

令和6年度仙台市既存放射光施設活用事例創出事業（トライアルユース）発表資料

次世代型植物工場レタス “おいしさ”の見える化に向けて



株式会社舞台ファーム

<会社概要>

未来の美味しいを創る。

BUTAIFARM

食と人と農業の未来のために、

持続可能な次世代への食糧供給システムを構築。

美味しい食の安心、安全、安定を「世界」に向けて創り続ける

未来の美味しいを創る企業です。



■所在地	仙台市若林区日辺字田中11番地
■代表取締役社長	針生 信夫
■設立	有限会社 舞台ファーム 2003年7月11日 株式会社 舞台ファーム 2004年8月20日
■売上高・資本金	売上高: 46.0億円<R6年6月度>(グループ全体: 61.0億円) 資本金: 5,000万円
■従業員	112名 (グループ全体: 208名)
■業務内容	野菜・お米の生産・販売 農産物加工・販売(カット野菜/ホール野菜) 農業経営に関するコンサルティング
■取得資格	全省庁統一入札参加資格(関東・甲信越地域、東北地域) 仙台市中央市場青果市場売買参加者資格(青果部 第2-111号) 米卸売販売資格、農業生産法人資格、認定農業法人資格 仙台市飲食店営業許可(仙台市(若保衛)指令 第0289号) エコファーマー認定資格
■関連会社	(株)みちさき : 水耕栽培(トマト、葉物類) (株)旬の風 : 宅配寿司「銀のさら」店舗運営 e-フレッシュ(株) : カット野菜・業務用野菜 (一社)ステージパス : 障がい者就労継続支援 舞台アグリノバージョン(株) : 精米事業・玄米流通 福島舞台ファーム(株) : コメを中心とした農産物生産・流通

<沿革>

- 1720年 約300年前、初代針生家にて農業を開始
- 1982年 江戸時代から続く農家の15代目として農業をスタート
- 1988年 6次産業化に着手(地元スーパーとの直接取引を開始)
- 2003年 有限会社舞台ファーム設立。翌2004年株式会社に変更
- 2005年 業務用カット野菜の事業を開始
- 2009年 本社工場竣工。加熱用カット野菜事業、精米事業を拡大
- 2011年 東日本大震災による津波にて、備蓄米の流出など甚大な被害
- 2013年 舞台アグリイノベーション株式会社を設立(アイリスオーヤマとの共同出資事業)
株式会社みちさき、障がい者支援団体「一般社団法人ステージパス」を設立
「生食用カット野菜事業」を開始
- 2014年 舞台アグリイノベーション巨理精米工場竣工
- 2016年 東京農業大学生物産業学部と包括連携協定を締結
- 2017年 茨城県境町と包括連携協定を締結
- 2018年 福島県浪江町と包括連携協定を締結
- 2019年 福島県双葉町と包括連携協定を締結
福島舞台ファーム株式会社を福島県浪江町に設立
- 2021年 宮城県美里町に「美里グリーンベース」竣工
福島県浪江町に「ラック式カントリーエレベーター」竣工
福島県南相馬市と包括連携協定を締結
- 2024年(予定) 茨城県境町に集荷・物流拠点を建設予定



<美里グリーンベースについて>



- 名称： 美里グリーンベース
- 場所： 宮城県美里町中塚地区
- 面積： 建屋5.1ha / 敷地7.6ha
- 総工費： 約34億円
- 生産物： リーフレタス
- 光源： 天然光・LED併用（次世代型）
- 生産量： 最大1日3~4万株を出荷
- 竣工： 2021年10月竣工
- その他： J-GAP 2022年10月取得
持続可能な「食と農」のため
様々なSDGsの取組みを实践

宮城県美里町との連携により 地域農業を活性化することを使命に



気象要件が安定していることからハウス栽培に適しており、かつ東北自動車道も近く交通の便も良い宮城県美里町。

美里町と舞台ファームは、5年前から「集落営農組織の法人化支援事業」や農業法人の経営者を支援する「農業経営塾」などの取組を通じ、地域農業の活性化に努めてきました。BMS 次世代型生産プラントの建設により、更なる農業の活性化、ひいては地域経済の好循環を図っていきます。



舞台ハイブリッド 土耕栽培とは?



「舞台ハイブリッド土耕栽培」とは、従来の土耕栽培と水耕栽培を掛け合わせた生産方法。

舞台ファーム独自の「土を使ったソイルブロック」を培地とすることで、自然栽培や有機栽培に近い環境づくりが可能となります。

根張りが良いことで肉厚で遅しい野菜を生産でき、同時にスポンジなどの異物混入リスクを軽減。

スポンジ等を使った栽培が主流である植物工場に対し、舞台ハイブリッド土耕栽培は地球環境と植物の生育環境を同時に考えた、全く新しい生産方法となります。



<放射光で見る農産物>

ソイルブロック栽培したレタス中の元素と化学状態

<測定背景>

舞台ファームではSDGsの観点から植物工場で使用する培地として土(ソイルブロック)を開発。栽培方法による栄養配分の違いは知られているが、定性的な味の情報と放射光による定量的なデータを組み合わせ、「美味しさ」を定義し、ソイルブロックの優位性を証明したいと考えた。

またこの科学的検証により、新たな価値観を創出し、信頼性を確立する重要な研究と位置付けている。

<測定手法>

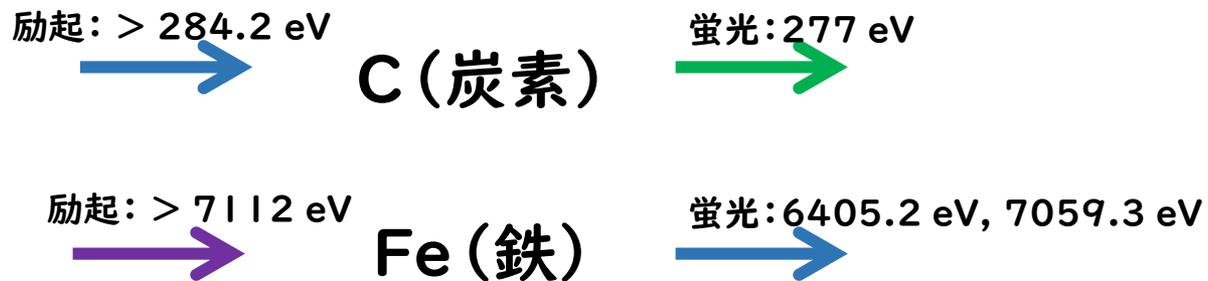
真空デシケーター中で5日間乾燥したレタスを、NanoTerasu BL08U, BL08Wにて測定

蛍光X線分析 (XRF・XAFS) について

①XRFを用いた元素の割合分析

原子の蛍光:

原子は特定のエネルギー（吸収端）より高い光で励起され、特定のエネルギーの蛍光を生じる。



吸収端と蛍光のエネルギーは元素ごとに決まっています、

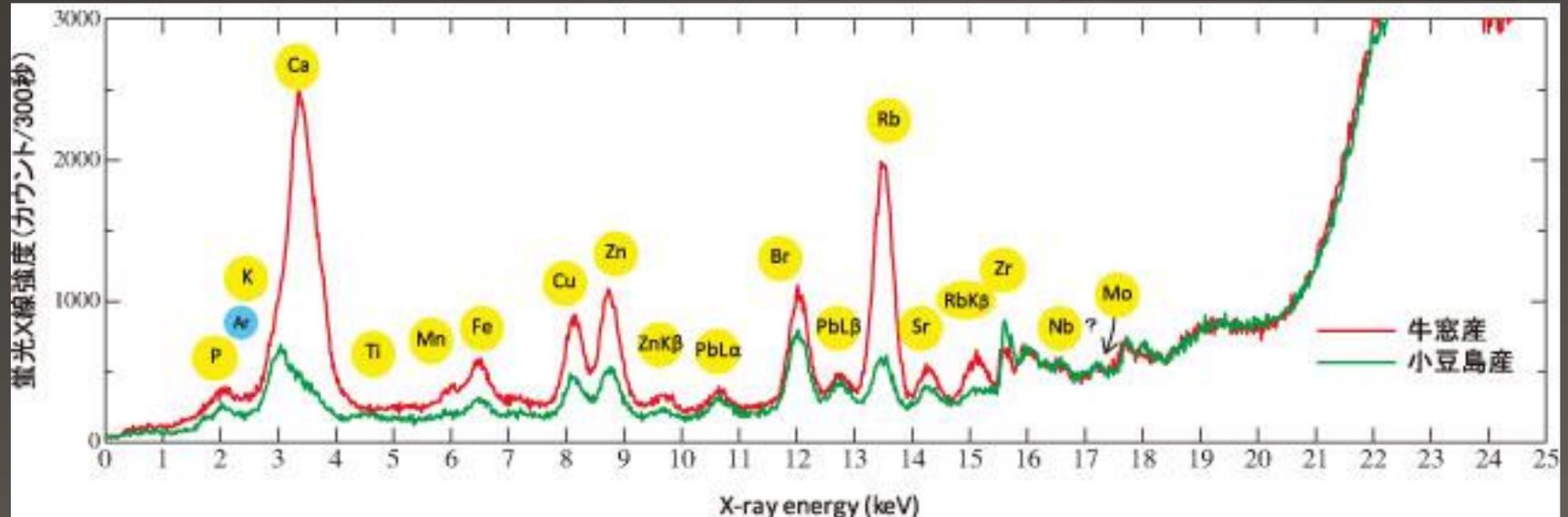
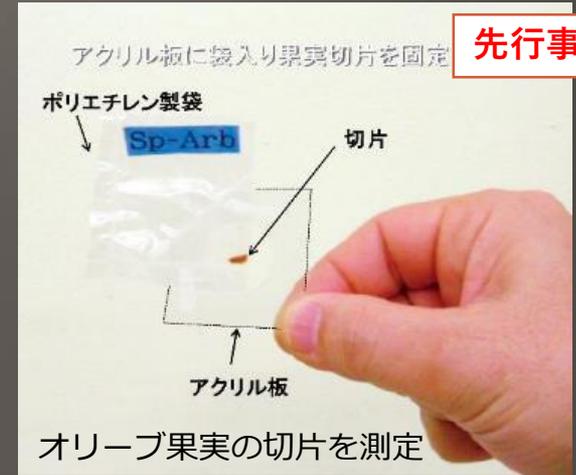
NanoTerasuでは13 keVのX線を照射したときに生じる蛍光X線の

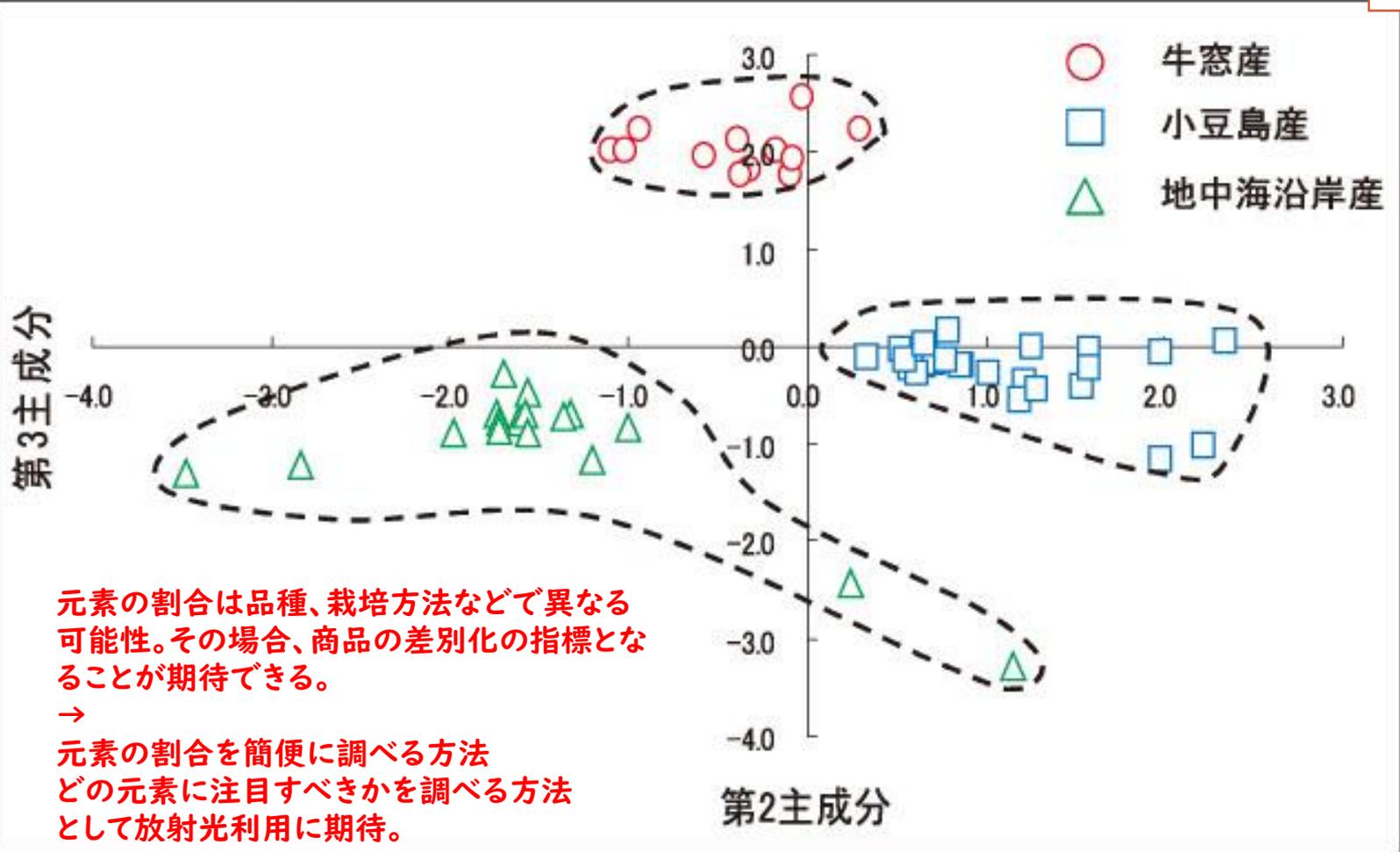
エネルギー値と強度を測定して、物質に含まれる元素の種類を調べることができます。

微量元素分析による原材料の産地識別 (黒大豆、落花生、タマネギなどの例がある)

SR-蛍光X線分析法によるオリーブの元素分析
SPring-8利用者情報 Vol. 15, No.4, PP 312-321 (2010)
服部 恭一郎、松村 慎吾、吉田 靖弘、小笠原 茂、徐 恵美
日本オリーブ(株) Nippon Olive Co., Ltd.

SPring-8では23 keVのX線を照射して元素を分析した例があります。





これまでの放射光測定事例

SPring-8で、オリーブの中に存在する元素の割合を分析したところ、産地による特徴が見られた。

仙台市トライアルユース事業：NanoTerasuでの挑戦

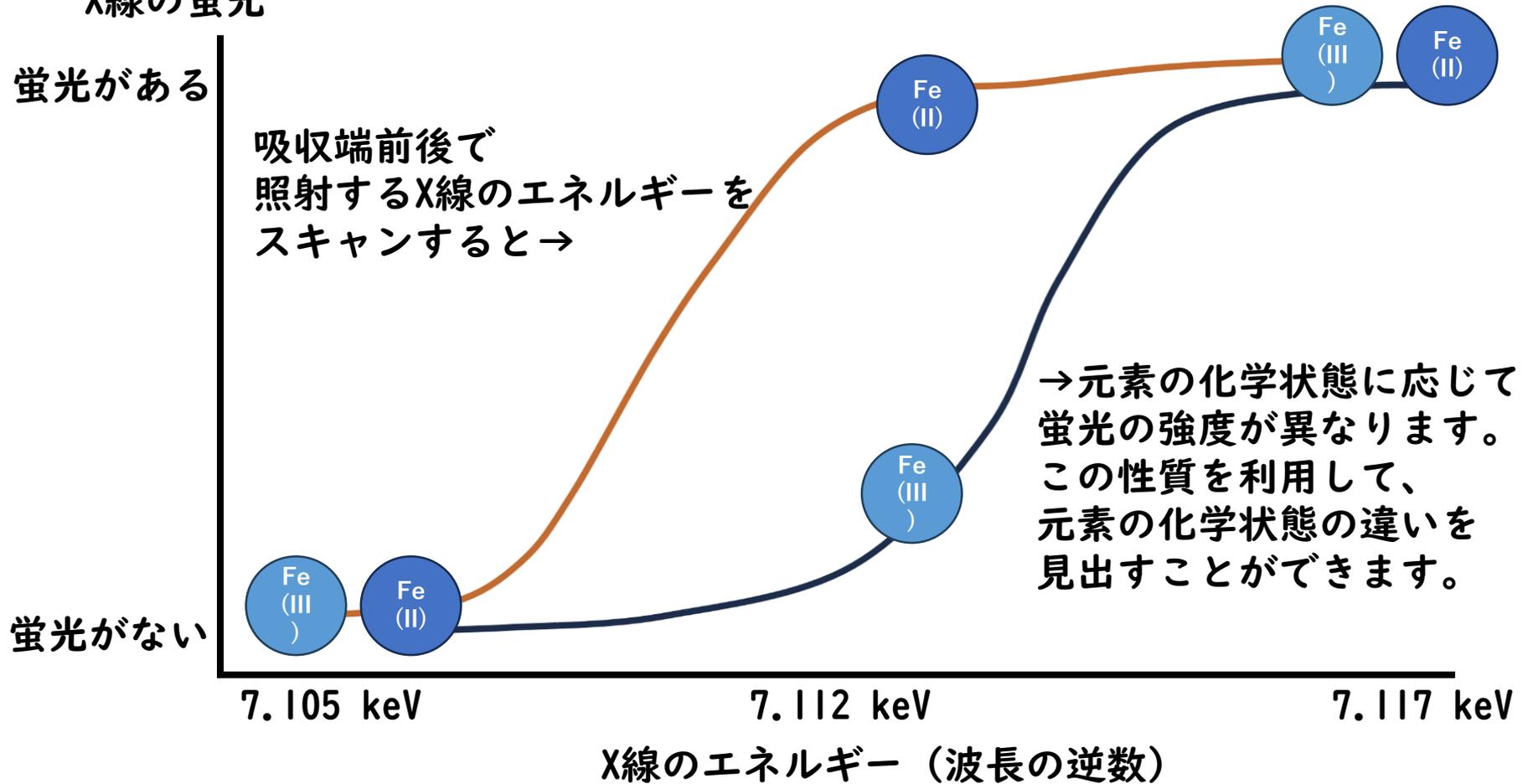
レタスやソイルブロック中のMgの化学状態を調べることができるか挑戦する。

蛍光X線分析 (XRF・XAFS) について

②XAFSを用いた元素の化学状態分析

蛍光X線を使った化学種分析の原理 (XAFS/XANES)

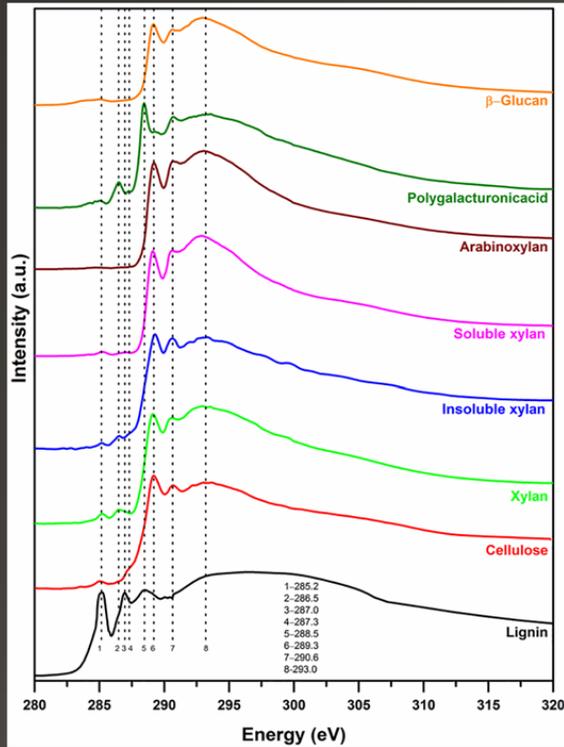
X線の蛍光



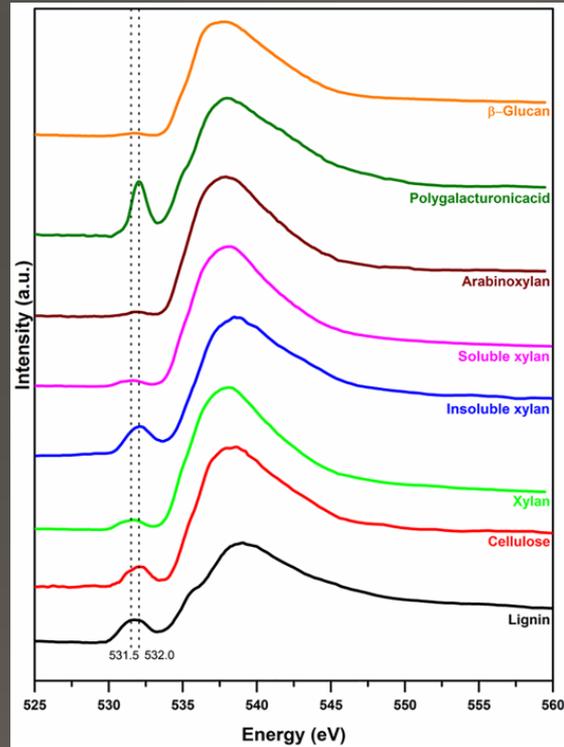
軟X線分光：糖の同定

軟X線領域の波長の光でスキャンすると、糖の種類によって異なるスペクトルが得られる。

先行事例



Carbon 1s soft X-ray absorption spectra of lignin, cellulose, xylan, arabinoxylan, polygalacturonic acid, and β -glucan.



Oxygen 1s soft X-ray absorption spectra of lignin, cellulose, xylan, arabinoxylan, polygalacturonic acid, and β -glucan.

B-グルカン

ポリガラクトロン酸

アラビノキシラン

可溶性キシラン

不溶性キシラン

キシラン

セルロース

リグニン

Karunakaran et al.,
PLOS ONE | (2015)
DOI:10.1371/journal.pone.0122959

測定対象となる具体的な元素

イネ玄米の美味しさと無機元素の関係: 良食味のお米は, Mgが多く, Kが少ない→農産物のおいしさにKやMgが関係?

第4表 場内試験米における化学分析値と食味試験値との単相関係数

単相関係数 (n=63)	玄米化学分析値						
	N	P	K	Mg	Ca	Mn	Mg/K
食味試験値							
外観	-0.446	0.136	-0.513	0.285	-0.276	0.110	0.495
香り	-0.275	-0.071	-0.343	0.091	-0.469	-0.104	0.242
粘り	-0.316	0.042	-0.653	0.271	-0.283	0.049	0.556
うま味	-0.466	-0.074	-0.633	0.123	-0.351	-0.047	0.424
硬さ	-0.405	-0.033	-0.562	0.183	-0.295	0.038	0.438
総合値	-0.384	0.031	-0.586	0.239	-0.337	-0.005	0.497

単相関係数 (n=63)	白米化学分析値						
	N	P	K	Mg	Ca	Mn	Mg/K
食味試験値							
外観	-0.467	0.113	-0.482	0.258	-0.139	0.196	0.517
香り	-0.317	-0.023	-0.053	0.006	-0.348	0.033	0.193
粘り	-0.356	-0.016	-0.450	0.270	-0.126	0.253	0.366
うま味	-0.486	-0.053	-0.298	0.123	-0.174	0.143	0.311
硬さ	-0.464	-0.066	-0.400	0.216	-0.095	0.165	0.369
総合値	-0.432	0.001	-0.361	0.231	-0.154	0.164	0.356

農産物おいしさに関わる元素
KやMgについてXAFS分析
→
NanoTerasuで元素の化学分析に基づいたおいしさの可視化ができるのだろうか?

相関係数の有意水準 (n=63), 危険率5%の場合 r=0.248

危険率1%の場合 r=0.323

堀野, 岡本 (1992) 玄米の窒素ならびにミネラル含量と米飯の食味との統計的関連

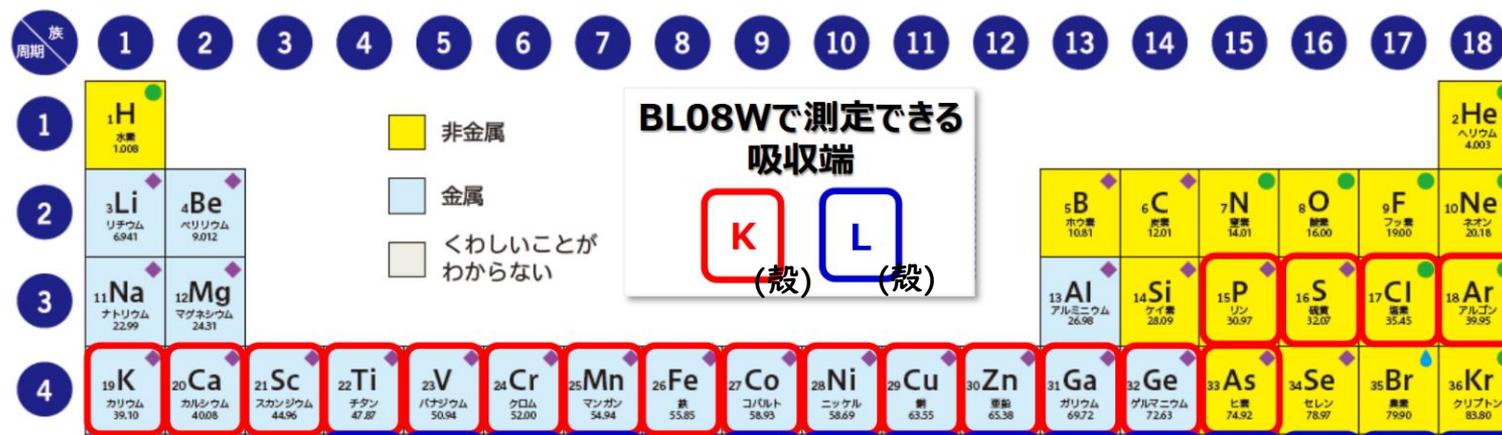
XRF/XAFSによる農産物（レタス）の分析

令和6年度の仙台市トライアルユース事業の目標

舞台ファーム産のソイルブロックを用いて栽培したレタスを対象として

NanoTerasuを利用して、どのような元素が多く（または少なく）含まれているのか？

BL08Uの軟X線XAFSを用いてMg（マグネシウム）：
BL08WのXAFSを用いてK（カリウム）とCa（カルシウム）：
の元素についてXAFS分析が可能かどうか？
を調べる



Si (ケイ素) より軽い元素についてはBL08Uで調べた。

Pより重い元素 (赤四角の元素) についてはBL08Wで調べた。

Fe (鉄) やZn (亜鉛) などのミネラル分については、従来の方法でも調べられているので、本事業ではP~Caの範囲を中心に測定を行うことにした。

PhoSICのビームライン情報で公開されている資料
https://www.phosic.or.jp/I0thCC_kouen4.pdf

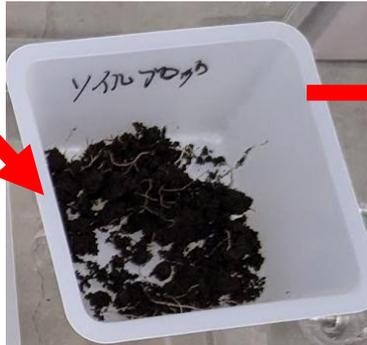
測定試料の前処理



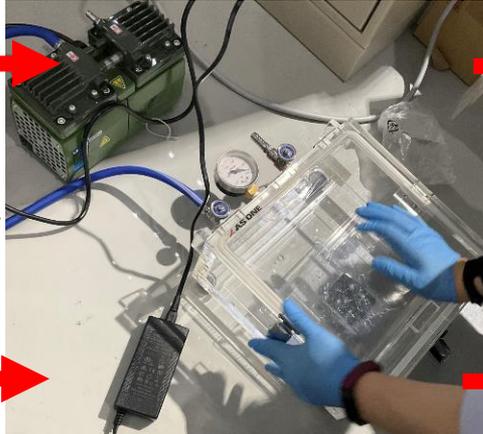
舞台ファーム産レタス
(市販品)



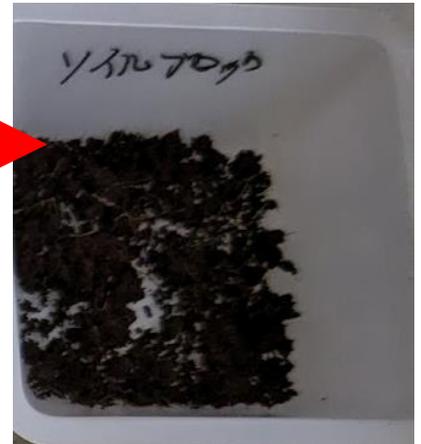
葉(可食部)をサンプリング



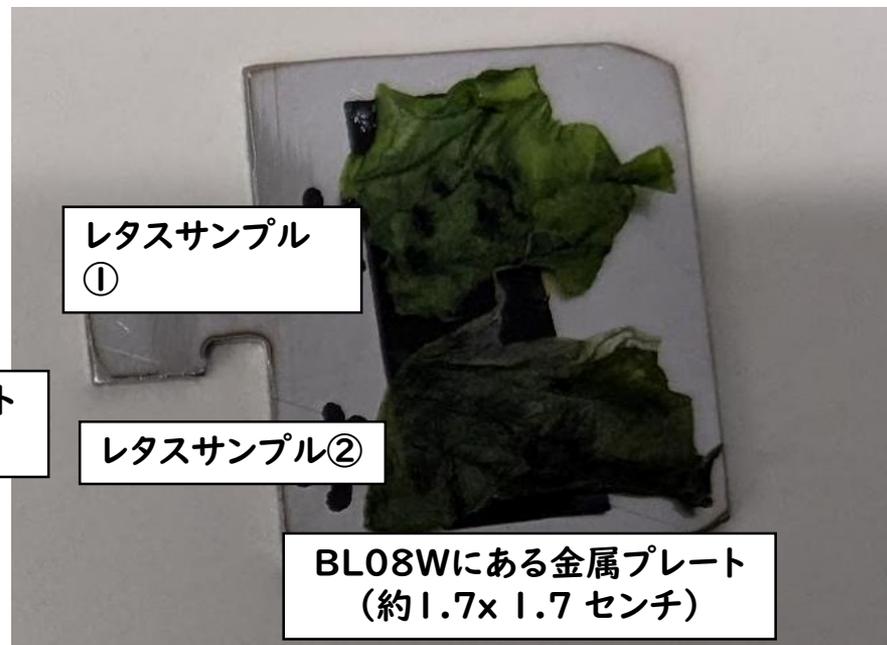
土の部分を
サンプリング



真空デシケーター中で
5日間乾燥



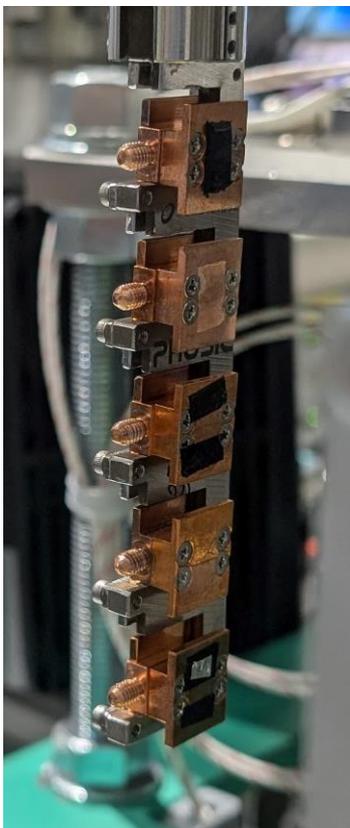
測定試料の準備：BL08U、BL08W



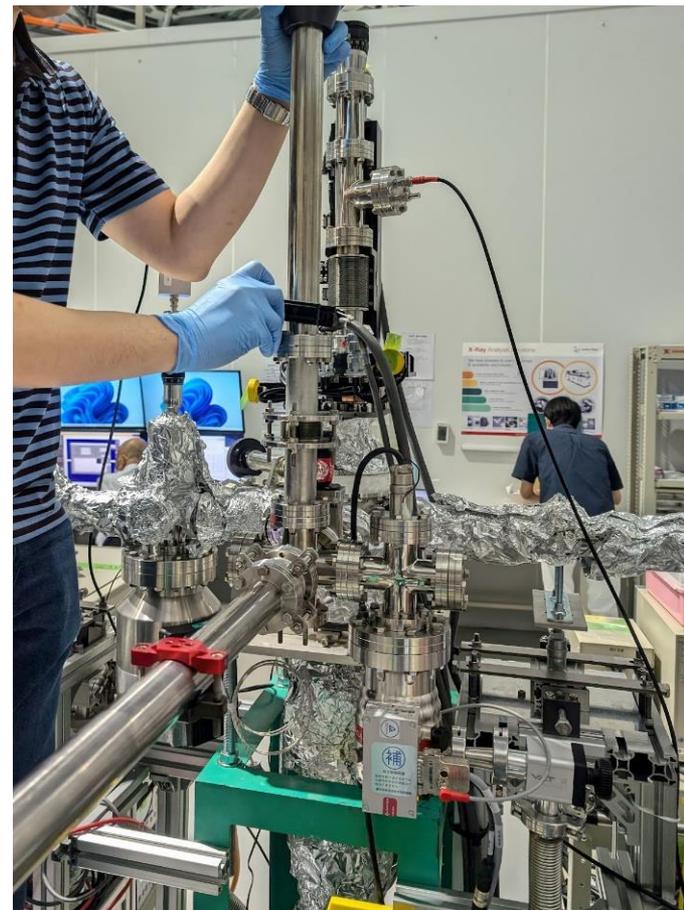
真空デシケーター中で5日間乾燥したレタスを、NanoTerasu BL08U, BL08Wにある金属製のプレートに両面テープで固定しただけ。

成分を分析するのに、抽出や精製などの操作は不要。

測定試料のセットと所要時間：BL08U

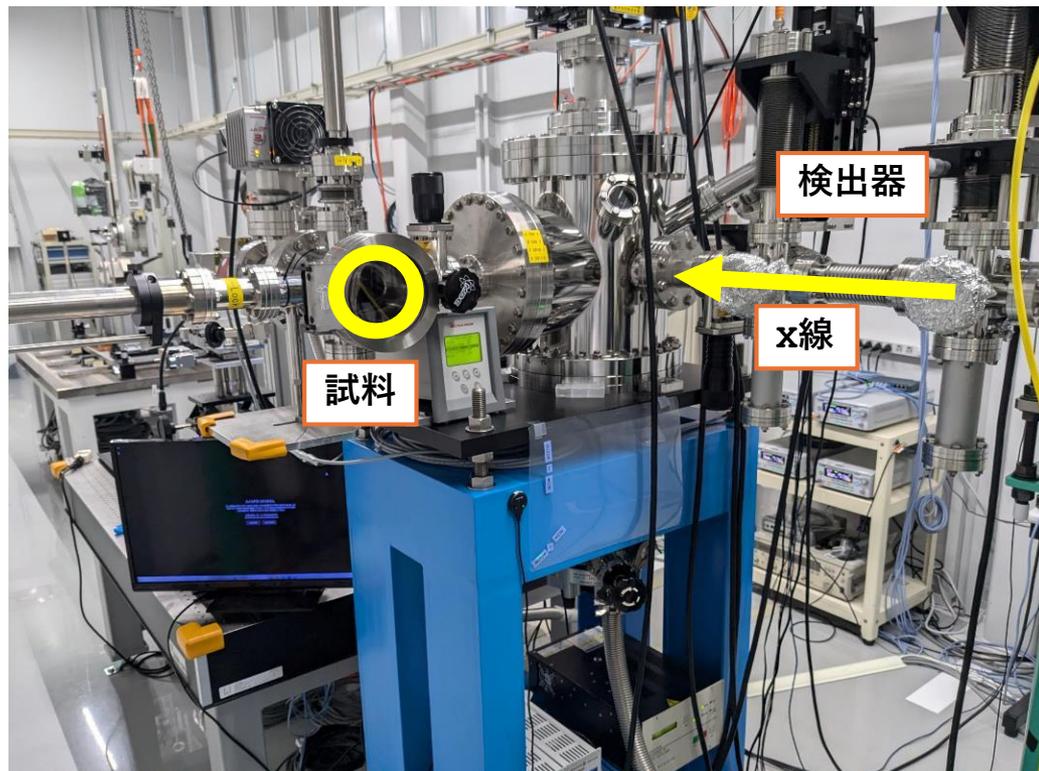


- 金属プレートは同時に5つまで装置にセットできた。
- 装置へのセットはNanoTerasuのスタッフにお願いした。
- 高い真空度(10^{-5} Pa)で測定するために、**レタスのような水分を多く含む試料は、事前に長時間の乾燥処理(今回は真空デシケーター中で5日間の乾燥)が必要だった。**
- 試料をセットしてから測定できるようになるために、1~1.5時間の真空排気が必要だった。
- 試料を取り出す際も、大気圧に戻すために30分程度を要した。
- 試料のセット、真空排気、試料取り出しなどの時間を考慮すると、実際に測定できたのは1シフト8時間中5時間程度であった。



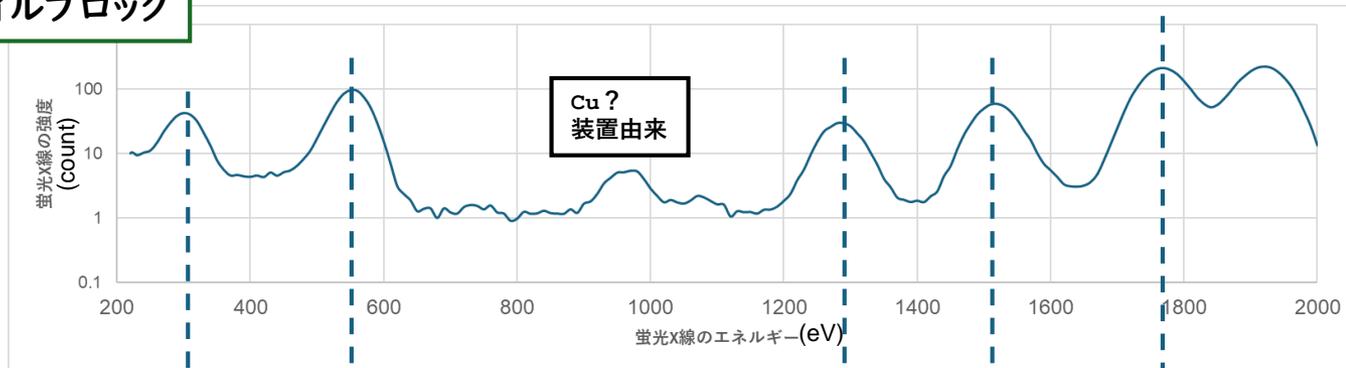
測定試料のセットと所要時間：BL08W

- 今回の測定はCaよりも軽い元素を重点的に調べるため、大気の影響を除くために真空中で測定。
- 金属プレートに貼り付けた試料は、右の写真の○の位置にセットした後、真空状態になり測定容器に入る。
- 試料に照射されたX線により生じた蛍光を、X線の進行方向と垂直の位置に置かれた検出器で検出。
- S (イオウ) などの軽い元素について調べる場合は、試料のまわりをHe (ヘリウム) に置換して測定することができる。
- Caよりも重い元素 (Asまで) については大気下で測定可。
- 測定時間は、XRFで元素の組成を調べる場合は、試料のセットに3分、測定に1分程度。
- XAFSで元素状態を調べる場合は、10~20分程度で測定できた。



元素の割合分析の結果 (BL08U)

ソイルブロック



1900 eVのX線を照射した時に発生する蛍光X線のエネルギー別の強度を測定した。

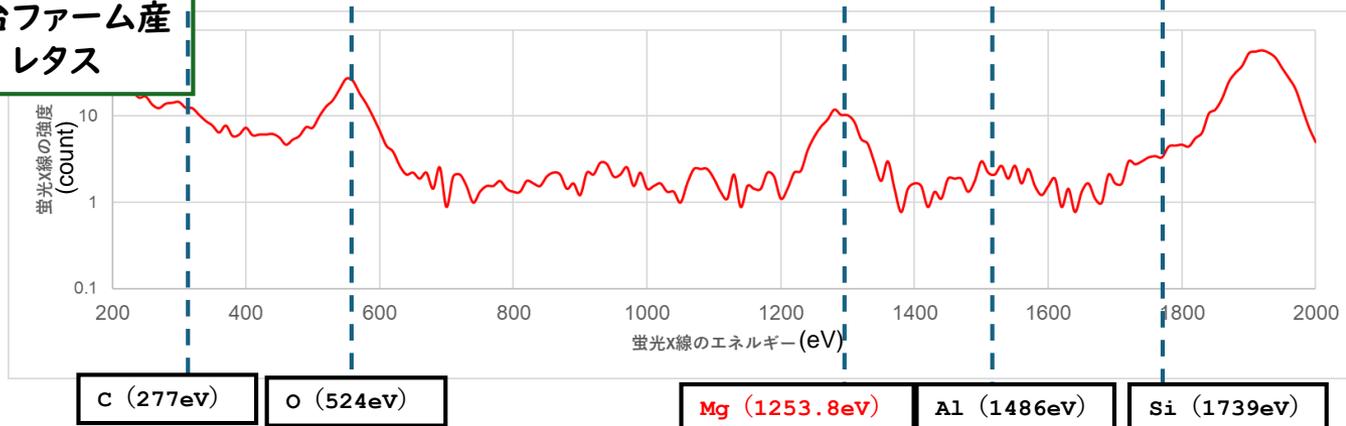
ソイルブロック、レタスのいずれからでもMgのシグナルピークが検出された。

土にはAlやSiが多く含まれるが、レタス中には見られない。

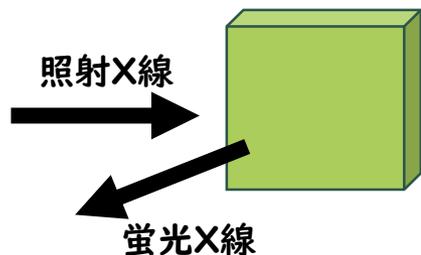
↓

BL08Uで農産物由来のMgを測定することが可能である。

舞台ファーム産
レタス



化学状態測定の内容



測定試料のレタスには
少しずつエネルギーを変化させて
X線を照射した。
その時に生じた蛍光X線の強度を
蛍光X線のエネルギーごとに検出した。

具体的な測定条件と測定時間

Mg分析:

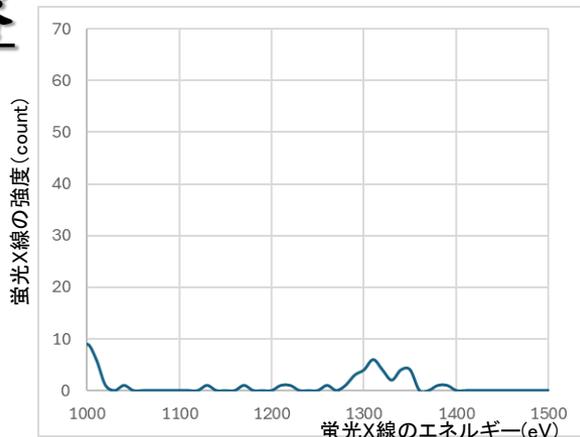
1290→1350eV 0.5eV刻

み

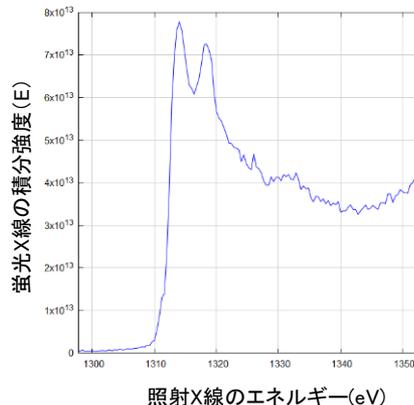
各点1秒間のX線照射

測定時間:約10分

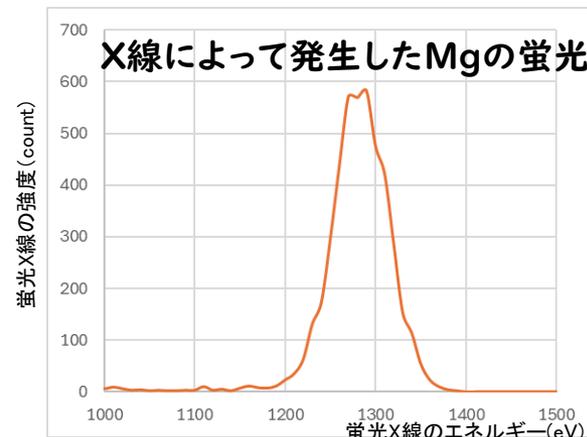
レタスに1290eVのX線を照射した時



蛍光X線が出るよりも低いエネルギーのX線を照射しても、蛍光は出てこない。



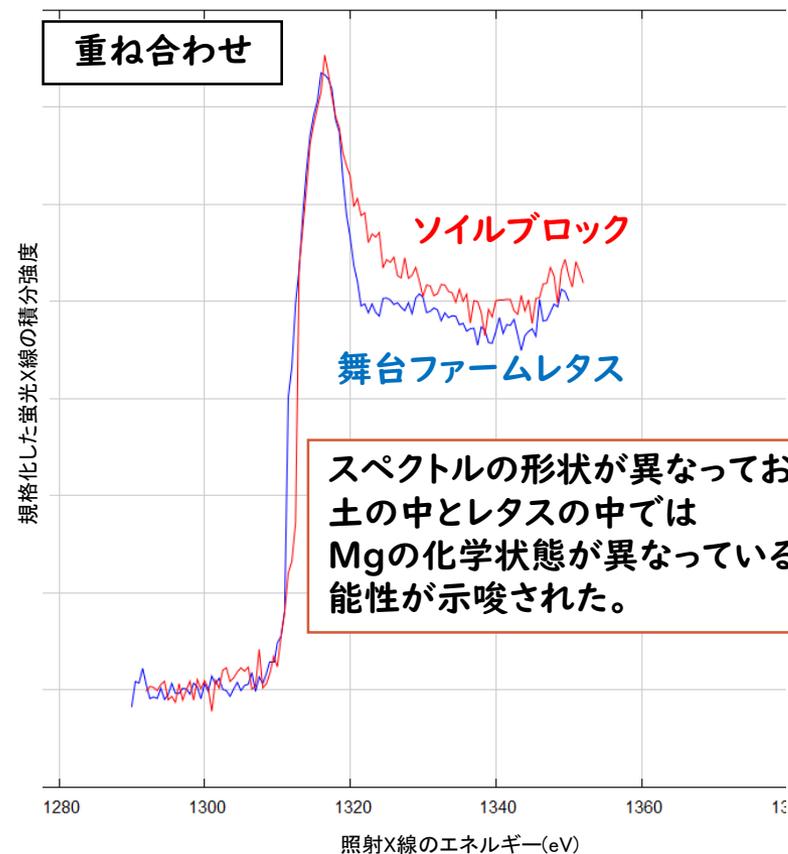
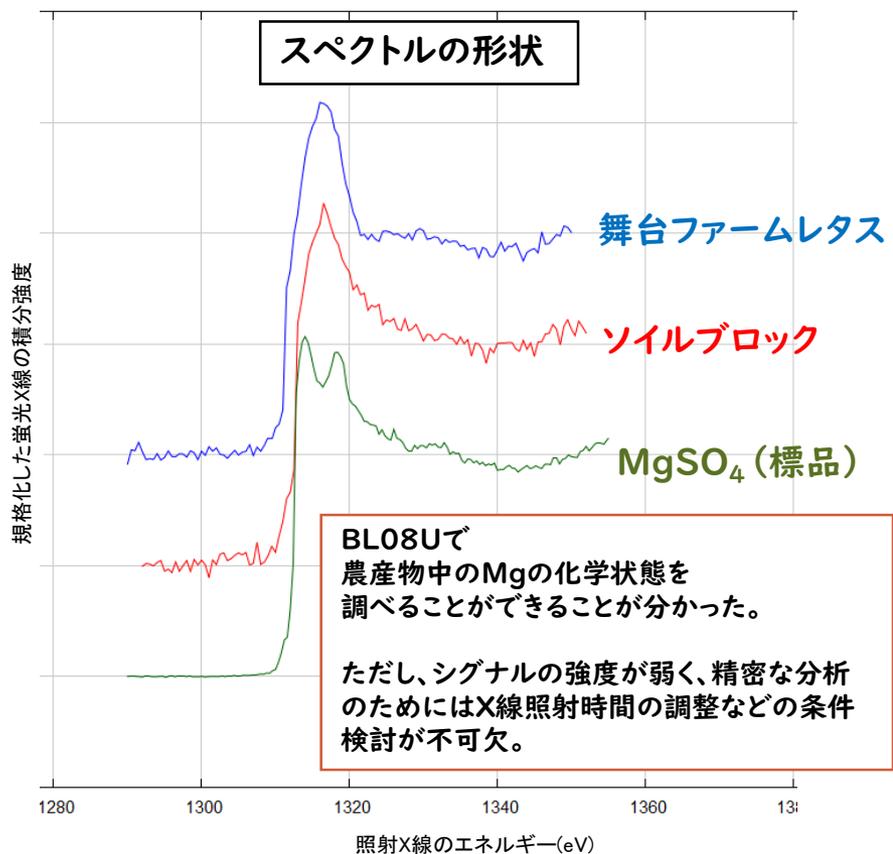
レタスに1313eVのX線を照射した時



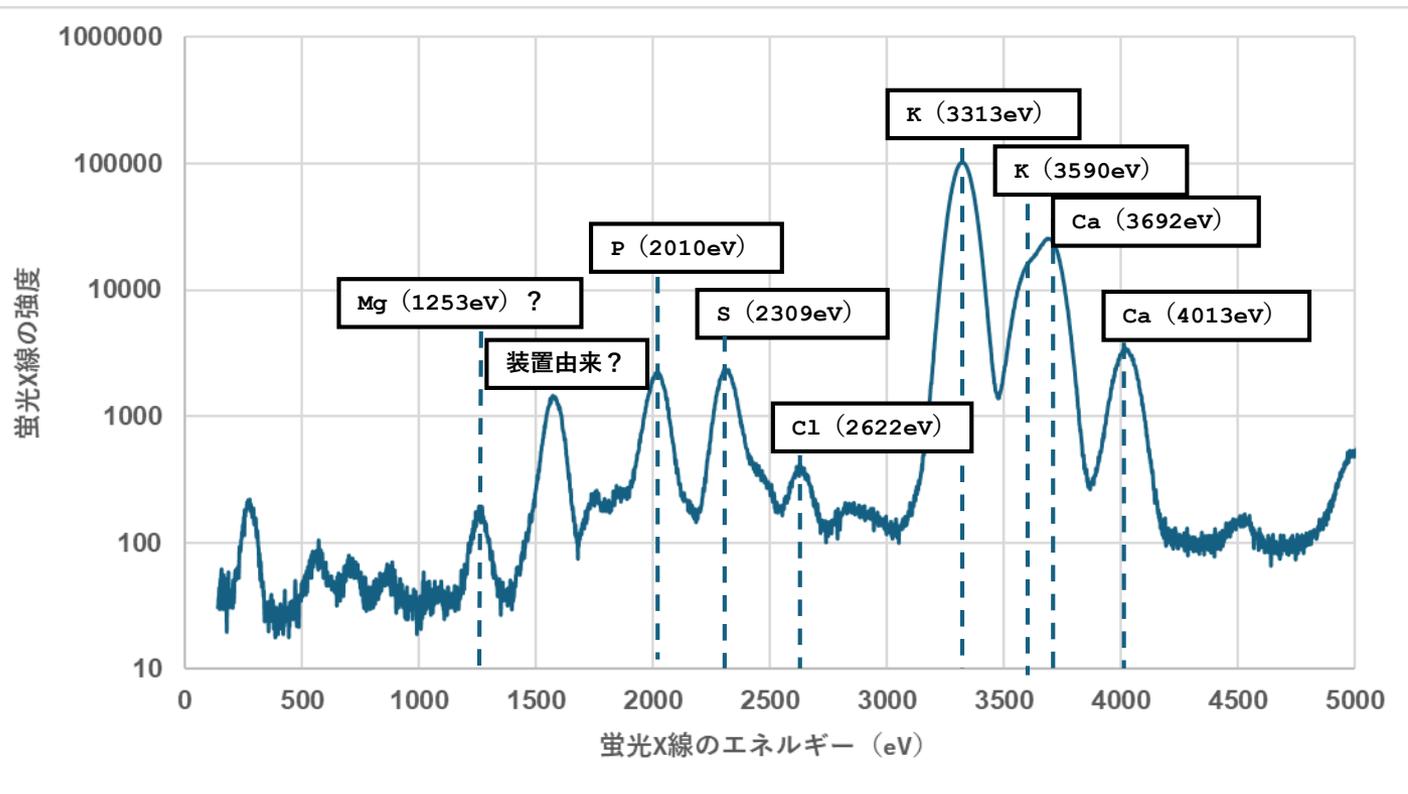
蛍光X線が出るよりも高いエネルギーのX線を照射すると蛍光が出てくる。

横軸を照射X線のエネルギー、縦軸をその時の蛍光X線の強度としてプロットすると、化学状態を表すグラフが得られた。

Mgの化学状態測定結果



元素の割合分析の結果 (BL08W)

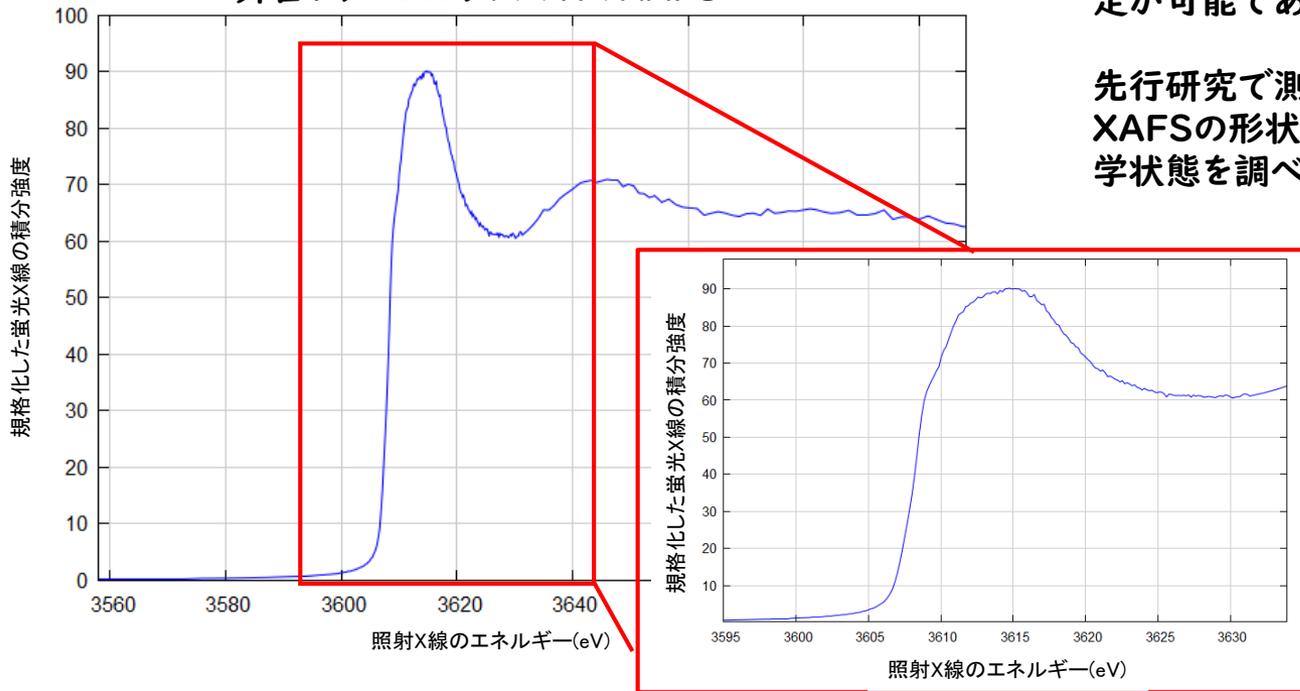


5000 eVのX線を照射した時に発生する蛍光X線のエネルギー別の強度を測定した。

舞台ファーム産レタスからはK、Ca由来のシグナルが強く検出された。

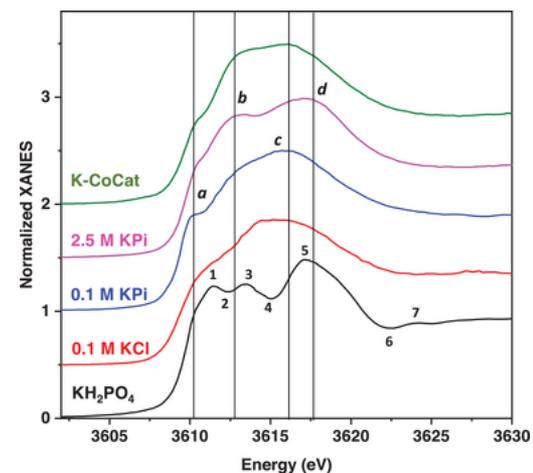
Kの化学状態測定結果

舞台ファームレタスのKのXAFS



BL08Wで農産物(レタス)のKのXAFS測定が可能であることが分かった。

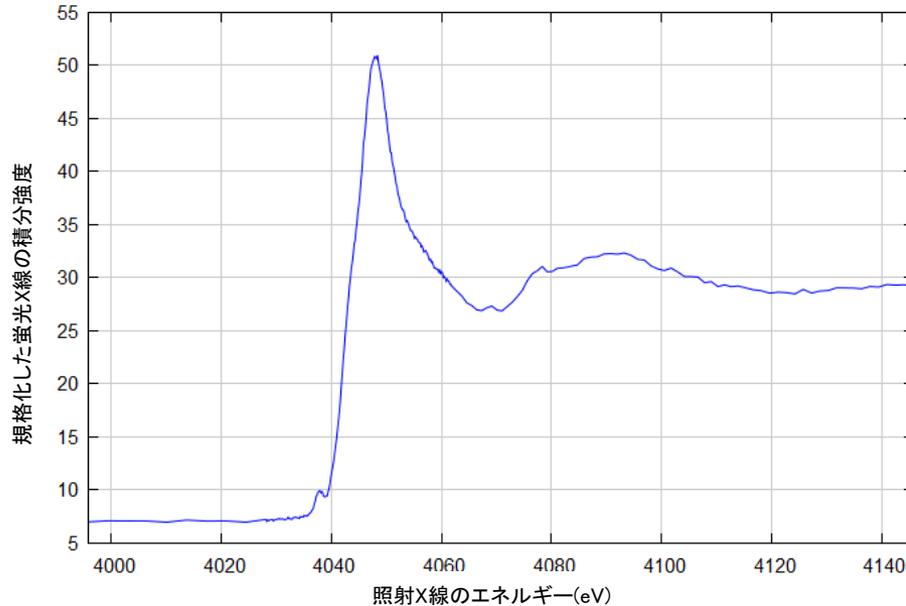
先行研究で測定されている標準試薬のKのXAFSの形状との比較で、レタス中のKの化学状態を調べることができるともかもしれない。



<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adsu.300008>

Caの化学状態測定結果

舞台ファームレタスのCaのXAFS



BL08Wで農産物(レタス)のCaのXAFS測定が可能であることが分かった。
先行研究で測定されている標準試薬のCaのXAFSの形状との比較で、レタス中のCaの化学状態を調べることができるともかもしれない。

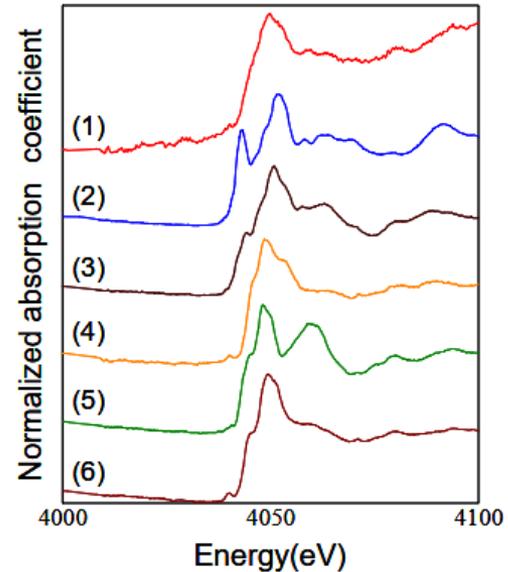


図4 Ca K吸収端のXANESスペクトル
(1): $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, (2): CaO
(3): $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (4): $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$
(5): CaCO_3 , (6): $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

https://www.saga-ls.jp/site_files/file/Publication/Experiment%20Report/H25/R/1304025R_morita.pdf

まとめ

乾燥させたレタスを用いて、

BL08UではMg、BL08WではK、Caの化学状態をXAFSで分析できることが分かった。

今後は、舞台ファーム産レタスと他の栽培方法（水耕栽培など）のレタスとの比較を試みたい。一回の測定で測定できる試料の大きさに限りがあるため、レタスの部位による違いや個体差などについては慎重に検証する必要がある。

真空状態で測定する試料では、真空中で乾燥したことにより化学状態が変化してしまうかもしれないので、その点も検証する必要がある。

展望

レタスの新しい分析手法を確立するためのおおまかな流れ

舞台ファーム産のソイルブロックを用いて栽培したレタスを対象として

NanoTerasuを利用して、どのような元素が多く(または少なく)含まれているのか?

BL08Uの軟X線XAFSを用いてMg (マグネシウム) :
BL08WのXAFSを用いてK (カリウム) とCa (カルシウム) :
の元素についてXAFS分析が可能かどうか?

を調べる



今回の測定によりNanoTerasuで測定できることがわかった。

舞台ファーム産のソイルブロックを用いて栽培したレタスと水耕栽培のレタスについて比較を試みる



ソイルブロック栽培と水耕栽培のレタスで違いがあったら

元素の違いと味や品質の違いについて、NanoTerasuを利用して科学的なアプローチを試みる。

謝辞（敬称略）

- 牧野知之（東北大学大学院農学研究科/放射光生命農学センター）
- 原田昌彦（東北大学大学院農学研究科/放射光生命農学センター）
- 村松淳司（東北大学大学院農学研究科/放射光生命農学センター）
- 高山裕貴（東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター）
- 日高將文（東北大学大学院農学研究科/放射光生命農学センター）
- 尾間由佳子（東北大学大学院農学研究科）
- NanoTerasuのスタッフのみなさま