

学位論文

タンパク質含有率を制御した低アミロース米の 加工特性及び理化学特性に関する研究

(Research on processing and physicochemical properties of Low
amylose content rice with controlled protein content)

2021 年 9 月

岩手大学大学院連合農学研究科

生物資源科学専攻食品科学連合講座

小舘 琢磨

Takuma KODATE

(岩手大学)

目次

第 1 章

緒言	1
----	---

第 2 章 窒素施肥条件の違いが低アミロース水稻品種「きらほ」の収量および米飯物性を含めた食味に与える影響

2-1 緒言	5
2-2 材料および方法	6
2-3 結果	9
2-4 考察	16
2-5 図表	22

第 3 章 高タンパク低アミロース米「きらほ」の水浸裂傷粒発生率と吸水特性

3-1 緒言	32
3-2 材料および方法	34
3-3 結果および考察	36
3-4 図表	42

第4章 高タンパク低アミロース米「きらほ」米飯の低温保存下における物性変化

4-1	緒言	47
4-2	材料および方法	48
4-3	結果および考察	51
4-4	図表	57

第5章

結言	64
摘要	66
Summary	69
謝辞	73
引用文献	74

第1章 緒言

農業者の高齢化および減少など農業全体を取り巻く状況は依然厳しい(若林 2016)。特に水稻生産者の経営安定と生産意欲を高め、かつ消費者や実需者の要求を満たすには、単位面積当たりの収量増加による生産性の向上に加え、水稻の担い手への農地集積や生産資材費低減による生産コスト低減が不可欠である（農林水産省 2019a）。一方、2020 年初頭からの新型コロナウイルス（SARS-CoV2）の発生（国立感染研 2020）および感染拡大（COVID-19）により、外食を控える動きがみられ、国内の米需要は停滞している（米穀安定機構 2021）。米の消費量が減少する中、水田の有効利用を図るためには、需要に応じた主食用米の生産が必要である（農林水産省 2019b）。

近年、高齢化や女性の社会進出等により食の簡便化が進んでおり（農林水産省 2017）、今後は持ち帰り弁当などの中食で用いられる業務用米の需要が更に拡大すると見込まれる（農林水産省 2020）。また、新型コロナウイルス感染拡大防止対策下であっても、1 世帯当たりの 1 か月間の中食（弁当・すし・おにぎり）への支出は+5 ポイント以上（令和 2 年 3 月比）の堅調な伸びを示している（農林水産省 2021）。さらに、外食・中食での業務用米需要や無菌包装米飯およびおにぎり・弁当向けや冷凍米飯の需要増加により、加工業者からは国内で多く生産されている「コシヒカリ」や「ひとめぼれ」などの品種に代わる超多収で安定した品質と食味をもつ品種が求められている（農林水産省 2019b）。特に、中食において米飯保存は、日持ちの観点から見ると冷蔵や冷凍といった低温での保蔵が望ましいが、一方でデンプンの老化により食味は低下する。よって、冷蔵後あるいは冷凍解凍後に食しても、炊飯後の米飯に近い食味と品質を有する、中食向けの新しい米品種の開発が求められている。

よって、それらに対応するため、中食需要の増加に対応できる品種、すなわち、冷めても粘りが強く柔らかい「低アミロース米」への期待は非常に大きいと考えられる。

しかし、収量性の大小は、農業経営体の生産性や実需者の製造・販売コストに直結するため、現在、流通する低アミロース水稻品種の収量性では、更なる普及拡大が期待できないと考えられる。現状では、多収の低アミロース米品種の育成は、「姫ごのみ」（飯田ら 2011）、「ぴかまる」（坂井ら 2016）などあるものの、東北地方を対象とした多収品種は、「シルキーパール」（滝田 2002）などあまり多くない。

更に、2015 年に著者らが岩手県内の加工業者を対象に実施した聞き取り調査によると、低アミロース米は、炊飯米が柔らかく、冷めても食味変動が小さい一方で、炊飯直後は、米飯を成形する際の「べたつき」や「米粒が軟らかく潰れる」ことによる成形等の作業性の低下が指摘されている。さらに、低温保存や再加熱後の米飯物性の変化が小さい加工特性が求められている。これらのニーズに応えるために、先行研究を整理した結果、水稻のうち「ヒノヒカリ」等の主食用米品種では施肥によって、タンパク質含有率が高まることで、炊飯米の表面構造が変化し、食味に影響することがすでに報告されている（岡留ら 1999）。一方、低アミロース米では、異なる窒素施肥条件での収量性や食味に対する知見は、北陸の低アミロース品種に関する報告（小牧ら 2001）があるもののあまり多くない。

よって、低アミロース米普及のためには、収量性向上によるコスト低減を目指す栽培法の開発と既存のフードシステムへ適合する業務用米適性の向上や低アミロース米用に最適化された低温流通技術の開発を同時並行で進めることが必要である。すなわち、低アミロース米の特性を最大限に活用したチルドフードシステムが構築できれば、米生産者は収量性・栽培特性の向上による安定生産と所得の

向上，チルド米飯実需者との契約栽培による持続的な農業経営が可能となる．また，チルド米飯実需者は，炊飯工場での製造効率の向上が図れるとともに，チルド米飯の食味向上や賞味期限・消費期限の延長により，店舗での食品廃棄物削減効果が中食全体で期待できる．さらに，消費者は，簡便化された調理済みチルド米飯食品の選択肢が広がることで，生活様式に合わせた米の消費行動がより一層喚起される．

以上のことより，本研究では，低アミロース性の遺伝子“*Wx-mq*”を持つ，岩手県育成の低アミロース水稻品種「きらほ」（仲條ら 2017）を用いて，異なる窒素施肥条件が収量性および米飯物性を含めた食味に与える影響について検討した．また，高タンパク質含有率の低アミロース米「きらほ」を用いて，水浸裂傷粒発生率および吸水特性などの業務用米適性を明らかにするとともに，米飯の低温保存による物性の変化を解明することを目的に行った．

具体的に第 2 章では，低アミロース水稻品種「きらほ」を複数の窒素施肥条件で栽培試験を行い，窒素施肥が収量性，理化学特性，米飯物性および食味官能評価に与える影響について検討した．

第 3 章では，窒素追肥技術により標準的なタンパク質含有率の低アミロース米と高タンパク質含有率の低アミロース米「きらほ」の精白米を用いて，炊飯工場で問題となる水浸裂傷粒発生率および吸水特性について業務用米適性の面から検討した．

第 4 章では，低アミロース米の炊飯米の硬さや粘り具合に影響する炊飯直後の物性に加え，保蔵に伴う炊飯米の硬化のしやすさ（老化性）等についての試験を行い，食味への影響はもとより，弁当やおにぎりなどの業務用炊飯米品種の選定に向けた低温保存適性を評価した．試験は，第 3 章と同様に窒素追肥技術により標準的なタンパク質含有率の低アミロース米「きらほ」と高タンパク質含有率の

低アミロース米「きらほ」を用いて、低温保存温度および保存時間が炊飯米の物性に与える影響について検討した。

最後に、第5章では本研究の主要な成果を列挙して述べ、結言とした。

本研究により、米タンパク質含有率を制御した低アミロース米の加工特性や理化学特性を向上させられれば、拡大が見込まれる冷蔵・冷凍食品市場や輸出米としての活用が高まるため、米生産の安定化や米の生産拡大への貢献が期待できる。

第 2 章

窒素施肥条件の違いが低アミロース水稻品種「きらほ」の収量および米飯物性を含めた食味に与える影響

2-1 【緒言】

農業者の高齢化および減少など農業全体を取り巻く状況は依然厳しい（若林 2016）。特に水稻生産者の経営安定と生産意欲を高め、かつ消費者や実需者の要求を満たすには、単位面積当たりの収量増加による生産性の向上に加え、水稻の担い手への農地集積や生産資材費低減による生産コスト低減が不可欠である（農林水産省 2019a）。一方、米の消費量が減少する中、水田の有効利用を図るためには、需要に応じた主食用米の生産が必要である（農林水産省 2019b）。

近年、外食・中食での業務用米需要や無菌包装米飯およびおにぎり・弁当向けや冷凍米飯の需要増加（農林水産省 2020）により、加工業者からは国内で多く生産されている「コシヒカリ」や「ひとめぼれ」などの品種に代わる超多収で安定した品質と食味をもつ品種が求められている（農林水産省 2019b）。

一方、高齢化や女性の社会進出等により、家庭で炊飯しない“食の簡便化”へ生活様式の変化が見込まれている（農林水産省 2017）ことから、今後、おにぎり・弁当向けや冷凍米飯の需要は急拡大すると見込まれる。よって、それらに対応するため、弁当やおにぎりに代表される中食需要の増加に対応できる品種、すなわち、冷めても粘りが強く柔らかい「低アミロース米」への期待は非常に大きいと考えられる。

しかし、現状では多収の低アミロース米品種の育成は、「姫ごのみ」（飯田ら 2011）、「ぴかまる」（坂井ら 2016）などあまり多くない。収量性の大小は、農業経営体の生産性や実需者の製造・販売コストに直結するため、現在流通する低アミ

ロース米品種の収量性では現状からの普及拡大は期待できないと推察される。

また、2015年に著者らが岩手県内の加工業者を対象に実施した、聞き取り調査によると、低アミロース米は、炊飯米が柔らかく、冷めても食味変動が小さい一方で、炊飯直後は、米飯を成形する際の「べたつき」や「米粒が軟らかく潰れる」ことによる成形等の作業性の低下が指摘されている。

水稻のうち「ヒノヒカリ」等の主食用米品種では施肥によって、タンパク質含有率が高まることで、炊飯米の表面構造が変化し、食味に影響することがすでに報告されている（岡留ら 1999）。一方、低アミロース米では、標準的な施肥における食味や食味関連成分に関する知見は品種ごとに多数報告されているが（国広ら 1993, 東ら 1999, 松江ら 2005, 仲條ら 2017）、異なる窒素施肥条件での収量性や食味に対する知見は、北陸の低アミロース品種に関する報告（小牧ら 2001）があるもののあまり多くない。

岩手県農業研究センターでは2015年に加工食品原料米としての利用を目的に、アミロース含有率が変動しにくい低アミロース性の遺伝子“*Wx-mq*”を持つ低アミロース水稻品種「きらほ」を育成した（仲條ら 2017）。「きらほ」は粘りが強く、炊飯後に冷えても硬くなりやすい特徴があり、岩手県央および県北地域での普及が期待されているものの、「いわてっこ」と比べ、精玄米収量が9%程度低く、玄米千粒重が0.2 g 軽く粒径が小さい（仲條ら 2017）などいくつか課題がある。

そこで、本研究では、低アミロース水稻品種「きらほ」を用い、異なる窒素施肥条件が収量性および米飯物性を含めた食味に与える影響について検討した。

2-2 【材料と方法】

2-1-1 栽培方法

2015年から2018年までの4か年、岩手県北上市の岩手県農業研究センター水田圃

場において、低アミロース水稻品種「きらほ」を供試した。

栽培方法は、22.2株/m²（条間30 cm×株間15 cm，1株4本植え）の栽植密度で葉齢4.0葉頃の中苗を手植え移植した。また、移植時期は、各年次ともに5月15日頃行った。以後の栽培管理は、地域慣行のとおり行った。

施肥は、地域慣行の肥料成分を参考に、基肥（硫安）の窒素は3，6，12 g/m²の3水準，追肥として、幼穂形成期に窒素（塩安）0，2，4 g/m²の3水準，穂揃期に窒素（硫安）0，4，8 g/m²の3水準をそれぞれ組み合わせ、「きらほ」の窒素施肥の感受性を幅広く検討するため一般的な施肥量よりも多く投入した条件も設け、合計8処理区を設けた（表2-1）。また、基肥としてリン酸およびカリをそれぞれ成分で7.5 g/m²施用した。7月上旬に約1週間の中干しを行った時期を除き常時湛水状態とした。

なお、試験は水田1筆（440 m²）を用い、1区あたり4条×4.4 m（5.3 m²）を2反復ずつで実施した。

2-2-2 収量および収量構成素の調査方法

生育ステージは、全茎数の40～50 %に出穂が認められた日を出穂期とし、全穂数の80 %以上の穂首が黄化した日を成熟期とした。成熟期以降の調査は、生産力検定試験における調査方法（福嶋ら2015）に準じ、成熟期に、試験区中央の連続10株について、最長稈の稈長と穂長および1株あたりの穂数を測定した。また、倒伏程度は、無（0）～甚（5）の6段階で評価した。坪刈りは、1試験区当たり60株（4条×15株）を地際から刈り取った。そして、自然乾燥した後、風乾全重を測定し、脱穀および粃摺り後に地域慣行の1.9 mmの篩により選別し、篩上に残った玄米と篩下の玄米それぞれの重量を計測し、篩上に残った玄米を水分15 %に換算して精玄米重および千粒重を求めた。また、くず米歩合は、「篩下の玄米/篩選前

の玄米」の比率により求めた。1穂籾数は、1試験区につき生育中庸な5株を選び、測定した。

玄米外観品位の判定は、農林水産省農産物規格規定に基づき、民間検査機関によって (1~10): 1 (1等上), 2 (1等中), 3 (1等下)~9 (3等下), 10 (規格外)に格付けした結果を用いた。

2-2-3 理化学分析，米飯物性および食味官能評価の方法

理化学分析，米飯物理性および食味官能評価に供試した白米は，家庭用精米機（サタケ社RSKM5B）により歩留まり90 %にとう精した。理化学性は，白米をブラベンダーテストミルで粉碎し，70メッシュの篩を通過させた米粉を用いて，白米タンパク質含有率は近赤外分光分析装置（ビュッヒ社NIR Flex N-500）で，白米アミロース含有率は，稲津（1988）の自動分析法を改良した五十嵐ら（2004）の方法による流路型自動化学分析装置（ビーエルテック：オートアナライザーⅢ型）を用いて，アミロース含有率が既知の標準米試料であるうるち米「ゆきひかり（19.4%）」ともち米の「ヒメノモチ（0.0%）」から検量線を作成し，測定した。

米飯物性は，岡留ら（1996）の方法により，白米10 g と白米重の1.5倍の水とで少量炊飯し，25℃で2時間放冷した。測定は，テンシプレスサー（タケトモ電機社TTP-50BX2）を用い，米飯1粒による低・高圧縮試験（1バイト目に粒厚に対して25 %圧縮し，2バイト目に90 %圧縮，30粒測定）を行った。なお，米飯粒表層の物性を捉えるために低圧縮（25%）に設定し，加工適性に関連する表層の硬さや付着性などの差異検出を目的に測定した。また，米飯粒全体の物性を捉えるために高圧縮（90%）に設定し，食感に関連する全体の硬さや粘りについて測定した。

食味官能評価は，とう精歩合90 %の白米と白米重の1.4倍の水とを60分浸漬した後，IH炊飯器（Panasonic社SR-HC105）で52分炊飯し，1時間放冷したものを

いた。官能評価は、各年次ともに各回正午に岩手県農業研究センター職員15名前後のパネルにより、旧食糧庁の食味試験実施要領を参考にした。なお、8試験区のうち、6-2-0区を基準米とし、残りの7試験区を2つに分け（3区と4区）、それぞれ1回ずつ官能評価を行った。

2-2-4 統計解析

岩手大学情報基盤センターの SAS9.4/STAT (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) を用い、試験区間の差異および年次間差の解析は分散分析を行い、Tukey 法により群間の検定を行った。また、相関関係は、基肥窒素施肥量と収量構成要素各項目との相関関係はポリシリアル相関係数、収量構成要素の各項目間の相関関係はピアソンの積率相関係数を用い、それぞれ無相関検定を行った。

2-3 【結果】

2-3-1 供試年の平均気温および日照時間の推移と生育ステージ

調査圃場より約7 km離れた最寄りのアメダス地点（北上市）の気象データを使用し、供試年別に移植期の5月中旬から成熟期の9月上旬までの旬別平均気温と平年値および旬別日照時間と平年値の推移を図2-1に示した。

5月から7月の平均気温は、平年よりやや低い時期が見られたものの、いずれの年次ともに概ね平年並からやや高く推移した。登熟期の8月は、2015年は上旬と下旬の気温の変動が大きく、2016年はいずれも平年並からやや高い気温で推移し、2017年および2018年は平年並からやや低く推移した。

日照時間は、移植期の5月から出穂期の7月下旬まではいずれの年次ともに、概ね平年並から多く推移していた。一方、出穂期以後は、年次による日照時間のばらつきが大きく、特に、2015年は8月中旬から下旬、2017年は8月上旬から下旬、

2018年は8月下旬の日照時間が平年並から少なく、寡照条件だった。

次に、試験区ごとの供試4ヶ年平均の生育ステージ、出穂期から成熟期までの平均気温および登熟日数を表2-2に示した。

出穂期および成熟期は、いずれの試験区とも試験区間における差は小さかった。一方、年次によるばらつきが大きく、出穂期は6日間、成熟期は11日間の年次間差がみられた。

また、出穂日から成熟期までの平均気温および登熟日数は、いずれの試験区間に差はみられなかったが、年次によるばらつきがみられた。

2-3-2 成熟期の稈長、穂長、 m^2 当たり穂数、収量および収量構成要素

試験区ごとの供試4ヶ年平均の成熟期の稈長、穂長、 m^2 当たり穂数、収量および収量構成要素を表2-3に示した。

稈長は、分散分析の結果、試験区間の有意差があり、3-0-0区の63.6 cmから12-4-8区の72.4 cmまで8.8 cmの差がみられた。また、穂長は、分散分析の結果、試験区間の有意差があり、3-0-0区の14.7 cmから12-4-8区の17.4 cmまで2.7 cmの差がみられた。 m^2 当たり穂数は3-0-0区の369.8本から12-4-8区の457.9本まで88.1本の差がみられたものの、試験区間に有意な差はみられなかった。倒伏程度はいずれの試験区も0で、倒伏はみられなかった。

精玄米重は、岩手県と同熟期品種「いわてっこ」の標準施肥窒素量（岩手農研2001）である6-2-0区では480.5 g/m^2 であった。追肥窒素量を揃えた基肥窒素量の効果を比較すると、3-0-0区と12-0-0区との間には有意な差が認められ、後者は前者に対し、81.1 g/m^2 (20%)増加した。6-0-0区と比較し、12-0-0区では46.7 g/m^2 (11%)増加し、6-2-4区と12-2-4区では58.3 g/m^2 (11%)増加し、6-4-8区と12-4-8区では、41.3 g/m^2 (7%)増加したが、いずれも有意な差はみられなかった。また、基

肥窒素量を揃えた追肥窒素量で比較すると、基肥を 6 g/m^2 とした区では、6-0-0 区の 441.5 g/m^2 と比較し、6-2-0 区、6-2-4 区、6-4-8 区でそれぞれ 39.0 g/m^2 (9%), 72.1 g/m^2 (16%), 114.4 g/m^2 (26%) 精玄米重の増加がみられ、基肥を 12 g/m^2 とした区では、12-0-0 区の 488.2 g/m^2 と比較し、12-2-4 区、12-4-8 区でそれぞれ 83.7 g/m^2 (17%), 109 g/m^2 (22%) の精玄米重の増加みられた。特に、基肥窒素量が 6 g/m^2 および 12 g/m^2 どちらの試験区ともに、2 回の追肥の合計窒素量が 6 g/m^2 以上の区では、無追肥と比べ、精玄米重が有意に増加した。

くず米歩合は、いずれの試験区ともに 1~2 ポイントの範囲に収まっており、試験区間における有意な差はみられなかったものの、分散分析の結果、年次間には差がみられ、2015 年が有意に高かった。

玄米品位および収穫指数は、年次間差はみられたものの、試験区間で有意な差はみられなかった。

次に、収量構成要素のうち、玄米千粒重は、分散分析の結果、3-0-0 区と 6-2-0 および 6-4-8 区との間でのみ、有意差がみられたものの、それ以外の試験区では有意な差はみられなかった。また、年次間で有意な差がみられ、2018 年、2017 年の順に大きく、2015 年および 2016 年は小さかった。

1 穂粒数は、3-0-0 区が 1 穂当たり 50.6 粒で、他の試験区と比べ 8 粒から 20 粒程度有意に少なかった。 m^2 当たり粒数は、分散分析の結果、試験区間の有意差があり、3-0-0 区の 18.7 千粒/m^2 から 6-4-8 区の 32.3 千粒/m^2 まで 13.6 千粒/m^2 の差がみられた。追肥窒素量を揃えた基肥窒素量の効果を比較すると、3-0-0 区と比較し、6-0-0 区では 3.5 千粒/m^2 (18%), 12-0-0 区では 6.1 千粒/m^2 (32%) 増加し、6-2-4 区と 12-2-4 区では 0.4 千粒/m^2 (1%), 6-4-8 区と 12-4-8 区では 0.9 千粒/m^2 (3%) 減少したが、いずれも有意な差はみられなかった。また、基肥窒素量を揃えた追肥窒素量で比較すると、基肥を 6 g/m^2 とした区では、6-0-0 区の 22.2 千粒/m^2 と比較し、

6-2-0 区, 6-2-4 区, 6-4-8 区ではそれぞれ 2.6 千粒/m²(12%), 7.2 千粒/m²(32%), 10.1 千粒/m²(45%)の m²当たり籾数の増加がみられ, 基肥を 12 g/m²とした区では, 12-0-0 区の 26.1 千粒/m²と比較し, 12-2-4 区, 12-4-8 区ではそれぞれ 2.9 千粒/m²(11%), 5.3 千粒/m²(20%)の m²当たり籾数の増加がみられた. 特に, 基肥窒素量が 6g/m²および 12g/m²どちらの試験区とも 2 回の追肥の合計窒素量が 6 g/m²以上の区では, 無追肥区と比べ, m²当たり籾数が有意に増加する傾向がみられた.

2-3-3 窒素施肥量, 稈長, 穂長および m²当たり穂数, 収量および収量構成要素との相関関係

供試年ごとに基肥, 追肥および総窒素施肥量と, 成熟期における稈長, 穂長および m²当たり穂数と, 全重, 精玄米重および収量構成要素との相関関係を表 2-4 に示した.

基肥は, 4 カ年のうち全年次で有意な相関がみられた項目はなかったものの, 稈長, 全重および精玄米重は 3 カ年で有意な正の相関関係がみられた. また, 追肥は全重, 精玄米重および m²当たり籾数でいずれの年次も有意な正の相関関係がみられた. 総窒素施肥量との相関関係は, 全重, 精玄米重および m²当たり籾数はいずれの年次も有意な正の相関関係がみられ, 稈長, 穂長, 穂数および 1 穂籾数は 4 カ年のうち 3 カ年で有意な正の相関関係がみられた一方, いずれの年次も玄米千粒重とは有意な相関関係はみられなかった.

全重は m²当たり籾数と $r = 0.721$ から $r = 0.967$, 精玄米重は m²当たり籾数と $r = 0.788$ から $r = 0.938$ の有意な正の相関関係がみられた. 玄米千粒重は, いずれの年次も精玄米重と有意な相関関係はみられなかった.

2-3-4 白米タンパク質含有率および白米アミロース含有率

白米タンパク質含有率および白米アミロース含有率を表 2-5 に示した。白米タンパク質含有率は、6.5%~9.0%の範囲に分布していた。6-0-0 区が最も低い 6.5%で、6-4-8 区が最も高い 9.0%だった。追肥量を揃えた基肥窒素量が異なる区の比較では、無追肥の 3-0-0 区および 6-0-0 区に比べ、12-0-0 区でのみ有意な増加がみられたが、増加量は 0.5%程度と少なかった。

また、基肥が 6 g/m²および 12 g/m²の場合、追肥窒素量が 0 g/m²の区に比べ、2 回の追肥量の合計を 6 g/m²、12 g/m²に増加させると、白米タンパク質含有率が有意に高くなり、基肥窒素量より追肥窒素量が、白米タンパク質含有率の変動に強く影響する傾向がみられた。

次に、白米アミロース含有率は、9.1%~9.9%の範囲に分布していた。各試験区間の変動範囲は 1 ポイント未満だったものの、施肥窒素量が多くなるにつれ、白米アミロース含有率がやや低下する傾向がみられ、特に、追肥窒素量を増量した場合の低下が顕著にみられた。また、分散分析の結果、年次間に有意な差はみられなかった。

2-3-5 食味官能評価

6-2-0 区を基準米として、各試験区の食味官能評価について表 2-6 に供試年平均で示した。

外観評価、香りおよび味はそれぞれ、-0.347 から 0.363 まで、-0.186 から 0.046 まで、-0.371 から 0.228 までの範囲に分布しており、いずれの試験区も基準との差は±1 の範囲内だった。粘りは、-0.429 から 0.326 までの範囲に分布し、また、硬さは、-0.386 から 0.577 までの範囲に分布していた。基準と比べ、6-4-8 区は粘りが、-0.429 とやや弱く、硬さが、0.577 とやや硬く、総合評価が、-0.638 とやや

低い評価を示していたものの、いずれの試験区も基準との差は ± 1 の範囲内だった。

2-3-6 炊飯米における米飯物性評価

テンシプレッサーによる炊飯米の単粒の米飯物性について表 2-7 に示した。

全試験区の米飯物性は、表層の硬さと粘りがそれぞれ $80.0 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ から $91.9 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ まで、 $22.4 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ から $26.1 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ までの範囲に分布していたものの、いずれも試験区間に有意な差は見られなかった。全体の硬さと粘りはそれぞれ $2807.0 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ から $3860.6 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ まで、 $721.1 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ から $934.8 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ までの範囲に分布していたものの、いずれも試験区間に有意な差は見られなかった。

また、表層の付着量と付着性はそれぞれ 2.23 mm から 2.52 mm まで、 5.13 J/m^2 から 6.93 J/m^2 までの範囲に分布し、表層の付着量はいずれも試験区間に有意差はみられなかったものの、表層の付着性は、6-0-0 区および 6-2-0 区と 6-4-8 区および 12-4-8 区との間、3-0-0 区と 12-4-8 区との間に有意な差がみられた。全体の付着性は 4.03 J/m^2 から 6.45 J/m^2 までの範囲で変動し、6-0-0 区と 6-4-8 区および 12-4-8 区との間に有意な差がみられた。

硬さと粘りとの比で表されるバランス度のうち、表層のバランス度は 0.25 から 0.33 までの範囲に分布し、3-0-0 区および 6-0-0 区と 6-4-8 区および 12-4-8 区との間に有意な差がみられた。

2-3-7 白米タンパク質含有率および白米アミロース含有率と食味官能評価との相関関係

供試年次ごとに白米タンパク質含有率および白米アミロース含有率と食味官能評価との相関関係を表 2-8 に示した。

白米タンパク質含有率と食味官能評価との相関関係は、外観は、2015年に $r = -0.739$ 、2017年に $r = -0.885$ の有意な負の相関関係がみられた。味は、2015年に $r = -0.839$ の有意な負の相関関係がみられた。粘りは、2015年に $r = -0.862$ 、2017年に $r = -0.850$ の有意な負の相関関係がみられた。硬さは、2017年に $r = 0.934$ 、2018年に $r = 0.710$ の有意な正の相関関係がみられた。総合評価は、2015年に $r = -0.766$ の有意な負の相関関係がみられた。

次に、白米アミロース含有率と食味官能評価との関係は、粘りは2017年に $r = 0.811$ の有意な正の相関関係、硬さは2015年に $r = -0.717$ の有意な負の相関関係がみられた。総合評価は、2017年に $r = 0.754$ の有意な正の相関関係がみられた。その他の項目および年次では、有意な相関関係はみられなかった。

2-3-8 年次別の白米タンパク質含有率と米飯粒表層の硬さおよび付着性との関係

年次別の白米タンパク質含有率とテンシプレスサーによる単粒における米飯粒表層の硬さとの関係を図 2-2 に示した。

相関係数は最小 $r = 0.622$ から最大 $r = 0.801$ までの正の相関関係がみられ、2015年はややバラつきが大きいものの、いずれの年次も白米タンパク質含有率が高くなるにつれ、米飯粒表層の硬さが有意に高くなる傾向がみられた。

次に、年次別の白米タンパク質含有率とテンシプレスサーによる単粒における米飯粒表層の付着性との関係を図 2-3 に示した。

相関係数は最小 $r = -0.887$ から最大 $r = -0.520$ までの負の相関関係がみられ、2018年は、直線の傾きがやや緩やかだったものの、いずれの年次も白米タンパク質含有率が高くなるにつれ、米飯粒表層の付着性が有意に低くなる傾向がみられた。

2-4 【考察】

2-4-1 低アミロース米「きらほ」の異なる施肥窒素での生育および収量の差異

黒田ら（1999）は、寒冷地を対象とした多収品種育成におけるひとつの方向として、シンク容量の拡大のためには面積当たり籾数の増加、つまり1穂当たり籾数を増大することまたは面積当たり籾数を維持するとともに玄米千粒重を大きくすることが重要であることを指摘している。本試験の m^2 当たり籾数と精玄米重との間には強い正の相関関係があった（表 2-4）。穂数および1穂籾数は追肥窒素量との間に、年次によって相関関係がみられる年とみられない年があったものの双方の積である m^2 当たり籾数は、追肥窒素量との間に全年次で高い正の相関関係がみられた。大平ら（2018）は、東北地方の穂重型多収品種「いわいだわら」において穂揃期の窒素追肥により登熟歩合や粗玄米重が向上することを報告している。偏穂数型の低アミロース米「きらほ」では、追肥窒素によって、1穂籾数または有効茎が増える傾向にあったことから、 m^2 当たり籾数が増加し、精玄米重が増加したと推察される。

実際に本試験における、追肥窒素量を揃えた基肥の効果を比較すると、3-0-0 区および 12-0-0 区で、精玄米重に有意な差がみられたものの、基肥が 6 g/m^2 以上の区の比較では、基肥増量により m^2 当たりの籾数や精玄米重が増加傾向にあるものの有意な差はみられなかった。同熟期品種の「いわてっこ」の標準施肥における基肥窒素量が 6 g/m^2 であることを考えると、「きらほ」においては標準的な基肥窒素量以上の増量による増収効果は小さいと考えられる。一方、基肥窒素量を揃えた追肥の効果を比較すると、2回の追肥窒素量の合計が 6 g/m^2 以上の区の m^2 当たり籾数が無追肥区に比べて有意に増加し、精玄米重も有意に増加した。これらのことから、 m^2 当たりの籾数増加やそれに伴う精玄米重の増加は、基肥窒素量より

も追肥窒素量の増量による効果が大きいと考えられた。このことはすでに報告されているうるち米品種の結果（王ら 1997, 福嶋 2007）と一致していた。また、 m^2 当たりの籾数増加により登熟歩合の低下およびくず米歩合の増加が考えられるが、本試験においては、試験区間にくず米歩合の差はみられず、追肥窒素量の増量による登熟歩合への明確な影響はみられなかった。一方、6-2-0 区と 6-2-4 区では、穂揃期の追肥で籾数が増加したものの、6-2-4 区でくず米が増加傾向にあることから、本試験では、登熟期間にしいな等の発育停止籾の減少や穂からの籾の脱落が減少したことが要因と考えられる。

精玄米重の年次間差については、2015 年は有意に低収かつ、くず米歩合も有意に高い傾向がみられた。2015 年は、北上地点の実際のアメダスの数値では、出穂直前の 7 月中旬に 4 日間程度の $16\sim 18^{\circ}\text{C}$ の低温期間があり、8 月下旬にも低温期間があった（第 1 図）。この年の収量および収量構成要素をみると、全重が小さくかつ m^2 当たり籾数が多いこと、くず米歩合がやや高いこと、試験区と同じ圃場において「きらほ」と同程度の早生品種でも低収であったことなどから、減数分裂期の短期間の低温や 8 月下旬の低温により、「きらほ」を含む早生品種では生育に影響が考えられ、生育量が小さくなったことや籾数過剰による登熟歩合の低下などにより、くず米歩合が増加し低収となったと推察される。2016 年は他の年次より有意に多収の傾向がみられたものの、全重が重く、籾数がやや多いこと以外は他の年次と差はみられず、要因は判然としなかった。

2-4-2 低アミロース米「きらほ」の異なる窒素施肥での食味関連成分および炊飯米物性の差異

2015 年に著者らが岩手県内の加工業者を対象に実施した、聞き取り調査によると、低アミロース米の普及が進まない要因の一つに、おにぎりや弁当などの機械

成形時に米飯が潰れやすく、機械に付着しやすいなど作業ロスが多く発生することがある。これは、低アミロース米は、炊飯直後は柔らかく、粘りが強い特性を持つためと推察され、炊飯直後の柔らかさと粘りを抑えることが出来れば加工しやすくなると考えられる。

米飯の硬さはアミロース含有率と相関が高く (Juliano 1971)、また、タンパク質含有率とも関係があることが報告されている (山下ら 1974)。

本試験の結果から、低アミロース米「きらほ」は、幼穂形成期および穂揃期の追肥窒素量の合計が 0 g/m^2 , 2 g/m^2 の区に比べ、 6 g/m^2 , 12 g/m^2 に増加させた区で、白米タンパク質含有率が有意に増加した (表 2-5)。また、低アミロース米「きらほ」においては、白米タンパク含有率は基肥窒素量の影響が少ない一方、追肥窒素量で白米タンパク質含有率が変動しやすくなることを、低アミロース米「きらほ」において明らかにした (表 2-5)。これは、うるち米による既報 (平 1970, 本庄 1971, 石間 1974, 山下 1974, Tamaki et al.1989) と一致し、低アミロース米「きらほ」では、追肥窒素により、タンパク質含有率を制御できることが示唆された。

一方、白米アミロース含有率については、追肥窒素量を 0 g/m^2 , 4 g/m^2 , 8 g/m^2 に増量した場合、差は小さいものの有意に減少する傾向がみられた (第 5 表)。

アミロース含有率に影響を与える環境要因として、気温が低くなるとアミロース含有率は増加する (平 1998, 今林ら 1998, 松江ら 1999) ことが知られているが、本試験では、出穂期から成熟期までの平均気温の年次間差が 1°C 前後と小さく、試験区間にアミロース含有率の年次間差はみられなかった。よって、本試験のアミロース含有率の差は、山内ら (1982) のうるち米における試験と同様に、タンパク質含有率が増加したのに伴い、みかけのアミロース含有率が減少したことによるものと推察される。

次に、米飯物性は、タンパク質含有率が高い米ほどタンパク質が米粒内の表層

に多く存在し、これら表層側に集積したタンパク質が米飯粒の表層の硬さ(H1)に影響する(岡留ら 1999)。本試験では、年次間の変動はあるものの、タンパク質含有率と米飯粒の表層の硬さ(H1)との間に有意な正の相関関係が見られた。また、タンパク質含有率と米飯表層の付着性(A3)との間に有意な負の相関関係がみられたことから、米飯粒の表層(H1)が硬くなることで、加工製造の際、米飯の放熱のための「ほぐし」および「シャリ切り」作業の米粒の「つぶれ」が低減する可能性が示唆された。中森ら(2004)は、冷凍ピラフに対する加工適性は米飯表面の付着性を測定することでの的確に評価できることに加え、表面の付着性低下により、米飯の「べたつき」が減少し、加工適性が向上することを明らかにしている。したがって、低アミロース米「きらほ」においても、タンパク質含有率が高まることで、米飯表面の粘り及びさらに、米飯粒表層の粘り(-S1)および付着性(A3)が低下し、加工時の成型装置への米飯の付着である「べたつき」が低減する可能性が示唆された。

2-4-3 低アミロース米「きらほ」の異なる施肥窒素での食味

施肥によりタンパク質含有率を高めることで、加工適性が向上する可能性については前述したが、一方、うるち米では、白米タンパク質含有率が高くなるほど食味評価が劣り、米飯の粘性および弾性が低下することがすでに明らかになっている(石間ら 1974, 稲津 1988, 松江ら 1996)。本試験では、白米タンパク質含有率と食味官能評価の外観、味および粘りは年次により有意な負の相関関係があり、また、硬さは有意な正の相関関係にあり(表 2-8)、既知見と同様の傾向を示していた。一方、各施肥区間と基準との食味官能評価各項目の差は小さいことから(表 2-5)、施肥窒素により、白米タンパク質含有率が高まるのに対し、食味官能評価は低くなりにくいことが示唆された。

一方、米飯粒全体の物性は、室温保存や冷蔵、冷凍保存後の食感に強く影響すると考えられる。特に、アミロース含有率が全体の硬さ(H2)に影響しやすい(岡留ら 1999)。また、粘りと硬さの比で示されるバランス度は、官能評価における食味との相関が高い(石井ら 1993, 中森ら 2004, 山倉ら 2005)。本試験における施肥区間における米飯粒全体の物性は、施肥窒素量が少ない場合に付着性(A6)がやや高くなる傾向がみられるものの、硬さ(H2)、粘り(-S2)およびバランス度(-S2/H2)に有意な差はみられなかった(表 2-7)。したがって、低アミロース米「きらほ」は、施肥窒素量による白米アミロース含有率の変動はみられるものの、その差は小さく、施肥窒素量による米飯粒全体の物性への影響は小さいと推察される。

よって、低アミロース米「きらほ」は、タンパク質含有率の増加により、食味官能評価の粘りはやや低下し、硬さはやや硬くなる傾向がみられるものの総合評価の差は小さくなり、一定程度の食味は維持できると推察される。

以上のことから、低アミロース米「きらほ」の収量性向上には、他のうるち米品種と同様に、 m^2 当たり籾数の増加のための追肥窒素量の増量が有効であることが示唆された。また、施肥窒素量の増量によるタンパク質含有率の増加は、炊飯米の表層が硬くなるとともに、炊飯米表層の付着性が低下することにより、加工製造における米飯成型機への「べたつき」が低減し、作業の効率化が図られると推察される。また、炊飯米の食味は、粘りはやや低下し、硬さはやや硬くなる傾向を示すものの、食味総合評価の差は小さく、良食味は維持されることが示唆された。

したがって、総合的に判断した結果、今回の試験では、12-2-4 区の施肥体系が多収で、食味官能評価および米飯物理性に優れる傾向を示しており、低アミロース米「きらほ」に最適な施肥体系であると推察される。

他のうるち米では、玄米タンパク質含有率が高くなると食味は低下する傾向を

示すが、タンパクが高くなりにくい、または高タンパクでも食味が低下しにくい品種を選び、栽培方法（施肥条件）を改良することによって、食味が低下せずにタンパク含有率を高める余地があることが示唆されている（松崎ら 1973）。

よって、低アミロース米「きらほ」における追肥窒素施肥は、収量性の向上に加え、タンパク質含有率を高めることによって、加工製造の米飯成形における米飯の「つぶれ」や「べたつき」を低減することが可能かつ良食味を維持できる栽培法であると推察される。一方で、窒素肥料を多投下する栽培方法は、施肥および施肥作業時間の増加による生産コストの増加が見込まれることから、疎植栽培や無中干し栽培など施肥窒素の多投に頼らない栽培法やおにぎり・弁当向けや冷凍米飯への加工適性が高い安定多収品種の開発が必要と考えられる。

表2-1 試験区の施肥体系.

試験区 の表記 (区)	基肥			追肥(窒素)		総窒素 施肥量 (g/m ²)
	N (g/m ²)	P ₂ O ₅ (g/m ²)	K ₂ O (g/m ²)	幼穂形成期 (g/m ²)	穂揃期 (g/m ²)	
3-0-0	3	7.5	7.5	0	0	3
6-0-0	6	7.5	7.5	0	0	6
6-2-0	6	7.5	7.5	2	0	8
6-2-4	6	7.5	7.5	2	4	12
6-4-8	6	7.5	7.5	4	8	18
12-0-0	12	7.5	7.5	0	0	12
12-2-4	12	7.5	7.5	2	4	18
12-4-8	12	7.5	7.5	4	8	24

表2-2 供試年平均の生育ステージおよび出穂期から成熟期までの平均気温および登熟日数.

	試験区 の表記 (区)	生育ステージ		出穂期から成熟期	
		出穂期 (月/日)	成熟期 (月/日)	平均気温 (℃)	登熟日数 (日)
施肥					
	3-0-0	7/27	9/10	23.7	45
	6-0-0	7/28	9/11	23.7	45
	6-2-0	7/27	9/10	23.8	45
	6-2-4	7/27	9/10	23.8	45
	6-4-8	7/27	9/10	23.8	45
	12-0-0	7/28	9/10	23.7	45
	12-2-4	7/27	9/10	23.8	45
	12-4-8	7/27	9/10	23.8	45
年次					
	2015年	7/24	9/4	24.4	41
	2016年	7/30	9/9	25.1	41
	2017年	7/27	9/15	22.2	50
	2018年	7/27	9/12	23.5	47

表2-3 供試年平均の成熟期における稈長，穂長，穂数ならびに精玄米重，玄米品位，収穫指数および収量構成要素.

	試験区 の表記 (区)	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (本/m ²)	倒伏 程度 (0~5)	全重 (g/m ²)	わら重 (g/m ²)	粗玄 米重 (g/m ²)	精玄 米重 (g/m ²)	くず米 歩合 (%)	玄米 品位 (1-10)	収穫 指数	玄米 千粒重 (g)	1穂 粒数 (粒/穂)	m ² 当たり 粒数 (1000粒/m ²)
施肥 (4カ年平均)	3-0-0	63.6 d	14.7 d	369.8	0.0	1102.3 b	552.7	411.9	407.1 e	1.3	2.8	36.9	22.4 b	50.6 b	18.7 c
	6-0-0	66.0 cd	15.7 cd	379.9	0.0	1186.0 ab	593.5	448.3	441.5 de	1.1	2.8	37.2	22.6 ab	58.4 a	22.2 bc
	6-2-0	69.5 abc	17.1 ab	383.0	0.0	1203.2 ab	566.5	515.9	480.5 cd	1.0	2.4	39.9	22.9 a	64.3 a	24.8 bc
	6-2-4	68.5 cd	17.1 ab	438.2	0.0	1353.9 ab	664.2	545.0	513.6 bc	1.4	2.9	37.9	22.8 ab	66.6 a	29.4 a
	6-4-8	69.4 abc	17.2 a	457.0	0.0	1433.9 ab	684.8	583.4	555.9 ab	1.7	3.1	38.8	22.9 a	69.9 a	32.3 a
	12-0-0	68.3 bc	15.9 bc	410.7	0.0	1301.1 ab	646.2	447.0	488.2 cd	1.3	2.6	37.5	22.5 ab	63.3 a	26.1 bc
	12-2-4	71.4 ab	16.7 abc	442.3	0.0	1509.2 a	752.6	580.7	571.9 ab	1.5	2.9	37.9	22.6 ab	65.7 a	29.0 a
	12-4-8	72.4 a	17.4 a	457.9	0.0	1547.4 a	756.5	615.0	597.2 a	1.5	3.0	38.6	22.7 ab	67.9 a	31.4 a
年次	2015年	62.6 z	15.3 z	448.0	0.0	1199.9 z	552.7	411.9	374.4 z	2.7 y	3.1 y	32.2 z	21.6 z	71.0 y	32.1 y
	2016年	72.0 y	16.7 yz	430.1	0.0	1550.6 y	593.5	448.3	641.3 x	1.1 z	1.5 z	41.2 y	21.9 z	65.9 y	28.6 yz
	2017年	69.5 y	16.3 yz	387.7	0.0	1258.8 z	566.5	515.9	489.4 y	0.7 z	3.4 y	38.8 y	23.4 y	54.0 z	21.0 z
	2018年	70.5 y	17.6 y	403.6	0.0	1309.1 z	664.2	545.0	522.8 y	0.8 z	3.1 y	40.3 y	23.8 x	62.4 yz	25.3 yz
分散 分析	試験区	**	*	n.s.		**	**		**	n.s.	n.s.	n.s.	*	**	**
	年次	**	*	n.s.		**	**		**	**	**	**	**	**	**
	試験区×年次	n.s.	n.s.	n.s.		n.s.			n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

注1) 倒伏程度は，達観により，0(無倒伏)～3(中)～5(甚：完全倒伏)に区分した程度を示す.

注2) 玄米品位は，民間検査機関職員が1「上上」～9「下下」・10「規格外」に階級分けした結果を示す.

注3) 表中の英文字の各々において，同一文字を付した数値間には，Tukey法により5%水準で有意差無しを示す.

注4) 表中の“**”，“*”および“n. s.”は，分散分析により1 %水準，5 %水準で有意差有りおよび有意差無しを示す.

表2-4 窒素施肥量, 成熟期における稈長, 穂長, 穂数, 収量および収量構成要素との相関関係.

項目	基肥窒素 施肥量	追肥窒素 施肥量	総窒素 施肥量	稈長	穂長	穂数	全重	精玄 米重	玄米 千粒重	1穂 粒数
2015年の相関(n=8)										
稈長	0.769 *	0.004 n.s	0.412 n.s.							
穂長	0.648 n.s	0.109 n.s	0.413 n.s	0.205 n.s.						
穂数	0.322 n.s	0.987 **	0.825 **	-0.171 n.s	0.094 n.s.					
全重	0.638 n.s	0.892 **	0.970 **	0.107 n.s	0.349 n.s	0.888 **				
精玄米重	0.731 *	0.873 **	0.987 **	0.185 n.s	0.311 n.s	0.853 **	0.963 **			
玄米千粒重	0.425 n.s	0.329 n.s	0.390 n.s	-0.089 n.s	0.424 n.s	0.218 n.s	0.414 n.s	0.534 n.s.		
1穂粒数	0.769 *	0.534 n.s	0.768 *	0.365 n.s	0.123 n.s	0.622 n.s	0.586 n.s	0.629 n.s	-0.101 n.s.	
m ² 当たり粒数	0.493 n.s	0.894 **	0.926 **	-0.001 n.s	0.091 n.s	0.959 **	0.861 **	0.849 **	0.120 n.s	0.816 **
2016年の相関(n=8)										
稈長	0.903 **	0.966 **	0.924 **							
穂長	0.883 **	0.988 **	0.985 **	0.991 **						
穂数	0.906 **	0.836 n.s	0.950 **	0.874 **	0.857 **					
全重	0.962 **	0.753 *	0.952 **	0.903 **	0.867 **	0.758 *				
精玄米重	0.915 **	0.849 **	0.971 **	0.958 **	0.938 **	0.791 *	0.981 **			
玄米千粒重	-0.370 n.s	0.185 n.s	-0.075 n.s	0.028 n.s	0.110 n.s	-0.037 n.s	-0.371 n.s	-0.191 n.s.		
1穂粒数	0.688 n.s	0.931 **	0.896 **	0.915 **	0.923 **	0.916 **	0.679 n.s	0.772 *	0.304 n.s.	
m ² 当たり粒数	0.737 *	0.854 *	0.904 **	0.909 **	0.905 **	0.971 **	0.721 *	0.788 *	0.160 n.s	0.984 **
2017年の相関(n=8)										
稈長	0.971 **	0.869 **	0.923 **							
穂長	0.916 **	0.400 n.s	0.765 *	0.837 **						
穂数	0.436 n.s	0.610 n.s	0.635 n.s	0.555 n.s	0.173 n.s.					
全重	0.805 **	0.842 **	0.976 **	0.916 **	0.630 n.s	0.814 *				
精玄米重	0.885 **	0.849 **	0.969 **	0.958 **	0.747 *	0.688 n.s	0.969 **			
玄米千粒重	0.813 **	0.012 n.s	0.493 n.s	0.604 n.s	0.905 **	0.027 n.s	0.410 n.s	0.486 n.s.		
1穂粒数	0.926 **	0.877 **	0.825 *	0.934 **	0.719 *	0.480 n.s	0.845 **	0.842 **	0.514 n.s.	
m ² 当たり粒数	0.690 *	0.906 **	0.905 **	0.877 **	0.536 n.s	0.850 **	0.967 **	0.897 **	0.328 n.s	0.870 **
2018年の相関(n=8)										
稈長	0.615 n.s	0.795 **	0.798 **							
穂長	0.384 n.s	0.882 **	0.744 *	0.778 *						
穂数	0.795 *	0.776 *	0.906 **	0.640 n.s	0.561 n.s.					
全重	0.708 *	0.910 **	0.973 **	0.858 **	0.729 *	0.900 **				
精玄米重	0.576 n.s	0.917 **	0.918 **	0.891 **	0.869 **	0.813 **	0.963 **			
玄米千粒重	0.172 n.s	0.701 *	0.547 n.s	0.543 n.s	0.936 **	0.301 n.s	0.475 n.s	0.666 n.s.		
1穂粒数	0.196 n.s	0.837 **	0.563 n.s	0.763 *	0.881 **	0.366 n.s	0.664 n.s	0.793 *	0.835 **	
m ² 当たり粒数	0.426 n.s	0.817 **	0.773 *	0.844 **	0.913 **	0.661 n.s	0.866 **	0.938 **	0.781 *	0.940 **

注1) 基肥, 追肥および総窒素施肥量と各項目との関係はポリシリアル相関係数, それ以外の項目との関係はピアソンの相関係数を示す,

注2) 表中の“***”, “**”は1%水準, 5%水準で有意な相関関係有りを示し, “n.s.”は有意な相関関係無しを示す.

表2-5 供試年平均の白米タンパク質含有率および白米アミロース含有率の比較.

試験区の表記 (区)		白米タンパク質 含有率(%)		白米アミロース 含有率(%)	
	3-0-0	6.6	d	9.8	ab
	6-0-0	6.5	d	9.8	ab
	6-2-0	6.8	d	9.9	ab
	6-2-4	8.2	b	9.4	cd
	6-4-8	9.0	a	9.1	cd
	12-0-0	7.1	c	9.5	bc
	12-2-4	8.1	b	9.5	bc
	12-4-8	8.8	a	9.3	cd
分散分析	試験区	**		**	
	年次	n.s.		n.s.	
	試験区×年次	n.s.		n.s.	

注1) 表中の英文字の各々において、同一文字を付した数値間には、Tukey法により5%水準で有意差無しを示す.

注2) 表中の“**” および “n. s.” は、分散分析により1 %水準で有意差有りおよび有意差無しを示す.

表2-6 供試年平均の食味官能評価結果.

試験区の表記 (区)	外観 (-3～+3)	香り (-3～+3)	味 (-3～+3)	粘り (-3～+3)	硬さ (-3～+3)	総合 (-3～+3)
3-0-0	0.363	0.046	0.228	0.326	-0.339	0.195
6-0-0	0.153	-0.057	0.057	0.193	-0.386	0.099
6-2-0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6-2-4	0.007	-0.091	-0.006	-0.228	0.203	-0.154
6-4-8	-0.347	-0.186	-0.371	-0.429	0.577	-0.638
12-0-0	0.143	-0.061	0.094	-0.298	-0.223	-0.031
12-2-4	-0.038	-0.026	0.117	-0.195	0.039	0.086
12-4-8	-0.152	-0.084	-0.212	-0.157	0.029	-0.160

注) パネル数は9～17名. 「6-2-0」を基準として, -3 (劣) ～3 (優), ただし, 粘りは-3 (弱) ～ (強), 硬さは-3 (柔) ～3 (硬) で評価した.

表2-7 供試年平均の炊飯米における米飯物性.

表3-1 試験区・年次・施肥率による米飯粒性状																	
試験区 の表記 (区)	米飯粒の表層										米飯粒の全体						
	硬さ	粘り	付着量		付着性	バランス度		硬さ	粘り	付着性	バランス度						
	H1	-S1	L3	A3	-S1/H1		H2	-S2	A6	-S2/H2							
	($\times 10^2$ N/m ²)	($\times 10^2$ N/m ²)	(mm)	(J/m ²)				($\times 10^2$ N/m ²)	($\times 10^2$ N/m ²)	(J/m ²)							
施肥																	
3-0-0	80.0	24.4	2.44	6.41	ab	0.31	a	2807.0	721.1	5.48	ab	0.26					
6-0-0	80.8	26.1	2.52	6.93	a	0.33	a	3052.5	754.4	6.45	a	0.25					
6-2-0	82.1	26.1	2.39	6.69	a	0.32	ab	3209.0	801.7	5.74	ab	0.25					
6-2-4	86.6	24.8	2.40	6.15	abc	0.29	ab	3106.6	795.8	5.29	ab	0.26					
6-4-8	91.2	23.7	2.23	5.39	bc	0.26	b	3395.7	851.2	4.35	b	0.25					
12-0-0	87.0	24.5	2.41	6.11	abc	0.29	ab	3572.3	868.0	4.86	ab	0.25					
12-2-4	90.5	24.9	2.42	6.05	abc	0.29	ab	3700.8	875.6	4.67	ab	0.24					
12-4-8	91.9	22.4	2.27	5.13	c	0.25	b	3860.6	934.8	4.03	b	0.25					
年次																	
2015年	74.3	z	25.7	y	2.80	x	7.49	x	0.35	y	3176.4	z	802.4	7.20	x	0.26	y
2016年	79.5	yz	20.9	z	2.36	y	5.49	yz	0.27	z	3063.7	z	800.8	4.74	yz	0.26	y
2017年	87.8	y	25.3	y	2.49	y	6.29	y	0.29	z	3071.3	z	780.1	5.01	y	0.26	y
2018年	103.5	x	26.4	y	1.89	z	5.15	z	0.26	z	4040.9	y	918.0	3.49	z	0.23	z
分散 分析	試験区	n.s.	n.s.	n.s.	**		**		n.s.	n.s.	**		n.s.				
	年次	**	**	**	**		**		**	n.s.	**		**		**		
	試験区×年次	n.s.	**	*	n.s.		**		**	n.s.	n.s.		n.s.		**		

注1) 表中の英文字の各々において，同一文字を付した数値間には，Tukey法により5%水準で有意差無しを示す.

注2) 表中の“**”，“*”および“n. s.”は，分散分析により1 %水準，5 %水準で有意差有りおよび有意差無しを示す.

表2-8 白米タンパク質含有率および白米アミロース含有率と 食味官能評価との相関関係.

項目	年	食味官能評価											
		外観		香り		味		粘り		硬さ		総合	
タンパク質	2015	-0.739	*	-0.629	n.s.	-0.839	**	-0.862	**	0.668	n.s.	-0.766	*
	2016	-0.660	n.s.	-0.064	n.s.	-0.541	n.s.	-0.264	n.s.	0.444	n.s.	-0.456	n.s.
	2017	-0.885	**	-0.577	n.s.	-0.527	n.s.	-0.850	**	0.934	**	-0.697	n.s.
	2018	-0.310	n.s.	-0.454	n.s.	-0.103	n.s.	-0.268	n.s.	0.710	*	-0.010	n.s.
アミロース	2015	0.537	n.s.	0.446	n.s.	0.453	n.s.	0.555	n.s.	-0.717	*	0.552	n.s.
	2016	0.493	n.s.	0.231	n.s.	0.583	n.s.	0.447	n.s.	-0.296	n.s.	0.504	n.s.
	2017	0.561	n.s.	0.644	n.s.	0.627	n.s.	0.811	**	-0.681	n.s.	0.754	*
	2018	0.220	n.s.	0.519	n.s.	0.032	n.s.	0.212	n.s.	-0.666	n.s.	-0.121	n.s.

注1) 供試年ごとに8試験区を込みにした相関係数(各年次n=8).

注2) 表中の“**”, “*”は1%水準, 5%水準で有意な相関関係有りを示し, “n.s.”は有意な相関関係無しを示す.

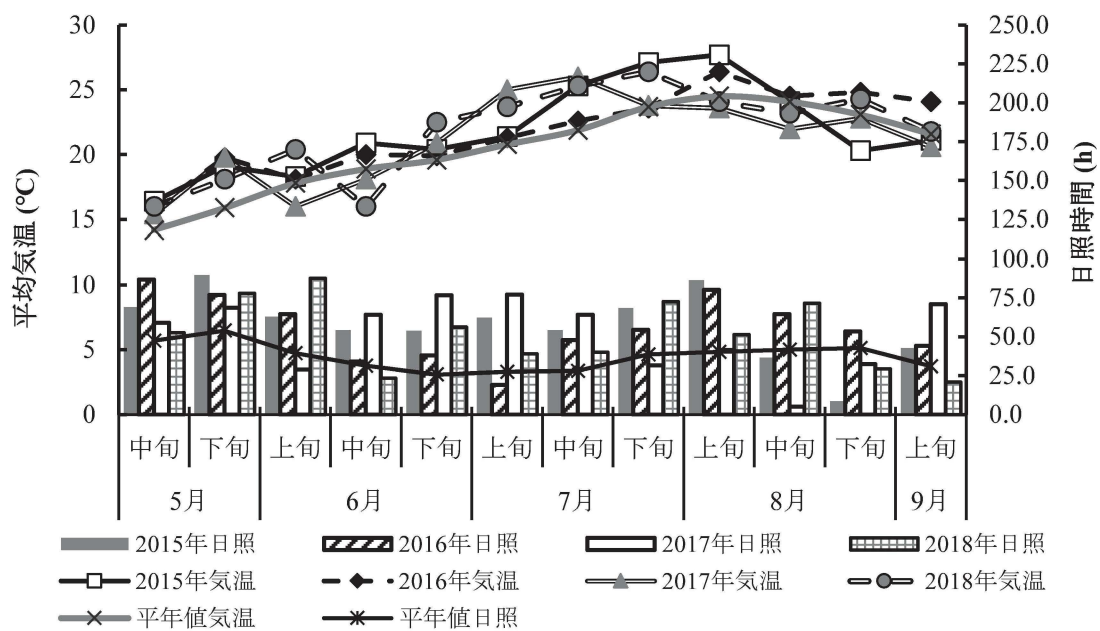


図2-1 試験期間の平均気温および日照時間の推移.

注) 平年値は, アメダス北上地点(気象庁)における30年間のデータ

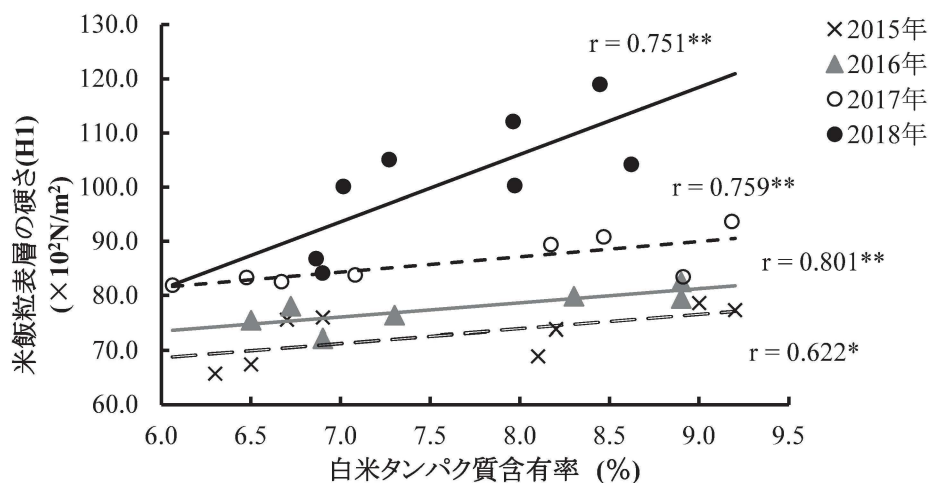


図2-2 供試年別の白米タンパク質含有率と米飯粒表層の硬さとの関係.

注) 図中の“**”, “*”は, それぞれ1%水準および5%水準で有意な相関関係有りを示す.

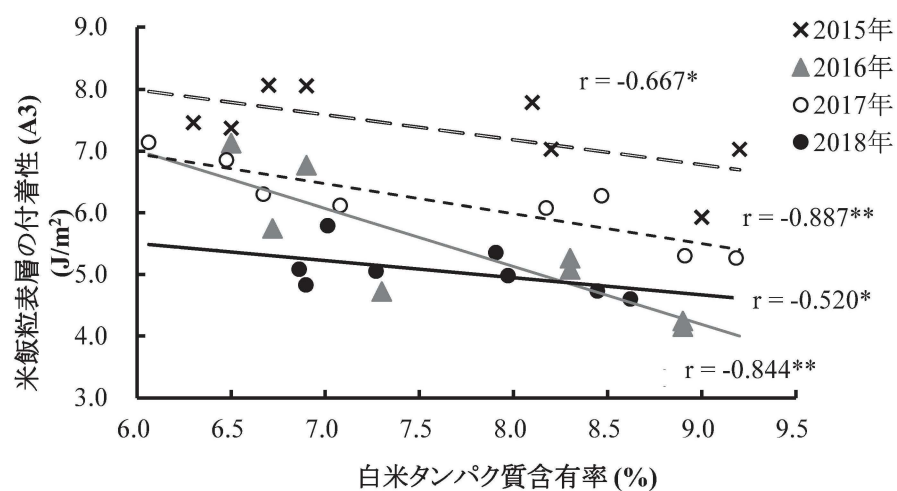


図2-3 供試年別の白米タンパク質含有率と米飯粒表層の付着性との関係.

注) 図中の“**”, “*”は, それぞれ1%水準および5%水準で有意な相関関係有りを示す.

第3章

高タンパク低アミロース米「きらほ」の水浸裂傷粒発生率と吸水特性

3-1 【緒言】

近年、高齢化や女性の社会進出等により食の簡便化が進んでおり（農林水産省 2017）、今後は持ち帰り弁当などの中食で用いられる業務用米の需要が更に拡大すると見込まれる（農林水産省 2020）。中食において米飯保存は、日持ちの観点から見ると冷蔵や冷凍といった低温が望ましいが、一方でデンプンの老化により食味は低下する。よって、冷蔵後あるいは冷凍解凍後に食しても、炊飯後米飯に近い食味と品質を有する、中食向けの新しい米品種の開発が求められている（農林水産省 2008）。この中で、低アミロース米（アミロース含有率が 15% 以下で糯性ではなく、もち米と通常のうるち米の中間的性質を有する米（石谷ら 1992, 堀末ら 1996, 大坪ら 1995））は炊飯後、冷蔵しても粘りが強く柔らかい米飯特性をもつため、中食向けの業務用米として期待を集めている（根本ら 2002）。

一般に、中食向けを含む業務用米の精白工程に重要とされる評価項目は、白度、精白歩合、玄米外見品質および碎粒、水浸裂傷粒発生率（柳瀬ら 1985, 柳瀬 1989, 柳原ら 2017）があげられる。ここに、水浸裂傷粒とは、水浸時に精白米が胚部や腹部側から吸水することで水分膨張の差が生じることにより生じる外部裂傷した粒であり、これは炊飯後に炊飯崩壊粒となり、食味にも悪影響を及ぼすことが知られている（柳瀬 1989, 村田ら 1992）。この水浸裂傷粒発生率は 10% を超えると、米飯表面にアミロースを主体とする水溶性物質、いわゆる「おねば」（丸山ら 2002）が過剰となり米飯表面に「べたつき」（柳原ら 2017）が生じる。これにより粒感が低下するため、冷凍ピラフやおにぎりなどの成型工程では、米粒崩壊による食品ロス（不良品発生や歩留低下）が引き起こされる（柳原ら 2017）。しかしなが

ら、以上に関して低アミロース米を用いた研究例は見当たらない。また、浸漬工程における精白米の吸水特性は、米飯の「ふっくら感」である膨張容積(谷ら 1969)など「炊きあがりの良さ」に多大な影響を与える(柳原ら 2017)が、醸造用(水間 2009, 佐藤ら 2011, 小出ら 2013, 奥田ら 2017)やうるち米(村田ら 1996, 深井ら 2006, 貝沼 2009, 坂本ら 2015)と比べ、低アミロース米を用いた知見は見当たらない。よって、精白米の水浸裂傷粒発生率および吸水特性に関して低アミロース米を用いた測定を行うことは、以上の炊飯工程の問題点を解決するうえで有益な知見になると考える。

精白米の水浸裂傷粒発生率および吸水特性に与える因子としては精白米中のアミロース含有率以外にもタンパク質含有率があげられる。これまでアミロース含有率が 17~23%程度の主食用米では、精白米中のタンパク質含有率が大きくなるにつれ食味が低下すること(石間ら 1974)、また施肥すなわちタンパク質含有率が高まることで、炊飯米の表面構造が変化するとの報告がある(岡留ら 1999)。近年、著者らは低アミロース米の栽培において、窒素追肥を制御することで、意図的かつ安定的に高タンパク低アミロース米を生育できる技術を開発し、また、その米飯特性について調査を行ってきた(小舘ら 2017)。その中で高タンパク低アミロース米は、内部構造が通常のタンパク質含有率の低アミロース米と異なること、タンパク質含有率の高い精白米は吸水特性が低くなることから、急激な精白米内部への吸水に起因する水浸裂傷粒の発生を抑制できるのではないかと考えた(小舘ら 2020)。

本研究では、以上を確かめるため、窒素追肥技術により低アミロース米品種「きらほ」から標準タンパク低アミロース米(無追肥)および高タンパク低アミロース米(穂揃期に窒素追肥)を栽培・収穫した。その後、粳摺り、精米した後、標準タンパク低アミロース米および高タンパク低アミロース米の水分および水温が

水浸裂傷粒発生率および吸水特性（吸水中の含水率の変化，加熱吸水率）について検討した．さらに，高タンパク低アミロース米の業務用米への適性について考察したので報告する．

3-2 【材料および方法】

3-2-1 供試材料

2018 年に岩手県北上市の岩手県農業研究センター水田圃場において栽培した低アミロース米品種「きらほ」（仲條ら 2017）を測定に用いた．

栽培は，著者らの研究（小館ら 2017）を基に基肥を窒素成分で 6 g/m^2 ，追肥を無追肥とした区を標準タンパク区，基肥を窒素成分で 6 g/m^2 ，穂揃期に窒素成分で 8 g/m^2 を施用した区を高タンパク区とした．また，リン酸およびカリをそれぞれ成分で 6 g/m^2 施用した．移植を 5 月 29 日に行い，以後の栽培管理は，地域慣行のとおり行った．

収穫後は，水分約 15% (w/w) まで乾燥し，インペラ式粳摺り機（大竹製作所：FS20-SM）により粳摺りを行った．得られた玄米を縦目 1.9 mm の篩いにより調整した後，精米機マジックミル（サタケ：RSKM5B）を用い，とう精歩合 90% となるよう精米した．

3-2-2 タンパク質含有率およびアミロース含有率の測定

測定に用いた精白米のタンパク質含有率は近赤外分光分析装置（ビュッヒ：NIR Flex N-500）を用いて計測した．また，精白米のアミロース含有率は稲津（1988）の自動分析法を改良した五十嵐ら（2004）の方法による流路型自動化学分析装置（ビーエルテック：オートアナライザーⅢ型）を用いて，アミロース含有率が既知の標準米試料であるうるち米「ゆきひかり（19.4%）」ともち米の「ヒメノモチ

(0.0%)」から検量線を作成し、測定した。加えて、本研究では分析装置の再現性確認のため、既知試料として隣接圃場の「ひとめぼれ」を用い、分析前後にそのタンパク質含有率とアミロース含有率を計測した。

3-2-3 精白米の水浸裂傷粒発生率の測定

測定には、水分 13.4% および 14.4% になるように塩化ナトリウムの飽和水溶液で相対湿度を一定にしたデシケーター内で一定日数調湿した精白米を用いた。水浸裂傷粒発生率の測定は小出ら（2001）の方法に準じて行った。ここでは、水温を 5℃、10℃、20℃、30℃とし、精白米 100 粒を計粒板に載せた後、30 分浸漬した。浸漬後、目視にて水浸裂傷粒数を計測し、水浸裂傷粒発生率を求めた。なお、測定はそれぞれ 6 反復行った。

3-2-4 精白米の吸水中の含水率変化の測定

精白米（水分 15.5%）を測定に使用した。測定は、小出ら（2016）の方法に準じて、水温 5℃、10℃、20℃、30℃の条件下で行った。その後、ポリエチレン製ネットに精白米 10 g を入れ、これをインキュベーター内の容器に 15, 30, 45, 60, 90, 120 分水浸させたのち、卓上遠心機（BECKMAN: GS-15R）にて 1 分間遠心脱水（回転数 200 rpm）した。その後、吸水後の精白米の質量を計測するとともに、135℃常圧加熱乾燥法（日本食品科学工学会 1996）により 24 時間絶乾し、含水率（%, d.b.）を算出した。なお、吸水測定は 3 反復行った。

3-2-5 精白米の加熱吸水率の測定

精白米の炊飯米における加熱吸水率は、膨張容積（いわゆる「ふっくら感」）と強い相関関係（丸山ら 2002）にあることが報告されており、低アミロース米も、

うるち米並の加熱吸水率が必要と考えられる．よって，以下の方法により加熱吸水率を測定した．

精白米 600 g と精白米重の 1.4 倍（精白米の含水率に基づき 1.4 倍となるよう加水量を補正）の蒸留水とを 60 分浸漬したのち，IH 炊飯器（Panasonic：SR-HC105）で 52 分炊飯したのち，直ちに米飯質量を測定した．なお，加熱吸水率の算出方法は，竹生ら（1960）が定義した「加熱吸水率＝炊飯米の重量／使用精白米の重量」を基に計算した．

3－2－6 玄米の内部構造の解析

玄米の内部構造の解析には，走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた．SEM 解析用サンプルは玄米を 2 分割に切断後に，試料台に固定し，玄米胚乳表面にオスミウムコーター（Filgen 社：OPC40）を用いて，オスミウムを 5 nm 蒸着した．完成したサンプルは，SEM（JEOL 社：JSM-7800F PRIME）を用い，真空下，加速電圧 5kV で観察した．

3－2－7 統計解析

統計解析は岩手大学情報基盤センターの SAS9.4/STAT（SAS Institute Inc., Cary, NC, USA）を用いた．ここでは Welch の t 検定により解析し， $p < 0.05$ を有意差ありとして判定した．

3－3 【結果および考察】

3－3－1 タンパク質含有率およびアミロース含有率

測定に用いた精白米のタンパク質含有率およびアミロース含有率を図 3-1 に記す．標準タンパク区のタンパク質含有率は 6.4%，高タンパク区のタンパク質含有

率は 8.3%であり両者に有意な差が認められた。一方、アミロース含有率は、標準タンパク区において 8.1%，高タンパク区において 7.3%であり，有意な差は見られなかった。また，分析装置の再現性確認のため，標準試料として分析の前後に供試した「ひとめぼれ」の精白米のタンパク質含有率は 6.8%，アミロース含有率は 18.4%で，標準誤差±1%以内の範囲であった。

この結果から，本測定で用いた「きらほ」は，低アミロース米（仲條ら 2017）であり，また，栽培段階において穂揃期の窒素追肥により異なるタンパク質含有率を有する精白米を提供できることが示された。

3－3－2 水浸裂傷粒発生率

標準タンパク区（水分 13.4%と 14.4%）と高タンパク区（水分 13.4%と 14.4%）の水浸裂傷粒発生率を図 3-2 に示す。標準タンパク区（水分 13.4%）では，水温 5℃において水浸裂傷粒発生率が 31.2%と高い値を示したが，水温の上昇とともに水浸裂傷粒発生率が減少し，30℃では 15.8%となった。標準タンパク区（水分 14.4%）では，5℃において水浸裂傷粒発生率は 16.3%を示し，水温の上昇とともに水浸裂傷粒発生率が緩やかに減少し，30℃では 8.0%となった。標準タンパク区において水分 13.4%と 14.4%の水浸裂傷粒発生率を比較すると，全ての浸漬温度で高水分の精白米が低水分より有意に低い結果が得られた。これらの傾向は，村田ら（1996）および小出ら（2001）の報告と一致していた。

一方，高タンパク区は，水分 13.4%および 14.4%において，いずれの水温でも水浸裂傷粒発生率が 10%以下と低い結果を示した。また，水浸裂傷粒発生率は，全ての浸漬温度において高水分の精白米と低水分の精白米との間に有意な差は見られなかった。これは既往の報告（村田ら 1996，小出ら 2001）と異なる結果であり，低アミロース米を高タンパク化することで，精白米の水分や水温に関わらず

水浸裂傷粒の発生が低減できることが示唆された。本研究では、標準タンパク区と高タンパク区を比較すると、浸漬温度が 5℃、10℃および 20℃の場合および水分（13.4%と 14.4%）において、高タンパク区の水浸裂傷粒発生率が標準タンパク区の値より有意に低い結果が得られた。一般に、水浸裂傷粒発生率は精米に供される玄米水分に依存し（柳瀬 1989）、水浸裂傷粒発生率が 20%を超えると米飯の食味に悪影響を及ぼすことが示されている（柳瀬 1989）が、高タンパク区ではいずれの水分および水温においても、水浸裂傷粒発生割合は 10%以下である。水浸裂傷粒発生率を 10%以下に抑えることは、米飯加工製造において食味の平準化（日本炊飯協会 2020）および米飯の「べたつき」の低減を意味する（柳原ら 2017）。

よって、高タンパク低アミロース米は、炊飯条件による水浸裂傷粒の発生率の変動が小さく、かつ発生を抑制できる低アミロース米であると推察する。今後は、このことを解明するため、高タンパク低アミロース米内部のタンパク質分布や吸水機構についてミクロな観点からの検討が必要である。

3-3-3 吸水中の含水率変化

標準タンパク区と高タンパク区の精白米（水分 15.5%）の浸漬中の含水率変化を図 3-3 に示す。これを見ると浸漬中の精白米の含水率は指数関数的に上昇し、水温が 20℃および 30℃では 60 分程度で水分が平衡に達した。さらに、浸漬中の精白米の含水率は、吸水温度の影響およびタンパク質含有率に大きく影響されないことがわかる。また、いずれの水温条件においても、標準タンパク区の含水率と高タンパク区の含水率との間には、5%水準で有意な差は見られなかった。

次に、吸水中の含水率変化を、既往の文献と同様に以下の Page 式（村田ら 1996, 小出ら 2016）を用いて近似した。

$$\frac{M'_e - M'}{M'_e - M'_0} = \exp(-kt^N) \quad (1)$$

ここに、 M' は吸水時間 t (h) のときの含水率 (%d.b.), M'_0 は初期含水率 (%d.b.), M'_e は平衡含水率 (%d.b.)でここではパラメータ、 k は吸水速度定数 (h^{-N}), N はパラメータ (-). 測定値を式 (1) に代入し、非線形最小二乗法で得られたパラメータを表 3-1 に示す. また、得られたパラメータを式 (1) に代入し得られた計算値を図中に実線で示す (図 3-3). これより吸水中の低アミロース米の精白米の含水率は、Page 式により高い精度で近似できることが示され、このことは実際の炊飯工程にて吸水時間を設定に資する知見を与えると考える.

3-3-4 精白米の加熱吸水率

標準タンパク区と高タンパク区の精白米の炊飯における加熱吸水率を図 3-4 に示す. それぞれの精白米重を 100%とした場合に、加熱吸水率は標準タンパク区において 237.5%, 高タンパク区において 234.0%であり、試験区間に有意な差は見られなかった. この結果から、高タンパクの低アミロース米「きらほ」は、標準タンパクの低アミロース米「きらほ」と炊飯における加熱吸水率に差は見られなかった. 柳瀬ら (1984) は、玄米タンパク質含量が 6.0%~10.3%のうるち米の加熱吸水率は 223%~240%で、タンパク質含量の高いものは、精白米の初期吸水率がやや劣ること、加熱吸水率がやや小さいことを明らかにしている. 本試験の標準タンパク区および高タンパク区の低アミロース米は、いずれもこれらうるち米の加熱吸水率の範囲である. ここに示す高タンパクの低アミロース米は、標準タンパクの低アミロース米と比べ、加熱吸水率と、図 3-3 にみられるように精白米の吸水特性に関して差が見られないことから、炊飯の炊き上がりに問題が見られないことが推察される.

3-3-5 玄米の内部構造解析

玄米内部の構造を解析するため、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて玄米横断面を観察した。玄米の割断面を図 3-5、中心部を図 3-6 に示す。標準タンパク区の玄米表層にあたる玄米割断面の外側（糠層と精白米での表層部分）は、タンパク質顆粒の他に、デンプン粒であるアミロプラストが広く分布していた。また、高タンパク区は、標準タンパク区と比べ、精白米の場合の表層部分を中心に広範囲にタンパク質顆粒が密に分布し、アミロプラストはほとんど観察されなかった。一方、中心部は、標準タンパク区および高タンパク区ともに、アミロプラストによるデンプン粒が多く観察された。また、高タンパク区では、アミロプラスト包膜が消失しデンプン粒が散在する部分が観察された。

よって、高タンパク低アミロース米「きらほ」は、タンパク質顆粒が玄米表層に密集し、中心部はアミロプラストが分布しているものの、一部デンプン粒が散在するなど、高タンパク化により玄米表層の内部構造が変化することが明らかとなった。

これにより、高タンパク低アミロース米「きらほ」は、水浸裂傷粒の発生条件である浸漬中の白米粒の腹部側と背部側の水分差によって腹部側に生じる引張応力と水分の増加に伴う強度の低下（村田ら 1992）が、玄米表層にタンパク質顆粒が密集することで、強度が低下しにくくなることで水浸裂傷粒の発生が低減すると推察される。一方、タンパク質は、デンプンの吸水力を低下させる要因のひとつであることが明らかになっている（塩野ら 2017）。また、浸漬によりアミロプラスト構造が消失し、多孔質構造の孔の面積が増加することが明らかになっている（冨田ら 2015）。したがって、高タンパク化によりデンプンの吸水力は低下するものの、浸漬前からすでにアミロプラスト構造が消失し、吸水しやすくなって

いることから、高タンパク低アミロース米は標準タンパクのものと比べ、吸水力に差がみられなかったと推察される。

以上、水浸裂傷粒の発生率、吸水特性、加熱吸水率を考えると、高タンパク低アミロース米「きらほ」は、業務用米の炊飯工程における加工適性の改善・向上に有効である。今回、著者らの有する栽培技術を生産現場に応用し、高タンパク低アミロース米を大量生産すれば、冷蔵・冷凍米飯や業務用米に対して、消費者や生産者の米飯品質の期待に応じられる可能性が高まる。次章では、高タンパク低アミロース米の米飯の物理的特性を測定するとともに、その冷蔵後の品質変化や食味について検討する。

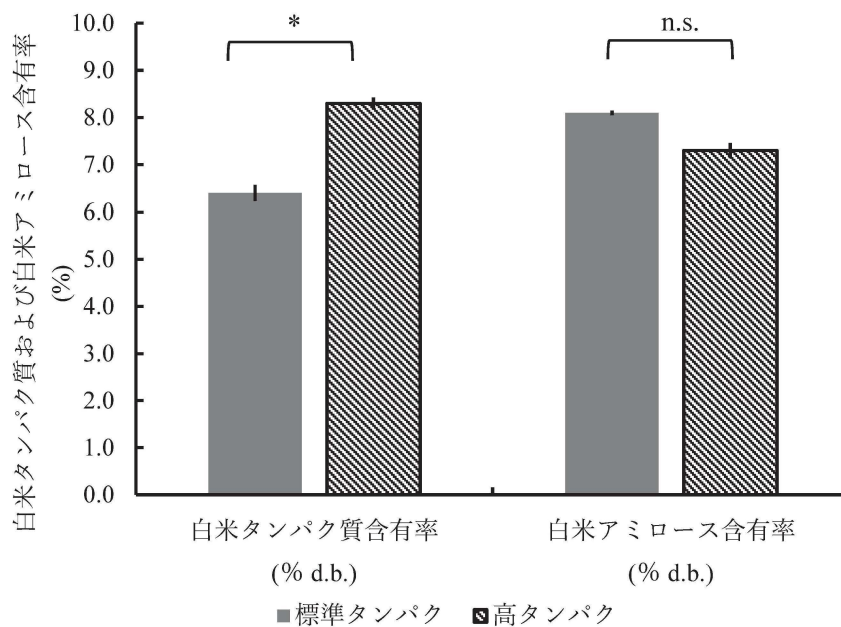


図3-1 白米タンパク質含有率および白米アミロース含有率の変化.

注1) 図中のバーは標準誤差を表す. (n=3)

注2) 図中の同一英文字を付した数値間には, Tukey法により5%水準で有意差が無いことを示す.

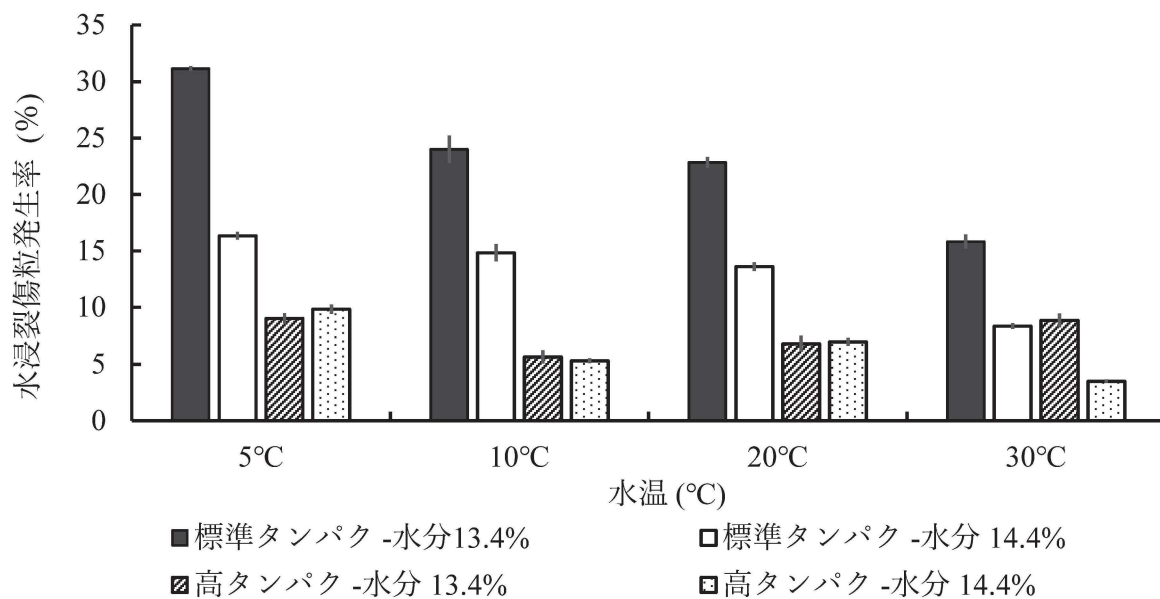


図3-2 異なる水温および異なる白米水分 (13.4 %, w.b.および14.4 %, w.b.) 条件における白米の水浸裂傷粒の比較.

注) 図中のバーは標準誤差を表す (n=6) .

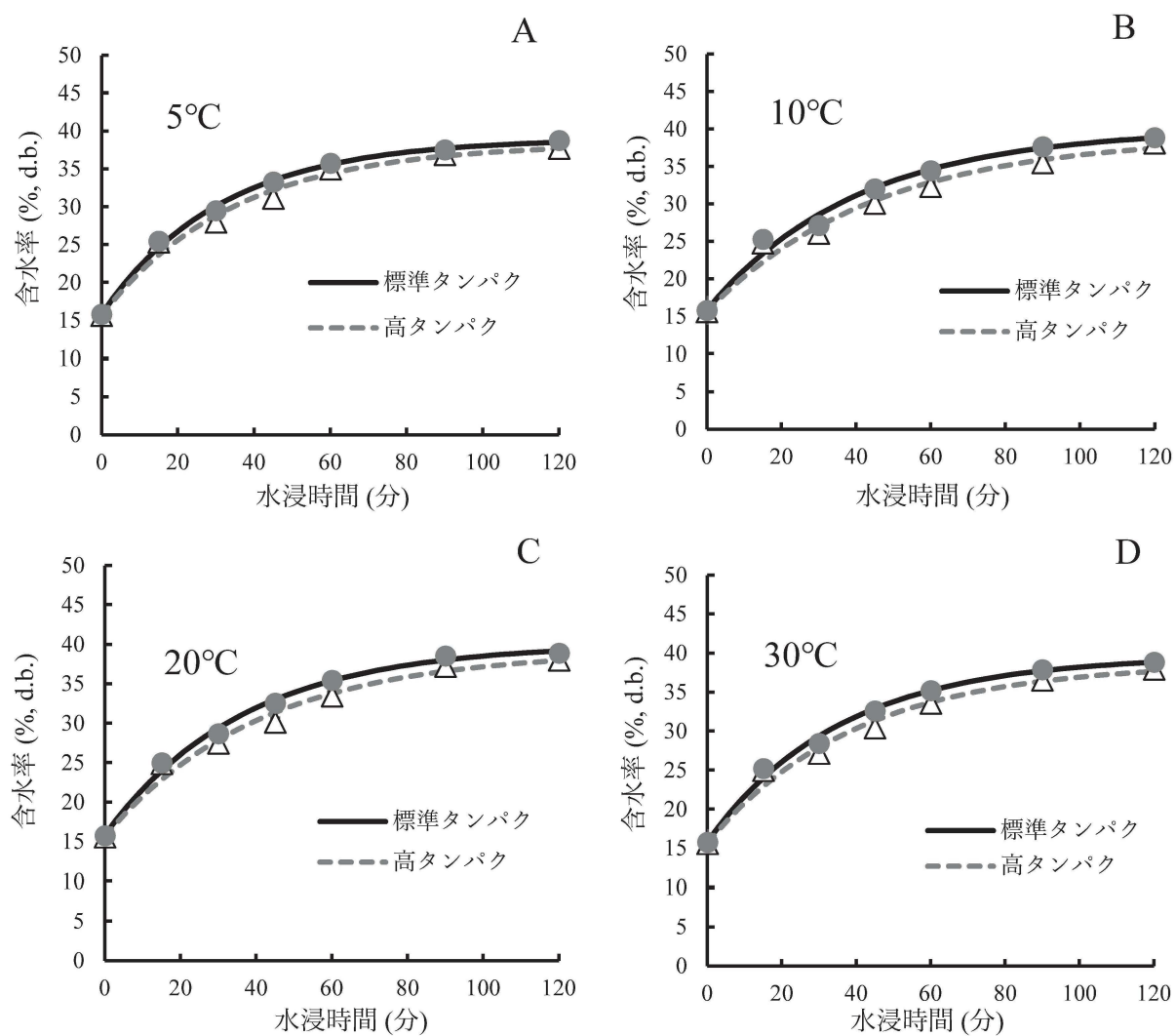


図3-3 異なる水温における含水率の経時変化.

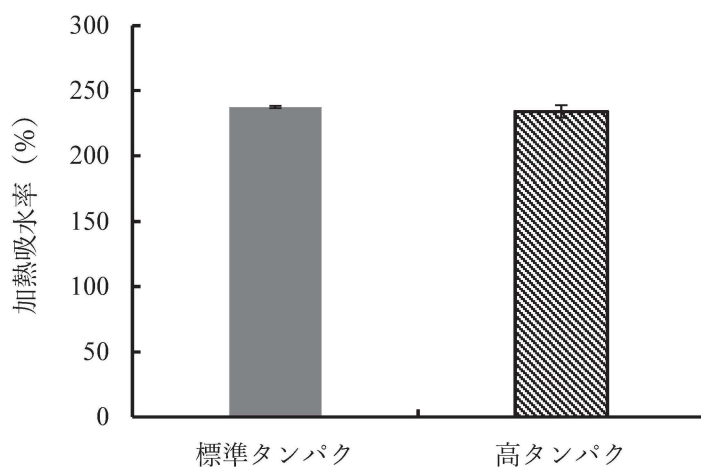


図3-4 炊飯における加熱吸水率の比較.

注) 図中のバーは標準誤差を表す (n=6) .

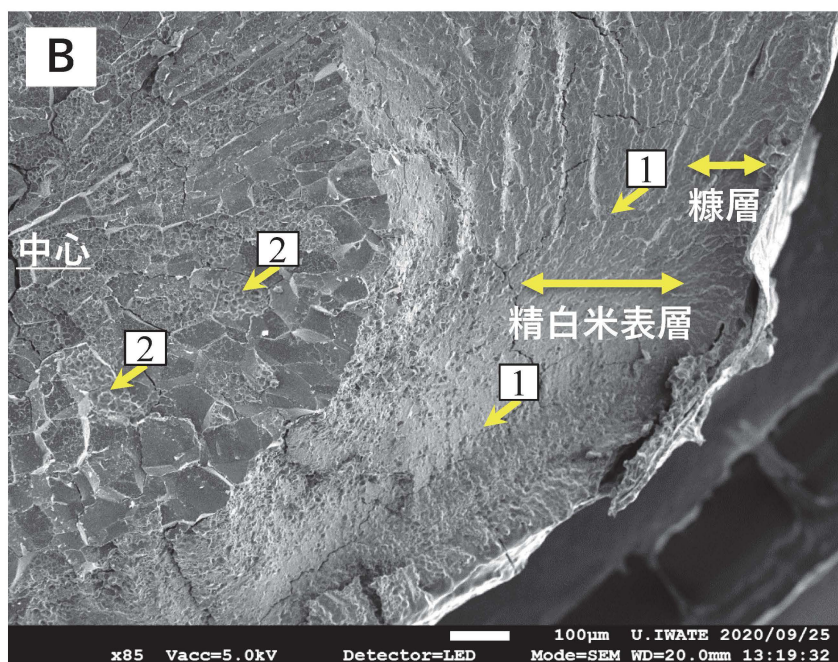
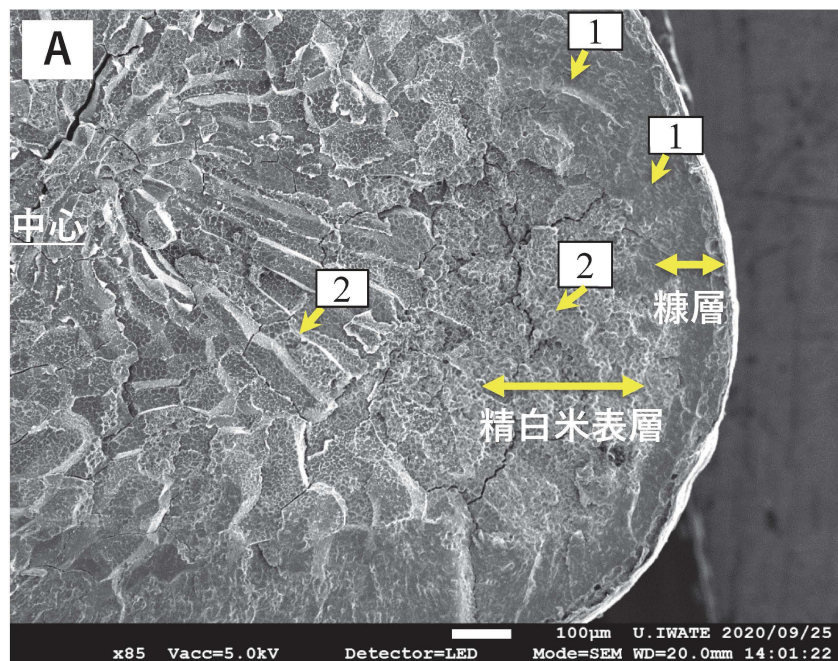


図3-5 標準タンパク質含有率と高タンパク質含有率の「きらほ」における玄米横断面の走査型電子顕微鏡写真。

注1) A：標準タンパク質含有率，B：高タンパク質含有率の「きらほ」を示す。
 注2) 図中の矢印1はタンパク質顆粒，矢印2はアミロプラストを示す。

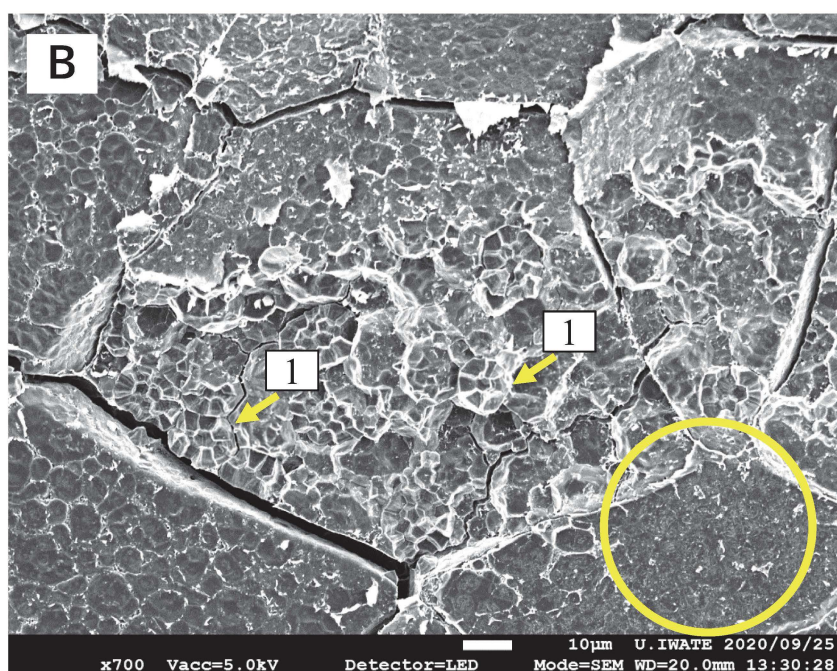
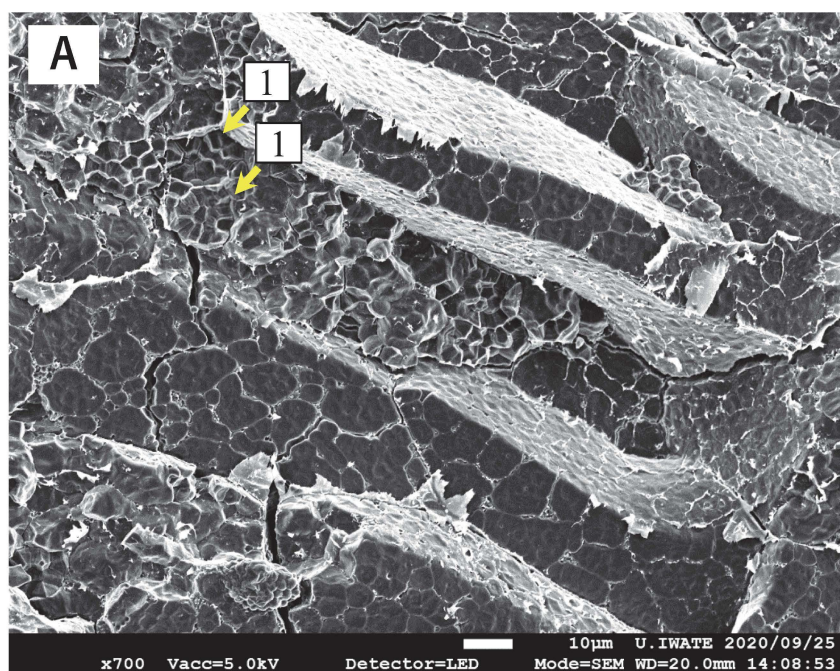


図3-6 標準タンパク質含有率と高タンパク質含有率の「きらほ」における玄米横断面中心部の走査型電子顕微鏡写真。

注1) A：標準タンパク質含有率，B：高タンパク質含有率の「きらほ」を示す。

注2) 図中の矢印1はアミロプラスト，円内は露出したデンプン粒を示す。

表3-1 統計的フィッティングによる精白米含水率の指数モデルパラメータ.

A) 標準タンパク

水温 (°C)	パラメータ			RMSE (%,d.b.)	R ²
	k (h ⁻¹)	N (-)	M_e (%,d.b.)		
5	1.76	1.10	38.9	0.482	0.997
10	1.56	0.98	39.9	1.026	0.985
20	1.63	1.02	40.0	0.618	0.995
30	1.65	1.04	39.6	0.683	0.993

B) 高タンパク

水温 (°C)	パラメータ			RMSE (%,d.b.)	R ²
	k (h ⁻¹)	N (-)	M_e (%,d.b.)		
5	1.67	1.05	38.3	0.938	0.986
10	1.47	0.92	39.0	1.197	0.977
20	1.54	0.96	39.2	1.041	0.984
30	1.56	0.98	38.7	0.996	0.985

注) 表中のRMSEは二乗平均平方根誤差 (%,dry basis)を示し, また, R²は決定係数を示す.

第4章

高タンパク低アミロース米「きらほ」 米飯の低温保存下における物性変化

4-1 【緒言】

2020年初頭からの新型コロナウイルス(SARS-CoV2)の発生(国立感染研 2020)および感染拡大(COVID-19)により、外食を控える動きがみられ、国内の米需要は停滞している(米穀安定機構 2021)。一方、コロナ禍における緊急事態宣言下での外出自粛行動等により内食率の高まりとともに、家庭における持ち帰り弁当等の中食需要は堅調に伸びている((株) インテージリサーチ 2021, 農林水産省 2021)。

また、高齢化や女性の社会進出等による家庭で炊飯しないいわゆる“食の簡便化”が進んでおり(農林水産省 2017)、外食・中食での業務用米需要や無菌包装米飯に加え、おにぎりや持ち帰り弁当向けの中食で用いられる業務用米の需要が更に拡大すると見込まれる(農林水産省 2020)。中食において米飯保存は、日持ちの観点から見ると冷蔵や冷凍といった低温が望ましいが、一方でデンプンの老化により食味は低下する。よって、冷蔵後あるいは冷凍解凍後に食しても炊飯後米飯に近い食味と品質を有する、中食向けの新しい米品種の開発が求められている(農林水産省 2008)。この中で、低アミロース米(アミロース含有率が15%以下で糯性ではなく、もち米と通常のうるち米の中間的性質を有する米(石谷 1992, 堀末ら 1996, 大坪 1995))は炊飯後、冷蔵しても粘りが強く柔らかい米飯特性をもつため、中食向けの業務用米として期待を集めている(根本ら 2002)。

一般に、微生物の繁殖を抑えるため冷蔵保存が望ましいが、米飯を冷蔵保存すると α 化された米デンプンが、再 β 化により老化し、硬く粘りの無い食感となる。

谷ら(1969)は、米の食味官能評価の総合評価には官能評価における粘りや硬さが強く関連し、粘りにはアミログラムの最高粘度およびブレイクダウン、米飯の粘性及び弾性が影響し、硬さには米飯の弾性が影響していることを報告している。

近年、著者らは低アミロース米の栽培において、窒素追肥を制御することで、意図的かつ安定的に高タンパク低アミロース米を生育できる技術を開発し、また、その米飯特性について調査を行ってきた（小舘ら 2017）。一般的に主食用のうるち米では、タンパク質含有量の高い米飯は表層の硬さが増加し、表層の付着性が低下する（柳瀬ら 1984）。一方、低アミロース米特有の柔らかさは、低温保存下であっても維持される（高見ら 1998、松田ら 2003）ことから、著者らの高タンパク低アミロース米は、内部構造が通常のタンパク質含有率の低アミロース米と異なることから、米飯表層の物理性の改変により、米飯の老化抑制が可能ではないかと考えた。

以上を確かめるため、本研究では、低アミロース米品種「きらほ」を用い、窒素追肥技術により、標準タンパク低アミロース米（無追肥）および高タンパク低アミロース米（穂揃期に窒素追肥）に栽培した米飯を用い、低温保存温度および保存時間が米飯物性に与える影響について検討を行った。

4-2 【材料および方法】

4-2-1 試料および試料の調製

2018 年に岩手県北上市の岩手県農業研究センター水田圃場において栽培した低アミロース米品種「きらほ」（仲條ら 2017）を測定に用いた。また、比較用品種として同圃場で栽培したうるち米品種「ひとめぼれ」（佐々木ら 1993）を用いた。

低アミロース米「きらほ」の栽培は、著者らの研究（小舘ら 2017）を基に基肥を窒素成分で 6 g/m^2 、追肥を無追肥とした区を「きらほ-標準タンパク」、基肥を

窒素成分で 6 g/m²，穂揃期に窒素成分で 8 g/m²を施用した区を「きらほ-高タンパク」とした．また，リン酸およびカリをそれぞれ成分で 6 g/m²施用した．比較用の「ひとめぼれ」は，「きらほ-標準タンパク」と同様の施肥量で栽培した．なお，「きらほ-標準タンパク」および「きらほ-高タンパク」の移植は 5 月 29 日，「ひとめぼれ」の移植は 5 月 15 日に行い，以後の栽培管理は，地域慣行どおりに行った．

収穫後は，水分約 15%(w/w)まで乾燥し，インペラ式粃摺り機（大竹製作所：FS20-SM）により粃摺りを行った．得られた玄米を縦目 1.9 mm の篩いにより調製した後，かくはん式の家庭用精米機（サタケ：マジックミル RSKM5B）を用い，とう精歩合 90%となるよう精米した．

4－2－2 タンパク質含有率およびアミロース含有率の測定

測定に用いた精白米のタンパク質含有率は近赤外分光分析装置（ビュッヒ：NIR Flex N-500）を用いて計測した．また，精白米のアミロース含有率は五十嵐ら（2004）の方法による流路型自動化学分析装置（ビーエルテック：オートアナライザーⅢ型）を用いて，アミロース含有率が既知の標準米試料であるうるち米「ゆきひかり（19.4%）」ともち米の「ヒメノモチ（0.0%）」から検量線を作成し，測定した．

4－2－3 測定用米飯の炊飯方法，測定試料の調製および冷蔵保存方法

測定に使用する米飯は，精白米 600 g と精白米重の 1.4 倍（精白米の含水率に基づき 1.4 倍となるよう加水量を補正）の蒸留水とを 60 分間浸漬したのち，IH 炊飯器（Panasonic：SR-HC105）で 52 分間炊飯した．炊飯後の米飯は，集団粒の低・中・高圧縮 6 バイト法の試料は，セル（内径:直径 40 mm×高さ 12 mm）に 10 g の米飯を詰め，厚み 10 mm となるように成型した後，ポリ塩化ビニリデンフィルム

で覆い粗熱を取ったのち、チャック付きポリ袋に入れ、水分の蒸発を防いだ。また、単粒の低・高圧縮 2 バイト法の試料は、ポリスチレン秤量皿（容量:110 ml）に 25 g の米飯を均一に載せた後、結露落下防止のためペーパータオルを被せ、ポリ塩化ビニリデンフィルムで覆い、チャック付きポリ袋に入れ、水分の蒸発を防いだ。

その後、どちらの試験試料ともに恒温機内温度が 5℃、10℃、20℃のそれぞれの条件下で米飯を 24 時間、48 時間および 72 時間それぞれ保存した。なお、測定には、測定の 2 時間前から室温 20℃で保存した試料を用いた。

4-2-4 米飯物性の測定

米飯物性の測定には圧縮試験機テンシプレッサー（タケトモ電機：MyBoy2 SYSTEM）を用い、米卸や米飯加工会社で業務用適性や食感評価に用いられる集団粒による低・中・高圧縮 6 バイト法と圧縮率の異なる 2 種類の圧縮試験により、米飯 1 粒の硬さと粘りを表層と全体に分けて多面的に計測する岡留ら（1996）の単粒による低・高圧縮 2 バイト法により行った。

（1）集団粒による低・中・高圧縮 6 バイト法

図 4-1 に示したように、小変形、中間変形、大変形の応力値である 3 点について、繰り返し 2 回圧縮の計 6 回の測定を行い、それぞれ圧縮に要した力を H、引き離しに要した力を -H、仕事量を -A と表した。なお、試料の最大圧縮力を「硬さ（H5）」、92%および 23%圧縮するのに要する仕事量比を「こし（A5/A1）」、引き離しに要した力の最大値を「付着性（-H5）」、仕事量の最大値を「粘り（-A5）」として示した。プランジャー（直径 18 mm）を用い、プランジャースピード 2 mm/s、ロードセル 10 kg とした。試料の塊の厚さに対して低圧縮率は 23%、中圧縮率は 46%、高圧縮率は 92%圧縮し、測定した。解析は 6 回測定した平均値を用いた。

(2) 単粒による低・高圧縮 2 バイト法

測定は、岡留ら(1996)の方法を参考にし、パンクチャープローブ(直径 30 mm)を用い、プランジャースピードを 6 mm/s, ロードセル 10 kg とし、各 30 粒測定の平均値を用いた。また、図 4-2 に示したように、米飯単粒の表層の物性を低圧縮試験(圧縮率 25 %), 全体の物性を高圧縮試験(圧縮率 90 %)により測定した。測定した項目は、表層は硬さ(H1), 粘り(-S1), 付着性(A3)を、全体は硬さ(H2), 粘り(-S2)と測定した。また、圧縮に要する粘りと硬さの比を表層のバランス度(-S1/H1)および全体のバランス度(-S2/H2)として、それぞれの測定値から算出した。

4-2-5 統計解析

統計解析は岩手大学情報基盤センターの SAS9.4/STAT (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)を用いた。ここでは試料間の差は Tukey-Kramer の HSD による多重比較で検定し、 $p < 0.05$ で有意差ありとした。

4-3 【結果および考察】

4-3-1 タンパク質含有率およびアミロース含有率

測定に用いた精白米のタンパク質含有率およびアミロース含有率を図 4-3 に示した。「きらほ-標準タンパク」のタンパク質含有率は 6.4 %, 「きらほ-高タンパク」のタンパク質含有率は 8.3%であり両者に有意な差が認められた。一方、アミロース含有率は、「きらほ-標準タンパク」において 8.1 %, 「きらほ-高タンパク」において 7.3 %であり、有意な差は見られなかった。また、「ひとめぼれ」の精白米のタンパク質含有率は 6.8 %, アミロース含有率は 18.4%だった。

4-3-2 集団粒による低・中・高圧縮試験

米飯の保存条件と物性との関係を明らかにする目的で、集団粒による 6 バイト法で測定した結果を示した（図 4-4-(A)～(C)）。

硬さ（H5）の変化を図 4-4-(A)に示した。20℃の条件では、処理開始時（0 時間）は、「きらほ-標準タンパク」と「きらほ-高タンパク」との間に有意差はみられなかったが、「ひとめぼれ」は「きらほ-標準タンパク」および「きらほ-高タンパク」よりそれぞれ $15.5 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ および $15.8 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ 程度、有意に硬かった。24 時間、48 時間および 72 時間後の物性は、「ひとめぼれ」は処理開始時と比べ 136%，152%，130%程度それぞれ硬くなったのに対し、「きらほ-標準タンパク」は処理開始時と比べ 130%，132%，120%程度硬くなり、「きらほ-高タンパク」は処理開始時比べ 121%，136%，131%程度硬くなっていた。また、いずれの経過時間においても「きらほ-標準タンパク」および「きらほ-高タンパク」は、「ひとめぼれ」より有意に柔らかい傾向がみられた。10℃の条件では、「ひとめぼれ」が 48 時間後に、処理開始時より 241%硬くなっていたのに対し、「きらほ-標準タンパク」は 72 時間後に処理開始時の 242%，「きらほ-高タンパク」では 72 時間後に処理開始時の 217%の硬さとなり、24 時間程度遅く「ひとめぼれ」並の硬さになる傾向を示した。また、72 時間後の試験区間の差は「きらほ-高タンパク」は、「ひとめぼれ」より $51.2 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ 程度有意に柔らかい傾向がみられた。一方、「きらほ-標準タンパク」と「きらほ-高タンパク」との間には有意な差はみられなかった。5℃の条件では、10℃と同様の傾向を示し、72 時間後の「きらほ-標準タンパク」および「きらほ-高タンパク」の硬さは、24 時間程度遅く「ひとめぼれ」並の硬さになった。

付着性（-H5）の変化を図 4-4-(B)に示した。20℃では、試験区間の差は小さく、付着性の差はみられなかったものの、10℃および 5℃では、保蔵時間が経過する

につれ、付着性が低下する傾向がみられ、特に「ひとめぼれ」は付着性の低下が早かった。また、「きらほ-標準タンパク」と「きらほ-高タンパク」とでは、10℃では、差がみられなかったものの、5℃では72時間後の「きらほ-高タンパク」の付着性は有意に高かった。

粘り (-A5) の変化を図 4-4-(C)に示した。20℃では、48時間まではいずれの試験区も差は見られず、72時間後の「きらほ-標準タンパク」は、「きらほ-高タンパク」および「ひとめぼれ」より粘りが有意に強い傾向がみられた。10℃では、時間の経過とともに低下する傾向がみられ、48時間後以降は、「きらほ-標準タンパク」および「きらほ-高タンパク」より「ひとめぼれ」の粘りが有意に弱い傾向がみられた。5℃では、処理開始時と比べ、粘りは「ひとめぼれ」では24時間後に 26.3 J/m^2 (処理開始時比 59%)に低下するのに対し、「きらほ-標準タンパク」では48時間後にそれぞれ 31.3 J/m^2 (59%) および 27.9 J/m^2 (58%) に低下した。さらに、「きらほ-高タンパク」は72時間後に 23.5 J/m^2 (48%) で、「ひとめぼれ」および「きらほ-標準タンパク」より粘りが低下しにくい傾向を示した。

貝沼ら (1981) の BAP 法により -5℃から 5℃までの温度帯で保存した非凍結米飯は保存後 1～2 日で急激な糊化率の低下を招くことが鈴木 (1989)により、明らかになっている。本実験における 5℃での保存の場合、「ひとめぼれ」では24時間、低アミロース米の「きらほ-標準タンパク」および「きらほ-高タンパク」では48時間後に付着性および粘りが急激に低下することが示唆された。一方、「きらほ-高タンパク」は48時間以後、付着性および粘りの減少幅は小さくなった。これは、タンパク質含有率が高まったことによって、米飯の表層が硬くなることで、低温によるデンプンの老化に伴う離水が緩慢となった結果、米飯全体の粘りが低下しにくくなったものと推察される。

4-3-3 単粒による低・高圧縮試験

米飯の保存条件と単粒における物性との関係を明らかにする目的で、単粒による低・高圧縮 2 バイト法で測定した結果を示した（図 4-5-(A)～(B)）。

表層の硬さ(H1)の変化を図 4-5-(A)に示した。20℃の条件では、集団粒と同様の傾向を示し、時間が経過するにつれ、硬くなる傾向を示したが、「きらほ-標準タンパク」および「きらほ-高タンパク」では変化が小さかった。また、10℃および 5℃の場合では、いずれの試験ともに時間が経過するにつれ、硬くなる傾向を示し、「ひとめぼれ」は、「きらほ-高タンパク」および「きらほ-標準タンパク」の順に硬くなりやすかった。

表層の付着性(A3)の変化を図 4-5-(B)に示した。いずれの温度条件および試験区においても時間が経過するにつれ減少する傾向を示し、48 時間以後は減少率が小さい傾向を示した。また、10℃および 5℃では、「ひとめぼれ」の 24 時間後の付着性が大きく減少していたものの、72 時間後はいずれの試験区も付着性は小さくなっていったことから、試験区間の差は小さくなっていった。

全体の硬さ(H2)の変化を図 4-5-(C)に示した。いずれの温度および試験区ともに時間の経過とともに硬くなる傾向を示した。また、「ひとめぼれ」は 10℃では 48 時間後、5℃では 24 時間後に急速に硬くなっていた。一方、「きらほ-高タンパク」は 24 時間後までは、処理時の硬さを維持し、それ以降は「きらほ-標準タンパク」と同様の傾向を示していた。

粘りと硬さの比で示される表層のバランス度(-S1/H1)の変化を図 4-5-(D)に、また、全体のバランス度(-S2/H2)の変化を図 4-5-(E)に示した。いずれの温度および試験区において、保存時間が経過するにつれてバランス度が低下する傾向を示していた。特に表層のバランス度では、保存温度が低くなるにつれ、試験区間のバランス度の差が小さくなる傾向がみられた。一方、全体のバランス度では「きら

ほ-標準タンパク」と「きらほ-高タンパク」に 10℃ 24 時間を除きいずれの処理温度および時間において有意な差はみられなかったものの、「ひとめぼれ」と比べ「きらほ-標準タンパク」と「きらほ-高タンパク」は、いずれも有意に高い傾向を示した。また、10℃および 5℃の場合、72 時間後の「きらほ-標準タンパク」と「きらほ-高タンパク」の全体のバランス度は、「ひとめぼれ」の 24 時間と同等のバランス度を示していた。

この結果から、高見ら（1998）は、米飯物性は、低アミロース米は表層の粘りが減少しにくく、硬さが増加しにくいことを明らかにしていること、また、尾崎（1973）、小田原ら（2004）、は米飯への酢酸添加は表層の粘り増加と冷蔵保存時の物性変化の抑制に効果があること、また、糖類は表層の硬さ増加および保水効果による老化抑制の働きがある（川合 2016）ことから、本実験の「きらほ-高タンパク」は、低アミロース米の高タンパク化によって、米飯表層の硬さが増加した結果、糖類と同様の老化抑制効果が得られたものと推察される。併せて、低アミロース性によるデンプン老化抑制の効果（高見ら 1998、久野ら 2000、大田原ら 2018）により、低温条件においても「きらほ-標準タンパク」および「ひとめぼれ」と比べ、米飯の老化が緩慢になることが示唆された。一方、米飯の老化に伴う、硬さの増加や粘りの減少は、食感が劣り食味が低下する（大家ら 1998）ため、食感を物性面の変化から捉えることは重要である。特に、粘りと硬さの比で示されるバランス度は、官能評価における食味との相関が高い（石井ら 1993、中森ら 2004、山倉ら 2005）ことが明らかになっている。

したがって、「きらほ」をはじめとする低アミロース米ですでに報告されている標肥栽培での米飯に加え、本試験の多肥栽培での高タンパク質米飯の低温保存は、同じ条件の「ひとめぼれ」より米飯物性値と食味が良好であることが示唆され、低温保存下においても食味は維持されると推察される。

以上，保存温度および保存時間における米飯物性を考えると，「きらほ-高タンパク」の高タンパク低アミロース米は，持ち帰り弁当やおにぎりなどの冷蔵適性の改善・向上に有効である．よって，高タンパク低アミロース米は，冷蔵米飯や業務用米に対する消費者や実需者の米飯品質への期待に応じられる．

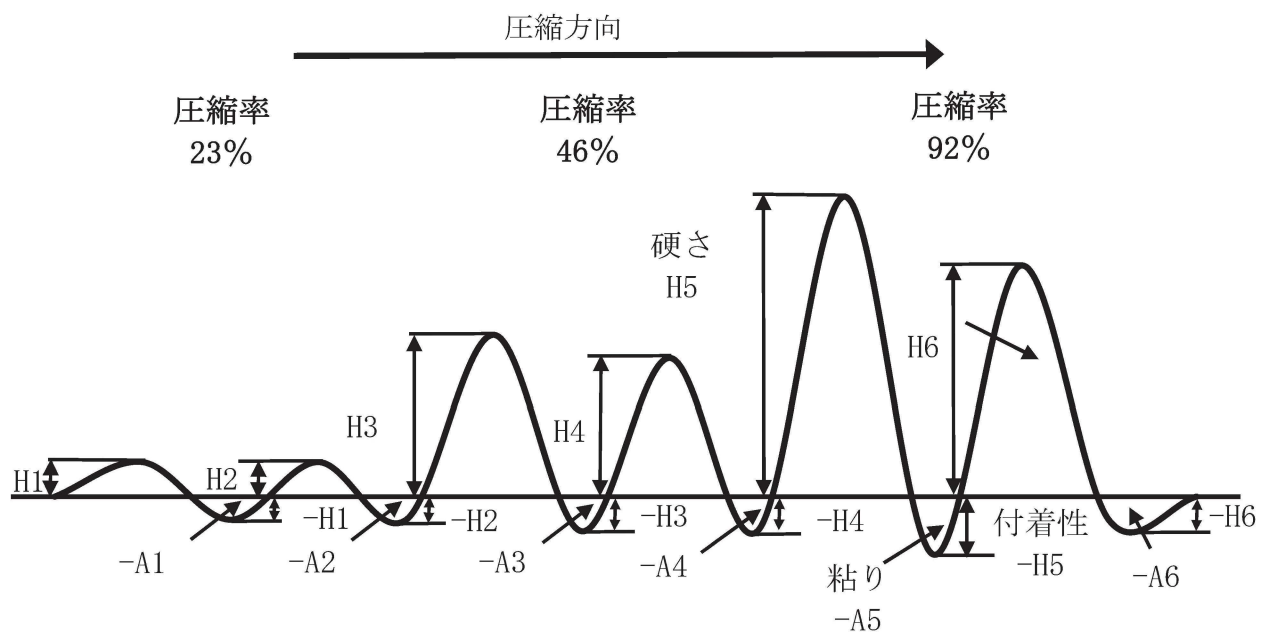
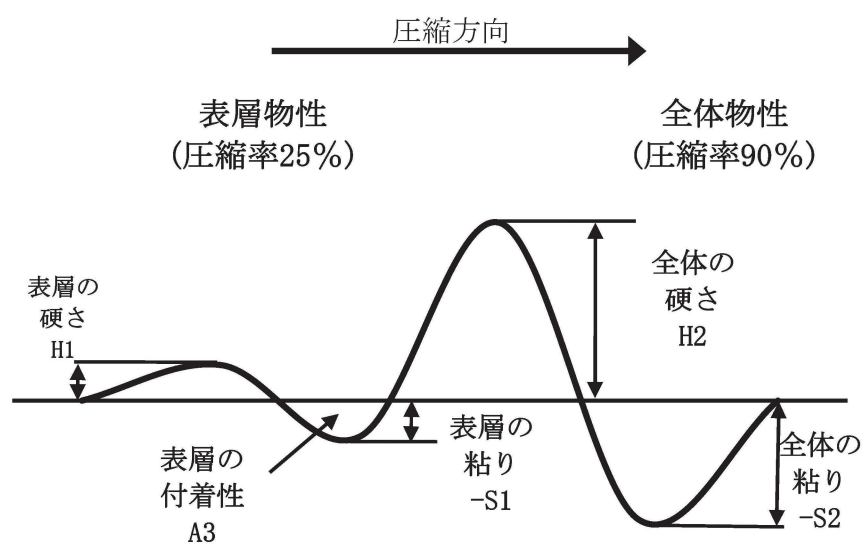


図4-1 集団粒の低・中・高圧縮6バイト法試験の波形解析項目.



表層のバランス度: $(-S1/H1)$, 全体のバランス度: $(-S2/H2)$

図4-2 単粒の低・高圧縮2バイト法試験の波形解析項目.

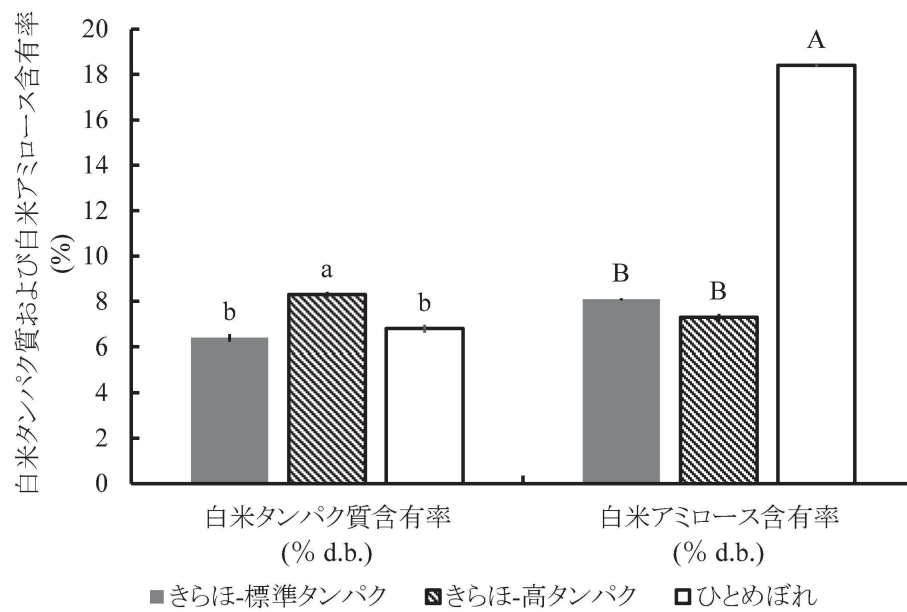
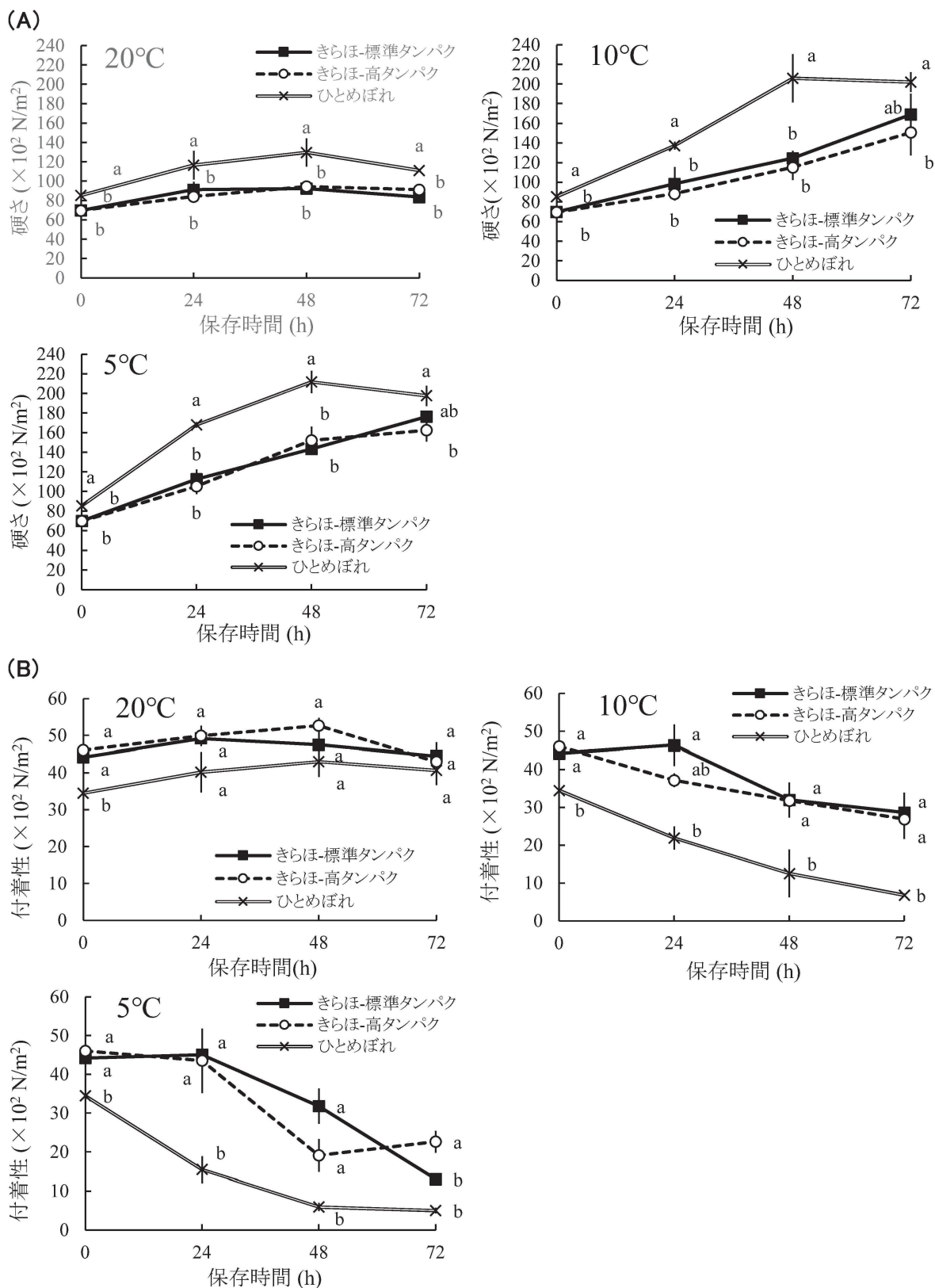


図4-3 白米タンパク質含有率および白米アミロース含有率の比較

注1) 図中のバーは標準誤差を表す。

注2) 図中の同一英文字を付した数値間には, Tukey法により5%水準で有意差が無いことを示す。



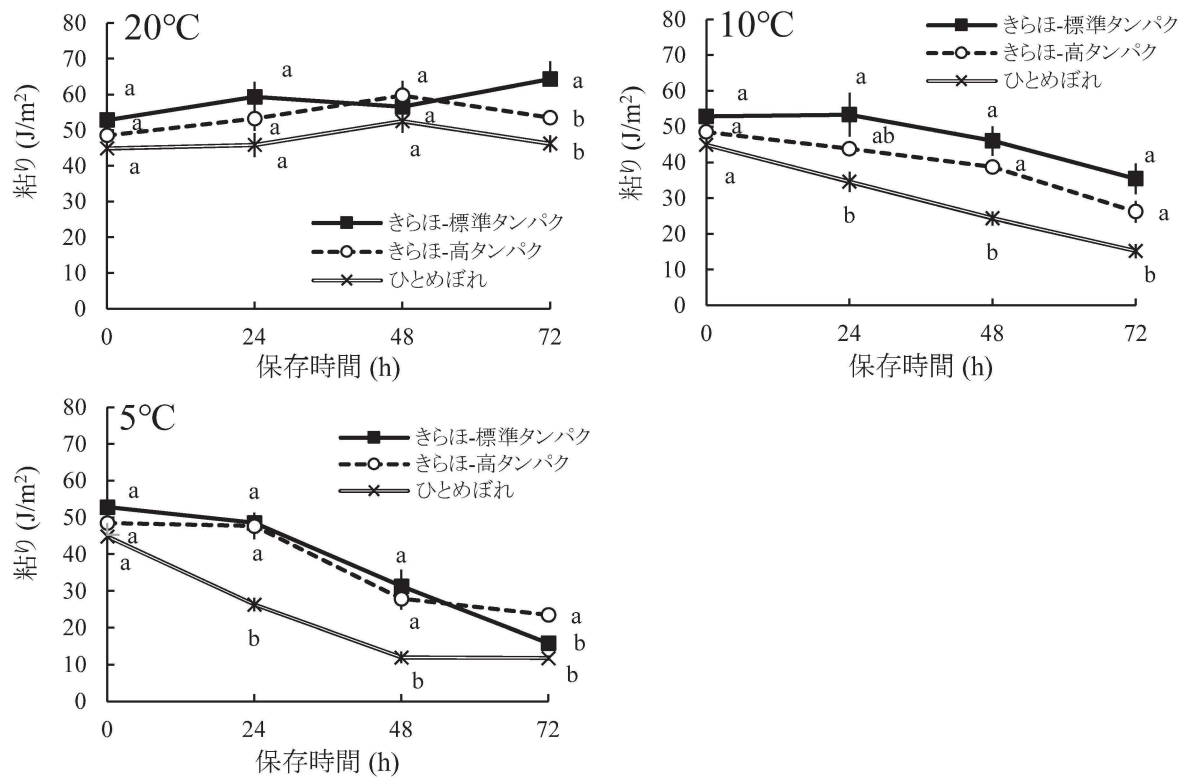
上段 (A): 硬さ(H5)
下段 (B): 付着性(H5)

図4-4 20 °C, 10 °Cおよび5 °Cで保存した米飯の集団粒における物性変化.

注1) 図中のバーは標準誤差を表す(n=6).

注2) 図中の同一英文字を付した数値間には, Tukey法により5%水準で有意差が無いことを示す.

(C)

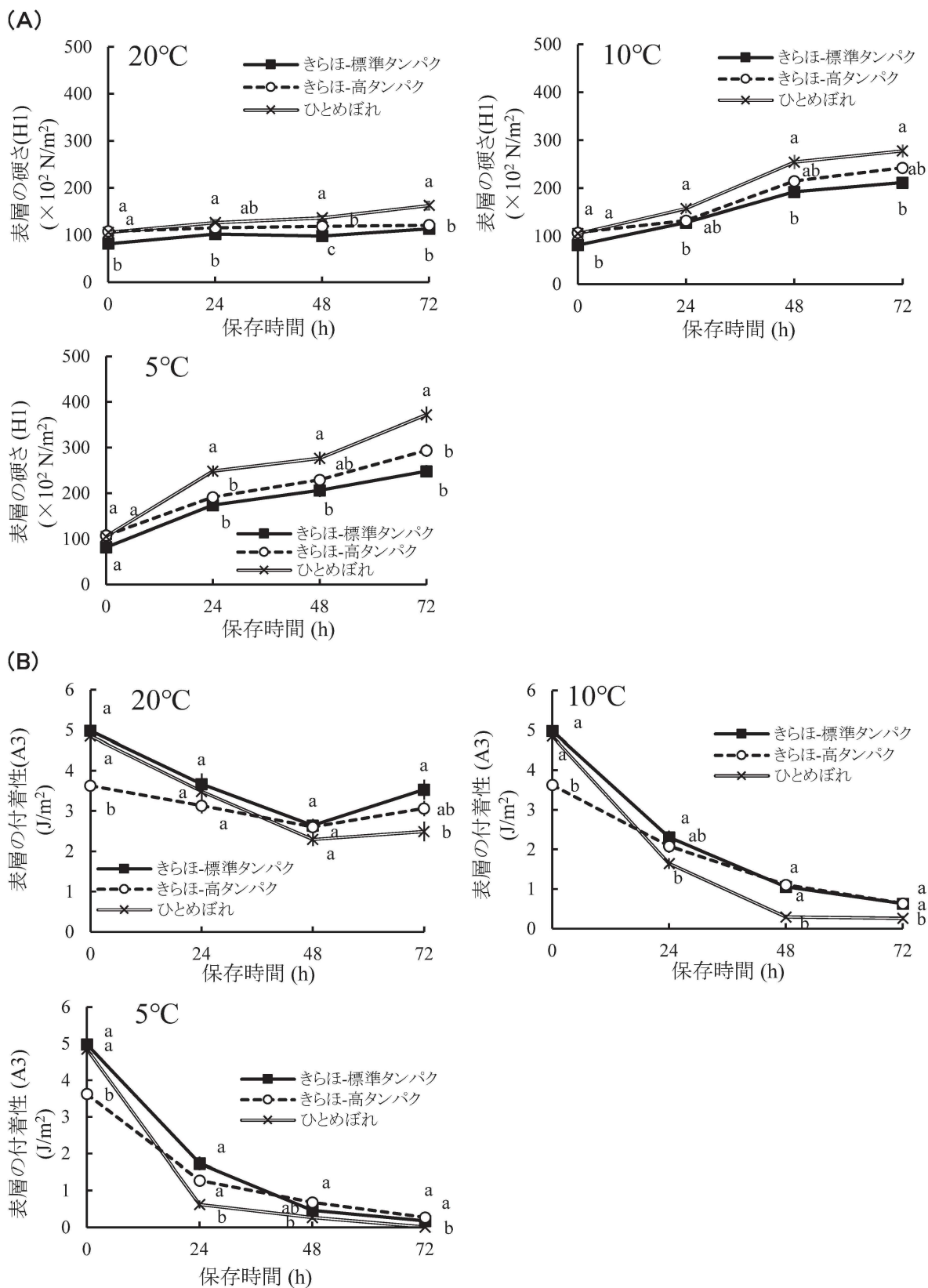


(C):粘り(-A5)

図4-4つづき 20 °C, 10 °Cおよび5 °Cで保存した米飯の集団粒における物性変化.

注1)図中のバーは標準誤差を表す(n=6).

注2)図中の同一英文字を付した数値間には, Tukey法により5%水準で有意差が無いことを示す.



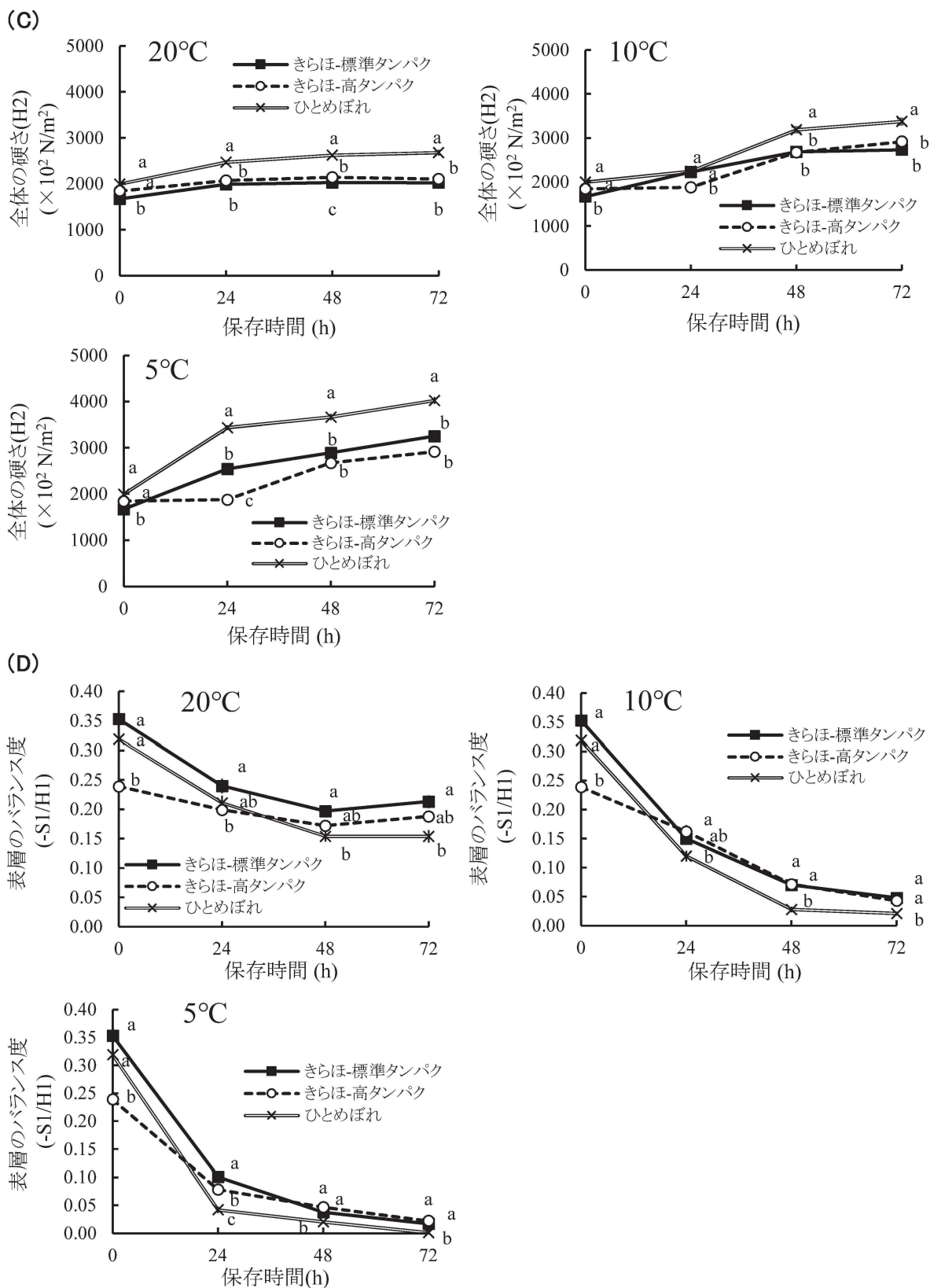
上段 (A): 表層の硬さ(H1)

下段 (B): 表層の付着性(A3)

図4-5 20 °C, 10 °Cおよび5 °Cで保存した米飯の単粒における物性変化.

注1) 図中のバーは標準誤差を表す(n=30).

注2) 図中の同一英文字を付した数値間には, Tukey法により5%水準で有意差が無いことを示す.



上段 (C): 全体の硬さ(H2)

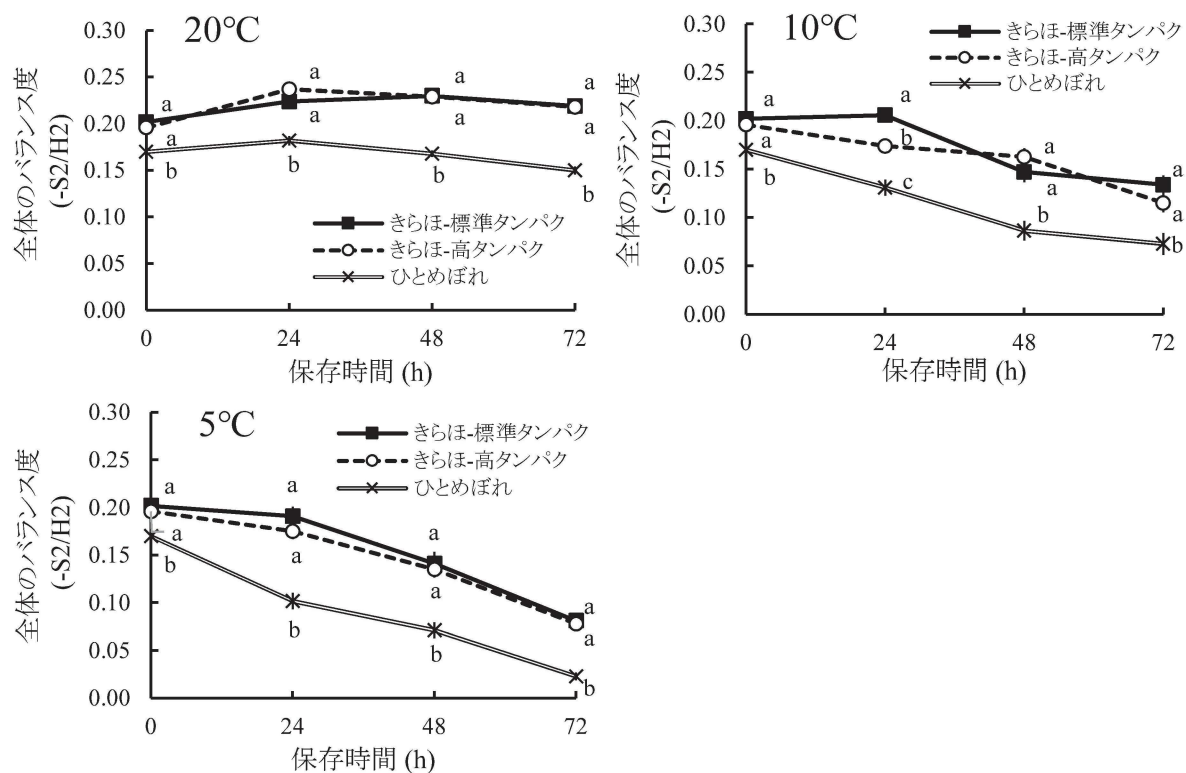
下段 (D): 表層の付着性(A3)

図4-5つづき 20 °C, 10 °Cおよび5 °Cで保存した米飯の単粒における物性変化。

注1) 図中のバーは標準誤差を表す(n=30).

注2) 図中の同一英文字を付した数値間には, Tukey法により5%水準で有意差が無いことを示す。

(E)



(E) : 全体のバランス度 ($-S2/H2$)

図4-5つづき 20 °C, 10 °Cおよび5 °Cで保存した米飯の単粒における物性変化.

注1)図中のバーは標準誤差を表す.

注2)図中の同一英文字を付した数値間には, Tukey法により5%水準で有意差が無いことを示す.

第5章 結言

本論文は、低アミロース米「きらほ」を用いて、異なる窒素施肥条件が収量性および米飯物性を含めた食味に与える影響について検討した。また、高タンパク質含有率の低アミロース米「きらほ」を用いて、水浸裂傷粒発生率および吸水特性などの業務用米適性や米飯の低温保存による物性の変化について測定を行い、それらを解析し、まとめたものである。

その概要は以下のとおりである。

5-1 【窒素施肥条件の違いが低アミロース水稻品種“きらほ”の収量および米飯物性を含めた食味に与える影響】

岩手県育成の低アミロース水稻品種「きらほ」を用い、異なる窒素施肥条件が収量性および物性を含めた食味に与える影響について検討した。その結果、追肥窒素量の増量により、米飯成形時の「べたつき」低減が推察される一方、食味官能評価における総合評価の低下は小さかった。したがって、低アミロース米「きらほ」は、追肥窒素量を増量することにより、増収するとともに、食味が低下することなく、加工製造時の米飯の「べたつき」による作業効率の低下が抑えられるものと考えられる。

5-2 【高タンパク低アミロース米“きらほ”の水浸裂傷粒発生率と吸水特性】

水稻品種「きらほ」の標準タンパク低アミロース米（無追肥）および高タンパク低アミロース米（穂揃期に窒素追肥）を栽培・収穫し、その水浸裂傷粒発生率および吸水特性について測定した。その結果、高タンパク低アミロース米は標準タンパク低アミロース米と比較して、種々の精白米水分および水浸温度の条件下

において、吸水速度および加熱吸水率に差はみられず、また、水浸裂傷粒発生率が大きく減じることが明らかとなった。よって、高タンパク低アミロース米は、水浸裂傷粒の発生率が少なく、吸水特性および加熱吸水率の観点から、業務用米としての新たな活路が大きく期待できるものである。

5－3【高タンパク低アミロース米“きらほ”米飯の低温保存下における物性変化】

水稻品種「きらほ」の標準タンパク低アミロース米（標肥）および高タンパク低アミロース米（多肥）の白米米飯を用い、保存温度および保存時間ごとの集団粒および単粒における物性について測定した。その結果、「ひとめぼれ」の24時間後と「きらほ」標準タンパク区および高タンパク区の48時間後の集団粒の粘りは同じ値を示すとともに、高タンパク化した「きらほ」は「ひとめぼれ」より48時間長く、「きらほ」の標準タンパク区より24時間長く、米飯の粘りが維持することでデンプンの老化抑制が可能であることを明らかにした。

以上より、窒素追肥量の増量による多収と高タンパク化により、原料米の低コスト化と炊飯・成形加工製造時の米飯の「べたつき」による作業効率の低下が抑えられることを示した。また、高タンパク化しても、食味は低下しないこと、米飯物性の老化が緩慢になることが示された。このことは持ち帰り弁当やおにぎりなどの冷蔵食品の改善・向上に資する知見である。

本研究は、低アミロース米を高タンパク化することで、米飯の品質保持・老化抑制が可能であることを初めて示したものである。また、育種・生産の観点から測定計画を立案し、これを食品科学的に考察したものであり、得られた成果は米飯のみならず米加工・米生産の観点から有益な情報を与えるものである。

摘要

近年、中食需要の増加とともにおにぎり・弁当向けや冷凍米飯需要が拡大している。それらに対応するには、粘りが強く冷めても硬くなりにくい低アミロース米が最適と考えられるが、栽培面では低収量，加工製造面では米飯成形における「べたつき」による作業効率の低下が課題として挙げられる。そこで本論文では，以上の課題解決を図るため，岩手県育成の低アミロース水稻品種「きらほ」を用い，異なる窒素施肥条件が収量性及び米飯物性を含めた食味に与える影響について検討した。更に本論文では，高タンパク質含有率の低アミロース米「きらほ」を用いて，水浸裂傷粒発生率及び吸水特性などの業務用米適性を明らかにするとともに，米飯の低温保存による物性の変化を解明し，生産者と実需者双方のニーズに対応する技術開発に向けた知見を得ることを目的とした。

はじめに，第2章では異なる窒素施肥条件が収量性および物性を含めた食味に与える影響について検討した。その結果，基肥窒素量が $6\text{g}/\text{m}^2$ および $12\text{g}/\text{m}^2$ の両試験区とも，幼穂形成期および穂揃期の2回の追肥の合計窒素量が $6\text{g}/\text{m}^2$ および $12\text{g}/\text{m}^2$ の区では，無追肥区と比べ，精玄米重が有意に増加した。また，追肥窒素量の増量により，白米タンパク質含有率は有意に高くなる傾向がみられ，白米アミロース含有率は有意に減少する傾向がみられるものの，差は小さかった。米飯成形時の「べたつき」に関連する炊飯米の物理性についてみると，白米タンパク質含有率は米飯粒表層の硬さとの間に正の相関関係が，また，白米タンパク質含有率と表層の付着性との間に負の相関関係がみられたことから，追肥窒素量の増量により，米飯成形時の「べたつき」低減が推察された。一方で，追肥窒素量の増量による米飯粒全体の硬さへの影響は小さく，食味官能評価における総合評価の低下も小さかった。したがって，低アミロース米「きらほ」は追肥窒素量を増

量することで増収が可能となり、しかも食味を低下させることなく、加工製造時の米飯の「べたつき」による作業効率の低下が抑えられることが示唆された。

つぎに、第3章では窒素追肥技術により、低アミロース米「きらほ」から標準タンパク低アミロース米（無追肥）及び高タンパク低アミロース米（穂揃期に窒素追肥）を栽培・収穫し、その水浸裂傷粒発生率及び吸水特性について測定した。その結果、以下の知見を得た。

高タンパク低アミロース米は標準タンパク低アミロース米と比較して、種々の精白米水分及び水浸温度の条件下において水浸裂傷粒発生率が10%以下に大きく減じることが示された。また、高タンパク低アミロース米と標準タンパク低アミロース米との間に吸水速度及び加熱吸水率に差はみられなかった。よって、高タンパク低アミロース米は、水浸裂傷粒の発生率が少なく、吸水特性及び加熱吸水率の観点から、業務用米としての新たな活路が期待できることが示された。

さらに、第4章では第3章と同じ材料を用い、窒素追肥技術により低アミロース米「きらほ」から標準タンパク米及び高タンパク米の2試験区と、比較用の主食用「ひとめぼれ」を用い、それらの米飯物性に低温保存温度及び保存時間が与える影響について検討した。その結果、「きらほ」の標準タンパク区及び高タンパク区は、いずれの保存温度及び保存時間においても、「ひとめぼれ」より集団粒としての付着性及び粘りが低下しにくい傾向にあった。特に、5℃保存した場合に、処理開始時と比べ、粘りは「ひとめぼれ」では24時間後に26.3 J/m²（処理開始時比59%）に低下するのに対し、「きらほ」の標準タンパク区では48時間後にそれぞれ31.3 J/m²（減少率59%）及び27.9 J/m²（58%）に低下した。更に、「きらほ」の高タンパク区は72時間後に23.5 J/m²（48%）で「ひとめぼれ」及び「きらほ」標準タンパク区より粘りが低下しにくいことが示唆された。その結果、「ひとめぼれ」の24時間後と「きらほ」標準タンパク区及び高タンパク区の48時間

後の集団粒の粘りは同じ値を示すとともに、高タンパク化した「きらほ」は「ひとめぼれ」より 48 時間長く、「きらほ」の標準タンパク区より 24 時間長く、米飯の老化抑制できることを示した。

以上、本論文は窒素追肥量の増量による多収と高タンパク化により、原料米の低コスト化と炊飯・成形加工製造時の米飯の「べたつき」による作業効率の低下が抑えられることを示した。また、高タンパク化しても、食味は低下しないこと、米飯物性の老化が緩慢になることが示された。このことは持ち帰り弁当やおにぎりなどの冷蔵食品の改善・向上に資する知見である。

よって、本論文は低アミロース米を高タンパク化することで、米飯の品質保持・老化抑制が可能であることを初めて示したものである。本研究は、育種・生産の観点から測定計画を立案し、これを食品科学的に考察したものであり、得られた成果は米飯のみならず米加工・米生産の観点から有益な情報を与えるものである。

Summary

The demand for cooked rice for rice balls, boxed meals, and frozen rice has been increasing along with the strong demand for ready-made meals. Recently, low amylose content rice has been considered to keep its high tenacity and to have resistance to avoid being hard after cooking and even subjected to cooling condition. However, low amylose content rice has had some problems such as low yield during cultivation and low efficiency such as stickiness during processing and manufacturing. In this study, we investigated the effects of different nitrogen fertilization conditions on yield and eating quality including rice properties, using the low amylose content rice variety "Kiraho" bred in Iwate Prefecture. In addition, the suitability of the rice for commercial use, such as the incidence of water-soaked lacerated grains and water absorption characteristics were clarified by using the high-protein-content low amylose content rice variety "Kiraho".

First, low amylose content rice had strong stickiness and was still soft even if it cools. But low yield and lower forming efficiency by "stickiness" of cooked rice in processing were considered as problems. In Chapter 2, we examined the effect of nitrogen application on yield and eating quality of low amylose rice "Kiraho", which had been developed in Iwate prefecture. The number of husk and the high yielding by the amount of nitrogen for topdressing increased. As for the physicochemical properties of cooked rice related to "stickiness" during forming, there was a positive correlation between the protein content and the hardness of the surface of cooked rice, and a negative correlation

between the protein content and the adherence of the surface, suggesting a reduction in "stickiness" during forming, while there was no significant difference between the hardness of high compression rice. On the other hand, there was no significant difference between the hardness of the cooked rice and that of the high compression rice, and the decrease in the overall evaluation in the sensory evaluation of eating quality was small. These results suggested that nitrogen fertilization of low amylose content rice "Kiraho" improved the yield and modified the physicochemical properties of the surface layer of cooked rice by increasing the protein content, and reduced the stickiness of rice in processing, while the effect on the eating quality was small.

Therefore, it can be inferred that an increase in the amount of nitrogen in the fertilizer may reduce the stickiness of the rice when it is formed, but the decrease in the overall evaluation in the sensory evaluation of eating quality was small. Therefore, increasing the amount of nitrogen fertilizer applied to low amylose rice "Kiraho" will increase its yield and reduce the work efficiency due to the "stickiness" of rice during processing and manufacturing without decreasing its eating quality.

Next, it is said that recently low amylose content has been preferred for industrial use, because it retains its sticky and soft characteristics even after cooking and refrigeration. In Chapter 3, we investigated the low amylose content rice cultivar, "Kiraho", with either a standard protein content (no fertilizer at the ear stage) or a high protein content (fertilized with nitrogen at the ear stage), and measured the characteristics of the cracked grains after soaking and the water absorbed during soaking. The results showed that the

proportion of cracked grains after soaking was lower in high protein than in standard protein low amylose content rice under various conditions of moisture content and water soaking temperature. There was no difference between the low amylose content rice with a high or standard protein content in changes in moisture content during absorption. There was also no difference in the water uptake ratio during the cooking quality test between the high protein and standard protein low amylose content rice. These results indicated that the high protein low amylose content rice is more likely to be suitable for industrial use because of its lower proportion of cracked grains after soaking, and its water absorption and heat absorption rate.

In Chapter 4, we studied the affects of low storage temperature and duration on the physicochemical properties of rice, using two test plots of standard protein rice and high protein rice from the low amylose rice variety "Kiraho" using nitrogen fertilization technology, and rice variety "Hitomebore" for comparison. Results showed that the standard and high-protein groups of "Kiraho" tended to be less adhesive and less sticky than those of "Hitomebore" at all storage temperatures and times. In particular, when the grains were stored at 5°C, the stickiness of "Hitomebore" decreased to 26.3 J/m² (59% of that at the start of treatment) after 24 hours, while it decreased to 31.3 J/m² (59% of decrease) and 27.9 J/m² (58% of decrease) after 48 hours in the standard protein zone of "Kiraho". Furthermore, the high-protein zone of "Kiraho" was 23.5 J/m² (48%) after 72 hours, suggesting that the stickiness of the "Hitomebore" and "Kiraho" standard protein zones was less likely to decrease. Therefore, the

stickiness of the group grains after 24 hours in the "Hitomebore" and after 48 hours in the "Kiraho" standard protein and high-protein groups was the same, and the high-protein "Kiraho" was longer than "Hitomebore" by 48 hours, and longer than the "Kiraho" standard protein group by 24 hours. It was suggested that "Kiraho" with high protein could suppress rice aging 48 hours longer than "Hitomebore" and 24 hours longer than "Kiraho" with standard protein.

High yield and high protein by increasing the amount of nitrogen fertilizer can reduce the cost of raw rice and decrease the work efficiency due to "stickiness" of rice during rice cooking and forming process manufacturing. In addition, even with high protein, the taste of the rice is less likely to deteriorate and the aging of the rice properties becomes slower, making it effective for improving and enhancing refrigerated foods such as take-out lunch boxes and rice balls.

This dissertation shows that high-protein, low-amylose rice will have a strong feasibility to adapt consumers' and producers' expectations for rice quality after refrigerated and/or frozen treatments as commercial use.

謝辞

本論文をとりまとめるにあたり，国立大学法人岩手大学農学部教授 小出章二博士，同准教授 折笠貴寛博士，国立大学法人山形大学農学部教授 片平光彦博士からは，終始懇切丁寧な御指導と御助言を戴くとともにご校閲を賜りました．深甚なる感謝の意を表します．

また，国立大学法人弘前大学農学生命科学部教授 張樹槐博士，公益財団法人岩手生物工学研究センター 阿部陽博士には，本論文を御校閲して戴き，御意見と御指導を賜り，謹んで感謝の意を表します．

本研究のきっかけを与えていただいた岩手大学名誉教授 黒田榮喜博士，農研機構食品研究部門 岡留博司博士，同東北農業研究センター 安江紘幸博士，同遺伝資源研究センター 田中大介博士には懇切丁寧な御指導，御助言をいただき深く感謝申し上げます．

また，本研究遂行にあたり，岩手県農業研究センター県北農業研究所長 扇良明氏，岩手県立農業大学校 仲條眞介博士，岩手県農業研究センター 藤岡智明博士，同 太田裕貴氏からは特段の御配慮と御鞭撻を賜りました．

本研究は，2015 年～2021 年に岩手県農業研究センター，2018 年～2021 年に社会人学生として国立大学法人岩手大学大学院連合農学研究科において試験を実施しました．試験に際し，岩手県農業研究センター主任技能員 菊地徳章氏をはじめとする技能員，会計年度任用職員諸氏には，栽培試験圃場の管理業務及び調査に関して多くの御支援を戴きました．また，岩手大学技術部技術専門職員 小室岬氏には走査型電子顕微鏡撮影に関して御支援を戴きました．岩手大学農学部食料生産環境学科農産物流通科学研究室の所属学生には，多くの御協力を戴きました．心から感謝を申し上げ，ここに記します．

最後に，私の仕事への理解と就学の機会を与えてくれた家族に感謝します．

引用文献

竹生新治郎・岩崎哲也・谷達雄 1960. 米の炊飯嗜好特性に関する研究（第 1 報）. 日本米と輸入米との比較. 栄養と食糧 13（3）：137-140.

深井洋一・岡村修・塚田清秀 2006. 炊飯時の浸漬時間及び水温が米飯の品質に及ぼす影響. 日食科工誌 53：592-595.

福嶋陽 2007. 生育時期別窒素追肥が水稻の形態的形質に及ぼす影響およびその品種間差異. 日作紀 76(1)：18-27.

福嶋陽・太田久稔・梶亮太・津田直人 2015. 生産力検定試験成績を利用した水稻の収量形成要因の解析. 日作紀 84(3)：249-255.

東正昭・斉藤滋・滝田正・山口誠之・春原嘉弘・横上晴郁・池良一・田村泰章・小山田善三・小綿寿志・井上正勝・松本定夫・片岡知守 1999. 低アミロース米良食味品種「スノーパール」の育成. 東北農試研報 95：1-12.

本庄一雄 1971. 米のタンパク含量に関する研究：第 2 報 施肥条件のちがいが玄米のタンパク質含有率およびタンパク質総量に及ぼす影響. 日作紀 40(2)：190-196.

堀末登・石谷孝佑 1996. 新しい形質を導入した新形質米品種の開発と利用の展望. 「美味しい米」. 櫛渕欽也監修, 農林水産技術情報協会, 東京. 第 3 巻. 115-135.

五十嵐俊成・上野真吾 2004. ヨウ素吸収マルチスペクトル測定による澱粉の物理的特性及び食味の推定方法. 特願 2004-168795.

飯田修一・出田収・松下景・春原嘉弘・根本博・前田英郎・石井卓朗・田村泰章 2011. 良質で食味がすぐれる温暖地西部向き低アミロース水稻品種「姫ごのみ」の育成. 近中四農研報 10：69-86.

今林惣一郎・尾形武文・松江勇次 1998. 米の理化学的特性における年次間および産地間変動. 日作紀 67(1) : 30-35.

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. 北海道農試研報 66 : 1-89.

石井卓朗・岩崎哲也 1993. 理化学的手法による新形質米の食味特性の評価(3). 食総研報 57: 29-33.

石間紀男・平宏和・平春枝・御子柴穆・吉田誠次 1974. コメの食味に及ぼす窒素施肥および精米中のタンパク質含有率の影響. 食総研報 29 : 9-15.

石谷孝祐 1992. “米の加工利用”. 日本の稲育種. 農業技術協会 : pp165-179.

岩手県農業研究センター 2001. 水稻オリジナル品種「いわてっこ」の栽培法. 岩手県農業研究センター平成 13 年度試験研究成果,
https://www.pref.iwate.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/036/805/h13_fukyu02.pdf, (参照 2021-5-4) .

Juliano B.O. 1971. A simplified assay for milled rice amylose. Cereal Science Today 16 : 334.

株式会社インテージ リサーチ 2021. この冬の第三波 生活者行動への影響は? . 「インテージ知る Gallery」2021 年 2 月 12 日公開記事,
<https://www.intage.co.jp/gallery/daisanpa/>, (参照 2021-5-4) .

貝沼圭二・松永暁子・板川正秀・小林昭一 1981. β -アミラーゼ-プルラナーゼ(BAP)系を用いた澱粉の糊化度, 老化度の新測定法. 澱粉科学 28 : 235-240.

貝沼やす子 2009. 米の調理性に関する研究. 日本家政学会誌 60 : 775-783.

川井清司 2016. 米飯の冷蔵保存を目的とした澱粉の老化抑制に関する研究. 東洋食品研究所研究報告書 31 : 105-108.

小舘琢磨・太田久稔・岡留博司・太田裕貴・小田中温美 2017. 窒素施肥の違いが低アミロース水稻品種“きらほ”の食味関連成分に与える影響. 日本作物学会講演会要旨集 244: 64.

小舘琢磨・藤岡智明・岡留博司・安江紘幸・仲條眞介・小出章二 2020. タンパク質含有率が異なる低アミロース米の白米における吸水の特徴. 日本作物学会講演会要旨集 249: 136.

公益社団法人米穀安定供給確保支援機構 2021. 米の消費動向調査結果(令和3年3月分). https://www.komenet.jp/pdf/shouhi-doukou_21042690.pdf, (参照 2021-5-4).

公益社団法人日本炊飯協会ホームページ. 米飯格付認定事業「2. 精米の品位基準」. <http://rice-cook.com/txt/jigyo-rank.html>, (2020.2.22 現在).

小出章二・田子雅則・西山喜雄 2001. 胴割れ米とひび割れ米の水浸裂傷. 日食科工誌 48 (1): 69-72.

小出章二・伊藤 萌・折笠貴寛 2013. 精米後の酒米の水分吸着等温線. 日食保蔵誌 39 (2): 83-86.

小出章二・折笠貴寛・小出冬菜・村松良樹・田川彰男 2016. 乾燥米飯の乾燥・保存・吸水における含水率予測. 日食保蔵誌 42 (2): 59-64.

国立感染症研究所 2020. 日本国内の新型コロナウイルス感染症第一例を契機に検知された中国武漢市における市中感染の発生. ASR Vol.41: 143-144.

小牧有三・太田久稔・笹原英樹・上原泰樹 2001. 低アミロース水稻品種「ソフト 158」および有望系統「北陸 180 号」の施肥反応. 北陸作報 36: 13-17.

国広泰史・江部康成・新橋登・菊池治巳・丹野久・菅原圭一 1993. 薬培養による低アミロース良食味水稻新品種「彩」の育成. 育種学雑誌 43(1): 155-163.

久野三智子・貝沼圭二・高橋節子 2000. 低アミロース米澱粉の理化学的特性.

応用糖質科学会誌 47(3,4) : 319-326.

黒田栄喜・東直邦・岡田貴・阿部進・平野貢・村田孝雄 1999. 寒冷地を対象とした新規育成品種における収量性, 各収量構成要素および収穫指数の比較. 日作紀 68(2): 235-244.

丸山悦子・佐藤真実 2002. 米飯の新食味評価法確立の指標. 日食科工誌 52 : 566-572.

松田佳奈・高橋節子 2003. 低アミロース米の理化学的性質. 日本家政学会誌 54(11) : 889-897.

松江勇次・小田原孝治・比良松道一 1996. 北部九州産米の食味に関する研究. 第7報 食味の産地間差とその要因. 日作紀 65(2): 245-252.

松江勇次・尾形武文 1999. 栽培条件が穂上位置別の米粒のアミロース含有率に与える影響. 日作紀 68(4): 495-500.

松江勇次・佐藤大和・尾形武文 2005. 低アミロース米品種における米の食味評価とブレンド適性. 日作紀 74(4): 422-426.

松崎昭夫・松島省三・富田豊雄 1973. 水稻収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究 第113報 穂揃期窒素追肥が品質に及ぼす影響. 日作紀 42(1): 54-62.

水間智哉 2009. 酒造用原料米の吸水特性の解析. 日本醸造協会誌 104 : (5) : 322-330.

村田敏・小出章二・河野俊夫 1992. 水浸時の精白米の裂傷に関する研究. 農業機械学会誌 54 (1) : 67-72.

村田敏・田中史彦・徳永淳一・小出章二・K.S.P.アマラトゥンガ 1996. 穀物の吸水に関する研究. 日本農業機械学会誌 58 (2) : 19-24.

仲條真介・佐々木力・菅原浩視・阿部(川代)早奈恵・木内豊・田村和彦・穴戸

央子・高草木雅人・阿部陽・遠藤あや・神山芳典 2017. 早生の低アミロース新品種「きらほ」の育成. 岩手農研セ研報 16: 23-39.

中森朋子・加藤淳 2004. 米飯の粘りに基づく冷凍米飯に対する加工適性評価. 北海道立農業試験場集報 86: 1-9.

根本博・井辺時雄 2002. 3.2 アミロース変異米 1) 低アミロース米. 石谷孝佑編, “米の事典一稲作からゲノムまで”. 幸書房, 東京. 90-95.

日本食品科学工学会 1996. 新・食品分析法編集委員会【編】. 新・食品分析法. 光琳, 東京. 6-9.

農林水産省大臣官房広報評価課情報分析室 2017. 平成 28 年度食料・農業・農村白書. 104-109. https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h28/zenbun.html, (参照 2021-1-8).

農林水産省大臣官房政策課食料安全保障室 2020. 平成 31 年度食品産業動態調査. 55. https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_doutai/attach/pdf/doutai_top-117.pdf, (参照 2021-1-8)

農林水産省政策統括官付穀物課 2019a. 米の生産コスト低減について令和元年 11 月. 1-7, (参照 2021-1-8).
<https://www.maff.go.jp/j/syouan/keikaku/soukatu/attach/pdf/index-236.pdf>

農林水産省政策統括官付穀物課 2019b. 米をめぐる状況平成 31 年 4 月. 1-47. https://www.maff.go.jp/j/syouan/keikaku/soukatu/attach/pdf/kome_seisaku_kaikaku-83.pdf, (参照 2021-1-8).

農林水産省大臣官房政策官付穀物課 2020. 米に関するマンスリーレポート (令和 2 年 12 月号).
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/keikaku/soukatu/attach/pdf/mr-404.pdf>, (参照 2021-1-8).

農林水産省大臣官房政策官付穀物課 2021. 米に関するマンスリーレポート (令和3年6月号). <https://www.maff.go.jp/j/seisan/keikaku/soukatu/attach/pdf/mr-478.pdf>, (参照 2021-6-7).

農林水産省農林水産技術会議事務局 2008. 水稻の品種開発 (農林水産省). https://www.maff.go.jp/j/study/kome_sys/09/pdf/data4.pdf, (参照 2021-1-8).

小田原誠・底押秀康・高橋鍛・岡留博司・大坪研一 2004. すし酢が酢飯の低温保存後のテクスチャーに与える影響. 日食科工誌 51 (11): 620-625.

大平陽一・西田瑞彦・福重直輝・持田秀之・石川洋・勝部忠志・斎藤真二・菊池公一・小野洋・白土宏之・伊藤景子 2018. 東北地域における多収性水稻品種「いわいだわら」の収量と玄米タンパク質含有率に及ぼす豚ふん堆肥施用と窒素施用の影響. 東北農研研報 120: 47-66.

大坪研一 1995. 米の品質. 「米の科学」, 竹生新治郎監修. 石谷孝佑・大坪研一編. 朝倉書店, 東京. 13-77.

大家千恵子・川端晶子 1998. 日本産米の品種の異なる米の食味特性. 日食科工誌 45(6): 341-348.

岡留博司・豊島英親・大坪研一 1996. 単一装置による米飯物性の多面的評価. 日食科工誌 43(9): 1004-1011.

岡留博司・栗原昌之・楠田宰・豊島英親・金静逸・下坪訓次・松田智明・大坪研一 1999. 窒素施肥の異なる炊飯米の多面的物性評価法. 日作紀 68(2): 211-216.

奥田将生・上用みどり・福田央・玉村隆子 2017. 泡盛用原料米の白米水分及び碎米化が吸水性に及ぼす影響と二度蒸しによる蒸米吸水率の向上. 日本醸造協会誌 112 (9): 629-640.

大田原美保・北原茉美・大石恭子・香西みどり 2018. 圧縮米飯粒の色と画像解析による飯の老化評価. 日食科工誌 65(4): 170-182.

- 尾崎直臣 1973. 米飯の老化 (第 2 報). 栄養と食糧 26(5) : 289-295.
- 坂井真・田村克徳・梶亮太・田村泰章・片岡知守・佐藤宏之 2016. 西日本向けの多収・低アミロース水稻新品種「ぴかまる」の育成. 育種学研究 18: 152-157.
- 坂本薫・森井沙衣子・上田真理子 2015. 炊飯における温水浸漬と低温浸漬が米の吸水率に与える影響. 日本調理科学会誌 48(3) : 193-199.
- 佐々木武彦・阿部眞三・松永和久・岡本栄治・丹野耕一・千葉芳則・狩野篤・植松克彦 1993. 水稻新品種「ひとめぼれ」について. 宮城古川農試報 2 : 1-17.
- 佐藤稔英・中山繁喜・米倉裕一・平野高広・山口祐子・遠山良 2011. 水浸裂傷の発生要因の検討. 日本醸造協会誌 106(2) : 103-111.
- 塩野弘二・辻井良政・野口智弘・高野克己 2017. 米デンプンの糊化および粘度挙動に対する内在タンパク質および脂質の影響. 日食保蔵誌 43 (2) : 71-75.
- 鈴木一成 1989. 米飯の老化に及ぼす保存温度の影響, 日本家政学会誌 40(11) : 983-985.
- 平宏和 1970. 多収穫栽培米のタンパク質含量に与える施肥の影響. 日作紀 39 : 200-203.
- 平俊雄 1998. 1993 年の低温と 1994 年の高温が福島県の水稲品種の食味と理化学的特性に与えた影響. 日作紀 67(1) : 26-29.
- 高見幸司・郡山剛・大坪研一 1998. 低アミロース米飯の低温保存中における硬化性とその評価方法. 日食科工誌 45 (8) : 469-477.
- 滝田正・東正昭・横上晴郁・片岡知守・加藤浩・山口誠之・田村泰章・小綿寿志・小山田善三・春原嘉弘 2002. 低アミロース米良食味品種「シルキーパール」の育成. 東北農研研報 100 : 27-39.
- Tamaki M. , Ebata M. , Tashiro T. and Ishikawa M. 1989. Physico-ecological studies on quality formation of rice kernel. I. Effects of nitrogen top-dressed at

full heading time and air temperature during ripening period on quality of rice kernel. Jpn. J. Crop Sci. 58(4): 653-658.

谷達雄・吉川誠次・竹生新治郎・堀内久弥・遠藤勲・柳瀬肇 1969. 米の食味評価に関係する理化学的要因 (I). 栄養と食糧 22 (7): 452-461.

富田晴雄・坂本薫・John Henderson・竹森利和 2015. 浸漬時間の違いによる米飯の構造とテクスチャーの関係. 日本調理科学会誌 48 (1): 18-25.

山倉美穂・岡留博司・鈴木啓太郎・チャンチウエン・本間清一・笹川秋彦・山崎彬・大坪研一 2005. 米の超高压処理と浸漬が炊飯に与える効果. 日食科工誌 52(2): 60-67.

山下鏡一・藤本堯夫 1974. 肥料と米の品質に関する研究(4). 東北農試研報 48: 91-96.

山内富士夫・大内邦夫・浜村邦夫 1982. 北海道産米の化学成分組成に関する研究—第 3 報 精白米におけるタンパク質含量とアミロース含量との関係—. 北海道農試研報 134: 139-145.

柳原哲司・藤井はるか 2017. 北海道米の業務用適性評価とその活用. 日食科工誌 64 (5): 243-255.

柳瀬肇・大坪研一・橋本勝彦・佐藤裕保・寺西敏子 1984. 米のタンパク質含量と米飯テクスチャーならびに炊飯特性. 食総研報 45: 118-122.

柳瀬肇・大坪研一 1985. 精米加工と米飯食味の関係(1). 食総研報 46: 148-161.

柳瀬肇 1989. 大型精米加工と品質. 農業機械学会誌 51 (2): 105-112.

若林剛志 2016. 日本農業の現状と見通し. 農林金融(1): 30-44.

王余龍・山本由徳・蔣軍民・姚友礼・蔡建中・新田洋司 1997. 中国産日本型水稻 9004 系統の多収要因の解析: 第 3 報 窒素施用時期並びに施用量が収量成立に及ぼす影響. 日作紀 66(1): 1-10.