原子番号も得ることが可能であり、これらを用いた計算により散乱 X 線の影響を除去可能になると考えられる。

(English)

Absorption-contrast X-ray imaging cannot perform the precise measurement of the density of samples, because X-ray was scattered in the sample and the transmitted intensity was modified. A novel method using an energy-resolved imager was developed to decrease the influence of the X-ray scattering. The feasibility of the method was tested with tomographic images of a phantom obtained using an 18-keV monochromatic X-ray and PILATUS imager which only detects the X-ray having energy higher than the settled threshold (9 and 17 keV). The result shows that the energy resolution of PILATUS was about 1 keV which was wider than the differences of the energy between the incidence and the scattered X-ray (~100 eV), and therefore the influence of X-ray scattering could not be decreased.

As an alternative method, we focused to a computational method using plural images obtained by different X-ray energy. For the first step, a calculation of an atomic-number image from two images obtained by different X-ray energy (20 and 30 keV) was demonstrated. The calculated image visualized aluminum rod, artificial bone, acrylic pipe composing the phantom clearly. The mean values of the atomic number of each region

corresponded to the ideal values correctly. This result shows that the method gives us a way to decrease the influence of the X-ray scattering.

2. 背景と目的：

吸収コントラスト X 線イメージング法は、X 線がサンプルを透過する際に生じる強度変化を画像化する撮像法である。X 線の高い透過能を利用し、高精細に各種材料や生体試料等を観察することができる。しかし、サンプルによって生じた散乱 X 線も検出器に同時に入射することになるため、サンプルによる X 線の吸収量を正確に検出することは従来の検出器では不可能であった。このため、エネルギーが単一（単色）の X 線を利用しても、サンプルの正確な密度を求めることが難しいという問題があった。サンプルによる散乱 X 線（コンプトン散乱）は、入射 X 線のエネルギーより数 keV 低いエネルギーにピークを持つという特徴がある。このため、エネルギー分解能を有した検出器を用いれば散乱 X 線による影響を除去することが可能であり、サンプルの密度を正しく測定できるようになると期待される。

本課題では、上記手法の原理的な検証を行うために、BL07 において超電導ウィグラーから放射された高いエネルギーの X 線（20～30keV）と、エネルギー分解能を有した画像検出器（PILATUS）を用いて吸収 X 線 CT の測定を行った。この際、PILATUS のカットエネルギー（閾値）を入射 X 線のエネルギーと同程度に設定することで、入射 X 線よりエネルギーが低い散乱 X 線を除去した画像を検出した。サンプルには密度が既知の各種ファントムを用い、上記測定により得られた画像からファントム断面像を再構成して密度を算出した。そして、既知の密度と比較することにより、本法の有効性を評価した。

3. 実験内容（試料、実験方法、解析方法の説明）

図 1 に本課題で利用したイメージングシステムの概要を示す。本システムは 2 結晶分光器、サンプルステージ、および X 線画像検出器から構成されている。ウィグラーから放射された白色 X 線は、2 結晶分光器（回折面 Si(220)）により単色化され、イオンチャンバーを経た後、サンプルステージで位置決めされたサンプルに照射した。サンプルを透過した X 線は下流に設置した X 線画像検出器で検出した。

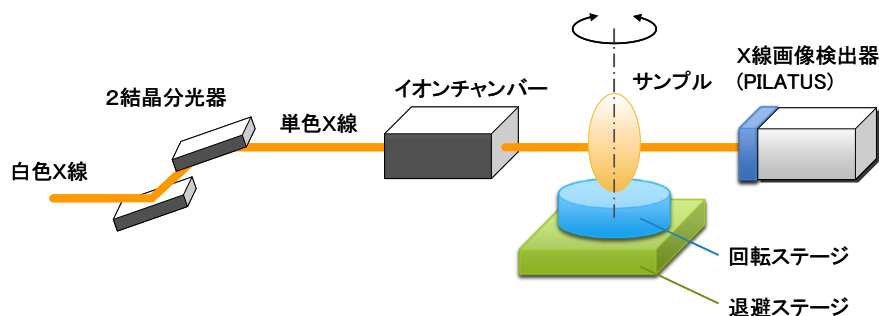


図 1 イメージングシステムの模式図

サンプルステージは、X 線に対して直角な鉛直方向を軸としてサンプルを回転させる回転ステージと、サンプルを X 線の光路から退避する X ステージから構成されている。CT の測定は、(1) X ステージを用いてサンプルを光路から退避して背景強度分布を測定、(2) サンプルを光路に設置し、サンプルを回転（0～360°）させながら各角度で投影像を測定、(3) (1)と同様の方法により、背景強度分布を測定、の手順により行った。X 線画像検出器には、有効視野 85mm×33mm、ピ

クセル数 492×192 画素の PILATUS 100K を用いた。ダイナミックレンジは 20 bits であり、最大 100 万カウントまで X 線を検出することができる。また、閾値より低いエネルギーの X 線をカットする（検出しない）機能を有しており、エネルギーを分別することもできる。

4. 実験結果と考察

(1) ピラタスのエネルギー分解能

入射 X 線のエネルギーを 18keV に固定した状態で、PILATUS 検出器の閾値を 5~20keV まで 100eV 刻みで変化させ、エネルギー分解能の測定を行った。図 2 に各閾値で取得した強度の差分を計算した結果を示す。18keV にピークを持ち、半値全幅が 1keV であることが分かる。即ち、エネルギー分解能は 1 keV と考えられる。

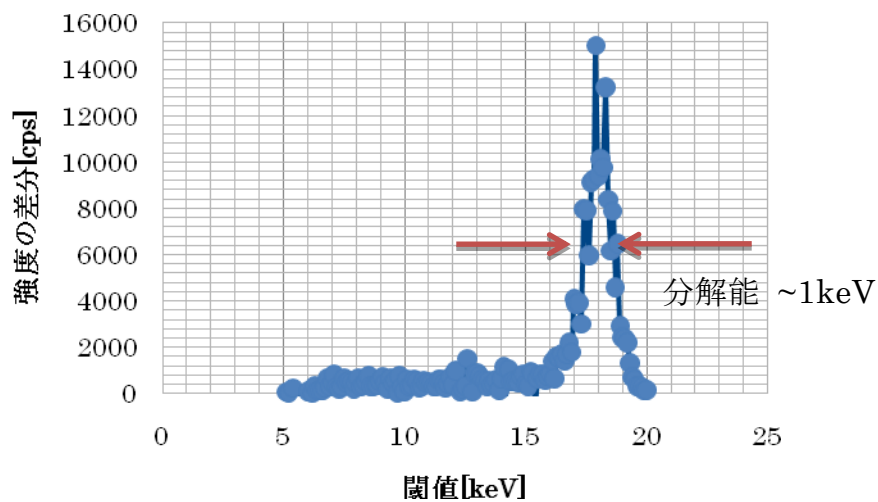
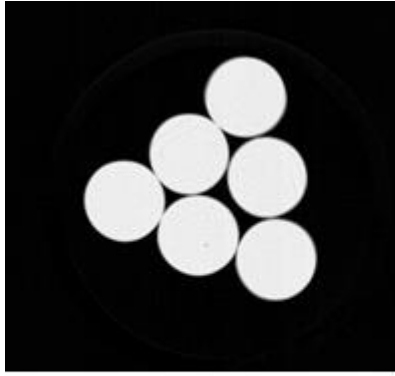


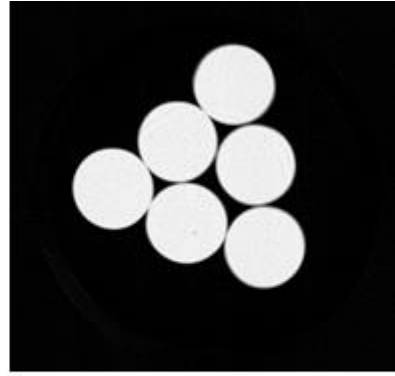
図2 検出強度の差分（エネルギープロファイル）

(2) 各閾値におけるファントム断面像と CT 値

入射 X 線のエネルギーを 18keV に固定した状態で、PILATUS 検出器の閾値を 9 および 17keV に設定し、アクリルファントムの測定を行った。いずれの測定も投影数は 500 枚/360°で、露光時間は 5 秒である。図 3 に通常の再構成計算により得られた各閾値における断面像を示す。閾値が異なっているにも関わらずファントム内の平均的な CT 値は誤差内で一致しており、両者に有意な差がないことが分かる。



閾値 9 keV
CT値: 2.26 ± 0.03



閾値 17 keV
CT値: 2.25 ± 0.03

図3 異なる閾値で取得したアクリルファントムの断面像

この原因として、以下に示すように散乱の角度依存性が考えられる。コンプトン散乱において、散乱後のX線の波長 λ_s は

$$\lambda_s = \lambda_i + \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$$

で与えられる。ここで、 λ_i は入射X線の波長、 h はプランク定数、 m は電子の質量、 c は光速、 θ は前方を0とする散乱角である。本測定ではサンプルを透過したX線を検出しているため、 θ がほぼ0°の領域で透過X線と散乱X線を検出していることになる。即ち、上式から入射X線と散乱X線にエネルギーの差はほとんどないことが分かる。

サンプルからPILATUSまでの距離は100mmであり、サンプル中心からPILATUS全体を見込む角度は40°になる。従って、PILATUSに入射できる散乱X線のうち、最も大きな散乱角 θ は20°となる。上式から $\theta = 20^\circ$ における λ_s は0.0688nmで、エネルギーに換算すると17.96eVとなり、入射X線との差は僅かに40eVであることが分かる。即ち、エネルギー分解能が1keV程度のPILATUSでは、散乱X線をカットすることができず同時検出することになり、閾値が異なるにも関わらずCT値に全く差がなかったと考えられる。

(3) 異なるエネルギーのX線を用いた撮像と実効原子番号の算出

(2)の結果から、PILATUS検出器の閾値を変化させただけでは、散乱X線の影響を低減できないことが分かった。そこで、異なるエネルギーのX線を用いて得られた画像データから計算によりその影響を取り除く方法の検討を行った。その第1段階として、異なるエネルギーのX線で取得した複数の画像から、実効的な原子番号(実効原子番号)の算出を試みた。

図4は水素(H)からガリウム(Ga)までの各元素について、エネルギー20keVと30keVのX線における線吸収係数の比を計算した結果である。このように線吸収係数の比は原子番号に依存し、上記エネルギーでは水素(H)からリン(P)までが単調増加になる。このため、この比から原子番号(混合物や化合物の場合は平均的な原子番号を示す実効原子番号)を算出することが可能になる。

図5は前項と同一のシステムを使用し、20および30keVのX線を用いて測定したファントムの各断面像について、その比(20keV/30keV)を計算した結果を示す。ファントム

を構成するアルミニウム棒、人工骨、水で満たしたアクリルパイプ、アクリル棒が明瞭に可視化できていることが分かる。図中に示した値は画像上の各領域の平均値で、括弧内は理論値である。水やアクリルでは両者はほぼ一致しており、図4から実効原子番号を正確に算出可能なことが分かる。

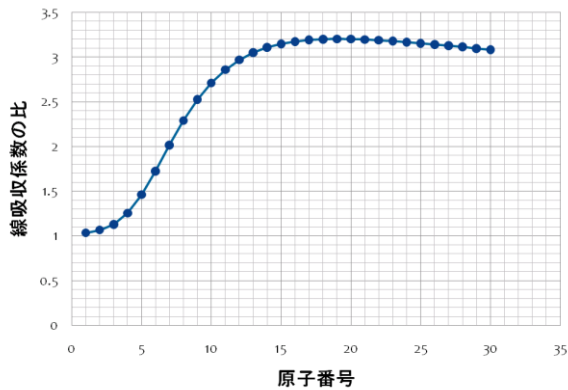


図4 各原子番号における線吸収係数の比
H から P まで単調増加であり、比から実効原子番号を一意に求めることができる。

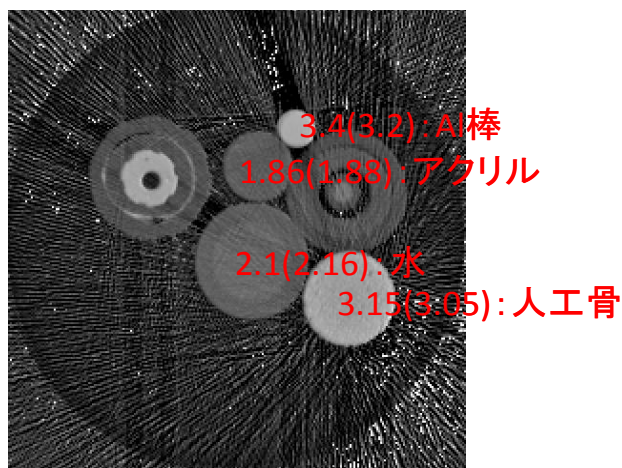


図5 20keV の断面像を 30keV の断面像で除算した画像
コントラストは線吸収係数の比になる。なお、値は各領域の平均値で、括弧内は理論値。

従来の X 線 CT では線吸収係数の分布像しか得ることができなかったが、本方法では複数のエネルギーを用いることにより、正確な電子密度に加えて実効的な原子番号も得ることが可能となった。さらに複数のエネルギーで取得した断面像を組み合わせることによって、散乱 X 線の影響を算出し、取り除くことが可能になると考えられる。また、本方法を用いることで、生体軟部組織において、各臓器や組織間で吸収係数の差が単に密度に由来するものなのか、元素の組成比の相違に由来するものかを判定することが可能になると考えられる。この応用として、ガン検出能の向上や、病気進行度（動脈硬化など）の評価などが期待される。また、材料評価に適用した場合には、実効的な原子番号の変化をもたらす金属の酸化や還元の定量的な評価や、ポリマー等有機材料のブレンド状態の解明への応用なども期待される。

5. 今後の課題：

今回の実験結果により、単一元素で構成された被写体の場合、元素の種類まで正確に同定でき

る可能性が示された。今後、複数の元素で構成された被写体を用い、実効的な原子番号を高精度に求めることを試みる。また、生体試料や有機材料等のサンプルの撮影を行い、本手法の適応可能性について検討を行う必要があると考えている。さらに、複数（3以上）のエネルギーで同様の測定を行い、散乱 X 線の影響を取り除く方法について検討を行う。

6. 参考文献

[1] A. Yoneyama, et al., Med. Phys. 35, 4727 (2008)

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

8. キーワード（注：試料および実験方法を特定する用語を2～3）

エネルギー分解 CT , 吸収コントラスト X 線イメージング法, PILATUS