法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-16

フォトンカウンティング形X線CTシステムを用いた媒質同定法の開発

中村, 翔太 / NAKAMURA, Shota

(発行年 / Year)
2012-03-24
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2012-03-24
(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
2011-33

２０１１年度

修　士　論　文

フォトンカウンティング形X線CTシステムを用いた媒質同定法の開発

Development of Identification Method of a Media with a Photon Counting X-ray CT

指　導　教　授

尾　川　浩　一　教授

法政大学大学院　工学研究科　情報電子工学専攻

10R4141　中村　翔太

法政大学小金井図書館
2012.12.01

目 次

Abstract **2**

第 1 章　はじめに **4**

第 2 章　放射線検出器 **6**
2.1 シンチレーション検出器 6
2.2 半導体検出器 7

第 3 章　X 線 CT **9**
3.1 エネルギー積分形 X 線 CT 9
3.2 フォトンカウンティング形 X 線 CT 10
3.3 X 線 CT を用いた媒質同定法 10
3.3.1 従来手法： デュアルエネルギー X 線法 10
3.3.2 提案手法 10

第 4 章　提案手法 **11**
4.1 手順 11
4.2 ROI の最適な設定方法 13

第 5 章　シミュレーション **14**
5.1 シミュレーション条件 14
5.2 単一媒質 16
5.2.1 純媒質 16
結果: カルシウム，アルミニウム，マグネシウム，水，エタノール . . 16
5.2.2 混合物における濃度変化 19
結果 (a): 水，エタノール 10 %，50 %，90 %，100 % 19
結果 (b): 塩水 4 %，塩水 3 %，水 22
5.3 従来手法 (デュアルエネルギー X 線法) 25
5.4 単一媒質 25
5.4.1 純媒質 25
結果: カルシウム，アルミニウム，マグネシウム，水，エタノール . . 25
5.4.2 混合物における濃度変化 27
結果: 水，エタノール 10 %，50 %，90 %，100 % 27

第 6 章　実験 **29**
6.1 実験装置 29
6.1.1 仕様 29
6.1.2 エネルギースペクトル 30
6.1.3 閾値毎の検出感度の均一性 31

6.1.4 テストチャートを用いた空間分解能調査 32
6.1.5 Step-wedge ファントム (アルミニウム) 33
6.1.6 検出カウントレートの線形性 34
6.1.7 最適なエネルギーウィンドウの調査 35
6.1.8 測定時間における検出カウント量の変化 36
6.2 実験条件 37
6.3 単一媒質 38
6.3.1 純媒質 38
結果: アルミニウム，水，エタノール 38
6.3.2 混合物における濃度変化 41
結果 (a): アルコール濃度：水，エタノール 50 %，100 % 41
結果 (b): 日本酒 15.5 %，芋焼酎 25 %，バーボン 45 %，スピリタス 96 % 44
結果 (c): 塩分濃度：塩水 3 % 47
結果 (d): 100 %オレンジジュース，炭酸水 (無糖)，水，スピリタス 96 % 50

第 7 章 考察 **53**
7.1 純物質 53
7.2 混合物 54
7.3 温度に対するエタノール濃度の密度値 55

第 8 章 まとめ **56**

謝辞 **57**

参考文献 **58**

発表論文 **59**

第 9 章 付録 A 実験装置についての補足 **60**
9.1 HPK 製 C10413LAGH の使用法 60

第 10 章 付録 B 密度の値に対する補足 **63**
10.1 エタノールと塩水の密度の値 63

Abstract

Modern x-ray CT systems measure data corresponding to the sum of the energy of x-ray photons incident to a detector. Thus reconstructed values are a kind of average of linear attenuation coefficients over the whole energy range. So it is hard to measure the true linear attenuation coefficient of a target medium, because a linear attenuation coefficient of a medium is a function of x-ray energies [1]. However, if we could measure an energy spectrum of detected photons with several energy windows with an x-ray CT system, we would be able to identify a medium with its linear attenuation coefficient in a region of interest. The identification of a medium with an x-ray CT would enable us to evaluate the degree of calcification in a vein, and to improve the accuracy of treatment planning in a heavy ion therapy. The aim of this study is to accurately identify a medium with an x-ray CT system, in which data are measured with several energy windows. In this paper, We showed the validity of our identification method of a medium with a photon counting x-ray CT system.

第1章　はじめに

現在，医療現場においてX線CT(Computed tomography)を用いた画像診断は，医師の診察を手助けする装置として重要な役割を担っている．X線は，1985年にドイツの物理学者であるW. C. Rontgenによって発見され，医療分野へ応用された．更に，1975年にイギリスのEMI社のG. N. Hounsfieldらによって世界初となるX線CTが開発され，物体を傷付けることなく，内部の断層画像を得ることが出来るため，医療だけでなく幅広い分野に応用されている．

X線CTは種類が2つある．1つ目は放射形CT(Transmisson CT)と呼ばれ，物体内部に線源を分布させ，外部に放射した放射線を検出器にて測定及び再構成することで断面画像を映像化するものである．そして，この放射形CTに相当するものとしてSPECT(Single Photon Emission CT)がある．SPECTとは，人体内部に放射性同位元素(RI)を投与し，放射される放射線の分布から断層画像を得る装置である．従来のCTでは表わせなかった血流量や代謝機能の情報が得られるため、医療現場においては特に脳血管障害や心疾患の診断等の生体機能を観測する際に用いられる．2つ目は透過形CT(TransmissionCT)と呼ばれるX線CTである．これは物体の外部に線源を置き，照射された放射線が物体を透過した際の減衰分布から断層画像を映像化するものである．そして，本研究においては，この後者のX線CTを用いて媒質の同定を行っている．

透過形X線CTに相当するものとしてエネルギー積分形X線CTとフォトンカウンティング形(光子計数形)X線CTが挙げられる．現在の医療現場において用いられるX線CTは，ほとんどがエネルギー積分形X線CTの方である．このX線CTは，検出器に入射するX線光子の全てのエネルギーを測定しているため，そのCT画像は全エネルギー範囲に渡る線減衰係数の平均値を意味する[1]．これは対象物体の真の減衰係数の測定は困難であることを意味し，このX線CTによる媒質同定は難しい．なぜなら，媒質の線減衰係数はX線エネルギーの関数だからである．媒質同定の従来手法としてデュアルエネルギーX線法[2]がある．これは，エネルギー積分形X線CTにおいて2つの異なるエネルギースペクトルを持つX線を使用し，それぞれのCT画像から得られる線減衰計数値から媒質同定を行う方法である．しかし，使用できるエネルギー情報が少ないために精度が低いという欠点がある．一方で，もしX線CTシステムを用いて複数のエネルギーウィンドウ毎にX線光子を測定可能ならば，関心領域(ROI)におけるその線減衰係数値を用いて媒質の同定が可能となる．そして，この複数のエネルギーウィンドウ毎に測定を可能にする技術として，フォトンカウンティング技術を用いたフォトンカウンティング形X線CTがある．

我々は，このフォトンカウンティング形X線CTを用いて4つのエネルギーウィンドウに対して得られる再構成画像を作成し，その画像から得られた物体の線減衰係数のセットを用いることで媒質同定を行うという方法を提案した[3-5]．その際に我々は，事前に個々の媒質に対する各エネルギーウィンドウの線減衰係数の参照値を計算する．そして，この参照値とフォトカウンティング形X線CTを用いて測定した値を比較することで対象となる媒質の同定を行う．本論文では，このフォトンカウンティング形X線CTを用いた提案手法における媒質同定法の結果を示す．提案手法における媒質同定の有効性を評価するために，モンテカルロ法を用いたシミュレーション及び幾つかの媒質を用いた実験を行った．その結果，フォ

トンカウンティング形X線CTシステムを用いた提案手法により，アルミニウムや水，エタノール等の純物質の媒質同定を可能としただけでなく，水とエタノールの濃度変化を5％の濃度差において，また塩水の濃度変化を1％の濃度差において正確に媒質同定が可能であること示した．

最後に，本論文の構成を示す．第2章で放射線検出器，第3章では2種類のX線CTとそれらを用いた従来手法であるデュアルエネルギーX線法及び提案手法の違いを説明し，第4章では提案手法の詳細な手順を説明する．第5章及び第6章においてはにおいてはシミュレーションと実験から提案手法の有効性を示す．そして，第8章で考察，第7章でまとめを記述する．

第2章　放射線検出器

現在，医療現場のX線CTとして用いられる放射線検出器は，シンチレーション検出器である．シンチレーション検出器とは，シンチレータにおいて検出されたX線光子から発せられる光をフォトダイオードを用いて電気信号に変換することで測定する検出器である．しかし，X線光子を光に変換後に測定するため，検出効率が低下し，再構成された画像の鮮明さも低下する欠点がある．そこで，この欠点を改善した検出器として近年登場したのが半導体素子を用いた半導体検出器であり，この検出器はシンチレーション検出器に代わる検出器として期待されている．ここでは，シンチレーション検出器と半導体検出器の構造について示す．

2.1　シンチレーション検出器

シンチレーション検出器の構造図をFig. 2.1に示す．この検出器には，シンチレータ(蛍光体)が用いられ，光信号を検出可能なフォトダイオードと組み合わせて使用するのが一般的である．シンチレータとは，放射線を吸収すると相互作用を起こし，構成する原子が励起する．その後，励起状態から安定状態に原子が戻ろうとする際に光を放射する物質のことである．検出器のシンチレータには，Table 2.1が示すようにヨウ化ナトリウム(NaI(Tl))やコウ化セシウム(CsI(Tl))，ゲルマニウム酸ビスマス(BGO)，タングステン酸カドミウム($CdWO_4$)等が使われている．これらの物質は原子番号の大きな元素を含むため，単位体積あたりの放射線の検出効率が高いことから用いられている．そして，これらを使用することでγ線やX線を光に変換し，フォトダイオードで測定することが出来る．また，Fig. 2.1に示すように，シンチレータの外側は放射線を透過できる反射材等で覆うことで，背景光がシンチレータを通してフォトダイオードに入らないように遮光し，誤検出を防いでいる．同時に発生した光をフォトダイオード以外に漏らさない構造になっている．しかし，シンチレータ検出器には欠点がある．それは検出した放射線を一度光に変換し，測定を間接的に行うことである．これにより，その分検出効率が低下し，画質を劣化させてしまう．

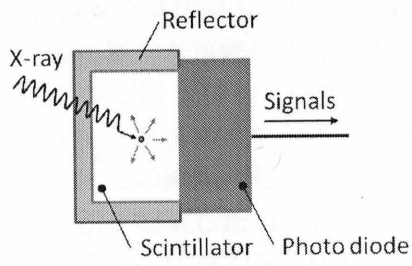

Fig. 2.1: シンチレーション検出器の構造

Table 2.1: シンチレータの特性

シンチレータ	密度 [g/cm^3]	屈折率	発光波長 [nm]	減衰時間 [nsec]	潮解性
NaI(Tl)	3.67	1.85	415	230	有
CsI(Tl)	4.51	1.79	565	1000	有
BGO	7.13	2.15	480	300	無
$CdWO_4$	7.90	2.25	540	5000	無

2.2 半導体検出器

半導体検出器は，半導体の電離現象を電気信号として取り出すことで放射線を検出する．そのため，シンチレーション検出器とは異なり，放射線を間接的でなく直接検出することを可能とする検出器である．半導体検出器の検出素子は，面積の大きいダイオードである．放射線により空乏層内で発生する電子と正孔 (ホール) は電極によって集められる．そして，集められた電荷量は放射線のエネルギーに比例し，出力のパルス数は線量に比例する．半導体として用いられる素子として，Si や Ge 等の単結晶半導体素子があるが，バンドギャップに関して Table. 2.2 に示すように CdTe と比べると値が低いため検出効率の面で Si や Ge は CdTe に劣る．一方で，CdTe は Si や Ge と比較して原子番号が大きいため，NaI と同じレベルの高い検出効率を持っている．さらに，Fig. 2.2 が示すように，CdTe は厚さ 5 mm ならば，100 keV の場合はほぼ 100 %の検出効率を達成できるが，Si は検出効率が 20 %にしかならない．100 keV の放射線では，Si を使うと検出効率が非常に低く検出は難しいが，CdTe を使うと検出が可能ということを示している．また，Ge 半導体の場合はバンドギャップは 0.67 eV と小さく，液体窒素温度という動作温度が要求されるのに対し，CdTe 半導体のバンドギャップは 1.4 eV と比較的大きい．そのため，CdTe 半導体検出器では，Ge 検出器で使用するような大掛かりな冷却装置を必要とせず，室温動作も可能であるという利点がある．そのため，本研究では CdTe 検出器を用いた X 線 CT システムにより媒質同定を行う．

Table 2.2: 半導体素子の特性

	半導体素子		
	Si	Ge	CdTe
原子番号	14	32	48, 52
密度 [g/cm^3]	2.23	5.33	5.85
比抵抗 [Ωcm]	$\sim 10^4$	50	10^9
電子移動度 $\mu_e\tau_e$[cm^2/V·s]	1400	3900	1100
正孔移動度 $\mu_h\tau_h$[cm^2/V·s]	480	1900	100
バンドギャップエネルギー [eV]	1.12	0.67	1.44

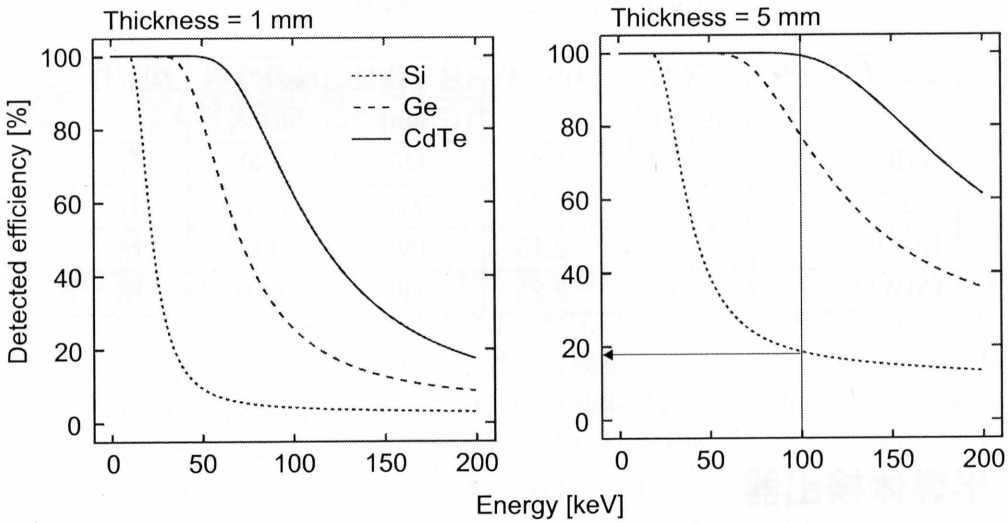

Fig. 2.2: 各半導体素子におけるエネルギー毎の検出効率

第3章　X線CT

現在の医療現場において, 一般的に用いられてるX線CTは，エネルギー積分形X線CTである．これはCT画像を再構成するためのデータを収集する際に，X線光子がもともと持っていたエネルギーの情報を捨てて，全体として検出されたエネルギーを積分した情報のみを使って再構成画像を作成している．そのため，計測値に対して低エネルギーの領域の検出光子が少なくなり，ビームハードニングの影響で再構成画像のコントラスト低下及びアーチファクトが発生してしまう問題がある．これらの問題を解決するX線CTが，フォトンカウンティング形X線CTである．これは，入射光子をエネルギー毎に検出することを可能とするため，低エネルギーのX線が高エネルギーのX線に影響を及ぼす事はない．そのため，画質の改善及びアーチファクトの軽減を可能とするので，次世代のX線CTとして期待されている．

3.1　エネルギー積分形X線CT

エネルギー積分形X線CTとは，入射するX線光子の全てのエネルギーの積分値を測定している．そのため，得られるCT画像はX線の全てのエネルギー範囲に渡る線減衰係数の平均値から作られている．以下に，エネルギー積分形X線CTにおける投影データの算出方法を示す.

初めに，X線管と検出器との間に物体を置かずに測定した場合のX線強度をI_0は，

$$I_0 = \int S_{w/o}(E) \cdot EdE \tag{3.1}$$

次に，物体を置いた場合のX線強度をIは，

$$I = \int S_{w/o}(E) \cdot E \cdot e^{-\int_x \mu(x;E)dx} dE \tag{3.2}$$

とそれぞれ表せる．ここで，$S_{w/o}$はX線管から放射されるエネルギースペクトル，$\mu(x;E)$は透過物体の線減衰係数，xは物体の透過距離である．そして，投影データPを求める式は，Eq. 3.1とEq. 3.2を用いてEq. 3.3に変形できる.

$$P = \log_e \left(\frac{I_0}{I}\right) = \log_e \left(\frac{\int S_{w/o}(E) \cdot EdE}{\int S_{w/o}(E) \cdot E \cdot e^{-\int_x \mu(x;E)dx} dE}\right) \tag{3.3}$$

この投影データをもとに再構成し，CT画像が作成される.

3.2 フォトンカウンティング形X線CT

フォトンカウンティング形X線CTとは，X線光子を幾つかのエネルギー毎に検出し，X線の減衰量を測定することを可能とするフォトンカウンティング技術を用いたX線CTである．以下に，フォトンカウンティング形X線CTにおける投影データの算出方法を示す．

初めに，X線管と検出器との間に物体を置かずに測定した場合のX線強度をI_0は，

$$I_0 = \int S_{w/o}(E)dE \tag{3.4}$$

次に，物体を置いた場合のX線強度をIは，

$$I = \int S_{w/o}(E) \cdot e^{-\int_x \mu(x;E)dx} dE \tag{3.5}$$

とそれぞれ表せる．そして，投影データPを求める式は，Eq. 3.4とEq. 3.5を用いてEq. 3.6に変形できる．

$$P = \log_e \left(\frac{I_0}{I}\right) = \log_e \left(\frac{\int S_{w/o}(E)dE}{\int S_{w/o}(E) \cdot e^{-\int_x \mu(x;E)dx} dE}\right) \tag{3.6}$$

この投影データをもとに再構成し，CT画像が作成される．

3.3 X線CTを用いた媒質同定法

3.3.1 従来手法： デュアルエネルギーX線法

デュアルエネルギーX線法とは，2つの異なるエネルギースペクトルを持つX線を用いてCT画像を作成し，そのCT画像から得られる物体の線減衰係数情報から媒質同定を行う手法である．ここで，用いられる2つのエネルギースペクトルは低いエネルギーを持つX線(例：管電圧80kVp)と高いエネルギーを持つX線(例：管電圧120kVp)である．X線の減衰量の比が，測定媒質の原子番号に依存することを利用し，媒質の同定を行う．しかし，得られる情報が2つしかないことから精度が低いという問題がある．また，デュアルエネルギーX線を得る方法には，電圧を変えて2回測定する方法やフィルタを用いて2つのエネルギーに分ける方法(Kフィルタ法)が用いられるが，連続X線を使用しているため物質を透過した前後でエネルギーが変化してしまい，測定が正確でないという問題もある．

3.3.2 提案手法

我々は，入射する光子を複数のエネルギーウィンドウで測定することが可能なフォトンカウンティング技術を用いたX線CTシステムを用いる．そして，設定するエネルギーウィンドウは4つ置き，ウィンドウ毎にCT画像を作成する．これらのCT画像から得られた4つの線減衰係数のセットを用いて媒質の同定を行う．その際，4つのエネルギーウィンドウにおける線減衰係数の参照値を種々の媒質についてあらかじめ計算しておき，この参照値と測定値を比較することで未知の媒質の同定を行う．詳細な手順は第4章にて記す．

第4章　提案手法

4.1　手順

以下に提案手法の手順を示す.

1. 初めに，任意の媒質の参照値のセットを前もって計算し，リスト化しておく．媒質同定における参照値 η_i は，以下の Eq. 4.1 を用いて計算した.

$$\eta_i = \frac{1}{x} \log \left(\frac{\sum_{W_i} S_{w/o}(E)}{\sum_{W_i} S_{w/o}(E) \exp\left(-\mu(E)x\right)} \right) \tag{4.1}$$

ここで，x は X 線が物体を透過する距離，W_i はエネルギーウィンドウ，$S_{w/o}(E)$ は入射光子のエネルギースペクトル，$\mu\ (E)$ は当該エネルギーにおける特定媒質の線減衰係数である．η_i は透過距離 x の関数であるため，対象物体に合わせて計算することが必要となる．しかし，x 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しても媒質の同定が可能である．また今回，以下の Fig. 4.1 を示すように，媒質同定の際に候補となる媒質を 44 個用意している．この候補となる媒質は，医療の分野及び爆薬物に対するセキュリティ分野において用いられる媒質で構成されている．線減衰係数値が高い媒質は傾きが大きく，反対に線減衰係数値が低い媒質は傾きが小さいこと示している.

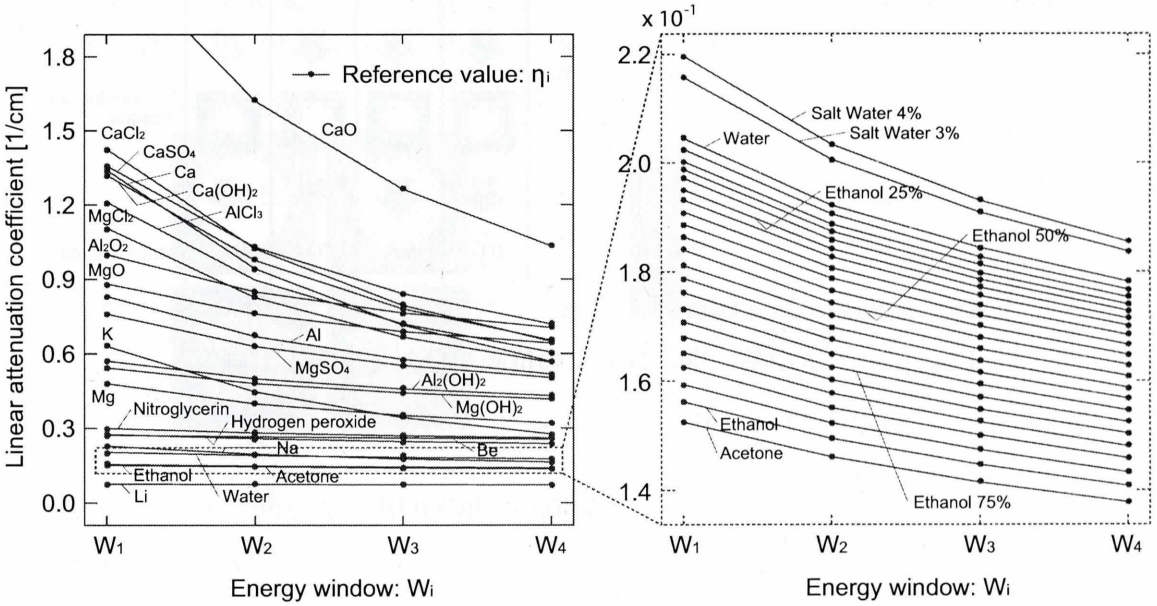

Fig. 4.1: 候補となる媒質の参照値

2. フォトンカウンティング型X線CTシステムにおいて，エネルギー範囲の異なる4つのエネルギーウィンドウ ($W_i : i = 1$〜4) を使用し，測定データから複数のCT画像を得る．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線減衰係数を示すため，各画像において媒質同定したい物質の領域にROIを設定し，Fig.4.2が示すように，ROI内の平均値を線減衰係数の測定値 ($m_i : i = 1$〜4) とする．

3. この測定値を様々な媒質の線減衰係数の参照値 ($\eta_i : i = 1$〜4) と比較することで媒質の同定を行う．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，

$$d = \frac{1}{n} \sum_{W_i} | \, m_i - \eta_i \, | \tag{4.2}$$

という平均誤差dを求める式を用いた．nは使用したエネルギーウィンドウの数 (n=4) である．そして，測定値と種々の媒質の参照値を比較し，この値が最小となる参照値を持つ媒質を関心領域内の媒質と決定した．例として，Fig. 4.4のような結果の場合は，判定媒質をアルミニウムだとみなす．

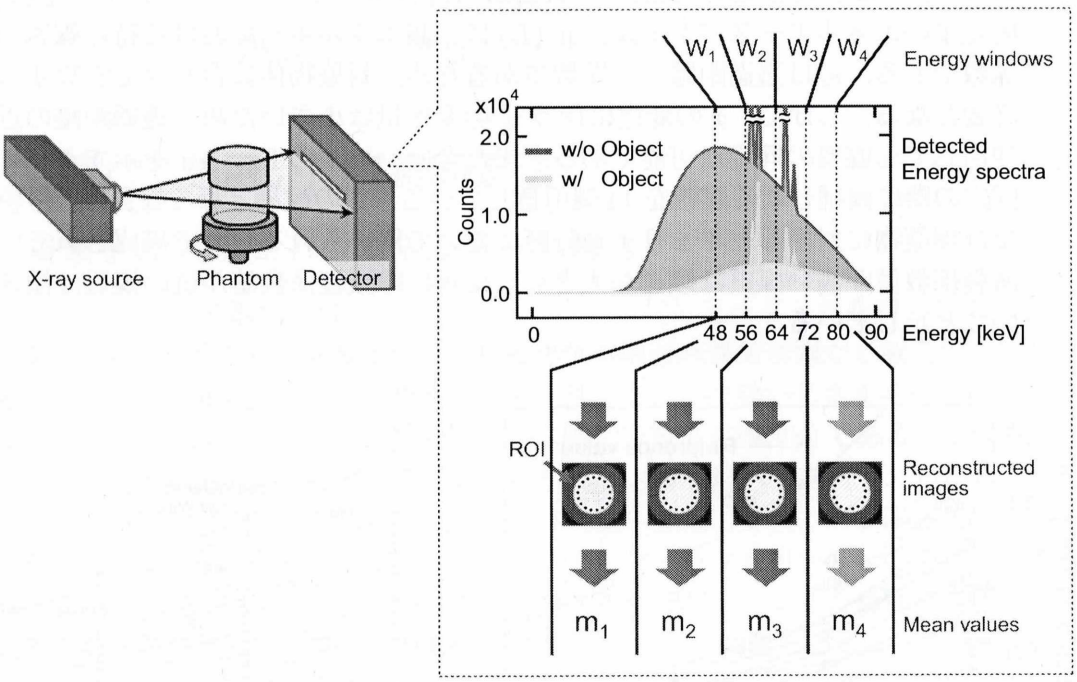

Fig. 4.2: エネルギーウィンドウの位置及び対応するCT画像

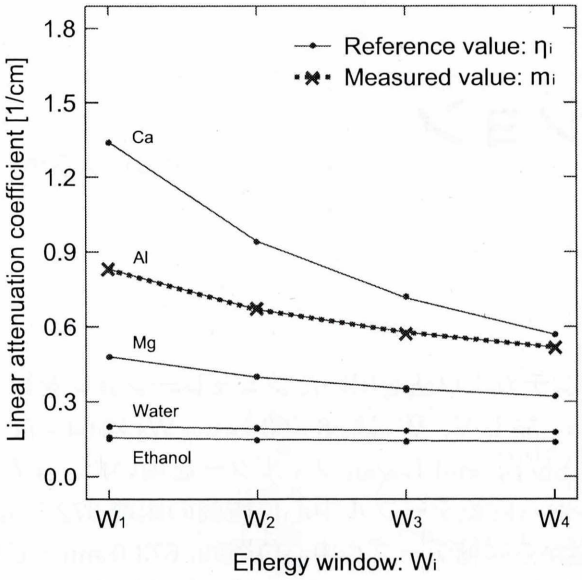

Fig. 4.3: 測定値と候補となる参照値との比較

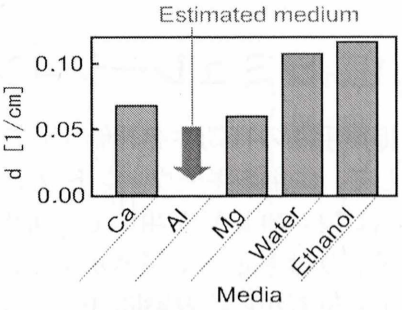

Fig. 4.4: 測定値と候補となる参照値との平均誤差 d

4.2 ROIの最適な設定方法

測定値 m_i を得るための ROI(Region Of Interest) の最適な設定方法を調査した．今回，シミュレーションにおける対象物体には半径 r = 2 cm(40 pixel) の円柱のアルミニウムを仮定している．そして，対象物体の形状と同じ円形の ROI を設定し，得た測定値を参照値と比較し，平均誤差 d を計算する．この時，設定する半径 r = 40, 39, 38, 37, 36, 35 pixel の 6 パターンである．その結果を Fig. 4.5 に示す．結果から分かるように，ROI の半径は対象物体の半径より最低でも 2 pixel 程度内側を取るように設定する必要がある．

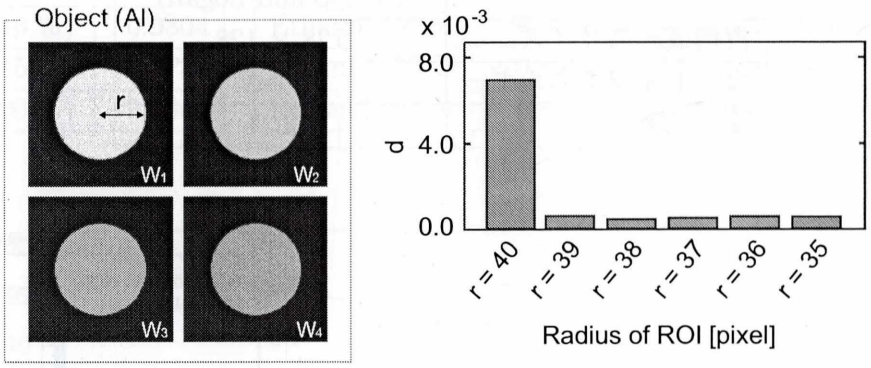

Fig. 4.5: ROI の取り方における平均誤差 d の変化

第5章　シミュレーション

5.1　シミュレーション条件

提案手法の有効性を評価するために，モンテカルロ法を用いたシミュレーションを行った．そして，エネルギーウィンドウは，W_1 は 48 - 55 keV，W_2 は 56 - 63 keV，W_3 は 64 - 71 keV，W_4 は 72 - 79 keV を用いて，再構成法には Shepp and Logan フィルターを用いた．また，ジオメトリは Fig. 5.1 が示すように，X 線源から回転テーブル中心位置間の距離 672.5 mm(X 線照射位置から照射窓間: 9.5 mm + 照射窓から回転テーブル中心位置間: 673.0 mm) であり，回転テーブル中心位置から検出器筐体間の距離 50.0 mm，検出器筐体から検出素子間の距離 48.0 mm と設定した．また，参照値を求める際に用いたエネルギースペクトルは Fig. 5.2 である。第 7 章で示す実験条件と同じ条件下で行った．

Table 5.1: シミュレーション条件

発生光子数	1,000,000 per pixel
管電圧	90 kV
フィルター	Al 10 mm
投影数	180 (360 *deg.*)
検出器のピクセル数	128 pixels
ピクセルサイズ	0.5×0.5 mm^2
再構成法	Filtered backprojection (Shepp and Logan)
再構成画像サイズ	128×128
カットオフエネルギー	30 keV
検出効率	100 %

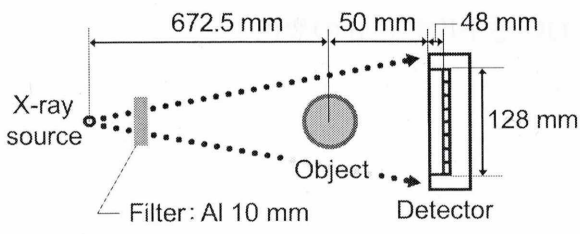

Fig. 5.1: ジオメトリ

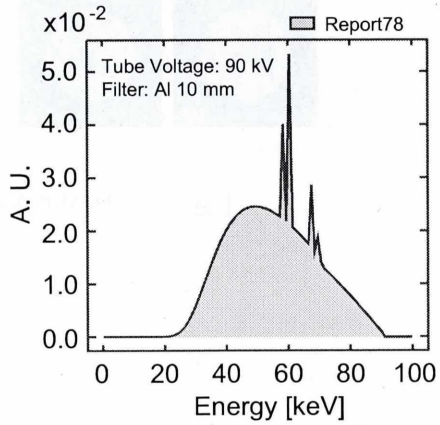

Fig. 5.2: エネルギースペクトル

また今回，参照値に用いた各媒質の密度の値は以下の値を示す．Table 5.2 には純物質の密度を示し，Table 5.3 には混合物の密度を示している。そして，Table 5.3 において示す水やエタノール，塩水に関しては，実験環境下の温度である 25 ℃の時の密度を用いた．また，温度 25 度の時の水とエタノール間の濃度に対する密度値のグラフを示す．そのグラフを見ても分かるように密度値は非線形であることが分かる。

Table 5.2: 使用した純物質の密度

Medium	Density [g/cm^3]	Medium	Density [g/cm^3]	Medium	Density [g/cm^3]
Li	0.534	Ethanol	0.785	Al_2O_3	3.97
Be	1.85	Hydroperoxide	1.4	$Al(OH)_3$	2.42
Na	0.968	Aceton	0.788	$AlCl_3$	2.44
Mg	1.738	Nitroglycerin	1.6	CaO	3.35
Al	2.7	MgO	3.65	$Ca(OH)_2$	2.36
K	0.856	$Mg(OH)_2$	2.36	$CaCl_2$	2.16
Ca	1.55	$MgCl_2$	2.325	$CaSO_4$	2.96
Water	0.997	$MgSO_4$	2.65	-	-

Table 5.3: 使用した混合物の密度

Medium	Density [g/cm^3]	Medium	Density [g/cm^3]	Medium	Density [g/cm^3]
Salt water 3 %	1.0196	Ethanol (25 %)	0.9585	Ethanol (65 %)	0.8751
Salt water 4 %	1.0271	Ethanol (30 %)	0.9506	Ethanol (70 %)	0.8633
-	-	Ethanol (35 %)	0.9410	Ethanol (75 %)	0.8512
Water	0.9970	Ethanol (40 %)	0.9314	Ethanol (80 %)	0.8390
Ethanol (5 %)	0.9887	Ethanol (45 %)	0.9206	Ethanol (85 %)	0.8263
Ethanol (10 %)	0.9804	Ethanol (50 %)	0.9098	Ethanol (90 %)	0.8135
Ethanol (15 %)	0.9734	Ethanol (55 %)	0.8984	Ethanol (95 %)	0.7993
Ethanol (20 %)	0.9664	Ethanol (60 %)	0.8869	Ethanol	0.7850

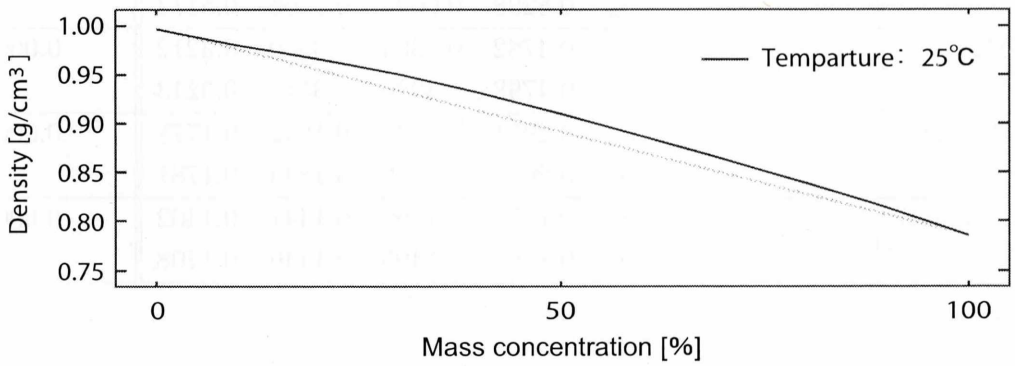

Fig. 5.3: 室温 25 ℃の場合の水とエタノール間の濃度に対する密度値

5.2 単一媒質

5.2.1 純媒質

結果: カルシウム，アルミニウム，マグネシウム，水，エタノール

ここでは，高い原子番号のカルシウムから低い原子番号のエタノールに対して媒質同定がシミュレーションにおいて可能かを示している．以下に結果を示す．Fig. 5.4においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定したROIの番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，シミュレーション値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 5.4 に示す．

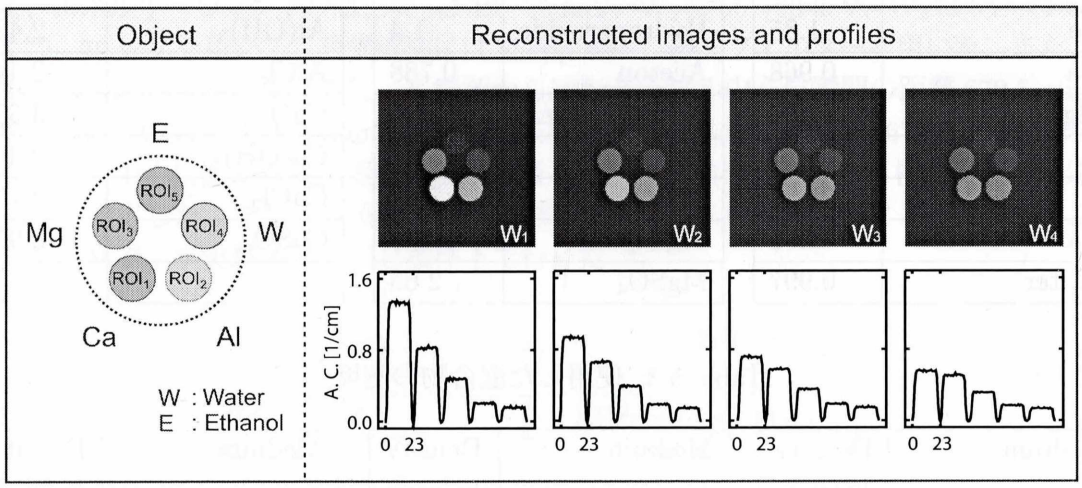

Fig. 5.4: 再構成画像とプロファイル

Table 5.4: 真の媒質の参照値とシミュレーション値との比較

Object		W_1	W_2	W_3	W_4	Averaged Error
ROI_1(Ca)	Simulated value: m_i	1.3323	0.9409	0.7109	0.5663	0.0025
	Reference value: η_i	1.3383	0.9430	0.7118	0.5673	
ROI_2(Al)	m_i	0.8270	0.6685	0.5757	0.5164	0.0015
	η_i	0.8298	0.6698	0.5766	0.5173	
ROI_3(Mg)	m_i	0.4782	0.3984	0.3510	0.3212	0.0007
	η_i	0.4798	0.3990	0.3517	0.3213	
ROI_4(Water)	m_i	0.2051	0.1921	0.1842	0.1778	0.0003
	η_i	0.2044	0.1922	0.1843	0.1781	
ROI_5(Ethanol)	m_i	0.1555	0.1490	0.1441	0.1402	0.0006
	η_i	0.1562	0.1495	0.1446	0.1408	

Fig. 5.5 には，候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との比較を示す.

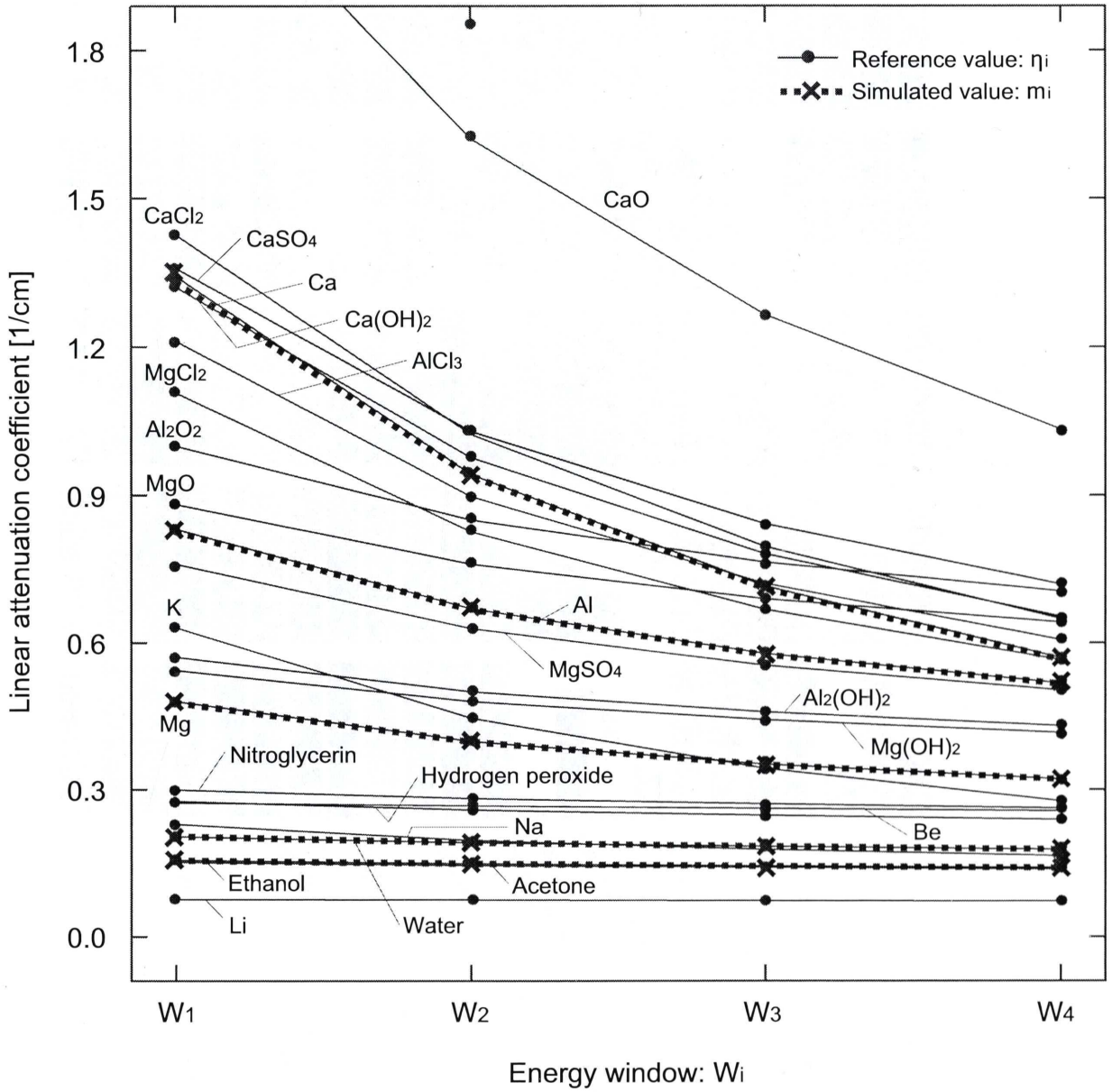

Fig. 5.5: 候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との比較

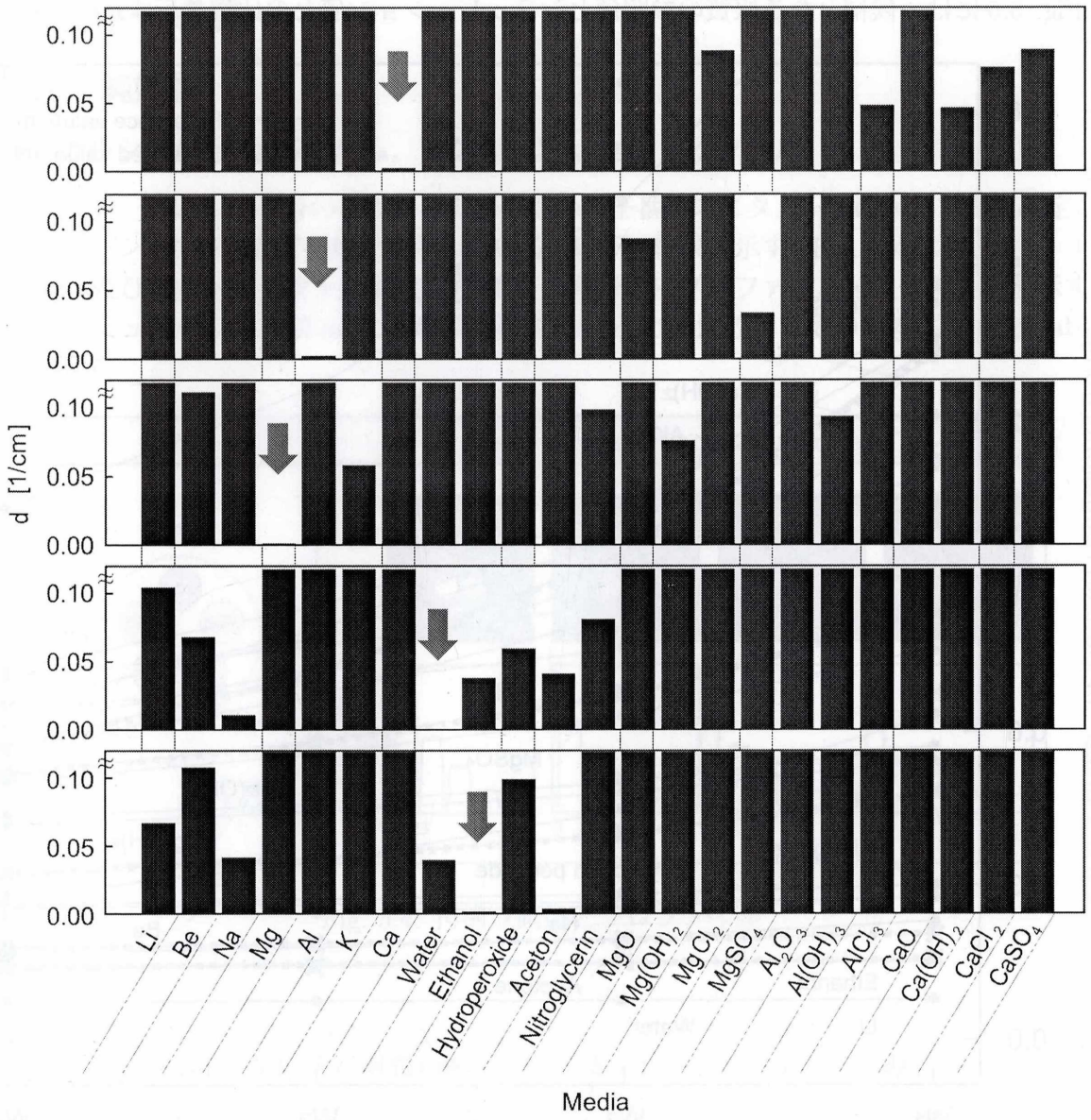

Fig. 5.6: 候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d
(上から ROI_1, ROI_2, ROI_3, ROI_4, ROI_5)

Fig. 5.6 には，候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d を示す．その結果，全ての媒質において正確に媒質同定が出来ていることが分かる．

5.2.2 混合物における濃度変化

結果 (a): 水，エタノール 10 %，50 %，90 %，100 %

低い原子番号のエタノールにおいて，その濃度変化を媒質同定がシミュレーションにおいて可能かを示している．以下に結果を示す．Fig. 5.7においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定したROIの番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，シミュレーション値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 5.5 に示す．

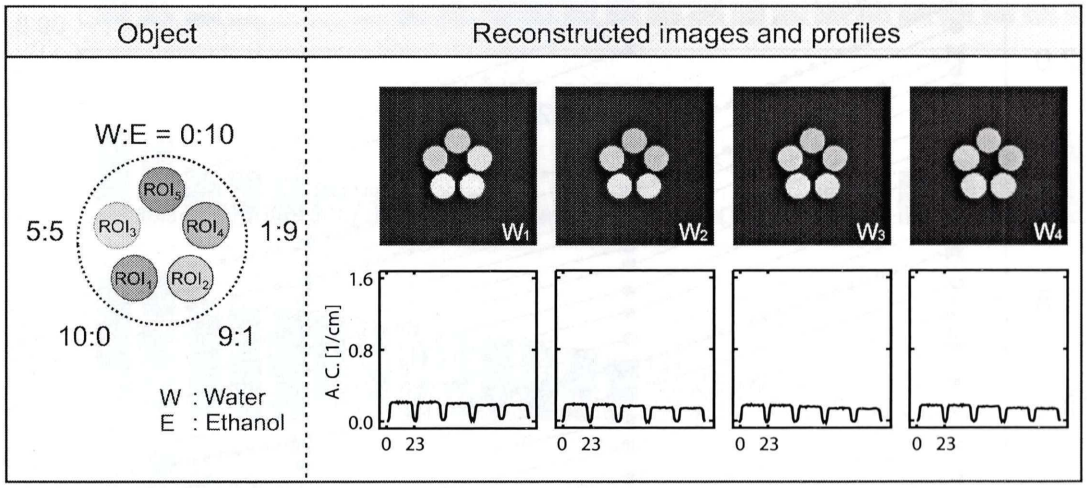

Fig. 5.7: 再構成画像とプロファイル

Table 5.5: 真の媒質の参照値とシミュレーション値との比較

Object		W_1	W_2	W_3	W_4	Averaged Error
ROI_1(Water)	Simulated value: m_i	0.2044	0.1921	0.1841	0.1778	0.0002
	Reference value: η_i	0.2044	0.1922	0.1843	0.1781	
ROI_2(Ethanol 10 %)	m_i	0.2003	0.1885	0.1811	0.1750	0.0001
	η_i	0.2003	0.1887	0.1813	0.1753	
ROI_3(Ethanol 50 %)	m_i	0.1838	0.1741	0.1677	0.1625	0.0002
	η_i	0.1840	0.1743	0.1680	0.1630	
ROI_4(Ethanol 90 %)	m_i	0.1623	0.1551	0.1497	0.1457	0.0001
	η_i	0.1626	0.1551	0.1501	0.1459	
ROI_5(Ethanol)	m_i	0.1561	0.1492	0.1441	0.1403	0.0004
	η_i	0.1562	0.1495	0.1446	0.1408	

Fig. 5.8 には，候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との比較を示す.

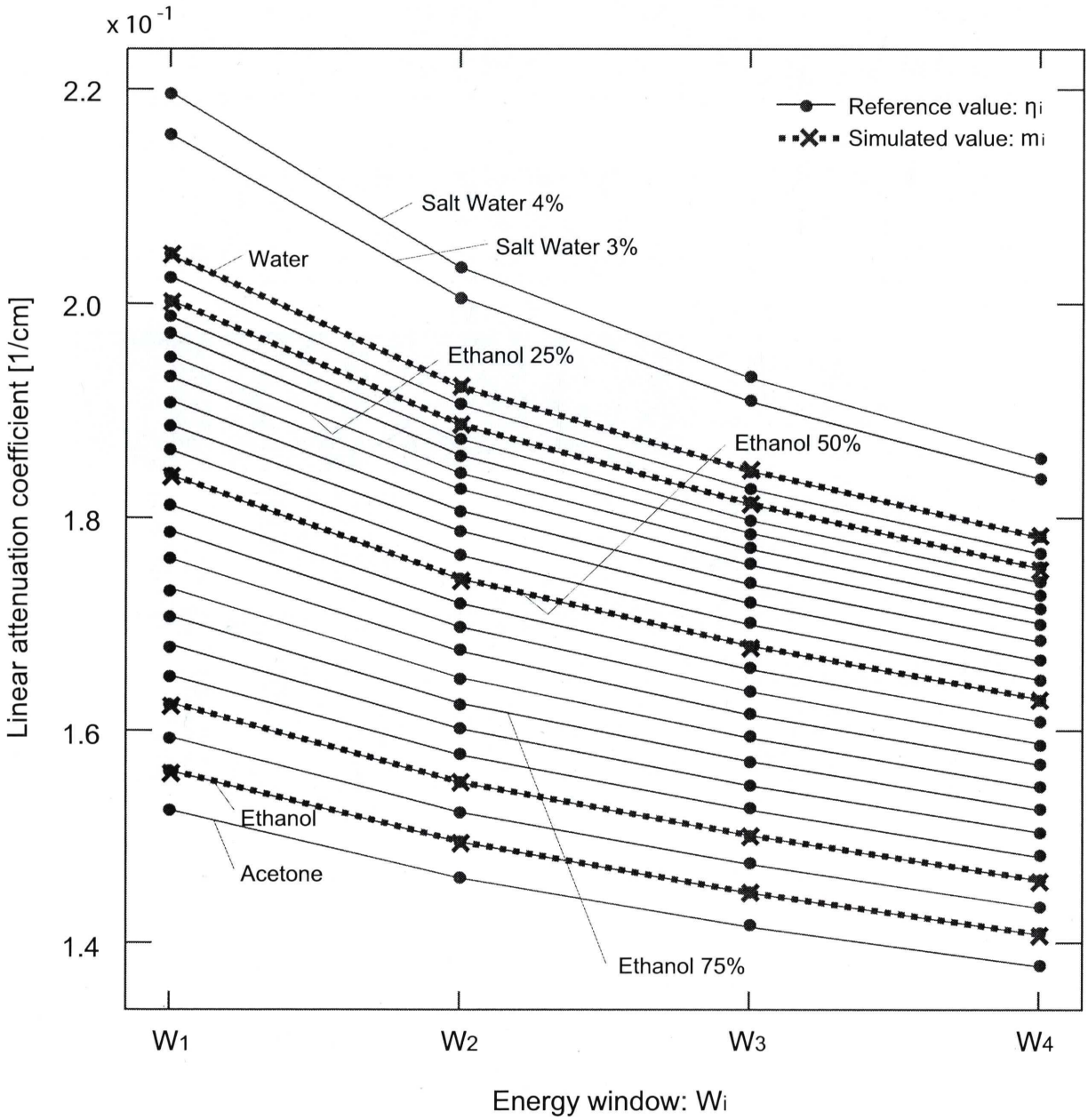

Fig. 5.8: 候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との比較

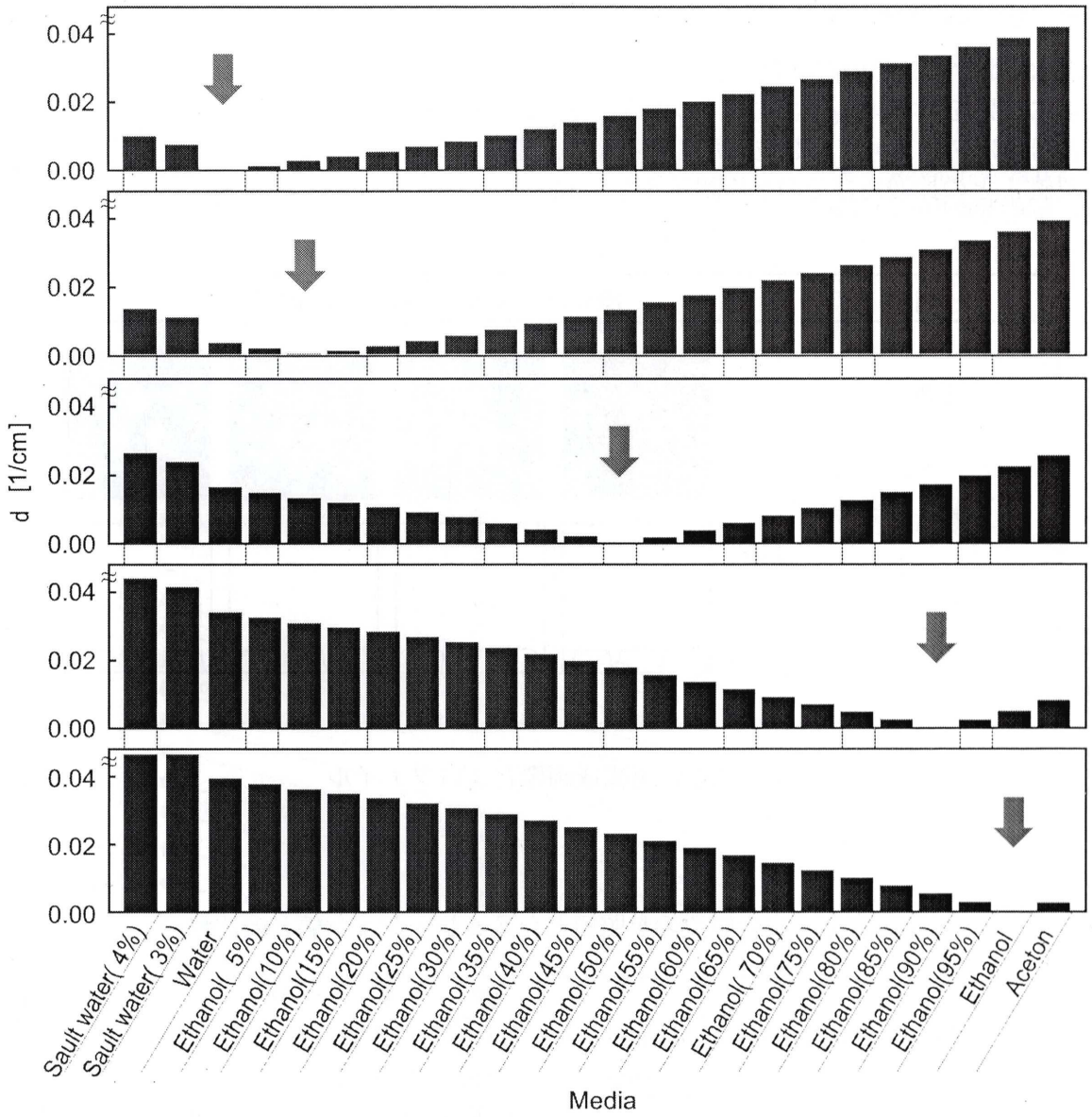

Fig. 5.9: 候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d
(上から ROI_1, ROI_2, ROI_3, ROI_4, ROI_5)

Fig. 5.9 には，候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d を示す．その結果，全ての媒質において正確に媒質同定が出来ていることが分かる．

結果 (b): 塩水 4 %，塩水 3 %，水

塩水において，その濃度変化を媒質同定がシミュレーションにおいて可能かを示している．以下に結果を示す．Fig. 5.10 においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定した ROI の番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，シミュレーション値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 5.6 に示す．

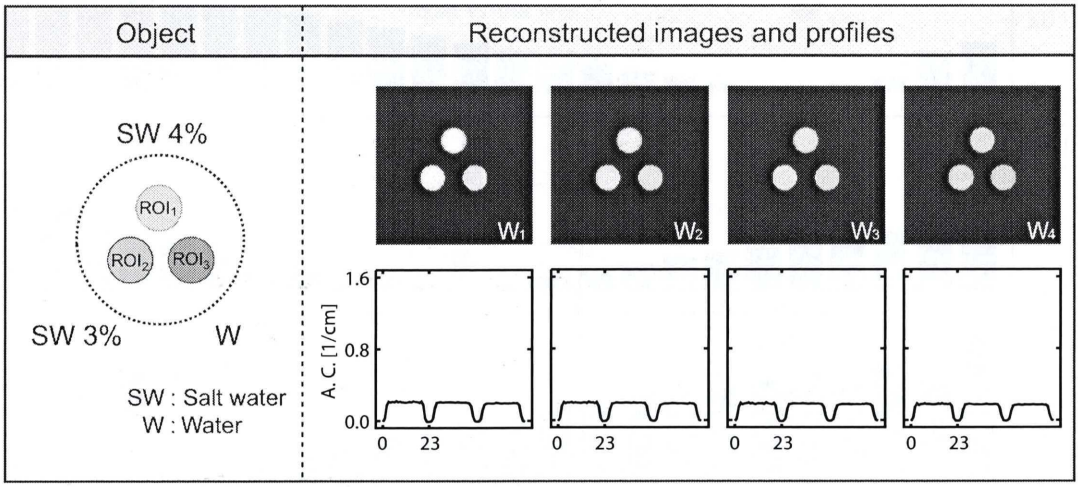

Fig. 5.10: 再構成画像とプロファイル

Table 5.6: 真の媒質の参照値とシミュレーション値との比較

Object		W_1	W_2	W_3	W_4	Averaged Error
ROI_1(Salt Water 4 %)	Simulated value: m_i	0.2195	0.2032	0.1930	0.1849	0.0003
	Reference value: η_i	0.2197	0.2034	0.1931	0.1855	
ROI_2(Salt Water 3 %)	m_i	0.2155	0.2005	0.1906	0.1834	0.0003
	η_i	0.2158	0.2006	0.1909	0.1837	
ROI_3(Water)	m_i	0.2042	0.1921	0.1843	0.1780	0.0002
	η_i	0.2045	0.1922	0.1844	0.1782	

Fig. 5.11 には，候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との比較を示す.

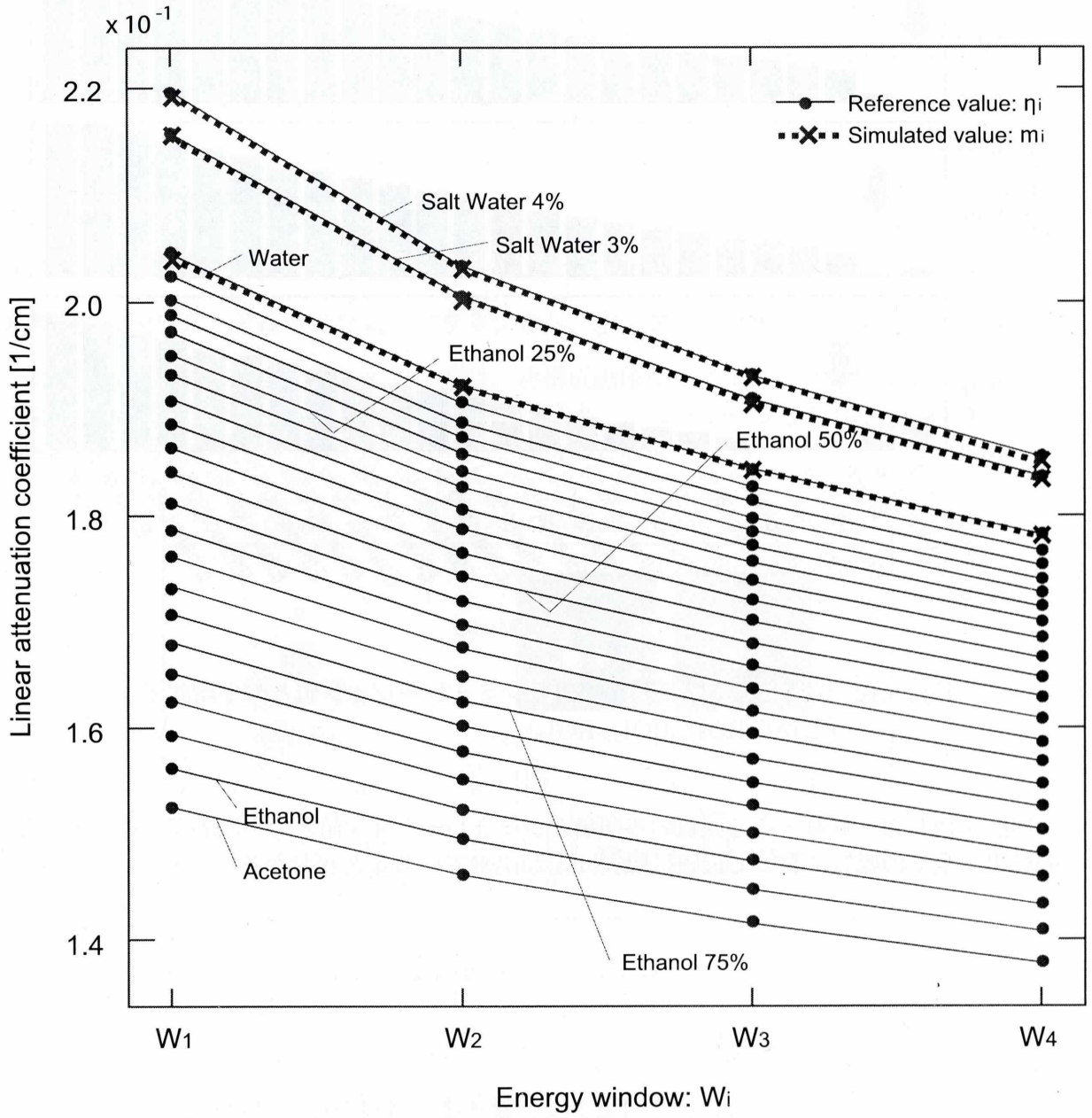

Fig. 5.11: 候補となる媒質とシミュレーション値との比較

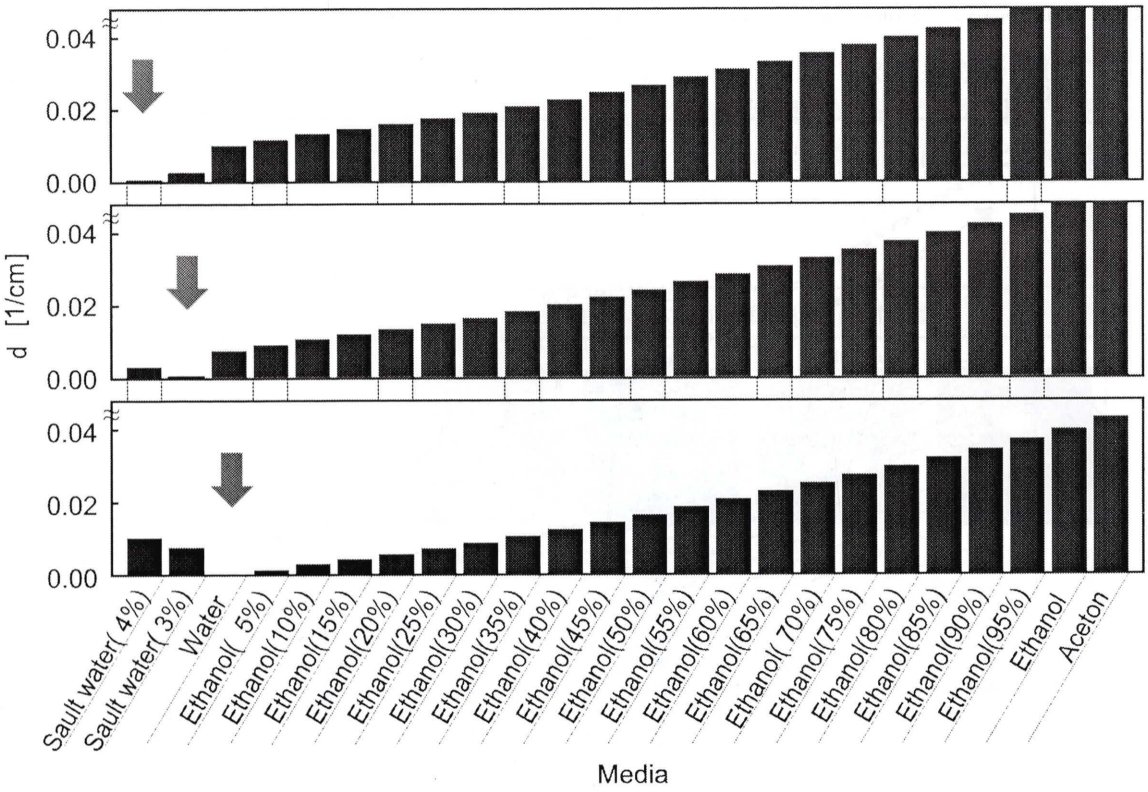

Fig. 5.12: 候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d
(上から ROI_1, ROI_2, ROI_3)

Fig. 5.12 には，候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d を示す．その結果，全ての媒質において正確に媒質同定が出来ていることが分かる．

5.3 従来手法 (デュアルエネルギーX線法)

ここでは，デュアルエネルギーX線法を用いて媒質同定を行った．この際に用いたX線の管電圧は低いエネルギーの 80kVp と高いエネルギーの 120kVp である．それ以外の条件は，Table 5.1 と同様である．

5.4 単一媒質

5.4.1 純媒質

結果: カルシウム，アルミニウム，マグネシウム，水，エタノール

以下に結果を示す．Fig. 5.13 においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定した ROI の番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，シミュレーション値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 5.7 に示す．

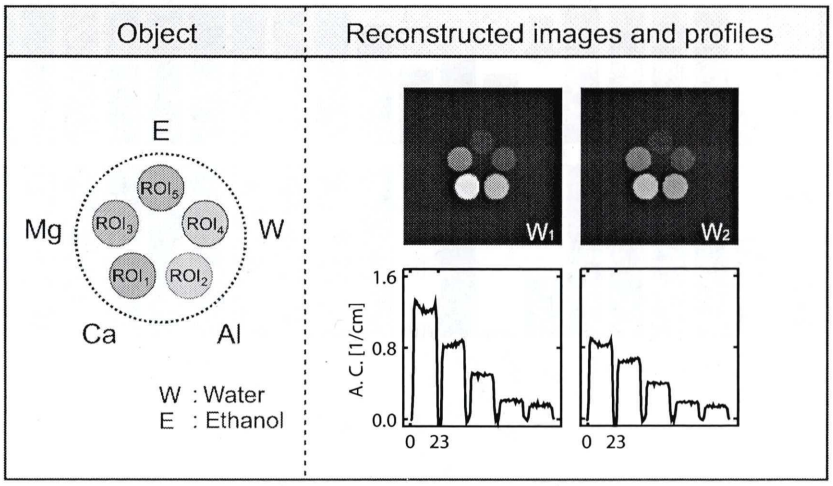

Fig. 5.13: 再構成画像とプロファイル

Table 5.7: 真の媒質の参照値とシミュレーション値との比較

Object		W_1	W_2	Averaged Error
ROI_1(Ca)	Simulated value: m_i	1.2453	0.8539	0.0768
	Reference value: η_i	1.3368	0.9159	
ROI_2(Al)	m_i	0.8464	0.6683	0.0463
	η_i	0.9014	0.7058	
ROI_3(Mg)	m_i	0.5042	0.4087	0.0244
	η_i	0.5332	0.4285	
ROI_4(Water)	m_i	0.2190	0.1996	0.0048
	η_i	0.2130	0.1960	
ROI_5(Ethanol)	m_i	0.1656	0.1539	0.0043
	η_i	0.1603	0.1507	

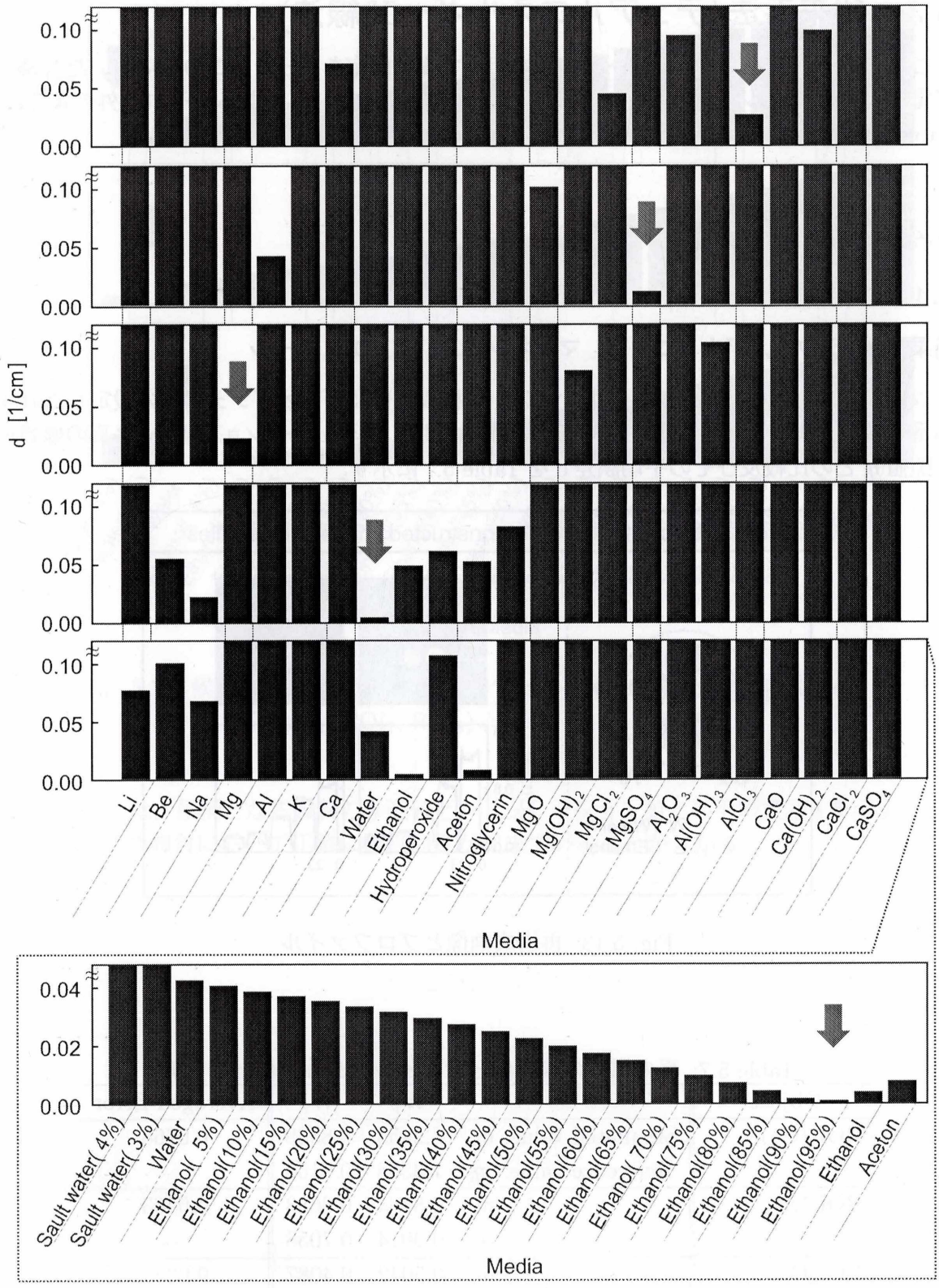

Fig. 5.14: 候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d
(上から ROI_1, ROI_2, ROI_3, ROI_4, ROI_5)

Fig. 5.14 には，候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d を示す．その結果，原子番号が高い媒質のアルミニウムやマグネシウムの同定は出来ないことが分かる．

5.4.2 混合物における濃度変化

結果: 水，エタノール 10 %，50 %，90 %，100 %

低い原子番号のエタノールにおいて，その濃度変化を媒質同定がシミュレーションにおいて可能かを示している．以下に結果を示す．Fig. 5.15 においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定した ROI の番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，シミュレーション値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 5.8 に示す．

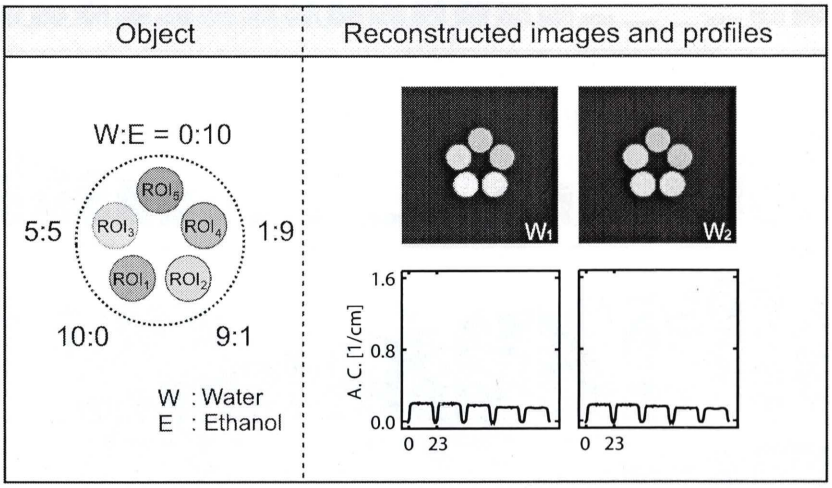

Fig. 5.15: 再構成画像とプロファイル

Table 5.8: 真の媒質の参照値とシミュレーション値との比較

Object		W_1	W_2	Averaged Error
ROI_1(Water)	Simulated value: m_i	0.2124	0.1955	0.0005
	Reference value: η_i	0.2130	0.1960	
ROI_2(Ethanol 10 %)	m_i	0.2079	0.1917	0.0005
	η_i	0.2085	0.1922	
ROI_3(Ethanol 50 %)	m_i	0.1894	0.1762	0.0006
	η_i	0.1901	0.1767	
ROI_4(Ethanol 90 %)	m_i	0.1664	0.1560	0.0005
	η_i	0.1669	0.1565	
ROI_5(Ethanol)	m_i	0.1599	0.1504	0.0004
	η_i	0.1603	0.1507	

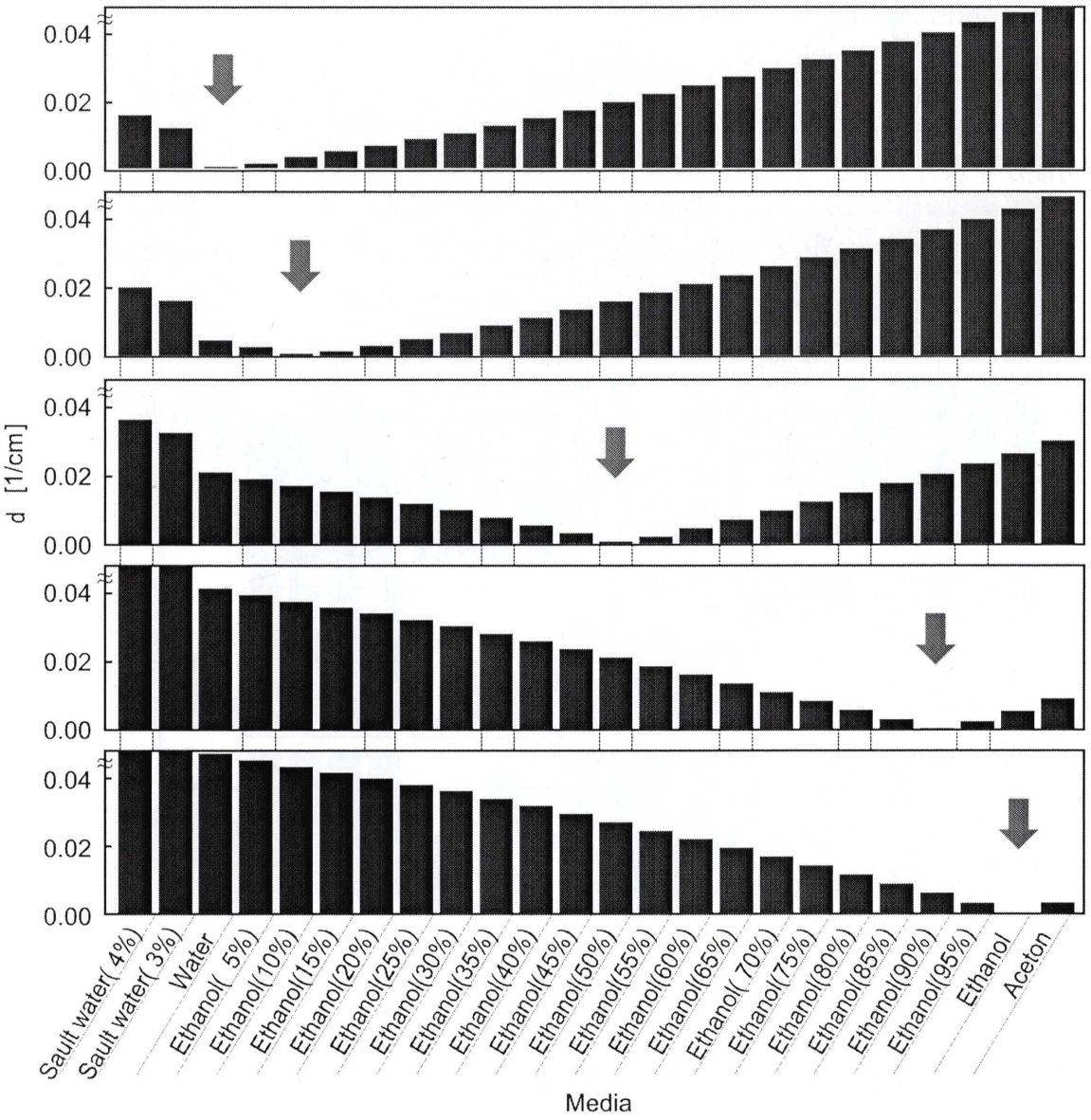

Fig. 5.16: 候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d
(上から ROI_1, ROI_2, ROI_3, ROI_4, ROI_5)

Fig. 5.16 には，候補となる媒質の参照値とシミュレーション値との平均誤差 d を示す．その結果，全ての媒質において正確に媒質同定が出来ていることが分かる．

第6章　実験

6.1　実験装置

6.1.1　仕様

実験装置の外観を Fig. 6.1 に示す．また，今回実験に用いた X 線管はマイクロフォーカス X 線管 L9121(浜松ホトニクス製 (HPK 製))，検出器はエネルギー弁別型 128ch CdTe 型放射線ラインセンサ C10413LGAH(HPK 製) である．それぞれの装置の特性については Table 6.1, Table 6.2 に示す．

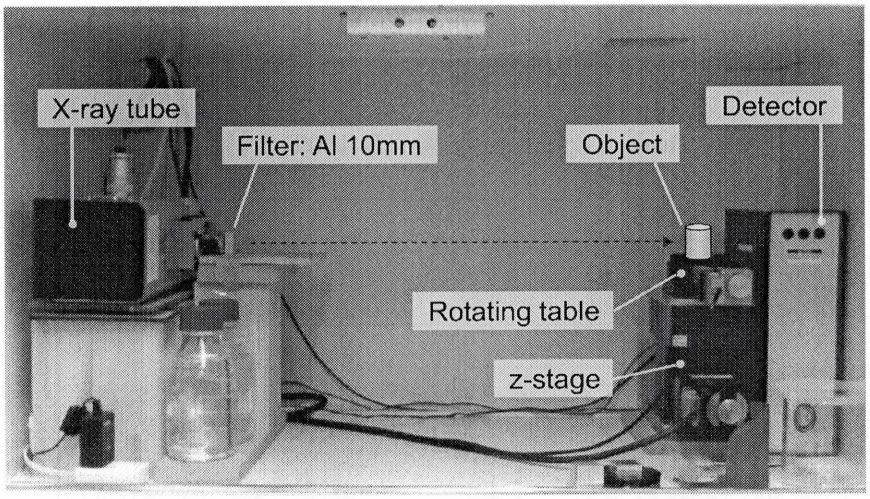

Fig. 6.1: 実験装置の外観

Table 6.1: X 線管の特性

管電圧	20 ～ 90 kV
管電流	0 ～ 250 μA
照射窓	Be 150 μm
焦点寸法	7 μm
筐体から焦点距離	9.5 mm
放射角度	39 deg.

(HPK 製 Micro forcus X-ray source L9121)

Table 6.2: CdTe 型検出器の特性

検出素子	CdTe
素子数	128
素子サイズ	0.45×0.5 mm^2
素子の厚さ	5 mm
最大カウントレート	100k s^{-1}
検出効率	85 % (at 100 keV)

(HPK 製 C10413LAGH)

6.1.2 エネルギースペクトル

X線のエネルギースペクトルを測定するために，HPK製 C10413LAGH と Amptek製 XR-100T の放射線検出器で測定した．結果を以下に示す．また，左図は Report78 より得た理論値も示している．条件は，管電圧 90kVp でフィルタに 10 mm のアルミニウムを置いている．X線管のエネルギースペクトルを調べるために用いた Amptek製 XR-100T の外観及び特性を以下に示す．

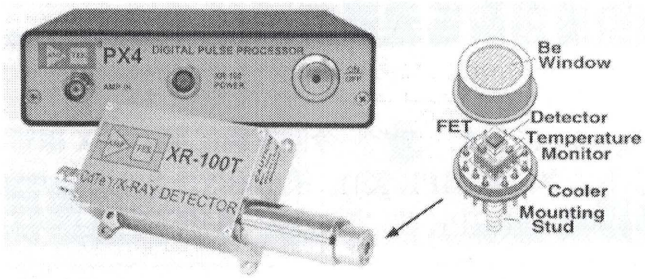

Fig. 6.2: Amptek製 XR-100T

Table 6.3: Amptek製 XR-100T の特性

検出素子	CdTe
検出器サイズ	3 × 3 mm 5 × 5 mm
検出器の厚さ	1 mm
エネルギー分解能 @ 122 keV, ^{57}Co	9 mm^2: 1.2 keV FWHM 25 mm^2: 1.5 keV FWHM
Be窓	100 μ m
チャネル数	1024

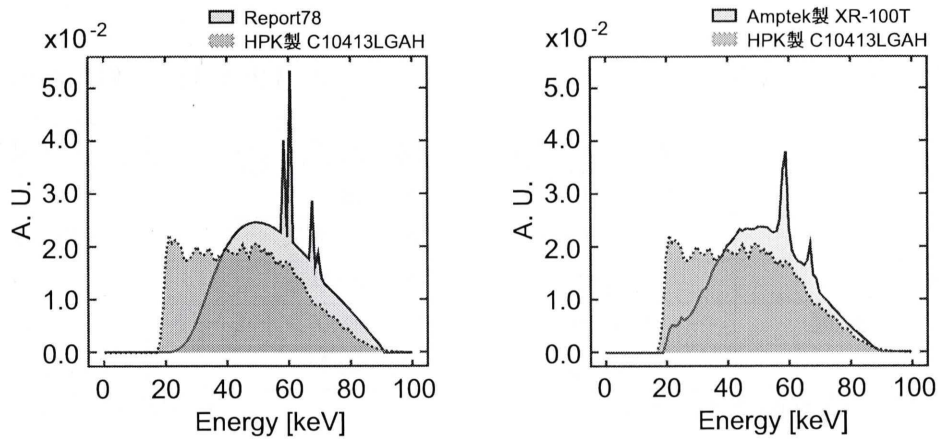

Fig. 6.3: エネルギースペクトル

6.1.3 閾値毎の検出感度の均一性

X線管と検出器間にフィルタ以外のオブジェクトを置かずに測定を行い，検出器における放射線の検出感度を調べた．実験に用いたフォトンカウンティング型検出器は，閾値を5つ設定可能 (Thr. 1〜Thr. 5) のため，全ての閾値において検出感度が均一であるか調査実験を行った．また，閾値は 48, 56, 64, 72, 80 keV である．その結果，全ての閾値は同じ検出感度を持っていることを以下の Fig. 6.4 で示す．

Table 6.4: 測定条件

管電圧	90 kV
管電流	10 μA
フィルター	Al 10 mm
データ収集時間	20 sec

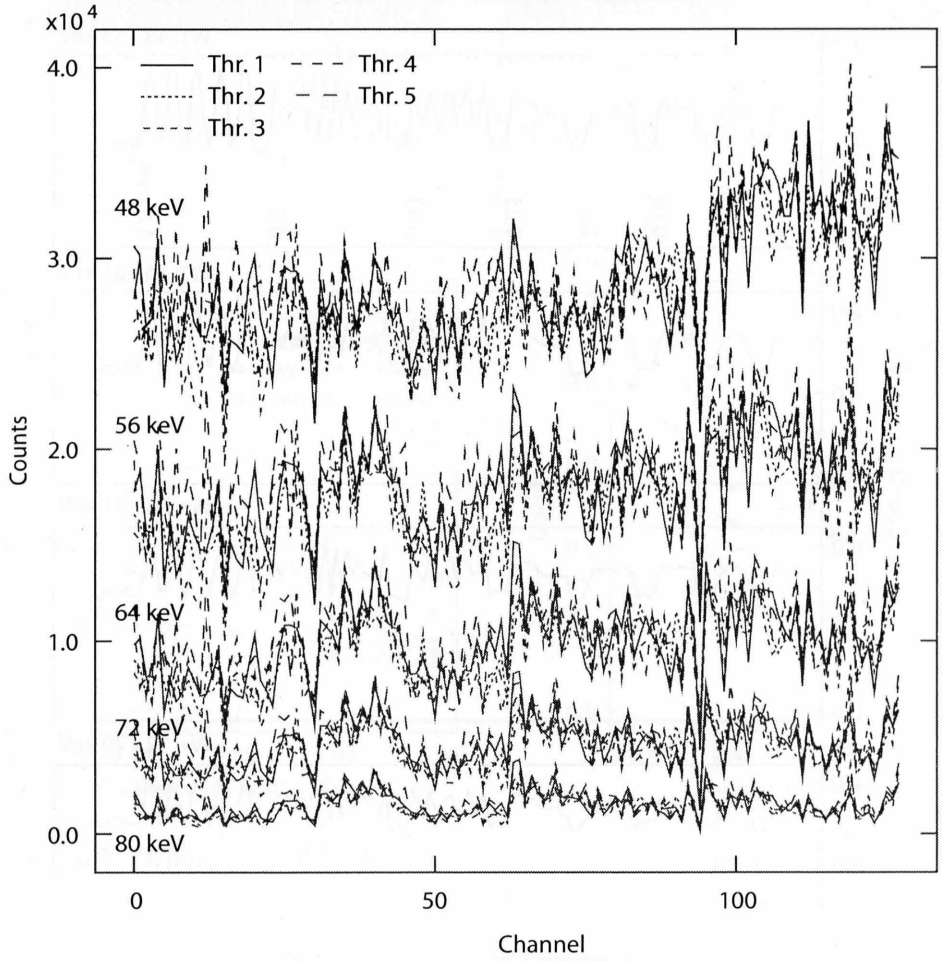

Fig. 6.4: 閾値毎の検出感度

6.1.4 テストチャートを用いた空間分解能調査

ここでは，テストチャート (化成オプトニクス株式会社製 X 線テストチャート Type 7) を用いて空間分解能の調査を行った．テストチャートの隙間の大きさは，それぞれ 1.0, 0.5, 0.33, 0.25, 0.2, 0.16, 0.125, 0.1 mm である．また，測定条件は Table 6.5 と同様であり，エネルギーウィンドウはシミュレーションの時と同様である.. 測定結果を以下に示す．この時に，検出器の素子の大きさは 0.5 mm であるため，理論的には右から 2 番目の 0.5 mm が正確に測定できるはずだが，実際は右から 1 番目の 1.0 mm が限界であることが以下の結果から分かる.

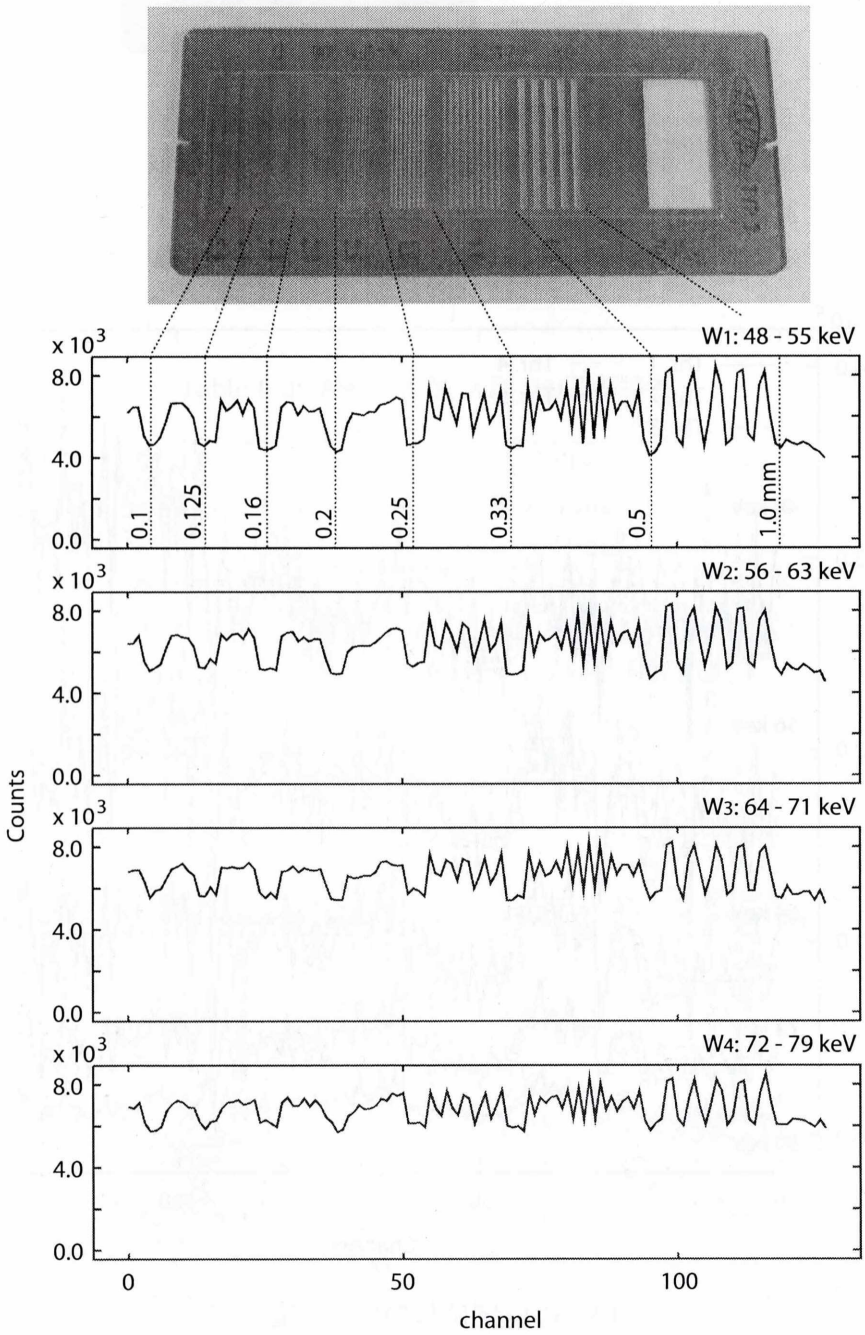

Fig. 6.5: テストチャートを用いた空間分解能調査

6.1.5 Step-wedge ファントム (アルミニウム)

アルミニウムの Step-wedge ファントムを用いて測定を行った．測定条件及び設定エネルギーウィンドウは 6.1.3 節の時と同様である．以下に実験に用いたファントム (Fig. 6.6) 及び測定結果を示す．Fig. 6.7 は測定データからアルミニウムの厚さが異なる領域毎に ROI を取り，その平均値をプロットしたグラフである．また，Fig. 6.7 は Lambert Beer の法則を用いて計算した値である．この結果が示すのは，右の W_1 の値が右のグラフと比較して実験における値の場合，W_3 とは離れ，W_2 のグラフに近づいているのが分かる．これは，チャージシェアリングの影響により高いエネルギーの光子が低いエネルギーとして誤検出されてしまうためである．

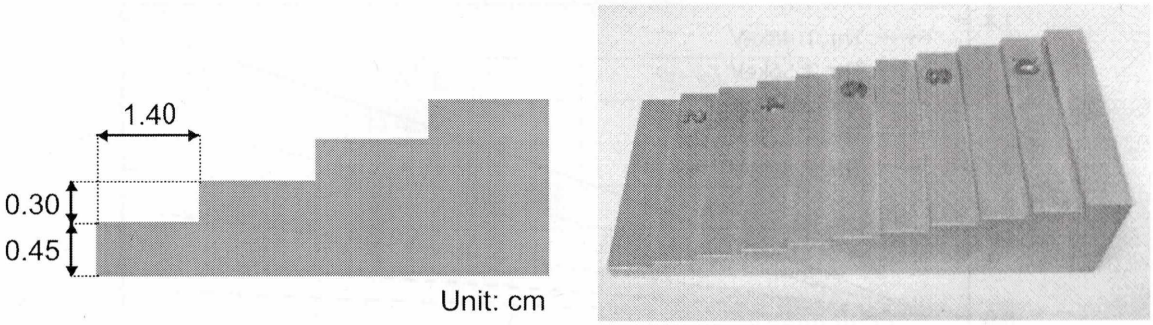

Fig. 6.6: Step-wedge ファントム (アルミニウム)

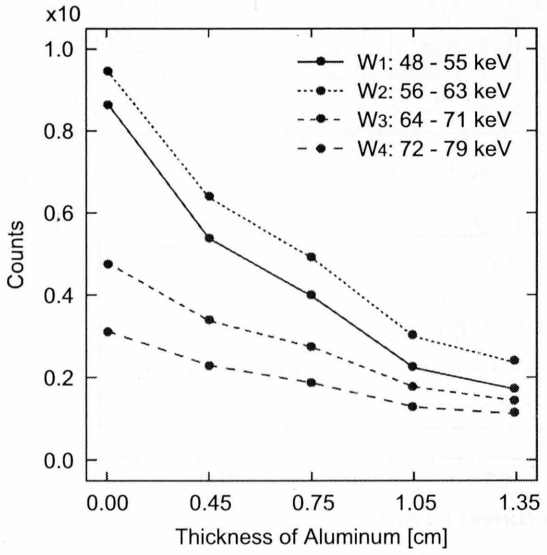

Fig. 6.7: 実験による測定値

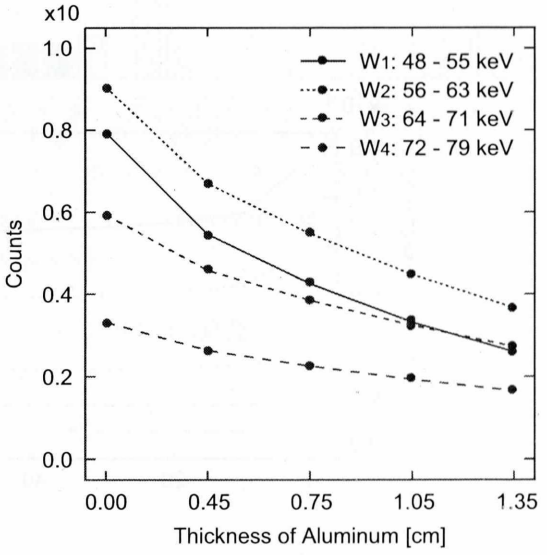

Fig. 6.8: 理論値

6.1.6 検出カウントレートの線形性

X 線管の管電圧を 90 kVp に固定して，管電流を 2, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 μA で測定した．その結果を Fig. 6.9 に示す．また，右の Fig. は Fig. 6.9 をそれぞれの管電流で割ったものである．その結果から分かるように，左では線形に見えるが実際は低い管電流ではカウント数が高く，管電流の上昇と共に徐々に下がる傾向にあるため，一定にはならない．また管電流更に上げていくと高いエネルギーでは若干高くなる傾向にある．この結果から，高カウントレート測定ではパイルアップが生じていると考えられるため，測定は低カウントレートで行うのが良いと考えられる．

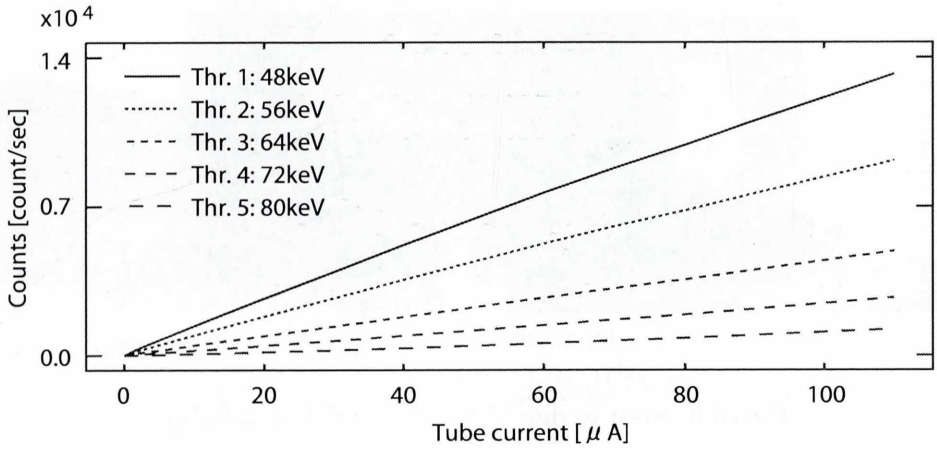

Fig. 6.9: カウントレート [count/sec]

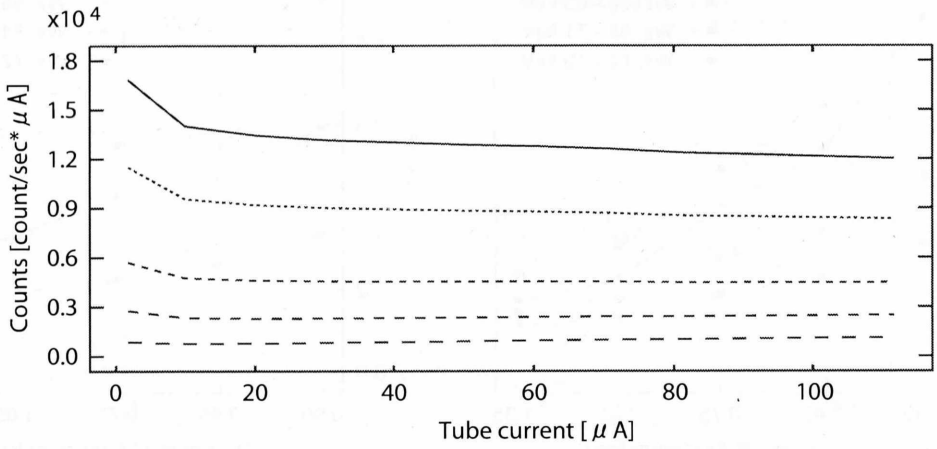

Fig. 6.10: カウントレート [count/sec* μ A]

6.1.7 最適なエネルギーウィンドウの調査

実験において最適なエネルギーウィンドウを選択するため調査を行った．調査方法は，アルミニウムを測定し，投影データを作成する．その投影データ値とLambert Beerの法則を用いて算出した投影データの理論値とを比較し，誤差が小さいところを選択する．その結果，48 keV以下では，チャージシェアリングの影響で，理論値との誤差が大きくなると思われる．そのため，48 keV以上でエネルギーウィンドウを作成するのが最適であることが分かる．また5 keV刻みにエネルギーウィンドウを設定すると検出カウント数が少ないために値の変動が大きいことから，我々は48 keVから80keVまでを8 keV刻みで4つのウィンドウで行うことに決めた．

Table 6.5: 測定条件

管電圧	90 kV
管電流	10 μA
フィルター	Al 10 mm
データ収集時間	20 sec
オブジェクト	平板 Al 10 mm

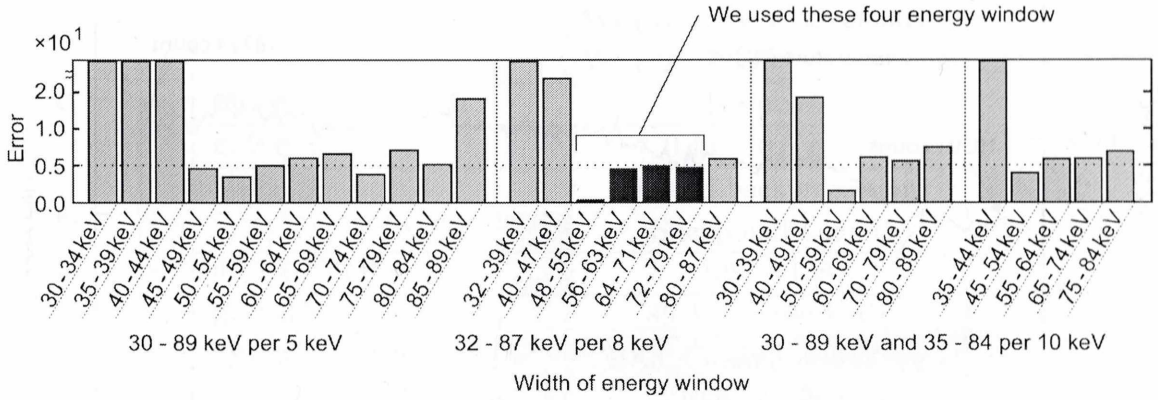

Fig. 6.11: 最適なエネルギーウィンドウの調査

6.1.8 測定時間における検出カウント量の変化

測定条件をTable 6.6に示す．この時，X線管と検出器間に物体を置かずに測定を行った．そして，全体的に3時間半の測定を行い、X線の検出カウント量に変化が出るかを調査した．結果をFig. 6.12に示す．その結果が示すように，測定開始時はチャネル毎の平均カウント数が18591カウントであるのに対して，3時間半後は18724カウントと約230カウントも検出カウント数が増加することがわかる．この理由は，検出素子にペルチェ機構をはじめとする冷却機構が無いために検出素子の温度が上昇し，検出感度が変化するためだと考えられる．そのため，測定時間は可能な限り短時間で行う方が良い。

Table 6.6: 測定条件

管電圧	90 kV
管電流	10 μA
フィルター	Al 10 mm
データ収集時間	10 sec
閾値	40 keV

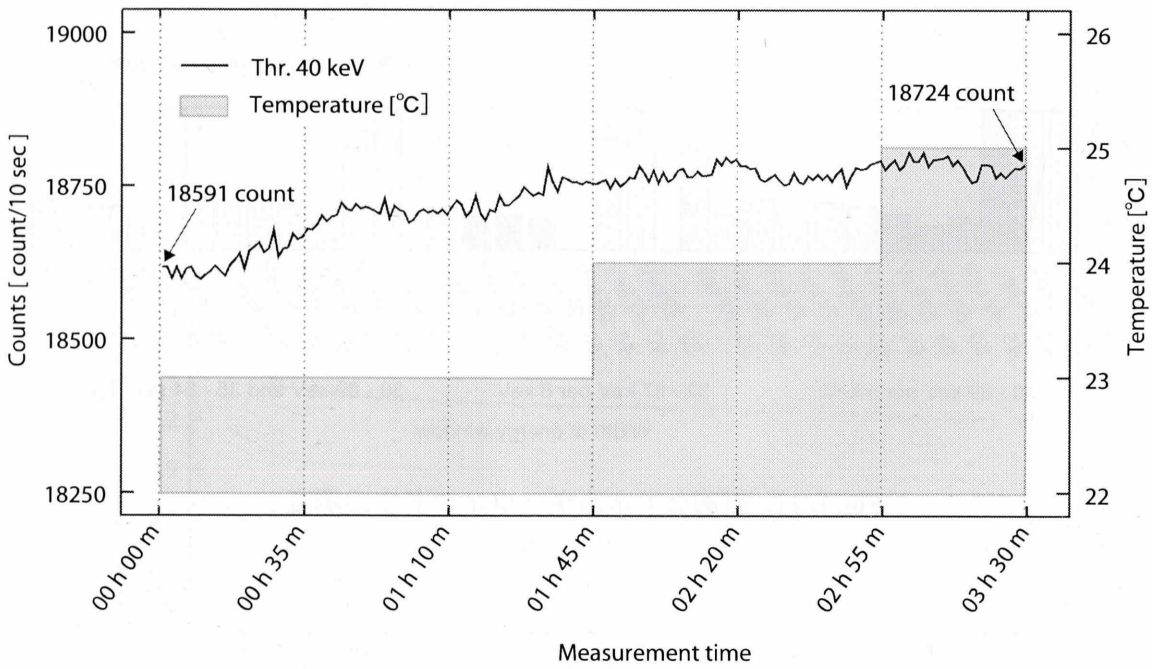

Fig. 6.12: 測定時間における検出カウント量の変化量

6.2 実験条件

提案手法の有効性を評価するために，実験を行った．エネルギーウィンドウは，W_1 は 48 - 55 keV，W_2 は 56 - 63 keV，W_3 は 64 - 71 keV，W_4 は 72 - 79 keV を用いて，再構成法には Shepp and Logan フィルターを用いた．また，ジオメトリはシミュレーション条件と同様である．Fig. 6.13 が示すように，X 線源から回転テーブル中心位置間の距離 672.5 mm(X 線照射位置から照射窓間: 9.5 mm + 照射窓から回転テーブル中心位置間: 673.0 mm) であり，回転テーブル中心位置から検出器筐体間の距離 50.0 mm，検出器筐体から検出素子間の距離 48.0 mm である．また，参照値を求める際に用いたエネルギースペクトルは Fig. 6.14 に示す HPK 製 C10413LGAH で測定した方である。そして，第 7 章と同じ条件で行った．

Table 6.7: 実験条件

管電圧	90 kV
管電流	10 μA
フィルター	Al 10 mm
投影数	180 (360 deg.)
データ収集時間	20 sec per projection
測定環境下の温度	23 - 25 ℃
カウント量 (20 sec)	W_1 (48 - 55keV)： 8669 cpp W_2 (56 - 63keV)： 9497 cpp W_3 (64 - 71keV)： 4803 cpp W_4 (72 - 79keV)： 3164 cpp
検出器のピクセル数	128 pixels
ピクセルサイズ	0.45 × 0.5 mm^2
再構成法	Filtered backprojection (Shepp and Logan)
再構成画像サイズ	128 × 128
検出効率	85 % (at 100 keV)
設定コンフィグファイル (推奨検出カウントレート) (測定エネルギー範囲)	BA3_Configuration2.csv 100k s^{-1} 以下 30 keV ～ 380 keV

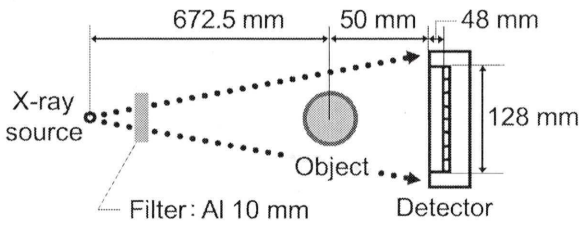

Fig. 6.13: ジオメトリ

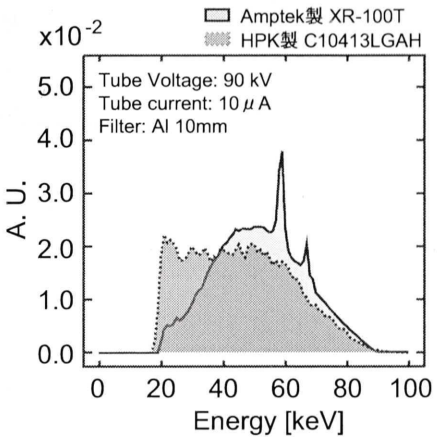

Fig. 6.14: エネルギースペクトル

6.3 単一媒質

6.3.1 純媒質

結果: アルミニウム，水，エタノール

ここでは，高い原子番号のカルシウムから低い原子番号のエタノールに対して媒質同定が実験において可能かを示している．以下に結果を示す．Fig. 6.15 においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定した ROI の番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，測定値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 6.8 に示す．

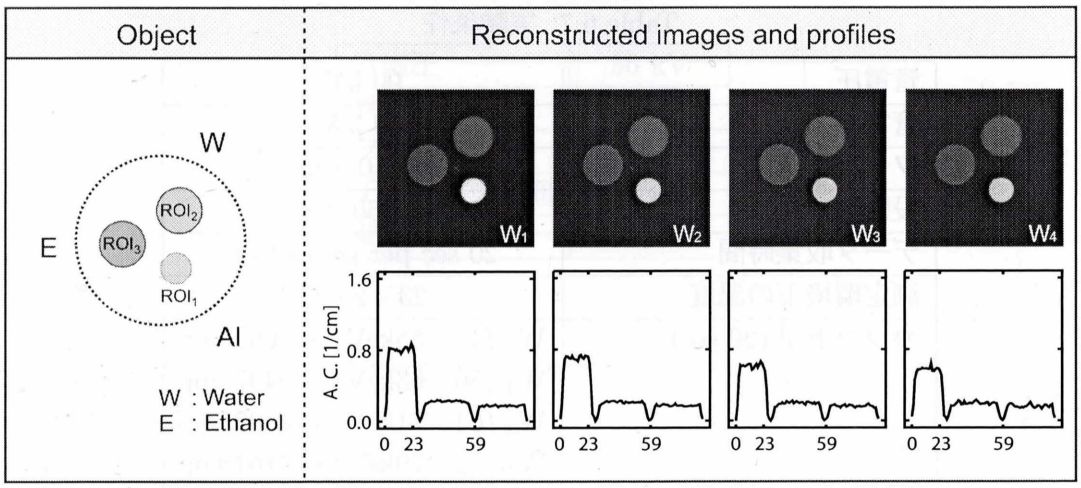

Fig. 6.15: 再構成画像とプロファイル

Table 6.8: 真の媒質の参照値と測定値との比較

Object		W_1	W_2	W_3	W_4	Averaged Error
ROI_1(Al)	Measured value: m_i	0.7866	0.6831	0.5966	0.5497	0.0271
	Reference value: η_i	0.8298	0.6698	0.5766	0.5173	
ROI_2(Water)	m_i	0.2042	0.1952	0.1857	0.1817	0.0020
	η_i	0.2044	0.1922	0.1843	0.1781	
ROI_3(Ethanol)	m_i	0.1545	0.1495	0.1444	0.1422	0.0009
	η_i	0.1562	0.1495	0.1446	0.1408	

Fig. 6.16 には，候補となる媒質の参照値と測定値との比較を示す.

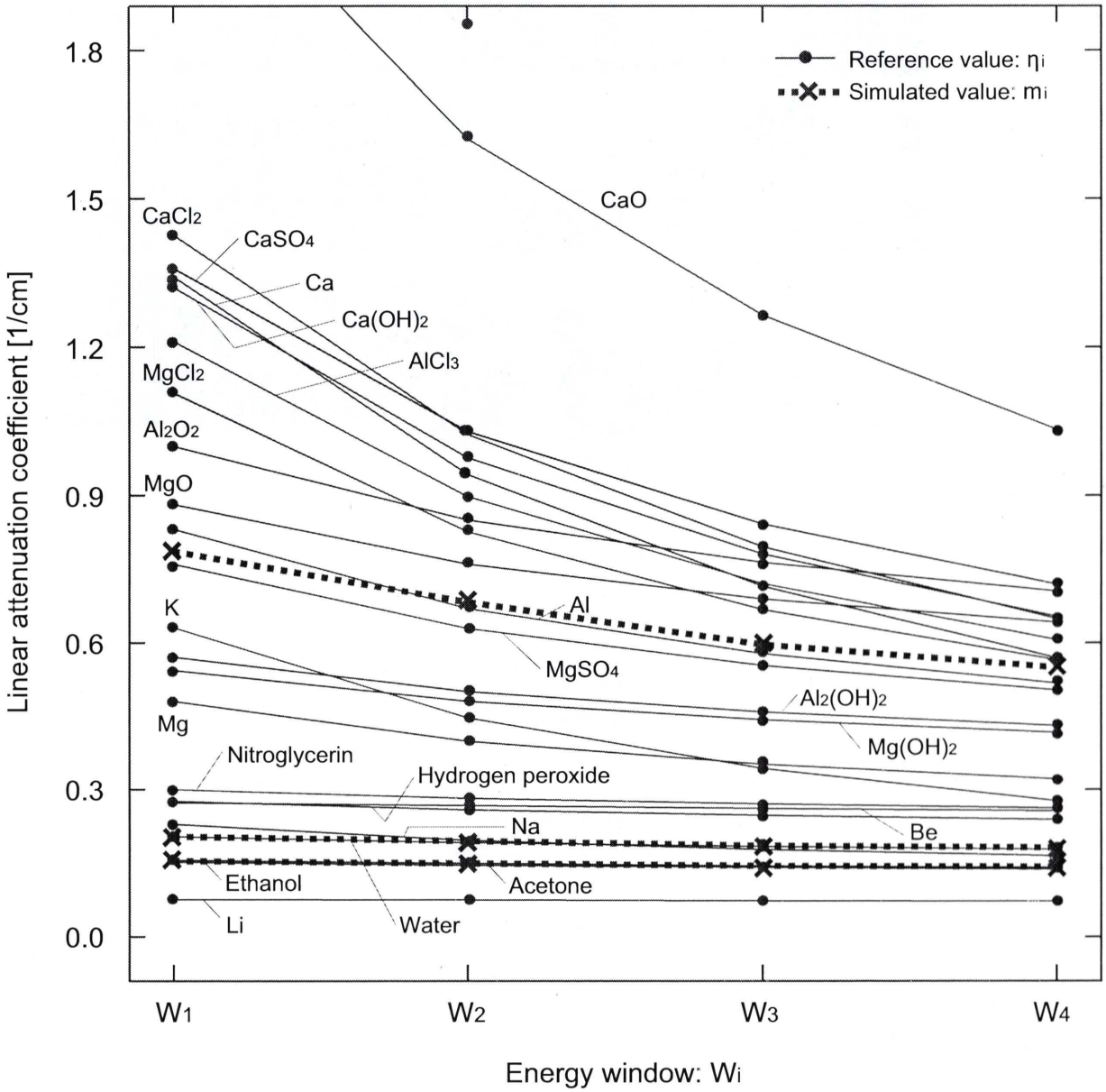

Fig. 6.16: 候補となる質と測定値との比較

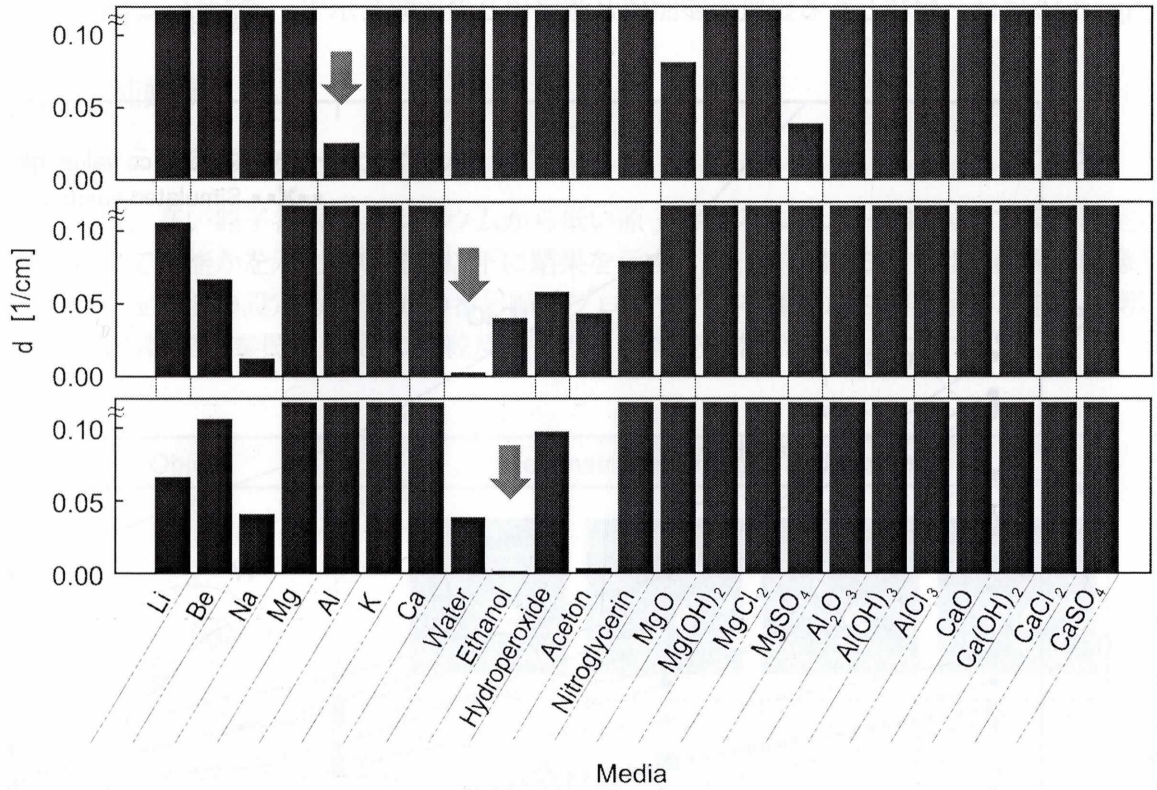

Fig. 6.17: 候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d
(上から ROI_1,ROI_2,ROI_3)

Fig. 6.17 には，候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d を示す．その結果，全ての媒質において正確に媒質同定が出来ていることが分かる．

6.3.2 混合物における濃度変化

結果 (a): アルコール濃度：水，エタノール 50 %，100 %

ここでは，低い原子番号のエタノールに対して媒質同定が実験において可能かを示している．以下に結果を示す．Fig. 6.18 においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定した ROI の番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，測定値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 6.9 に示す．

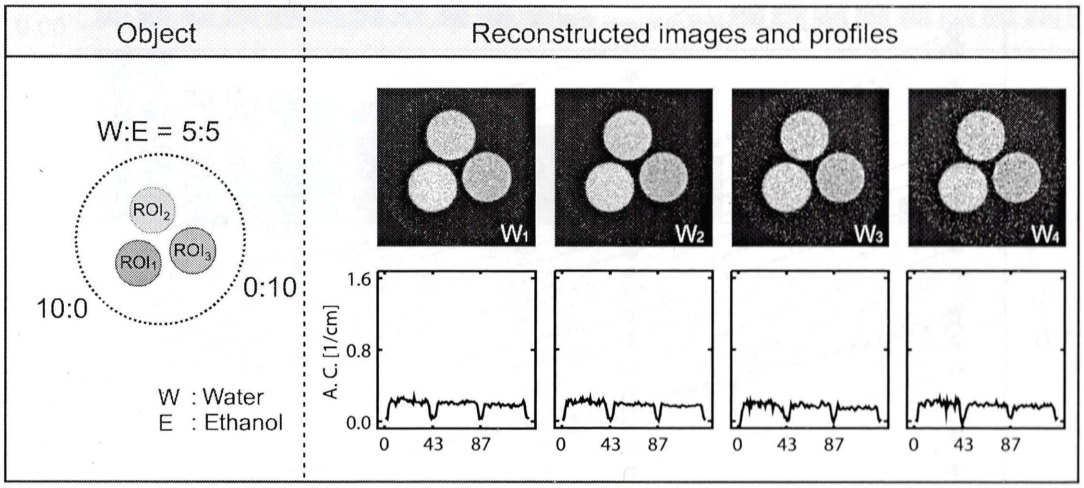

Fig. 6.18: 再構成画像とプロファイル

Table 6.9: 真の媒質の参照値と測定値との比較

Object		W_1	W_2	W_3	W_4	Averaged Error
ROI_1(Water)	Measured value: m_i	0.2032	0.1924	0.1856	0.1818	0.0016
	Reference value: η_i	0.2044	0.1922	0.1843	0.1781	
ROI_2(Ethanol 50 %)	m_i	0.1804	0.1733	0.1679	0.1638	0.0014
	η_i	0.1840	0.1743	0.1680	0.1630	
ROI_3(Ethanol)	m_i	0.1546	0.1485	0.1452	0.1424	0.0012
	η_i	0.1562	0.1495	0.1446	0.1408	

Fig. 6.19 には，候補となる媒質の参照値と測定値との比較を示す．

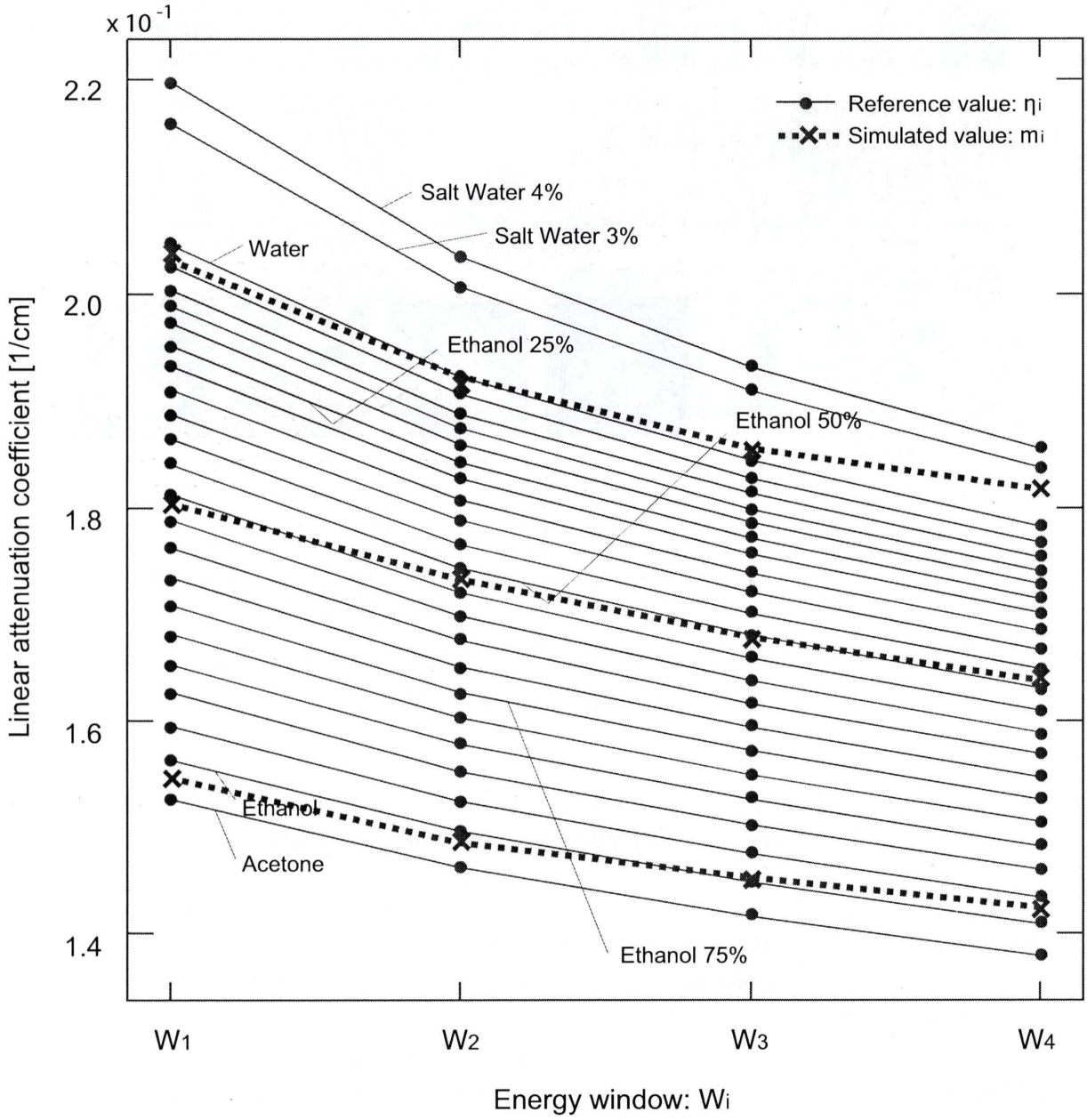

Fig. 6.19: 候補となる媒質と測定値との比較

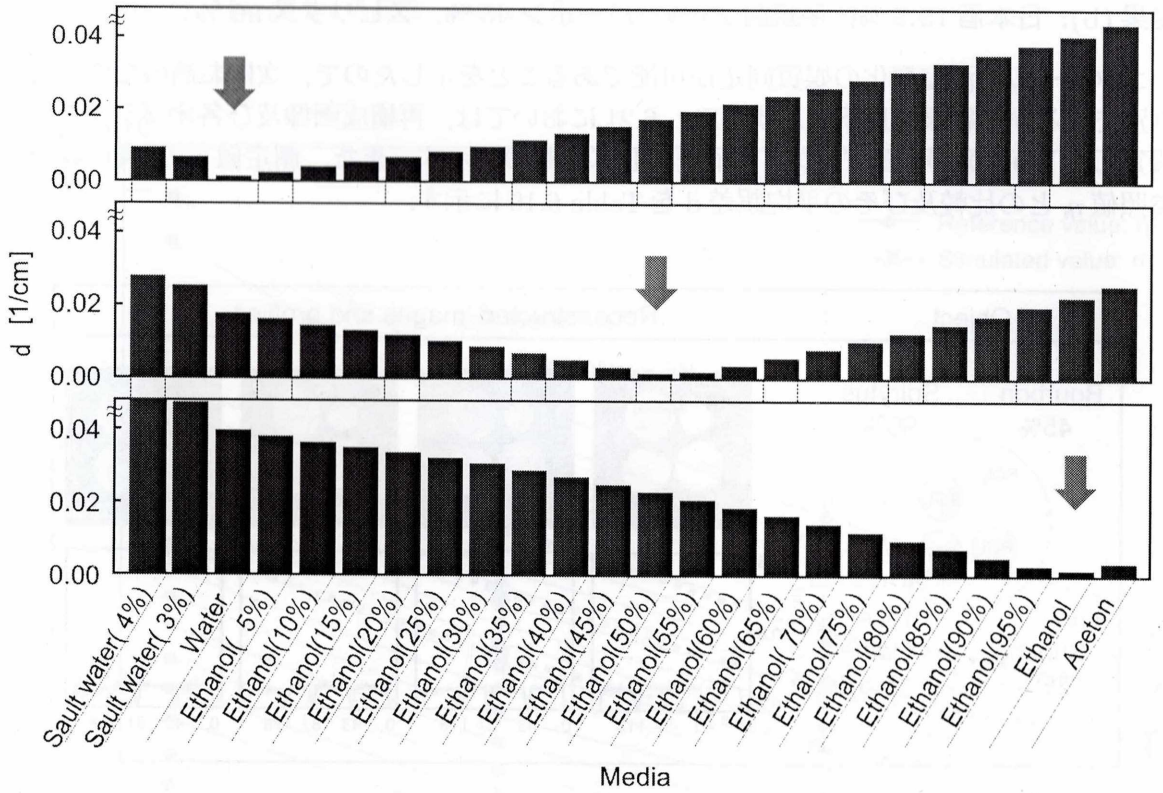

Fig. 6.20: 候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d
(上から ROI_1, ROI_2, ROI_3)

Fig. 6.20 には，候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d を示す．その結果，全ての媒質において正確に媒質同定が出来ていることが分かる．

結果 (b): 日本酒 15.5 %，芋焼酎 25 %，バーボン 45 %，スピリタス 96 %

エタノールの濃度変化の媒質同定が可能であることを示したので，次にお酒の濃度変化を判別できるかの結果を以下に示す．Fig. 6.21 においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定した ROI の番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，測定値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 6.10 に示す．

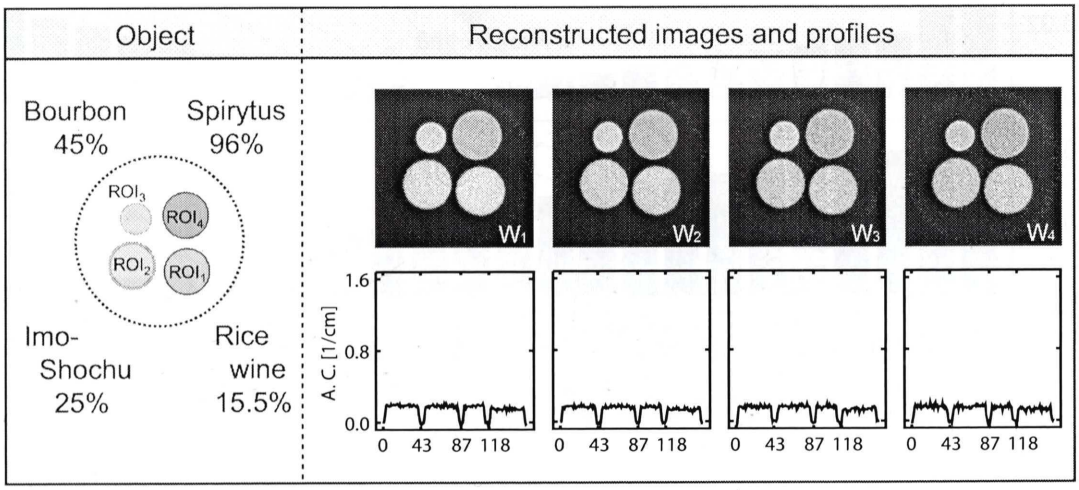

Fig. 6.21: 再構成画像とプロファイル

Table 6.10: 真の媒質の参照値と測定値との比較

Object		W_1	W_2	W_3	W_4	Averaged E
ROI_1(Rice wine 15.5 %)	Measured value: m_i	0.2017	0.1924	0.1836	0.1790	0.0042
	Reference value: η_i	0.1988	0.1874	0.1798	0.1740	
ROI_2(Imo-shochu 25 %)	m_i	0.1968	0.1871	0.1787	0.1748	0.0024
	η_i	0.1951	0.1842	0.1771	0.1714	
ROI_3(Bourbon 45 %)	m_i	0.1909	0.1818	0.1743	0.1697	0.0048
	η_i	0.1864	0.1765	0.1700	0.1648	
ROI_4(Spyritus 96 %)	m_i	0.1595	0.1529	0.1470	0.1452	0.0008
	η_i	0.1594	0.1523	0.1474	0.1433	

Fig. 6.22: 各オブジェクトのパッケージ

Fig. 6.23 には，候補となる媒質の参照値と測定値との比較を示す.

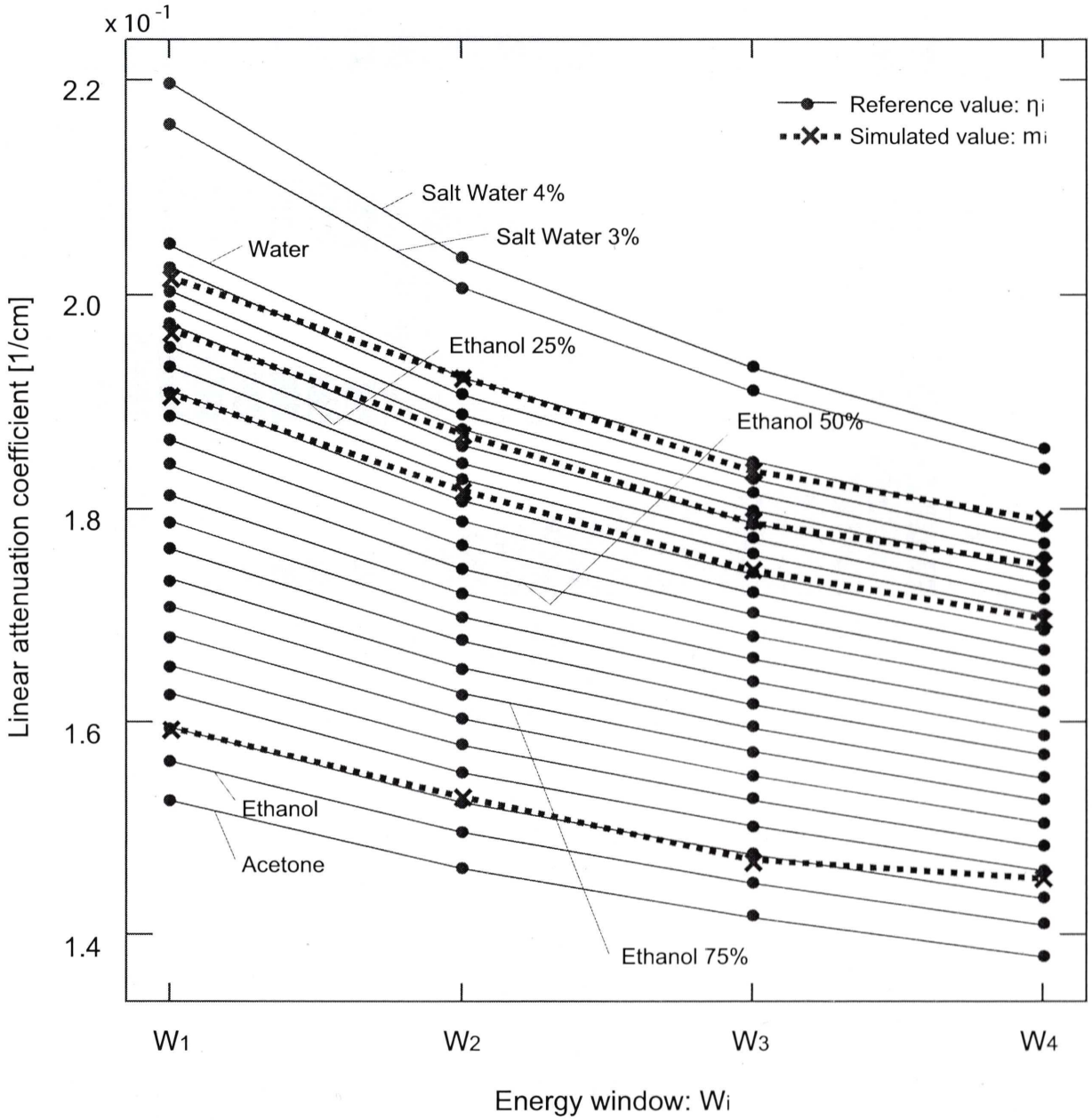

Fig. 6.23: 候補となる媒質と測定値との比較

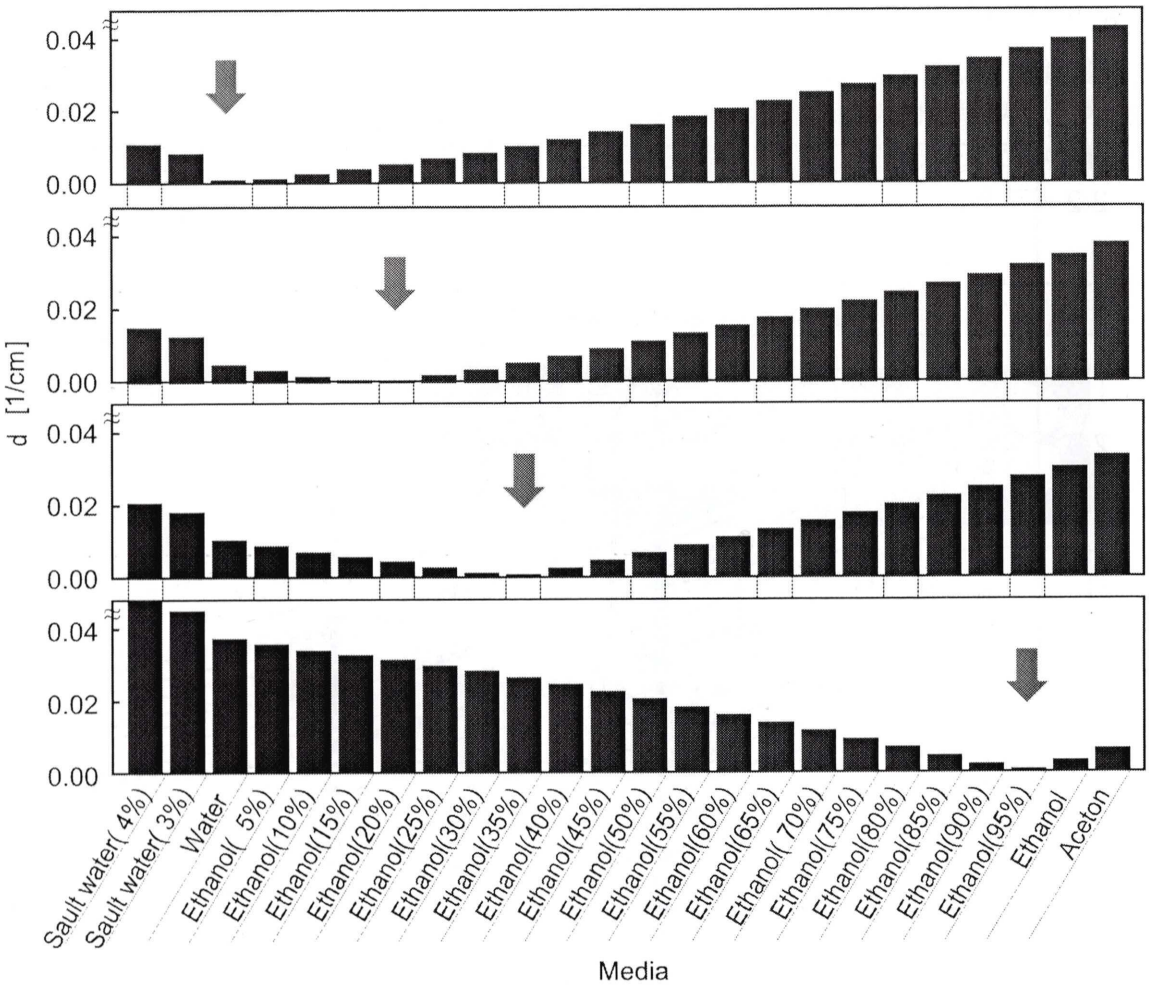

Fig. 6.24: 候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d
(上から ROI_1, ROI_2, ROI_3, ROI_4)

Fig. 6.24 には，候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d を示す．その結果，スピリタス 96 %のようなほぼエタノールに関しては正確に判別が可能だが，他のお酒に関しては 10 %〜15 %の誤差で真のアルコール度数を判定することが出来なかった．これは，糖分をはじめとするアルコールと水以外の成分が含まれているために，媒質の減衰係数値を上がり，判別が正確に出来なかったと考えられる．それを証明すべく，次に塩水の実験を行った．

結果 (c): 塩分濃度：塩水 3 %

ここでは，塩水に対して媒質同定が実験において可能かを示している．以下に結果を示す．Fig. 6.25 においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定した ROI の番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，測定値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 6.11 に示す．

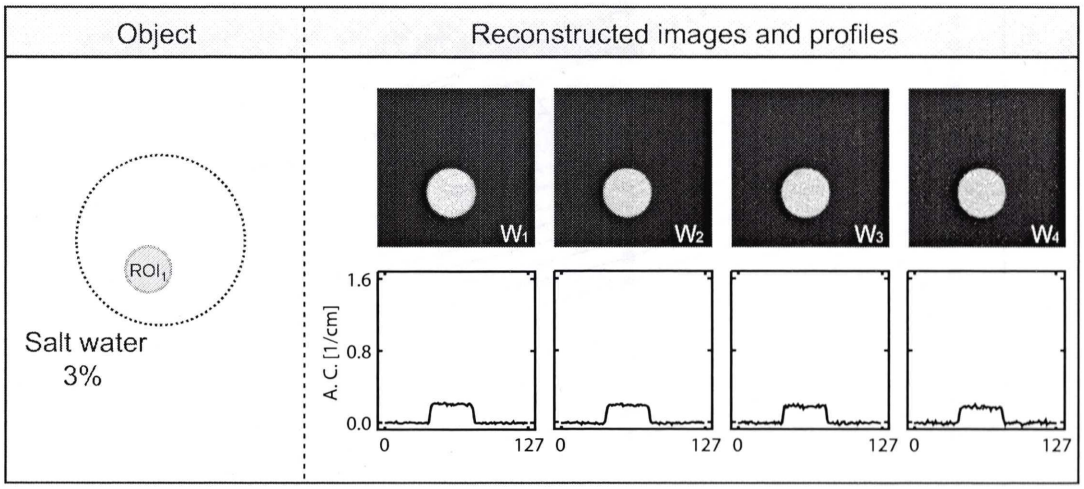

Fig. 6.25: 再構成画像とプロファイル

Table 6.11: 真の媒質の参照値と測定値との比較

Object		W_1	W_2	W_3	W_4	Averaged Error
ROI_1(Salt water 3 %)	Measured value: m_i	0.2017	0.1924	0.1836	0.1790	0.0042
	Reference value: η_i	0.1988	0.1874	0.1798	0.1740	

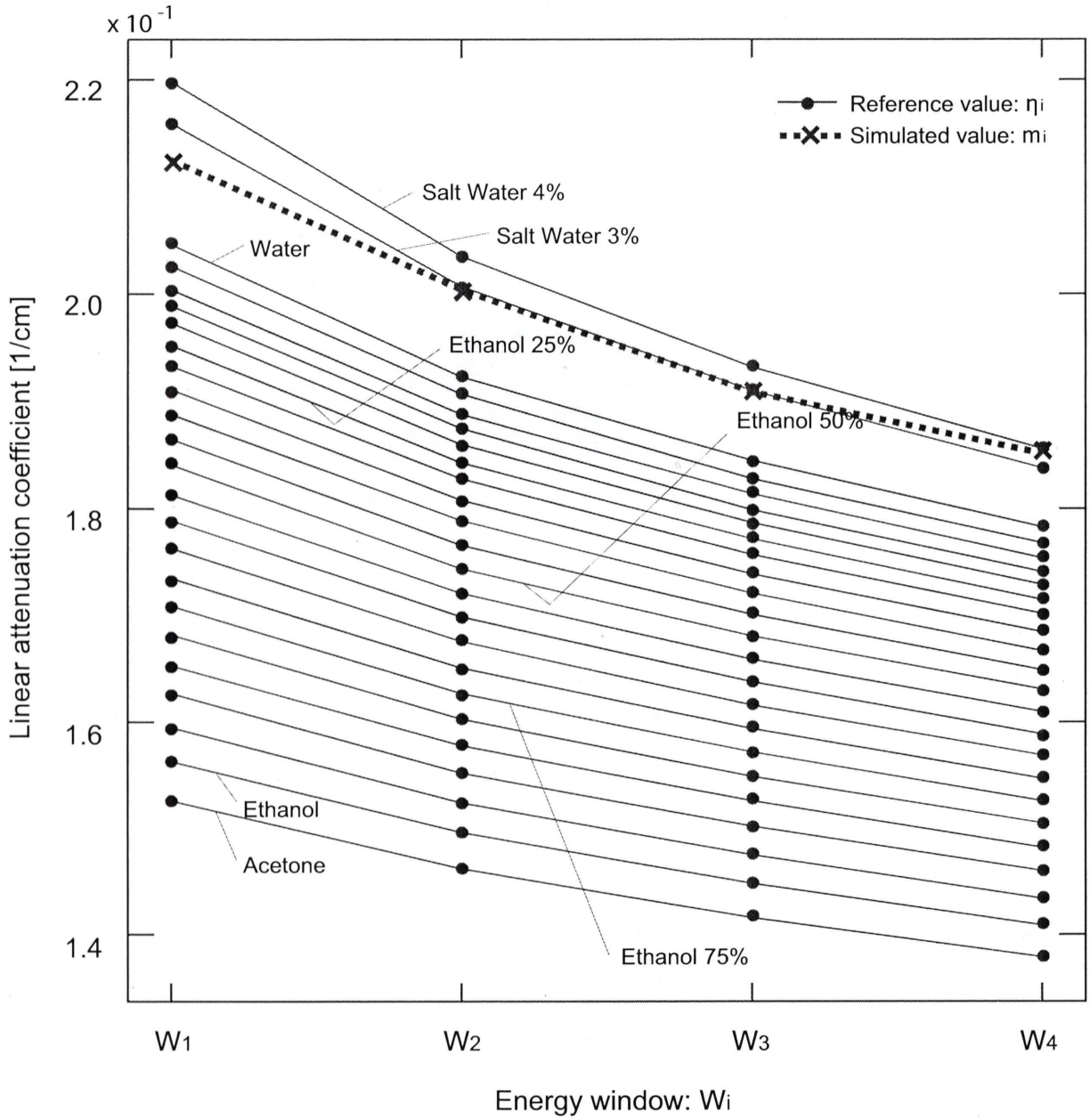

Fig. 6.26: 候補となる媒質と測定値との比較

Fig. 6.26 には，候補となる媒質の参照値と測定値との比較を示す．
Fig. 6.27 には，候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d を示す．その結果，塩水

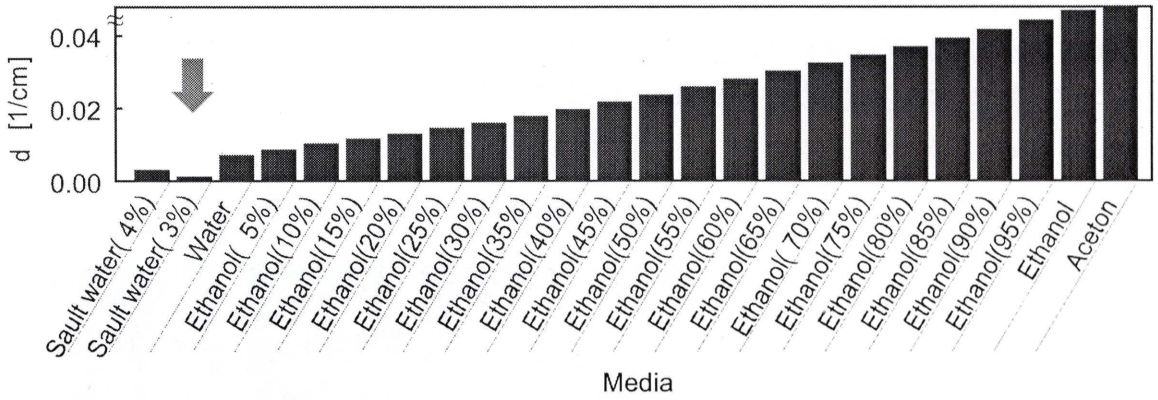

Fig. 6.27: 候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d
(上から ROI_1)

3 %が正確に媒質同定が出来ていることが分かる．また，この結果からお酒 (焼酎や日本酒，バーボン等) を正確に判定するには，水やエタノールの他に，様々な媒質が混ざった場合の参照値を用意しておく必要があると考えられる．

結果 (d): 100 %オレンジジュース，炭酸水 (無糖)，水，スピリタス 96 %

ここではお酒だけでなく，アルコールが入っていない媒質に対して媒質同定が可能かを示している．以下に結果を示す．Fig. 6.28 においては，再構成画像及び各オブジェクトの設定した ROI の番号順にプロファイルを並べたものを示す．また，測定値 m_i と真の媒質の参照値 η_i との比較及びその平均誤差 d を Table 6.12 に示す．

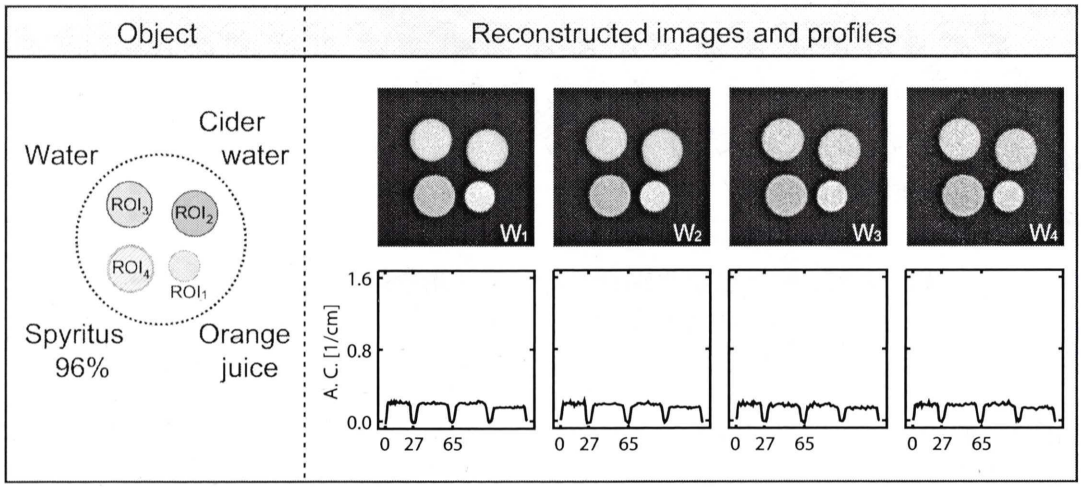

Fig. 6.28: 再構成画像とプロファイル

Table 6.12: 真の媒質の参照値と測定値との比較

Object		W_1	W_2	W_3	W_4	Averaged Error
ROI_1(100 % Orange)	Measured value: m_i	0.2133	0.2037	0.1931	0.1897	0.0101
	Reference value: η_i	0.2044	0.1922	0.1843	0.1781	
ROI_2(Cider water)	m_i	0.2046	0.1941	0.1856	0.1828	0.0020
	η_i	0.2044	0.1922	0.1843	0.1781	
ROI_3(Water)	m_i	0.2045	0.1937	0.1859	0.1828	0.0019
	η_i	0.2044	0.1922	0.1843	0.1781	
ROI_4(Spyritus 96 %)	m_i	0.1590	0.1530	0.1472	0.1469	0.0012
	η_i	0.1594	0.1523	0.1474	0.1433	

Fig. 6.29: 各オブジェクトのパッケージ

Fig. 6.30 には，候補となる媒質の参照値と測定値との比較を示す.

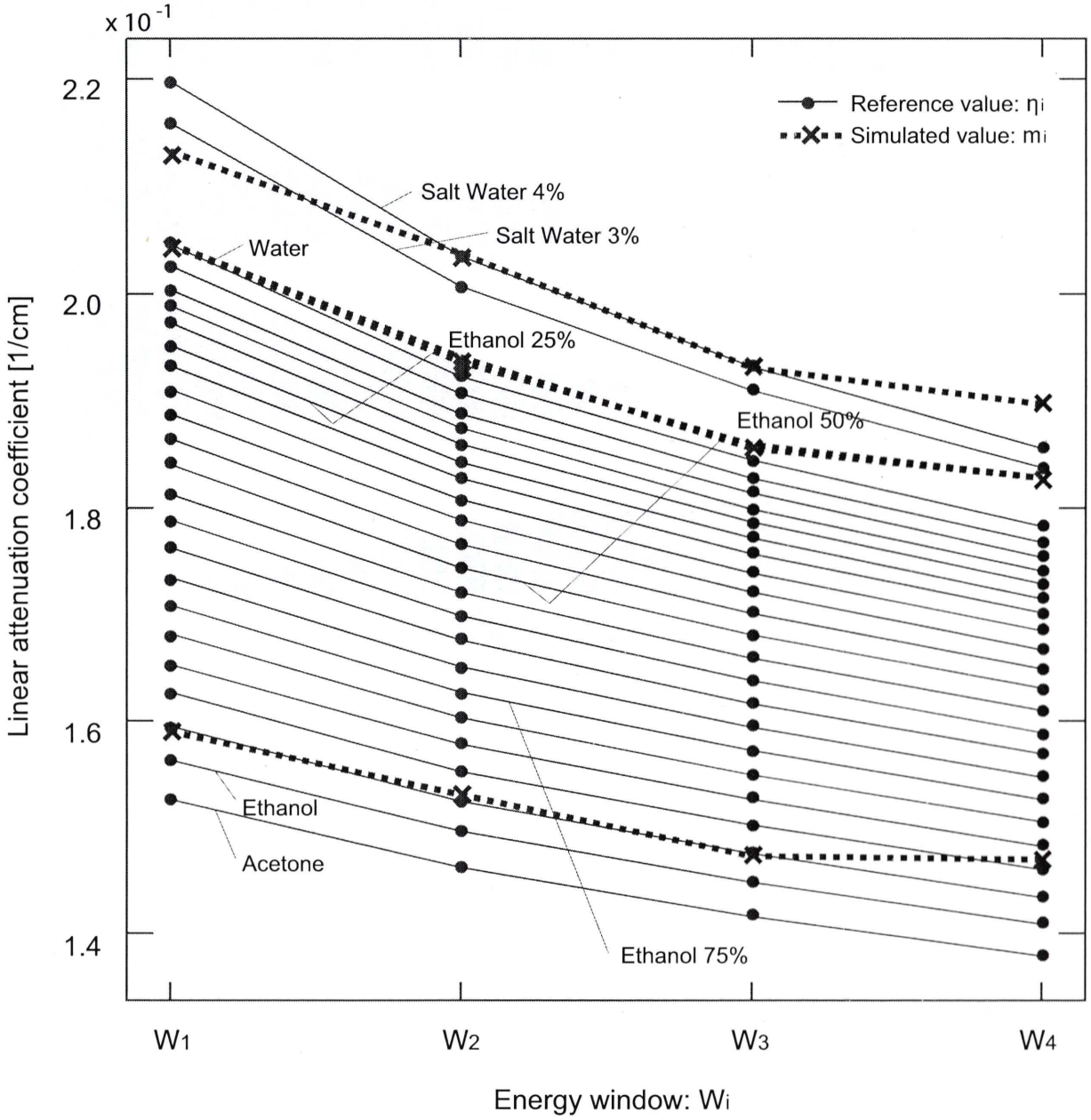

Fig. 6.30: 候補となる媒質と測定値との比較

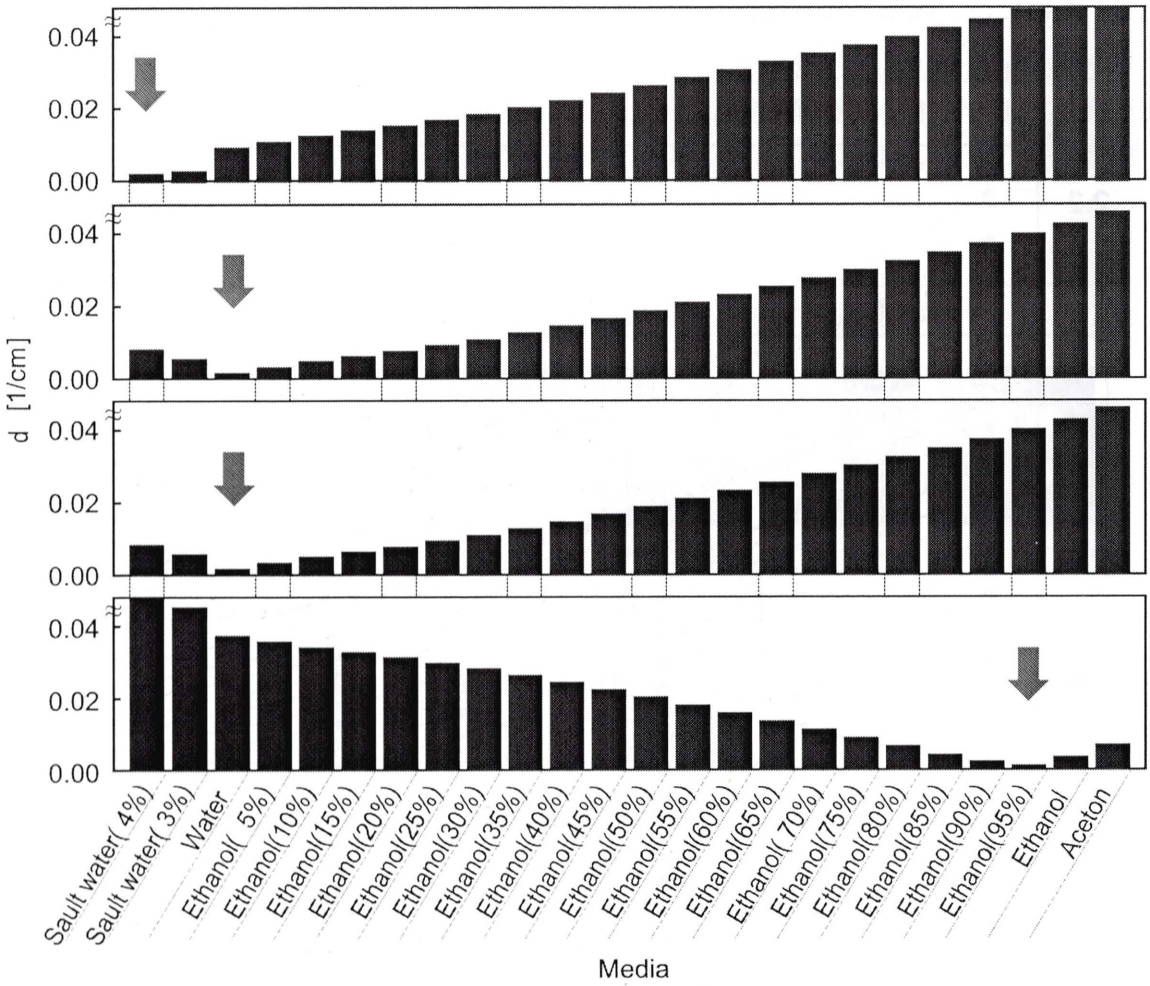

Fig. 6.31: 候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d
(上から ROI_1, ROI_2, ROI_3, ROI_4)

Fig. 6.31 には，候補となる媒質の参照値と測定値との平均誤差 d を示す．その結果，炭酸水 (無糖) は水と判定されたが，オレンジジュースといった糖分が含まれるものは正確な判定は未だ出来ないことが分かる．

第7章　考察

7.1　純物質

アルミニウムをはじめとする原子番号の高い媒質から水やエタノール等の低い媒質において，最適なエネルギーウィンドウを用いることで媒質同定を正確に行うことが出来ることを示した．しかし，Table 7.1 及び Fig. 7.1 が示すように，原子番号の高い媒質においては参照値との平均誤差が原子番号の低い媒質に比べて大きい．これは，ビームハードニング (線質硬化) の影響が原因だと考えられる．ビームハードニングとは，連続 X 線が物質を通過するとき，低エネルギーの方がより多く吸収されるため，エネルギースペクトル全体が高いエネルギー側に移動する現象のことであり，原子番号の高い媒質はこの移動度合が大きい．そのため X 線 CT において，再構成した CT 値が不正確なものになるためだと考えられる．

Table 7.1: 従来手法と提案手法における平均誤差 d

Methods		Average Error: d				
		Ca	Al	Mg	Water	Ethanol
Simulation	Conventional	0.0768	0.0463	0.0244	0.0048	0.0043
	Proposed	0.0025	0.0015	0.0007	0.0003	0.0006
Experiment	Proposed	×	0.0271	×	0.0020	0.0009

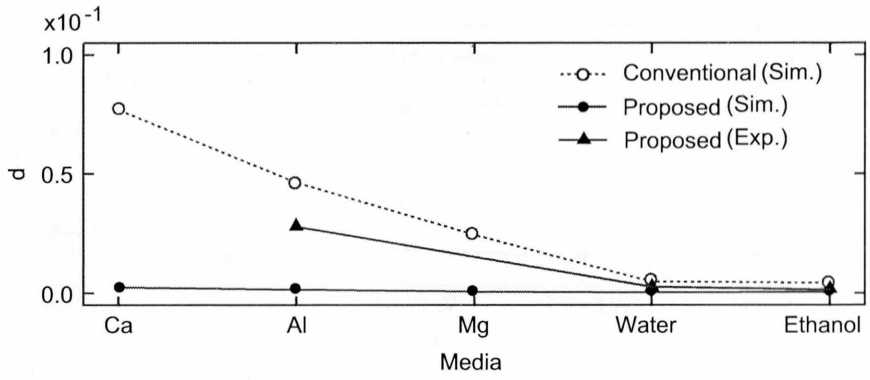

Fig. 7.1: シミュレーション及び実験において従来手法と提案手法における平均誤差 d の比較

7.2 混合物

ここでは，濃度変化のため濃度毎の参照値は少ししか違わないため，精度の高い測定が必須となる．ここで，問題となるのががチャージシェアリング (small pixel effect) の影響である．チャージシェアリングとは，X線光子を検出する際に，その光子が持つエネルギー (例：90keV) を隣の検出素子と2分して (例：40keV と 50keV) 誤検出してしまう現象である．これにより，高いエネルギーを持つ光子が低いエネルギーの光子として測定されてしまう．そのため，低いエネルギーのウィンドウで作成したCT値は参照値より線減衰係数値が低くなってしまう．そのため，この影響を受けにくいエネルギーウィンドウを設定することが必要となる．そして，その影響が受けにくいウィンドウ幅を調査した結果，Fig. 6.11 が示すように 48-80 keV の間を 8keV 置きに設定するのが最適である．その結果，混合物においてエタノール及び塩分の濃度変化を正確に判定することに成功した．しかし，48-80keV 間でエネルギーウィンドウを設定しても，実際のお酒のエタノール濃度を正確に判定するのは困難である．実験において，日本酒や焼酎，バーボンをオブジェクトとした結果がある (Table 6.10)．その結果から分かるように，実際の濃度の参照値よりも測定値の値が高く出ている．これは，お酒に水とエタノール以外の成分 (例：塩分や糖分等) が含まれているためであると考えられる．そのため，もし正確に判定するには今以上に様々なパターンの参照値を作成しておく必要があると考えられる．

Table 7.2: 従来手法と提案手法における平均誤差 d

Methods		Average Error: d				
		Water	W:E=9:1	W:E=5:5	W:E=1:9	Ethanol
Simulation	Conventional	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005	0.0004
	Proposed	0.0002	0.0001	0.0002	0.0001	0.0004
Experiment	Proposed	0.0016	×	0.0014	×	0.0012

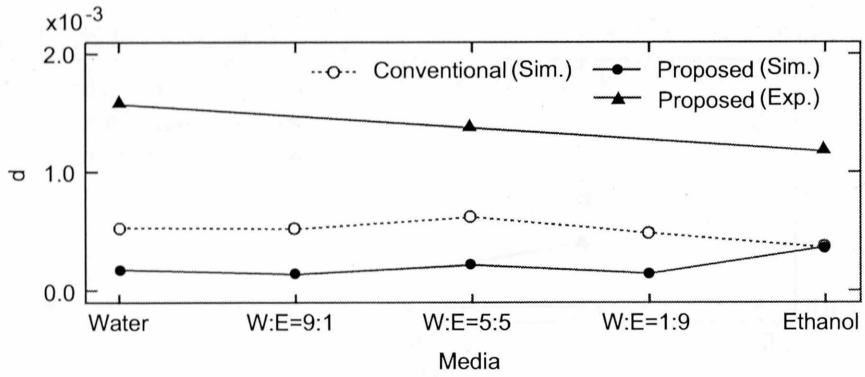

Fig. 7.2: シミュレーション及び実験において従来手法と提案手法における平均誤差 d の比較

7.3 温度に対するエタノール濃度の密度値

Fig. 7.3 に温度に対するエタノール濃度の密度の変化を示す．温度は 0〜65 ℃を 5 ℃刻みの 14 パターンである．そのグラフが示すように，エタノール濃度に対する密度値は温度によっても変化があることを分かる．そのため，実験環境の温度は測定精度を高める上で，重要なパラメータの 1 つであることを示す．そして，我々が行った実験環境下の温度は，Table 6.7 に示すように 23 - 25 ℃であったので，液体の密度は 25 ℃の時を使用し，参照値を作成することで今回の高い精度の媒質同定を可能にした．

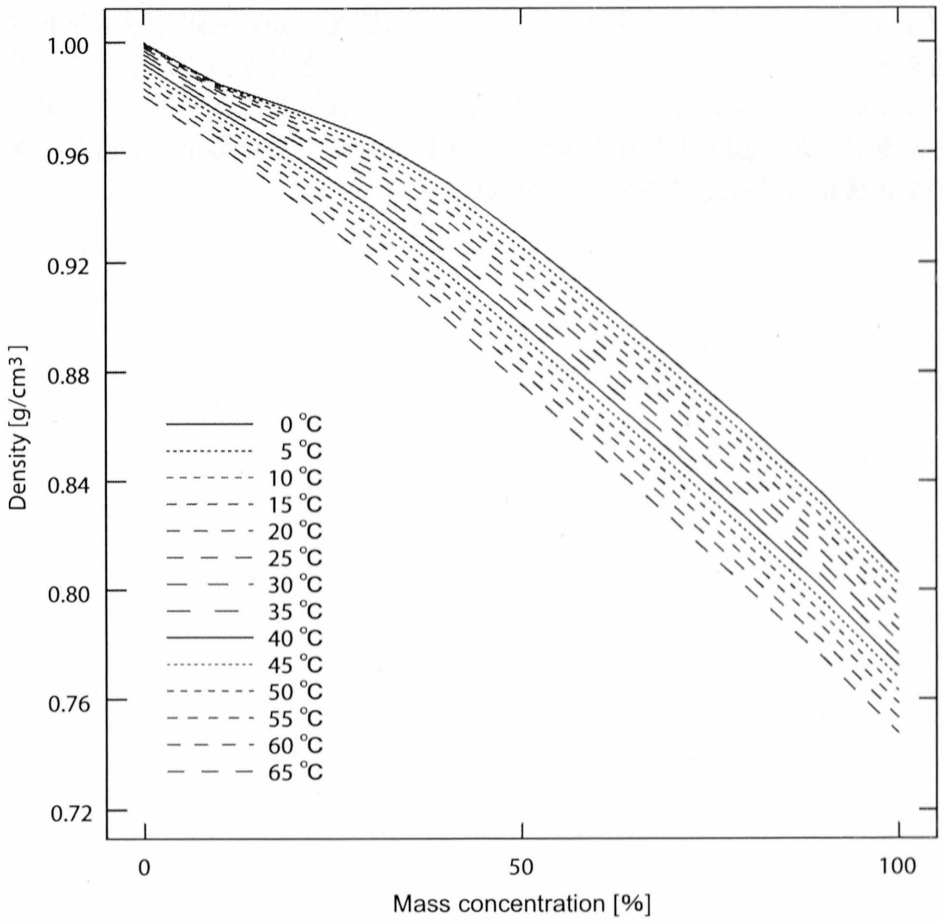

Fig. 7.3: 各温度に対するエタノール濃度の密度値

第8章　まとめ

提案手法であるフォトンカウンティング形X線CTを用いた媒質同定法の有効性を評価するために，モンテカルロシミュレーション及び基礎実験を行った．その際に用いる4つのエネルギーウィンドウを調査し，48 keVから80 keVの間を8 keV間隔でウィンドウを設定するのが最もチャージシェアリングの影響を受けにくいことが分かった．そして，その最適なエネルギーウィンドウを用いることで，純物質であるアルミニウムや水，エタノールだけでなく，水とエタノールの濃度変化を5 %の濃度差において，また塩水の濃度変化を1 %の濃度差において正確に媒質同定できることを示した．

謝辞

本研究において，全般的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冨仁准教授及び貝吹太志氏，また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] Macovski A., Alvarez R. E., et al. “Energy Dependent Reconstruction in X-ray Computerized Tomography.” Computer Biology Medicine, Vol. 6, pp. 325-336, 1976

[2] G. Zhang, Z. Chen, Li. Zhang, J. Cheng, “Exact Reconstruction for Dual Energy Computed Tomography Using an H-L Curve Method,” IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imag. Conf. Rec., pp. 3485-3488, 2006

[3] K. Ogawa, H. Shibusawa, Y. Harata, T. Yamakawa, “Simulation study on a photon counting X-ray CT system,” IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imag. Conf. Rec., vol. 5, pp. 2755-2759, 2004

[4] K. Kowase, K. Ogawa, “Photon Counting X-ray CT System with a Semiconductor Detector,” IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imag. Conf. Rec., pp. 3119-3123, 2006

[5] T. Hirokawa, K. Ogawa, “Identification of media with a photon counting x-ray CT, ” Proc. The 5th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics, CD-ROM, 2008

発表論文

原著および査読付国際論文

1. Koichi Ogawa, Tatsuma Hirokawa, Shota Nakamura, "Identification of a material with a photon counting x-ray CT system," IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, CD-ROM, Knoxville(USA), Nov.1-6,2010

2. Koichi Ogawa, Shota Nakamura, Tatsuma Hirokawa, "Material Discrimination with an Energy Binned X-ray CT," Annual Meeting on European Congress of Radiology, DOI: 10.1594/ecr2011/C-1109, Vienna(Austria), March 3-7, 2011

国際会議における発表

1. Koichi Ogawa, Tatsuma Hirokawa, Shota Nakamura, "Identification of a material with a photon counting x-ray CT system," IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Knoxville(USA), Nov.1-6,2010

国内学会における発表

1. 中村翔太、尾川浩一、"媒質同定を行うためのフォトカウンティング型 X 線 CT の研究" 第 100 回日本医学物理学会学術大会報文集（医学物理、vol.30、sup.5、p.247-248）,2010/9/24-25(東京)

第9章　付録A　実験装置についての補足

9.1　HPK製 C10413LAGHの使用法

HPK製 C10413LAGHのソフトウェアを起動後に，Fig. 9.1が表示される．その後，以下の手順毎に設定を行えば測定可能となる．

1. Step 1の「Read」をクリックし,「BA3_Configuration2(H23.7.29).csv」を読み込む．
2. Step 2のThreshold 1〜Threshold 5に設定したい閾値を校正表を参考に入力する．(注意：隣合う閾値は，最低10 keV間隔を空ける．) その後,「Send Threshold Parameters」をクリックすることで閾値を設定できる．
3. Step 3の「Configuration Setting」をクリックする．その後，Passwordの入力し，Fig. 9.2が表示される．(Passwordは，仕様書に記入させている．)

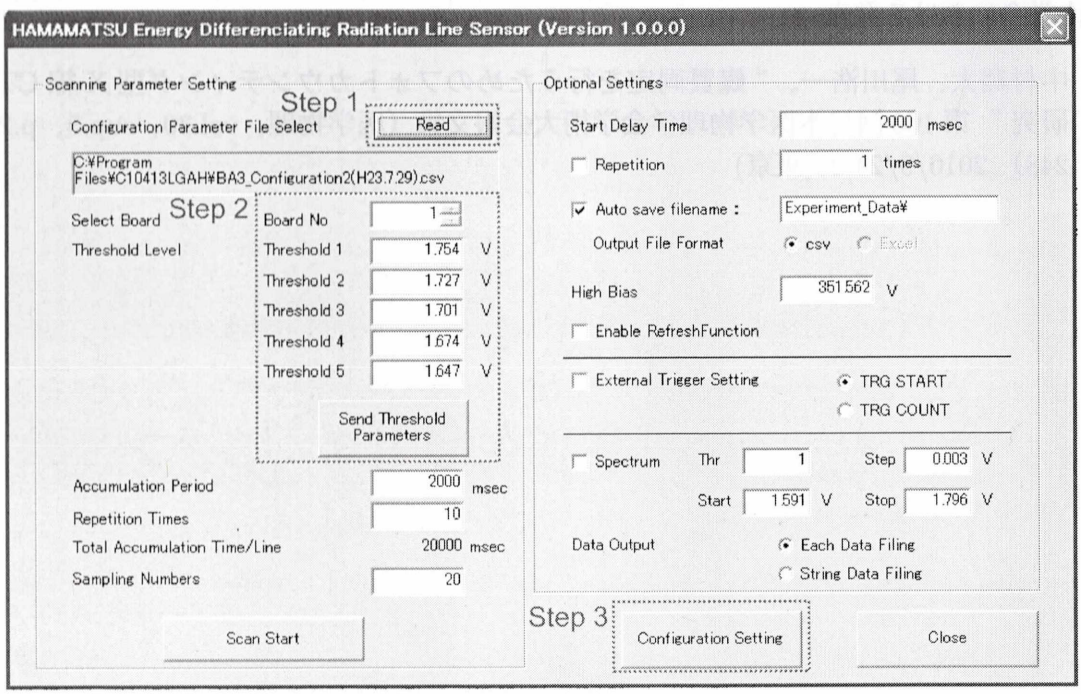

Fig. 9.1: HPK製 C10413LAGHのソフトウェア (1)

4. Step 4 の Thr1(V)〜Thr5(V) に 2. で入力した値がきちんと入っているか確認する．ITAU(uA) の中は，触らないこと．

5. Step 5 は，リアルタイムに設定した閾値毎の光子のカウント量をみる際に用いる．初めに，「HighBias ON」をクリックして，「Test Start」をクリックする．そうすると，上の四角窓に棒グラフでカウント量が表示される．また，棒グラフの縦軸及び表示したい閾値は四角窓の右側にある MAX，MIN，Display Threshold にて変更できる．

6. Step 6 の「Acquire Data」をクリック後，Fig. 9.3 が表示される．

7. Step 7 の部分に測定方法を設定する．
測定時間 [msec] = (Conut soure period(msec) * Adding) * Sampling counts となる．

8. Step 8 の「Start」をクリックし，測定開始される．

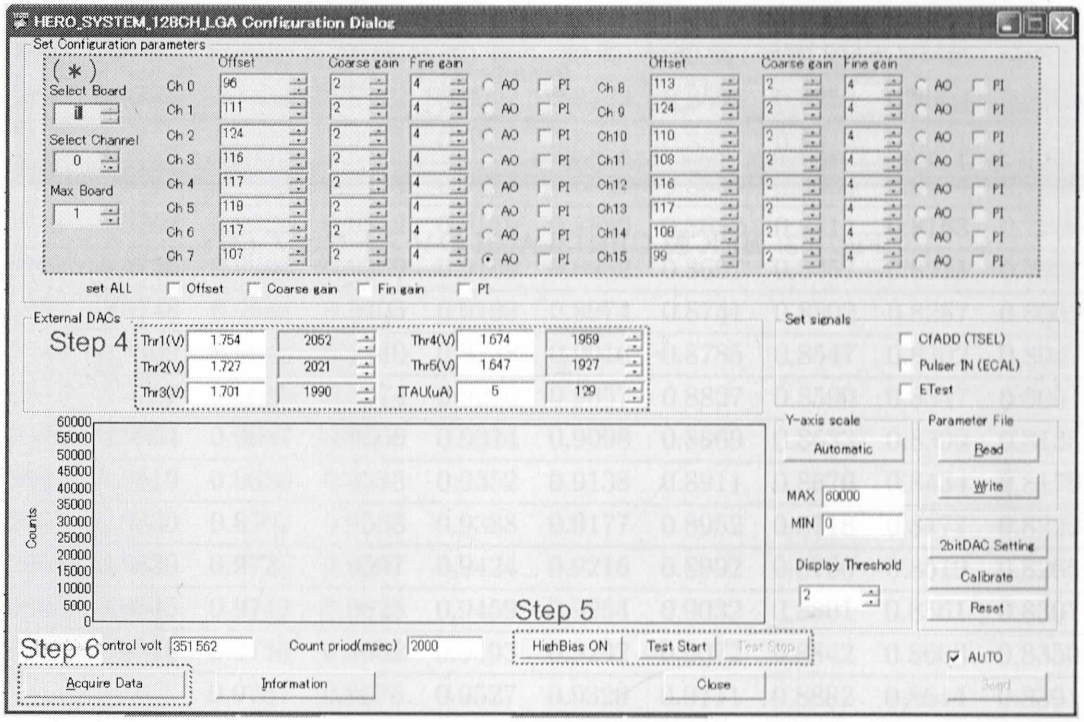

Fig. 9.2: HPK 製 C10413LAGH のソフトウェア (2)

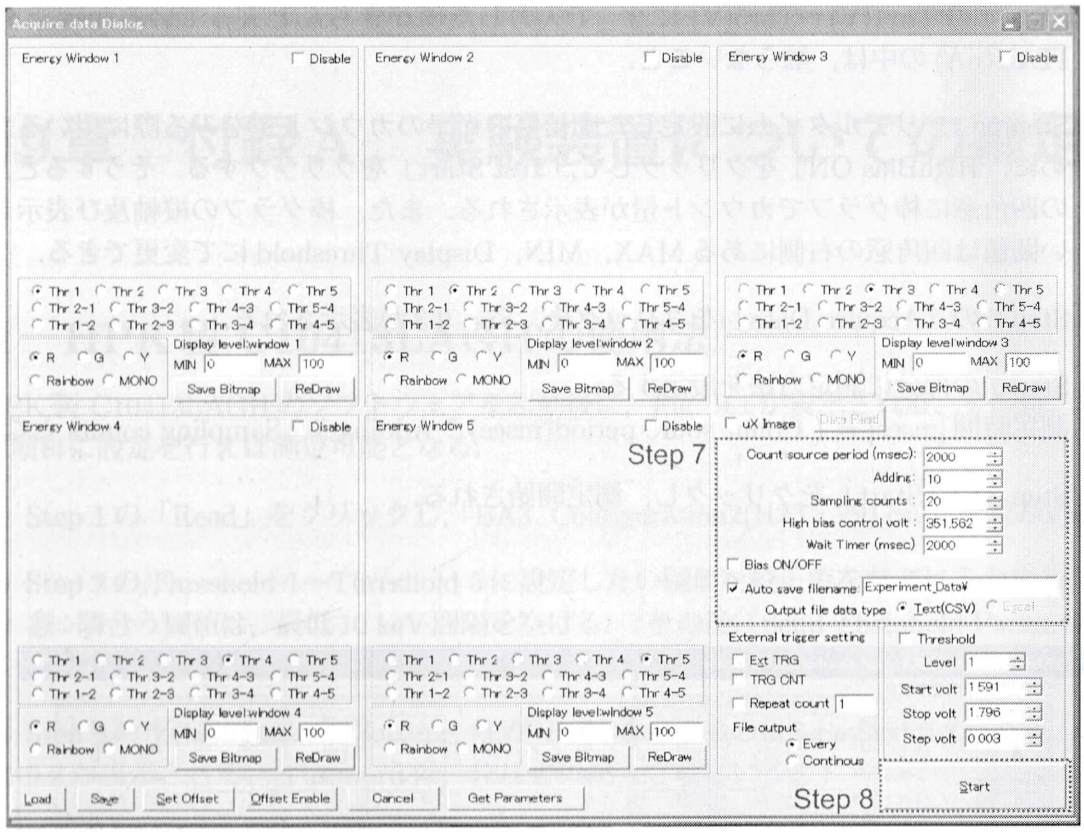

Fig. 9.3: HPK 製 C10413LAGH のソフトウェア (3)

第10章　付録B　密度の値に対する補足

10.1　エタノールと塩水の密度の値

エタノールの濃度兼温度に対する密度の値をTable 10.1に，塩水の濃度兼温度に対する密度の値をTable 10.2に示す．また，参考資料にはエタノールの濃度は10 %毎の密度を示している．しかし，我々はエタノールの濃度を5 %毎に参照値を作成するため，間を線形補間を用いて補っている．

Table 10.1: エタノールの濃度兼温度に対する密度の値

℃	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
65	0.9806	0.9623	0.9424	0.9212	0.8992	0.8752	0.8503	0.8258	0.8004	0.7750	0.7474
60	0.9832	0.9651	0.9460	0.9254	0.9036	0.8801	0.8556	0.8312	0.8061	0.7808	0.7530
55	0.9857	0.9677	0.9493	0.9294	0.9078	0.8845	0.8605	0.8363	0.8114	0.7860	0.7581
50	0.9881	0.9702	0.9525	0.9332	0.9119	0.8889	0.8652	0.8411	0.8163	0.7909	0.7629
45	0.9902	0.9726	0.9556	0.9369	0.9159	0.8932	0.8697	0.8457	0.8211	0.7956	0.7675
40	0.9922	0.9748	0.9585	0.9405	0.9199	0.8974	0.8741	0.8502	0.8257	0.8002	0.7719
35	0.9940	0.9769	0.9613	0.9440	0.9238	0.9016	0.8785	0.8547	0.8302	0.8047	0.7763
30	0.9957	0.9787	0.9639	0.9474	0.9276	0.9057	0.8827	0.8590	0.8347	0.8091	0.7807
25	0.9970	0.9804	0.9664	0.9506	0.9314	0.9098	0.8869	0.8633	0.8390	0.8135	0.7850
20	0.9982	0.9819	0.9686	0.9538	0.9352	0.9138	0.8911	0.8676	0.8434	0.8179	0.7892
15	0.9991	0.9830	0.9707	0.9568	0.9388	0.9177	0.8952	0.8718	0.8477	0.8222	0.7935
10	0.9997	0.9839	0.9725	0.9597	0.9424	0.9216	0.8992	0.8760	0.8519	0.8265	0.7978
5	1.0000	0.9845	0.9742	0.9625	0.9459	0.9254	0.9032	0.8801	0.8561	0.8307	0.8020
0	0.9998	0.9848	0.9756	0.9652	0.9493	0.9292	0.9072	0.8842	0.8603	0.8350	0.8062
-5	-	-	0.9767	0.9678	0.9527	0.9329	0.9111	0.8882	0.8644	0.8391	0.8104
-10	-	-	0.9776	0.9703	0.9561	0.9366	0.9149	0.8922	0.8685	0.8433	0.8147
-15	-	-	-	0.9727	0.9593	0.9402	0.9188	0.8961	0.8726	0.8475	0.8189
-20	-	-	-	0.9749	0.9625	0.9438	0.9226	0.9001	0.8766	0.8516	0.8231
-30	-	-	-	-	0.9685	0.9506	0.9300	0.9077	0.8846	0.8597	0.8316
-40	-	-	-	-	-	-	0.9368	0.9147	0.8920	0.8673	0.8396
-50	-	-	-	-	-	-	-	-	0.8980	0.8736	0.8466

(参考資料: *http : //www.alcohol.jp/expert/list/01mitsudo0_50.html*,
http : //www.alcohol.jp/expert/list/01mitsudo60_100.html)

塩水の参考資料には，その濃度が３％から４％間の時の密度のみ示している．そのため，参照値は塩水３％と４％の２つのみ使用している．

Table 10.2: 塩水の濃度兼温度に対する密度の値

℃	3.0 %	3.1 %	3.2 %	3.3 %	3.4 %	3.5 %	3.6 %	3.7 %	3.8 %	3.9 %	4.0 %
15	1.0222	1.0229	1.0237	1.0245	1.0252	1.0260	1.0268	1.0275	1.0283	1.0291	1.0299
16	1.0219	1.0227	1.0235	1.0242	1.0250	1.0258	1.0265	1.0273	1.0281	1.0288	1.0296
17	1.0217	1.0225	1.0232	1.0240	1.0248	1.0255	1.0263	1.0271	1.0278	1.0286	1.0294
18	1.0215	1.0222	1.0230	1.0238	1.0245	1.0253	1.0261	1.0268	1.0276	1.0284	1.0291
19	1.0212	1.0220	1.0228	1.0235	1.0243	1.0250	1.0258	1.0266	1.0273	1.0281	1.0289
20	1.0210	1.0217	1.0225	1.0233	1.0240	1.0248	1.0255	1.0263	1.0271	1.0278	1.0286
21	1.0207	1.0215	1.0222	1.0230	1.0238	1.0245	1.0253	1.0260	1.0268	1.0276	1.0283
22	1.0205	1.0212	1.0220	1.0227	1.0235	1.0242	1.0250	1.0258	1.0265	1.0273	1.0280
23	1.0202	1.0209	1.0217	1.0224	1.0232	1.0240	1.0247	1.0255	1.0262	1.0270	1.0277
24	1.0199	1.0207	1.0214	1.0222	1.0229	1.0237	1.0244	1.0252	1.0259	1.0267	1.0274
25	1.0196	1.0204	1.0211	1.0219	1.0226	1.0234	1.0241	1.0249	1.0256	1.0264	1.0271
26	1.0193	1.0201	1.0208	1.0216	1.0223	1.0231	1.0238	1.0246	1.0253	1.0261	1.0268
27	1.0190	1.0197	1.0205	1.0212	1.0220	1.0227	1.0235	1.0242	1.0250	1.0258	1.0265
28	1.0187	1.0194	1.0202	1.0209	1.0217	1.0224	1.0232	1.0239	1.0247	1.0257	1.0262
29	1.0184	1.0191	1.0199	1.0206	1.0213	1.0221	1.0228	1.0236	1.0243	1.0251	1.0258
30	1.0180	1.0188	1.0195	1.0203	1.0210	1.0218	1.0225	1.0233	1.0240	1.0247	1.0255
31	1.0177	1.0184	1.0192	1.0199	1.0207	1.0214	1.0222	1.0229	1.0237	1.0244	1.0251
32	1.0173	1.0181	1.0188	1.0196	1.0203	1.0211	1.0218	1.0226	1.0233	1.0240	1.0248

(参考資料: $http://www.marine-tech.co.jp/seawater/images/hijuu_graph.pdf$)