

フォトンカウンティングX線CTを用いた媒質 同定に関する研究

廣川, 立磨 / HIROKAWA, Tatuma

(発行年 / Year)

2010-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2010-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

P377,5
M34
2009-26

平成21年度 (2009)

修士論文

フォトンカウンティングX線CTを
用いた媒質同定に関する研究

Identification of Media with a Photon Counting X-ray CT

指導教授

尾川 浩一 教授

法政大学 工学研究科 情報電子工学専攻

08R4130 広川 立磨

目次



Abstract	2
第1章 はじめに	4
第2章 X線CTを用いた媒質の同定	5
2.1 従来のX線CT	5
2.2 従来手法	5
2.2.1 単色X線法	5
2.2.2 デュアルX線法	5
2.3 提案手法	5
第3章 提案手法	6
3.1 手順	6
3.2 エネルギーウィンドウ	6
3.3 参照値	7
3.3.1 参照値と透過距離	7
3.3.2 測定値と参照値の比較	7
3.4 混合物の同定法	8
3.5 高精度な参照値計算	9
第4章 シミュレーション	11
4.1 シミュレーション条件	11
4.2 単一媒質	12
4.2.1 純物質	12
シミュレーション結果	12
結果-カルシウム-	13
結果-アルミニウム-	15
結果-マグネシウム-	17
結果-水-	19
結果-エタノール-	21
4.2.2 オブジェクトサイズの変化	24
シミュレーション結果	24
結果-アルミニウム 直径 40 mm-	25
結果-アルミニウム 直径 20 mm-	27
結果-アルミニウム 直径 10 mm-	29
結果-アルミニウム 直径 5 mm-	31
4.2.3 線量の変化	34
シミュレーション結果	34
結果-アルミニウム 照射光子数 1,000,000/pixel-	35

	結果-アルミニウム 照射光子数 100,000/pixel-	37
	結果-アルミニウム 照射光子数 10,000/pixel-	39
	結果-アルミニウム 照射光子数 1,000/pixel-	41
4.2.4	混合物	43
	シミュレーション結果	43
	結果-連立方程式による同定 エタノール5 %-	44
	結果-連立方程式による同定 エタノール50 %-	44
	結果-連立方程式による同定 エタノール95 %-	44
	結果-混合比ごとの参照値計算 エタノール5 %-	45
	結果-混合比ごとの参照値計算 エタノール50 %-	47
	結果-混合比ごとの参照値計算 エタノール95 %-	49
4.3	複数媒質	51
	シミュレーション結果	51
	結果-エタノール, 水-	52
	結果-カルシウム, 水-	53
	結果-水, カルシウム-	54
	結果-水, エタノール, カルシウム-	55
	結果-カルシウム, マグネシウム, アルミニウム	56
	結果-カルシウム, アルミニウム, マグネシウム, エタノール, 水-	57
第5章	実験	59
5.1	実験装置	59
5.2	実験	60
5.3	実験結果	60
	結果-水-	61
	結果-エタノール-	63
	結果-アルミニウム-	65
第6章	考察	67
6.1	単一媒質シミュレーション	67
6.1.1	純物質	67
6.1.2	混合物	68
6.2	複数媒質シミュレーション	69
6.3	実験	69
第7章	まとめ	70
	謝辞	71
	参考文献	72
	発表論文	73

Abstract

Modern x-ray CT systems measure the energy of all incident photons that enter the detector, thus it is very difficult to identify a medium with an x-ray CT image. We proposed a new method to accomplish this task of identifying a medium, in which we used a detector that could measure photons using several energy windows. Our method identifies an object using a set of linear attenuation coefficients of the object acquired from reconstructed images obtained for each energy window. For this identification, we calculated a set of linear attenuation coefficients for each individual medium beforehand, and we compared this master dataset with that measured using the photon counting x-ray CT. To evaluate the validity of our proposed method, we conducted some simulations and experiments using several materials that are typical for these types of experiments. Our results showed that we could correctly identify the materials with a photon counting detector.

第1章 はじめに

現在、我々の生活において、コンピュータ断層撮影(CT, Computed Tomography)は非常に身近なものとなっている。CTは医療現場において病巣の早期発見や臨床診断のために用いられるほか、工業分野における品質管理やセキュリティ検査などのための非破壊検査にも幅広く応用されている。

CTはその原理の違いから、透過型CT(transmission CT)と放射型CT(emission CT)の二種類に分類することができる。透過型CTは、非検体に向けて複数方向から放射線を照射し、非検体を透過した放射線を観測することで、非検体内部における放射線の減衰量の分布(即ち非検体の内部構造)を画像化するものである。本研究で使用したX線CTはこれに当たり、非検体内部のX線減衰分布を画像として得るものである。一方の放射型CTは、被験者の体内に放射性同位元素(RI, radioactive isotope)を投与し、そこから放射される γ 線を体外で観測することで、放射線源の分布を画像化するものである。医療現場において、主に生体の機能を観察することを目的に用いられるSPECT(single photon emission CT)やPET(positron emission CT)がこれに当たる。これらのCTはその用途によって適宜使い分けられるが、本研究ではX線CTを用いて媒質を同定することを目的とした。

媒質の線減衰係数はエネルギーの関数であるため、X線の減衰量をエネルギーごとに知ることによって媒質の同定が可能である^[1]。しかしながら、現在のX線CTシステムでは検出器に入射した全てのX線のエネルギーの積分値を投影データとするため、CT画像の値は使用した全てのエネルギー範囲に渡る線減衰係数の重み付け平均となり、媒質の同定は困難である。従来手法として単色X線を使用し、再構成画像として得られる媒質の減衰係数から同定を行う単色X線法^[2]や、二つの異なるエネルギースペクトルのX線を使い、それぞれの減衰量の情報から媒質を同定するデュアルX線法^{[3],[4]}が知られているが、これらには十分な単色X線を得ることが難しく一般使用に適さないことや、使用できるエネルギー情報が少なく精度が低くなることなどの欠点がある。また、放射性同位元素を用いることでエネルギーが一定な γ 線を使用することができるが、十分な線量を得ることができず、これも適した方法とすることはできない。

そこで、我々はX線CTシステムにおいていくつかのエネルギーウィンドウを使用し、エネルギー範囲の異なるCT画像を複数枚同時に撮影する方法を考案した。こうして得られたCT画像は、各エネルギーウィンドウにおける媒質の減衰係数分布を表すため、画像の関心領域内の減衰係数を用いることで媒質の同定が可能となるのである。本論文では我々の提案するX線CTを用いた媒質同定手法の有効性をシミュレーション結果と実験結果から評価した。

最後に本論文の構成について触れておく。まず、第2章ではX線CTを用いた媒質の同定について従来手法と提案手法の比較を行う。次に、第3章で提案手法について詳しく説明する。第4章、第5章では提案手法の有効性の評価のために行ったシミュレーションと実験について述べ、これに対する考察を第6章で行う。最後に、第7章で本論文をまとめる。

第2章 X線CTを用いた媒質の同定

2.1 従来のX線CT

検出器に入射した全てのX線のエネルギーの積分値を投影データとする。この投影データを使用して得られる再構成画像の値は使用したX線の全てのエネルギー範囲に渡る線減衰係数の重み付け平均となるため、個々の光子のエネルギー情報が失われてしまい媒質の同定は困難である。従来のエネルギーフルエンス型X線CTの投影データはX線光子のエネルギーを E 、検出X線のエネルギースペクトルを $p'(E)$ とすると以下の式で示される。

$$\int p'(E) \cdot E dE \quad (2.1)$$

2.2 従来手法

2.2.1 単色X線法

単色X線を使用してCT画像を撮影することで、再構成画像値として得られる媒質の減衰係数から同定を行う。しかしながら単色X線源としてシンクロトロンが必要となるため、一般的な使用には適さない。また、単色X線としてK-X線のような特性X線を使用することもできるが、十分なエネルギーと光子数を得ることが難しく、適した方法とは言えない。

2.2.2 デュアルX線法

二つの異なるエネルギースペクトルのX線を使い、それぞれの減衰量の情報から媒質を同定する。一般的に知られているH-L(high and low intensities of the transmission x-ray)曲線法では、異なる二つの強度のX線の減衰量の比が減衰媒質の原子番号に依存することを利用して物体の原子番号を測定するものである。しかしながら、この方法では二つのエネルギー情報のみを使用するため、高い精度を得ることが難しい。

2.3 提案手法

フォトンカウンティングX線CTシステムにおいて、いくつかのエネルギーウィンドウを使用し、エネルギー範囲の異なるCT画像を複数枚同時に撮影する。こうして得られたCT画像は、各エネルギーウィンドウにおける媒質の減衰係数分布を表すため、画像の関心領域内の減衰係数を用いることで媒質の同定が可能となる。一般的な多色X線を使用することが可能で、複数のエネルギー情報を使用できるため精度も高くなる。提案手法に関しては次章で詳しく説明する。

第3章 提案手法

3.1 手順

フォトンカウンティングX線CTシステムにおいて n 個のエネルギーウィンドウ ($w_i : i = 1 \sim n$) の使用により, エネルギー範囲の異なるCT画像を複数枚同時に撮影する. これらのCT画像は使用したエネルギーウィンドウにおける媒質の減衰係数分布を示すため, 各画像の関心領域内の値を平均して減衰係数の測定値 ($m_i : i = 1 \sim n$) とする. こうして得られた減衰係数の測定値を様々な媒質の理論値 ($\eta_i : i = 1 \sim n$) と比較し, 値が近くなるものを探すことで同定を行う. η_i は媒質同定における参照値で, 以下の式によって計算した.

$$\eta_i = \frac{1}{l} \log_e \left(\frac{\sum w_i p(E)}{\sum w_i p(E) \cdot e^{-\mu(E)l}} \right) \quad (3.1)$$

ここで E は入射 X 線のエネルギー, $p(E)$ は入射 X 線のエネルギースペクトル, $\mu(E)$ は任意の媒質の線減衰係数, l は透過距離である. Eq. 3.1 において η_i は l の関数であるが, 透過距離の近似値を使用することで媒質の同定が可能である. もし正確な透過距離を知りたい場合は, 再構成されたCT画像から計算することができる.

3.2 エネルギーウィンドウ

本研究で使用した浜松ホトニクス製のCdTe検出器CHPC-HS1はX線光子を検出する際に5つのエネルギー閾値を設定することができる. そのため, 一度の測定でそれぞれの閾値を超えたエネルギーを持つ光子を検出した5つの投影データが得られる. ここで, 異なる閾値を使用して得た投影データの差を取ることで, それらの閾値に挟まれるエネルギー範囲の投影データを求めることができる. したがって, 5つのエネルギー閾値を使用することで, 4つの異なるエネルギー範囲の投影データを同時に撮影することができるのである.

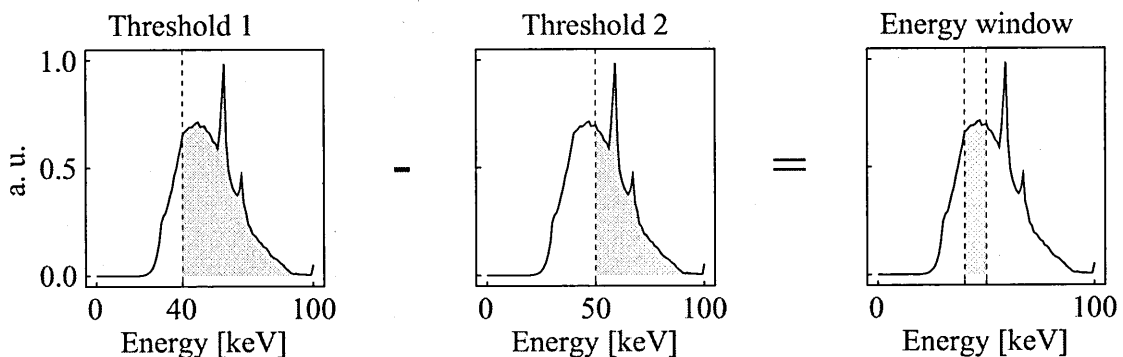


Fig. 3.1: Calculation of energy window

3.3 参照値

3.3.1 参照値と透過距離

参照値はあるエネルギーウィンドウ w_i においてエネルギースペクトル $p(E)$ の X 線が任意の媒質を l cm 透過したときの減衰係数の重みづけ平均である。この値は透過距離 l の関数であるため、オブジェクトの大きさに合わせて計算することが必要となる。しかしながら l の変化に伴う η_i の変化量は小さいため、透過距離の近似値を使用することで媒質の同定が可能である。管電圧: 90 kV, フィルタ: Al 10 mm, w_1 : 40-49 keV, w_2 : 50-59 keV, w_3 : 60-69 keV, w_4 : 70-79 keV で計算した η_i の透過距離 l に対する関係を Fig. 3.2 に示す。

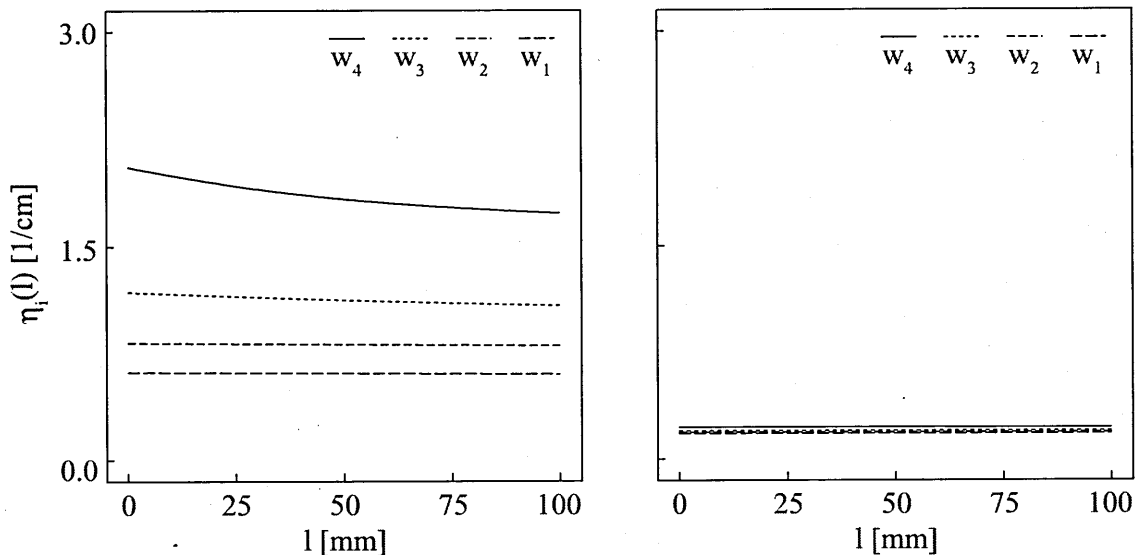


Fig. 3.2: Reference value (left: calcium, right: water)

参照値は使用したエネルギーウィンドウにおける媒質の減衰係数の範囲で変化するため、減衰係数曲線の傾きが大きいカルシウムでは透過距離の変化に伴う変化が大きい。また、一般的に減衰係数曲線は光子のエネルギーが高くなるほど変化量が小さくなるため、高エネルギーウィンドウでは参照値の透過距離依存性も小さくなる。本研究では透過距離の近似値として使用したオブジェクト (円柱) の直径の長さを用いて参照値を計算した。

3.3.2 測定値と参照値の比較

媒質同定の際に行う測定値 m_i と参照値 η_i の比較には以下の式を用いた。

$$\epsilon = \sum_{w_i} \frac{|m_i - \eta_i|}{n} \quad (3.2)$$

ここで w_i はエネルギーウィンドウ, n は使用したエネルギーウィンドウの数である。この式は使用した全てのエネルギーウィンドウにおける測定値と参照値の差の平均を表し、この値が小さいほど測定した関心領域内の媒質は参照値を計算した媒質に近い。本研究では、測定値と計算した全ての参照値を比較し、この値が最小となる参照値を持つ媒質に関心領域内の媒質と決定した。

3.4 混合物の同定法

複数の純物質(単体や化合物)が混ざり合っただけした混合物を対象とする場合、我々は二つの方法を用いて媒質の同定を試みた。一つは物質の混合比ごとに参照値を計算する方法である。様々な物質を様々な比で混合した参照値を計算し、提案手法を用いることで混合物の媒質を同定することができるのである。もう一つは連立方程式による混合物の同定法である。混合物の密度がその要素となる物質の密度の混合比による重みづけ平均で近似できる場合、混合物の減衰係数もその要素の重みづけ平均で近似することができる。したがって、減衰係数から計算される参照値も同様に近似することができるため、複数の媒質の参照値と測定値をエネルギーウィンドウごとに連立させて解くことで、物質の混合比を求めることができるのである。以下では、連立方程式を用いた混合物の同定法について具体的に説明する。

ある物質 A, B の混合物を 4 つのエネルギーウィンドウを使用して同定する場合、それぞれの混合比を α , β とおいて以下の連立方程式を立てることができる。

$$\begin{cases} \alpha \cdot \eta_1^A + \beta \cdot \eta_1^B = m_1 \cdots (1) \\ \alpha \cdot \eta_2^A + \beta \cdot \eta_2^B = m_2 \cdots (2) \\ \alpha \cdot \eta_3^A + \beta \cdot \eta_3^B = m_3 \cdots (3) \\ \alpha \cdot \eta_4^A + \beta \cdot \eta_4^B = m_4 \cdots (4) \\ \alpha + \beta = 100\% \cdots (5) \end{cases} \quad (3.3)$$

この連立方程式は二元一次方程式であるため、5つの式の内2つを利用して解くことができる。ここで注意しておきたいのは、上から4つの式は近似によって得た式ということである。そのため本研究では混合比の合計=100%の式に対し、近似で得た4つ式をそれぞれ連立させて解き、得られた4つの解を平均した値を混合比の測定値とした。

$$(1),(5) \cdots \alpha_{(1),(5)}, \beta_{(1),(5)}, (2),(5) \cdots \alpha_{(2),(5)}, \beta_{(2),(5)} \\ (3),(5) \cdots \alpha_{(3),(5)}, \beta_{(3),(5)}, (4),(5) \cdots \alpha_{(4),(5)}, \beta_{(4),(5)}$$

$$\alpha = \frac{1}{4} (\alpha_{(1),(5)} + \alpha_{(2),(5)} + \alpha_{(3),(5)} + \alpha_{(4),(5)}) \quad (3.4)$$

$$\beta = \frac{1}{4} (\beta_{(1),(5)} + \beta_{(2),(5)} + \beta_{(3),(5)} + \beta_{(4),(5)}) \quad (3.5)$$

この連立方程式を混合物の要素ではない物質の参照値で計算した場合、エネルギーウィンドウごとの解に大きな差や、混合比の値にはあり得ないマイナスの値が発生する。そのため、この方法の使用の際に混合物の要素の物質を知っている必要はなく、任意の媒質の中から媒質を同定することができる。また、この方法では使用したウィンドウの数+1個(混合比の合計=100%)の式を立てることができるため、ウィンドウの数+1個要素から成る混合物の混合比を求めることができる。しかしながら、混合物の要素が増えると誤差が大きくなるため、要素の数は最高で2ないし3種類までが限界である。

3.5 高精度な参照値計算

オブジェクトが減衰係数の大きく異なる媒質を複数含む場合、各々の媒質が互いに影響し合い、Eq. 3.1 を用いた通常の参照値計算では媒質の同定が困難となる。そこで、本研究では複数媒質のオブジェクトに対し、より高精度な参照値の計算を行った。以下では、この参照値を用いた媒質同定法を具体例を用いて説明する。

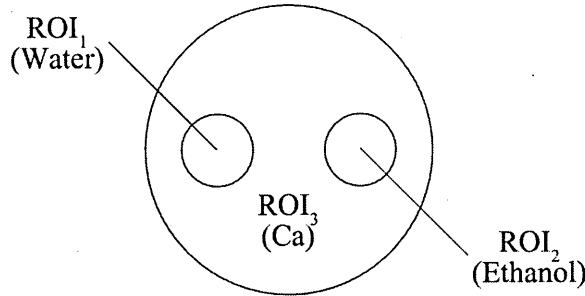


Fig. 3.3: Object

Fig. 3.3 のようなオブジェクトの同定を行う場合、まずは通常の手法と同様に4つの再構成画像からROIごと(媒質ごと)に m_i を求める。この値は使用したエネルギーウィンドウにおける媒質の減衰係数を表すため、内挿・外挿することで、ROI内の媒質の減衰係数曲線の近似 $\mu'(E)$ を得ることができる。

$$\begin{aligned} \text{ROI}_1: & m_1^1, m_2^1, m_3^1, m_4^1 \cdots \mu_1'(E) \\ \text{ROI}_2: & m_1^2, m_2^2, m_3^2, m_4^2 \cdots \mu_2'(E) \\ \text{ROI}_3: & m_1^3, m_2^3, m_3^3, m_4^3 \cdots \mu_3'(E) \end{aligned}$$

ここで、近似した減衰係数曲線の傾きを調べ、傾きの大きい媒質から順に同定を行う。これは減衰係数の変化量が大きい媒質が変化量の小さい媒質に与える影響が大きいためである。

例の場合: $\text{ROI}_3(\text{Ca}) \rightarrow \text{ROI}_1(\text{Water}) \rightarrow \text{ROI}_2(\text{Ethanol})$

ROI₃

まず、ROI₃ を同定する場合、再構成画像から得たオブジェクトの構造と他の領域の減衰係数近似曲線 (ROI₁: $\mu_1'(E)$, ROI₂: $\mu_2'(E)$)、測定に使用したエネルギースペクトル $p(E)$ とエネルギーウィンドウ w_i 、そして参照値を計算するある媒質 x の減衰係数曲線 $\mu_x(E)$ を用い、CT画像を計算する。このCT画像のROI₃における平均値を η_i として、測定値との差が最小となる媒質を探す。

$$\begin{aligned} \text{ROI}_3: m_i & \approx \eta_i(\mu_1'(E), \mu_2'(E), \mu_x(E)) \text{ の時} \\ \text{ROI}_3 & = x(\text{この例では } x=\text{Ca}) \end{aligned}$$

ROI₁

次に、ROI₁ についても同様の方法で参照値を計算し媒質を同定するが、この時すでに同定されたROI₃には近似曲線ではなく、同定したCaの減衰係数を用いる。これによって近似曲線の使用よりも正確な参照値を計算することができる。もしROI₃の同定結果が誤っていても、誤った媒質は真の媒質に近い減衰係数を持つため、参照値に真の媒質と近い影響を与えることができる。

$$\text{ROI}_1: m_i \approx \eta_i(\mu_x(E), \mu'_2(E), \mu_{Ca}(E)) \text{ の時}$$
$$\text{ROI}_1 = x(\text{この例では } x=\text{Water})$$

ROI₂

最後に、ROI₂ に関しては近似曲線は使用せず、すでに同定された他の ROI の媒質の減衰係数を使用して同様に同定を行う。

$$\text{ROI}_2: m_i \simeq \eta_i(\mu_{\text{Water}}(E), \mu_x(E), \mu_{Ca}(E)) \text{ の時}$$
$$\text{ROI}_2 = x(\text{この例では } x=\text{Ethanol})$$

反復

以上で全ての ROI の媒質を同定できたが、同定には減衰係数の近似曲線を使用したため、精度が低くなっている。また、途中の同定を誤った場合には以降の同定に誤った媒質 (真の媒質に近い減衰係数を持つ) の減衰係数を用いてしまうため、精度が低くなる。そこで同定結果の媒質を用いて再び同じ手順を繰り返す。これによって誤りの訂正や同定結果の確認を行うことができる。ほとんどの場合、一度の反復で同定結果は収束する。

第4章 シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

モンテカルロシミュレーションを行い提案手法の有効性を評価した。ここで、シミュレーションの条件は本研究で行った実験の条件とできるだけ等しくなるように設定した。そのため、X線管は実験に用いた浜松ホトニクス製のマイクロフォーカスX線源L9121を想定し、管電圧は設定範囲最大の90 kVとした。ここで、入射X線の光子数は管電流による設定ではなく、検出器の各素子に入射する数を直接設定した。また、X線検出器は同じく浜松ホトニクス製のCdTe検出器CHPC-HS1を想定し、シミュレーションの効率を上げるために検出感度は100%とし、エネルギー分解能は1 keVとした。検出器は40 keV以下の閾値を設定した測定で大きな誤差が生じたため、40~80 keVの範囲を10 keVごと4つのエネルギーウィンドウに分けて測定を行った。シミュレーションのジオメトリと使用したX線のエネルギースペクトルをFigs. 4.1, 4.2に、シミュレーション条件をTable 4.1に示す。

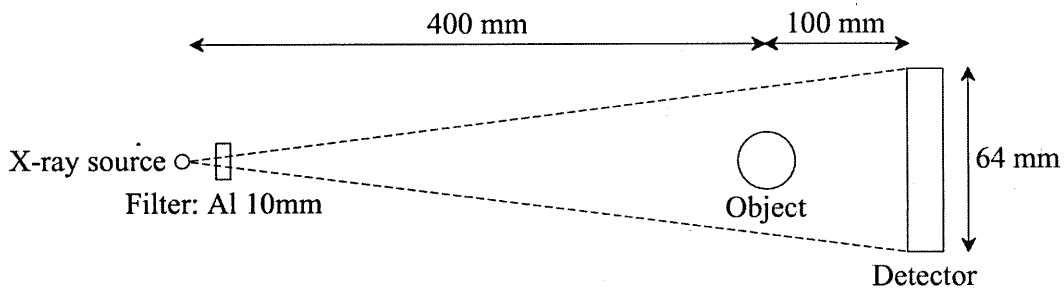


Fig. 4.1: Geometry

オブジェクトには一つの媒質から成る単一媒質オブジェクトと複数の媒質の領域を持つ複数媒質オブジェクトを使用し、オブジェクトを構成する媒質には単体と化合物から成る純物質と複数の純物質が混じり合った混合物を用いた。設定できる管電圧は最大90 kVであるため、対象の媒質には水やアルコールのような液体と、原子番号の低い軽金属を用いた。

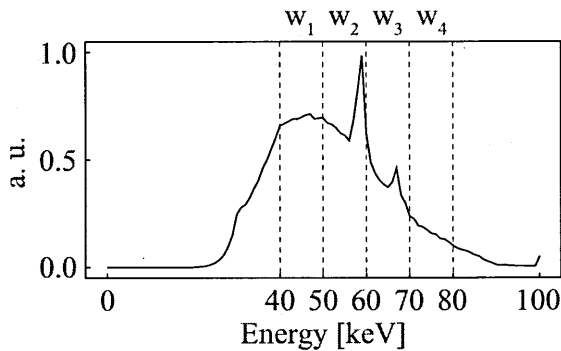


Fig. 4.2: Energy spectrum

Table 4.1: Conditions

Tube voltage	90 kV
Filter	Al 10 mm
Number of photons	1M / pixel
Number of projection	180(360 deg.)
Detector size	64 pixels
Pixel size	1×1 mm ²
Sensitivity	100 %
Energy resolution	1 keV

4.2 単一媒質

4.2.1 純物質

純物質から成るオブジェクトを対象としてシミュレーションを行い，得られた再構成画像から媒質同定を行った．媒質には水，エタノール，カルシウム，アルミニウム，マグネシウムを用いた．これらの媒質の密度を Table 4.2 に，X線減衰係数を Fig. 4.3 に示す．

Table 4.2: Density

Medium	Density [g/cm ³]
Calcium	1.55
Aluminum	2.70
Magnesium	1.74
Water	1.00
Ethanol	0.79

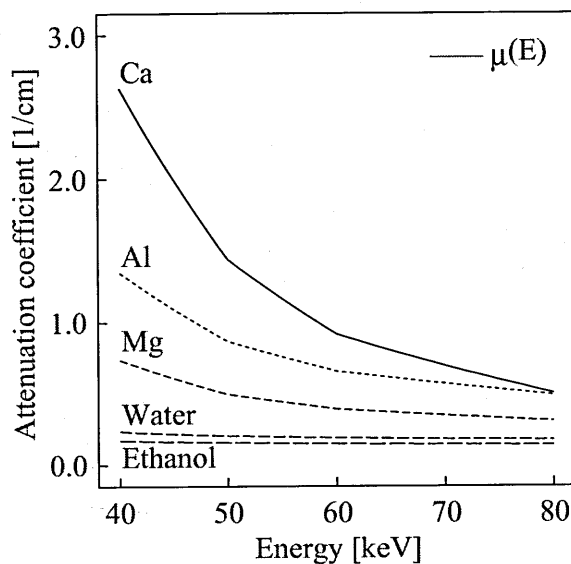


Fig. 4.3: Attenuation coefficient

シミュレーション結果

各媒質のシミュレーション値と参照値の比較を Fig. 4.4 に示す．これを見ると全ての媒質でシミュレーション値と参照値がほとんど一致しており，媒質を正しく同定できている．各媒質に対する詳細なシミュレーション結果を以降のページに示す．

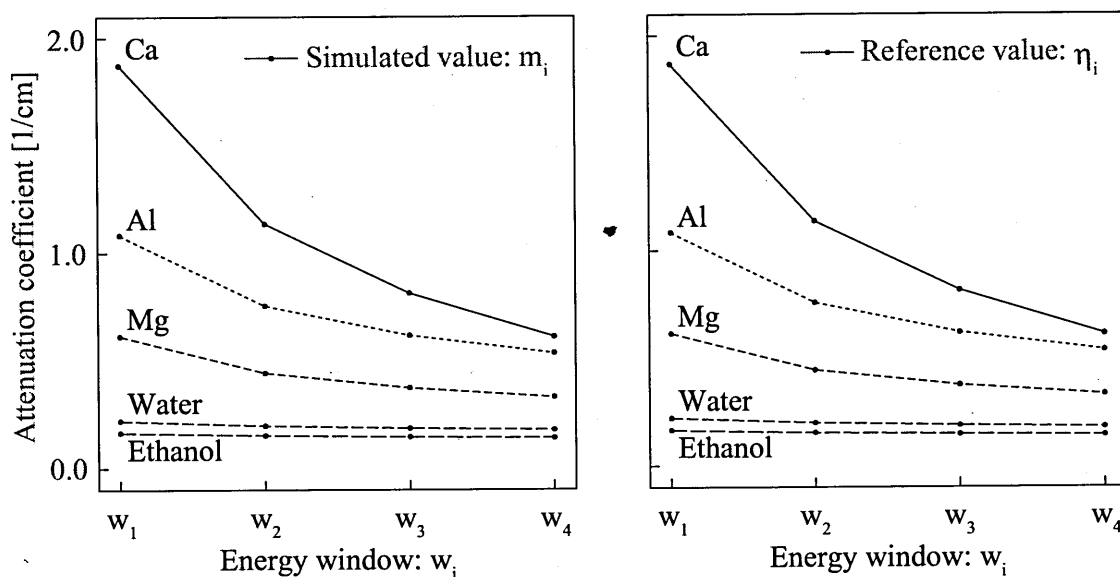


Fig. 4.4: Comparison of simulated values to reference values

結果-カルシウム-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.5, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を図 4.3, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を図 4.6 に示す。

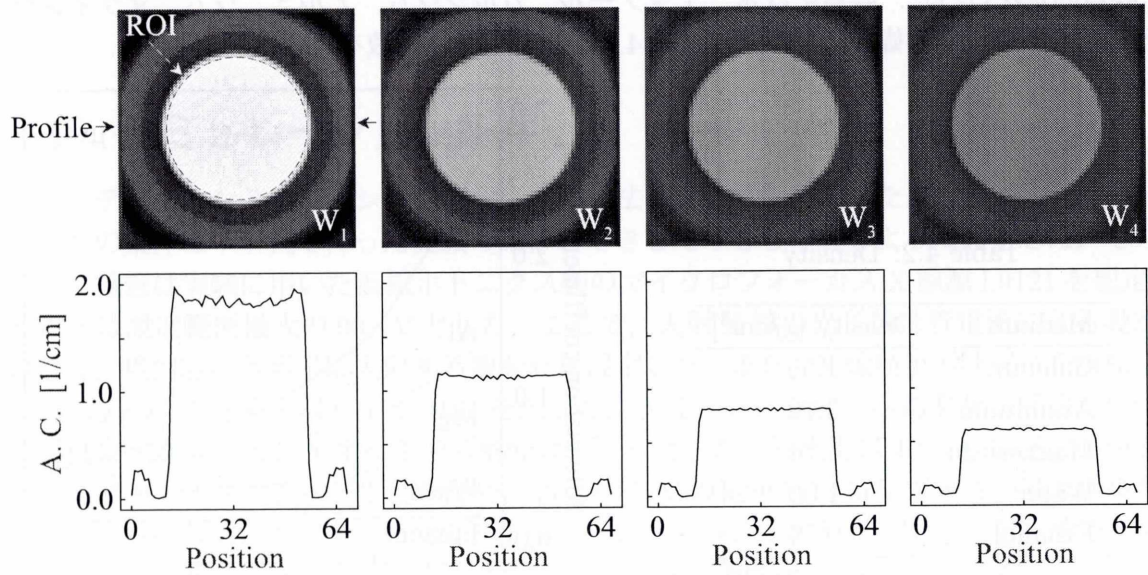


Fig. 4.5: Reconstructed images and profiles

Table 4.3: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.873	1.136	0.814	0.611	0.223 %
Reference value: η_i	1.868	1.136	0.816	0.613	

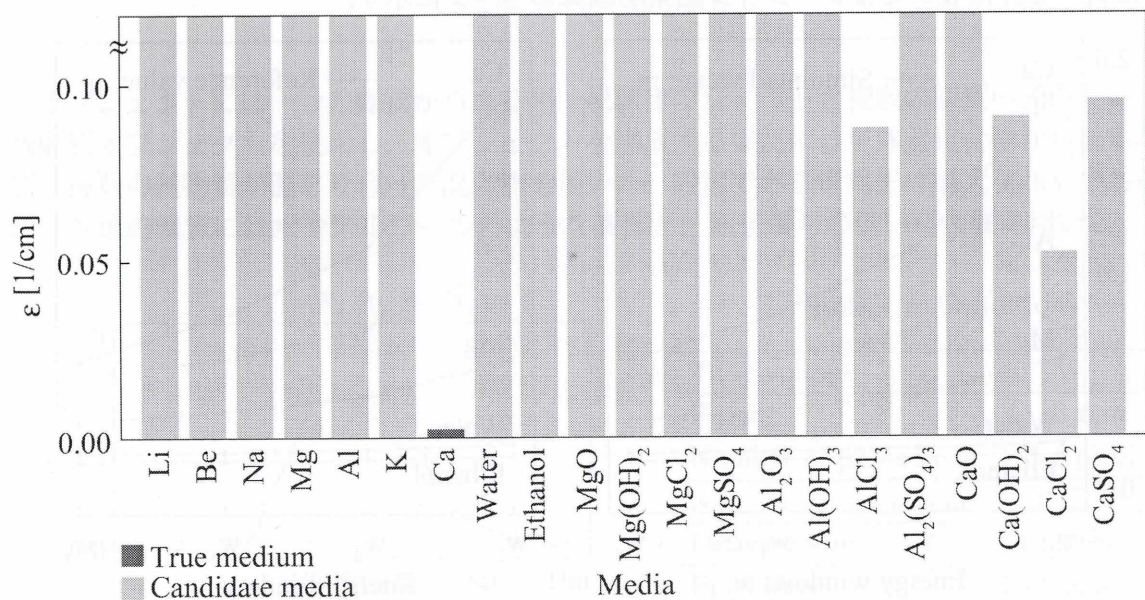


Fig. 4.6: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.7 に示す.

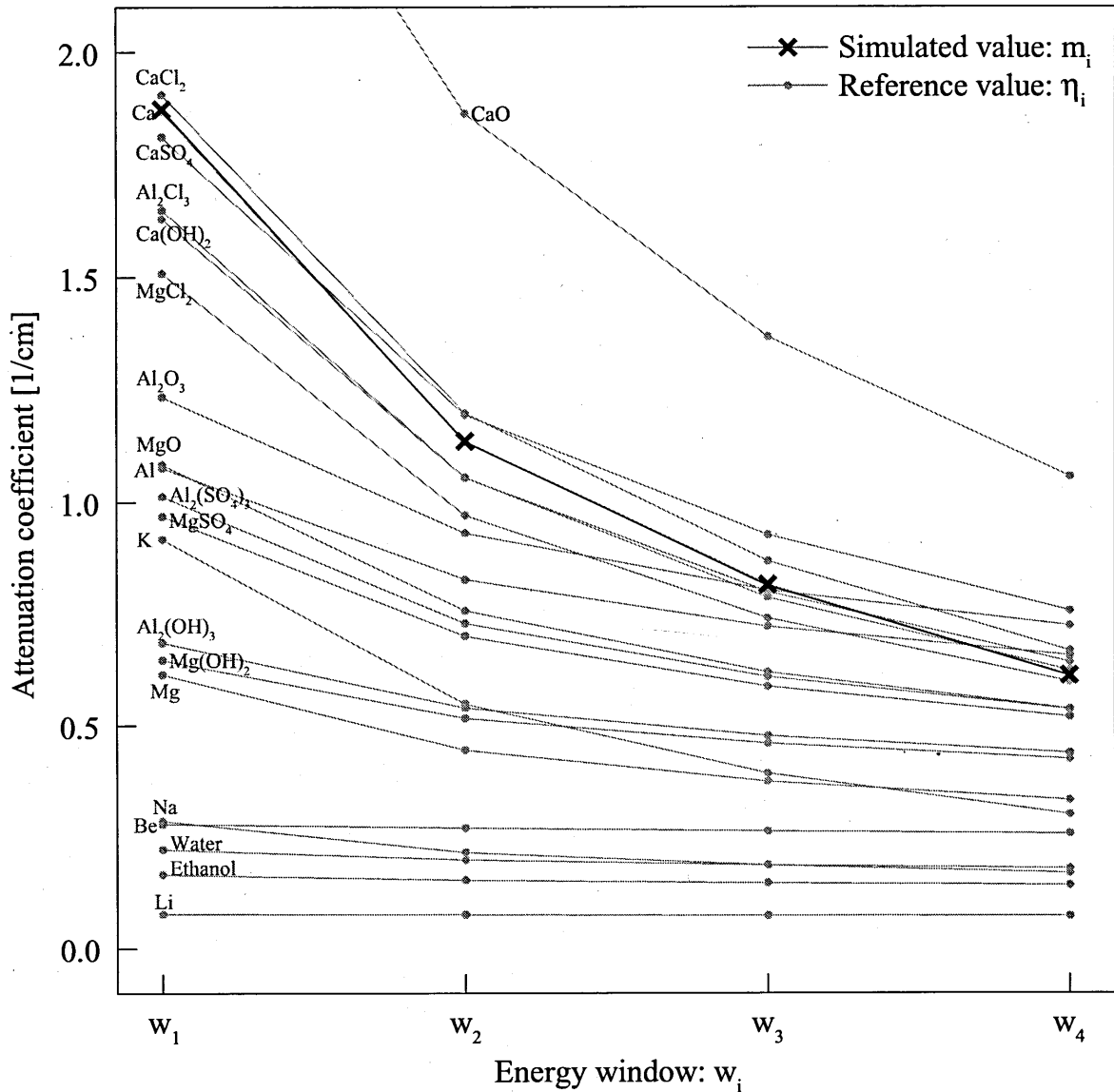


Fig. 4.7: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.3, Fig. 4.7より, シミュレーション値はカルシウムの参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.6より, ϵ の値はカルシウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-アルミニウム-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.8, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.4, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.9 に示す.

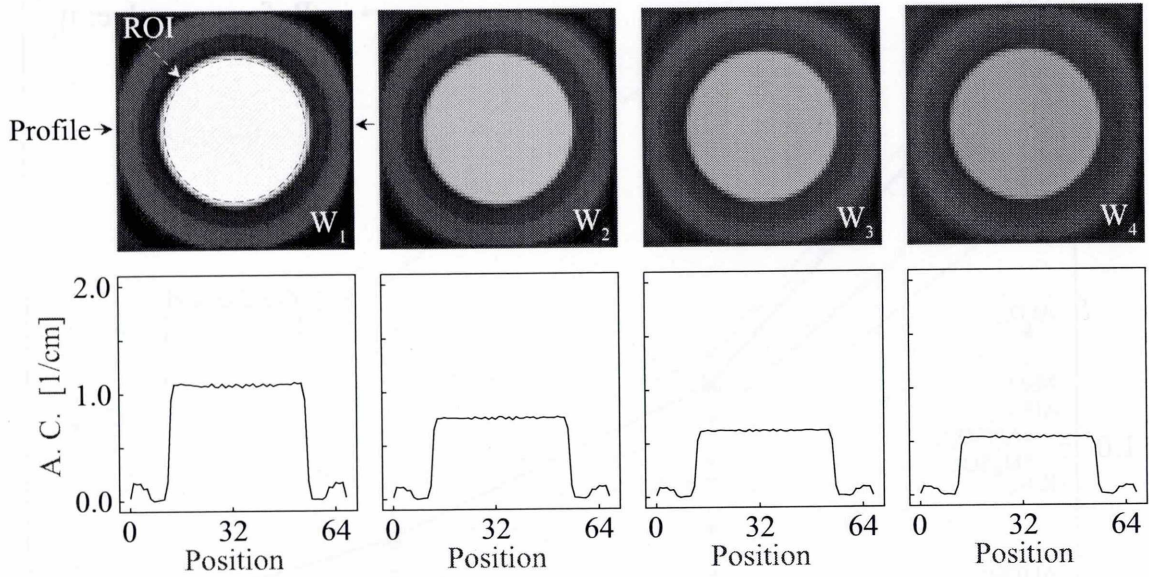


Fig. 4.8: Reconstructed images and profiles

Table 4.4: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.083	0.755	0.618	0.535	0.303 %
Reference value: η_i	1.084	0.758	0.620	0.537	

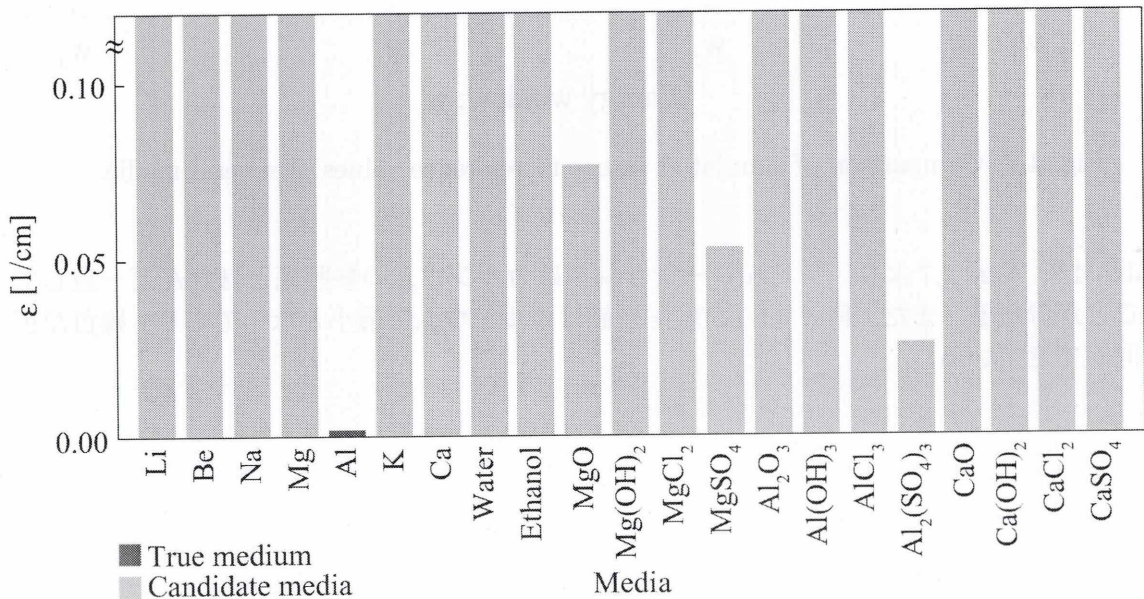


Fig. 4.9: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.10 に示す.

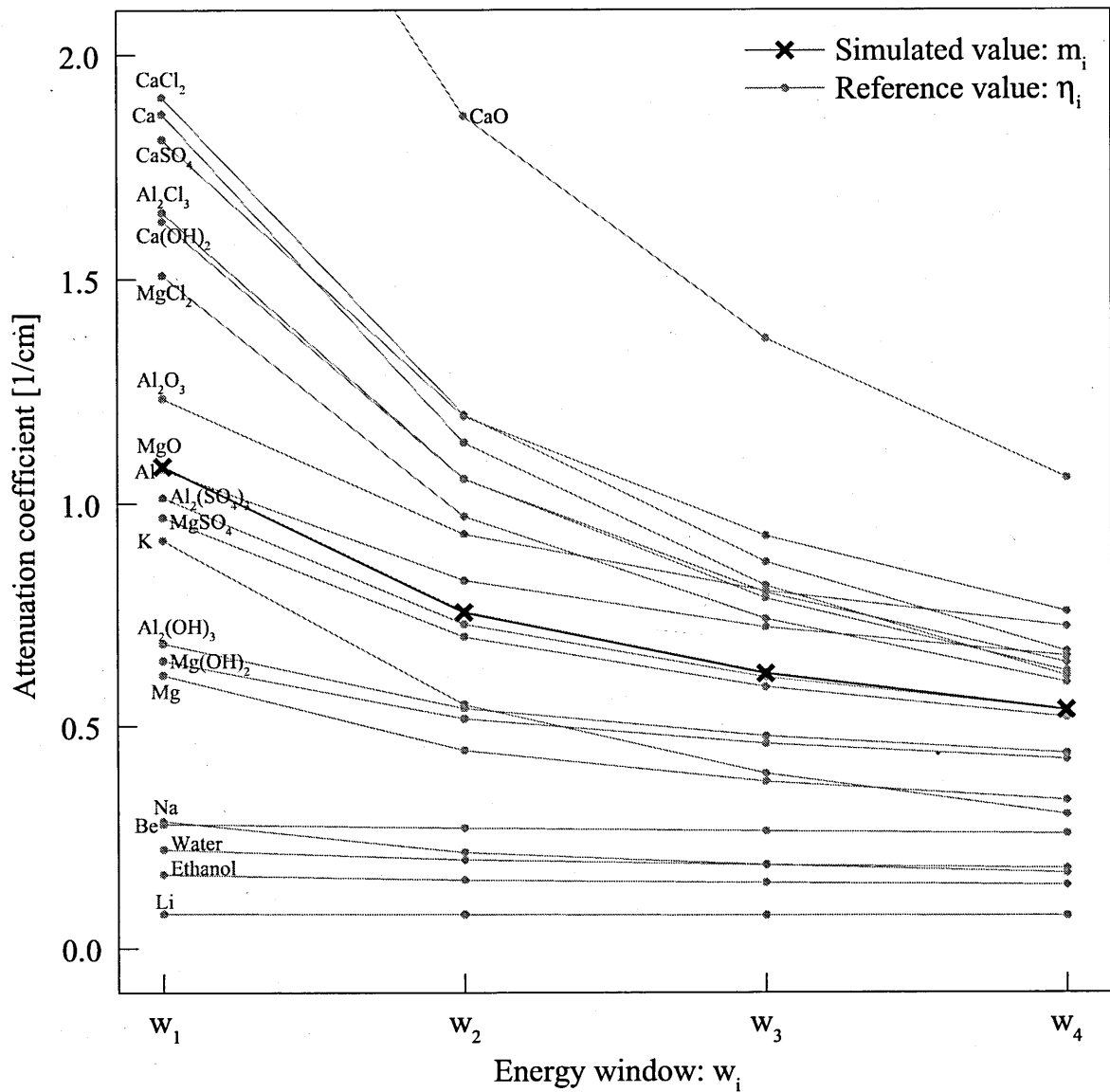


Fig. 4.10: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.4, Fig. 4.10 より, シミュレーション値はアルミニウムの参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.9 より, ϵ の値はアルミニウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-マグネシウム-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.11, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.5, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.12 に示す。

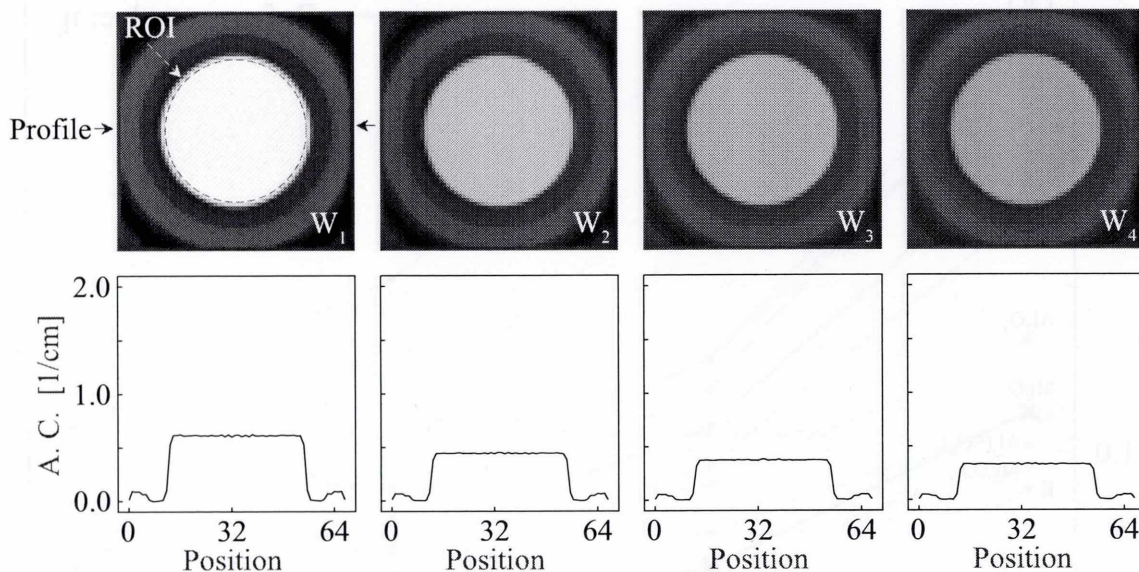


Fig. 4.11: Reconstructed images and profiles

Table 4.5: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	0.614	0.444	0.374	0.331	0.344 %
Reference value: η_i	0.615	0.445	0.375	0.332	

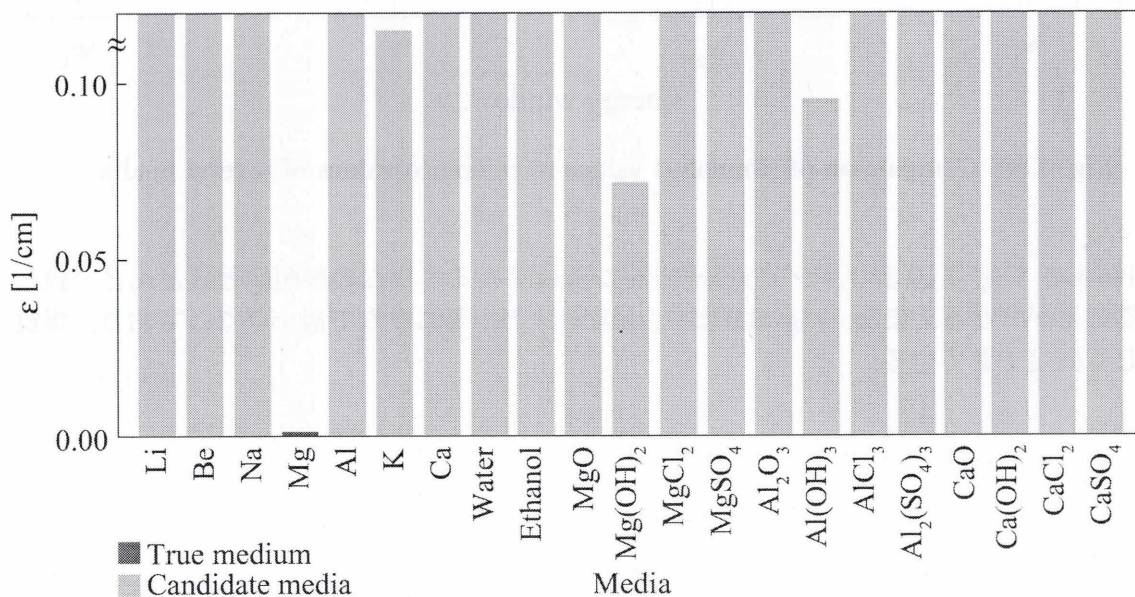


Fig. 4.12: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.13 に示す。

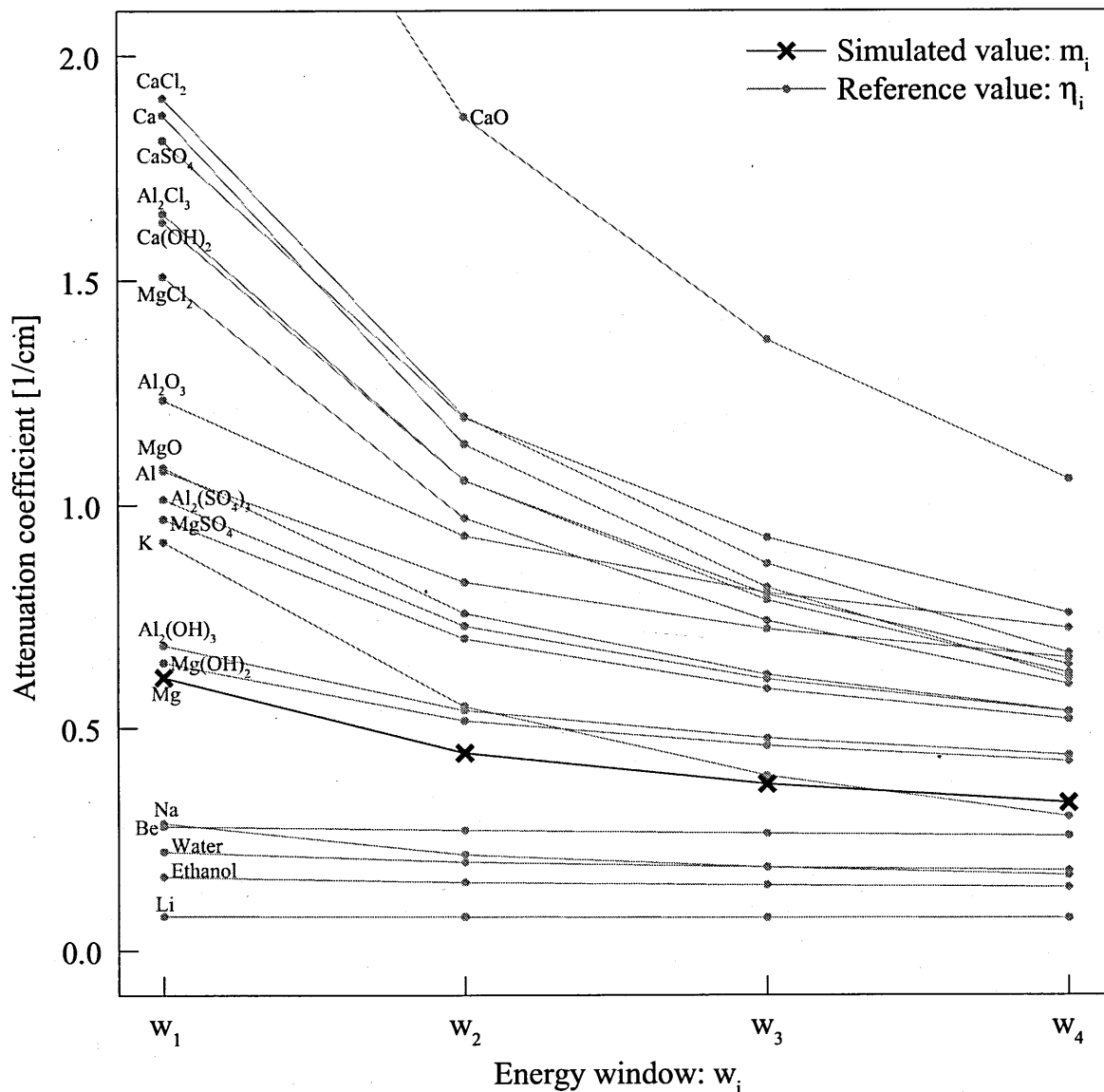


Fig. 4.13: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.5, Fig. 4.13 より, シミュレーション値はマグネシウムの参照値とほとんど一致していることが分かる。また, Fig. 4.12 より, ϵ の値はマグネシウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている。

結果-水-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.14, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.6, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.15 に示す。

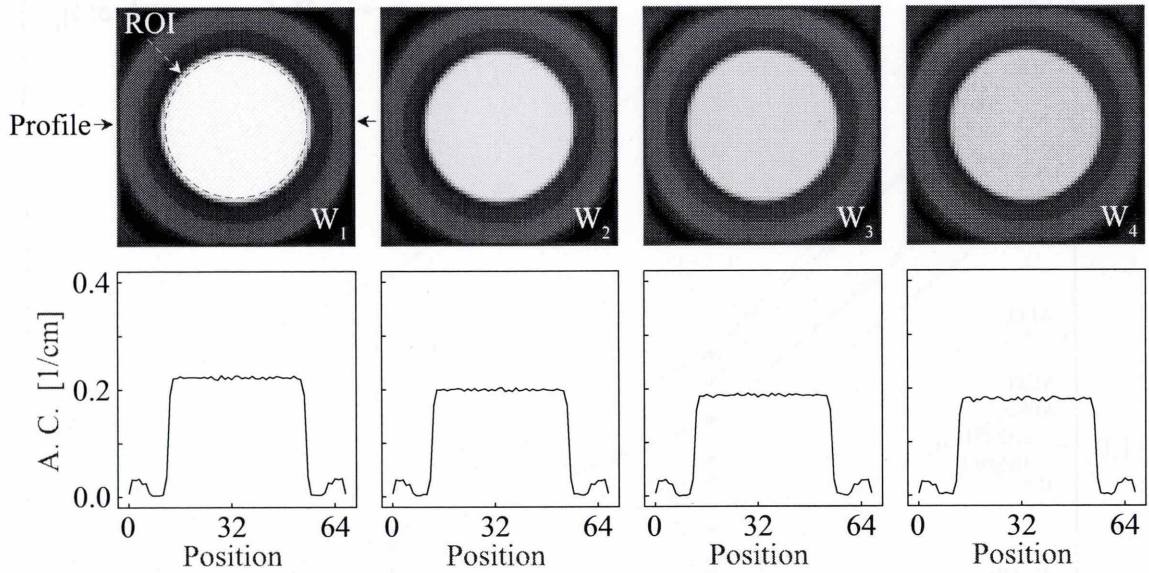


Fig. 4.14: Reconstructed images and profiles

Table 4.6: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	0.221	0.198	0.187	0.179	0.395 %
Reference value: η_i	0.222	0.199	0.187	0.179	

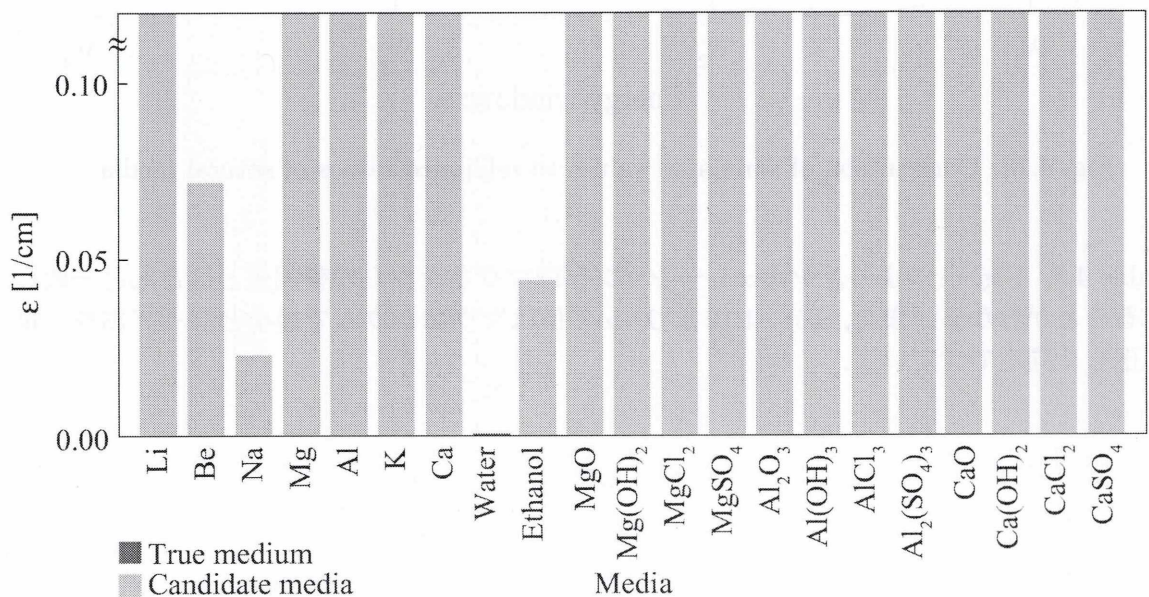


Fig. 4.15: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.16 に示す.

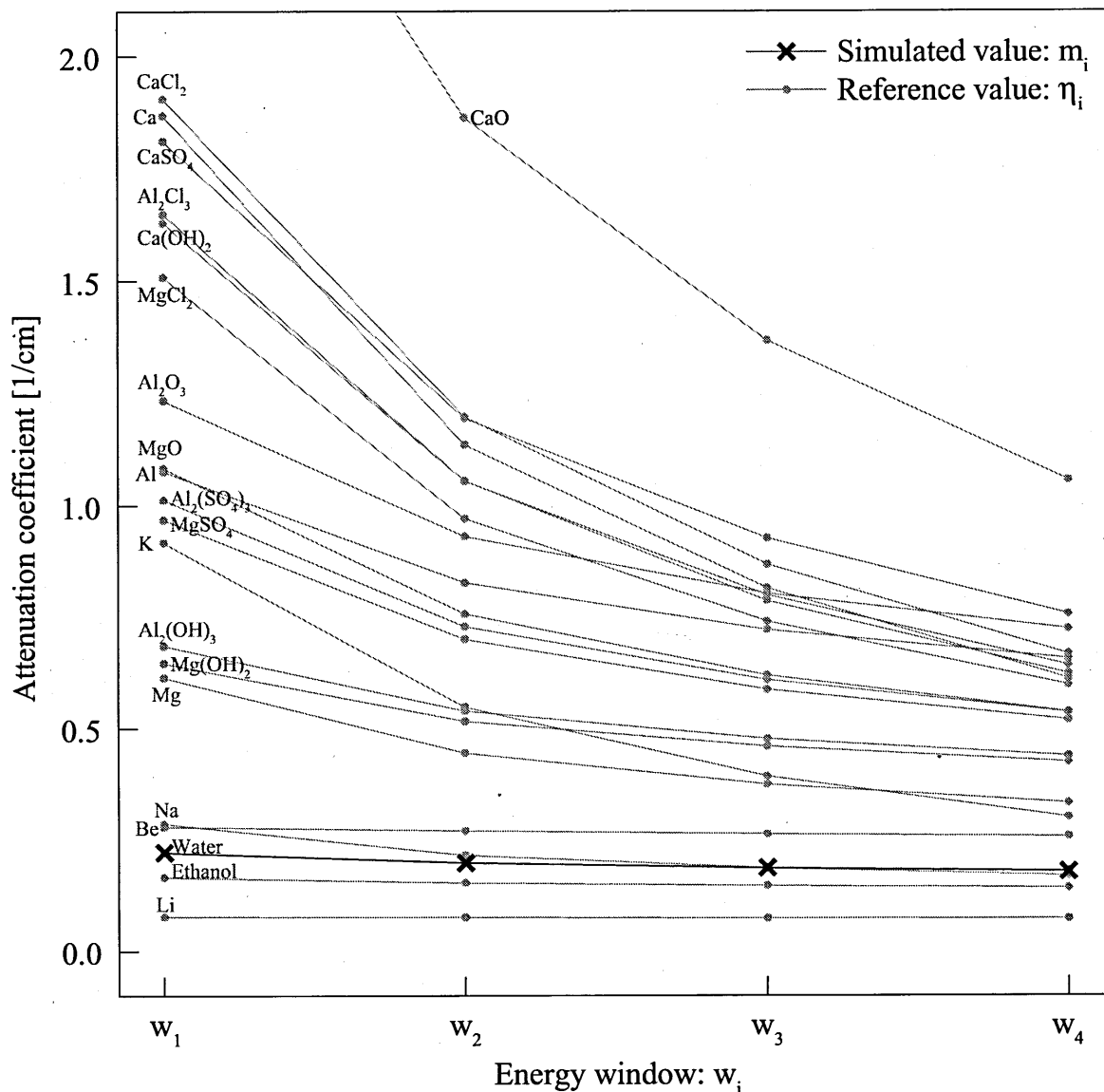


Fig. 4.16: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.6, Fig. 4.16 より, シミュレーション値は水の参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.15 より, ϵ の値は水で最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-エタノール-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.17、シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.7、シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.18 に示す。

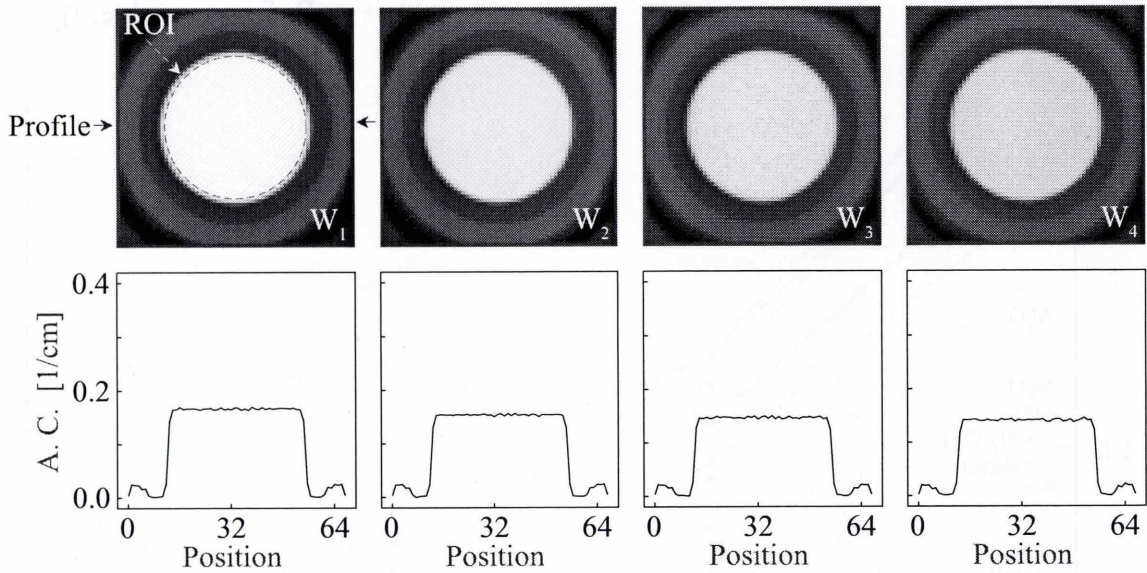


Fig. 4.17: Reconstructed images and profiles

Table 4.7: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	0.166	0.154	0.147	0.141	0.396 %
Reference value: η_i	0.166	0.154	0.147	0.142	

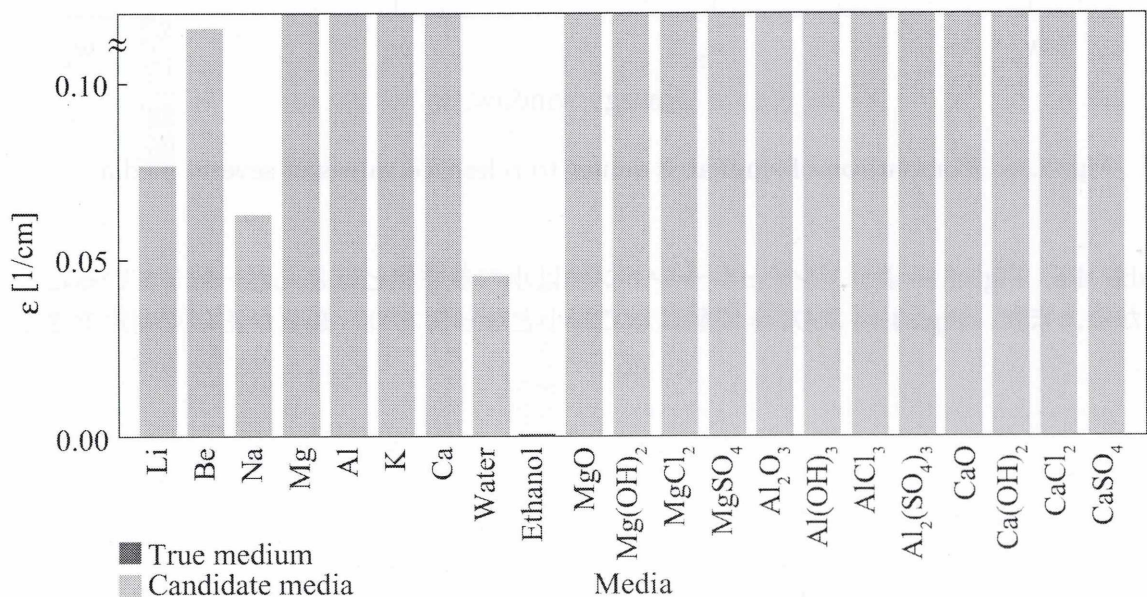


Fig. 4.18: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.19 に示す.

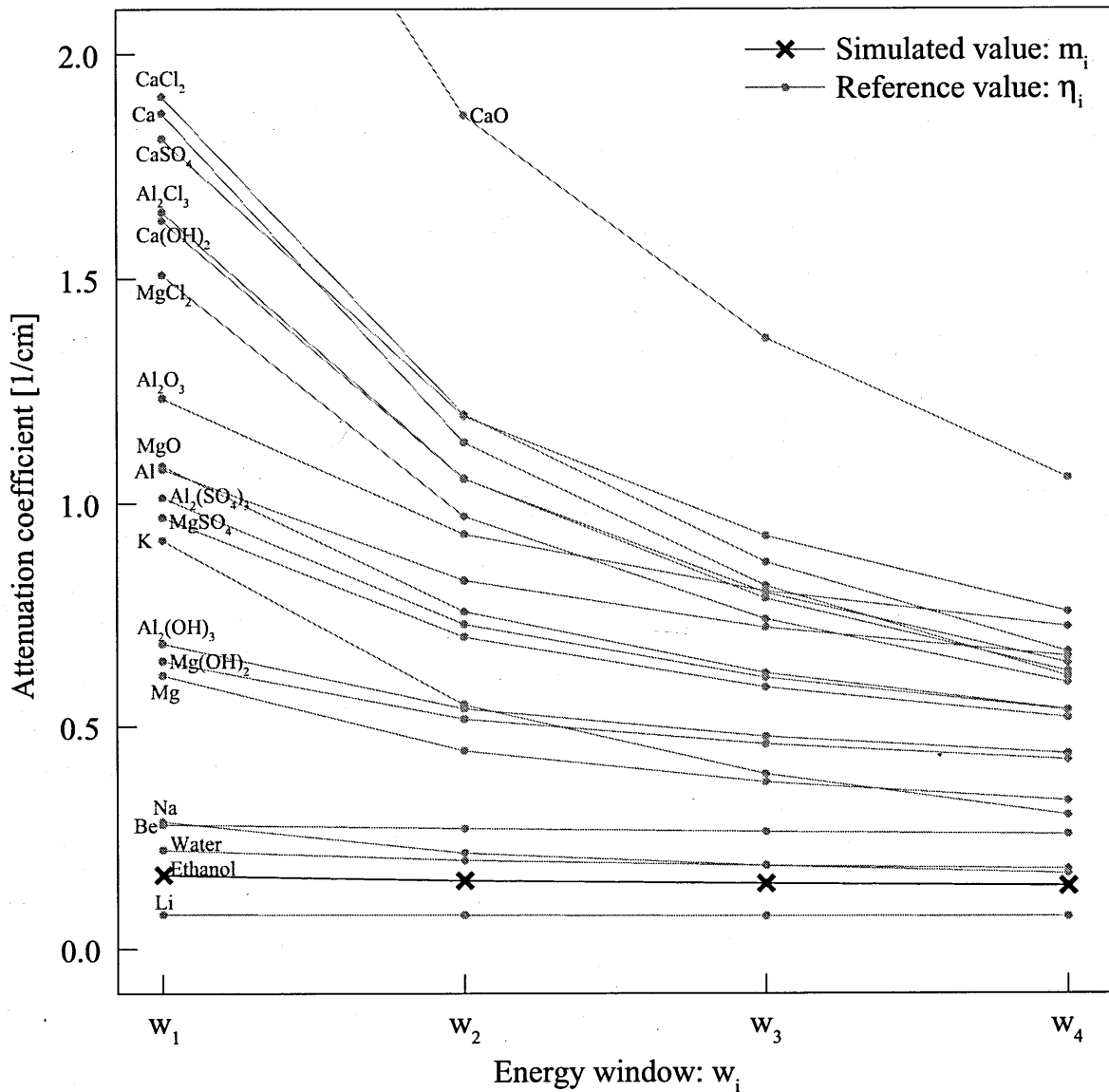


Fig. 4.19: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.7, Fig. 4.19 より, シミュレーション値はエタノールの参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.18 より, ϵ の値はエタノールで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

4.2.2 オブジェクトサイズの変化

同一の媒質で円柱オブジェクトの直径を変化させることで、オブジェクトサイズが提案手法に与える影響を調べた。媒質には今回シミュレーションを行った金属の中で最も平均的な減衰係数を持つアルミニウムを使用した。使用したオブジェクトのサイズを Fig. 4.20 に示す。オブジェクトのサイズを変化させることで使用できる ROI のサイズも変化し、参照値の計算に用いる l の値も変化する。

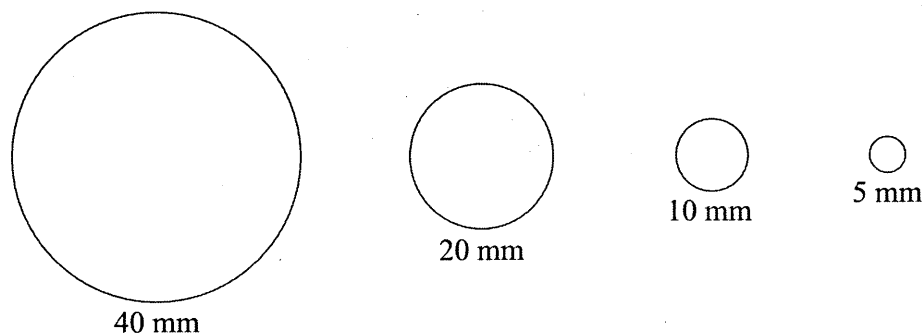


Fig. 4.20: Objects

シミュレーション結果

各オブジェクトにおけるシミュレーション値と参照値の比較を Fig. 4.21 に示す。オブジェクトサイズごとにシミュレーション値と参照値が少し変化している。しかしながら、どのサイズのオブジェクトでもシミュレーション値と参照値がほとんど一致しており、媒質を正しく同定できている。各オブジェクトに対する詳細なシミュレーション結果を以降のページに示す。

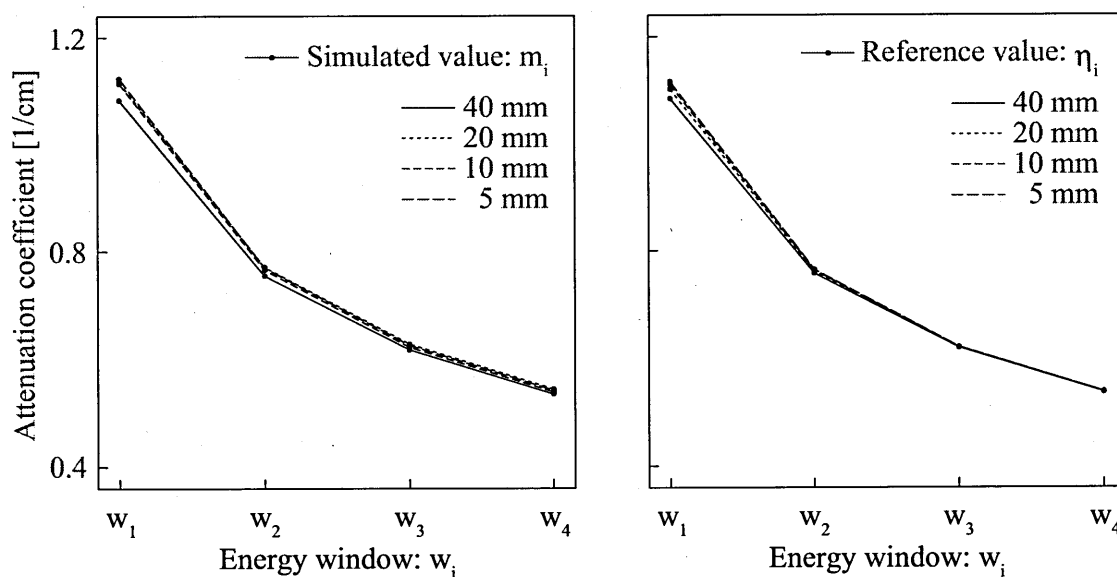


Fig. 4.21: Comparison of simulated values to reference values

結果-アルミニウム 直径 40 mm-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.22, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.8, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.23 に示す。

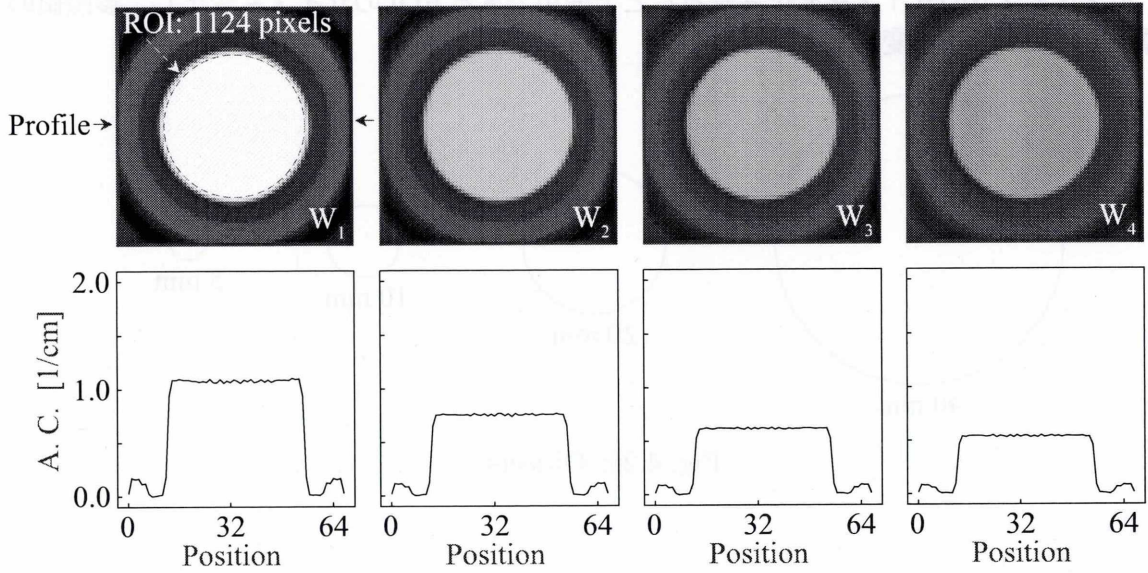


Fig. 4.22: Reconstructed images and profiles

Table 4.8: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.083	0.755	0.618	0.535	0.303 %
Reference value: η_i	1.084	0.758	0.620	0.537	

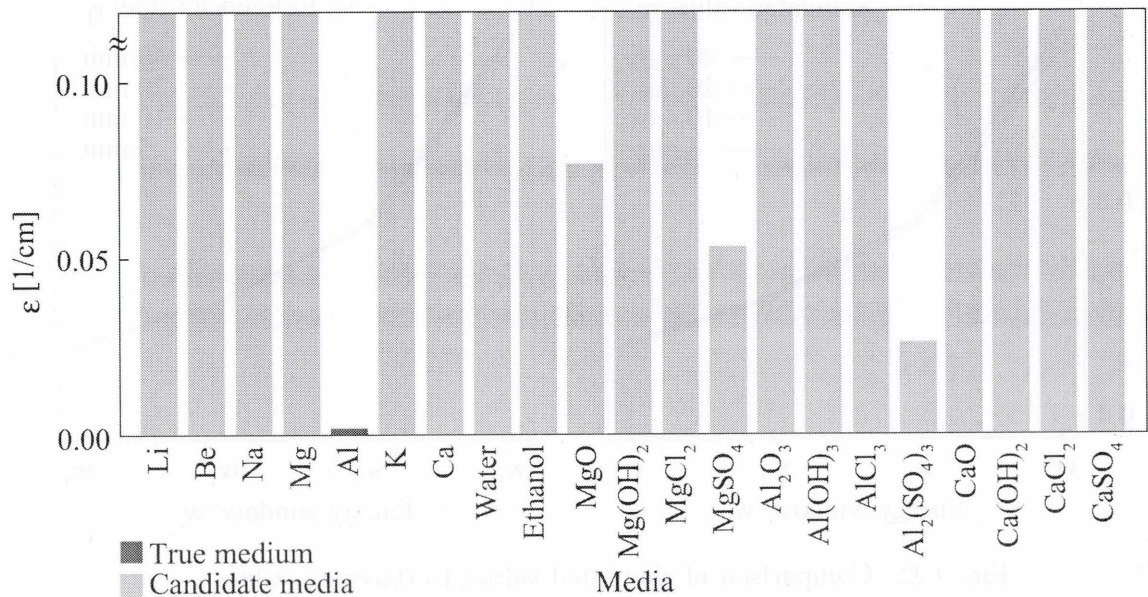


Fig. 4.23: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.24 に示す.

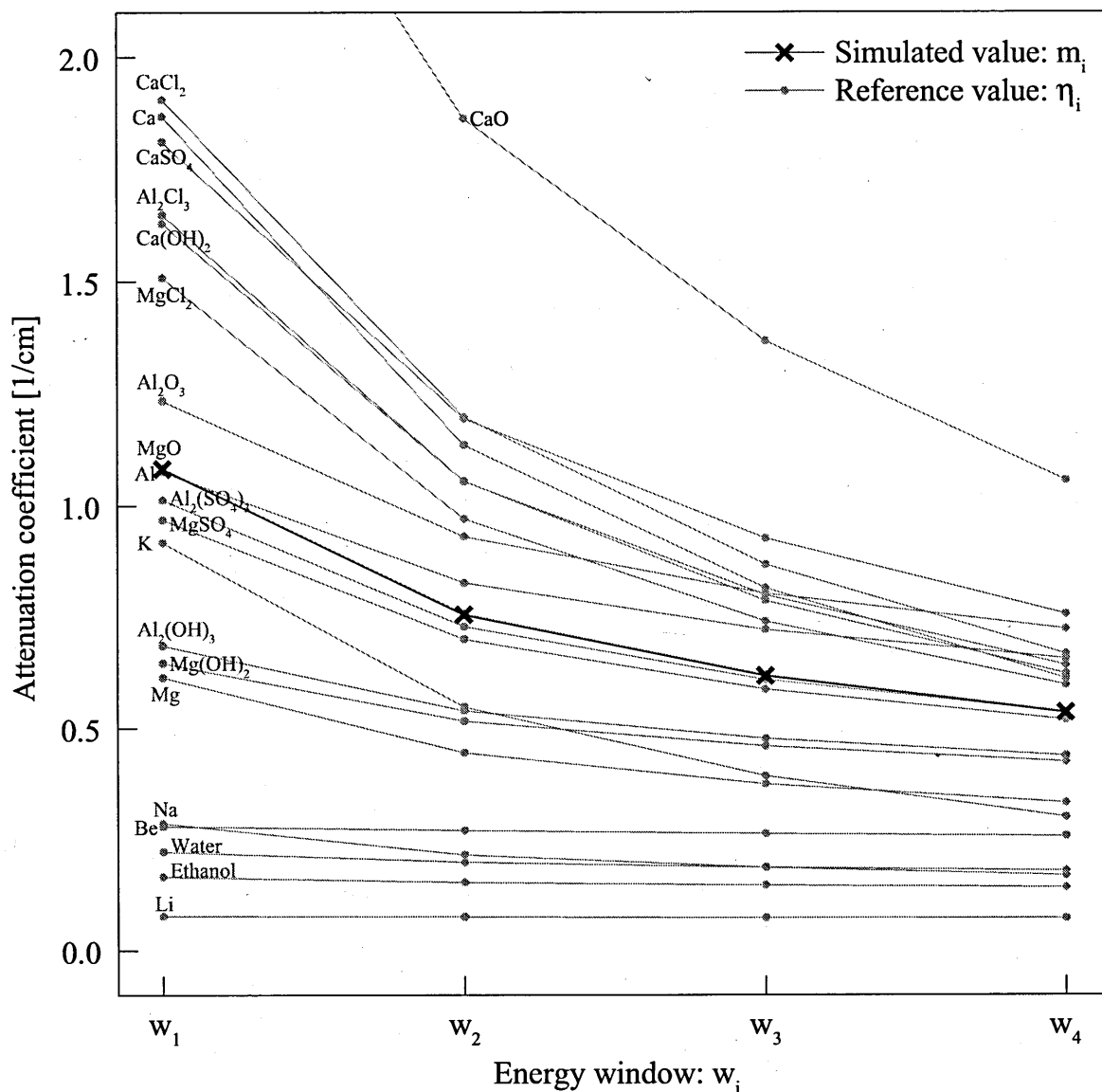


Fig. 4.24: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.8, Fig. 4.24 より, シミュレーション値はアルミニウムの参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.23 より, ϵ の値はアルミニウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-アルミニウム 直径 20 mm-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図. 4.25, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.9, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.26 に示す.

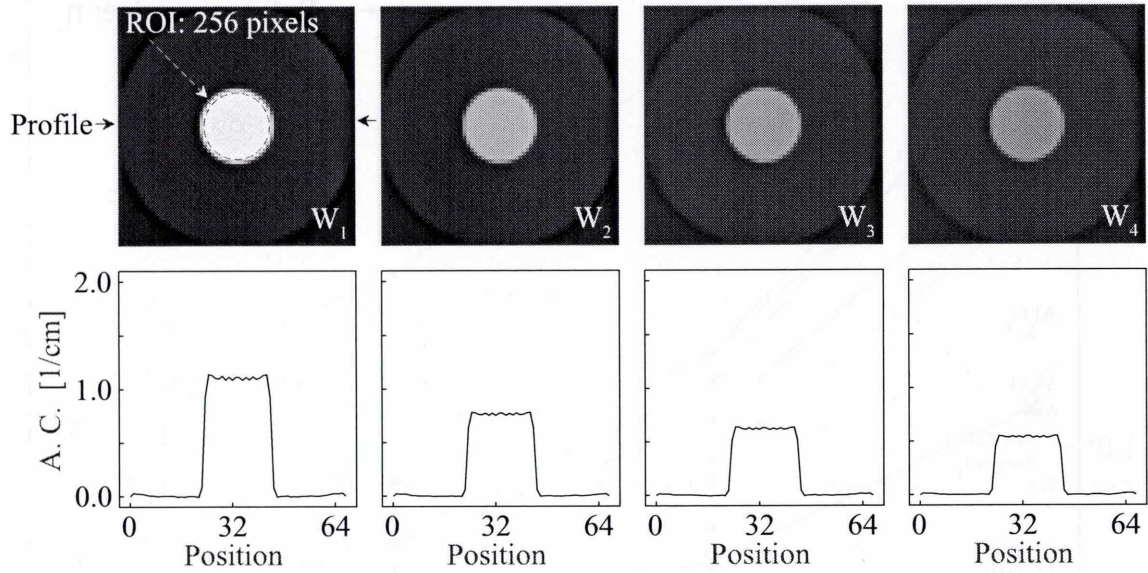


Fig. 4.25: Reconstructed images and profiles

Table 4.9: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.117	0.772	0.628	0.545	1.285 %
Reference value: η_i	1.102	0.762	0.621	0.538	

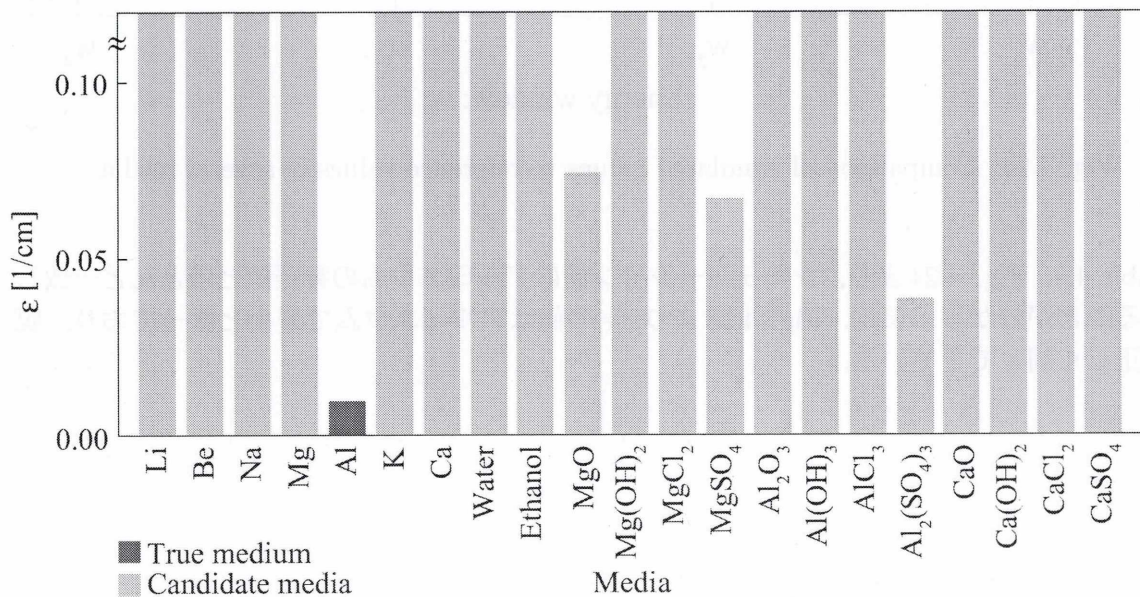


Fig. 4.26: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.27 に示す.

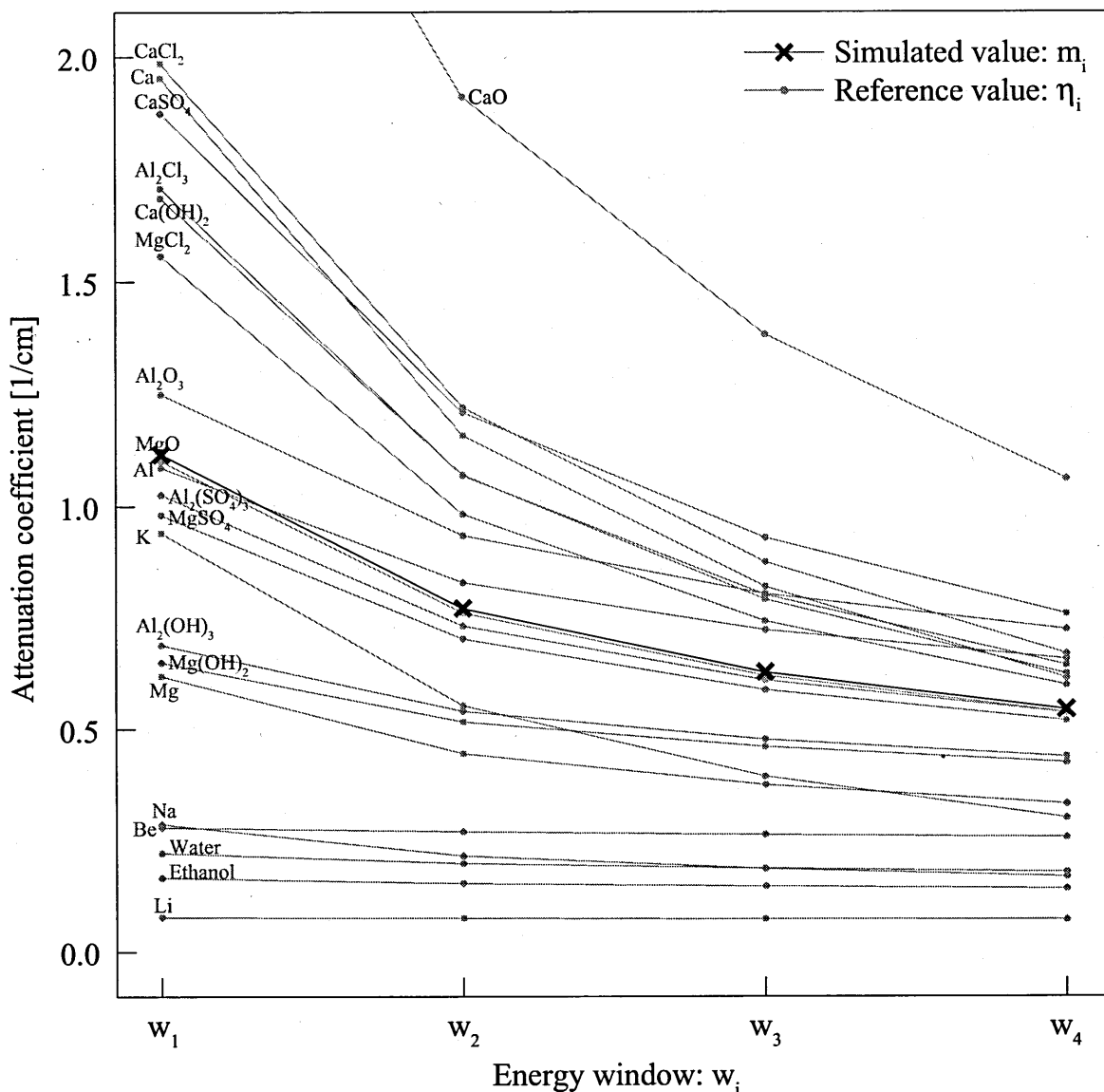


Fig. 4.27: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.9, Fig. 4.27 より, シミュレーション値はアルミニウムの参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.26 より, ϵ の値はアルミニウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-アルミニウム 直径 10 mm-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.28, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.10, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.29 に示す.

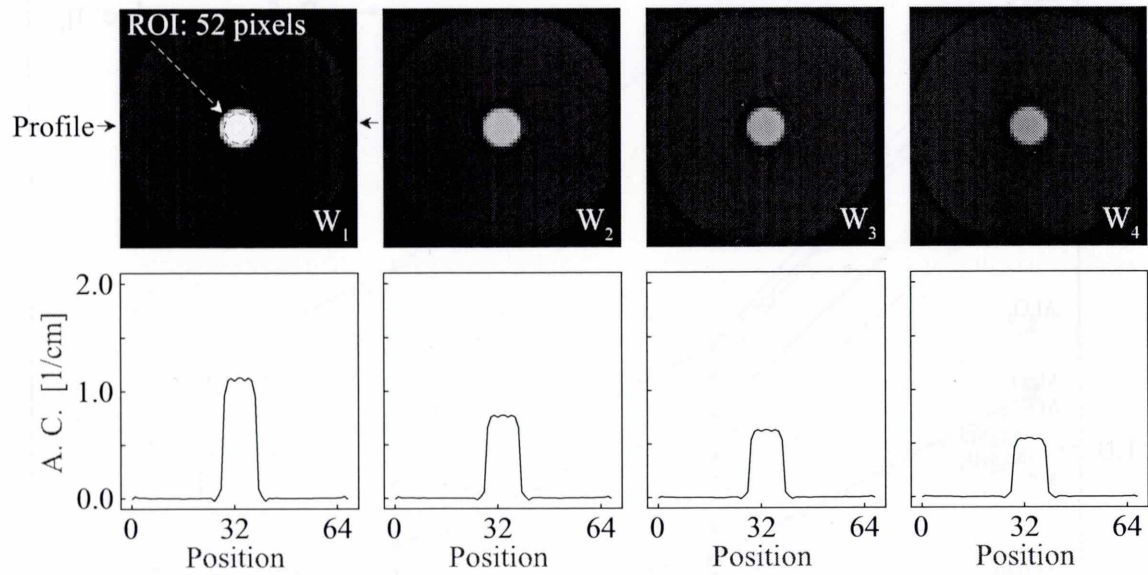


Fig. 4.28: Reconstructed images and profiles

Table 4.10: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.114	0.766	0.622	0.540	0.207 %
Reference value: η_i	1.111	0.764	0.621	0.538	

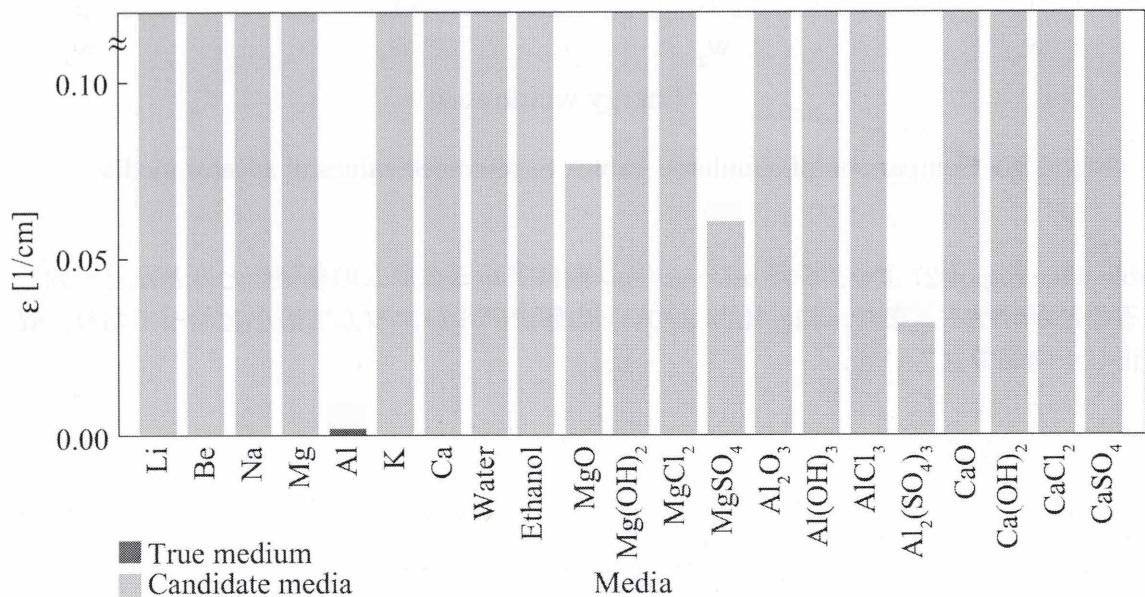


Fig. 4.29: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.30 に示す.

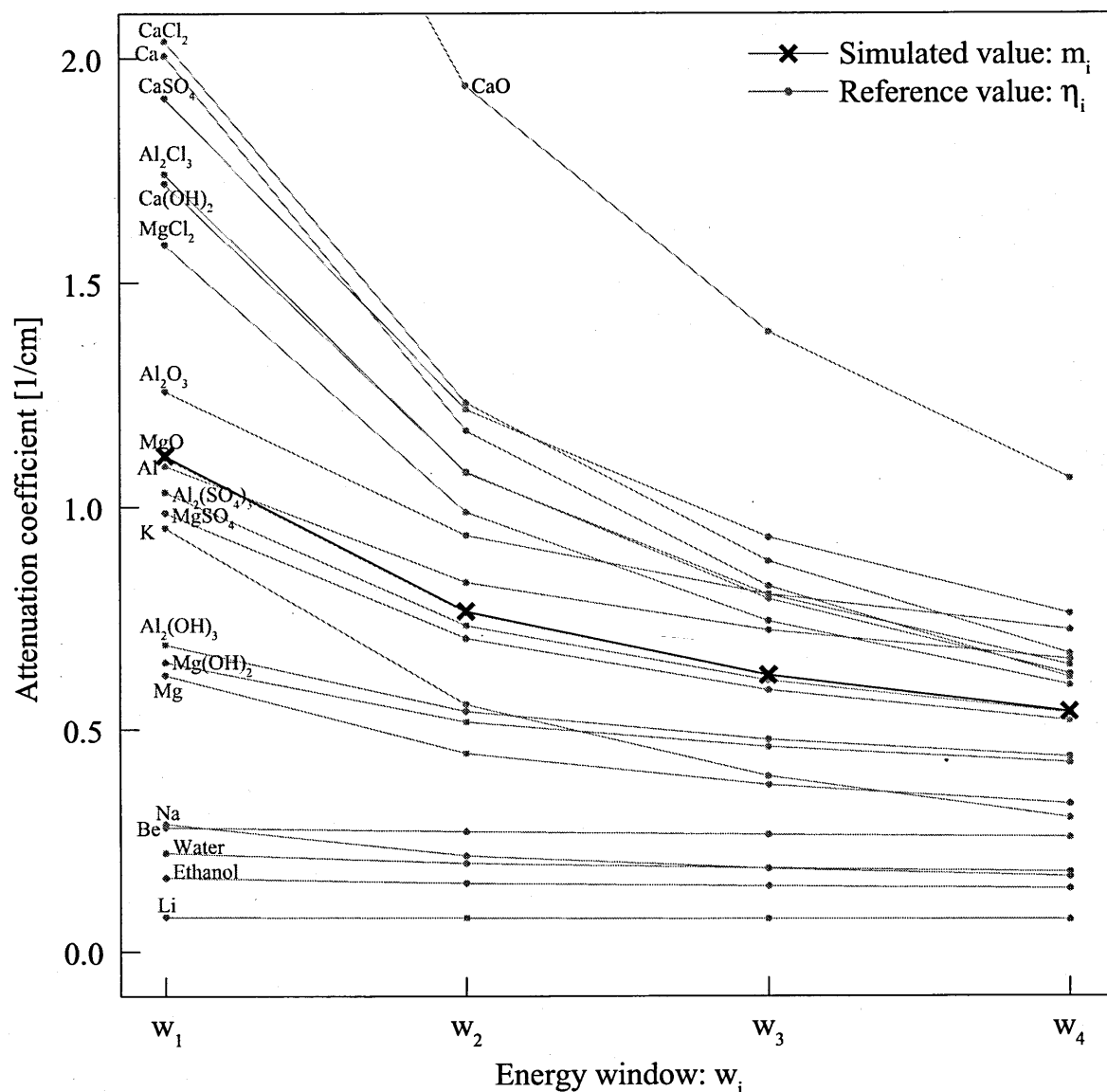


Fig. 4.30: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.10, Fig. 4.30 より, シミュレーション値はアルミニウムの参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.29 より, ϵ の値はアルミニウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-アルミニウム 直径 5 mm-

得られた再構成画像とそのプロフィールを Fig. 4.31, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.11, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.32 に示す.

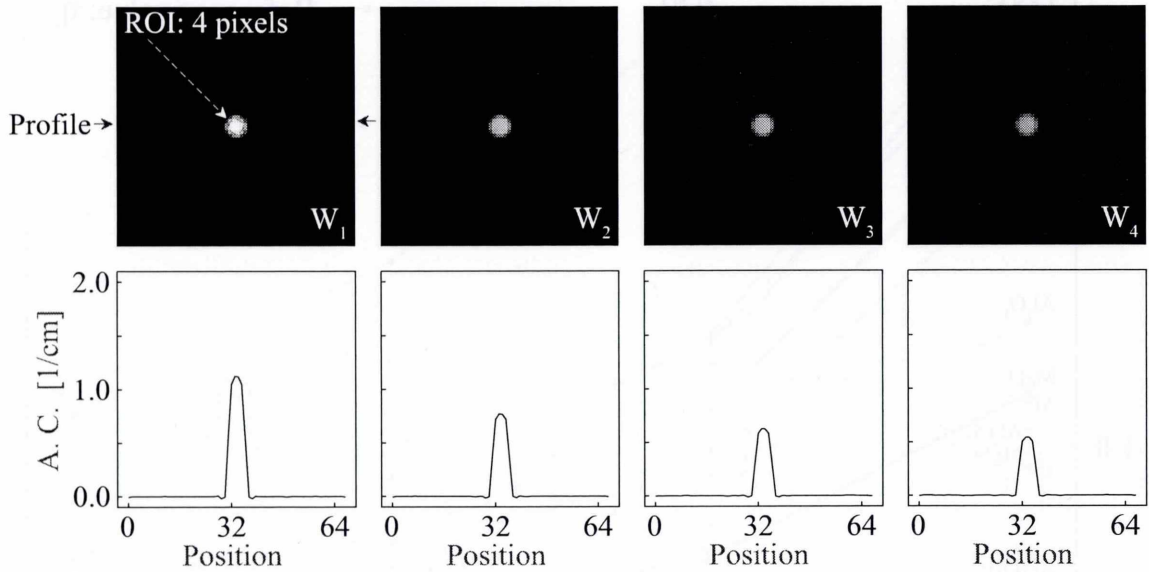


Fig. 4.31: Reconstructed images and profiles

Table 4.11: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.123	0.771	0.626	0.542	0.723 %
Reference value: η_i	1.116	0.765	0.621	0.538	

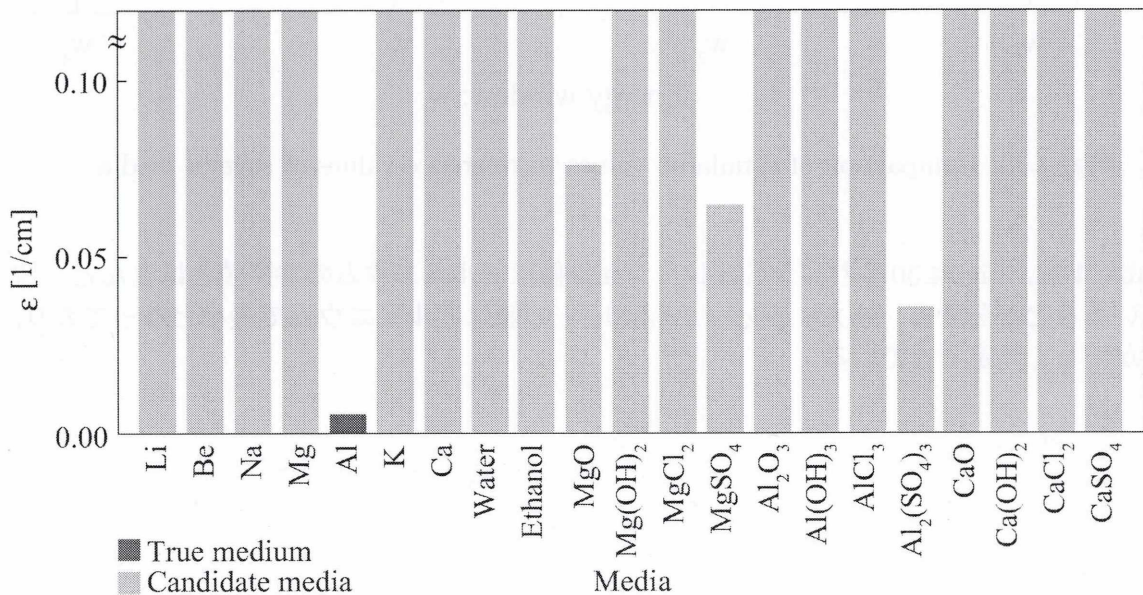


Fig. 4.32: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.33 に示す.

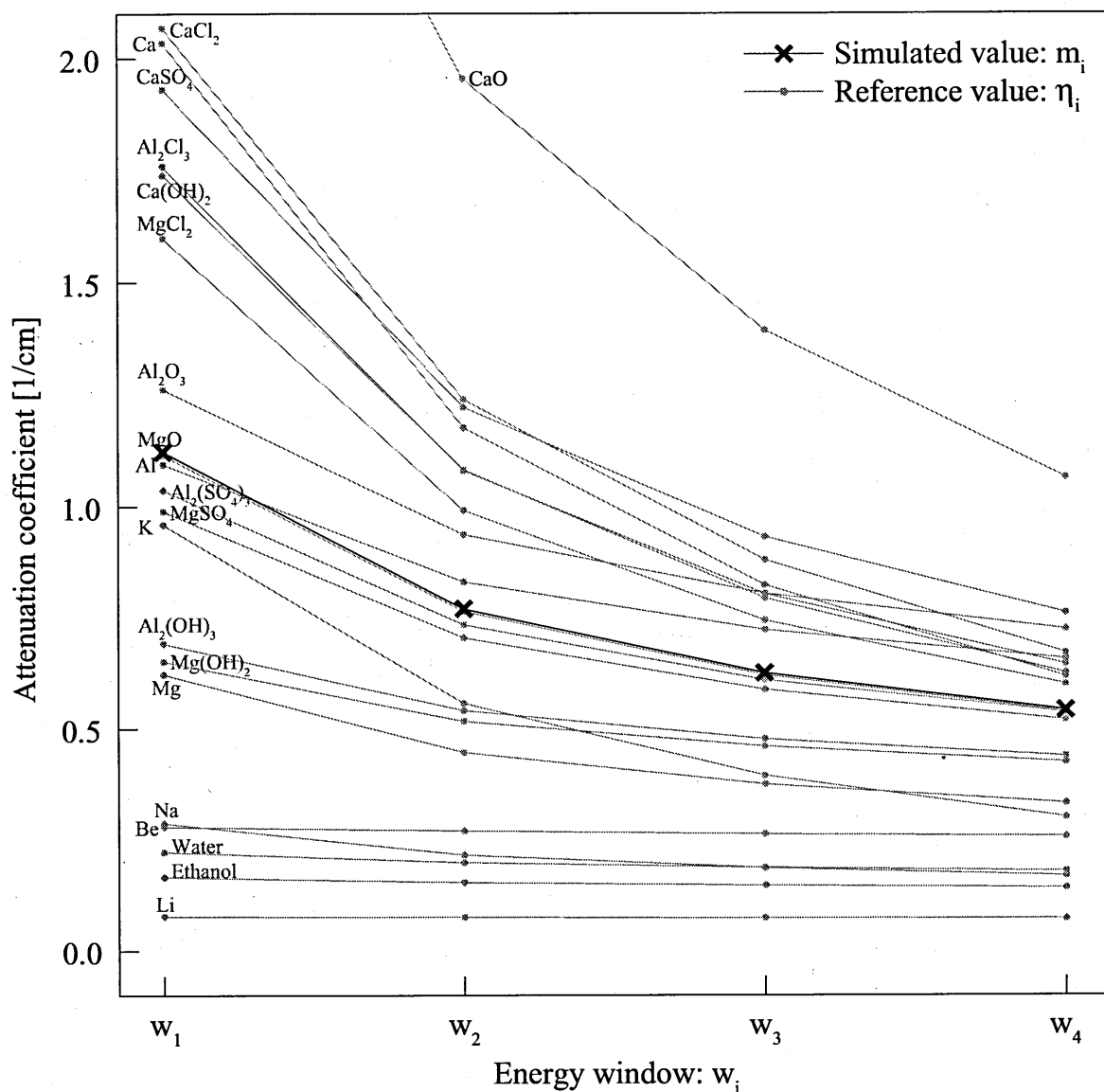


Fig. 4.33: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.11, Fig. 4.33 より, シミュレーション値はアルミニウムの参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.32 より, ϵ の値はアルミニウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

4.2.3 線量の変化

同一の媒質で照射線量を変化させることで、量子雑音が提案手法に与える影響を調べた。媒質には4.2.2と同様にアルミニウムを使用した。

シミュレーション結果

照射光子数に対する再構成画像の関心領域内の標準偏差とシミュレーション値の参照値に対する誤差率を Fig. 4.34 に、各照射線量のシミュレーション値と参照値の比較を Fig. 4.21 に示す。照射光子数1,000個の測定においてわずかに差が出たものの、各エネルギーウィンドウにおけるシミュレーション値の参照値に対する誤差率の平均は1.0%以下に収まっており、全ての条件で媒質を正しく同定できた。各照射線量に対する詳細なシミュレーション結果を以降のページに示す。

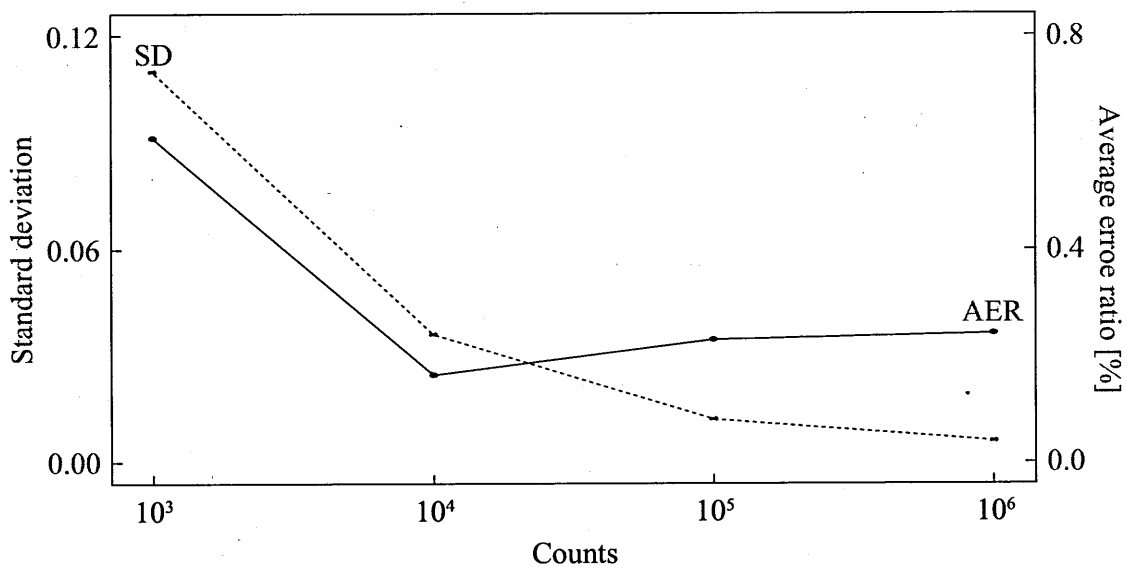


Fig. 4.34: Standard deviation and average error ratio

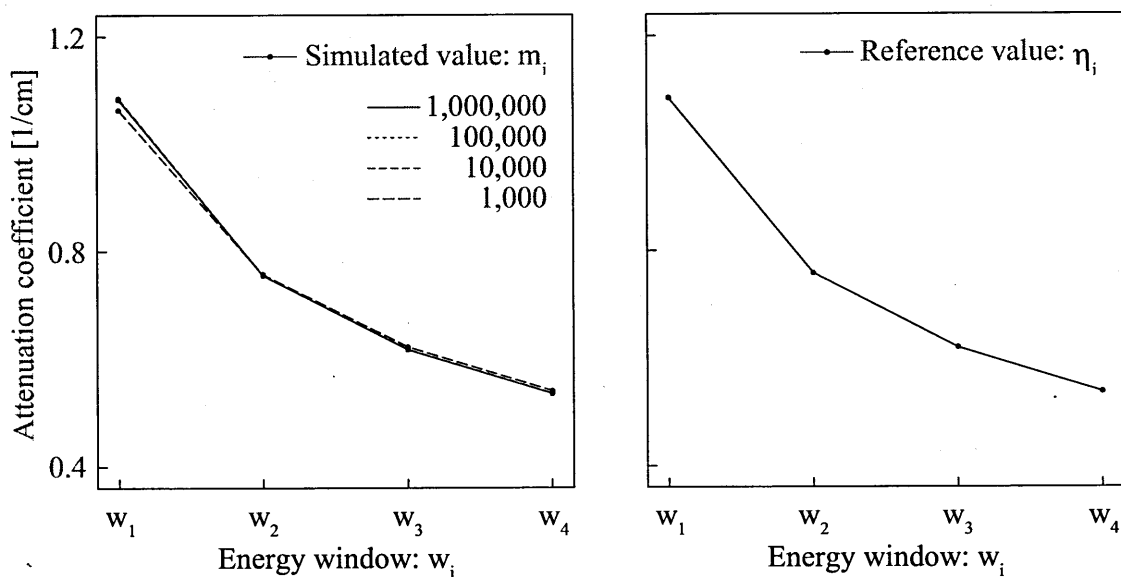


Fig. 4.35: Comparison of simulated values to reference values

結果-アルミニウム 照射光子数 1,000,000/pixel-

得られた再構成画像とそのプロファイルを Fig. 4.36, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.12, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.37 に示す.

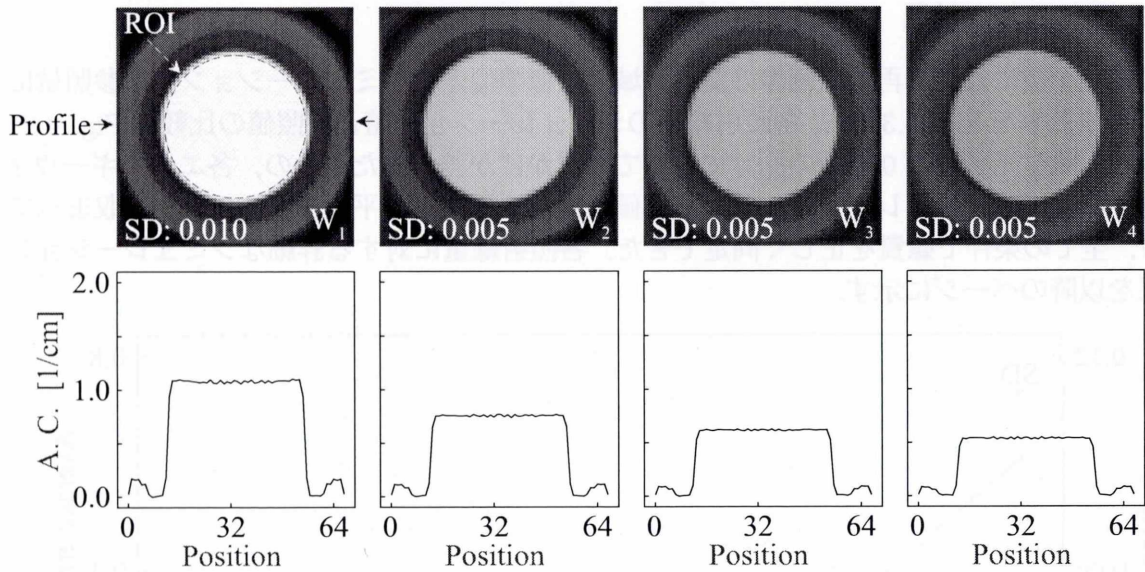


Fig. 4.36: Reconstructed images and profiles

Table 4.12: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.083	0.755	0.618	0.535	0.303 %
Reference value: η_i	1.084	0.758	0.620	0.537	

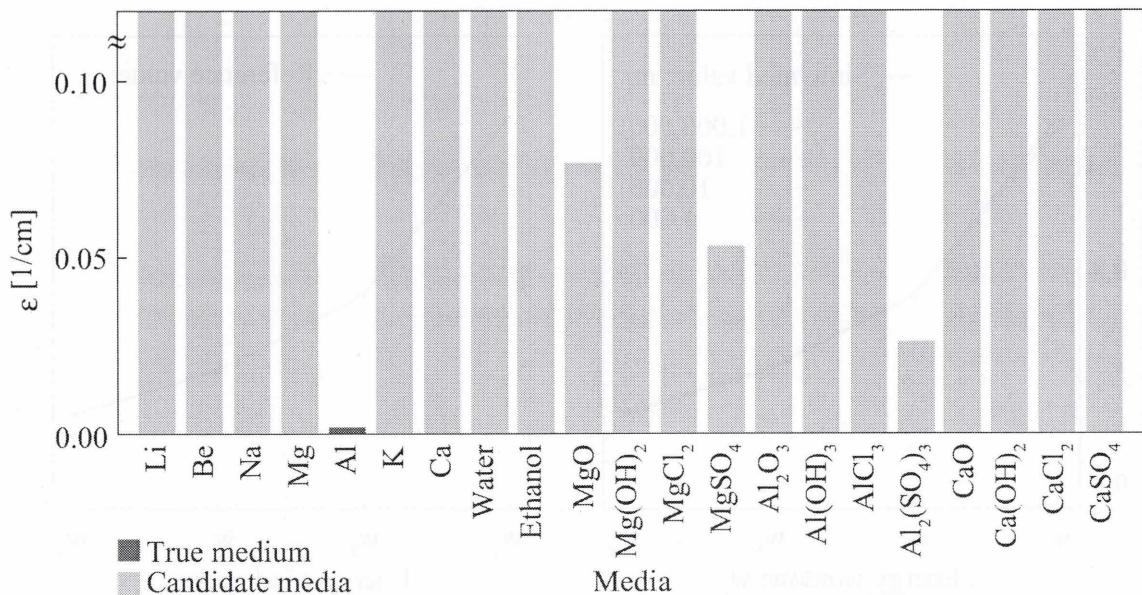


Fig. 4.37: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.38 に示す.

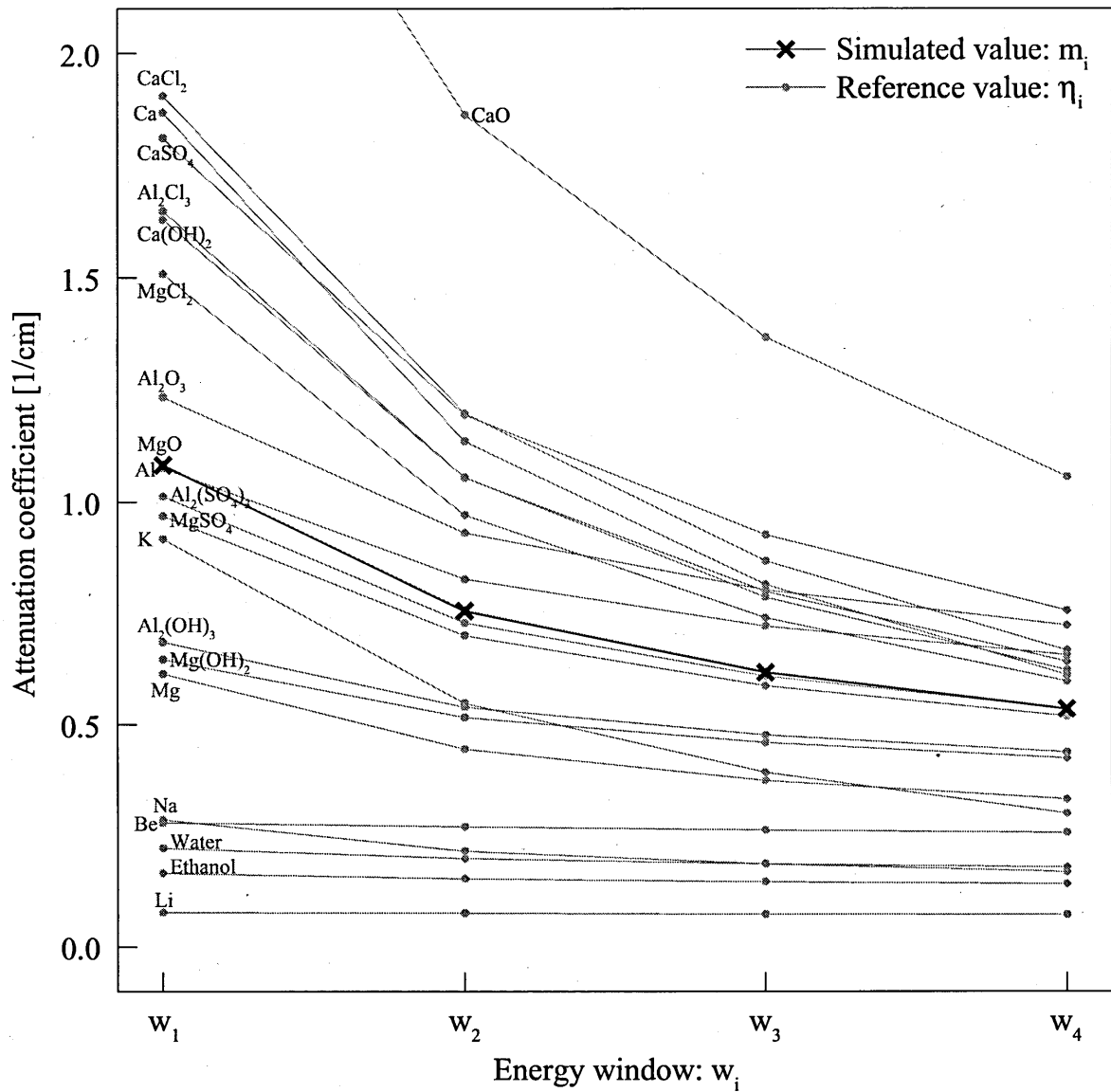


Fig. 4.38: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.12, Fig. 4.38 より, シミュレーション値はアルミニウムの参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.37 より, ϵ の値はアルミニウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-アルミニウム 照射光子数 100,000/pixel-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図. 4.39, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.13, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.40 に示す。

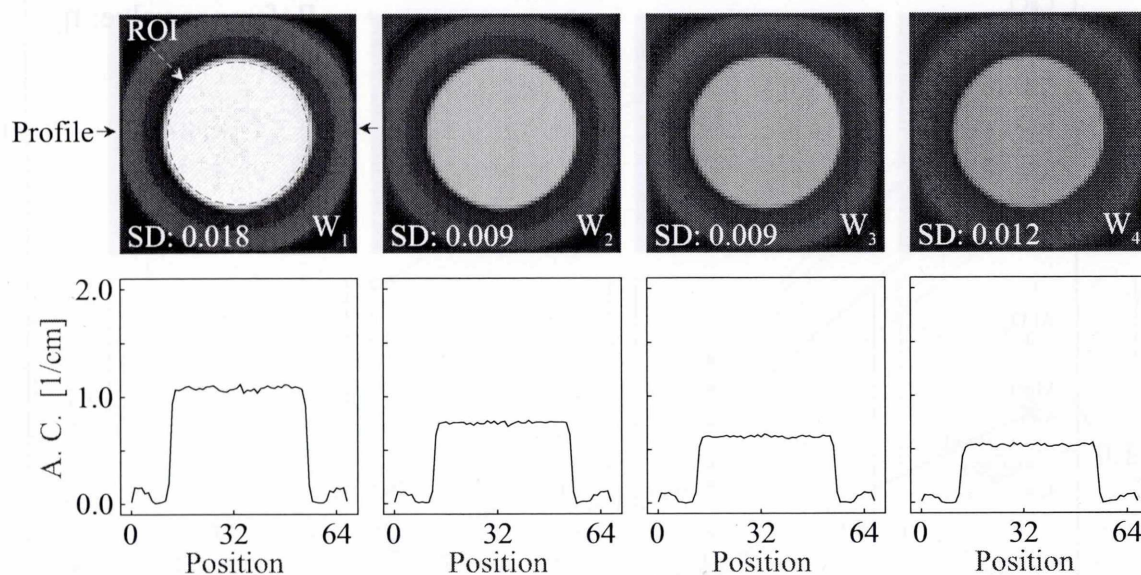


Fig. 4.39: Reconstructed images and profiles

Table 4.13: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.083	0.756	0.618	0.535	0.288 %
Reference value: η_i	1.084	0.758	0.620	0.537	

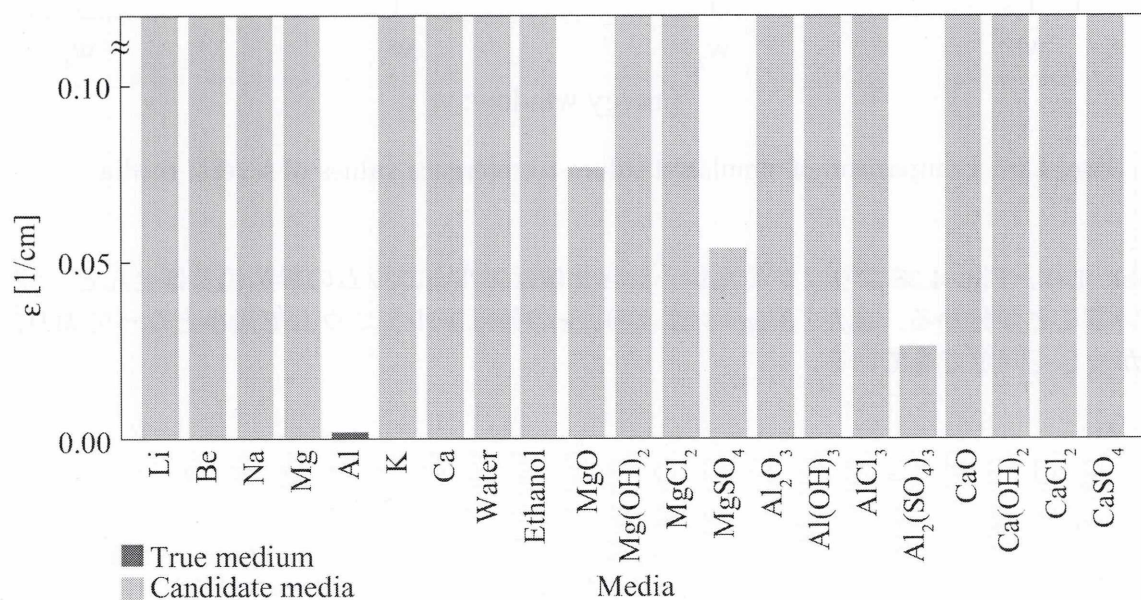


Fig. 4.40: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.41 に示す。

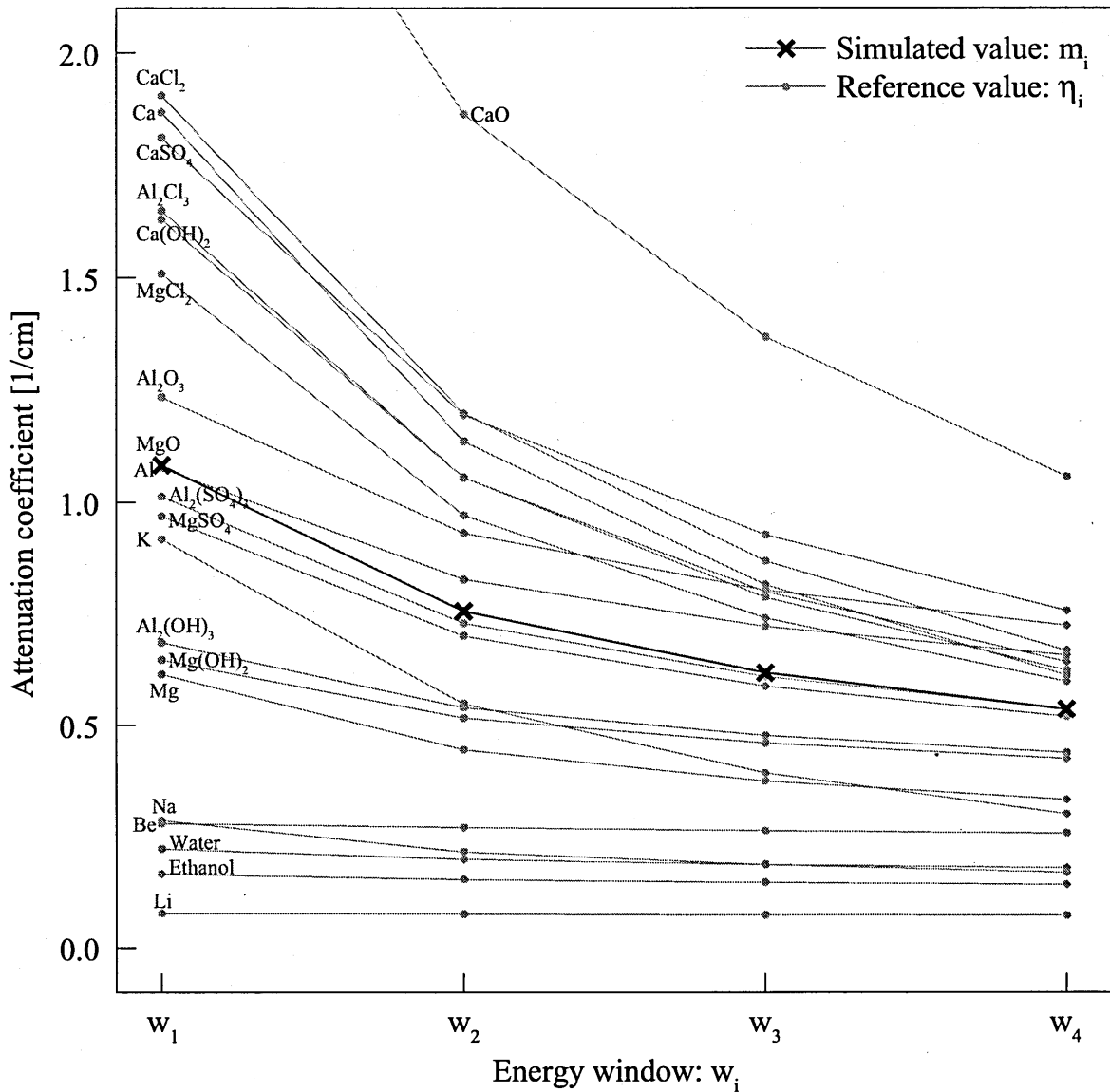


Fig. 4.41: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.13, Fig. 4.41 より, シミュレーション値はアルミニウムの参照値とほとんど一致していることが分かる。また, Fig. 4.40 より, ϵ の値はアルミニウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている。

結果-アルミニウム 照射光子数 10,000/pixel-

得られた再構成画像とそのプロフィールを Fig. 4.42, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.14, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.43 に示す.

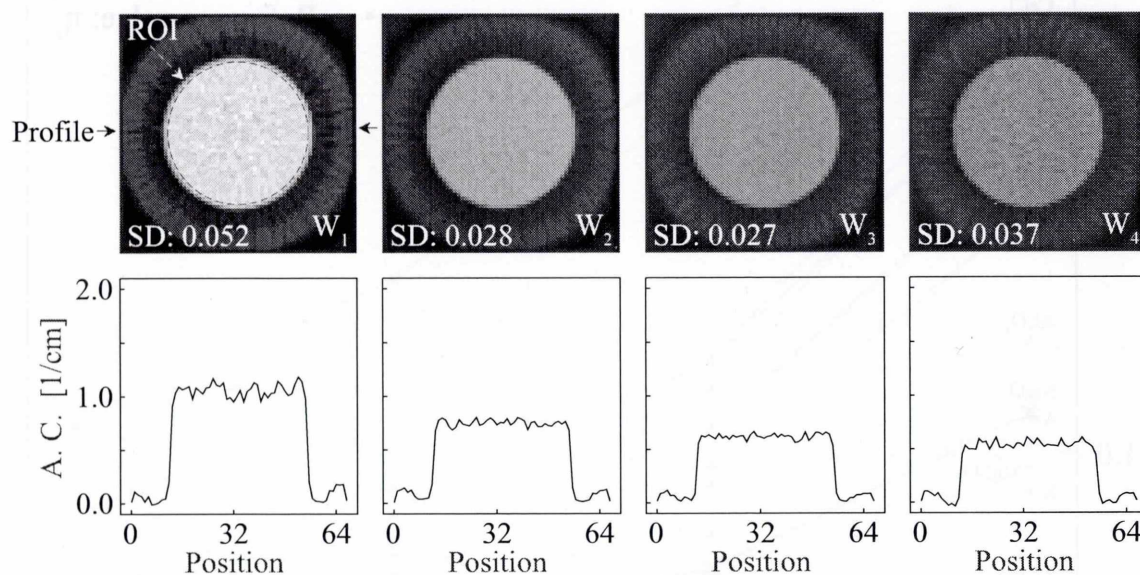


Fig. 4.42: Reconstructed images and profiles

Table 4.14: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.084	0.756	0.618	0.536	0.206 %
Reference value: η_i	1.084	0.758	0.620	0.537	

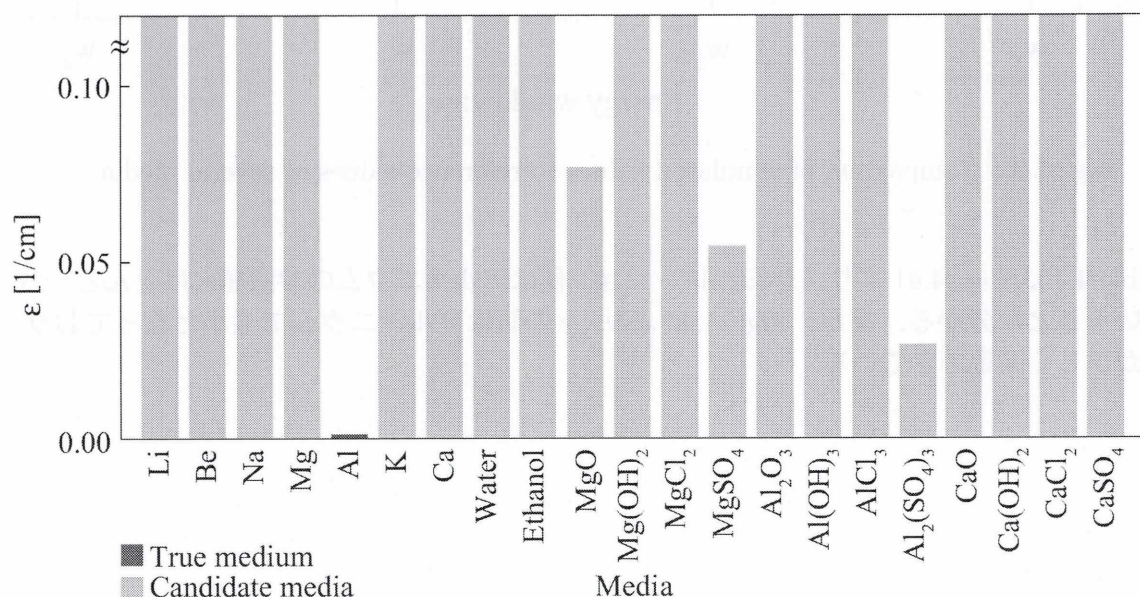


Fig. 4.43: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.44 に示す。

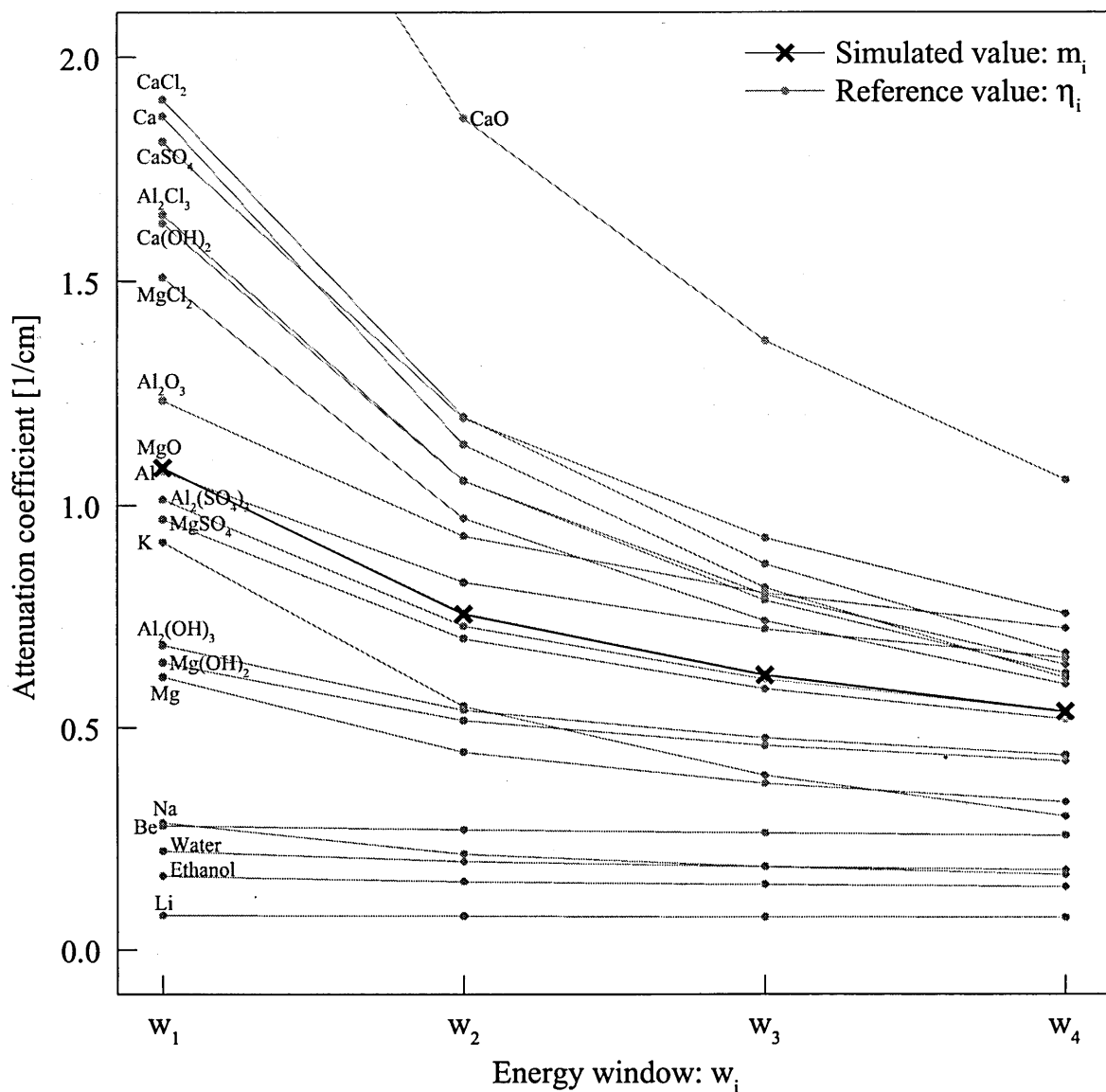


Fig. 4.44: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.14, Fig. 4.44 より, シミュレーション値はアルミニウムの参照値とほとんど一致していることが分かる。また, Fig. 4.43 より, ϵ の値はアルミニウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている。

結果-アルミニウム 照射光子数 1,000/pixel-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.45, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.15, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.46 に示す。

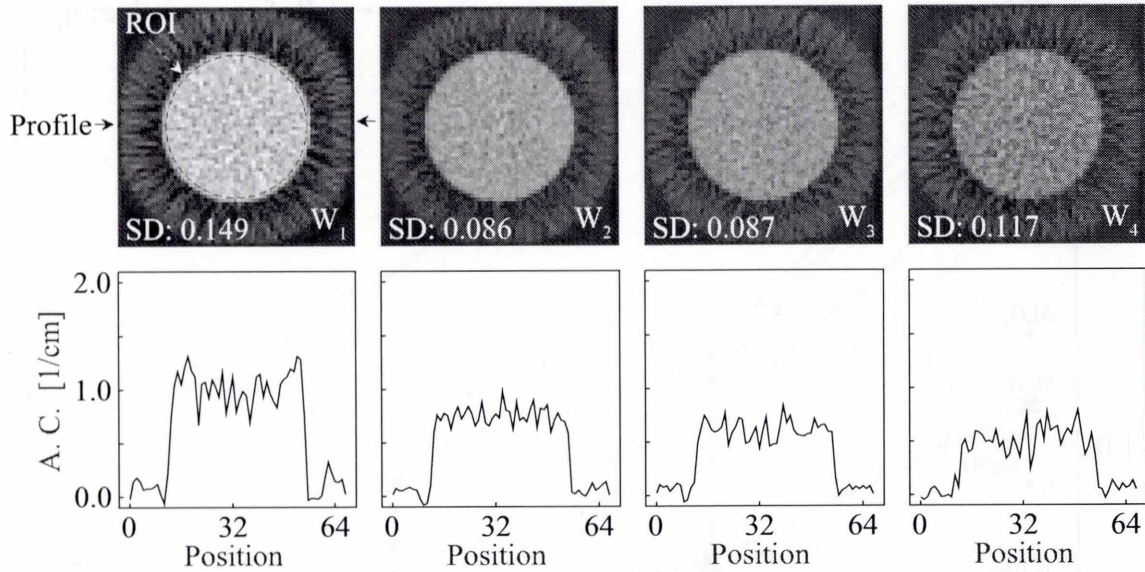


Fig. 4.45: Reconstructed images and profiles

Table 4.15: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	1.063	0.758	0.623	0.541	0.762 %
Reference value: η_i	1.084	0.758	0.620	0.537	

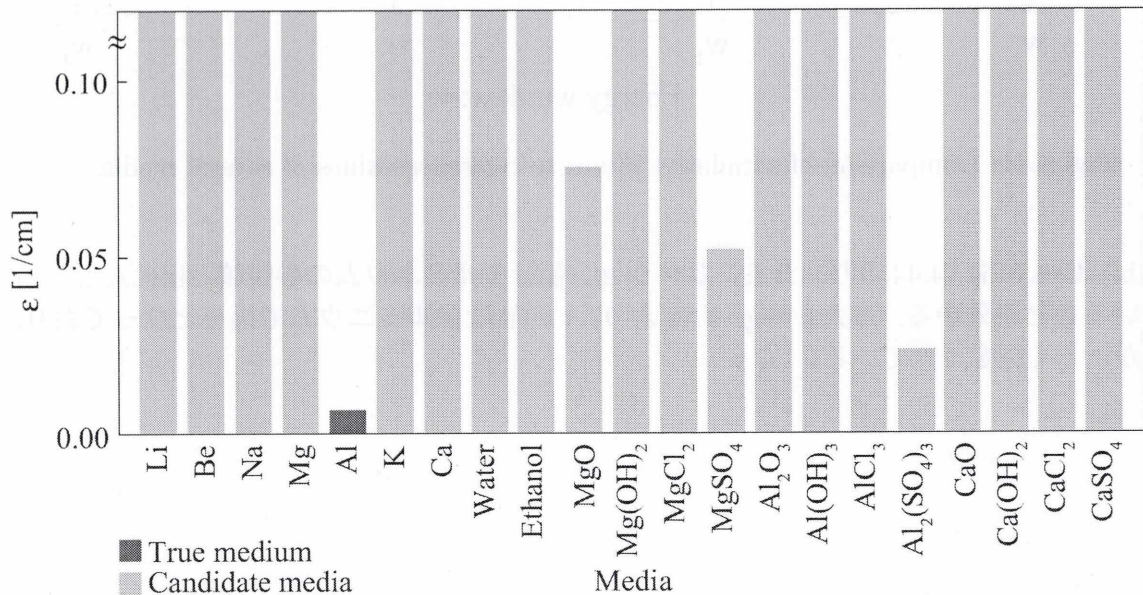


Fig. 4.46: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.47 に示す.

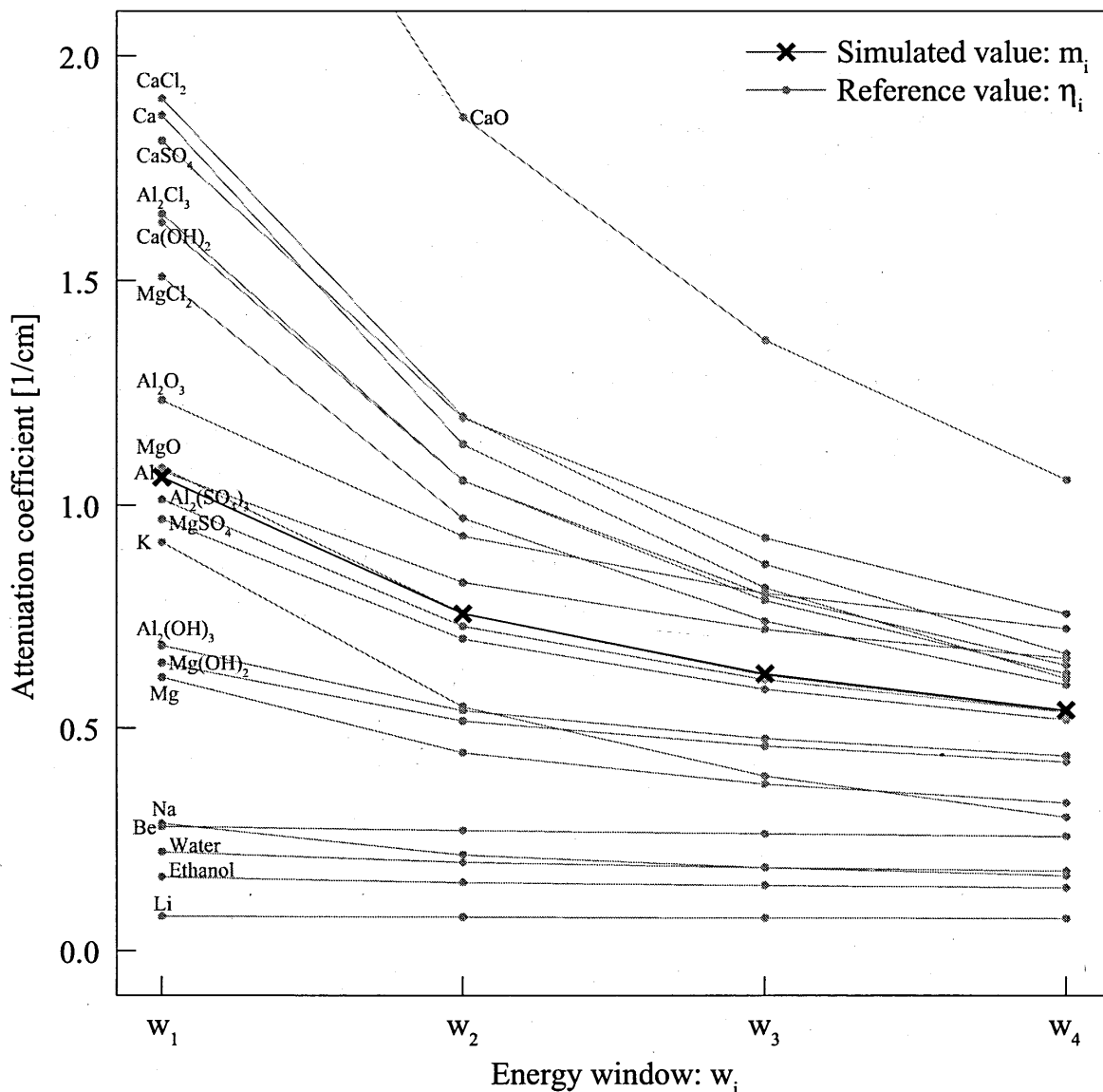


Fig. 4.47: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.15, Fig. 4.47 より, シミュレーション値はアルミニウムの参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.46 より, ϵ の値はアルミニウムで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

4.2.4 混合物

濃度の異なるいくつかのエタノール水溶液に対し、混合比ごとに参照値を計算する方法と要素の参照値から連立方程式を解く法を利用してエタノールの濃度を求め、二つの方法を比較した。オブジェクトの媒質には質量パーセント濃度 5 %、50 %、95 % のエタノール水溶液使用し、混合比ごとに参照値を計算する方法ではエタノール水溶液の参照値を濃度 0~100 % まで 5 % 置きに計算した。また、連立方程式にはエネルギーウィンドウごとに得られる

$$\eta_i^{water} \cdot \alpha + \eta_i^{ethanol} \cdot \beta = m_i$$

と、混合比の合計から得られる

$$\alpha + \beta = 100\%$$

の式を用いた。

シミュレーション結果

二つの手法による、シミュレーション値の正しい参照値に対する誤差率を Fig. 4.48 に示す。ここで、混合比ごとに参照値を計算する方法では、5 % 間隔の濃度で参照値を計算しているため、正しい濃度を同定できていても、誤差は 2.5 % とした。混合比ごとに参照値を計算する方法では、全てのオブジェクトに対し高い精度で濃度を求めることができた。二つの手法の各オブジェクトに対する詳細なシミュレーション結果を以降のページに示す。

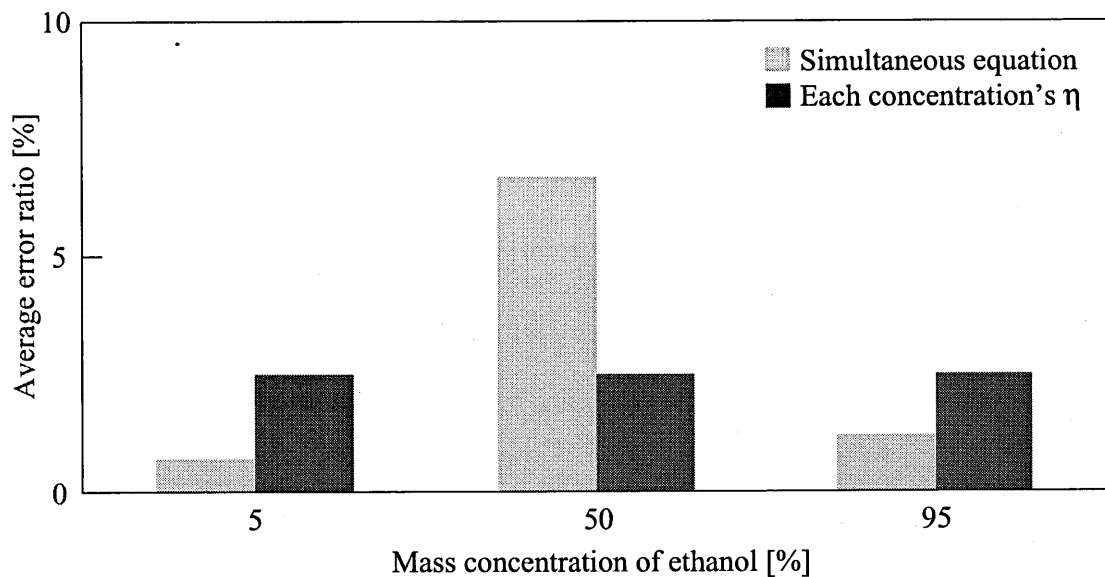


Fig. 4.48: Comparison of error ratios using two methods

結果-連立方程式による同定 エタノール5 %-

水の混合比を $\alpha\%$ エタノールの混合比を $\beta\%$ とし、水とエタノールの参照値とシミュレーション値から立てた連立方程式を Eq. 4.1 に示す。また、この連立方程式を解いて求めた媒質の混合比を Table 4.16 に示す。

Table 4.16: Simulated mass concentrations

Eq.	$\alpha\%$	$\beta\%$
(1), (5)	94.3	5.7
(2), (5)	94.2	5.8
(3), (5)	94.1	5.9
(4), (5)	94.7	5.3
Average	94.3	5.7

結果-連立方程式による同定 エタノール50 %-

水の混合比を $\alpha\%$ エタノールの混合比を $\beta\%$ とし、水とエタノールの参照値とシミュレーション値から立てた連立方程式を Eq. 4.2 に示す。また、この連立方程式を解いて求めた媒質の混合比を Table 4.17 に示す。

Table 4.17: Simulated mass concentrations

Eq.	$\alpha\%$	$\beta\%$
(1), (5)	55.2	44.6
(2), (5)	56.9	43.1
(3), (5)	57.7	42.3
(4), (5)	57.2	42.8
Average	56.8	43.3

結果-連立方程式による同定 エタノール95 %-

水の混合比を $\alpha\%$ エタノールの混合比を $\beta\%$ とし、水とエタノールの参照値とシミュレーション値から立てた連立方程式を Eq. 4.3 に示す。また、この連立方程式を解いて求めた媒質の混合比を Table 4.18 に示す。

Table 4.18: Simulated mass concentrations

Eq.	$\alpha\%$	$\beta\%$
(1), (5)	6.4	93.6
(2), (5)	6.1	93.9
(3), (5)	6.3	93.7
(4), (5)	6.2	93.8
Average	6.3	93.8

結果-混合比ごとの参照値計算 エタノール5 %-

得られた再構成画像とそのプロフィールを Fig. 4.49, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.19, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.50 に示す.

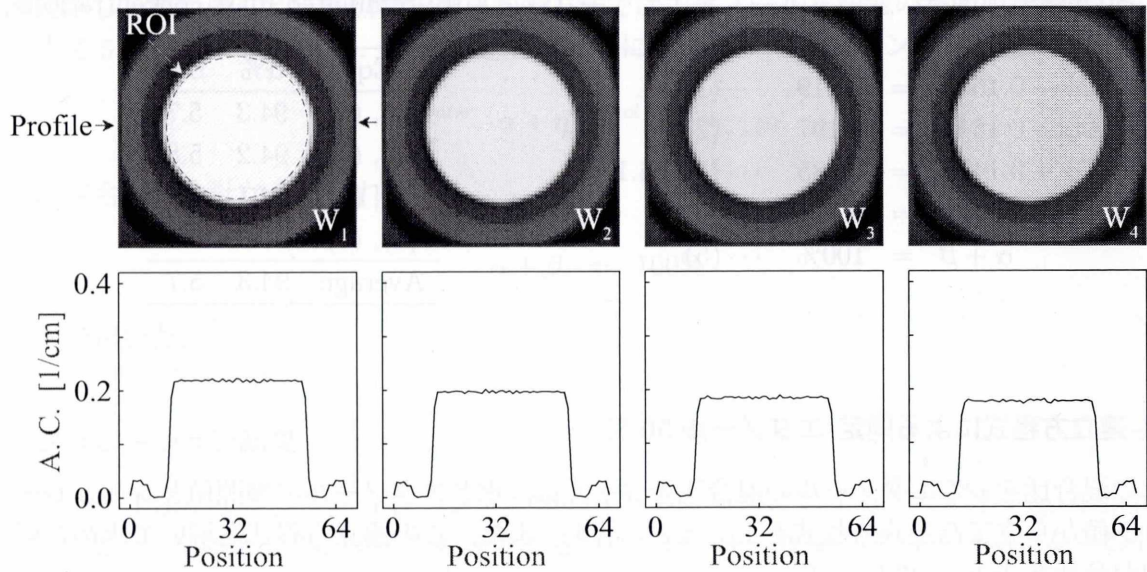


Fig. 4.49: Reconstructed images and profiles

Table 4.19: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	0.219	0.197	0.185	0.177	0.223 %
Reference value: η_i	0.220	0.197	0.186	0.178	

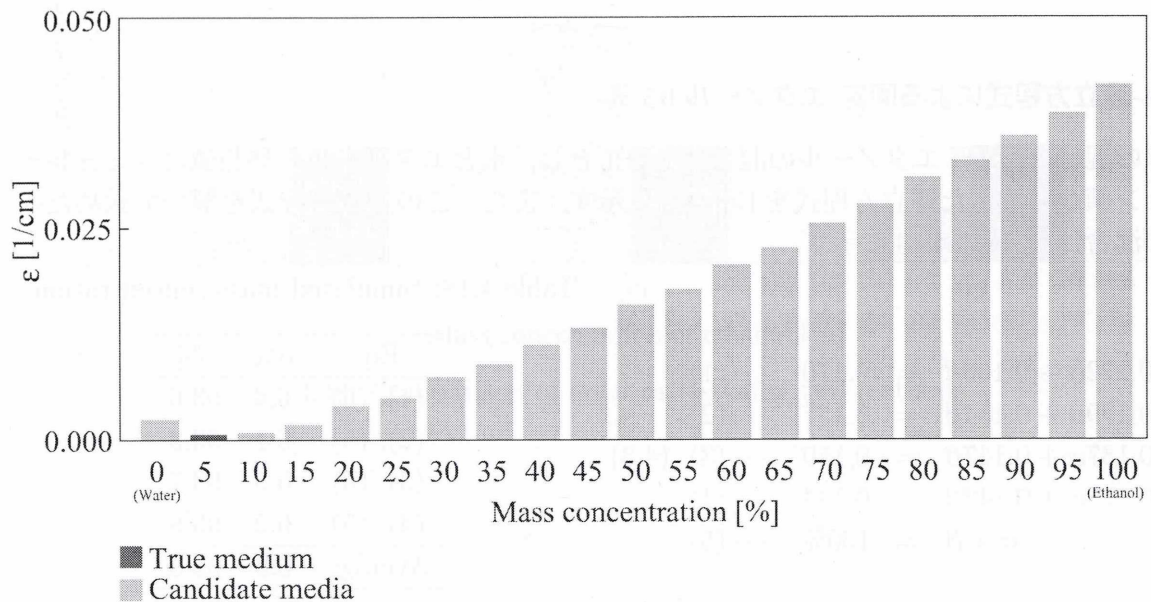


Fig. 4.50: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.51 に示す.

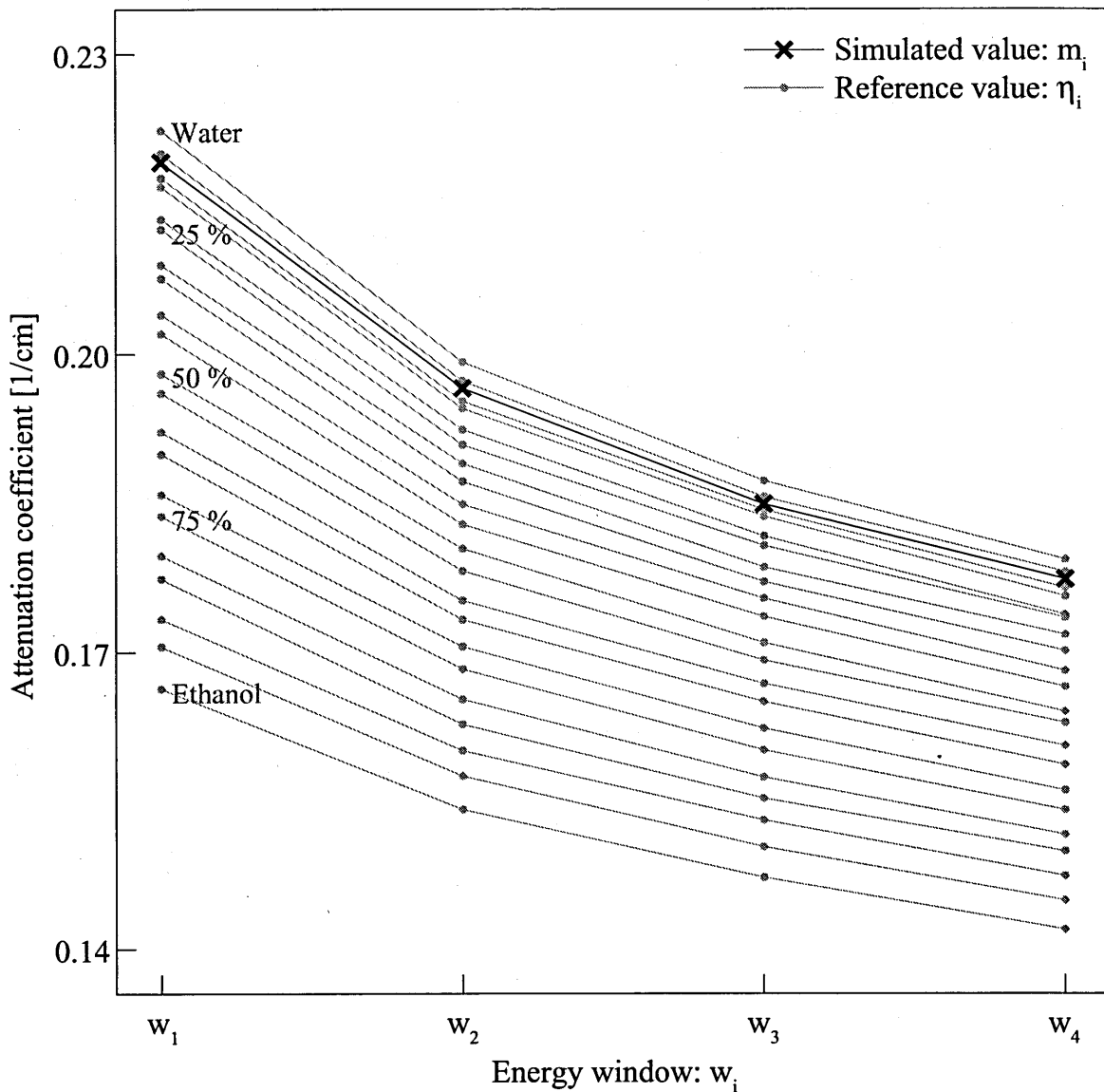


Fig. 4.51: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.19, Fig. 4.51 より, シミュレーション値は5%エタノール水溶液の参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.50 より, ϵ の値は5%エタノール水溶液で最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-混合比ごとの参照値計算 エタノール 50 %-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.52, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.20, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.53 に示す.

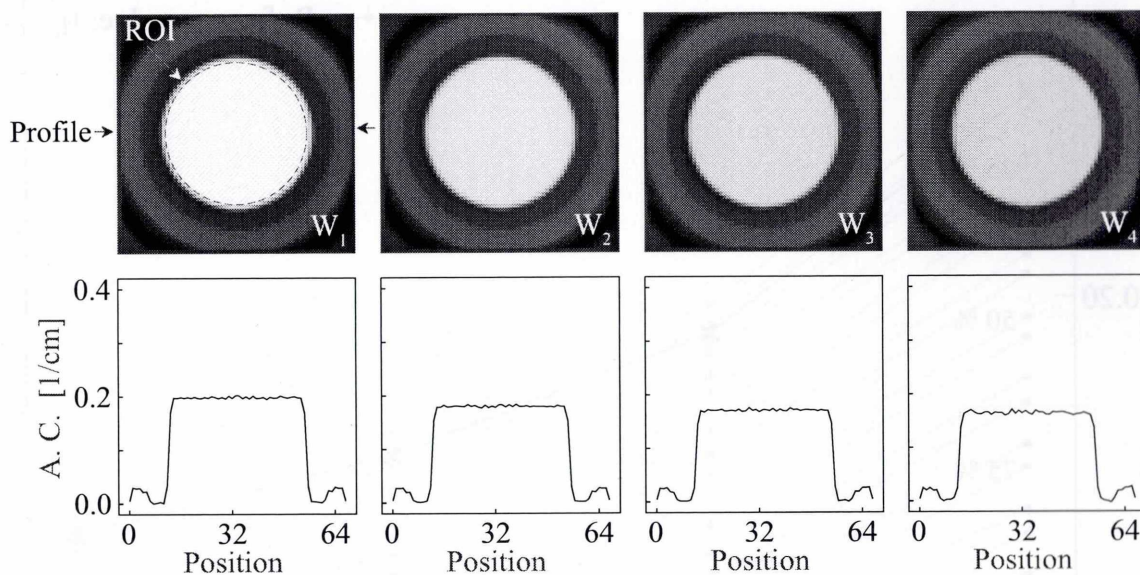


Fig. 4.52: Reconstructed images and profiles

Table 4.20: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	0.197	0.180	0.170	0.163	0.223 %
Reference value: η_i	0.198	0.180	0.171	0.164	

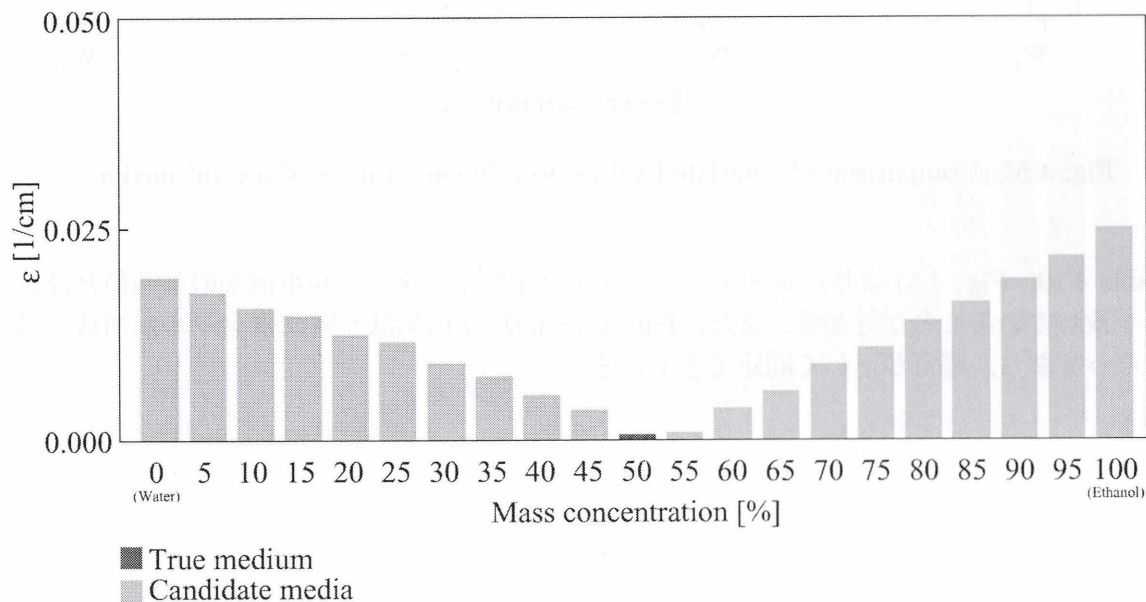


Fig. 4.53: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.54 に示す.

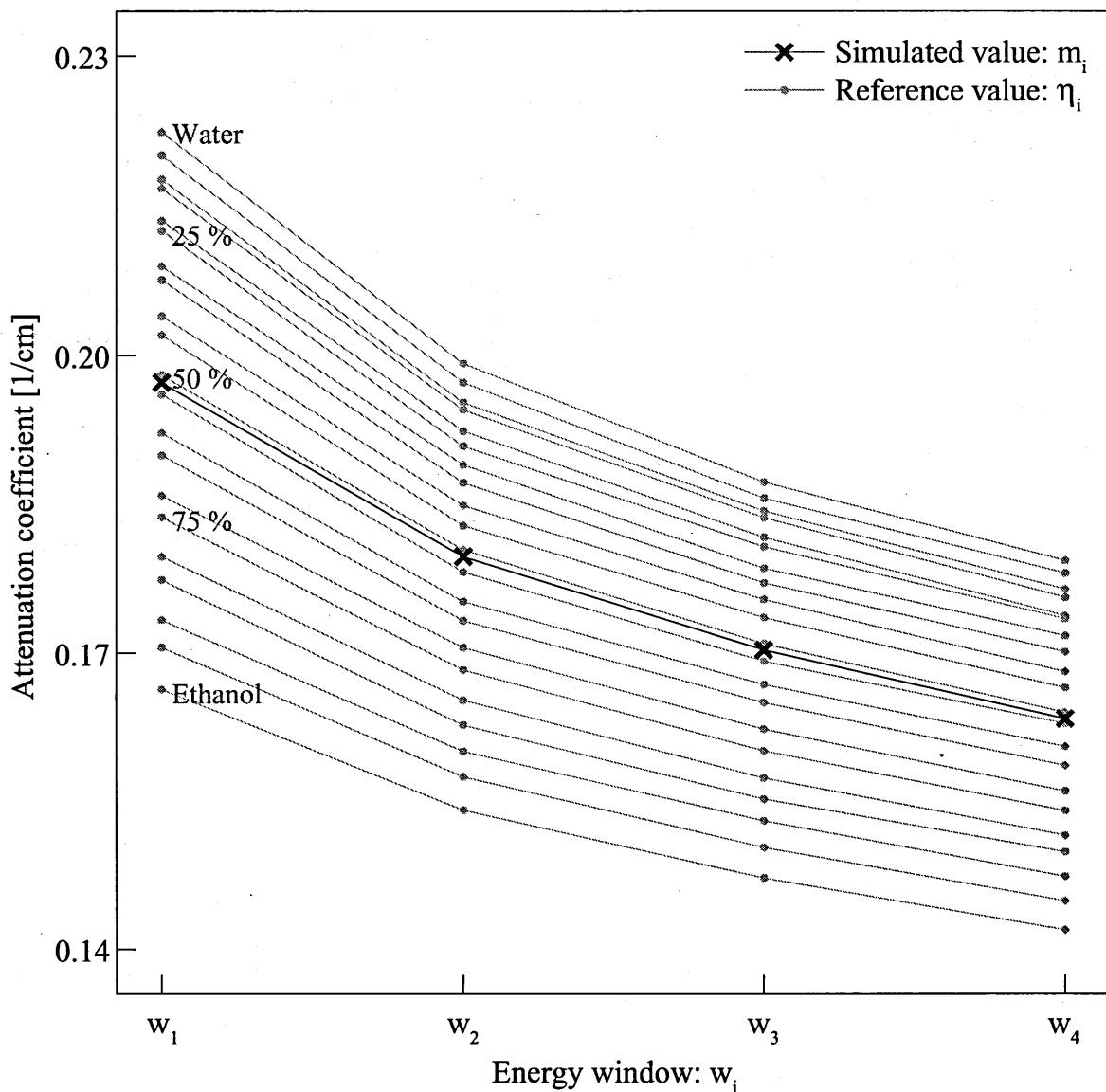


Fig. 4.54: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.20, Fig. 4.54 より, シミュレーション値は 50 % エタノール水溶液の参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.53 より, ϵ の値は 50 % エタノール水溶液で最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-混合比ごとの参照値計算 エタノール 95 %-

得られた再構成画像とそのプロフィールを Fig. 4.55, シミュレーション値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 4.21, シミュレーション値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 4.56 に示す.

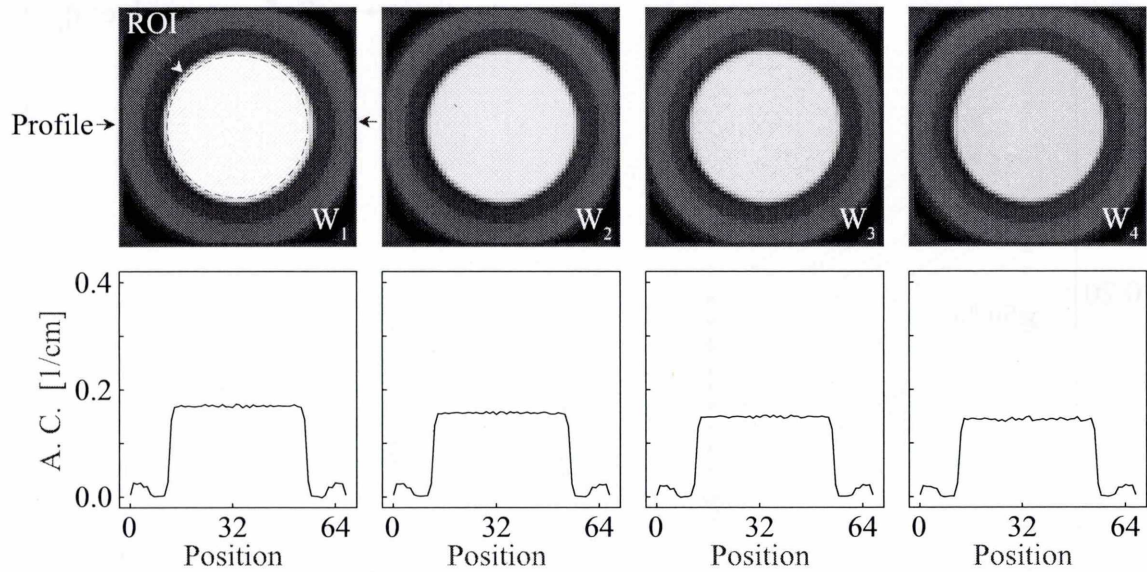


Fig. 4.55: Reconstructed images and profiles

Table 4.21: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Simulated value: m_i	0.170	0.157	0.150	0.144	0.223 %
Reference value: η_i	0.171	0.157	0.150	0.145	

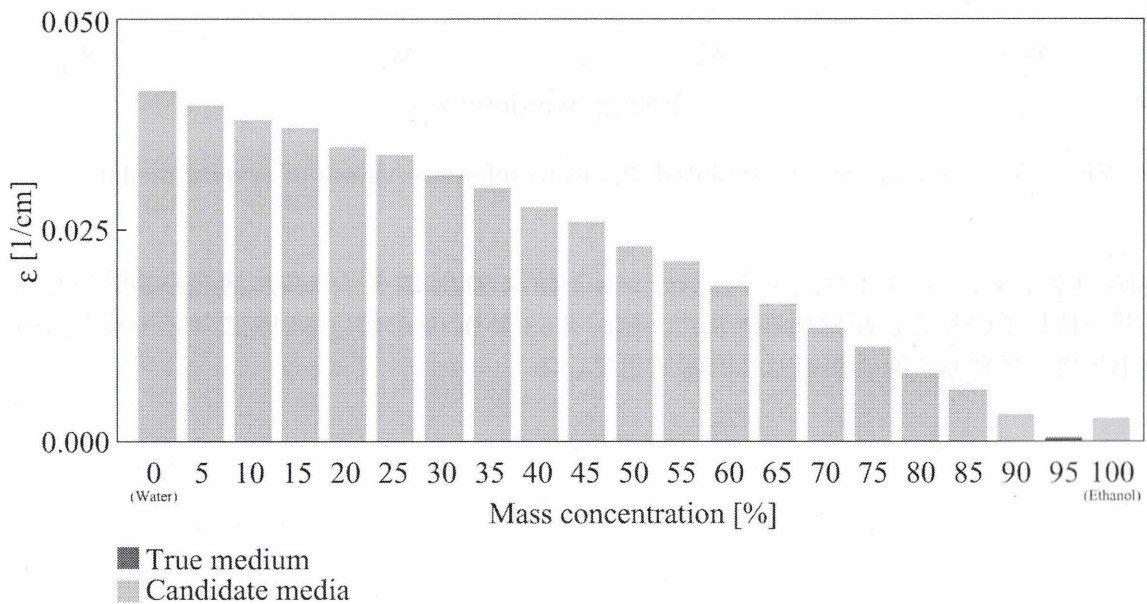


Fig. 4.56: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

シミュレーション値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 4.57 に示す.

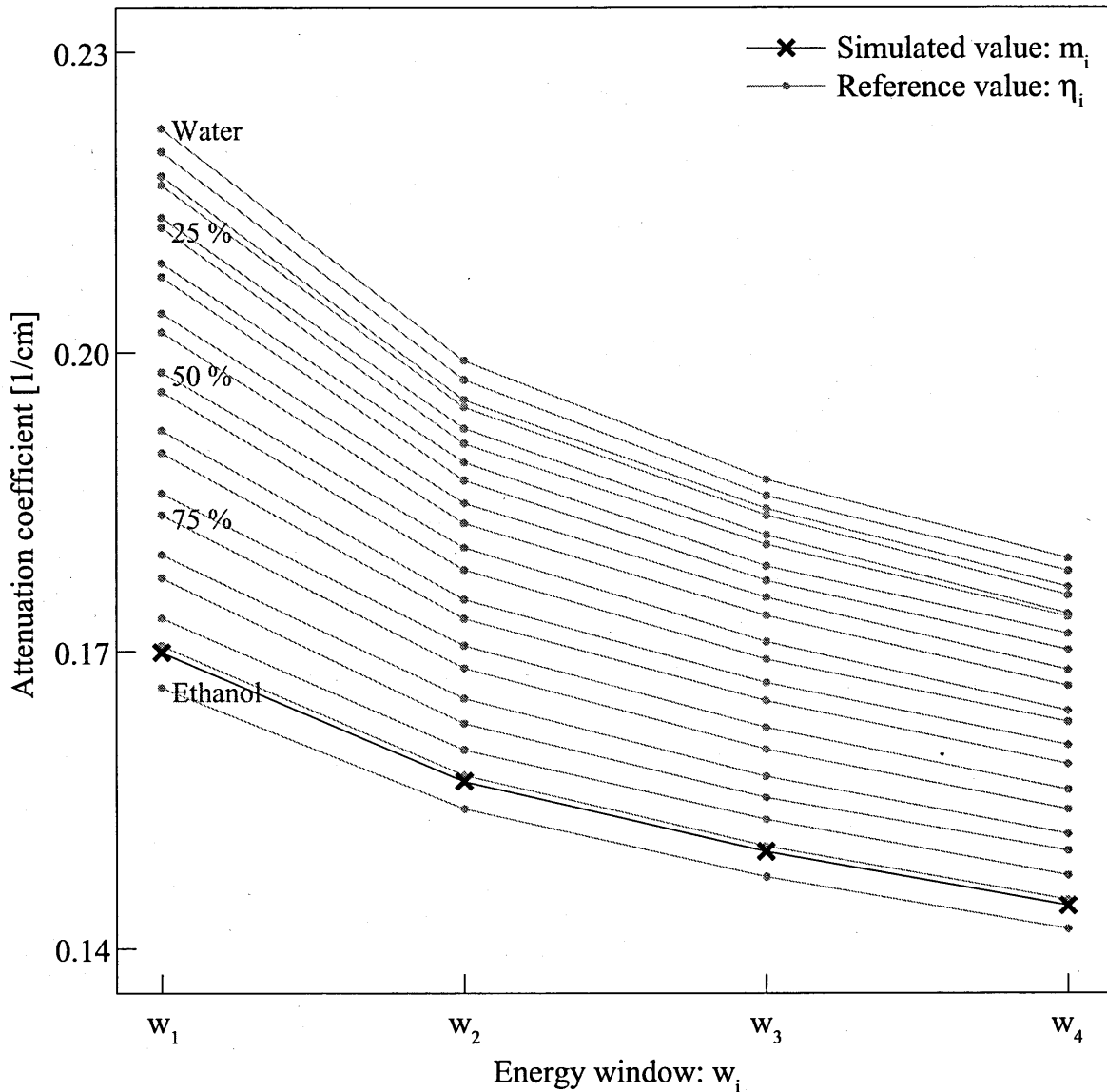


Fig. 4.57: Comparison of simulated values to reference values of several media

Table 4.21, Fig. 4.57 より, シミュレーション値は 95 % エタノール水溶液の参照値とほとんど一致していることが分かる. また, Fig. 4.56 より, ϵ の値は 95 % エタノール水溶液で最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

4.3 複数媒質

複数媒質に対し, Eq. 3.1 によって求めた通常の参照値 η_i と 3. 4 に示した高精度な参照値 η'_i を用いて媒質を同定し, 二つの参照値を比較した. 使用したオブジェクトを Fig. 4.58 に示す.

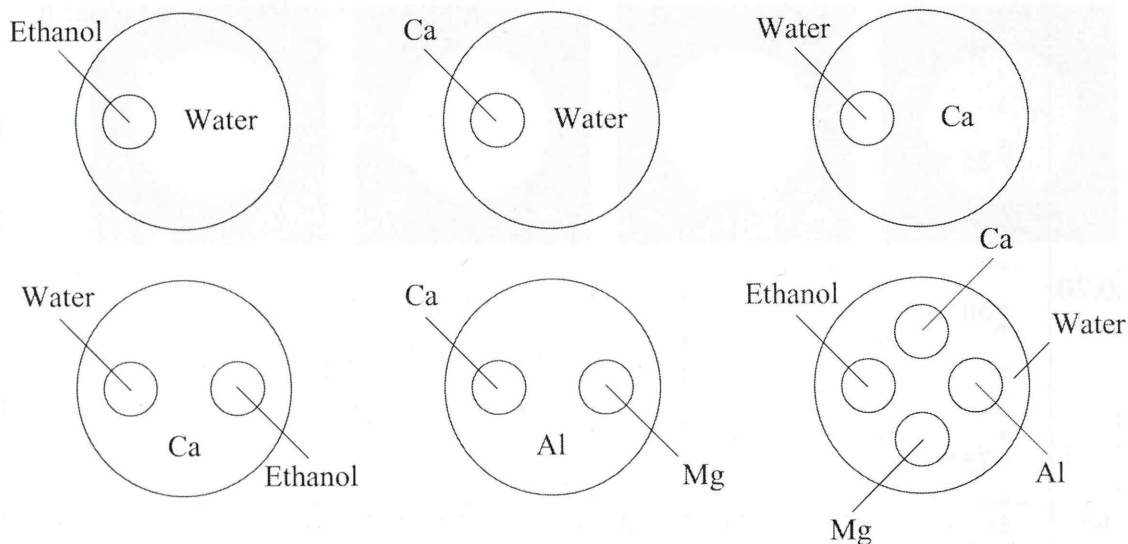


Fig. 4.58: Objects

シミュレーション結果

各オブジェクトのシミュレーション値 m_i の通常の参照値 η_i に対する平均誤差率と高精度な参照値 η'_i に対する平均誤差率の比較を Fig. 4.59 に示す. この平均誤差率はオブジェクトごとに各ウィンドウと各 ROI の値を全て平均して求めている. 各オブジェクトに対する詳細なシミュレーション結果を以降のページに示す.

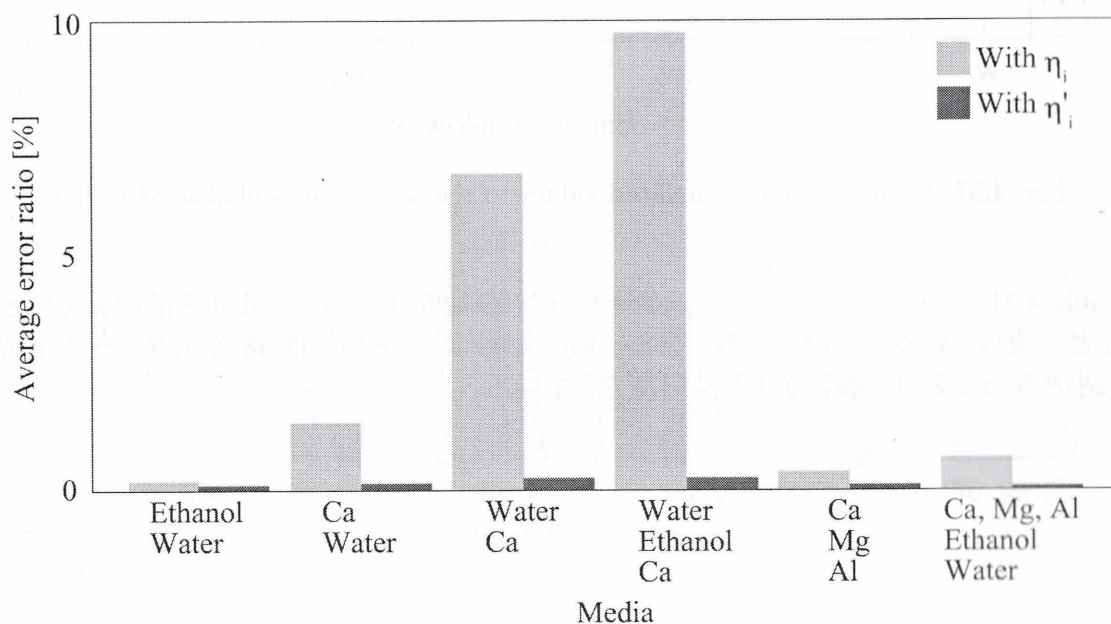


Fig. 4.59: Comparison error ratios using two methods

結果-エタノール, 水-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.60, シミュレーション値 m_i と参照値 η_i , η'_i の比較を Table 4.22, 対象の媒質の参照値とシミュレーション値の差 ϵ を Fig. 4.61 に示す。

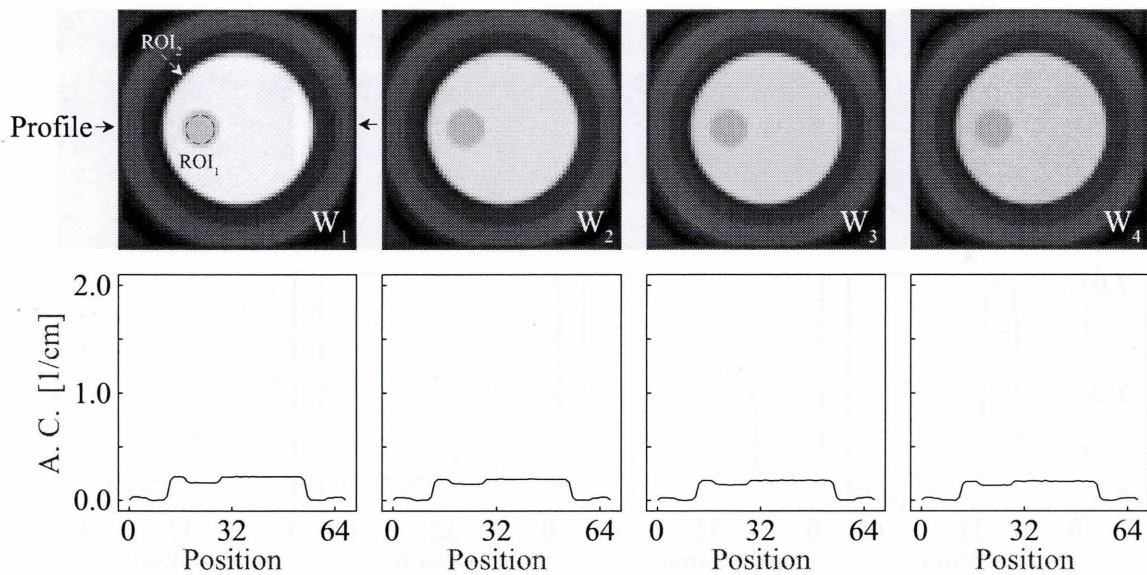


Fig. 4.60: Reconstructed images and profiles

Table 4.22: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	ROI ₁ (Ethanol)			ROI ₂ (Water)		
	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i
w_1	0.166	0.166	0.166	0.222	0.222	0.222
w_2	0.154	0.154	0.154	0.199	0.199	0.198
w_3	0.147	0.147	0.147	0.187	0.187	0.187
w_4	0.142	0.142	0.142	0.179	0.179	0.179
Error [%]		0.128	0.098		0.224	0.138

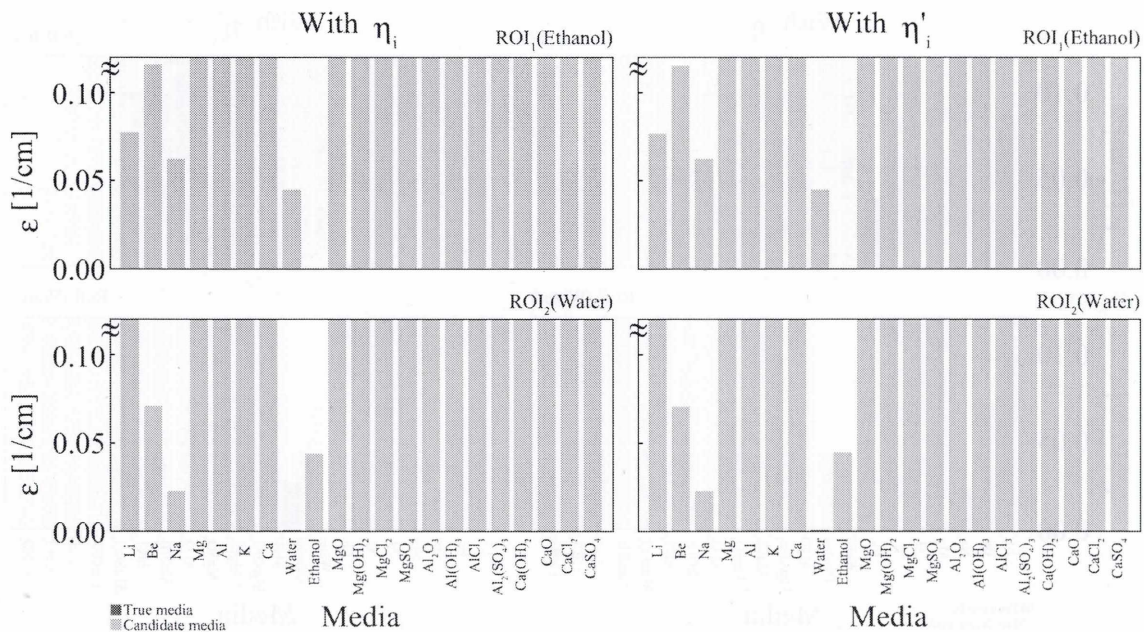


Fig. 4.61: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

結果-カルシウム, 水-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.62, シミュレーション値 m_i と参照値 η_i , η'_i の比較を Table 4.23, 対象の媒質の参照値とシミュレーション値の差 ϵ を Fig. 4.63 に示す。

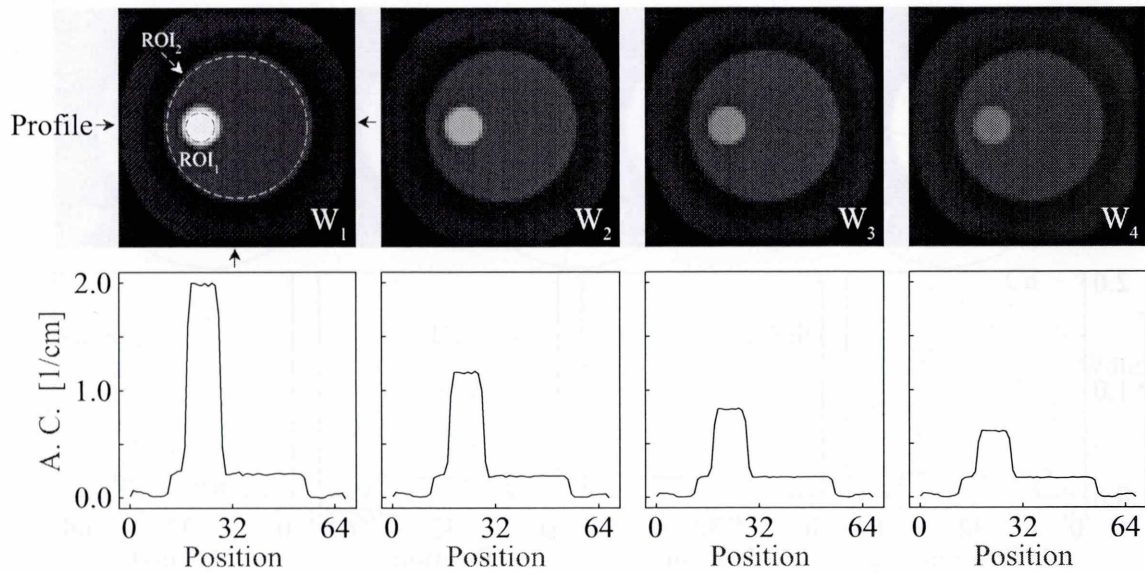


Fig. 4.62: Reconstructed images and profiles

Table 4.23: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	ROI ₁ (Ca)			ROI ₂ (Water)		
	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i
w_1	1.988	1.868	1.991	0.221	0.222	0.222
w_2	1.164	1.136	1.165	0.198	0.199	0.199
w_3	0.819	0.816	0.820	0.186	0.187	0.187
w_4	0.615	0.613	0.615	0.179	0.179	0.179
Error [%]		2.408	0.068		0.436	0.226

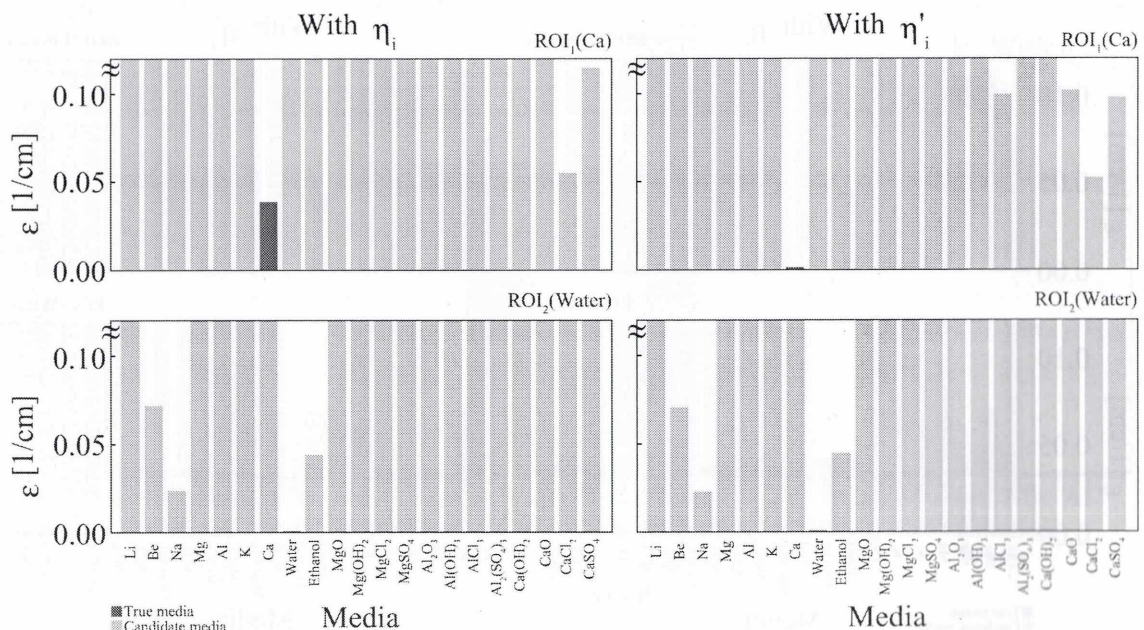


Fig. 4.63: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

結果-水, カルシウム-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.64, シミュレーション値 m_i と参照値 η_i, η'_i の比較を Table 4.24, 対象の媒質の参照値とシミュレーション値の差 ϵ を Fig. 4.65 に示す。

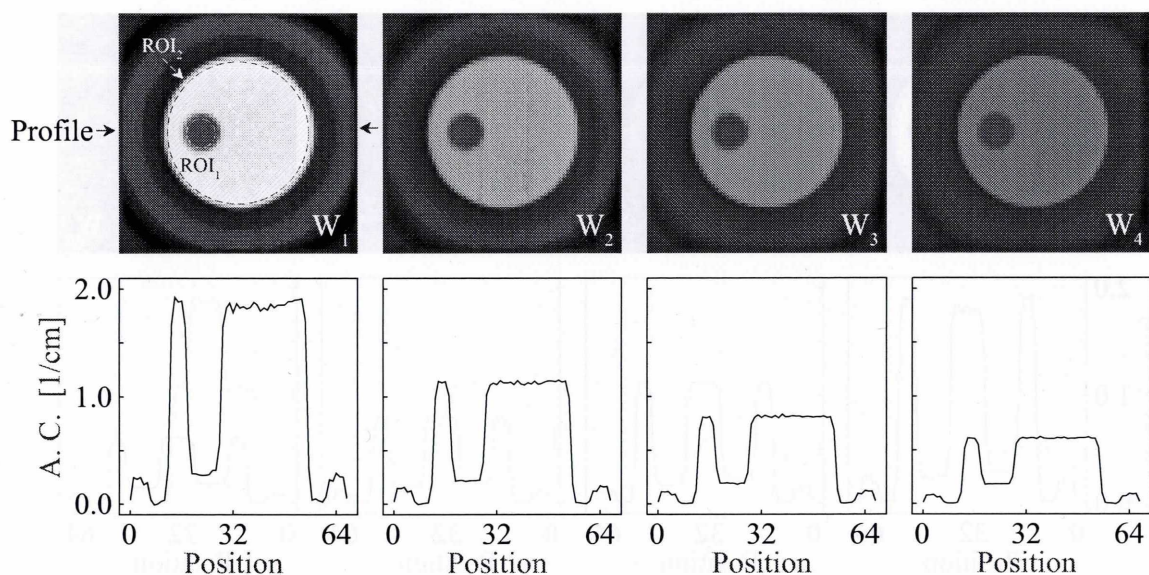


Fig. 4.64: Reconstructed images and profiles

Table 4.24: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	ROI ₁ (Water)			ROI ₂ (Ca)		
	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i
w_1	0.303	0.222	0.302	1.855	1.868	1.875
w_2	0.222	0.199	0.222	1.131	1.136	1.136
w_3	0.192	0.187	0.192	0.814	0.816	0.814
w_4	0.183	0.179	0.183	0.611	0.613	0.611
Error [%]		13.027	0.065		0.449	0.407

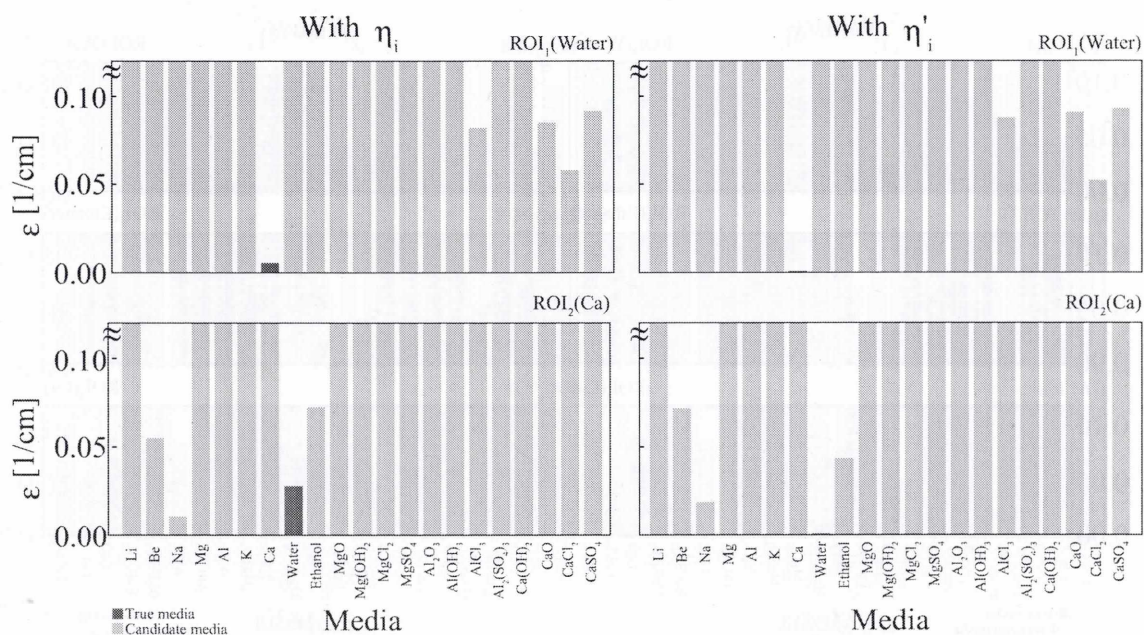


Fig. 4.65: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

結果-水, エタノール, カルシウム-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図. 4.66, シミュレーション値 m_i と参照値 η_i, η'_i の比較を Table 4.25, 対象の媒質の参照値とシミュレーション値の差 ϵ を Fig. 4.67 に示す。

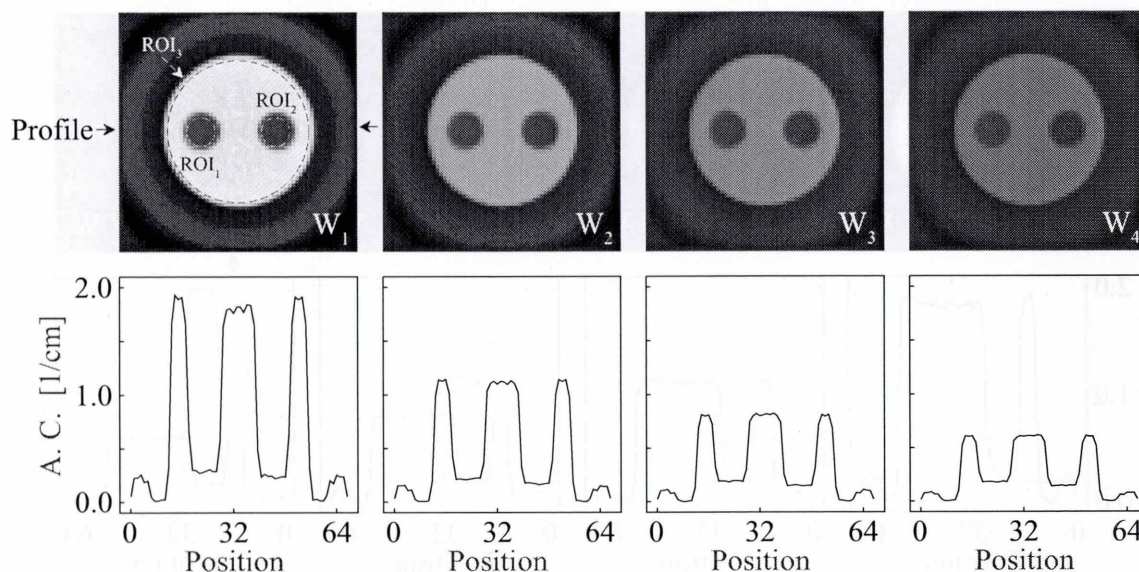


Fig. 4.66: Reconstructed images and profiles

Table 4.25: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	ROI ₁ (Water)			ROI ₂ (Ethanol)			ROI ₃ (Ca)		
	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i
w_1	0.295	0.222	0.296	0.248	0.166	0.244	1.878	1.868	1.878
w_2	0.220	0.199	0.220	0.175	0.154	0.176	1.136	1.136	1.137
w_3	0.192	0.187	0.192	0.153	0.147	0.152	0.814	0.816	0.814
w_4	0.182	0.179	0.182	0.145	0.142	0.145	0.611	0.613	0.611
Error [%]		11.732	0.168		17.258	0.585		0.286	0.030

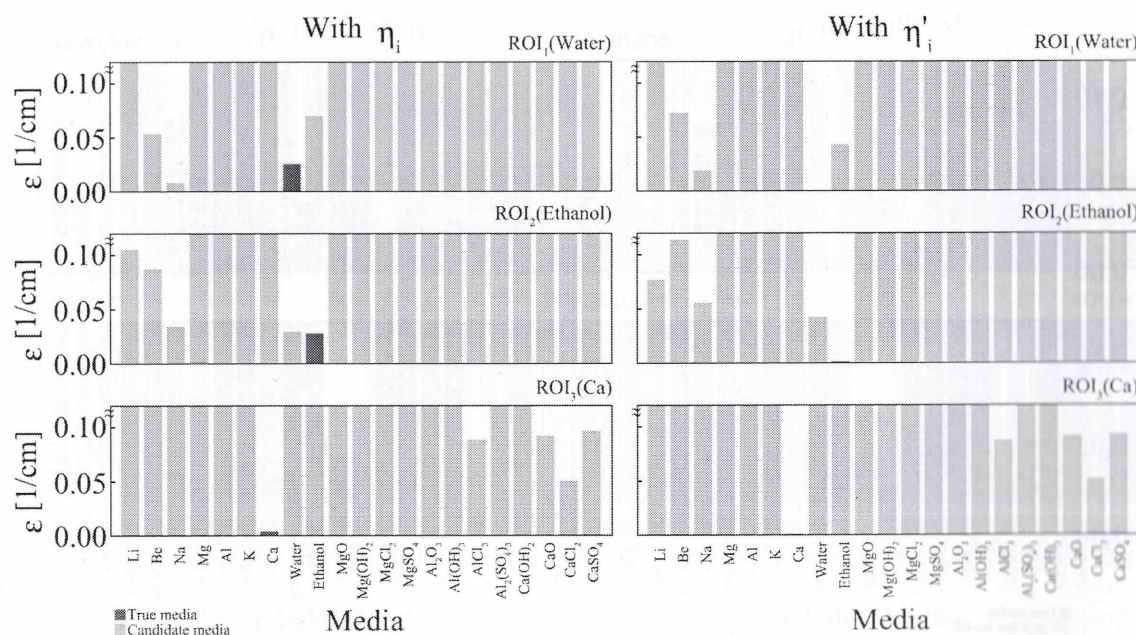


Fig. 4.67: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

結果-カルシウム, マグネシウム, アルミニウム

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 4.68, シミュレーション値 m_i と参照値 η_i , η'_i の比較を Table 4.26, 対象の媒質の参照値とシミュレーション値の差 ϵ を Fig. 4.69 に示す。

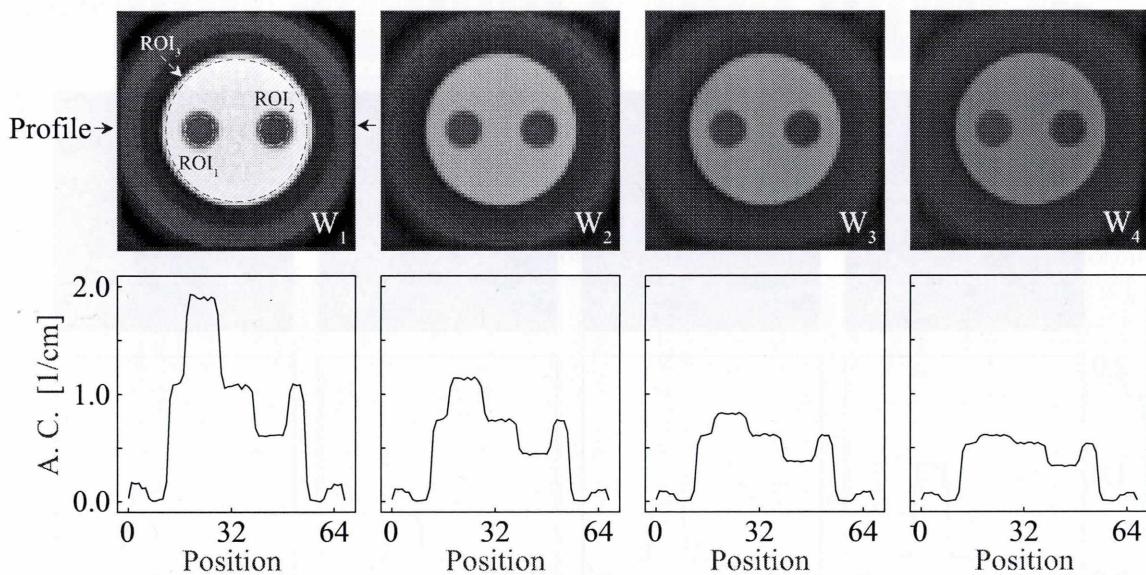


Fig. 4.68: Reconstructed images and profiles

Table 4.26: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	ROI ₁ (Ca)			ROI ₂ (Mg)			ROI ₃ (Al)		
	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i
w_1	1.904	1.868	1.906	0.616	0.615	0.617	1.083	1.084	1.084
w_2	1.145	1.136	1.146	0.446	0.445	0.446	0.755	0.758	0.756
w_3	0.816	0.816	0.817	0.374	0.375	0.375	0.617	0.620	0.618
w_4	0.612	0.613	0.613	0.332	0.332	0.332	0.535	0.537	0.535
Error [%]		0.697	0.100		0.149	0.098		0.301	0.050

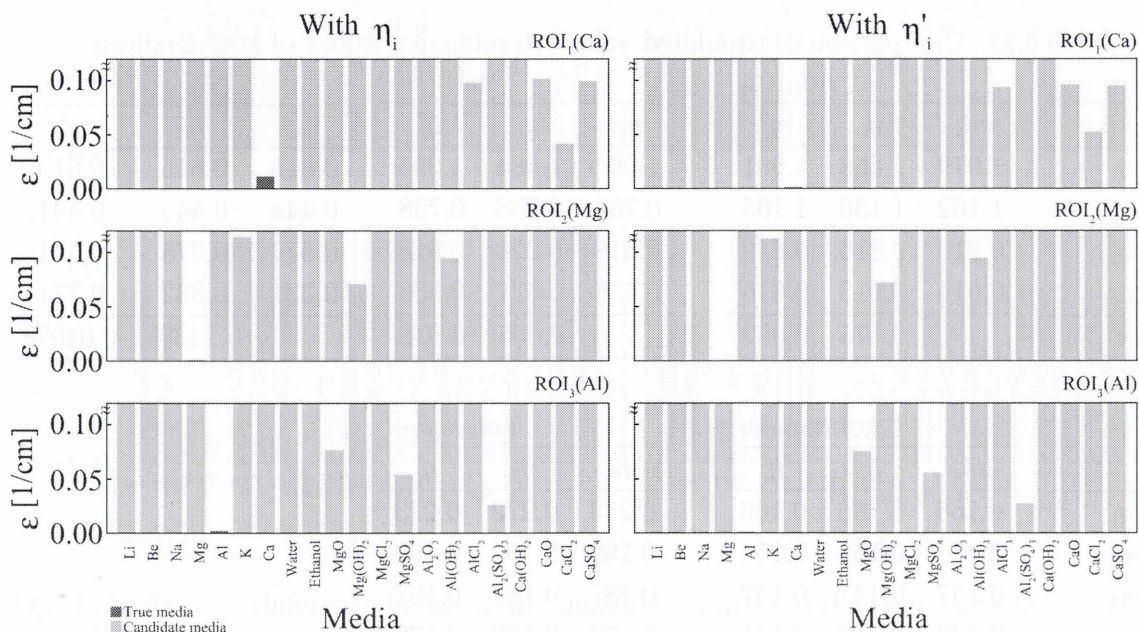


Fig. 4.69: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

結果-カルシウム, アルミニウム, マグネシウム, エタノール, 水-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図. 4.70, シミュレーション値 m_i と参照値 η_i , η'_i の比較を Table 4.27, 対象の媒質の参照値とシミュレーション値の差 ϵ を Fig. 4.71 に示す.

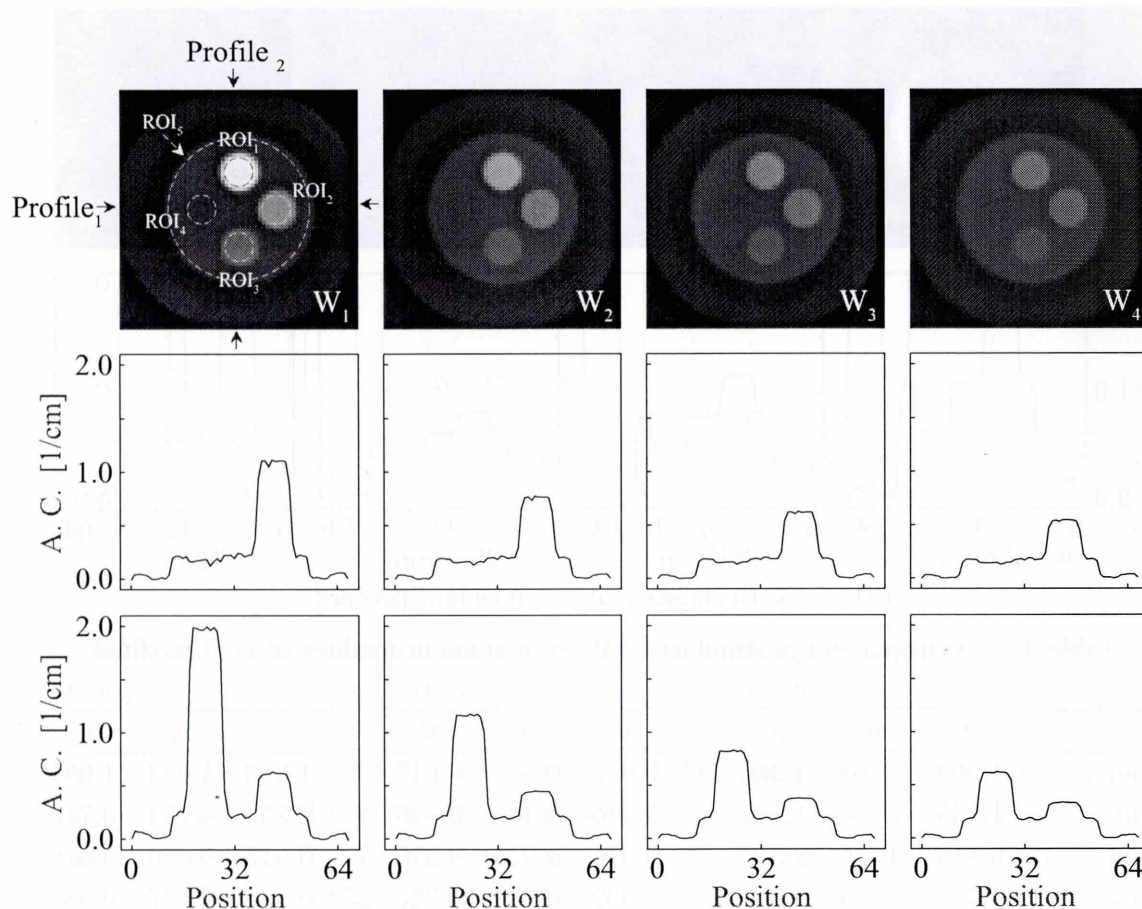


Fig. 4.70: Reconstructed images and profiles

Table 4.27: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	ROI ₁ (Ca)			ROI ₂ (Al)			ROI ₃ (Mg)		
	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i
w_1	1.979	1.868	1.981	1.094	1.084	1.095	0.615	0.615	0.615
w_2	1.162	1.136	1.163	0.758	0.758	0.758	0.444	0.445	0.444
w_3	0.818	0.816	0.819	0.618	0.620	0.618	0.374	0.375	0.374
w_4	0.614	0.613	0.615	0.536	0.537	0.536	0.331	0.332	0.331
Error [%]		2.176	0.082		0.405	0.076		0.243%	0.040%

	ROI ₄ (Ethanol)			ROI ₅ (Water)		
	m_i	η_i	η'_i	m_i	η_i	η'_i
w_1	0.166	0.166	0.166	0.223	0.222	0.223
w_2	0.153	0.154	0.154	0.199	0.199	0.199
w_3	0.147	0.147	0.147	0.187	0.187	0.187
w_4	0.142	0.142	0.141	0.179	0.179	0.179
Error [%]		0.318	0.099		0.261	0.036

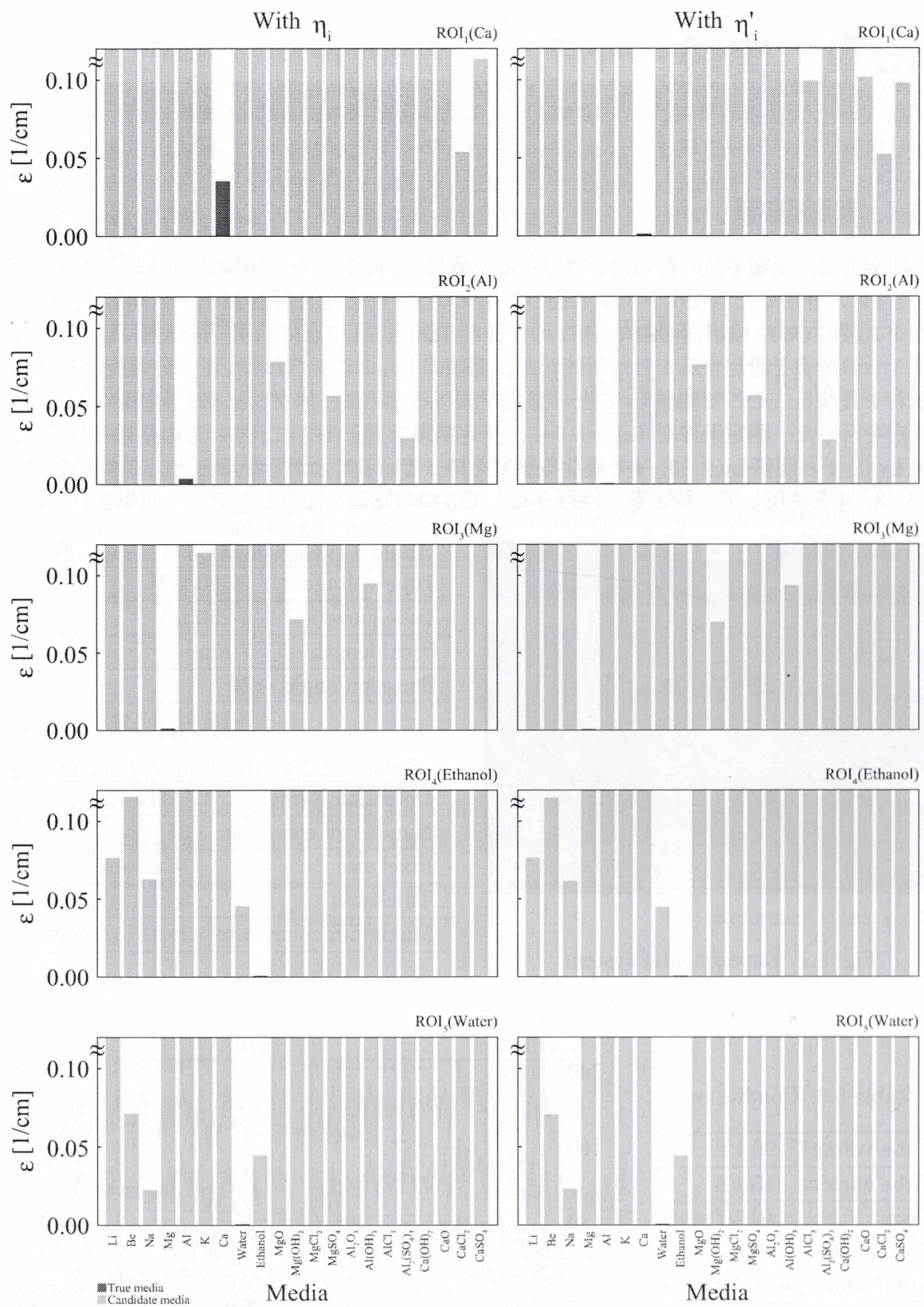


Fig. 4.71: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

第5章 実験

5.1 実験装置

本研究では、提案手法の有効性を評価するために実験を行った。実験装置のジオメトリを Fig. 5.1 に、使用した浜松ホトニクス製のマイクロフォーカス X 線源 L9121 と同じく浜松ホトニクス製の CdTe 検出器 CHPC-HS1 の仕様を Tables 5.1, 5.2 に示す。検出器には Lv 0~4 まで 5 つの閾値を設定することが可能だが、閾値の Lv によってエネルギー分解能と検出感度が若干異なる。そこで閾値 Lv ごとの感度を調べるために、オブジェクトを置かずに X 線の測定を行った。測定条件を Table 5.3 に、測定結果を Fig. 5.2 に示す。この結果を見ると、閾値 Lv 0, 1 と閾値 Lv 2, 3, 4 で異なる感度を持っていることが分かる。そこで本研究では Lv 2, 3, 4 を使用して、測定を二回行うことで 5 つの閾値を使用したデータ収集を行った。

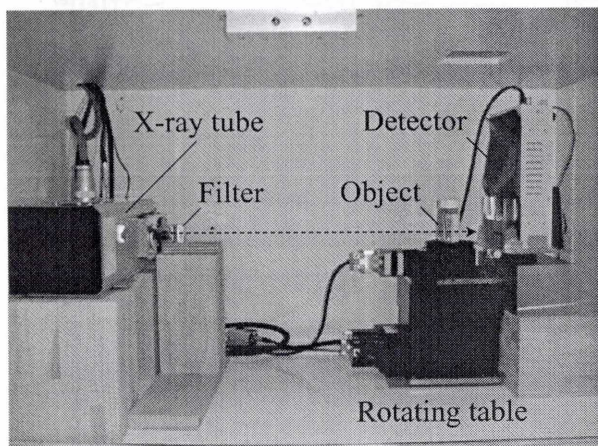


Fig. 5.1: Experimental system

Table 5.1: Specification of x-ray tube

Tube voltage	20-90 keV
Tube current	0-250 μ A
Focal length	7 μ m
Emission angle	39 $^{\circ}$

Table 5.2: Specification of detector

Detection element	CdTe
Number of elements	64 pixels
Pixel size	1 \times 1 mm ²
Thickness	5 mm
Maximum count rate	2 \times 10 ⁶ /s \cdot mm ²

Table 5.3: Conditions

Tube voltage	90 kV
Tube current	10 μ A
Filter	Al 10 mm
Data acquisition time	200 sec/proj.
Threshold	40, 50, 60, 70, 80 keV

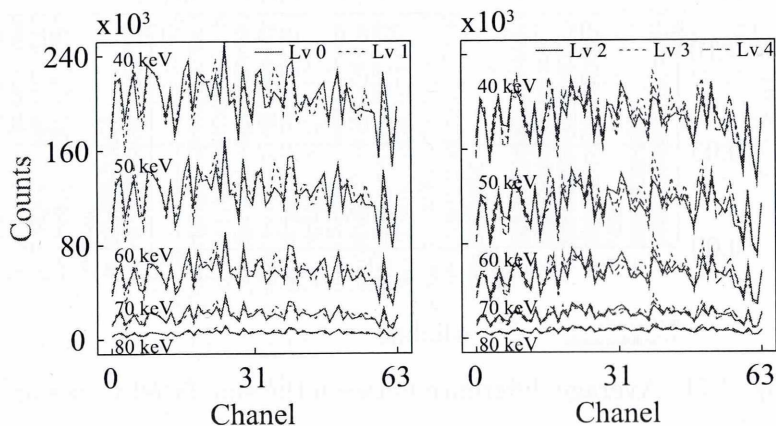


Fig. 5.2: Measurement counts with each threshold level

5.2 実験

実験を行い提案手法の有効性を評価した。実験では、広いエネルギー範囲のデータ収集を行うために管電圧は最高設定範囲の 90 kV とし、管電流は検出器の高エネルギー分解能モードでの推奨最大カウントレート 30,000 c/s に対しカウントレートが約半分となる $10 \mu\text{A}$ とした。また、検出器は 40 keV 以下の閾値を設定した測定で大きな誤差が生じたため、40~80 keV の範囲を 10 keV ごと 4 つのエネルギーウィンドウに分けて測定を行った。使用した X 線のエネルギースペクトルを Fig. 5.3 に、実験条件を Table 5.4 に示す。オブジェクトには直径 3.5 cm のアクリルシリンダー容器に入れた水とエタノールと $30 \times 30 \text{ mm}^2$ のアルミニウムを使用した。

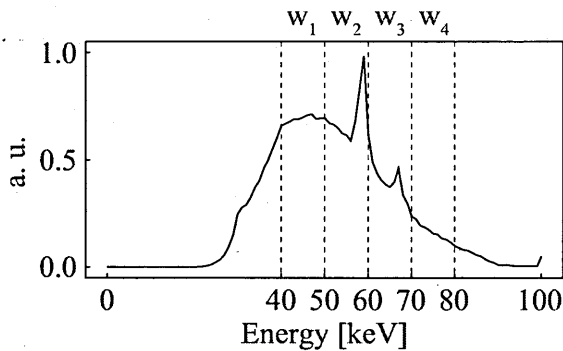


Fig. 5.3: Energy spectrum

Table 5.4: Conditions

Tube voltage	90 kV
Tube current	$10 \mu\text{A}$
Filter	Al 10 mm
Data acquisition time	10 sec/proj.
Number of projection	180(360 deg.)
Detector size	64 pixels
Pixel size	$1 \times 1 \text{ mm}^2$

5.3 実験結果

測定値と参照値の比較を Fig. 5.4 に示す。これを見ると水とエタノールでは測定値と参照値がほとんど一致しており、媒質を正しく同定することができる。しかしながら、アルミニウムでは大きな誤差が生じた。各媒質に対する詳細な実験結果を以降のページに示す。

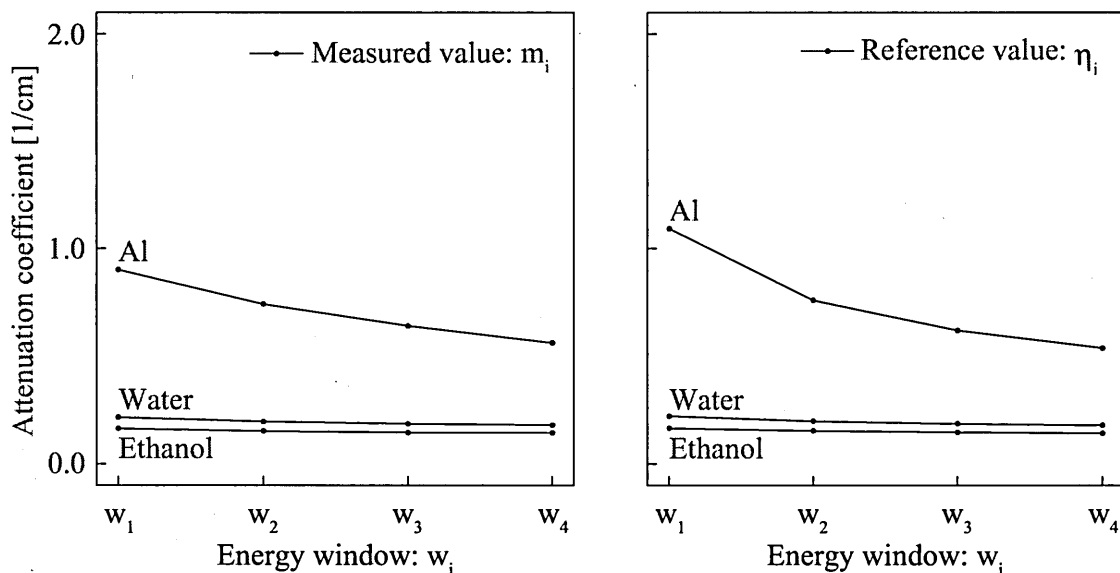


Fig. 5.4: Comparison of m_i to reference values to measured values

結果-水-

得られた再構成画像とそのプロフィールを Fig. 5.5, 測定値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 5.5, 測定値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 5.6 に示す。

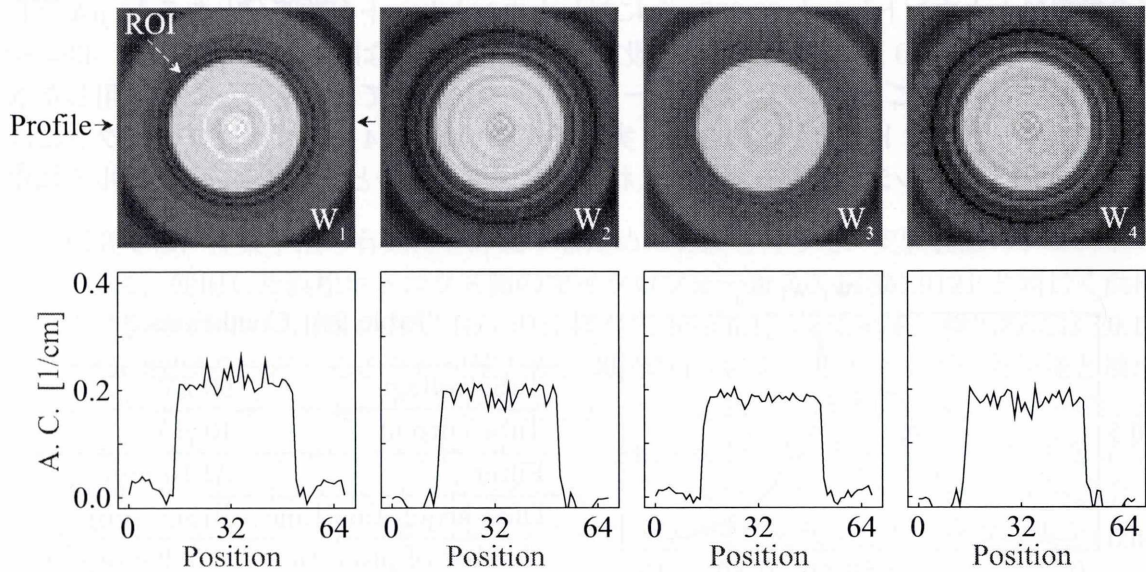


Fig. 5.5: Reconstructed images and profiles

Table 5.5: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Measured value: m_i	0.217	0.197	0.186	0.181	1.244%
Reference value: η_i	0.222	0.199	0.187	0.179	

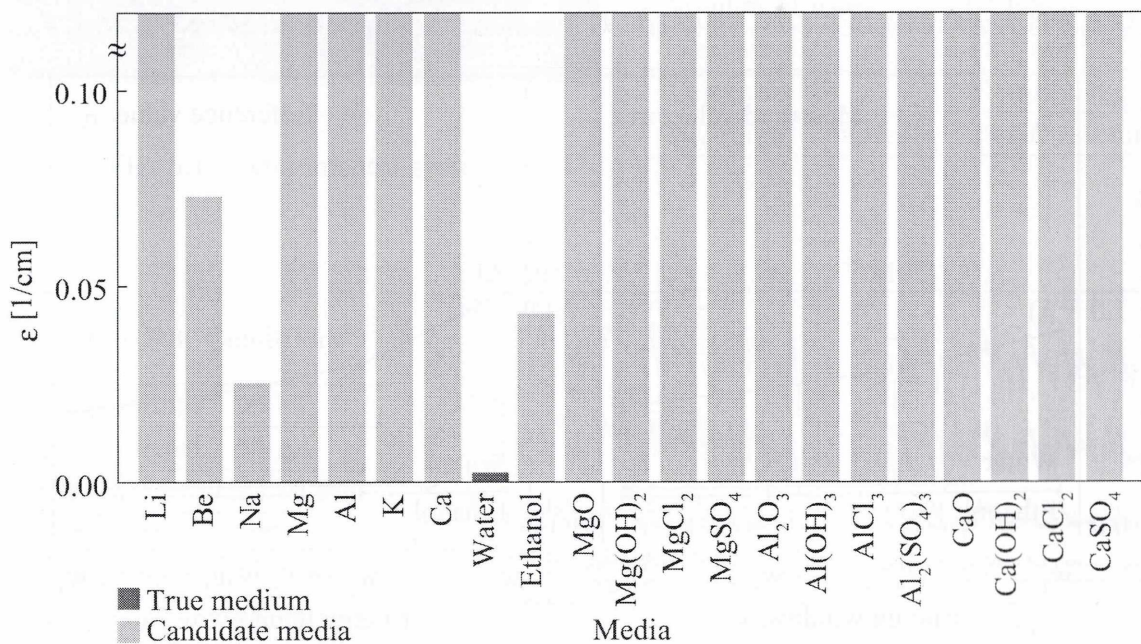


Fig. 5.6: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

測定値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 5.7 に示す.

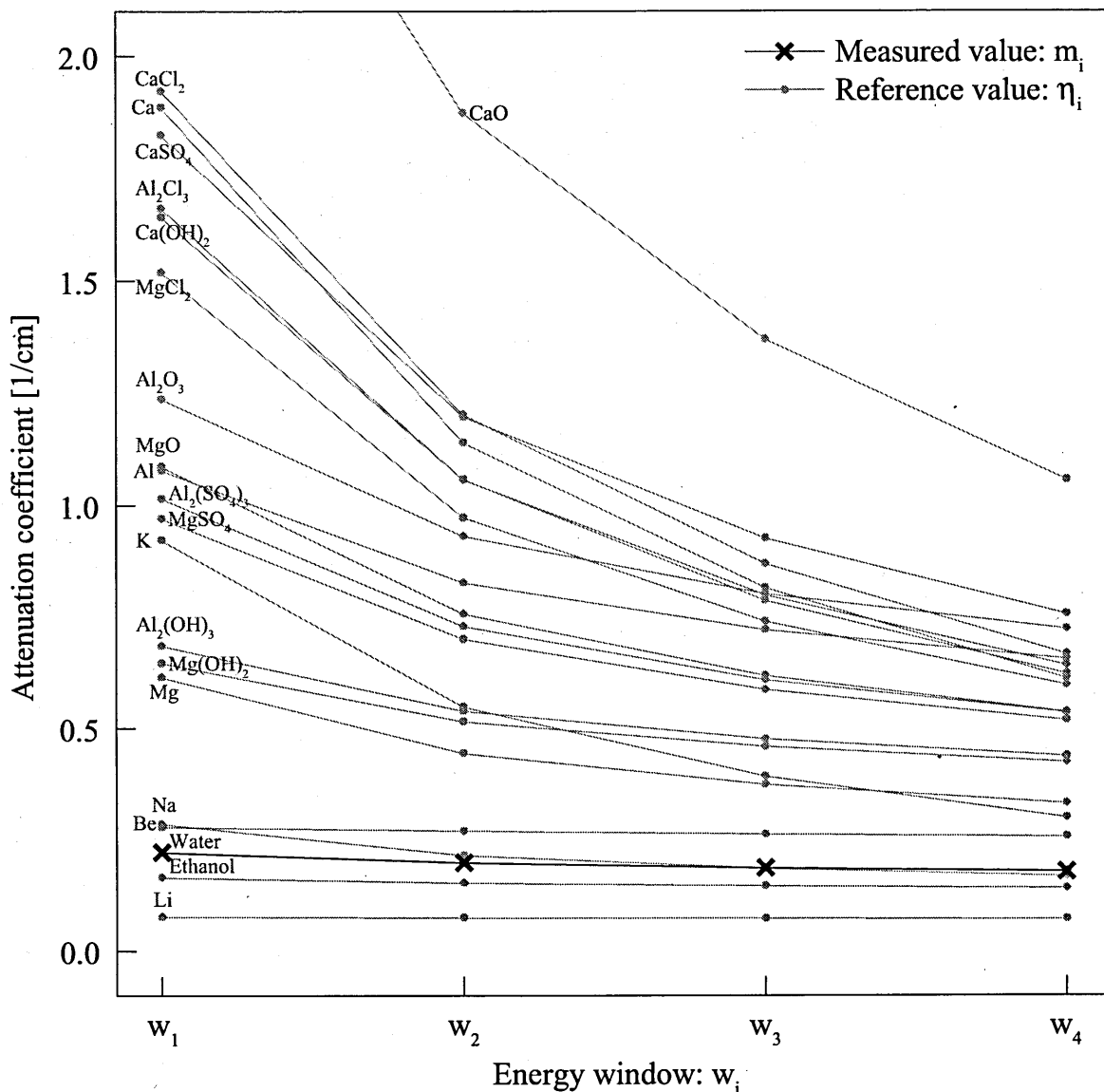


Fig. 5.7: Comparison of m_i to reference values to measured values

Table 5.5, Fig. 5.7 より, 測定値は水の参照値とほとんど一致していることがわかる。また, Fig. 5.6 より, ϵ の値は水で最小となっており, 媒質が正しく同定できている。

結果-エタノール-

得られた再構成画像とそのプロファイルを図 5.8, 測定値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 5.6, 測定値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 5.9 に示す。

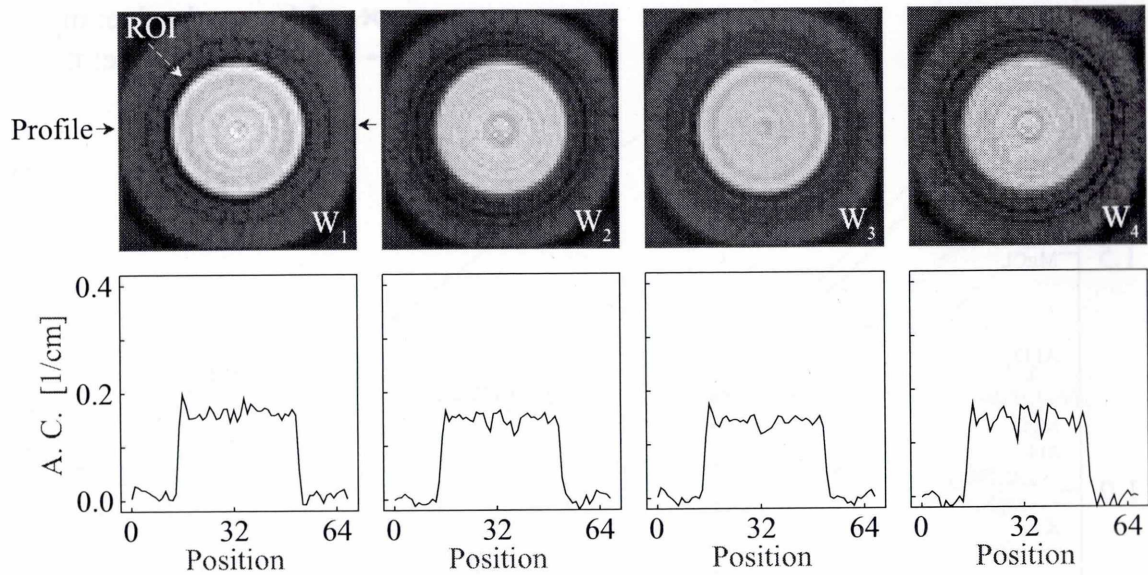


Fig. 5.8: Reconstructed images and profiles

Table 5.6: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Measured value: m_i	0.165	0.153	0.146	0.145	1.145%
Reference value: η_i	0.166	0.154	0.147	0.142	

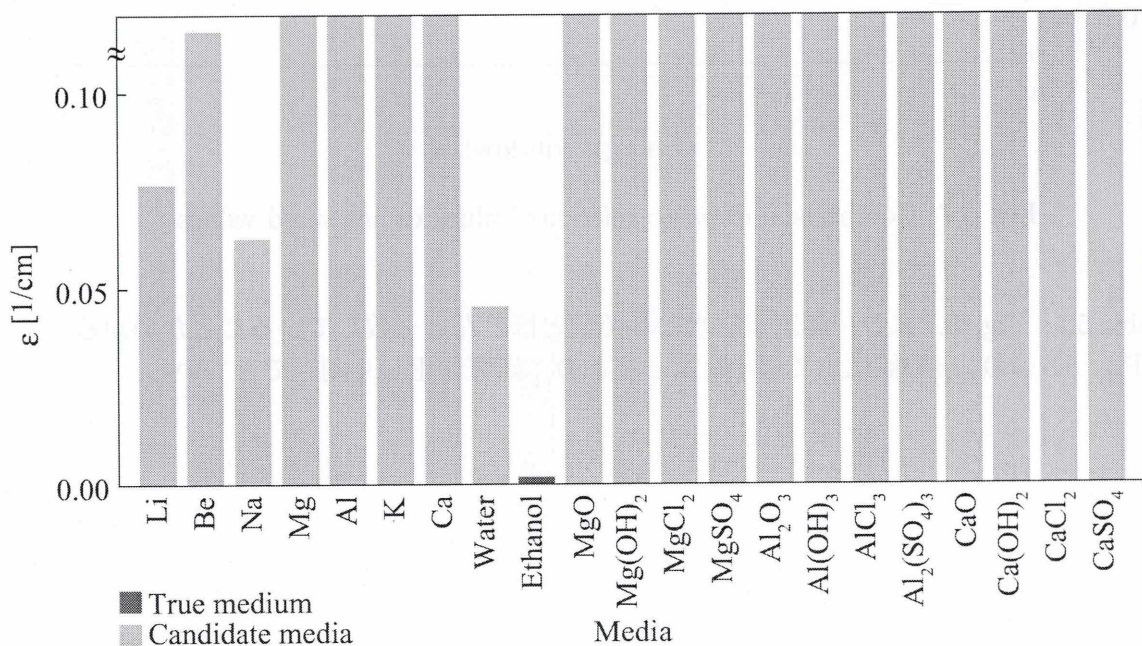


Fig. 5.9: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

測定値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 5.10 に示す.

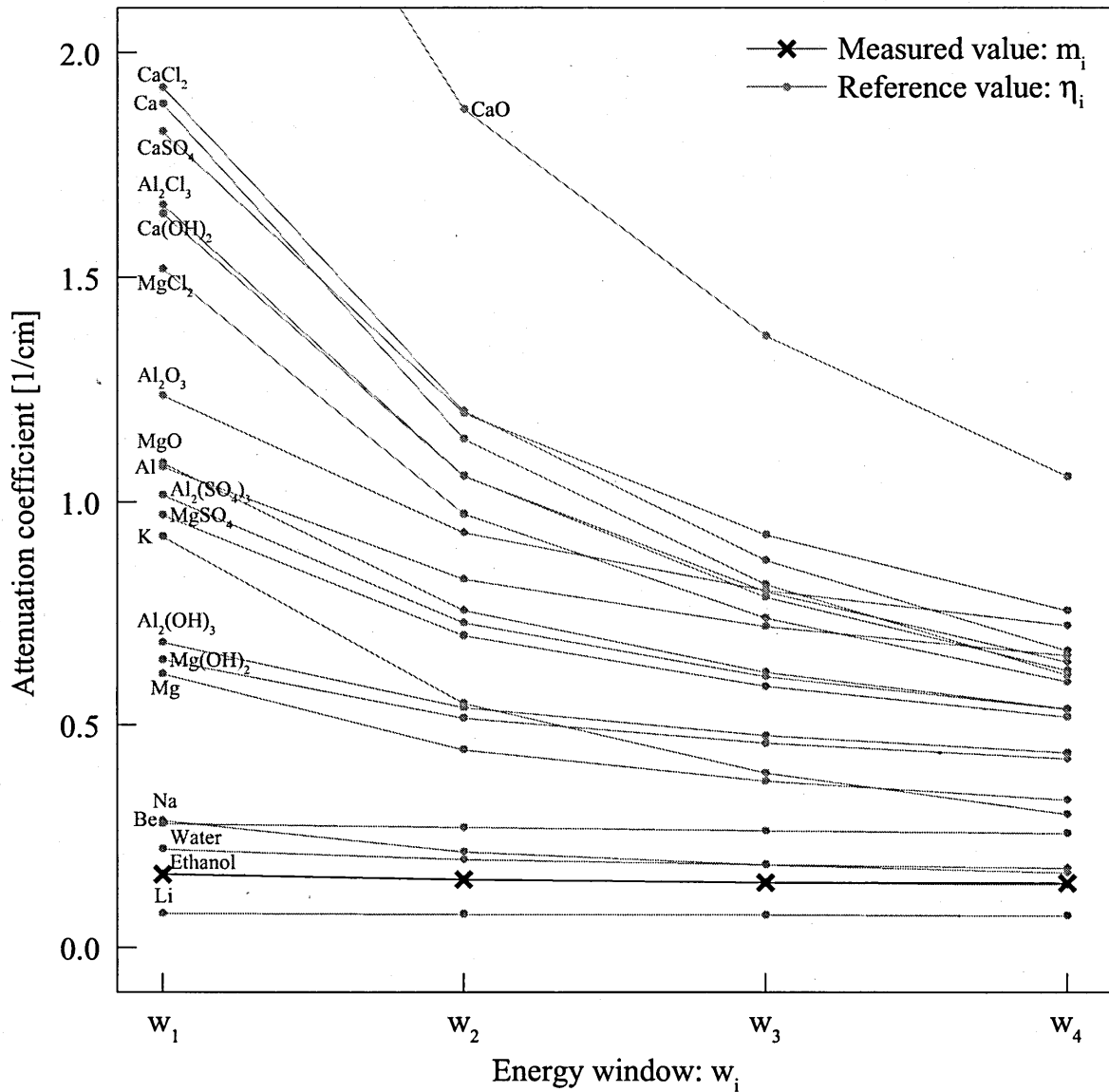


Fig. 5.10: Comparison of m_i to reference values to measured values

Table 5.6, Fig. 5.10 より, 測定値はエタノールの参照値とほとんど一致していることがわかる. また, Fig. 5.9 より, ϵ の値はエタノールで最小となっており, 媒質が正しく同定できている.

結果-アルミニウム-

得られた再構成画像とそのプロフィールを Fig. 5.11, 測定値 m_i と正しい媒質の参照値 η_i の比較を Table 5.7, 測定値と対象とした媒質の参照値の差 ϵ を Fig. 5.12 に示す。

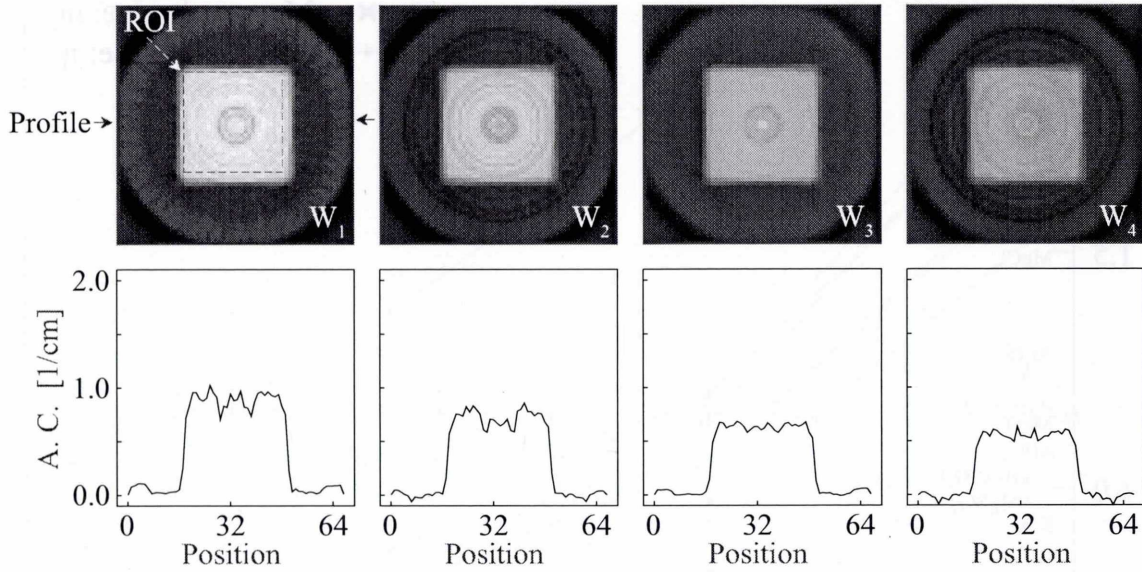


Fig. 5.11: Reconstructed images and profiles

Table 5.7: Comparison of simulated values to reference values of true medium

	w_1	w_2	w_3	w_4	Average error ratio
Measured value: m_i	0.962	0.742	0.640	0.562	5.508%
Reference value: η_i	1.093	0.760	0.620	0.538	

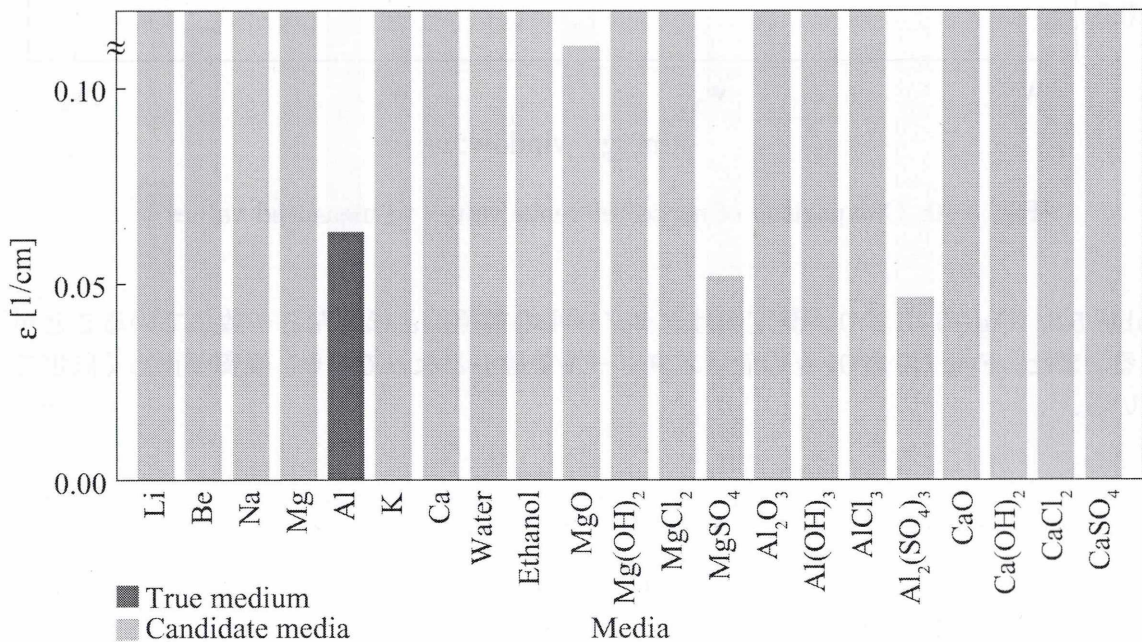


Fig. 5.12: Average difference between the simulated values and the reference values of several media

測定値 m_i と対象とした媒質の参照値 η_i の比較を Fig. 5.13 に示す。

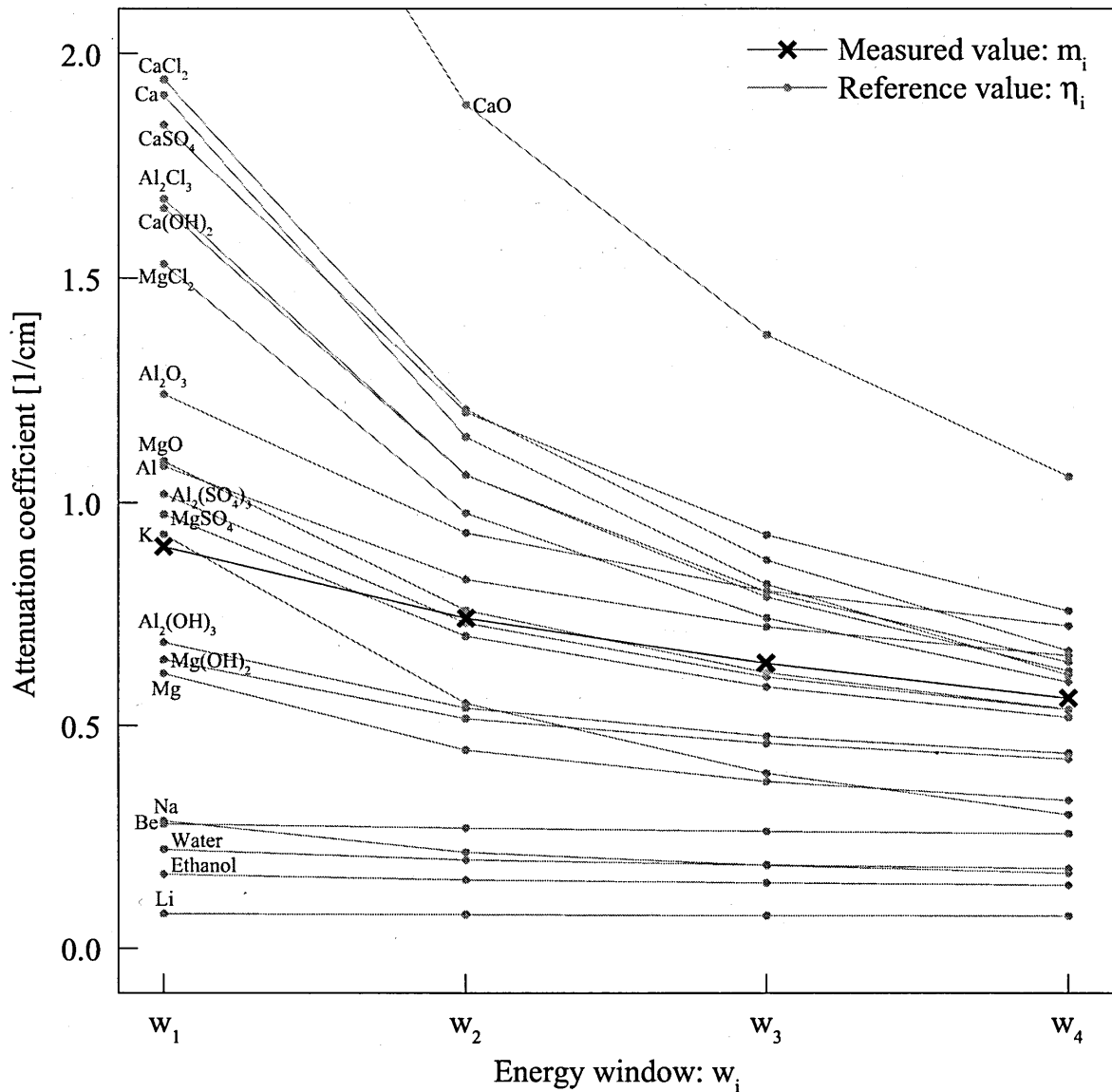


Fig. 5.13: Comparison of m_i to reference values to measured values

Fig. 5.13 より測定値はどの参照値とも一致しておらず、Table 5.7を見ると w_1 において特に大きな誤差が生じていることがわかる。また、Fig. 5.12 より、 ϵ の値は硫酸アルミニウムで最小となっており、媒質を正しく同定することができていない。

第6章 考察

6.1 単一媒質シミュレーション

6.1.1 純物質

結果を見ると全ての媒質で正しい媒質の ϵ の値が最小になっており、媒質を正しく同定することができる。Fig. 4.6のプロファイルを見ると、カルシウムの w_1 における再構成画像の値は中心部分に比べて外側の方が高い値になっている。これはビームハードニングによる影響で、カルシウムでは減衰係数の値がエネルギーによって大きく異なる(減衰係数曲線の傾きが大きい)ため、ビームハードニングの影響を大きく受けたために顕著に表れている。しかしながら、我々はこれらの異なる値を平均し Eq. 3.1 によって求めた参照値と比較することで媒質を正しく同定することができる。また、この影響は減衰係数曲線の傾きが大きくなる低いエネルギーで大きくなるため、今回使用したエネルギーウィンドウよりも低いエネルギーを使う場合には、測定値と正しい媒質の参照値の間の誤差の原因となる。この誤差は、Eq. 3.1における l の値を正しく求めることで低減することができる。今回使用した5つの媒質におけるシミュレーション値の正しい媒質の参照値に対する平均誤差率は0.4%以内であった。

アルミニウムのオブジェクトサイズを変化させて提案手法を試したところ、これもまた全てのサイズで媒質を正しく同定することができた。4.21におけるシミュレーション値と参照値のオブジェクトサイズごとの差が、透過距離による値の差を表している。オブジェクトのサイズと媒質同定の誤差には規則的な変化は見られず、サイズごとに Eq. 3.1 の l の値を変えて計算することで、様々な大きさのオブジェクトを同定できることが分かった。直径20 mmのオブジェクトではシミュレーション値の正しい媒質の参照値に対する平均誤差率が1.285%と他のオブジェクトに比べて大きかった(各オブジェクトの平均誤差率を Table 6.1 に示す)。統計変動による誤差の可能性を考えてシミュレーション値の理論値を計算して参照値と比較したところ、平均誤差率は1.306%であり、この誤差は統計変動によるものではないことが分かった。よってこれは Eq. 3.1 に用いた近似の透過距離 l からくるものだと考えられる。そこで3.4に示した高精度な参照値を計算してシミュレーション値と比較したところ、平均誤差率は0.021%まで減少したため、やはりこの誤差は近似の透過距離 l から来るものであった。しかしながら平均誤差率1.285%という値は十分に小さいため、通常の参照値計算を使って正しく媒質を同定することができる。

Table 6.1: Average error ratio

Object diameter [mm]	40	20	10	5
Error [%]	0.303	1.285	0.207	0.723

照射線量を変化させることで量子雑音が生じる影響を調べたところ、照射光子数を1,000/pixelと極めて少なくした場合にも、シミュレーション値の正しい媒質

の参照値に対する平均誤差率 0.762 % という高い精度で媒質の同定を行うことができた。これは、提案手法において、再構成画像の ROI 内の値を平均してシミュレーション値としたことで、量子雑音の影響を減らすことができたためである。Fig. 4.34 を見ると、光子数の減少とともに ROI 内の標準偏差の値が大きくなり、画像に量子雑音が付加されていることが分かる。また、この量子雑音の画像に対する影響は Figs. 4.36, 4.39, 4.42, 4.45 に示した再構成画像とプロファイルからも見る事ができる。しかしながら、シミュレーション値の正しい媒質の参照値に対する平均誤差率は照射光子数 10,000~1,00,000 /pixel の間では大きく変化しておらず、ROI 内の値を平均したことで量子雑音の影響を減らすことができて確認できる。照射光子数、投影数、ROI サイズと測定誤差には関係があり、十分な ROI のサイズが取れる場合には照射光子数を減らしても媒質同定の精度には影響しない。

6.1.2 混合物

本研究では混合物の同定として、提案手法を用いてエタノール水溶液の濃度を求めた。Fig. 4.48 を見ると、混合比ごとに参照値を計算する方法では誤差が安定しているのに対して、連立方程式を用いた方法では混合比によって精度にばらつきが出た。これは参照値を計算する方法では濃度ごとに混合物の正しい密度を使って参照値を計算しているのに対し、連立方程式を用いる方法では混合物の要素の物質の密度を混合比による重みづけ平均することで混合物の密度を近似しているためである。そのため、密度近似の誤差が大きくなる 50 % エタノール水溶液の同定において大きな誤差が生じたのである。エタノール水溶液の質量パーセントごとの密度と水とエタノールの密度を混合比で重みづけ平均して近似したものの比較を Fig. 6.1 に示す。連立方程式を使って混合物を同定する場合、真の密度と近似の密度がどれだけ近いかによって同定の精度が決まる。そのため、液体に固体が溶解するような場合 (例えば食塩水) は固体の密度とその水溶液の密度とで極端に差が出るため同定を行うことができない。これに対し、混合比ごとに参照値を計算する方法では混合物の要素に依存することなく同定を行うことができる。

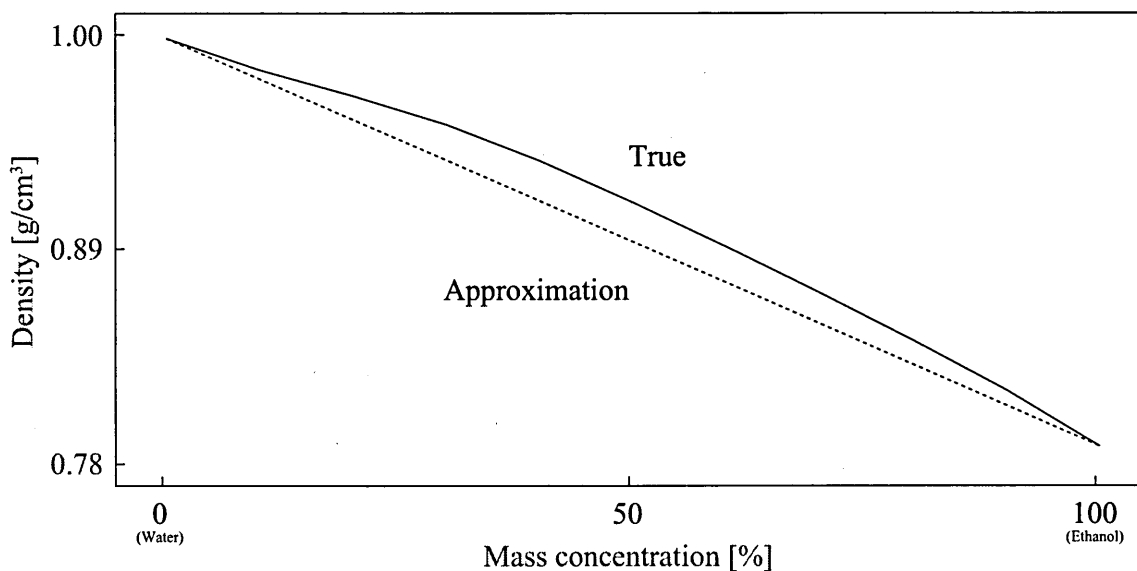


Fig. 6.1: Density

6.2 複数媒質シミュレーション

複数媒質をオブジェクトとしたシミュレーションでは、通常の参照値 η_i と高精度な参照値 η'_i を用いて媒質同定を行い、二つの参照値を比較した。Fig. 4.59 を見ると、 η'_i を用いた同定が全てのオブジェクトに対して有効だったのに対し、 η_i を用いたものではいくつかのオブジェクトで大きな誤差が生じていることが分かる。この誤差はオブジェクトを構成する媒質の減衰係数の高さの差が生むのではなく、減衰係数の傾きの差によって起こり、特に、減衰係数の傾きが大きい媒質が、傾きの小さい媒質を包み込むような場合に大きくなる。そのため、オブジェクトが水やエタノールのような媒質をカルシウムで包み込むような構造の時に誤差が大きくなっている。通常の参照値計算でこの誤差を減らすことは難しく、オブジェクトがこのような媒質を含む場合には η'_i のように精度の高い参照値の計算が必要となる。しかしながら、オブジェクトを構成する媒質が水とエタノールのように近い性質を持つ場合は、通常の参照値計算で媒質を正しく同定することができる。

6.3 実験

水とエタノールでは媒質を正しく同定できているが、アルミニウムでは誤った媒質において ϵ の値が最小となっており、媒質を正しく同定することができなかった。実験では照射光子数が約 125,000 /pixel と低いいため、再構成画像において統計変動による量子雑音が多く見られる。しかしながら、我々は ROI 内の値を平均して測定値とすることで量子雑音の影響を受けずに媒質同定を行うことができるため、アルミニウムにおける同定の誤りはこれに依るものではない。また、検出素子ごとに感度補正のキャリブレーションを行ったものの、感度のばらつきから生じるリングアーチファクトが見られるが、これも ROI 内に占める面積の割合が小さいため、平均値を使うことで無視することができる。これらの考えから、アルミニウムにおける同定の誤りは、検出器における検出感度の線質依存性が原因と考えられる。水とエタノールの減衰係数曲線が比較的到低い値を持ち傾きが小さいのに対し、アルミニウムは値が高く傾きも大きいため、オブジェクトを透過した X 線の線質が大きく変化する。これによって検出光子に対する検出器の感度に変化が生じて誤差が出たものと考えられる。しかしながら、水とエタノールではシミュレーション結果と同様に、測定値の正しい媒質の参照値に対する平均誤差率 1.5% 以下という高い精度の同定を行うことができた。

第7章 まとめ

本研究において、我々は我々の提案するフォトンカウンティング X 線 CT システムを用いた媒質同定法の有効性について、シミュレーション結果と実験結果から評価した。シミュレーション結果から、提案手法が有効であることが分かった。また、測定誤差の大きかったアルミニウムの場合を除いて、測定値の理論値に対する誤差率 1.5 % 以下という極めて高い精度で媒質を正しく同定することができ、提案手法が有効であることを実験によって実証することができた。

謝辞

本研究において、全般にご指導頂きました尾川浩一教授，様々なアドバイスをして頂きました彌富仁専任講師，様々な面でお世話になりました尾川研究室の方々に感謝致します。

参考文献

- [1] M. Firsching, D. Niederlohner, T. Michel, " Quantitative Material Reconstruction in CT with Spectroscopic X-ray Pixel Detectors - a Simulation Study, " IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, pp. 2257-2259, 2006
- [2] Watanabe M. , Sato E. , " Energy-discriminating K-edge x-ray computed tomography system, " Proceedings SPIE, Vol. 7080, pp. 0B. 1-0B. 5, 2008
- [3] Macovski A. , Alvarez, R. E. et al, " Energy Dependent Reconstruction in X-ray Computerized Tomography, " Computer Biology Medicine, Vol. 6, pp. 325-336, 1976
- [4] Guowei Z. , Zhiqiang C. , " Exact Reconstruction for Dual Energy Computed Tomography Using an H-L Curve Method, " IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, pp. 3485-3488, 2006
- [5] Cranley K, Gilmore B J, Fogarty G W A, et al, " Catalogue of diagnostic x-ray spectra and other data, " IPEM Report No. 78 CD-ROM, 1997

発表論文

原著および査読付国際論文

1. Tatsuma Hirokawa, Koichi Ogawa, " Identification of Media with a Photon Counting X-ray CT, " Proceedings of the 5th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics, CD-ROM
2. Yuki Futatsumori, Koichi Ogawa, Tatsuma Hirokawa, " Identification of Media with a Photon Counting X-ray CT System, " IEICE Technical Report, Vol. 122, pp. 277-278

国際会議における発表

1. Tatsuma Hirokawa, Koichi Ogawa, " Identification of Media with a Photon Counting X-ray CT, " Proceedings of the 5th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics, Jeju, Korea, 2008/9/10-12

国内学会における発表

1. 広川立磨、尾川浩一、" X線CTを用いた媒質同定におけるデータ収集パラメータの考察 "、第28回日本医用画像工学会大会、名古屋、2009/8/4-5