

委託研究「中性子イメージングを用いた非破壊検査技術の高度化」 (研究開発テーマ：先進放射線計測技術の開発) 研究成果報告概要

研究開発の概要

(研究実施期間) 平成30年度～令和3年度

(目的)

放射線計測技術を応用した放射線高度利用の産業化を促進する。本研究では、中性子ビームを用いた中性子CTの開発を行うことにより、中性子イメージング技術の高精度化に資する研究開発を行う。併せて、中性子イメージング機能の高度化を目的として、カメラ等機器の持ち込みのための中性子照射室室内放射線遮へいの設計・導入及び中性子イメージング装置の性能評価を行う。また、陽子の分布を測定できるMRIによる3次元陽子イメージング技術の開発を行い、その工学利用を行う。

(必要性)

様々な物体を非破壊で、中身の形状、元素まで分かる装置は、工業製品の内部検査、廃棄物の内部検査、重要文化財・考古学資料の調査など、その応用は非常に幅広い。量子科学センターでは、高強度の中性子束を用いた実験を行えるが、サイクロトロン運転時における室内の中性子線量の値は高く、室内の実験体系の電子回路等を遮蔽による保護が必要とされている。また、サイクロトロン室内に遮へいを施し、室内線量の低減を行うことは、サイクロトロンの保守点検を安全に行うために必要である。

(新規性)

本研究で開発される中性子CTは、加速器からの中性子を用いて、水素から中重元素までの元素の空間分布を調べる全く新しい方法である。

(独創性)

PET用のAVFサイクロトロンは本来、高強度の陽子ビームでRI製造を行うものであるが、本研究では、これを中性子線発生に利用している。

(有用性)

中性子を用いた非破壊装置としては、中性子ラジオグラフィーが古くから知られているが、これは非常に低エネルギーの中性子を用いたもので主に水素原子画像を見ることが出来る。また、MRIによる3次元陽子イメージングは中性子CTによる陽子イメージングと同じであり、金属を含まない工学的試料の内部構造を調べるのに適している。

平成30年度の研究成果

NRT装置の有用性の研究に関しては、特に青森県に関連した試料の投影図の取得を行った。図1はリンゴ及びカリンの丸ごとのNRT画像である。内部の構造の撮影をねらったが、厚さ10cmの水分を良く含んだ試料の投影は難しいことがわかった。そこで、図2に示すように1cmのスライスにした結果、透視はできたが非破壊検査となったため、比較的水分が少ない試料の透視を行った。図3は青森県の特産であるヒバの木片の写真とNRT画像を示す。年輪が良く観察でき、NRTのヒバの工芸品の評価に使用できる可能性がでてきた。次に、土壌中の植物の根の画像撮影を試みた。図4に示すように、土壌中の水分がバックグラウンドになって見る事ができなかった。しかし、図4の左図が示すように、土壌中の構造が観察できることが分かったので、土器の分析を行った。六ヶ所村立郷土館の協力を得て、縄文土器の透視を行った。図5、6にその結果を示す。図5では、粘土の境目が良く観察されている。図6では、粘土の繋ぎに使用したと思われる細い草の投影像が観察されている。これは、X線の透視では見れない。この結果、NRTは土器の製造方法の研究に役立つことが分かった。今後、六ヶ所村立郷土館と連携して、共同研究を行っていく予定である。

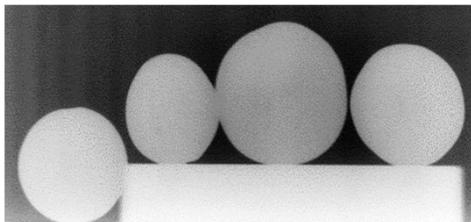


図1 リンゴ丸ごとのNRT画像

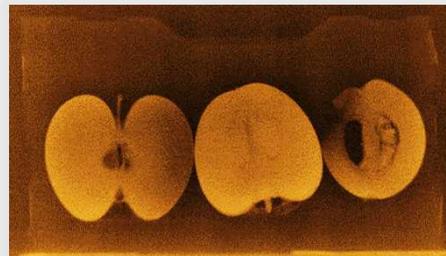


図2 リンゴとカリンのスライスのNRT画像

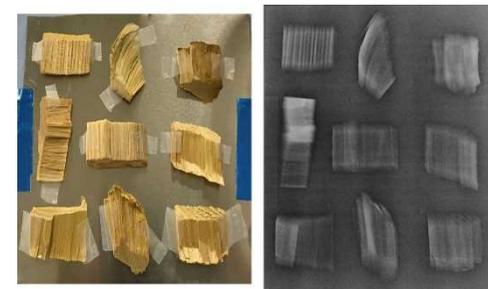


図3 ヒバの木片の写真とNRT画像

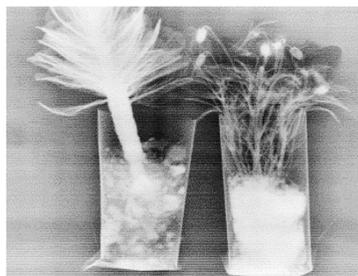


図4 カーネーションと花キャベツのNRT画像



図5 縄文土器の写真とそのNRT画像



図6 草を練りこんで作られた土器のNRT画像

令和元年度の研究成果

QSCの中性子ビームは、Beターゲットの損傷を防ぐためビームのスポットは点でなく拡がりを持っている。このため、中性子ビームの投影図はボケる。これを改善するには、試料を線源から遠ざければ良い。

図1はIPからの距離を変えた0.5mm径の銅線の投影画像である。IPから離れていくに従い、影が細くなっていくことが観測された。図1の左端のIPに接触させて撮像した画像には、0.5mmの内部が観測できる可能性を示している。そこで、全長2.5mmの蟻の透視画像のNRTを行った。図2は蟻のNRT画像である。足、内臓などは観察されていない。今後の改良が望まれる。

図3の上段は、中性子線源から約2mの位置で撮影したもので、下段は、撮影距離を4mに話して、0.5mm径の金線の撮影を行った投影図である。金線の位置はIPから5cmまで離れた。図3から中性子線源から2mの位置で10分照射では0.5mm径の金線は撮影できなかったが、4m離れた位置でははっきりと撮影されている。この位置では、中性子線の量も2mの位置より4分の1になっている。しかも、IPから5cm離れた位置でも0.5mmの金線が撮影されている。従って、4mの位置では厚さ5cmの試料の透過画像が0.5mmの空間分解能で測定できることが分かった。この結果は、製造業における製品の欠陥等の非破壊検査に役立つことが期待できる。

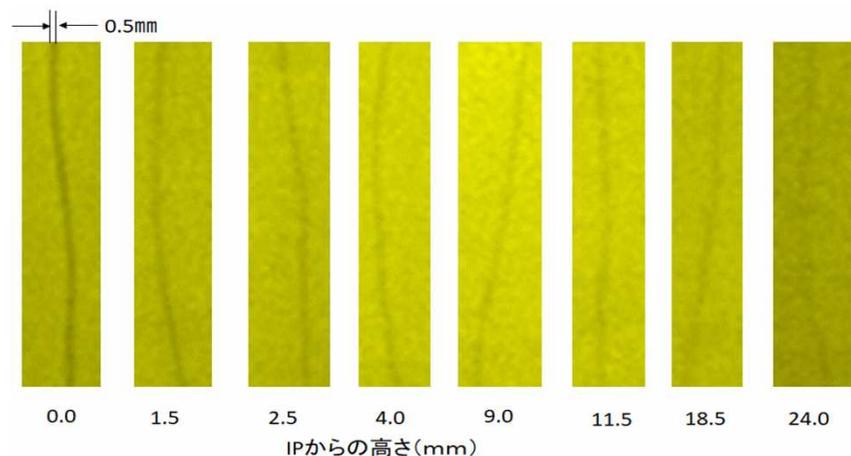


図1 0.5mm径の銅線のIPイメージ

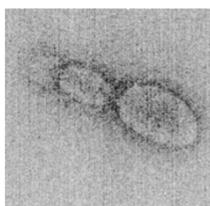


図2 蟻のNRT画像

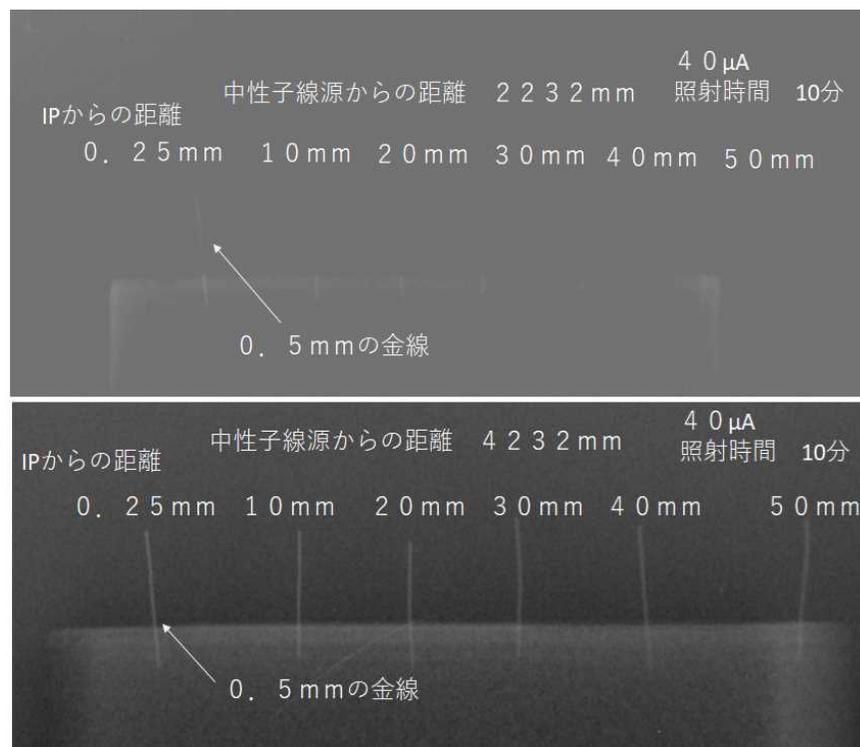


図3 0.5mm径の金線試料の中性子線源からの位置及びIPからの位置における画像

令和2年度の研究成果

2次元検出器として通常使用されている中性子カメラ（蛍光コンバータ、鏡、CCDカメラを組み合わせたもの）とコンピューター制御できる回転台とを組み合わせた中性子CT装置を開発した。図1はフキノトウの断層画像である。図2は松カサの3次元投影画像である。回転軸と蛍光コンバータの距離が4 cm以内ならば、令和元年度の結果より、原理的には0.5mm程度の解像度を得られることが期待できる。本実験において、中性子カメラによる撮影において、放射線遮蔽の効果を評価した。中性子に対しては、ポリエチレンブロックによる遮蔽で十分であることが分かった。CCD画像に影響を与えるのは多くの報告書で述べられているように、ガンマ線によるバックグラウンドの影響が多く、カメラを十分に鉛ブロックで遮蔽することが必要だった。熱中性子を吸収して放射性同位元素になる元素で原子1個当たり最も吸収断面積の大きい元素はGd元素である。この元素は、中性子IPの中に含まれ、Gdから発生したベータ線が輝尽性蛍光を発光させている。我々は、マツクイムシの樹木中での増殖過程を調べるために、マツクイムシにGd元素を摂取させて観察することを考えた。図3は、幹の直径が1 cmの松の木の中性子透過画像である。次にマツクイムシにGd元素を摂取させて、中性子画像を撮ったがGd元素を反映した画像は得られなかった。弘前大学の大山教授がGd摂取による中性子治療の研究において、Gd元素の磁気能率の大きいことを利用したMRI画像の使用を提案していることに注目し、マツクイムシに対してもこの手法が使えるか試したが、現在、まだ期待される画像は得られていない。

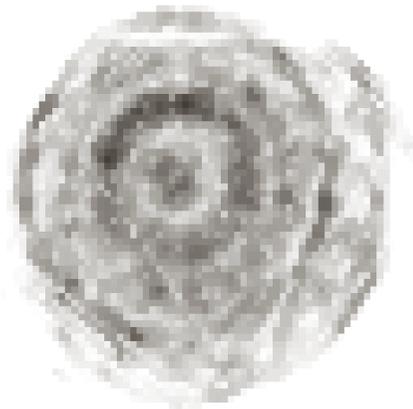


図1 フキノトウの中性子断層画像

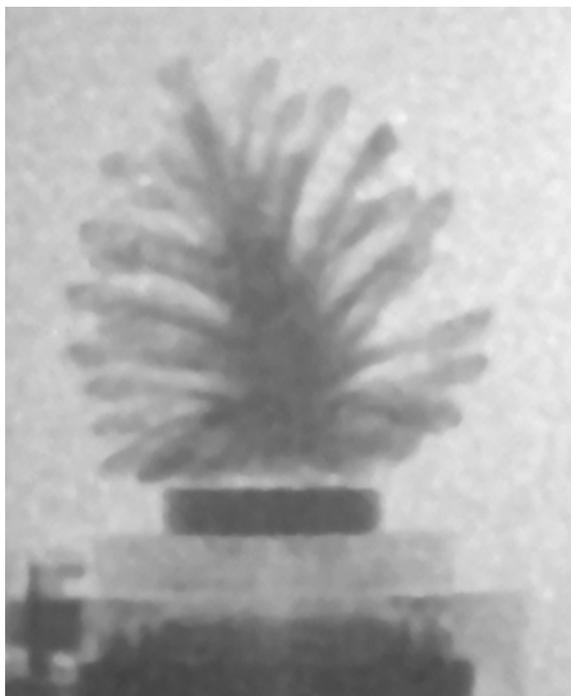


図2 松カサの3次元投影画像

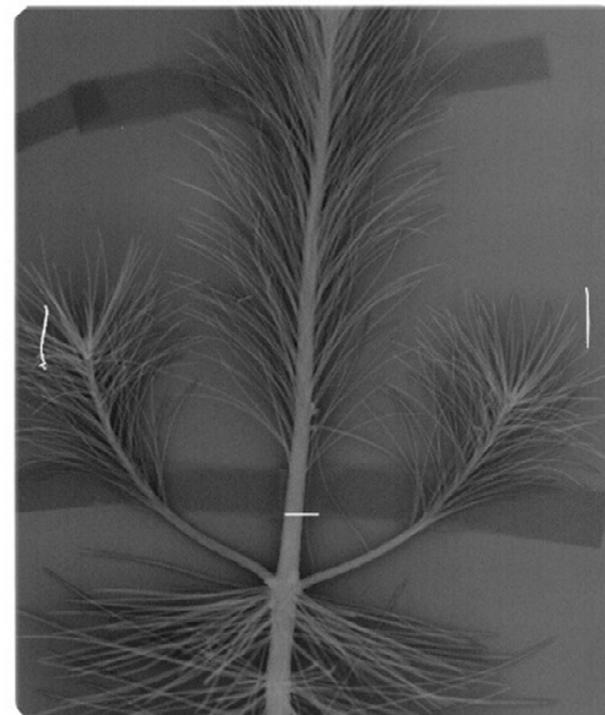


図3 松の木の中性子画像

令和3年度の研究成果

前年度に続き中性子線CTを開発した。図1は今回開発した中性子線CTを示す。中性子カメラとしては、今回は中性子線に強いCMOSカメラが用いられた。図2は、1mm径の円筒の穴が2つ空いたアルミニウム製のファントムの穴に水を入れ中性子線CTで撮影した水のCT画像である。中性子線の拡がり等を考慮するとCTの解像力は0.46mmより小さいことが分かった。

今回の実験では、中性子カメラとしてCMOSカメラが用いられたが、S/N比が良くないため再生画像にBGの影響が残る。図3はCMOSカメラの暗画像とCCDカメラの暗画像を示す。CCDカメラの方が連続のBGが低くS/Nの良い再生画像が期待できる。しかし、スパイク的なノイズは再生画像上には大きなアーティファクトとして現れる。そこで、今後、ボロン入りのプラスチックゴムを加工して、CCDカメラを中性子線から遮蔽する工夫を行う。

図1 中性子線CT

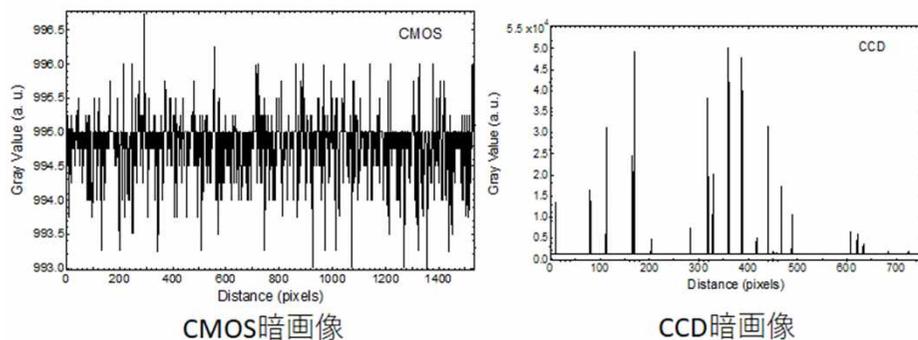


図3 CMOSカメラの暗画像とCCDカメラの暗画像

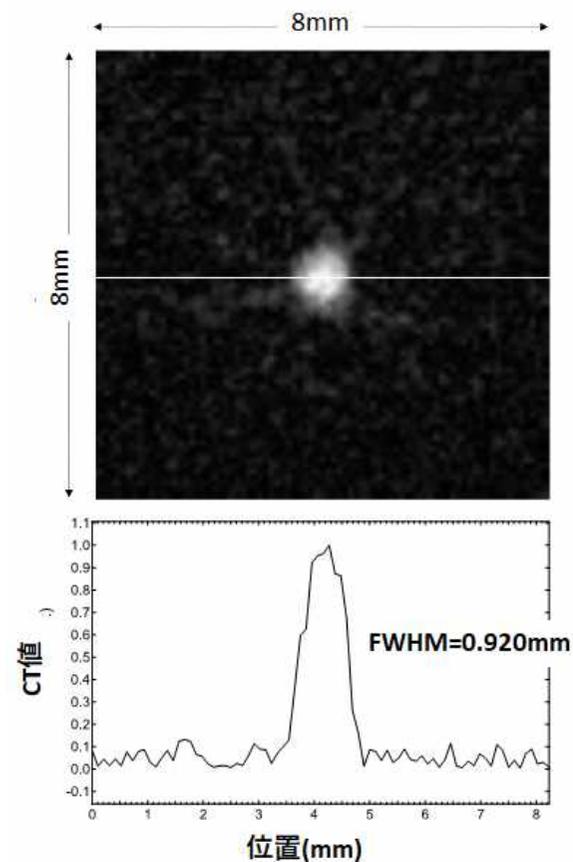


図2 径1mmの水柱ファントムの断面画像

研究発表

1. 令和3年度博士論文審査会にて木村乃久が「小型加速器中性子を用いた中性子線CTの開発」として題して発表した。

研究会等の開催

特に無し。

発表論文

1. 青森県量子科学センターにおける加速器中性子線CTシステムの開発, 応用物理学会の学術雑誌、「放射線」、2021年7月29日受理、木村乃久、人見啓太郎、野上光博、渡辺賢一、石井慶造

青森県内への波及効果

開発された中性子CTを用いて、今後、青森県内の工場で生産される工業製品の内部検査を行い、製品の品質の向上に貢献する。また、三内丸山遺跡から発掘された考古学試料の調査など、県内のニーズに対応した活用方法を提案していく。