酒造原料米のデンプン分子構造と 酒造適性

酒造原料米の最大成分であるデンプンの性質が清酒醸造にどのような影響を与えるのか興味深い課題である。デンプンはアミロースとアミロペクチンにより構成される。近年、本解説にも紹介されているデンプン変異体米を用いた研究により、米デンプンの詳細な分子構造とその生成機構が解明されつつある。今回は、著者の最近の研究成果からデンプン分子構造と蒸し米の酵素消化性、蒸米のデンプンの老化特性、さらにイネ登熟期気温が米デンプンの分子構造に及ぼす影響と幅広く解説していただいた。品種や気象条件による酒造原料米の性質の違いを理解する上で参考になるものと思う。

奥 田 将 生

1. はじめに

清酒醸造では、糖化と発酵が同時に進行するため、発酵の管理においてはアルコール発酵とともに米の溶解が重要である。特に、米の溶解の程度は、原料利用率を左右し、その結果として酒の品質面では味の濃淡に大きく影響する。

米の溶解性に関わる因子は、多くの報告があり、タンパク質含量、米粒の組織構造、デンプンの性質などが関係するとされている。中でもデンプンについては、白米の最大成分であり古くから酒造適性との関連について興味もたれ、これまでにアミロース含量の低い米の酵素消化性が良いこと、アミロペクチンの側鎖構造と酵素消化性が相関を示すことなどが報告されている¹⁻³⁾。しかしながら、アミロースとアミロペクチンの2成分について同時に組成・構造を解析し、醸造適性との関連性を検討した報告はなく、デンプンの組成・分子構造と酵素消化性との関係は明確でなかった。

そこで、我々は、アミロースとアミロペクチンを精製し、米デンプンの組成及び分子構造の詳細な解析を行い、蒸米の酵素消化性との関連性について検討を行った。その結果、米デンプンの組成や構造に原因する蒸米中のデンプンの老化特性が蒸米の消化性に影響を

及ぼすこと、イネ登熟期気温がデンプン構造を変化させ酒造適性に影響を及ぼすことなどの知見を得たので、本稿で紹介したい。

2. 米の胚乳貯蔵デンプン

米を含む植物の貯蔵デンプンは、食品産業上での利用あるいは学術的な方面において古くから興味をもたれ、高次構造の解明に向けての取組がさかんに行われてきた。巨大分子ゆえに解析が困難で、その高次構造は完全に明らかにされていないが、近年分析手法の進歩により詳細な情報が得られるようになり、分子構造や生合成について活発に研究が進められている。

詳細は他の成書⁴⁾を参照して頂くとして、ここでは基本的なデンプン分子構造、糊化・老化特性について述べる。

(1) 構造

米デンプンはアミロースとアミロペクチンで構成される（粳米でアミロース：アミロペクチン≒20%：80%、糯米はアミロペクチン≒100%）（第1図）。アミロースは直鎖状分子で、平均分子量が 10^6 である。アミロペクチンは枝分かれの多い分子で、平均分子量が $10^7 \sim 10^8$ である。

デンプンの直鎖部分は、グルコースが α 1-4 結合で

アミロペクチン (70-80% 房状)

アミロース (20-30% 直鎖状)

第1図 アミロペクチンとアミロースの構造

第2図 イソアミラーゼによる枝切り反応後のゲルろ過クロマトグラム

FI: アミロース画分, FIIa: アミロペクチンの長鎖画分, FIIb: アミロペクチンの短鎖+中間鎖画分

連なったもので、分岐は直鎖の途中からグルコースの α 1-6結合による。アミロースはほとんど分岐を持たないが、アミロペクチンは、平均でグルコース残基約25個に1個の割合で α 1-6結合による分枝構造をもつ（直鎖部分の長さは平均で18~24残基、分岐間は5~8残基の間隔がある）。種、品種、栽培環境などの要因によりその組成や構造が多様性を示し、(2)に述べるデンプンの糊化・老化特性に大きな影響を及ぼす。

これら構造の決定には、イソアミラーゼにより α 1-6結合を分解しゲルろ過HPLCを行ない分子量分布を測定する方法（第2図：アミロース・アミロペクチン長鎖・短鎖の分画）やHPAEC-PAD法によるアミロペクチン側鎖長分布の測定、非/還元末端基の定量による分岐度、平均重合度の測定が、解析手段として用いられる。

(2) 糊化・老化特性

生デンプンを水の存在下で加熱すると、デンプンが

吸水、膨潤し、消化酵素の作用を受けやすくなる。これをデンプンの糊化という。糊化デンプンを低温下で長時間放置すると、結晶性が回復する。この現象をデンプンの老化という。老化したデンプンは結晶性が回復し水に溶けにくく、消化酵素の作用を受けにくくなる。デンプンの糊化・老化特性は、組成・構造と密接に関連する。特に老化は、アミロース含量、アミロース分岐度、アミロペクチン側鎖構造によって、影響を受けるとされている。

これら特性の解析手段として、示差走査熱量計(DSC: Differential Scanning Calorimetry)による糊化・老化特性、ラピッドビスコアナライザー(RVA: Rapid Visco Analyzer)による粘度特性の分析などが用いられる。

3. デンプン構造と蒸し米の酵素消化性

2で述べたように、デンプンは糊化後低温環境下で長時間経過すると老化する性質を持つことから、低温環境下で長期間発酵させる清酒醸造の工程では、蒸しによって完全に糊化された白米中のデンプンは時間の経過に伴い老化が進むと考えられた。また、白米の大半をデンプンが占めるので、蒸米の酵素消化性はデンプンの老化の影響を受け、さらに、デンプンの老化速度はデンプンの組成・分子構造に左右されるので、最終的に蒸米の酵素消化性は、デンプンの分子構造に強く影響されると考えられた。

しかし、そのような観点から研究が行われてきたにも関わらず、過去の報告⁵⁾では酒造工程でのデンプンの老化はほとんど生じていないとされ、デンプンと酒造適性との関連は明確でなかった。

これまで、デンプンの研究が進まなかったのは、デンプン特性の差が小さな試料を用いて研究されてきたこと、アミロースとアミロペクチンを精製して2成分を同時に詳細な構造解析と酒造適性との関連付けを行

っていないこと、デンプンの老化について当時の分析手法では微妙なデンプンの老化を検知できなかったこと、などの理由が考えられた。

我々は、デンプン構造の差が大きい変異体米を入手し、アミロースとアミロペクチンを精製してその構造を詳細に解析し、デンプン構造と蒸米の酵素消化性との関連性について検討を開始した。

3-1 デンプン変異体を用いた解析⁶⁾

九州大学では、N-メチル-N-ニトロソウレア (MNU) 処理によって様々な米胚乳貯蔵デンプン変異体が生産されている。これらは親品種と比較してデンプン特性が大きく異なっており、アミロースとアミロペクチンの比率や、アミロペクチンの分子構造が変化したものが、多数得られている。そこで、デンプンの分子構造と蒸米の酵素消化性との関係を明確化するため、これらの胚乳デンプン変異体5種類とその親品種2種類、低アミロース米1種類（第1表）を、実験

材料に用い、アミロースとアミロペクチンを精製し、その組成・分子構造を解析し、蒸米の酵素消化性との関連性について検討した。

(1) 化学成分値とデンプン組成・分子構造

第2表に、8試料の70%白米の化学成分値（デンプン価、タンパク質含量）と精製したデンプン、アミロペクチン、アミロースの組成、分子構造を示した。デンプン価は、台中65、ミルキークィーンが高く（94.1、93.5）、EM5が低かった（84.2）。タンパク質含量は、台中65、EM12で低く（4.6、5.4）、EM5が高かった（9.1）。アミロース含量（FI）は、EM12、ミルキークィーンが低く（4.4%、8.4%）、EM790が高かった（26.7%）。アミロペクチンの短鎖割合のFIIb'・アミロペクチンの短鎖と長鎖の比率（FIIb'/FIIa'）は、ともにEM5が一番大きく（85.5、5.9）、EM10が一番小さかった（55.1、1.2）。アミロペクチンの平均鎖長は、EM790が一番小さく（17.8）、EM10が一番

第1表 使用した変異体の遺伝子型と特徴

	遺伝子型	特 徴
EM 5	<i>sugary1</i>	デンプン枝切り酵素欠損。アミロペクチンの短鎖が増加。
EM 10	<i>amylose extender</i>	デンプン枝作り酵素欠損。アミロペクチンの短鎖が減少。
EM 12	<i>dull 1</i>	GBSS(デンプン粒結合型デンプン合成酵素)活性低下。アミロース含量が減少。
EM 36	<i>floury 2</i>	デンプン枝作り酵素、GBSS等の活性低下。粉質米。
EM 790	変異箇所不明	変異箇所不明。酵素消化性が悪い。
金南風		EM 5, EM 10, EM 12, EM 36, の親品種
台中65号		EM 790 の親品種
ミルキークィーン		低アミロース米

各試料は、精米歩合70%まで搗精し分析に用いた。

第2表 変異体米と親品種の化学成分値とデンプン組成・分子構造

	デンプン 含量 (%/dry)	タンパク質 含量 (%/dry)	アミロース 含量 (FI : %)	アミロペクチン 短鎖割合 (FIIb' : %)	アミロペクチン 短鎖/長鎖比 FIIb'/FIIa'	アミロペクチン 平均鎖長 (C.L.)	アミロース 平均重合度 (DPn)
金南風	92.9±0.7	5.7±0.2	16.8±0.4	75.5±0.3	3.1±0.1	20.6±0.5	1207±30
台中65	94.1±1.1	4.6±0.1	19.3±0.6	76.8±0.5	3.3±0.1	18.3±0.0	1644±165
ミルキークィーン	93.5±0.8	6.0±0.0	8.4±0.2	75.8±0.2	3.1±0.0	19.6±0.2	1124±48
EM 5	84.2±0.3	9.1±0.2	25.9±1.1	85.5±0.5	5.9±0.3	18.3±0.5	905±14
EM 10	89.6±0.4	7.0±0.0	20.7±0.2	55.1±0.2	1.2±0.0	28.2±2.0	1003±53
EM 12	89.6±0.4	5.4±0.0	4.4±0.4	75.3±0.2	3.1±0.0	19.5±0.5	987±26
EM 36	91.3±0.7	6.3±0.0	12.6±0.2	74.4±0.1	2.9±0.0	20.7±0.7	1050±50
EM 790	89.8±1.5	8.5±0.0	26.5±1.1	82.4±0.8	4.7±0.3	17.8±0.2	1455±53

米粉からデンプンを調製した後、アミロペクチン・アミロースを、ブタノール沈殿法により精製した。精製したデンプン・アミロペクチンをイソアミラーゼ処理し、ゲルろ過HPLCにより、アミロース由来のFI、アミロペクチンの長鎖由来のFIIa、アミロペクチンの短鎖+中間鎖由来のFIIbの比率を求めた。アミロペクチン平均鎖長は、迅速ミス分解法、アミロース平均重合度は、改良Park-Johnson法により測定した。

大きかった(28.2)。アミロースのグルコース平均重合度(DPn)は台中65やEM790が高く(1644, 1455), EM5やEM36が低かった(905)。

(2) 蒸米の酵素消化性

第3表に70%白米の蒸米の酵素消化性を示した。酵素消化性は、アミロペクチンの長鎖割合が多いEM10が一番低かった(0.9)。アミロース含量の多

第3表 変異体米と親品種の消化性

	°Brix	デンプンから糖への変換率(%)
金南風	9.8	60.4
台中65	8.8	53.4
ミルキークィーン	11.8	73.5
EM5	5.1	35.8
EM10	0.9	3.8
EM12	12.6	79.9
EM36	9.6	62.0
EM790	6.2	38.3

全国統一酒米分析方法に従い、70%精白米を用い、蒸米を15°Cで3時間気中放置後、15°Cで24時間酵素消化し、生成糖量を測定した。

第4表 酵素消化性との相関係数

	R
デンプン価	0.558
タンパク質含量(%)	-0.555
アミロース含量(FI: %)	-0.763*
アミロペクチン短鎖割合(FIIb': %)	0.466
アミロペクチン短鎖/長鎖比(FIIb'/FIIa')	0.100
アミロペクチン平均鎖長(C.L.)	-0.606
アミロースの平均重合度(DPn)	0.049

いEM5, EM790も低い値を示した(5.1, 6.2)。一方アミロース含量の少ないEM12やミルキークィーンは、高い値を示した(12.6, 11.8)。

第4表に酵素消化性と各分析値との相関係数を示した。酵素消化性は、アミロース含量と有意な負の相関を示した($r=-0.774$)。これは若井らの結果¹⁾と良く一致した。一方、タンパク質含量、デンプン価、アミロースの平均重合度、アミロペクチンの側鎖構造とは、有意な相関はなかった。しかし、アミロペクチンの短鎖の割合が極端に少ないEM10は酵素消化性が顕著に低下しており、アミロース含量だけでなく、アミロペクチンの構造も酵素消化性に影響を及ぼすことが示唆された。

アミロース含量以外に酵素消化性に寄与する因子を探索するために、酵素消化性を目的変数とし、アミロース含量とそれ以外のパラメータを説明変数とした重回帰分析を行った(第5表)。アミロース含量のみを用いた単相関式の R^2 (寄与率)と比較して、アミロペクチンの側鎖構造を表すパラメータを説明変数に取り込むと、寄与率が上昇した(FIIb'/FIIa': $R^2=0.843$, FIIb': $R^2=0.949$, C.L.: $R^2=0.963$)。重回帰式の説明変数の正・負の符号から、アミロース含量が低く、アミロペクチンの短鎖/長鎖比が大きくなると、酵素消化性が高くなることが示された。

(3) 蒸米のデンプンの老化

アミロース含量が高く、アミロペクチンの短鎖/長鎖比が小さいデンプンは老化が早く進むため、これらの結果は消化試験中に生じたデンプンの老化性の差が原因と考えられた。そこで酵素消化性試験と同条件で

第5表 消化性を目的変数に用いた重回帰式

重回帰式	R^2
$Y = -2.35 \times (FI) + 90.39$	0.583*
$Y = -2.235 \times (FI) - 0.844 \times (\text{protein}) + 94.006$	0.584
$Y = -2.080 \times (FI) + 1.084 \times (\text{totalstarch}) - 12.752$	0.595
$Y = -2.08 \times (FI) + 0.03 \times (DPn) + 62.25$	0.659
$Y = -2.05 \times (FI) - 4.53 \times (C.L.) + 183.19$	0.963**
$Y = -2.67 \times (FI) + 1.67 \times (FIIb') - 29.46$	0.949**
$Y = -3.17 \times (FI) + 10.26 \times (FIIb'/FIIa') + 69.13$	0.843**

Y: 酵素消化性, protein: タンパク質含量, total starch: デンプン価, DPn: アミロース平均重合度, FI: アミロース含量, FIIb': アミロペクチン短鎖割合, FIIb'/FIIa': アミロペクチン短鎖/長鎖比, C.L.: アミロペクチン平均鎖長

第3図 消化性試験と同条件で調整した蒸米のDSC曲線

調整した蒸米を熱分析したところ（第3図）、全試料においてデンプン老化の主眼的要因とされるアミロペクチンの再結晶化とアミロース-脂質複合体の再会合が観察され、酵素消化性が低かった試料はアミロペクチンの再結晶化熱量やアミロース-脂質複合体の再会合熱量が大きくなっていった。以上のことから、アミロース含量やアミロペクチンの側鎖構造の違いに原因するデンプンの老化性の差異が、蒸米の酵素消化性に深

く関与するものと考えられた。

3-2 酒造好適米・食用米を用いた解析⁷⁾

次に、酒造好適米と食用米についてデンプン組成・分子構造を解析し、酵素消化性、デンプンの老化との関連性について検討した。

(1) 各品種の化学成分値とデンプン組成・構造

第6表に、各品種の70%白米の化学成分値（デンプン価、タンパク質含量）と精製したデンプン、アミロペクチン、アミロースの組成、分子構造を示した。デンプン組成・分子構造は、酒造好適米と食用米に特有の特徴はみられなかったが、デンプン変異体ほど大きくはないが品種間で差異がみられた。アミロース含量（FI）は、おくほまれ、五百万石で低く（15.5%，15.6%），吟風，初雫で高かった（19.2，20.2%）。アミロペクチンの短鎖割合（FIIB'）及びアミロペクチンの短鎖/長鎖比（FIIB'/FIIA'）も、アミロース含量と同様の傾向を示し、おくほまれ，五百万石で低く，一方，吟風，初雫で高かった。アミロースの平均重合度（DPn）は吟風や初雫が高く（1309，1478），おくほまれや五百万石が低かった（956，1004）。デンプン価やタンパク質含量は，品種間で顕著な差はなかった。山田錦は，アミロース含量（17.8%），アミロペクチン短鎖/長鎖比（3.2）ともに，比較的高い値を示した。

(2) デンプンの糊化老化特性

精製デンプンについて，ラピッド・ビスコ・アナライザー（RVA）で粘度特性と示差走査熱量計（DSC）により糊化特性を解析した（データ割愛）。RVAの最高粘度は，アミロース含有量が低いと，高い値を示した。DSCの糊化開始・ピーク温度は，アミロペクチンの短鎖/長鎖比が高いと，低い値を示した。また，

第6表 酒造好適米と食用米の化学成分値とデンプン組成・分子構造

	デンプン 含量 (%/dry)	タンパク 含量 (%/dry)	アミロース 含量 (FI : %)	アミロペクチン 短鎖割合 (FIIB' : %)	アミロペクチン 短鎖/長鎖比 (FIIB'/FIIA')	アミロース 平均重合度 (DPn)
山田錦（広島）	92.8	5.0±0.1	17.8±0.5	76.1±0.3	3.2±0.1	1058±29
吟風（北海道）	92.5	5.6±0.1	19.2±0.6	76.5±0.8	3.3±0.1	1309±55
初雫（北海道）	92.6	5.6±0.1	20.2±0.4	77.6±0.1	3.5±0.0	1478±35
五百万石（石川）	91.7	5.2±0.0	15.6±0.2	73.4±0.1	2.8±0.0	1004±36
おくほまれ（福井）	91.4	5.8±0.1	15.5±0.3	73.0±0.5	2.7±0.1	956±58
日本晴（広島）	92.5	5.1±0.0	18.1±0.3	75.5±0.3	3.1±0.1	1128±54
コシヒカリ（千葉）	91.6	5.2±0.0	15.2±0.2	75.3±0.2	3.0±0.0	1100±40

試料は，全て2001年産。

デンプンの老化については、アミロペクチン短鎖/長鎖比が高いと、老化の進行がゆるやかであった。これらは過去の報告^{8,9)}と一致し、デンプンの組成や構造はデンプンの糊化老化特性に深く関連していることが確認された。

(3) 気中に放置した蒸米の酵素消化性

変異体の結果と同様に酵素消化性がアミロース含量とアミロペクチンの短鎖割合のパラメータで説明できるかどうかを重回帰分析で検討したが、精度良く説明できなかった (FI と FI**IIb'**/FI**IIa'** で $R^2=0.068$, FI と FI**IIb'** : $R^2=0.084$)。実用品種ではデンプン変異体ほどデンプン構造に大きな差異がなくデンプンの老化の影響が現れにくいと考えられた。

気中放置した蒸米の酵素消化性は清酒醸造試験における粕歩合や清酒液量に相関があることが報告されている¹⁾。そこで、気中で 15°C、0.5~24 時間放置した蒸米の酵素消化性について検討した (第 7 表)。

放置時間の経過に伴い、いずれの品種も酵素消化性は低下したが、酵素消化性の低下速度は品種により異なった。気中放置 0.5 時間では酵素消化性の高かった品種が山田錦、五百万石であったのに対して、低かったのが吟風、初雫、日本晴であった。しかし、放置時間の経過に伴い、0.5 時間時とは酵素消化性の易難の順位が入れ替わり、気中放置 24 時間では、酵素消化性が高

かったのが吟風、初雫、山田錦で、低かったのがおくほまれ、五百万石であった。酵素消化性の低下の程度を、放置 0.5 時間の酵素消化性の値を 100%とした相対酵素消化性で比較したところ、アミロペクチンの短鎖/長鎖比が高い吟風、初雫、山田錦は、酵素消化性が低下しにくく、アミロペクチンの短鎖/長鎖比が低いおくほまれ、五百万石は酵素消化性が低下しやすかった。

(4) 気中放置蒸米におけるデンプンの老化

気中放置蒸米の酵素消化性の低下とデンプンの老化との関連を調べるため、酵素消化性試験と同条件で放置した蒸米を熱分析した。第 4 図に熱分析の DSC 曲線の一例を示した。いずれの品種も蒸し後 30 分ではアミロース-脂質複合体の再会合に由来する 80~100°C 付近のピークしかみられなかった。蒸し後 3 時間以降では、アミロース-脂質複合体のピークは変化しなかったが、40°C 付近にアミロペクチンの再結晶化に由来するピークが出現し、時間の経過とともにピーク面積は大きくなった。したがって、蒸し後 30 分以降に蒸米に起こる物理変化は、アミロース脂質の再会合でなくアミロペクチンの再結晶化 (老化) に起因すると考えられることから、放置した蒸米の酵素消化性の低下は、アミロペクチンの老化の進行が主体要因であると考えられた。

第 7 表 15°C で 0.5~24 hr 気中放置した蒸米の酵素消化性

品種	蒸し後の気中 放置時間 (hr)	気中放置した蒸米の酵素消化性(デンプンから糖への変換率: %) (相対酵素消化性(%))					
		0.5	3	6	9	11	24
山田錦 (広島)		71.3±0.2 (100)	66.7±0.5 (93.6)	58.1±1.2 (81.5)	49.6±0.9 (69.5)	43.6±0.8 (61.2)	15.4±1.0 (21.6)
吟風 (北海道)		61.3±1.4 (100)	56.7±0.5 (92.5)	50.3±1.1 (82.1)	44.1±0.2 (72.0)	38.5±1.5 (62.9)	18.3±0.9 (29.9)
初雫 (北海道)		57.4±0.8 (100)	52.5±0.7 (91.4)	46.6±0.8 (81.2)	39.3±1.2 (68.5)	34.7±1.2 (60.4)	16.6±0.3 (28.9)
五百万石 (石川)		65.9±1.1 (100)	56.4±0.5 (85.6)	46.5±0.9 (70.6)	35.2±0.6 (53.5)	28.9±1.6 (44.0)	9.5±0.8 (14.5)
おくほまれ (福井)		63.8±0.3 (100)	53.3±0.3 (83.6)	40.7±0.6 (63.9)	28.8±1.3 (45.1)	24.3±0.5 (38.1)	7.4±1.1 (11.6)
日本晴 (広島)		58.8±0.6 (100)	51.5±0.8 (87.6)	43.0±1.1 (73.1)	33.2±0.8 (56.5)	28.2±1.6 (48.0)	10.2±1.2 (17.3)
コシヒカリ (千葉)		63.4±0.6 (100)	55.9±2.5 (88.2)	47.1±0.6 (74.3)	36.8±1.7 (58.0)	31.5±1.6 (49.7)	8.9±0.61 (14.0)

蒸米を 15°C で 0.5~24 時間気中放置後、15°C で 24 時間酵素消化し、生成糖量を測定した。

第4図 氣中放置した蒸米のDSC曲線

第5図 氣中放置した蒸米のアミロペクチンの再結晶化熱量の経時変化

アミロペクチンの再結晶化に由来するピーク面積の増加の程度（アミロペクチンの老化の進行速度）は、品種により差異がみられた（第5図）。アミロペクチンの短鎖/長鎖比が高く、酵素消化性の低下が少なかった吟風や初雫といった品種の老化の進行が遅く、アミロペクチンの短鎖/長鎖比が低く、酵素消化性の低下速度が早かったおくほまれや五百万石が高かった。

第6図 放置した蒸米のアミロペクチンの再結晶化熱量と相対消化性

第7図 アミロペクチン側鎖構造と氣中放置蒸米の相対消化性

さらにアミロペクチンの再結晶化熱量と相対酵素消化性との関係には深い相関が認められた（第6図）。また、デンブ構造と酵素消化性との関連性をみると、アミロペクチン短鎖/長鎖比の高い品種ほど、氣中放置しても酵素消化性が低下しにくかった（第7図）。

以上の結果から、蒸米を放置した場合、アミロペクチンの側鎖構造に起因する老化性の差異が酵素消化性に大きく影響するものと考えられた。

4. イネ登熟期気温の及ぼす影響^{10,11)}

イネの栽培温度もアミロペクチンの側鎖構造に影響することがわかった。イネの登熟期気温が酒造適性に及ぼす影響について調べるため、登熟期の気温を高温区と対照区、又は、低温区と対照区に人工的に制御し山田錦及び日本晴を生育させ、米の酒造適性を解析した。その結果、イネ登熟期の気温の差異は、アミロペクチンの側鎖構造（低温で短鎖/長鎖の比率が増大、高温で減少）及びアミロース含量（低温で増加、高温で減少）に明確な影響を及ぼした（第8表）。これは過去の報告¹²⁾に一致し、この構造変化は、糊化特性・粘度特性分析結果からも裏付けられた。このデンプンの組成、構造の変化は、酵素消化性（低温で溶解し易く、高温で溶解し難い）に強く影響を及ぼしていることを明らかにした。以上の結果は、岡崎らが過去

の全国酒造用原料米統一分析結果を統計解析した報告¹³⁾と傾向が一致し、冷害年の米は溶解性が良く、高温年の米は溶解性が悪いという経験的知見がイネ登熟期の気温条件によるアミロペクチンの構造の変化に原因していることを裏付けるものであった。

5. 精米歩合の影響¹⁴⁾

精米歩合の影響についても調べた。玄米から精米歩合90-30%に搗精し、米粉と精製デンプンを調製し、精米歩合と物理化学的およびデンプン構造特性との関連性を調べた。米粉では、精米歩合が低くなるに伴い、RVAで測定した粘度特性で最高粘度が増加し、DSCで測定した糊化特性で糊化ピーク温度が低下し、吸熱エンタルピー変化量が増加したが、精製デンプンではこれらのパラメータの変化は小さかった。デンプンの組成・構造を解析したところ、アミロース含量、アミ

第8表 登熟期気温がデンプン構造に及ぼす影響

栽培年	品種	登熟期温度	アミロース (%)	アミロペクチン		
				長鎖 (FIIa : %)	短鎖 (FIIb : %)	短鎖/長鎖比 (FIIb/FIIa)
2003	山田錦	20°C	22.0	18.2	59.8	3.3
		30°C	19.1	21.1	59.8	2.8
	日本晴	20°C	20.7	18.4	60.9	3.3
		30°C	16.8	21.6	61.6	2.9
2004	山田錦	20°C	21.5	19.5	59.0	3.0
		35°C	15.5	23.6	60.9	2.6
	日本晴	20°C	20.5	19.9	59.6	3.0
		35°C	15.6	23.5	61.0	2.6

第9表 異なる精米歩合の試料（山田錦*）から調製したデンプンの組成と構造

精米歩合 (%)	アミロース (%)	アミロペクチン		
		長鎖 (FIIa : %)	短鎖 (FIIb : %)	短鎖/長鎖比 (FIIb/FIIa)
玄米	16.6±0.8	21.4±0.3	61.9±0.5	2.89±0.02
90	16.6±0.9	21.4±0.3	62.0±0.6	2.90±0.02
80	16.7±0.7	21.3±0.3	62.0±0.7	2.90±0.06
70	16.8±0.4	21.2±0.2	62.0±0.4	2.93±0.03
60	17.3±0.2	21.2±0.1	61.5±0.1	2.90±0.01
50	17.3±0.1	21.1±0.2	61.6±0.1	2.91±0.03
40	17.2±0.0	21.1±0.2	61.7±0.2	2.92±0.04
30	16.9±0.4	21.1±0.2	62.1±0.4	2.95±0.04

*2004年兵庫県産山田錦。五百万石、日本晴のデータは割愛した。

第 10 表 実用品種におけるアミロペクチンの側鎖構造
と老化，酵素消化性，登熟期気温の関係

アミロペクチン の側鎖 (短鎖/長鎖比)	長い (低い)	短い (高い)

老化	早い	遅い
蒸米の酵素消化性	低い	高い
イネ登熟期気温	高い	低い

ロペクチンの短鎖/長鎖比は，品種間に差異がみられたものの，同一品種では精米歩合 90-30% で差異はみられなかった（第 9 表）。以上より，デンプンの組成・構造が精米歩合の違いによる醸造特性へ及ぼす影響は少ないと考えられた。むしろ，精米歩合に関しては，デンプン特性より従前より言われるタンパク質や脂質などの成分の方が醸造適性へ大きく影響すると考えられた。

6. おわりに

蒸米の酵素消化性に影響を及ぼすデンプン関連因子やイネ登熟期の気温の影響について検討したところ，アミロース含量やアミロペクチンの側鎖構造の違いに原因するデンプンの老化性の差異が，蒸米の酵素消化性に深く関与することが明らかになった。第 10 表に本稿のまとめを示す。

デンプン構造の大きく異なったデンプン変異体間の比較では，アミロース含量が酵素消化性と有意な負の相関性を示したが，実用品種（酒造好適米，食用米）の比較では，蒸米を気中放置しデンプンの老化を進めた場合，アミロペクチンの短鎖/長鎖比の大きいすなわちアミロペクチンの側鎖が短い品種が，デンプン（アミロペクチン）の老化の進行が遅く，高い酵素消化性を示した。酒造においては，製麴工程や長時間の蒸米放冷などの蒸米がデンプンの老化を受けやすい環境下にある場合には，実用品種間ではアミロース含量の差が小さいこともあり，デンプンの大半を占めるアミロペクチンの側鎖構造の差異が醗における酵素消化性に強く影響を及ぼすものと考えられる。

イネ登熟期の気温もデンプン構造を変化させ，結果

として醸造適性に影響することが明らかとなった。各地で栽培される実用品種のデンプンの特徴は，デンプン生合成系遺伝子が改変された品種を除くと，遺伝的要因のみでなく栽培地の気象条件が大きく影響していることが考えられる。代表的な酒造好適米である山田錦と五百万石に関して推測すれば，山田錦は低温でももろみの溶解性が良いとされる¹⁵⁾が，これは晩生品種ゆえに 8 月中旬以降のやや涼しくなった時期に登熟し，アミロペクチンの側鎖が短くなるためと推測される。一方五百万石は，蒸し後硬くなりやすく気中放置での消化性の低下が速いとされる^{15,16)}が，これは早生品種ゆえに 7 月下旬～8 月上旬の最も暑い時期に登熟し，アミロペクチン側鎖が長くなるためと考えられる。

これらの成果は，米の育種指標，酒造原料米の適性評価法，気象条件からの原料米適性の予測法などへ応用可能と考えられ，今後さらに検討が必要である。本研究は，酒類総合研究所旧原料研究室で行われた研究成果を紹介したものである。本研究の実施に際しまして，デンプン関連の実験手法等をご指導いただきました福山大学生命工学部の井ノ内直良教授並びに糖質研究室の皆様に深く感謝致します。また，デンプン変異体米試料をご提供いただきました九州大学の佐藤光教授に深く感謝致します。

< (独) 酒類総合研究所 >

参 考 文 献

- 1) 若井芳則，水間智哉，宮崎紀子，長野知子，柳内敏靖，生工，75，99-109 (1997)

- 2) 水間智哉, 古川幸子, 清川良文, 若井芳則, 醸協, 98, 293-302 (2003)
 - 3) 荒巻功, 吉井美華, 岩瀬新吾, 江辺正英, 菅野喜浩, 菊永雪絵, 奥田将生, 小関卓也, 橋爪克己, 醸協 99, 457-466, (2004)
 - 4) 不破英次, 檜作進, 小巻利章, 貝沼圭二 (編著) 澱粉科学の事典, 朝倉書店, (2003)
 - 5) 三吉和重, 小山和男, 醸協, 70, 277-281 (1975)
 - 6) Okuda, M., Aramaki, I., Koseki, T., Satoh, H. and Hashizume, K. Cereal Chem. 82, 361-368 (2005)
 - 7) Okuda, M., Aramaki, I., Koseki, T., N.Inouchi and Hashizume, K. Cereal Chem. 83, 143-151 (2006)
 - 8) Zeng, M., Morris, C., Batey, I., and Wrigley, C.W. Cereal Chem. 74 : 63-71 (1997) .
 - 9) Asaoka, M., Okuno, K., Sugimoto, Y., Kawakami, J. and Fuwa, H. starch/starke, 36 : 189-193 (1984).
 - 10) 小関卓也, 奥田将生, 米原由希, 八田一隆, 岩田博, 荒巻功, 橋爪克己, 醸協, 99, 591-596 (2004)
 - 11) 米原由希, 小関卓也, 奥田将生, 荒巻功, 橋爪克己, 醸協, 100, 650-657 (2005)
 - 12) 不破英次, 89, 174-179 (1994)
 - 13) 岡崎直人, 君塚敦, 木崎康造, 小林信也, 醸協, 84, 800-806 (1989)
 - 14) Okuda M, Kobayashi K., Itani, T., Aramaki, I. and Hashizume, K. J. Appl. Glycosci., 54, 1-5 (2007)
 - 15) 前重道雅, 小林信也 (編著), 日本の酒米と酒造り, (株)養賢堂, (2000)
 - 16) 安澤義彦, 勝又和明, 片岡 惇, 醸協, 101, 886-892 (2006)
-