

令和 5 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

フォトンカウンティングによるX線スペクトル分析を活用した散乱線画像計測技術の研究

令和 6 年 5 月

株式会社 ANS e e N

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、株式会社 ANS e e Nが実施した令和5年度「フォトンカウンティングによるX線スペクトル分析を活用した散乱線画像計測技術の研究」の成果を取りまとめたものです。

目次

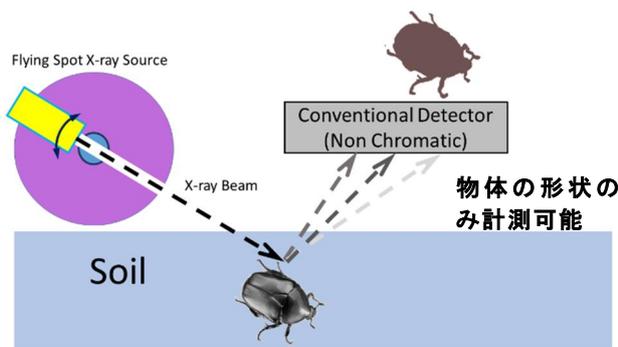
0. 研究背景.....	2
1. 委託業務の目的.....	2
2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度.....	3
3. 委託業務における研究の方法及び成果.....	3
(1) 散乱 X 線を用いた埋設物イメージングアルゴリズムの研究.....	3
(2) 受線素子及び電荷カウンティング LSI の試作.....	16
(3) 受線センサパネル試作.....	24
(4) 埋設物の物質弁別アルゴリズムの研究.....	28
(5) X 線照射試験.....	35
4. 委託業務全体の成果.....	41
5. プロジェクトの総合的推進.....	42
6. まとめ、今後の予定.....	42
7. 研究発表、知的財産権等の状況.....	42

0. 研究背景

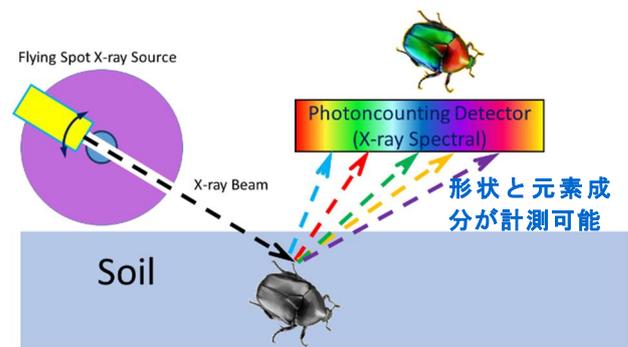
従来の X 線地中探査では物体の位置と形状計測が限界だった。対象物を透過、あるいは反射した X 線が、その物質固有のフォトンエネルギー(波長)スペクトルを含む性質を利用、埋設物に含まれる元素を検知することで、その分析能力を飛躍的に向上させる。本研究では非接触物質弁別探査の中核技術として、フォトン電荷カウンティングによる演算回路を集積した、3D-IC タイリングによる高解像度・高感度 X 線イメージセンサを創出する。

物質弁別型 X 線探査は、埋設物の同定能力が格段に進歩させ、掘削前危険物探知による土地再利用工事での安全確保をはじめ、建設後の経年劣化が懸念される橋梁、橋脚など、透過撮影が難しい対象物の検査に有用である。移動計測も可能であり、アスファルト路面陥没探査、トンネル壁面崩落予知、鉄道軌道スラブ検査など、社会インフラや産業インフラに幅広く応用できる。ガンマ線検出器として、離れた地点からの放射線核種の特定も可能である。海底資源を含む幅広い地中埋設・埋蔵探査、さらには災害救助への利用が期待される。

従来の散乱 X 線による地中探査



散乱 X 線スペクトルイメージングによる地中



1. 委託業務の目的

非接触で地中埋設物の物質同定を実現する計測法として、電荷カウンティングによる X 線センシングを適用し、人力でも移動可能な地中探査システムを念頭に、以下の仕様を実現する計測技術の開発を目指す。

1 埋設物の有効探査範囲：地表より最深 10cm 程度

土壌による X 線の吸収を考慮した原理検証可能な深さ範囲であり、かつ地中の埋設物（有用物・危険物等）検知および石による誤検知を検証できる最小深さ範囲として設定

2 検出サイズ：5cm 角ないしは直径 5cm

想定される線源、検出器で原理検証可能な十分な X 線散乱量を得るためにサイズであり、かつ埋設物や石の検知として最小限度の性能として必要なサイズから設定

3 散乱線解像度：1 cm 以内

ラミノグラフによる画像化の原理検証を想定した十分な散乱量を面積積分するための解像度や、埋設物や石のおおよその外形を得るために必要な最低限必要な解像度から設定

4 金属・非金属の弁別に加え、各々の素材において 2 種類以上の元素

(例：鉄とアルミニウムあるいは木材とプラスチックの判別) を区別可能

想定検出器エネルギー分解能と白色 X 線源からの大まかな材質弁別を原理検証するため材質を例示しており、併せて有用物、危険物、注意すべき物質を判別するのに最低限必要な区分範囲から設定

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

1 埋設物の有効探査範囲：地表より最深 10cm 程度

深度 10cm について実測において 5cm の撮像対象に対して材料の違う場合に散乱 X 線反応が違ふこと確認した。しかしながら解像度については満たすことが出来なかった。

深度 5cm については実測において検出サイズ、散乱線解像度、材料弁別をすべて満たす成果を得た。

2 検出サイズ：5cm 角ないしは直径 5cm

12x12cm の検出器を試作し、撮像範囲として 5cm 以上の撮像領域を達成した。

3 散乱線解像度：1 cm 以内

コリメータにより散乱線の入射を限定することにより 1cm 板の明確な画像化を達成した。

4 金属・非金属の弁別に加え、各々の素材において 2 種類以上の元素

金属、非金属対象物について 2 種類以上の元素（材料）を弁別することに成功した。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

(1) 散乱 X 線を用いた埋設物イメージングアルゴリズムの研究

[詳細研究項目1]

散乱 X 線の立体スペクトル測定による散乱 X 線分布の可視化により X 線入射と散乱 X 線受線の関係の明確化を行う。土壌は様々な条件が考えられるため、土壌なし、シンプルな遮蔽、シンプルな土壌、さまざま土壌条件（種類、吸水度等）へ順次拡張しつつ、他の項目の結果とあわせて現実的な測定系の限界点等を明らかにする。

散乱 X 線を取得する上で基礎的な情報となるのは、撮像対象となる物体の散乱 X 線、特性 X 線の応答特性と、物体の周辺物質の吸収、散乱角度の特性である。研究開発目標に対応するように、土壌中の軽元素～重元素の各種代表物質の基礎データを取得することを目的としてシミュレーション、及び実験を実施した。

最初に、シミュレーションにより、0、30、45、60、75、90、120、135、150、180度のそれぞれの角度における撮像対象となる代表物質として選択したアクリル(C₅O₂H₈)_n、鉄(Fe)、金(Au)についてスペクトルを計算した。線源は180度から0度に対して照射しているため、0度が透過、180度が完全反射となる。X線の照射エネルギーは150keVとした。このジオメトリで、アクリル(C₅O₂H₈)_n、鉄(Fe)、金(Au)の0度、90度、120度、135度、150度、180度の各位置におけるスペクトルを測定した結果をそれぞれ図3(1)1-1(a)、(b)、(c)に示す。

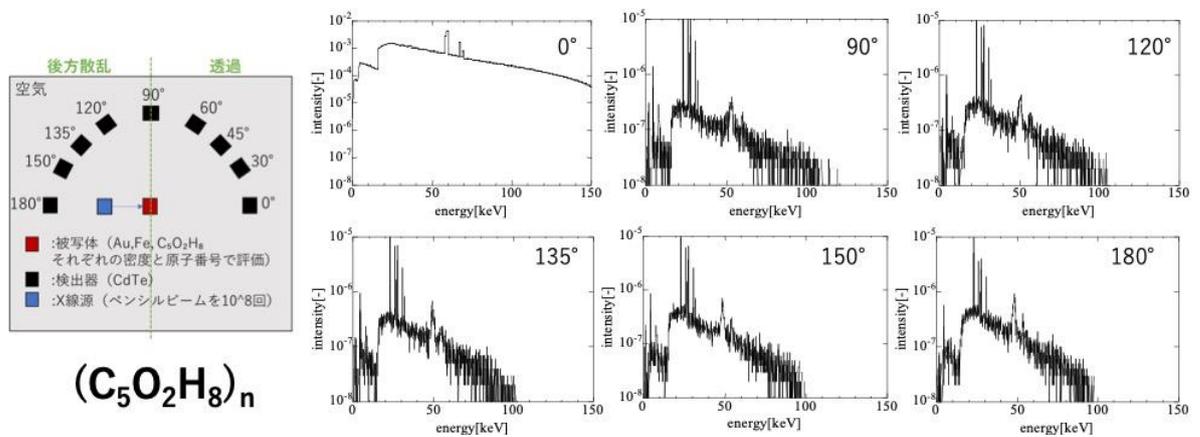


図3(1)1-1(a)：アクリルを対象物体としたときの各角度におけるスペクトル

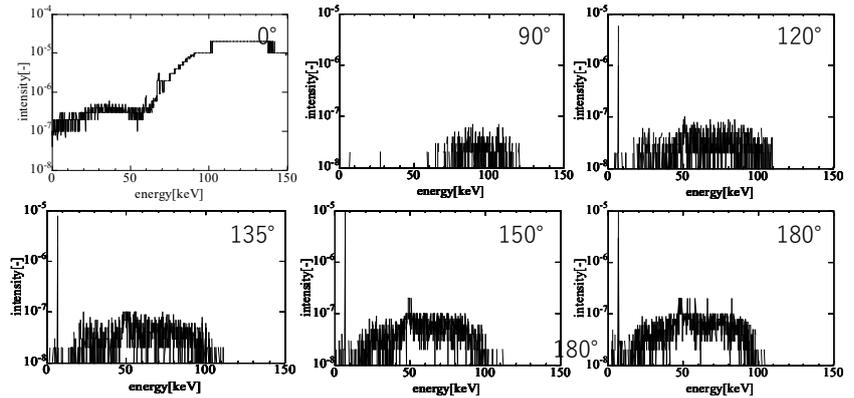
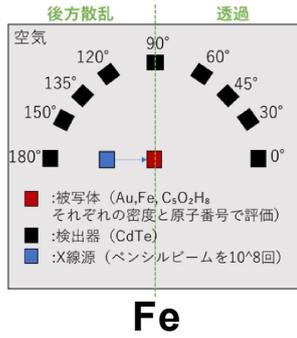


図3(1)1-1(b) : 鉄を対象物体としたときの各角度におけるスペクトル

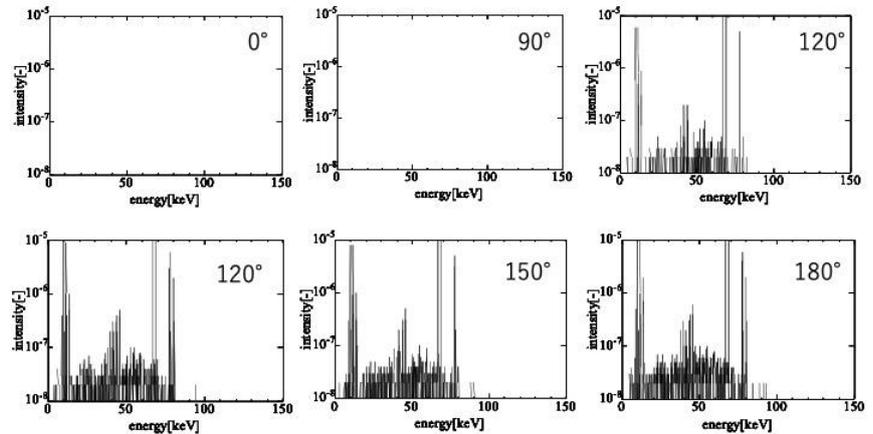
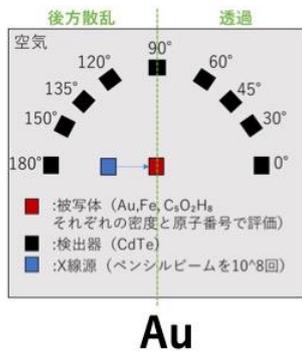


図3(1)1-1(c) : 金を対象物体としたときの各角度におけるスペクトル

軽元素物質であるアクリルは入射したX線の多くが透過しており、反射側として出てくるのは100keV以下のエネルギーとなった。全体的に入射したX線のスペクトルのエネルギー特性をそのまま減衰した特性となったことが特徴である。次に重い物質である鉄については高エネルギーのみが透過側に現れ、反射側には100keV以下のエネルギーが現れた。アクリルとは異なり、物体で透過しなかった低エネルギー領域が多く反射される傾向の特性を示し、反射線量の角度依存性もアクリルよりは大きい。最後に重元素物質である金については150keV領域ではほぼ透過せず、低エネルギーの反射X線と特性X線である蛍光ピークが見られた。線量の角度依存性は鉄と類似した傾向を示した。このことから、スペクトルを計測することにより、3種類の重さの物質についてそれぞれ特徴的な反射特性の傾向を見いだせることがわかった。

次に、土壌、水の中にこれら物質があった場合の反射スペクトルを計算し、かつ実測実験として水中の物質を模擬した反射スペクトルの実測を行った。このとき実験の都合で120度の反射計測を行う前提としたため、シミュレーションも120度の場合で計算を行った。

図3(1)1-2に実験系の模式図と写真を示す。X線源(150kV) から出力されたX線は水を透過した後被写体に照射され、その反射スペクトルが120度の位置に配置された水と透過した後、CdTe検出器で計測される実験系である。X線源から検出器への直接的なX線入射を防ぐために、線源と検出器の間に鉛ブロックを配置している。水は土壌の代わりとして配置しており、実験における場所の均一性を考慮しなくて良いこと、及びシミュレーション内でも構築が容易であり比較をしやすいことを理由に選択した。

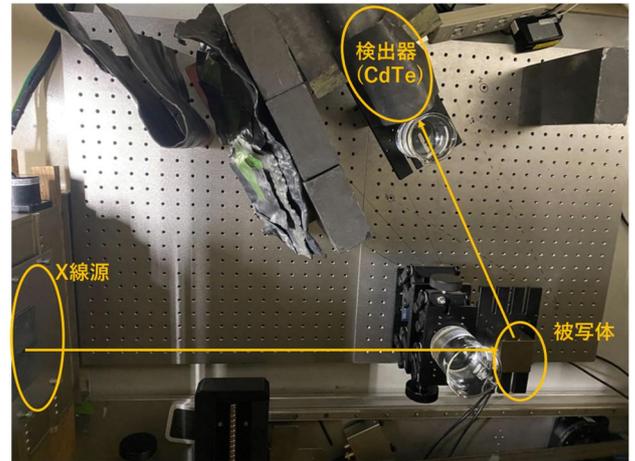
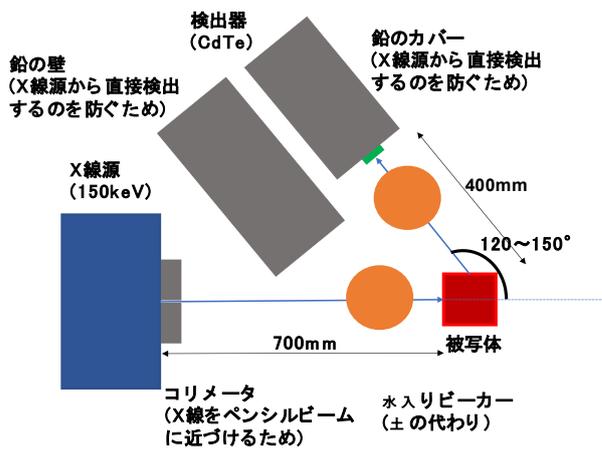


図3(1)1-2：実測実験のジオメトリ（左：模式図、右：写真）

図3(1)1-3に実測実験の各種スペクトルを示す。実測の結果においては被写体を乗せるステージや角度の正確性を出すための下面の光学実験用板、遮蔽箱等が存在するために被写体がない状態でも散乱線が多数存在することから、被写体なしの条件で測定を行い、各被写体の測定結果からこの結果を引くことで正味のスペクトルとした。金（Au）と鉄（Fe）においては反射線量が少ないために統計誤差からこの差分計算によりマイナス値が出ている。

シミュレーションと実測の結果を比較すると、特徴的なピークがある金（70keV付近）と鉄（5keV付近）については一致している。一方で、アクリルについては水がある状態では測定対象なしと類似したスペクトル形状となっており、この結果から判定するのは難しい。

なお、実測では測定対象がない場合にもスペクトル形状に周辺物体からの散乱線などを起因とした分布が存在しており、シミュレーションのように固定具等のない理想系からは外れるために、スペクトル情報の差異が少なくなっている。特に土壌を模した水がある状態においてはそれが顕著に現れており、アクリルや鉄は水により識別の難易度が上がることを示唆する結果を得た。一方で、金の特性X線はエネルギーが高いために、実測においてもスペクトルから特徴的な情報を得られることがわかった。

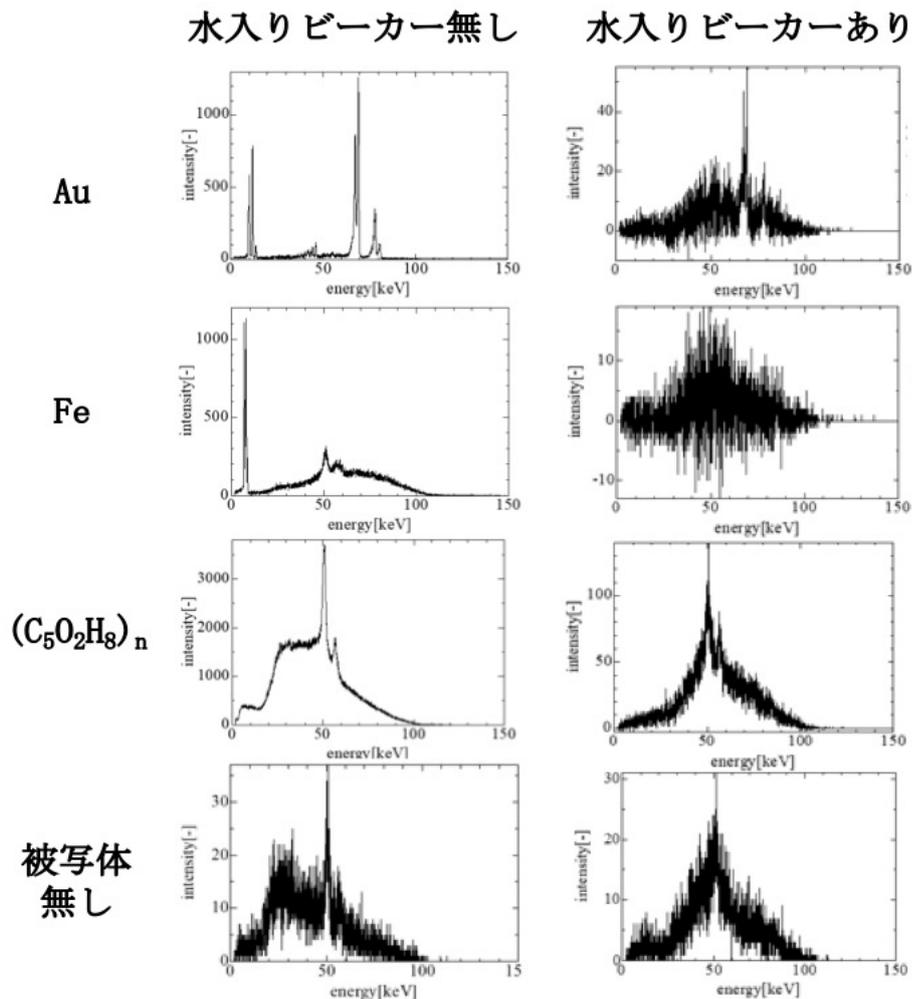


図3(1)1-3：水入りビーカーの有無における各種物質のスペクトル測定結果（実測実験）

次に、物質弁別の手法として、研究項目(1)でシミュレーションにより計算をした160kVのX線源の場合のスペクトルを5つのエネルギー帯域(0-30keV、31-60keV、61-90keV、91-120keV、121-150keV)で計上し、パターンを取得する方法を検証した。これは扱う数値を数個まで減らし、そのパターンを指標として識別をするコンセプトであり、現場利用を想定した実用的な手法を前提とした場合、現場で算出できる程度の計算量に加え、人間が解釈でき、次の測定条件を方向づけできることを前提としている。

実際の測定では90度(地面水平)よりも大きい必要があるため、実用的な線源及びセンサの配置を考慮して135度、150度、180度の場合を解析対象とした。その結果を図3(1)1-4(a), (b), (c)に示す。この結果から、鉄はエネルギー帯域毎の傾向が金及びアクリルとは異なるのでその情報から弁別できることがわかる。金とアクリルについてはエネルギー帯域毎のカウント数の傾向は同じであるためこの方法で見分けることは困難である。しかしフルスペクトルのデータから特性X線のエネルギーを見ることで金は明示的に見分けることができるため、その情報を付加することで、金、鉄、アクリルを弁別することは可能であると考えられる。

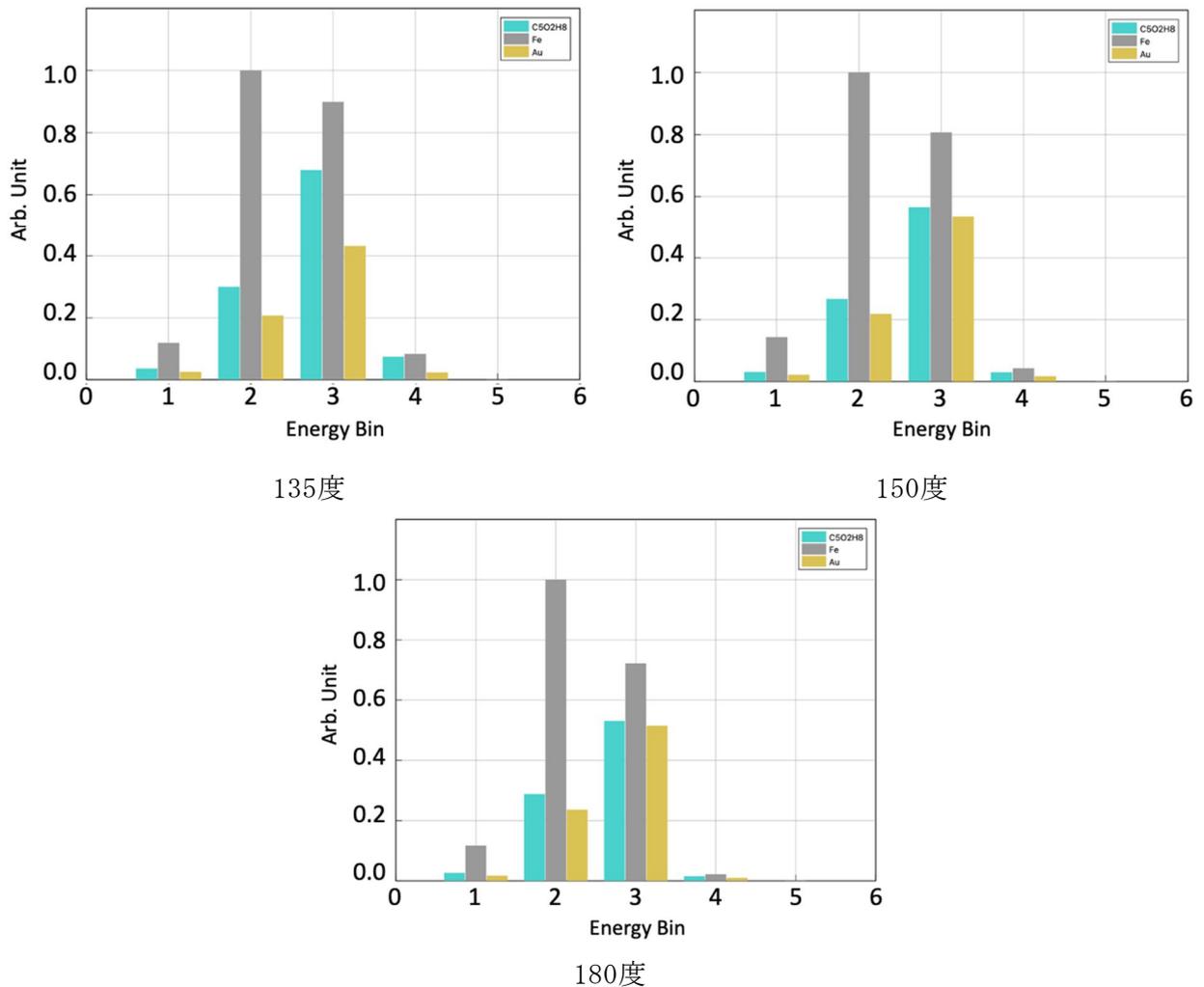


図3(1)1-4：135度, 150度, 180度におけるエネルギー帯域毎のカウント数

[詳細研究項目2]

散乱解像度を確保する散乱X線イメージングアルゴリズムの開発を行う。実質解像度確保のためにスペクトル状に広がる散乱X線から必要情報を抽出するためのエネルギー演算処理の研究を行う。

X線測定時の土と水の影響を調べるために、粒度がある程度揃っている硅砂の含水量を変えて、X線の透過量がどのように変化するかを実測測定により調査した。硅砂は5, 6, 8号、及び市販の黒土の4種類を用意し、それぞれに含水量を変化させていった場合のスペクトルを測定した結果を図3(1)2-1(a), (b), (c), (d)に、その透過減衰量を表3(1)2-1(a), (b), (c), (d)示す。このとき、X線源は150kVとし、線量（電流）値と測定時間は同じとした。

測定結果から、すべての硅砂と黒土において水を23gまたは46g入れた場合にX線の透過量が増えた。これは硅砂 (SiO₂) と水 (H₂O) の物質密度が大きく違うため、含水することにより密度の低い水がX線透過経路に多く含まれることになり透過量が増えると考えられる。なお、硅砂の粒径サイズについて以下のように定義されている。

- 5号 0.5mm
- 6号 0.3mm
- 8号 0.1mm

硅砂または黒土に水を加えると、X線の透過率は増大する傾向がみられるが、一定量を超えると、含水量の増加に応じて透過率が減少しており、含水量は測定結果に影響を及ぼすと考えられる。なお、硅砂5号400g+水115gの結果については後述の結果から本来は比率が最も低くなるものであるが、長時間実験によるセンサ温度の上昇によりバックグラウンドノイズが増加し

ハズレ値となってしまったと考えられる。

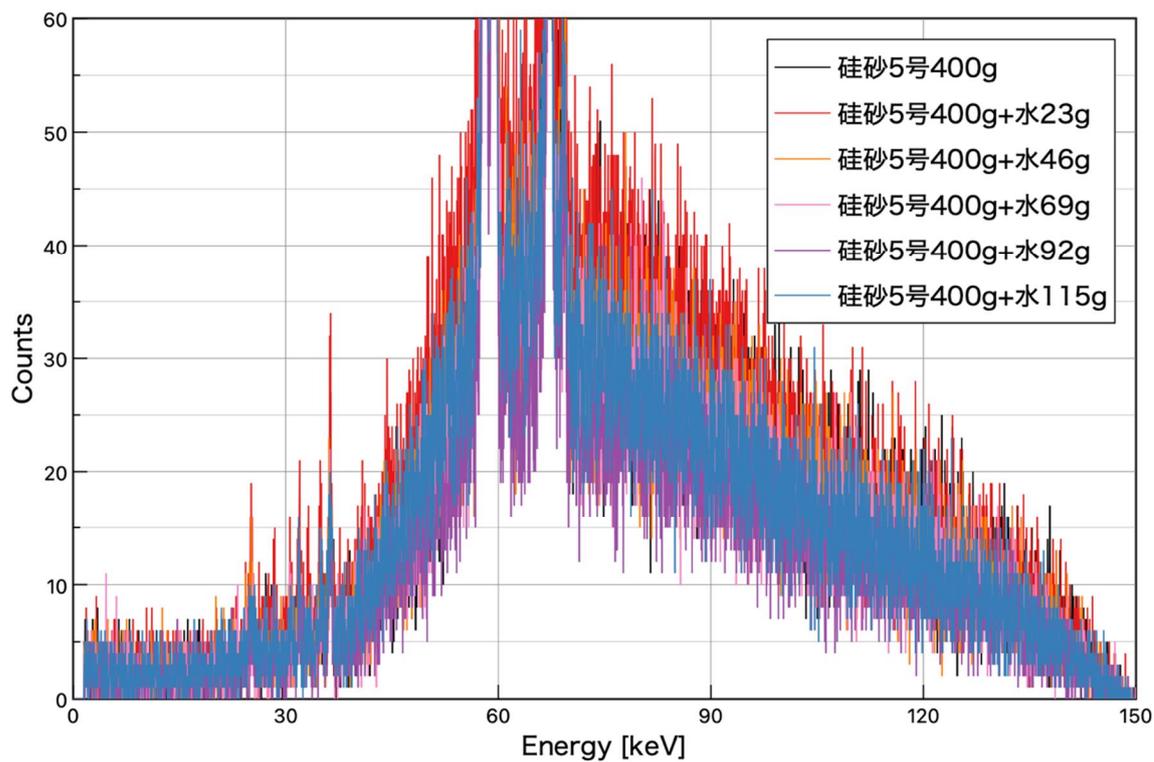


図3(1)2-1(a)：珪砂5号と各含水量の透過スペクトル

表3(1)2-1(a)：珪砂5号と各含水量の透過減衰量

	珪砂5号400g	珪砂5号400g +水23g	珪砂5号400g +水46g	珪砂5号400g +水69g	珪砂5号400g +水92g	珪砂5号400g +水115g
総カウント数	65547	82333	62752	59051	50283	62873
比率	100%	126%	96%	90%	77%	96%

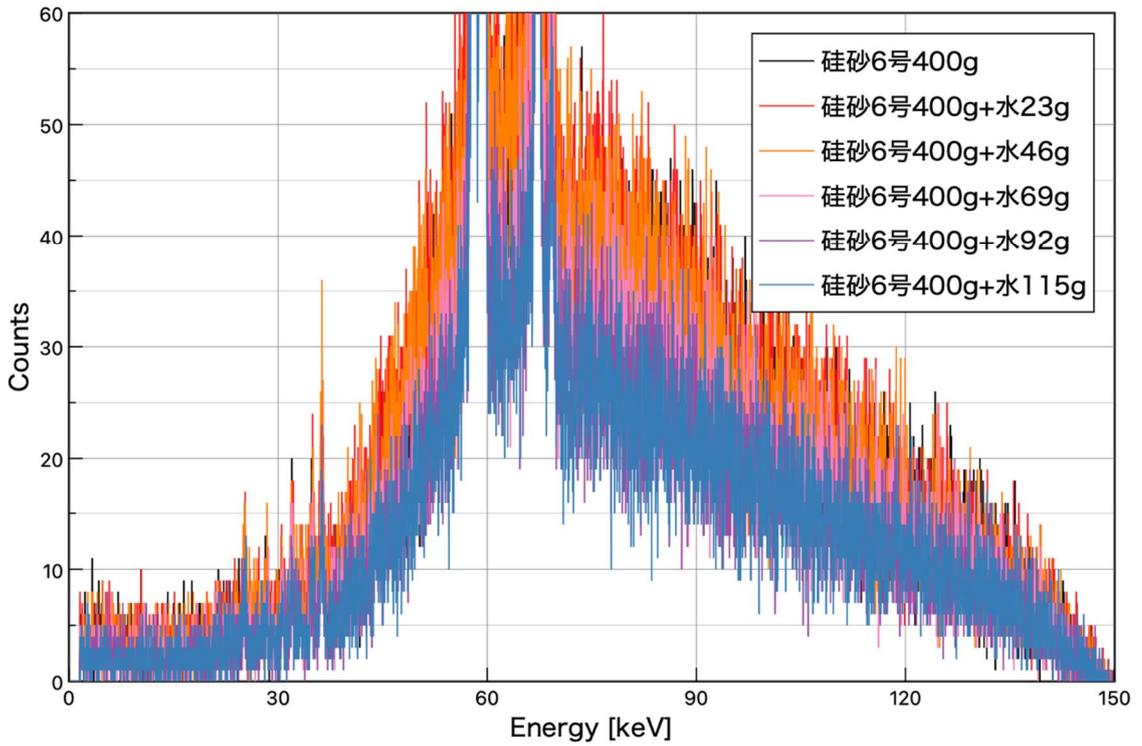


図3(1)2-1(b)：珪砂6号と各含水量の透過スペクトル

表3(1)2-1(b)：珪砂6号と各含水量の透過減衰量

	珪砂6号400g	珪砂6号400g +水23g	珪砂6号400g +水46g	珪砂6号400g +水69g	珪砂6号400g +水92g	珪砂6号400g +水115g
総カウント数	79361	87495	86034	66986	58928	56380
比率	100%	110%	108%	84%	74%	71%

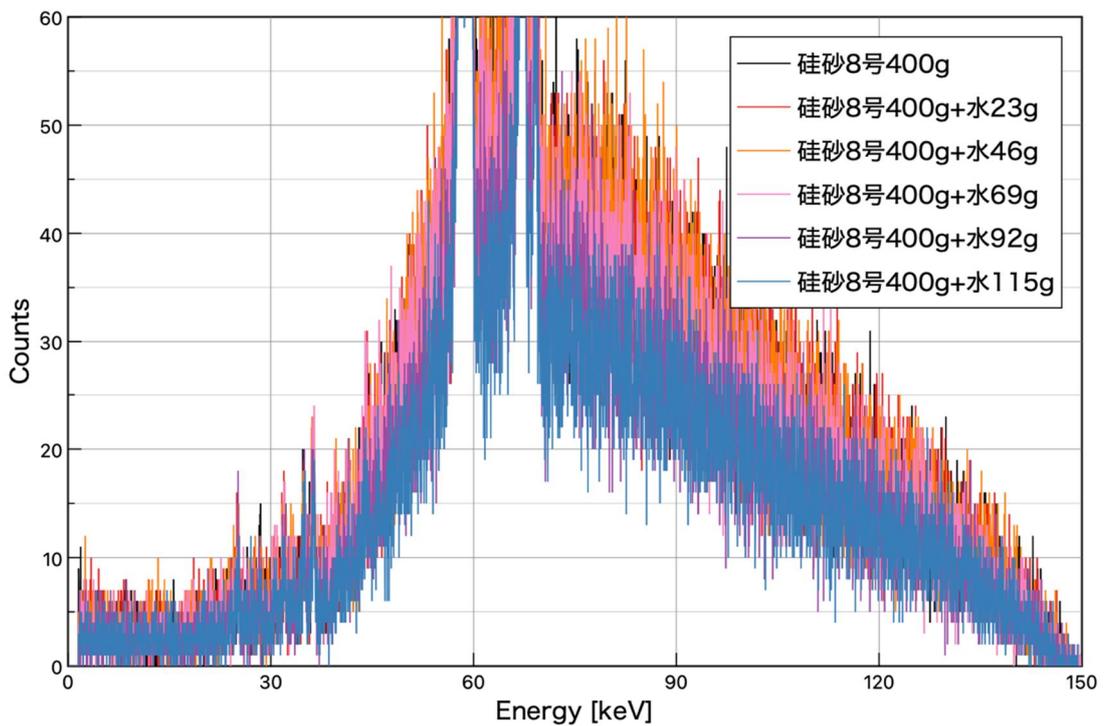


図3(1)2-1(c)： 珪砂8号と各含水量の透過スペクトル

表3(1)2-1(c)： 珪砂8号と各含水量の透過減衰量

	珪砂8号400g	珪砂8号400g +水23g	珪砂8号400g +水46g	珪砂8号400g +水69g	珪砂8号400g +水92g	珪砂8号400g +水115g
総カウント数	85356	85543	89165	82730	68778	62823
比率	100%	100%	104%	97%	81%	74%

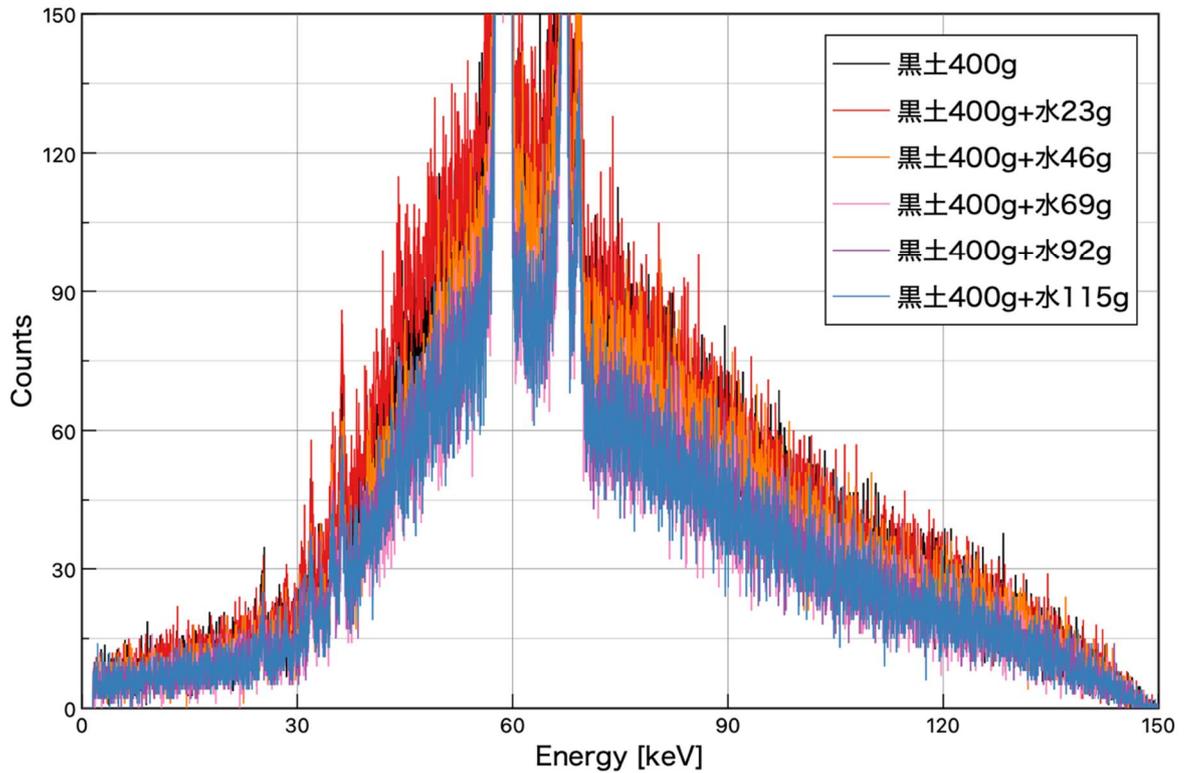


図3(1)2-1(d)： 黒土と各含水量の透過スペクトル

表3(1)2-1(d)： 黒土と各含水量の透過減衰量

	黒土400g	黒土400g +水23g	黒土400g +水46g	黒土400g +水69g	黒土400g +水92g	黒土400g +水115g
総カウント数	196125	211456	176171	141272	150738	143496
比率	100%	108%	90%	72%	77%	73%

次に、実測環境の調査として、各種土壌ファントムを作成し実験を行った。ファントム作成、及び実測実験はTMS（株）に依頼した。測定した土壌ファントムは砂、山の表土、市販の土（黒土）、庭先の土、田んぼの土、畑の土、アスファルトの7つである。土壌ファントムについては、それぞれ50mmと100mmの厚みのファントムを作製し、砂は50mmと75mmである。アスファルトは道路舗装に使われていた廃材を利用し、約30mm程度の厚みである。図3(1)2-2にファントムの写真と測定の様子を示す。



図3(1)2-2 土壌サンプルと測定時の様子

50mm、100mm（砂は75mm）それぞれの厚みの土壌サンプルのスペクトル測定結果を図3(1)2-3(a), (b)にカウント数と容器を基準とした比率を表3(1)2-3(a), (b)に示す。なお、アスファルトについては実験に用いたX線の線量が小さく実測が不可能であったため結果からは除外している。

この結果から、50mm厚みの場合には70keV以下程度のエネルギー帯域では土種類により吸収量の差異があり、カウント総数比率で、最大10%程度となることがわかった。一方で、100mm厚みの場合には全エネルギー帯域で吸収量の差異が少なくなっており、カウント比率でも2%程度の差に収まっていることがわかった。厚みにより傾向が異なる要因としては、それぞれの土壌において粒径が大きく異なるファントムであるため、容器内での充填率の粗密が大きいが、厚みが増えることで平均化されるためであると考えられる。

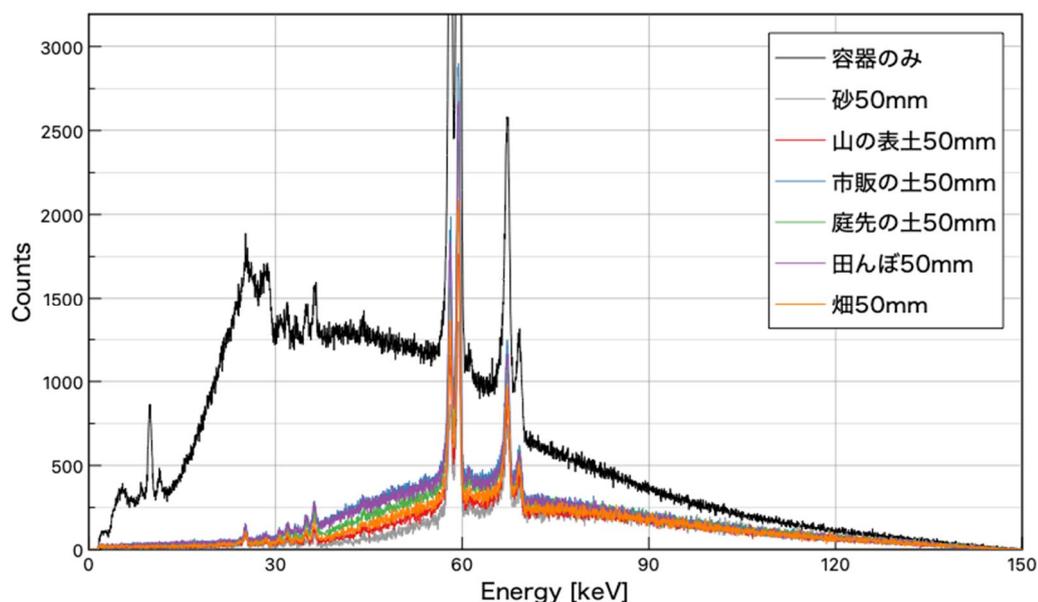


図3(1)2-3(a)：土壌ファントム（50mm厚み）の透過スペクトル

表3(1)2-3(a)：土壌ファントム（50mm厚み）の透過減衰量

	砂	山の表土	市販の土	庭先の土	田んぼ	畑
カウント数	416420	469292	694031	596059	656620	513688
比率（容器基準）	17%	19%	28%	24%	27%	21%

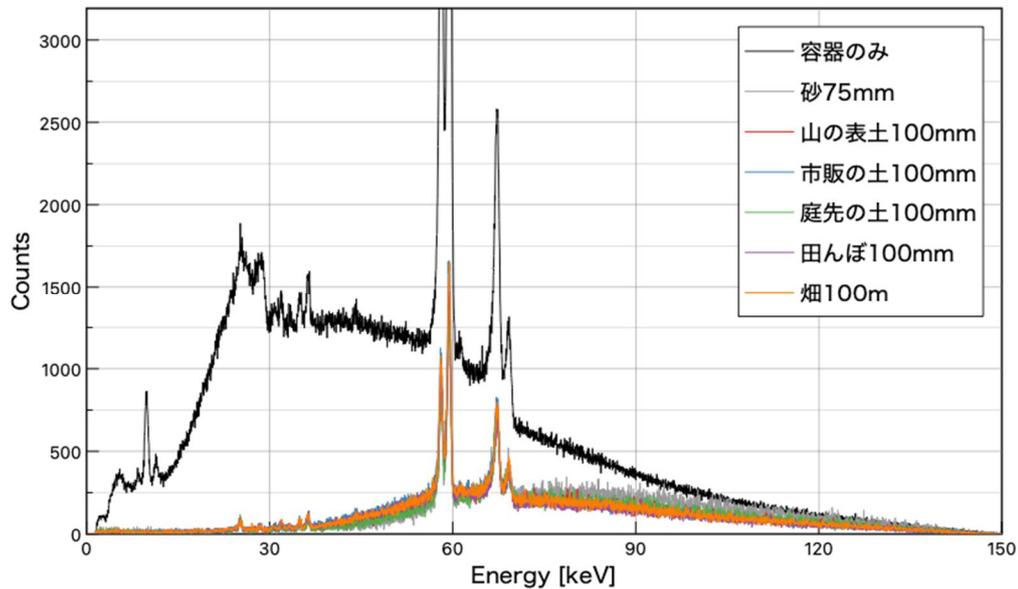


図3(1)2-3(b)：土壌ファントム（100mm厚み）の透過スペクトル

表3(1)2-3(b)：土壌ファントム（100mm厚み）の透過減衰量

	砂75mm	山の表土	市販の土	庭先の土	田んぼ	畑
カウント数	455380	403467	429449	399853	391230	418940
比率（容器基準）	19%	16%	18%	16%	16%	17%

[詳細研究項目3]

モンテカルロシミュレーション、及びラボX線照射設備による実験によりシステムに必要な計測条件の設定を行い、検出サイズ目標実現のための計測面積・積分時間等の設定を行う。また、遮蔽される土壌の影響について検討する。

散乱X線イメージングの場合、測定対象物のX線照射領域全体がX線光源として振る舞うことになるため、受線センサに入射する際にその入射角度を制限しないと極めて広い強度分布関数の重ね合わせとなり、分解能の高い解像ができず形状認識可能な画像を得ることが出来ない。そこで、入射角度制限のためのコリメータについての検証と試作、及びその特性評価を実測撮像により行い、これをもって解像度評価を行った。この結果、2.25mm仕切りのコリメータにより形状認識が可能な解像度の散乱X線画像を取得するに至った。

まずはコリメータの効果を検証するためにモンテカルロシミュレーションにより散乱線除去能力について計算を行った。図3(1)3-1に示すように、センサの前にグリッド上のコリメータを配置し、コリメータの有無により入射するX線に差異があるか調べた。

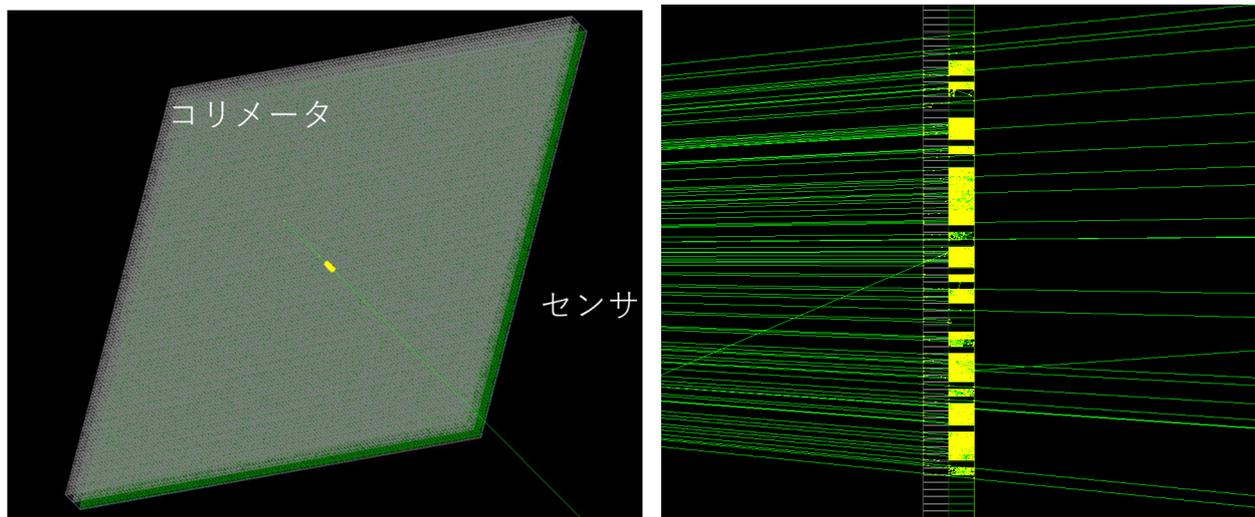


図3(1)3-1：コリメータとセンサの構造（俯瞰図（右）と断面図（左））

メインピークが70keVの散乱X線と、メインピークが110keVの散乱X線を模擬した白色分布X線源が最大半角6度で入射した場合について、1.0mmの穴と0.1mmの壁構造を有するグリッド構造の鉛製コリメータの有無によるカウント値、及び線量（カウント×エネルギー）の値を比較した結果を図3(1)3-2(a)に示す。また、70keVをメインピークにもつ散乱X線、及び110keVをメインピークにもつ散乱X線を模擬した白色X線を同様の条件で入射した場合の結果を図3(1)3-2(b)に示す。

この結果から、コリメータの有無による線量の差（緑と赤の分布偏り）が生じていないため、0.1mmピッチを実現するコリメータではコリメーション能力が不足していると判明した。そこで、コリメータの構造を2.25mmの穴で0.25mmの壁構造とし同様の計算を行った結果を図3(1)3-3(a), (b)に示す。結果として2.25mm穴0.25mm壁構造のコリメータの場合、コリメータの有無により線源分布の明確な差異が現れその効果を実証できることがわかった。

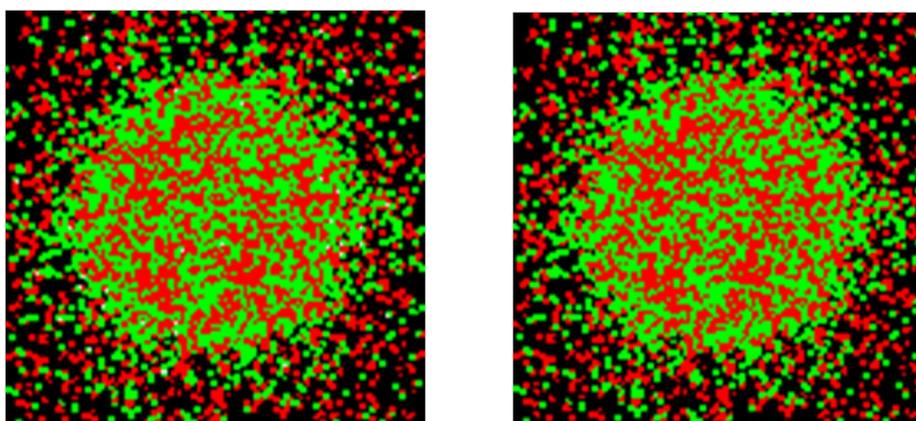


図3(1)3-2(a)：70keVピークの散乱X線が1.0mm穴0.1mm壁コリメータつきセンサに入射した場合のカウント値（左）、線量（右）の分布。緑がコリメータありのほう大きい値で、赤がコリメータなしのほう大きい値を示す。

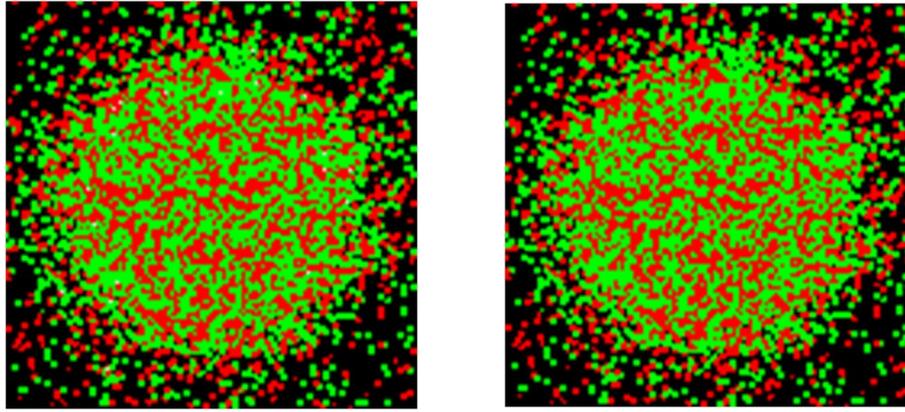


図3(1)3-2(b) : 110keVピークの散乱X線が1.0mm穴0.1mm壁コリメータつきセンサに入射した場合のカウント値(左)、線量(右)の分布。緑がコリメータありのほうが大きい値で、赤がコリメータなしのほうが大きい値を示す。

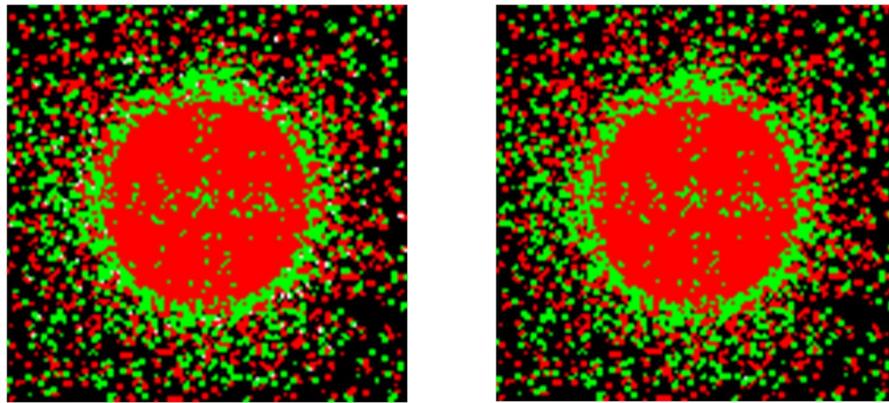


図3(1)3-3(a) : 70keVピークの散乱X線が2.25mm穴0.25mm壁コリメータつきセンサに入射した場合のカウント値(左)、線量(右)の分布。緑がコリメータありのほうが大きい値で、赤がコリメータなしのほうが大きい値を示す。

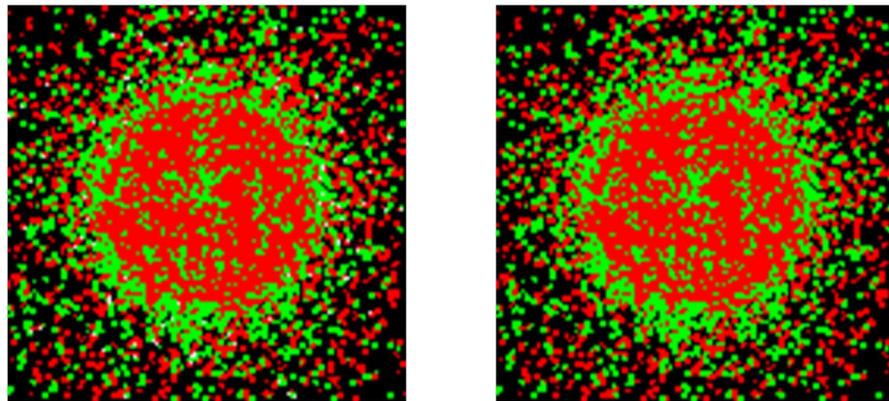


図3(1)3-3(b) : 110keVピークの散乱X線が2.25mm穴0.25mm壁コリメータつきセンサに入射した場合のカウント値(左)、線量(右)の分布。緑がコリメータありのほうが大きい値で、赤がコリメータなしのほうが大きい値を示す。

シミュレーション結果で効果の確認できた2.25mm穴0.25mm壁ピッチの鉛コリメータを実際に試作した(図3(1)3-4)。予算と試作期間の都合から原理検証としては1次元センサ用のコリメータを試作した。2次元コリメータを作る場合には金属3Dプリンタを活用してタンガステン等の材料で作成すれば実現可能である。

また、試作したコリメータをセンサに取り付け、撮像を行った。コリメータ効果を比較するた

めにコリメータ無し、及び20mm穴2mm壁のコリメータとの比較撮像実験を行った。撮像対象はアルファベットの「A」の形状の亚克力板とした。この結果、2.25mm穴コリメータでは明確に「A」の文字を認識できる画像を取得することに成功した（図3(1)-3-5）。

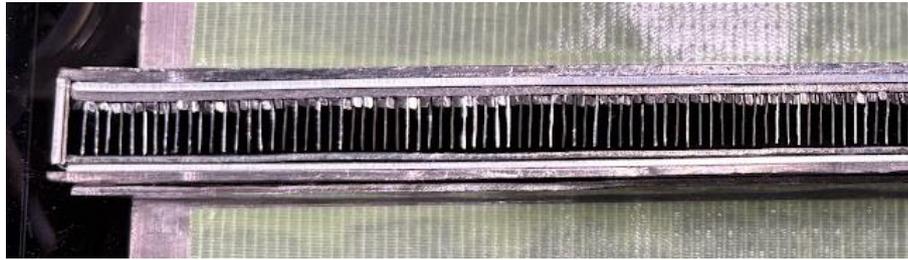


図3(1)3-4：2.25mm穴0.25mm壁コリメータ（1次元）の試作機

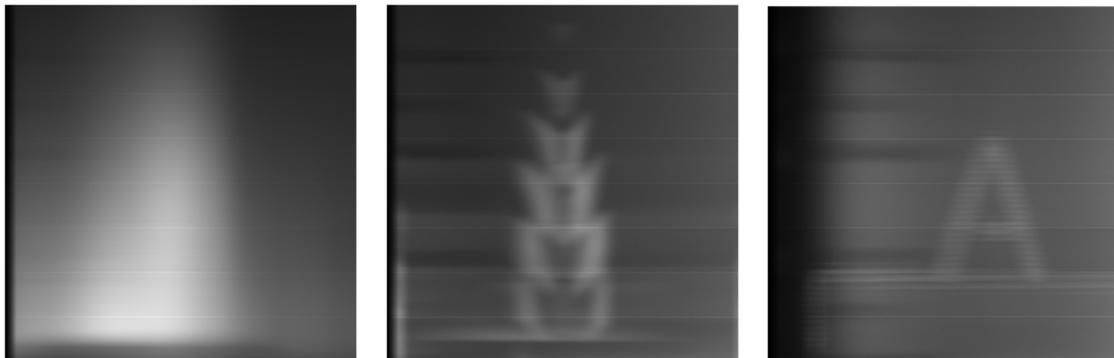


図 3(1)3-5：試作したコリメータと亚克力製「A」文字サンプルの撮像結果
（左からコリメータなし、20mm 穴 2mm 壁、2.25mm 穴 0.25mm 壁）

目標となる 1cm 以下の解像度を明確に得られるか、及び材料弁別に繋げられるデータを取得できるかを検証するために、1x1cm のサイズの 12 種類の金属類板を撮像した。この結果、図 3(1)3-6 に示すように、それぞれの金属板を認識できる解像度が得られた。また、材料毎の散乱線強度の違いに関するデータを取得できた。

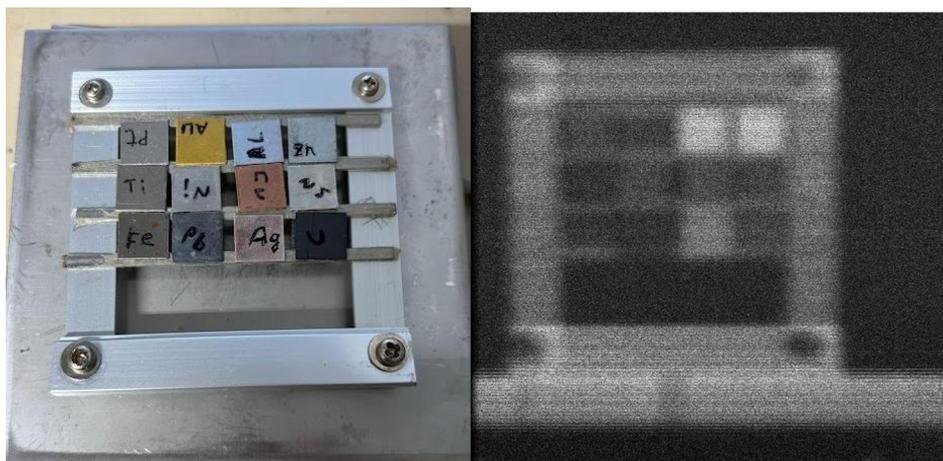


図 3(1)3-6：1x1cm の各種金属板の撮像結果

(2) 受線素子及び電荷カウンティング LSI の試作

[詳細研究項目1]

これまでに成果を持つ電荷カウンティング型のフォトンカウンティング信号処理LSIについて消費電力の低減等を考慮して設計・試作する。

これまでに成果を持つ電荷カウンティング型のフォトンカウンティング信号処理LSIは、半導体検出器としてショットキー型のCdTeを想定しているが、LSIの動作パラメータの調整によりそれ以外の半導体検出器（例えばCZT、TlBr）でも動作可能であった。これは様々な材料に対するX線イメージングの研究を行うために必要な特長であるが、一方で、本研究のように用途が限定されている場合には不要な機能も含まれていた。そこで、不要な機能の削減および次節の適切なエネルギー分解能の設定に関するチューニングを行うことで、消費電力の低減等を考慮した設計・試作を行った。

表3(2)1-1に、本研究で設計・試作したLSIの消費電力の低減結果を示す。結果の示す通り、本研究の成果として約25%の消費電力の低減を実現した。

表3(2)1-1 本研究で設計・試作したLSIの消費電力の低減結果

LSIの種類	消費電力[mW]
既存LSI	550
本研究で設計・試作したLSI	410

[詳細研究項目2]

物質弁別能と高感度を両立する適切なエネルギー分解能の設定を行う。この二項目は相反する条件となることが予測されるため、LSI回路規模等の制約とあわせた効果的かつ現実的な条件設定を行い設計へ盛り込む。

物質弁別能と高感度を両立する適切なエネルギー分解能の設定を、これまでに成果を持つ電荷カウンティング型のフォトンカウンティング信号処理LSIに適用するためには、LSIの回路規模等の制約により、計測できるエネルギー範囲とエネルギー分解能が相反する条件となる。すなわち、広いエネルギー範囲において高エネルギー分解能を実現するには、LSIの各画素において高分解能（多ビット）のADCを用意しなければならず、消費電力や回路面積といった回路規模の制約に相反する。そこで、エネルギー範囲の下限値にオフセットを持たせる機能を考案し、照射されるX線の全エネルギー範囲ではなく、物質弁別に必要なエネルギー範囲だけを計測できるよう設計へ盛り込んだ。

具体的には、既存LSIは例えば管電圧200kVのX線管の出力に対して、200keVを16分割（エネルギー分解能4bit）し12.5keV刻みで測定を行う。これを高分解能化するにはエネルギーの分割数を増やすしかなく、回路規模が大きくなってしまう。また、より高い管電圧のX線管、例えば2倍の400kVに対応しようとするエネルギーの刻みが2倍の25keVになってしまうため、刻みを維持するためにはエネルギーの分割数を2倍に増やすしかなく、やはり回路規模が大きくなる。一方で、管電圧が2倍の400kVになったとしても、そのメインピークである200keV付近が物質弁別のための主要なエネルギー範囲であるならば、計測の下限値を100keVにオフセットして100keVから300keVの範囲を計測することにより、回路規模を増やすことなくエネルギー分解能を維持できる。

以上を設計へ盛り込み試作したLSIを用いて、エネルギーオフセット量を変えながらX線スペクトルを計測した結果を図3(1)2-1に示す。使用したX線管の管電圧は150kVである。エネルギーオフセット量が増えるにしたがって低エネルギー側の計測値が出現しなくなっている。一方でエネルギー分解能は一定であり、計測範囲がシフトしていることが確認できた。

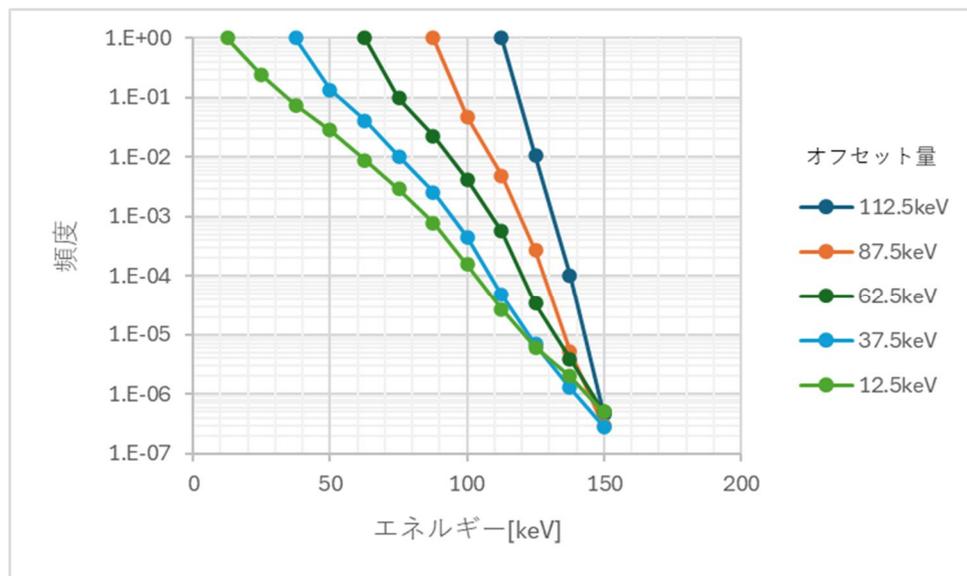


図3(1)2-1：試作したLSIのエネルギーオフセット機能の測定結果

[詳細研究項目3]

ダイナミックレンジを確保する微細ピクセル構造を持つ低ノイズセンサの試作を行う。低ノイズ化のために受線素子に接合構造を形成するため、また大面積で効率よく試作するためスパッタリングによる成膜を試みる。バックアップとしてより多くの製造時間が見込まれるがこれまでに製造・出荷実績をもつ蒸着法も準備する。

受線素子としてCdTeを採用した際に求められる性能は、エネルギー分解能と空間分解能の2つである。エネルギー分解能はセンサ素子のノイズがその特性を決定し、空間分解能についてはプロセス及び実装技術が特性を決定する。大面積センサを作る場合には実装技術の負荷を下げる事が重要であり、そのために強度面なども考慮した低ノイズセンサのプロセス方法を開発する必要がある。

そこで、受線素子への電極成膜については従来用いていた高真空中での加熱による金属蒸着法ではなく、スパッタリング法を用いた電極成膜について検証を行った。スパッタリング法では低真空中で良く高速な処理が可能ことと、プラズマ表面処理が可能なことにより前処理から蒸着までの輸送時の酸化などの不安定さを解消できることが上記条件を満たす上で適している。

図3(2)3-1にそれぞれ加熱蒸着、スパッタリングによる電極成膜で試作した受線素子の電流電圧特性 (I-V特性) を示す。前者は7サンプル (A-G)、後者は3サンプル (A-C) を試作しそれぞれ特性評価を行った。この結果から、スパッタリングによっても加熱蒸着と同等の特性を得ることが示された。また、真空条件としては加熱蒸着のときに 10^{-6} Pa程度で、スパッタリングのときに 10^{-2} Pa程度であり、金属成膜までの準備時間はスパッタリングが1/10程度となった。また、スパッタリングの場合には直径200mm程度の範囲で一括して成膜が可能であるが、加熱蒸着の場合には直径50mm程度の範囲が有効範囲となる。

このことから効率性を考慮した大面積パネルのためのプロセスとしてスパッタリングの方に優位性があることが示された。

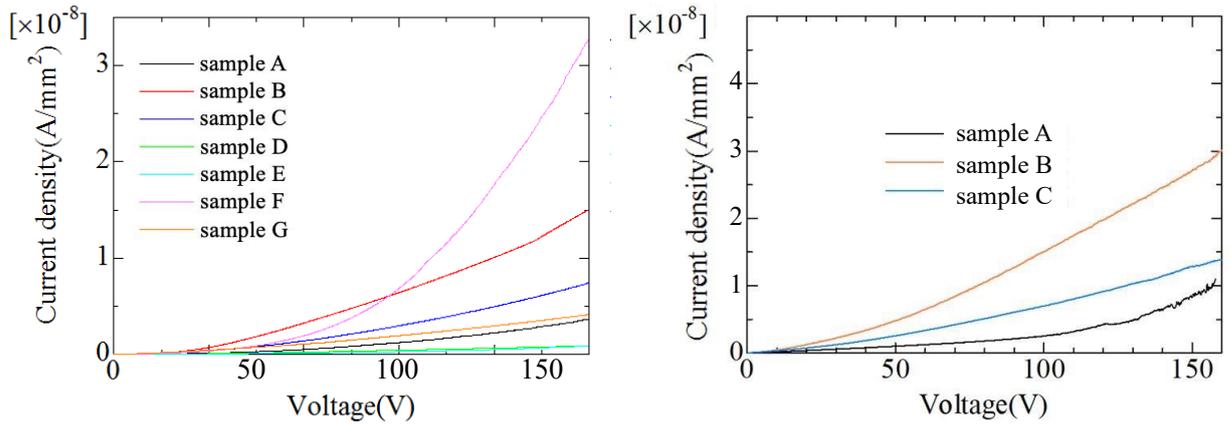


図3(2)3-1：熱加熱蒸着による電極成膜で試作した受線素子の電流電圧特性（左）とスパッタリングによる電極成膜で試作した受線素子の電流電圧特性（右）

[詳細研究項目4]

受線素子の性能向上のため、成膜条件、アニーリング処理などの最適化を行う。

アニーリングプロセスによる特性安定について検証するための実験を行った。電極成膜により作られた受線素子は、X線イメージングセンサとして実装するためにLSIとピクセル状の電気接合をする必要がある。その際に加熱処理が必須であり、このときに特性変化を起こすことによりエネルギー分解能が劣化する場合がある。そこで、実装前の適切な熱処理により、実装後の特性を一定に保つためのアニーリング処理についての検証を行い、実装時に加熱できる最大の温度の調査を行った。

図3(2)4-1にアニーリングなし（0℃）と、100℃、200℃、300℃、及び400℃の各温度でアニーリングを行った後とのスペクトル特性変化についての評価結果を示す。また、図3(2)4-2に同様のアニーリング条件での信号の立ち上がり特性についての評価結果を示す。これらの結果から300～400℃で特性変化を引き起こすことがわかったため、実装温度は200℃以下程度が望ましいという結論を得た。

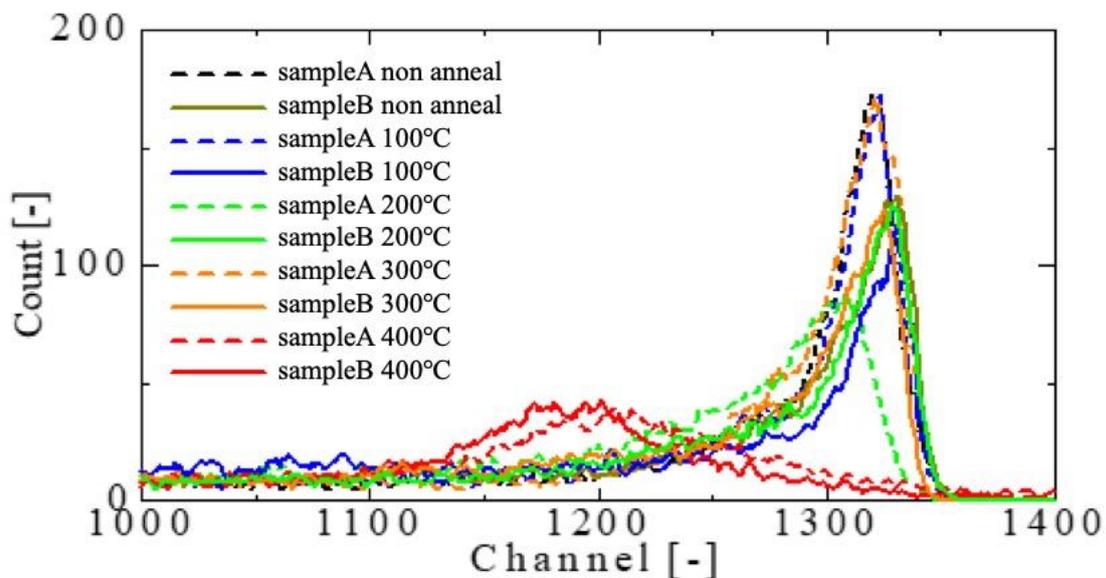


図3(2)4-1：各温度でのアニーリング後のスペクトル測定結果

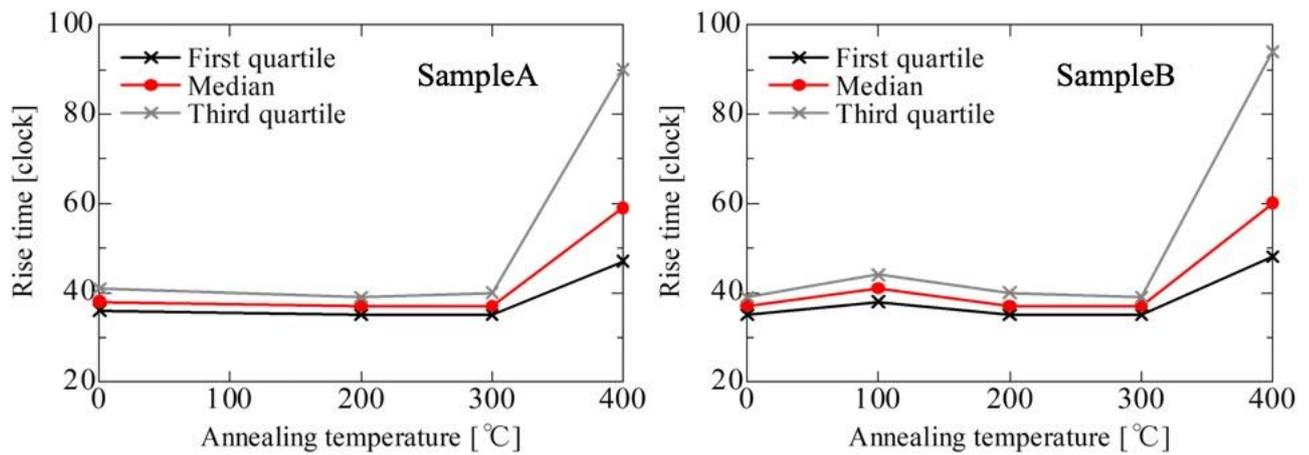


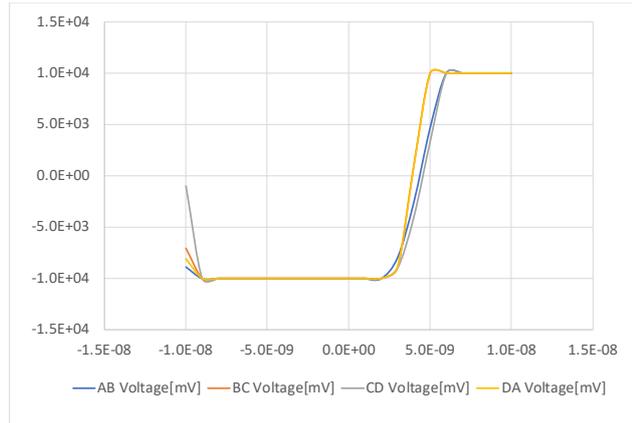
図3(2)4-2：各温度でのアニーリング後のパルス信号の立上り時間測定結果

本研究目的に対して受線素子の高性能化は要求される画像解像度、及びエネルギー弁別を実現するために必須課題である。具体的に受線素子の熱雑音を下げつつ、均一性を上げることが目標となり、これを実現するために有用なプロセスがドーピング後の発熱によって発生するアニーリング効果である。よって、そのプロセス条件の最適値を見出すために、複数のレーザードーピング条件でデバイス作成し、特性評価として電流電圧特性評価とHall効果測定を行った。

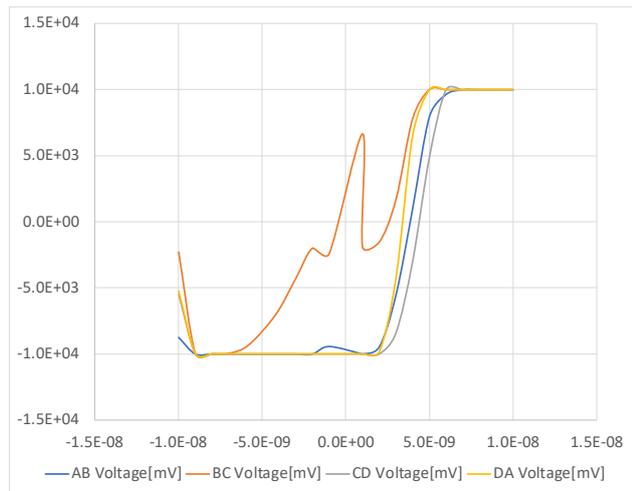
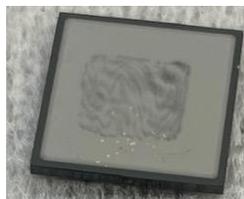
図3(2)4-3に3つのレーザー強度条件における特性比較を示す。50mJ/cm²の条件の場合に表面特性としてオーミック特性が出現しており、Hall効果測定が可能である。このサンプルについて測定を行ったところ、約16乗のキャリア濃度であることが推定され、理論値である16-17乗とほぼ等しい結果となった。

今回実施した条件においては50mJ/cm²のレーザードーピングが素子製造には最も良い点であると結論付けた。

5mJ/cm²



25mJ/cm²



50mJ/cm²

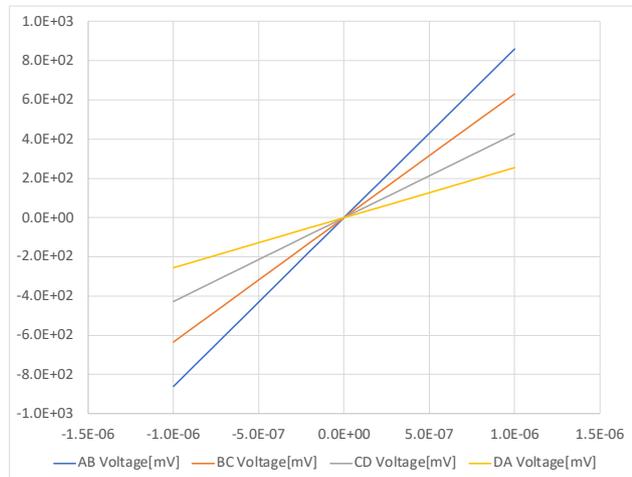
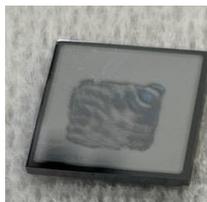


図3(2)4-3: CdTe受線素子の作成条件と特性

各レーザーエネルギーで試作した受線素子の²⁴¹Amを線源とした放射線測定の結果を図3(2)4-4に示す。この結果からも、装置設定値50mJ/cm² (実測値では46mJ/cm²) の条件で照射した素子が最も放射線測定に対する特性が良かったことから製造条件の最適化ができたものと言える。

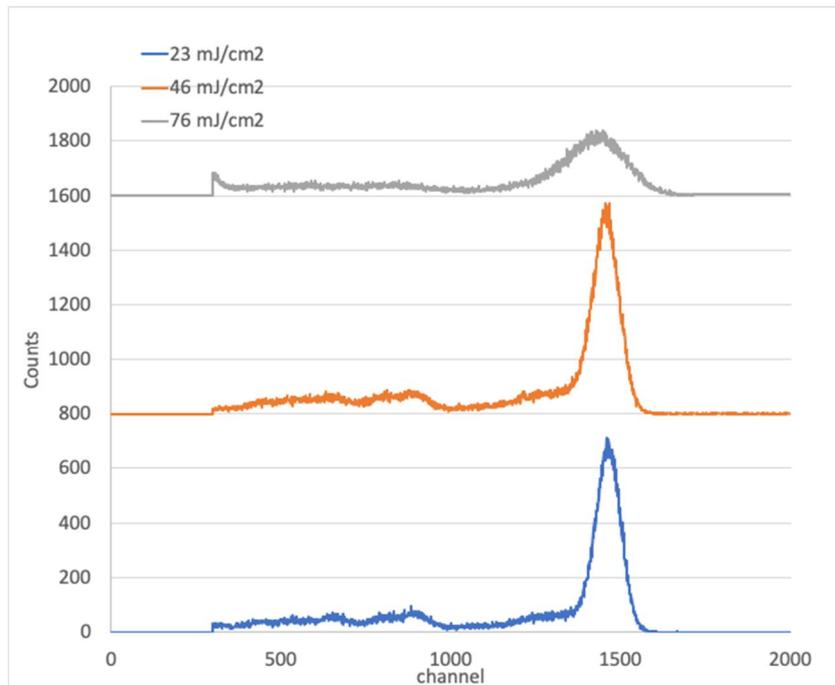


図3(2) 4-4: 各レーザーエネルギーで試作した受線素子の²⁴¹Am線源の測定結果

[詳細研究項目5]

データ解析、イメージングアルゴリズム等へのフィードバックのためのセンサ特性の詳細評価を行う。受線素子の試作した素子の合否判定評価は半導体特性試験による社内基準を用いて進め、(3)で試作したモジュールやパネルについてはX線照射試験によるバラツキ、エネルギー分解能の社内評価基準を用いる。ここではアルゴリズム研究への情報提供のため、センサモジュールとしての応答関数評価等の合否判定に加え、抜き取りで研究レベルの詳細な評価を行う。

LSI薄化、TSV加工、バンプ形成、モジュール試作を行った際の歩留まり評価を実施した。評価基準は、センサモジュール状態で以下の3つを満たすこととした。

- ・電源ショートがないこと
- ・データ通信が正常にできること
- ・ピクセル歩留まりが80%以上であること

この結果、3つの条件を満たすセンサモジュール数は59/119となり、歩留まりは約50%であった。この原因として、特にバンプ形成とモジュール試作に課題があり、実装時の受線素子破壊とピクセル歩留まりが低下したものと考えられる。試作したモジュールを図3(2)5-1に示す。



図3(2)5-1: 試作したセンサモジュール

センサモジュールの詳細評価として、外環境温度による特性の変化について調査を行った。測定した評価モジュールと恒温槽、及び測定ジオメトリを図3(2)5-2に示す。恒温槽に評価系一式を入れ、雰囲気温度を-10℃、10℃、20℃としたときの²⁴¹Am線源(59.5keV)による検出効率の計測を行った。図3(2)5-3に示すように、雰囲気温度が低いほど検出効率は増加する傾向であることがわかった。

た。このことからセンサ冷却はセンシングにおいて重要な要素となることがわかった。

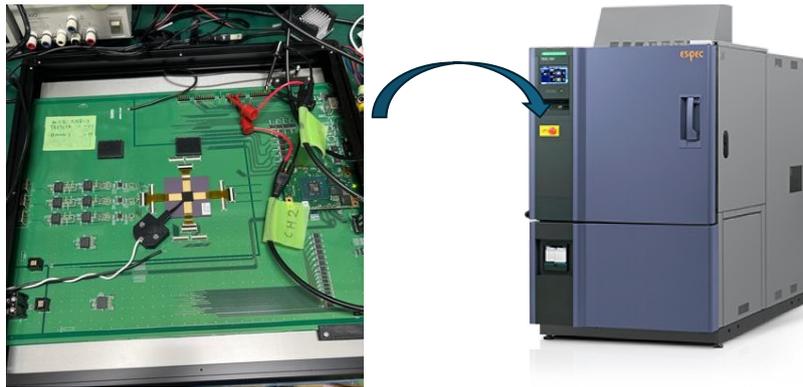
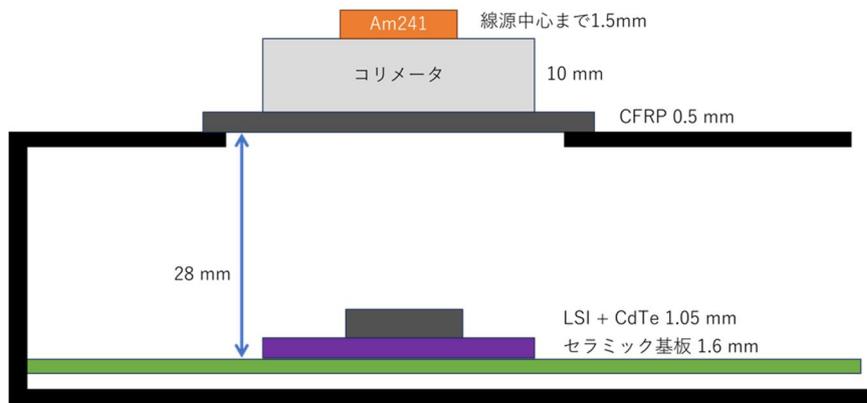


図3(2)5-2：測定環境と測定ジオメトリ



線源中心からCdTe上面までの距離 $1.5+10+0.5+28 - (1.05+1.6) = 37.35$ mm

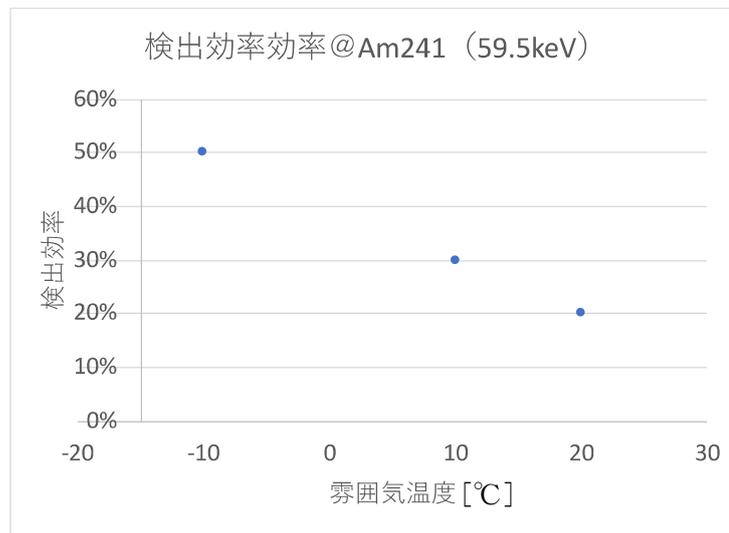


図3(2)5-3：雰囲気温度と検出効率の関係

次に、雰囲気温度と画質についての関係を調べた。雰囲気温度-10°Cから30°Cまで変化させたときに²⁴¹Am線源で照射し画像に変化があるか確認した。動作モードとして3種類それぞれの設定で撮像した。雰囲気温度が30°Cになった時点で画像に変化が現れた。結果としては10°Cを比較代表値として図3(2)5-4にまとめた。

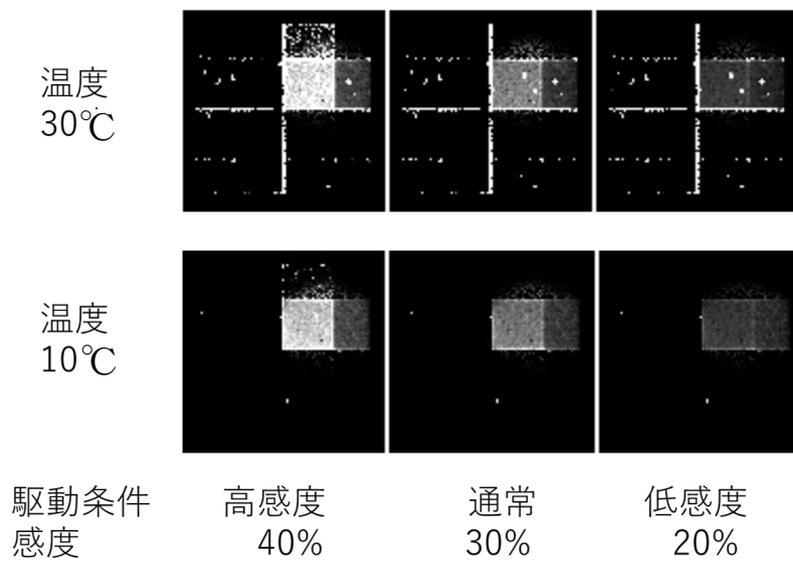


図 3(2)5-4 : 雰囲気温度と画質の関係

(3) 受線センサパネル試作

[詳細研究項目1]

3D-IC技術を用いたLSI薄化、TSV加工、受線センサとのバンピング接合によるセンサモジュールの試作を行う。パネルの試作のためには数十個のモジュールが必要となるため、その歩留まりの確保、動作特性の均一化が測られるように研究を進める。

受線素子にCdTeを用いた大面積イメージセンサを実現するためには、ピクセル化したCdTeとLSIを上層方向に積層するハイブリッド構造が必須となる。また、そのモジュールを複数並べることで広い面積を受線するイメージセンサが実現される。この構造を実装可能なものとするためには、LSIはCdTeのピクセル接合からの入力信号と信号出力の伝送を両立する必要があり、必然的にLSIの上下貫通配線構造を要求する。イメージセンサとしての実装時の構造（断面図）は図3(3)1-1に示すとおりである。

従来の実装方法ではCdTeとLSI（Read Out IC：ROIC）、及びLSIとPCBを銀ペースト印刷法により実装していたが、加熱接合時に有機溶剤や銀粒子が飛散し、センサ端面やガードリングにリーク電流を増やす電流パスが形成されるため、エネルギー分解能を低下させてしまう。そこで、LSIに有機溶剤を用いないマイクロバンプを形成する方法を検討した。具体的にはニッケル（Ni）を成膜形成した後に金（Au）薄膜を形成する方法とし、これにより実装時の金属固着性を高め、電気導通歩留まりを高める効果を狙った。LSIの電極パッドを活用したメッキを活用することで微細パターンが可能な点もメリットである。図3(3)1-2に構造模式図を示す。

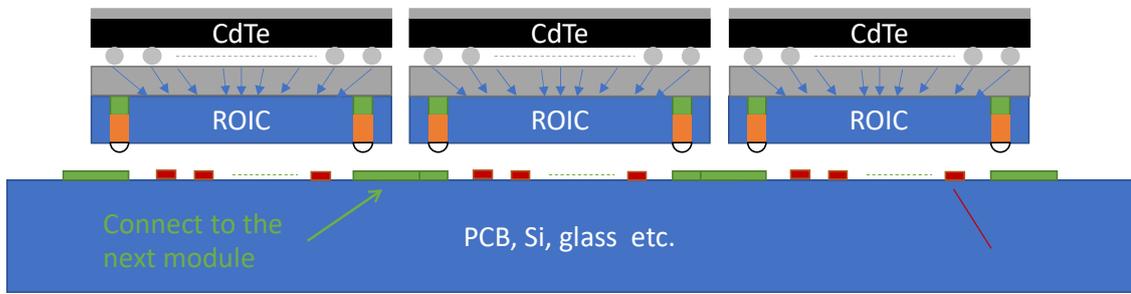


図3(3)1-1：CdTeを使用したイメージセンサの構造模式図

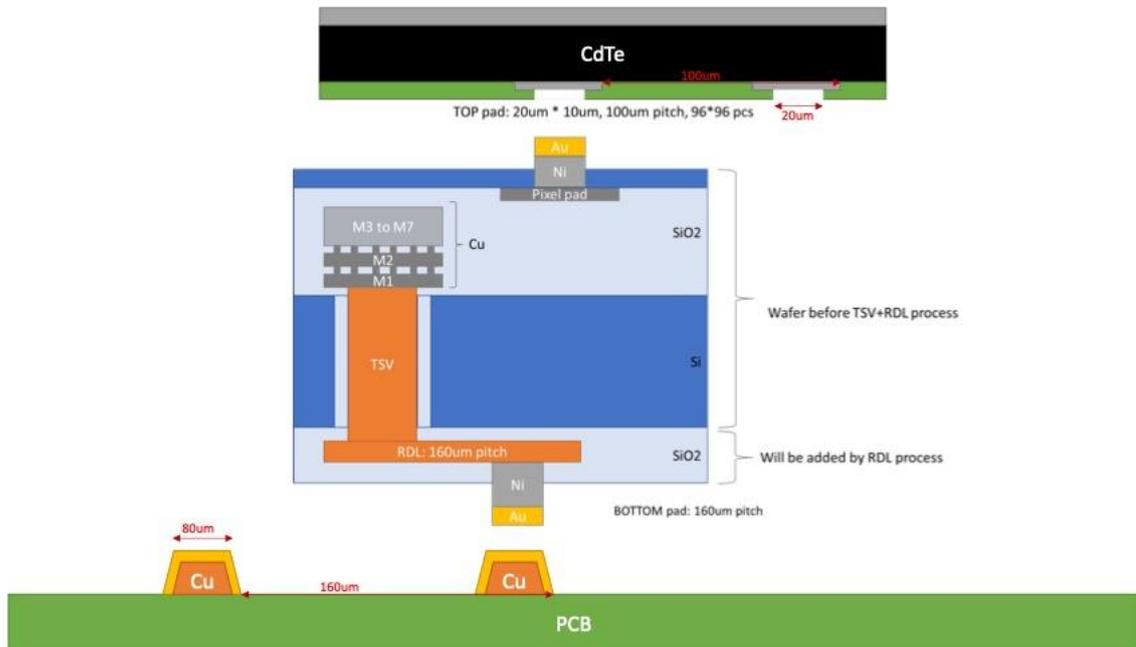


図3(3)1-2：ニッケル・金（Ni/Au）バンプ形成の構造模式図

3D-IC技術を用い、LSIの薄化、及びTSV加工を行った。チップのTSV電極側の表面メタル

を観察した結果を図3(3)1-3に示す。図3(3)1-1に示す構造を実現するために電源と信号の両方が裏面に配置され、かつパッドの冗長性を確保するパターンを実現した。

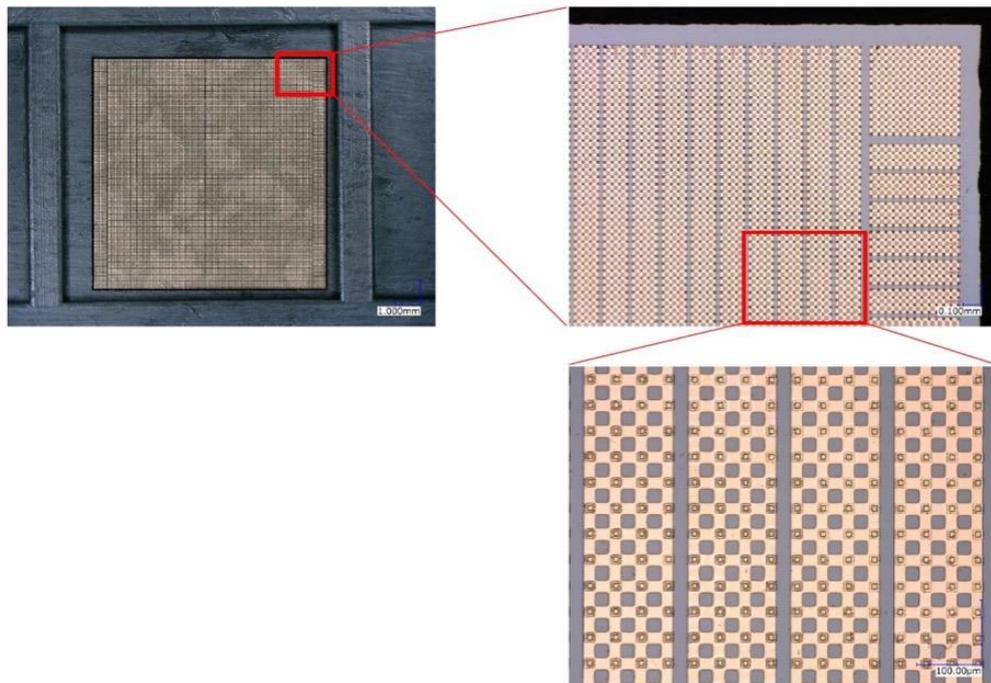


図3(3)1-3：試作したTSV加工後のLSI

CdTe受線素子とTSV加工済みのLSIをピクセル毎に接合して積層し、センサモジュールを試作した。CdTe受線素子の耐圧、耐熱の特性から低温、低圧バンプを形成可能な銀ペーストバンプ印刷方式を採用した（図3(2)3-1参照）。また、信号読出しのためのパッケージ基板へのセンサモジュール接合にも同様に銀ペーストバンプ印刷方式を採用した。試作した評価用センサユニットとその断面観察結果を図3(3)1-4に示す。

想定通りピクセル毎にバンプが形成され、CdTe - LSI - パッケージ基板の3層構造が実現されている。

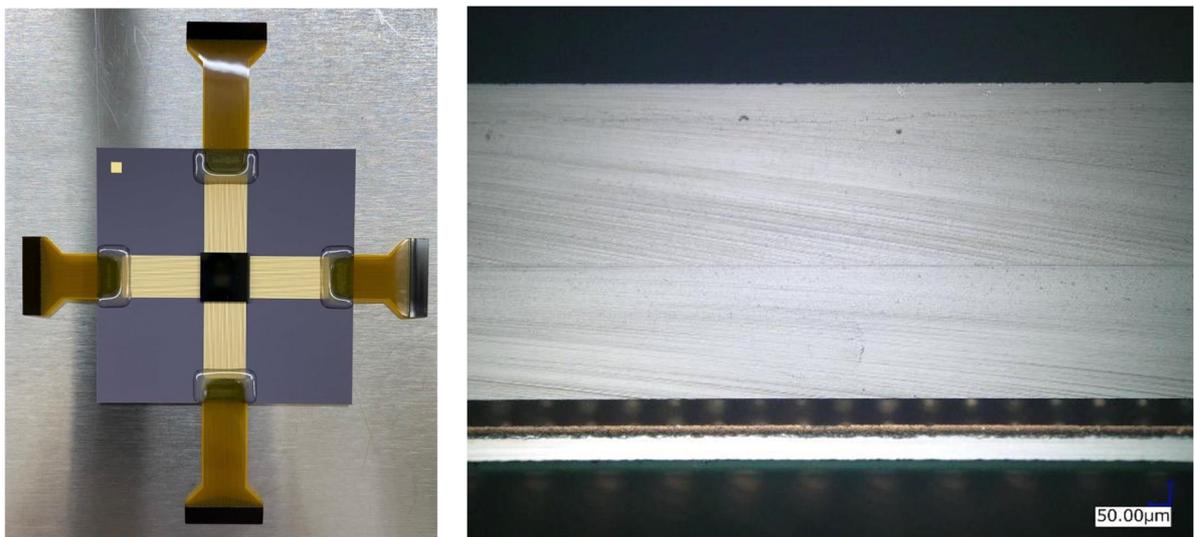


図3(3)1-4 試作したセンサモジュールと端面構造観察の結果

この成果を踏まえてセンサモジュールを縦横3行3列ずつ実装した、3x3の受線センサパネルを作成した。図3(3)1-5に試作したセンサパネルの写真とX線透過で解像度評価チャートを撮像した結果を示す。試作したCdTeとLSIにより、X線に応答した撮像結果を得られることがわかった。

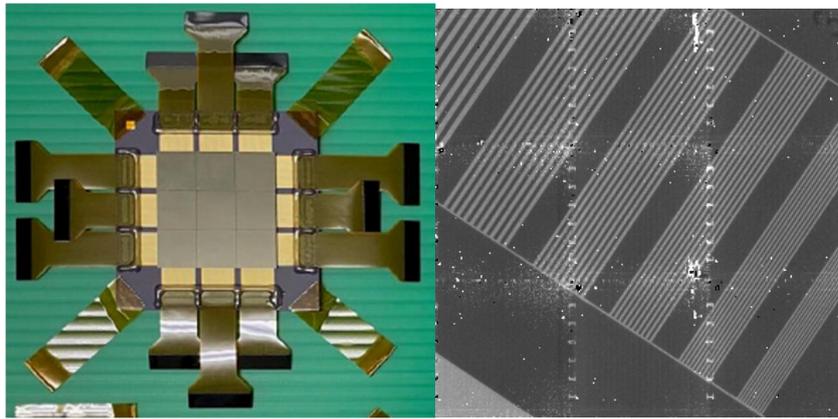


図3(3)1-5: 試作した受線センサパネル (3x3) と解像度チャートの撮像結果

[詳細研究項目2]

実装基板上へモジュールのタイリングによる大面積センサの試作を行う。微細配線パターンが可能な基板（ガラスエポキシ系樹脂、セラミック、シリコン、ガラス等）を検討し、本研究での必要な性能を確保しつつ熱応力など大面積化するための基盤技術の確立および試作を行う。

センサモジュールを高精度に複数行列で実装する基板は高い精度を有する必要がある。特に本研究の目標である5cm以上の撮像対象の散乱X線を受線するためには、10cm以上のパッケージ基板とする必要がある。このときに満たすべき条件は、以下の通りである。

- 配線余白等も含め15cmの配線長を有する
- 80 μ m線幅/80 μ mギャップの精度を上記長さ（15cm）で実現する
- 基板反りは1cmあたりで5 μ m以内
- 実装時の加熱（120度）、加圧（5000N/m）で変形しない剛性を有する

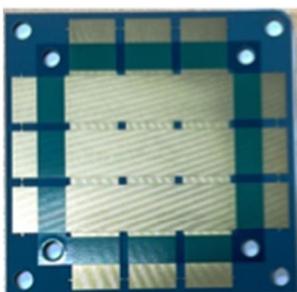
パッケージ基板としてはガラスエポキシ基板とセラミック基板が一般的に用いられている。また、確実な配線精度、及び剛性や反り精度を実現可能な部材としてシリコン基板への配線がある。これらが上記の仕様を満たせるか検証するために試作を行い、簡単に測定が可能な反りと配線精度について評価を行った。

図3(3)1-6に示すように、ガラスエポキシ基板、及びセラミック基板については上記仕様を満たすことが出来なかった。具体的にはガラスエポキシ基板、及びセラミック基板については、平板上での目視と物差しによる測定で反りの発生を確認し、5cmで300 μ m以上（1cmあたり60 μ m以上）であることがわかった。

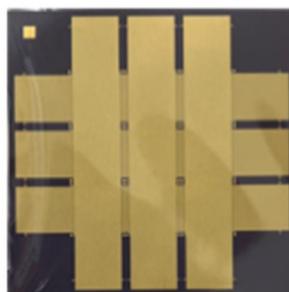
唯一、基板反りと配線精度の両方の仕様を満たすことができるのは、シリコン基板であった。シリコンの場合には酸化膜を形成した上に、フォトリソグラフィによりパターンニングを行い、メッキで配線を形成することで、大面積かつ高精度の配線パターンを実現した。

一方で、製造の容易製や自由度、コストなどを考慮するとその順番は以下の通りである。

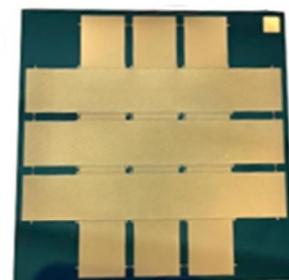
1. ガラスエポキシ（多層配線可能、低価格）
2. セラミック基板（多層配線可能、量産時には低コスト）
3. シリコン基板（片面配線のみ、コスト高）



ガラスエポキシ基板
反り：NG
配線精度：NG



セラミック基板
反り：OK
配線精度：NG



シリコン基板
反り：OK
配線精度：OK

図3(3)-1-6: 試作した各種部材でのパッケージ基板

これまでの結果を踏まえ、目標とする5cmの撮像対象物を実現するために、センサモジュールを12x12でシリコンパッケージ基板に配置した大面積受線センサパネルを試作した（図3(3)1-7）。

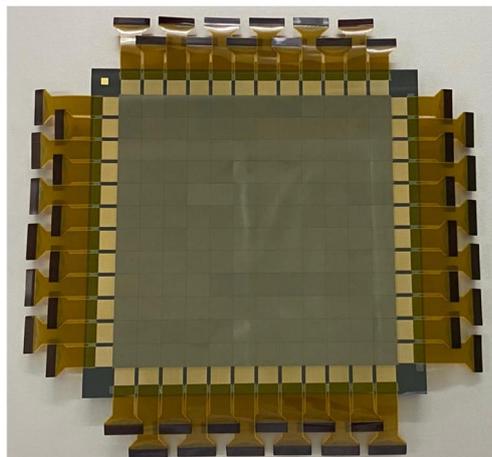


図 3(3)1-7 : 試作した 12x12 モジュール配置の受線センサパネル

開発した受線センサパネルで、5x5cm の鉄、及びアルミニウム板の散乱 X 線像を撮像した。撮像対象物と撮像結果を図 3(3)1-8 に示す。この結果として 8x8cm 程度の有効撮像領域を実現した。

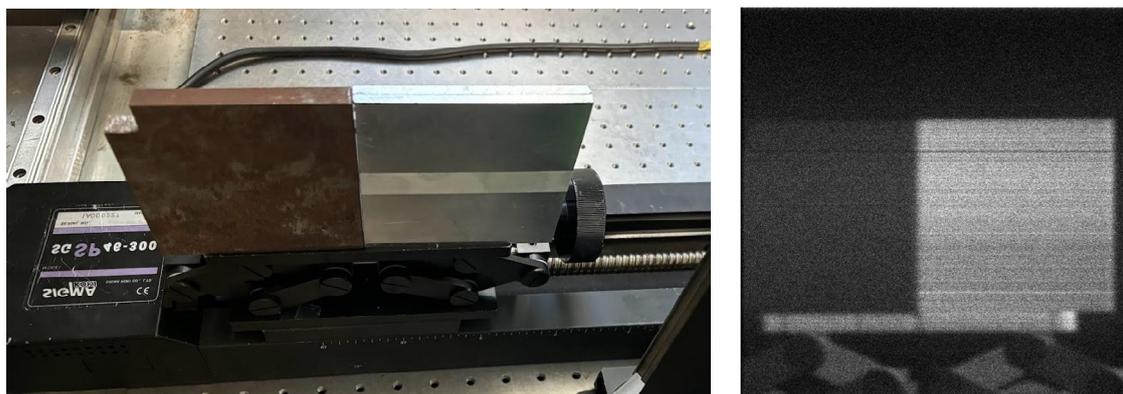


図 3(3)1-8 : 5x5cm の金属板 2 種類の撮像結果（鉄、アルミニウムそれぞれ）

(4) 埋設物の物質弁別アルゴリズムの研究

[詳細研究項目1]

反射立体散乱エネルギー分布の解析、対象物材質、サイズによる計測エネルギースペクトル条件の算出、画像化を考慮したエネルギー位置及び幅分解能等の算出を行う。

散乱X線の特徴を調べるためにシミュレーションにより角度依存などを検証した。図3(4)1-1に示すように、土壌に垂直にX線を入射した際に45度に配置した600mm長のセンサ位置においてどのような散乱X線が検知されるかを計算した。なお45度位置に600mmのセンサを配置すると、30度～90度までの情報を一括で得ることができる。センサ位置のデータは、全長のデータを足し合わせたスペクトルと、1mm毎に算出した強度（カウント数）をそれぞれ計算した。

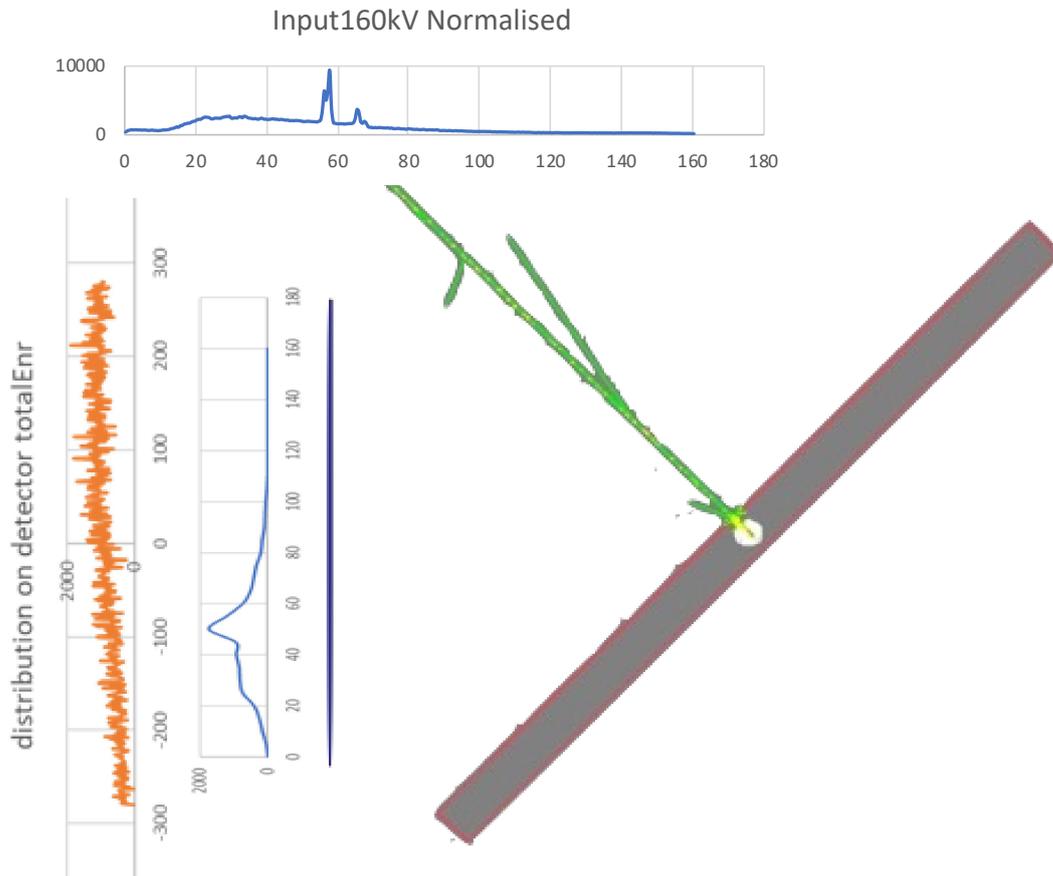


図3(4)1-1：土の散乱X線特性の計算

この結果から言えることは、入射方向に近づくほど散乱線量は増え、スペクトルは線源の特性X線との比率が減少し、かつエネルギーが全般的に低い方向にシフトするということである。

更に、アルミニウム (Al)、鉄 (Fe)、アクリル樹脂 (PMMA) それぞれについて、土中1cm～5cmの深さに埋没している場合の散乱X線のスペクトル、及び線量をそれぞれ評価した。土のみのカウント最大値で正規化したスペクトルと、対数表示のスペクトルをそれぞれの材料毎に算出した結果を図3(4)1-2(a), (b), (c)にそれぞれ示す。

この結果から、材料、及び深さによりスペクトルが変化するが、アルミニウムについては土と極めて近い応答を示すことがわかった。

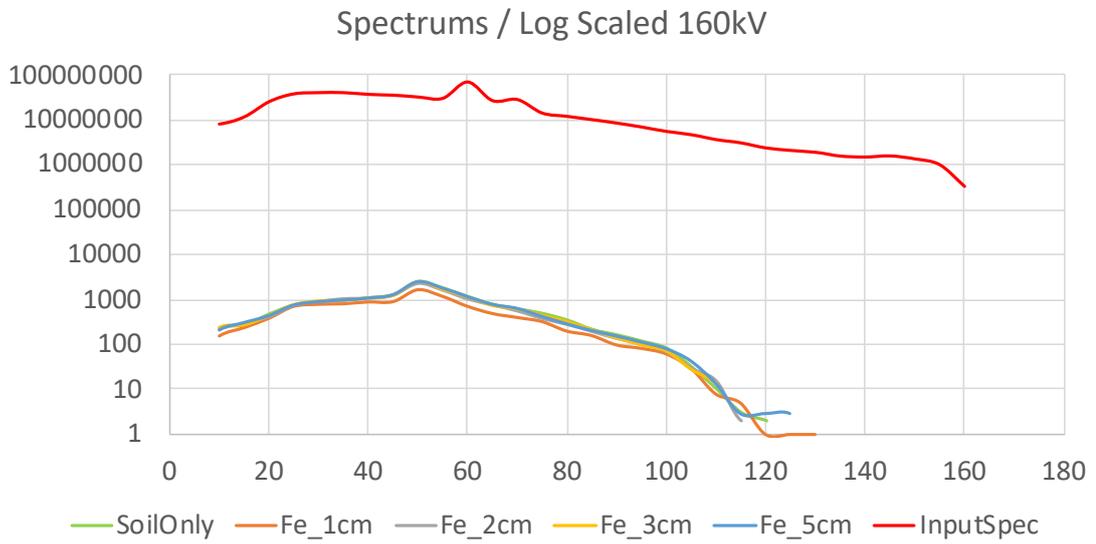
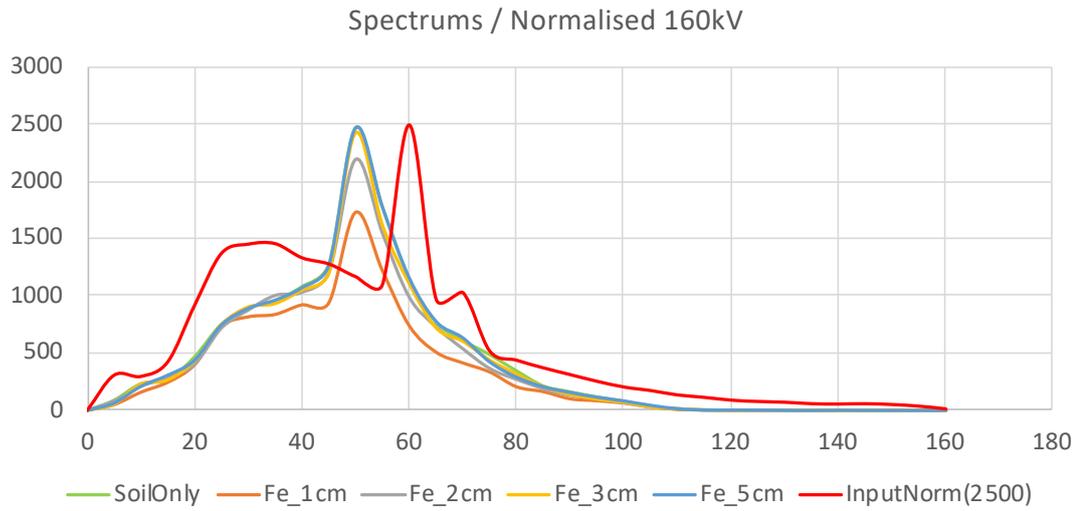
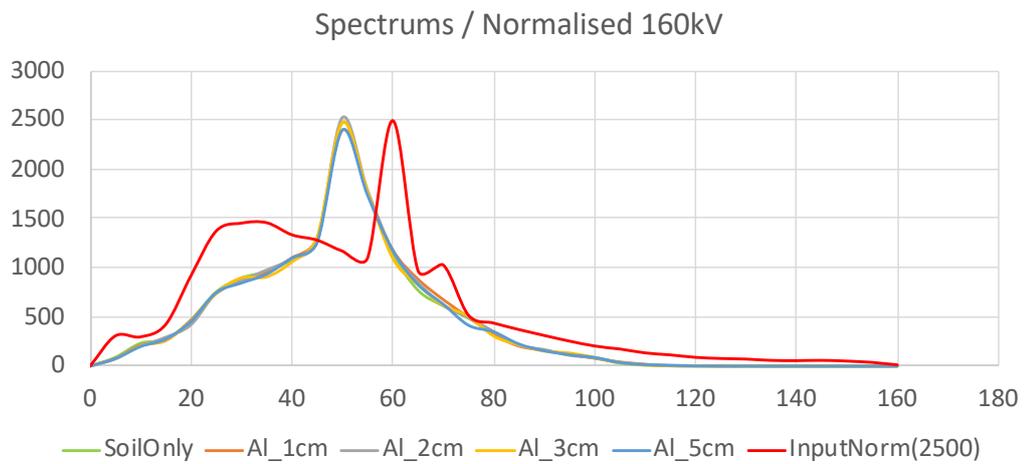


図3(4) 1-2(a) : 鉄が1~5cmの深さに埋没している場合の散乱X線の特徴



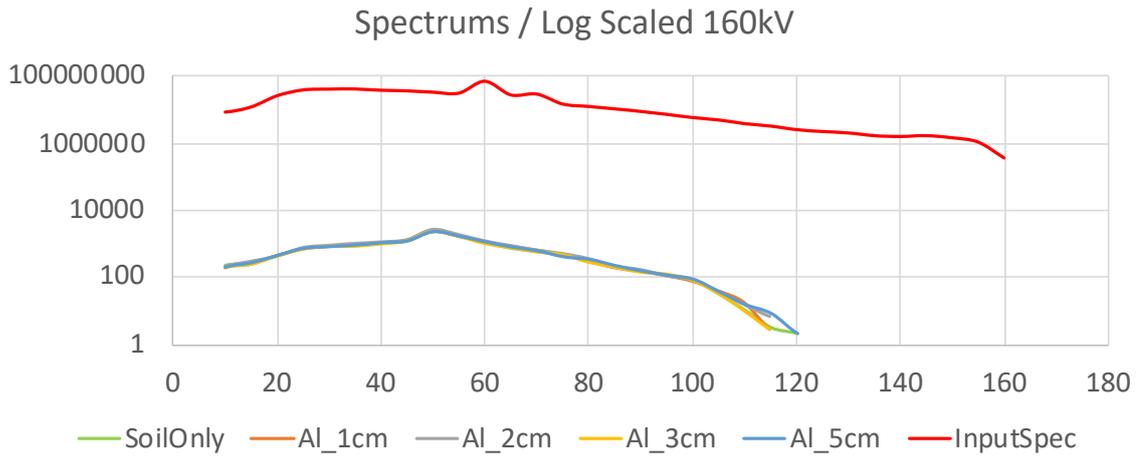


図3(4) 1-2 (b) : アルミニウムが1~5cmの深さに埋没している場合の散乱X線の特徴

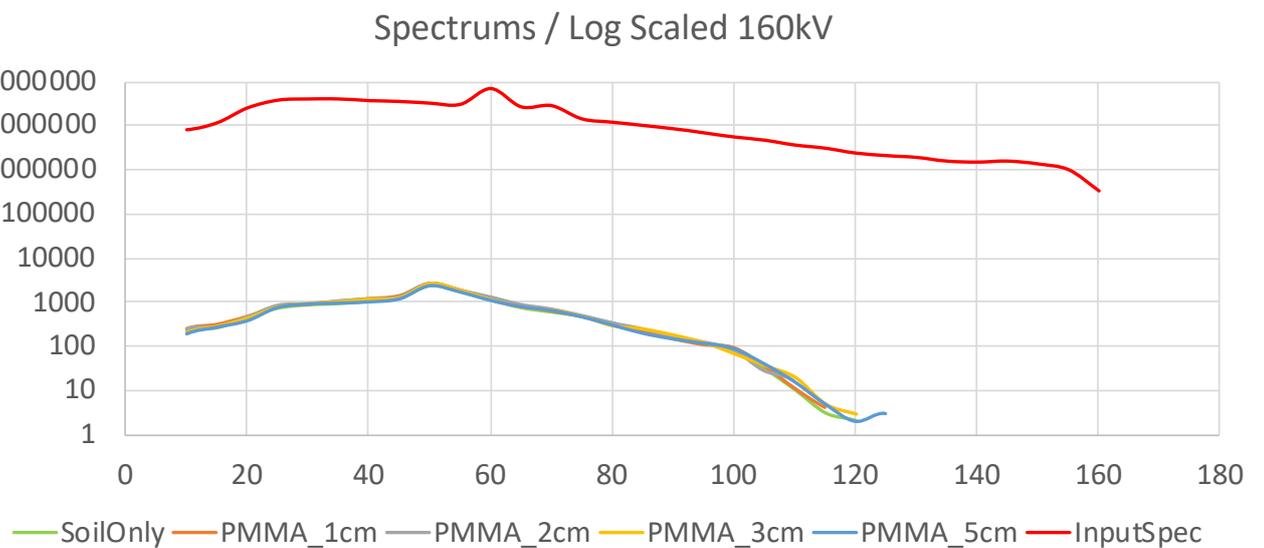
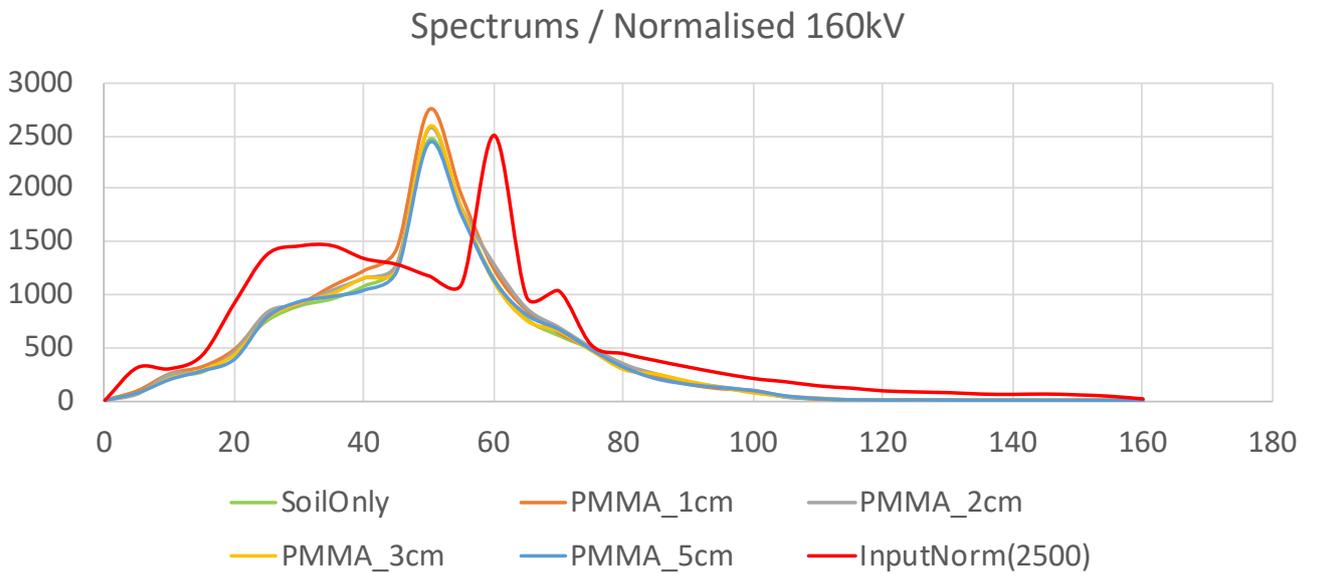


図3(4) 1-2 (c) : アクリル樹脂が1~5cmの深さに埋没している場合の散乱X線の特徴

次に、X線の加速エネルギーが160kV、300kV、450kVのそれぞれ場合に同様の傾向となるかを検証するため、カウント値と深さの関係に着目して計算を行った。計算結果を図3(4)1-3に示す。縦軸が深さ、横軸が土と比較したときのカウント数の差異比率(%)である。

この結果から、深さが深くなるほどカウント値の変化は少なくなることがわかる。また、物質の原子番号に従ってカウント値が増えるか減るかに傾向があると言える。土(主にSi)よりも軽い原子番号の物質(Al、PMMA)については散乱X線のカウント値が増えるのに対して、重い原子番号の物質(Fe)については散乱X線のカウント値が減る。これは土よりも軽いものは散乱体、重いものは吸収体として振る舞うことを示している。

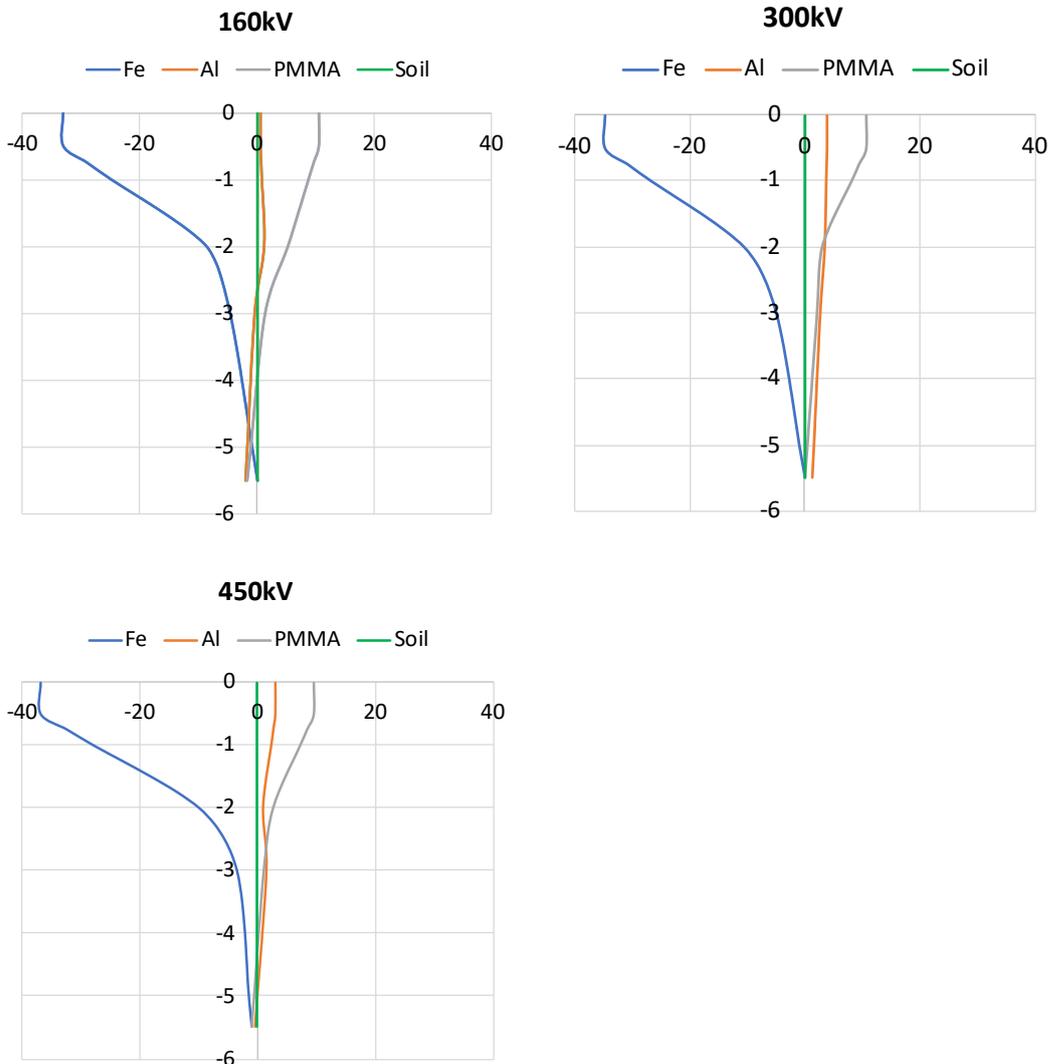


図3(4)1-3：入射するX線エネルギーの違いによる埋没深さとカウント数の関係(鉄、アルミニウム、アクリル樹脂)

[詳細研究項目2]

解像度実現とは別に埋設物物質の全体的な把握のためのアルゴリズムを研究する。シミュレーション、実測データによる検証とデータ前処理について研究を進め、必要に応じて深層学習、AIを用いた材質同定やその高度化について研究する。

シミュレーション及び実測結果から、特性X線のエネルギーが60keV以上となるような材料(タングステンよりも重い元素)においては、土中においても特性X線のスペクトルからその情報を取得することで材料の特定ができることがわかった。一方で、多くの人工物は、より低原子番号の材料の組み合わせで構成されているために、その弁別手法を開発する必要がある。これまでのシミュレーションによる解析、及び計測結果から、散乱X線のスペクトルと強度(カウント数)、及び散乱角度の3つの情報が材料を弁別する主要な指標であるこ

とがわかっている。一方で、X線の加速エネルギー、埋蔵深さ水分含有量等様々な要因により極めて多くのパラメータが相互的に作用し合うために明確な傾向を特定するのは困難であると考えた。そこで、いわゆる深層学習により前述3つの特徴量を指標として材料を弁別する方法を検証した。

アルゴリズムの基本的なコンセプトを示す模式図を図3(4)2-1に示す。

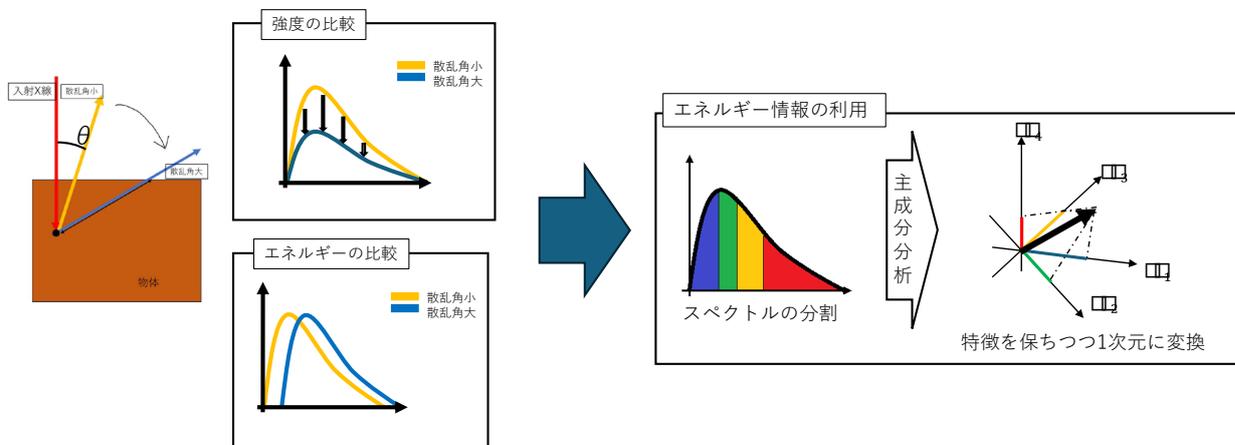


図3(4)2-1：材料弁別アルゴリズムのコンセプト

特にエネルギースペクトルについてはどのようにエネルギー帯域のカウント値を集計するかにより材料が示す散乱X線の特徴が大きく変わることがわかっているために、この部分を学習することで、いわゆるスペクトルのパターンマッチングを1つの値として表し、強度情報と独立変数として扱う事により材料弁別精度を上げる方法が有効であると考えた。それぞれの値と計算関する関係を図3(4)2-2に示す。

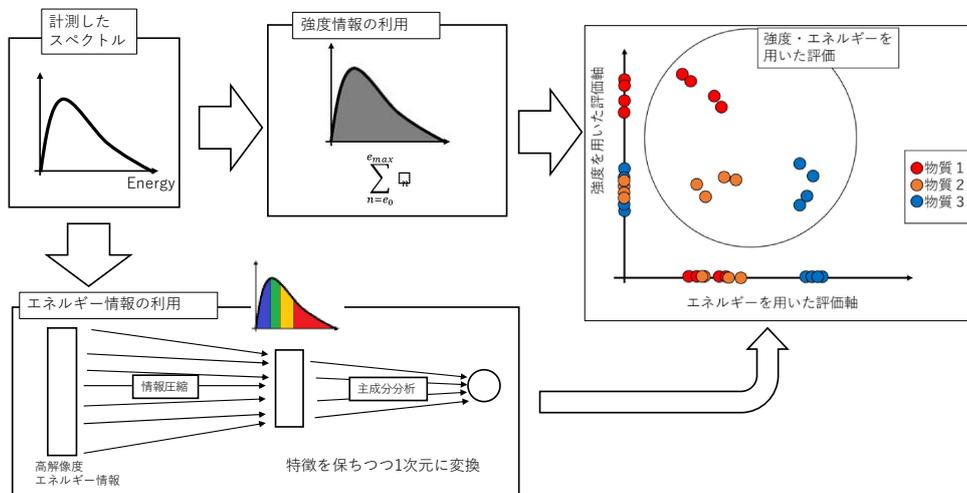
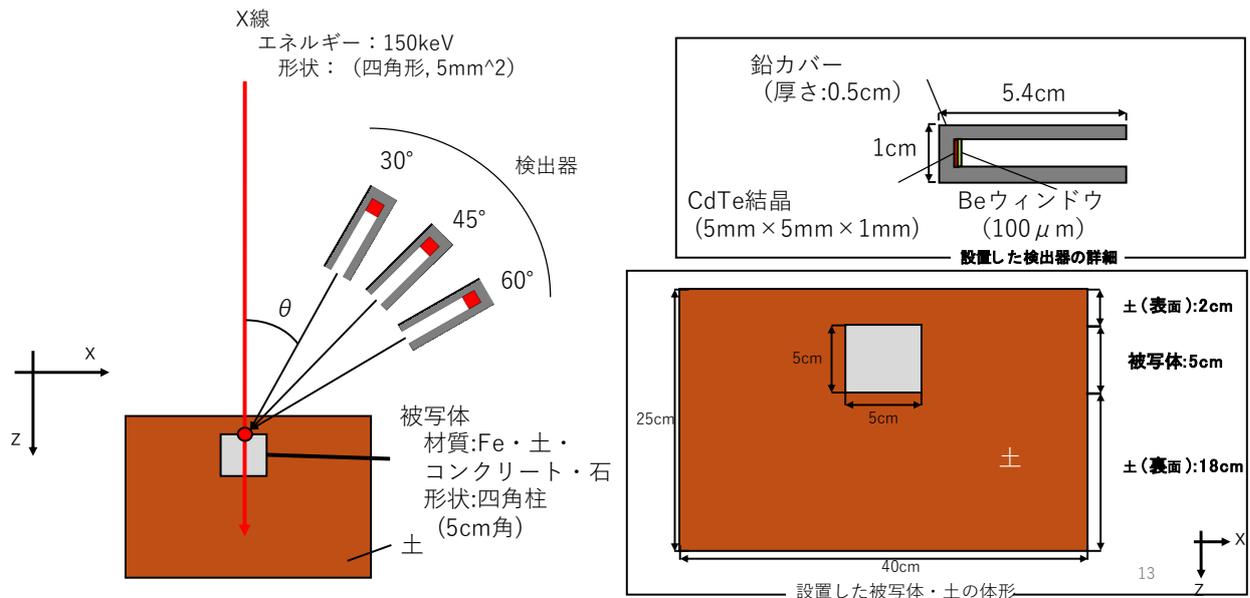


図3(4)2-2：散乱X線のスペクトル情報、強度情報を利用したアルゴリズム

実際にこの方式を実装しシミュレーションにより材料弁別可能性を評価した。ジオメトリを含むシミュレーション条件を図3(4)2-3に示す。また、この計算により得られたそれぞれの散乱角度における材料弁別マップを図3(4)2-4に示す。



シミュレーション条件	
ソフトウェア	PHITS ver3.32
ヒストリー数	1×10 ⁸
バッチ数	10
計算時間	8時間/回

図 3(4)2-3 : シミュレーションのジオメトリと条件

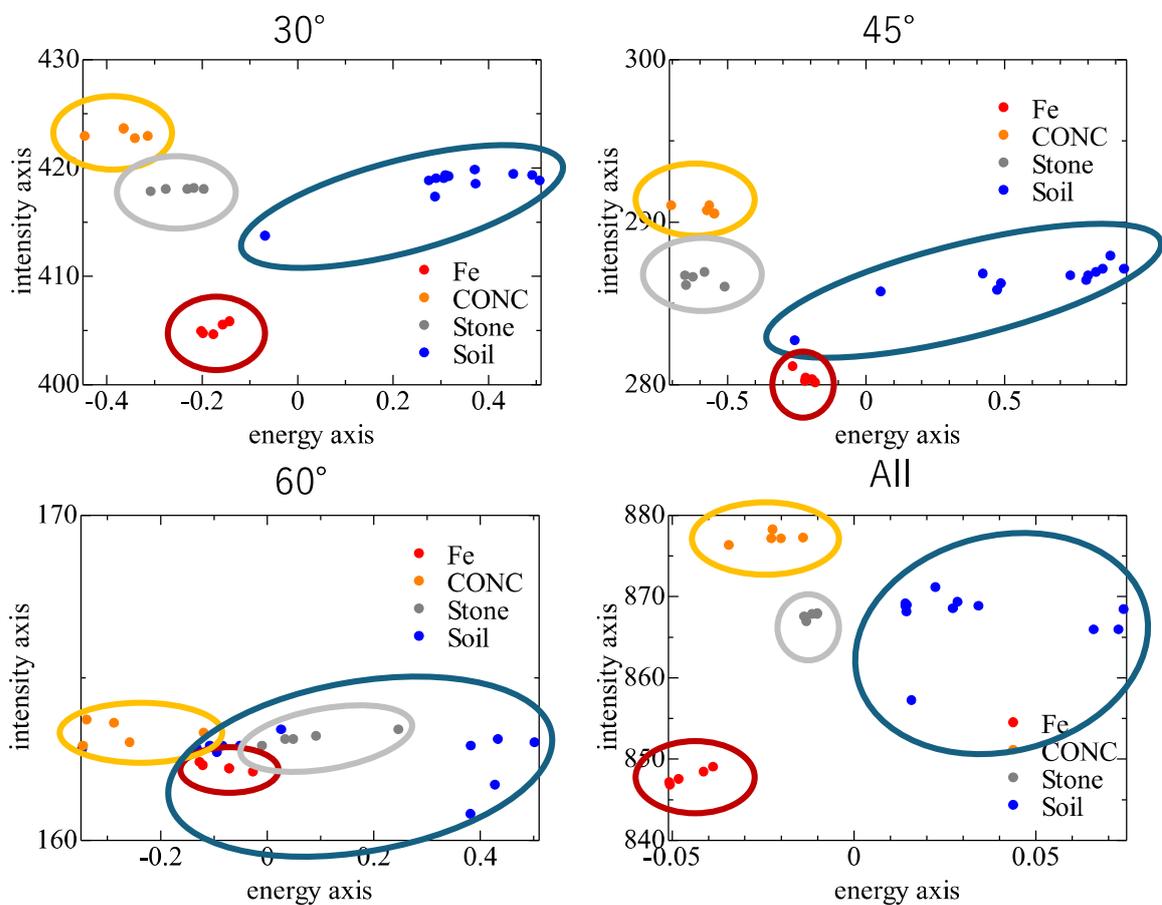


図 3(4)2-4 : 各散乱角度における材料弁別マップ

材料弁別の能力を評価するために、土との差異を分離度として表し算出した結果を図 3(4)2-5 に示す。なお、分離度は以下の式で表される数値と定義した。

$$\text{分離度} = \frac{(m_2 - m_1)^2}{s_1^2 + s_2^2} \quad \begin{array}{ll} m_1: \text{土の平均ベクトル} & s_1^2: \text{土の分散} \\ m_2: \text{被写体の平均ベクトル} & s_2^2: \text{被写体の分散} \end{array}$$

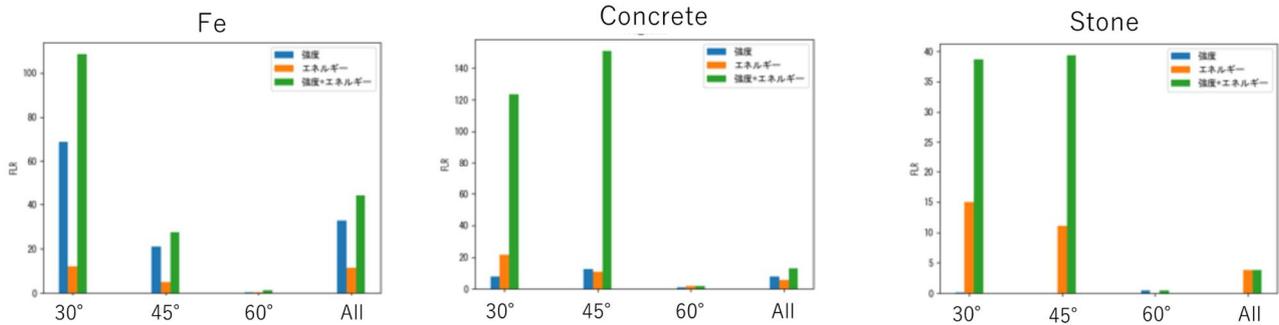


図 3(4)2-5 : 土との分離度の角度、及び使用指標による違い

この結果から、強度とエネルギーの両方を用いた指標が土との分離度が最も大きくなることがわかり、その有効性が証明された。特に土と石というほぼ同様の元素で構成される物質も弁別可能である可能性を示唆している。また、分離度は散乱線を取得する角度に大きく依存するため、センササイズや配置角度が重要な意味を持ち、またピクセルサイズも重要なファクターとなるものと考えられる。

(5) X線照射試験

[詳細研究項目1]

地中埋設ファントムを対象とした実地計測を行う。シミュレーションおよびラボでのX線照射による検証試験の結果を基にファントムを用いた現場を想定した実測試験を行う。ラボX線照射設備に比べ比較的遠距離となる1m程度までの検知についての基礎データ取得を行う。

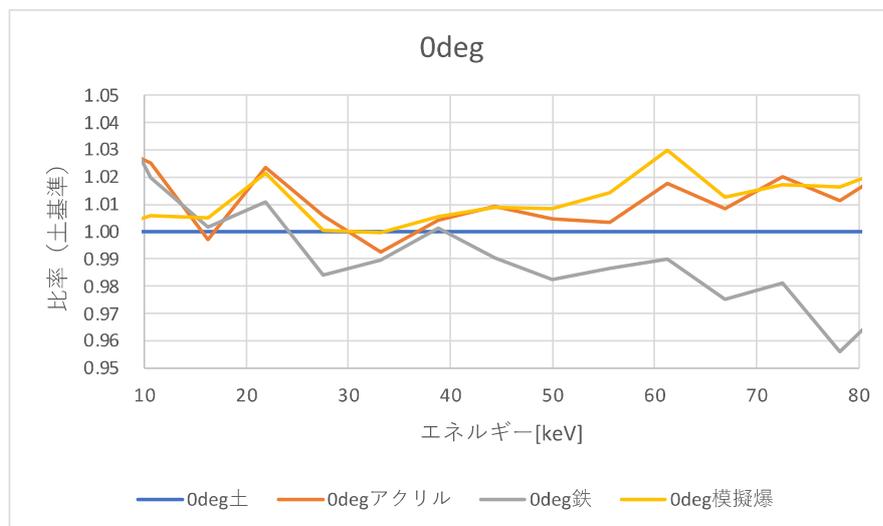
より実地的な散乱イメージングおよび物質弁別アルゴリズムの開発のために現場を想定した条件下でのX線照射による検出器の評価もあわせて進める。

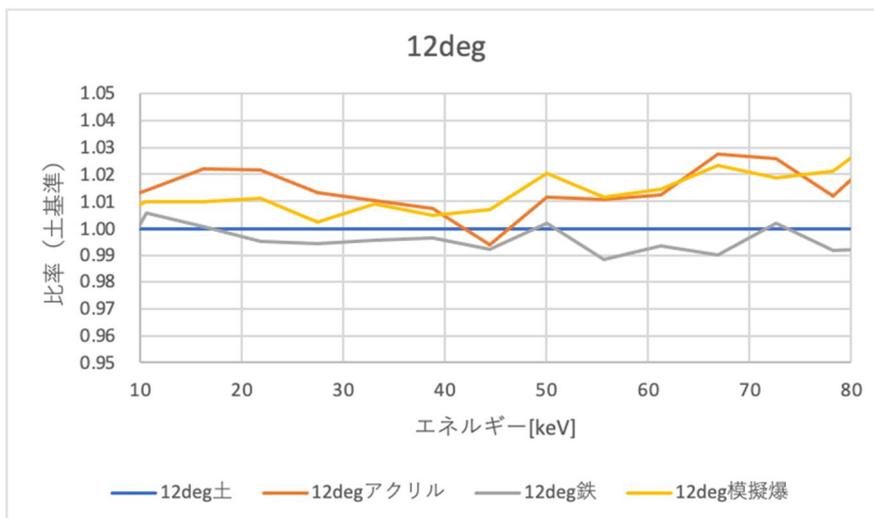
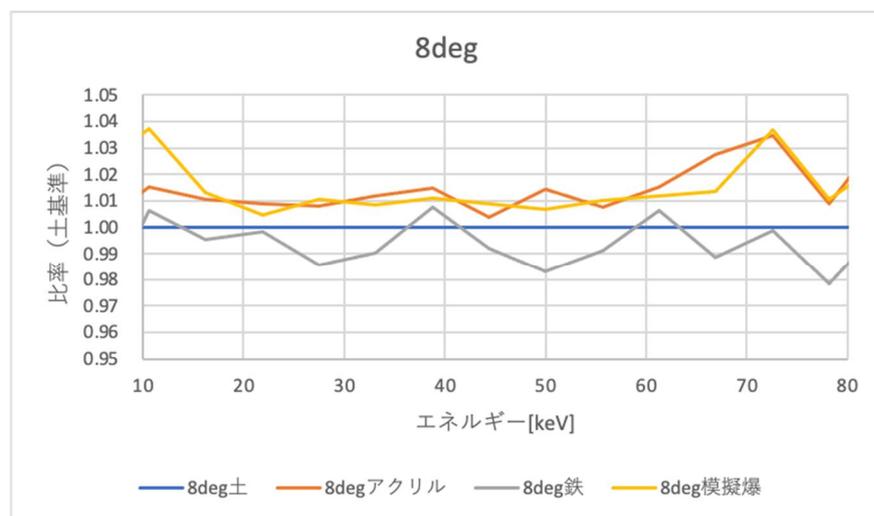
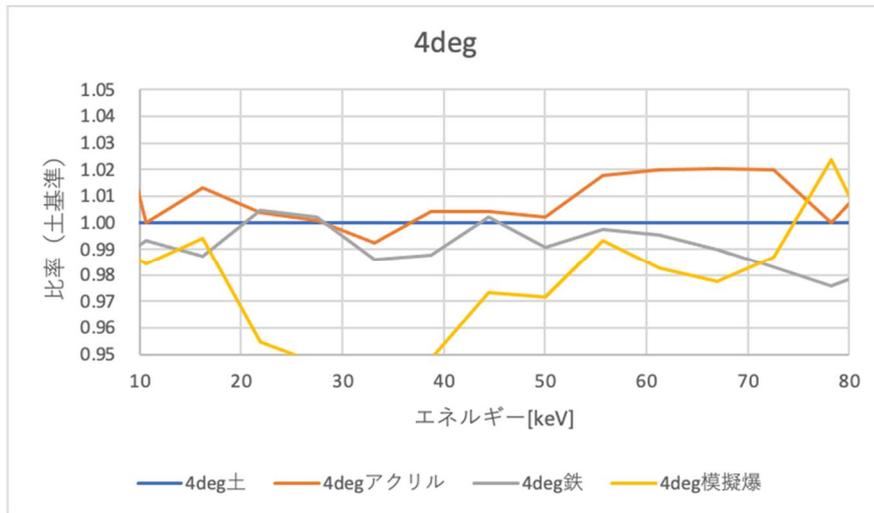
400kV出力が可能なX線源による高エネルギー実験データの取得を行った。事前実験から散乱線により測定精度が大きく低減することがわかっているため、X線源用のコリメータを作成し、背面に土を多量に置くことで建屋コンクリートからの散乱線の影響を抑制し、スペクトルの測定を行った。図3(5)1-1に実際の照射の様子を示し、図3(5)1-2に土のみの場合を基準とした場合の各サンプルの差異を示す。

この結果から、シミュレーションや160kVでの実測と同じように角度とエネルギー情報を取得することで物質ごとに有意な差異が得られ、アクリルなどの軽元素と、鉄などの重元素の弁別が可能であることがわかった。



図 3(5)1-1: 400kV の X 線照射実験の様子





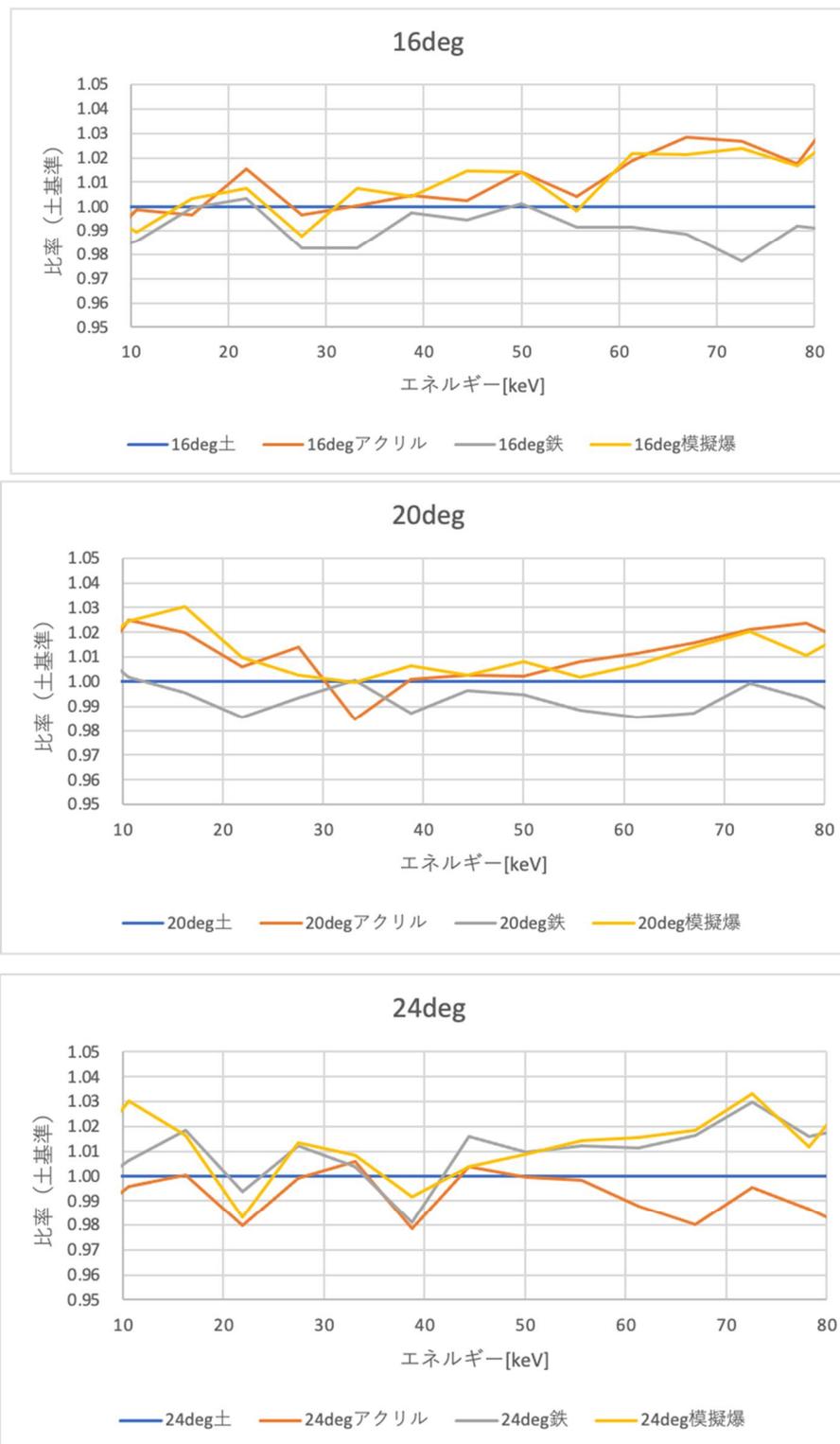


図3(5) 1-1: 各角度におけるそれぞれのスペクトルの差異

シミュレーションから散乱 X 線は入力に対して極めて少ない量しか発生しないため、イメージングのためには散乱 X 線を漏れなく効率的に取得する必要がある。一方で、解像度を向上させるためにはコリメータで入射角度を制限する必要がある。このため、撮像システムとしては極力撮像対象に近づけて、距離による線量減衰が少ない条件を実現する必要があると考えた。

センサ、線源を両方搭載してスキャンするためには大掛かりな装置（ロボットアームや大型移動治具）が必要となり予算的に難しいため、撮像対象を光学ステージの上に載せて移動させスキャンする撮像実験システムを構築した。これにより、線源・センサと対象物の距離を数 cm の距離まで近づける事ができる。

160kV の線源を利用したシステムで土中 5cm、及び 10cm を模擬した撮像試験結果を図 3(5)1-2(a),(b)に示す。5cm 深さにおいて良好な撮像結果を得た。また 10cm 深さにおける撮像についても物質ごとの反応性の違いを得るに至った。一方で、形状認識の解像度を得るには至らなかったが、その原因は線量の不足によるものであることが明らかであり、X 線源の加速電圧、または電流量を増やすことで目標を達成できる見通しを得た。

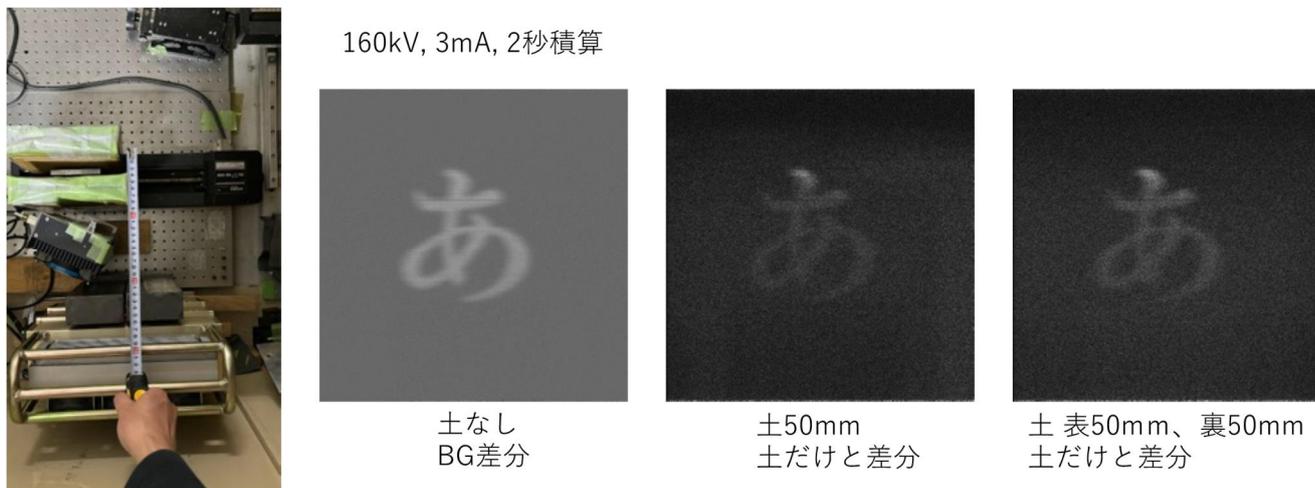


図 3(5)1-2(a) : 5cm 深さにおける散乱 X 線画像の撮像結果

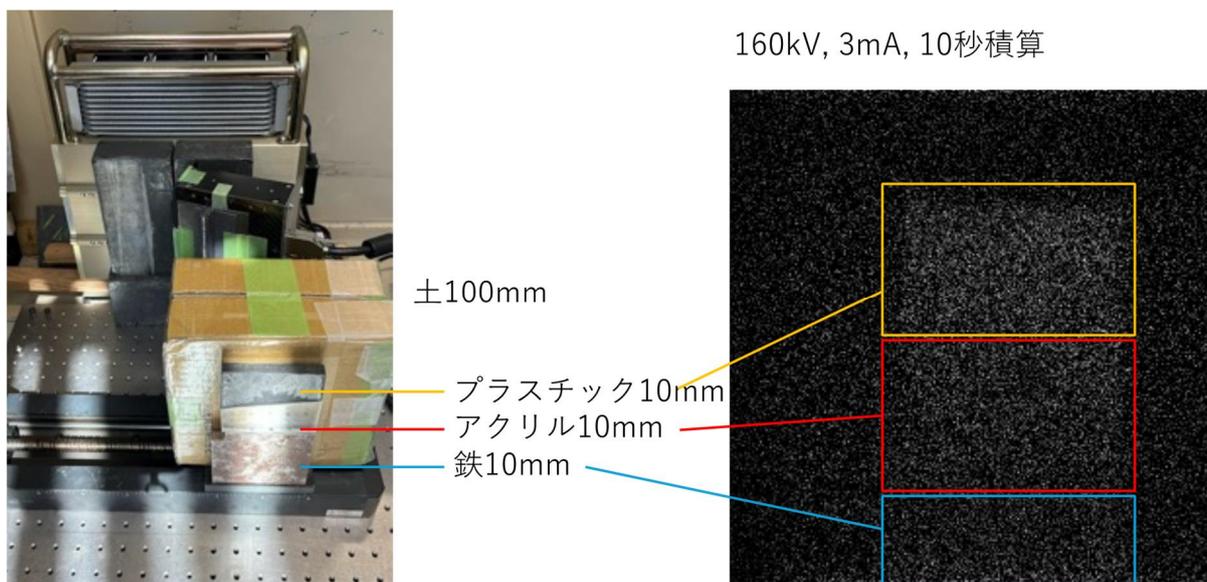


図 3(5)1-2(b) : 10cm 深さにおける散乱 X 線画像の撮像結果

本研究開発により得た知見、及び開発したセンサ、アルゴリズム、撮像システムなどを統合的に活用し、目標である X 線スペクトルによる材料弁別イメージングの可能性を検証する撮像実験を行った。人工的なファントムではなく自然物を撮像してその画質と材料弁別能力を評価するために、軽元素物として「ホタテガイ」、重元素物として「金属製目覚まし時計」を撮像対象に選んだ。

ホタテガイは殻がカルシウム (Ca[原子番号 20]) を主体とした元素で構成されており、身の部分は有機物 (C[原子番号 6],H[原子番号 1],O[原子番号 8]) で構成されているため、原子番号 6~10 (身の部分) 以下と 20 (殻の部分) が 14 (土) を介して取得できることを実証可能である。金属製目覚まし時計については、筐体の多くはアルミニウム (Al[原子番号 13]) で構成されており、ベルの一部が鉄 (Fe[原子番号 26])、電池がカリウム (K 原子番号[17])、電子回路基板や指板などが樹脂 (C,H,O) である。

それぞれの撮像対象の写真、散乱 X 線撮像 (強度情報のみ)、材料弁別アルゴリズムにより

抜き出した部分を RGB カラーにそれぞれ割り当てて合成した画像を図 3(5)1-3(a),(b)に示す。

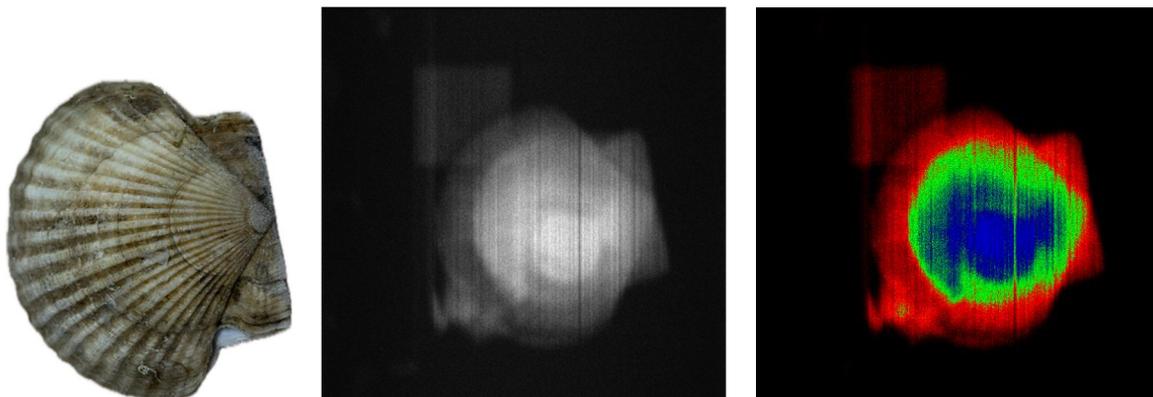


図 3(5)1-3(a) : ホタテガイの撮像結果 (撮像条件 : 土中 5cm、160kV 3mA)

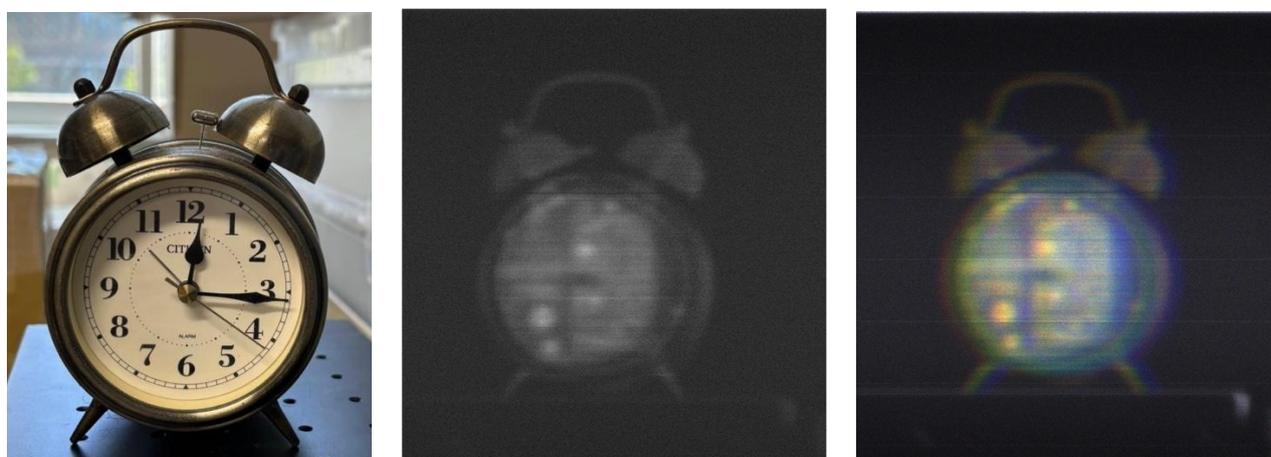


図3(5)1-3(b) : 金属目覚まし時計の撮像結果 (撮像条件 : 土中5cm、160kV3mA)

[詳細研究項目2]

基礎検証可能な実測用ファントムの設計及び試作を行う。単一物質、単純形状、複数サイズなどの検討を行う。

以下の撮像サンプルを用意し、物質、形状、サイズ等による散乱X線の違いとイメージングでどのように反映されるかを検証した。

- ファントム1 : X線透過像解像度評価用テストチャート (鉛)
- ファントム2 : 単元素材料棒 (炭素、アルミニウム、マグネシウム、チタン、ニッケル、鉄)
- ファントム3 : アルミニウム板越しの亚克力ブロック、高密度樹脂部材
- ファントム4 : アルミニウム板越しのコンクリートブロック (ヒビあり)

これらのファントムの撮像結果を図3(5)2-1(a), (b), (c), (d)に示す。各ファントムにおいて散乱X線イメージング結果だけを見た場合でも何を撮像したかわかる程度の解像度を得ることが出来た。また、材料による散乱X線強度の違いもピクセル値に反映されていることがわかった。

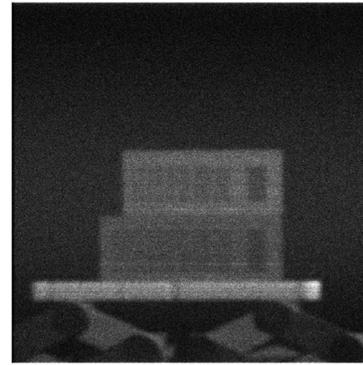
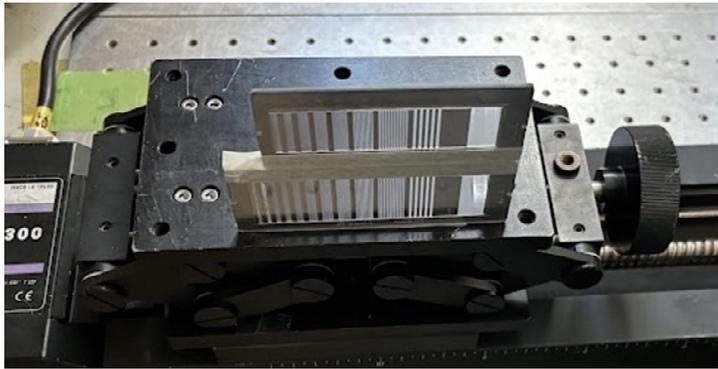


図 3(5)2-1(a) : X線透過像解像度評価用テストチャート (鉛)

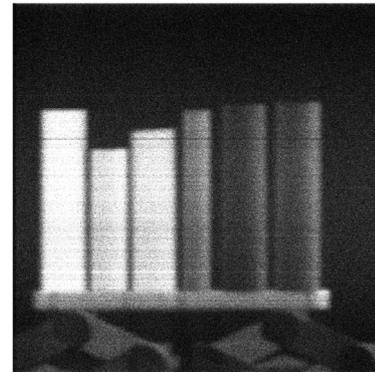


図 3(5)2-1(b) : 単元素材料棒撮像結果
(炭素 C、アルミニウム Al、マグネシウム Mg、チタン Ti、ニッケル Ni、鉄 Fe)

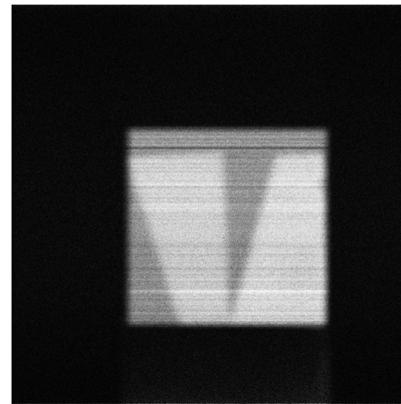
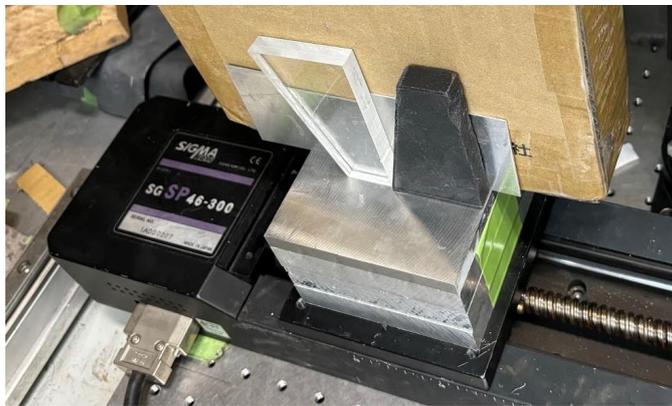


図 3(5)2-1(c) : アルミニウム板の後ろにあるアクリルブロック、及び高密度樹脂部材

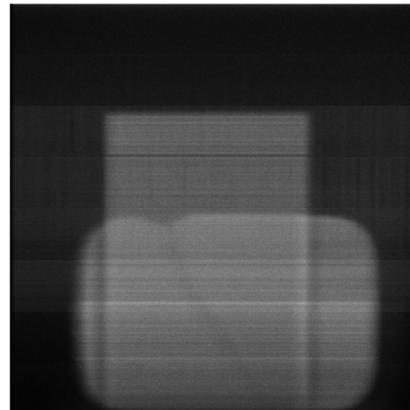
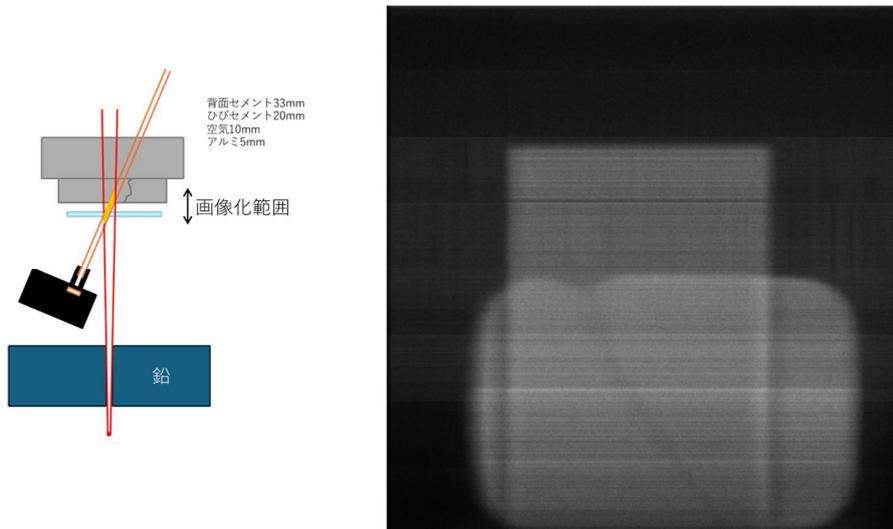


図 3(5)2-1(d) : アルミニウム板の後ろにあるコンクリートブロック

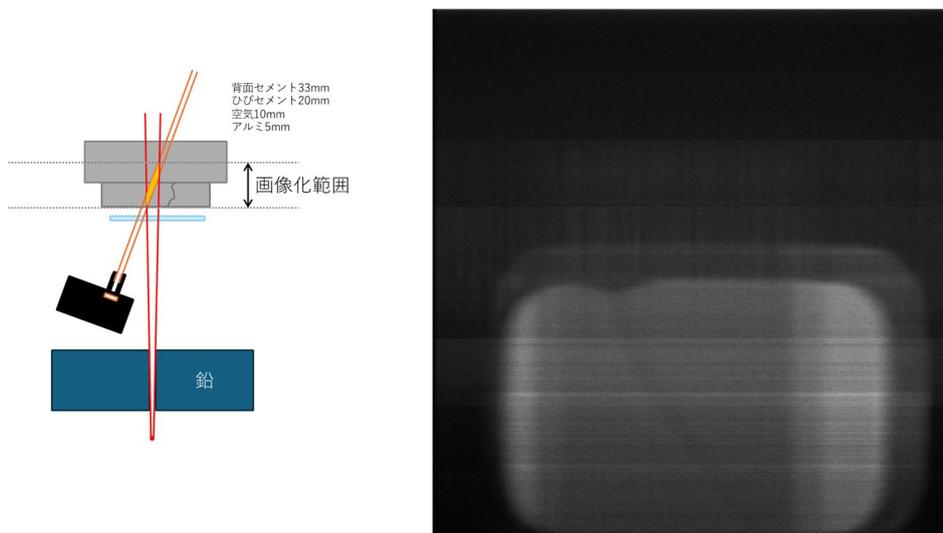
4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

高精度な微細コリメータを開発することが出来たため従来目標よりかなり鮮明な解像度の散乱X線画像を取得することが出来た。また、解像度の高さから、撮像角度を変更することで深さ方向の情報を得ることができることがわかった。実験結果から、深さの選択性については5mm程度の解像度を実現出来た。



センサに最も近い撮像対象に焦点をあわせた場合の撮像結果



センサから遠い撮像対象に焦点をあわせた場合の撮像結果

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

これまでの散乱X線イメージングは強度情報のみを用いた手法限定されており、大出力線源を用いても得られる解像度や撮像対象物の情報は限定的なものであった。一方で、本研究開発成果では、散乱X線のエネルギー情報を活用することで材料弁別の可能性を示したと同時に、小さい出力のX線源においても高い解像度を実現可能であることを実証した。

この結果は、これまで散乱X線イメージングでは実用的なイメージングシステムの構築が不可能であると考えられてきた非破壊検査用途への応用可能性を示唆するものである。特に、建造物など、対向してX線源とセンサを配置出来ないものの非破壊検査は、X線検査の対象外として扱われてきたが、本研究開発成果の応用により実用的に展開できる可能性がある。

また、散乱線を活用した材料弁別はこれまで学术界でもほとんど言及されていない分野であ

り、特に深層学習によって材料弁別、及び識別の可能性を示したのは大きな成果と言えると考えている。この成果については大学等と連携して学会発表等を実施して、当該分野の研究開発コミュニティの形成を目指していきたいと考えている。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

協力者や参画者のネットワークによりこれまでにリモートセンシング技術を開発したことのある国内の技術者、及び研究者との交流の機会を持つことが出来た。また、研究開発に必要な川上、川下企業ともコミュニケーションを取る機会となり、本研究開発で目指しているシステムを実現するためのハードウェア、ソフトウェアに関わる技術の議論をできる関係を構築出来た。

また、これまでは透過X線のみが実験結果と比較的符号し易いと思っていたモンテカルロシミュレーションについても、最新のシミュレータライブラリに加えて、センサや対象物の条件を厳密に定義することで散乱X線にもある程度の精度で適応できることがわかったのは重要な知見となった。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

プロジェクトの進捗共有やデータ共有が関係者間で円滑に共有し、かつ活発な議論ができるようにオンラインツールを活用したコミュニケーションを積極的に活用した。また、実験に置ける協力者を含め参画メンバーで議論できるような機会を積極的に設けた。

5. 2 経費の効率的執行

オンラインの稟議システムに専用のプロジェクトを作成し、案件発生時から関係者が把握できるようにし、無駄のない経費執行と、関係者間でのコミュニケーションを実現する環境を構築した。また、システム上に各種情報が残っているため、財務部門などからも随時チェックが可能な透明性を担保し、経理、会計面からの意見も随時反映できるようにしたことで、会社全体でのチェック機構が働くようにした。

6. まとめ、今後の予定

当初目標としていた開発目標をほぼ達成するとともに、一部については想定を上回る成果を得ることが出来た。また、参画者、協力者との連携により自社のみでは実現出来なかった成果につながる研究開発の機会を得ることが出来た。

今後は今回の研究開発で得られた成果を元に、研究機関との連携を更に強化して学術論文や学会発表、展示、特許出願など対外的な成果発表をする機会を増やしていきたい。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	該当なし
展示・講演	該当なし
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況
該当なし

(3) その他特記事項
該当なし