

米粉パン適性に関する育種学的・  
生理学的研究

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科  
先端農業技術科学専攻  
博士（農学）学位論文

青木法明

# 目次

第1章 緒言	1
1-1 世界の食料需給の現状	1
1-2 我が国の食料需給の現状と課題	2
1-3 我が国の食料自給率向上に向けた取り組みと米粉用米	2
1-4 米粉パンによる米粉消費拡大への有用性	3
1-5 米粉パンの普及に向けた課題	4
1-6 本研究で行う、技術的課題への対応	7
第2章 グルテン添加米粉パンにおける多収品種の製パン特性	9
2-1 材料および方法	9
2-1-1 供試材料と米粉調製	9
2-1-2 米粉特性	12
2-1-3 製パンと比容積・硬さの評価	14
2-2 結果	17
2-2-1 米粉特性	17
2-2-2 米粉パンの形状	21
2-2-3 米粉パンの硬さ	21
2-3 考察	25
2-4 まとめ	27
第3章 特徴的なアミロペクチンを持つ品種の米粉パン	28
3-1 材料および方法	29
3-1-1 供試材料と米粉調製	29
3-1-2 米粉特性	29
3-1-3 遺伝子型同定	29
3-1-4 製パン特性	30
3-2 結果	32
3-2-1 米粉特性	32
3-2-2 米粉パンの形状	35
3-2-3 米粉パンの硬さ	39
3-2-4 日本晴準同質遺伝子系統から作られた米粉パン	39
3-3 考察	44
3-4 まとめ	46

第4章 短いアミロペクチンを持つ変異体は米粉パンの老化が抑制される	48
4-1 材料および方法	49
4-1-1 供試材料と米粉調製	49
4-1-2 遺伝子型の決定	49
4-1-3 米粉特性	49
4-1-4 製パンと比容積・硬さの評価	49
4-2 結果	50
4-2-1 米粉特性	50
4-2-2 アミロペクチン構造	54
4-2-3 米粉パンの形状	54
4-2-4 米粉パンの硬さ	58
4-2-5 米粉パンの食味検定	60
4-3 考察	62
4-4 まとめ	63
第5章 イネ登熟期の気温が米粉パンの製パン特性に与える影響	65
5-1 材料および方法	66
5-1-1 供試材料と米粉調製	66
5-1-2 米粉特性	66
5-1-3 製パン方法と製パン特性の評価	66
5-2 結果	67
5-2-1 登熟気温	67
5-2-2 米粉特性	67
5-2-3 米粉パンの比容積、形状	71
5-2-4 米粉パンの硬さ	74
5-2-5 米粉パンの食味検定	74
5-3 考察	79
5-4 まとめ	80
第6章 総合考察	82
摘要	86
引用文献	88

略語

DSC : 示差走査熱量計 (Differential Scanning Calorimetry)

NIL : 準同質遺伝子系統 (near-isogenic line)

RVA : Rapid Visco Analyzer

## 第 1 章 緒言

### 1-1 世界の食料需給の現状

この数十年、世界全体での食料の需要は一貫して増加してきた (FAO, 2014)。これは、開発途上国などの人口増加により世界人口が増加しているだけでなく、中国などのような新興国を中心に、食事の質が向上していることにも起因している。経済発展により所得が向上すると、一般に穀物を中心とした食生活から、肉食も多く取り入れた食事に変化する。肉の生産にはトウモロコシなどの穀物を使うことが多いが、1キログラムの肉を生産するためには、鶏肉で約 4kg、豚肉で約 7kg、牛肉で約 11kg の穀物が必要であるとされている (農林水産省, 2004)。そのため、肉食の消費量が増加すると、穀物の消費量が大幅に増加することとなる。

この食料需要の増大に対応し、世界の穀物生産量も増加してはいる。しかし、世界の農地面積はこの数十年でも大きく変化しておらず、収穫量の増加はもっぱら単収の増加によってもたらされている。先進国を中心に農業関連の投資は行われているものの、今後とも需要に応えられるだけの単収の伸びが続くかは明確でない。気象変動等による不作から、需要量に見合う生産量を確保できない年もあり、穀物の期末在庫率はこの 10 年程度低い水準となっている (農林水産省, 2013a)。このため、不作時の穀物価格の緩衝作用が弱くなっている。

穀物市場は薄いマーケットとも呼ばれる。食料の輸出国も、一部の例外を除いて、自国の需要を満たした余剰分を輸出に回す。そのため、生産量が減少すると、輸出できる量は大きく減少することとなる。生産国の偏りもリスク要因の一つとしてあげられる。主要穀物の輸出国は、作物によって異なるが、少数の国で大半の貿易量が占められている。例えば、小麦は上位 3 カ国 (アメリカ、オーストラリア、カナダ) で約 44%、トウモロコシは上位 3 カ国 (アメリカ、アルゼンチン、ブラジル) で約 69% となる (USDA, 2014)。このことは、一つの国での不作による輸出量の減少、もしくは一つの国の政策 (例えば輸出禁止令や穀物のバイオエタノールへの使用増) が国際的な貿易量に大きな影響を与えることを示す。

このような食料の生産・需要の事情から、近年は食料価格が一時的にせよ高騰することが頻発している。穀物価格の高騰は、食料品の価格上昇につながる。食料は日々欠かすことができない消費財であり、一般に所得の低い発展途上国で

は、家計全体に占める食料購入の割合が特に影響が大きい。2007～2008年の食料価格高騰においては、ハイチやモザンビークなど複数の国で暴動が発生するなど、食料価格の高騰が社会不安の要因となった。期末在庫率が低下傾向にあるなど需給状況が不安定な中、我が国は食料輸入が世界最大であり（FAO, 2014）、この国際穀物価格の高騰には決して無縁ではなく、近年、我が国の経常収支の悪化の一因にもなっている。

### 1-2 我が国の食料需給の現状と課題

現在、我が国の食料の多くは外国に頼っている。2012年の日本の食料自給率は熱量換算で約39%、生産額換算で約68%であった（農林水産省, 2014a）。1960年の食料自給率は、熱量換算で約79%、生産額換算で約93%であり、熱量換算の自給率は50年で約半分まで低下している。我が国の場合、食料自給率が低下したのは、食料の生産能力が低下したためではない。食生活の変化に伴って、国内で生産できる作物（特に米）の消費が減少し、国内での生産が困難な作物や海外の方が安価な作物の消費が増えたことが原因である（農林水産省, 2013b）。

食料自給率を作物別に見ると、米は約97%とほぼ自給しているが、小麦は約13%、大豆は約27%、穀物としてのトウモロコシはほぼ0%となっており、米以外の主要な作物は自給率が低い（農林水産省, 2014b）。我が国の小麦の輸入量は約621万トン、大豆の輸入量は約283万トン、トウモロコシの輸入量は約1528万トン（いずれも2011年）と多くの量を輸入しており、これらを合わせた食料の輸入額は世界一多い（FAO, 2014）。自給率の数値が低かったとしても、緊急時における国内農業の食料供給力の程度を表している訳ではないが、日本の食料は外国の食料の需給状況に対して影響を受けやすいことを示している。食料自給率の向上は、食料の安定供給の観点から重要であり、政策的な取組みとともに、技術的課題の解決に向けた取組みが必要である。

### 1-3 我が国の食料自給率向上に向けた取り組みと米粉用米

食料自給率に向けた取り組みの中で、米粉への期待は大きい。農林水産省は、2010年に策定した「食料・農業・農村基本計画」において、食料自給率を2020年度までに供給熱量ベースで50%、生産額ベースで70%にそれぞれ引き上げる

ことを掲げている（農林水産省，2013b）。この目標達成のため、生産面と消費面の両面から取り組み、生産面では以下の項目が挙げられている。

- ・水田作の麦・大豆の単収向上
- ・ムギの二毛作の飛躍的拡大
- ・不作付水田における米粉用・飼料用米等の作付拡大
- ・耕作放棄地の解消

「食料・農業・農村基本計画」において主要品目の生産量目標も設定しているが、最も高い生産増加率が求められている品目は、米粉用米の作付け・生産の拡大である。米粉用米の生産量は2008年度の実績は0.06万トンであるが、2020年度の目標は50万トンとなっており、800倍以上の増加が目標となっている。小麦や大豆2～3倍程度の増加が目標となっているのと比較すると極めて大きく、その実現のための技術革新の余地も大きい。

#### 1-4 米粉パンによる米粉消費拡大への有用性

米粉の用途として、今後の米消費拡大に期待されるものとしては、パン、麺類、お好み焼き、餃子、ケーキ、コロッケ、中華麺、ドーナツ、パン、ピザ、プリン、ホワイトソースなど、様々なものが挙げられる（農林水産省，2014c）。これらの食品の中で、パンの市場規模は特に大きい。我が国のパン用小麦の消費量は年間約120万トンと多く（農林水産省，2012）、小麦粉の全消費量（約500万トン）の中でも消費量が多い。米粉の洋菓子等への利用例は多いが、洋菓子の市場規模はパンよりも少ないことから、米の消費拡大の面では米粉パンの方が有利である。また、伝統的に、米粉は和菓子の材料として主に用いられているが、年間の消費量は年間8～10万トン（農林水産省，2012）であり、年ごとに消費量の大きな変動はない。

米粉パンが有望であるもう一つの理由は、製造にかかる初期投資が比較的低いことも利点としてあげられる。米粉パンは基本的には製パン設備があれば作成することができる。そのため、製パンを行っている業者は、特殊な機械や設備を導入することなく米粉パンの作成が可能になる。米粉パン以外に有望と思われる用途の一つとして、米粉麺がある。例えば、ベトナムのフォーやタイのクイティアオ、カンボジアのノムバンチョック、台湾などのビーフンなどである。これら

の麺を作るには専用の製麺機が必要であり、ラーメンやうどんの製麺機で作ることは難しい。麺用小麦の消費量は年間約 130 万トンであり（農林水産省，2012）、パンと同様に市場規模は大きいものの、設備投資が必要という点で米粉パンは米粉麺と比較して優位性があると言える。

本研究は、米粉の用途として「米粉パン」を対象とすることで、我が国の食料自給率の向上に技術的側面から貢献しようとするものである。

#### 1-5 米粉パンの普及に向けた課題

米粉パンが普及してきたのは比較的最近のことである。補助金等の政策的な後押しや消費者の米粉への関心が高まったことも大きな要因であるが、米粉パンに関する技術的な改良が進んだことも大きい。しかし、技術的な課題は数多く残されている。

昨今の技術的な改良として貢献度が高いものの一つは、良質な米粉の製粉方法が開発されたことである。米粉には材料の違いや製粉方法の違いにより、従来から数多くの種類の米粉が作られてきている。例えば、上新粉、上用粉、白玉粉、味塵粉、寒梅粉、道明寺粉などが知られている（竹生，1995）。しかし、これらの米粉の多くは米粉パン等には適していない（與座・松木，2014）。これは、米は小麦と異なり粒が硬く粉碎には強い力が必要となることから、細かい米粉が作りやすく、粗い米粉では米粉パン等に用いるには適していなかったためである。また、従来の製粉方法では、粉碎時の熱や衝撃のために、細かい米粉は損傷したデンプンの割合が高くなり、これも米粉パン等に適さなかった要因の一つである。損傷デンプンが高い粉は吸水量が多くなることが知られている（庄子ら，2012）。小麦粉生地では、小麦の持つデンプン分解酵素により損傷デンプンが分解されることで糖が発生し発酵が促進される。しかし、米はアミラーゼ活性が小麦より低い（Lorenz and Saunders, 1978）、米粉パンの生地では損傷デンプンが分解されない。そのため、損傷デンプンの多い米粉でパンやスポンジを作ると生地の重量が増すために、製品の膨らみが劣ることが示されている（Araki et al., 2009; 山木ら，2007）。米粉麺においても、損傷デンプンの多い米粉から作成した場合には調理中の茹で溶けが多いことが報告されている（Hatcher et al., 2002）。

これらの粉の粗さと高い損傷デンプン含量の問題を改良したのが、新潟県に

より開発された、二段階製粉法（有坂ら, 1994）と酵素処理製粉法（諸橋ら, 2000）である。これらの方法の特徴は、米粒を水や酵素液で軟化させてから気流粉碎器という粉碎器を用いて製粉することで、上新粉など従来の米粉より細かく、損傷デンプンの少ない米粉を作ることである。このような製粉方法の改良により、パンや麺などの用途に向く米粉を作ることができるようになった。

米粉パンの製パン方法にも、近年様々な改良が行われている。小麦粉とは異なり、米粉だけでパンを作るとは基本的にできない。小麦粉に水を加えて捏ねると、グルテンというタンパク質のネットワーク構造が形成され、粘弾性のある生地ができる（田中・松本, 1991）。しかし、米粉にはこのようなネットワークを形成するタンパク質を持たないため、小麦粉のような生地を作るとはできない。そのため、米粉を用いてパンを作ろうとすると、添加物を加えるなどの工夫が必要となる。

米粉パンは、大きく分けて 3 種類に分類される（青木, 2008; 奥座ら, 2008）。①小麦粉に米粉を混ぜて作ったパン（米粉混成パン）、②米粉に小麦のタンパク質を混ぜて作ったパン（グルテン添加米粉パン）、③小麦成分を含まないパン（グルテンフリー米粉パン）である。

①米粉混成パンは、3 種類の米粉パンの中で、最も古くから作られているパンである。ベトナムでは、19 世紀のフランス統治時代からバインミーと呼ばれるパンが作られているが、かつてはこのパンには米粉が入っていたことが多かった。日本では、玄米麺麴という名称で、1919 年に販売された（小菅, 1997）。このパンは玄米粉が小麦の 3～5%入っている蒸しパンであった（山本, 1980）。米粉混成パンは小麦のパンとほぼ同様の工程で製パンできるため、大規模な工場などでの製造に適している。しかし、米粉比率が高いほど膨らみが低下するため（Noomhorm et al., 1994; 高野, 1986）、米粉比率が 20%程度までが目安とされている。

②グルテン添加米粉パンは、小麦から抽出したタンパク質と米粉とを混合したミックス粉を用いて作られたパンである。米粉比率は 80～85%程度と高くできることから（福盛, 2004）、このタイプの米粉パンによる米粉の消費拡大への期待は大きい。米粉混成パンよりモチモチした食感があり、米粉らしさが現れているパンでもある。そのため、このタイプのパンの販売例も多い。

③グルテンフリー米粉パンは、米粉に増粘多糖などを加える等により生地に

粘弾性を持たせて作ったパンである。食感は一般的なパンとはかなり異なっていることが多い。小麦の成分を含んでいないため、小麦アレルギーやセリアック病など、小麦の食べられない人でも食べることができる (Cureton and Fasano, 2009)。セリアック病とは、小麦タンパク質が原因で起きる自己免疫疾患であり、アメリカでは133人に1人がこの病気にかかっているという報告がある (Fasano et al., 2003)。増粘多糖としてグアーガム、キサントガム、ヒドロキシプロピルメチルセルロース (HPMC) (Demirkesen et al., 2010; Lazaridou et al., 2007; 中村・諸橋, 2005)などを用いる。このほか、米を乳酸発酵 (小崎ら, 2001)すること、麴発酵 (Hamada et al., 2013)することにより製パンする方法や、グルタチオンを用いて米のタンパク質を変性させることで作られた米粉パン (Yano, 2012)、米粉を剪断粉碎することで $\alpha$ 化した米粉を添加する米粉パン (西岡, 2011)も作られている。

このように、米粉の製粉や製パン方法について技術改良が進んできたが、以下の主要な3つの課題が残されている。

- ① 米粉生産コストの低減
- ② 米粉パンは小麦粉パンより硬くなりやすい性質の改善
- ③ 米粉パンの膨らみにくさの改善

①原料である米は小麦と比較して価格は2倍以上高い (農林水産省, 2014d)。また、米粉を調整する際、二段階製粉法や酵素処理製粉法のいずれの方法を用いたとしても、水や酵素液の処理、粉碎、乾燥の3段階の処理が必要となる他、气流粉碎器という高価な製粉装置を必要とする。そのため、製粉コストは小麦粉より高くなるだけでなく、従来の米粉よりも高くなる。米粉のコストの高さのために、米粉パンは小麦粉パンより価格が高くなり、米粉普及の抑制要因となっている。そのため、米の生産と製粉の低コスト化が必須である。

②米粉パンは製パン直後には小麦粉パンにはないモチモチとした食感があり、多くの人に好まれる。しかし、製パン後に小麦粉のパンより硬くなりやすい (老化しやすい) という問題点がある。グルテンフリーパンはその傾向が顕著である (Kadan et al., 2001)。パンの老化には様々な要因が関わっているが (Gray and

Bemiller, 2003)、グルテンも関わっている。米粉にはグルテンを形成するタンパク質がないことが老化しやすい原因の一つと考えられている。そのため、米粉パンの普及のためには、硬くなりにくい米粉パンを作る必要がある。

③パンが膨らむためには、発酵中に発生する二酸化炭素を生地の中に取り込む必要がある。しかし、小麦ではグルテンがその役割を果たすが、米にはグルテンを形成する成分がない。そのため、どの種類の米粉パンでも、その膨らみは小麦粉のパンに劣り、側面の凹み（ケービング）を生じやすい。グルテン添加米粉パンでは小麦のグルテンを添加しているが、グルテンの抽出過程でタンパク質のネットワーク形成能が低下しているため、やはりケービングを生じやすくなる。損傷デンプン含量の低い米粉を用いることで、米粉パンの膨らみはある程度改善するが、これだけでは十分ではない。そのため、米粉パンの商品価値を上げるためには、パンの膨らみを改善することが望ましい。

#### 1-6 本研究で行う、技術的課題への対応

本研究は、米粉利用を低コスト化と高品質化の両面から技術的に改善し、米粉利用の促進を図り、ひいては食料自給率の向上に貢献することを目的とする。

米生産の低コスト化の一手段として、多収品種の使用があげられる。多収品種は一般的な品種と比較して単位面積あたりの収穫量が高いことから、生産コストを下げることができる。ただ、炊飯米の品質が一般に劣るため、炊飯米として用いるには不適な品種が多い。しかし、多収品種の中で米粉パンに向く品種を見出すことができれば、着実な米粉生産コストの低減に結びつくことが期待できる。

米粉パンの品質劣化への対応として、パンの副原料の改良や製法の改良でなく、米の成分の改変により米粉パンの品質の向上につなげることができるかを検証した。本研究では、米の成分の中で、デンプンに着目した。デンプンはブドウ糖が結合してできた多糖であり、 $\alpha$ -(1-4)結合により直鎖状につながったアミロースと、 $\alpha$ -(1-4)結合の鎖と $\alpha$ -(1-6)結合による分岐を含むアミロペクチンの、2つの成分より構成され (Hizukuri et al., 1989)、米の乾燥重量の9割を占める。アミロースの含量と、アミロペクチンの鎖の分岐構造はデンプンの性質に影響を及ぼし、炊飯米の硬さには深く関わっていることが報告されている (Umemoto et al., 2008; 稲津, 1988)。米粉パンにおいては、アミロース含量とパンの膨らみや

硬さについては報告されていたものの（高橋，2011；高橋ら，2009）、アミロペクチンとパンの膨らみや硬さとの関係については明確でない。小麦粉パンにおいても同様である。そこで、2種類の試験を行った。一つは、変異体の使用である。アミロペクチンの構造が一般的な品種と遺伝的に異なっている品種を用いて製パン性試験を行った。もう一つは、栽培条件の改変である。登熟中の気温により、同じ品種であってもアミロペクチンの側鎖長が変化することが知られており、低温で登熟するほど側鎖が短くなることが知られている（Inouchi et al., 2000; Umemoto et al., 1999）。そこで、異なる登熟気温で栽培して得られた米をいて製パン性試験を行った。

米粉利用に係る技術的課題の全てが解決できる訳ではないが、技術的な側面から一定の貢献が期待できる一連の研究成果が得られたので、これらを学位論文としてとりまとめ、将来にわたる研究の方向性について整理したい。

## 第 2 章 グルテン添加米粉パンにおける多収品種の製パン特性

米粉普及のためには米粉生産の低コスト化が必須である。低コスト化の一つの対策が、多収品種の利用による米の生産コストの低減である。主食用品種より 30～40%多収となる品種もあり（農林水産省, 2009）、特に北陸 193 号は一部の農家で 1000kg/10a 以上の収量をあげたことが報告されている（三浦ら, 2008）。

しかし、これらの多収品種の多くは主食用米と比較して食味に劣る。その理由としては、多収品種は育成途中で食味での選抜はあまり行われていないことが挙げられる。また、多収品種の多収性を生かすためには、施肥量、特に窒素施肥量の増加を必要とするが、窒素施肥量が多いほど米のタンパク質含量が増加し、食味の低下をもたらす（石間ら, 1974）。米の外観品質は食味と関係があることが知られているが（Ishizuki et al., 2013; Lisle et al., 2000）、多収品種の玄米品質は劣ることが多い。そのほか、炊飯米の粘りにはアミロース含量が重要な役割を果たすが、多収品種の多くはアミロース含量が高い。これらの理由のため、多収品種は主食用に用いられることはほとんどなく、主に飼料やバイオエタノールの生産に用いられてきた。

多収品種は粒食には不適であるが、米粉パンなど粉食としての適性は明らかではない。そこで、本項では多収品種を用いて米粉パンの製パン試験を行い、いずれの品種の製パン性が優れるのか、どのような性質が高い製パン適性と関連しているかをについて検証した。

### 2-1 材料および方法

#### 2-1-1 供試材料と米粉調製

多収品種として、クサノホシ（春原ら, 2003）、クサホナミ（坂井ら, 2003）、タカナリ（井辺ら, 2004）、べこあおば（中込ら, 2006）、べこごのみ（中込ら, 2008）、北陸 193 号（Goto et al., 2009）、ホシアオバ（前田ら, 2003）、モミロマン（平林ら, 2010）、夢あおば（三浦ら, 2006）の 9 品種と、対照品種としてコシヒカリを用いた（Table 2-1）。これらの多品種は 2008 年に農林水産省が加工用や飼料用に向けて原種種子の公募を行った品種である

（<http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/081120.htm>）。これらの品種はそれぞれの

育成地における比較品種より、おおよそ 5~30%の多収である（農林水産省，2009）。

多収品種はそれぞれの品種の育成地で生産された米を使用し、コシヒカリは作物研究所の試験圃場（茨城県つくばみらい市）で生産された米を使用した。精米は山本製作所縦型精米機（ライスパル：VP-31）を用い、搗精歩留まりは 90%とした。米粉調製は、5kg の精白米を 5U/L スミチーム PTE（新日本化学工業）、0.1%クエン酸 3 ナトリウム溶液 5L に 40℃で 1 時間処理後、気流粉碎機 KV-3-4S（躍進機械製作所）を用いて 7000rpm の回転速度で粉碎を行った(Araki et al., 2009)。粉碎後、流動層乾燥機（MDW-20、フジパウダル）を用いて粉の水分を 15%以下に調製した。

Table 2-1 High-yielding cultivars used in this study

Variety name	Place of cultivation	Headgin date	Brown rice yield (kg/a)	Comparative vaiety (yield [kg/a])
Bekoaoba	Akita	7-Aug	73.2	Fukuhibiki (68.9)
Bekogonomi	Akita	25-Jul	68.6	Akihikari (65.2)
Hokuriku 193	Niigata	16-Aug	76.5	Nipponbare (65.3)
Hoshiaoba	Hiroshima	14-Aug	69.4	Nipponbare (53.8)
Kusahonami	Ibaraki	24-Aug	69.9	Nipponbare (52.4)
Kusanohoshi	Hiroshima	24-Aug	67.0	Nipponbare (53.3)
Momiroman	Ibaraki	15-Aug	76.5	Nipponbare (58.1)
Takanari	Ibaraki	14-Aug	75.8	Musashikogane (65.7)
Yumeaoba	Niigata	29-Jul	75.1	Fukuhibiki (73.5)

### 2-1-2 米粉特性

アミロース含量はヨウ素呈色法により定量した (Juliano, 1971)。標準サンプルとして、糯米粉にポテトアミロース (Sigma Type III) を混合した粉を用いた。タンパク質含量は 20mg の試料を窒素定量用分解装置 KR-1000 (EYELA, 東京) を用いて硫酸分解後、全窒素量をインドフェノール法 (Nkonge and Ballance, 1982)により定量し、係数 5.95 をかけることで求めた。米粉の損傷デンプン含量は 100mg の米粉から損傷澱粉定量キット (Megazyme, Bray, Ireland) を用いプロトコールに従い定量した。いずれの成分も、米粉現物あたりの含量(w/w)を定量した。粒度測定には粒度分布測定装置 LS 13 320(Beckman Coulter, Fullerton, USA) を用い、乾式法で測定を行った。糊化粘度特性の測定には Rapid Visco Analyzer (RVA) (Newport Scientific, Sydney, Australia) を用い、米粉 3.5g (水分 14%換算) に蒸留水 25mL を加えて分析した (豊島ら, 1997)。具体的には、50°C・960 rpm で 10 秒間攪拌した後 160 rpm で攪拌しつつ、以下の 19 分間のプロファイルにより行った： (1) 50°C で 1 分間保持、 (2) 4 分間で 93°C まで加熱、 (3) 93°C で 7 分間保持、 (4) 4 分間で 50°C まで冷却、 (5) 50°C で 3 分間保持とし (Figure 2-1)、各段階の粘度を付属のソフトウェアにより計測した。粘度が上がり始める時の温度を粘度上昇開始温度とし、デンプンの糊化の指標とした。

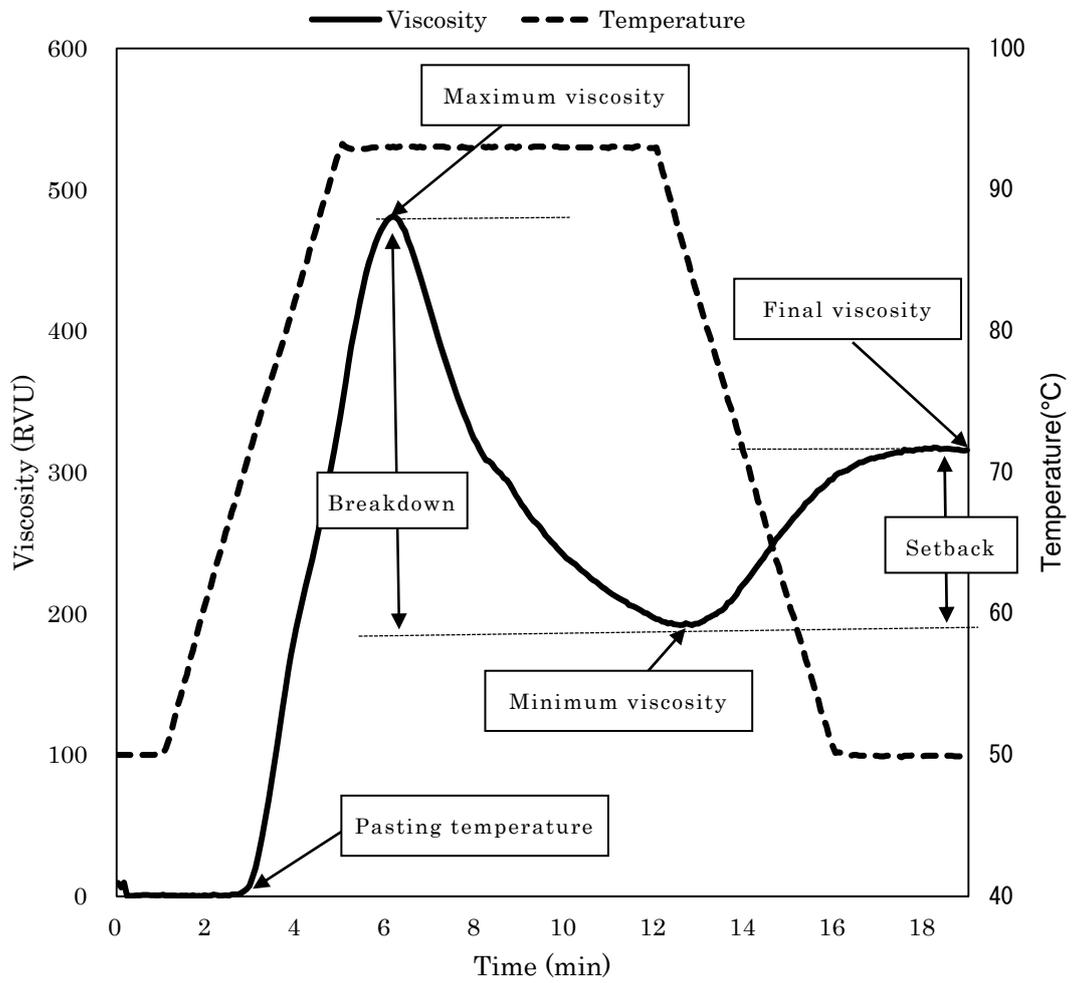


Figure 2-1 Pasting curve of Rapid Visco Analyzer

### 2-1-3 製パンと比容積・硬さの評価

粉の配合は Table 2-2 の通りとし、ノータイム法 (Araki et al., 2009; 田中・松本, 1991)によりパン生地を作成した。グルテンはエマソフト (理研ビタミン, 東京) を使用、ドライイーストはスーパーカメリヤ (日清, 東京) を使用した。ミキシングには縦型ミキサーHPI-20M (関東混合機工業株式会社, 東京) を用い、低速 3 分、中高速 5 分でミキシングを行った後に油脂投入を行い、さらに低速 2 分、中高速 4 分でミキシングを行った。成形した 400g の生地をパン型 (スルトン 1 斤型) に入れ、温度 40°C、湿度 85% で 1 時間発酵させた後、デッキオーブン TDV-431SABB-SSS-MSM-FR-Z (戸倉商事, 滋賀) を用いて 185°C で 30 分間焼成を行った (Figure 2-2)。

焼成したパンは室温で 1 時間放冷してパンの重量を測定するとともに、その体積を 3D Laser Scanner VM-130 (ASTEX, 東京) で測定し、比容積 (体積 / 重量) を求めた。ケービング率は、パン中央部の切断面の面積とパン型の断面積の比率により求めた。室温で 1 日静置したパンを厚さ 1.4cm にスライスし、硬さを TA-XTplus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Surrey, UK) で測定した。パンの中心付近に直径 36mm のプランジャーを置き、120mm/min の圧縮速度でパンの厚さに対して 40% の圧縮を行い、25% 圧縮時の応力をパンの硬さとし、パンの中央付近にあたる 5 枚のパンの硬さの平均値を求めた。

Table 2-2 Combination ratio of rice bread

Ingredient	Combination ratio
Rice flour	80
Gluten	20
Sugar	7.0
Skimmed milk	3.0
Salt	1.5
Shortening	8.0
Dry yeast	1.5
Water	72

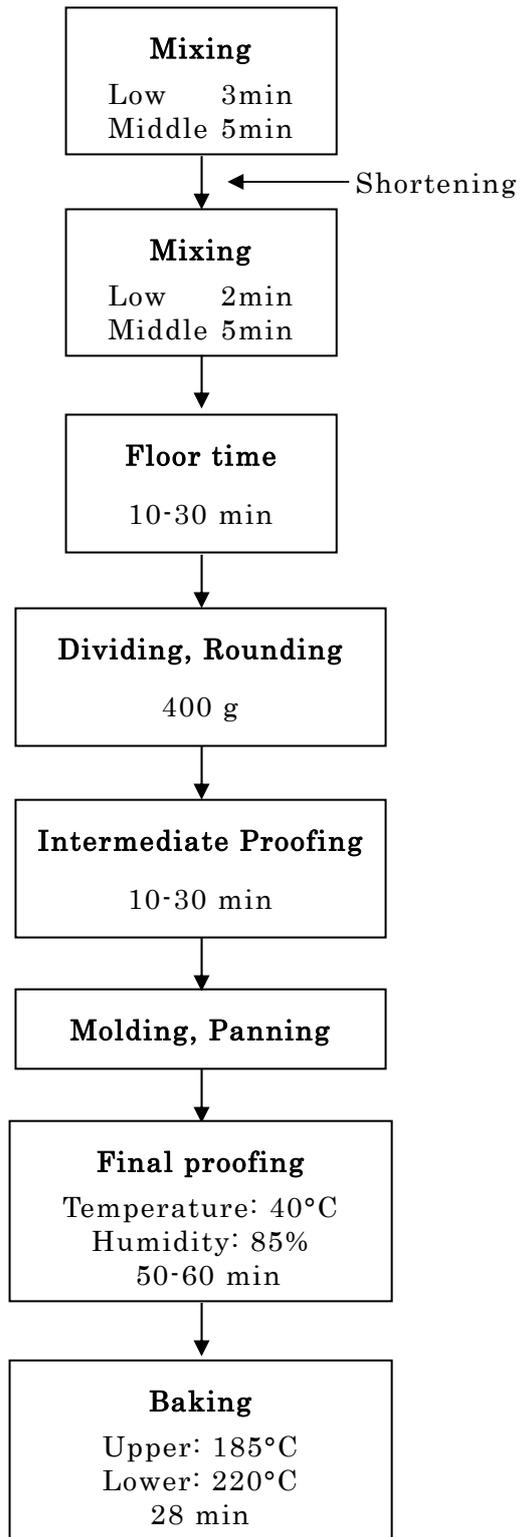


Figure 2-2 Flow chart of bread making process

## 2-2 結果

### 2-2-1 米粉特性

供試した9つの多収品種のアミロース含量はいずれもコシヒカリと同等か、コシヒカリよりも高い値を示した (Table 2-3)。これらの品種のうちホシアオバ、モミロマン、夢あおばの3品種はアミロース含量が20%以上あり、特にモミロマンは26.0%と最も高かった。多収品種のタンパク質含量はいずれもコシヒカリより高かった。米粉の平均径は32.6~63.1  $\mu\text{m}$ 、中位径は24.8~62.1  $\mu\text{m}$ と細かく、米粉の損傷デンプン含量はいずれの多収品種でも4%以下と低い値であった。モミロマンやクサホノシなど、白濁の多い米粒の品種 (Figure 2-3) は粒径と損傷デンプンの値が低い傾向にあった。

多収品種のRVA粘度特性値は品種間で大きな違いがあった (Table 2-4)。アミロース含量とRVAの最高粘度、ブレイクダウン、セットバックとの間にはそれぞれ相関係数が-0.88、-0.87、0.97の相関があり、いずれも有意な相関であった ( $p<0.01$ )。このことから、これらの粘度特性の品種間差はアミロース含量の違いが主要な要因と考えられた。粘度上昇開始温度についてはクサホナミが71.9°Cと高い値を示した以外はほぼ同じ値であった。

Table 2-3 Properties of rice flour samples

Variety name	Amylose content (%) <sup>a</sup>	Protein content (%) <sup>a</sup>	Damaged starch content (%) <sup>a</sup>	Average diameter (μm)	Medium diameter (μm)
Koshihikari	15.9 ± 0.6 e	5.5 ± 0.3 b	1.3 ± 0.1 f	47.6	46.2
Bekoaoba	19.8 ± 0.2 b	7.7 ± 2.2 ab	1.7 ± 0.1 d	40.7	36.3
Bekogonomi	18.2 ± 0.1 c	9.3 ± 0.3 ab	1.8 ± 0.1 d	38.1	38.0
Hokuriku 193	17.4 ± 0.1 d	7.6 ± 1.5 ab	3.2 ± 0.0 a	63.1	62.1
Hoshiaoba	20.0 ± 0.1 b	11.4 ± 1.1 a	2.4 ± 0.1 b	44.5	44.1
Kusahonami	16.5 ± 0.1 e	8.1 ± 1.4 ab	1.5 ± 0.0 e	40.2	39.7
Kusanohoshi	19.3 ± 0.1 bc	6.0 ± 0.9 b	1.6 ± 0.1 de	37.6	32.0
Momiroman	26.0 ± 0.2 a	10.9 ± 1.9 a	1.3 ± 0.0 f	32.6	24.8
Takanari	16.1 ± 0.1 e	6.3 ± 0.4 b	2.1 ± 0.0 c	51.4	50.6
Yumeaoba	20.2 ± 0.1 b	7.5 ± 1.8 ab	1.8 ± 0.0 d	44.7	43.7

<sup>a</sup> Means ± standard deviations with the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's range test).



Figure 2—3 Rice grains of high-yielding cultivars

Table 2-4 Rapid Visco Analyzer viscosity values

Variety name	Maximum Viscosity (RVU)	Minimum Viscosity (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting temperature (°C)
Koshihikari	556 ± 2 b	196 ± 4 de	360 ± 5 b	318 ± 3 e	122 ± 4 d	66.9 ± 0.0 b
Bekoaoaba	458 ± 2 d	240 ± 5 a	218 ± 3 f	375 ± 5 a	136 ± 0 c	66.5 ± 0.1 b
Bekogonomi	469 ± 7 d	212 ± 6 b	258 ± 8 d	357 ± 6 bc	146 ± 0 b	66.5 ± 0.0 b
Hokuriku 193	572 ± 7 a	194 ± 6 e	379 ± 3 a	319 ± 4 e	126 ± 1 d	66.5 ± 0.0 b
Hoshiaoba	436 ± 1 e	202 ± 1 cd	234 ± 2 ef	348 ± 2 cd	145 ± 3 b	66.5 ± 0.0 b
Kusahonami	462 ± 4 d	199 ± 5 cd	263 ± 3 d	322 ± 4 de	123 ± 1 d	71.9 ± 0.4 a
Kusanohoshi	440 ± 1 e	217 ± 2 b	223 ± 0 f	363 ± 4 b	147 ± 2 b	66.5 ± 0.1 b
Momiroman	321 ± 2 f	190 ± 0 e	132 ± 1 g	372 ± 2 ab	183 ± 2 a	66.6 ± 0.0 b
Takanari	504 ± 5 c	157 ± 2 f	347 ± 6 c	266 ± 1 f	109 ± 1 e	66.5 ± 0.1 b
Yumeaoba	446 ± 3 de	206 ± 5 bc	239 ± 2 e	356 ± 3 c	150 ± 2 b	66.4 ± 0.0 b

Means ± standard deviations (n = 3) with the same letter are not significantly different at p < 0.05 (Tukey's range test).

### 2-2-2 米粉パンの形状

パンの形状を **Figure 2-4** に示した。コシヒカリの米粉パンは腰折れ（ケービング）が顕著であったのに対し（**Figure 2-4 A**）、多収品種の米粉パンはいずれもコシヒカリよりもケービングが少なく（**Figure 2-4 B~J**）、特に、モミロマンのケービングが最も少なかった（**Figure 2-4 H**）。比容積については、いずれの多収品種の米粉パンも、コシヒカリの米粉パンと同等かそれ以上の比容積を示した（**Table 2-5**）。

### 2-2-3 米粉パンの硬さ

焼成 2 日後の米粉パンの硬さをコシヒカリと比較した場合クサホナミは約 3 倍と著しく高い値を示したほか、モミロマンや夢あおばも 30%以上高い値を示した（**Table 2-5**）。しかし、他の多収品種についてはコシヒカリと大きな違いは認められなかった。

全 10 品種を用いて米粉特性（アミロース含量、タンパク質含量、米粉粒度、損傷デンプン含量）と米粉パン特性（比容積、硬さ）との相関を調べたところ、米粉特性とパン特性との間に有意な相関は見られなかった（データ示さず）。硬さに関してクサホナミの米粉パンが極めて硬いことから相関が検出できなかった可能性が考えられたことから、クサホナミのデータを除いて解析した（**Figure 2-5**）。その結果、アミロース含量とパン比容積、アミロース含量とパン硬さとの間に有意な相関（ $p < 0.05$ ）が見られた（**Figure 2-5 A、B**）。

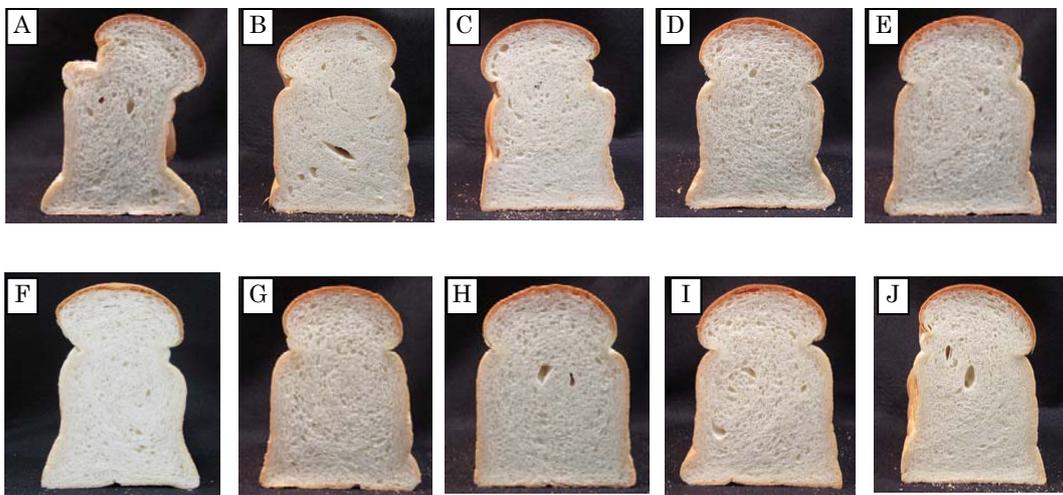


Figure 2-4 Bread shapes

A: Koshihikari, B: Bekoaoba, C: Bekogonomi, D: Hokuriku 193, E: Hoshiaoba, F: Kusahonami, G: Kusanohoshi, H: Momiroman, I: Takanari, J: Yumeaoba

Table 2-5 Properties of rice breads

Variety name	Specific Loaf Volume (mL/g) <sup>a</sup>	Bread hardness (g) <sup>a</sup>	Caving rate (%)
Koshihikari	3.7 (1.0) c	201 (1.0) c	26.4 (1.0)
Bekoaoba	4.3 (1.2) a	247 (1.2) bc	9.6 (0.4)
Bekogonomi	3.9 (1.1) a	221 (1.1) c	9.5 (0.4)
Hokuriku 193	3.8 (1.0) bc	212 (1.1) c	17.3 (0.7)
Hoshiaoba	3.9 (1.1) ab	212 (1.1) c	12.3 (0.5)
Kusahonami	3.8 (1.0) c	602 (3.0) a	20.0 (0.8)
Kusanohoshi	4.0 (1.1) a	198 (1.0) c	15.0 (0.6)
Momiroman	4.1 (1.1) a	286 (1.4) b	7.8 (0.3)
Takanari	4.0 (1.1) a	223 (1.1) c	12.8 (0.5)
Yumeaoba	4.1 (1.1) a	264 (1.3) b	13.7 (0.5)

Values in parentheses are relative values, with Koshihikari being 1.0.

<sup>a</sup> Means with the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's range test).

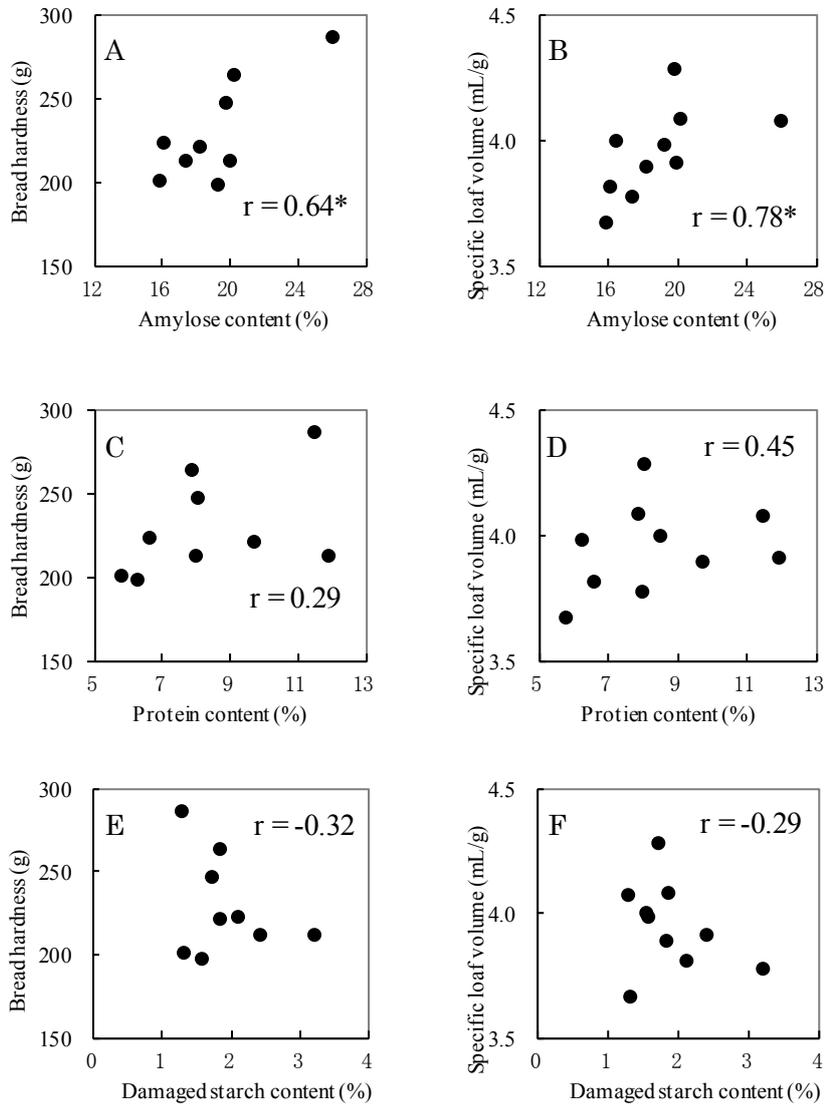


Figure 2-5 Correlation between rice properties and bread qualities

A: Amylose contents and bread loaf volumes, B: Amylose contents and bread hardness values, C: Protein contents and bread loaf volumes, D: Protein contents and bread hardness values, E: Damaged starch contents and bread loaf volumes, F: Damaged starch contents and bread hardness values.

Values in parentheses are correlation coefficient without the data of Kusahonami.

\* indicates significant correlation ( $p < 0.05$ ).

### 2-3 考察

米粉パンの問題点の一つとして、小麦粉のパンと比較して膨らみ（比容積）が少ないことが挙げられる（瀧尾, 2007）。米粉パンの比容積は損傷デンプン含量と有意な負の相関があるため（Araki et al., 2009）、膨らみのよい米粉パンを作るためには、米粉の損傷デンプン含量は低いことが望ましい。今回得られた多収品種の米粉は粒度や損傷デンプン含量がいずれの品種も低く（Table 2-1）、パンのケービング程度や比容積はコシヒカリと同程度もしくはコシヒカリ以上であった（Figure 2-4、Table 2-5）。このため、少なくとも酵素処理製粉法で粉碎した場合には、多収品種も米粉パン向けの良質な米粉が得られることを示している。

多収品種から得られた米粉の粒度や損傷デンプン含量の値が小さかった要因として、米粒の白濁度の高さが考えられる。粉質米と呼ばれる胚乳へのデンプン蓄積が不十分な変異体は玄米が柔らかく、粉質米から得られた米粉は粒度や損傷デンプン含量が低いことが報告されている（Ashida et al., 2010）。多収品種においても、粉質米ほどではないにしても、白濁粒の割合が多い品種があった

（Figure 2-3）。白濁粒が多い米は精米時に碎米となりやすく、炊飯米として用いるには不向きである。しかし、米粉として用いるならば細かい粉が得られるという利点となりうる。

本試験で用いた品種では、損傷デンプン含量と比容積との間に負の相関は認められたものの、有意な相関ではなかった（Figure 2-5 E）。これは、Arakiらの報告では用いた米粉の損傷デンプン含量が1.0～22.1%と広い範囲であったのに対し（Araki et al., 2009）、今回のサンプルでは含量の幅が1.3～3.2%と小さかったために相関が検出できなかったためと考えられる。

小麦デンプンとグルテンとを混合して作成したパンでは、アミロース含量の高い小麦粉から作った方がパンのケービングが少ないことが知られている（Lee et al., 2001）。米粉パンにおいても、アミロース含量が中程度の一般品種でもパンがケービングしやすいが、低アミロース米の米粉パンではケービングがより激しいこと、高アミロースのパンではケービングが少なく形状に優れることが報告されている（高橋ら, 2009）。今回用いた多収品種の多くはアミロース含量がコシヒカリよりも高かったことから（Table 2-3）、多収品種のパンが低いケービング程度となった要因の1つとして、アミロース含量の違いの可能性が挙げられる。

しかし、タカナリはアミロース含量がコシヒカリとほぼ同等であるにもかかわらずパンのケービングが少なかったことから、アミロース含量以外にケービングの発生に影響する要因の存在が考えられ、今後さらなる研究が必要である。

高橋らはアミロース含量とパン比容積、硬度と有意な負の相関を報告している（高橋ら, 2009）。しかし、クサホナミのアミロース含量は 16.5%と高い値ではないが（Table 2-3）、パンが著しく硬くなりやすかった（Table 2-5）。クサホナミの粘度上昇開始温度は他の品種とは異なり、71.9℃と高い値であった（Table 2-4）。粘度上昇開始温度の高いデンプンは老化しやすく、時間の経過をともなう硬化が早いため（Umemoto et al., 2008）、クサホナミの米粉パンではデンプンの老化が他の品種よりも速やかに進んだためにパンが硬くなったと考えられる。クサホナミはアケノホシを母、中国 113 号を父とする交配から得られている（坂井ら, 2003）。アケノホシは粘度上昇開始温度が高いことから（Horibata et al., 2004）、クサホナミの粘度上昇開始温度が高いという性質はアケノホシより受け継がれたものと考えられる。

アミロース含量とパンの膨らみや硬さとは相関が見られたものの、今回の製パン試験においては、Figure 2-5 C、Figure 2-5 D に示したように、米のタンパク質含量と米粉パンの比容積および硬さには相関が見られなかった。このことから、本試験では、米の種子貯蔵タンパク質は米粉パンの比容積や硬さにはあまり影響していないと考えられる。

タカナリは米粉パンに向く品種であると言われており、今回得られた結果でもコシヒカリと比較してパンがケービングしにくく、膨らみの大きいパンができることが示された（Figure 2-4）。タカナリ以外の多収品種の米粉を用いても、コシヒカリと同等もしくはそれ以上にケービングしにくいパンができた。しかし、クサホナミやモミロマンの米粉パンように供試試料の中にはパンが硬すぎる特徴を有する多収品種も存在することから、米粉パン用の米粉を調整する場合には注意が必要と考えられる。既報（高橋ら, 2009）および本報告から、ケービングが少ない米粉パンを作るためにはアミロース含量が高いことが望ましいものの、硬くなりにくい米粉パンを作るためにはアミロース含量は高すぎないことが望ましい。そのため、米粉パンには 20%程度の、一般品種よりはやや高めのアミロース含量を持つ米粉が適すると考えられる。多収品種の多くはややアミロース含量が高い

ため、米粉パンに適すると言える。

多収性品種は栽培条件によっては極めて多収となりうることを示している。例えば、べこあおばは多肥条件下では 10a あたり 920kg の粗玄米収量を示しており（福嶋ら, 2008）、北陸 193 号は 10a あたり 1000kg 以上の粗玄米収量が得られた例もある（三浦ら, 2008）。多収品種の性質を生かすためには多肥栽培が必要であるが、肥料のコストは全生産コストの 1 割程度である（農林水産省, 2014e）。そのため、施肥を通常の 2 倍の投入となるが、多収品種の多くは一般品種の 3 割以上の増収となることから、結果的に低コスト化が実現できる。今後の利用が期待される。

## 2-4 まとめ

加工用や飼料用に育成された多収品種における米粉パンの品質の品種間差を見いだすこと、米粉パンに適する品質特性を見いだすことを目的として、9 品種の多収品種とコシヒカリを用いてグルテンを添加した米粉パンを作成し、米粉の特性（アミロース含量、タンパク質含量、粒度、損傷デンプン含量、RVA 粘度特性）と米粉パン製パン特性（パン比容積、硬さ）とを調査した。多収品種の米粉のアミロース含量はコシヒカリと同等か高く、タンパク質含量はいずれもコシヒカリよりも高かった。パンの比容積と相関があることが示されている損傷デンプン含量はいずれの品種でも 4%以下と低い値を示した。また、いずれの多収品種から作られた米粉パンも、コシヒカリのパンよりケービング（腰折れ）程度が少なくパンの比容積が同程度か大きかった。しかし、アミロース含量の特に高いモミロマンや粘度上昇開始温度の高いクサホナミの米粉パンの硬さは、コシヒカリの米粉パンよりも高い値を示した（モミロマン：1.4 倍、クサホナミ：3.0 倍）。なお、タンパク質含量とパンの比容積および硬さとは相関が見られなかった。これらの結果から、中程度のアミロース含量で粘度上昇開始温度が高くない多収品種を用いることでコシヒカリと同等かそれ以上に形状がよい米粉パンができることが示された。

### 第 3 章 特徴的なアミロペクチン構造を持つ品種の米粉パン

米は日本における主食であり、日本農業における重要な作物である。しかし、日本国内の米の消費量は年々減少しており、米の過剰生産が重大な問題となっている。米粉をパンに用いることは、米の消費を拡大し、過剰生産に対応する一手段である。しかし、米粉パン、麺、菓子への米粉の利用は小麦粉と比較して低い。これは、米粉パンが小麦粉のパンより硬くなりやすいことにある (Yamauchi et al., 2004)。小麦において、デンプンはパンの硬化に関与する主要な成分である (Gray and Bemiller, 2003)。

デンプンは米の乾燥重量の約 90%を占める。デンプンはアミロースとアミロペクチンから構成される。アミロースはブドウ糖が $\alpha$ -(1-4)-結合により直鎖状となっている分子であり、アミロペクチンはブドウ糖の $\alpha$ -(1-4)-結合の他、(1-6)-結合による分岐がある分子である (Hizukuri et al., 1989)。アミロース合成は *Waxy* (*Wx*) 遺伝子がコードするデンプン粒結合性デンプン合成酵素 I (GBSSI) により制御されている (Sano, 1984)。機能のある対立遺伝子として、主に *Wx<sup>a</sup>* と *Wx<sup>b</sup>* がインディカ品種とジャポニカ品種にそれぞれ分布している (Sano, 1984; Sano et al., 1986; Wang et al., 1995)。アミロペクチン合成は、可溶性デンプン合成酵素、デンプン枝付け酵素、デンプン枝切り酵素により制御される (Nakamura, 2002)。米のアミロペクチン構造は主として、短鎖割合の高い S 型と長鎖割合の高い L 型に分類される (Nakamura et al., 2002)。この違いは、*Alk* 遺伝子座にコードされるデンプン合成酵素 II (SSIIa) の多型に由来する (Umemoto et al., 2002)。また、高アミロース品種では、アミロペクチン中にあるアミロース様の超長鎖に品種間差があり (Hizukuri et al., 1989)、超長鎖合成は *Wx* 遺伝子座で制御される (Aoki et al., 2006)。アミロース含量やアミロペクチン側鎖の分布は、保存中の炊飯米の硬化に影響を与えている (Umemoto et al., 2008)。

第 2 章において、アミロース含量が高い、もしくは糊化温度が高い品種から作られた米粉パンは硬くなりやすいことを示した。本研究では、より多様なデンプン特性を持つ 26 品種を用いた。この品種群には、高アミロース含量、高糊化温度、高アミロースかつ高糊化温度、高超長鎖含量を示す品種などが含まれている。さらに、*Wx* 遺伝子座と *Alk* 遺伝子座に関する準同質遺伝子系統を用いて、

アミロースやアミロペクチンが米粉パン特性に及ぼす効果を確認した。

### 3-1 材料および方法

#### 3-1-1 供試材料と米粉調製

本研究では 26 品種・系統を用いた (Table 3-1)。アミロースやアミロペクチン特性と米粉パンの品質との関係の詳細な解析のために、*Wx* と *A1k* 遺伝子座に関する準同質遺伝子系統 (NIL)を用いた。本研究で用いた NIL は日本晴を遺伝的背景とした系統であり、Kasalath 型の *Wx* (GBSSI) 対立遺伝子を持つ NIL (*Wx<sup>a</sup>*)、Kasalath 型の *A1k* (SSIIa) 対立遺伝子を持つ NIL (*A1k*) と、両者を交配することで得られた、*Wx* と *A1k* 双方の遺伝子型が Kasalath 型の NIL (*Wx<sup>a</sup>,A1k*) に固定した 3 系統 (Umemoto et al., 2008) である。いずれの NIL も、遺伝子近傍を除いては全て日本晴の遺伝子型を持つことが、DNA マーカーを用いることにより確認されている。

米粉は二種類の製粉方法により調整した。16 品種・系統については、ペクチナーゼ溶液 (0.3%くえん酸三ナトリウム、0.05%ペクチナーゼ) で 40℃、1 時間浸漬後、気流粉碎機 (SPM-R290, 西村機械製作所, 大阪) で粉碎した。残りの 10 品種・系統については、株式会社波里より提供を受けた。これらの米粉は湿式の気流粉碎により調整した。

#### 3-1-2 米粉特性

米粉の粒度、損傷デンプン含量、アミロース含量、糊化粘度特性の測定は、第 2 章に示した方法と同様に行った。窒素含量は燃焼法により定量し、Sumigraph NC-22F (住化分析センター, 東京) を用いた。アセトアニリドを標準物質とし、窒素含量に 5.95 を乗じることで、タンパク質含量とした。

#### 3-1-3 遺伝子型同定

DNA は米粉から Nakamura et al. の方法 (Nakamura and Ohtsubo, 2010) により、米粉より臭化ヘキサデシルトリメチルアンモニウムを用いて抽出した。*Wx<sup>a</sup>* と *Wx<sup>b</sup>* 対立遺伝子の検出には、Yamanaka ら (2004) の dCAPS マーカーを用いた。抽出した DNA を WP-CAPS (TGT TGT TCA TCA GGA AGA ACA TCT

CCA AG)と WP-B (TTA ATT TCC AGC CCA ACA CC) をプライマーとして PCR で増幅後、*Eco*T14I で消化した産物を 8%アクリルアミドゲルで電気泳動して *Wx* 遺伝子型を決定した。*Alk* と *alk* の対立遺伝子を区別する一塩基多型マーカー (Hiratsuka et al., 2010)を用いた。DNA を SNP3(A)Forward (CGG GCT GAG GGA CAT CA) と SNP3,4Reverse (CAC ACA AAC CGG AAG CTA AT)、もしくは SNP3(G)Forward (CGG GCT GAG GGA CAT CG) と SNP3,4Reverse で PCR し、2%アガロースゲルで電気泳動して *Alk* の遺伝子型を決定した。

#### 3-1-4 製パン特性

米粉のミキシング特性は、ファリノグラフ (Brabender Instruments, Duisberg, Germany) を使い、AACC 公定法 54-21 に従って行った。40g の米粉と、10g グルテンのミックス粉を用いた(いずれも水分 14%換算)。500BU の粘度になった時の加水量を米粉の吸水量とし、各特性値を測定した (Figure 3-1)。

製パン方法は、第 2 章と同様にノータイム法により行ったが、加水量は生地の状態により調整した。パンの比容積 (mL/g)と硬さについても、第 2 章の方法と同様に行ったが、パンの硬さはそれぞれのパンで 3 枚の硬さの平均をとり、各品種 3 斤のパンで測定した。

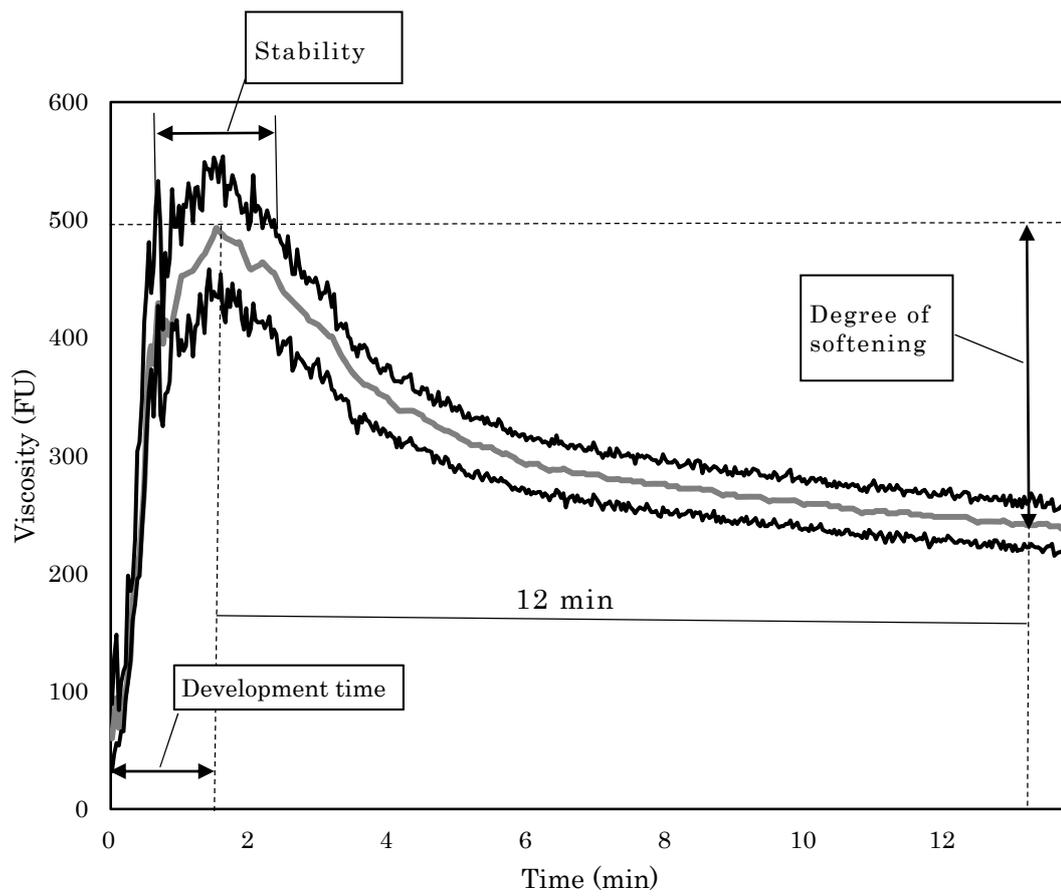


Figure 3-1 Specimen of Farinograph curve

## 3-2 結果

### 3-2-1 米粉特性

26 品種と NIL の損傷デンプン含量は 1.4~5.1%であり、平均粒径は 13.3~47.6 $\mu\text{m}$ であった (Table 3-1)。ペクチナーゼ溶液後に粉砕した米粉は湿式粉砕の米粉よりも損傷デンプン含量や平均粒径が有意に低かった ( $p<0.01$ 、データ示さず)。アミロース含量は 9.0~29.5%の範囲であった。 $Wx^a$  対立遺伝子を持つ品種のアミロース含量 (25.8~29.5%)は  $Wx^b$  対立遺伝子を持つ品種のアミロース含量 (9.0~23.3%)と比較して高かった。超長鎖含量が高い品種と (夢十色、台中在来 1 号)と超長鎖含量が中程度の品種 (ホシユタカ、ホシニシキ)の間にアミロース含量の有意な差は見られなかった。タンパク質含量は 4.2%~8.2%の範囲であった。

26 品種と NIL の米粉の糊化粘度特性は RVA により求めた (Table 3-2)。最高粘度、最低粘度、ブレイクダウン、最終粘度、セットバック、粘度上昇開始温度の値は、それぞれ 259~678 RVA ユニット (RVU)、103~311 RVU、137~487 RVU、243~657 RVU、115~346 RVU、63.3°C~78.4°C となった。越のかおりと収 8515 はインディカ型の  $A1k$  対立遺伝子を持っており (Table 3-1)、他の品種よりも高い粘度上昇開始温度であった。

Table 3-1 Chemical characteristics of rice flour from low-, intermediate-, and high-amylose cultivars and near-isogenic lines (NILs)

	Milling method	Damaged starch content (fw%)	Median particle size ( $\mu\text{m}$ )	Amylose content (fw%)	Protein content (fw%)	$Wx$ allele	$Alk$ allele	Feature
Milky queen	Pectinase treatment	2.6 $\pm$ 0.1 f	22.5	9.0 $\pm$ 0.4 n	4.5 $\pm$ 0.0 q	$Wx^b$	$alk$	
Ouu405	Wet milling	2.8 $\pm$ 0.1 f	28.9	13.3 $\pm$ 0.1 m	5.7 $\pm$ 0.1 l	$Wx^b$	$alk$	
Bekogonomi	Pectinase treatment	2.0 $\pm$ 0.1 h	18.0	20.7 $\pm$ 0.5 h	6.6 $\pm$ 0.1 e	$Wx^b$	$alk$	High yield
Hokuriku Kona 232	Wet milling	3.3 $\pm$ 0.1 de	47.6	16.8 $\pm$ 0.0 l	7.3 $\pm$ 0.1 c	$Wx^b$	$alk$	Floury mutant
Hokuriku Shi 209	Pectinase treatment	2.2 $\pm$ 0.1 g	20.8	18.6 $\pm$ 0.1 j	4.2 $\pm$ 0.0 r	$Wx^b$	$alk$	High yield
Hoshiaoba	Wet milling	2.5 $\pm$ 0.0 f	20.2	20.1 $\pm$ 0.3 h	5.6 $\pm$ 0.0 m	$Wx^b$	$alk$	High yield
Hoshinoko	Wet milling	3.0 $\pm$ 0.2 e	29.8	19.4 $\pm$ 0.2 i	8.0 $\pm$ 0.1 b	$Wx^b$	$alk$	Floury mutant
Kanto 239	Wet milling	2.4 $\pm$ 0.1 f	31.0	22.0 $\pm$ 0.4 g	5.9 $\pm$ 0.1 jk	$Wx^b$	$alk$	High yield
Kinmaze	Pectinase treatment	2.3 $\pm$ 0.1 g	26.1	21.2 $\pm$ 0.2 gh	4.9 $\pm$ 0.0 p	$Wx^b$	$alk$	
Kirara397	Wet milling	3.8 $\pm$ 0.1 c	41.2	20.5 $\pm$ 0.3 h	6.2 $\pm$ 0.0 h	$Wx^b$	$alk$	
Kitaaoba	Wet milling	5.1 $\pm$ 0.3 a	47.5	22.6 $\pm$ 0.2 fg	6.0 $\pm$ 0.1 ij	$Wx^b$	$alk$	High yield
Koshihikari	Pectinase treatment	1.9 $\pm$ 0.1 i	29.0	18.0 $\pm$ 0.2 j	5.1 $\pm$ 0.1 o	$Wx^b$	$alk$	
Mizuhochikara	Wet milling	3.4 $\pm$ 0.4 d	32.9	23.3 $\pm$ 0.4 f	5.5 $\pm$ 0.0 m	$Wx^b$	$alk$	High yield
Mizuhonoka	Wet milling	2.8 $\pm$ 0.3 ef	35.0	19.0 $\pm$ 0.2 i	6.1 $\pm$ 0.1 i	$Wx^b$	$alk$	High yield
Saikai 198	Pectinase treatment	2.1 $\pm$ 0.0 h	21.3	18.8 $\pm$ 0.1 j	6.3 $\pm$ 0.0 fg	$Wx^b$	$alk$	High yield
Shu 8515	Pectinase treatment	1.8 $\pm$ 0.1 j	27.9	17.1 $\pm$ 0.1 kl	5.6 $\pm$ 0.0 m	$Wx^b$	$Alk$	
Takanari	Pectinase treatment	1.7 $\pm$ 0.0 j	32.4	17.5 $\pm$ 0.3 k	7.1 $\pm$ 0.1 d	$Wx^b$	$alk$	High yield
Yamadanishiki	Pectinase treatment	2.1 $\pm$ 0.0 h	21.5	22.2 $\pm$ 0.5 g	5.3 $\pm$ 0.0 n	$Wx^b$	$alk$	
Hoshinishiki	Pectinase treatment	4.3 $\pm$ 0.2 b	26.2	25.9 $\pm$ 1.2 d	8.2 $\pm$ 0.3 a	$Wx^a$	$alk$	
Hoshiyutaka	Pectinase treatment	2.2 $\pm$ 0.1 g	22.7	29.5 $\pm$ 0.5 a	5.1 $\pm$ 0.0 o	$Wx^a$	$alk$	
Koshinokaori	Wet milling	1.9 $\pm$ 0.1 i	35.9	25.8 $\pm$ 0.2 e	6.4 $\pm$ 0.0 f	$Wx^a$	$Alk$	
Momiroman	Pectinase treatment	2.1 $\pm$ 0.1 gh	24.3	26.2 $\pm$ 1.0 cd	6.4 $\pm$ 0.0 f	$Wx^a$	$alk$	High yield
Shu 8414	Pectinase treatment	1.7 $\pm$ 0.2 j	23.2	26.8 $\pm$ 0.6 bc	6.4 $\pm$ 0.0 f	$Wx^a$	$alk$	
Taichung Native1	Pectinase treatment	1.6 $\pm$ 0.1 j	19.2	26.5 $\pm$ 0.2 cd	5.6 $\pm$ 0.0 m	$Wx^a$	$alk$	
Yumetoiro	Pectinase treatment	1.9 $\pm$ 0.1 ij	16.4	29.1 $\pm$ 0.1 a	5.0 $\pm$ 0.1 op	$Wx^a$	$alk$	
Nipponbare	Pectinase treatment	2.4 $\pm$ 0.1 fg	17.2 $\pm$ 0.1 a	18.9 $\pm$ 0.1 ij	5.9 $\pm$ 0.0 k	$Wx^b$	$alk$	Control cultivar
NIL( $Wx^a$ )	Pectinase treatment	2.0 $\pm$ 0.1 hi	14.9 $\pm$ 0.1 b	17.0 $\pm$ 0.2 l	6.5 $\pm$ 0.0 f	$Wx^a$	$alk$	Near isogenic line
NIL( $Alk$ )	Pectinase treatment	2.1 $\pm$ 0.1 h	17.3 $\pm$ 0.1 a	27.9 $\pm$ 0.6 b	6.1 $\pm$ 0.0 i	$Wx^b$	$Alk$	Near isogenic line
NIL( $Wx^a, Alk$ )	Pectinase treatment	1.4 $\pm$ 0.0 j	13.3 $\pm$ 0.3 c	27.9 $\pm$ 0.5 b	6.2 $\pm$ 0.1 gh	$Wx^a$	$Alk$	Near isogenic line

Means  $\pm$  standard deviations (n = 3) with the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's range test).

Table 3-2 Rapid Visco Analyzer (RVA) viscosity values

	Maximum Viscosity (RVU)	Minimum Viscosity (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting temperature (°C)
Milky queen	678 ± 9 a	191 ± 1 d	487 ± 9 a	318 ± 2 l	126 ± 1 m	68.3 ± 0.1 e
Ouu405	563 ± 0 b	177 ± 2 f	386 ± 2 b	292 ± 2 mn	115 ± 2 n	65.2 ± 0.1 j
Bekogonomi	462 ± 6 e	184 ± 2 e	278 ± 5 f	375 ± 4 f	191 ± 2 f	67.9 ± 0.0 f
Hokuriku Kona 232	259 ± 1 q	103 ± 3 n	156 ± 2 k	243 ± 3 p	140 ± 0 kl	69.2 ± 0.0 d
Hokuriku Shi 209	419 ± 1 f	163 ± 3 i	255 ± 2 g	339 ± 3 jk	175 ± 1 h	69.6 ± 0.2 cd
Hoshiaoba	492 ± 3 d	190 ± 3 de	302 ± 2 de	373 ± 9 f	183 ± 7 g	68.6 ± 0.3 e
Hoshinoko	337 ± 11 kl	129 ± 3 m	208 ± 8 i	265 ± 4 o	136 ± 1 l	64.8 ± 0.2 k
Kanto 239	401 ± 6 g	154 ± 5 j	247 ± 2 gh	289 ± 5 n	135 ± 1 l	66.9 ± 0.1 gh
Kinmaze	516 ± 1 r	222 ± 4 b	294 ± 4 e	406 ± 4 d	184 ± 1 g	68.9 ± 0.2 d
Kirara397	415 ± 2 fg	175 ± 15 f	240 ± 16 h	345 ± 12 i	170 ± 5 h	64.5 ± 0.9 k
Kitaaoba	345 ± 3 jk	143 ± 9 l	202 ± 6 i	285 ± 5 n	142 ± 4 k	63.3 ± 0.2 l
Koshihikari	525 ± 2 c	211 ± 1 bc	314 ± 0 d	363 ± 0 g	152 ± 1 ij	68.8 ± 0.1 de
Mizuhochikara	418 ± 4 f	180 ± 4 f	238 ± 3 h	338 ± 3 jk	158 ± 1 i	67.4 ± 0.5 g
Mizuhonoka	460 ± 38 e	177 ± 12 f	283 ± 27 ef	324 ± 14 l	146 ± 2 j	69.5 ± 0.2 d
Saikai 198	517 ± 2 c	169 ± 1 gh	349 ± 2 c	324 ± 1 l	155 ± 1 i	69.7 ± 0.1 c
Shu 8515	523 ± 5 c	209 ± 2 c	314 ± 6 d	357 ± 2 gh	148 ± 2 j	75.7 ± 0.9 b
Takanari	449 ± 4 ef	180 ± 3 f	269 ± 3 fg	325 ± 3 kl	145 ± 2 jk	66.5 ± 0.0 h
Yamadanishiki	387 ± 4 gh	195 ± 8 d	193 ± 4 j	391 ± 9 e	196 ± 0 e	66.0 ± 0.2 i
Hoshinishiki	301 ± 0 n	163 ± 8 hi	138 ± 9 l	360 ± 3 g	197 ± 6 e	66.0 ± 0.4 i
Hoshiyutaka	304 ± 2 mn	161 ± 3 i	143 ± 1 l	372 ± 3 fg	211 ± 1 d	68.0 ± 0.4 f
Koshinokaori	370 ± 23 hi	175 ± 9 fg	195 ± 16 ij	384 ± 16 ef	209 ± 8 d	75.2 ± 0.4 b
Momiroman	321 ± 3 lm	173 ± 2 g	148 ± 2 kl	357 ± 3 gh	184 ± 1 g	66.4 ± 0.7 h
Shu 8414	357 ± 3 ij	220 ± 1 b	137 ± 2 l	453 ± 3 c	233 ± 3 c	67.6 ± 0.4 fg
Taichung Native1	465 ± 1 e	307 ± 3 a	158 ± 4 k	595 ± 1 b	288 ± 3 b	66.4 ± 0.3 h
Yumetoiro	511 ± 18 cd	311 ± 13 a	200 ± 4 i	657 ± 17 a	346 ± 4 a	66.5 ± 0.2 h
Nipponbare	436 ± 2 f	200 ± 2 d	150 ± 2 k	350 ± 4 hi	150 ± 2 j	70.4 ± 0.3 c
NIL( $W_X^a$ )	275 ± 4 p	178 ± 3 f	192 ± 0 j	370 ± 3 fg	192 ± 0 e	68.3 ± 0.3 ef
NIL( $Alk$ )	425 ± 2 f	168 ± 1 h	133 ± 1 l	302 ± 1 m	133 ± 1 l	78.4 ± 0.8 a
NIL( $W_X^a, Alk$ )	288 ± 1 o	144 ± 0 k	196 ± 1 i	339 ± 1 jk	196 ± 1 e	75.7 ± 0.7 b

RVU, Rapid Visco Analyzer units

Means ± standard deviations (n = 3) with the same letter are not significantly different at p < 0.05 (Tukey's range test).

### 3-2-2 米粉パンの形状

アミロース含量が高い品種から作られた米粉パン (Figure 3-2 T~Z) は、アミロース含量が中程度の品種やアミロース含量の低い品種 (Figure 3-2 A~S) と比較して腰折れ (ケービング) しにくい傾向が見られた。比容積は 3.2 mL/g (奥羽 405) から 4.7 mL/g (越のかおり) の範囲であった (Table 3-3)。全品種を用いて相関を調べたところ、損傷デンプン含量や平均粒径、タンパク質含量と比容積との間には有意な相関は検出できなかった (Table 3-4A)。アミロース含量と比容積との間には有意な正の相関が検出され、 $Wx^a$  対立遺伝子、 $Wx^b$  対立遺伝子を持つ品種だけで相関を調べても有意な正の相関が検出された (Table 3-4C, D)。



Figure 3-2 Shapes of rice breads

A, Milky Queen; B, Ouu405; C, Bekogonomi; D, Hokuriku Kona 232; E, Hokuriku Shi 209; F, Hoshiaoba; G, Hoshinoko; H, Kinmaze; I, Kirara 397; J, Kitaaoba; K, Koshihikari; L, Mizuhochikara; M, Mizuhonoka; N, Nipponbare; O, Saikai 198; P, Shu 8515; Q, Takanari; R, Yamadanishiki; S, Yamadawara; T, Hoshinishiki; T, Hoshiyutaka; V, Koshinokaori; W, Momiroman; X, Shu 8414; Y, Taichung Native1; Z, Yumetoiro. A-B: Low amylose, C-S: Middle amylose, T-Z: High amylose. A-B: Low amylose, C-S: Middle amylose, T-Z: High amylose.

Table 3-3 Rice bread properties

	Specific loaf volume (mL/g)	Bread hardness (g)			Hardening rate (g/day)
		Day one	Day two	Day three	
Milky queen	3.3 ± 0.1 hi	104 ± 6 j	146 ± 17 kl	171 ± 21 j	34 ± 5 gh
Ouu405	3.2 ± 0.2 i	124 ± 12 h	128 ± 11 l	158 ± 30 j	17 ± 6 h
Bekogonomi	4.1 ± 0.1 d	166 ± 8 g	228 ± 4 i	284 ± 9 gh	59 ± 1 f
Hokuriku Kona 232	3.5 ± 0.0 g	226 ± 4 f	256 ± 14 h	343 ± 19 fg	58 ± 7 f
Hokuriku Shi 209	4.1 ± 0.0 de	155 ± 13 g	200 ± 18 ij	265 ± 24 hi	55 ± 8 fg
Hoshiaoba	4.0 ± 0.1 e	171 ± 27 g	232 ± 18 hi	293 ± 22 g	61 ± 11 f
Hoshinoko	3.7 ± 0.1 f	183 ± 6 g	229 ± 8 i	289 ± 15 g	53 ± 4 g
Kanto 239	3.7 ± 0.0 f	245 ± 11 e	273 ± 30 gh	411 ± 43 ef	83 ± 19 ef
Kinmaze	4.0 ± 0.1 e	149 ± 10 gh	181 ± 5 j	278 ± 21 h	65 ± 23 f
Kirara 397	3.8 ± 0.1 f	320 ± 14 c	414 ± 7 d	480 ± 22 de	80 ± 7 f
Kitaaoba	3.4 ± 0.1 gh	231 ± 5 ef	308 ± 14 f	328 ± 21 g	48 ± 8 g
Koshihikari	3.8 ± 0.2 f	124 ± 5 h	165 ± 6 k	269 ± 5 h	73 ± 1 f
Mizuhochikara	4.1 ± 0.0 de	320 ± 26 c	432 ± 23 cd	533 ± 45 d	107 ± 10 de
Mizuhonoka	4.1 ± 0.1 d	155 ± 15 g	202 ± 19 ij	275 ± 22 h	60 ± 5 f
Saikai 198	4.1 ± 0.1 d	168 ± 8 g	239 ± 19 hi	287 ± 23 g	60 ± 13 f
Shu 8515	4.2 ± 0.1 bc	327 ± 74 bc	669 ± 70 b	831 ± 67 b	252 ± 5 a
Takanari	3.7 ± 0.1 f	235 ± 4 e	281 ± 20 fg	349 ± 10 f	57 ± 12 f
Yamadanishiki	4.3 ± 0.0 b	177 ± 3 g	200 ± 5 ij	261 ± 13 i	42 ± 6 g
Hoshinishiki	4.2 ± 0.0 cd	292 ± 18 cd	348 ± 5 e	476 ± 26 e	92 ± 17 e
Hoshiyutaka	4.4 ± 0.1 b	264 ± 27 de	335 ± 20 ef	485 ± 71 d	111 ± 37 d
Koshinokaori	4.7 ± 0.1 a	710 ± 37 a	918 ± 56 a	1064 ± 26 a	177 ± 16 b
Momiroman	4.0 ± 0.1 e	298 ± 6 cd	385 ± 5 de	525 ± 11 d	113 ± 6 d
Shu 8414	4.0 ± 0.0 e	339 ± 21 b	432 ± 55 c	550 ± 53 d	105 ± 17 e
Taichung Native1	4.2 ± 0.1 cd	364 ± 5 b	458 ± 22 c	637 ± 64 c	136 ± 22 cd
Yumetoiro	4.4 ± 0.1 b	356 ± 5 b	469 ± 20 c	674 ± 46 c	159 ± 25 bc

Means ± standard deviations (n = 3) with the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's range test).

Table 3-4 Correlation between rice flour characteristics and bread properties

A	Damaged starch	Median particle size	Amylose content	Protein content	Maximum viscosity	Minimum viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature
Specific loaf volume	-0.37	-0.37	0.69 **	-0.05	-0.25	0.36	-0.47 *	0.54 **	0.65 **	0.43 *
Bread hardness (Day one)	-0.21	0.06	0.60 **	0.12	-0.30	0.26	-0.48 *	0.40	0.48 *	0.76 **
Bread hardness (Day two)	-0.25	0.03	0.50 *	0.06	-0.18	0.29	-0.36	0.38	0.42 *	0.84 **
Bread hardness (Day three)	-0.30	-0.03	0.58 **	0.04	-0.20	0.37	-0.43 *	0.47 *	0.51 *	0.78 **
Hardening rate	-0.28	-0.09	0.46 *	-0.08	-0.06	0.40	-0.29	0.44 *	0.42 *	0.66 **
B	Damaged starch	Median particle size	Amylose content	Protein content	Maximum viscosity	Minimum viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature
Specific loaf volume	-0.32	-0.52 **	0.74 **	-0.09	-0.25	0.41 *	-0.51 *	0.59 **	0.70 **	0.01
Bread hardness (Day one)	-0.11	-0.15	0.79 **	0.10	-0.37	0.46 *	-0.67 **	0.60 **	0.67 **	0.31
Bread hardness (Day two)	-0.12	-0.19	0.79 **	0.04	-0.30	0.50 *	-0.61 **	0.63 **	0.69 **	0.34
Bread hardness (Day three)	-0.19	-0.24	0.84 **	0.02	-0.32	0.56 **	-0.66 **	0.70 **	0.77 **	0.25
Hardening rate	-0.16	-0.24	0.75 **	-0.10	-0.21	0.52 **	-0.51 *	0.63 **	0.66 **	0.30
C	Damaged starch	Median particle size	Amylose content	Protein content	Maximum viscosity	Minimum viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature
Specific loaf volume	-0.03	-0.49 *	0.70 **	-0.44 *	0.28	0.29	0.11	0.42 *	0.54 **	-0.24
Bread hardness (Day one)	-0.46 *	-0.43 *	-0.09	-0.27	0.86 **	0.90 **	0.33	0.81 **	0.69 **	0.10
Bread hardness (Day two)	-0.49 *	-0.33	-0.13	-0.45 *	0.91 **	0.84 **	0.53 **	0.75 **	0.61 **	0.28
Bread hardness (Day three)	-0.60 **	-0.67 **	0.24	-0.53 **	0.94 **	0.97 **	0.36	0.94 **	0.87 **	-0.07
Hardening rate	-0.09	0.13	-0.28	-0.66 **	0.78 **	0.43 *	0.96 **	0.33	0.21	0.72 **
D	Damaged starch	Median particle size	Amylose content	Protein content	Maximum viscosity	Minimum viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	Pasting temperature
Specific loaf volume	-0.35	-0.46	0.57 *	-0.09	-0.18	0.35	-0.41	0.61 **	0.72 **	0.28
Bread hardness (day one)	0.20	0.33	0.59 **	0.12	-0.40	-0.10	-0.37	0.02	0.17	0.04
Bread hardness (day two)	0.21	0.24	0.60 **	0.06	-0.30	-0.02	-0.30	0.12	0.24	0.09
Bread hardness (day three)	0.13	0.25	0.67 **	0.08	-0.38	-0.01	-0.41	0.12	0.24	0.12
Hardening rate	0.10	0.11	0.54 *	-0.07	-0.19	0.10	-0.25	0.17	0.19	0.18

A: Correlations for all twenty-six cultivars; B: Correlations for twenty-four cultivars except Koshinokaori and Shu 8515, which had *Alk* alleles; C: Correlations for six cultivars that had *Wx<sup>a</sup>* alleles except for Koshinokaori; D: Correlations for eighteen cultivars that had *Wx<sup>b</sup>* alleles except for Shu 8515.

\* and \*\*: significant at 5% and 1% levels, respectively.

### 3-2-3 米粉パンの硬さ

パンの硬さは品種間で大きく異なっていた (Table 3-3)。アミロース含量が低い品種であるミルキークイーンや奥羽 405 号 (Table 3-1) から作られた米粉パンは、他のパンよりも柔らかかった。アミロース含量が高く糊化温度も高い品種である越のかおりから作られたパンは、用いたパンの中で最も硬い値を示した。アミロース含量が中程度で糊化温度が高い品種である収 8515 から作られたパンは硬化速度が最も高く、製パン 3 日目のパンの硬さは 2 番目に硬い値を示した。アミロース含量とパンの硬さや硬化速度との間には有意な正の相関 ( $p < 0.01$ ) があつた (Table 3-4A)。 *A1k* 対立遺伝子を持つ越のかおりと収 8515 のデータを除くと、アミロース含量とパンの硬さや硬化速度との間の相関係数は高くなつた (Table 3-4B)。 *Wx<sup>a</sup>* 対立遺伝子を持つ品種の間では、台中在来 1 号や夢十色から作られたパンは、ホシニシキやホシユタカ、収 8414、モミロマンから作られたパンと比較して硬かつた (Table 3-3)。しかし、これらの品種間のアミロース含量は同程度であつた (Table 3-1)。 *Wx<sup>a</sup>* 対立遺伝子を持つ品種間では、アミロース含量とパンの硬さ値との間には有意な相関は見られなかつた (Table 3-4C)。しかし、最高粘度や最低粘度、最終粘度、セットバックとは相関が見られた ( $p < 0.01$ )。

### 3-2-4 日本晴準同質遺伝子系統から作られた米粉パン

日本晴と、Kasalath の *Wx* (GBSSI) を含む染色体を持つ NIL(*Wx<sup>a</sup>*)、Kasalath の *A1k* (SSIIa) を持つ NIL(*A1k*)、Kasalath の *Wx* と *A1k* の両方を持つ NIL(*Wx<sup>a</sup>,A1k*) の、3 種の NIL を用いた。損傷デンプン含量や平均粒径、タンパク質含量は大きく異なつてはいなかつた (Table 3-1)。NIL(*Wx<sup>a</sup>*) と NIL(*Wx<sup>a</sup>,A1k*) のアミロース含量は、日本晴や NIL(*A1k*) のアミロース含量と比較して高かつた。NIL(*A1k*) と NIL(*Wx<sup>a</sup>,A1k*) の粘度上昇開始温度は、日本晴や NIL(*Wx<sup>a</sup>*) の粘度上昇開始温度と比較して高かつた (Table 3-2)。

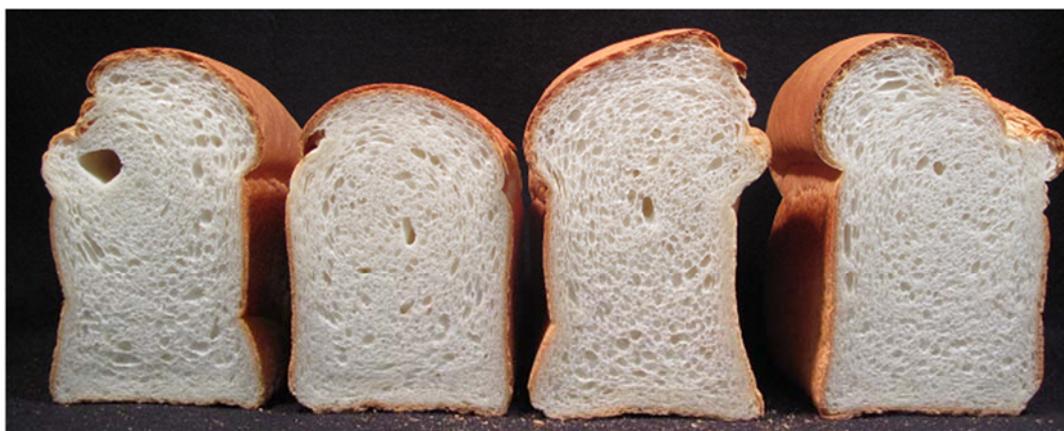
米粉の吸水は日本晴で最も高く、NIL(*Wx<sup>a</sup>,A1k*) が最も低かつた (Table 3-5)。生地の弱化度は日本晴が全ての NIL より高かつたが、生地の形成時間や生地の安定度は日本晴の値が特に高い傾向は見られなかつた。

NIL( $W_{x^a}$ )と NIL( $W_{x^a}, A/k$ )から作られた米粉パンは、日本晴や NIL( $A/k$ )から作られたパンと比較してケービングが少なかった (Figure 3-3)。パンの比容積は NIL( $W_{x^a}, A/k$ )で最も高く、NIL( $W_{x^a}$ )で最も低かった (Figure 3-4A)。NIL( $W_{x^a}, A/k$ )から作られた製パン後 1~3 日のいずれにおいても最も硬い値であった (Figure 3-4B)。パンの硬化速度については、全ての NIL がコシヒカリの値よりも高かった。さらに、NIL( $A/k$ )から作られたパンは、製パン 1 日目においては NIL( $W_{x^a}$ )から作られたパンと同等であったが、パンの硬化速度の値は NIL( $A/k$ )から作られたパンの方が高かった。

Table 3-5 Dough properties of near-isogenic lines (NILs) of Nipponbare

	Water absorption (%)	Development time (min)	Stability (min)	Degree of softening [FU]
Nipponbare	64.6	1.4	1.0	184
NIL( $Wx^a$ )	63.1	1.4	0.9	138
NIL( $Alk$ )	63.5	1.5	1.2	142
NIL( $Wx^a, Alk$ )	62.1	1.4	1.3	145

FU : Farinograph units



Nipponbare

NIL( $Wx^a$ )

NIL( $Alk$ )

NIL( $Wx^a,Alk$ )

Figure 3-3 Shapes of rice breads made from Nipponbare and near-isogenic lines

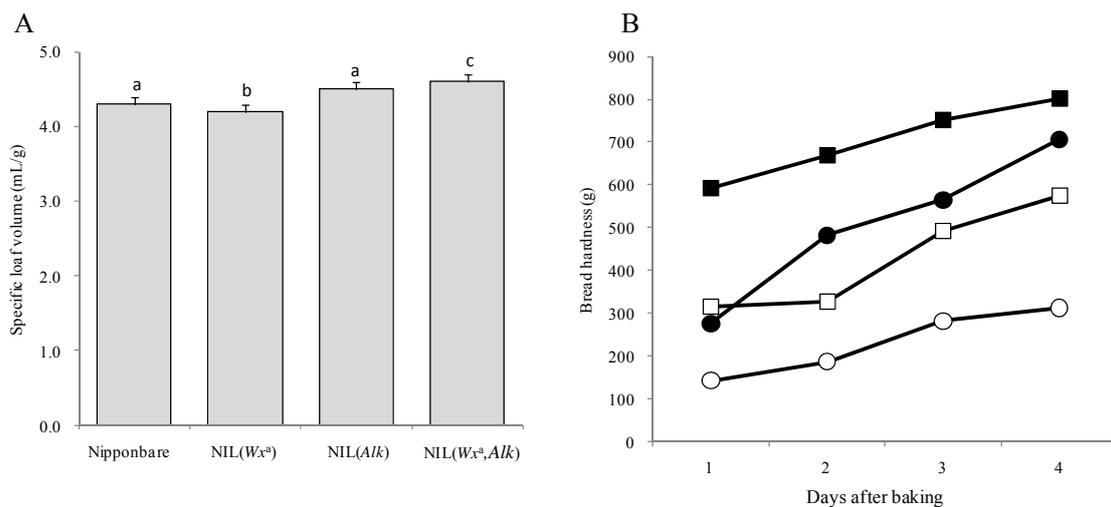


Figure 3-4 Properties of breads made from Nipponbare near-isogenic lines (NILs)

(A) Specific loaf volume of the breads. Vertical bar shows the SD of each value (n = 4). Mean values with the same letter are not significantly different at  $p < 0.05$  (Tukey's range test).

(B) Hardness of the breads. Closed squares; NIL( $Wx^a,Alk$ ), closed circles; NIL(*Alk*), open squares; NIL( $Wx^a$ ), open circles; Nipponbare.

### 3-3 考察

粒度が小さく、損傷デンプン含量が低いことが米粉パン向きの米粉の重要な指標である (Araki et al., 2009)。本研究では、2種類の製粉法により得られた試料を用いた。損傷デンプン含量と平均粒径が試料間で異なっていたが、損傷デンプン含量は6%以下であり、平均粒径は50 $\mu$ m以下であった (Table 3-1)。このことから、これらの試料はデンプン特性と米粉パンの品質との関係性を評価するのに適している。

アミロース含量と比容積やパンの硬さとの間に有意な相関が見られ (Table 3-4A)、これらの結果は過去の報告と一致する (高橋ら, 2009)。ミルキークイーンや奥羽405号などアミロース含量が低い品種から作られたパンは柔らかかったが (Table 3-3)、ケービングしやすかった (Figure 3-2)。このことは、低アミロース品種はパンの形状が劣るために米粉パンには不適であることを示す。逆に、 $Wx^a$ 対立遺伝子を持ちアミロース含量が高い品種から作られたパンはケービングが少なかったが (Figure 3-2, 3-3)、アミロース含量が中程度の品種から作られたパンと比較して硬かった (Figure 3-4, Table 3-3)。このことは、高アミロース品種はパンが硬すぎるために米粉パンには不適であることを示す。このため、 $Wx^b$ 対立遺伝子を持ち、アミロース含量が中程度の品種が米粉パンに適する。

アミロペクチン側鎖にも品種間差が見られた。ほぼ全ての米のアミロペクチンはL型とS型の2種類に分類される (Nakamura et al., 2002)。S型のアミロペクチンは短鎖(重合度<10)がL型のアミロペクチンより多い。SSIIaをコードする $A1k$ 対立遺伝子がアミロペクチン構造や糊化に関与している (L型:  $A1k$ 、S型:  $a1k$ ) (Umemoto and Aoki, 2005)。本研究では、収8515とNIL( $A1k$ )、NIL( $Wx^a, A1k$ )が $A1k$ 対立遺伝子を持っており、粘度上昇開始温度が高かった (Table 3-2)。NIL( $Wx^a$ )とNIL( $A1k$ )、NIL( $Wx^a, A1k$ )の米粉の吸水は日本晴と比較して低かったこと (Table 3-5)は、アミロース含量とアミロペクチン構造が生地の吸水に関わっていることを示唆する。 $A1k$ 遺伝子座の遺伝子型は炊飯米の食味に影響する (Umemoto et al., 2008)。炊飯直後にはNIL( $A1k$ )と日本晴の硬さは同程度であるが、保存中にNIL( $A1k$ )は日本晴よりも硬くなる。これはデンプンの老化が原因である。本研究では、 $A1k$ 対立遺伝子を持つ品種から作られたパンは $a1k$ 対立遺伝子を持つ品種から作られたパンより硬くなりやすい事を示した (Table

3-3、Figure 3-4B)。これらの結果は、アミロペクチン構造がパンの硬さにも影響し、*alk* 対立遺伝子を持つ品種が米粉パンに適する事を示す。日本でのほとんどの品種は *alk* 対立遺伝子を持つ。しかし、これらの品種を用いても、小麦粉のパンより硬くなりやすい。デンプン枝付け酵素 I の変異体など (Sato et al., 2003)、一般品種よりも糊化温度が低い品種を用いることで、米粉パンが硬くなりやすく適しているかもしれない。さらなる研究により、低糊化温度とパンの物性との関係が明らかになるであろう。

高アミロース米では、アミロペクチンの超長鎖が存在するが、中程度や低アミロースの米では超長鎖の含量は低い、もしくはほとんど含まれていない (Hizukuri et al., 1989)。夢十色と台中在来 1 号の超長鎖含量 (>10%) は、ホシニシキやホシユタカより高い(5%–7%) (Horibata et al., 2004; Inouchi et al., 2005)。そして、超長鎖は炊飯米の物性の重要な決定因子である (Radhika Reddy et al., 1993)。さらに、超長鎖含量と RVA のセットバックとの間に有意な正の相関があることが報告されている (Aoki et al., 2006; Inouchi et al., 2005)。本研究で用いた、*Wx<sup>a</sup>* 対立遺伝子を持つ品種・系統の間では、セットバックとパンの硬さとの間に有意な正の相関が見られたものの、アミロース含量とパンの硬さとの間には有意な相関は見られなかった (Table 3-4C)。これらの結果は、デンプンの老化程度を反映するセットバックが保存中のパンの硬さに現れていることを示唆し、*Wx* の遺伝子型が同じ場合には、アミロース含量よりもアミロペクチンの超長鎖含量の方がパンの硬さに影響していることを示唆する。高アミロース米を米粉パンに用いる際には、超長鎖含量が中程度の品種が適している。

損傷デンプン含量と比容積との間に有意な相関が見られなかった (Table 3-4)。この結果は Araki らの報告 (2009) と合致しない。これは、損傷デンプン含量や平均粒径の幅が小さかったためと考えられる。Araki らの報告では損傷デンプン含量の範囲が 1.0%~22.1% であり、平均粒径の範囲は 5.6  $\mu\text{m}$ ~115.9  $\mu\text{m}$  であった。本研究では、損傷デンプン含量の範囲は 1.4%~5.1% であり、平均粒径は 13.3  $\mu\text{m}$ ~47.6  $\mu\text{m}$  であった (Table 3-1)。北陸粉 232 号やほしのこは粉質米品種であり、粉にやりやすく高い比容積のパンを作ることができる (Ashida et al., 2010)。しかし、北陸粉 232 号やほしのこから作られた米粉パンは高い比容積を示していなかった (Table 3-3)。この結果は、これらの品種の米粉の損傷デンプン

含量が他の品種の米粉より低くなかったためと考えられる (Table 3-1)。これらの結果は、損傷デンプン含量や平均粒径の違いが大きくない時には、アミロースやアミロペクチンの方がよりパンの性質を決定する重要な要因であることを示す。タンパク質含量と比容積や硬さとの間には、*Wxa* 対立遺伝子を持つ品種間のみで調査した場合を除き、相関が見られなかった (Table 3-4,  $p > 0.05$ )。この結果は、米の種子貯蔵タンパク質は米粉パンにおいてはデンプンよりも重要度が低いことを示唆する。

米粉の不利な点の一つは価格の高さである。多収性品種を使用することにより、米の生産コストが下がることが期待されている。べこごのみ、北陸飼 209 号、ほしあおば、きたあおば、ミズホチカラ、モミロマン、西海 198 号、タカナリ、やまだわらは多収性品種である。これらの品種の多くは食味に劣るために飼料などに用いられている。本研究で得られた結果から、多収性品種であっても中程度のアミロース含量で、糊化温度が低い品種を用いれば食味の面でもコストの面でも米粉パンに適していることを示唆する。

イネにおいては登熟期の気温が低いとアミロース含量が高くなることが知られていることから (Asaoka et al., 1984)、晩生品種を用いるか気温の低い地域で栽培された米を使うことで、ケービングの少ないパンの製造に適した米粉が得られることを示唆する。なお、適度な柔らかさを持ち、風味の良い米粉パンを作るための米粉特性の解明はまだ十分ではない。パンの硬さに影響するデンプンの粘度上昇開始温度、米粉の粉体特性等々の解明を進め、さらに米粉パンに適する品種特性と適性品種を見いだす必要がある。

### 3-4 まとめ

様々なアミロース含量やアミロペクチン構造を持つ 26 品種を用いて米粉の性質とグルテン添加米粉パンの品質を調べ、品種間差を比較した。高アミロース含量の品種から作られた米粉パンケービングが少なく、アミロース含量と比容積との間には有意な正の相関が見られた ( $p < 0.01$ )。アミロース含量とパンの硬さとの間にも正の相関が見られた。しかし、高アミロース含量の品種の中でもアミロペクチンの超長鎖含量が高い品種は、アミロース含量の差は小さかったにもか

かわらず、超長鎖含量が中程度の品種よりも硬くなりやすかった。高糊化温度の品種から作られた米粉パンは低糊化温度の品種から作られたパンより硬くなりやすかった。日本晴を遺伝的背景とする、*Wx* 遺伝子座と *Alk* 遺伝子座に関する 3 系統の準同質遺伝子系統 (NIL) を用いたところ、これらの NIL の米粉は吸水が少なく、パンの硬さ値が日本晴より高かった。これらの結果は、アミロース含量やアミロペクチン構造が、水の吸収やパンの体積、パンの硬さなど、生地やパンの品質に影響していることを示し、中程度のアミロース含量を持ち、糊化温度の低い品種が適していることが示された。

## 第4章 短いアミロペクチンを持つ変異体は米粉パンの老化が抑制される

米粉パンは製パン直後には特有のモチモチとした食感があり、多くの人に好まれる。しかし、米粉パンは保存中に小麦粉パンより硬くなりやすい（老化しやすい）という問題点がある。パンは製造してから常温で数日経過してから食べられることもあるため、パンの老化は商品価値の低下をもたらす。そのため、米粉パンの老化が早い特性は、食品流通の観点から米粉パンの利用促進を考える際に解決すべき重要な課題の一つとなっている。

パンの老化には様々な要因が関わっているが、デンプンの性質が強く影響している (Gray and Bemiller, 2003; Morgan et al., 1997)。デンプンは、アミロースとアミロペクチンという2つの成分から構成されている。生デンプンは二重らせんによりクラスターを形成し、密に詰まっており、デンプン粒は非結晶領域と半結晶領域から構成される (Donald, 2001)。デンプンは水分の存在下で加熱すると結晶が崩れることにより糊化する。この糊化の温度はアミロペクチンの構造に依存している (Jane et al., 1999)。糊化デンプンが冷却されると、デンプンの直鎖領域が部分的に再結晶化する。これをデンプンの老化と呼び、パンの老化にも主要な役割を果たしていると信じられている (Bosmans et al., 2013; Hug-Iten et al., 2003)。アミロースとアミロペクチンの双方がデンプンの老化に関わるが、アミロースが数時間で老化するのに対し、アミロペクチンは数日にわたって老化する (Miles et al., 1985; Ribotta and Le Bail, 2007)。そのため、パンの長期間の老化は、アミロペクチンによって生じていると推測した。

米のアミロペクチンはデンプン合成酵素 IIa 活性の有無により、主に S 型と L 型に分類される (Nakamura et al., 2002)。S 型のアミロペクチンは L 型のアミロペクチンより短鎖割合が高く、デンプンの糊化温度が低い (Umemoto et al., 2004)。第4章で示したとおり、L 型アミロペクチンを持つ品種は、グルテン添加米粉パンが硬くなりやすい (Aoki et al., 2012)。そのため、一般品種よりさらにアミロペクチンの短鎖割合の低い品種を用いれば、硬くなりにくい米粉パンを作ることができるのではないかという仮説を立てた。デンプン枝付け酵素 I の変異体がイネで見つかっており、この変異体はアミロペクチンの短鎖割合がコシヒカリ等の S

型アミロペクチンを持つ品種よりも高いことが示されている (Okamoto et al., 2013; Satoh et al., 2003)。ここでは、これらのアミロペクチン短鎖比率の高い 3 変異体品種 (秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai) を用いることで、硬くなりにくいグルテンフリー米粉パン、グルテン添加米粉パンが得られたので報告する。

#### 4-1 材料および方法

##### 4-1-1 供試材料と米粉調製

アミロペクチン側鎖の短い品種として、秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai を用いた。比較品種としては、コシヒカリを用いた (Table 4-1)。早不知 D と Kurnai はデンプン枝付け酵素 I の自然変異体である。デンプン枝付け酵素 I の塩基配列に違いが見られなかったことから (Okamoto et al., 2013)、同祖の変異であると考えられている。秋田酒 44 号は $\gamma$ 線照射により得られた変異体であり、デンプンリン酸化酵素の変異である (岡本和之 et al., 2013a)。精白米をペクチナーゼ処理後に気流粉碎器で粉碎することにより、米粉を調整した。

##### 4-1-2 遺伝子型の決定

全 DNA は珪藻土とスピンフィルターを用いて抽出した (Tanaka and Ikeda, 2002)。Wx 遺伝子座と A1k 遺伝子座の対立遺伝子は、第 3 章に示した方法と同様の方法で決定した。

##### 4-1-3 米粉特性

米粉の粒度、損傷デンプン含量、アミロース含量、タンパク質含量、糊化粘度特性の測定は、第 3 章に示した方法と同様に行った。糊化温度は示差走査熱量計 (DSC) により測定した。プラチナパンに 10mg の米粉と 25  $\mu$  L の蒸留水を入れ、DSC7 (PerkinElmer Inc., Waltham, USA) を用い、10 °C から 100 °C まで 10 °C/min で加熱した。吸熱ピークを示した時の温度を糊化温度とした。

##### 4-1-4 製パンと比容積・硬さの評価

グルテンフリー米粉パンとグルテン添加米粉パンを作成した。グルテン添加

米粉パンは第3章に示したとおり、米粉80%、グルテン20%のミックス粉を使用した。

グルテンフリー米粉パンの作成にあたっては、米粉80%とタピオカデンプン20%のミックス粉を使用した。ミックス粉100%に対し、2%のヒドロキシプロピルメチルセルロース（信越化学）、砂糖8%、脱脂粉乳4%、食塩2%、ショートニング7%、ドライイースト4%、水105%を添加して混捏した。400gの生地を37℃、湿度70%で約1時間発酵させた。200℃で20分間焼成した。

パンの比容積、パン硬さの測定は第3章と同様に行った。食味検定は、製パン2日後に1.4cmにスライスしたパンを用いて行い、コシヒカリの米粉パンを比較に用いた。グルテン入り米粉パンでは32名が参加し、グルテンフリー米粉パンで27名が参加した。

## 4-2 結果

### 4-2-1 米粉特性

平均粒径はサンプル間で大きな違いはなく、損傷デンプン含量はいずれの試料でも3%以下であった（Table 4-1）。コシヒカリの値が最も小さく、Kurnaiが最も高かった。Kurnaiのアミロース含量はコシヒカリとほぼ同等であったが、秋田酒44号と早不知Dのアミロース含量はコシヒカリより約2%高かった。アミロース合成に関わるWx遺伝子の遺伝子型はいずれもWx<sup>b</sup>型（日本型）であった（データ示さず）。タンパク質含量は、早不知Dが他の品種よりやや高い値であった。吸水率については、秋田酒44号と早不知Dはコシヒカリと同程度であったが、Kurnaiはわずかに高かった。

DSCにより測定された秋田酒44号の糊化温度は、コシヒカリより約3℃低く、早不知DとKurnaiは約4℃低かった（Table 4-2）。RVAにより測定された粘度上昇開始温度については、秋田酒44号はコシヒカリより約2℃低く、早不知DとKurnaiは約3℃低かった（Table 4-3）。

Table 4-1 Properties of rice flour samples

	Average particle size ( $\mu\text{m}$ ) <sup>a</sup>	Damaged starch content (%) <sup>b</sup>	Amylose content (%) <sup>b</sup>	Protein content (%) <sup>b</sup>	Water absorption (%)
Koshihiakri	32.9	1.9 $\pm$ 0.1 d	18.0 $\pm$ 0.2 b	5.1 $\pm$ 0.1 c	77.4
Akita Sake 44	30.3	2.4 $\pm$ 0.1 c	20.2 $\pm$ 0.4 a	5.1 $\pm$ 0.2 c	77.1
Hiderishirazu D	31.3	2.7 $\pm$ 0.1 b	20.7 $\pm$ 0.2 a	7.0 $\pm$ 0.0 a	77.1
Kurnai	34.9	3.0 $\pm$ 0.1 a	17.6 $\pm$ 0.3 b	5.9 $\pm$ 0.1 b	79.3

<sup>a</sup> Means of two replicates are shown.

<sup>b</sup> Means and standard deviations from three replicates are shown. Means  $\pm$  standard deviations with the same letter are not significantly different from each other ( $p < 0.05$ , Tukey's test).

Table 4-2 Differential scanning calorimetry (DSC) values

	To (°C)	Tp (°C)	Te (°C)	ΔH (J/g)
Koshihiakri	63.5 ± 0.2 a	69.9 ± 0.3 a	76.6 ± 0.3 a	12.6 ± 0.3 a
Akita Sake 44	58.1 ± 0.6 b	66.8 ± 0.1 b	75.0 ± 0.1 b	11.6 ± 0.1 ab
Hiderishirazu D	56.4 ± 0.6 c	65.2 ± 0.1 c	73.9 ± 0.2 c	10.4 ± 0.5 c
Kurnai	56.7 ± 0.9 bc	65.8 ± 0.4 c	74.5 ± 0.3 bc	11.3 ± 0.6 b

Means and standard deviations from three replicates are shown. Means ± standard deviations with the same letter are not significantly different from each other ( $p < 0.05$ , Tukey's test).

Table 4-3 Rapid Visco Analyzer (RVA) viscosity values

	Maximum viscosity (RVU)	Minimum viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Pasting temperature (°C)
Koshihiakri	525 ± 2 a	211 ± 1 b	363 ± 0 c	68.8 ± 0.8 a
Akita Sake 44	416 ± 5 d	243 ± 14 ab	407 ± 10 b	66.4 ± 0.7 b
Hiderishirazu D	453 ± 3 c	275 ± 15 a	436 ± 2 a	65.7 ± 0.7 b
Kurnai	496 ± 12 b	244 ± 15 ab	408 ± 14 b	65.2 ± 0.4 b

Means and standard deviations from three replicates are shown. Means ± standard deviations with the same letter are not significantly different from each other ( $p < 0.05$ , Tukey's test).

#### 4-2-2 アミロペクチン構造

Figure 4-1 は、秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai のアミロペクチン鎖長分布とコシヒカリの鎖長分布との差分を示す。3 変異体のいずれにおいても、アミロペクチンの短鎖比率がコシヒカリより高く、中鎖比率が高いことが示された。早不知 D と Kurnai の間ではアミロペクチンの鎖長分布は似ていた。しかし、秋田酒 44 号については、重合度 8~15 のアミロペクチン鎖は早不知 D や Kurnai より高く、重合度 16~36 のアミロペクチン鎖は低かった。

#### 4-2-3 米粉パンの形状

秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai より作られたグルテンフリー米粉パンの高さと比容積は、コシヒカリの米粉パンよりいずれも低い値となった (Figure 4-2A、Table 4-4)。グルテン添加米粉パンについては、秋田酒 44 号の米粉パンはコシヒカリの米粉パンと比較して同程度の高さとなり、比容積は高い値となった (Figure 4-2B、Table 4-4)。早不知 D と Kurnai の米粉パンについては、コシヒカリの米粉パンと比較して、高さ と 比容積ともに低い値を示した。

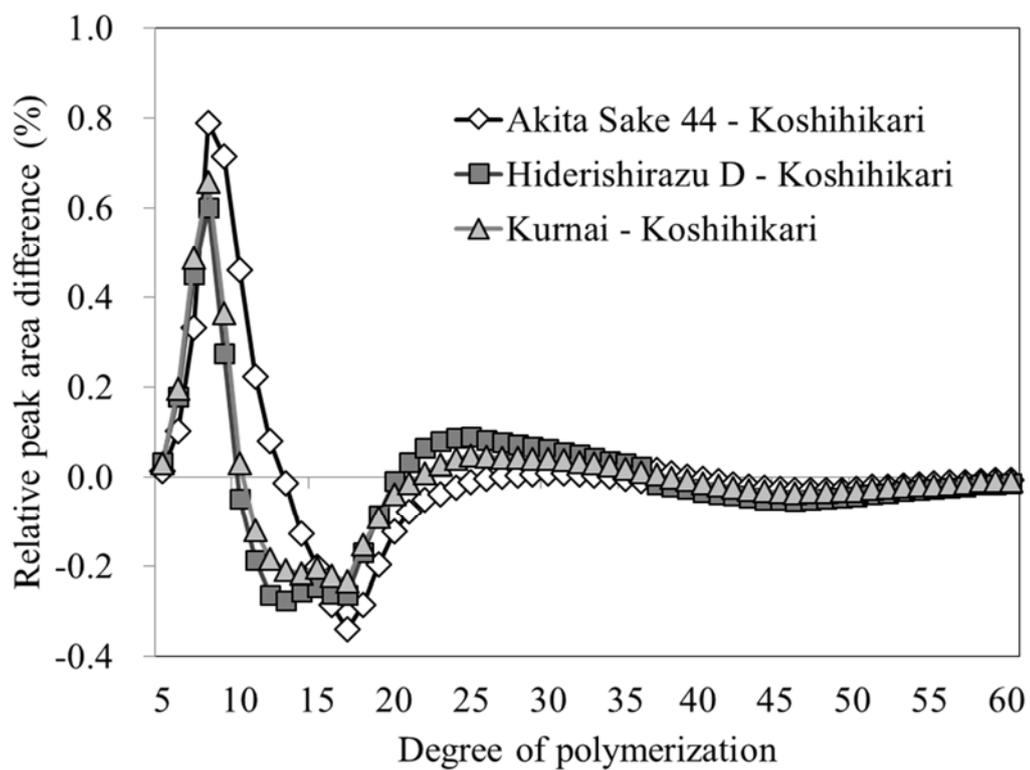


Figure 4-1 Differences in the chain-length distribution of isoamylase-debranched starches relative to 'Koshihikari'

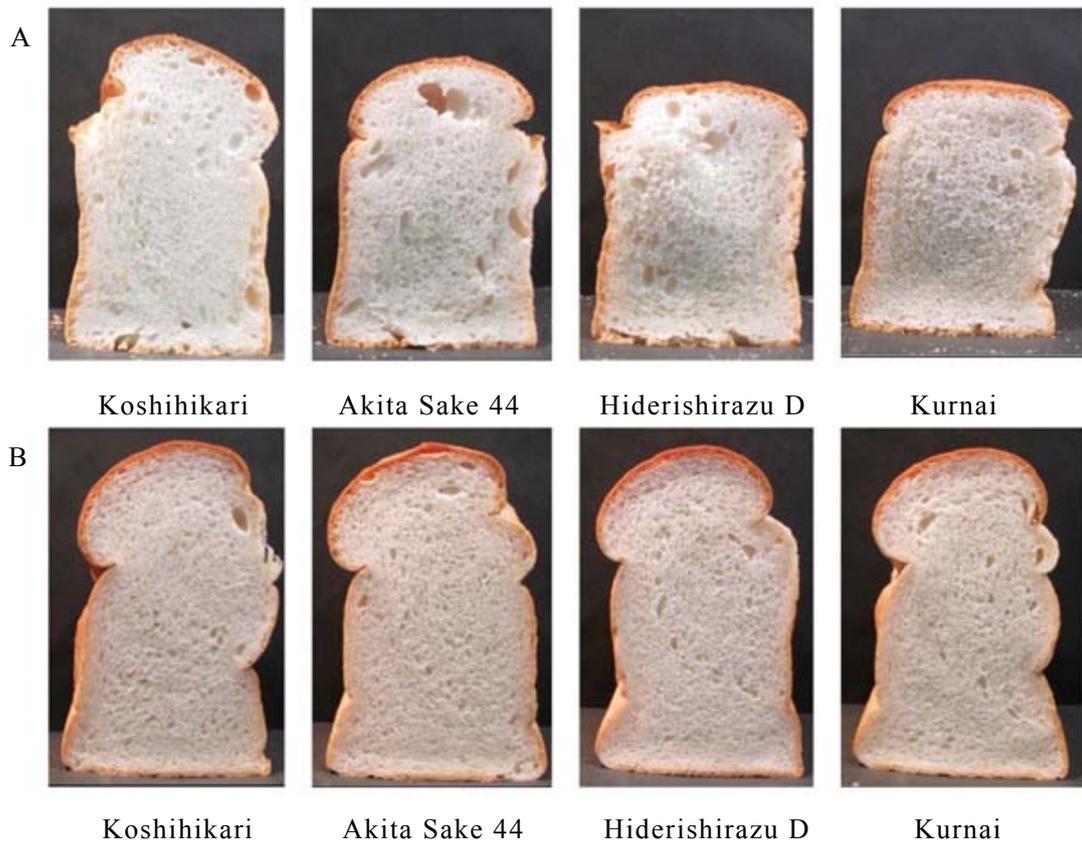


Figure 4-2 Shapes of gluten-free bread and gluten-containing bread

A: Gluten-free bread, B: Gluten-containing bread

Table 4-4 Loaf volumes and heights of rice breads

	Gluten-free bread		Gluten-containing bread	
	Specific loaf volume (mL/g)	Bread height (cm)	Specific loaf volume (mL/g)	Bread height (cm)
Koshihikari	4.3 ± 0.1 a	12.6 ± 0.4 a	3.9 ± 0.1 b	13.2 ± 0.2 a
Akita Sake 44	3.9 ± 0.2 b	11.6 ± 0.5 a	4.2 ± 0.1 a	13.2 ± 0.1 a
Hiderishirazu D	3.6 ± 0.1 b	10.1 ± 0.1 bc	3.9 ± 0.0 b	12.6 ± 0.3 b
Kurnai	3.8 ± 0.1 b	10.5 ± 0.1 b	3.7 ± 0.0 c	12.1 ± 0.1 c

Means and standard deviations from three replicates are shown.

Means ± standard deviations with the same letter are not significantly different from each other ( $p < 0.05$ , Tukey's test).

#### 4-2-4 米粉パンの硬さ

製パン後1日～3日のパンの硬さ変化を硬化速度とし、品種ごとに比較した。その結果、秋田酒44号、早不知D、Kurnaiから作られたグルテンフリー米粉パンの硬化速度は、コシヒカリの米粉パンと比較して、それぞれ39%、22%、14%となった。製パン1日後のグルテンフリー米粉パンの硬さは、Kurnaiでコシヒカリより有意に低い値となったものの、秋田酒44号と早不知Dについてはコシヒカリとは有意な差は見られなかった（Figure 4-3A）。製パン2日目と3日目においては、秋田酒44号、早不知D、Kurnaiのパンの硬さは、いずれもコシヒカリより有意に低い値となった。コシヒカリ、秋田酒44号、早不知D、Kurnaiの米粉パンの硬化速度は、それぞれ175.6、68.9、38.7、24.9（g/日）であった。

秋田酒44号、早不知D、Kurnaiから作られたグルテン添加米粉パンの硬化速度は、コシヒカリの米粉パンと比較して、それぞれ27%、16%、13%となった。しかし、製パン1日後において、秋田酒44号、早不知D、Kurnaiの米粉パンの硬さは、コシヒカリとは有意差はなかった（Figure 4-3B）。製パン2日目と3日目においては、秋田酒44号、早不知D、Kurnaiのパンの硬さは、いずれもコシヒカリより有意に低い値となった。コシヒカリ、秋田酒44号、早不知D、Kurnaiの米粉パンの硬化速度は、それぞれ53.9、14.6、8.7、7.2（g/日）であった。どの品種についても、グルテンフリー米粉パンはグルテン添加米粉パンより硬化速度が高かった。

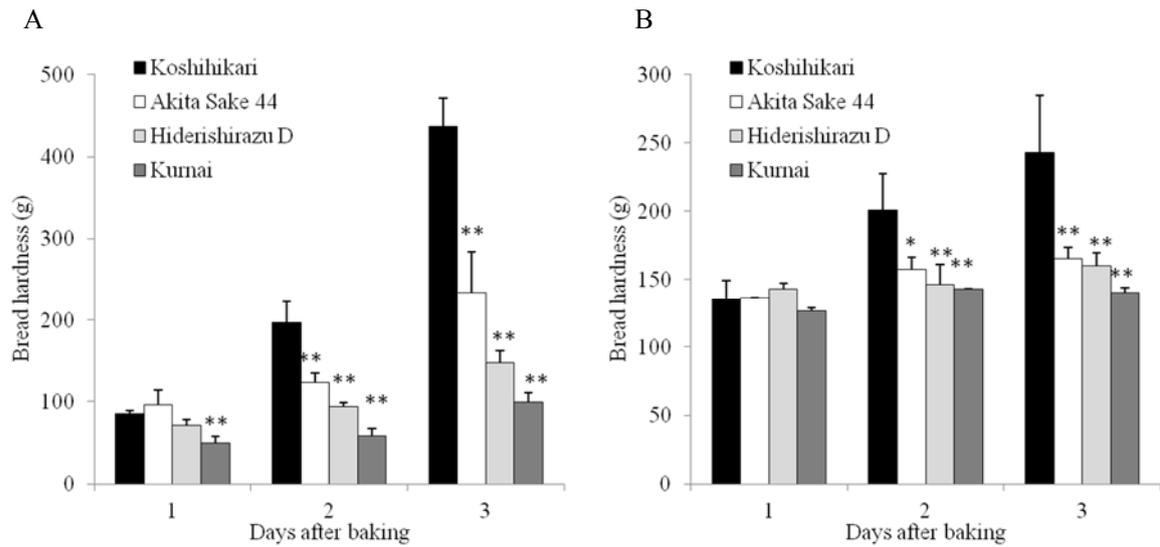


Figure 4-3 Bread hardness

A: Gluten-free bread, B: Gluten-containing bread

\* and \*\* indicate significant differences ( $p < 0.05$ ) and ( $p < 0.01$ ), respectively

(Dunnett's test). The values of 'Koshihikari' were used as a reference

#### 4-2-5 米粉パンの食味検定

Figure 4-4 は、コシヒカリの米粉パンを基準とした、秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai の米粉パンの柔らかさを示す。秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai のグルテンフリー米粉パンについて柔らかさの評価値の平均は、秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai でそれぞれ+1.04、+0.78、+1.56 であった。柔らかさの最頻値は、秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai でそれぞれ+1、+1、+2 であった。

グルテン添加米粉パンについて柔らかさの評価値の平均は、秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai でそれぞれ+0.06、+0.50、+1.13 であった。柔らかさの最頻値は、秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai でそれぞれ±0 と+1、+1、+1 であった。食味総合値については、グルテンフリー米粉パン、グルテン添加米粉パンの双方でばらついていた（データ示さず）。

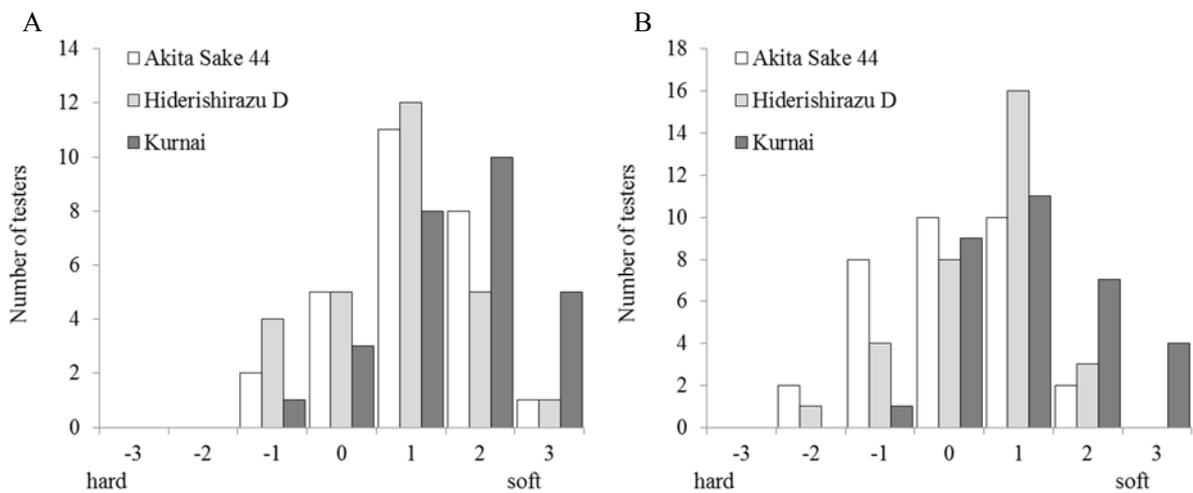


Figure 4-4 Sensory evaluation of bread made from three cultivars with low gelatinization temperatures compared with bread made from ‘Koshihikari’ as a reference.

A: Gluten-free bread, B: Gluten-containing bread

Softness was scored from -3 (very hard) to 3 (very soft) with that of Koshihikari designated as 0.

#### 4-3 考察

本研究では、秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai のアミロペクチン鎖はコシヒカリと比較して、短鎖の割合が高かった (Figure 4-1)。他の成分等についてはコシヒカリと大きな違いがなかったことから (Table 4-1)、本研究で用いた米粉試料は、アミロペクチン側鎖とパンの特性との関係を調査するために有用な材料であることを意味する。

アミロース含量とパンの比容積との間には正の相関があることが過去に報告されている (Aoki et al., 2012; Lee et al., 2001; 高橋 et al., 2009)。しかし、本研究ではアミロース含量に大きな違いがないにも関わらず (Table 4-1)、パンの比容積が有意に異なっていた (Figure 4-2、Table 4-4)。この結果は、アミロペクチン構造がパンの形状に影響することを示唆する。パンの形状が異なる理由として、糊化温度の違いが考えられる。アミロペクチンの変異体は糊化温度が低いため、生地の中の泡が焼成中の早い段階で安定化するのかもしれない。

スライスしたパンの圧縮試験の結果から、秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai の米粉パンはコシヒカリの米粉パンより著しくパンの硬化が遅いことが明らかとなった。(Figure 4-3)。食味検定の結果は圧縮試験と同様の結果であった (Figure 4-4)。アミロース含量とパンの硬さとの間には有意な正の相関がある (Aoki et al., 2012; 高橋 et al., 2009)。しかし、本研究で用いた試料はアミロース含量の違いは小さかった (Table 4-1)。これらの結果は、グルテンフリー米粉パンとグルテン添加米粉パンの双方において、アミロペクチンがパンの硬化を遅くすることに影響を及ぼしていることを示唆している。秋田酒 44 号と、早不知 D や Kurnai との間にも硬化速度の違いについても、アミロペクチンの構造の違いであると考えられる (Figure 4-1)。どのアミロペクチン鎖がパンの硬さに決定的な役割を果たしているかを明らかにするためにはさらなる研究が必要であるが、糊化温度がデンプンの老化度と正の相関があることから (Vandeputte et al., 2003)、パンの硬さにも関与していることが考えられる。

本研究で用いた秋田酒 44 号、早不知 D、Kurnai の 3 品種は、硬くなりにくい米粉パンを作ることができることから (Figure 4-3)、パン以外のグルテンフリーの製品に向いているとも言える。増粘多糖類を加えることによりグルテンフリーパンの老化を抑えることができることが報告されているが (Gómez et al., 2003)、

これらの品種はデンプン自体の老化を抑えられることから、増粘多糖を加えない製品にも応用できる。ただ、これらの品種を普及させるためには改善の余地がある。早不知 D と Kurnai は陸稲品種であり、出穂日が早いために栽培適地が限られる。秋田酒 44 号は日本酒用の品種であり、一般的な水稻品種とはことなるためである。デンプン枝付け酵素 I の変異を検出する DNA マーカーは開発されている (Okamoto et al., 2013)。そのため、硬くなりにくい米粉パンを選抜するマーカーとして用いることができる。秋田酒 44 号はデンプンリン酸化酵素の変異体であり、デンプン枝付け酵素 I の活性を持っている (岡本 et al., 2013b)。秋田酒 44 号のデンプンリン酸化酵素の塩基配列を調査することで、変異を検出する DNA マーカーが開発できるかもしれない。これらの DNA マーカーを用いることで、硬くなりにくい米粉パンに適する品種を開発することができることが期待される。

小麦粉のパンは約 3%が老化によって販売に適さなくなり (Zobel and Kulp, 1996)、経済的な損失は年に 10 億ドルと推定されている (Berkowitz and Oleksyk, 1991)。本研究では、短いアミロペクチン鎖を持つ品種を用いることで柔らかさが維持される米粉パンができることを明らかにした (Figure 4-3、4-4)。米ではデンプン枝付け酵素、デンプンリン酸化酵素の変異により、アミロペクチン鎖が短くなる (Okamoto et al., 2013; Satoh et al., 2008)。しかしながら、小麦のデンプン枝付け酵素の変異体はアミロペクチンの構造に明らかな影響をもたらしていない (Regina et al., 2004)。もし秋田酒 44 号のように、小麦でもアミロペクチン鎖の短い変異体が得られれば、硬くなりにくいパンを作ることができるようになるかもしれない。この知見は、硬くなりにくい小麦品種の育種への道筋となり、消費者や製パン業界によって大きなインパクトとなることが期待できる。

#### 4-4 まとめ

パンの老化は製パン業界にとって重大な経済的問題である。本論文では、短いアミロペクチン鎖が米粉パンの柔らかさを維持することにつながることを見いだした。胚乳デンプンのアミロペクチン短鎖の割合の高い 3 つの変異体を用いた。そのうちの 2 つはデンプン枝付け酵素 I の変異体である。パンの圧縮試験の結果、これらの品種から作られたパンの硬さは、製パン 1 日後ではコシヒカリの米粉パ

ンとほぼ同等であった。しかしパンの硬化速度はコシヒカリの米粉パンと比較して明らかに低いことが示された（グルテンフリー米粉パン：14%–39%、グルテン入り米粉パン：13%–27%）。製パン2日後に行った食味試験は、圧縮試験と同様の結果であった。アミロース含量や粒度、損傷デンプン含量の試料間の違いは、過去の報告から判断すると、製パン性に影響を与えるほどの違いではなかった。これらの結果は、アミロペクチンが短かったことが原因でパンの老化が抑えられていたことが示唆された。この知見は、柔らかさが維持できる米粉パン用品種の開発だけでなく、他の作物にも応用できる。

## 第5章 イネ登熟期の気温が米粉パンの製パン特性に与える影響

デンプンの合成は10種類以上の遺伝子により制御されている (James et al., 2003)。アミロースは、本質的には  $Wx$  遺伝子にコードされるデンプン粒結合性デンプン合成酵素 I のみにより合成が制御されている。それに対し、アミロペクチンは、デンプン合成酵素 I~III、デンプン枝付け酵素 I と II、デンプン枝きり酵素など数多くの遺伝子が関与している。デンプン合成は遺伝的に高度に制御されているが、環境要因によっても影響され、登熟中の気温によりアミロース、アミロペクチンともに性質が変化することが報告されている。

イネにおいて、ジャポニカ型の  $Wx^b$  遺伝子型を持つコシヒカリなどの品種は、登熟中の気温が低いとアミロース含量は高くなることが知られている。これは、低温では  $Wx$  遺伝子の発現量が高温時より高くなることがその原因である (Hirano and Sano, 1998; Larkin and Park, 1999; Wang et al., 1995)。また、アミロースの長さも低温での登熟条件の方が長くなることが報告されている (Asaoka et al., 1987)。

アミロペクチン合成に関わる遺伝子も、登熟気温の影響を受ける。例えば、登熟気温が低いとデンプン合成酵素 I が減少すること (Jiang et al., 2003) や、デンプン枝付け酵素 IIb 活性の増加を生じること (Yamakawa et al., 2007) が報告されている。これらの酵素活性の変化のため、登熟気温が低いとアミロペクチン鎖長の短鎖割合は高くなり、それに伴って糊化温度も低くなる (Asaoka et al., 1984; Inouchi et al., 2000)。

これらのことから、登熟気温が低い条件で栽培して得られた米はアミロペクチン短鎖割合が高く（糊化温度が低く）、米粉パンに適している可能性がある。そこで、本研究では、登熟気温の低い条件での栽培された米を得るために、移植時期を遅らせることで開花日も遅らせる栽培を行った。米粉パンは製パン方法により3種類に分類されるが (興座ら, 2008)、本研究では、米粉比率が80%と高いパン（グルテン添加米粉パン）と、米粉比率が20%と低いパン（米粉混成パン）を作成し、登熟気温と製パン特性との関係を調べ、興味深い結果を得たので報告する。

## 5-1 材料および方法

### 5-1-1 供試材料と米粉調製

コシヒカリ、タカナリ、ひとめぼれを用いた。栽培年は、コシヒカリが 2009～2011 年、タカナリは 2009 年と 2011 年、ひとめぼれは 2010 年と 2011 年である (Table 5-1)。2009 年のタカナリ以外は、いずれの年度・品種においても 5 月、6 月、7 月の 3 回に分けて移植した。地上 1.5m における、開花後 20 日間の平均気温を登熟気温とした。得られた白米をペクチナーゼ溶液で 40℃、1 時間処理後、気流粉碎機 SPM-R290 (西村機械製作所) で調整された米粉を使用した。

### 5-1-2 米粉特性

米粉特性は第 2 章と同様の方法で行った。アミロペクチン側鎖の解析は Fujita らの方法を用いた (Fujita et al., 2001)。糊化粘度特性の測定には RVA を用いた。枝分かれのないアミロペクチン側鎖 (A 鎖) の重合度 (DP) は 17 以下であることから (Bertoft and Koch, 2000)、DP34 までのアミロペクチン鎖に占める DP17 以下のアミロペクチン鎖の割合を短鎖比率とした。

### 5-1-3 製パン方法と製パン特性の評価

グルテン添加米粉パンと米粉混成パンの 2 種類の米粉パンを作成した。グルテン添加米粉パンは第 3 章と同様の方法で行った。米粉混成パンの作成にあたっては、小麦粉 80%と米粉 20%のミックス粉を使用し、グルテン添加米粉パンと同様にノータイム法により作成した。米粉混成パンについては、5 月移植と 7 月移植の米についてのみ用いて作成した (Table 5-4)。

パンの比容積と硬さの測定についても前章までと同様に行った。食味検定は、製パン 2 日後に約 20 名により行った。5 月移植の米粉パンと 7 月移植のコシヒカリの米粉パンについて行った。対照として、グルテン添加米粉パンの検定では薄力米粉 (波里) で作成した米粉パンを用い、米粉混成パンでは小麦粉のパンを用いた。

## 5-2 結果

### 5-2-1 登熟気温

栽培したイネの移植日、出穂日と登熟気温を Table 5-1 に示す。栽培年度によって登熟気温は異なっていたが、どの年度においても、7月に移植したイネの方が5月に移植したイネより登熟気温が低かった。

### 5-2-2 米粉特性

Table 5-2 に米粉特性と、登熟気温との相関を示す。米粉の平均粒度は 26.0～39.7  $\mu\text{m}$  の範囲であり、登熟気温との有意な相関は見られなかった ( $p>0.05$ )。損傷デンプン含量は登熟気温と有意な正の相関があったが、1.7～3.4%と、いずれも低い値であった。タンパク質含量は 5.1～9.7%であり、登熟気温と有意な負の相関があった ( $r = -0.78, p<0.01$ )。アミロース含量は 15.1～22.9%であり、登熟気温と有意な負の相関 ( $r = -0.87, p<0.01$ ) があった。アミロペクチンの短鎖比率 (重合度 17 以下の鎖の比率) 77.6～81.5%であり、登熟気温と有意な負の相関 ( $r = -0.80, p<0.01$ ) があった。

米粉の糊化粘度特性は RVA により求めた (Table 5-3)。粘度上昇開始温度は 65.3～73.1 $^{\circ}\text{C}$  と試料間で比較的差が小さかったが、登熟気温と有意な負の相関 ( $p<0.01$ ) が見られ、相関係数は -0.95 となった。最高粘度と最終粘度は登熟気温と有意な相関が見られたが、最低粘度は有意な相関は見られなかった。

いずれの特性値も、品種によって明確な違いは見られず、登熟気温など環境の影響が大きかった。

Table 5-1 Transplanting date, heading date, temperature during ripening

Cultivar	Year	Transplanting date	Heading date	Temperature during ripening (°C) <sup>a</sup>
Hitomebore	2010	14-May	28-Jul	27.8
		17-Jun	14-Aug	28.3
		22-Jul	12-Sep	21.3
	2011	11-May	29-Jul	27.0
		9-Jun	12-Aug	25.7
		9-Jul	2-Sep	25.6
Koshihiakri	2009	14-May	7-Aug	25.3
		18-Jun	24-Aug	22.5
		29-Jul	23-Sep	21.0
	2010	14-May	1-Aug	27.9
		17-Jun	15-Aug	28.4
		22-Jul	9-Sep	22.0
	2011	11-May	29-Jul	27.0
		9-Jun	12-Aug	25.7
		9-Jul	26-Aug	25.6
Takanari	2009	14-May	12-Aug	25.0
		18-Jun	31-Aug	21.3
	2011	14-May	4-Aug	26.9
		9-Jun	15-Aug	25.5
		9-Jul	7-Sep	23.7

<sup>a</sup> Mean temperature during 20 days after the heading date

Table 5-2 Properties of rice flour samples

Cultivar	Year	Transplanting month	Average particle size ( $\mu\text{m}$ )	Damaged starch content (%)	Protein content (%)	Amylose content (%)	Short chain ratio of amylopectin (%) <sup>a</sup>
Hitomebore	2010	May	26.0	2.2 $\pm$ 0.0	5.3 $\pm$ 0.0	17.0 $\pm$ 0.2	78.3
		June	27.6	2.4 $\pm$ 0.1	6.0 $\pm$ 0.0	16.2 $\pm$ 0.5	78.5
		July	29.2	2.7 $\pm$ 0.1	8.6 $\pm$ 0.0	21.9 $\pm$ 0.2	79.7
	2011	May	32.9	2.0 $\pm$ 0.0	6.4 $\pm$ 0.4	16.1 $\pm$ 0.3	77.6
		June	33.6	2.1 $\pm$ 0.0	6.3 $\pm$ 0.0	16.9 $\pm$ 0.7	78.4
		July	37.2	2.6 $\pm$ 0.1	6.6 $\pm$ 0.0	17.3 $\pm$ 0.3	79.7
Koshihiakri	2009	May	32.9	1.9 $\pm$ 0.0	5.1 $\pm$ 0.1	18.3 $\pm$ 0.2	80.2
		June	31.2	2.4 $\pm$ 0.4	6.2 $\pm$ 0.1	20.0 $\pm$ 0.3	79.8
		July	33.1	3.4 $\pm$ 0.1	9.7 $\pm$ 0.1	22.5 $\pm$ 0.2	80.7
	2010	May	27.4	2.1 $\pm$ 0.1	5.6 $\pm$ 0.2	17.0 $\pm$ 0.3	78.3
		June	29.5	1.7 $\pm$ 0.0	5.9 $\pm$ 0.0	15.1 $\pm$ 0.3	78.5
		July	38.5	2.3 $\pm$ 0.1	9.6 $\pm$ 0.1	19.3 $\pm$ 0.2	81.5
	2011	May	32.8	2.0 $\pm$ 0.0	5.8 $\pm$ 0.1	16.3 $\pm$ 0.1	79.1
		June	34.4	1.7 $\pm$ 0.0	6.4 $\pm$ 0.1	16.2 $\pm$ 0.3	79.2
		July	39.7	2.2 $\pm$ 0.1	7.2 $\pm$ 0.0	16.0 $\pm$ 0.6	79.6
Takanari	2009	May	32.2	2.1 $\pm$ 0.2	6.7 $\pm$ 0.0	17.8 $\pm$ 0.2	78.9
		June	29.1	2.7 $\pm$ 0.0	7.1 $\pm$ 0.0	22.8 $\pm$ 0.3	80.2
	2011	May	28.9	2.1 $\pm$ 0.0	5.9 $\pm$ 0.1	16.6 $\pm$ 0.8	79.0
		June	33.9	2.1 $\pm$ 0.1	7.5 $\pm$ 0.1	17.4 $\pm$ 0.6	79.2
		July	29.0	2.9 $\pm$ 0.1	8.1 $\pm$ 0.0	22.9 $\pm$ 0.5	79.9
	Correlation coefficient with ripening temperature			- 0.24	- 0.70**	- 0.78**	- 0.87**

<sup>a</sup> Short chain ratio of amylopectin was calculated as (DP 5-17)/(DP 5-34)

<sup>b</sup> The temperature at the onset of the rise in viscosity was determined as the pasting temperature.

\*\* indicates significant difference ( $p < 0.01$ ).

Table 5-3 Physicochemical properties of rice flour measured by Rapid-Visco Analyzer

Cultivar	Year	Transplanting month	Maximum viscosity (RVU)	Minimum viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Pasting temperature (°C)
Hitomebore	2010	May	604 ± 3	210 ± 18	351 ± 26	71.9 ± 0.9
		June	593 ± 18	209 ± 7	353 ± 3	73.0 ± 0.5
		July	485 ± 16	212 ± 4	414 ± 5	66.5 ± 0.8
	2011	May	516 ± 19	208 ± 9	334 ± 8	71.9 ± 0.5
		June	432 ± 8	186 ± 3	312 ± 3	70.5 ± 0.4
		July	432 ± 6	192 ± 4	323 ± 6	69.2 ± 0.1
Koshihiakri	2009	May	512 ± 21	211 ± 0	363 ± 1	70.3 ± 0.4
		June	456 ± 5	201 ± 6	360 ± 8	67.8 ± 0.0
		July	421 ± 9	197 ± 9	381 ± 6	65.3 ± 0.4
	2010	May	575 ± 1	205 ± 3	351 ± 1	72.6 ± 0.4
		June	562 ± 29	209 ± 13	357 ± 34	73.1 ± 0.8
		July	531 ± 10	201 ± 4	419 ± 1	66.7 ± 0.4
	2011	May	551 ± 5	206 ± 14	331 ± 16	72.3 ± 0.4
		June	410 ± 52	173 ± 15	293 ± 24	71.2 ± 0.8
		July	459 ± 10	189 ± 4	320 ± 7	70.7 ± 0.7
Takanari	2009	May	510 ± 57	177 ± 15	334 ± 20	69.5 ± 0.5
		June	431 ± 4	202 ± 5	391 ± 4	66.7 ± 0.5
	2011	May	505 ± 24	161 ± 9	272 ± 10	70.8 ± 0.0
		June	459 ± 16	164 ± 3	289 ± 2	70.2 ± 0.4
		July	396 ± 23	174 ± 11	342 ± 14	65.5 ± 0.4
	Correlation coefficient with temperature during ripening			- 0.61**	- 0.02	- 0.57 *

\* and \*\* indicates significant difference (p<0.05) and (p<0.01), respectively.

### 5-2-3 米粉パンの比容積、形状

グルテン添加米粉パンでは、比容積は 3.6–4.5 (mL/g) の範囲であり、登熟気温の間には有意ではないが正の相関が見られた (Table 5-4)。登熟気温の高い条件で栽培された米を用いた場合、パンが腰折れ (ケービング) しやすい傾向があった (Figure 5-1A~I)。米粉混成パンでは、比容積は 3.6–4.1 (mL/g) となり、グルテン添加米粉パンよりサンプル間の違いが小さかった。比容積と登熟気温との間には弱い負の相関が見られたが、有意な相関ではなかった。パンの形状はサンプル間で大きく異ならず、ケービングについても同程度であった (Figure 5-1J~O) 比容積とアミロース含量との間にも有意な相関は見られなかった (Table 5-4)。

Table 5-4 Loaf volumes of rice breads

Cultivar	Year	Transplanting month	Rice flour + gluten <sup>a</sup>	Wheat flour + rice flour <sup>b</sup>
Hitomebore	2010	May	4.1 ± 0.0	3.7 ± 0.0
		June	3.9 ± 0.1	-
		July	3.9 ± 0.2	3.9 ± 0.1
	2011	May	4.0 ± 0.3	3.9 ± 0.1
		June	3.9 ± 0.1	-
		July	4.2 ± 0.0	3.6 ± 0.0
Koshihiakri	2009	May	4.2 ± 0.2	4.0 ± 0.1
		June	4.2 ± 0.1	-
		July	3.8 ± 0.1	4.0 ± 0.1
	2010	May	4.1 ± 0.5	4.1 ± 0.0
		June	4.2 ± 0.1	-
		July	3.6 ± 0.1	3.9 ± 0.1
	2011	May	3.9 ± 0.3	3.8 ± 0.0
		June	4.2 ± 0.2	-
		July	3.9 ± 0.1	3.8 ± 0.0
Takanari	2009	May	4.5 ± 0.1	-
		June	3.9 ± 0.0	-
	2011	May	3.9 ± 0.3	4.0 ± 0.1
		June	4.0 ± 0.2	-
		July	3.8 ± 0.1	4.1 ± 0.0
Correlation coefficient with temperature during ripening			0.37 ns	-0.23 ns
Correlation coefficient with amylose content			-0.36 ns	0.41 ns

<sup>a</sup> Rice bread made from mixture of rice flour (80%) and wheat gluten (20%)

<sup>b</sup> Rice bread made from mixture of wheat flour (80%) and rice flour (20%)

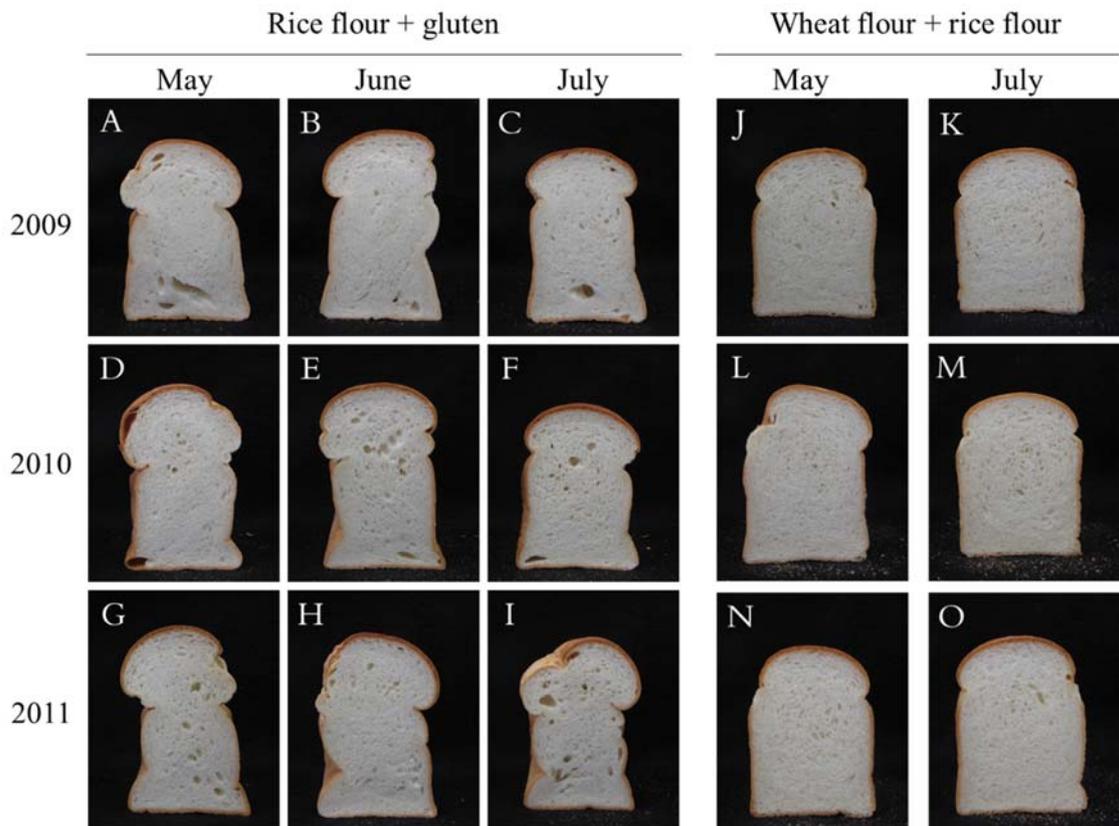


Figure 5-1 Shapes of rice breads made from rice samples obtained by varying growth conditions (transplanting time, years).

A – I: Bread made from rice flour (80%) and gluten (20%)

J – O: Bread made from wheat flour (80%) and rice flour (20%)

#### 5-2-4 米粉パンの硬さ

グルテン添加米粉パンの硬さは、製パン 1 日目では登熟気温と有意な負の相関が見られたが、製パン 2 日目では有意でない負の相関となり、製パン 3 日目では有意ではないが正の相関が見られた (Table 5-5)。米粉混成パンにおいては、いずれの日でも正の相関が見られたが、製パン後の日数が増えるほど、相関係数は高い値となった。

登熟気温とパンの硬化速度 (1 日あたりのパンの硬さ変化) についての関係を Figure 5-2 に示す。グルテン添加米粉パン、米粉混成パンのいずれにおいても、登熟気温とパンの硬化速度との間には有意な正の相関があった (Figure 5-2 A, B)。アミロース含量と硬化速度には有意な負の相関があった (Figure 5-2 C, D)。粘度上昇開始温度とパンの硬化速度にも有意な正の相関があった (Figure 5-2 E, F)。

#### 5-2-5 米粉パンの食味検定

コシヒカリを用いた米粉パンの食味検定の結果、7 月に移植して得られた米のグルテン添加米粉パンは、5 月移植して得られたパンと比較して、どの栽培年度でも柔らかい傾向があり (Figure 5-3 A~C)、いずれも有意差が見られた (データ示さず)。7 月に移植して得られた米の米粉混成パンは、5 月移植して得られたパンと比較して、やや柔らかい傾向があったが (Figure 5-3 D, E)、有意差は見られなかった (データ示さず)。総合評価においても 7 月移植して得られた米のパンがやや高い傾向があった (Figure 5-4)。

Table 5-5 Rice bread hardness

Cultivar	Year	Transplanting month	Rice flour + gluten <sup>a</sup>			Wheat flour + rice flour <sup>b</sup>		
			Day 1	Day 2	Day 3	Day 1	Day 2	Day 3
Hitomebore	2010	May	74 ± 4	115 ± 0	161 ± 13	172 ± 17	252 ± 15	352 ± 23
		June	79 ± 14	111 ± 18	172 ± 28	-	-	-
		July	104 ± 10	104 ± 12	122 ± 16	120 ± 10	173 ± 22	243 ± 32
	2011	May	83 ± 20	125 ± 24	191 ± 17	165 ± 10	268 ± 12	353 ± 9
		June	80 ± 7	102 ± 16	159 ± 9	-	-	-
		July	68 ± 8	88 ± 17	105 ± 21	182 ± 13	253 ± 19	340 ± 21
Koshihiakri	2009	May	62 ± 3	95 ± 15	128 ± 13	177 ± 5	285 ± 12	345 ± 22
		June	77 ± 3	93 ± 6	115 ± 5	-	-	-
		July	115 ± 14	128 ± 9	143 ± 12	183 ± 3	252 ± 7	300 ± 28
	2010	May	84 ± 22	127 ± 31	159 ± 20	139 ± 13	239 ± 3	320 ± 18
		June	84 ± 8	120 ± 13	154 ± 19	-	-	-
		July	121 ± 8	132 ± 9	151 ± 9	158 ± 10	246 ± 6	272 ± 24
	2011	May	85 ± 3	140 ± 7	182 ± 10	168 ± 14	287 ± 35	343 ± 29
		June	73 ± 8	106 ± 12	136 ± 24	-	-	-
		July	85 ± 9	97 ± 18	134 ± 26	148 ± 12	239 ± 19	314 ± 10
Takanari	2009	May	103 ± 11	139 ± 16	177 ± 31	-	-	-
		June	157 ± 37	176 ± 14	196 ± 28	-	-	-
	2011	May	79 ± 0	117 ± 3	160 ± 5	139 ± 14	249 ± 13	312 ± 32
		June	73 ± 9	95 ± 12	138 ± 26	-	-	-
		July	114 ± 4	141 ± 3	161 ± 6	124 ± 5	201 ± 13	235 ± 24
Correlation coefficient with temperature during ripening			- 0.62**	- 0.19	0.30	0.10	0.47	0.72**

\*\* indicates significant difference (p<0.01).

<sup>a</sup> Rice bread made from mixture of rice flour (80%) and wheat gluten (20%)

<sup>b</sup> Rice bread made from mixture of wheat flour (80%) and rice flour (20%)

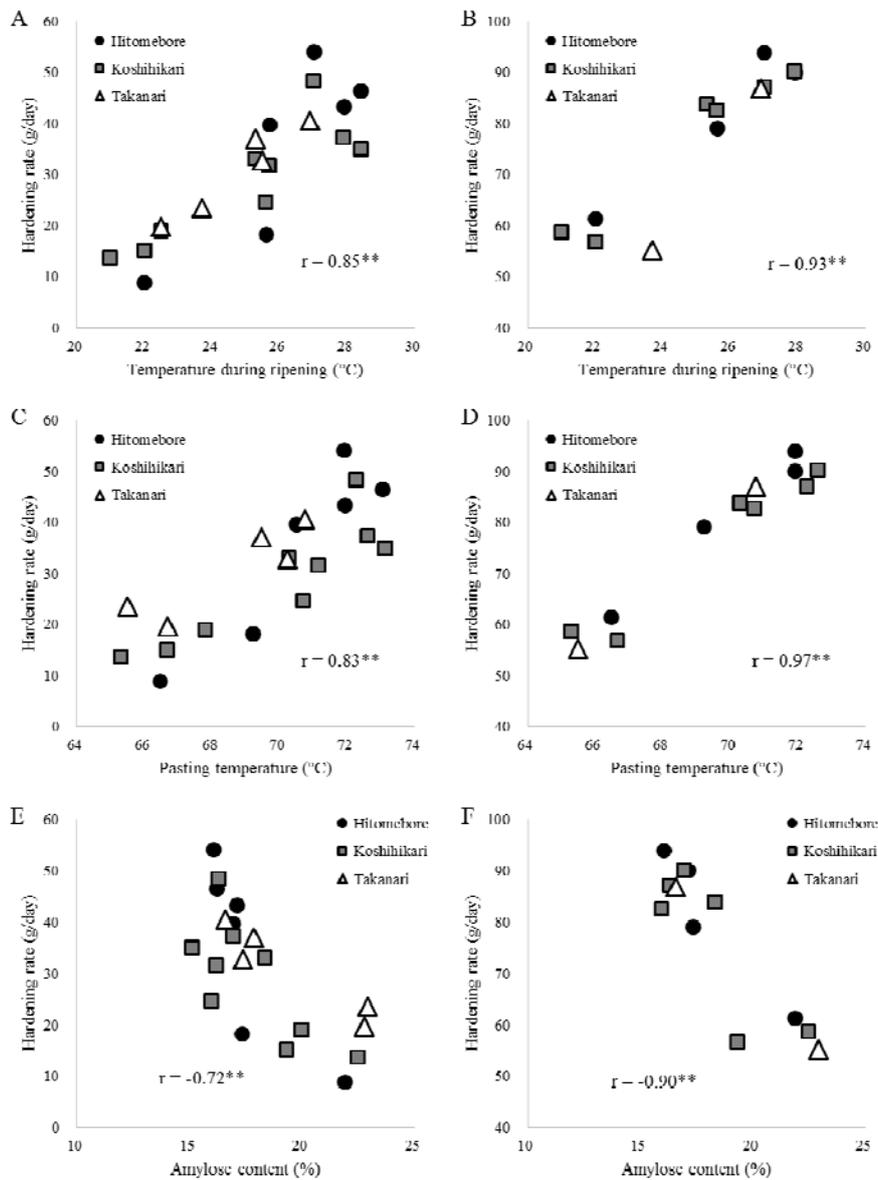


Figure 5-2 Correlation between bread hardening rate and temperature during ripening, amylose content, or pasting temperature

A: Temperature during ripening and bread hardening (rice flour + gluten)

B: Temperature during ripening and bread hardening (wheat flour + rice flour)

C: Amylose content and bread hardening (rice flour + gluten)

D: Amylose content and bread hardening (wheat flour + rice flour)

E: Pasting temperature and bread hardening (rice flour + gluten)

F: Pasting temperature and bread hardening (wheat flour + rice flour)

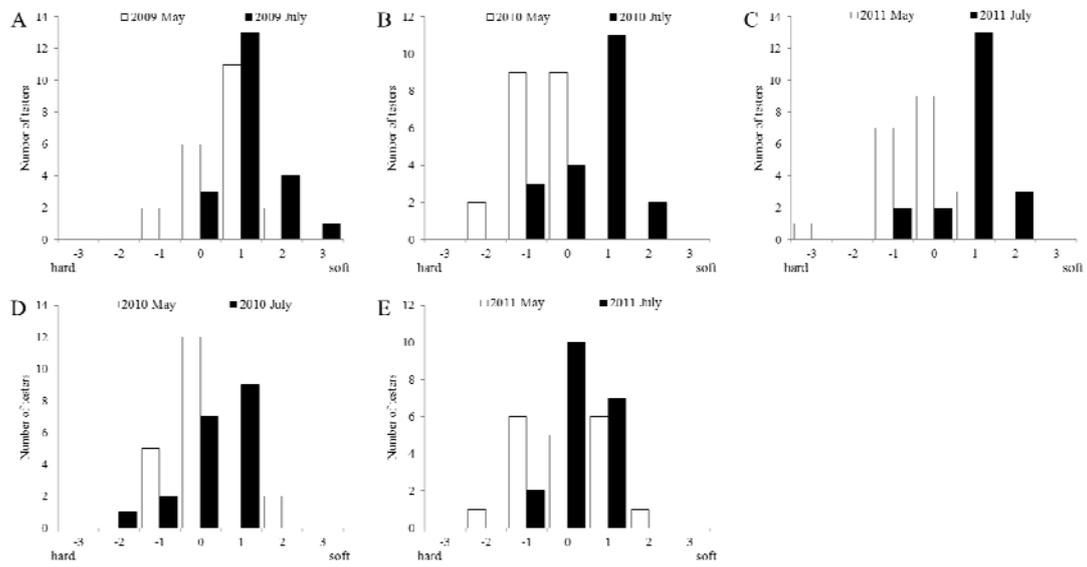


Figure 5-3 Sensory evaluation of rice breads made from Koshihikari (softness)  
Softness was scored from -3 (very hard) to 3 (very soft) with that of control bread designated as 0.

A - C: Bread made from rice flour and gluten

D, E: Bread made from Wheat flour and rice flour.

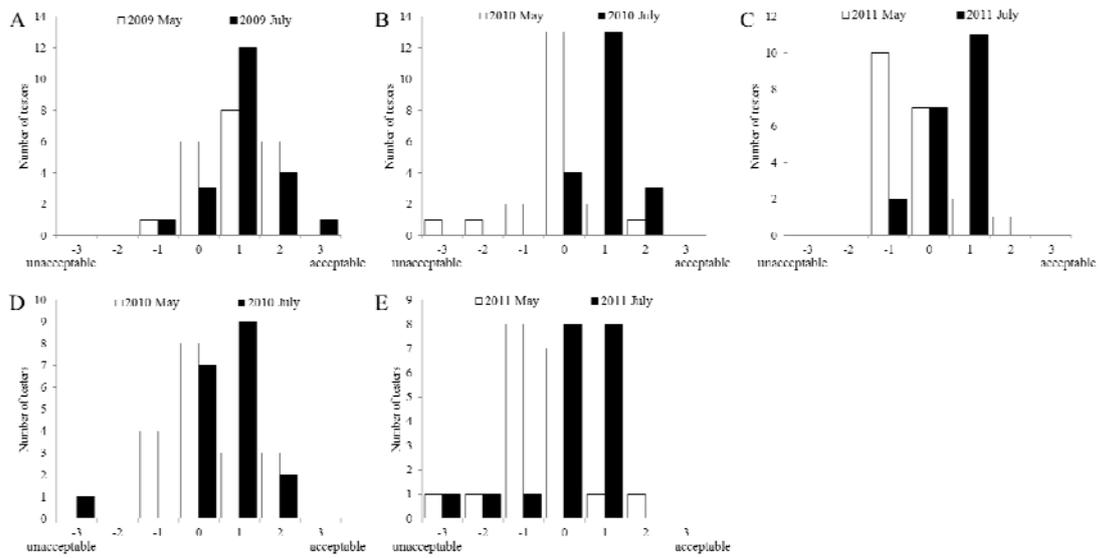


Figure 5-4 Sensory evaluation of rice breads made from Koshihikari (overall acceptability)

Overall acceptability was scored from -3 (unacceptable) to 3 (extremely acceptable) with that of control bread designated as 0.

A - C: Bread made from rice flour and gluten

D, E: Bread made from Wheat flour and rice flour.

### 5-3 考察

本研究において、登熟中の気温が低い条件で得られた米はパンが硬くなりやすく、実際に食べた場合でも差が分かる程度に硬さに違いがあることが明らかとなった (Figure 5-2、Figure 5-3)。登熟気温とパン硬化速度、粘度上昇開始温度とパン硬化速度の相関は、米粉比率が 80%含まれるグルテン添加米粉パンだけでなく、米粉比率が 20%の米粉混成パンでも見られた。このため、出穂後の気温や粘度上昇開始温度が分かれば、その品種の米粉パンへの適性が分かることが示された。気温はアメダスなどから容易に求めることができることから、イネの出穂日さえ分かれば、得られた米粉の適性が推定できる。粘度上昇開始温度の測定に用いた RVA は、約 3.5g の米粉があれば 1 回の測定ができ操作も簡便である。そのため、登熟気温が分からなかったとしても、少量の米粉があれば米粉パンの適性を予測することも可能である。

登熟気温を低くするためには、苗の移植時期を遅らせるか、出穂日の遅い品種を用いることとなり、いずれにしても一般品種とは異なる時期に作業することとなる。このことは、農作業の時期の分散につながり、作業コストを低下させることになる。小麦や大麦を栽培した後にイネを栽培することで、単位面積当たりの生産エネルギー量を増やすことにもつながる。すなわち、本研究で得られた結果は品質の向上だけでなく、低コストでの稲作を可能とすることを意味する。

アミロース含量と米粉パンの硬さとは正の相関があることが知られている (Aoki et al., 2012; 高橋ら, 2009) が、本研究では逆に有意な負の相関が見られた (Figure 5-2)。これは、登熟気温とアミロース含量とが負の相関があったことが原因であると考えられる。すなわち、アミロペクチン構造の方が保存中の硬さ変化に強く関わっていることを示す。

本研究では登熟気温が異なる条件で栽培することで、アミロペクチン構造を変化させ、それに伴って糊化温度を変化させた米を得ることができた。しかし、デンプン特性以外にも、損傷デンプン含量やタンパク質など、他の成分についても変化が起きていた (Table 5-1)。米粉パンの品質には、損傷デンプン含量が重要な役割を果たすことが知られている (Araki et al., 2009)。本研究では損傷デンプン含量は登熟気温とも相関が見られたが、試料間で 1.7-3.4% と狭い範囲の違いでしかなく、3.0% 以上の含量を示す試料は一つだけであった。このため、今回

用いた製パン試験の結果は、損傷デンプン含量の影響は受けていないことが示唆された。タンパク質含量も登熟気温と負の相関があり、タンパク質含量とパンの硬化速度との間には有意な相関があった（グルテン添加米粉パン： $r = -0.74$ 、 $p < 0.01$ 。米粉混成パン： $r = -0.92$ 、 $p < 0.01$ ）。しかし、第2章と第3章で示した結果の中では、タンパク質含量と米粉パン特性に有意な相関が見られなかった（Figure 2-3、Table 3-4）。このため、今回見られた相関は、見かけ上の検出である可能性があるが、タンパク質と製パン性との関連については今後の詳細な研究が必要である。米には内在性のアミラーゼが存在し、炊飯中に働くことで炊飯米の食味に関わることが示されている。しかし、登熟気温が低い方がアミラーゼ活性は低いことから（Yamakawa et al., 2007）、内在性のアミラーゼの変化が原因でパンの硬化抑制が起きたとは考えにくい。

グルテン添加米粉パンにおいて、アミロース含量が高いとパンのケービングが少なく、パンの比容積が高くなることが知られており（高橋ら, 2009）、これまで研究においても同様の結果が得られている（Figure 2-5、Table 3-4）。しかし、登熟気温が異なる試料を用いた今回の試験では、比容積とアミロース含量との間に相関は見られなかった。このことは、アミロース含量よりもアミロペクチンの構造の方がパンの形状への影響が大きいことを示唆している。米粉混成パンでは、登熟気温とパンの比容積との間に明らかな関係は見られなかった。これは、米粉の使用比率が低かったためと考えられる。

登熟気温が低くなるとアミロペクチンの短鎖が増加することについては、小麦においても知られている（Matsuki et al., 2003）。そのため、小麦においても本研究の成果が活用できる可能性がある。早生品種の活用や播種日の変更等により、登熟気温を低くすることができれば、硬くなりにくいパンを作ることができ、国産小麦の消費拡大に繋がることも期待できる。

#### 5-4 まとめ

米粉パンの硬さ変化にはデンプンが関与しており、デンプンの中でもアミロペクチンの影響が大きいことが示されている。登熟気温が低くなるとアミロペクチンの側鎖が短くなることから、本研究では、栽培時期をずらして登熟気温を変

化させた米を用いて 2 種類の米粉パン（グルテン添加米粉パンと米粉混成パン）を作成し、製パン特性を比較した。その結果、登熟気温が低い条件で栽培した米を用いると、パンが硬くなりにくいことが明らかとなった。アミロペクチンの短鎖割合や粘度上昇開始温度は登熟気温と高い相関があったことから、登熟気温やアミロペクチンの短鎖割合、粘度上昇開始温度はパンの硬さの指標となることが示された。

## 第 6 章 総合考察

### 6-1 本研究の意義

本研究において、多収品種の多くは米粉パンに適しているが、アミロース含量が高い品種とアミロペクチン側鎖の長い品種はパンが硬くなりやすく不適であることを示した（第 2 章、第 3 章）。また、アミロペクチン側鎖の短い変異体を用いること、もしくは登熟気温が低い条件で栽培して得られた米を用いることで、米粉パンの柔らかさが維持できることを明らかにした（第 4 章、第 5 章）。これら一連の研究結果は、低コストで品質のよい米粉加工製品の開発への一定の貢献が期待できるものである。本研究で得られた成果の中で、特に新規性の高いものとして挙げられるのは、アミロペクチンと製パン特性との関係を明らかにしたことである。アミロペクチン構造の改変によりパンの品質向上ができることを示したことは、小麦でも報告されていない。

小麦ではタンパク質の性質が、加工適性等における特に重要な基準となっている。小麦粉は強力粉、中力粉、薄力粉などに分類されるが、これはタンパク質含量によって決まり、デンプンの性質は関係しない。これまで、小麦の品質研究はタンパク質の研究に重点が置かれてきており、グルテンを形成するタンパク質の改良により品質の向上が図られることが主であった。例えば、優れた製パン性を示す国産小麦品種「ゆめちから」(田引ら, 2011)は通常の小麦粉よりもグルテン活性の強い超強力粉としての性質を示すが、この性質は特徴的なタンパク質 (Maruyama-Funatsuki et al., 2005)を導入することにより得られている。

小麦のアミロペクチンの短鎖（重合度 6~10）が増加した変異体は報告されている (Yamamori et al., 2000)。しかし、この変異体はアミロース含量も著しく増加するなどアミロペクチン以外の性質も変化しており、パンの比容積が低く外観が劣るなど、製パン適性が劣っている (Morita et al., 2002)。小麦は、秋田酒 44 号や早不知 D、Kurnai のように、アミロース含量が変化せずアミロペクチンの短鎖が増加した品種・系統は見つかっていない。このため、小麦のアミロペクチン構造と製パン性との関係は明らかでない。アミロース含量が低下した糯小麦の品種は育成されており (Kiribuchi-Otobe et al., 1997)、糯小麦をブレンドすることで、パンの老化が抑制されることが示されている (Bhattacharya et al.,

2002)。しかし、本研究で示したように、製パン後に数日間保存する場合においては、アミロースよりもアミロペクチンの影響の方が大きい。そのため、アミロペクチンのみが変化した小麦品種を育成することができれば、糯小麦を用いた場合より、老化がより抑制できるパンができることも十分に期待できる。

本研究では、アミロペクチンを品種・栽培の面から改変することで、米粉パンの硬化を抑制できることを示した。この結果は、米粉パンの改良だけにとどまらず、より需要の大きな小麦のパンにおける物性解明や品質向上にも大きな示唆を与えるであろう。

## 6-2 今後の課題

多収品種の多くは米粉パンに適していることを示し、米粉パンの柔らかさが維持できる品種特性と栽培法について明らかにした。これらの成果のみによって、米粉パンに関する技術的課題の全てが解決できる訳ではない。本研究で得られた成果をより広く進展させ、実用化していくためには、次のような研究開発を進めていく必要があると考えている。

### 6-2-1 多収品種へのアミロペクチン変異の導入

米粉パン用品種の品種改良としては、多収品種とアミロペクチンの変異品種を掛け合わせ、アミロペクチン構造に変異の入った多収品種を開発することが挙げられる。そうすることで、低コストで栽培ができ、しかも米粉パンにしたときに品質劣化が少ない米ができる。早不知 D や Kurnai の変異は 1 遺伝子座の劣勢変異であり選抜用の DNA マーカーも開発されていることから (Okamoto et al., 2013)、戻し交雑等により、容易に変異系統の選抜が可能である。このような品種を開発することで、通常は米粉用に用い、米が余っているときには飼料用に用いるという形で、一つの品種で状況に応じた使い分けができる。

### 6-2-2 低温時期に登熟する多収品種の開発

登熟気温が低い条件で栽培された米は、パンが硬くなりにくいことを第 5 章で示した。開花時期が遅い多収品種を開発することができれば、できた米のアミ

ロペクチンが低いことが予想される。気象庁のホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) によると、札幌の 1981~2010 年の 8 月と 9 月の平均気温はそれぞれ 22.3℃、18.1℃となっている。つくばの 8 月と 9 月の平均気温はそれぞれ 25.5℃と 21.9℃である。北海道で、ななつぼしや、きらら 397 と同時期以降の出穂日の多収品種、つくばなど関東地方ではコシヒカリより一ヶ月以上遅い出穂日の多収品種を作ることができれば、第 5 章で用いた米粉の中で、最も柔らかいパンができた米粉と同等の米粉パン適性の品種となると推定される。

#### 6-2-3 高アミロース含量かつアミロペクチン短鎖の多い品種の開発

より形がよく、硬くなりにくい米粉パンを作るためには、アミロース含量が高く、アミロペクチンの短鎖割合が高い品種が必要であると思われる。本研究で用いた秋田酒 44 号や早不知 D はアミロース含量が 20%以上と一般品種と比較して高く (表 4-1)、7 月に移植して得られた米の多くはアミロース含量が 20%以上の値を示した (表 5-2)。しかし、これらの米から作ったグルテン添加米粉パンの比容積は、高アミロース含量の米から作った米粉パンと比較して、低い傾向があった (表 3-3、表 4-2、表 5-4)。これらの結果から、モミロマンやホシニシキ等のようにアミロース含量が 25%以上の品種と、早不知 D や秋田酒 44 号のような品種とを交配し、双方の性質を持つ品種ができれば、より米粉パンに適する品種となるかもしれない。

#### 6-2-4 さらにデンプンが老化しにくい品種の開発

早不知 D や Kurnai と、秋田酒 44 号とは別の変異遺伝子を持つ。そのため、双方の変異遺伝子を持つ系統が得られれば、そのアミロペクチンはさらに短鎖割合が高く糊化温度が低いことが予想される。秋田酒 44 号はデンプンリン酸化酵素の変異であるが (岡本ら, 2013b)、選抜マーカーは開発されていない。デンプンリン酸化酵素遺伝子の配列を決定することで選抜マーカーが開発されれば、デンプン枝付け酵素 I とデンプンリン酸化酵素の双方の変異を導入した品種の開発が容易となる。さらに、梅本らにより、早不知 D よりさらに糊化温度が低い変異体を得られたことが報告されている (梅本 et al., 2013)。この変異体の原因遺伝

子は特定されていないが、デンプン枝付け酵素 I とともデンプンリン酸化酵素とも異なる変異体であるとすれば、アミロペクチン短鎖割合がより高い品種が得られる可能性が高い。

このような複数のアミロペクチン変異を持つ品種が育成できれば、デンプンがより老化しにくくなることが予想される。このような品種は、米粉パンだけでなく他の食品にも利用できる可能性がある。アミロペクチンは長時間の保存時の硬化に影響することから、加工してから食べられるまである程度時間のかかる食品への応用が考えられる。例えば、団子などの和菓子やシフォンケーキなどの洋菓子などの他、レトルトパックのご飯などが挙げられる。また、秋田酒 44 号から製造された日本酒は、アルコール度数が高く粕歩合が低いことが報告されている (田口 et al., 1989)。この特徴がアミロペクチンの変異に起因していたとすると、早不知や Kurnai の変異も取り入れた酒米品種を開発することにより、さらに酒粕の少なく歩留まりの高い日本酒作りができる可能性がある。

イネは日本を含め、アジアモンスーン地域に適した作物であり、我が国の食料の自給力維持・向上のための鍵を握っている。本研究により、米粉パンの消費拡大に向けた技術的な課題を解決するための、新たな技術やそのシーズが作出された。本研究で得られた成果を用いることで、米粉パンの利用促進を通じ、我が国の食料自給率向上に向けて一定の貢献をすることが予想される。更に米粉パン利用を促進するには、さらなる育種的・生理学的取組み等も不可欠であり、今後の多分野での研究の展開が期待されるところである。

## 摘要

我が国の食料自給率は熱量換算で 40%を下回っており、食料の安定供給の観点から自給率の向上が求められている。食料自給率に向けた取り組みの中で、米粉による消費拡大、特に米粉パンへの期待が大きい。しかし、消費拡大への技術的課題として、①米粉生産コストの低減、②パンが硬くなりやすい性質の改善、③膨らみにくさの改善、が残されている。

低コストで栽培可能な多収品種 9 品種を用いた製パン性試験を行ったところ、多収品種の米粉パンは、コシヒカリの米粉パンと同等か優れた膨らみを示した。しかし、2 品種はパンが硬くなりやすく不適であった。不適な品種は、デンプンの成分であるアミロースもしくはアミロペクチンが特徴的であり、これらの性質が製パン性に影響したことが示唆された。そこで、アミロースやアミロペクチンと製パン性との関係をより詳細に調べるため、アミロース合成、アミロペクチン合成に関する日本晴の準同質遺伝子系統を含む 26 品種・系統を用いた試験を行った。その結果、アミロース含量が高いほどパンの比容積（1g あたりの体積）が高いが硬くなりやすいことを確認し、アミロペクチンの鎖長はパンの比容積には大きく影響しないが、長鎖の割合が高いとパンが硬くなりやすいことを明らかにした。また、アミロースは短期間でのパン硬化に関与しており、アミロペクチンは長期間でのパン硬化に関与することも示した。

アミロペクチンの短鎖の割合が高い品種として、デンプン枝付け酵素 I (SbeI) やデンプンリン酸化酵素 (Pho) の変異体が知られている。そこで、SbeI 変異体 2 品種と Pho 変異体 1 品種を用いて米粉パン特性を評価した。これらの品種の米粉パンは、比容積はコシヒカリの米粉パンと同等かやや低い値であったが、硬化速度はコシヒカリより著しく低く、硬くなりにくいことを明らかにした。また、登熟中の温度が低いほどアミロペクチンの短鎖割合が高くなることが知られていることから、移植日を遅くすることで登熟気温を低い条件で栽培した米を得て、米粉パン特性を評価した。その結果、登熟気温やデンプンの粘度上昇開始温度は、パン硬化速度との間に有意な正の相関が見られた。これらの結果から、低温で栽培した方が米粉パンに適すること、開花後の気温や粘度上昇開始温度は米粉パン適性の指標となることを明らかにした。

本研究により、米粉パンのコストや品質について技術的な課題を解決するための、新たな知見や技術が得られた。本研究で得られた成果を用いることで、米粉パンの利用促進を通じ、我が国の食料自給率向上に貢献することが期待される。

## 引用文献

- Ahlborn, G.J., Pike, O.A., Hendrix, S.B., Hess, W.M., Huber, C.S., 2005. Sensory, mechanical, and microscopic evaluation of staling in low-protein and gluten-free breads. *Cereal Chem.* 82, 328–335.
- Aoki, N., Umemoto, T., Hamada, S., Suzuki, K., Suzuki, Y., 2012. The amylose content and amylopectin structure affect the shape and hardness of rice bread. *J. Appl. Glycosci.* 59, 75–82.
- Aoki, N., Umemoto, T., Yoshida, S., Ishii, T., Kamijima, O., Matsukura, U., Inouchi, N., 2006. Genetic analysis of long chain synthesis in rice amylopectin. *Euphytica* 151, 225–234.
- 青木法明, 2008. 多種多様な、米粉と米粉パン. *農林経済* 2–7.
- Araki, E., Ikeda, T.M., Ashida, K., Takata, K., Yanaka, M., Iida, S., 2009. Effects of rice flour properties on specific loaf volume of one-loaf bread made from rice flour with wheat vital gluten. *Food Sci. Technol. Res.* 15, 439–448.
- 有坂将美, 中村幸一, 吉井洋一, 1994. 米粉の製造方法及びその利用食品.
- Asaoka, M., Okuno, K., Konishi, Y., Fuwa, H., 1987. The effects of endosperm mutations and environmental temperature during development on the distribution of molecular weight of amylose in rice endosperms. *Agric. Biol. Chem.* 51, 3451–3453.
- Asaoka, M., Okuno, K., Sugimoto, Y., Kawakami, J., Fuwa, H., 1984. Effect of environmental temperature during development of rice plants on some properties of endosperm starch. *Starch - Stärke* 36, 189–193.

- Ashida, K., Araki, E., Iida, S., Yasui, T., 2010. Flour properties of milky-white rice mutants in relation to specific loaf volume of rice bread. *Food Sci. Technol. Res.* 16, 305–312.
- Berkowitz, D., Oleksyk, L.E., 1991. Leavened breads with extended shelf life.
- Bertoft, E., Koch, K., 2000. Composition of chains in waxy-rice starch and its structural units. *Carbohydr. Polym.* 41, 121–132.
- Bhattacharya, M., Erazo-Castrejón, S. V, Doehlert, D.C., McMullen, M.S., 2002. Staling of bread as affected by waxy wheat flour blends. *Cereal Chem. J.* 79, 178–182.
- Bosmans, G.M., Lagrain, B., Ooms, N., Fierens, E., Delcour, J.A., 2013. Biopolymer interactions, water dynamics, and bread crumb firming. *J. Agric. Food Chem.* 61, 4646–4654.
- Cureton, P., Fasano, A., 2009. The increasing incidence of coeliac disease and the range of gluten-free products in the marketplace, in: Gallagher, E. (Ed.), *Gluten-Free Food Science and Technology*. Wiley-Blackwell Publishing, Oxford, pp. 1–16.
- Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., Sahin, S., 2010. Rheological properties of gluten-free bread formulations. *J. Food Eng.* 96, 295–303.
- Donald, A.M., 2001. Plasticization and self assembly in the starch granule. *Cereal Chem.* 78, 307–314.
- FAO, 2014. FAOSTAT. URL <http://faostat3.fao.org/home/E>
- Fasano, A., Berti, I., Gerarduzzi, T., Not, T., Colletti, R.B., Drago, S., Elitsur, Y., Green, P.H.R., Guandalini, S., Hill, I.D., Pietzak, M., Ventura, A., Thorpe, M., Kryszak, D., Fornaroli, F., Wasserman, S.S., Murray, J.A., Horvath, K.,

2003. Prevalence of celiac disease in at-risk and not-at-risk groups in the United States. *Arch. Intern. Med.* 163, 286.
- Fujita, N., Hasegawa, H., Taira, T., 2001. The isolation and characterization of a waxy mutant of diploid wheat (*Triticum monococcum* L.). *Plant Sci.* 160, 595–602.
- 福盛幸一, 2004. パン・菓子用米粉組成物、米粉パン・菓子およびその製造方法.
- 福鳶陽, 長田健二, 白土宏之, 山口弘道, 福田あかり, 吉永悟志, 寺島一男, 持田秀之, 2008. 極大粒の水稻品種「べこあおば」は7年間平均で920kg/10aの超多収を記録. 東北農業研究成果情報.
- Gómez, M., Ronda, F., Blanco, C.A., Caballero, P.A., Apesteguía, A., 2003. Effect of dietary fibre on dough rheology and bread quality. *Eur. Food Res. Technol.* 216, 51–56.
- Goto, A., Sasahara, H., Shigemune, A., Miura, K., 2009. Hokuriku 193: A new high-yielding indica rice cultivar bred in Japan. *Japan Agric. Res. Q. JARQ* 43, 13–18.
- Gray, J.A., Bemiller, J.N., 2003. Bread staling: molecular basis and control. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2, 1–21.
- Hamada, S., Suzuki, K., Aoki, N., Suzuki, Y., 2013. Improvements in the qualities of gluten-free bread after using a protease obtained from *Aspergillus oryzae*. *J. Cereal Sci.* 57, 91–97.
- Hatcher, D.W., Anderson, M.J., Desjardins, R.G., Edwards, N.M., Dexter, J.E., 2002. Effects of flour particle size and starch damage on processing and quality of white salted noodles. *Cereal Chem. J.* 79, 64–71.

平林秀介, 根本博, 安東郁男, 加藤浩, 太田久稔, 佐藤宏之, 竹内善信, 石井卓朗, 前田英郎, 井邊時雄, 出田収, 平山正賢, 岡本正弘, 西村実, 八木忠之, 梶亮太, 2010. 飼料用水稲品種「モミロマン」の育成. 作物研究所報告 11, 31–47.

Hirano, H.-Y., Sano, Y., 1998. Enhancement of *Wx* gene expression and the accumulation of amylose in response to cool temperatures during seed development in rice. *Plant Cell Physiol.* 39, 807–812.

Hiratsuka, M., Umemoto, T., Aoki, N., Okamoto, K., 2010. Development of SNP markers of *starch synthase IIa (alk)* and haplotype distribution in Rice Core Collections. *Rice Genet. Newsl.* 25, 80–82.

Hizukuri, S., Takeda, Y., Maruta, N., Juliano, B.O., 1989. Molecular structures of rice starch. *Carbohydr. Res.* 189, 227–235.

Horibata, T., Nakamoto, M., Fuwa, H., Inouchi, N., 2004. Structural and physicochemical characteristics of endosperm starches of rice cultivars recently bred in Japan. *J. Appl. Glycosci.* 51, 303–313.

Hug-Iten, S., Escher, F., Conde-Petit, B., 2003. Staling of bread: role of amylose and amylopectin and influence of starch-degrading enzymes. *Cereal Chem.* 80, 654–661.

稲津脩, 1988. 北海道産米の食味向上による品質改善に関する研究. 北海道立農業試験場報告 1–89.

井邊時雄, 赤間芳洋, 中根晃, 羽田丈夫, 伊勢一男, 安東郁男, 内山田博士, 中川宣興, 古館宏, 堀末登, 能登正司, 木村健治, 森宏一, 高柳健治, 藤田米一, 上原泰樹, 石坂昇助, 中川原捷洋, 山田利昭, 古賀義昭, 2004. 多用途向き多収水稻品種「タカナリ」. 作物研究所研究報告, 35–51.

- Inouchi, N., Ando, H., Asaoka, M., Okuno, K., Fuwa, H., 2000. The effect of environmental temperature on distribution of unit chains of rice amylopectin. *Starch - Stärke* 52, 8–12.
- Inouchi, N., Hibi, H., Li, T., Horibata, T., Fuwa, H., Itani, T., 2005. Structure and properties of endosperm starches from cultivated rice of Asia and other countries. *J. Appl. Glycosci.* 52, 239–246.
- 石間紀男, 平宏和, 平春枝, 御子柴穆, 1974. 米の食味におよぼす窒素施肥および精白中の蛋白質含量率の影響. *食品総合研究所研究報告* 29, 9–15.
- Ishizuki, H., Matsue, Y., Ogata, T., Saitoh, K., 2013. Effect of thickness and appearance quality of brown rice on palatability and physicochemical properties of rice grown under shading and high-temperature treatments. *Japanese J. Crop Sci.* 82, 252–261.
- James, M.G., Denyer, K., Myers, A.M., 2003. Starch synthesis in the cereal endosperm. *Curr. Opin. Plant Biol.* 6, 215–222.
- Jane, J., Chen, Y.Y., Lee, L.F., McPherson, A.E., Wong, K.S., Radosavljevic, M., Kasemsuwan, T., 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. *Cereal Chem.* 76, 629–637.
- Jiang, H., Dian, W., Wu, P., 2003. Effect of high temperature on fine structure of amylopectin in rice endosperm by reducing the activity of the starch branching enzyme. *Phytochemistry* 63, 53–59.
- Juliano, B.O., 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. *Cereal Sci. Today* 16, 334–338.

- Kadan, R.S., Robinson, M.G., Thibodeaux, D.P., Pepperman, A.B., 2001. Texture and other physicochemical properties of whole rice bread. *J. Food Sci.* 66, 940–944.
- 川越靖, 恩田弥生, 高星千恵美, 熊丸敏博, 佐藤光, 2013. パン類の製造に適した米粉組成物およびその利用. 特許第 5187739 号.
- Kawagoe, Y., 2010. The rice *esp2* mutant accumulates protein aggregates in the endosperm and has better qualities for rice bread. *Gamma F. Symp.* 49, 27–30.
- Kiribuchi-Otobe, C., Nagamine, T., Yanagisawa, T., Ohnishi, M., Yamaguchi, I., 1997. Production of hexaploid wheats with waxy endosperm character. *Cereal Chem.* 74, 72–74.
- 小菅桂子, 1997. 近代日本食文化年表. 雄山閣出版, [東京].
- Larkin, P.D., Park, W.D., 1999. Transcript accumulation and utilization of alternate and non-consensus splice sites in rice granule-bound starch synthase are temperature-sensitive and controlled by a single-nucleotide polymorphism. *Plant Mol. Biol.* 40, 719–27.
- Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., Biliaderis, C.G., 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *J. Food Eng.* 79, 1033–1047.
- Lee, M.-R., Swanson, B.G., Baik, B.-K., 2001. Influence of amylose content on properties of wheat starch and breadmaking quality of starch and gluten blends. *Cereal Chem.* 78, 701–706.
- Lisle, a. J., Martin, M., Fitzgerald, M. a., 2000. Chalky and translucent rice grains differ in starch composition and structure and cooking properties. *Cereal Chem.* 77, 627–632.

Lorenz, K., Saunders, R.M., 1978. Enzyme activities in commercially-milled rice. *Cereal Chem.* 55.

前田英郎, 春原嘉弘, 飯田修一, 松下景, 根本博, 石井卓朗, 吉田泰二, 中川宣興, 坂井真, 星野孝文, 岡本正弘, 篠田治躬, 2003. 飼料用水稲新品種「ホシアオバ」の育成. 近畿中国四国農業研究センター研究報告, 83-98.

Maruyama-Funatsuki, W., Takata, K., Funatsuki, H., Tabiki, T., Ito, M., Nishio, Z., Kato, A., Saito, K., Yahata, E., Saruyama, H., Yamauchi, H., 2005. Identification and characterization of a novel LMW-s glutenin gene of a Canadian Western Extra-Strong wheat. *J. Cereal Sci.* 41, 47-57.

Matsuki, J., Yasui, T., Kohyama, K., Sasaki, T., 2003. Effects of environmental temperature on structure and gelatinization properties of wheat starch. *Cereal Chem. J.* 80, 476-480.

Miles, M.J., Morris, V.J., Orford, P.D., Ring, S.G., 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. *Carbohydr. Res.* 135, 271-281.

三浦清之, 上原泰樹, 小林陽, 太田久稔, 清水博之, 笹原英樹, 福井清美, 小牧有三, 大槻寛, 後藤明俊, 重宗明子, 2006. 水稲新品種「夢あおば」の育成. 中央農業総合研究センター研究報告, 1-23.

三浦清之, 笹原英樹, 後藤明俊, 重宗明子, 上原泰樹, 小林陽, 太田久稔, 清水博之, 福井清美, 大槻寛, 小牧有三, 2008. 極多収のインド型水稲新品種「北陸 193号」. 関東東海北陸農業研究成果情報. URL [http://www.naro.affrc.go.jp/org/narc/seika/kanto20/12/20\\_12\\_06.html](http://www.naro.affrc.go.jp/org/narc/seika/kanto20/12/20_12_06.html)

Morgan, K.R., Gerrard, J., Every, D., Ross, M., Gilpin, M., 1997. Staling in starch breads: The effect of antistaling alpha-amylase. *Starch-Starke* 49, 54-59.

- Morita, N., Maeda, T., Miyazaki, M., Yamamori, M., Miura, H., Ohtsuka, I., 2002. Dough and baking properties of high-amylose and waxy wheat flours. *Cereal Chem.* 79, 491–495.
- 諸橋敬子, 鍋谷隆史, 吉井洋一, 江川和徳, 2000. 小麦粉の代替品となる米粉の製造方法及び当該米粉を使用した加工食品. 特許公開 2000-175636.
- 中込弘二, 山口誠之, 片岡知守, 遠藤貴司, 滝田正, 東正昭, 横上晴郁, 加藤浩, 田村泰章, 2006. 直播栽培に適する稲発酵粗飼料専用品種「べこあおば」の育成. 東北農業研究センター研究報告, 1–14.
- 中込弘二, 山口誠之, 片岡知守, 遠藤貴司, 滝田正, 横上晴郁, 加藤浩, 2008. 東北地域向けの早生の飼料イネ専用品種「べこごのみ」の育成. 東北農業研究センター研究報告, 1–13.
- 中村幸一, 諸橋敬子, 2005. パン製造用の米粉及び米粉を用いたパンの製造方法. 特許公開 2005-245409
- Nakamura, S., Ohtsubo, K., 2010. PCR method for the detection and identification of cultivars of rice flours used in yeast leavened breads containing both wheat and rice flours. *J. Cereal Sci.* 52, 16–21.
- Nakamura, Y., 2002. Towards a better understanding of the metabolic system for amylopectin biosynthesis in plants: rice endosperm as a model tissue. *Plant Cell Physiol.* 43, 718–725.
- Nakamura, Y., Sakurai, A., Inaba, Y., Kimura, K., Iwasawa, N., Nagamine, T., 2002. The fine structure of amylopectin in endosperm from Asian cultivated rice can be largely classified into two classes. *Starch - Stärke* 54, 117–131.
- 西岡昭博, 2011. プラスチック発泡成形技術が可能にした米粉 100%パンと加熱・せん断粉碎によるアルファ化米粉製造技術の開発. *グリーンテクノ情報* 6, 17–21.

- Nkonge, C., Ballance, G.M., 1982. A sensitive colorimetric procedure for nitrogen determination in micro-Kjeldahl digests. *J. Agric. Food Chem.* 30, 416–420.
- Noomhorm, A., Bandola, D.C., Kongseree, N., 1994. Effect of rice variety, rice flour concentration and enzyme levels on composite bread quality. *J. Sci. Food Agric.* 64, 433–440.
- 農林水産省, 2004. 我が国の食料自給率: 食料自給率レポート. 平成 15 年度. 農林水産省.
- 農林水産省, 2009. 新しい多収米品種—加工用米及び飼料用米等、新規需要米の生産に向けて—.
- 農林水産省, 2012. 食品製造業統計表, in: 食品産業動態調査. 食品需給研究センター, pp. 205–207.
- 農林水産省, 2013a. 食料の安定供給の確保に向けた取組, in: 平成 25 年度 食料・農業・農村白書. 農林統計協会, pp. 24–30.
- 農林水産省, 2013b. 我が国の食料自給率の動向, in: 平成 25 年度 食料・農業・農村白書. 農林統計協会, 東京, pp. 40–43.
- 農林水産省, 2014a. 自給率の推移 ②総合自給率等の推移. 平成 24 年食料需給表. URL <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001117396>
- 農林水産省, 2014b. 自給率の推移 ①品目別自給率の推移. 平成 24 年食料需給表. URL <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001117396>
- 農林水産省, 2014c. 米粉の利用推進について [WWW Document]. URL <http://www.maff.go.jp/j/seisan/keikaku/komeko/>
- 農林水産省, 2014d. 米・麦の生産者物価指数及び生産者価格, in: 農林水産統計月報. 農林水産省大臣官房統計部, pp. 15–16.

農林水産省, 2014e. 米の作付規模別生産費. URL

[http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi\\_nousan/index.html#r](http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi_nousan/index.html#r)

Okamoto, K., Aoki, N., Fujii, H., Yanagihara, T., Nishi, A., Satoh, H., Umemoto, T., 2013. Characterization and utilization of spontaneous deficiency in starch branching enzyme I of rice (*Oryza sativa* L.). *J. Appl. Glycosci.* 60, 53–60.

岡本和之, 田畑美奈子, 川又快, 青木法明, 梅本貴之, 2013a. 酒造好適米から見出した低温糊化系統の特性について. *育種学研究* 15.

岡本和之, 田畑美奈子, 川又快, 青木法明, 梅本貴之, 2013b. 酒造好適米から見出した低糊化系統の特性について. *育種学研究* 15(別 1), 79.

小崎道雄, Dizon, E.I., Sanchez, P.C., 関達治, 2001. フィリピンの米粉の蒸しパン. *日本食品保蔵科学会誌* 27 巻, 295–302.

Radhika Reddy, K., Zakiuddin Ali, S., Bhattacharya, K.R., 1993. The fine structure of rice-starch amylopectin and its relation to the texture of cooked rice. *Carbohydr. Polym.* 22, 267–275.

Regina, A., Kosar-Hashemi, B., Li, Z., Rampling, L., Cmiel, M., Gianibelli, M.C., Konik-Rose, C., Larroque, O., Rahman, S., Morell, M.K., 2004. Multiple isoforms of starch branching enzyme-I in wheat: lack of the major SBE-I isoform does not alter starch phenotype. *Funct. Plant Biol.* 31, 591–601.

Ribotta, P.D., Le Bail, A., 2007. Thermo-physical assessment of bread during staling. *LWT - Food Sci. Technol.* 40, 879–884.

坂井真, 井辺時雄, 根本博, 堀末登, 中川宣興, 佐藤宏之, 平澤秀雄, 高館正男, 田村和彦, 安東郁男, 石井卓朗, 飯田修一, 前田英郎, 青木法明, 出田収, 平林秀介, 太田久稔, 2003. 飼料用水稲新品種「クサホナミ」の育成. *作物研究所研究報告*, 1–15.

- Sano, Y., 1984. Differential regulation of waxy gene expression in rice endosperm. *Theor. Appl. Genet.* 68, 467–73.
- Sano, Y., Katsumata, M., Okuno, K., 1986. Genetic studies of speciation in cultivated rice. 5. Inter- and intraspecific differentiation in the waxy gene expression of rice. *Euphytica* 35, 1–9.
- Satoh, H., Nishi, A., Yamashita, K., Takemoto, Y., Tanaka, Y., Hosaka, Y., Sakurai, A., Fujita, N., Nakamura, Y., 2003. Starch-branching enzyme I-deficient mutation specifically affects the structure and properties of starch in rice endosperm. *Plant Physiol.* 133, 1111–1121.
- Satoh, H., Shibahara, K., Tokunaga, T., Nishi, A., Tasaki, M., Hwang, S.-K., Okita, T.W., Kaneko, N., Fujita, N., Yoshida, M., Hosaka, Y., Sato, A., Utsumi, Y., Ohdan, T., Nakamura, Y., 2008. Mutation of the plastidial  $\alpha$ -glucan phosphorylase gene in rice affects the synthesis and structure of starch in the endosperm. *Plant Cell* 20, 1833–1849.
- 庄子真樹，羽生幸弘，毛利哲，畑中咲子，池田正明，富樫千之，藤井智幸，2012. 製粉方法の異なる米粉の粉体特性と吸水特性の評価. *日本食品科学工学会誌* 59, 192–198.
- 春原嘉弘，飯田修一，前田英郎，松下景，根本博，石井卓朗，吉田泰二，中川宣興，坂井真，星野孝文，岡本正弘，篠田治躬，2003. 飼料用水稻新品種「クサノホシ」の育成. *近畿中国四国農業研究センター研究報告*, 99–113.
- 田引正，西尾善太，伊藤美環子，山内宏昭，高田兼則，桑原達雄，入来規雄，谷尾昌彦，池田達哉，船附稚子，2011. 超強力秋まき小麦新品種「ゆめちから」の育成. *北海道農業研究センター研究報告* 195, 1–12.
- 田口隆信，高橋仁，渡辺誠衛，石川京子，中田健美，1989. 秋田酒 44 号の酒造適性について. *秋田県醸造試験場報告* 21, 3–8.

- 高橋誠, 2011. 高品質な米の製粉技術の開発とこれを用いたパン・麺の製造. 農林水産技術研究ジャーナル 34, 27-31.
- 高橋誠, 本間紀之, 諸橋敬子, 中村幸一, 鈴木保宏, 2009. 米の品種特性が米粉パン品質に及ぼす影響. 日本食品科学工学会誌 56, 394-402.
- 高野博幸, 1986. 米粉高置換添加ライスペッドの品質改善. 食品総合研究所研究報告 48, 52-62.
- 瀧尾佳明, 2007. 米粉食品の普及と米粉パン (特集 お米の力再発見). 月刊フドケミカル 23, 38-44.
- 竹生新治郎, 1995. 米の加工・利用各論, in: 石谷孝佑, 大坪研一 (Eds.), 米の科学, シリーズ食品の科学. 朝倉書店, pp. 146-183.
- 田中康夫, 松本博, 1991. 製パンプロセスの科学, 製パンの科学. 光琳, 東京.
- Tanaka, J., Ikeda, S., 2002. Rapid and efficient DNA extraction method from various plant species using diatomaceous earth and a spin filter. Breed. Sci. 52, 151-155.
- 豊島英親, 岡留博司, 大坪研一, 須藤充, 堀末登, 稲津脩, 成塚彰久, 相崎万裕美, 大川俊彦, 井ノ内直良, 不破英次, 1997. ラピッド・ビスコ・アナライザーによる米粉粘度特性の微量迅速測定方法に関する共同試験. 日本食品科学工学会誌 44, 579-584.
- 梅本貴之, 船附稚子, 長澤幸一, 山内宏昭, 2013. 低温糊化変異米の生産方法、米加工品、及び食品. 特許公開 2013-172710.
- Umemoto, T., Aoki, N., 2005. Single-nucleotide polymorphisms in rice starch synthase IIa that alter starch gelatinisation and starch association of the enzyme. Funct. Plant Biol. 32, 763.

- Umemoto, T., Aoki, N., Lin, H., Nakamura, Y., Inouchi, N., Sato, Y., Yano, M., Hirabayashi, H., Maruyama, S., 2004. Natural variation in rice starch synthase IIa affects enzyme and starch properties. *Funct. Plant Biol.* 31, 671.
- Umemoto, T., Horibata, T., Aoki, N., Hiratsuka, M., Yano, M., Inouchi, N., 2008. Effects of variations in starch synthase on starch properties and eating quality of rice. *Plant Prod. Sci.* 11, 472–480.
- Umemoto, T., Terashima, K., Nakamura, Y., Satoh, H., 1999. Differences in amylopectin structure between two rice varieties in relation to the effects of temperature during grain-filling. *Starch - Stärke* 51, 58–62.
- Umemoto, T., Yano, M., Satoh, H., Shomura, A., Nakamura, Y., 2002. Mapping of a gene responsible for the difference in amylopectin structure between japonica-type and indica-type rice varieties. *Theor. Appl. Genet.* 104, 1–8.
- USDA, 2014. Grain: World Markets and Trade. USDA Econ. Stat. Mark. Inf. Syst. URL <http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1487>
- Vandeputte, G.E., Vermeulen, R., Geeroms, J., Delcour, J.A., 2003. Rice starches. III. Structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. *J. Cereal Sci.* 38, 61–68.
- Wang, Z.-Y., Zheng, F.-Q., Shen, G.-Z., Gao, J.-P., Snustad, D.P., Li, M.-G., Zhang, J.-L., Hong, M.-M., 1995. The amylose content in rice endosperm is related to the post-transcriptional regulation of the waxy gene. *Plant J.* 7, 613–622.

- Yamakawa, H., Hirose, T., Kuroda, M., Yamaguchi, T., 2007. Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray. *Plant Physiol.* 144, 258–77.
- Yamanaka, S., Nakamura, I., Watanabe, K., Sato, Y.-I., 2004. Identification of SNPs in the *waxy* gene among glutinous rice cultivars and their evolutionary significance during the domestication process of rice. *Theor. Appl. Genet.* 108, 1200–1204.
- Yamamori, M., Fujita, S., Hayakawa, K., Matsuki, J., Yasui, T., 2000. Genetic elimination of a starch granule protein, SGP-1, of wheat generates an altered starch with apparent high amylose. *Theor. Appl. Genet.* 101, 21–29.
- 山木一史, 清水英樹, 岩下敦子, 太田智樹, 中田淳博, 佐藤里奈, 田中常雄, 2007. 道産米を用いた微細米粉の製造と加工利用. 北海道立食品加工研究センター研究報告 7, 17–20.
- 山本淳, 1980. ライスブレッド(くつきんぐるうむ). *調理科学* 13, 280–283.
- Yamauchi, H., Noda, T., Matsuura-Endo, C., Takigawa, S., Saito, K., Oda, Y., Funatsuki, W., Iriki, N., Hashimoto, N., 2004. Bread-making quality of wheat/rice flour blends. *Food Sci. Technol. Res.* 10, 247–253.
- Yano, H., 2010. Improvements in the bread-making quality of gluten-free rice batter by glutathione. *J. Agric. Food Chem.* 58, 7949–54.
- Yano, H., 2012. Comparison of oxidized and reduced glutathione in the bread-making qualities of rice batter. *J. Food Sci.* 77, C182–C188.
- 與座宏一, 岡部繭子, 島純, 2008. 米粉利用の現状と課題—米粉パンについて—. *日本食品科学工学会誌* 55, 444–454.

與座宏一，松木順子，2014. 市販米粉の製パン性について. 食品総合研究所研究報告  
78, 43-46.

Zobel, H.F., Kulp, K., 1996. The staling mechanism, in: Hebeda, R.E., Zobel, H.F.  
(Eds.), Baked Goods Freshness: Technology, Evaluation and Inhibition of  
Staling. Marcel Dekker, New York, pp. 1-64.

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、終始暖かい激励とご指導・ご鞭撻をいただきました筑波大学大学院先端農業技術科学専攻連係大学院准教授 田中淳一博士に心より感謝申し上げます。学位論文審査において、貴重なご指導とご助言をいただきました、筑波大学大学院生命環境科学研究科教授 藤村達人博士、先端農業技術科学専攻連係大学院教授 乙部千雅子博士、高橋良二博士に心から感謝申し上げます。

多収品種等、米粉パンの製パン性試験の試料を提供いただいた(独)農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター、東北農業研究センター、中央農業総合研究センター北陸研究センター、作物研究所、近畿中国四国農業研究センター、九州沖縄農業研究センターに深謝いたします。米粉の提供、米粉の粉体特性の解析、米粉パンの製パン方法のご指導いただくとともに、貴重なご助言をいただきました、(株)波里の皆様へ深謝いたします。日本晴準同質遺伝子系統等の試料をご供与くださると同時に、終始実験指導や様々なご助言をいただきました、北海道農業研究センター 梅本貴之博士に心よりの感謝を申し上げます。アミロペクチン鎖長に関わる変異体をご恵与くださると同時に、貴重なご助言を賜りました茨城県生物工学研究所 岡本和之博士に深謝いたします。米粉の調整方法や加工適性の解析等につきまして、多大なるご指導とご助言をいただいた新潟県農業総合研究所食品研究センター 中村幸一博士、高橋誠博士、本間紀之博士に深謝いたします。デンプンの分析手法等につきまして、ご指導・ご鞭撻をいただきました福山大学教授 井ノ内直良博士と助教 中浦嘉子博士、食品総合研究所 山本和貴博士に深謝いたします。さらに、本研究を実施するための環境を整備し、また数多くのご助言と激励をいただきました作物研究所稲研究領域 鈴木啓太郎博士と荒木悦子博士、圃場作業に携わった業務科の皆様、実験補助に携わった契約職員の皆様に心より感謝申し上げます。