

Ⅲ 日本で栽培されている米の澱粉特性

1. はじめに

米は、小麦及びトウモロコシと共に、世界三大穀物の一つとして世界中で栽培されている。日本は、アジアモンスーン地域北部に位置し、海からの季節風によって十分な降雨がもたらされ、年間の温度差が大きいことから、稲作に好適な条件が揃っている¹⁾。日本で主に栽培されている米は、短粒種で粘りの強いジャポニカ米であるが、夢十色²⁾、サリークイーン³⁾等、日本で育成されたインデカ米も僅かではあるが栽培されている。

農林水産省の食糧需給調査⁴⁾によると、日本人の主食である米の1人あたりの年間消費量は、1962年の118.3 kgをピークに年々減少し、2014年にはピーク時の半量以下の55.6 kgにまで低下した(図1)。米消費量低下の主な原因は、食生活の欧米化、消費者ニーズの多様化、主食の比率低下等が考えられる。しかしながら、2010年に行われた非公開型インターネットアンケートによる三食の主食状況調査⁵⁾によると、朝食についてはパン(45.8%)が最も多かったものの、昼食、夕食となるにつれてごはん(米)の割合が高くなり、夕食では9割近い結果となったことが報告されている。この結果からも分かるように、1人あたりの年間米消費量は低下しても、米は我が国にとって、依然重要な食糧資源である。

日本人は、軟らかく粘りの強い米を一般的に好むが、チャーハン、パエリア等、少し硬めで粘りの弱い米の方が適している料理もある⁶⁾。また、コンビニエンスストア、スーパー等では、おにぎり、弁当を長時間低温下で保存するため、そのような状況下でも硬くなりやすく粘りが落ちにくい米が望まれる等、米の

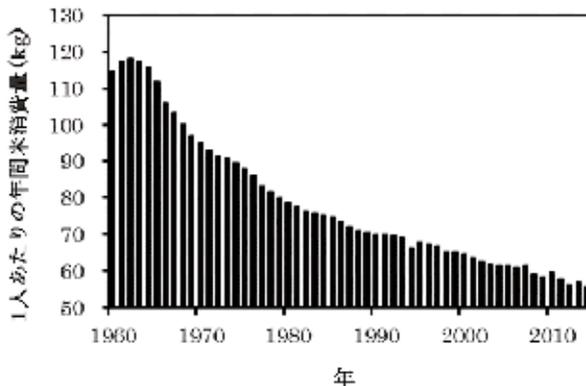


図1 1人あたりの年間米消費量の推移(文献⁴⁾より作図)

調理・加工法及び用途によって求められる米飯物性は異なる⁷⁾。米飯物性は、米の7割以上を占める澱粉の影響を最も強く受けると考えられていることから^{8,9)}、多様化したニーズに応えるためにも、現在、日本で栽培されている米の澱粉特性について、著者の研究を踏まえて纏めてみた。

2. イネの作付動向

(公社)米穀安定供給確保支援機構の作付動向調査¹⁰⁾によると、平成27年の水稻の作付は約150万haであり、内、うるち米が95.2%、もち米が3.5%、醸造用米が1.3%であった。つまり、日本で作付されている水稻のほとんどがうるち米である。また、うるち米の品種別作付割合は、1位コシヒカリ(36.1%)、2位ひとめぼれ(9.7%)、3位ヒノヒカリ(9.0%)、4位あきたこまち(7.2%)、5位ななつぼし(3.4%)と続き、作付割合上位10品種で全体の約76%、20品種で約85%を占める¹⁰⁾(図2)。水稻うるち米の作付品種数は、1950年代には300以上、60年代には約250、70年代から80年代には160~200、90年代から2000年には200~280品種と推移している¹¹⁾。平成27年の作付品種数は不明だが、その数に大きな変動はないと考えられることから、仮におおよそ200品種と見積もっても、その10分の1の品種によって全作付面積の8割以上が占められると推算される。また、うるち米の品種別作付割合上位10品種の内、ひとめぼれ、ヒノヒカリ、あきたこまちは、コシヒカリを親として育成された品種であることから、コシヒカリを含めたコシヒカリ系統の米が、少なくとも全体の62%を占める(図2)。前述のインターネットを利用したアンケート調査⁵⁾によると、



図2 平成27年産うるち米(醸造用米、もち米を除く)の品種別作付割合(文献¹⁰⁾より作図)

最も人気のある品種はコシヒカリ、2位はあきたこまちであり、いずれもコシヒカリ系統の米である。この結果は、日本人がコシヒカリの食味を好むことを裏付けている。しかし、一方で、品種へのこだわりはないという回答が47%もあり、これは、日本で栽培されている米が似たような食味をしている、つまり食味にバラエティーがない、と否定的な捉え方をされていると見ることもできる。

3. 日本で栽培されている米の澱粉特性

1) うるち（粳）米ともち（糯）米

米には、白飯として食するうるち米と餅や赤飯として食するもち米とがあり、収穫乾燥後の精白米はうるち米が半透明なのに対して、もち米は白い。これは、もち米中に存在する空隙が光を乱反射させることによるものとされる¹²⁾。うるち米の澱粉¹³⁾は、アミロース及びアミロペクチンの2成分から構成されている(図3)。グルコースが α -1, 4-グリコシド結合により直鎖状に繋がったものがアミロース¹⁴⁾であり、 α -1, 4結合から成るグルコース直鎖の途中から α -1, 6-グリコシド結合によって分岐構造を持つものがアミロペクチン¹⁵⁾である。一方、もち米の澱粉は、アミロースを含まず、アミロペクチンのみから構成されている。アミロースは、ADP-グルコースピロフォスホリラーゼ (AGPase) によって生成されるADP-グルコースを基質として、約60 kDa¹⁶⁾の澱粉粒結合型澱粉合成酵素I (granule-bound starch synthase I : GBSS I) によって合成される¹⁷⁾。GBSS Iは、イネの第6染色体上に位置するWx遺伝子によってコードされており、この遺伝子が機能を失うと、アミロースが全く含まれないもち性となる¹⁸⁾。

2) アミロース含量

一般に、アミロース含量の高い米は、米飯とした場合、体積増加が多く(釜ぶえする)、硬く、粘りの少ない飯となり、アミロース含量の低い米は、軟らかくて粘りのある飯となる¹⁹⁾。

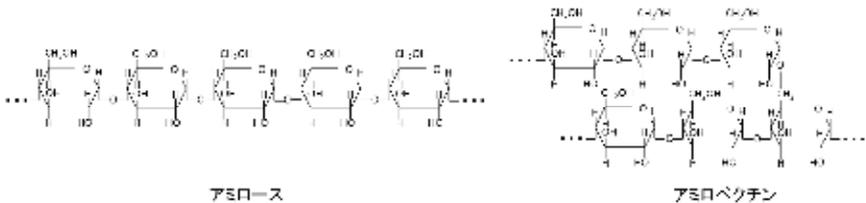


図3 アミロース及びアミロペクチンの化学構造

アミロース、 α -1, 4-グリコシド結合により直鎖状に繋がったグルコースポリマー；アミロペクチン、 α -1, 4結合から成るグルコース直鎖の途中から α -1, 6-グリコシド結合によって分岐構造を持つグルコースポリマー

もち米は、アミロースを含まずアミロペクチンのみで構成されているため、粘りが強い²⁰⁾。餅、赤飯として食される以外にも、餅生地を老化させて、あられ、おかきといった加工米菓にも用いられる。この餅生地の硬化速度は、澱粉の特性に大きく左右される。アミロース含量が、もち米とコシヒカリを始めとするうるち米との中間の米を、低アミロース米、もしくは半もちと呼ぶ²⁰⁾。低アミロース米は、粘りが強く、老化しにくいいため、コンビニエンスストア、スーパーのおにぎり、弁当等、長時間冷蔵保存される米飯に適している。タイ米に多い高アミロース米は、白飯にすると粘りが弱く、パサパサしているため、日本人の嗜好には合わない。しかし、ピラフ、チャーハン等のバラバラとした食感が好まれる料理または冷凍米飯に用いられており、近年、その需要は高まっている²¹⁾。

澱粉中のアミロース含量測定には、主に、ヨウ素呈色比色法、電流滴定法、電圧滴定法等のヨウ素を用いる定量方法と、酵素・クロマト法とがある²²⁾。前者は、アミロース分子が6個のグルコース残基で1巻きの螺旋構造を形成することを利用した方法で、螺旋構造内にヨウ素分子が取り込まれると青色に呈色することから、その呈色度を測定し定量する。後者は、澱粉に α -1,6 結合を特異的に切断する酵素（殆どの場合 *Pseudomonas* のイソアミラーゼ）を作用させて枝切りした後に、ゲル濾過クロマトグラフィーによって、側鎖分子をその大きさで分離・定量する方法である²³⁾。うるち米澱粉からアミロペクチンを精製し、酵素・クロマト法でその鎖長分布を調べると、アミロースと同程度の大きさで非常に長い直鎖状側鎖である超長鎖 (super long chains : SLC) の存在が認められる²⁴⁾。この SLC も、アミロースと同様にヨウ素と結合して呈色するため、ヨウ素を用いる定量方法及び酵素・クロマト法いずれの測定方法においても、実際のアミロース含量である「真のアミロース含量」よりも高いアミロース含量が算出される。よって、真のアミロース含量と区別するために、「見かけのアミロース含量」と呼ぶ。

酵素・クロマト法により、澱粉、精製アミロペクチンのゲル濾過溶出曲線 (図4) をそれぞれ描き、鎖長分布を調べると、これらの関係が良く分かる。アミロースが含まれる澱粉 (図4A) では、画分境界をヨウ素吸収波長で決定し、ローマ数字で画分を区別する。アミロース及び SCL が溶出する Fr. I を見かけのアミロース含量とするが、中間画分 (Int. Fr.) にも短いアミロース、非常に長いアミロペクチン単位鎖が含まれるので付帯情報として重要である。Fr. II, Fr. III はアミロペクチン単位鎖のそれぞれ長鎖画分、短鎖画分である。一方、精製アミロペクチン (図4B「●」) では、画分境界は溶出曲線の極小で決定し、アラビア数字で画分を区別する。アミロースが含まれないことから、Fr. 1 は SCL であり、次にアミロペクチン長鎖 (Fr. 2) 及び短鎖 (Fr. 3) が溶出する。そして、澱粉 (図4B「○」) の溶出曲線を重ね合わせ、同じ極小境界で区切った Fr. 1 には、アミロース及び SCL が含まれるので、精製アミロペクチン溶出曲線で求め

た SCL を差し引くと、真のアミロース含量が求まる。画分境界の考え方が異なるので、澱粉試料、精製アミロペクチン試料で見かけのアミロース含量が異なる点には注意が必要である。

日本で栽培されている米として、2006年に(独)農業・食品産業技術総合研究機構 作物研究所及び5ヶ所の農業研究センターでプロジェクト研究「低コストで質の良い加工・業務用農作物の安定供給技術の開発」のために栽培された試料米80点、2006年に北海道で栽培された雪の穂、2005年三重県産コシヒカリ(市販品)を加えた計82点(N=82)の米について、その性質を調べた。表1には、精白米から調製した澱粉について、ヨウ素呈色法で得られた最大吸収波長(λ_{\max})、680 nmにおける吸光度(青価, blue value: B.V.)と、酵素・クロマト法で得られた見かけのアミロース含量(Fr. I)とを示した²⁵⁾。 λ_{\max} と見かけのアミロース含量との間には、相関係数0.962の非常に高い正の相関関係が認められたことから(図5)、 λ_{\max} の値に基づいて、もち米、低アミロース米、中アミロース米、高アミロース米に分類し、それぞれの見かけのアミロース含量の平均を算出したところ、もち米で $0.0 \pm 0.0\%$ (N=12)、低アミロース米で $9.2 \pm 2.7\%$ (N=25)、中アミロース米で $18.3 \pm 3.3\%$ (N=41)、高アミロース米で $28.0 \pm 1.1\%$ (N=4)となった(表1)。世界で栽培されている米の見かけのアミロース含量は0~約33%であるのに対して²⁶⁾、日本で栽培されている米の見かけのアミロース含量は、0~29%と大差ないことが分かる。つまり、日本で栽培されている米の見かけのアミロース含量はバラエティーに富んでいるといえる。これは、アミロース含量が米の食味に大きな影響を及ぼすという研究結果が多数報告されたことを受け、新形質米育種においてアミロース含量の改変を積極的に行った成果といえる²⁷⁻²⁹⁾。

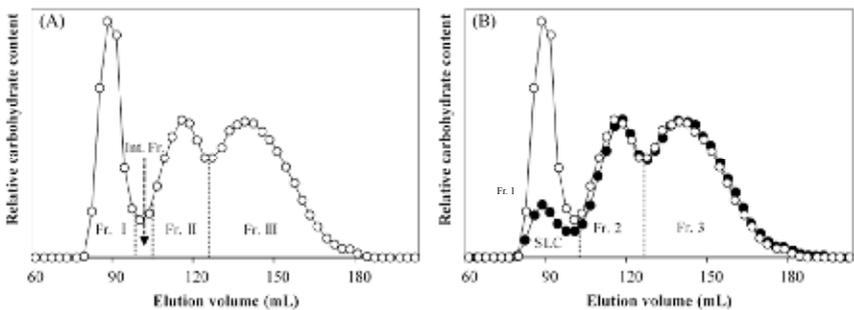


図4 ゲル濾過溶出曲線²⁵⁾

(A) は枝切りした澱粉の溶出曲線(○)。(B) は枝切りした澱粉(○)、枝切りした精製アミロペクチン(●)の各溶出曲線。見かけのアミロース含量は、真のアミロース含量とSLC含量との合計。

同じ試料米を用いて、炊飯米及び炊飯米を5℃で24時間保存した冷飯を調製し、その硬さを、硬さ・粘り計（RHS1A, (株) サタケ）を用いて、越智ら³⁰⁾の方法により測定した(図6)。炊飯米, 冷飯共に, 見かけのアミロース含量 (Fr. I) が高い程, 硬い。また, アミロース含量が高い米程, 冷飯が硬い傾向があることから, アミロース含量が高い米程, 老化が速いといえる。

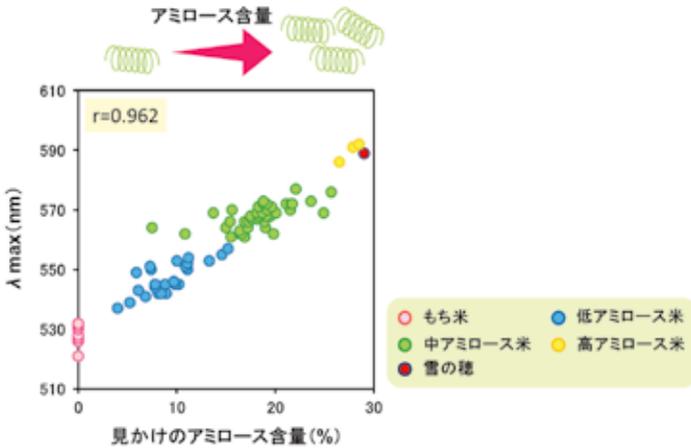


図5 日本で栽培されている米のアミロース含量とヨウ素呈色法におけるλ max 値との相関 (文献²⁵⁾より作図)

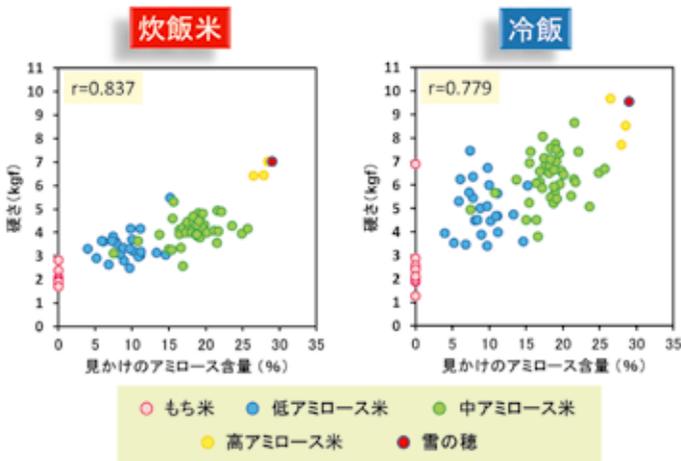


図6 炊飯米及び冷飯の硬さと見かけのアミロース含量との関係²⁵⁾

表1 日本で栽培されている米のアミロース含量 (文献²⁵⁾より抜粋)

I. もち米

No.	試料名	栽培地	ヨウ素・澱粉複合体吸収曲線			Fr. I (%)
			λ_{\max} (nm)	B.V.	n	
1	ヒヨクモチ	福岡	520 ± 0	0.05 ± 0.00	6	0.0
2	泉1280	福岡	521 ± 0	0.07 ± 0.00	6	0.0
3	はくちょうもち	北海道	526 ± 0	0.07 ± 0.00	6	0.0
4	奥羽紫糯389号	秋田	526 ± 1	0.07 ± 0.00	6	0.0
5	モチミノリ	茨城	527 ± 1	0.06 ± 0.00	6	0.0
6	北陸糯197号	新潟	527 ± 0	0.09 ± 0.00	6	0.0
7	紅染めもち	福岡	528 ± 0	0.07 ± 0.00	6	0.0
8	めばえもち	新潟	530 ± 0	0.08 ± 0.01	6	0.0
9	北陸糯199号	新潟	531 ± 0	0.08 ± 0.01	6	0.0
10	北陸糯210号	新潟	532 ± 0	0.07 ± 0.00	6	0.0
11	朝紫	秋田	532 ± 1	0.08 ± 0.01	6	0.0
12	ヒメノモチ	新潟	532 ± 1	0.08 ± 0.00	6	0.0
平均			528 ± 4	0.07 ± 0.01	6	0.0 ± 0.0

II. 低アミロース米

No.	試料名	栽培地	ヨウ素・澱粉複合体吸収曲線			Fr. I (%)
			λ_{\max} (nm)	B.V.	n	
1	スノーパール	秋田	537 ± 0	0.11 ± 0.00	6	4.0
2	シルキーパール	秋田	539 ± 1	0.12 ± 0.00	6	5.2
3	西海257号	福岡	541 ± 1	0.10 ± 0.01	6	6.8
4	札系05062	北海道	542 ± 1	0.13 ± 0.00	6	8.1
5	札系050624	北海道	542 ± 1	0.13 ± 0.00	6	8.4
6	はなえまき	北海道	542 ± 0	0.13 ± 0.00	6	8.9
7	LGCソフト	広島	543 ± 1	0.11 ± 0.00	6	6.1
8	ミルキータイン	茨城	544 ± 1	0.14 ± 0.00	6	7.8
9	札系05063	北海道	545 ± 1	0.14 ± 0.00	6	8.8
10	札系04036	北海道	545 ± 1	0.15 ± 0.00	6	9.8
11	中国192号	広島	545 ± 0	0.16 ± 0.00	6	7.8
12	札系03038-1	北海道	545 ± 1	0.16 ± 0.02	6	10.2
13	札系05060	北海道	546 ± 1	0.14 ± 0.00	6	9.7
14	朝つゆ	新潟	546 ± 1	0.15 ± 0.00	6	9.7
15	関東224号	茨城	549 ± 1	0.11 ± 0.01	6	5.9
16	中国191号	広島	550 ± 1	0.13 ± 0.01	6	7.4
17	札系05058	北海道	550 ± 1	0.15 ± 0.00	6	11.1
18	関東229号	茨城	551 ± 1	0.13 ± 0.01	6	7.3
19	札系05055	北海道	551 ± 1	0.16 ± 0.00	6	10.9
20	関東230号	茨城	552 ± 1	0.12 ± 0.01	6	11.1
21	中系特80	広島	553 ± 1	0.15 ± 0.02	6	10.0
22	ソフト158	新潟	553 ± 0	0.16 ± 0.00	6	13.3
23	おぼろづき	北海道	554 ± 0	0.17 ± 0.00	6	11.2
24	北海306号	北海道	555 ± 1	0.18 ± 0.00	6	14.6
25	泉1274	熊本	557 ± 0	0.20 ± 0.01	6	15.2
平均			547 ± 5	0.14 ± 0.02	6	9.2 ± 2.7

Ⅲ. 中アミロース米

No.	試料名	栽培地	ヨウ素・澱粉複合体吸収曲線			Fr. I (%)
			λ_{\max} (nm)	B.V.	n	
1	札系05051	北海道	561 ± 0	0.20 ± 0.00	6	16.9
2	泉1273	福岡	561 ± 0	0.21 ± 0.01	6	15.5
3	柔小町	福岡	562 ± 0	0.18 ± 0.01	6	16.6
4	札系03043-1	北海道	562 ± 0	0.21 ± 0.00	6	10.8
5	北海300号	北海道	562 ± 0	0.21 ± 0.00	6	16.4
6	泉1272	福岡	562 ± 0	0.25 ± 0.01	6	19.8
7	あきたこまち	秋田	563 ± 1	0.23 ± 0.00	6	16.4
8	札系03044-1	北海道	564 ± 1	0.21 ± 0.01	6	7.5
9	西海黄256号	福岡	564 ± 0	0.21 ± 0.01	6	19.0
10	北海302号	北海道	564 ± 0	0.22 ± 0.00	6	15.0
11	コシヒカリ	福岡	564 ± 0	0.22 ± 0.01	6	17.2
12	泉1277	福岡	566 ± 0	0.21 ± 0.01	6	18.9
13	北海303号	北海道	566 ± 0	0.22 ± 0.00	6	15.4
14	北陸166号	新潟	566 ± 0	0.23 ± 0.01	6	16.9
15	コシヒカリ (市販品)	三重	566 ± 1	0.24 ± 0.00	6	17.3
16	コシヒカリ	茨城	567 ± 0	0.24 ± 0.01	6	17.6
17	日本晴	福岡	567 ± 0	0.24 ± 0.00	6	18.2
18	中国酒185号	広島	568 ± 0	0.21 ± 0.01	6	17.5
19	泉1276	福岡	568 ± 0	0.22 ± 0.01	6	18.3
20	キヌヒカリ	福岡	568 ± 0	0.22 ± 0.01	6	19.1
21	コシヒカリ	新潟	568 ± 0	0.25 ± 0.01	6	19.5
22	泉1279	福岡	569 ± 0	0.21 ± 0.01	6	18.7
23	ほしのゆめ	北海道	569 ± 1	0.24 ± 0.00	6	24.9
24	きらら397	北海道	569 ± 0	0.25 ± 0.00	6	13.7
25	札系04015	北海道	569 ± 1	0.25 ± 0.00	6	18.1
26	札系04033	北海道	569 ± 0	0.26 ± 0.04	6	20.1
27	ヒノヒカリ	福岡	570 ± 0	0.22 ± 0.01	6	19.2
28	札系05047	北海道	570 ± 1	0.24 ± 0.00	6	21.5
29	日本晴	茨城	570 ± 0	0.28 ± 0.01	6	15.6
30	キヌヒカリ	新潟	571 ± 1	0.22 ± 0.02	6	18.3
31	北海293号	北海道	571 ± 0	0.25 ± 0.01	6	19.6
32	北陸赤212号	新潟	571 ± 0	0.27 ± 0.00	6	18.3
33	中国183号	広島	572 ± 0	0.23 ± 0.01	6	21.7
34	日本晴	広島	572 ± 1	0.24 ± 0.00	6	19.1
35	北海307号	北海道	572 ± 0	0.25 ± 0.01	6	21.1
36	札系04032	北海道	572 ± 1	0.26 ± 0.00	6	18.8
37	春陽	新潟	572 ± 1	0.28 ± 0.01	6	21.6
38	ヒノヒカリ	広島	573 ± 1	0.21 ± 0.01	6	18.8
39	あゆのひかり	新潟	573 ± 1	0.22 ± 0.01	6	23.6
40	北海299号	北海道	576 ± 0	0.26 ± 0.01	6	25.7
41	初雫	北海道	577 ± 1	0.26 ± 0.02	6	22.1
平均			568 ± 4	0.23 ± 0.02	6	18.3 ± 3.3

IV. 高アミロース米

No.	試料名	栽培地	ヨウ素・澱粉複合体吸収曲線			Fr. I (%)
			λ_{\max} (nm)	B.V.	n	
1	ベニロマン	熊本	586 ± 0	0.33 ± 0.01	6	26.5
2	雪の穂	北海道	589 ± 1	0.36 ± 0.00	6	29.0
3	ホシユタカ	熊本	591 ± 0	0.35 ± 0.01	6	27.9
4	夢十色	茨城	592 ± 0	0.37 ± 0.00	6	28.5
平均			590 ± 3	0.35 ± 0.02	6	28.0 ± 1.1

3) アミロペクチンの鎖長分布

米の食味には、アミロース含量が大きく影響を及ぼすことが古くから知られていたが、澱粉の大半を占めるアミロペクチンの構造も食味に関与することが、近年の研究によって明らかとなってきた³¹⁻³⁴⁾。アミロペクチンの構造については、古く19世紀後半、A. Meyerにより研究が始まり、Staudingerの櫛型モデル、Haworthの薄層型モデル、Meyerの樹枝状モデル、二國、Frenchらの房状モデル等が提唱されてきたが、現在のところ房状モデルが最も妥当なものとして受け入れられている^{35, 36)}。また、前述の通り、うるち米のアミロペクチンには、SLCが存在するが、もち米には存在しないことが明らかにされている²⁴⁾。アミロペクチンの単位鎖長分布は、澱粉もしくはアミロペクチンをイソアミラーゼで完全に枝切りして、生じた単位鎖の重合度分布をゲル濾過クロマトグラフィー或いはパルス電流検出器を用いる高性能陰イオン交換クロマトグラフィーにより測定する方法、枝切りした単位鎖を蛍光標識し、キャピラリー電気泳動法によって測定する方法がある³⁷⁾。

Nakamuraら^{38, 39)}は、キャピラリー電気泳動法を用いて、日本を含むアジアで栽培された水稻うるち米及びもち米のアミロペクチン側鎖長を測定し、その短鎖及び中鎖（グルコース重合度：DP ≤ 24）に対する短鎖（DP ≤ 10）の割合を amylopectin chain ratio (ACR) として算出した。アジアで栽培された米の大半は ACR の低い ($0.150 < \text{ACR} < 0.200$) L 型のアミロペクチンを持つ米と、ACR の高い ($0.240 < \text{ACR} < 0.290$) S 型のアミロペクチンを持つ米との2つのタイプに分類されることが報告されている³⁸⁾。また、日本で栽培された米は、全て S 型 ($0.240 < \text{ACR} < 0.287$) でアミロペクチン側鎖が短いこと、アミロペクチン側鎖が長くなる程、糊化温度が高くなること等が明らかにされている³⁸⁾。Horibataら⁴⁰⁾もアミロペクチン側鎖長と糊化温度との間には正の相関関係があることを報告している。そこで、我々は、おおよそのアミロペクチン側鎖長を知るために、示差走査型熱量計 (DSC) を用いる簡易法⁴⁰⁾で、日本で栽培されている米の糊化温度測定を行った。すると、日本で栽培されている米の糊化温度（糊化ピーク温度）は、54～74℃の範囲に分布し、特に62～72℃の範囲に集中していることが分かった（図7）。つまり、Nakamuraらの報告^{38, 39)}にも

あるように、日本で栽培されている米のアミロペクチンの側鎖長は短く、バラエティーに乏しいといえる。

炊飯米及び冷飯について、その硬さと糊化温度との関係を調べた結果を図8に示す。炊飯米、冷飯共に硬さと糊化温度との間に相関関係は無いが、冷飯の硬さは、アミロース含量が近い米においては、糊化温度が高い程、つまりアミロペク

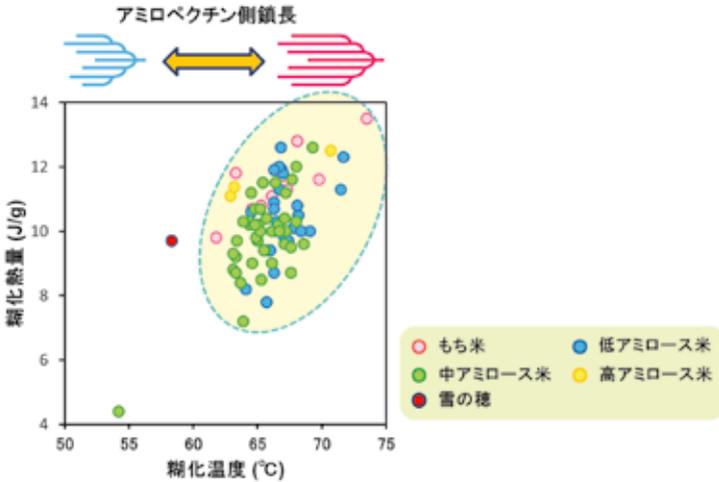


図7 糊化温度（ピーク温度）の分布²⁵⁾

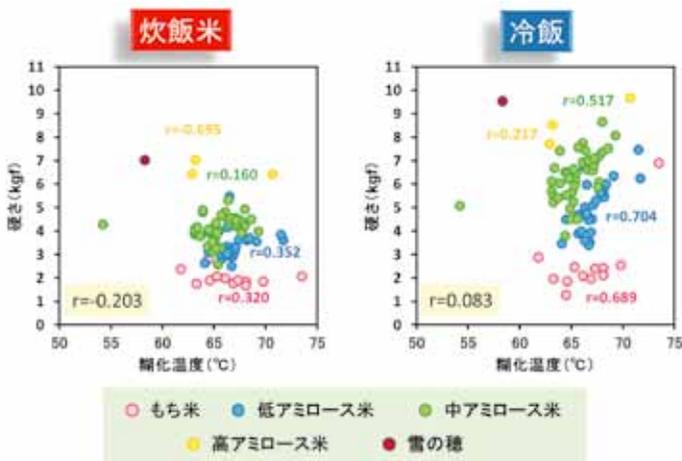


図8 炊飯米及び冷飯の硬さと糊化温度（ピーク温度）との関係²⁵⁾

チン側鎖が長くなる程、硬くなる傾向が見られた。高アミロース米については、日本で得られる試料数が少ないためか、特段の傾向は認められなかった。また、Okamoto⁴¹⁾らは、餅の硬化速度と品種間差について、アミロペクチン側鎖が短い品種は餅の硬化速度が遅く、長い品種は速いことを報告している。もち米菓製造では、軟らかくて粘る餅を切断する必要があるため、餅を冷蔵庫に1～3日間入れて冷却し、切断できる程度にまで硬化させる。この工程には長時間を要するために、生産性に深く関係することから、餅の硬化速度は非常に重要である⁴²⁾。つまり、うるち米ももち米も、バラエティーに富んだアミロペクチン側鎖長の品種を開発して利用することで、老化の程度をより厳密に制御することが可能になると期待される。

4) SLC 含量

SLCは、アミロペクチンに結合した側鎖であるが、アミロース様の性質を示す。すなわち、DP300～500程度の非常に長い直鎖であり、ヨウ素と結合して呈色する⁴³⁾。前述の通り、白飯の食味及び物性には、アミロース及びアミロペクチンの分子構造が大きく関与しているが、SLCもまた白飯の食味に影響を及ぼす。水上ら³⁴⁾は、SLC含量と米飯の硬さとの間に高い正の相関があり、SLCが多い程硬い米飯となる傾向があることを報告した。また、白飯の付着性は、SLCが多くなると低下するが、SLC含量が1%までは急激に低下し、それ以上では緩やかに低下することを示した。SLC含量の分析は、澱粉と精製アミロペクチンとをそれぞれ枝切りし、ゲル濾過クロマトグラフィーを用いて行う方法があるが、回転粘度計の一種であるRapid Visco Analyser (RVA)を用いて推算する方法もある⁴⁰⁾。RVA測定で得られるセットバック値(最終粘度-最低粘度)とSLC含量との間には、高い正の相関関係が認められることから、おおよそのSLC含量を知る方法として、RVA測定は有用である。日本で栽培されている米のSLC含量を推定するために、RVA測定を行った結果を図9に示す。縦軸のブレークダウン(ピーク粘度-最低粘度)は、良食味米の指標であり⁴⁴⁾、値が高くなるほど良食味と言われている。日本で栽培されている米のセットバック値は、35～340RVUであった。Horibataら⁴⁰⁾の方法に基づいて、セットバック値からSLC含量を推算したところ、1品種で12%以上、3品種で3～12%の値が得られ、これらの品種はいずれも高アミロース米であった。また、高アミロース米を除く78品種のSLC含量は、3%以下であった。この結果から、日本で栽培されている米のSLC含量も、アミロペクチンの側鎖長と同様に、バラエティーが無いといえる。

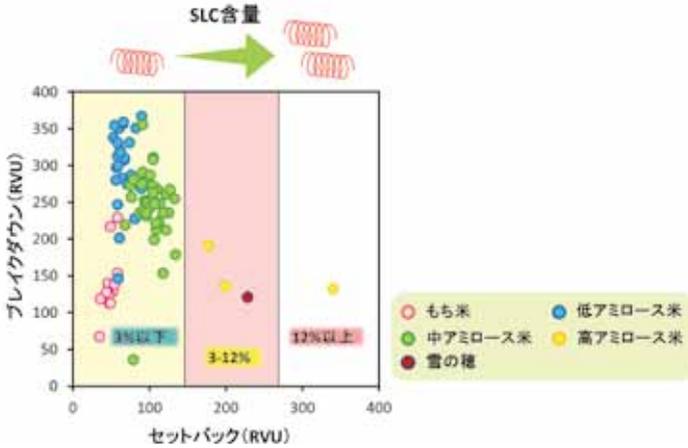


図9 RVA 測定値からの SLC 含量推算

5) まとめ

日本で栽培されている米の見かけのアミロース含量は、0～29%に分布し、世界で栽培されている米のアミロース含量分布（0～約33%）と大差無く、バラエティーに富んでいる。しかし、アミロペクチンの側鎖長については、世界で栽培されている米ではアミロペクチンの側鎖が短いS型及び長いL型が存在しているのに対して、日本で栽培されている米のアミロペクチンは、S型のみと多様性に乏しい。更に、SLC含量についても、大半の米が3%以下に偏っている。これまでは、米の食味に大きな影響を及ぼすという報告が多数あるアミロース含量に基づいて、様々な新形質米が育成されてきたが、アミロペクチンと食味との関係も解明されつつあることから、今後は、アミロペクチンの構造特性にも注目した新形質米が多数育成され、日本人の多様化したニーズに応えられる米の誕生が望まれる。

4. 高アミロース米「雪の穂」の活用事例

雪の穂は、2000年に北海道勇払郡むかわ町にある穂別ヘルシーフード農業センターにおいて、低アミロース米である「彩」の突然変異米として発見され、2009年に品種登録されたジャポニカの短粒米である（品種登録番号 第18121号）。雪の穂は、脱粒し易く、玄米が腹白で芒が稀短、穂長及び稈長がやや長い。その他の特徴は種子親である彩に類似していることから、自然条件下で生じた彩の突然変異体とみなされた。雪の穂の澱粉構造について調べたところ、雪の穂は高アミロース米（Fr. I：29.0%）で、しかも、アミロペクチンクラスターを構成する側鎖が日本で栽培されている米の中でも極めて短い品種であることが

分かった。また、SLC 含量がコシヒカリ (2.3%)、ホシユタカ (6.3%) よりも高く 8.6% で、独特な澱粉構造をしていることが分かった²⁵⁾。海野ら⁴⁵⁾ は、この雪の穂を育成し、健康成人を対象とした単回摂取試験及び耐糖能障害者を対象とした食事負荷試験を実施し、雪の穂の米飯が、低 GI (GI=40) であること、コシヒカリの米飯 (GI=80) に比べて食後血糖値の上昇が有意に低く、インスリン分泌が抑制されることを明らかにした。また、耐糖能障害者を対象とした長期摂取試験においても、HbA1c (ヘモグロビン A1c; 過去 1~2 ヶ月間の平均的な血糖レベルを示す。食事の影響を受けない。) 及び 1, 5-AG (1, 5-アンヒドロ-D-グルシトール; 血糖の上昇を速やかに反映する。) が有意に改善され、血糖の是正に寄与する可能性を示した⁴⁶⁾。更に、経口血糖降下薬を使用している 2 型糖尿病患者を対象にした食後血糖に関する試験を行い、経口血糖降下薬であるスルホニル尿素薬単独あるいは併用の 2 型糖尿病患者においては、コシヒカリ米飯群よりも雪の穂米飯群の方が食後血糖の上昇が有意に小さく、食後血糖の是正に有用であること、また、 α -グルコシダーゼ阻害薬単独あるいは併用の 2 型糖尿病患者においては、雪の穂米飯群の方がインスリン分泌の抑制効果があることを明らかにした⁴⁷⁾。これらの結果を踏まえ、雪の穂は、糖尿病の食事療法の主食として有益であると考えられ、パックご飯として市販されるに至っている (図 10)。糖尿病の治療は長期間に及ぶことが多いため、煩わしい計量、米中心の日本型食生活の変更を、糖尿病患者に強いることなく食事療法を行うことが望まれている。今後益々、雪の穂のような機能性を持つ米が普及し、国民の生活の質を高めることが期待される。



図 10 高アミロース米「雪の穂」の市販パックごはん

謝辞

本研究は、筆者が福山大学生命工学部在勤当時、(独) 農業・食品産業技術総合研究機構(当時)とのプロジェクト研究「低コストで質の良い加工・業務用農作物の安定供給技術の開発」及び(株)三和化学研究所との共同研究において実施した成果を纏めたものである。

長きに渡りご指導を賜った井ノ内直良先生(福山大学生命工学部教授)、並びに、試料をご供与頂いた関係各位・各所に厚く御礼申し上げます。

(食品加工流通研究領域 食品品質評価制御ユニット 中浦 嘉子)

引用文献

- 1) 櫛淵欽也監修：美味しい米 第1巻 世界の米と日本の米(社)農林水産技術情報協会 p.2-3
- 2) 加藤茂苞, 丸山吉晴：稲の異なる種類間に於ける類縁関係の血清学的研究. 九大農学部学芸雑誌, **3**, 16-29 (1930).
- 3) 石谷孝佑編：米の事典 - 稲作からゲノムまで - 幸書房 p.96
- 4) 農林水産省：食糧需給表. <http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/fbs/> (取得日：2016年10月3日)
- 5) お米と食生活に関するアンケート NTT レゾナント(株) <http://research.nttcoms.com/database/data/001277/> (取得日 2016年10月3日)
- 6) 櫛淵欽也監修：美味しい米 第2巻 世界の米と日本の米(社)農林水産技術情報協会 p.32
- 7) 櫛淵欽也監修：美味しい米 第2巻 世界の米と日本の米(社)農林水産技術情報協会 p.2
- 8) 花城勲, 太田健介, 竹田千重乃, 水上浩之, 竹田靖史：炊飯時に溶出する澱粉成分の構造と米飯の付着性. 応用糖質科学, **51**, 349-354 (2004).
- 9) 高見幸司, 中浦嘉子, 堀端哲也, 郡山剛, 井ノ内直良：新形質米の米飯物性と胚乳澱粉の性質との関係. 応用糖質科学, **51**, 355-362 (2004).
- 10) 公益社団法人 米穀安定供給確保支援機構：平成27年産水稻の品種別作付動向について. <http://www.komenet.jp/pdf/H27sakutuke.pdf> (取得日：2016年10月3日)
- 11) 横尾政雄, 平尾正之, 今井徹：1956年～2000年の作付面積からみた稲の主要品種の変遷 作物研究所研究報告, **7**, 19-125 (2005).
- 12) 櫛淵欽也監修：美味しい米 第2巻 世界の米と日本の米(社)農林水産技術情報協会 p. 38
- 13) S. Hizukuri, Y. Takeda, N. Maruta and B. O. Juliano: Molecular structures of rice starch. *Carbohydr. Res.*, **189**, 227-235 (1989).

- 14) S. Ball, H. P. Guan, M. James, A. Myers, P. Keeling, G. Mouille, A. Buleon, P. Colonna and J. Preiss: From glycogen to amylopectin; A model for the biogenesis of the plant starch granule. *Cell*, **86**, 349-352 (1996).
- 15) A. Buleon, P. Colonna, V. Planchot and S. Ball: Starch granules; structure and biosynthesis. *Int. J. Bio. Macromol.*, **23**, 85-112 (1998).
- 16) C. P. Villareal and B. O. Juliano: Waxy gene factor and residual protein of rice starch granules. *Starch/Stärke*, **38**, 118-119 (1986).
- 17) S. Ball: Recent views on the biosynthesis of the plant starch granule. *Trends Glycosci. Glycotechnol.*, **37**, 405-415 (1995).
- 18) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株) 朝倉書店 p.10
- 19) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株) 朝倉書店 p.29
- 20) 櫛渕欽也監修: 美味しい米 第1巻 世界の米と日本の米 (社) 農林水産技術情報協会 p.193
- 21) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株) 朝倉書店 p.62
- 22) 不破英次, 小巻利章, 檜作進, 貝沼圭二編集: 澱粉科学の事典 朝倉書店 p.158-159
- 23) N. Inouchi, K. Nishi, S. Tanaka, M. Asai, Y. Kawase, Y. Hata, Y. Konishi, S. Yue and H. Fuwa: Characterization of amaranth and quinoa starches. *J. Appl. Glycosci.*, **46**, 233-240 (1999).
- 24) S. Hizukuri: Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and the crystalline structure of starch granules. *Carbohydr. Res.*, **141**, 295-306 (1985).
- 25) 中浦嘉子, 中尾恵子, 高木龍一郎, 海野良一, 林靖久, 井ノ内直良: 高アミロース米「雪の穂」の胚乳澱粉の性質と米飯物性. *応用糖質科学*, **1**, 86-94 (2011).
- 26) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株) 朝倉書店 p.187
- 27) 石谷孝佑編: 米の事典 - 稲作からゲノムまで - 幸書房 p.90
- 28) B. S. Rao, A. R. V. Murthy, and R. S. Subrahmanya: The amylose and the amylopectin contents of rice and their influence on the cooking quality of the cereal. *Proc. Indian Acad. Sci.*, **36**, 70-80 (1952).
- 29) B. O. Juliano, L. U. Onate, and A. M. Mundo: Relation of starch composition, protein content and gelatinization temperature to cooking and eating qualities of milled rice. *Food Technol.*, **19**, 1006-1011 (1965).
- 30) 越智龍彦, 川上晃司, 三上隆司, 福森 武: 「硬さ・粘り計」による炊飯米物性の判定. *美味技術研究会誌*, **6**, 6-16 (2005).
- 31) 高橋節子, 杉浦智子, 内藤文子, 渋谷直人, 貝沼圭二: 新形質米の調理・加工適性に関する研究 (第2報) 米の食味と米澱粉の構造. *応用糖質科学*, **45**,

- 99-106 (1998).
- 32) T. Umemoto, T. Horibata, N. Aoki, M. Hiratsuka, M. Yano and N. Inouchi: Effects of variations in starch synthase on starch properties and eating quality of rice. *Plant Prod. Sci.*, **11**, 472-480 (2008).
- 33) M. Ramesh, S. Z. Ali and K. R. Bhattacharya: Structure of rice starch and its relation to cooked rice texture. *Carbohydr. Polym.*, **38**, 337-347 (1999).
- 34) 水上浩之, 竹田靖史: 新形質米米飯の咀嚼特性と澱粉の分子構造との関係. 応用糖質科学, **47**, 61-65 (2000).
- 35) 貝沼圭二: 澱粉の微細構造. 化学と生物, **13**, 10-18 (1975).
- 36) 不破英次, 小巻利章, 檜作進, 貝沼圭二編集: 澱粉科学の事典 朝倉書店 p.22-24
- 37) 不破英次, 小巻利章, 檜作進, 貝沼圭二編集: 澱粉科学の事典 朝倉書店 p.161
- 38) Y. Nakamura, A. Sakurai, Y. Inaba, K. Kimura, N. Iwasawa and T. Nagamine: The fine structure of amylopectin in endosperm from Asian cultivated rice can be largely classified into two class. *Starch/ Stärke*, **54**, 117-131 (2002).
- 39) Y. Nakamura, A. Sato and B. O. Juliano: Short-chain-length distribution in debranched rice starches differing in gelatinization temperature or cooked rice hardness. *Starch/ Stärke*, **58**, 155-160 (2006).
- 40) T. Horibata, M. Nakamoto, H. Fuwa and N. Inouchi: Structural and physicochemical characteristics of endosperm starches of rice cultivars recently bred in Japan. *J. Appl. Glycosci.*, **51**, 303-313 (2004).
- 41) K. Okamoto, K. Kobayashi, H. Hirasawa and T. Umemoto: Structural Differences in amylopectin affect Waxy rice processing. *Plant Prod. Sci.*, **5**, 45-50 (2002).
- 42) 竹生新治郎監修, 大坪研一, 石谷孝佑編: 米の科学 (株)朝倉書店 p.147
- 43) Y. Takeda, S. Hizukuri and B. O. Juliano: Structures of rice amylopectins with low and high affinity for iodine. *Carbohydr. Res.*, **168**, 79-88 (1987)
- 44) 谷達雄, 吉川誠次, 竹生新治郎, 堀内久弥, 遠藤勲, 柳瀬肇: 米の食味評価に関係する理化学的要因 (I). 栄養と食糧, **22**, 452-461 (1969).
- 45) 海野良一, 林靖久, 高木龍一郎, 高野和彦, 鎌田等, 河盛隆造: 健康成人における高アミロース米品種「雪の穂」米飯摂取時の食後血糖およびインスリン分泌に及ぼす影響. 日本病態栄養学会誌, **15**, 167-173 (2012).
- 46) 海野良一, 林靖久, 高木龍一郎, 高野和彦, 鎌田等, 河盛隆造: 耐糖能障害者における高アミロース米品種「雪の穂」米飯の長期摂取による血糖プロファイルの改善効果. 日本病態栄養学会誌, **18**, 375-385 (2015).

- 47) 海野良一, 林靖久, 高木龍一郎, 高野和彦, 白田俊二, 中畑元伸, 伊藤克礼, 河盛隆造: 薬物療法中の2型糖尿病患者における高アミロース米品種「雪の穂」米飯の食後血糖およびインスリン分泌に及ぼす影響. 日本病態栄養学会誌, **19**, 111-120 (2016).

