

スキャナ式胚乳測色システムによる胚乳のくすみと鉄含量との関係性の検証

石川 吾郎^{*1)}・前島 秀和^{*2)}・中村 和弘^{*1)}・鈴木 雅博^{*1)}
伊藤 裕之^{*1)}・平 将人^{*1)}・谷口 義則^{*1)}・中村 俊樹^{*1)}

抄 録：国内産小麦の小麦粉は概して暗いくすんだ色相をしており、この原因究明が求められている。最近、製粉による二次的な影響を受けずに種子内部（胚乳部）の色相を効率的に評価できる「スキャナ式胚乳測色システム」が開発された。そこで、小麦粉での報告があるくすみとタンパク質含量および鉄含量との関係を胚乳色において調査した。その結果、胚乳の明るさ（L*）値は、タンパク質含量および鉄含量が低いほど高くなる傾向がみられた。しかし、同等なタンパク質含量を示す材料でみた場合には、胚乳L*と鉄含量に相関は認められなかった。このことから、鉄は胚乳のくすみを引き起こす主要因ではないと考えられた。つまり、これまでに報告されている小麦粉のくすみと鉄含量との関係は、ふすまの切れ込み、あるいは鉄含量とタンパク質含量との正相関によって間接的にみられたものである可能性が示唆された。

キーワード：小麦粉、胚乳、明度、L*、鉄含量、タンパク質含量

Determining Whether a Relationship Exists between Iron Content and Darkness of Wheat Endosperm Using a New Colorimetry System : Goro ISHIKAWA^{*1)}, Hidekazu MAEJIMA^{*2)}, Kazuhiro NAKAMURA^{*1)}, Masahiro SUZUKI^{*1)}, Hiroyuki ITO^{*1)}, Masato TAIRA^{*1)}, Yoshinori TANIGUCHI^{*1)}, and Toshiki NAKAMURA^{*1)}

Abstract : Domestic wheat flour is generally darker than imported flours, and wheat researchers would like to elucidate the cause of darkness in wheat. A high-throughput endosperm colorimetry system has been established to evaluate flour color without an effect of milling fraction. Using the system, we investigated whether the endosperm brightness (L* value) was associated with the protein and iron contents. We found that as the endosperm L* value rose, the protein and iron contents declined. However, among samples with similar protein contents, there was no correlation between endosperm L* value and iron content. Therefore, we conclude that iron content is not a main cause of endosperm darkness. It is possible that the reported relationship between flour darkness and its iron content is caused by bran included in the flour and/or by a positive correlation of protein and iron content.

Key Words : wheat flour, endosperm, brightness, L*, iron content, protein content

I 緒 言

国内産小麦の小麦粉は概して暗いくすんだ色相をしており、これまで実需者の間での評価は決して高くなかった。そのため、我が国の小麦育種事業では、小麦粉の色相（粉色）を改善することに多くの努力が払われ、最近、日本めん用の輸入小麦銘柄ASW（Australian Standard White）に匹敵する色相をも

つコムギ品種「きたほなみ」が北海道立北見農業試験場において開発された（柳沢ら 2007）。これを受けて、全国的小麦育種機関では「きたほなみ」がもつ良粉色形質を各地の適応品種に導入する試みが始まっている。

このような育種的成功にも関わらず、粉色を低下させる要因、特にくすみの原因物質については未だ明確な結論は得られていない。その理由として、粉

* 1) 東北農業研究センター (National Agriculture Research Center For Tohoku Region, Morioka, Iwate 020-0198, JAPAN)

* 2) 現・長野県農業試験場 (Nagano Agricultural Experiment Station, Suzaka, Nagano 382-0051, JAPAN)

平成21年7月22日受付、平成21年12月17日受理

色は播種時期や収穫期の気象など環境による影響を受けやすいこと(松崎・豊田 1997、佐藤ら 2003a、2003b、内村ら 2004)、製粉工程が必要であるためふすまの切れ込みなど二次的要因の影響が不可避であること(Shuey 1975、Olivarら 1992)などからくすみを実験的に制御することが難しい点が挙げられる。しかしながら、粉色の劣化を引き起こす要因を解明することは、その回避技術の開発に繋がるばかりでなく、色相という間接的な方法ではなく原因物質を指標とした高精度な遺伝解析を可能にする。ごく最近、粉色を指標とした遺伝解析により多数の量的形質遺伝子座(QTLs)が検出された(Zhangら 2009a、Zhangら 2009b)。くすみの原因物質を特定しこれを指標とすることによって、これら多数のQTLsから育種選抜の対象とするべき遺伝子座を絞り込める可能性がある。

これまでに、粉色の品種間差異あるいは各種形質との関連性について多くの研究が行われてきた(Petersonら 1986、小綿ら 1996、木谷ら 2002、伊藤ら 2002、堀田・本多 2005、辻ら 2006)。その中で最も多く報告されているものとして、小麦粉のくすみとタンパク質含量との関係がある(Petersonら 1986、小綿ら 1996、辻ら 2006)。つまり、小麦粉のタンパク質含量が高いものほど測色色差計のL*で表される明るさが劣るという傾向が認められる。また、Petersonら(1986)および木谷ら(2002)は、粉色とミネラル含量との関係を調査し、鉄の含有量とL*との間には負の相関がみられることから、粉色には鉄が関連していると報告している。これらの事実から、粉色の劣化はある種のタンパク質に結合した鉄が原因ではないかと考えられている。

しかしながら、小麦粉を用いた色相評価には大きな問題が存在する。つまり、小麦粉では微生物の繁殖や夾雑物、製粉時のふすまの切れ込みの影響を回避出来ないため、種子本来の色相、つまり胚乳部の色相(胚乳色)を正確に評価出来ないことである。そのため、Barnes(1986)は、種子を切開し、胚乳部のみを取り出して粉碎した粉の色を測定し、胚乳色にも品種間差異が存在することを初めて示した。胚乳色による評価は、製粉による二次的影響を避けられるという点で優れていたが、測定に大きな労力を要するためこれまで育種選抜で利用されることはなかった。

近年、胚乳色測定に掛かる労力を減らす目的で、種子切断面の胚乳部を直接測定する手法が開発された。すなわち、輪切りにして皮を剥いた種子を微小面測色計で測定する方法(小綿ら 1999)や多検体の種子断面の二次元画像を解析する方法(二次元測色法)(Horiganeら 2003)である。これらによって、先に述べた製粉による二次的要因を避けられるという利点に少量の種子で胚乳色を評価できるという利点加わり、特に育種の初期世代での選抜に有効な手段となり得る可能性が示唆された。その後、前島ら(2007)は二次元測色法および解析ソフトウェアを改良することによって効率的な多検体測定法である「スキャナ式胚乳測色システム」を確立した。この方法による胚乳色の測定値は、粉色と一定の相関がみられることから、その簡易評価法として育種選抜に利用され始めている。この改良によって初めて胚乳色と他の形質との関係について大規模に調査する事ができるようになったことから、本研究では、これまで粉色で見出されていくすみとタンパク質含量あるいは鉄含量との関係が、製粉による二次的影響を受けない胚乳色においても認められるかどうかについて検証したので報告する。

本研究の遂行にあたり、当所業務科職員および契約職員には供試材料の栽培管理および調整に関して協力を頂いた。特に、契約職員の中山貴司氏には大変な労力を要する小麦胚乳の調整にご尽力頂いた。これらの方々に感謝の意を表す。また、本研究は農研機構交付金プロジェクト研究「新たな需要動向に対応するための製パン性や色相に優れた小麦系統および赤かび病抵抗性系統の開発(新需要麦)」の助成のもとで行われた。本プロジェクトの関係者の方々には、推進会議などを通じてご指導・ご鞭撻を賜った。この場を借りて深く感謝申し上げたい。

II 材料および方法

供試材料

東北農業研究センターでの生産力検定試験およびその予備試験で得られた2007年産の202点および2008年産の201点のコムギ種子を供試した。これらのサンプルには同じ品種系統による複数試験区由来のものが含まれているため、品種系統数でみると2007年産は57、2008年産は92品種・系統からなっていた。小麦の粒は、その粉の粒度分布によって硬質、軟質および中間質に明瞭に分けられる。供試サンプ

ルを粒の硬軟別にみると、硬質は224点（64品種・系統）、中間質は23点（8品種・系統）、軟質は156点（51品種・系統）であった。栽培方法は、両年とも条播区では畦幅70cmの播幅15cm、ドリル播区では区幅156cmの条間20cmの6条ドリル播（区間56cm）であり、苦土石灰を80kg/10a、基肥を10a当りN：P₂O₅：K₂Oが4：13.5：10kg施した。なお、土壌は黒ボク土であった。病害虫防除は東北農業研究センターの慣行法に従った。サンプルは収穫後、本研究に用いるまで4℃に設定した低温庫で保管した。

タンパク質含量および鉄含量の測定

原粒タンパク質含量は、近赤外分析機（FOSS、Infratec 1255、検量線HS270310）を用いて1反復あたり5回測定し、水分含量13.5%に換算した値を用いた。胚乳部は、各サンプルから任意に選んだ50粒を供試し、セラミック刃を用いて皮部および糊粉層を剥いた後、粒溝に沿って縦に割り、最後に溝に残っていた皮部および糊粉層を取り除いて調整した。このとき、胚乳部は原粒重量のおよそ半分になっていた。胚乳部のタンパク質含量は、窒素分析装置（Perkin Elmer、Series II Nitrogen Analyzer、窒素タンパク換算係数5.7）を用いた燃焼法によって測定し、水分含量13.5%に換算した。鉄含量は、500mgの胚乳部から硝酸による湿式分解法によって抽出した鉄を、ICP-MS（エスアイアイ・ナノテクノロジー製、SPQ-9500）を用いて定量した。すべての測定は2反復行い、平均値をサンプルの値とした。

胚乳色の測定

胚乳の色相は、「スキャナ式胚乳測色システム」（前島ら 2007）により測定した。すなわち、各サンプル20粒を専用フォルダーに接着した後、鏡面切断装置（千穂田精衡、CGC-350）を用いて種子の中央部付近から切断した。切断面の画像を専用スキャナ（千穂田精衡、CSS-60F）によって取り込み200bpiのビットマップ画像として保存した。ろ紙（ADVANTEC、Filter paper No.2）1枚を敷いたシャーレ（栄研器材、2号角シャーレ）に蒸留水15mlを加えて、シャーレ当り15フォルダーを切断面が下になるように置き、20℃のインキュベーター内に静置して吸水させた。吸水開始後4時間目（以

降、4時間処理）および6時間処理時に切断面の余分な水分をろ紙（ADVANTEC、Filter paper No.2）で取り除いた後、前述と同じ方法で断面の画像を取り込んだ。保存した画像は、解析ソフトウェア「ピクセル解析9.0」（千穂田精衡）を用いて明るさ（L*）値によって胚乳部のみを抽出し、抽出された領域のピクセルデータを単純平均して各サンプルのL*、赤み（a*）および黄色み（b*）値とした。測定は2反復行い、平均値をそのサンプルの値とした。また、「盛系D-B006」および「厨系B-B143」の1反復目の6時間処理の画像について、「ピクセル解析9.0」の機能を使って1粒当りおよそ900ピクセル分のL*値（ピクセルデータ）を取得した。ピクセルデータは、「MS Excel 2007」（マイクロソフト）を用いて加工した。すなわち、種子断面のL*値による色分け、ヒストグラム作成、L*が65以上の全ピクセル数に対する各値のピクセル数の割合（ピクセル頻度）、2系統のピクセル頻度の差を算出した。

硝子率の測定

硝子率は、サンプルあたり40粒（20粒×2反復）を供試して測定した。胚乳色を測定するために切断した種子の断面を観察して、粉状質の割合が断面全体の70%以上のものを粉状粒、30~70%のものを中間粒、30%未満のものを硝子粒として分類を行い、各区分の粒数から次の計算式で算出した。

$$\text{硝子率}(\%) = (\text{中間粒数} \times 0.5 + \text{硝子粒数}) / 40 \times 100$$

III 結 果

原粒タンパク質含量による系統の抽出

収穫年次および粒の硬軟別の原粒タンパク質含量の分布を図1に示す。2008年産は2007年産に比べてタンパク質含量が高く、また変異幅がやや小さい傾向がみられた。また、粒の硬軟別の最頻値は硬質が13.4%、中間質が12.4%、軟質が12.4%であった。タンパク質含量が同等のサンプルをできるだけ多く供試して胚乳色と鉄含量との関係を調査するため、原粒タンパク質含量の最頻値付近から硬質および軟質それぞれについて60サンプルを選んだ（表1、タンパク区分「中」）。さらに、タンパク質含量の影響をみるため、原粒タンパク質含量の最大値および最小値付近からも硬質と軟質それぞれ15サンプルずつ選んだ（表1、タンパク区分「高」および「低」）。最終的に、タンパク区分「中」から120、「低」および

「高」の区分からそれぞれ30サンプル、合計180サンプルを選び出して胚乳色を測定した。

吸水による種子断面L*の変化および閾値の設定

胚乳色測定時の種子断面画像および画像内に示した走査線上でのL*の変化を図2に示した。軟質品種である「ネバリゴシ」は吸水とともにL*値は減少したが、吸水4時間処理から6時間処理にかけて

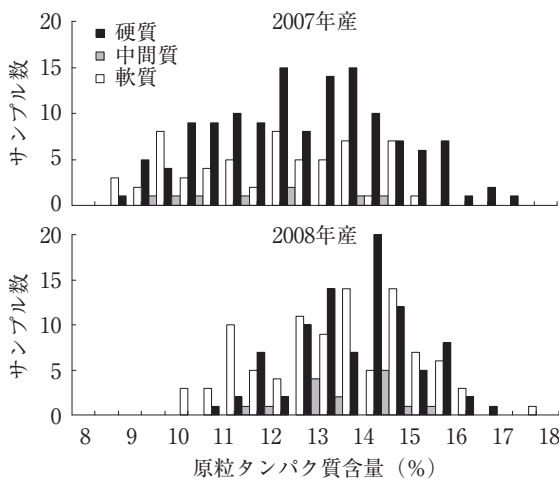


図1 収穫年次および粒の硬軟別の原粒タンパク質含量の分布
値は近赤外分析機による測定で水分含量13.5%換算値。

値はほぼ一定であった。一方、硬質品種である「ゆきちから」では、吸水とともにL*値は急激に増加し、4時間処理に比べて6時間処理が全体的にやや高い値を示した。吸水後の画像では、走査線上の粒と背景の境界付近ではL*が50から70程度まで急激に変化していることから、閾値をこの間に設定することによって胚乳部分を抽出できると考えられた。そこで、閾値を50から70まで5ずつ段階的に変化させて選択領域に種皮あるいは糊粉層が含まれるかどうかを調査したところ、閾値を65に設定した場合に最も良く胚乳部分が抽出できていた(データ未提示)。したがって、以降のデータは閾値を65に設定して得られた値を用いることとした。

胚乳色とタンパク質含量との関係

粒の硬軟、収穫年次およびタンパク区分別にみた胚乳色を図3に示す。なお、吸水4時間と6時間処理で同じ解析をしたところ結果が一致していたことから、これ以降は6時間処理のデータのみを示す。胚乳L*は、硬質、軟質ともにタンパク区分「高」、「中」、「低」の順に高くなる傾向がみられた。収穫年次別に見た場合でも、サンプル数が1の2007年「高」と2008年「低」を除けば、タンパク区分「高」、「中」、「低」の順に有意に高くなっていった。a*については、L*とは逆にタンパク区分「高」、「中」、

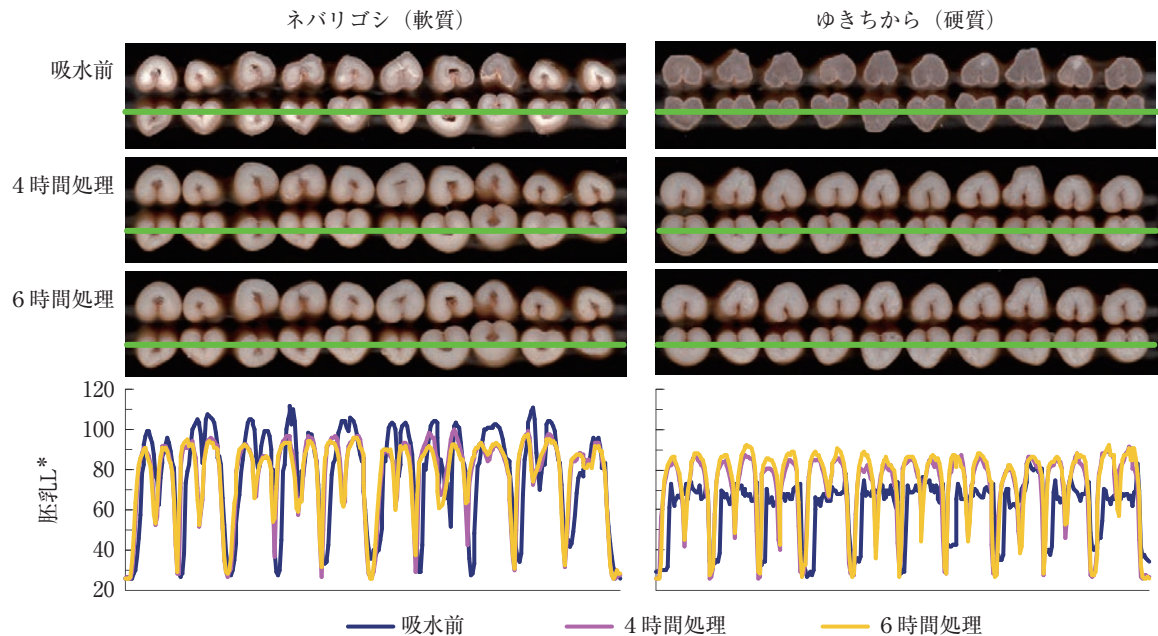


図2 胚乳色測定時の「ネバリゴシ」および「ゆきちから」の種子断面画像(上)および画像中の緑色で示した走査線上におけるL*の変化(下)

「低」の順に低くなる傾向がみられたが、この傾向は軟質に比べて硬質の方が明瞭であった。b*については、タンパク区分「高」、「中」、「低」の順に高くなる傾向が認められたが、a*と同様に軟質に比べて硬質の方が明瞭であった。サンプル数の少ない群を除いた場合、これらの傾向は収穫年次間で一致していた。

次に、タンパク質含量が同等なサンプル間にも胚乳色に有意な差異が見られるかどうかを調べるため、タンパク区分「中」のサンプルについて胚乳色

に関する分散分析を行った。その結果、収穫年次および粒の硬軟に関わらずサンプル間に有意な差異が認められた(表2)。また、タンパク区分「低」および「高」について分散分析を行った場合でも胚乳色に有意な差異が見られた(データ未提示)。

胚乳L*と硝子率

硝子率が胚乳L*に与える影響を調査するため、粒の硬軟およびタンパク区分別に両者の関係を示した(図4)。硬質のサンプルでは、全てのタンパク

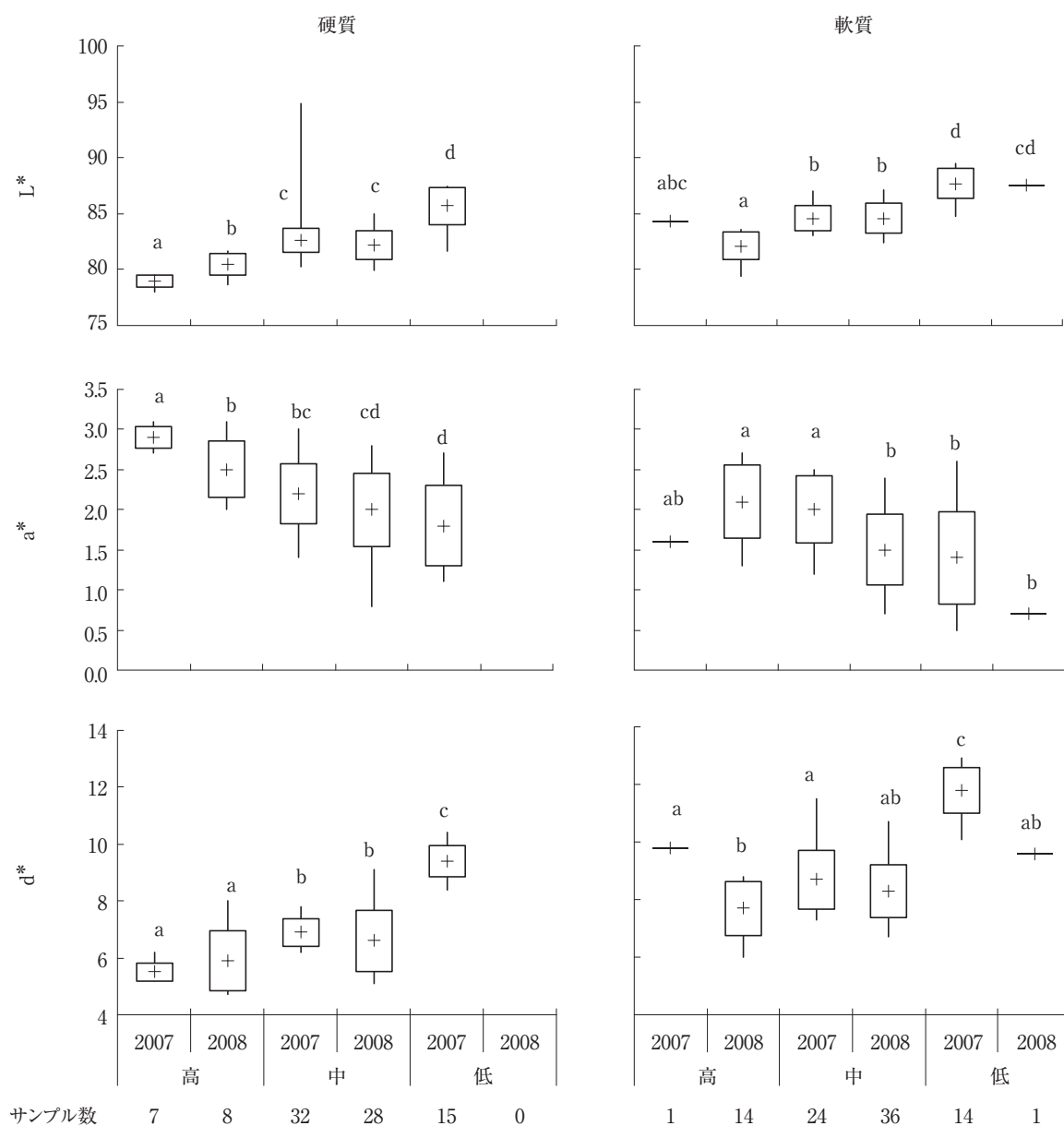


図3 粒の硬軟、タンパク質含量区分および収穫年次別の胚乳色

+は平均値、ボックスは標準偏差、棒は最大値と最小値を示す。各グラフ内で異なる記号は5%水準で群間に有意差があることを示す (Fisher's PLSD法)。

表1-1 供試サンプル一覧およびそれらの原粒タンパク質含量、胚乳色、硝子率および胚乳成分

番号	粒の 硬軟	品種 系統名	収穫 年次	試験区	原粒 タンパク質(%) ¹	タンパク質 区分	胚乳色 ²			硝子率	胚乳成分	
							L*	a*	b*		鉄(μg/g)	タンパク質(%) ¹
1	硬質	盛系D-B006	2007	556	9.0	低	86.5	2.2	10.4	41.3		
2	硬質	ゆきちから	2007	高度化25	9.2	低	86.1	1.7	9.8	45.0		
3	硬質	ゆきちから	2007	高度化4	9.4	低	86.8	1.6	9.5	46.3		
4	硬質	ゆきちから枯熟	2007	開下5	9.4	低	86.0	1.6	8.9	58.8		
5	硬質	はつもち	2007	529	9.5	低	81.6	2.6	9.6	47.5		
6	硬質	ゆきちから	2007	高度化13	9.5	低	87.5	1.3	10.0	46.3	2.3	7.8
7	硬質	ゆきちから	2007	高度化9	9.6	低	86.6	1.4	9.1	53.8		
8	硬質	アオバコムギ	2007	533	9.7	低	83.6	2.4	9.1	55.0		
9	硬質	ゆきちから対象	2007	開下4	10.0	低	85.5	1.8	8.4	57.5		
10	硬質	アオバコムギ	2007	571	10.0	低	83.5	2.7	9.2	58.8		
11	硬質	ゆきちから遮光	2007	開下2	10.1	低	87.5	1.1	9.2	53.8		
12	硬質	ゆきちから	2007	高度化16	10.2	低	86.2	1.5	8.8	55.0		
13	硬質	盛系D-B006	2007	512	10.2	低	85.4	2.2	9.7	45.0		
14	硬質	盛系d-B002	2007	548	10.2	低	86.0	1.4	10.0	53.8	3.3	8.2
15	硬質	ゆきちから	2007	高度化1	10.2	低	87.1	1.4	9.6	58.8		
16	硬質	厨系A-B199	2008	553	12.8	中	83.4	1.8	9.1	67.5		
17	硬質	アオバコムギ	2007	419	12.9	中	80.5	2.9	7.5	65.0		
18	硬質	厨系A-B796	2007	544	12.9	中	84.9	1.4	7.1	52.5		
19	硬質	東北223号	2008	520	12.9	中	81.8	2.7	6.5	73.8		
20	硬質	盛系D-B006	2007	411	13.0	中	80.9	2.8	6.5	51.3	3.1	10.2
21	硬質	厨系a-B578	2008	528	13.0	中	83.0	1.8	5.7	83.8	2.9	8.2
22	硬質	厨系B-B143	2007	29	13.1	中	83.3	1.8	6.9	52.5		
23	硬質	コユキコムギ	2007	408	13.1	中	80.8	2.8	6.6	66.3	2.2	10.6
24	硬質	コユキコムギ	2008	422	13.1	中	82.7	2.1	6.1	73.8		
25	硬質	厨系B-B143	2008	546	13.1	中	83.0	1.7	6.4	83.8		
26	硬質	厨系a-B595	2007	16	13.2	中	83.8	1.5	7.5	53.8	3.2	10.8
27	硬質	ゆきちから雨避け	2007	開条1	13.2	中	83.1	1.9	6.3	72.5	3.4	10.3
28	硬質	厨系C-B173	2008	96	13.2	中	85.0	0.8	8.9	55.0	5.3	10.8
29	硬質	厨系B-B143	2008	531	13.2	中	83.7	1.6	6.9	81.3	3.3	10.2
30	硬質	厨系a-B575	2007	3	13.3	中	83.2	2.2	7.2	53.8		
31	硬質	厨系a-B581	2007	7	13.3	中	82.9	2.2	7.0	58.8		
32	硬質	ゆきちから雨避け	2007	開条9	13.3	中	83.2	2.0	6.6	85.0		
33	硬質	東北218号	2007	443	13.3	中	81.7	2.5	6.5	56.3	2.2	10.2
34	硬質	厨系B-B989	2008	77	13.3	中	83.2	1.3	7.7	91.3		
35	硬質	盛系D-B010	2008	550	13.3	中	80.9	2.7	5.7	83.8	2.5	9.8
36	硬質	ゆきちから(本)	2007	12	13.4	中	82.7	2.1	6.8	65.0		
37	硬質	厨系a-B589	2007	13	13.4	中	82.7	2.3	7.8	50.0		
38	硬質	厨系C-B003	2008	78	13.4	中	81.3	2.4	5.7	65.0		
39	硬質	厨系B-B176	2008	212	13.4	中	79.9	2.8	6.1	58.8	3.8	9.9
40	硬質	ゆきちから(本)	2008	439	13.4	中	83.0	1.8	6.0	83.8		
41	硬質	ハルイブキ(本)	2008	518	13.4	中	84.2	1.6	7.9	58.8		
42	硬質	東北223号	2008	560	13.4	中	81.8	2.6	6.1	75.0		
43	硬質	盛系C-B3736b	2008	563	13.4	中	81.2	2.1	6.6	81.3		
44	硬質	ゆきちから(本)	2007	202	13.5	中	83.6	2.0	6.9	88.8		
45	硬質	厨系B-B115	2007	23	13.5	中	84.2	2.0	6.9	51.3		
46	硬質	厨系B-B132	2007	25	13.5	中	84.0	2.1	7.6	52.5		
47	硬質	コユキコムギ	2008	434	13.5	中	82.5	2.3	6.2	68.8		
48	硬質	盛系C-B3736a	2008	521	13.5	中	81.3	2.3	7.1	68.8		
49	硬質	厨系a-B587	2007	8	13.6	中	83.0	2.0	7.1	57.5		
50	硬質	コユキコムギ	2007	455	13.6	中	80.3	3.0	6.3	67.5		
51	硬質	盛系D-B003	2007	406	13.6	中	82.2	2.2	6.3	57.5		
52	硬質	盛系D-B003	2007	436	13.6	中	82.5	2.0	6.3	63.8		
53	硬質	盛系D-B006	2008	425	13.6	中	81.3	2.3	5.7	68.8		
54	硬質	盛系D-B010	2008	525	13.6	中	80.2	2.5	5.1	85.0		
55	硬質	ハルイブキ(本)	2008	536	13.6	中	84.2	1.7	8.2	55.0		
56	硬質	盛系C-B3736a	2008	562	13.6	中	81.4	2.1	6.8	80.0		
57	硬質	厨系A-B796	2007	506	13.7	中	83.3	1.6	6.5	57.5		
58	硬質	厨系B-B233	2007	42	13.7	中	83.2	1.9	7.6	51.3		
59	硬質	ゆきちから(本)	2007	225	13.7	中	82.6	2.1	6.5	82.5		
60	硬質	ゆきちから対象	2007	開条7	13.7	中	83.1	2.1	7.0	71.3		

¹水分13.5%換算した値。²吸水6時間処理の値。

表1-2 供試サンプル一覧およびそれらの原粒タンパク質含量、胚乳色、硝子率および胚乳成分

番号	粒の 硬軟	品種 系統名	収穫 年次	試験区	原粒 タンパク質(%) ¹	タンパク質 区分	胚乳色 ²			硝子率	胚乳成分	
							L*	a*	b*		鉄(μg/g)	タンパク質(%) ¹
61	硬質	盛系D-B008	2008	548	13.7	中	82.8	2.3	7.8	65.0		
62	硬質	ゆきちから(本)	2007	424	13.8	中	82.5	2.2	6.4	56.3		
63	硬質	ゆきちから(本)	2007	57	13.9	中	83.1	2.1	6.4	60.0		
64	硬質	厨系A-B766	2007	232	13.9	中	81.8	2.4	7.5	51.3		
65	硬質	厨系B-B176	2008	237	13.9	中	80.0	2.2	6.5	62.5		
66	硬質	厨系a-B578	2008	552	13.9	中	82.8	1.9	5.8	81.3		
67	硬質	厨系a-B590	2007	14	14.0	中	82.4	2.4	6.4	56.3		
68	硬質	厨系A-B764	2007	205	14.0	中	82.1	2.6	7.4	52.5		
69	硬質	ゆきちから(本)	2007	449	14.0	中	82.3	2.1	6.4	82.5		
70	硬質	厨系a-B594	2007	15	14.0	中	82.4	2.3	6.2	50.0		
71	硬質	ゆきちから(本)	2008	54	14.1	中	82.3	1.8	5.5	81.3		
72	硬質	厨系B-B141	2008	208	14.1	中	82.1	1.7	5.3	77.5		
73	硬質	厨系B-B141	2008	233	14.1	中	82.5	1.7	5.6	68.8		
74	硬質	盛系C-B3736b	2008	522	14.1	中	81.3	2.2	6.5	68.8		
75	硬質	厨系A-B766	2007	206	14.2	中	82.4	2.1	7.5	53.8		
76	硬質	東北223号	2007	追肥8	15.7	高	79.4	2.9	5.6	58.8		
77	硬質	厨系a-B589	2008	216	15.7	高	80.7	2.6	5.4	86.3		
78	硬質	ハルイブキ(本)	2008	423	15.7	高	80.9	2.2	6.5	71.3	5.9	11.8
79	硬質	盛系C-B3736	2007	450	15.8	高	79.3	2.7	6.2	55.0		
80	硬質	盛系D-B010	2008	448	15.8	高	78.7	2.6	4.8	92.5		
81	硬質	東北223号	2007	追肥1	15.9	高	79.4	2.8	5.5	68.8		
82	硬質	厨系B-B883	2008	66	15.9	高	79.9	2.5	5.8	56.3		
83	硬質	厨系B-B899	2008	70	15.9	高	80.1	2.5	4.7	57.5		
84	硬質	東北223号	2007	追肥3	16.4	高	78.7	3.0	5.5	62.5		
85	硬質	厨系B-B591	2008	74	16.4	高	81.5	2.1	5.8	58.8		
86	硬質	厨系C-B075	2008	84	16.4	高	81.6	2.0	6.5	56.3		
87	硬質	東北223号	2007	追肥6	16.6	高	79.3	2.8	5.4	58.8		
88	硬質	厨系B-B568	2008	25	16.7	高	80.8	3.1	8.0	53.8		
89	硬質	東北223号	2007	追肥2	16.9	高	78.0	3.0	5.3	72.5		
90	硬質	東北223号	2007	追肥5	17.3	高	78.6	3.1	5.2	60.0	4.0	13.2
91	軟質	キタカミコムギ	2007	523	8.4	低	88.5	1.1	12.5	15.0	2.7	6.8
92	軟質	キタカミコムギ	2007	546	8.4	低	88.7	1.0	12.5	7.5		
93	軟質	盛系C-B4038	2007	553	8.4	低	88.8	1.2	11.4	23.8		
94	軟質	盛系C-B4040	2007	560	8.7	低	88.6	1.2	11.4	23.8		
95	軟質	盛系C-B4040	2007	551	8.7	低	89.5	1.2	12.6	17.5	2.3	8.2
96	軟質	しゅんよう	2007	577	9.1	低	87.8	1.1	11.7	30.0		
97	軟質	盛系C-B4015	2007	524	9.2	低	87.0	1.1	12.9	15.0		
98	軟質	ネバリゴシ(本)	2007	572	9.2	低	85.4	2.6	11.8	45.0		
99	軟質	キタカミコムギ	2007	区外	9.2	低	88.6	1.1	12.0	31.3		
100	軟質	ネバリゴシ(本)	2007	504	9.3	低	84.8	2.5	11.7	45.0		
101	軟質	東北222号	2007	561	9.3	低	86.5	1.7	10.1	46.3		
102	軟質	しゅんよう	2007	576	9.3	低	87.9	1.4	12.2	26.3		
103	軟質	盛系C-B4038	2007	503	9.4	低	88.4	0.5	10.7	40.0		
104	軟質	盛系D-B004	2007	501	9.8	低	87.4	1.8	11.2	13.8		
105	軟質	盛系C-B3552	2008	545	9.8	低	87.6	0.7	9.6	38.8		
106	軟質	盛系C-B4040	2007	402	11.8	中	87.0	1.3	9.7	41.3		
107	軟質	ネバリゴシ(本)	2007	420	11.8	中	84.3	2.2	8.7	47.5		
108	軟質	ネバリゴシ(本)	2007	56	11.9	中	84.0	2.3	9.3	50.0		
109	軟質	キタカミコムギ	2007	236	11.9	中	85.4	1.8	9.3	38.8		
110	軟質	ネバリゴシ(本)	2007	446	11.9	中	83.3	2.4	8.4	47.5		
111	軟質	キタカミコムギ	2007	456	11.9	中	84.8	2.0	9.5	42.5		
112	軟質	東北224号	2008	438	11.9	中	86.9	0.9	9.4	46.3		
113	軟質	ナンブコムギ	2008	529	11.9	中	85.5	1.7	10.7	46.3		
114	軟質	ネバリゴシ(本)	2007	207	12.0	中	84.2	1.9	8.6	43.8		
115	軟質	厨系B-B102	2007	19	12.1	中	86.4	1.3	10.6	41.3		
116	軟質	ネバリゴシ(本)	2008	213	12.2	中	82.9	2.3	7.8	48.8		
117	軟質	キタカミコムギ	2008	401	12.2	中	86.0	1.1	8.9	43.8		
118	軟質	盛系C-B3552	2008	420	12.2	中	86.3	0.7	8.4	46.3		
119	軟質	盛系C-B4015	2007	429	12.3	中	84.8	1.5	8.7	45.0		
120	軟質	キタカミコムギ	2008	229	12.3	中	86.4	1.2	9.4	40.0		

¹水分13.5%換算した値。²吸水6時間処理の値。

表1-3 供試サンプル一覧およびそれらの原粒タンパク質含量、胚乳色、硝子率および胚乳成分

番号	粒の 硬軟	品種 系統名	収穫 年次	試験区	原粒 タンパク質(%) ¹	タンパク質 区分	胚乳色 ²			硝子率	胚乳成分	
							L*	a*	b*		鉄(μg/g)	タンパク質(%) ¹
121	軟質	キタカミコムギ	2007	10	12.4	中	86.5	1.2	9.6	32.5		
122	軟質	東北220号	2007	427	12.4	中	83.0	2.3	7.3	48.8		
123	軟質	厨系b-B503	2008	17	12.4	中	84.9	1.3	8.3	50.0		
124	軟質	ネバリゴシ(本)	2008	53	12.4	中	83.3	1.8	7.8	50.0		
125	軟質	厨系b-B055	2008	220	12.4	中	84.9	1.5	9.5	46.3		
126	軟質	ネバリゴシ(本)	2008	240	12.4	中	82.7	2.4	8.4	50.0		
127	軟質	東北220号	2008	509	12.4	中	85.5	1.5	7.5	50.0		
128	軟質	ネバリゴシ(本)	2007	243	12.5	中	84.1	2.2	9.2	50.0		
129	軟質	キタカミコムギ	2008	52	12.5	中	85.1	1.3	8.0	48.8		
130	軟質	厨系b-B055	2008	223	12.5	中	84.2	1.6	9.7	50.0		
131	軟質	キタカミコムギ	2007	407	12.6	中	84.0	2.3	8.7	42.5		
132	軟質	盛系C-B3552	2008	426	12.6	中	85.5	1.0	8.0	51.3		
133	軟質	キタカミコムギ	2008	432	12.6	中	85.0	1.4	8.1	47.5		
134	軟質	盛系C-B4015	2008	433	12.6	中	87.1	0.7	9.4	45.0		
135	軟質	盛系C-B4015	2007	413	12.7	中	85.7	1.4	8.6	41.3		
136	軟質	盛系D-B005a	2007	433	12.7	中	83.7	1.8	8.2	50.0		
137	軟質	キタカミコムギ	2007	211	12.7	中	84.0	2.1	8.7	41.3		
138	軟質	キタカミコムギ	2008	201	12.7	中	85.0	1.6	9.0	48.8		
139	軟質	盛系C-B4015	2008	406	12.7	中	86.4	0.7	8.5	45.0		
140	軟質	ネバリゴシ(本)	2008	445	12.8	中	82.6	2.1	7.7	51.3		
141	軟質	盛系D-B004	2008	416	12.8	中	86.2	1.3	7.9	52.5		
142	軟質	厨系B-B175	2007	32	12.9	中	84.0	1.8	7.4	53.8	2.8	11.1
143	軟質	ネバリゴシ(本)	2008	412	12.9	中	82.9	2.1	7.7	51.3		
144	軟質	ナンブコムギ	2008	559	12.9	中	85.0	1.7	10.3	47.5		
145	軟質	ナンブコムギ	2007	9	13.1	中	86.0	1.4	11.5	41.3	2.2	11.4
146	軟質	ネバリゴシ(本)	2008	3	13.1	中	83.5	1.9	8.3	51.3	3.7	10.7
147	軟質	厨系B-B791	2008	48	13.1	中	83.0	1.8	7.5	50.0	3.1	10.4
148	軟質	盛系D-B005a	2008	402	13.1	中	84.4	1.7	7.8	47.5		
149	軟質	盛系D-B004	2008	443	13.1	中	82.4	2.4	6.7	51.3		
150	軟質	キタカミコムギ	2007	55	13.2	中	84.0	2.4	8.6	48.8	2.8	10.3
151	軟質	盛系C-B4033	2007	432	13.2	中	84.0	2.5	7.8	46.3	4.7	11.3
152	軟質	キタカミコムギ	2008	2	13.2	中	85.0	1.1	7.9	48.8		
153	軟質	厨系B-B797	2008	49	13.2	中	83.3	1.5	7.4	48.8		
154	軟質	盛系D-B005a	2008	428	13.2	中	85.1	1.2	7.5	50.0	5.0	10.4
155	軟質	盛系D-B004	2007	439	13.3	中	85.4	2.2	7.9	46.3	2.6	10.8
156	軟質	盛系C-B4033	2007	412	13.3	中	83.6	2.5	7.4	50.0		
157	軟質	厨系B-B728	2008	41	13.3	中	82.6	1.8	7.5	51.3	3.0	10.3
158	軟質	盛系D-B004	2007	416	13.4	中	84.3	2.4	7.8	50.0		
159	軟質	厨系B-B302	2007	49	13.4	中	83.5	1.8	7.7	47.5		
160	軟質	厨系b-B486	2008	14	13.4	中	84.2	1.4	8.4	48.8		
161	軟質	厨系a-B536	2008	232	13.4	中	84.3	1.5	7.7	52.5	3.5	10.5
162	軟質	厨系C-B123	2008	88	13.5	中	84.0	1.5	8.0	46.3		
163	軟質	厨系C-B133	2008	91	13.5	中	85.0	1.2	6.7	48.8		
164	軟質	厨系a-B535	2008	202	13.5	中	83.8	1.5	8.3	50.0		
165	軟質	東北224号	2008	411	13.5	中	85.4	1.2	8.4	47.5		
166	軟質	厨系B-B802	2008	50	14.8	高	83.6	1.3	6.7	50.0		
167	軟質	ナンブコムギ	2008	444	14.8	高	83.1	2.0	8.7	51.3		
168	軟質	ナンブコムギ	2007	54	14.9	高	84.3	1.6	9.8	50.0		
169	軟質	厨系b-B470	2008	12	14.9	高	80.7	2.5	7.3	51.3		
170	軟質	厨系C-B176	2008	97	15.0	高	79.4	2.7	8.4	50.0	4.7	12.1
171	軟質	東北220号	2008	435	15.2	高	83.6	1.8	6.7	50.0		
172	軟質	厨系a-B536	2008	203	15.3	高	82.6	1.9	7.2	50.0		
173	軟質	ナンブコムギ	2008	219	15.3	高	81.0	2.5	8.3	51.3	3.4	12.3
174	軟質	厨系a-B554	2008	227	15.3	高	82.1	1.9	6.7	50.0		
175	軟質	ナンブコムギ	2008	1	15.5	高	81.9	2.2	8.5	50.0		
176	軟質	ナンブコムギ	2008	51	15.5	高	81.6	2.3	8.6	50.0		
177	軟質	ナンブコムギ	2008	410	15.6	高	81.8	2.3	8.5	52.5		
178	軟質	厨系b-B511	2008	19	15.9	高	83.6	1.4	8.8	50.0		
179	軟質	厨系b-B520	2008	21	16.0	高	82.8	1.4	7.8	50.0		
180	軟質	厨系B-B546	2008	24	17.1	高	81.1	2.6	6.0	55.5		

¹水分13.5%換算した値。²吸水6時間処理の値。

区分で胚乳L*と硝子率に相関は見られなかった。一方、軟質では、タンパク区分「高」のサンプルでは相関は見られなかったが、「中」および「低」のサンプルでは認められた。これらの相関は、硝子率が30%以下と特に低い2007年のサンプルによって引き起こされたものであった。なお、硝子率のほぼ等しい領域（硬質50~60%、軟質40~50%）でみた場

合でも、胚乳L*はタンパク区分「高」、「中」、「低」の順に高くなる傾向が認められた。

胚乳色と鉄含量

タンパク区分「中」のサンプルから、原粒タンパク質含量が同等、かつ胚乳L*の差が大きくなるように20サンプルを選び出し、これらの胚乳粉のタン

表2 タンパク質含量区分「中」のサンプルにおける胚乳色の分散分析

収穫年次	粒の硬軟	変動要因	自由度	L*		a*		b*	
				分散	分散比	分散	分散比	分散	分散比
2007	硬質	サンプル	31	2.12	3.33 ***	0.28	4.41 ***	0.49	1.88 *
		反復	32	0.64		0.06		0.26	
	軟質	サンプル	23	2.37	3.38 **	0.36	6.89 ***	2.05	9.47 ***
		反復	24	0.70		0.05		0.22	
	全体	サンプル	55	4.06	6.10 ***	0.33	5.67 ***	2.85	11.79 ***
		反復	56	0.66		0.06		0.24	
2008	硬質	サンプル	27	3.31	5.04 ***	0.42	3.09 **	2.20	8.06 ***
		反復	28	0.66		0.14		0.27	
	軟質	サンプル	35	3.48	4.95 ***	0.39	5.11 ***	1.63	5.36 ***
		反復	36	0.70		0.08		0.30	
	全体	サンプル	63	6.18	9.03 ***	0.54	5.24 ***	3.35	11.52 ***
		反復	64	0.68		0.10		0.29	
全体	硬質	サンプル	59	2.71	4.20 ***	0.35	3.62 ***	1.31	4.93 ***
		反復	60	0.65		0.10		0.27	
	軟質	サンプル	59	2.99	4.25 ***	0.48	7.14 ***	1.86	6.90 ***
		反復	60	0.70		0.07		0.27	
	全体	サンプル	119	5.15	7.63 ***	0.50	6.13 ***	3.09	11.57 ***
		反復	120	0.67		0.08		0.27	

胚乳色は吸水6時間処理の値。***、**および*は、それぞれ0.1、1および5%水準で有意であることを示す。

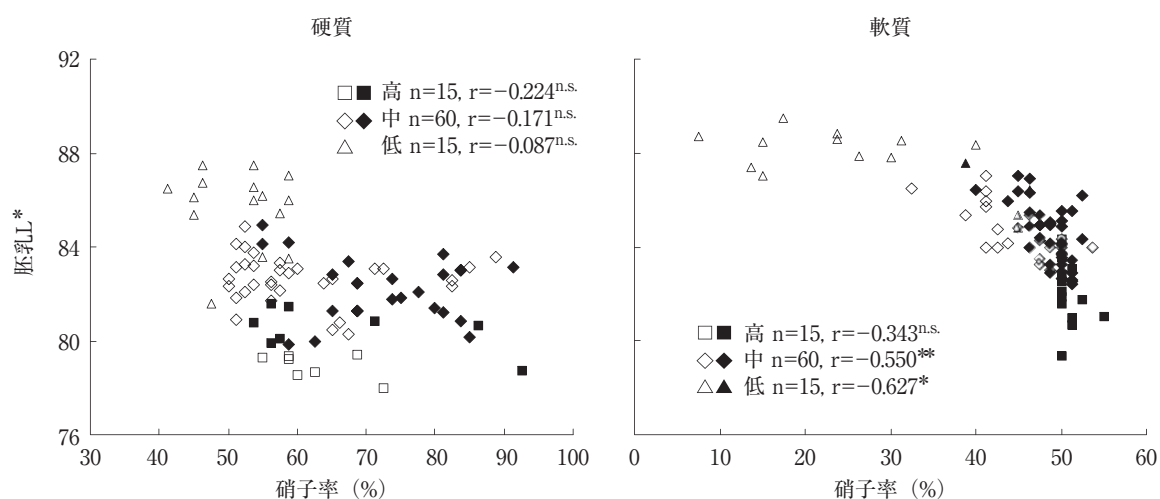


図4 粒の硬軟およびタンパク質含量区分別の硝子率と胚乳L*との関係

プロットの白塗りは2007年産、黒塗りは2008年産のサンプルであることを示す。相関関係の**および*はそれぞれ1%および5%水準で有意であることを示す。

パク質含量および鉄含量を測定した (表1)。胚乳L*と鉄含量との散布図を図5に示す。調査した20サンプルのうち、硬質の9サンプルの胚乳タンパク質含量は9.8から10.8%、軟質の10サンプルは10.3から11.4%の範囲に入っていた。なお、硬質の1サンプルについては胚乳タンパク質含量が8.2%と低かったためデータから除外した。図5に示すとおり、タンパク質含量を揃えたサンプルでは両収穫年次とも胚乳L*と鉄含量との間に相関は認められなかった。このことは、a*およびb*でも同様であった。

次に、タンパク質含量が胚乳色および鉄含量に与える影響をみるため、タンパク区分「低」および「高」からもそれぞれ4サンプルを選んで、これらの胚乳タンパク質含量および胚乳鉄含量を測定した (表1)。このとき、先にタンパク区分「中」で胚乳成分を測定した「ハルイブキ」、「ゆきちから」、「ナンブコムギ」、「キタカミコムギ」の4品種について

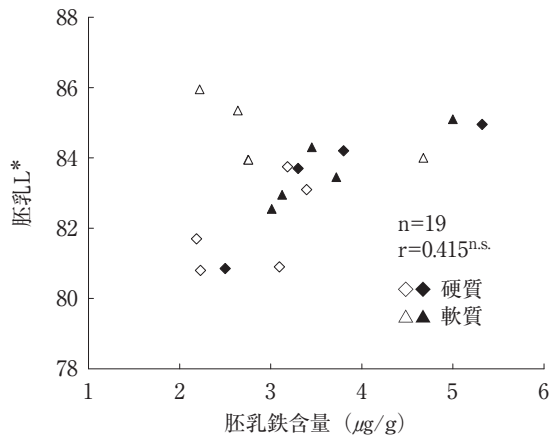


図5 胚乳タンパク質含量が類似したサンプルにおける胚乳L*と鉄含量との関係
プロットの白塗りは2007年産、黒塗りは2008年産のサンプルであることを示す。

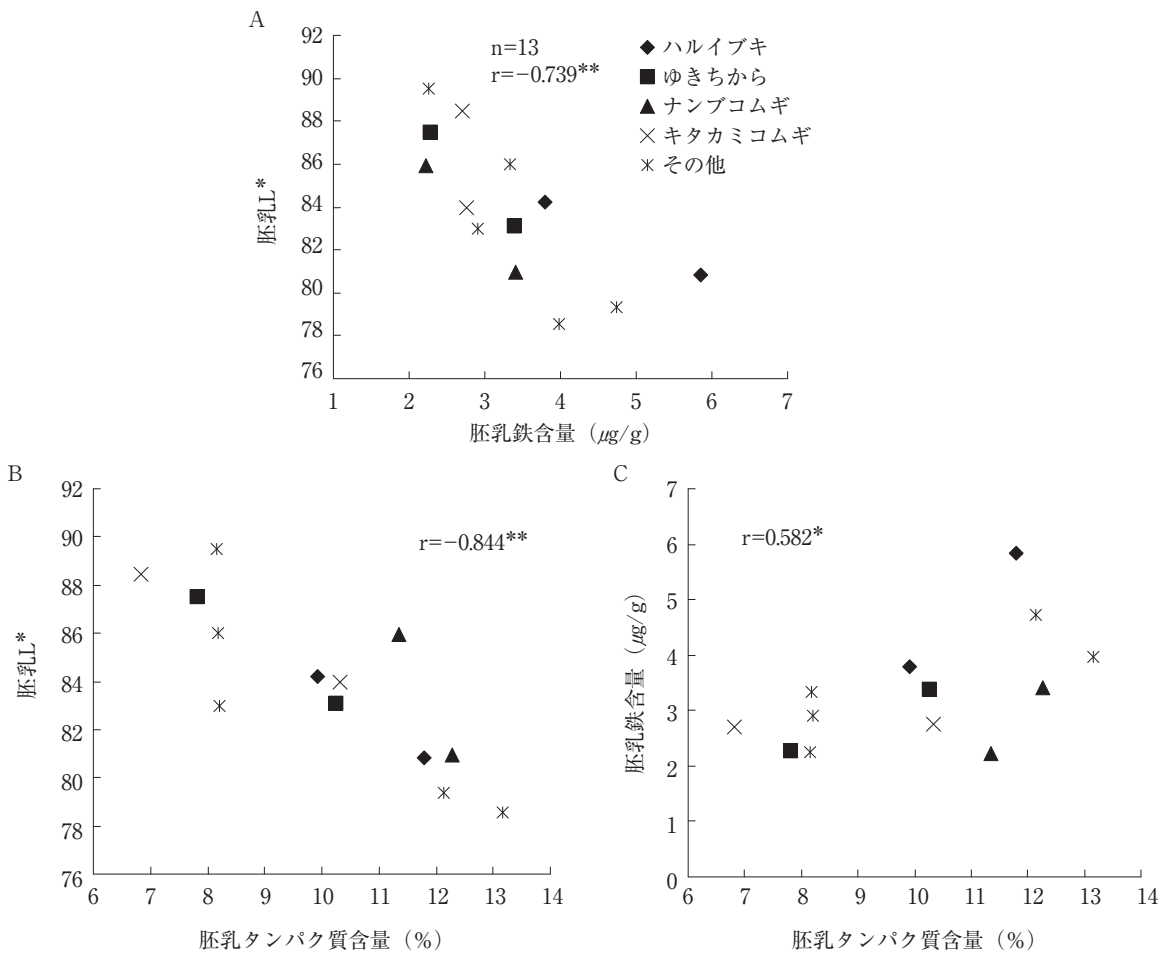


図6 胚乳L*、鉄含量およびタンパク質含量の関係
相関係数における**および*はそれぞれ1%および5%水準で有意であることを示す。

は、それぞれ2水準のタンパク質含量での値を比較できるようにした。胚乳L*、タンパク質含量および鉄含量の関係を図6に示す。これら3項目の間には有意な相関が存在した。つまり、タンパク質含量や鉄含量が高くなると胚乳L*が低くなる傾向があり、タンパク質含量と鉄含量の間にも正の相関がみられた。また、この傾向は同一品種で比較した場合にはより明瞭であった。さらに、胚乳鉄含量が3.0~4.0 $\mu\text{g/g}$ と近い12サンプルを用いて胚乳L*とタンパク質含量との関係を見た場合には有意な負の相関が認められた ($r = -0.852^{**}$)。なお、a*およびb*では、L*でみられたようなタンパク質含量と鉄含量との関係はみられなかった (データ未提示)。

種子断面の胚乳L*分布

「盛系D-B006」および「厨系B-B143」は、共に硬質で胚乳タンパク質含量が10.2%と等しく、鉄含量がそれぞれ3.3および3.1 $\mu\text{g/g}$ と近かった。しかし、胚乳L*が大きく異なっており、「盛系D-B006」は80.9、「厨系B-B143」は83.7であった (表1、20番および29番)。そこで、胚乳L*の差異が生じる要因を探るため、6時間処理の種子断面のL*分布および20粒分のピクセル頻度の差を示した (図7)。種子断面のL*分布では、「厨系B-B143」は「盛系D-B006」に比べて85以上の値を示すピクセルが種皮の近くまで広がっており、90以上の値を示すピクセルが“頬”の部分を中心に多く存在していた (図7A)。また、65以上の値を示した全ピクセル数に対するそれぞれの値のピクセル数を百分率で表してピクセル頻度とした。胚乳L*の高い「厨系B-B143」から低い「盛系D-B006」のピクセル頻度の差をみたところ、「厨系B-B143」は90以下の値を示すピクセルが比較的少ないのに対し、90以上の値を示すピクセルが極めて多いという特徴が見られた (図7B)。

IV 考 察

小麦粉の明るさ (L*) はそのタンパク質含量の影響を受けることが知られている (Petersonら 1986、小綿ら 1996、木谷ら 2002)。また、小麦粉のタンパク質含量は原粒タンパク質含量と高い相関がある。本研究でも、胚乳のL*、a*およびb*はいずれもタンパク質含量の影響を受けることが示された (図3)。

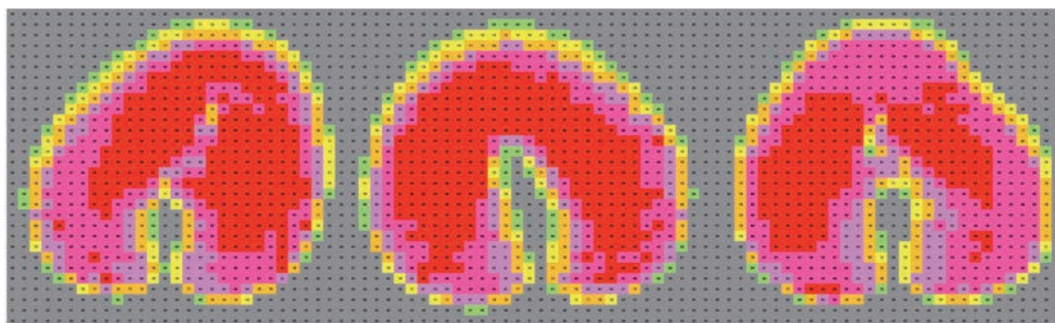
そこで、タンパク質含量の同等なサンプルを胚乳

色の測定に用いるため、近赤外分析機によって原粒タンパク質含量を測定し、この値から供試するサンプルを選抜した。さらに、以前の報告では、胚乳色の測定には粒の硬軟を考慮する必要があることが示されていることから (前島ら 2007)、胚乳色を測定するサンプルは粒の硬軟別に選ぶこととした。本研究では、両年を通じた原粒タンパク質含量の最頻値の前後約1%の範囲から、硬質および軟質それぞれ60サンプルを選出した。これまでの色相研究において、これほどの規模でタンパク質含量が同等な材料を供試したものはないことから、これらはタンパク質含量以外の色相劣化要因を探る上で有効な材料になると考えられた。

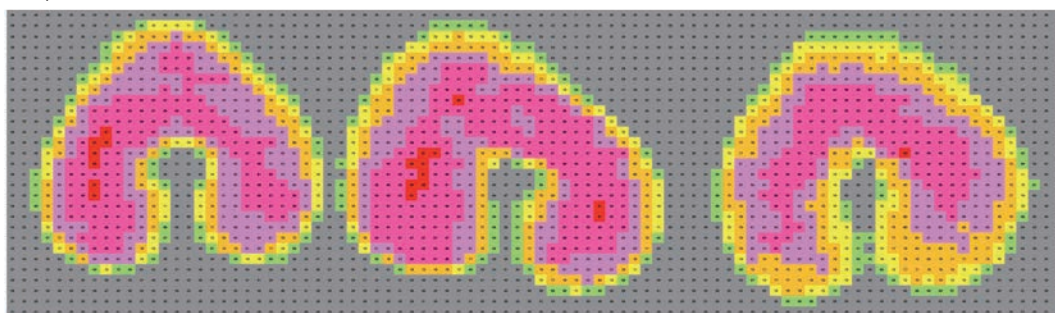
Horiganeら (2003) は、種子断面のL*によって胚乳部分が抽出できることを示している。本研究においても、吸水開始後の種子断面では胚乳部と周辺部のL*が明瞭に異なることを確認できた (図2)。さらに、種子断面の画像とL*のピクセルデータを重ね合わせたところ、皮部あるいは糊粉層がピクセル中に僅かでも含まれるとL*が急速に低下し、50以下の値をとっていることがわかった (データ未提示)。また、50~70の間で閾値を段階的に変えて算出した場合にも、得られるL*値にほとんど影響が見られなかったことから、この範囲に入るピクセルの種子断面全体に占める割合は少なく、胚乳部とそれ以外の部分のL*値がこの範囲を境に明瞭に分かれていることが示された。

種子断面による胚乳色測定では、2つの大きな問題が考えられる。そのひとつは、硝子率の影響であり、硝子質の部分では測定光の多くが透過してL*が低く算出され、本来の色相が評価できないという問題がある。一般に、タンパク質含量が高くなるに従って、また、軟質粒より硬質粒において硝子率が高くなることが知られている (長尾 2007)。これは、小麦粉の見た目において、粒度が粗いものは光の反射が少ないため全体的にくすんで見えるのと似ている。そのため、粉色を評価する際には、粒度の影響を取り除くため、小麦粉に蒸留水を加えて一定時間攪拌したペーストを用いる (農林水産技術会議事務局 1968)。同じ考えから、胚乳色の評価においても硝子質の影響を取り除くため、一定時間吸水させてから測定する方法が確立している (小綿ら 1996、Horiganeら 2003)。本研究においても、水を含んだろ紙上に種子断面を置いて吸水させて測定

A 厨系B - B143



盛系D - B006



B

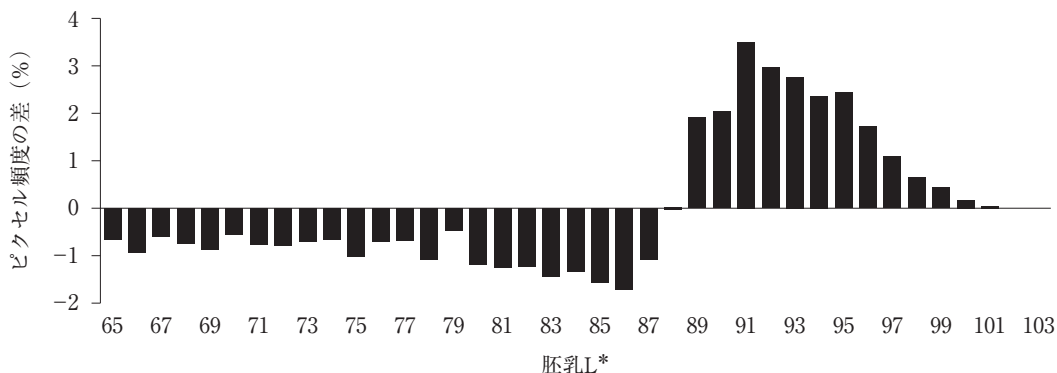


図7 種子断面のL*分布 (A) およびピクセル頻度差のヒストグラム (B)

ピクセル頻度とは65以上の値を示す全ピクセル数に対する各値の百分率であり、頻度差は「厨系B - B143」の頻度から「盛系D - B006」の頻度を引いた値。

することによって、胚乳L*の測定における硝子率の影響を取り除けていることが示された(図4)。つまり、タンパク区分「高」、「中」、「低」の順に胚乳L*が高くなるのは硝子率の影響ではなく、これまで報告されていたようなタンパク質含量と胚乳L*との負の相関に依るものと考えられた。もうひとつの問題は、吸水によって生じる切断面の凹凸の影響である。色相は光の反射で決まることから、凹凸によって測定光が乱反射することにより、それ自体がくすみの原因となりうる。そこで、胚乳L*が異なるサンプルを供試して、6時間処理後に切断面を再

度薄く切って鏡面化してから測定した。その結果、切断している間の乾燥によってL*の値はやや減少するもののサンプル間の差はよく保存されていた(データ未提示)。このことから、本研究で用いた胚乳色測定法は、サンプル間の胚乳L*の差異を検出するという目的においては問題がないと言える。

本研究では、タンパク質含量が同等なサンプルを用いた場合には、胚乳色と鉄含量の間には関係性が見られなかった(図5)。このことは、過去に小麦粉において報告されているL*と鉄含量との負の相関(木谷ら 2002)と矛盾しているようにみえる。

しかし、木谷ら（2002）は施肥量や晩刈りを行うことによって人為的に色相を変化させていることから、色相の劣化要因が本研究とは異なる可能性がある。もしくは、タンパク質含量が大きく異なる品種・系統で胚乳L*と鉄含量との関係を調査したところ負の相関がみられた（図6）ことから、過去の報告はタンパク質含量と鉄含量との相関によって間接的にみられた現象である可能性が示唆された。粒あるいは小麦粉のタンパク質含量と鉄含量との相関についてはこれまでにいくつかの報告がある（Petersonら 1986、Morgounovら 2007、Zhaoら 2009）が、タンパク質含量と鉄含量が同じ遺伝因子に支配されているかどうかは分かっていない。最近、野生4倍体コムギに由来する高タンパク質含量遺伝子が単離され、NACと呼ばれる転写因子をコードしていることが判明した（Uauyら 2006）。この遺伝子はタンパク質含量を増大させるだけでなく、枯れ上がりの早期化や種子のミネラル含量を高めるなどの多面効果を持っている。したがって、もし供試サンプルのタンパク質含量の高低がこの因子の関与に拠るものであれば、鉄含量も同様の傾向が生じる可能性は高いと考えられる。

タンパク質含量や鉄含量の同等なサンプルを用いた場合にも、胚乳L*に有意差が認められた（図5）。そこで、胚乳L*の差を生み出す要因を探るため、種子断面のピクセル毎のL*値を用いてその分布と頻度をみたところ、L*の高いサンプルと低いサンプルとでは90を境としてピクセル頻度に顕著な違いがみられた（図7B）。この傾向はここに示した2系統だけでなく粒の硬軟に関わらず胚乳L*の高いサンプルと低いサンプルを比較した場合に供試サンプル間で一般的にみられる傾向であり、88~90が境界となっていた。この境界値が、本研究で供試したサンプル特有のものなのか、普遍的に言えることなのかは今後さらなる調査が必要である。しかし、胚乳L*の優劣をその分布から明瞭に分けられることは、くすみの新たな評価指標として利用できる可能性がある。

糊粉層には原粒中のミネラルの60%以上が含まれている（栗本・大楠 2007）ことから、これが僅かでも混入すると鉄含量に大きな影響を与えることが予測できた。そのため本研究では、皮部の微小な切れ込みや糊粉層の混入を防ぐ目的で、手作業により胚乳部の調整を行った。その結果、小麦粉の鉄含量

は4~14 $\mu\text{g/g}$ の範囲（Pedersonら 1986、木谷ら 2002）であるのに対し、胚乳の鉄含量の範囲は2~6 $\mu\text{g/g}$ であった（図5、6）。このことは、製粉工程では皮部あるいは糊粉層の混入が少なからずあることを示しており、小麦粉を用いて各種形質との関係性を見る場合には、ふすまの混入による成分組成、特にミネラル含量の変化を常に考慮する必要性を示唆している。本研究で用いたスキャナ式胚乳測色システムは、製粉による二次的影響を取り除いて種子本来の色相を高速多検体で測定することを実現させた。したがって、今回見出された胚乳L*に差異のある試料は、種子内部のくすみの原因を解明する上で重要な手掛りのひとつとなると考えられる。

これまで、小麦粉の色相劣化はある種のタンパク質に結合した鉄が原因ではないかと考えられていた。しかし本研究において、供試サンプルをタンパク質含量が同等のものだけに絞って解析した場合には鉄は胚乳のくすみの原因とは言えない結果が得られた。つまり、小麦粉のくすみと鉄との関係性は、鉄含量とタンパク質含量との相関、および皮部あるいは糊粉層の混入によって説明された。しかしながら、一般に種子内部は周辺部に比べてタンパク質含量が低いことが知られている（長尾 2000）。つまり、粒全体のタンパク質含量は同程度であっても、L*の高いサンプルはL*の低いサンプルに比べて周辺部にタンパク質が偏在していることも考えられる。そのため、タンパク質含量の影響を完全に排除するためには、種子内部のタンパク質分布まで考慮したさらなる調査が必要であろう。

引用文献

- 1) Barnes, P.J. 1986. The influence of wheat endosperm on flour color grade. *J. Cereal Sci.* 4: 143-155.
- 2) Horigane, A.; Yamada, S.; Hikichi, Y.; Kiribuchi-Otobe, C.; Fujita, M.; Yamaguchi, T.; Horiguchi, M. 2003. Evaluation of color characteristics of cross-sectioned wheat kernels. *Food Sci. Technol. Res.* 9: 327-331.
- 3) 堀田 博, 本多一郎. 2005. 国内産小麦粉のくすみと遊離トリプトファン含量. *日本食品科学工学会誌* 52: 538-541.

- 4) 伊藤美環子, 中村和弘, 吉川 亮. 2002. 小麦の粉色向上のための遺伝資源の評価. 東北農業研究 55 : 79-80.
- 5) 木谷裕亮, 堀田 博, 本多一郎. 2002. 国内産小麦粉色相とミネラル含量の関係. 日本食品科学工学会誌 49 : 49-52.
- 6) 小綿美環子, 渡辺 満, 佐藤暁子. 1996. 東北地域で栽培されたコムギにおける粗タンパク含量と粉色の関係 - 東北6県における連絡試験のデータの解析から -. 東北農業試験場研究資料 19 : 41-45.
- 7) 小綿美環子, 渡辺 満, 中村信吾, 佐藤暁子. 1999. コムギ1粒の胚乳断面色の測定による粉色の評価法の開発. 育種学研究 1 : 149-156.
- 8) 栗本洋一, 大楠秀樹. 2007. 小麦粉 - その原料と加工品 -, 第4編 小麦粉及び副製品, 第2章小麦粉製品の成分, 日本麦類研究会編, 東京都. p.483-515.
- 9) 前島秀和, 石川吾郎, 鈴木雅博, 伊藤裕之, 平将人, 中村俊樹, 谷口義則. 2007. 小麦粉色相評価のためのスキヤナ式胚乳測色システム, 平成19年度東北農業研究成果情報. p.55-56.
- 10) 松崎守夫, 豊田政一. 1997. コムギ品質の登熟にともなう推移 (2) 粉の品質特性. 日本作物学会紀事 66 : 183-188.
- 11) Morgounov, A.; Gomez-Becerra, H.F.; Abugalieva, A.; Dzhunusova, M.; Yessimbekova, M.; Muminjanov, H.; Zelenskiy, Y.; Ozturk, L.; Cakmak, I. 2007. Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia. Euphytica 155 : 193-203.
- 12) 長尾精一. 2000. 小麦の科学, 2. 小麦の種類と品質特性, 2.6 小麦粒の構造と成分組成, 朝倉書店, 東京都. p.37-40.
- 13) 長尾精一. 2007. 小麦粉 - その原料と加工品 -, 第2編 小麦, 第7章 小麦の品質, 日本麦類研究会編, 東京都. p.244-275.
- 14) 農林水産省技術会議事務局. 1968. 小麦品質検定方法 - 小麦育種試験における -. 研究成果 35 : 1-70.
- 15) Olivar, J.R.; Blakeney, A.B.; Allen, H.M. 1992. Measurement of flour color space parameters. Cereal Chem. 69 : 546-551.
- 16) Peterson, C.J.; Johnson, V.A.; Mattern, P.J. 1986. Influence of cultivar and environment on mineral and protein concentrations of wheat flour, bran, and grain. Cereal Chem. 63 : 183-186.
- 17) 佐藤大和, 内村要介, 尾形武文, 松江勇次, 陣内暢明. 2003a. 九州北部におけるコムギ粉の色相の年次間変動とその要因. 日本作物学会紀事 72 : 409-417.
- 18) 佐藤大和, 内村要介, 松江勇次. 2003b. コムギにおける播種時期の違いが製粉特性に及ぼす影響. 日本作物学会紀事 72 : 43-49.
- 19) Shuey, W.C. 1975. Flour color as a measurement of flour quality. Baker's Digest 49 : 18-26.
- 20) 辻 孝子, 吉田朋史, 藤井 潔. 2006. 小麦粉色相に関与する成分の解明と簡易色相選抜法の開発. 愛知県農業総合試験場研究報告 38 : 1-5.
- 21) Uauy, C.; Distelfeld, A.; Fahima, T.; Blechl, A.; Dubcovsky, J. 2006. A NAC Gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat. Science 314 : 1298-1301.
- 22) 内村要介, 佐藤大和, 尾形武文, 松江勇次. 2004. 成熟期の降雨処理によるコムギの子実水分含有率の変化と品質低下の品種間差. 日本作物学会紀事 73 : 29-34.
- 23) 柳沢 朗, 吉村康弘, 天野洋一, 小林 聡, 西村 努, 中道浩司, 荒木和哉, 谷藤 健, 田引 正, 三上浩輝, 池永充伸, 佐藤奈奈. 2007. 秋まきコムギ新品種「きたほなみ」の育成. 北海道立農業試験場集報 91 : 1-13.
- 24) Zhang, K.P.; Chen, G.F.; Zhao, L.; Liu, B.; Xu, X. B.; Tian, J.C. 2009a. Molecular genetic analysis of flour color using a doubled haploid population in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Euphytica 165 : 471-484.
- 25) Zhang, Y.; Wu, Y.; Xiao, Y.; He, Z.; Zhang, Y.; Yan, J.; Zhang, Y.; Xia, X.; Ma, C. 2009b. QTL mapping for flour and noodle colour components and yellow pigment content in common wheat. Euphytica 165 : 435-444.
- 26) Zhao, F.J.; Su, Y.H.; Dunham, S.J.; Rakszegi, M.; Bedo, Z.; McGrath, S.P.; Shewry, P.R. 2009. Variation in mineral micronutrient concentrations in grain of wheat lines of diverse origin. J. Cereal Sci. 49 : 290-295.