

米の他用途の方向と水稻育種の可能性

誌名	農林水産技術研究ジャーナル
ISSN	03879240
著者	奥野, 員敏 古賀, 義昭
巻/号	11巻10号
掲載ページ	p. 39-45
発行年月	1988年10月

米の他用途の方向と水稻育種の可能性

奥野 員敏^{*}・古賀 義昭^{**}

1. はじめに

1960年代以降に、わが国では、短稈・多収品種が相ついで育成され、水稻の収量水準の飛躍的な向上に貢献した。なかでも、レイメイ、ホウヨク、シラヌイなどの一連の短稈・多収品種は、寒冷地や暖地における収量性の増大に貢献した。これらの品種は、国際稲研究所や米国で育成された多収品種と同一座の半矮性遺伝子を保有し¹⁾、以後、わが国における短稈・多収品種の主要な遺伝子給源となった。短稈・多収品種の普及とそれらの品種に適した栽培技術の開発に伴って、わが国における稲作の安定化と多収化が図られるようになった。

一方、収量性の増大や米の消費の減退などにより、米の生産は過剰傾向となり、その後、転作作物の導入などによる生産調整が行われるようになった。しかし、耐湿性に優れ、しかも収益性の高い転作作物は乏しい。そのため、他用途向き水稻品種への要望は高まりつつある。

北陸地域では全耕地面積の約90%が水田であり、これまでに、良質米生産基地としての地位を築いてきた。近年、北陸地域においても生産調整が行われるようになり、大豆と大麦による作付体系の導入が推進されている。しかし、北

陸地域では重粘土の排水不良田が多く、転作作物の導入を困難にしている。また、北陸地域には、古くから米を原材料にした食品加工業が定着している。このような背景から、米の利用範囲を拡大するための新しい水稻品種の育成が当面の重要な課題となっている。

北陸農業試験場における水稻育種の主な目標は、良質・良食味品種の育成と他用途向き超多収品種の育成である。本稿では、他用途向き水稻品種育成の方向とその可能性に焦点をあてて話題を拾ってみたい。とりわけ、米の主成分であるデンプン、タンパク質および脂質の量や質について、米に内在する多様性を探り、米の利用範囲を拡大することの可能性について論じてみたい。

2. 米デンプンの多様性とその利用場面

米の中には多量のデンプンが集積する。白米では乾物の90%以上がデンプンであり、まさに米はデンプンの貯蔵庫である。

従来は、ウルチとモチに大別されていた米のデンプンに、比較的広範な遺伝変異が存在することが明らかにされてきた。それらの主要な点を要約すると次に示す通りである。

(1) ウルチ品種のアミロース含量には変異があり、その違いは wx 遺伝子座の対立遺伝子の違いによる。一般に、高アミロースの Wx^a はインド型品種に、低アミロースの Wx^b は日本型品種に分布する²⁾。

Kazutoshi OKUNO and Yoshiaki KOGA : Future prospect in rice breeding for utilizing rice grains as a raw material of industrial products

(2) モチ突然変異系統の中には、微量のアミロースを生成できる系統が存在する。在来のモチ品種にはアミロースを生成するものは発見されていない。ウルチ性からモチ性への変化、すなわち *wx* 座での遺伝子発現には多様な調節機構が介在する³⁾。

(3) モチ・ウルチ性を決定する *wx* 座での発現を調節する一群の遺伝子が存在する。これらの遺伝子は *du* と呼ばれている。*du* 遺伝子はアミロース含量を低下させるが、アミロペクチンの構造を変化させない^{4,5)}。

(4) *ae* 遺伝子はアミロース含量を増加させるとともにアミロペクチンの構造を変化させる^{4,5)}。

(5) 米のアルカリ崩壊性に関して品種間差異があり、その違いは *alk* 遺伝子により支配される⁶⁾。

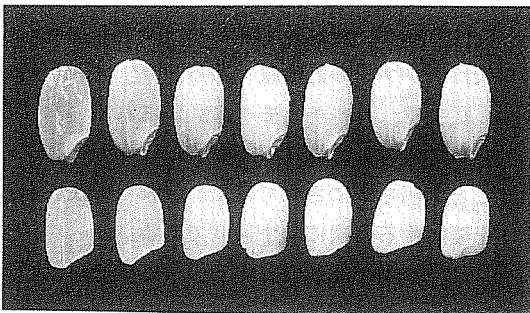
以上が、これまでに米デンプンの遺伝変異について得られた知見である。それでは、米の加工・利用を考えるときに、どのようなデンプンの性質を米に付与したらよいのであろうか、言い換えれば、どのようなデンプンの性質をもった米をつくれれば、米の利用に新しい展開が期待できるのだろうか。そこで、これらの課題について、検討を加えてみることにする。

現在、育種家や食品加工の研究者にもっとも注目されているのは、低アミロース遺伝子 (*du*) である。今までのところ、5種の *du* 遺伝子座

が見いだされており⁷⁾、米の外観やアミロース含量には幅広い変異がある(写真1)。これらの米は従来の分類でいうと、ウルチでもモチでもない。それゆえ、これまでとは違った米の利用の仕方があるかもしれないと期待されている。

du 遺伝子を用いた育種の事例として、北海道産米の食味を改善しようとする試みがある。これまでに、「道北43号」をはじめとする数系統が育成されてきた。しかし、アミロース含量が登熟期の温度に依存して顕著に変動するため、高温年には米の外観が白濁してしまう。現在までのところ、この種の米は飯米として流通していない。では、今後、*du* 遺伝子を用いた育種をいかにして進めるか検討してみよう。重要なことは、それぞれの環境条件にもっとも適した遺伝子を選択することにより、見かけの品質を劣化させることなく低アミロース化を図ることである。そのためには、*wx* 座の対立遺伝子や数種の *du* 遺伝子について、いかなる種類の遺伝子を選ぶか、単独あるいは相互に組み合わせるか、などについての十分な吟味が必要である。デンプン合成にかかわる多様な遺伝子を駆使すれば、それぞれの利用目的に合ったアミロース含量を任意に作り出すことも可能である。

ついで、低アミロース米のその他の利用について展望する。低アミロース米飯はきわめて粘るので、粘りを増強させるためのブレンド米として、その活用を検討している。北陸農業試験場における予備的な食味試験の結果から、低アミロース米を混ぜると食味は改善されることがわかった。ブレンド米としての利用場面は広いと推定されるので、今後、さらに試験を続けてみたい。また、低アミロース米の米菓適性についても調べられている。米菓適性を評価するための指標の一つに膨化の程度がある。膨化度の大小はデンプンに固有の性質であり、主にアミロース含量により影響される。一般に、低アミロースであることが米デンプンの膨化にとって好ましい。このような特性を生かして、低アミロース米を原材料にした新しい米菓やスナック



注) 左はウルチ米、右はモチ米、その他は低アミロース米
左から右へ、アミロース含量は低下する

写真1 アミロース含量が違う米

表1 米成分の遺伝変異とその利用場面

成分	遺伝子	成分特性	利用場面
デンプン	<i>ae</i>	粉質, 高アミロース アミロペクチンの構造変化	デンプン素材
	<i>du(1-5)</i>	低アミロース	米飯, 米菓, 団子, スナック
	<i>Wx^a</i>	ウルチ(高アミロース)	包装米飯
	<i>Wx^b</i>	ウルチ(日本品種並みの アミロース含量)	米飯, 米菓外
	<i>wx</i>	モチ	餅, 米菓外
脂質	<i>ge</i>	巨大胚, 脂質含量の増加	油脂
タンパク質	<i>esp-1</i>	プロラミンの減少	栄養価の向上, 飼料
	<i>esp-2</i>	グルテリンの増加	//, //
	<i>esp-3</i>	プロラミンの減少	//, //
	<i>Esp-4</i>	プロラミンの増加	

食品が誕生することを期待する。ただし、米菓やスナック食品の市場はそれぞれ年産20万トン程度であり、新しい製品が開発されたとしても、米の消費量を大幅に伸ばすことにはならないかもしれない。

ついで、高アミロース米の利用場面について検討する。近年、電子レンジの普及に伴って各種のレトルト食品（包装米飯）が出回っている。手軽さも手伝って、若年層を中心に販路を広げつつある。消費者がレトルト食品を利用するまでには、製造過程や調理を通じて、何度か熱処理が加えられる。すなわち、デンプンは糊化と老化の過程を繰り返し受けることになる。このような過程を経た場合、アミロース含量の高い米は米飯の変化が小さいと推定されている。現在、外国稲を用いて育成された高アミロース系統などについて、レトルト食品の開発が手がけられている。今後は、日本型品種に *wx* 座の対立遺伝子 *Wx^a* を導入して、25~30%程度のアミロース含量を示す高アミロース品種を育成し、レトルト食品用の適品種を開発することが課題となろう。

デンプンについて語る時、コーン・スターチを製造するために膨大な量のトウモロコシが輸入されていることを見過ごせない。その量は加

工用として消費される米の量を凌いでいる。デンプンの利用場面は多岐にわたるが、一般的には、作物に特定される利用場面があるわけではない。そこで、いかに低コストであるかが制限要因となる。他の作物では発見されていない低アミロース・デンプンなど、米デンプンに特定できる利用場面を発見することも今後の重要な課題である。

すでに、本誌で論じたように、米デンプンの構造と性質には多様な遺伝変異が存在する³⁾。その多様性を最大限活用して、表1に示すような米の新しい利用場面を開拓することは今後の水稻育種にとって重要である。

3. 油料作物としてのイネの利用

わが国で生産される植物油のうち国内産油脂源は米糠のみであり、全植物油の約5%を占めるにすぎない。それ以外の油脂源はすべて輸入されており、その主なものはナタネ、ダイズおよびトウモロコシである。世界における米糠油の生産量は過去10年間に倍増し、約40万トンに達したが、わが国での生産量は減少した¹⁰⁾。

精白するときに玄米の約10%は米糠として取り除かれる。年間の飯米の消費量をおよそ900

万トンと仮定すると、精白時に90万トンの米糠が生じる。米糠の含油率を20%と仮定すると、米糠から生産される油脂量は18万トンに相当する。しかし、実際にわが国で生産される米糠油は年間約9万トンにすぎない。残りは家畜の飼料などに用いられている。では、米糠がそれほど有効利用されていないのはなぜであろうか。米糠には活性の高いリパーゼが存在するため、精白時に脂質は急速に加水分解されるといわれている。そのことが米糠の有効利用を妨げる原因の一端になっているかもしれない。

油料作物としての価値を決める主な要因は含油率と脂肪酸組成である。まず、含油率に関する育種の可能性について検討する。

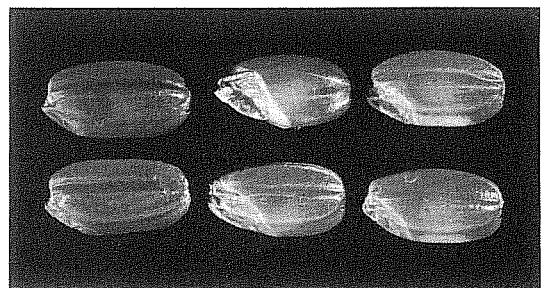
代表的な油料作物であるナタネ、ゴマ、ヒマワリなどの種子中の含油率が約40~50%であるのに対して、米(玄米)の含油率は2~3%である。先に述べたように、米の脂質は糠(胚芽、種皮および糊粉層の混合物)に特異的に集積する。糠での含油率は20%程度でありダイズやラッカセイの含油率に匹敵する。それゆえ、米糠は貴重な油脂源である。今後、油脂用の水稲品種を育成するには、含油率を飛躍的に向上させなければならない。そこで、米の含油率を高めるための育種法について考えてみよう。

第1はトウモロコシで行われてきたように、多数の微動遺伝子を集積して種子全体の含油率を高める方法である。米国・イリノイ大学において、76世代にわたり含油率についての選抜試験が実施された。その結果、20%程度の含油率を示す高含油系統が育成された¹¹⁾。トウモロコシの種子の含油率には50以上の遺伝子座が関与すると推定されている。したがって、高含油系統の育成は、長い世代にわたる地道な選抜により、脂質合成にかかわる数多くの遺伝子を集積できることを示す。これは作物の成分育種における著名な事例であるが、米の含油率について育種を進める上でも示唆を与えてくれるであろう。また、米の胚乳中にはデンプン粒やタンパク質顆粒に結合した脂質が存在するので¹²⁾、胚

乳中の含油率を高めるための選抜も重要である。

第2は、米の中に占める糠の割合を増やし含油率を増大させる方法である。脂質の存在部位が限られる米の場合、胚芽や糊粉層の重量を増やすことで含油率の増大を図ることが可能である。実際に、通常の品種に比べて胚芽の重量が2~3倍に増大した突然変異が誘起されている¹³⁾(写真2)。この系統の玄米と胚芽における含油率は、原品種に比較してそれぞれ1.5倍と2倍に増加することが明らかにされた¹⁴⁾。これらの特性は、単一の劣性遺伝子 *ge* (*giant embryo*)により支配されると推定された。また、育種素材としての価値は不明であるが、1粒の米に2個の胚芽が形成される突然変異系統や、糊粉層の厚さの変異も見いだされている。これらの系統の油脂源としての評価も今後に残された課題である。

ついで、米の脂肪酸組成について育種の立場から検討を加えてみたい。米糠油の脂肪酸組成は植物油の中では良質である。米糠油には血液中のコレステロールを低下させる効果をもつリノール酸が比較的多く含まれるからである。米のリノール酸含量は約30~40%であり、玄米、胚芽および糊粉層の間で大差ない¹⁴⁾。このことは、米糠の割合を増やすことにより、本来の米の脂肪酸組成を変えずに高含油米を育成できることを示す。また、リノール酸含量には生態型間で違いがある¹⁵⁾ので、さらに良質な脂肪酸組成を有する品種を育成することが可能であろう。



注) 左はウルチ米、中央と右は胚芽が大きい米
写真2 胚芽が大きい米(九州大学佐藤光氏原図)

しかし、リノール酸は酸化を受けやすく製品の劣化を招くおそれがあるので、無制限にリノール酸を増やすことは米糠の加工・利用にとって必ずしも好ましいことではない。また、米の胚芽には脂肪酸を酸化させる3種のリポキシゲナーゼ・アイソザイムが含まれる¹⁶⁾。ダイズにも3種のリポキシゲナーゼ・アイソザイムが存在するが、これらのアイソザイムを欠く系統が発見された¹⁷⁾。ダイズでの成功例を参考にして、イネにおいてもリポキシゲナーゼ欠損系統の発見が待たれる。油脂源としての米の利用を拡大できるかどうかの鍵を握っているといっても過言ではない。また、リポキシゲナーゼの作用により脂肪酸が酸化されて、古米臭の成分が生成されると推察されている¹⁸⁾ので、米の貯蔵性を改善するためにもリポキシゲナーゼ欠損系統を探索する必要がある。

4. タンパク質の改善による米の栄養価の向上

日本人は全摂取タンパク質の約15%を米やその加工品から摂取する。食生活が欧米化されつつある今日でも、米は日本人にとって重要なタンパク質源である。

米の中には5~10%のタンパク質が含まれる。米のタンパク質はトウモロコシ、コムギ、オオムギなどの主要な穀物に比べて良質である。トウモロコシなどの穀物での主要なタンパク質はアルコールに可溶のプロラミンであり、リジンやトリプトファンが制限アミノ酸となる。一方、米の全タンパク質の約80%は希酸や希アルカリに可溶のグルテリンである。プロラミンに比べてグルテリンは栄養的に優れている。したがって、イネでは主にタンパク質含量を向上させるための取り組みがなされてきた。

ところが、近年になってタンパク質含量を増やすだけでは、米のタンパク質の改善に必ずしもつながらなかった。タンパク質は存在部位や性質の違う3種類の顆粒中に集積する。これらの顆粒はタンパク質顆粒（プロティ

ン・ボディ、PB）と呼ばれる。PB-1とPB-2は胚乳中に局在し、デンプン粒が集積するアミロプラストの隙間に蓄えられる。PB-3は糊粉層や胚盤に局在し、集積する主要なタンパク質は水溶性のアルブミンと塩類可溶のグロブリンである。PB-3は精白時に米糠とともに除去されてしまう。そこで、一般的には米から摂取するタンパク質は、PB-1とPB-2に貯蔵されるタンパク質に限られる。これらの2種類のタンパク質顆粒にも集積するタンパク質の種類や消化性について、大きな違いがあることが明らかにされてきている¹⁹⁾。

PB-1にはプロラミンが特異的に集積するため、リジンやトリプトファンが制限アミノ酸となる。しかも、人間や動物はPB-1をほとんど消化できない。一方、PB-2はグルテリンとグロブリンから構成され、人間や動物の消化系で利用できる。したがって、PB-1を減少させるか、あるいは欠失させる一方、PB-2を増大させることができれば米のタンパク質の栄養価を改善できるものと期待される。最近、米のタンパク質の組成を変更させる遺伝子が発見された^{20,21)}。これらの遺伝子の中にはプロラミンを減少させる遺伝子やグルテリンを増大させる遺伝子が含まれる。今後、遺伝子座が違う遺伝子を組み合わせ、低PB-1含量・高PB-2含量の品種を育成することがタンパク質育種の目標となる。

米のグルテリンは他の種子タンパク質のグルテリンに比べて、リジンやトリプトファンが少ないと指摘されている。米のグルテリンは22~23 KDa ポリペプチドと37~39 KDa ポリペプチドから構成される。これらのサブユニットは57 KDaの前駆体ポリペプチドが翻訳後に修飾され、形成されたものである。将来、グルテリンをコードする遺伝子の構造領域やプロモーター領域を改変することにより、米のタンパク質の栄養価を改善することが可能になろう²²⁾。

米のタンパク質を積極的に改善することによって、米の利用範囲を拡大することができるで

あろうか。飯や米の加工品にとってタンパク質含量が高いことは、適性上好ましくない。これらの米の利用場面ではタンパク質の質的な改善が求められるが、新用途の開発や消費量の増大には必ずしも結び付かない。わが国における高タンパク質・高リジン米の利用場面は、主に家畜などの飼料が想定される。しかし、タンパク質育種の可能性の大きさに比べて、あまりにも利用範囲が小さい。食品加工での利用をも含めて、今後とも可能性を探ってみたい。

5. 成分育種における選抜法の開発

成分育種ではその目標に合致した育種素材があるか否かが重要である。たとえ適当な素材があっても、多数の雑種集団の中からの確に望ましい組換え型を選抜するには、手法の開発も不可欠である。育種への適用を図る場合、できる限り多量のサンプルを簡便に、迅速に、かつ再現性高く測定できる手法の開発が望まれる。ところが、上記の条件を満たす手法がすでに整っているわけではない。

筆者の知る限り、成分育種における理想的な選抜事例の一つは、酵素免疫法(ELISA)による β -グルカナーゼ含量の選抜である。デンマーク・カールスベルグ研究所で開発され、無 β -グルカナーゼの醸造用オオムギの選抜に利用されている。酵素免疫法は病理学を中心に広く用いられてきた再現性の高い手法であり、今後は育種への適用も活発になるであろう。

わが国の水稻育種において、酵素免疫法はしま葉枯病抵抗性の検定に用いられている。実験室レベルでは貯蔵タンパク質の選抜にも用いられている。この種の選抜法では貯蔵タンパク質や遺伝子に対応したタンパク質を単離し、それらを抗原にして抗血清を調整しなければならない。しかし、育種で取り扱われる形質の多くはその発現にかかわる遺伝子産物がわかっていない。今後は、農業形質の発現にかかわるタンパク質を解明し、酵素免疫法などの新しい選抜シ

ステムを開発することが課題となる。

今日、水稻の成分育種において調査されている形質は、アミロース含量、デンプンの理化学的特性、脂質含量、脂肪酸組成、タンパク質含量、アミノ酸組成などである。それぞれの形質を別々の方法で測定するのは操作が煩雑となり、限られた時間の中で育種家が自在に使用できる技術として定着しないかもしれない。近年、近赤外分光による成分分析機が各種販売されている。この種の機器の能力を十分に活用するには、食品化学などの専門家との密接な連携が不可欠である。

6. おわりに

他用途向き品種を育成するには、まず、米の中に内在する多種多様な遺伝変異を発掘することが課題となる。本稿では、米に集積するデンプン、タンパク質および脂質について、それらの量や質の遺伝的多様性を検討してきた。現在はその一部が利用されているにすぎない。米の利用範囲を拡大するためには、従来にない付加価値を米に与えることができるかが重要な目標となる。これまで検討してきたことは、今後の水稻育種が取り組もうとする課題の一端にしかすぎない。もちろん将来にわたっても、水稻育種の中心は各種の病虫害や障害に強く、安定して生産性が高く、しかも美味しい品種の育成に据えられるべきであろう。一方、利用の場面は限られていても、米の販路を拡大することにつながるような新しいタイプの米も開発しておかなければならない。形や大きさが多様な米、香りのある米、色の着いた米など、様々な角度から米に内在する遺伝的多様性を活用する方法を探っておくことが重要である。

食品加工業では、技術革新が進みどのような原材料を提供されても、同様な品質の製品を作り出すノウハウを獲得した。したがって、今後食品加工業からのニーズを引き出して、新しい製品の開発に闘志を燃やせるような「個性のあ

る米」を作り出せるかどうか、他用途向き品種を育成する際の鍵となる。

すべての課題について一朝一夕に実現できるわけではない。通常、水稻品種が誕生するまでには約10年を要する。そこで、食品加工分野と協力して、米に秘められた可能性を探りつつ、将来それらの夢を実現したいと願っている。

（ *北陸農業試験場 作物第1研究室）
（ **北陸農業試験場 作物第1研究室長）

引用文献

- 1) 菊池 文雄・板倉 登・池橋 宏・横尾 政雄・中根 晃・丸山 清明 (1985), 農技研報D36 : 125-146.
- 2) Sano, Y. (1984), Theor. Appl. Genet. 68 : 467-473.
- 3) 奥野 員敏 (1988), 研究ジャーナル11(6) : 3-9.
- 4) Okuno, K. (1987), Gamma-Field Symposia 24 : 39-62.
- 5) Okuno, K., Fuwa, H., Yano, M. (1983), Japan. J. Breed. 33 : 387-394.
- 6) Yano, M., Okuno, K., Kawakami, J., Satoh, H., Omura, T. (1985), Theor. Appl. Genet. 69 : 253-257.
- 7) Asaoka, M., Okuno, K., Sugimoto, Y., Yano, M., Omura, T., Fuwa, H. (1986), Stärke 38 : 114-117.
- 8) 工藤 政明 (1968), 農技研報D19 : 1-84.

- 9) Yano, M., Okuno, K., Satoh, H., Omura, T. (1988), Theor. Appl. Genet. 76 (印刷中)
- 10) 平 宏和 (1988), 研究ジャーナル11(6) : 10-17.
- 11) Alexander, D. E., Creech, R. G. (1977), in Corn and Corn Improvement (ed. Sprague, G. F.), Am. Soc. Agr., P. 363-370.
- 12) 間野 康男・大西 正男・伊藤 精亮 (1988), 澱粉科学35 : 49-55.
- 13) 大村 武・佐藤 光 (1981), 育種学最近の進歩22 : 10-19.
- 14) 松尾 巧・佐藤 光・尹 景民・大村 武 (1987), 育種37 : 185-191.
- 15) Taira, H., Nakagahra, M., Nagamine, T. (1988), J. Agric. Food Chem. 36 : 45-47.
- 16) Ida, S., Masaki, Y., Morita, Y. (1983), Agric. Biol. Chem. 47 : 637-641.
- 17) Kitamura, K., Kumagai, T., Kikuchi, A. (1985), Japan. J. Breed. 35 : 413-420.
- 18) 森田 雄平 (1984), 化学と生物22 : 710-718.
- 19) Tanaka, K., Sugimoto, T., Ogawa, M., Kasai, Z., (1980), Agric. Biol. Chem. 44 : 1633-1639.
- 20) Kumamaru, T., Satoh, H., Iwata, N., Omura, T., Ogawa, M. (1987), Jpn. J. Genet. 62 : 333-339.
- 21) Kumamaru, T., Satoh, H., Iwata, N., Omura, T., Ogawa, M., Tanaka, K. (1988), Theor. Appl. Genet. 76 (印刷中)
- 22) Takaiwa, F., Kikuchi, S., Oono, K. (1987), Mol. Gen. Genet. 208 : 15-22.

