

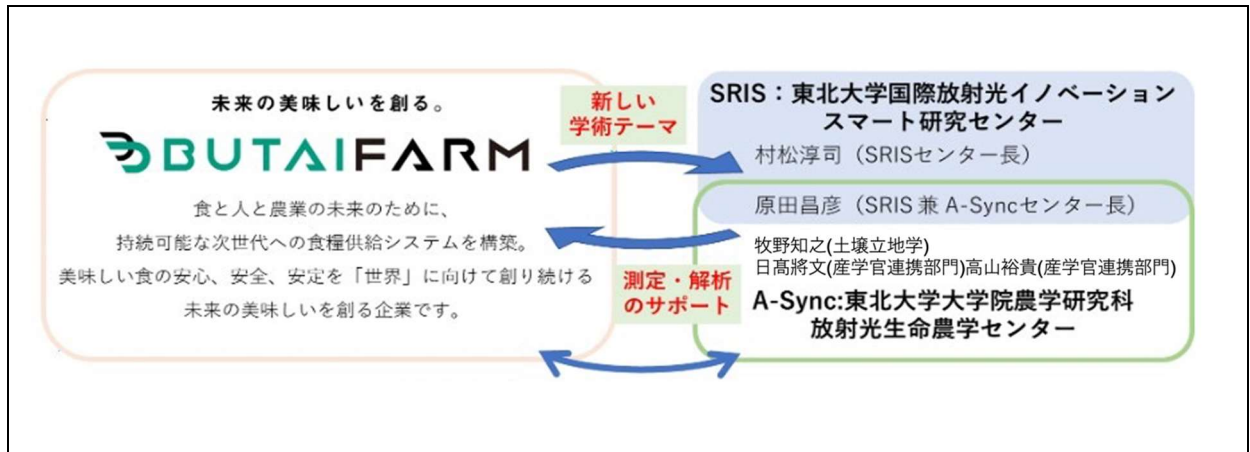
(様式第 6 号)

令和 6 年度仙台市 NanoTerasu トライアルユース事業 事例報告書

1 課題名

ソイルブロック栽培レタスの元素分析

2 測定にあたっての体制（社外委託先を含め記載）



3 背景と測定目的

○背景

昨今、国内農業をめぐる課題は山積しており、担い手不足・高齢化、食の安心・安全の確保、生産性向上といった問題に加え、最近深刻度を増しているのが気候変動問題である。生産環境の変化、想定を超える高温やゲリラ豪雨、年々強くなりつつある台風の被害等多方面から影響を受けており、生産者、消費者双方にとって今後安定した価格での供給量の確保は喫緊の課題である。この問題は世界的規模で発生しており、植物工場への投資が劇的に増えている状況にあるが、日本国内においてもその建設は増加傾向にある。当社でも令和3年10月、播種から収穫まで自動栽培を可能とする日本最大級のレタス植物工場を稼働している（宮城県美里町）。直近では記録的な円安基調やウクライナ戦争による世界的食料サプライチェーンの危機など、日本の食料安保が大きな節目を迎えている状況にある。今回のトライアルユースでの取組では、レタスの可食部の「美味しさ」に関する研究を検討したい。植物工場にて使用する培地として一般に水耕栽培やスポンジが広く普及しているが、SDGsの観点から、当社では土（ソイルブロック）の開発を行っている。栽培方法によって含まれる栄養配分や量が異なることは知られているが、この栽培方法の違いによる定性的な味の情報と放射光で得られる定量的な情報とを掛け合わせることで「美味しさ」を定義し、ソイルブロックの品質の優位性を示したい。同ソイルブロックの優位性の科学的根拠を確認することで、この分野においての新しい価値観を広げ、またその信頼性を担保する上でも非常に有用な研究であると考えている。

○目的

2022年度に採択いただいた仙台市トライアルユース事業では、ソイルブロックの優位性について、ソイルブロックそのものの分析を課題として、ソイルブロック中の根張りの様子を可視化することを試みて、測定の諸条件を示して分析の可能性を示すことができた。

本事業では、ソイルブロックを使って栽培されたレタスそのものに着目し、その品質の良さを示すべく、ソイルブロック栽培レタスの元素に着目した分析を試みたい。具体的には元素の組成（量）と、元素の化学状態（質）の分析となる。後者の元素の質的分析は、放射光の特徴を生かした測定手法であり、特に軟X線に強みのあるナノテラスを使うことで、従来の放射光施設では分析が難しかった軽元素についても分析を試みたい。

下記の表のような農産物中の元素量と美味しさを調べた研究では、KとMgの割合に美味しさとの相関がみられることから、本事業ではまず、K、Mg等のソイルブロック栽培レタス中の量と質について分析することに挑戦する。

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

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

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

4 測定方法（測定手法、測定セットアップ、使用ビームラインなど）

測定試料の前処理

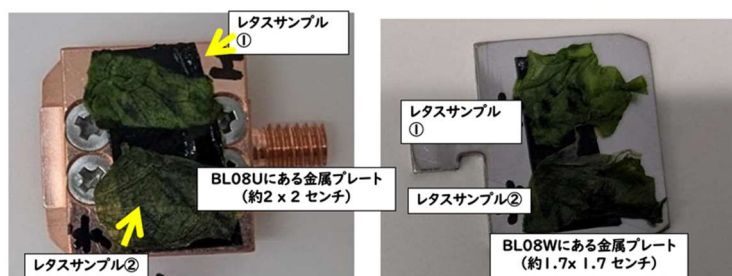
ソイルブロックで生育した舞台ファームのレタスを使用。レタスから葉（可食部）と土の部分を別々にサンプリングし、サンプルを真空デシケーター中で 5 日間乾燥させた。乾燥後の葉と土のサンプルを測定試料として使用。



(5 日間乾燥後のレタスとソイルブロック)

測定試料の準備 : BL08U、BL08W

真空デシケーター中で 5 日間乾燥した上記レタスを、NanoTerasu BL08U、BL08W にある金属製プレートに両面テープで固定した。BL08U にある金属プレートは約 2×2 センチ、BL08W にある金属プレートは約 1.7×1.7 センチのサイズである。



測定試料のセットと所要時間 : BL08U

高い真空度(10^{-5} Pa)で測定するために、レタスのように水分を多く含む試料は、事前に乾燥処理の段階処理（今回は真空デシケーター中で 5 日間の乾燥）、試料をセットしながら測定できるようになるために、1～1.5 時間の真空排気、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、実際に測定できるのは 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

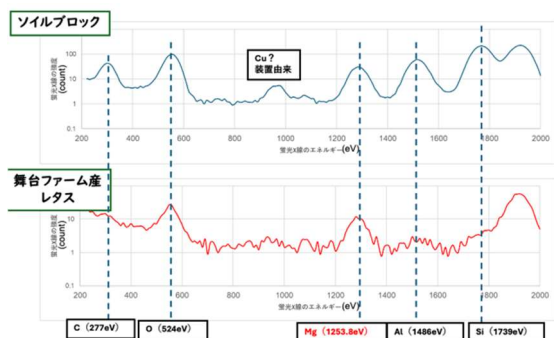
今回の測定は Co よりも軽い元素を重点的に調べるため、大気の影響を除くために真空中で測定した。金属プレートに貼り付けた試料は、所定の位置にセットした後、真空状態になり測定容器に入る。試料に照射された X 線により生じた蛍光を、X 線の進行方向と垂直の位置に置かれた検出器で検出する。

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 K 殻 X で測定可能である。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 分程度である。XAFS で元素状態を調べる場合は、10～20 分程度で測定できた。

5 結果及び考察（代表的なグラフや図を用いて分かりやすく説明すること）

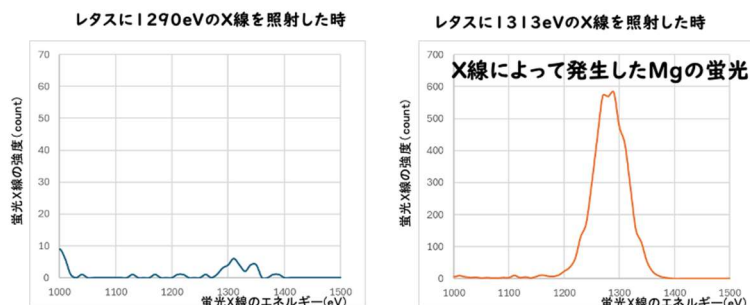
元素の割合分析の結果（BL08U）

BL08U ビームラインでは、1900 eV の X 線を照射した際に発生する蛍光 X 線のエネルギー別の強度を測定した。ソイルブロック（土壌サンプル）と舞台ファーム産レタスの両方から Mg のシング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かった。このことから、BL08U を用いることで農作物由来の Mg を測定することが可能であることが確認された。検出された主な元素は C (277eV)、O (524eV)、Mg (1253.6eV)、Al (1486eV)、Si (1739eV) である。



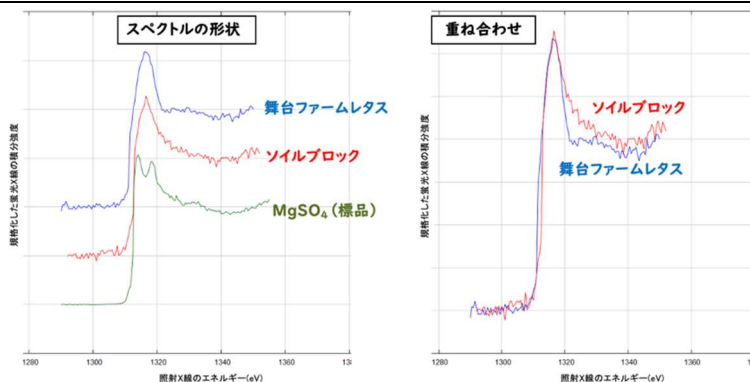
化学状態測定の内容

化学状態の測定では、測定試料のレタスに対して少しずつエネルギーを変化させた X 線を照射し、その際に生じる蛍光 X 線の強度をエネルギーごとに検出した。1270eV の X 線照射では蛍光は出ないが、1313eV の X 線照射では Mg の蛍光が確認された。これは蛍光 X 線が出るエネルギー閾値を超えたことを示している。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ことで、化学状態を表すグラフが得られた。Mg 分析においては、1270eV から 1350eV まで 0.5eV 刻みで測定し、各点 1 秒間の X 線照射で、約 10 分の測定時間を要した。



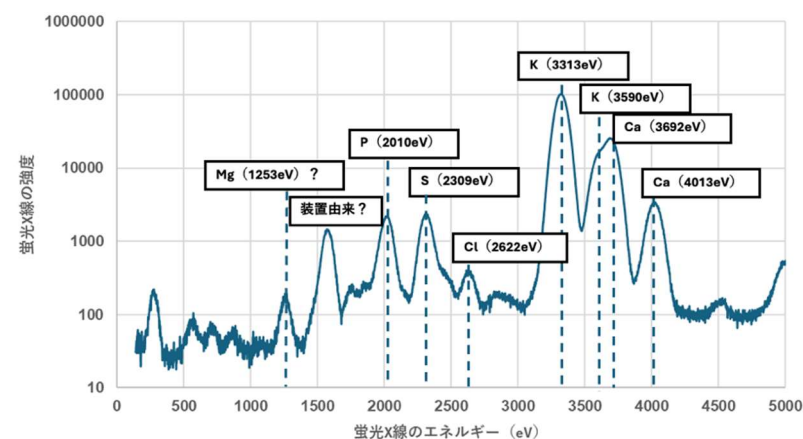
Mg の化学状態測定結果

Mg の化学状態測定では、青谷ファームレタス、ソイルブロック、MgSO₄（標品）の 3 つのサンプルのスペクトルを比較した。BL08U を使用することで Mg の化学状態を調べることが確認された。ただし、シグナルの強度が弱く、詳細な分析のためには今後 X 線照射時間の調整などの条件検討が必要である。青谷ファームレタスとソイルブロックのスペクトルを重ね合わせた結果、形状が異なっていることが観察され、土のサンプルとレタスサンプルでは Mg の化学状態が異なっている可能性が示唆された。



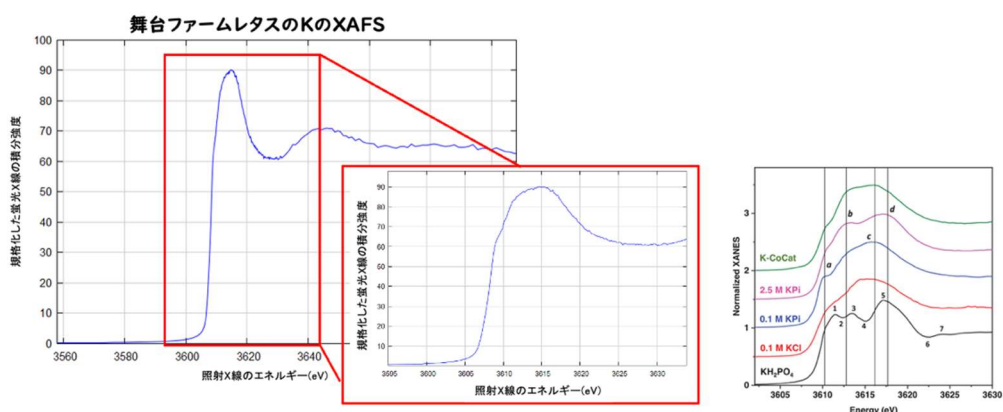
元素の割合分析の結果 (BL08W)

BL08W ビームラインでは、5000 eV の X 線を照射した際に発生する蛍光 X 線のエネルギー別の強度を測定した。青谷ファームレタスからは K、Ca 由来のシグナルが強く検出された。検出された元素とそのエネルギー値は Mg (1253eV)、P (2013eV)、S (2308eV)、Cl (2622eV)、K (3313eV)、K (3590eV)、Ca (3688eV)、Ca (4013eV) である。より詳細な理解のために、レタスの他の部位や水耕栽培レタスとの比較が今後の課題として挙げられる。



K の化学状態測定結果

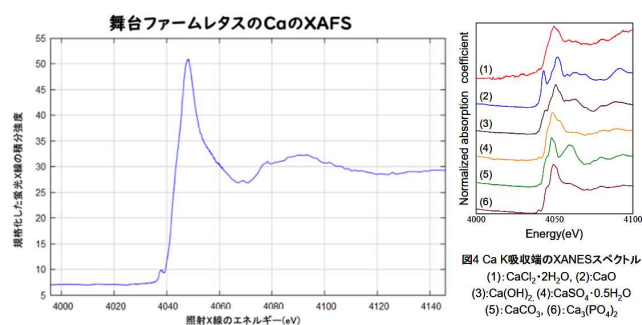
BL08W で青谷ファームレタスの K の XAFS 測定を行った結果、農産物(レタス)の K の XAFS 測定が可能であることが確認された。先行研究で測定されている標準試薬の K の XAFS の形状と比較することで、レタス中の K の化学状態を調べる可能性が示された。



Ca の化学状態測定結果

同様に、BL08W で青谷ファームレタスの Ca の XAFS 測定も行った。このビームラインで農産物 (レタス) の Ca の XAFS 測定が可能であることが確認された。測定結果は、先行研究で測

定されている 6 種類の Ca 化合物 ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaSO_4 、 CaCO_3 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) の XANES スペクトルと比較することができ、これによりレタス中の Ca の化学状態を詳細に調査できる可能性が示された。



6 今後の課題

まとめ

乾燥させたレタスを用いた実験から、NanoTerasu のビームラインにおいて、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確認された。このことは、農作物の微量元素の化学状態を非破壊で分析できる新たな手法の確立につながる重要な知見である。

今後の課題

一回の測定で分析できる試料の大きさには限りがあるため、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。特に葉の位置や生育段階による元素分布の違いを系統的に調査することが重要である。また、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元素の化学状態が変化してしまう可能性があるため、生体内での状態をより正確に反映させる前処理方法についても検討が必要である。シグナル強度が弱いという問題点に対しては、X線照射時間の最適化や検出器の感度向上など、測定条件の改善が求められる。

展望

今後は、舞台ファーム産のソイルブロックで栽培したレタスと水耕栽培のレタスとの比較研究を進める計画である。これにより、栽培方法の違いが元素の取り込み方や化学状態にどのような影響を与えるかを科学的に解明できる可能性がある。

さらに、これらの元素分析結果と、味や食感、栄養価などの品質指標との関連性を調査することで、より高品質な農作物生産のための科学的アプローチを確立したい。特に、Mg、K、Ca などのミネラル成分の化学状態が植物の生育や品質にどのように影響するかを明らかにすることは、農業科学の発展に貢献する重要な研究課題である。

このような研究を継続することで、NanoTerasu を活用した農作物の新しい分析手法を確立し、農業と先端科学技術の融合による食の安全性向上や高付加価値作物の開発に寄与することを目指す。

7 参考文献

- 森田 敦, 大槻 光彦. (2013). 塩の異同識別のための XANES 分析. 佐賀県警察本部科学捜査研究所. https://www.saga-ls.jp/site_files/file/Publication/Experiment%20Report/H25/R/1304025R_morita.pdf
- Role of Potassium in Electrocatalytic Water Oxidation Investigated in a Cobalt-Based Catalyst. (2023). Advanced Sustainability, Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adsu.202300008>