

米デンプンの α -アミラーゼによる消化性と食味関連形質に関する主成分分析

誌名	日本作物學會紀事
ISSN	00111848
著者名	大澤,実 井上,直人
発行元	日本作物學會
巻/号	77巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 61-68
発行年月	2008年1月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



品質・加工

米デンプンの α -アミラーゼによる消化性と食味関連形質に関する主成分分析

大澤実^{1,2)}・井上直人^{2,3)}

(¹⁾ 群馬県農業技術センター, (²⁾ 信州大学大学院総合工学研究科, (³⁾ 信州大学農学部)

要旨: 米の α -アミラーゼによる消化性と食味に関して総合的な品種評価をするために, 多変量解析法の一つである主成分分析を用い, IRRI コアコレクションを含む 58 品種・系統について検討した. 解析には推定グリセミック・インデックス (EGI) などのデンプン消化関連形質および糊化特性, 粗蛋白質含量などの食味関連形質を選んだ. 分析の結果, 4 つの主成分が検出され, 第 1 主成分だけで全変動の約 50%, 第 1~第 4 主成分で全変動の約 90% を説明することができた. 第 1 主成分は消化速度に関係すると同時に米飯の粘りの強さにも関係する変動成分であることが因子負荷量から明らかになった. また, 第 2 主成分は米飯の老化性に関わる主成分, 第 3 主成分は米の α -アミラーゼによる消化の全体量に関わる主成分, 第 4 主成分は米の粗蛋白質含量に関わる主成分であると評価された. 第 1 および第 2 主成分に基づいて, 米デンプンの α -アミラーゼによる消化性と米飯の物性について同時に評価することができた. さらに, EGI と要因との相関関係から, アミロース含量や RVA の最高粘度が EGI 推定の際に優れた指標となることが明らかとなった. これらのことは, 低 GI と食味の良さを兼ね備えた品種の育成に応用できる.

キーワード: α -アミラーゼ, グリセミック・インデックス, 米, 主成分分析, 消化, 食味, デンプン消化.

現在わが国では, 食生活の欧米化や高齢化にともない, 高血圧や糖尿病などいわゆる生活習慣病の増加が懸念されている. こうした背景から, 病気を未然に防ぐ予防に重点を置いた医療や毎日の食事を通した生活習慣病予防および健康増進が注目されている. 近年, ヨーロッパやオーストラリアなどでは, 新しい栄養指導の方法としてグリセミック・インデックス (GI) に基づいた食品や食品の組み合わせが取り入れられるようになってきた. これは, 糖質の量が同じ食品でも糖の構造や種類が異なると食後血糖の上昇・下降の程度が違うことが, 注目されるようになってきたためである (Jenkins ら 1982, Jenkins ら 1984, Goñi ら 1997). GI はこうした糖の質に着目して食後血糖値の変化の様子を示す指標の一つであり, その活用が推奨される理由の一つは, 食後血糖値の変化がインスリンの食後上昇パターンを支配するため, GI を用いてインスリン分泌を抑制できるためである. したがって, GI を上手に活用することにより毎日の食事を通して生活習慣病予防や健康増進が期待できる. 特に, 低 GI 食品は, 糖尿病や高脂血症などの代謝疾患を患う人々が食事管理する上で有効かつ重要である (Wolever and Mehling 2002).

米は日本人の主食であり最も重要な穀物である. Miller ら (1992) は加熱調理した米の GI は 64~93 の範囲に分布し, 小麦パスタの 58, オートミールの 58, 圧偏した大麦の 66 に比べその値が大きいことから, 米は高 GI 食品に分類されるとしている. また, 白米と玄米の GI の値には, 大きな違いが認められなかったと報告している. Hu ら (2004) によれば, 米の GI には品種間差があり, アミロ

ス含量の高い品種でその値は低く, 糯品種でその値は高くなる傾向が示されている. このように, アミロース含量は GI の変動に影響を及ぼす主要な要因の一つである. また, アミロース含量は米の食味において重要度が高いことでも知られている. すなわち, アミロース含量の高い米ほど炊飯時の吸水量が多く, 粘りの少ない硬い米飯になり食味が劣る (大坪 1996a). しかし, 一方で米の GI は, アミロース含量が同程度の品種間においても違いが認められることから, アミロース含量以外の要因の存在が指摘されている (Frei ら 2003). その要因としては, デンプン粒の大きさ, 結晶化の程度, 物理的な特性の違いなどが挙げられている. このように, GI の変動には多くの要因が関係していることがわかってきている. これらのことを考えあわせると, 低 GI でありながら良食味を示す品種が育成できる可能性も考えられる. しかしながら, 現在のところ GI に影響を及ぼす多くの要因を用いた総合的な品種評価はなされていない. そこで本研究では, 要因としてアミロース含量などの他にデンプンの α -アミラーゼによる消化パラメーターおよびラピッドビスコアナライザー (RVA) による糊化特性値などを用いて主成分分析を行い, 米の GI や α -アミラーゼによる消化性ならびに食味を支配する物理・化学的特性に関して総合的な品種評価を試みた.

材料と方法

1. 材料

供試材料は, 第 1 表に示した 58 品種・系統である. これらは IRRI のコアコレクションと群馬県農業技術セン

第1表 供試系統におけるデンプンの α -アミラーゼによる分解率.

番号	品 種・系 統 名 (産地)	アミロース (% DM)	粗蛋白質 (% DM)	パラメーター				EGI
				a	b	c	a + b	
1	Calrose76 (米国)	30.3	8.2	23.7	55.0	0.022	78.7	74.0
2	ARC 10177 (インド)	32.4	7.7	23.8	52.2	0.027	76.0	74.2
3	IR26 (フィリピン)	33.2	8.9	21.4	59.4	0.018	80.8	74.4
4	NP125 (インド)	31.6	6.6	27.3	50.4	0.034	77.7	74.7
5	ARC 7229 (インド)	31.5	7.4	24.8	53.3	0.027	78.1	74.9
6	JHONA 26 (パキスタン)	31.9	6.0	28.7	52.6	0.030	81.3	75.3
7	TETEP (ベトナム)	30.3	6.8	27.0	53.3	0.030	80.3	75.8
8	JHONA 349 (インド)	32.1	7.6	28.0	58.5	0.023	86.5	76.7
9	DULAR (インド)	31.9	8.5	23.6	57.5	0.026	81.1	77.3
10	白穀 (台湾)	32.3	5.9	23.1	58.3	0.027	81.4	78.2
11	HU-LO-TAO (台湾)	30.5	8.1	20.2	55.2	0.035	75.4	78.3
12	北陸 207 号 (日本)	31.8	7.2	23.4	56.6	0.031	80.0	78.3
13	PEH-KUH-TSAO-TU (台湾)	32.9	8.3	21.0	56.6	0.032	77.6	78.5
14	Tadukan (フィリピン)	33.4	5.8	23.9	59.6	0.026	83.5	78.7
15	KALAMKATI (インド)	31.7	8.7	21.9	55.3	0.038	77.2	78.9
16	新潟 79 号 (日本)	32.3	6.6	23.3	57.5	0.031	80.8	78.9
17	SURJAMKUHT (インド)	32.0	7.5	23.9	59.6	0.027	83.5	79.1
18	統一 (韓国)	25.2	9.2	18.9	58.6	0.029	77.5	79.1
19	MOROBEREKAN (ギニア)	29.8	8.9	21.9	54.8	0.047	76.7	79.8
20	CHAHORA 144 (パキスタン)	29.3	10.6	21.2	57.2	0.038	78.4	80.2
21	IR50 (フィリピン)	31.4	7.3	15.1	64.2	0.023	79.3	80.3
22	TAICHUNG NATIVE 1 (台湾)	30.6	10.1	14.1	65.8	0.022	79.9	80.8
23	BABER (-)	31.2	7.2	18.7	58.9	0.036	77.6	81.1
24	IR40 (フィリピン)	30.3	7.3	16.2	61.3	0.030	77.5	81.2
25	N22 (インド)	34.6	6.5	21.9	59.6	0.035	81.5	81.3
26	Gembrong (インドネシア)	28.3	8.8	21.6	57.4	0.046	79.0	81.6
27	CANELA DE FERRO (ブラジル)	28.9	6.6	22.8	57.0	0.049	79.8	81.6
28	TUMO-TUMO (マレーシア)	28.9	9.2	19.1	60.8	0.034	79.9	81.9
29	IR28 (フィリピン)	27.8	6.8	13.8	67.0	0.023	80.8	82.1
30	IR8 (フィリピン)	27.3	9.3	11.6	70.6	0.020	82.2	82.5
31	DOM-ZARD (イラン)	27.3	11.3	17.5	59.4	0.042	76.9	82.5
32	IR36 (フィリピン)	29.0	10.6	13.0	63.7	0.029	76.7	82.5
33	TRES MESES (ブラジル)	29.8	5.9	20.6	60.6	0.040	81.2	83.0
34	AI-CHIAO-HONG (台湾)	31.3	7.1	14.5	64.1	0.030	78.6	83.1
35	南豊 (中国)	24.8	8.8	16.4	62.2	0.035	78.6	83.1
36	MAINTIMOLOTSY 1226 (マダガスカル)	27.7	8.5	19.0	61.2	0.039	80.2	83.3
37	BENGIZA (アフガニスタン)	30.5	6.0	19.4	58.4	0.055	77.8	83.3
38	戦捷 (日本)	28.2	8.0	19.0	61.9	0.037	80.9	83.4
39	IR24 (フィリピン)	24.6	8.9	14.7	59.9	0.047	74.6	83.5
40	CAAWA/FORTUNA 6-103-5 (フィリピン)	28.3	8.7	24.0	59.0	0.055	83.0	83.7
41	ROJOFOTSY 1226 (マダガスカル)	27.9	10.7	24.4	63.4	0.035	87.8	84.0
42	日本晴 (日本)	23.7	7.6	17.4	62.1	0.041	79.5	84.3
43	IGUAPE CATETO (ハイチ)	30.0	6.7	20.6	61.2	0.046	81.8	84.4
44	CAROLINA GOLD (米国)	30.4	6.0	24.5	63.4	0.040	87.9	85.0
45	関東 146 号 (日本)	24.9	8.7	15.8	62.4	0.045	78.2	85.1
46	コシヒカリ (日本)	20.9	6.5	14.1	60.5	0.058	74.6	85.1
47	La572 (米国)	23.0	9.1	13.8	61.0	0.055	74.8	85.2
48	AZUCENA (フィリピン)	23.9	7.4	20.1	65.0	0.036	85.1	85.3
49	ゴロビカリ (日本)	22.6	6.4	15.1	61.4	0.057	76.5	85.7
50	PADI KASALLE (インドネシア)	27.1	8.7	22.3	67.6	0.031	89.9	85.8
51	密陽 23 号 (韓国)	23.4	8.4	14.7	63.8	0.049	78.5	86.7
52	Arborio (イタリア)	19.9	10.3	11.9	63.8	0.053	75.7	87.1
53	さわびかり (日本)	9.8	6.8	16.3	63.3	0.065	79.6	87.7
54	ハタニシキ (日本)	19.2	10.0	11.6	65.5	0.051	77.1	88.1
55	ミルキープリンセス (日本)	10.7	7.4	13.1	64.8	0.075	77.9	89.5
56	ハバタキ (日本)	20.4	8.7	15.3	68.0	0.053	83.3	90.2
57	ミルキークイーン (日本)	15.6	7.0	13.7	68.7	0.056	82.4	91.1
58	関東 IL3 号 (日本)	22.5	6.9	16.9	71.0	0.049	87.9	91.9
平均値		27.6	7.9	19.4	60.5	0.038	79.9	82.0
分散分析		**	**	**	**	**	**	**

パラメーター a, b, c は非線形モデル式 $Y_t = a + b(1 - e^{-ct})$ に当てはめたときの定数を, Y_t は分解時間 t における分解率を示す. ** は 1% 水準で有意であることを示す.

EGI: 推定グリセミック・インデックス.

ターの保存品種の中から糯品種を除き無作為に選定し、2006年に同センター内の同一水田区内で同一条件の下で栽培し、苗は成苗で、6月27日に移植し、栽植密度は条間30 cm、株間15 cm、1株1本の手植えとした。基肥窒素量は7 g m⁻²、無追肥である。

2. 試料の調整

収穫した籾は日陰で風乾した後に籾摺りし、1.7 mmの縦目篩を用いて精選した精玄米を本実験に供試した。これら玄米の粉碎はテストミル (Quadrumat Junoir, ブラベンダー社) を用いて行い、試料は236 μm径のスクリーンを通過させた。

3. 方法

(1) 難消化性デキストリンの定量

難消化性デキストリンの定量はレジスタントスターチ・アッセイキット (K-RSTAR, メガザイム社) を使用して行った (McCleary and Monaghan 2002)。100 mgの試料に、2 mLの0.1 M マレイン酸緩衝液 (pH 6.0) を加え、121℃、30分間、オートクレーブで加熱した。放冷した後、4 mLのアミラーゼ溶液 [ブタ膵臓α-アミラーゼ (EC 3.2.1.1) 30 U mL⁻¹ + アミログルコシダーゼ (E-AMGDF, メガザイム社, EC 3.2.1.3) (AMG) 3 U mL⁻¹の混合溶液] を加え、37℃で16時間インキュベートした。次に6 mLのエタノールを加え酵素反応を停止した後、遠心分離 (1500 g, 10分間) を行い、得られた沈殿を2 mLの2 M 水酸化カリウム水溶液で溶解した。そこへ、8 mLの1.2 M 酢酸緩衝液 (pH 3.8)、および AMG (E-AMGDF, メガザイム社, EC 3.2.1.3) 330 Uを加え50℃で30分間反応させて、グルコースに分解した。グルコースはグルコースオキシダーゼ・パーオキシダーゼ法 (Trinder 1969) で定量した。各試料の分析は2反復で行い、難消化性デキストリン含量は乾物換算して表した。難消化性デキストリンは、レジスタントスターチ・アッセイキットを使用して測定されたレジスタントスターチ画分とした。

(2) α-アミラーゼによるデンプン消化率の測定

α-アミラーゼによるデンプン消化率の測定は100 mgの試料に20 mLの0.1 M マレイン酸緩衝液 (pH 6.0) を加え、105℃、10分間、オートクレーブで加熱した試料を用いて検討した。試料はオートクレーブで加熱後に37℃まで放冷し、ブタ膵臓α-アミラーゼ (EC 3.2.1.1) 0.09 Uを加え、振とう (200 rpm) しながら37℃でインキュベートした。振とう開始から0, 30, 60, 120, 240分後に各々0.4 mLずつをマイクロチューブに分取した。その後、α-アミラーゼを失活させるために、サンプルをただちに100℃、5分間加熱処理した。次に遠心分離 (12000 rpm, 5分間) を行い、その上清からサンプル0.1 mLを取り出し、0.37 mLの0.4 M 酢酸緩衝液 (pH 4.5) と AMG (E-AMGDF, メガザイム社, EC 3.2.1.3) 0.1 Uを加え60℃、45分反応

させてグルコースに分解した。グルコースはグルコースオキシダーゼ・パーオキシダーゼ法で定量した。各試料の分析は2反復で行った。デンプンの消化率は、井上・山本 (1992) が推奨する Ørskov and McDonald (1979) の非線形回帰式に当てはめて3つのパラメーターに要約して表すこととした。このモデル式はデンプンの消化率を最も簡易に表現できるものである。

$$Y_t = a + b(1 - e^{-ct})$$

ここでtは分解時間、Y_tはt時間分解したときの分解率(%), a, b, cは定数である。aは試料の加熱前処理によって生じたデンプン分解物の割合(%), bはα-アミラーゼの作用に由来する分解割合(%), cは分解速度を表している。a, b, cの推定は統計ソフト STATISTICA を使用し、準ニュートン法による非線形最小2乗法で行った。

(3) 推定 GI (EGI)

EGIの値はGoñiら (1997) の推奨するモデルにあてはめて算出した。

$$EGI = 39.71 + [0.549 \times \text{加水分解指数 (HI)}]$$

ここで、HIは各サンプルの加水分解曲線下面積 (AUC) の基準食品 (白パン) のAUCに対する比率 [HI = 各サンプルのAUC / 基準食品 (白パン) のAUC] を示している。また、AUCは以下の式により算出した。

$$AUC = b(t_i - t_0) - (b/c) [1 - \exp\{-c(t_i - t_0)\}]$$

ここで、t_iは180分、t₀は0分、b, cは非線形モデルのパラメーターを示している。

(4) アミロース含量、粗蛋白質含量およびラピッドビスコアナライザー (RVA) 糊化特性値の測定

アミロース含量は、100 mgの試料を0.5 N 水酸化ナトリウム水溶液で膨潤させ、ヨード呈色反応によりオートアナライザー II 型 (ブラン・ルーベ社) で測定した。標準試料には「日本晴」 (アミロース18.1%, 水分14.0%) を使用した。粗蛋白質含量は近赤外分光分析装置 NIR6500 HON (ニレコ社) を用いて測定した。アミロース含量と粗蛋白質含量は乾物換算して表した。RVA 糊化特性は、3.5 gの試料に0.5%硫酸銅水溶液25 mLを添加し、RVAsuper3 (Newport Scientific Instrument 社) を用いて測定した (豊島ら1997, 岡本・根本1998)。測定は、60℃、1分間保持、60~93℃を3分間で昇温、93℃、5分間保持、93~60℃を3分間で冷却の計12分間の条件で行った。各試料の分析は2反復で行った。

(5) 主成分分析

主成分分析は、統計ソフト STATISTICA を使用し、米デンプンのα-アミラーゼによる消化性や食味に関連する11形質の測定値を用いて行った (第2表の形質を参照)。

結 果

1. 米デンプンのα-アミラーゼによる分解率

第1表に供試品種・系統における米デンプンのα-アミラーゼによる分解率を示した。分解開始の初期値であるパ

第2表 主成分分析に用いた形質の変動.

形 質		最大値	最小値	平均値	変動係数 (%)
生物性 (デンプン消化 パラメーター)	a	28.7	11.6	19.4	23.2
	b	71.0	50.4	60.5	7.6
	c	0.075	0.018	0.038	31.6
	a+b	89.9	74.6	79.9	4.4
	EGI	91.9	74.0	82.0	5.2
化学性 (成分)	アミロース含量 (% DM)	34.6	9.8	27.6	19.2
	粗蛋白質含量 (% DM)	11.3	5.8	7.9	17.5
	RS 含量 (% DM)	0.24	0.00	0.11	64.9
物理性 (RVA 糊化特性)	最高粘度 (cP)	4914	2256	3157	17.2
	ブレイクダウン (cP)	3776	961	1770	27.9
	セットバック (cP)	1079	264	542	29.9

パラメーター a, b, c は非線形モデル式 $Y_t = a + b(1 - e^{-ct})$ に当てはめたときの定数を示す.

RS 含量: 難消化性デキストリン含量.

EGI: 推定グリセミック・インデックス.

第3表 因子負荷量と累積寄与率.

形 質		主 成 分			
		第 1	第 2	第 3	第 4
デンプン消化 パラメーター	a	-0.70	0.66	0.11	-0.06
	b	0.69	-0.40	0.58	0.05
	c	0.81	0.31	-0.35	-0.10
	a+b	-0.02	0.34	0.91	-0.01
	EGI	0.92	-0.06	0.22	-0.07
化学成分	アミロース含量	-0.92	-0.02	0.15	0.07
	粗蛋白質含量	0.06	-0.56	-0.05	-0.78
	RS 含量	-0.63	-0.39	-0.30	0.25
	最高粘度	0.91	-0.16	-0.01	0.25
R V A	ブレイクダウン	0.81	0.20	-0.22	0.34
	セットバック	-0.42	-0.73	0.18	0.39
	固有値	5.41	1.87	1.55	1.02
	寄与率 (%)	49.2	17.0	14.1	9.3
	累積寄与率 (%)	49.2	66.2	80.3	89.6

パラメーター a, b, c は非線形モデル式 $Y_t = a + b(1 - e^{-ct})$ に当てはめたときの定数を示す.

RS 含量: 難消化性デキストリン含量.

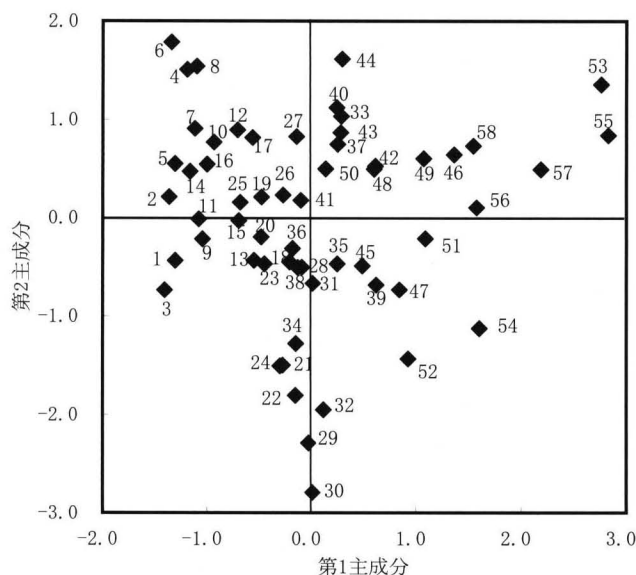
EGI: 推定グリセミック・インデックス.

ラメーター a は 11.6~28.7 の範囲に分布し, その平均値は 19.4 であった. α -アミラーゼの作用に由来する分解割合を示すパラメーター b は 50.4~71.0 の範囲に分布し, その平均値は 60.5 であった. 分解速度を示す係数であるパラメーター c は 0.018~0.075 の範囲に分布し, その平均値は 0.038 であった. 分解上限量を示すパラメーター a + b は 74.6~89.9 の範囲に分布し, その平均値は 79.9 であった. EGI の値は 74.0~91.9 の範囲に分布し, その平均値は 82.0 であった.

2. 主成分分析に用いた形質

主成分分析に用いた 11 形質の測定値について第2表に示

した. 形質の内訳は, 生物学的要因としてデンプンの α -アミラーゼ消化性に関するパラメーター a, b, c, a + b および EGI, 化学的要因として成分値であるアミロース含量, 粗蛋白質含量および難消化性デキストリン含量, 物理的要因として RVA 糊化特性値の最高粘度, ブレイクダウン (BD) およびセットバック (SB) である. これによると, 供試品種・系統のアミロース含量は 9.8~34.6%, 粗蛋白質含量は 5.8~11.3%, 難消化性デキストリン含量は 0.00~0.24%, RVA の最高粘度は 2256~4914 cP, BD は 961~3776 cP, SB は 264~1079 cP の範囲に分布していた. なお, 米デンプンの α -アミラーゼによる分解率に関するパラメーター a, b, c および a + b については上で既に示したとおりである.



第1図 第1および第2主成分スコアの散布図。
図中の番号は第1表の品種番号を示す。

3. 主成分分析

(1) 因子負荷量, 固有値および累積寄与率

主成分分析における因子負荷量, 固有値および累積寄与率を第3表に示した。因子負荷量は主成分と形質値との相関の程度を示す値であり, 寄与率は形質の変動のうちその主成分でもって説明できる全変動中の割合を示している。これにより第1主成分だけで全変動の約50%, 第1~第4主成分の合計で全変動の約90%を説明できることが明らかとなった。主成分に対する因子負荷量をみると, 第1主成分はパラメーターaおよびアミロース含量との間に高い負の相関が, パラメーターb, 同c, EGI, 最高粘度およびBDとの間に高い正の相関が認められた。第2主成分はSBとの間に高い負の相関が, 第3主成分はパラメーターa+bとの間に高い正の相関が, 第4主成分は粗蛋白質含量との間に高い負の相関が認められた。

(2) 第1および第2主成分スコアによる品種の分布

第1および第2主成分スコアによる供試品種・系統の散布図を第1図に示した。供試品種・系統の分布をみると, 第1, 第2主成分ともに高いスコアを示す品種・系統として「さわびかり」(第1図中番号53)および「ミルクープリンセス」(同55)が認められた。それとは対照的に第1, 第2主成分ともに低いスコアを示す品種・系統として「IR26」(同3)および「Calrose76」(同1)などが対比品種・系統として認められた。また, 第1主成分スコアが低く, 第2主成分スコアが高い品種・系統としては, 「JHONA26」(同6), 「JHONA349」(同8)および「NP125」(同4)などが認められ, それらとは逆の第1主成分スコアが高く, 第2主成分スコアが低い「ハタニシキ」(同54)および「Arborio」(同52)があることがわかった。さらに, 第2主成分スコアが極めて低い特徴的な品種・系統として「IR8」(同30)

が認められた。

考 察

多変量解析法の一つである主成分分析は, 望月(1968)がトウモロコシの品種分類に用いたのを初めとして, 多くの作物の品種分類に適用されてきた。イネにおいては渡辺(1985)が耐倒伏性の評価などに適用している。このように, 主成分分析は多くの形質が関与すると推測される特性を総合的に把握するのに優れた分析手法であると考えられる。本研究では, アミロースなどの成分値の他にデンプンの α -アミラーゼによる消化パラメーターや糊化特性値などを含む多形質の測定値を用いた主成分分析を行い, 米の α -アミラーゼによる消化性と食味関連特性に関して総合的な品種評価を試みた。

1. EGIの品種間差異

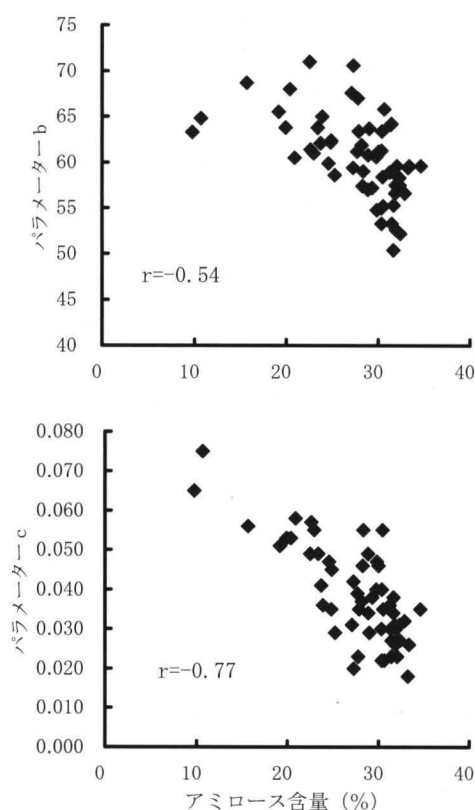
Freiら(2003)やHuら(2004)は, 米のGIには品種間差があり, アミロース含量の高い品種でその値が低くなる傾向を示している。また, Huら(2004)は, 最もEGIの低かった品種ではRVAの最高粘度や最終粘度の値が小さかったことも報告している。本報告で得られたEGIとアミロース含量との間には, 有意な負の相関($r = -0.78$, $n = 58$, $P < 0.001$)が認められ, RVAの最高粘度とEGIの間においても有意な正の相関($r = 0.78$, $n = 58$, $P < 0.001$)が認められた。Freiら(2003)やHuら(2004)の報告における供試品種数は各々6品種および12品種であり, その栽培地域もフィリピンや中国などの狭い地域に限定されている。本報告における供試数は58品種・系統であり, それらの報告に比べると多いだけでなく, アジア, 北米, 南米等を含む広範な地域の品種・系統を用いている。このような広範な条件においても同様な結果が得られたことから, アミロース含量やRVAの最高粘度はEGIに影響を及ぼす主要な要因であることが確認できた。このことは, アミロース含量やRVAの最高粘度がEGI推定の際に, 優れた指標となることを示している。

2. 主成分分析による米デンプンの α -アミラーゼによる消化性の評価

因子負荷量と形質との関係から, 第1主成分はパラメーターb, 同c, EGI, RVAの最高粘度およびBDの値が大きく, アミロース含量が低い特徴を持つ品種・系統ほどそのスコアが大きくなった。すなわち第1主成分スコアが大きくなるほど消化速度が速く, EGIは大きいと言える。さらに粘りの強い米飯は最高粘度とBDが大きいことが知られているので(大坪1996b), 第1主成分スコアの大きな品種・系統は米飯の粘りも強い。これらのことから, 第1主成分は消化速度に関係すると同時に米飯の粘りの強さにも関係する主成分であると考えられる。第2主成分の示す特徴は, SBの大小であった。SBは米飯の老化性と関係が深く,

SBの大きな品種は米飯の老化が速い(大坪 1996b)。このことから、第2主成分は米飯の老化性に関わる変動因子で、そのスコアが大きくなるほど老化しにくく米飯が硬くなり、にくいことを示すと考えられた。第3主成分の示す特徴は、パラメーター $a+b$ の大小であった。パラメーター $a+b$ は α -アミラーゼによる米デンプンの分解上限値を示していることから、第3主成分は分解の全体量に関する変動因子であると考えられる。第4主成分の示す特徴は、粗蛋白質含量の大小であった。第4主成分は粗蛋白質含量に関わる変動因子で、そのスコアが大きくなるほど粗蛋白質含量は低くなった。このように粗蛋白質含量に関する主成分が他の形質の変動と独立して検出されていることから、米の粗蛋白質含量とデンプンの α -アミラーゼによる消化性は関連性が低く、各々が独立した要因であると推察される。また、第1および第2主成分ともに共通して因子負荷量が多い形質としてパラメーター a があげられた。このことは、パラメーター a が α -アミラーゼによる米デンプンの消化速度と米飯の老化性に共通する要因であることを示しており興味深い。

第1および第2主成分スコアによる供試品種・系統の散布図を示した第1図において、第1主成分軸は α -アミラーゼによる米デンプンの消化速度を表し、第2主成分軸は米飯の硬くなりにくさを表している。第1図において第1象限の右上方に位置するほど消化速度が速く、EGI は大きく、米飯の粘りが強く、老化しにくく柔らかい特徴を有する。実際に供試品種・系統の分布を見た場合、「さわびかり」(第1図中番号53)および「ミルキープリンセス」(同55)などの低アミロース米がここに位置していた。これは低アミロース米が消化速度が速く、米飯の粘りが強く老化しにくいことを示している。それとは対照的に第3象限に位置する「IR26」(同3)および「Calrose76」(同1)などは消化速度が遅く低EGIだが、老化が速く硬くなりやすい特徴をもつことを示している。第2象限の左上方に位置する「JHONA26」(同6)、「JHONA349」(同8)および「NP125」(同4)などは低EGIでかつ老化しにくい特徴をもつと推察される。アミロース含量とEGIの間には高い負の相関が認められることから、低GIの米は粘りが弱く硬い食感となるが、これら第2象限の左上方に位置する品種は、血糖抑制効果と米飯の柔らかい食感を両立する可能性のある育種素材として有用であると考えられる。第4象限には「ハタニシキ」(同54)や「Arborio」(同52)などが位置し、これらは消化速度が速く、老化も速い特徴を有すると推察された。これらの結果から、主成分分析によってEGIと米飯の物性を同時に評価できることが示された。さらに、第2主成分スコアが極めて低い品種・系統として「IR8」(同30)が特徴的であった。RVAのSBとアミロペクチンに含まれる超長鎖(SLC)含量は高い相関があり、SLC含量はデンプンの老化に大きな役割を果たしていることが知られている(Inouchiら2005)。このことから、「IR8」のアミロ



第2図 アミロース含量とデンプン消化パラメーターの関係。
パラメーター b , c は非線形モデル式 $Y_i = a + b(1 - e^{-c})$ に当てはめたときの定数を示す。

ペクチンにはSLCが多く含まれていることが示唆される。本研究における主成分分析の結果では、米デンプンの α -アミラーゼによる消化性と米飯の老化性に関する主成分が各々独立して抽出された。したがって、米飯の老化性に深く関わるSLC含量と米デンプンの α -アミラーゼによる消化性との間の関連は希薄と推察された。しかしながら、「IR8」のパラメーター c は小さく、SLC含量は米デンプンの α -アミラーゼによる消化速度に何らかの影響を及ぼしていると示唆された。したがって、この点についてはアミロペクチンの構造や鎖長分布なども含め、さらに慎重に検討する必要があると考えられた。

3. 育種への応用

現在の日本は高齢社会であり、高齢者、特に要介護状態の人たちにとっての最大の栄養問題は、蛋白質とエネルギーの低栄養状態であると指摘されている(五味ら2002)。高齢者にとって、主食である米飯は重要なエネルギーと蛋白質の供給源である。そのため血糖値をコントロールする必要性があるからといって、米飯の摂取量を厳しく制限すると、エネルギーと蛋白質がほとんど確保できなくなってしまう。米飯を制限しないで血糖値をコントロールし、なおかつ十分な蛋白質とエネルギーを確保できるようにするためには、低GIの水稻品種が必要不可欠と考えられる。

食感の良さと低GIを兼ね備えた品種育成を目標とした

場合、第1図において第2象限の左上方に位置していた「JHONA26」、「JHONA349」および「NP125」などは、低GIで老化しにくく柔らかい食感をもつと推察された。したがって、これらを育種母本として活用し、選抜にはアミロース含量やRVAの最高粘度を指標に用いた一次選抜と官能試験を組み合わせると合理的であると考えられる。これにより、粘りは強くないが老化しにくく柔らかい食感をもつ低GIの品種が選抜可能であろう。アミロース含量とEGIの間には高い負の相関が認められることから、低GIは高アミロース含量に主に依存すると考えられるため、低GIと粘りのある食感の両立はかなり困難と推察される。しかしながら、アミロース含量が同程度の品種群の中においても、デンプン消化パラメーターbおよびcの値にはかなりの変動幅が認められた(第2図)。したがって、アミロース含量が中庸な品種群の中からパラメーターbおよびcの値が小さいといった消化特性を持つ品種を選定し、品種育成に利用することで、低GIと粘りのある食感の両立が可能と考えられる。このようにGIのような積分値ではなく、速度論的な見地から消化パラメーターに分けることで、アミロース含量の増大なしにEGI値の低減化が可能ではないかと考えた。

若木ら(2001)は米飯を基準食として食品の組み合わせによるGIを検討し、寿司飯や、米飯と乳製品との組み合わせによりGIが低減化することを報告している。したがって、乳製品との組み合わせ、例えばミルクを用いたりゾットなどの二次加工を前提にすれば、高アミロース米であっても活用の道は開けると考えられる。こうした二次加工と栄養学的見地から、血糖抑制型専用品種の開発を進めていくことも今後の課題と考えられた。また、本研究で主成分分析に用いた形質は、いずれも気象条件によって左右されるものである。したがって、各々の品種評価については、今後さらに年次を重ねて検討を進めていくことも必要であると考えられる。

引用文献

- Frei, M., P. Siddhuraju and K. Becker 2003. Studies on the in vitro starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines. *Food Chem.* 83 : 395–402.
- 五味郁子・杉山みち子・梶井文子・安藤高郎 2002. 複合型高齢者ケア止血における高齢者の JARD2001 を用いた要介護度別身体計測値の評価. *栄養—評価と治療*. 19 : 97–102.
- Goñi, I., A. Garcia-Alonso and F. Saura-Calixto 1997. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutr. Res.* 17 : 427–437.
- Hu, P., H. Zhao, Z. Duan, Z. Linlin and D. Wu 2004. Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. *J. Cereal Sci.* 40 : 231–237.
- 井上直人・山本藤生 1992. トウモロコシ子実の消化性に関する品種間差違の解析— α -アミラーゼによる消化性とルーメン内消失率および成分との関係—. *日草誌* 37 : 397–404.
- Inouchi, N., H. Hibui, T. Li, T. Horibata, H. Fuwa and T. Itani. 2005. Structure and properties of endosperm starches from cultivated rice of asia and other countries. *J. Appl. Glycosci.* 52 : 239–246.
- Jenkins, D.J. A., M.J. Thorne, K. Camelon, A. Jenkins, A.V. Rao, R.H. Taylor, L.U. Thompson, J. Kalmusky, R. Reuchert and F. Francis 1982. Effect of processing on digestibility and the blood glucose response. *Clin. Nutr.* 36 : 1093–1101.
- Jenkins, D.J.A., T.M.S. Wolever, A.L. Jenkins, R.G. Josse and G.S. Wong 1984. The glycemic response to carbohydrate foods. *The Lancet* 18 : 388–391.
- McCleary, B.V. and D.A. Monaghan 2002. Measurement of resistant starch. *J. AOAC International* 85 : 665–675.
- Miller, J. B., E. Pang and L. Bramall 1992. Rice : a high or low glycemic index food? *Am. J. Clin. Nutr.* 56 : 1034–1036.
- 望月昇 1968. 主成分分析によるトウモロコシの品種分類と育種材料探索に関する研究. *農技研報* D19 : 85–149.
- 岡本和之・根本博 1998. ラピッド・ビスコ・アナライザーによる陸稲品種の餅硬化性の評価と高度の餅硬化性を持つ陸稲品種「関東糯172号」. *日作紀* 67 : 492–497.
- Ørskov, E.R. and I. McDonald 1979. The estimation of protein degradability in the rumen incubation measurements weighted according to rate of passage. *J. Agric. Sci. Camb.* 92 : 499–503.
- 大坪研一 1996a. 米の美味しさの科学. 美味しい米 第2巻 櫛渕欽也監修. 農林水産技術情報協会, 東京. 50–54.
- 大坪研一 1996b. 米の美味しさの科学. 美味しい米 第2巻 櫛渕欽也監修. 農林水産技術情報協会, 東京. 96–101.
- Trinder, P. 1969. Determination of glucose in blood using glucose-oxidase with an alternative oxygen acceptor. *Ann. Clin. Biochem.* 6 : 24–27.
- 豊島英親・岡留博司・大坪研一・須藤充・堀末登・稲津脩・成塚彰久・相崎万裕美・大川俊彦・井ノ内直良・不破英次 1997. ラピッド・ビスコ・アナライザーによる米粉粘度特性の微量迅速測定法による共同試験. *日食工誌* 44 : 579–584.
- 若木陽子・杉山みち子・中本典子・小山和作・阿部眞佐子・細谷憲政 2001. 米飯と酢, 大豆, 牛乳・乳製品の組み合わせ食のグリセミック・インデックス. *Health Sci.* 17 : 133–142.
- 渡辺利通 1985. イネの倒伏抵抗性に関する育種学的研究 第1報 倒伏抵抗性関連形質による品種の群別. *農技研報* D36 : 147–196.
- Wolever, T.M.S. and C. Mehling 2002. High-carbohydrate-low-glycemic-index dietary advice improves glucose disposition index in subjects with impaired glucose tolerance. *Br. J. Nutr.* 87 : 477–487.

Principal Component Analysis of Starch Digestibility and Physicochemical Properties Related to Texture of Rice : Minoru OSAWA^{1,2)} and Naoto INOUE^{2,3)} (¹⁾*Gunma Agr. Tech. Cent., Maebashi, Gunma 371-0002, Japan ;* ²⁾*Interdisciplinary Grad. Sch. of Sci. and Tech. Shinshu Univ. ;* ³⁾*Fac. Agr. Shinshu Univ.*)

Abstract : Starch digestibility and texture of rice were studied in 58 rice cultivars and lines in the IRRI core collection and rice germplasm bank of Gunma Agricultural Technology Center. The principal component analysis was applied to evaluate the *in vitro* starch digestibility with α -amylase in milled brown rice and physicochemical properties related to texture. Eleven physicochemical properties were analysed by principal component analysis. Of the total variation of 11 characters, 49, 17, 14 and 9% were accounted for by these first 4 principal components, respectively, and so 90% could be explained by the 4 components. The factor loading suggested that the first principal component was a factor which was concerned with starch hydrolysis rate. The second principal component was closely related to the starch degradation rate, the third to the amount of the digestible fraction, and the fourth was to the content of protein in brown rice. The distribution of principal component score showed that the cultivars with a low Glycemic Index (GI) have slow starch degrading properties and superior texture. The GI was significantly correlated with amylose content and the peak value measured with a rapid visco analyzer (RVA^{super3}). These results contribute to development of the cultivars which have a low GI with good eating quality.

Key words : α -amylase, Digestion, Glycemic index, Principal component analysis, Rice, Starch hydrolysis, Texture.
