

# フォトンカウンティング形X線CTを用いた媒質同定に関する研究

MATSUMOTO, Mariko / 松本, 真梨子

---

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

53

(発行年 / Year)

2015-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2015-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

平成26年度 （ 2 0 1 4 ）

修 士 論 文

フォトンカウンティング形X線CTを用いた  
媒質同定に関する研究

Material Decomposition  
using a Photon Counting CT System

指 導 教 授

尾 川 浩 一 教授

法政大学 理工学研究科 応用情報工学専攻

マツモト マリコ

13R4132 松本 真梨子

# 目次

|                          |    |
|--------------------------|----|
| Abstract                 | 2  |
| 第1章 はじめに                 | 4  |
| 1.1 X線CT                 | 4  |
| 1.2 媒質同定に関する従来手法         | 4  |
| 1.3 本研究の目的               | 5  |
| 1.4 本論文の構成               | 5  |
| 第2章 媒質同定法                | 6  |
| 2.1 主成分分析                | 6  |
| 2.2 最小二乗法                | 9  |
| 2.3 特異値分解                | 10 |
| 第3章 シミュレーション             | 12 |
| 3.1 媒質同定法の比較             | 12 |
| 3.1.1 評価方法               | 12 |
| 3.1.2 シミュレーション条件         | 12 |
| 3.1.3 再構成結果              | 14 |
| 3.1.4 主成分分析による分離結果       | 15 |
| 3.1.5 最小二乗法による分離結果       | 16 |
| 3.1.6 特異値分解による分離結果       | 17 |
| 3.2 単一媒質のシミュレーション        | 18 |
| 3.2.1 金コロイドを用いたシミュレーション  | 18 |
| 3.2.2 再構成結果              | 19 |
| 3.2.3 特異値分解による分離結果       | 20 |
| 3.2.4 ガドリニウムを用いたシミュレーション | 21 |
| 3.2.5 再構成結果              | 22 |
| 3.2.6 特異値分解による分離結果       | 23 |
| 3.3 複数媒質のシミュレーション        | 24 |
| 3.3.1 再構成結果              | 25 |
| 3.3.2 特異値分解による分離結果       | 25 |
| 3.4 混合媒質のシミュレーション        | 26 |
| 3.4.1 再構成結果              | 27 |
| 3.4.2 特異値分解による分離結果       | 28 |
| 第4章 実験                   | 30 |
| 4.1 実験器具                 | 30 |
| 4.1.1 X線管                | 30 |
| 4.1.2 Telesystems 検出器    | 31 |

|       |                     |    |
|-------|---------------------|----|
| 4.1.3 | 実験環境                | 32 |
| 4.2   | 検出器性能               | 32 |
| 4.2.1 | エネルギーキャリブレーション      | 32 |
| 4.2.2 | X線管のカウント値補正         | 34 |
| 4.3   | データ処理方法             | 37 |
| 4.3.1 | デッドピクセル             | 37 |
| 4.3.2 | 均一性                 | 37 |
| 4.3.3 | ギャップ補正              | 37 |
| 4.3.4 | ビームハードニング補正         | 37 |
| 4.4   | 単一媒質の実験             | 39 |
| 4.4.1 | 金コロイドを用いた実験         | 39 |
| 4.4.2 | 再構成結果               | 40 |
| 4.4.3 | 特異値分解による分離結果        | 41 |
| 4.4.4 | ガドリニウムを用いた実験        | 42 |
| 4.4.5 | 再構成結果               | 43 |
| 4.4.6 | 特異値分解による分離結果        | 44 |
| 4.5   | 複数媒質の実験             | 45 |
| 4.5.1 | 再構成結果               | 46 |
| 4.5.2 | 特異値分解による分離結果        | 46 |
| 4.5.3 | 主成分分析による分離結果        | 47 |
| 4.5.4 | 最小二乗法による分離結果        | 48 |
| 4.6   | 混合媒質の実験             | 49 |
| 4.6.1 | 再構成結果               | 50 |
| 4.6.2 | 特異値分解による分離結果        | 51 |
| 第5章   | 考察                  | 53 |
| 5.1   | シミュレーション            | 53 |
| 5.1.1 | 媒質同定法の比較に対する考察      | 53 |
| 5.1.2 | 単一/複数/混合媒質の結果に対する考察 | 53 |
| 5.2   | 実験                  | 54 |
| 5.2.1 | 検出器性能に対する考察         | 54 |
| 5.2.2 | 単一/複数/混合媒質の結果に対する考察 | 54 |
| 第6章   | まとめ                 | 56 |
|       | 謝辞                  | 57 |
|       | 参考文献                | 58 |
|       | 発表論文                | 59 |

# Abstract

The purpose of this research is to validate the availability of a material decomposition with a photon counting CT. We used a photon counting detector that was able to measure four energy bins. And then, a principal component analysis, least squares method and singular value decomposition method were used for the material decomposition. We conducted some simulations and experiments. The materials used were water, calcium, gold-colloid, and gadolinium contained water. We evaluated the performance of the photon counting CT images in terms of the accuracy of reconstructed linear attenuation coefficients and density values. The results indicated that our detector could measure a material density with satisfactory accuracy using the singular value decomposition method. The results showed that our photon counting CT system was useful for the material decomposition.

# 第1章 はじめに

## 1.1 X線CT

近年、医療現場や非破壊検査において画像診断は必要不可欠になっている。医学分野での画像診断法には、コンピュータ断層撮影 (computed tomography : CT)、ポジトロン断層法 (positron emission tomography : PET)、単一光子放射断層撮影 (single photon emission computed tomography : SPECT) などが挙げられ、使用用途によって適宜使い分けられている。

本研究で扱うX線CTは透過型CTと呼ばれ、検査対象に対して外部からX線を照射し、対象を透過した光子を検出器で測定して得た投影データを再構成することで検査対象の断層画像を得るものである。現在の医療現場では、CT画像から検査対象の形状に関する情報のみで診断が行われている。これは、一般的に使用されているシンチレーション検出器が、光子の持つエネルギーの情報を捨ててX線のエネルギーをすべて積分した形で観測しているためである。このような検出器をエネルギー積分形検出器と呼び、光子エネルギーを積分しているため高いフラックスでも対応できるというメリットはあるが、X線のエネルギー情報が失われるだけでなく、ビームハードニングの影響を受けやすいという欠点がある。

これに対し、近年注目されているCTがフォトンカウンティング形X線CT[1-3]である。フォトンカウンティング形計測は、X線を光子数として検出するため、光子のエネルギー情報を得ることができる。これにより、任意のエネルギーのしきい値を設定して、特定の範囲のエネルギーの光子だけを検出することができる。つまり、物体の持つk-edgeなどの特徴量をもとにX線エネルギーの検出範囲を分けることで、その領域にある物質を特定することが可能となる。これは、それぞれの物質に対するX線の減衰がエネルギーの関数になっているからである。フォトンカウンティング形を用いた媒質同定が可能になれば、PETやSPECTのような核医学検査と同様に生体の形状情報だけでなく機能情報も得ることができるようになると考えられている。また、その他のフォトンカウンティング形のメリットとして、低エネルギーの情報を見ることができ、X線吸収量の差が小さい媒質であってもコントラストを高められること、ビームハードニングの影響を受けるエネルギーをカットすることによりビームハードニングの低下を実現できることなどが挙げられる。

## 1.2 媒質同定に関する従来手法

これまでに、媒質を同定する手法として単色X線法やデュアルエネルギーX線法[4]に関する研究が進められている。まず、単色X線法とは単一エネルギーのX線を用いてCT画像中の線減衰係数から媒質同定を行う手法である。しかし、単色X線の発生装置としてシンクロトロンが必要となるため、一般利用には適していない。2つ目のデュアルエネルギーX線法とは、物質に対するX線の減衰がエネルギーに依存することを利用して、二つの異なるエネルギーのX線を別々に照射し、得られたデータのそれぞれのX線の透過率の差から対象の物体を特定する手法である。この手法の医学分野での応用として、石灰化とヨード造影

剤の分離などがあるが，この手法で得られるデータは二種類の X 線から得られた減衰情報のみであるため，高精度に媒質を同定することは難しい．

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的は，フォトンカウンティング形 X 線 CT を用いた媒質同定の有効性を検証することである．検証方法として，モンテカルロ法を用いた光子輸送シミュレーションと実際にフォトンカウンティング形検出器を用いた実験を行い，得られたデータに対して主成分分析，最小二乗法，特異値分解の処理を施し，その分離結果から検討した．

### 1.4 本論文の構成

本論文では，第 2 章で媒質同定手法について詳しく紹介する．次に，第 3 章でモンテカルロシミュレーションで得られたデータに対して媒質同定の処理を行い，各手法の比較と定量的評価を行った．第 4 章ではさまざまな媒質を対象にフォトンカウンティング形検出器を用いて行った実験について述べ，シミュレーションと実験の結果に対する考察を第 5 章で述べる．最後に，第 6 章で本研究のまとめを述べる．

## 第2章 媒質同定法

### 2.1 主成分分析

主成分分析 (Principal Component Analysis : PCA)[5] とは、互いに相関のある変数について計測された多次元データの持つ情報をできるだけ損なうことなく、主成分と呼ばれる無相関な、もとの変数の線形結合である変数の組へ変換する統計的手法である。

一般に、同一のサンプルについて何らかの相関関係がある  $p$  個の変量  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$  ( $p \geq 2$ ) の測定された  $N$  組のデータ  $(x_{1\lambda}, x_{2\lambda}, \dots, x_{p\lambda})$  ( $\lambda = 1, 2, \dots, N$ ) が得られたとする。これら  $N$  個のデータは、それぞれ相互に関連のある変動を示しているとみなせることから、この説明関数として  $p$  個の変量の一次結合で

$$z = w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_px_p \quad (2.1)$$

を仮定し、 $w_1, w_2, \dots, w_p$  を変えて  $\sum_{i=1}^p w_i^2 = 1$  の条件のもとで  $z$  の分散が最大になるときの  $z$  を第1主成分とする。このときの重み係数を  $w_{1i}$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) で表すと

$$z_1 = w_{11}x_1 + w_{12}x_2 + \dots + w_{1p}x_p = \sum_{i=1}^p w_{1i}x_i \quad (2.2)$$

次に、 $z_1$  とは無相関な  $z$  のうちで  $\sum_{i=1}^p w_i^2 = 1$  の条件を満たす最大の分散を持つ  $z_2$  (第2主成分) を決定する。このときの重み係数を  $w_{2i}$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) で表すと

$$z_2 = w_{21}x_1 + w_{22}x_2 + \dots + w_{2p}x_p = \sum_{i=1}^p w_{2i}x_i \quad (2.3)$$

で表される。以下同様にして  $z_m$  までで全変動の大部分が説明されていれば、これ以上求めることをやめる。

$$z_m = w_{m1}x_1 + w_{m2}x_2 + \dots + w_{mp}x_p = \sum_{i=1}^p w_{mi}x_i \quad (2.4)$$

したがって、各重み係数は

$$w_{\alpha 1}^2 + w_{\alpha 2}^2 + \dots + w_{\alpha p}^2 = \sum_{k=1}^p w_{\alpha k}^2 = 1, \quad (\alpha = 1, 2, \dots, m) \quad (2.5)$$

を満たし、各主成分は次の条件を満たす。

条件1：第1主成分  $z_1$  の分散が最大である、

条件2：第  $\alpha$  成分  $z_\alpha$  は  $z_1, z_2, \dots, z_{\alpha-1}$  と無相関で分散が最大である。 ( $\alpha = 2, 3, \dots, m$ )

主成分を求める計算手順について説明する．まず，得られたデータ行列  $X$  を

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{p1} & \cdots & x_{pp} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

とする．このデータから各変量の分散共分散  $\sigma_{ij}$  を求め，それを行列  $\Sigma$  で表すと

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \cdots & \sigma_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{p1} & \cdots & \sigma_{pp} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

となる．分散共分散  $\sigma_{ij}$  は，

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j), \quad \bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik} \quad (2.8)$$

とする．

また，主成分を Eq. (2.1) の形式で求めるために各主成分の変量  $x_i$  の重み係数をそれぞれベクトル

$$\mathbf{w}_1 = \begin{pmatrix} w_{11} \\ w_{12} \\ \vdots \\ w_{1p} \end{pmatrix}, \mathbf{w}_2 = \begin{pmatrix} w_{21} \\ w_{22} \\ \vdots \\ w_{2p} \end{pmatrix}, \cdots, \mathbf{w}_m = \begin{pmatrix} w_{m1} \\ w_{m2} \\ \vdots \\ w_{mp} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

で表すと，第  $m$  主成分は  $X_m = (x_{1m}, x_{2m}, \cdots, x_{pm})^T$  として以下のように書くことができる．

$$z_m = \mathbf{w}_m^T \mathbf{X}_m \quad (2.10)$$

まず，第一主成分  $z_1$  の分散  $V\{z_1\}$  について，Eq. (2.5) の条件のもとで

$$V\{z_1\} = \mathbf{w}_1^T \Sigma \mathbf{w}_1 \quad (2.11)$$

を最大にするために，ラグランジュの未定乗数  $\lambda$  を用いて，

$$v = \mathbf{w}_1^T \Sigma \mathbf{w}_1 - \lambda(\mathbf{w}_1^T \mathbf{w}_1 - 1) \quad (2.12)$$

を  $\mathbf{w}_1^T$  で偏微分して 0 とおくと，

$$(\Sigma - \lambda I)\mathbf{w}_1 = 0 \quad (I \text{ は } p \text{ 次の単位行列}) \quad (2.13)$$

このベクトル  $\mathbf{w}_1$  の要素がすべて 0 以外の解を持つためには  $\lambda$  が固有方程式

$$|\Sigma - \lambda I| = 0 \quad (2.14)$$

の解 (固有値) とならなければならない． $p$  変量のデータから主成分を求める場合，主成分の個数はこの固有方程式から求まる異なる固有値  $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_m (m \leq p)$  の数だけ求めることができる．この  $m$  個の固有値は

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_i \geq \cdots \geq \lambda_m \geq 0 \quad (2.15)$$

とする。

今回、分散共分散行列  $\Sigma$  から固有値と固有ベクトルを求める方法として、べき乗法を用いた。まず、固有ベクトルの初期値を  $U_1$  とし、 $\Sigma$  と  $U_1$  の積 (これをベクトル  $A$  とおく) を求める。

$$A = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1p} \\ \sigma_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \sigma_{p1} & \cdots & \cdots & \sigma_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

そして、得られたベクトル  $A$  のノルムを求め、その平方根をとり固有値の近似値とする。

$$\lambda = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \cdots + a_p^2} \quad (2.17)$$

得られたベクトルの要素を求めたノルムの平方根で割り  $U_2$  とし、これを固有ベクトルの近似値とする。

$$U_2 = \begin{pmatrix} a_1/\lambda \\ a_2/\lambda \\ \vdots \\ a_p/\lambda \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

それから、 $\Sigma$  と  $U_2$  の積を求め、固有ベクトルの各要素の変化がある程度の精度以下になるまで、前述の操作を繰り返す。固有値と固有ベクトルを求めたら、行列  $\Sigma$  を更新する。更新後の行列  $\Sigma$  の要素  $\sigma_{ij}$  は、

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij} - \lambda \times u_i \times u_j \quad (2.19)$$

で表される。ここで、 $u_i$  は固有ベクトル  $U_2$  の第  $i$  要素、 $u_j$  は固有ベクトル  $U_2$  の第  $j$  要素である。

主成分分析は、情報量の分散で捉えているため、求めた主成分の分散の相対的な大きさを見ることでその主成分が持つ情報量を定量的に把握することができる。主成分の分散は分散共分散行列の固有値によって与えられることから、第  $i$  主成分が含む情報量を示す寄与率は、

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_p} \quad (2.20)$$

で求められる。また、第 1 主成分から第  $k$  主成分までを用いた場合の情報量を示す累積寄与率は、

$$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_k}{\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_k + \cdots + \lambda_p} \quad (2.21)$$

で与えられる。

## 2.2 最小二乗法

最小二乗法 (Least Squares Method : LSM)[6] とは，測定したデータの組を適切なモデル関数を用いて近似する際に，想定する関数と測定値の差の二乗和を最小となるような係数に決定する手法である．

例として，二次元の  $n$  個の計測データ  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  が得られたとする．モデル関数を  $y = ax$  とすると，理論値と測定値との差の二乗和  $J$  は

$$J = \sum_{i=1}^n (y_i - ax)^2 \quad (2.22)$$

となり，二乗和  $J$  が最小となるような  $a$  を決めるために，Eq. (2.22) を  $a$  について微分し，それを 0 と置く．

$$\frac{d}{da} J = -2 \sum_{i=1}^n x_i y_i + 2a \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \quad (2.23)$$

これを  $a$  について解くと

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.24)$$

が得られる．

今回，フォトンカウンティング形で得られたデータに対して最小二乗法を用いて媒質の分離，濃度の推定を行う．以下に，その手順を示す．

1. あらかじめ，複数個の基準値となる質量減衰係数をモンテカルロシミュレーションで求める．
2. 再構成画像中の注目画素に対して，以下の式の二乗和が最小となるような媒質の種類を推定する．

$$J(i) = \sum_{E=1}^F \{ \mu(E) - \rho(i) \mu_{m,i}(E) \}^2 \quad (2.25)$$

ここで， $i$  は媒質の種類， $J$  は二乗和， $F$  はエネルギー帯の数である．また， $\mu$  は測定された線減衰係数， $\mu_m$  は質量減衰係数である．

3. 媒質の密度  $\rho$  を推定する．

## 2.3 特異値分解

特異値分解 (Singular Value Decomposition : SVD)[7] とは，正方行列だけでなく任意の形の行列を分解することのできる手法である．

階数  $r$  の任意の  $n \times m$  行列  $A$  は，

$$A = U \Sigma V^T \quad (2.26)$$

という形に分解できる．ここで，

$$\Sigma = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_r), \quad \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_r > 0 \quad (2.27)$$

$$U^T U = V^T V = I_r \quad (2.28)$$

$\Sigma$  の対角要素を  $A$  の特異値と呼び， $A^2$  の固有値の平方根で表される．また， $U$  は  $n$  次直交行列であり各列を  $A$  の左特異値ベクトル， $V$  は  $m$  次直交行列で各列を  $A$  の右特異値ベクトルと呼ぶ．

ここで， $y = Ax$  の線形変換について考える．Eq. (2.26)，Eq. (2.28) から，

$$y = U \Sigma V^T x \quad (2.29)$$

Eq. (2.29) に左から  $U^T$  を掛けると，

$$U^T y = \Sigma V^T x \quad (2.30)$$

となる．また，行列の性質として対角行列には逆行列が存在するため， $\Sigma^{-1}$  が存在する．よって，

$$\Sigma^{-1} U^T y = V^T x \quad (2.31)$$

と変形できる．さらに，Eq. (2.31) に左から  $V$  を掛けると，

$$V \Sigma^{-1} U^T y = x \quad (2.32)$$

以上より， $A$  の擬似逆行列  $A^+ = V \Sigma^{-1} U^T$  が得られる．

データに対して特異値分解するにあたり，混合物の線減衰係数は線形結合ではないため，画像の再構成値に対して処理を行うことができない．そこで今回，混合物の線減衰係数を以下のように変形し，投影データに対して特異値分解法を行う．

$$\begin{aligned} \rho * (x_A * \mu'_A(E) + x_B * \mu'_B(E)) &= \rho * x_A * \mu'_A(E) + \rho * x_B * \mu'_B(E) \\ &= d_A * \mu'_A(E) + d_B * \mu'_B(E) \end{aligned} \quad (2.33)$$

ここで， $\rho$  を混合物の密度， $x_A$  を媒質  $A$  が含まれる割合， $d_A$  を  $A$  の areal density ( $d_A = \rho * x_A$ )， $\mu'_A$  を  $A$  の質量減衰係数とする．したがって，エネルギーウィンドウの総数を  $m$  とすると，スペクトル  $I(E)$  は，

$$\begin{aligned} I(E_1) &= I_0(E_1) * \exp(-(d_1 * \mu'_1(E_1) * l_1 + \dots + d_n * \mu'_n(E_1) * l_n)) \\ &\vdots \\ I(E_m) &= I_0(E_m) * \exp(-(d_1 * \mu'_1(E_m) * l_1 + \dots + d_n * \mu'_n(E_m) * l_n)) \end{aligned} \quad (2.34)$$

で表される． $n$  は媒質の種類の数， $l$  は透過距離である． $T(E) = \log \frac{I_0(E)}{I(E)}$  とすると，

$$\begin{aligned} T(E_1) &= d_1 * \mu'_1(E_1) * l_1 + \cdots + d_n * \mu'_n(E_1) * l_n \\ &\vdots \\ T(E_m) &= d_1 * \mu'_1(E_m) * l_1 + \cdots + d_n * \mu'_n(E_m) * l_n \end{aligned} \quad (2.35)$$

ここで，投影データの行列  $T$ ，質量減衰係数の行列  $M$ ，面密度の行列  $d$  として，

$$T = \begin{bmatrix} T(E_1) \\ \vdots \\ T(E_m) \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} \mu'_1(E_1) & \cdots & \mu'_n(E_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \mu'_1(E_m) & \cdots & \mu'_n(E_m) \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} d_1 * l_1 \\ \vdots \\ d_n * l_n \end{bmatrix}$$

とすると，投影データは以下の行列の形で表すことができる．

$$T = Md$$

特異値分解により， $M$  の擬似逆行列  $M^+$  を求め  $d$  を算出する．

## 第3章 シミュレーション

### 3.1 媒質同定法の比較

第2章で説明した主成分分析，最小二乗法，特異値分解の3手法の比較を行った．モンテカルロシミュレーションで得たデータに対して各処理を施し，定量的に評価した．

#### 3.1.1 評価方法

##### 線減衰係数の評価

作成した再構成画像にROI(ファントムの直径8割の範囲を対象とした)をセットし，平均値を算出することで理論値と測定値の比較を行った．媒質の線減衰係数の理論値はEq. (3.1)から求められる．

$$\eta_i = \frac{1}{x} \log_e \left[ \frac{\sum w_i p(E)}{\sum w_i p(E) \cdot \exp(-x\mu(E))} \right] \quad (3.1)$$

ここで， $x$  は透過距離， $E$  は光子のエネルギー， $\mu(E)$  は線減衰係数， $p(E)$  はエネルギースペクトルである．今回， $x$  は使用するファントムの直径にあわせ，3cmとして計算した．

##### 媒質同定結果の精度の評価

測定された密度と理論値から，Eq. (3.2)を用いて誤差率を算出することで結果の定量的評価を行った．

$$\text{Error ratio}(\%) = \frac{|\text{理論値} - \text{測定値}|}{\text{理論値}} \times 100 \quad (3.2)$$

#### 3.1.2 シミュレーション条件

シミュレーションで使用する媒質として，水，カルシウム (50 %)，ガドペンテト酸メグルミン (10 %)，金コロイド (3.0 wt %) の4媒質を用いてシミュレーションを行った．Table 3.1にシミュレーション条件を，Fig. 3.1にジオメトリを示す．使用したファントムはFig. 3.2に示す．水とカルシウムはそれぞれ人体の水分と骨を想定した媒質である．また，ガドペンテト酸メグルミン ( $\text{C}_{14}\text{H}_{20}\text{GdN}_3\text{O}_{15} \cdot \text{C}_7\text{H}_{17}\text{NO}_5$ ) は，MRIの造影剤として用いられている媒質であり，51keVにk-edgeが存在する．金コロイドは，近年注目されている新しい種類のX線造影剤であり，81keVにk-edgeが存在する．各媒質の線減衰係数を表すグラフをFig. 3.3に示す．本研究で用いたフォトンカウンティング形検出器では，任意の4つのエネルギーウィンドウを設定することができるため，k-edgeのあるエネルギー位置をしきい値として利用し媒質同定ができるかを検証する．Table 3.2には，特異値分解で使用する媒質ごとの質量減衰係数の理論値を示す．

Table 3.1: シミュレーション条件

|           |                     |           |
|-----------|---------------------|-----------|
| 管電圧       | 90 kV               |           |
| フィルタ      | Al 10 mm            |           |
| 発生光子数     | 200000 counts/pixel |           |
| 投影数       | 360 views           |           |
| 検出器サイズ    | 128 pixels          |           |
| ピクセルサイズ   | 0.05 cm             |           |
| マトリックスサイズ | 128 × 128 pixels    |           |
| 再構成手法     | FBP                 |           |
| エネルギー範囲   | bin0                | 36-50 keV |
|           | bin1                | 51-64 keV |
|           | bin2                | 65-80 keV |
|           | bin3                | 81-90 keV |

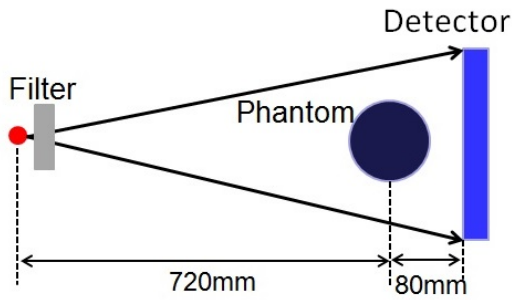


Fig. 3.1: ジオメトリ

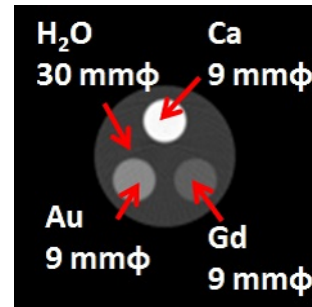


Fig. 3.2: ファントム

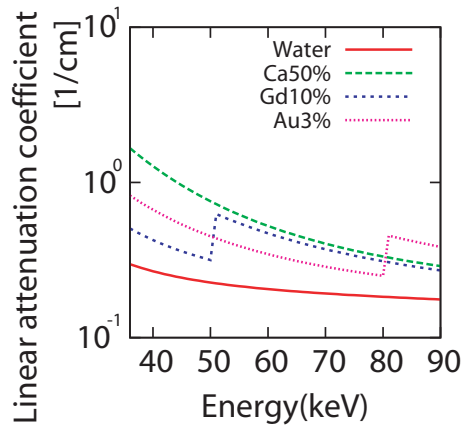


Fig. 3.3: 線減衰係数

Table 3.2: 質量減衰係数

|                  | bin0 | bin1 | bin2 | bin3 |
|------------------|------|------|------|------|
| Ca               | 1.35 | 0.73 | 0.46 | 0.34 |
| Gd               | 1.27 | 2.73 | 1.70 | 1.18 |
| Au               | 8.00 | 4.48 | 2.74 | 7.71 |
| H <sub>2</sub> O | 0.25 | 0.21 | 0.19 | 0.18 |

### 3.1.3 再構成結果

bin ごとの再構成画像を Fig. 3.4 に示す．また，媒質ごとの線減衰係数の理論値と再構成値をまとめた表を Table 3.3～3.6 に示す．

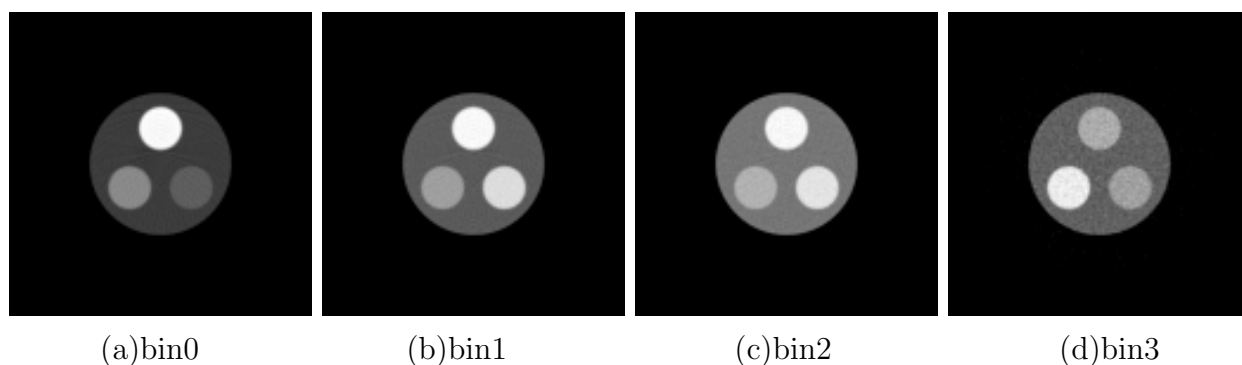


Fig. 3.4: 再構成画像

Table 3.3: 理論値との比較 (Ca)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.991 \pm 0.010$ | 0.978 |
| bin1 | $0.554 \pm 0.005$ | 0.571 |
| bin2 | $0.385 \pm 0.005$ | 0.398 |
| bin3 | $0.306 \pm 0.011$ | 0.315 |

Table 3.4: 理論値との比較 (Gd)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.376 \pm 0.009$ | 0.380 |
| bin1 | $0.492 \pm 0.005$ | 0.509 |
| bin2 | $0.354 \pm 0.004$ | 0.367 |
| bin3 | $0.285 \pm 0.010$ | 0.295 |

Table 3.5: 理論値との比較 (Au)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.549 \pm 0.009$ | 0.566 |
| bin1 | $0.354 \pm 0.005$ | 0.369 |
| bin2 | $0.276 \pm 0.005$ | 0.284 |
| bin3 | $0.419 \pm 0.010$ | 0.431 |

Table 3.6: 理論値との比較 (H<sub>2</sub>O)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.250 \pm 0.008$ | 0.252 |
| bin1 | $0.209 \pm 0.004$ | 0.211 |
| bin2 | $0.190 \pm 0.004$ | 0.192 |
| bin3 | $0.180 \pm 0.009$ | 0.181 |

### 3.1.4 主成分分析による分離結果

シミュレーションデータに対して、主成分分析して得られた因子画像を Fig. 3.5 に示す。また、各主成分の再構成値を Table 3.7～3.10 に示す。寄与率は、第1主成分から 0.909, 0.060, 0.031, 0.0003 であった。

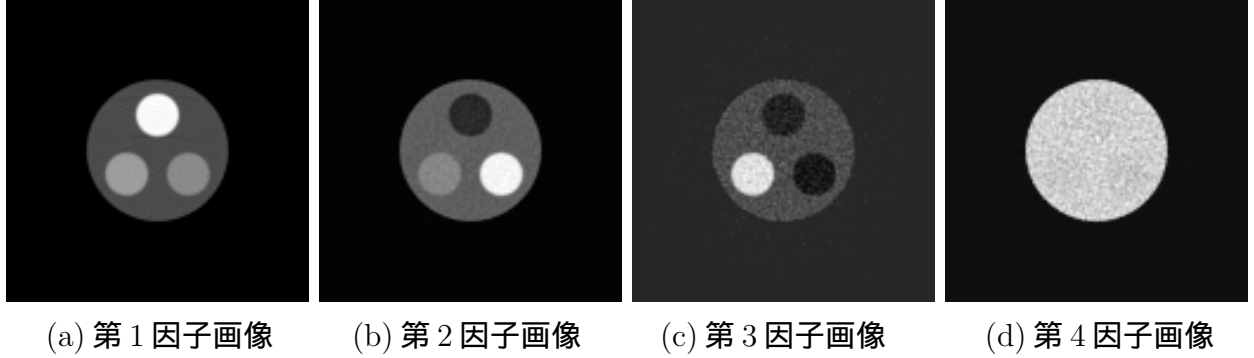


Fig. 3.5: 因子画像

Table 3.7: 第1主成分

|                  | 再構成値              |
|------------------|-------------------|
| Ca               | $1.235 \pm 0.011$ |
| Gd               | $0.685 \pm 0.011$ |
| Au               | $0.780 \pm 0.010$ |
| H <sub>2</sub> O | $0.376 \pm 0.009$ |

Table 3.8: 第2主成分

|                  | 再構成値              |
|------------------|-------------------|
| Ca               | $0.057 \pm 0.007$ |
| Gd               | $0.343 \pm 0.005$ |
| Au               | $0.187 \pm 0.006$ |
| H <sub>2</sub> O | $0.129 \pm 0.005$ |

Table 3.9: 第3主成分

|                  | 再構成値               |
|------------------|--------------------|
| Ca               | $-0.004 \pm 0.009$ |
| Gd               | $-0.014 \pm 0.009$ |
| Au               | $0.185 \pm 0.009$  |
| H <sub>2</sub> O | $0.039 \pm 0.008$  |

Table 3.10: 第4主成分

|                  | 再構成値              |
|------------------|-------------------|
| Ca               | $0.051 \pm 0.004$ |
| Gd               | $0.050 \pm 0.004$ |
| Au               | $0.051 \pm 0.003$ |
| H <sub>2</sub> O | $0.053 \pm 0.004$ |

各主成分の計算式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 \text{第1主成分} &= 0.83 \times \text{bin0} + 0.44 \times \text{bin1} + 0.26 \times \text{bin2} + 0.23 \times \text{bin3} \\
 \text{第2主成分} &= -0.56 \times \text{bin0} + 0.61 \times \text{bin1} + 0.38 \times \text{bin2} + 0.41 \times \text{bin3} \\
 \text{第3主成分} &= 0.04 \times \text{bin0} - 0.42 \times \text{bin1} - 0.21 \times \text{bin2} + 0.88 \times \text{bin3} \\
 \text{第4主成分} &= 0.01 \times \text{bin0} - 0.51 \times \text{bin1} + 0.86 \times \text{bin2} - 0.03 \times \text{bin3}
 \end{aligned}$$

### 3.1.5 最小二乗法による分離結果

Fig. 3.4の再構成画像に対して，最小二乗法によって媒質分離を行った結果を Fig. 3.6 に示す．基準値となる媒質として，水，Ca(40 %，50 %，60 %)，Gd(5 %，10 %，15 %)，Au(1 %，3 %，5 %) を用いた．各媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 3.11 に示す．

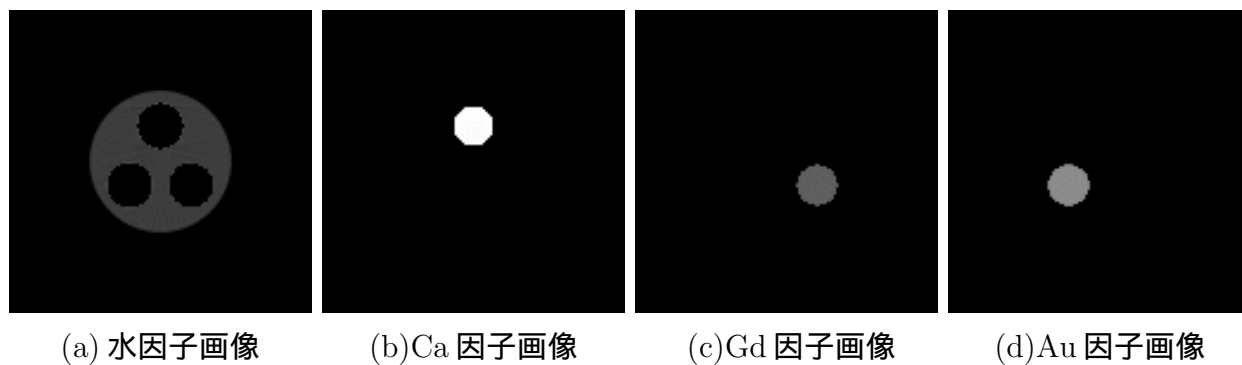


Fig. 3.6: 分離画像

Table 3.11: 密度の推定

|                  | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|------------------|--------|-------------------|-------|
| Ca               | 1.2135 | $1.206 \pm 0.018$ | 0.7 % |
| Gd               | 1.0466 | $1.044 \pm 0.005$ | 0.3 % |
| Au               | 1.0274 | $1.025 \pm 0.003$ | 0.2 % |
| H <sub>2</sub> O | 0.9982 | $0.998 \pm 0.010$ | 0.0 % |

### 3.1.6 特異値分解による分離結果

シミュレーションで得た投影データに対して，Table 3.2 の質量減衰係数を用いて特異値分解を行い，媒質分離した結果画像を Fig. 3.7 に示す．各媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 3.12 に示す．

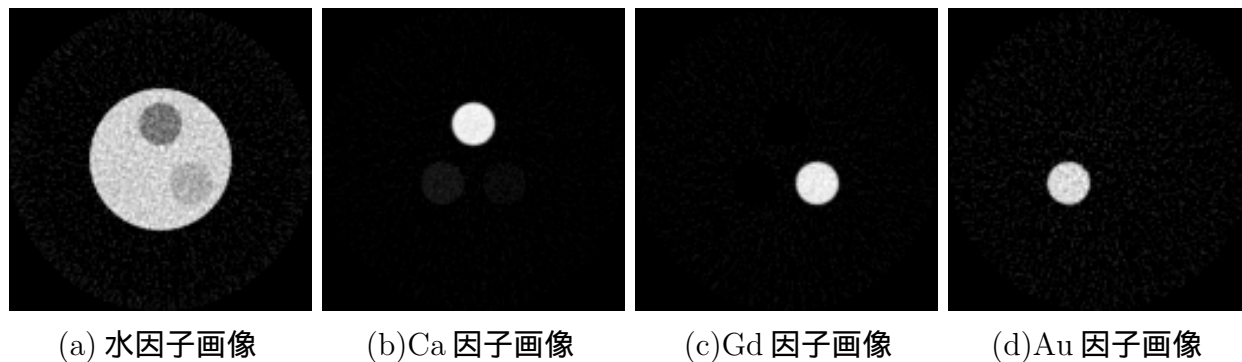


Fig. 3.7: 分離画像

Table 3.12: 密度の推定

|                  | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率    |
|------------------|--------|-------------------|--------|
| Ca               | 0.5452 | $0.662 \pm 0.015$ | 22.2 % |
| Gd               | 0.1090 | $0.111 \pm 0.004$ | 5.5 %  |
| Au               | 0.0327 | $0.031 \pm 0.002$ | 2.2 %  |
| H <sub>2</sub> O | 1.0904 | $0.994 \pm 0.066$ | 8.8 %  |

## 3.2 単一媒質のシミュレーション

さまざまな濃度の金コロイド溶液とガドリニウム水溶液を、水と金コロイド単体またはガドリニウム単体に分離できるかをシミュレーションから検証した。

### 3.2.1 金コロイドを用いたシミュレーション

使用したファントムは、金コロイド溶液 (1.6wt % , 2.0wt % , 2.4wt % , 4.0wt %) である。Table 3.13 にシミュレーション条件を、Fig. 3.8 にジオメトリを示す。媒質の線減衰係数は Fig. 3.10 に示す。また、設定したエネルギーウィンドウごとの質量減衰係数の理論値を Table 3.14 に示す。

Table 3.13: シミュレーション条件

|           |                     |           |
|-----------|---------------------|-----------|
| 管電圧       | 90 kV               |           |
| フィルタ      | Al 2 mm             |           |
| 発生光子数     | 200000 counts/pixel |           |
| 投影数       | 360 views           |           |
| 検出器サイズ    | 128 pixels          |           |
| ピクセルサイズ   | 0.05 cm             |           |
| マトリックスサイズ | 128 × 128 pixels    |           |
| 再構成手法     | FBP                 |           |
| エネルギー範囲   | bin0                | 51-60 keV |
|           | bin1                | 61-70 keV |
|           | bin2                | 71-80 keV |
|           | bin3                | 81-90 keV |

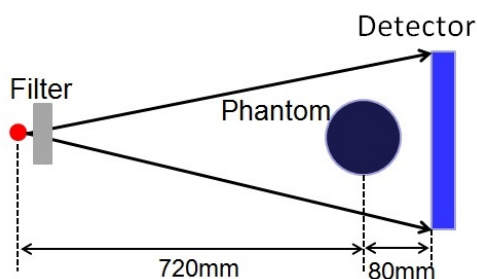


Fig. 3.8: ジオメトリ



Fig. 3.9: ファントム

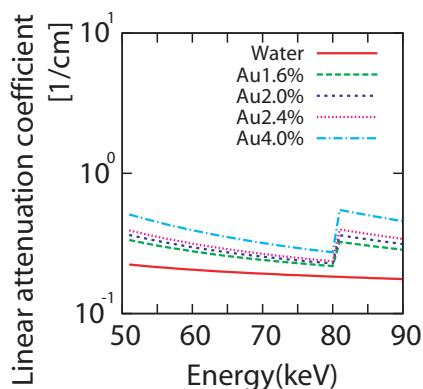


Fig. 3.10: 線減衰係数

Table 3.14: 質量減衰係数

|                  | bin0 | bin1 | bin2 | bin3 |
|------------------|------|------|------|------|
| Au               | 5.07 | 3.47 | 2.51 | 7.71 |
| H <sub>2</sub> O | 0.21 | 0.20 | 0.19 | 0.18 |

### 3.2.2 再構成結果

bin ごとの再構成画像を Fig. 3.11 に示す．また，媒質ごとの線減衰係数の理論値と再構成値をまとめた表を Table 3.15～3.18 に示す．

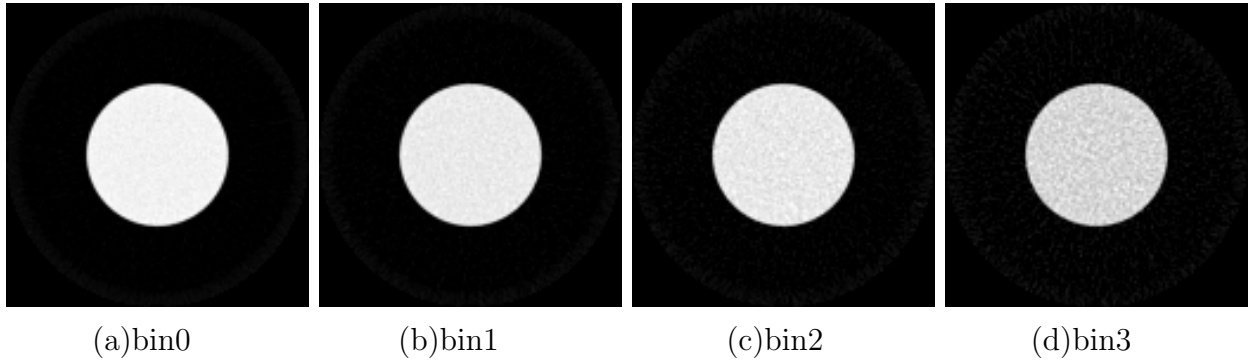


Fig. 3.11: 再構成画像

Table 3.15: 理論値との比較 (1.6wt %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.299 \pm 0.004$ | 0.303 |
| bin1 | $0.255 \pm 0.005$ | 0.256 |
| bin2 | $0.231 \pm 0.007$ | 0.229 |
| bin3 | $0.310 \pm 0.016$ | 0.312 |

Table 3.16: 理論値との比較 (2.0wt %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.320 \pm 0.004$ | 0.326 |
| bin1 | $0.270 \pm 0.005$ | 0.272 |
| bin2 | $0.242 \pm 0.007$ | 0.240 |
| bin3 | $0.343 \pm 0.016$ | 0.346 |

Table 3.17: 理論値との比較 (2.4wt %)

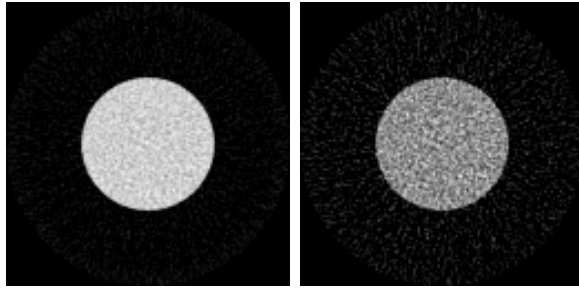
|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.342 \pm 0.005$ | 0.349 |
| bin1 | $0.284 \pm 0.005$ | 0.287 |
| bin2 | $0.253 \pm 0.007$ | 0.250 |
| bin3 | $0.376 \pm 0.016$ | 0.379 |

Table 3.18: 理論値との比較 (4.0wt %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.432 \pm 0.005$ | 0.443 |
| bin1 | $0.345 \pm 0.006$ | 0.349 |
| bin2 | $0.298 \pm 0.008$ | 0.295 |
| bin3 | $0.512 \pm 0.021$ | 0.517 |

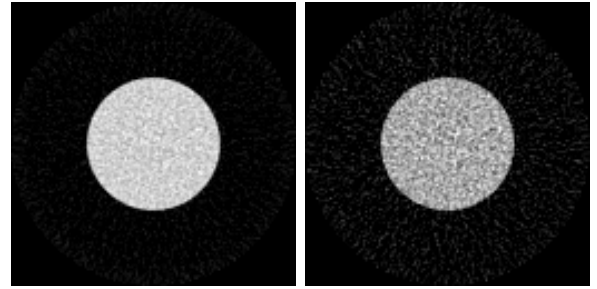
### 3.2.3 特異値分解による分離結果

各濃度の投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 3.12～3.15 に示す．また，各媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 3.19 に示す．



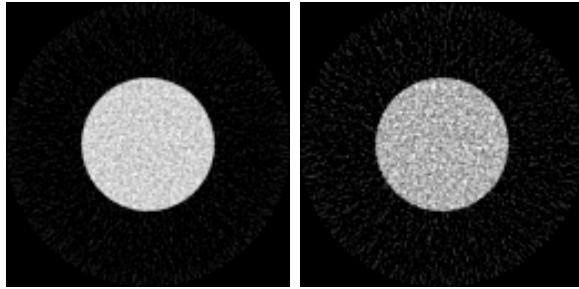
(a) 水因子画像 (b) Au 因子画像

Fig. 3.12: 分離画像 (1.6wt %)



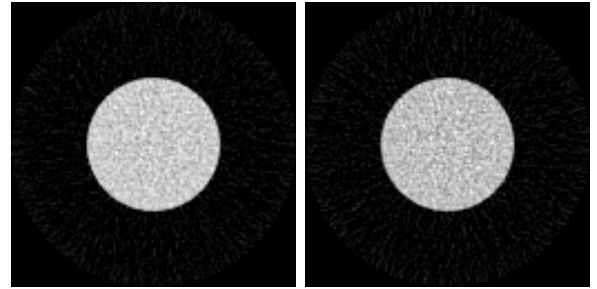
(a) 水因子画像 (b) Au 因子画像

Fig. 3.13: 分離画像 (2.0wt %)



(a) 水因子画像 (b) Au 因子画像

Fig. 3.14: 分離画像 (2.4wt %)



(a) 水因子画像 (b) Au 因子画像

Fig. 3.15: 分離画像 (4.0wt %)

Table 3.19: 密度の推定

|                         | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|-------------------------|--------|-------------------|-------|
| Au(1.6 %)               | 0.0162 | $0.017 \pm 0.003$ | 4.8 % |
| Au(2.0 %)               | 0.0203 | $0.021 \pm 0.003$ | 3.2 % |
| Au(2.4 %)               | 0.0245 | $0.026 \pm 0.003$ | 6.1 % |
| Au(4.0 %)               | 0.0415 | $0.043 \pm 0.004$ | 3.6 % |
| H <sub>2</sub> O(1.6 %) | 0.9974 | $0.995 \pm 0.065$ | 0.2 % |
| H <sub>2</sub> O(2.0 %) | 0.9971 | $0.997 \pm 0.068$ | 0.0 % |
| H <sub>2</sub> O(2.4 %) | 0.9969 | $0.999 \pm 0.068$ | 0.2 % |
| H <sub>2</sub> O(4.0 %) | 0.9961 | $1.002 \pm 0.083$ | 0.6 % |

### 3.2.4 ガドリニウムを用いたシミュレーション

使用したファントムは、ガドペンテト酸メグルミン溶液 (7.428 % , 9.285 % , 12.38 % , 18.57 %) である . Table 3.20 にシミュレーション条件を , Fig. 3.16 にジオメトリを示す . また , 媒質の線減衰係数のカーブを Fig. 3.18 に , 質量減衰係数の理論値を Table 3.21 に示す .

Table 3.20: シミュレーション条件

|           |                     |           |
|-----------|---------------------|-----------|
| 管電圧       | 90 kV               |           |
| フィルタ      | Al 2 mm             |           |
| 発生光子数     | 200000 counts/pixel |           |
| 投影数       | 360 views           |           |
| 検出器サイズ    | 128 pixels          |           |
| ピクセルサイズ   | 0.05 cm             |           |
| マトリックスサイズ | 128 × 128 pixels    |           |
| 再構成手法     | FBP                 |           |
| エネルギー範囲   | bin0                | 41-49 keV |
|           | bin1                | 50-54 keV |
|           | bin2                | 55-64 keV |
|           | bin3                | 65-90 keV |

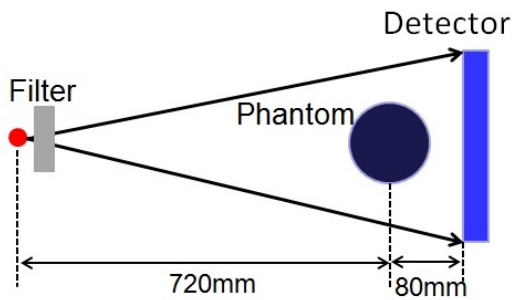


Fig. 3.16: ジオメトリ

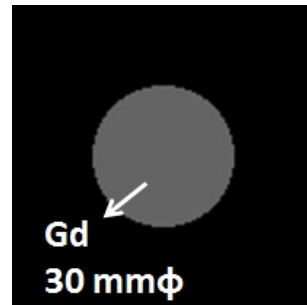


Fig. 3.17: ファントム

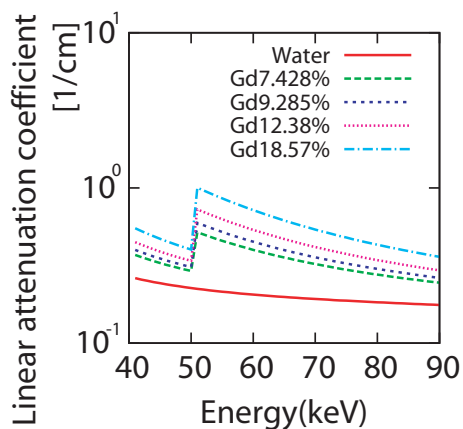


Fig. 3.18: 線減衰係数

Table 3.21: 質量減衰係数

|                  | bin0 | bin1 | bin2 | bin3 |
|------------------|------|------|------|------|
| Gd               | 1.24 | 1.50 | 2.64 | 1.58 |
| H <sub>2</sub> O | 0.25 | 0.22 | 0.21 | 0.19 |

### 3.2.5 再構成結果

bin ごとの再構成画像を Fig. 3.19 に示す．今回，検出器のエネルギー分解能を考慮し，bin1 を除いた 3 つの bin を用いることとした．また，媒質ごとの線減衰係数の理論値と再構成値をまとめた表を Table 3.22 ~ 3.25 に示す．

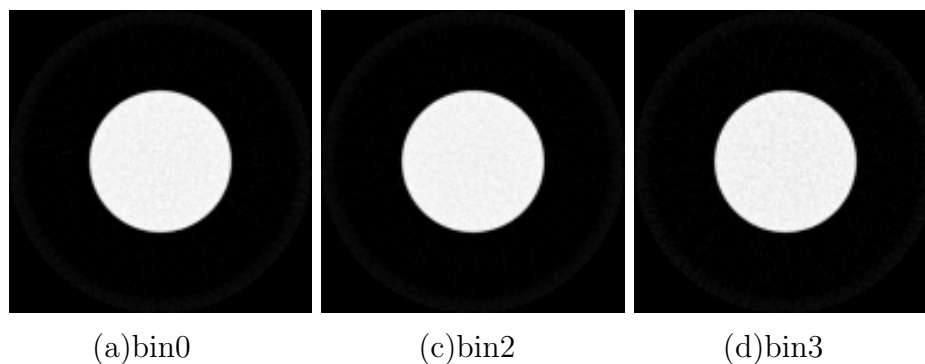


Fig. 3.19: 再構成画像

Table 3.22: 理論値との比較 (7.428 %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.326 \pm 0.004$ | 0.331 |
| bin2 | $0.403 \pm 0.005$ | 0.410 |
| bin3 | $0.310 \pm 0.005$ | 0.314 |

Table 3.23: 理論値との比較 (9.285 %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.347 \pm 0.005$ | 0.351 |
| bin2 | $0.455 \pm 0.006$ | 0.461 |
| bin3 | $0.341 \pm 0.005$ | 0.344 |

Table 3.24: 理論値との比較 (12.38 %)

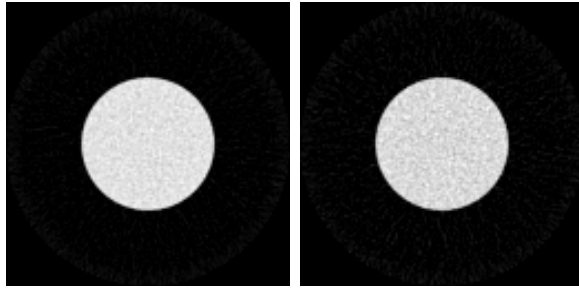
|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.385 \pm 0.005$ | 0.393 |
| bin2 | $0.542 \pm 0.007$ | 0.553 |
| bin3 | $0.395 \pm 0.006$ | 0.400 |

Table 3.25: 理論値との比較 (18.57 %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.463 \pm 0.006$ | 0.474 |
| bin2 | $0.726 \pm 0.009$ | 0.740 |
| bin3 | $0.505 \pm 0.007$ | 0.512 |

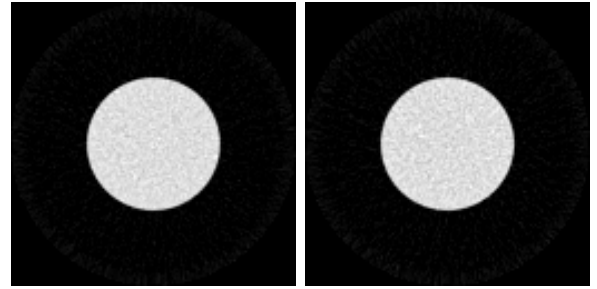
### 3.2.6 特異値分解による分離結果

各濃度の投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 3.20～3.23 に示す．また，各媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 3.26 に示す．



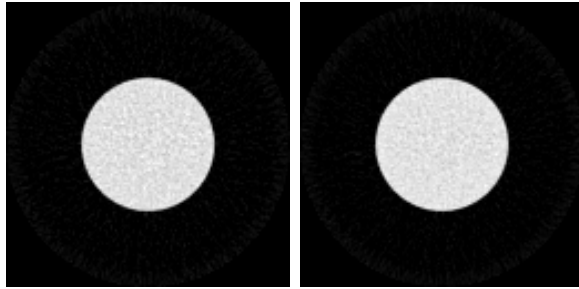
(a) 水因子画像 (b) Gd 因子画像

Fig. 3.20: 分離画像 (7.428 %)



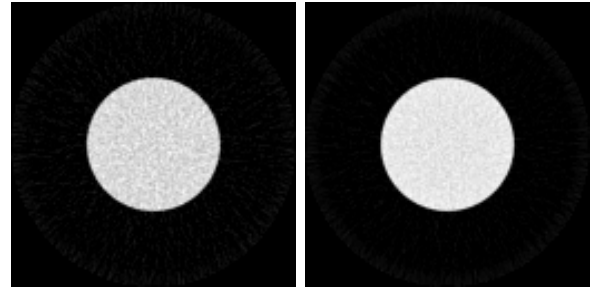
(a) 水因子画像 (b) Gd 因子画像

Fig. 3.21: 分離画像 (9.285 %)



(a) 水因子画像 (b) Gd 因子画像

Fig. 3.22: 分離画像 (12.38 %)



(a) 水因子画像 (b) Gd 因子画像

Fig. 3.23: 分離画像 (18.57 %)

Table 3.26: 密度の推定

|                           | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|---------------------------|--------|-------------------|-------|
| Gd(7.428 %)               | 0.0767 | $0.080 \pm 0.004$ | 4.2 % |
| Gd(9.285 %)               | 0.0968 | $0.101 \pm 0.004$ | 4.3 % |
| Gd(12.38 %)               | 0.1311 | $0.137 \pm 0.005$ | 4.5 % |
| Gd(18.57 %)               | 0.2030 | $0.211 \pm 0.006$ | 3.9 % |
| H <sub>2</sub> O(7.428 %) | 0.9566 | $0.948 \pm 0.034$ | 0.9 % |
| H <sub>2</sub> O(9.285 %) | 0.9460 | $0.938 \pm 0.035$ | 0.9 % |
| H <sub>2</sub> O(12.38 %) | 0.9280 | $0.921 \pm 0.038$ | 0.8 % |
| H <sub>2</sub> O(18.57 %) | 0.8902 | $0.883 \pm 0.044$ | 0.8 % |

### 3.3 複数媒質のシミュレーション

水と金コロイド 4.0wt %を用いてシミュレーションを行った．これは，人体の水分と金コロイドを造影剤として使用した状況を想定し，媒質分離できるかを検証するシミュレーションである．シミュレーション条件を Table 3.27 に，ジオメトリを Fig. 3.24 に示す．また，各媒質の線減衰係数を Fig. 3.26 に，Table 3.28 に質量減衰係数の理論値を示す．

Table 3.27: シミュレーション条件

|           |                     |           |
|-----------|---------------------|-----------|
| 管電圧       | 90 kV               |           |
| フィルタ      | Al 2 mm             |           |
| 発生光子数     | 200000 counts/pixel |           |
| 投影数       | 360 views           |           |
| 検出器サイズ    | 128 pixels          |           |
| ピクセルサイズ   | 0.05 cm             |           |
| マトリックスサイズ | 128 × 128 pixels    |           |
| 再構成手法     | FBP                 |           |
| エネルギー範囲   | bin0                | 51-60 keV |
|           | bin1                | 61-70 keV |
|           | bin2                | 71-80 keV |
|           | bin3                | 81-90 keV |

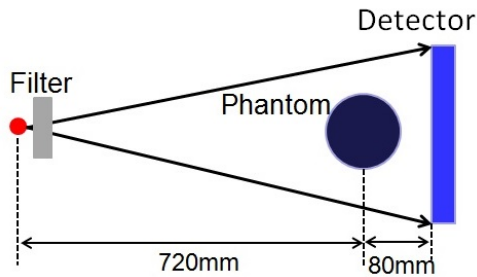


Fig. 3.24: ジオメトリ

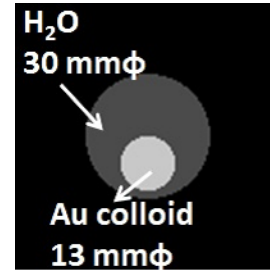


Fig. 3.25: ファントム

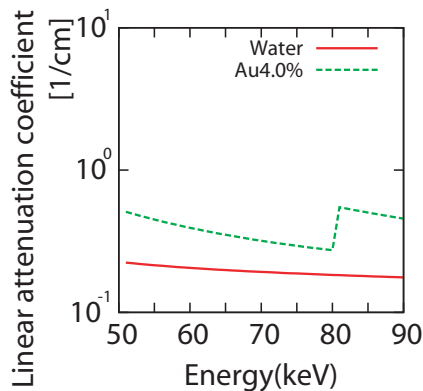


Fig. 3.26: 線減衰係数

Table 3.28: 質量減衰係数

|                  | bin0 | bin1 | bin2 | bin3 |
|------------------|------|------|------|------|
| Au               | 5.07 | 3.47 | 2.51 | 7.71 |
| H <sub>2</sub> O | 0.21 | 0.20 | 0.19 | 0.18 |

### 3.3.1 再構成結果

bin ごとの再構成画像を Fig. 3.27 に示す．また，媒質ごとの線減衰係数の理論値と再構成値をまとめた表を Table 3.29，3.30 に示す．

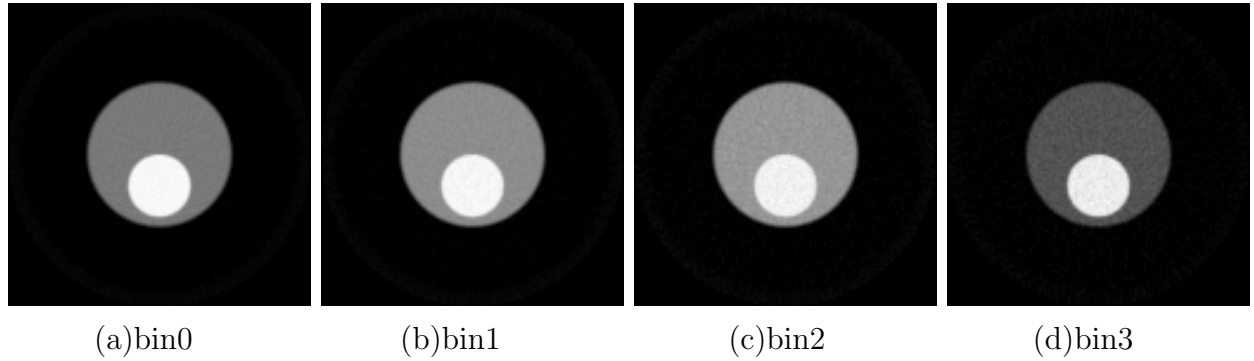


Fig. 3.27: 再構成画像

Table 3.29: 理論値との比較 (Au 4.0wt %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.425 \pm 0.004$ | 0.443 |
| bin1 | $0.340 \pm 0.004$ | 0.349 |
| bin2 | $0.295 \pm 0.006$ | 0.295 |
| bin3 | $0.505 \pm 0.012$ | 0.517 |

Table 3.30: 理論値との比較 ( $\text{H}_2\text{O}$ )

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.208 \pm 0.004$ | 0.214 |
| bin1 | $0.194 \pm 0.004$ | 0.198 |
| bin2 | $0.184 \pm 0.005$ | 0.188 |
| bin3 | $0.177 \pm 0.011$ | 0.181 |

### 3.3.2 特異値分解による分離結果

投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 3.28 に示す．また，各媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 3.31 に示す．

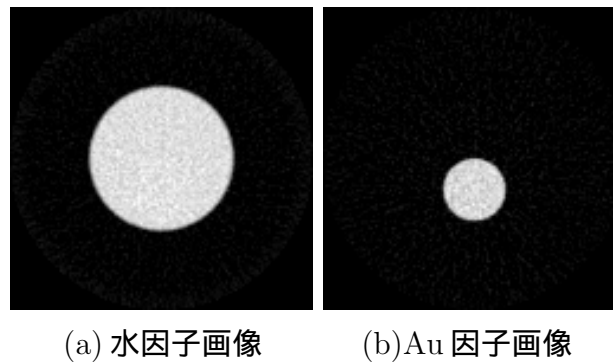


Fig. 3.28: 分離画像

Table 3.31: 密度の推定

|                              | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|------------------------------|--------|-------------------|-------|
| Au(4.0 %)                    | 0.0415 | $0.043 \pm 0.002$ | 3.6 % |
| $\text{H}_2\text{O}$ (4.0 %) | 0.9961 | $0.991 \pm 0.049$ | 0.5 % |
| $\text{H}_2\text{O}$         | 1.0376 | $0.973 \pm 0.050$ | 4.5 % |

### 3.4 混合媒質のシミュレーション

さまざまな割合の水，金コロイド，ガドペンテト酸メグルミンを混合した溶液を用いてシミュレーションを行った．混合溶液 (A) は，水 91.052 %，金コロイド 1.52 %，ガドリニウム 7.428 %を含んだ媒質である．混合溶液 (B) は，水 88.815 %，金コロイド 1.9 %，ガドリニウム 9.285 %を含んだ媒質である．混合溶液 (C) は水 82.824 %，金コロイド 2.32 %，ガドリニウム 14.856 %を含んだ媒質である．シミュレーション条件を Table 3.32 に，ジオメトリを Fig. 3.29 に示す．また，各混合溶液の線減衰係数を Fig. 3.31 に，質量減衰係数の理論値を Table 3.33 に示す．

Table 3.32: シミュレーション条件

|           |                     |           |
|-----------|---------------------|-----------|
| 管電圧       | 90 kV               |           |
| フィルタ      | Al 2 mm             |           |
| 発生光子数     | 200000 counts/pixel |           |
| 投影数       | 360 views           |           |
| 検出器サイズ    | 128 pixels          |           |
| ピクセルサイズ   | 0.05 cm             |           |
| マトリックスサイズ | 128 × 128 pixels    |           |
| 再構成手法     | FBP                 |           |
| エネルギー範囲   | bin0                | 45-50 keV |
|           | bin1                | 51-64 keV |
|           | bin2                | 65-80 keV |
|           | bin3                | 81-90 keV |

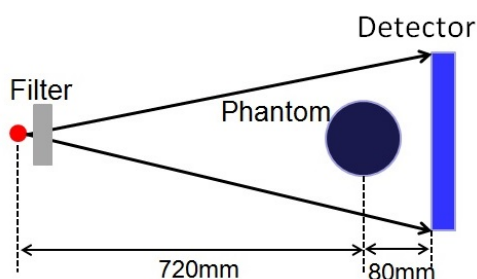


Fig. 3.29: ジオメトリ



Fig. 3.30: ファントム

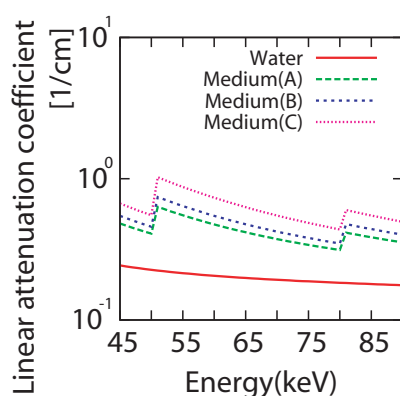


Fig. 3.31: 線減衰係数

Table 3.33: 質量減衰係数

|                  | bin0 | bin1 | bin2 | bin3 |
|------------------|------|------|------|------|
| Gd               | 1.10 | 2.76 | 1.71 | 1.18 |
| Au               | 7.76 | 4.51 | 2.75 | 7.71 |
| H <sub>2</sub> O | 0.24 | 0.21 | 0.19 | 0.18 |

### 3.4.1 再構成結果

bin ごとの再構成画像を Fig. 3.32 に示す．また，媒質ごとの線減衰係数の理論値と再構成値をまとめた表を Table 3.34 ~ 3.36 に示す．

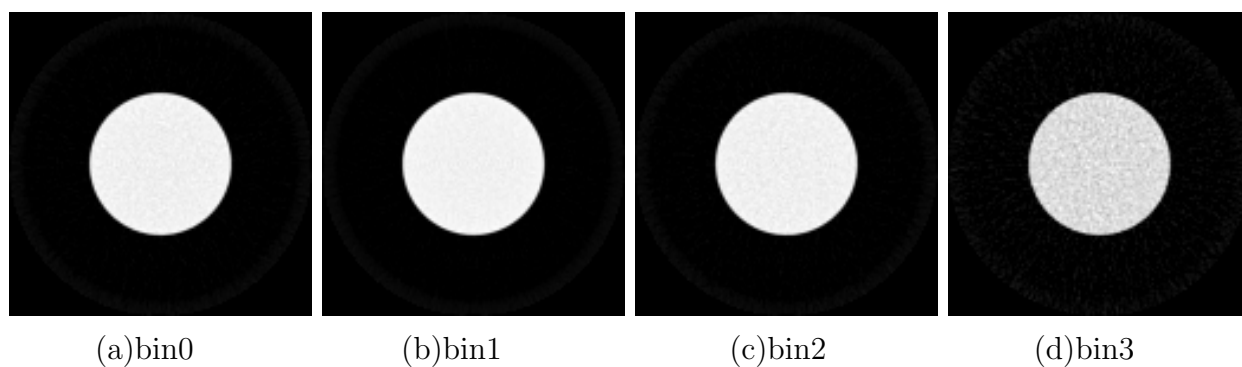


Fig. 3.32: 再構成画像

Table 3.34: 理論値との比較 (混合媒質 A)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.450 \pm 0.007$ | 0.444 |
| bin1 | $0.507 \pm 0.006$ | 0.519 |
| bin2 | $0.367 \pm 0.006$ | 0.372 |
| bin3 | $0.391 \pm 0.018$ | 0.395 |

Table 3.35: 理論値との比較 (混合媒質 B)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.508 \pm 0.007$ | 0.500 |
| bin1 | $0.585 \pm 0.007$ | 0.600 |
| bin2 | $0.413 \pm 0.007$ | 0.419 |
| bin3 | $0.447 \pm 0.019$ | 0.452 |

Table 3.36: 理論値との比較 (混合媒質 C)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.621 \pm 0.009$ | 0.607 |
| bin1 | $0.787 \pm 0.009$ | 0.807 |
| bin2 | $0.533 \pm 0.008$ | 0.542 |
| bin3 | $0.559 \pm 0.022$ | 0.565 |

### 3.4.2 特異値分解による分離結果

混合媒質 A の投影データに対して、特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 3.33 に示す。また、媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 3.37 に示す。

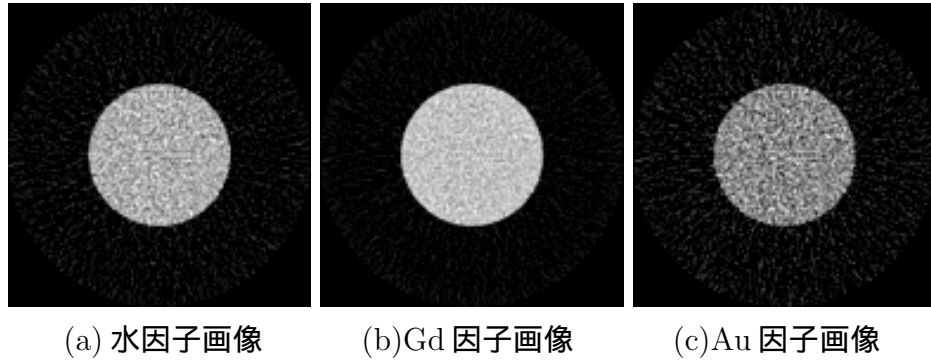


Fig. 3.33: 分離画像 (混合媒質 A)

Table 3.37: 密度の推定 (混合媒質 A)

|                  | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|------------------|--------|-------------------|-------|
| Gd               | 0.0779 | $0.081 \pm 0.006$ | 3.9 % |
| Au               | 0.0159 | $0.016 \pm 0.004$ | 0.3 % |
| H <sub>2</sub> O | 0.9540 | $0.983 \pm 0.137$ | 3.0 % |

混合媒質 B の投影データに対して、特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 3.34 に示す。また、媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 3.38 に示す。

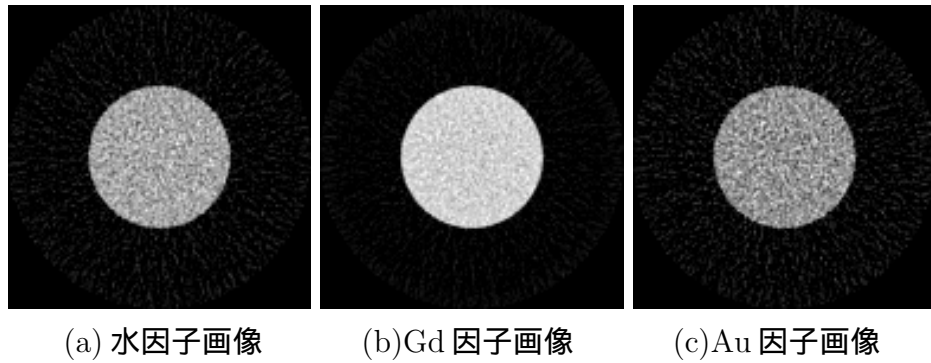


Fig. 3.34: 分離画像 (混合媒質 B)

Table 3.38: 密度の推定 (混合媒質 B)

|                  | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|------------------|--------|-------------------|-------|
| Gd               | 0.0987 | $0.102 \pm 0.007$ | 3.4 % |
| Au               | 0.0202 | $0.020 \pm 0.004$ | 1.0 % |
| H <sub>2</sub> O | 0.9440 | $0.982 \pm 0.150$ | 4.0 % |

混合媒質 C の投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 3.35 に示す．また，媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 3.39 に示す．

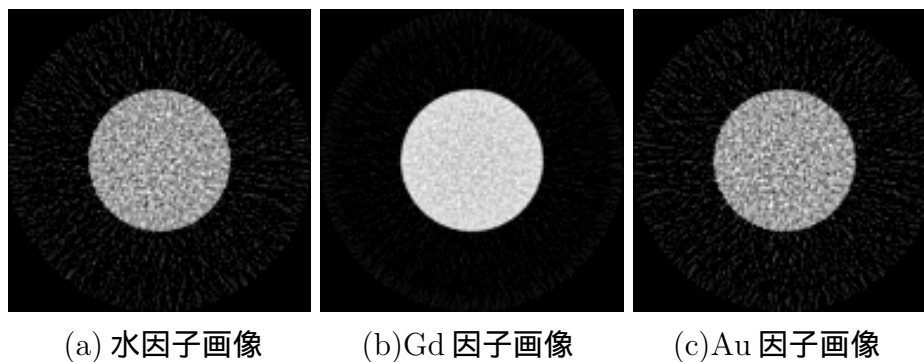


Fig. 3.35: 分離画像 (混合媒質 C)

Table 3.39: 密度の推定 (混合媒質 C)

|                  | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|------------------|--------|-------------------|-------|
| Gd               | 0.1632 | $0.166 \pm 0.009$ | 1.7 % |
| Au               | 0.0255 | $0.025 \pm 0.005$ | 1.9 % |
| H <sub>2</sub> O | 0.9100 | $0.981 \pm 0.176$ | 7.8 % |

## 第4章 実験

### 4.1 実験器具

#### 4.1.1 X線管

本研究では, X線管として Fig. 4.1 に示す TRIX-150S(Toreck , Japan) を使用した. Table 4.1 に X線管の仕様を示す.

Table 4.1: X線管の仕様

|      |     |              |
|------|-----|--------------|
| 焦点寸法 | 大焦点 | 0.6×0.6 mm   |
|      | 小焦点 | 0.3×0.3 mm   |
| 照射角  |     | 35°(円錐状)     |
| 管電圧  |     | 30 ~ 150 kV  |
| 管電流  | 大焦点 | 1.0 ~ 2.4 mA |
|      | 小焦点 | 0.5 ~ 1.4 mA |

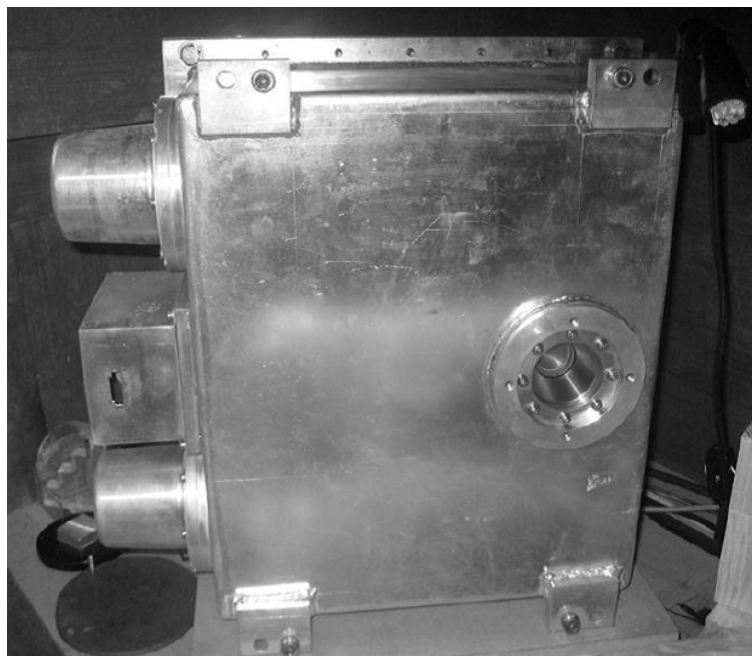


Fig. 4.1: X線管

### 4.1.2 Telesystems 検出器

フォトンカウンティング形検出器として, Fig. 4.2 に示す Telesystems 検出器 (Telesystems, Japan) を用いて実験を行った. Table 4.2 に検出器の仕様を示す.

Table 4.2: Telesystems 検出器の仕様

|             |                                |
|-------------|--------------------------------|
| エネルギー範囲     | 9 ~ 100 keV or<br>14 ~ 150 keV |
| 波形成形時間      | 300 nsec or 500 nsec           |
| 最大計数率       | 10 Mcps/mm <sup>2</sup>        |
| 有効視野        | 8×144 mm <sup>2</sup>          |
| ピクセルサイズ     | 0.2 mm                         |
| 検出器サイズ      | 40×720 pixels                  |
| モジュールサイズ    | 40×40 pixels                   |
| モジュール数      | 18                             |
| フレーム数       | 300 fps                        |
| エネルギー BIN 数 | 4                              |
| バイアス電圧      | -500 V                         |

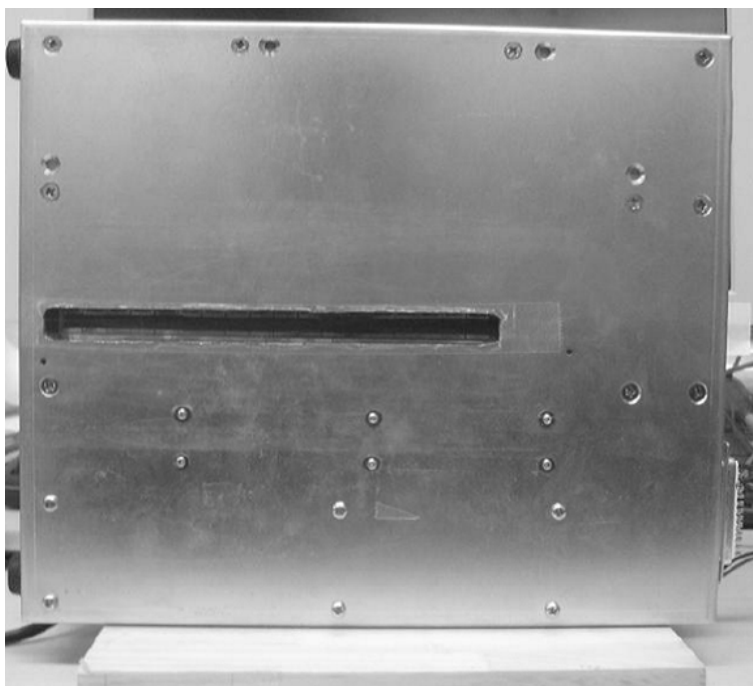


Fig. 4.2: Telesystems 検出器

### 4.1.3 実験環境

実験環境を Fig. 4.3 に示す．ファントムをターンテーブル上に置き， $360^\circ$ 回転させてデータ収集を行った．

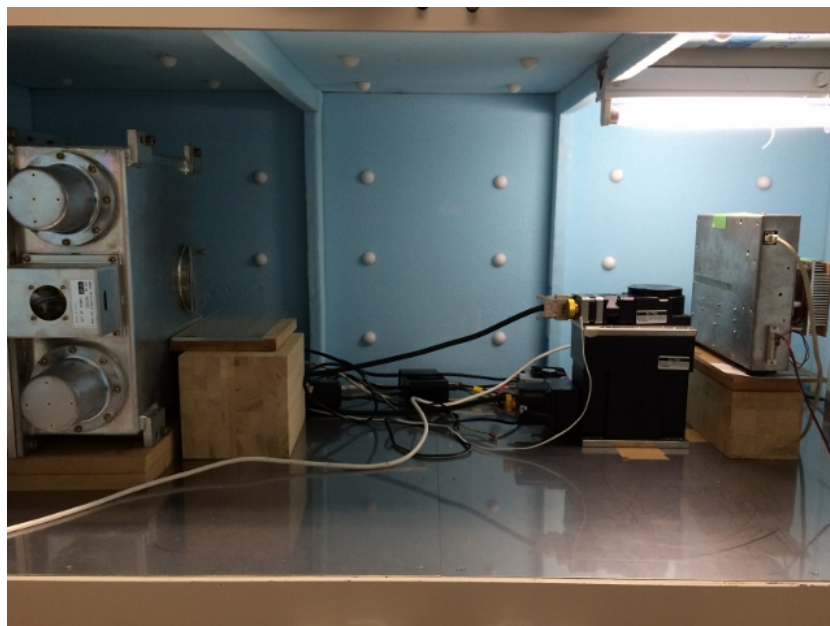


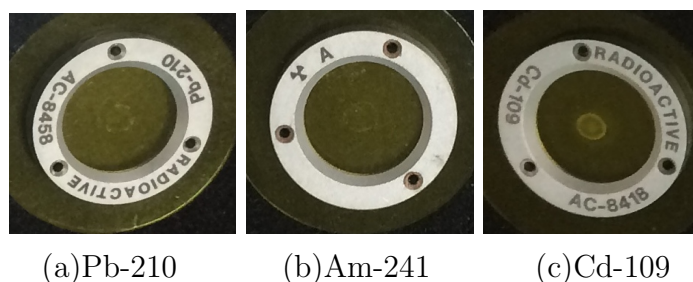
Fig. 4.3: 実験環境

## 4.2 検出器性能

実験において，検出器のエネルギー分解能や測定時に発生する雑音の影響を受けることで，媒質同定が困難になる．そこで，これらの問題の影響を低減するためにエネルギーキャリブレーションと X 線管のカウント補正を行い改善を図った．

### 4.2.1 エネルギーキャリブレーション

Fig. 4.4 に示す 3 つの  $\gamma$  線源 (Pb-210(47keV)，Am-241(60keV)，Cd-109(88keV)) を用いてエネルギー校正を行った．キャリブレーションの手順を以下に示す．



(a)Pb-210

(b)Am-241

(c)Cd-109

Fig. 4.4:  $\gamma$  線源

## キャリブレーション手順

1. 線源を Telesystems 検出器の任意のモジュールの中央に固定する。
2. 任意のステップの幅を取り，10 秒ほどの収集時間のデータを繰り返し収集する。
3. 線源をセットした範囲のモジュール部分に ROI を取り平均値を算出し，収集したデータの個数すべてを積算する。
4. カウント値の差分を取り，グラフを描く。

手順 2 に関して，まず最初の段階では線源のピークのスレッシュ位置が不明のため，ステップ幅を 10 ステップなど広めに取ってピークがどのあたりにあるかを見当づける必要がある。見当がついた後は，収集のステップ幅を 5 ステップ，3 ステップ，1 ステップと段階を追って狭めていき，最終的にはスレッシュ位置を特定する。また，収集時間が短いと雑音の影響を受けるため，短い収集時間で繰り返しデータを取り積算する必要がある（例えば，10 秒 × 60 回の 10 分積算など）。

手順 4 に関しては，モジュールのスレッシュ値を 40 に設定したデータから 42 に設定したデータを引けば，スレッシュ 40 のカウント値が得られる。

Fig. 4.5 に  $\gamma$  線源 Pb-210，Am-241，Cd-109 のピークをそれぞれ示す。エネルギーキャリブレーションにより得られたエネルギーとチャンネルの関係を Fig. 4.6 に示す。また，エネルギーキャリブレーションによる Gd の測定結果の変化を比較した結果を Fig 4.7 に示す。

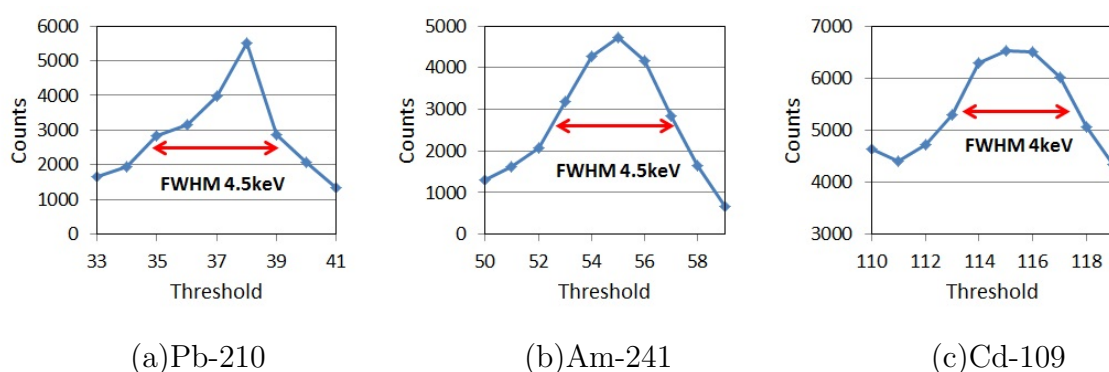


Fig. 4.5:  $\gamma$  線源のピーク

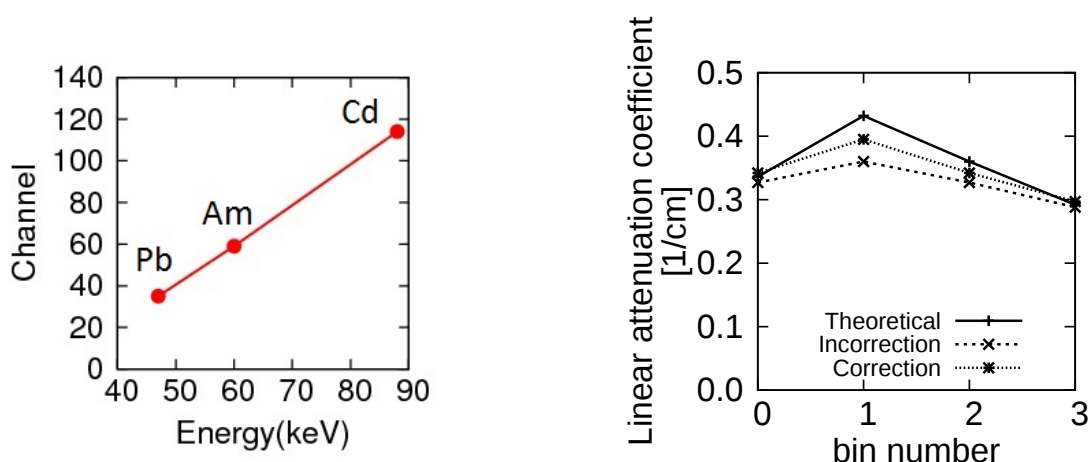


Fig. 4.6: エネルギーとチャンネルの関係

Fig. 4.7: 校正前後の比較

### 4.2.2 X線管のカウント値補正

これまでの実験データの傾向として、bin3の測定値が理論値よりも大きくなるという結果が出ていた。そこで、管電圧を90kVに固定した状態で管電流を0.6, 1.2, 1.8, 2.4mAに変化させたときのカウントの線形性を確認した。Fig. 4.8に示すのは、ターンテーブル上に水の入ったビーカーを置いた状態で収集した投影データである。まず、媒質が置かれていない空気の部分(図の赤い枠線内)にROIを取りbinごとに線形性を確認した。その結果をFig. 4.9に示す。



Fig. 4.8: 投影データ

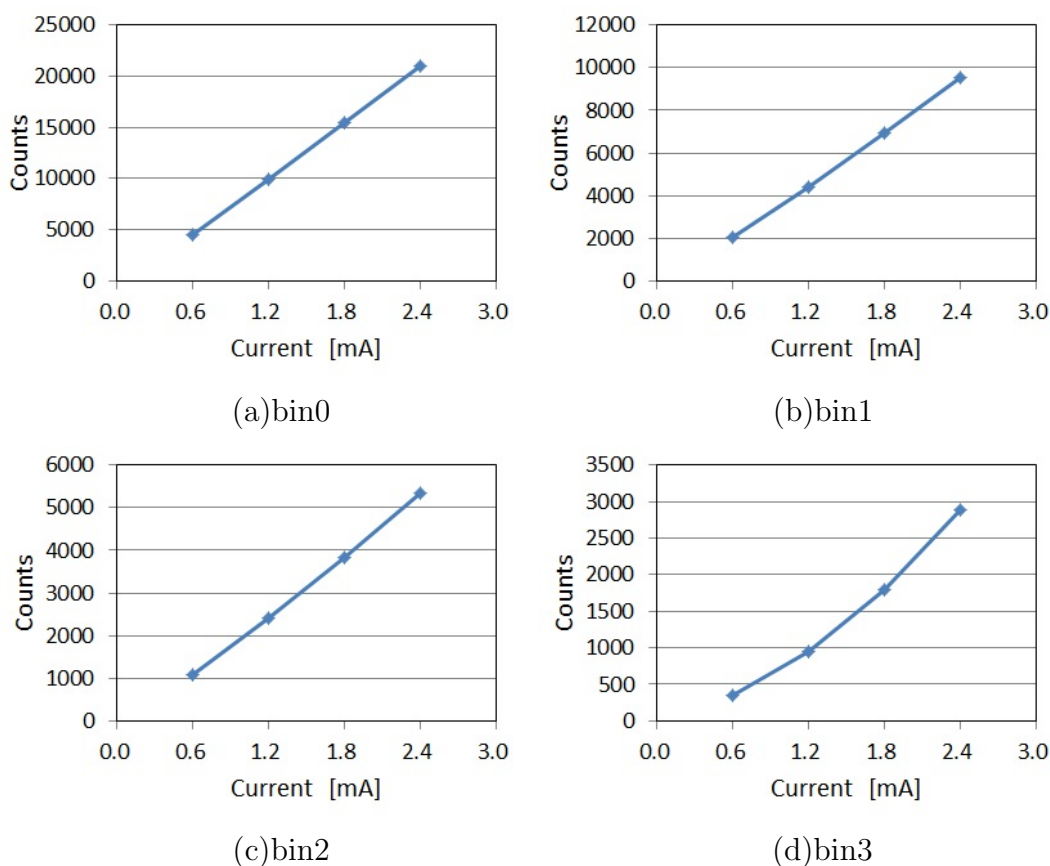
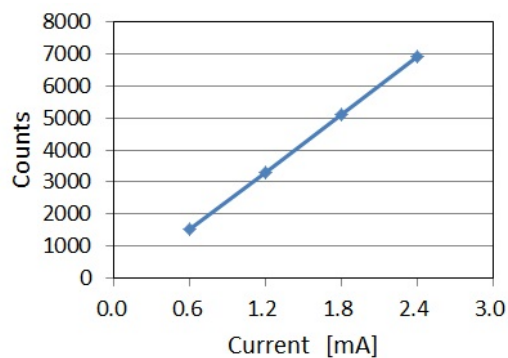


Fig. 4.9: カウントレート

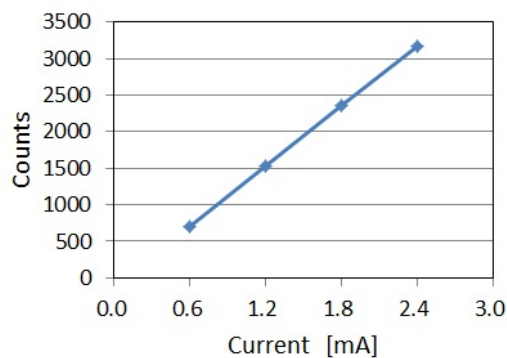
次に、Fig. 4.10に示す媒質がある部分(図の赤い枠線内)の線形性について確認した。その結果をFig. 4.11に示す。



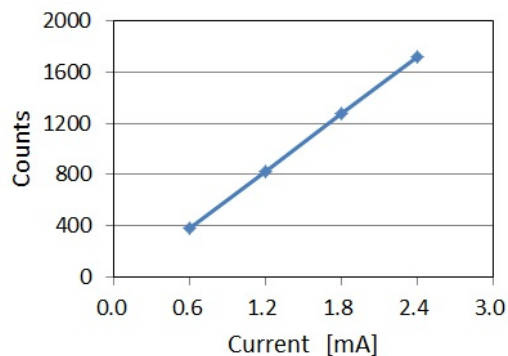
Fig. 4.10: 投影データ



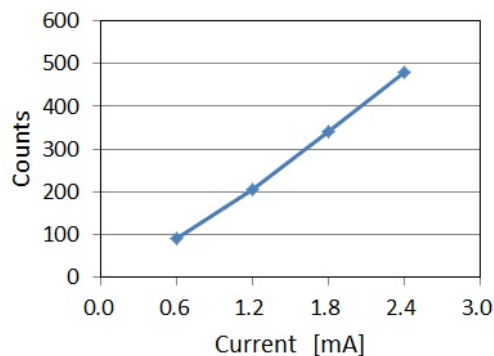
(a)bin0



(b)bin1



(c)bin2



(d)bin3

Fig. 4.11: カウントレート

管電流に対して非線形となった bin3 の結果から，管電圧 90kV 以上のエネルギーの光子が発生していると推測でき，bin3 に対してのカウント補正が必要である．そこで，以下に示す手順で bin3 が線形となるようにエネルギーの光子数を予測し補正を行った．

#### カウント補正手順

1. 任意の 4 つのエネルギーしきい値 (例えば，50，60，70，80keV) をそれぞれ設定する．
2. 手順 1 で設定したエネルギーと同じ管電圧で X 線を照射し，4 つのデータを得る．
3. 得られたデータから，照射した管電圧より大きいエネルギーのカウント値をモジュールごとに算出する．
4. エネルギーごとにカウント値をプロットし，近似曲線を求めて 90keV のときのカウント値を予測する．
5. 手順 4 で算出したモジュールごとのカウント予測値を実験の生データの bin3 から引き算し，それを再構成用のデータとして扱う．

補正方法の手順 1 の補足事項として，本研究で使用した Telesystems 検出器の設定できるエネルギーのスレッシュ値は最大 127 であるが，エネルギーキャリブレーションの結果から 90keV に相当するスレッシュが 127 以上にあると推測できるモジュールが存在するため，直接 90keV のエネルギーしきい値を検出器ソフトに設定してデータを収集することはできない．そのため，今回 4 つのエネルギーしきい値を 50, 60, 70, 80keV に設定することで，90keV 以上の発生光子を予測した．また，手順 2 に関してデータを収集する際には実験条件と同じ管電流，収集時間にした状態で収集する必要がある．

Fig. 4.12 に，設定したエネルギー以上に発生した光子数の近似曲線を示す．指数関数的に近似できることがわかり，図中の式を用いることで例えば 90keV 以上の余分な発生光子数を予測することができる．また，全モジュールに対して予測した光子数補正用のデータを Fig. 4.13 に，補正前後の理論値との比較を行った結果を Fig. 4.14 に示す．

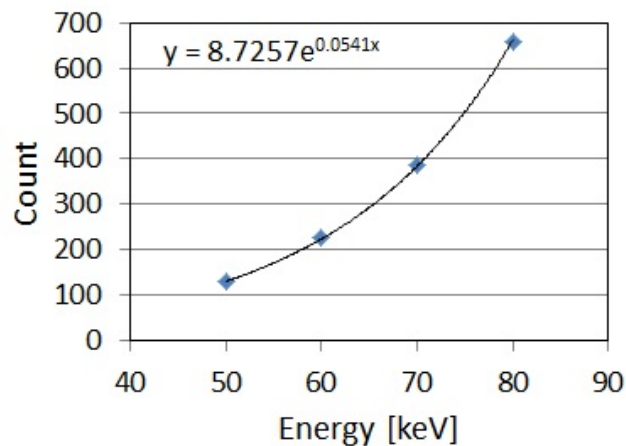


Fig. 4.12: エネルギーごとの過剰発生光子数



Fig. 4.13: 補正用データ

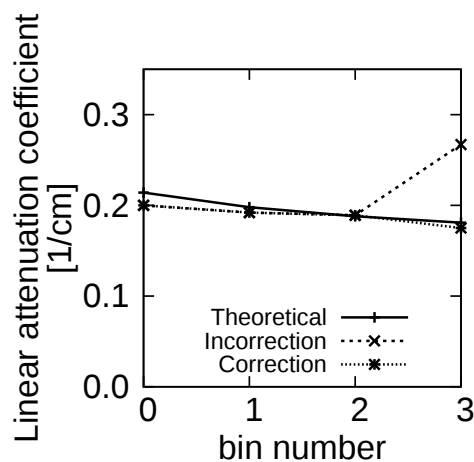


Fig. 4.14: 補正前後の比較 (媒質:  $\text{H}_2\text{O}$ )

## 4.3 データ処理方法

検出器には、ピクセルによって感度が不均一なものが存在するため、画像を再構成した際にリングアーチファクトが発生してしまう。そのため、画像再構成の前に検出器の個々のピクセルの感度を補正する必要がある。本研究では、キャリブレーションデータを用いることで検出器の感度不均一性とデッドピクセルの補正を行った。また、モジュール間のギャップを埋める必要があるのでギャップ補正を行った。さらに、再構成後の画像に対してビームハードニング補正を行った。

### 4.3.1 デッドピクセル

感度の著しく低い、または高いピクセルをデッドピクセルと呼ぶ。デッドピクセルは近傍画素を用いて補正を行った。この補正法では、キャリブレーションデータの測定値から検出器中のデッドピクセルを検出し、その近傍8画素のうちデッドピクセルと判定されなかった正常なピクセルを使って、それらの平均値で置き換えた。

### 4.3.2 均一性

この補正法は、検出器の有効視野全体をカバーするような均一な厚さのアクリルフantomを用いて測定したキャリブレーションデータにより、検出器の個々のピクセルの感度を補正した。まず、X線管の前にアクリルフantomを置いて測定することを20回繰り返す。このキャリブレーションデータの平均値を求め、平均値でキャリブレーションデータを割り逆数を取る。これをキャリブレーション係数とする。この係数を投影データにかけることで補正を行う。

### 4.3.3 ギャップ補正

モジュール間に存在する2pixelのギャップを線形補間を用いて補正した。モジュール0とモジュール1の間を補正する場合の例を以下に示す。

$$f(39, y) = \frac{(f(38, y) \times 2 + f(41, y))}{3} \quad (4.1)$$

$$f(40, y) = \frac{(f(38, y) + f(41, y) \times 2)}{3} \quad (4.2)$$

### 4.3.4 ビームハードニング補正

ビームハードニングの補正方法として、Eq. (4.3) に示す補正関数  $h(r, B)$  を用いて補正を行った。計測した線減衰係数を  $\mu_L$ 、円の中心からの放射距離を  $r$  とすると、

$$h(r, B) = \frac{\int_{\theta=0}^{2\pi} \mu_L(r \cos(\theta), r \sin(\theta), B)}{\int_{\theta=0}^{2\pi} \mu_L(r_{\max} \cos(\theta), r_{\max} \sin(\theta), B)} \quad (4.3)$$

で表される．ここで， $B$  はエネルギー bin を表しており， $\theta$  は極座標系における原点にセットされた画像の中心角である．また， $r_{\max}$  はファントムの中心からエッジまでの距離である．補正画像  $h_{L,C}(r, B)$  は，Eq. (4.4) を用いて算出する．

$$h_{L,C}(r, B) = \frac{\mu_L(r, B)}{h(r, B)} \quad (4.4)$$

媒質として Ca を用いて，50～90keV の光子を収集し再構成した画像を Fig. 4.15(a) に示す．この画像に対して，Eq. (4.3)，(4.4) によりビームハードニング補正を行った画像結果を Fig. 4.15(b) に示す．また，ビームハードニング補正前後のプロファイルを確認し，比較した結果を Fig. 4.16 に示す．

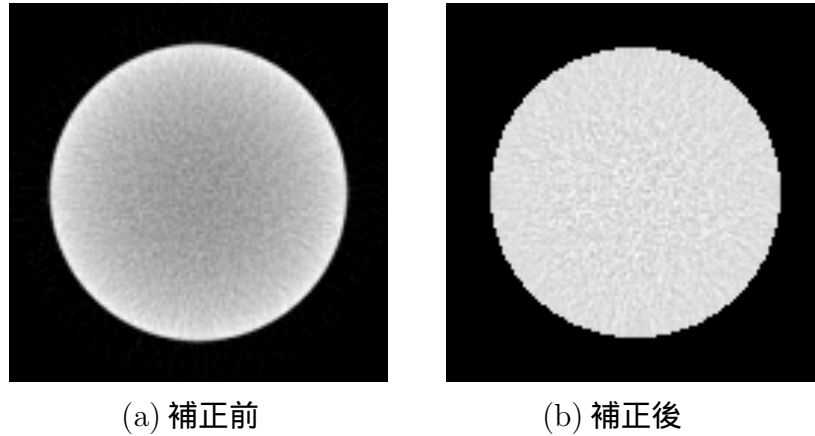


Fig. 4.15: 再構成画像

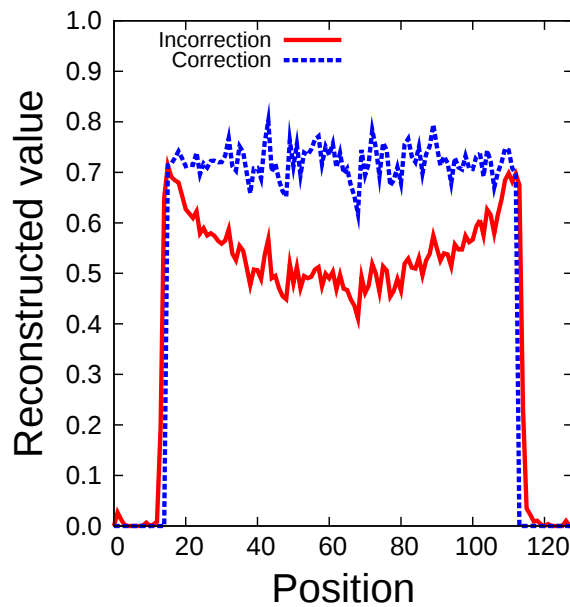


Fig. 4.16: 補正前後のプロファイルの比較 ( $y=63$ )

## 4.4 単一媒質の実験

さまざまな濃度の金コロイド溶液とガドリニウム溶液を、水と金コロイド単体またはガドリニウム単体に分離できるかを実験によって検証した。

### 4.4.1 金コロイドを用いた実験

使用したファントムは、Fig. 4.17 に示す金コロイド溶液 (1.6wt % , 2.0wt % , 2.4wt % , 4.0wt %) である。Table 4.3 に実験条件を示す。媒質の線減衰係数と設定したエネルギーウィンドウごとの質量減衰係数の理論値は、第3章の Fig. 3.10 と Table 3.14 を参照する。

Table 4.3: 実験条件

|         |                  |
|---------|------------------|
| 管電圧     | 90 kV            |
| 管電流     | 1.2 mA           |
| フィルタ    | Al 2 mm          |
| 投影数     | 180 views        |
| 収集時間    | 3 sec / view     |
| 再構成法    | FBP              |
| エネルギー範囲 | bin0 51 - 60 keV |
|         | bin1 61 - 70 keV |
|         | bin2 71 - 80 keV |
|         | bin3 81 - 90 keV |

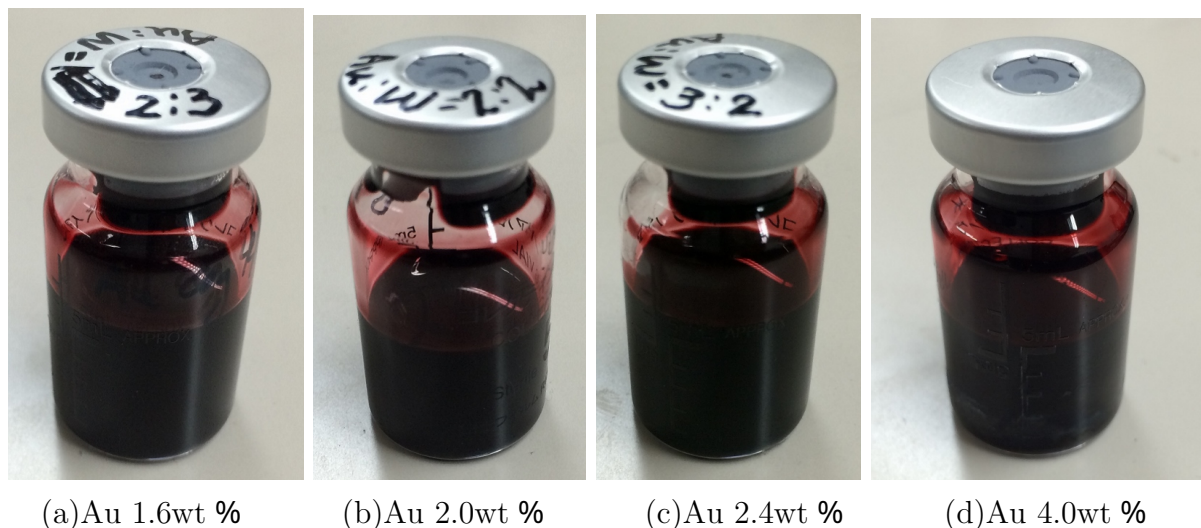


Fig. 4.17: 媒質

#### 4.4.2 再構成結果

bin ごとの再構成画像を Fig. 4.18 に示す．また，媒質ごとの線減衰係数の理論値と再構成値をまとめた表を Table 4.4 ~ 4.7 に示す．

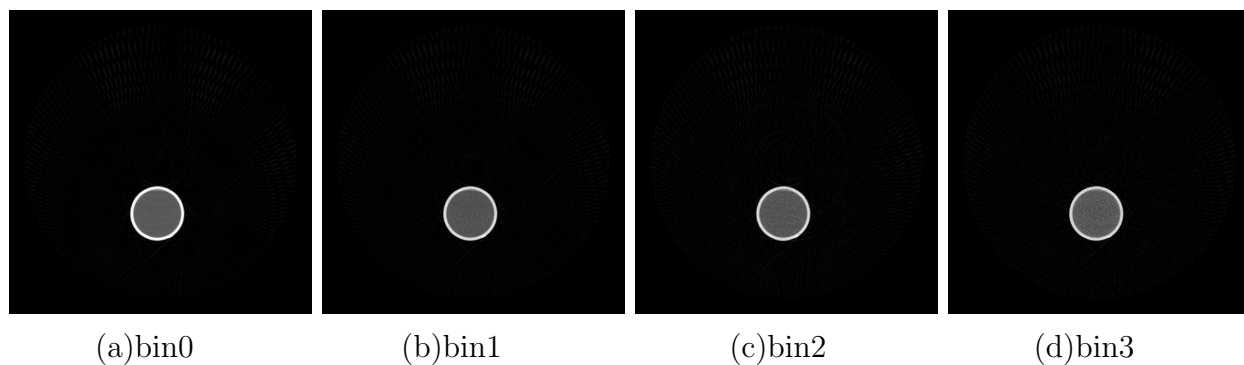


Fig. 4.18: 再構成画像

Table 4.4: 理論値との比較 (1.6wt %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.282 \pm 0.019$ | 0.303 |
| bin1 | $0.256 \pm 0.023$ | 0.256 |
| bin2 | $0.244 \pm 0.028$ | 0.229 |
| bin3 | $0.314 \pm 0.035$ | 0.312 |

Table 4.5: 理論値との比較 (2.0wt %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.299 \pm 0.013$ | 0.326 |
| bin1 | $0.270 \pm 0.018$ | 0.272 |
| bin2 | $0.258 \pm 0.023$ | 0.240 |
| bin3 | $0.349 \pm 0.039$ | 0.346 |

Table 4.6: 理論値との比較 (2.4wt %)

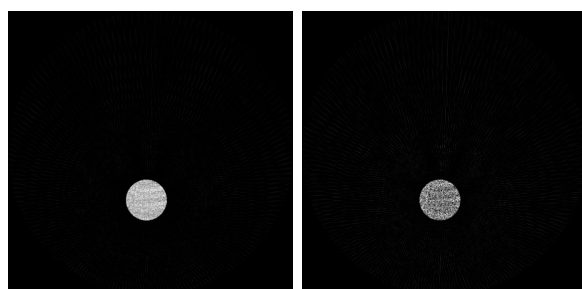
|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.319 \pm 0.014$ | 0.349 |
| bin1 | $0.286 \pm 0.018$ | 0.287 |
| bin2 | $0.271 \pm 0.024$ | 0.250 |
| bin3 | $0.382 \pm 0.038$ | 0.379 |

Table 4.7: 理論値との比較 (4.0wt %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.396 \pm 0.015$ | 0.443 |
| bin1 | $0.344 \pm 0.019$ | 0.349 |
| bin2 | $0.319 \pm 0.023$ | 0.295 |
| bin3 | $0.521 \pm 0.051$ | 0.517 |

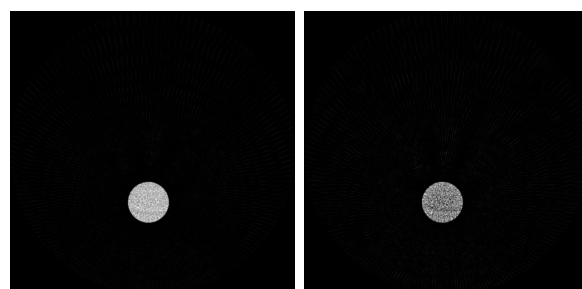
### 4.4.3 特異値分解による分離結果

各濃度の投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 4.19～4.22 に示す．また，各媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 4.8 に示す．



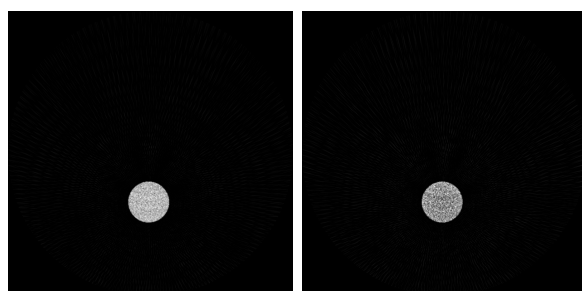
(a) 水因子画像 (b) Au 因子画像

Fig. 4.19: 分離画像 (1.6wt %)



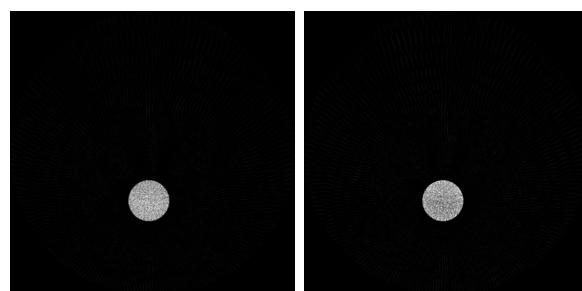
(a) 水因子画像 (b) Au 因子画像

Fig. 4.20: 分離画像 (2.0wt %)



(a) 水因子画像 (b) Au 因子画像

Fig. 4.21: 分離画像 (2.4wt %)



(a) 水因子画像 (b) Au 因子画像

Fig. 4.22: 分離画像 (4.0wt %)

Table 4.8: 密度の推定

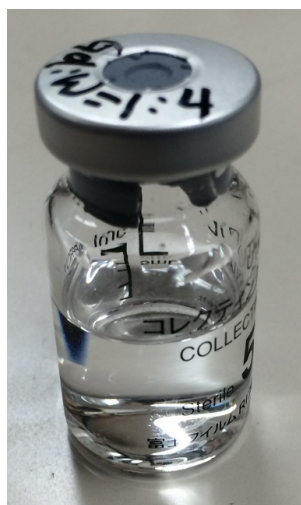
|                         | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|-------------------------|--------|-------------------|-------|
| Au(1.6 %)               | 0.0162 | $0.016 \pm 0.005$ | 1.3 % |
| Au(2.0 %)               | 0.0203 | $0.020 \pm 0.005$ | 1.7 % |
| Au(2.4 %)               | 0.0245 | $0.025 \pm 0.006$ | 2.0 % |
| Au(4.0 %)               | 0.0415 | $0.042 \pm 0.007$ | 1.2 % |
| H <sub>2</sub> O(1.6 %) | 0.9974 | $1.022 \pm 0.114$ | 2.5 % |
| H <sub>2</sub> O(2.0 %) | 0.9971 | $1.005 \pm 0.107$ | 0.8 % |
| H <sub>2</sub> O(2.4 %) | 0.9969 | $1.013 \pm 0.115$ | 1.6 % |
| H <sub>2</sub> O(4.0 %) | 0.9961 | $1.004 \pm 0.142$ | 0.8 % |

#### 4.4.4 ガドリニウムを用いた実験

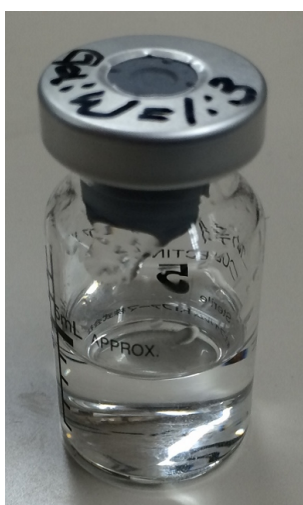
使用したファントムは，Fig. 4.23 に示すガドペンテト酸メグルミン溶液 (7.428 %，9.285 %，12.38 %，18.57 %) である．Table 4.9 に実験条件を示す．媒質の線減衰係数と設定したエネルギーウィンドウごとの質量減衰係数の理論値は，第 3 章の Fig. 3.18 と Table 3.21 を参照する．

Table 4.9: 実験条件

|         |              |             |
|---------|--------------|-------------|
| 管電圧     | 90 kV        |             |
| 管電流     | 1.0 mA       |             |
| フィルタ    | Al 2 mm      |             |
| 投影数     | 180 views    |             |
| 収集時間    | 1 sec / view |             |
| 再構成法    | FBP          |             |
| エネルギー範囲 | bin0         | 41 - 49 keV |
|         | bin1         | 50 - 54 keV |
|         | bin2         | 55 - 64 keV |
|         | bin3         | 65 - 90 keV |



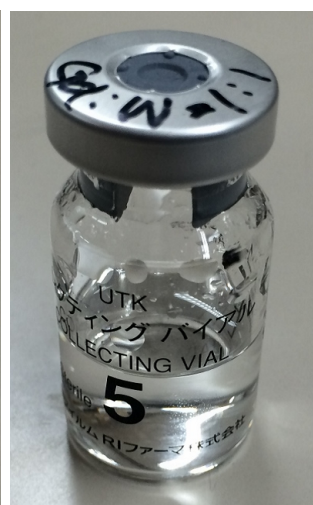
(a)Gd 7.428 %



(b)Gd 9.285 %



(c)Gd 12.38 %



(d)Gd 18.57 %

Fig. 4.23: 媒質

#### 4.4.5 再構成結果

bin ごとの再構成画像を Fig. 4.24 に示す．今回，検出器のエネルギー分解能を考慮し，bin1 を除いた 3 つの bin を用いることとした．また，媒質ごとの線減衰係数の理論値と再構成値をまとめた表を Table 4.10 ~ 4.13 に示す．

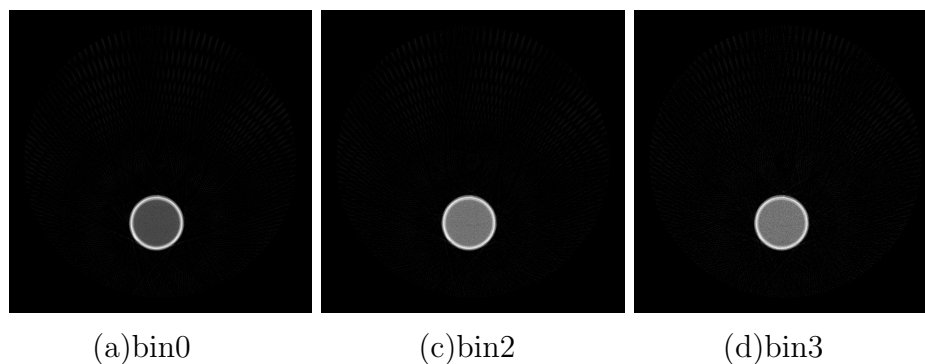


Fig. 4.24: 再構成画像

Table 4.10: 理論値との比較 (7.428 %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.337 \pm 0.021$ | 0.331 |
| bin2 | $0.401 \pm 0.023$ | 0.410 |
| bin3 | $0.325 \pm 0.024$ | 0.314 |

Table 4.11: 理論値との比較 (9.285 %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.369 \pm 0.023$ | 0.351 |
| bin2 | $0.450 \pm 0.022$ | 0.461 |
| bin3 | $0.346 \pm 0.023$ | 0.344 |

Table 4.12: 理論値との比較 (12.38 %)

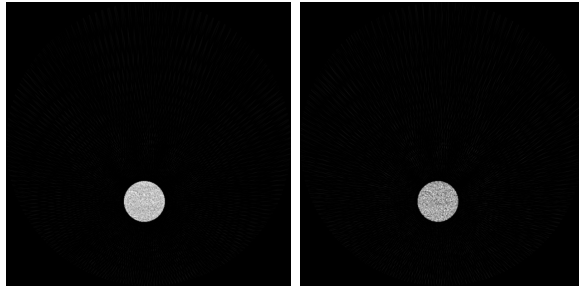
|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.411 \pm 0.024$ | 0.393 |
| bin2 | $0.529 \pm 0.026$ | 0.553 |
| bin3 | $0.418 \pm 0.026$ | 0.400 |

Table 4.13: 理論値との比較 (18.57 %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.500 \pm 0.015$ | 0.474 |
| bin2 | $0.687 \pm 0.023$ | 0.740 |
| bin3 | $0.527 \pm 0.051$ | 0.512 |

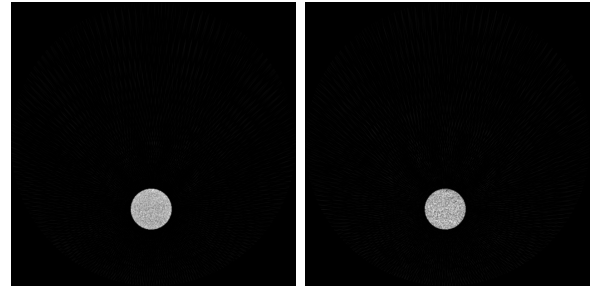
#### 4.4.6 特異値分解による分離結果

各濃度の投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 4.25 ~ 4.28 に示す．また，各媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 4.14 に示す．



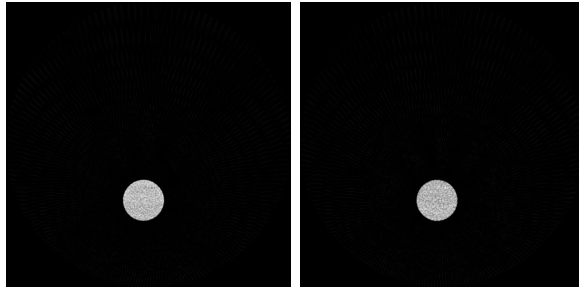
(a) 水因子画像 (b) Gd 因子画像

Fig. 4.25: 分離画像 (7.428 %)



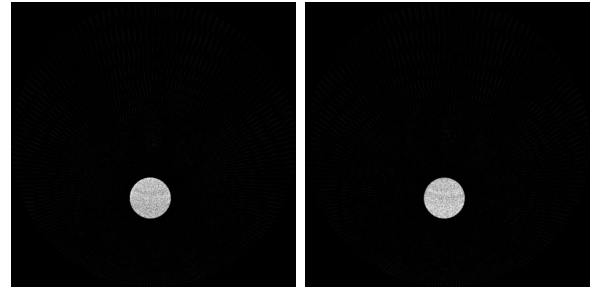
(a) 水因子画像 (b) Gd 因子画像

Fig. 4.26: 分離画像 (9.285 %)



(a) 水因子画像 (b) Gd 因子画像

Fig. 4.27: 分離画像 (12.38 %)



(a) 水因子画像 (b) Gd 因子画像

Fig. 4.28: 分離画像 (18.57 %)

Table 4.14: 密度の推定

|                           | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率    |
|---------------------------|--------|-------------------|--------|
| Gd(7.428 %)               | 0.0767 | $0.073 \pm 0.011$ | 4.8 %  |
| Gd(9.285 %)               | 0.0968 | $0.087 \pm 0.008$ | 10.1 % |
| Gd(12.38 %)               | 0.1311 | $0.114 \pm 0.013$ | 13.0 % |
| Gd(18.57 %)               | 0.2030 | $0.165 \pm 0.016$ | 18.7 % |
| H <sub>2</sub> O(7.428 %) | 0.9566 | $1.045 \pm 0.096$ | 9.2 %  |
| H <sub>2</sub> O(9.285 %) | 0.9460 | $1.088 \pm 0.090$ | 15.0 % |
| H <sub>2</sub> O(12.38 %) | 0.9280 | $1.158 \pm 0.112$ | 24.7 % |
| H <sub>2</sub> O(18.57 %) | 0.8902 | $1.285 \pm 0.126$ | 44.3 % |

## 4.5 複数媒質の実験

水と金コロイド 4.0wt %を用いて実験を行った．これは，人体の水分と金コロイドを造影剤として使用した状況を想定し，媒質分離できるかを検証する実験である．実験条件を Table 4.15 に示す．また，媒質の線減衰係数と設定したエネルギーウィンドウごとの質量減衰係数の理論値は，第 3 章の Fig. 3.26 と Table 3.28 を参照する．

今回，複数媒質の実験のみ特異値分解，主成分分析，最小二乗法の各手法を用いた場合の分離結果をそれぞれ示すこととする．

Table 4.15: 実験条件

|         |              |             |
|---------|--------------|-------------|
| 管電圧     | 90 kV        |             |
| 管電流     | 1.2 mA       |             |
| フィルタ    | Al 2 mm      |             |
| 投影数     | 180 views    |             |
| 収集時間    | 3 sec / view |             |
| 再構成法    | FBP          |             |
| エネルギー範囲 | bin0         | 51 - 60 keV |
|         | bin1         | 61 - 70 keV |
|         | bin2         | 71 - 80 keV |
|         | bin3         | 81 - 90 keV |



Fig. 4.29: 媒質

### 4.5.1 再構成結果

bin ごとの再構成画像を Fig. 4.30 に示す．また，媒質ごとの線減衰係数の理論値と再構成値をまとめた表を Table 4.16，4.17 に示す．

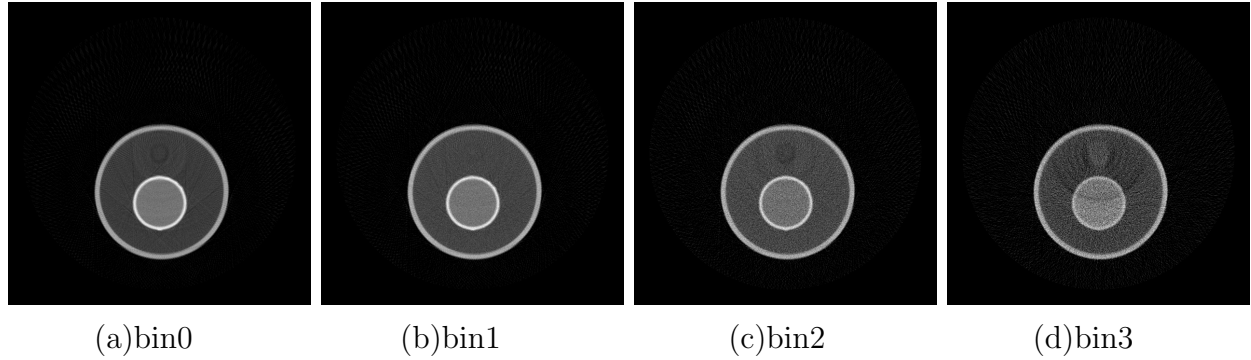


Fig. 4.30: 再構成画像

Table 4.16: 理論値との比較 (Au 4.0wt %)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.388 \pm 0.022$ | 0.443 |
| bin1 | $0.330 \pm 0.027$ | 0.349 |
| bin2 | $0.302 \pm 0.034$ | 0.295 |
| bin3 | $0.500 \pm 0.079$ | 0.517 |

Table 4.17: 理論値との比較 (H<sub>2</sub>O)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.200 \pm 0.025$ | 0.214 |
| bin1 | $0.192 \pm 0.023$ | 0.198 |
| bin2 | $0.189 \pm 0.028$ | 0.188 |
| bin3 | $0.175 \pm 0.079$ | 0.181 |

### 4.5.2 特異値分解による分離結果

投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 4.31 に示す．また，各媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 4.18 に示す．

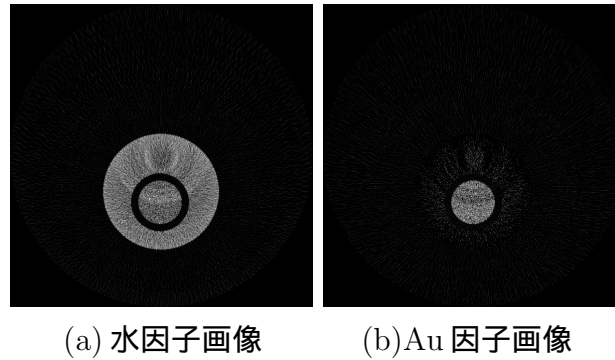


Fig. 4.31: 分離画像

Table 4.18: 密度の推定

|                         | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|-------------------------|--------|-------------------|-------|
| Au(4.0 %)               | 0.0415 | $0.043 \pm 0.018$ | 3.6 % |
| H <sub>2</sub> O(4.0 %) | 0.9961 | $0.936 \pm 0.334$ | 6.0 % |
| H <sub>2</sub> O(ピーカー)  | 1.0376 | $0.991 \pm 0.262$ | 4.5 % |

### 4.5.3 主成分分析による分離結果

再構成画像に対して，主成分分析して得られた因子画像を Fig. 4.32 に示す．また，各主成分の再構成値を Table 4.19～4.22 に示す．

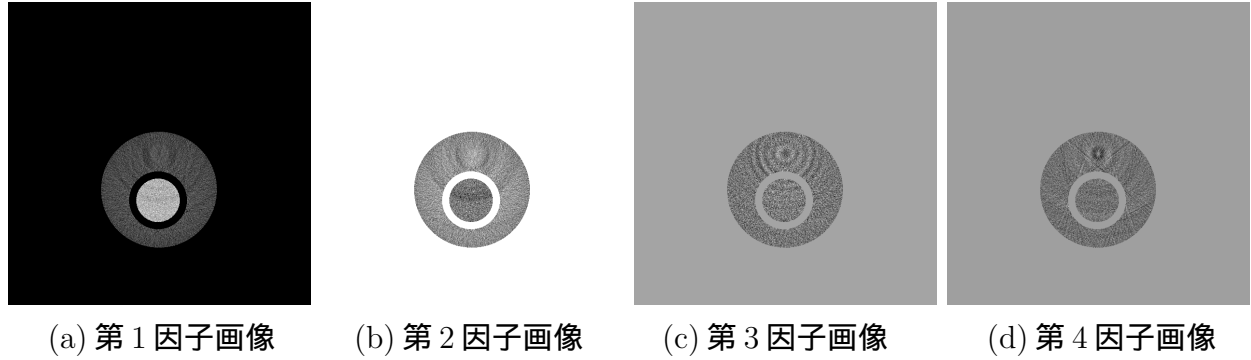


Fig. 4.32: 因子画像

Table 4.19: 第 1 主成分

|                  | 再構成値              |
|------------------|-------------------|
| Au               | $0.735 \pm 0.085$ |
| H <sub>2</sub> O | $0.317 \pm 0.069$ |

Table 4.20: 第 2 主成分

|                  | 再構成値               |
|------------------|--------------------|
| Au               | $-0.255 \pm 0.055$ |
| H <sub>2</sub> O | $-0.199 \pm 0.046$ |

Table 4.21: 第 3 主成分

|                  | 再構成値               |
|------------------|--------------------|
| Au               | $-0.033 \pm 0.027$ |
| H <sub>2</sub> O | $-0.035 \pm 0.027$ |

Table 4.22: 第 4 主成分

|                  | 再構成値               |
|------------------|--------------------|
| Au               | $-0.040 \pm 0.018$ |
| H <sub>2</sub> O | $-0.040 \pm 0.022$ |

各主成分の計算式を以下に示す．

$$\begin{aligned}
 \text{第 1 主成分} &= 0.37 \times \text{bin}0 + 0.27 \times \text{bin}1 + 0.22 \times \text{bin}2 + 0.86 \times \text{bin}3 \\
 \text{第 2 主成分} &= -0.60 \times \text{bin}0 - 0.44 \times \text{bin}1 - 0.44 \times \text{bin}2 + 0.50 \times \text{bin}3 \\
 \text{第 3 主成分} &= 0.37 \times \text{bin}0 + 0.32 \times \text{bin}1 - 0.87 \times \text{bin}2 - 0.04 \times \text{bin}3 \\
 \text{第 4 主成分} &= 0.61 \times \text{bin}0 - 0.79 \times \text{bin}1 - 0.05 \times \text{bin}2 - 0.01 \times \text{bin}3
 \end{aligned}$$

#### 4.5.4 最小二乗法による分離結果

Fig. 4.30 の再構成画像に対して，最小二乗法によって媒質分離を行った結果を Fig. 4.33 に示す．基準値となる媒質として，水，Au(2 %，4 %，6 %) を用いた．各媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 4.23 に示す．

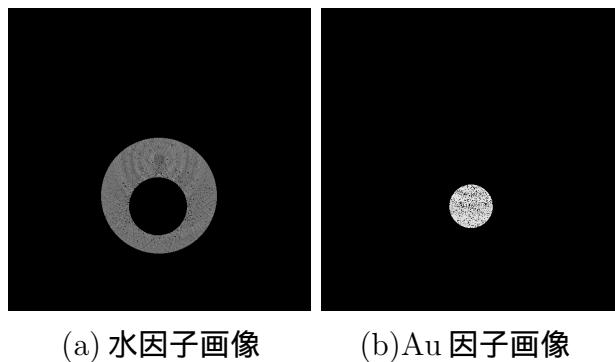


Fig. 4.33: 分離画像

Table 4.23: 密度の推定

|                  | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|------------------|--------|-------------------|-------|
| Au               | 1.0376 | $1.034 \pm 0.007$ | 0.3 % |
| H <sub>2</sub> O | 0.9982 | $0.999 \pm 0.003$ | 0.2 % |

## 4.6 混合媒質の実験

さまざまな割合の水，金コロイド，ガドペンテト酸メグルミンを混合した溶液を用いて実験を行った．使用ファントムを Fig. 4.34 に示す．混合溶液 (A) は，水 91.052 %，金コロイド 1.52 %，ガドリニウム 7.428 % を含んだ媒質である．混合溶液 (B) は，水 88.815 %，金コロイド 1.9 %，ガドリニウム 9.285 % を含んだ媒質である．混合溶液 (C) は水 82.824 %，金コロイド 2.32 %，ガドリニウム 14.856 % を含んだ媒質である．実験条件を Table 4.24 に示す．また，各混合溶液の線減衰係数と設定したエネルギーウィンドウごとの質量減衰係数の理論値は，第 3 章の Fig. 3.31 と Table 3.33 を参照する．

Table 4.24: 実験条件

|         |                  |
|---------|------------------|
| 管電圧     | 90 kV            |
| 管電流     | 1.2 mA           |
| フィルタ    | Al 2 mm          |
| 投影数     | 360 views        |
| 収集時間    | 3 sec / view     |
| 再構成法    | FBP              |
| エネルギー範囲 | bin0 45 - 50 keV |
|         | bin1 51 - 64 keV |
|         | bin2 65 - 80 keV |
|         | bin3 81 - 90 keV |

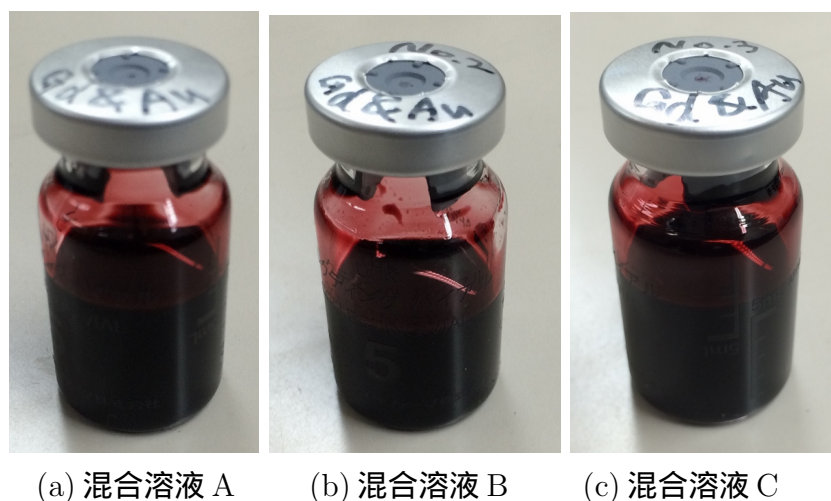


Fig. 4.34: 媒質

### 4.6.1 再構成結果

bin ごとの再構成画像を Fig. 4.35 に示す．今回，bin1 の測定精度が良くなかったため残りの 3 つの bin を用いることとした．また，媒質ごとの線減衰係数の理論値と再構成値をまとめた表を Table 4.25 ~ 4.27 に示す．

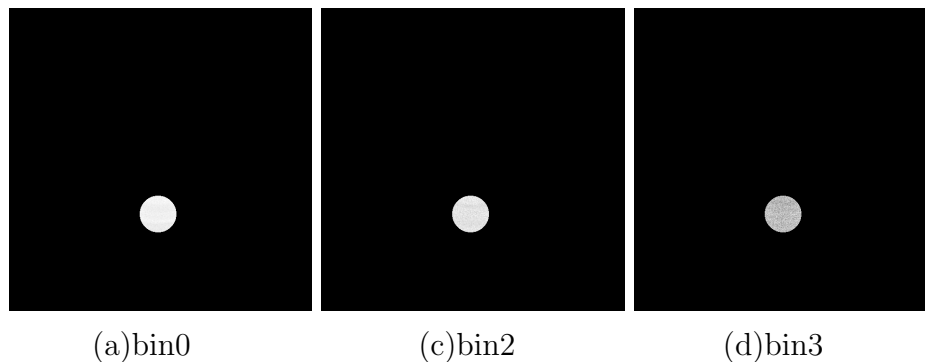


Fig. 4.35: 再構成画像

Table 4.25: 理論値との比較 (混合媒質 A)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.453 \pm 0.008$ | 0.444 |
| bin2 | $0.371 \pm 0.013$ | 0.372 |
| bin3 | $0.404 \pm 0.036$ | 0.395 |

Table 4.26: 理論値との比較 (混合媒質 B)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.508 \pm 0.010$ | 0.500 |
| bin2 | $0.415 \pm 0.016$ | 0.419 |
| bin3 | $0.463 \pm 0.032$ | 0.452 |

Table 4.27: 理論値との比較 (混合媒質 C)

|      | 再構成値              | 理論値   |
|------|-------------------|-------|
| bin0 | $0.618 \pm 0.012$ | 0.607 |
| bin2 | $0.536 \pm 0.017$ | 0.542 |
| bin3 | $0.576 \pm 0.038$ | 0.565 |

#### 4.6.2 特異値分解による分離結果

混合媒質 A の投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 4.36 に示す．また，媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 4.28 に示す．

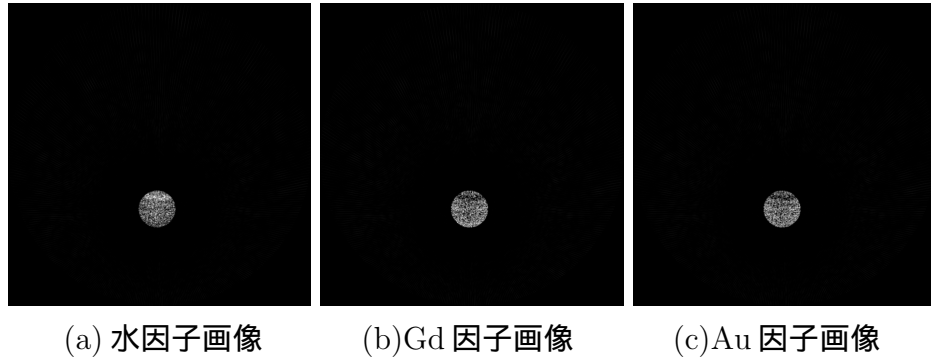


Fig. 4.36: 分離画像 (混合媒質 A)

Table 4.28: 密度の推定 (混合媒質 A)

|                  | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|------------------|--------|-------------------|-------|
| Gd               | 0.0779 | $0.074 \pm 0.033$ | 4.8 % |
| Au               | 0.0159 | $0.017 \pm 0.007$ | 3.9 % |
| H <sub>2</sub> O | 0.9540 | $1.039 \pm 0.407$ | 8.9 % |

混合媒質 B の投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 4.37 に示す．また，媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 4.29 に示す．

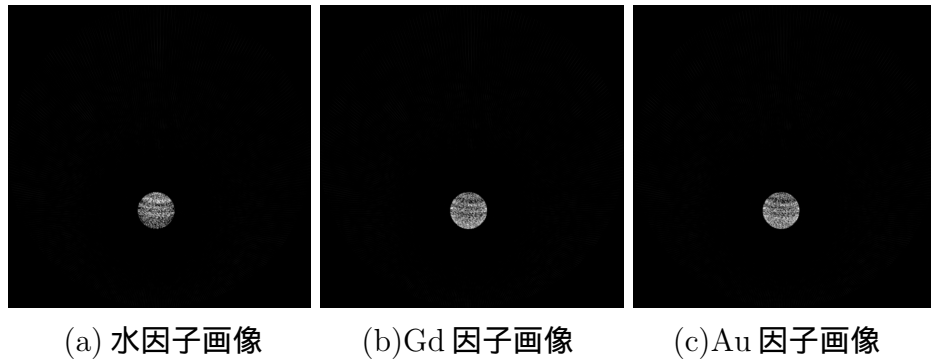


Fig. 4.37: 分離画像 (混合媒質 B)

Table 4.29: 密度の推定 (混合媒質 B)

|                  | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率   |
|------------------|--------|-------------------|-------|
| Gd               | 0.0987 | $0.092 \pm 0.031$ | 6.3 % |
| Au               | 0.0202 | $0.022 \pm 0.007$ | 6.9 % |
| H <sub>2</sub> O | 0.9440 | $1.027 \pm 0.381$ | 8.8 % |

混合媒質 C の投影データに対して，特異値分解を用いて媒質分離を行った結果を Fig. 4.38 に示す．また，媒質の密度の理論値と測定値を比較した結果を Table 4.30 に示す．

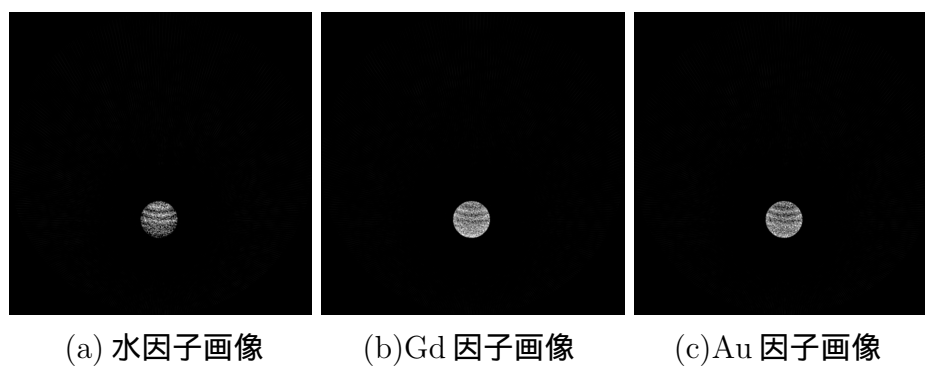


Fig. 4.38: 分離画像 (混合媒質 C)

Table 4.30: 密度の推定 (混合媒質 C)

|                  | 理論値    | 密度の測定値            | 誤差率    |
|------------------|--------|-------------------|--------|
| Gd               | 0.1632 | $0.154 \pm 0.038$ | 5.3 %  |
| Au               | 0.0255 | $0.026 \pm 0.008$ | 2.0 %  |
| H <sub>2</sub> O | 0.9100 | $1.037 \pm 0.453$ | 13.9 % |

## 第5章 考察

### 5.1 シミュレーション

#### 5.1.1 媒質同定法の比較に対する考察

水、カルシウム、ガドリニウム、金コロイドの4媒質を用いたシミュレーションについて、特にガドリニウムと金コロイドは収集したエネルギー範囲内に k-edge を持っているため、この特徴を利用してデータ収集を行った。各媒質の線減衰係数の理論値と再構成値を比較した Table 3.3 ~ 3.6 を見ると、カルシウムは bin3 を除く bin0 ~ bin2 で再構成値が理論値の標準偏差内に収まっていない。他の3媒質についても同様に、再構成値が理論値の標準偏差内に入っていないことがわかる。これは、実験におけるデータ収集状況を再現するために、散乱線の影響を取り除かなかったためと考えられる。

このデータに対して主成分分析を行った結果、Fig. 3.5 のように第1因子画像ではカルシウム、第2因子画像ではガドリニウム、第3因子画像では金コロイド、第4因子画像で水をよく表すようなコントラスト強調画像になっていることがわかる。しかし、最小二乗法の分離画像 Fig. 3.6 や特異値分解の分離画像 Fig. 3.7 と比較すると、主成分分析では媒質の明確な分離ができない。さらに、媒質の密度を定量化することができない。最小二乗法では、主成分分析と比較すると媒質を分離することには成功していることが Fig. 3.6 からわかる。しかし、最小二乗法は注目ピクセルに対して媒質の推定・密度の推定を行うため、画像を再構成する際に生じるファントムの輪郭部分のボケにより、この輪郭部分に関しては正確な分離が困難となる。また、カルシウム、ガドリニウム、金コロイドにもそれぞれ水を含んでいるが、これらの混合物を分離できていないことが Fig. 3.6(a) の水因子画像からわかる。これに対して、特異値分解は投影データに対して分離処理を行うため、輪郭部分における分離の問題は生じず、密度の定量的評価も可能となる。今回、特異値分解による分離精度は、理論値と再構成値の差があったため、特にカルシウムが誤差 22.2 % となったが、Fig. 3.7(a) の水因子画像からも混合物の分離に成功しているという点で、媒質同定の手法としては特異値分解が有効であると考えられる。

#### 5.1.2 単一/複数/混合媒質の結果に対する考察

単一媒質を用いたシミュレーション、複数媒質を用いたシミュレーション、混合媒質を用いたシミュレーションの結果から、使用した媒質の k-edge にあわせて適切にエネルギーウィンドウを設定し、得られたデータに対して特異値分解の処理を施すことで精度良く媒質を同定できることがわかった。

## 5.2 実験

### 5.2.1 検出器性能に対する考察

エネルギーキャリブレーションを行ったことで、47～88keV のエネルギー範囲内においては線形性が見られることが Fig. 4.6 からわかった。検出器の校正前後のガドリニウムを用いた実験結果 Fig. 4.7 を見ると、ガドリニウムの k-edge を含む bin1 に大幅な改善が確認できる。したがって、測定精度の良い実験結果を得るためには検出器のエネルギーキャリブレーションは非常に重要であると考えられる。

また、X 線を発生させたときの各 bin のカウントレートの確認を行った Fig. 4.9, 4.11 の結果より、bin0～2 については線形性を確認できたが、bin3 については管電流が大きくなるにつれてカウント値が上昇するという傾向が確認でき、非線形であることがわかった。この結果から、今回設定した管電圧は 90kV であり、90keV までの光子が発生しているという想定だが、実際には 90keV 以上の光子が発生しているということが考えられる。そのため、管電流を大きくすると 90keV 以上の光子が存在する分、カウントが上昇し非線形になると考えることができる。今回提案した補正手法を用いることで、Fig. 4.14 に示すような大幅な改善を実現できた。

以上より、実験において正確なデータを得るためには検出器に対する校正や X 線管のカウント値の補正は非常に重要であるとわかる。

### 5.2.2 単一/複数/混合媒質の結果に対する考察

単一媒質の金コロイドの実験においては、混合物中の金の密度推定は誤差 2.0 % 未満、水は誤差 2.5 % 未満と精度良く媒質同定することができた。シミュレーションと実験で精度を比較した結果を Fig. 5.1 に示す。これに対して、ガドリニウムの実験においては混合物中のガドリニウムの密度推定は最大誤差 18.7 %、水は誤差 44.3 % という結果となった。シミュレーションと実験で精度を比較した結果を Fig. 5.2 に示す。金コロイドの密度推定の精度は良く、ガドリニウムの精度は良くなかった理由として 2 点考えられる。まず、検出器のエネルギー分解能の影響により k-edge を正確に測定することができなかったという点である。さらに、今回用いた金コロイドは濃度がすべて 4.0 % 以内であるのに対して、ガドリニウムは最大 18.57 % と濃度が高く、その分 k-edge の傾斜が大きくなった。エネルギー分解能の問題と k-edge の傾斜の具合が合わさったことで、正確な測定が困難となり精度にも大きく影響したと考えられる。2 つ目として、bin のしきい値の設定精度が影響したと考えられる。実験データ処理において、例えば実際に再構成する際に用いられるデータ bin1 は生データの bin1 から bin2 を差し引くことで得られる。今回、ガドリニウムの k-edge は bin1 のエネルギー範囲内にあり、より正確な測定データを得るためには bin1 と bin2 のしきい値を精度良く検出器に対して設定する必要がある。これに対して、金コロイドは k-edge が bin3 にあり、生データの bin3 自身が実際に再構成する際の測定データとなるため他の bin の影響はない。

複数媒質を用いた実験について、Fig. 4.31 の分離画像を見るとアーチファクトが確認できるが、このアーチファクトはデータ収集の際のピクセルのノイズにより発生したリングアーチファクトに影響されたと考えられる。実験データのノイズ除去はバターワースフィルタによる処理を行っているが、他に影響を少なくする方法として、リングアーチファクトは回転中心付近に強く発生する傾向が見られるので、ファントムをターンテーブルの回転中心から離れた場所に置いたり、X 線管や検出器の温度をできるだけ安定させることで、リングアーチファクトの影響を低減することができると考えられる。また、媒質の密度推定の精度は、

Fig. 5.3 に示すようにシミュレーション結果とほぼ同等の精度であり，想定した結果が得られたといえる．

混合媒質を用いた実験では，bin1 の測定精度が低かったため残りの bin0，bin2，bin3 を用いて特異値分解の処理を施した．結果画像から，水，ガドリニウム，金コロイドの3 媒質に分離することができた．また，媒質の分離精度に関しては Fig. 5.4 に示すように一部の媒質はシミュレーションに近い精度を得ることができたが，誤差がシミュレーションのおおよそ2 倍になるものも多くあった．この誤差の原因として，リングアーチファクトの影響が考えられる．

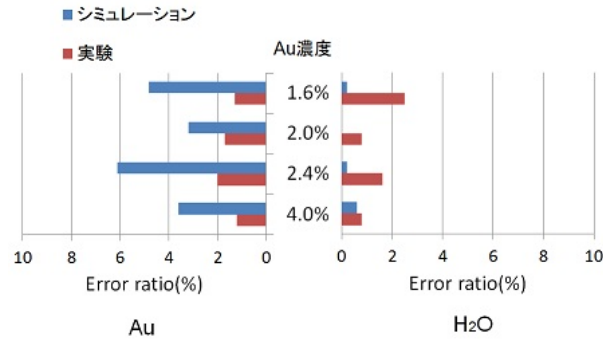


Fig. 5.1: 密度推定精度の比較 (単一媒質 Au)

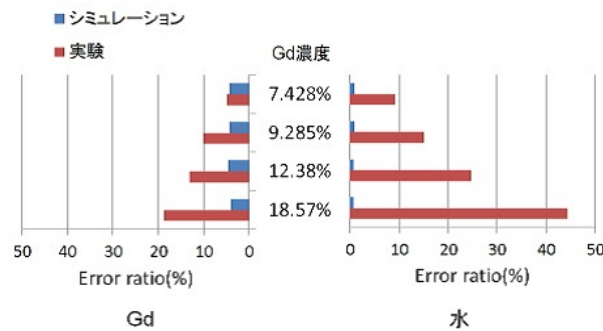


Fig. 5.2: 密度推定精度の比較 (単一媒質 Gd)

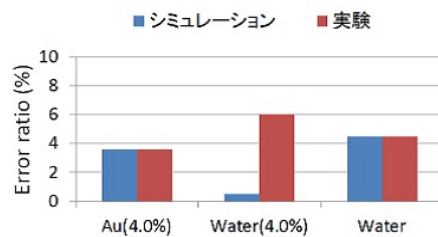


Fig. 5.3: 密度推定精度の比較 (複数媒質)

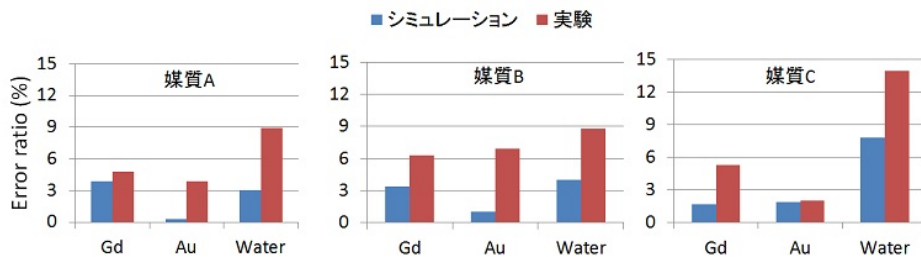


Fig. 5.4: 密度推定精度の比較 (混合媒質)

## 第6章 まとめ

媒質同定の手法として、特異値分解が主成分分析や最小二乗法よりも有効であることを画像の評価によって示した。実際に、フォトンカウンティング形 X 線 CT 装置を用いて得たデータに対して媒質分離を行った結果、水と Au を分離することに成功し、Au の密度を 4 % 以内の誤差で媒質同定することができた。また、水、Gd、Au を含む混合溶液では、Gd、Au とともに誤差 7 % 以内で媒質同定することが可能であることを示した。以上から、本研究の目的であるフォトンカウンティング形 X 線 CT を用いて精度良く媒質同定できることを示すことができた。

# 謝辞

本研究にあたって，全般に渡りご指導いただきました尾川浩一教授，さまざまな面でお世話になりました貝吹太志研究員，市村雄太氏，山本純平氏，向井広幸氏および尾川研究室の方々に感謝します．

## 参考文献

- [1] L. J. Meng, J. W. Tan, et al., "Preliminary evaluation of a novel energy-resolved photon-counting gamma ray detector", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 604:548-554, 2009.
- [2] L. Tlustos, "Spectroscopic x-ray imaging with photon counting pixel detectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 623:823-828, 2010.
- [3] K. Ogawa, T. Kobayashi, et al., "Development of an energy-binned photon-counting detector for x-ray and gamma-ray imaging", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 664:29-37, 2012.
- [4] X. Liu, L. Yu, A. N. Prinmak, and C. H. McCollough, "Quantitative imaging of element composition and mass fraction using dual-energy CT: Three-material decomposition", Med. Phys. 36, p1602-1609, 2009.
- [5] A. P. H. Butler, J. Butzer, N. Schleich, N. J. Cook, N. G. Anderson, N. Scott, et al., "Processing of spectral X-ray data with principal components analysis", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 633:140-142, 2011.
- [6] Huy Q. Le and Sabee Molloy, "Least squares parameter estimation for methods for material decomposition with energy discriminating detectors", Med. Phys. 38 (1), January 2011.
- [7] T. Maji, M. Matsumoto, F. Kaibuki, K. Ogawa, "Material decomposition using a singular value decomposition method", Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2013.

# 発表論文

## 国際会議における発表

1. Mariko Matsumoto, Futoshi Kaibuki, Koichi Ogawa, "K-edge Imaging with a Photon Counting CT System", Conf. Record on IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Seoul(Korea) Oct.27-Nov.2, 2013

## 国内の学会での発表

1. 松本真梨子, 小林透, 貝吹太志, 尾川浩一, 山川勉, 長野竜也, "フォトンカウンティング CT による媒質の線減衰係数の測定", 第 105 回日本医学物理学会学術大会報文集 (医学物理, vol.33, sup.1, p.70), 2013/04/11-04/14(横浜)
2. 松本真梨子, 貝吹太志, 尾川浩一, "フォトンカウンティング CT による k-edge イメージング", 第 107 回日本医学物理学会学術大会報文集 (医学物理, vol.34, sup.1, p.120), 2014/04/10-04/13(横浜)