

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

放射光を利用した小麦中微量元素の動態解析

2 測定にあたっての体制 (社外委託先を含め記載)

・株式会社 金トビ志賀

試料調製、放射光実験、小麦粉特性の評価、放射光測定と小麦粉特性評価の関連性の検討

・東北大学 農学研究科附属放射光生命農学センター/国際放射光イノベーション・スマート
研究センター (原田昌彦 教授、村松淳司 客員教授、高山裕貴 准教授、日高将文 助教、
尾間由佳子 助教)

放射光実験、放射光実験データ解析、放射光測定と小麦粉特性評価の関連性の検討

3 背景と測定目的

○背景

当社は 1917 年創業以来、うどん用中力粉に特化した製粉を行ってきた。金トビ志賀の愛知県産小麦粉「きぬあかり」は、他社の「きぬあかり」小麦粉と比較して「クリーミーホワイトで明るい」と評価されてきたが、その根拠は官能・経験則が中心であり、定量的な説明が不足していた。小麦に含まれる微量元素は、最終製品である麺の色調や物性に影響を与える。特に灰分が少ない小麦は製品の明度が高い傾向が報告されている (Oliver et al., 1992)。また、愛知県産小麦「きぬあかり」は明度が高く黄色みを帯びると報告されている (伴ほか, 2021) が、具体的にどの元素が少なく、どのような化学状態にあるのかは未解明であった。

○課題

小麦粉製品の品質差は、品種・産地等の先天要因と、製粉・製麺等の後天要因で決まる。当社はこれまで後天要因の最適化を進めてきた一方で、先天要因である原料由来の差を元素レベルで捉え、品質差を説明することができていなかった。

○測定目的

3GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu の BL08W-XAFS および BL08U を用いて、小麦に含まれる微量元素の動態を明らかにすることを目的とする。単なる元素の定量比較にとどまらず、元素の化学状態にまで着目することで、愛知県産小麦「きぬあかり」に特徴的な元素分布や化学状態を明らかにし、小麦の明度や加工特性との相関を見出すことを目指す。

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）

○使用ビームラインと測定内容

実験の流れとしては、まず XRF 測定で差がある元素を把握し、注目元素について XAFS 測定で化学状態を評価した。

- ・ビームライン：BL08W-XAFS

X 線蛍光（XRF）測定により、品種間および産地間での元素含有量の違いを広範囲に比較するとともに、鉄（Fe）およびマンガン（Mn）等の K 吸収端に着目した XAFS 測定を行い、主要元素の化学状態の違いを明らかにする。また、提案書で挙げた K および Ca の K 吸収端 XAFS 測定は、測定時間の制約により今回は実施しなかった。

- ・ビームライン：BL08U

軟 X 線領域での XRF 測定により、炭素（C）からケイ素（Si）までの軽元素組成を比較した。また、C、N、O については XAFS 測定により化学状態評価を試みたが、想定の結果が得られなかった。また、提案書で挙げた Br、Sr、Mn、Fe の XAFS 測定は該当のシグナルが得られなかった。L 端の蛍光 X 線は弱いいため、検出限界以下であった可能性がある。なお測定内容について、分析区分、ビームライン等の観点から整理を行った。

表 1 分析区分別ビームライン別測定一覧

分析区分	測定手法	ビームライン	対象試料	対象元素範囲	実施状況
元素分析	XRF	BL08W-XAFS	小麦破砕物	P~As	実施
		BL08U		C~Si	
		BL08W-XAFS	土	K, Ca等	
化学種分析	XAFS	BL08W-XAFS	乾麺	P~As	未実施(時間制約) 実施(想定結果得られず) 実施(該当シグナル得られず)
			乾麺	Fe, Mn等	
		BL08U	小麦破砕物、 乾麺	K, Ca	
			乾麺	C, N, O	
				Br, Sr, Mn, Fe	

○測定した小麦の概要

今回の測定では、日本国内で生産され日本麺用として使用される愛知県産小麦「きぬあかり」、北海道産小麦「きたほなみ」、農林 61 号に加え、海外品種としてオーストラリア産銘柄 ASW および高タンパクのパン用小麦 1CW を対象とした。

○試料作成

小麦破砕物は乳鉢にて粉碎後、可能な限り種皮を除去し、BL08W-XAFS 測定用にはカーボンテープに貼り付け、プラスチックプレートに固定した。BL08U 測定用にはインジウムに埋め込み、銅板プレート上に固定した。乾麺試料についても同様に測定を実施した。

以下の手順で測定試料を作成した



図 1 試料作成

○測定条件

・BL08W-XAFS

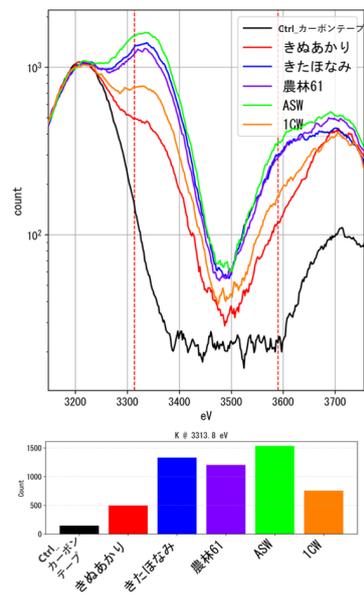
プラスチックプレート上の試料を所定位置に設置し、照射 X 線で生じた蛍光を進行方向に対して垂直方向に配置した検出器で検出した。測定は大気圧下で実施した。所要時間は、XRF 測定がセット約 3 分+測定約 1 分、XAFS 測定が 1 試料あたり約 10~20 分であった。

・BL08U

Si より軽い元素について、BL08U の軟 X 線を用いた XRF/XAFS で元素の組成を比較した。試料はインジウムに埋め込み、銅板プレートに固定して測定した（同時最大 5 枚）。高真空下で測定するため、真空排気に約 1~1.5 時間、取り出し時の大気圧復帰に約 30 分を要し、準備・復帰時間を含めると 1 シフト 8 時間あたりの実測定時間は概ね 5 時間程度であった。

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）

○小麦破砕物の元素組成（P~As まで）



BL08W-XAFS において X 線蛍光 (XRF) 測定を行い、各元素の蛍光 X 線 (赤の縦点線) の強度を測定した。蛍光 X 線の強度は試料の厚さや形状に依存するため、絶対量の測定は難しいが、元素の多寡は比較的容易に比較することが可能である。小麦破砕物間で最も特徴的な違いが見られたのは K であった。K の蛍光 X 線のピーク強度を比較すると、「きぬあかり」は他品種に比べて一貫して強度が低く、相対的に K 含量が少ないことが示唆された。一般に灰分はミネラルの総量を反映する指標であり、K 含量の低さは灰分が少ないという「きぬあかり」の特徴と整合する。ただし、灰分の低さは「きたほなみ」にも見られ、灰分は K のみで決まるものではなく複数元素の総量で決まる。したがって、本結果は「きぬあかり」における K 低含量を特徴の一つとして示すものである。

図 2 K の蛍光 X 線のシグナル強度

Ca および Fe については、蛍光 X 線強度を比較した結果、品種間で明確な差は認められなかった。一方で、Mn および Zn については、農林 61 号において他品種より多く含まれている傾向があった。

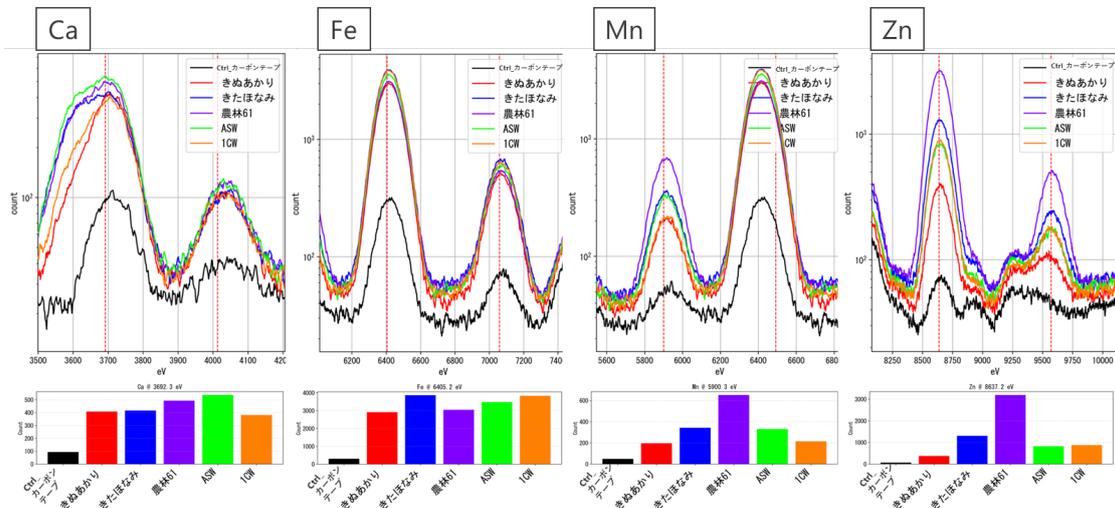


図 3 Ca, Fe, Mn, Zn の蛍光 X 線のシグナル強度

○小麦破碎物の元素組成 (C~Si まで)

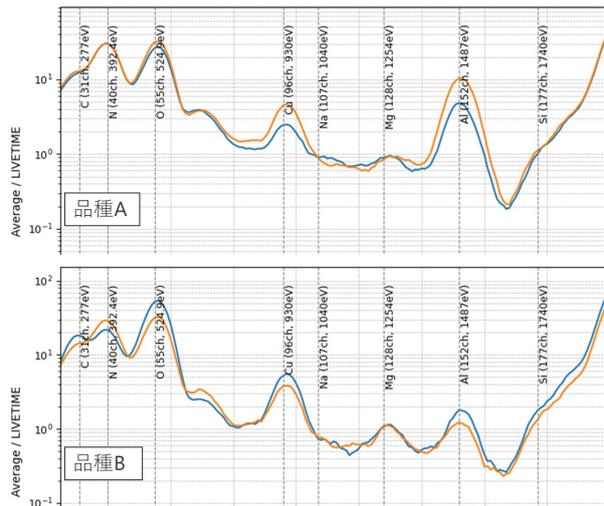


図4 小麦破碎物の軽元素 XRF 分析結果

BL08Uにおいて軟X線領域のXRF測定を実施し、CからSiまでの軽元素組成を比較した。同一品種について、各試料につき2回ずつ測定を行い、相対比較を行った。BL08Wでの実験と同様に含有元素の比較が可能であった。スペクトル中に検出されたAlについては、小麦破碎物そのものに由来する可能性が考えられる。一方、Cuについては、試料固定に用いた銅板プレート由来の寄与が含まれている可能性があり、解釈にあたっては基材由来の影響を考慮する必要がある。

【参考】土の元素分析結果

ここまで確認した小麦中の元素差の背景要因の一つとして、参考情報として土壌の元素状態を確認した。土壌についてもBL08W-XAFSでのXRF測定が可能であり、地点によって元素(KやCa)の量に差が見られた。ただし、今回測定した小麦はいずれも土採取地の畑で栽培したものではないため、栽培土壌と小麦中の元素の関係については本報告では言及できない。

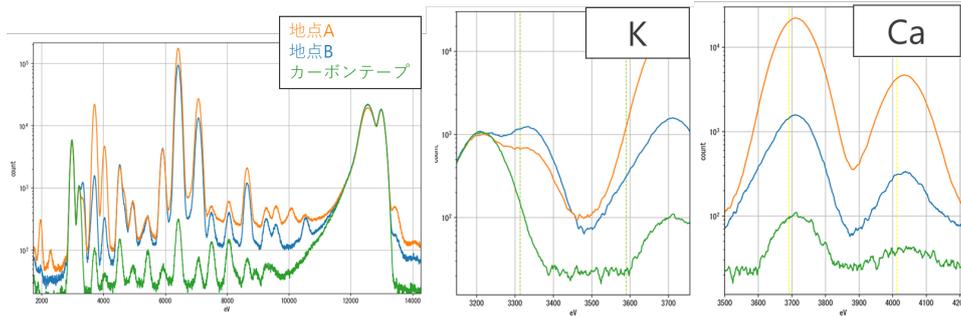
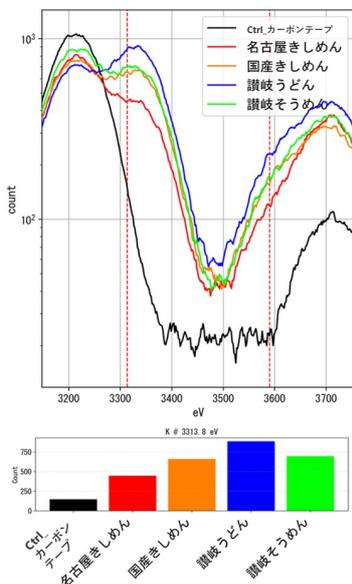


図5 土の元素分析結果



○乾麺の元素組成 (P~As まで)

使用小麦が異なる4つの乾麺商品について、小麦破碎物と同様にカーボンテープに張り付け、BL08W-XAFSにてXRF測定を行った。蛍光X線の強度は試料の厚さや形状に依存するため絶対量の測定は難しいが、元素の多寡は比較的容易に比較することが可能であった。結果として、同じきしめんでも、Kが少ない「きぬあかり」を使って製造された「名古屋きしめん」は、Kの含量が少なかった。

Ca、Fe、Mn、Znについては製品間で差は見られなかった。そうめんではミネラル分が少ない傾向が見られたが、形状(細い麺にX線を照射している)の影響の可能性はある。

図6 Kの蛍光X線のシグナル強度

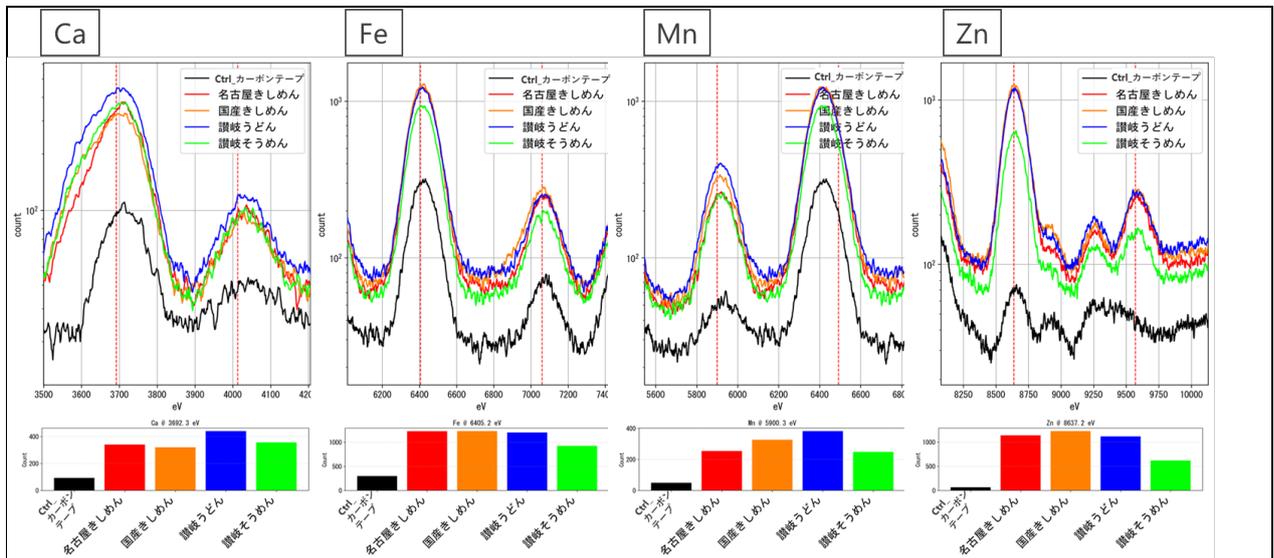


図7 Ca,Fe,Mn,Zn の蛍光 X 線のシグナル強度

○乾麺の化学種分析

BL08W-XAFSにおいて、名古屋きしめん、国産きしめん、讃岐うどん、讃岐そうめんを対象に、FeおよびMnのXAFS測定を実施した。測定の結果、FeおよびMnに製品間で顕著な差は見られなかった。以上より、乾麺中のFeおよびMnの化学状態は製品間で大きな違いがない可能性が示唆された。

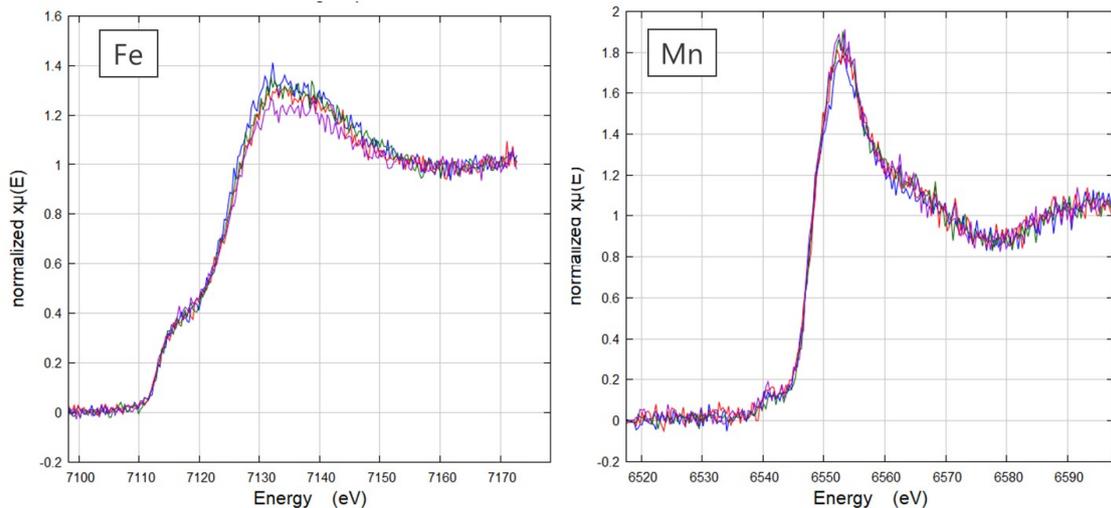


図8 Fe, Mn の XAFS 測定結果

6 今後の課題

○本事業のまとめ

本事業では、NanoTerasu (BL08W-XAFS/BL08U) を用いた XRF/XAFS 測定により、小麦破砕物および乾麺の元素組成と化学状態を評価した。品種間における小麦破砕物の元素組成の特徴として、「きぬあかり」は他の品種（きたほなみ、農林 61 号、ASW、1CW）と比較して K が顕著に少ないことが確認され、低灰分という指標と整合する結果が得られた。また、農林 61 号では Mn および Zn の含有量が多いという品種固有の特徴が示唆された。一方で、Ca や Fe の含有量については、品種間で決定的な差は認められなかった。

小麦破砕物で確認された元素特性は乾麺にも反映され、きぬあかりを使用した「名古屋きしめん」

は、他の麵製品と比較して K 含量が低いことが示された。さらに、乾麵中の Fe および Mn について XAFS 分析を行った結果、化学状態に品種間で大きな違いは見られず、加工後も安定した状態にある可能性が示唆された。

また、BL08W により P から As までの広範な元素分析が可能であること、ならびに BL08U の軟 X 線を用いることで C、N、O から Si までの軽元素組成の比較が可能であることを確認し、NanoTerasu 活用の有用性を示すことができた。

○本事業における目的への達成状況

本事業の目的は、単なる元素の定量比較にとどまらず、元素の化学状態にまで着目することで、愛知県産小麦「きぬあかり」に特徴的な元素分布や化学状態を明らかにし、小麦の明度や加工特性との相関を見出すことを目指すものであった。得られた知見として、きぬあかりでは K 含量が低いことを確認し、乾麵中の Fe および Mn の化学状態については品種間で顕著な差が認められないことを示した。相関に関する考察として、K 含量の低さは灰分低減と関連し、麵の白度の高さに寄与している可能性が示唆された。一方、乾麵中の Fe および Mn の化学状態差は小さく、これらの化学状態そのものが白度差の主因であることを支持する結果は得られなかった。また、本事業では加工特性を直接評価していないため、K 含量の低さ等の元素組成がタンパク質構造等に与える影響の可能性を含め、吸水率や粘弾性等の加工特性との関連については今後の検証が不可欠である。以上より、本事業により、きぬあかりの白度に関与する可能性のある元素指標 (K 含量) を抽出したが、明度・加工特性との関係を定量的に評価するには、明度測定値や物性値 (吸水率・粘弾性など) を同一試料で取得し、元素分析結果と比較検証する必要がある。

○展望

今後の展望として、今回は元素差 (K の低さ等) を示すことができた一方、吸水率など食味に関わる加工特性の実測値を同一ロットで取得していない。今後は同一ロットでデータを揃え、元素指標との相関を検証していく。また、今回の小麦破碎物測定では種皮が完全に除かれていない可能性があるため、より純粋な「小麦粉」としての評価には、製粉段階での採口粉を利用し、組織ごとのミネラル分布を考慮した詳細な分析を行っていききたい。

7 参考文献

Oliver, J. R., Blakeney, A. B., & Allen, H. M. (1992). Measurement of Flour Color in Color Space Parameters. *Cereal Chemistry*, 69, 546–551.

伴佳典ほか (2021) 日本麵用小麦品種「きぬあかり」の開発と高生産技術の開発・普及. 日本作物学会講演会要旨集 第 251 回.