

## 令和7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

蛍光 X 線元素分析によるイネの生育環境とコメの栄養価の関連性評価の試み

### 2 測定にあたっての体制 (社外委託先を含め記載)

(株)東北アグリサイエンスイノベーション

駒井三千夫：総括・試料調製・測定。

新潟食料農業大学

田副 雄士 准教授・伊藤 崇浩 講師・伊藤 豊彰 前教授：測定試料提供と学術指導。

(株)光エンジニアリングサービス

鈴木 拓明 博士・竹内 健一 氏：測定試料調製・計測支援・計測値の分析と解析。

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 (SRIS)・大学院農学研究科 (兼任)

高山 裕貴 准教授・日高 将文 准教授：測定方法の学術指導および助言。

東北大学大学院農学研究科

白川 仁 教授・大崎 雄介 准教授・藤井 智幸 教授：測定指導および助言。

### 3 背景と測定目的

【背景】イネのごま葉枯病 (以下の写真参照) は、仙台市内での発生は少ないようではあるが、新潟県では 2014 年以降増えてきている。必須元素類の養分不足時に発生しやすいため、砂質浅耕土や老朽化水田、秋落ち\* (下記参照) 水田でよく発生する。特にカリウムや鉄、ケイ酸、マンガン、マグネシウムが欠乏すると多発し、窒素切れを起こした場合にも発生が助長される。予防のためには、水田にこれらの成分が不足しないようにするなど、養分が豊富な肥沃な土作りが基本となる。これによって、おいしさも含めたコメの品質と収量の向上につながると考えられている。

2010 年代の SPring-8 や外国の放射光施設でのコメ粃や雑穀全粒の元素類の分析成果がヒントになり、雑穀の外皮には鉄分が多く、米粒の胚芽には亜鉛が多くあることなどに関心を持ち、今回の企画に繋がった。折しも昨年度、新潟食料農業大学の伊藤豊彰教授 (元東北大学准教授、土壤立地学) に相談したところ、鉄・ケイ酸・マンガン等を施用した水田由来のイネ粃を持っておられたので、今回はこれを譲り受けて利用させて頂くことになった。

【測定目的】申請書では高温障害に強いケイ酸資材 (ケイ素 Si の多い肥料) を用いた場合の Si の分布を測る事も想定していたが、今回は別なビームラインでの計測が必要であることと、実験イネ粃では初めてのマッピング解析であったため、次の機会の課題にすることとした。

また、当初、ごま葉枯病の水田 (対照区) と、土地改良資材の施用によって改善した水田由来のコメ粃 (試験区 4 群 = 各種の元素含有資材の施肥) 中の元素分布について解析し、土地改良が粃中の成分組成に及ぼす影響を解明する予定であった。しかし、計測準備中に、このような実験例が日本においては非常に少ないことが分かり、粃内の元素マッピングが可能な事を明らかにすることとした。

当初の研究目的の予備調査も兼ねて、試料として対照区 (資材無施用) と総合的土地改良資材 (製鋼スラグを原料とした資材で、Fe, Si, Ca, Mg, Mn などを含む) を施用した土壌で栽培したイネの粃を用いた。

対象元素は、コメの栄養価に関わるヒトの必須元素類（Ca, K, Fe, Zn, Cu, Mn=人体において存在量の多い順に記載）とした。なお、Rb は必須元素ではないが、明確な強度で検出されたために測定系に含めた。

#### 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）

新潟食料農業大学から入手したイネ籾（玄米+もみ殻）試料は、エポキシ樹脂に包埋した後に、マイクロトームでX線照射側をトリミングして平滑面にして、反対側を紙やすりで研磨して削った。全体の厚さ（X線透過幅）を400~500μmにした後にスライドホルダーにてMYLAR製ポリエステル膜で覆って測定装置にセットした。ナノテラスでの蛍光X線元素分析は、BL08W-XRD ビームラインで行い、計測した元素類は、K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb（原子番号順）の7種類とした。その二次元マッピングについて、成果を得たので報告する。

##### 1. イネ籾試料 <品種：コシヒカリ、栽培地：新潟県胎内市内>

###### ① 対照区：3個

➔ 土地改良処理なし。（ごま葉枯れ病多発。）

###### ② 総合的土壌改良区：3個

➔ 総合的土壌改良処理。Ca, Fe, Si を多量に、Mg, P, Mn を中程度に、B, Zn, Cu を少量含有する。

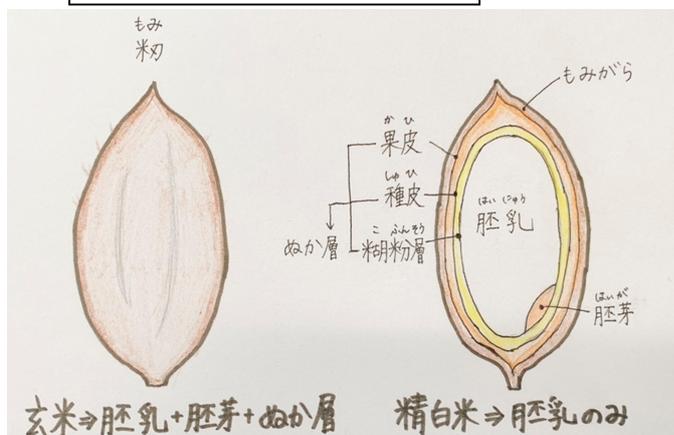
##### 2. 試料加工

籾殻付きの玄米を樹脂埋めし、研磨紙・マイクロトームを用いて厚さ約0.5mmに加工した。

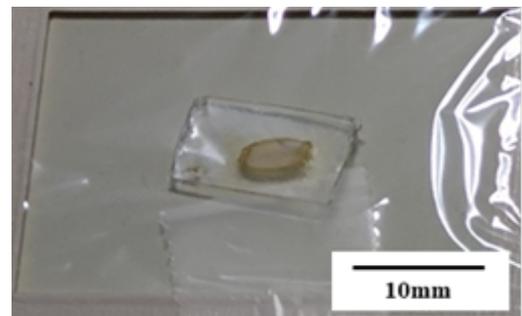
##### 3. 測定（蛍光X線マッピング）

- ビームライン： NanoTerasu BL08W-XRD
- エネルギー： 17.5keV
- ビームサイズ： 100μm × 100μm
- 測定元素： K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb
- 測定日： 2025年11月21日、11月26日

##### イネ籾の全体像（模式図）



##### 樹脂包埋マウント後の測定試料



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)



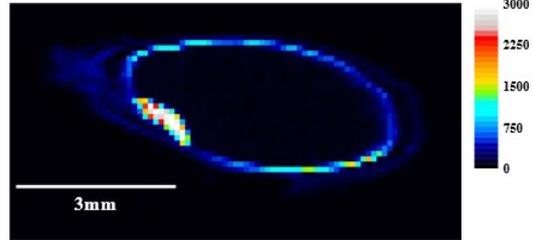
### 測定結果①: 蛍光X線マッピング (1/4)

#### 試料: 対照区 (土壌改良処理なし)

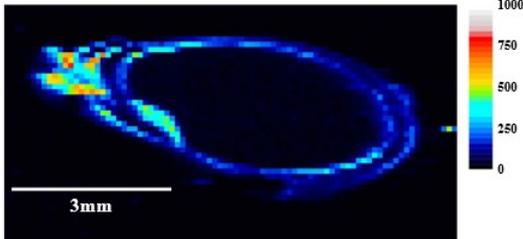
外観写真



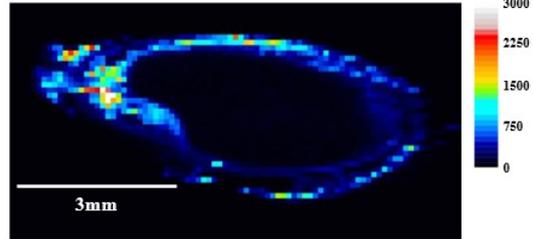
カリウム (K)



カルシウム (Ca)



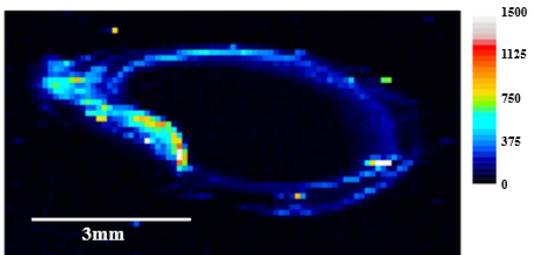
マンガン (Mn)



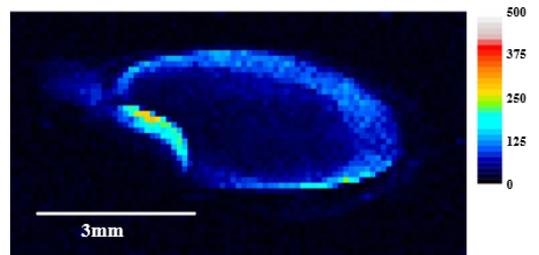
### 測定結果②: 蛍光X線マッピング (2/4)

#### 試料: 対照区 (土壌改良処理なし)

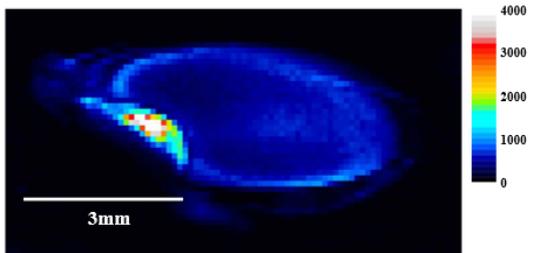
鉄 (Fe)



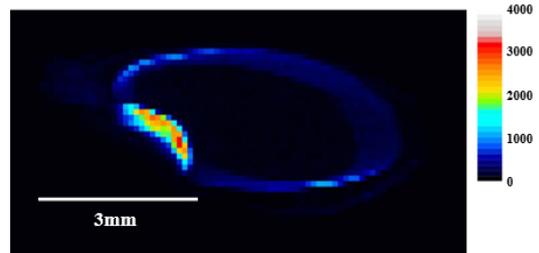
銅 (Cu)



亜鉛 (Zn)

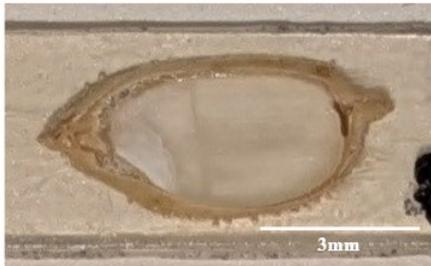


ルビジウム (Rb)

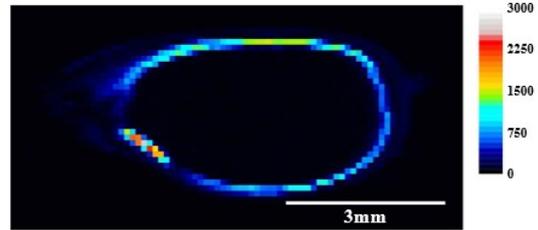


試料：総合区(総合的土壤改良処理)

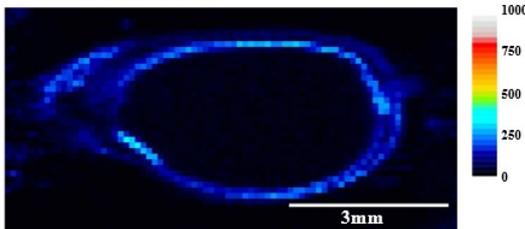
外観写真



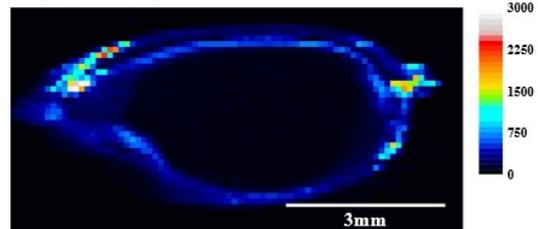
カリウム (K)



カルシウム (Ca)



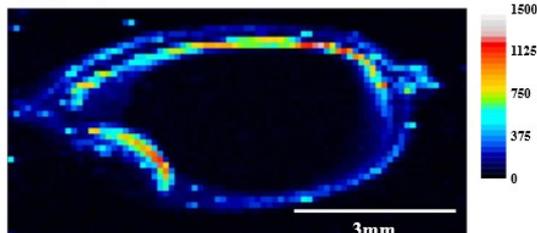
マンガン (Mn)



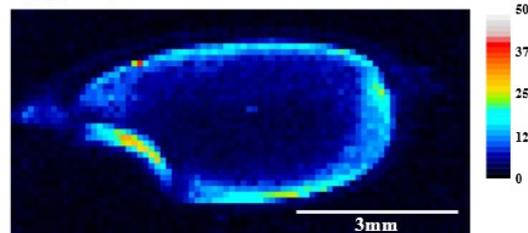
22

試料：総合区(総合的土壤改良処理)

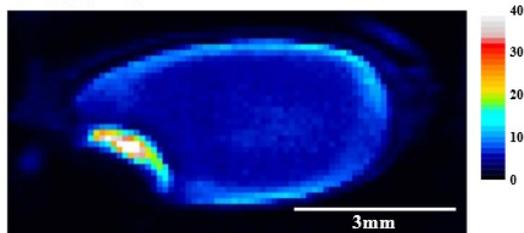
鉄 (Fe)



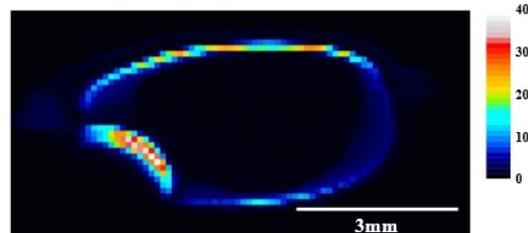
銅 (Cu)



亜鉛 (Zn)



ルビジウム (Rb)



23

1) イネ籾中の必須元素類の分布についての相対的なマッピングを行った結果、分析したすべての元素が胚芽に多量に存在し、胚乳（澱粉が蓄積）には少ないことが分かった。

さらに、Ca, Mn, Fe は籾殻の一部（籾が穂と細い軸で繋がっている部分。米粒に栄養が送られてくる入口。）にも多かった。

2) 玄米は糠層（果皮、種皮、糊粉層よりなる胚乳を包む層）と胚乳により構成されるが、対象としたすべての元素は、糠層にも高濃度に存在した。糠層と胚芽は通常の精米処理で除去されるために玄米に比較して精米の無機養分が低下すること（日本食品標準成分表、2020）を裏付ける結果が得られた。イネ籾における元素を視覚的にマッピングした新しい知見となった。

3) 対象元素の中で Zn と Cu は異なる分布を示し、胚乳にも多く分布しており、特に、Zn は胚乳全体に分布していた。また、総合的土地改良区で強度がより強く見えることから、土壤改良によって米の無機栄養濃度が高まる可能性が示唆された。Zn と Cu は他の元素よりも精白米から多く摂取できると推測された。

➡食品群別では穀類からの Zn と Cu の供給量が最大である（各々32%、36%が穀類から摂取）。また、食品成分表（2020）において玄米に対する精白米の相対的な Zn と Cu の含量が高いことが記載されているが、本研究はこのことを元素マッピングの面から裏付けることができた。

4) Zn と Cu は糠層の最も奥に在る糊粉層にまで多く分布しているかもしれない。

➡糠層内の分布の解像度を上げることによって果皮・種皮・糊粉層における元素分布を明らかにすることが可能と考えられる。

5) 新潟食料農業大学の研究において、製鋼スラグ原料の土壤改良資材（てんろ石灰＝本研究に用いた土壤改良資材）の施用によって、ごま葉枯れ病の発病を抑制する結果が得られている。対照群に比べて土壤改良区の米の元素の濃度が高い可能性が推察されたことと、ごま葉枯病発生抑制との関連を検討していきたい。

今後は、同手法を元素濃度既知の標準玄米に適用することによって濃度換算にチャレンジし、各元素濃度の米粒内分布の違いや土壤改良処理による違いも明らかにできるものと考えている。

## 6 今後の課題

### イネ籾中および玄米中の必須元素類の分布と存在濃度の蛍光 X 線分析：今後の課題

- 1) Zn と Cu は、糠層の中でもおそらくは糊粉層にまで多く分布している可能性があった。よって、糠層内の分布の解像度を上げられれば解析が可能となる。すなわち、スキヤンの場所を糠層を中心にした局所にセットして、かつ解像度を上げるスキヤニング法を適用することなどによって、果皮・種皮・糊粉層の位置における元素マッピングを行うことで有用な知見を得る。
- 2) 各必須微量元素の分布強度が、対照群よりも総合的施肥群（各種元素補給群）でより強く見られたが、今回の解析だけでは絶対濃度が不明のままであり、明確な濃度の比較はできていない。よって、今後は同手法を元素濃度既知の標準玄米を使った濃度解析に応用することによって、イネ籾および玄米中の濃度分布の違いや施肥群間（試験区間）の違いも明らかにしていきたい。
- 3) 申請書では高温障害に強いケイ酸資材（ケイ素 Si の多い肥料）を用いた場合の Si の分布を測定する事も想定していたが、今回の BL-08W のトライアルユースだけでは解析不可能であった。次の機会に、Si は BL-08U を用いて Mg なども含めて計測していきたい。

## 7 参考文献

- 1) 日下譲、ほか：「稲の微量元素の組織的放射化分析」、*RADIOISOTOPES*, **16**, 526-530, 1967.
- 2) 日下譲、ほか：「稲の微量元素の組織的放射化分析（続報）」、*RADIOISOTOPES*, **17**,108-112, 1968.
- 3) 大家千恵子、ほか：「品種の異なる玄米と白米中の無機元素」、*日本食品工業学会誌*, **39**, 55-59, 1992.
- 4) 田上恵子・内田滋夫：「ICP-OES と ICP-MS を用いた玄米中の無機元素分布と洗米による濃度変化の解析」、*BUNSEKI KAGAKU*, **65**, 511-517, 2016.
- 5) Ramakrishna, P.: Grain scans: fast X-ray fluorescence microscopy for high-throughput elemental mapping of rice seeds. *Plant Physiology*, **191**, 1465-1467, 2023.
- 6) Limmer, M.A., Webb, S.M., Seyfferth, A.L.: Evaluation of quantitative synchrotron radiation micro-X-ray fluorescence in rice grain. *J. Synchrotron Radiation*, **30**, 407-416, 2023.
- 7) Iwai, T., et al.: Dynamic changes in the distribution of minerals in relation to phytic-acid accumulation during rice seed development. *Plant Physiology*, **160**, 2007-2014, 2012.