青森県量子科学センターにおける量子分析技術の開発

陽子ビームを用いた産業用元素分析(PIXE)と中性子ビームを用いた透過検査(NRT)

弘前大学大学院理工学研究科
村上 海斗

研究背景・目的

青森県では、農業・工業などさまざまな産業があり、それらはたゆまぬ改善の努力が行われている。そういった改善をさらに科学的な方法で推進するために、2017年に青森県量子科学センター(QSC)が設立された。QSCは、これまでも県内における核物理に関連する高度な研究施設や企業で専門的な研究用途に限定して行われてきた高度な解析技術を、地域の製造業や農業などの一般産業に活用するものとなっている。

ここで紹介する研究は、QSCのサイクロトロン加速器を活用し、地域の方々が広く、容易に、高精度に利用できる「汎用的な量子分析プラットフォーム」を構築することを目的とするものである。

サイクロトロンビームを利用した三つの量子分析手法

1 PIXE分析法（粒子励起X線放出法）
原理： 加速された陽子を試料に照射し、発生する「特性X線」のエネルギーを測定することで、試料に含まれる元素の同定および定量を行う。
特徴： 微量元素の精密な分析が可能で、産業用途における成分評価に有効。

2 NRT（中性子透過検査）
原理： 陽子ビームをターゲット（Be）に照射して発生する中性子を試料に照射して、レントゲンのように物質内部の構造を透過的に検査する。
特徴： 作物の中身や缶詰の中の食べ物など覆われたものの中身にある軽元素で出来ている物の内部構造を、非破壊で可視化が可能。

3 X線CT（X線コンピュータ断層撮影）
原理： 病院のCT検査と同じように、試料の四方八方から透過したX線を計測し、三次元的な構造情報を再構成する。
特徴： 本研究ではPIXE現象による特性X線をX線源として活用することで、従来のX線管を用いた手法よりもいろいろなX線を利用して、高コントラストな画像を得ることを目標としている。

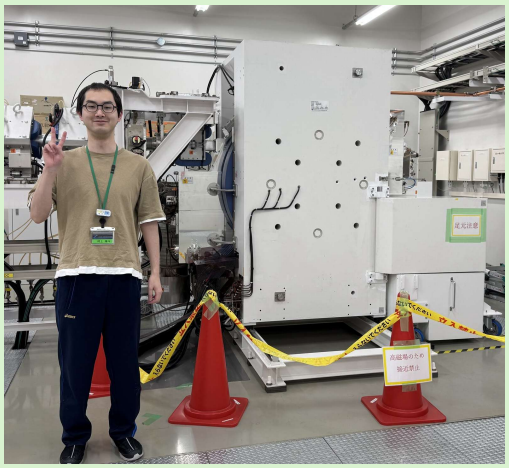


図1 青森県量子科学センターのサイクロトロンと筆者。

1 PIXEによる元素分析: 田んぼの土、かぼちゃ、牧草に含まれる成分の分析

この他にも、**麦わらや鶏肉**などさまざまな農産物に含まれる微量元素の分析をしている。

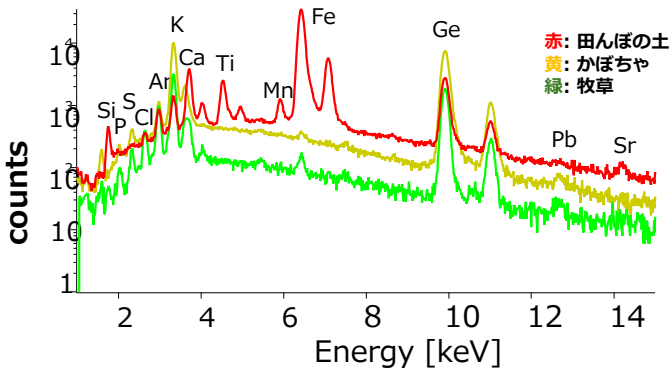


図3 青森県産業技術センターの方々からのサンプルについての実際のPIXEスペクトル。ピークがそれぞれの元素に対応していて、基準に使ったGeを用いることでppmまでの量を算出することができる。

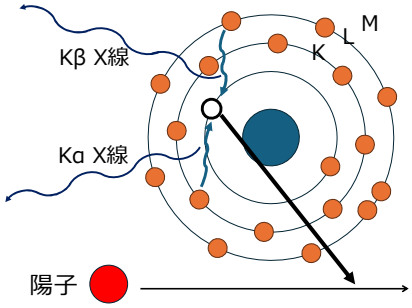


図2 PIXEの原理の概念図。
陽子照射により原子の内殻電子が電離し、生じた空孔を埋めるために外殻電子が遷移する。その際に放出される**光**（特性X線）を測定することで、元素の種類を同定、定量できる。

ppm [μg/g]	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ge (基準)
田んぼの土	301	0	11	44	414	1096	835	396	22124	6014
かぼちゃ	0	77	137	0	6647	14	0	0	47	28651
牧草	442	59	130	898	4626	543	0	0	126	8806

2 NRT（中性子透過検査）：ピーナツとインゲン豆の透視。

殻や鞘の中にある身や種の部分の透過画像を撮影。
*後に述べるX線だと、殻や鞘などの外側と中身の身や種の区別が難しい。

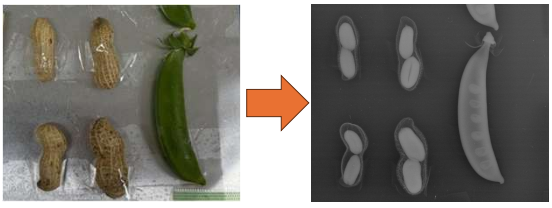


図4 ピーナッツとインゲン豆の透過画像。

青森県量子科学センターにおける量子分析技術の開発

特性X線の利用による高コントラスト・元素選択的撮像の開発

弘前大学大学院理工学研究科
村上 海斗

研究背景・目的

従来のX線CTは、X線管から放射される連続X線を用いるのが一般的である。しかし、バックグラウンド放射線の影響や、特定の軽元素に対するコントラスト不足といった課題があり、微細な構造や特定成分の分布を捉えるには限界がある。

青森県量子科学センター（QSC）の強みである「PIXE（粒子励起X線放出）」を活用し、「高コントラスト」かつ「元素選択的」な三次元構造解析技術の開発を目指す。

PIXE光源を用いたX線CTの原理

本手法は、陽子ビーム照射によって発生する「特性X線」を線源として利用する、新しいタイプのCT撮像法である。

- **高コントラスト結像のメカニズム**

陽子照射により発生する特性X線は、バックグラウンドになる連続X線が少ない。これにより、ノイズとなる信号が抑えられ、コントラストが高くなることが期待される。

- **元素選択的撮像（吸収端の利用）**

金属ターゲットを変えることで、特定の元素の「吸収端（K吸収端等）」を狙った撮像が可能となる。

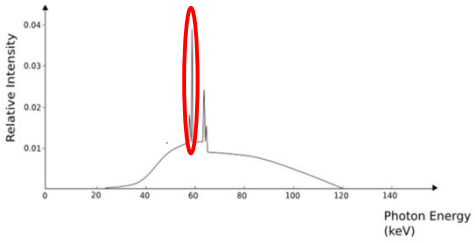


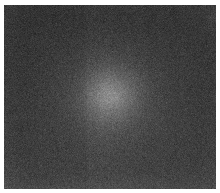
図 4 X線管のエネルギースペクトル。赤い色のところ（特性X線）だけのエネルギーの光が出せば高コントラストになる。PIXEを利用すると準単色のX線を利用でき撮像が可能。

二種類のX線撮像方法

フラットパネルセンサ



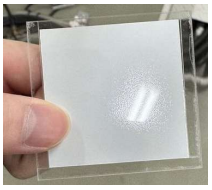
^{241}Am線源の撮像



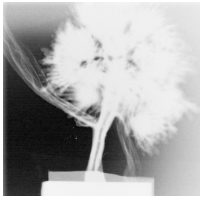
X線フラットパネルセンサ

・投影画像をすぐ見ることができる。
・連速的にデータの取得ができる。

X線イメージングプレート

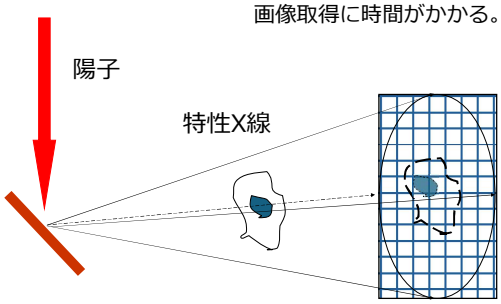


ふきのとう
Cu K線での撮像



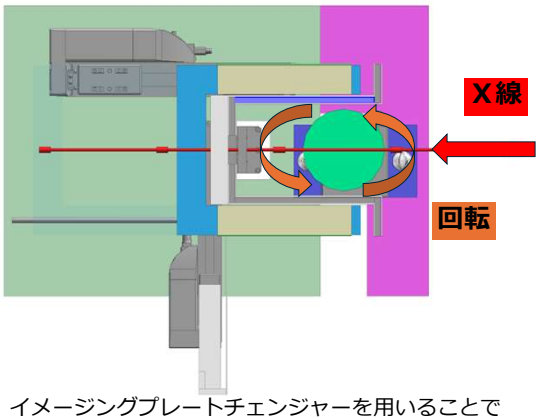
イメージングプレート

・フラットパネルセンサでは撮像できない低エネルギーも観光できる。
・空間分解能がフラットパネルセンサより高い。
・スキャナーで読み取るため画像取得に時間がかかる。



二次元画像から三次元再構成

三次元情報を得るためには、試料を回転させながら、あらゆる方向からの投影データを集める必要がある。



イメージングプレートチェンジャーを用いることでイメージングプレートでも複数の角度からの投影画像を取得することができる。

得られた多方向の2次元投影データを数学的に再構成することで、試料内部の三次元的な構造情報を構築する。

これからの応用

X線のエネルギーを簡単に変えれることから農業や工業まで幅広い応用が考えられる。

・松くい虫(松のなかにいる虫)
・3Dプリンターを利用したリバースエンジニアリング

まとめ

QSCサイクロトロンを用いた「成分（PIXE）」と「構造（NRT）」の両面からの非破壊検査技術を構築し、地域産業における解析ニーズへの対応力を示した。

今後は、PIXEを光源として用いた高分解能X線CT技術へと展開し、成分と形状を同時に可視化する次世代の産業検査技術として、地域社会へ貢献していく。