

植物中の水分動態の可視化

利用者 鈴木隆一、駒形智幸、松浦和哉
 所属 茨城県農業総合センター

1. はじめに

茨城農業総合センターで研究を行っている作物の中では、環境因子による様々な課題を抱えているものがある。一例として、グラジオラスの穂焼け症による障害、大豆根粒菌の寄与率向上や青立ち症状の発生要因の解明などは重要な課題であるが、これらの発生メカニズムはまだ不明な点が多い。作物の内部を生きのまま時系列的に測定・解析する手法が少ないためでもある。本課題では、生きのまま非破壊で観察できる中性子ラジオグラフィを用いて、グラジオラスとダイズがどのような画像として捉えられるのかを把握し、どのような展開ができるものなのかを検討した。

2. 実験方法

JRR 3内のTNRF第二撮影室にて中性子の照射を行い、撮像には55mmレンズ、蛍光コンバータ (${}^6\text{LiF}/\text{ZnS} : \text{Ag}$) および冷却CCDカメラを用いた。

グラジオラスは品種‘マスカーニ’を園芸研究所ビニルハウスで栽培し、花穂が完全に出穂した直後のステージで採花したものを供試した。撮影直前に花穂を切り取り、水分供給を絶った直後と撮影室内に1時間放置した後に中性子照射を行い、双方の水分量を比較した。

ダイズは品種‘タチナガハ’を農業研究所内でワグネルポットに植えて栽培したものを供試した。株をポットから抜き取って根を水洗した後、根部と地上部を中性子照射して画像の状況を検討した。

3 実験結果

<グラジオラス>

撮影室内の環境（室温30℃前後，湿度30%前後）条件下でスタート時（0h）と1時間の画像を示す（図1）。乾燥による水分減少がどの程度検出できるかがポイントであったが、部位によって水分の増減が異なることが判った。

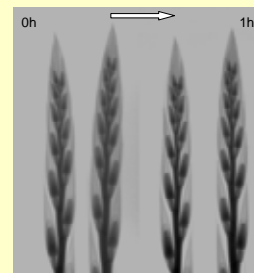


図1 グラジオラス花穂の中性子ラジオグラフィ
 左：スタート時、右：1時間後

図2の画像のように選択範囲をとり、垂直方向の相対強度の平均値（数値が大きいほど水分が多い）をグラフにすると、小花の苞葉先端の部位は減少していたが、茎や蕾の中心部は増加していた。苞葉は組織が薄いため、比較的早く乾燥が起こって水分が減少したものと考えられた。増加した部位に苞葉先端蕾茎に関しては、組織の厚みや苞葉に覆われていたこと、1h時間の経過とともに全体0h的に花穂が収縮したこと等が水分増加の要因と考えられるが、詳細についてはさらに検討が必要である。

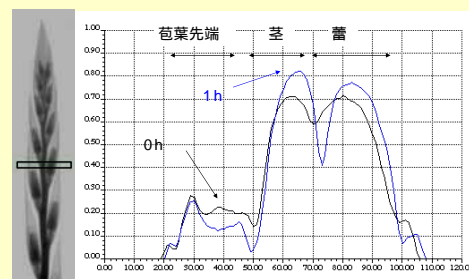


図2 グラジオラス花穂横断部位の水分分布
 グラフは左の花穂写真中の長方形部分の水分分布を表す。
 横軸は花穂の部位（左の花穂写真に対応）縦軸は水分量。

<ダイズ>

土壌中の根の分布を調べるため、鉢植えのダイズを用意したが、中性子が十分に透過せず、全く土壌中の様子を見ることはできなかった。土壌中の観察を行うためにはアルミ製の薄い根箱のようなものを用意すべきであろう。

試行的にダイズの地上部、および土壌から取り出した根（根粒菌付き）を測定した（図3）。地上部は部位による水分差を撮影することが可能であった。根部は細根まで詳細に撮影できるが、根粒菌の大きいものは黒く写るため根粒内の水分分布の撮影は困難と考えられた。

まとめ

ダイズに関しては、どのような画像が得られるかが判った。今後、我々のニーズとのマッチングが得られれば利用したいと思う。グラジオラスに関しては、中性子ラジオグラフィによって花穂中の水分量の変化をとらえられることが明らかになった。下期においては、撮影室内に投光器を設置し、高温高光度条件下で経時的に撮像を行い、より詳細な部位別の水分増減を調べる予定である。

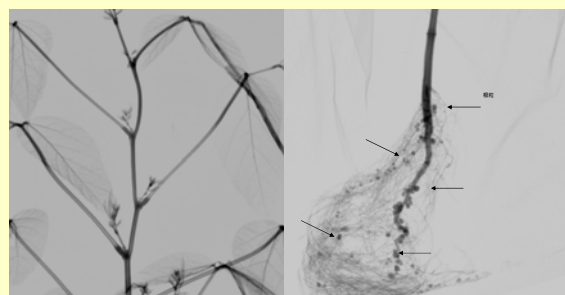


図3 ダイズの中性子ラジオグラフィ
 （左：地上部、右：根）

植物中の水分動態の可視化

利用者 鈴木隆一、駒形智幸、松浦和哉
 所属 茨城県農業総合センター

1. はじめに

茨城県農業総合センターで研究を行っている、グラジオラス穂焼け症の発生要因の解明は重要な課題である。発生メカニズムはまだ不明な点が多いが、それは作物の内部を生きたまま時系列的に測定・解析する手法が少ないことが一因となっている。上期の実験で、中性子ラジオグラフィーによってグラジオラス花穂中の水分量の変化をとらえられることが明らかになったことから、下期においては穂やけ発生器官である苞葉の部位別水分の経時変化を測定する。

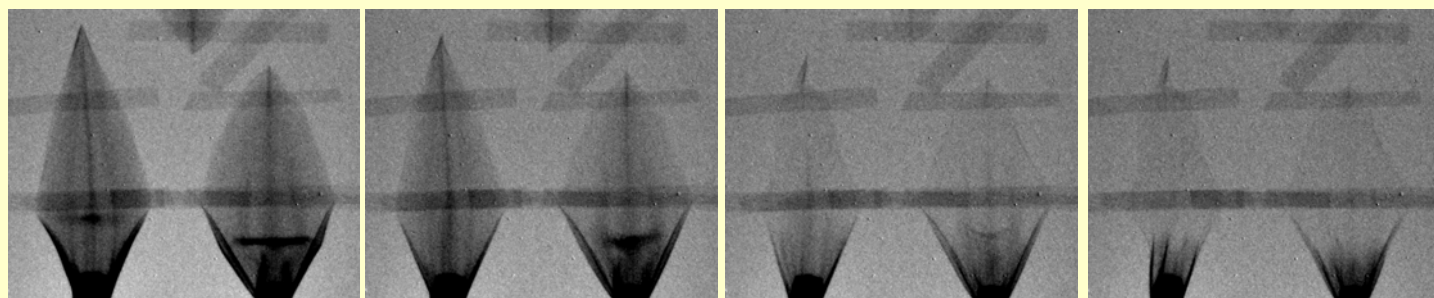
2. 実験方法

JRR 3内のTNRF第二撮影室にて中性子の照射を行い、撮像には55mmレンズ、蛍光コンバータ(6LiF/ZnS:Ag)および冷却CCDカメラを用いた。品種‘チノン’及び‘ホワイトフレンドシップ’を農業総合センター内ビニルハウスで栽培し、花穂が完全に出穂した直後のステージで採花したものを供試した。‘チノン’は穂やけに強く、‘ホワイトフレンドシップ’は穂やけに弱い品種である。撮影直前に小花柄を付けて苞葉を切り取り、水分供給を絶った状態で投光器をあてたまま撮影室内に放置して経時的に中性子照射を行った。

3. 実験結果

図1に小花苞葉の経時変化を示した。処理開始時に比べて経時的に苞葉画像の色が薄くなり、水分が減少している状況が画像から確認され、同時に体内水分の減少により形状の変化がみられた。

図2の画像のように選択範囲を取り、小花苞葉中の水分量をグラフ化した。両品種とも中心部分から外縁部分に向かうほど水分量が減少した。処理開始30分から60分の間に急激な水分の減少がみられた。‘チノン’は‘ホワイトフレンドシップ’に比べて30分後の水分減少が少ない傾向がみられ、また、苞葉外縁部の水分量が多い傾向が認められた。



処理開始時

30分後

60分後

90分後

図1 中性子ラジオグラフィーによるグラジオラス小花苞葉の経時変化
 (各写真とも左‘チノン’、右‘ホワイトフレンドシップ’)

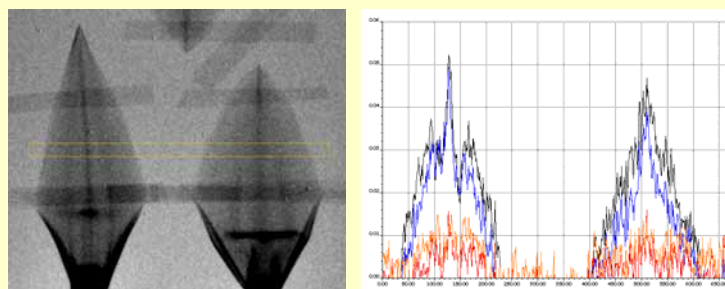


図2 グラジオラス小花苞葉の横断部位別水分分布の経時変化
 グラフは左の苞葉写真(左‘チノン’、右‘ホワイトフレンドシップ’)中の黄色長方形に囲まれた部分の水分分布を示す(横軸は黄色長方形の水平方向、縦軸は水分強度を表す。水分強度の値が大きいほど水分量が多い。)。グラフは黒:処理開始時、青:30分後、赤:60分後、オレンジ:90分後

各品種の小花苞葉の部位別水分量の経時変化を図3及び図4に示した。両品種とも水分量は処理開始10分後（目盛り値で15）付近まで上昇し，その後60分後（目盛り値で90）付近にかけて減少した。水分量は外縁部ほど少なく、特に‘ホワイトフレンドシップ’では最外縁部位（水色）で顕著に少なかった。‘チノン’では水分変化のグラフの傾きはいずれの部位もほぼ同程度であり、いずれの部位でも同じ量の水分減少がみられ、外縁部ほど早くベースラインに達した。‘ホワイトフレンドシップ’では中間部位（青色）の水分減少が緩やかな傾向だったが、おおむね‘チノン’と同様な傾向がみられた。‘ホワイトフレンドシップ’では最外縁部位のベースラインが高く表示されており、その原因については今後検討が必要である

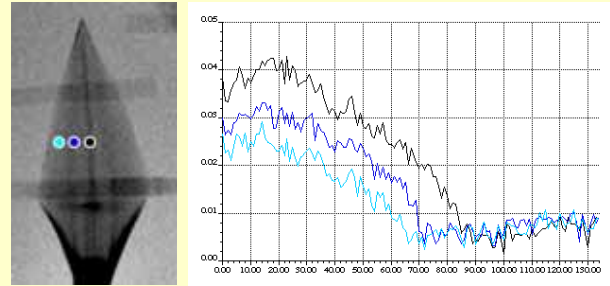


図3 ‘チノン’小花苞葉の部位別水分量の経時変化
横軸は時間（90=60分換算），縦軸は水分強度を表す。
グラフの色は左写真の同色各点の水分強度を表す。

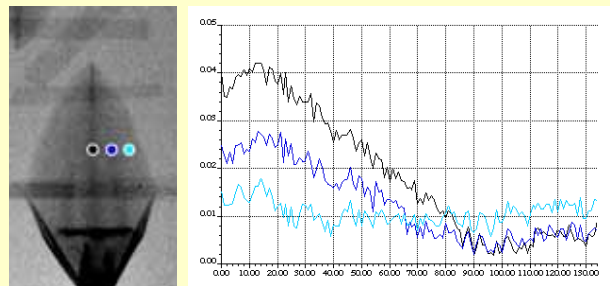


図4 ‘ホワイトフレンドシップ’小花苞葉の部位別水分量の経時変化
注釈は図3と同じ

4. まとめ

今回の実験では、グラジオラスの小花苞葉の部位別水分含量ならびに経時的水分変化の様相をとらえることができた。その結果、穂やけが小花苞葉の外縁部に生ずるのは、小花苞葉中の水分の絶対量が外縁部ほど早く減少するためと推測された。穂やけに弱い‘ホワイトフレンドシップ’では、穂やけに強い‘チノン’に較べて小花苞葉の外縁部の水分含量が特に少なく、水分不足の条件下では短時間に水分量がベースラインに達するため、穂やけが発生しやすいものと考えられた。今後は反復実験を行いデータの信頼性を高めるとともに、他の品種についても検討を加える必要がある。さらに、‘ホワイトフレンドシップ’と‘チノン’の小花苞葉外縁部位の水分差が何によって生じているのか、他の実験手法を踏まえて明らかにしていく必要がある。

植物中の水分動態の可視化

利用者 小林則夫、田中研一、坪井真樹

所属 茨城県農業総合センター

1. はじめに

茨城県農業総合センターでは、県産米の商品性向上技術の開発に取り組んでおり、なかでも白米を炊飯前に水浸した際に発生するひび割れ粒の低減や冷めても美味しい炊飯米の特性解明は重要な課題である。ひび割れ粒は、調査時の観察から正常粒と吸水過程が異なっていると考えられ、登熟期における米粒水分の変化が一つの要因と推察される。また、冷めた時に食感の異なる炊飯米は放冷による米粒内の水分変化が関与している可能性がある。しかしながら、米粒や炊飯米の水分を非破壊で経時的に測定・解析できる手法は少ないため、これらのメカニズムは不明である。

そこで、中性子ラジオグラフィを用いて、米粒や炊飯米がどのような画像として捉えられるのかを把握し、水分動態からみたメカニズムの解明に関する研究に利用可能かどうか検討する。

2. 実験方法

JRR 3内のTNRF第二撮影室にて中性子の照射を行い、稲穂と炊飯米の撮像には200mmレンズ、白米のCT撮像には100mmレンズを用い、蛍光コンバータ(6LiF/ZnS:Ag)および冷却CCDカメラによって撮影した。

(1)ひび割れ粒の発生メカニズム解明

穂の水分含量がひび割れ粒の発生に及ぼす影響

農業研究所において1/2000aのワグネルポットで栽培した「コシヒカリ」に以下の4処理を行い、登熟後期(8/30)及び成熟後(9/14)に採取直後の各区2穂を撮影した。残りの稲穂は収穫・乾燥後に玄米及び白米の品質調査を行い、画像データとの関係を解析した。

・試験区の構成

A：穂数1本/株(穂重型)、水管理 C：穂数3本/株(穂数型)、水管理

B：穂数1本/株(穂重型)、水管理 D：穂数3本/株(穂数型)、水管理

<登熟期の水管理>

水管理は土壌表面に水がなくなったら入水を繰り返す間断灌漑を行った。水管理は登熟中期から落水を開始し、水分不足による枯死を防ぐため、平均240ml/日の水を与えた。なお、各水管理とも降雨があった際には適宜排水した。

<耕種概要>

5月17日にポット当たり稚苗8個体を円形に移植した。施肥窒素は基肥に3g/m²、分けつ期及び幼穂形成期に計4g/m²を施用した。穂数は分けつを適時切除して制御した。

白米吸水過程の観察

水浸した白米を180°回転させながら撮影し、CT画像を構築した。サンプルはひび割れ粒の発生率が異なる18年産コシヒカリ(ひび割れ発生率36%、1%)を用いた。白米を蒸留水に2分間及び10分間浸漬した後、水分をふき取った米粒をアルミ管内に並べて密封し、直立させて撮影した。2枚のアルミ板の間に0~2cmの厚みに炊飯米を置き撮影

(2)食味の違いが水分低下に与える影響

タンパク質含量の異なる3種類の米を炊飯し、官能食味評価を実施するとともに、炊飯1.5、4、6.5時間後の炊飯米を中性子照射して画像の状況を検討し、食味の違いが水分低下に与える影響を解析した。



2枚のアルミ板の間に0~2cmの厚みに炊飯米を置き撮影

表1 ポット栽培した水稻の収量構成要素・品質

処理区		一穂初数 (粒)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	玄米水分 (%)	ひび割れ 粒(%)
穂数	水管理					
1本/株		130.2 ± 6.3	86.1	20.0	14.7	44
		130.7 ± 6.6	89.0	19.9	14.9	26
3本/株		73.9 ± 5.9	84.2	18.7	14.5	0
		75.9 ± 6.5	84.3	18.6	14.6	0

注) ひび割れ粒調査

玄米10gをパーレストで60秒間搗精した後、碎米及び粉状質粒を除いた100粒を水21の蒸留水に20分間浸漬した。グレインスコープTX-200で観察し、米粒の外周に口が開いたような亀裂が少しでも確認されればカウントした。

3. 実験結果

(1)ひび割れ粒の発生メカニズム解明

穂の水分含量がひび割れ粒の発生に及ぼす影響

供試サンプルの収量構成要素、ひび割れ粒発生率は穂数によって大きく変動し、水管理による差は小さかった(表1)。画像は主にデンプンによる吸収が反映されたため、着粒位置における水分の多少は目視で判別できなかった(図1)。

図1 稲穂の中性子ラジオグラフィ(8/30採穂、穂数3/株、水管理)



そこで、最上位と最下位の各3つの一次枝梗から小穂別に2~4粒を選び、相対吸収強度の粒当たり合計値を比較した(図2)。ひび割れ粒の発生が多かった穂数1本/株区では、発生率が高い水管理の方が両撮影時期とも相対吸収強度が低い傾向がみられた。特に登熟中期では一次小穂の低下が大きかった。一方、ひび割れ粒の発生がみられなかった穂数3本/株区では、水管理の違いによる差が認められなかった。株当たり穂数が同一で穂内の着生位置が同じ米粒は、炭水化物の蓄積程度もほぼ同じと考えられるので、相対吸収強度の違いは水分含量の違いを反映していると考えられた。従って、ひび割れ粒の発生が多かった穂数1本/株区的一次小穂では、登熟中期における米粒の水分含量が低下していると推察された。

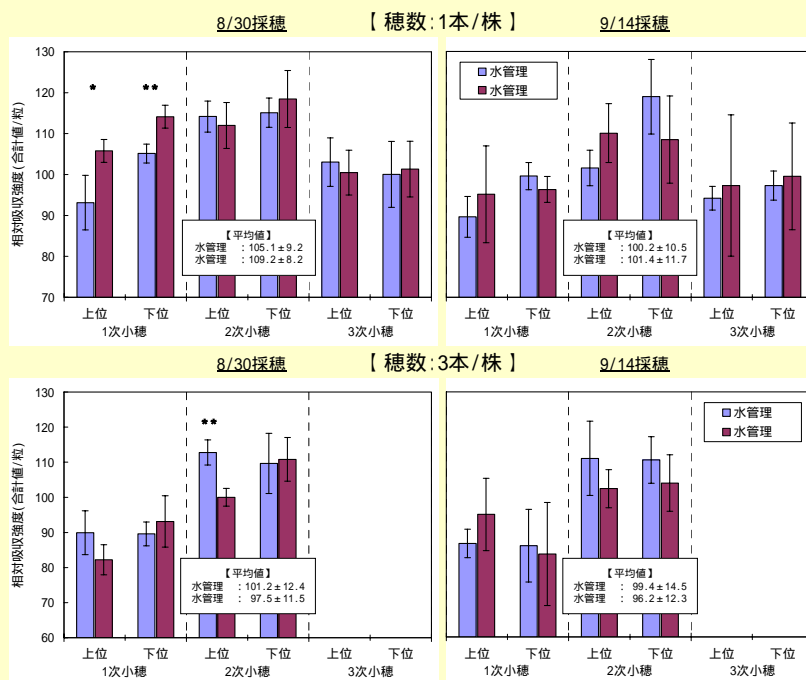
なお、株当たり穂数の違いは、ひび割れ粒の発生にも大きく影響したが、両者では米粒の発達ステージ、玄米粒重が異なるため、相対吸収強度からは比較できないと考えられた。

白米吸水過程の観察

まず、ひび割れ粒が多く発生する白米のCTを撮像したが、米粒内部の濃淡の違いは確認できなかったため(データ省略)、水浸時間を変えた白米のCTを撮像した(図3)。ひび割れ粒が多い米粒は少ない米粒に比べ内部の濃淡にばらつきが認められたため、ひび割れ粒の発生が異なる各5粒ずつの米粒断面の相対吸収強度を粒幅及び粒厚方向に取り出して比較した。

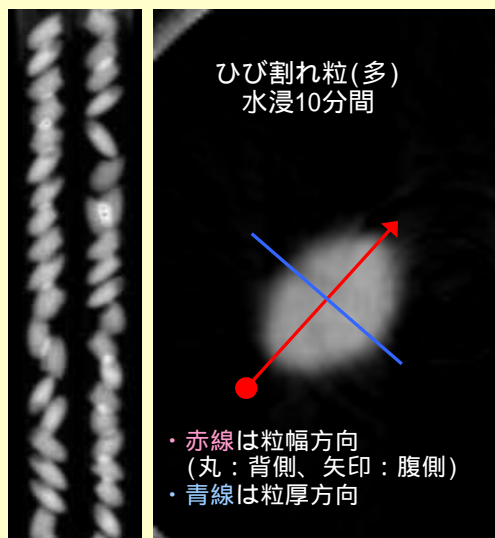
幅及び粒厚方向とも、吸水が進むと内部の相対吸収強度が低下し、その変動も大きくなった(図4、粒厚データ省略)。一方、ひび割れ粒の発生が少ない米粒では、水浸2分間及び10分間の相対吸収強度の変化はほとんど認められなかった。

このことから、ひび割れを起こす米粒は吸水過程で内部に割れを生じ、その部分が相対強度の低下とばらつきとなって表れている可能性が示唆された。



注) 図中の **, * はそれぞれ危険率1%, 5%の有意差があることを示す。

図2 着生位置別の相対吸収強度



(左の回転画像から右のCT断面を構築した。)

図3 白米の中性子ラジオグラフィ

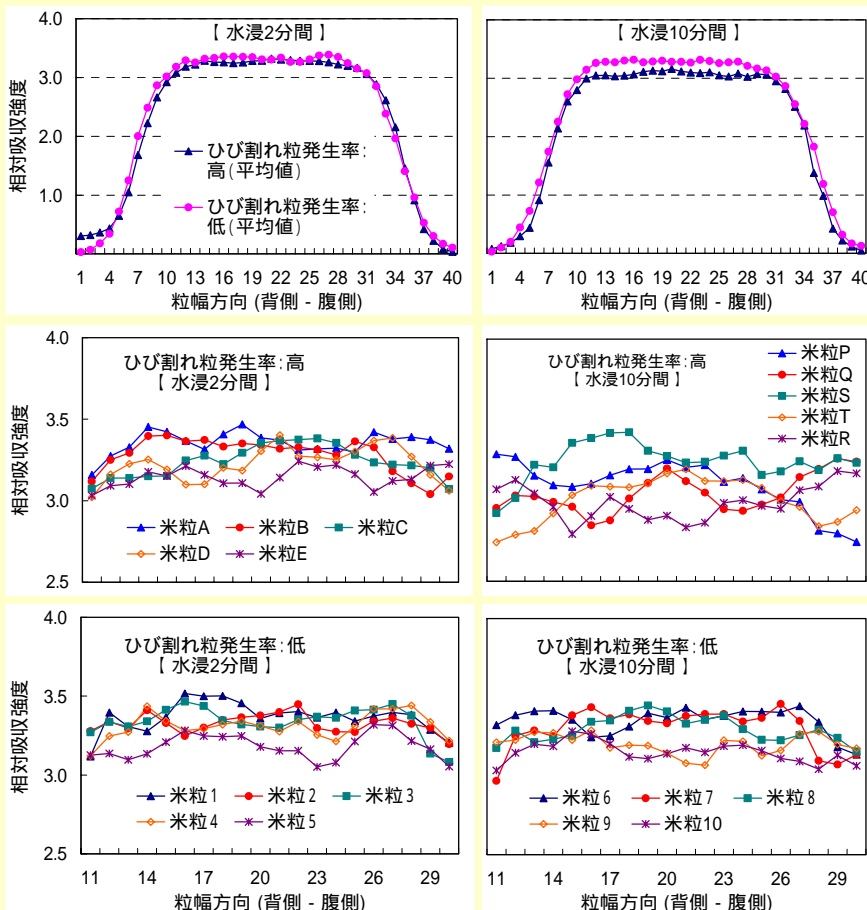


図4 水浸による白米内部の相対吸収強度の変化(粒幅方向)

(2)食味の違いが水分低下に与える影響

供試試料の属性と官能食味評価の結果を示す(表2)。タンパク質含量の増加に従って、食味は硬いという評価になり、総合評価は低下した。炊飯1.5、4、6.5時間後の撮影画像を示す(図5)。撮影時以外は約20℃の撮影室外に静置した。乾燥による水分減少がどのように撮影されるかがポイントであったが、画像だけでは水分低下の違いが明確に判別できなかったため、白色強度を数値化し指数表示で示す(図6)。また、重量の変化を指数表示で示す(図7)。時間経過に従って、白色強度は弱くなり水分低下を反映していたが、食味の違いによる差は確認できなかった。一方、同じように水分低下を反映していると考えられる重量の変化は、生産年度が古くタンパク質含量が高いと水分低下が多かった。食味評価と白色強度および重量変化の関係が異なる結果となったのは、中性子ラジオグラフィで捉えた画像が、炊飯米の水分だけでなく米に多量に含まれているデンプンの水素元素等も反映していたためと考えられた。

食味 概評	生産 年度	タンパク質含量 (白米乾物%)	外観		香り		うま味		粘り		硬さ		総合評価	
			悪	良	悪	良	悪	良	弱	強	硬	柔	悪	良
中	H18	6.5	-0.4	0.2	0.2	-1 **	-1 **	-0.2						
高	H19	5.1	0	0	0	0	0	0						
低	H19	8.1	-0.4	0.2	-0.8	-0.8	-1.4 *	-0.6 *						

注) パネラーは5名。供試試料の属性を知らせずに、サンプル「高」を基準として-5~5の範囲で評価。
はt検定による有意差を表す。: 5%有意、**: 1%有意

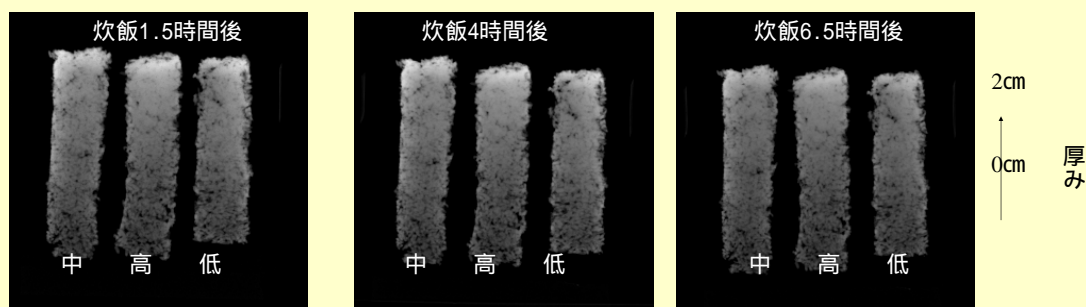


図5 炊飯米の中性子ラジオグラフィ

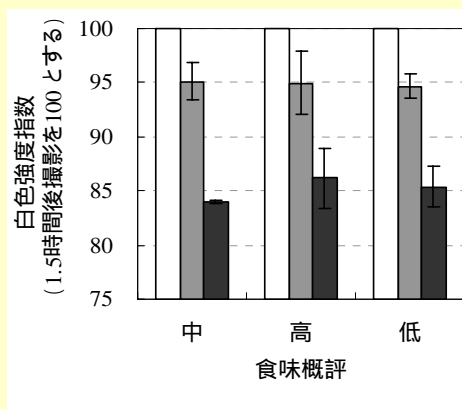


図6 食味概評と白色強度の変化

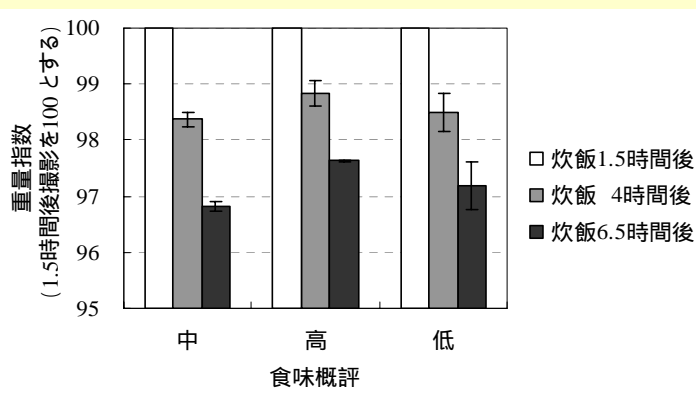


図7 食味概評と重量の変化

4. まとめ

(1)ひび割れ粒の発生メカニズムについて

登熟期における一次小穂の水分含量低下がひび割れ粒の発生に関連している可能性が示唆された。今後、詳細な穂内の水分変化を捉えられるかどうか検討する必要がある。なお、登熟中の米粒はデンプンの蓄積と水分含量の変化が同時に起こっているため、この解析手法は一穂初数や開花時期、枝梗の着生といった穂内の登熟条件が同様なサンプルに限定されることもわかった。

水浸した白米のCT画像から、ひび割れを起こしやすい米粒は吸水の過程で内部に割れを生じている可能性が示唆された。CT解析によって吸水過程を解明する一つの手掛かりを得たが、米粒内部の割れや水の進入経路などの詳細な可視化は、他の手法を検討する必要があると考えられた。

(2)食味の違いが水分低下に与える影響

水分以外に多量の水素元素を含む生体試料の場合、中性子ラジオグラフィ装置を用いた画像化では、水分の変化を明確に判別することが難しいということが分かった。中性子ラジオグラフィ装置自体は、肉眼で把握不可能な水分分布の新しい把握手法として非常に関心を引かれるものだが、植物体や食品への応用時には、装置の性質上不可避な制限(撮影範囲、画像化可能な対象など)が存在することを考慮に入れる必要があると思われた。