雑穀等たん白質に関する栄養化学的研究[†]

田 代 操

京都府立大学生生活科学部食物学科

Chemical and Nutritional Studies on Cereal Proteins

Misao TASHIRO

Department of Food Science, Faculty of Living Science,
Kyoto Prefectural University, Sakyo-ku, Kyoto

1. はじめに

粟や黍等の雑穀はかつてわが国においては重要な食糧源の一つとして米や小麦とともに多用されていたが、近年食生活の高度化に伴いこれらはほとんど忘れ去られ、現在ではたんに小鳥等の飼料として用いられているにすぎない。実際、これら雑穀は反当たり収量の低さ¹⁾、製粉の困難さ²⁾、全粒粉からの悪臭の発生³⁾などの種々の欠点を有している。しかしながら雑穀は比較的高いたん白質含量を有し貯蔵性にもすぐれ、また栽培面からは気候に対する適応性の高さや収穫期間の短さという利点をもっている⁴⁾。さらに粟や黍は古来より強壯の食餌としても知られており、また Mangay ら⁵⁾も、トウモロコシを常食とする地方に比べ粟を常食とする地方にペラグラの発生の少ないことをその比較的高いトリプトファン含量から説明している。したがってこれらは十分食糧源として再評価される価値のあるものといえる。

一方、米糠はもみの精白時に副生する米穀の外層部および一部胚芽を含む部分であり、その重量はもみの約10%にも及ぶ⁶⁾。またその一般組成は水分8~15%、たん白質10~16%、脂質8~23%、灰分7~20%、無窒素抽出物34~46%、粗繊維6~21%であり⁶⁾、比較的なん白質や脂質などの栄養素に富んでいる。しかしながら現在わが国においてはこの米糠はおもに米糠油の原料として利用されている以外は肥料や燃料また家畜の飼料として一部用いられているにすぎず、その高いたん白質含量にもかかわらず食品材料としての利用はほとんど図られていない。

これら粟、黍、米糠などの低利用あるいは未利用穀類資源のたん白質に関する栄養化学的研究は、粟に関しては, Adolph と Cheng⁷⁾, 平⁸⁾⁻¹⁰⁾, 李¹¹⁾, Burton ら¹²⁾,

Galyean ら¹³⁾, 高橋ら¹⁴⁾などの報告があり、また米糠に関しても, Lynn¹⁵⁾, Houston ら¹⁶⁾などによるアミノ酸組成の報告や Chen と Houston¹⁷⁾, 満田ら¹⁸⁾によるたん白濃縮物あるいは単離物の調製についての報告がある。しかしながら個々のたん白質の性状や栄養価については未だ不明の点が多く、また天然の毒性物質や反栄養因子などの動物に及ぼす影響¹⁹⁾についてもまったく知られていない。低利用あるいは未利用穀類たん白質の有効利用のためにはこのような未解明点を順次明らかにしていくことが必要であり、本稿ではこのような視点から著者らが行ってきた粟と米糠のたん白質に関する栄養化学的研究を概説する。

2. 粟たん白質の分別抽出

Osborne は植物たん白質をその溶解性の違いを利用して4種類、アルブミン(水溶性)、グロブリン(塩可溶性)、プロラミン(アルコール可溶性)およびグルテリン(酸またはアルカリ可溶性)に分画した²⁰⁾。雑穀たん白質に関してもほぼ同様の方法が用いられ、いくつかの報告がなされている²¹⁾⁻²⁴⁾。筆者も α -ブタノールで脱脂した粟粉より Wu らがオート麦に適用した方法²⁵⁾を用いてたん白質を分別抽出し、脱脂粟粉の総窒素に対する各画分の窒素量の割合およびアミノ酸組成を調べた²⁶⁾。

その結果、脱脂粟粉の粗たん白質含量(N $\times$ 6.25)は11.1%で、そのうち、水溶性、1M食塩可溶性、70%エタノール可溶性、0.1N酢酸可溶性および0.05N水酸化ナトリウム可溶性たん白質の占める割合はそれぞれ4, 5, 25, 1, 13%であった。したがって Osborne の古典的溶解度法では粟の全たん白質の約半量しか可溶化せず、また可溶化したたん白質においてもその半量以上はエタノール可溶性たん白質(プロラミン)で占められていることが示された。一方、アミノ酸組成に関しては、塩水溶性およびアルカリ可溶性たん白質がいずれも

[†] 本総説は昭和55年度日本栄養・食糧学会奨励賞の対象となったものである。

〒606 京都市左京区下鴨半木町

Table 1. Amino acid composition of foxtail millet proteins isolated by solubility methods.*

Amino acid	Whole flour	Water-soluble	NaCl-soluble	Ethanol-soluble	Acid-soluble	NaOH-soluble
Lysine	1.8	3.6	7.9	0.1	2.3	4.7
Histidine	1.9	1.1	2.4	1.5	1.5	2.2
Arginine	3.5	2.1	9.2	1.8	3.1	4.7
Aspartic acid	7.4	16.7	11.3	5.7	8.0	12.5
Threonine	3.9	5.8	4.8	3.5	3.8	4.9
Serine	5.0	5.3	6.5	5.3	7.3	5.8
Glutamic acid	19.2	21.7	17.4	23.3	24.4	13.8
Proline	8.1	3.7	3.1	9.6	5.7	5.7
Glycine	2.8	6.2	5.8	1.2	4.2	6.1
Alanine	8.4	7.0	6.8	9.9	8.8	7.2
Cystine	1.9	1.8	trace	1.7	trace	2.2
Valine	6.5	5.3	5.5	4.4	4.6	6.1
Methionine	2.9	2.2	1.4	3.6	2.3	3.3
Isoleucine	4.3	4.4	3.8	3.9	3.8	4.1
Leucine	13.6	6.6	7.2	14.5	12.2	7.8
Tyrosine	3.1	2.9	2.4	3.8	2.7	4.5
Phenylalanine	5.7	3.6	4.1	6.3	5.3	4.2

* Grams of amino acid per 100 g of total amino acid.

Fig. 1. Gel filtration profile of foxtail millet prolamin on Sephadex G-100.

The sample (about 200 mg) was dissolved in 3.0 ml of 0.1 M acetic acid containing 6 M urea and the solution was centrifuged at $10,000 \times g$ for 20 min. The supernatant solution was then applied to a Sephadex G-100 column (2.0×90 cm) equilibrated with 0.1 M acetic acid containing 6 M urea, followed by elution with the same solution at a flow rate of 20 ml/hr. Fractions of 3 ml were collected for the determination of the absorbance at 280 nm.

比較的リジンを多く含むのに対し、プロラミンにはほとんど含まれていないという際立った違いが認められた (Table 1)。なお、各たん白質の分子量分布を Sephadex G-100 のゲル濾過で調べたところ²⁷⁾、プロラミン以外のたん白質では分子量約 4 万以下の成分が大部分を占めたのに対し、プロラミンについては分子量 10 万以上の成分がほとんどであり、分子量的分布の面からも著しい差異が認められた。

3. 粟プロラミンのサブユニット構造

前述したようにプロラミンは粟の可溶性たん白質の過半を占める主要な貯蔵たん白質である。しかしながら、本たん白質の性質についてはきわめてわずかの知見しか得られておらず²¹⁾、とくにそのポリペプチド構成に関してはまったく不明のままである。そこで筆者はおもに SDS-ポリアクリルアミドゲル電気泳動法を用いてその解明にあたった²⁸⁾。

脱脂粟粉から塩水溶性たん白質を除去した後、70%エタノール抽出でプロラミンを単離し、さらに Sephadex G-100 のゲル濾過を行なってたん白質を分画した (Fig. 1)。粟プロラミンは F-1~F-4 の 4 成分に分離し、アミノ酸分析の結果²⁹⁾から、分子量 100,000 以上に相当する F-1 と 40,000~100,000 に相当する F-2 がプロラミン

Fig. 2. SDS-polyacrylamide gel electrophoretic patterns of foxtail millet prolamins, F-1 and F-2.

Denaturation of proteins was carried out at 37°C for 20 hours in 1% SDS without β -mercaptoethanol. Electrophoresis was performed in 10% gel at a current of 8 mA per column (0.5×9 cm) for 5 hours. A, foxtail millet prolamins; B, F-1; C, F-2.

を代表する主要成分であると考えられた。つぎに、これらを SDS-ゲル電気泳動すると、非還元系では粟プロラミンは分子量 12,000~76,000 にわたる少なくとも 15 本のポリペプチドのバンドを示し、F-1 はそのうち比較的高分子量域のバンドを、F-2 は比較的低分子量域のバンドを示した (Fig. 2)。一方、還元、S-シアノエチル化²⁹された試料では、これらはみな同一の泳動パターンとなり分子量 12,000 と 21,000 の二つのバンドしか示さなかった (Fig. 3)。

上述の結果は明らかに粟プロラミンがサブユニット構造をとることを示すものである。なお、このサブユニット構造に関しては、最近 Danno と Nataka が詳細な報告を出している³⁰。彼らはプロラミンのみならず筆者の分画では不溶性であるたん白質を SDS で可溶化し、それがプロラミンと同様のサブユニット構造をとることも報告している。したがって粟たん白質は、米や小麦のたん白質とは異なり、その貯蔵たん白質の大部分は単純なポリペプチドの重合体より成っていると考えられる。今後、これら貯蔵たん白質の利用のためにも、さらに詳しい物理化学的性質を究明することが必要と思われる。

4. 粟たん白質の栄養価

さて、粟たん白質の栄養価はどの程度のものであろうか。必須アミノ酸レベルから見た場合、一般に穀類はリジンを第一制限アミノ酸としており³¹、トウモロコシではさらにトリプトファン³²が、また大麦ではスレオニ

Fig. 3. SDS-polyacrylamide gel electrophoretic patterns of reduced and S-cyanoethylated foxtail millet prolamins (SCE-prolamins), F-1 (SCE-F-1) and F-2 (SCE-F-2).

Experimental procedures were the same as those in Fig. 2. A, SCE-prolamins; B, SCE-F-1; C, SCE-F-2.

ン³³、モロコシでは芳香族アミノ酸³⁴が第二制限アミノ酸となっている。粟に関しても、リジンが極端に不足しているという報告⁵⁾⁸⁾³⁵⁾が大部分であるが、実際に動物実験から評価した栄養価の報告は少ない。そこで筆者は通常の市販の粟粒 (韓国産、品種不明) より粟粉および抽出たん白質を調製し、それらのたん白質の栄養価をアミノ酸組成と動物実験結果を対比しながら評定してみた³⁶。また粟粉へのアミノ酸添加の効果についても検討を加えた。なお、粟粉は粟粒を脱殻粉碎して 60 メッシュのふるいを通る粉末として得、抽出たん白質は脱脂粟粉より 0.05 N 水酸化ナトリウム抽出さらに pH 4.8 での等電点沈澱により調製した。

これらのアミノ酸組成を Table 2 に、動物実験結果を Table 3 と 4 に示した。1973 年の FAO/WHO 暫定アミノ酸評点パターン³⁷⁾に対して、粟粉はリジンを第一制限アミノ酸としそのアミノ酸価は約 30、一方抽出たん白質は非常に優れた必須アミノ酸パターンを示しそのアミノ酸価は 100 に近かった。幼ラットにたん白質レベル 10% の飼料を与え 3 週間飼育したときの PER、NPR 値は、粟粉、抽出たん白質ともそのアミノ酸価を反映した値を示した。また成熟ラットを用い 10% たん白質レベルで測定した BV 値も同様の結果を示した。なお、FAO/WHO パターンを満足するよう粟粉に L-リジン塩酸塩 (飼料の 0.4%)、L-スレオニン (飼料の 0.1%) を添加したときはその栄養価は飛躍的に上昇した (Table 3)。

Table 2. Amino acid composition of protein sources.

(g/16 g N)

	FAO/WHO pattern (1973)	Casein	Millet flour	Alkaline-extracted protein
Lysine	5.5	7.68	1.80	5.43
Histidine		2.58	1.84	2.67
Arginine		3.68	3.38	8.24
Aspartic acid		6.81	7.19	8.12
Threonine	4.0	4.01	3.84	4.27
Serine		5.38	4.88	5.16
Glutamic acid		20.67	18.76	13.59
Proline		10.60	7.91	5.09
Glycine		1.92	2.78	5.61
Alanine		2.88	8.20	6.54
Cystine+Methionine	3.5	2.97	4.65	4.21
Valine	5.0	6.15	6.33	6.32
Isoleucine	4.0	5.54	4.23	4.18
Leucine	7.0	10.19	13.25	9.28
Tyrosine+Phenylalanine	6.0	11.74	8.57	9.45
Tryptophan	1.0	1.37	1.84	2.62
Total		104.17	99.45	100.78
Amino acid score		84.9	32.7	98.7

Table 3. PER and NPR of protein sources.

	PER	NPR
Casein	2.59±0.42 ^a	4.31±0.50 ^a
Millet flour	0.29±0.13 ^b	3.32±0.10 ^b
Alkaline-extracted protein	3.28±0.34 ^c	5.34±0.42 ^c
Millet flour supple- mented with lysine and threonine	3.11±0.51 ^e	5.19±0.53 ^o

* Values represent mean±SD of 5 rats per group.

** Values without common superscripts are significantly different ($p<0.05$).

これらの結果から、粟たん白質の低い栄養価はそのプロラミンあるいはプロラミン様たん白質に起因する著しいリジンの低含量のためであると考えられた。粟の必須アミノ酸に関しては、その総量は米や小麦よりも多い¹¹⁾、また、リジンは例外として他の必須アミノ酸のバランスは非常によい³⁸⁾との報告もあり、筆者の実験結果はそのような報告を裏づけるものであろう。なお、黍たん白質の栄養価評価においても、筆者は粟とほぼ同様の成績を得ている³⁹⁾。

5. 米糠たん白質の分別抽出

前述した粟が国内ではその作付けがほとんど見られない“見捨てられゆく既存穀類資源”とするなら、米糠は“注目すべき未利用穀類資源”といえる。実際、世界で生産される米糠の総量はおおよそ 400 万 t のたん白質、500 万 t の食用油、750 億 kcal の熱量に相当する⁴⁰⁾。この米糠の食糧資源としての高い潜在性から、その栄養素成分に関しては数多くの研究がなされている⁶⁾⁴¹⁾。筆者も米糠より Osborne の溶解度法を用いてたん白質を分別抽出し、そのアミノ酸組成や反栄養因子の一つであるトリプシンインヒビター（以下インヒビター）の含量について検討した⁴²⁾。

まずアセトンで脱脂した米糠（日本晴）より、水、5%食塩水、60% エタノール、0.05 N 水酸化ナトリウムを用いてたん白質を個々に抽出したところ、全たん白質のそれぞれ 51.4, 58.7, 10.4, 75.0% が可溶化した⁴²⁾。これら抽出たん白質は皆バランスのよい必須アミノ酸組成を有していたが、エタノール抽出たん白質を除く他のたん白質には高いインヒビター活性が認められた。このインヒビター活性は米糠 1 g 当たり約 1 mg のトリプシンを完全阻害する量に相当し、これは粟に認められた活性の数 10 倍にも相当した（未発表）。なお興味深い点

Table 4. BV, TD, and NPU of protein sources.

	BV	TD (%)	NPU
Casein	65.7±5.7 ^{ac}	99.5±1.0 ^a	65.3±5.7 ^{ac}
Millet flour	61.5±4.4 ^a	96.8±1.3 ^b	59.5±4.4 ^a
Alkaline-extracted protein	78.6±4.8 ^b	97.6±1.1 ^b	76.6±4.6 ^b
Millet flour supplemented with lysine and threonine	71.9±8.8 ^{bc}	96.0±1.6 ^b	69.1±8.9 ^{bc}

* Values represent mean±SD of 5 rats per group.

** Values without common superscripts are significantly different ($p<0.05$).

Table 5. Nitrogen distribution and trypsin inhibitor activity of rice bran proteins isolated by solubility methods.*

	Dialyzable	Albumin	Globulin	Prolamin	Glutelin
Nitrogen distribution (%)	16.6	14.4	26.5	3.2	16.3
Trypsin inhibitor activity (IU)	4.78	5.05	0.671	0	0.364
Specific activity (IU/mg of protein)	0.0171	0.0209	0.00151	0	0.00133

* Values obtained from 10 g of defatted rice bran.

Table 6. Amino acid composition of rice bran proteins isolated by solubility methods.*

	Albumin	Globulin	Prolamin	Glutelin
Lysine	7.67	5.12	5.16	5.02
Histidine	2.53	4.24	3.62	2.91
Arginine	7.60	10.29	8.75	9.03
Aspartic acid	10.09	7.68	7.94	7.92
Threonine	5.38	3.52	3.85	4.38
Serine	4.79	4.47	4.29	4.93
Glutamic acid	11.78	13.54	11.87	13.20
Proline	5.32	4.43	4.93	4.47
Glycine	6.31	5.74	6.33	5.90
Alanine	7.38	6.00	6.38	6.72
Cystine	2.33	4.21	1.62	1.34
Valine	5.91	5.79	5.46	6.38
Methionine	1.89	1.78	1.76	1.97
Isoleucine	3.85	3.97	3.15	4.66
Leucine	6.55	7.22	6.91	8.99
Tyrosine	3.10	3.67	2.54	4.13
Phenylalanine	3.30	5.20	3.99	5.73
Total	96.59	96.87	88.55	97.68

* Grams of amino acid per 16 g of nitrogen.

は、アルカリ抽出によってもインヒビターはほとんど失活しなかったということで⁴²⁾、これは米糠たん白質の利用上の一つの問題点となる可能性がある。

次に、脱脂米糠を5%食塩水、60%エタノール、0.05

N水酸化ナトリウムで順次抽出しアルブミン、グロブリン、プロラミン、グルテリンを単離した。各たん白質の窒素分布およびインヒビター活性を Table 5 に、アミノ酸組成を Table 6 に示した。米糠たん白質は白米の

Table 7. Summary of the purification of rice bran trypsin inhibitor.^a

Fraction	Volume (ml)	[Protein] ^b (mg)	Total act. ^c (units)	Specific act. (units/mg protein)	Ratio	Yield
Extract	3,610	40,300	916	0.0227	1	100
Extract after heat treatment	3,490	21,600	902	0.0418	1.84	98.5
90% (NH ₄) ₂ SO ₄ precipitate after dialysis	500	10,500	852	0.0811	3.57	93.0
1st CM-Sephadex peak	214	353	623	1.76	77.5	68.0
2nd CM-Sephadex peak	158	205	486	2.37	104	53.1
Sephadex G-75 peak	126	168	452	2.69	119	49.3

^a Starting material was 400 g of defatted rice bran.

^b Protein content was determined by the Lowry method.

^c 1 unit is twice the amount of inhibitor required for 50% inhibition of 1 mg of active trypsin based on the spectrophotometric method of Eranger *et al.*

Fig. 4. Isoelectric focusing of the crude rice bran trypsin inhibitor.

● : absorbance at 280 nm, ---- : trypsin inhibitor activity, ○ : pH.

たん白質⁴³⁾⁴⁴⁾に比べアルブミン、グロブリンの占める割合が高く、またインヒビター活性はその大部分がアルブミンと透析性画分に存在しているとの知見を得た。アミノ酸組成から判断した場合は、各たん白質の間ではアルブミンが最も良質であるが同時にインヒビター活性も最大であるため、その栄養価は単純にアミノ酸組成からのみでは判断できないと考えられた。

なお、米糠のインヒビター含量は当然品種の違いにより異なることが考えられるが、そのほかにも米糠中の成分、とくに胚芽成分の多少に左右されることが明らかになっている(未発表)。ここで述べた米糠の場合は比較的インヒビター含量が低い部類に属し、高いものでは1g

の米糠中に約3mgのトリプシンを完全阻害する量のインヒビターが含まれていた。

6. 米糠トリプシンインヒビターの単離精製と性質

穀類起源のインヒビターに関しては、小麦やライ麦の胚芽⁴⁵⁾、大麦⁴⁶⁾、トウモロコシ⁴⁷⁾⁴⁸⁾などからその単離精製が報告されている。米においてもインヒビターの存在および分布についての報告⁴⁹⁾が出されている。ここでは、米糠のインヒビターの単離精製と性質について述べる。

まず精製に先立って、脱脂米糠の1%食塩水抽出液を40~80%硫酸分画し粗インヒビターを調製した。焦点電気泳動分析により、粗インヒビター中には少なくとも2種類のインヒビターの存在が明らかとなった。しかし大部分は等電点が約8のインヒビターであった(Fig. 4)。さらに粗インヒビターに関して予備的に性質を検討し、インヒビターは耐熱、耐pH性で、またその分子量が10,000~25,000のたん白質であることを明らかにした⁵⁰⁾。

以上の知見に基づき単離精製法を確立した⁵¹⁾。その概略をTable 7に示した。400gの脱脂米糠を出発材料とし、1%食塩水による抽出、80°C、10分間の熱処理、90%硫酸飽和による塩析、さらにCM-Sephadex C-25を用いるイオン交換クロマトグラフィーおよび再クロマトグラフィー、最後にSephadex G-75によるゲル濾過を行ない電気泳動的に均一なインヒビター標品を得た。この米糠トリプシンインヒビター(以下RBTI)は、その等電点が8.1、分子量は14,500、また129個のアミノ酸より成る一本鎖ポリペプチドであった⁵¹⁾。

さて、栄養学上最も問題となるのはインヒビターの阻害特異性と安定性である。RBTIの牛トリプシンに対する阻害作用は、Fig. 5に示すように、インヒビター1

Fig. 5. Trypsin inhibition by rice bran trypsin inhibitor.

Trypsin (14.4 μ g for BAPA and 32.9 μ g for casein) was mixed with various amounts of RBTI and the mixture was incubated with BAPA at 37°C and pH 8.0 for 10 min or with casein at 25°C and pH 7.6 for 5 min. The solid line is a linear extrapolation to the equivalence point. ●: Hydrolysis of BAPA, ○: hydrolysis of casein.

mg が酵素 2.6 mg を完全阻害した⁵¹⁾。これをモル比に換算すると 1:1.6 となり, 1:1 阻害と 1:2 阻害の中間型を示した。この特徴的な阻害パターンを説明するために, RBTI と牛トリプシンの相互作用をゲル濾過およびセルロースアセテート膜電気泳動法で解析した⁵²⁾。両者は 1:1 と 1:2 の 2 種類の複合体を形成しうることが明らかとなり, これが特徴ある阻害パターンを生み出すものと判断した。さらに, このことより RBTI は 1 分子中に牛トリプシンに対する阻害活性部位を 2 個有する 2 頭性のインヒビターであることが示された。一方, RBTI はキモトリプシン, スブチリシン BPN', パニン, ペプシンに対しては無効であった⁵¹⁾。したがって, RBTI はセリンプロテアーゼのうちトリプシン型の酵素のみを阻害するきわめて特異性の狭いインヒビターであると考えられた。

牛以外の動物のトリプシンに対する RBTI の阻害作用はどうであろうか。とくに, 単胃哺乳類起原のトリプシンに対する阻害作用は栄養学的見地からも興味ある点である。そこで RBTI をリガンドとするアフィニティー・カラムを作成し, 市販の牛および豚トリプシン, またラットのすい臓より調製した粗トリプシン, 人すい液を試料とし, アフィニティー・クロマトグラフィーを行なった⁵³⁾。いずれのトリプシンもカラムに吸着し, RBTI とこれらトリプシンとが結合しうることを確認した。酸性下でカラムよりトリプシンを溶出し, これらを酵素材料として RBTI による阻害作用を調べた結果が Fig. 6 で

Fig. 6. Inhibitor activity of rice bran trypsin inhibitor against bovine, hog, rat and human trypsin isolated by affinity chromatography on a RBTI-Sepharose column.

ある。阻害強度に差は認められるものの, いずれのトリプシンも RBTI により阻害されることが判明した⁵³⁾。

安定性に関しては, RBTI は pH 1~11, 37°C, 24 時間放置後も 90~100% の活性を示し, また酸, 中性 pH 下では, 80°C, 30 分間の熱処理でも 90% 以上の活性を保持していた⁵³⁾。さらに, RBTI のプロテアーゼ消化に対する抵抗性を調べたところ, キモトリプシン消化によってはまったく活性を失わず, またペプシン消化においても 24 時間反応後でさえ約 70% の活性を保っていた⁵³⁾。したがって, RBTI が単胃動物に摂取されたときは十分活性なままで腸管に達できると推測された。

7. 米糠たん白濃縮物の栄養価

一般に, 植物は天然の毒物や反栄養因子をかなり有していることが知られている¹⁹⁾⁵⁴⁾。既述したように, 米糠中にも反栄養因子の一つであるインヒビターが大量に存在している。このインヒビターの栄養学的意義に関しては, おもに大豆のインヒビターを題材として多くの報告があり^{55)~59)}, インヒビターを摂取したラットに生育阻害やすい臓肥大の生じることを報告している。そこで筆者はインヒビター活性を有する米糠たん白濃縮物を調製し, その栄養価を検討した²⁰⁾⁶⁰⁾。

まず, 脱脂米糠の 1% 食塩水抽出液に 2 倍量のアセトンを加え, たん白質を沈殿させ, さらにこれを凍結乾燥して米糠たん白濃縮物 (RBPC) を得た。RBPC は粗たん白質含量約 50% で, 必須アミノ酸パターンの良好なアミノ酸組成を示した (Table 8)。一方, 本品 1g は牛トリプシン 6mg を阻害する量のインヒビター活性も有していた。

次に, 幼ラットに唯一のたん白質源として RBPC を

摂取させ2週間の成長実験を行なった。対照としてはオートクレーブ処理してインヒビターを失活させた heated RBPC, およびカゼインを与えた。Table 9 に示すように、2週間の体重増加量はカゼイン区が最高で heated RBPC 区, RBPC 区の順に小さく, RBPC 摂取

ラットに生育抑制がみられた。なお摂取飼料効率 (FE) においても RBPC 区は有意に低かった。実験期間中3回にわたりたん白質の見かけの消化率を測定した結果では, RBPC 区と heated RBPC 区間には差は認められなかった (Table 10)。さらに成長実験終了後ラットを殺し, すい臓を摘出し, その重量とプロテアーゼ活性を測定した。RBPC 区は heated RBPC 区に比べ若干すい臓が肥大しており, また酵素活性も高かった²⁶⁾。以上の結果から, heated RBPC が RBPC より高い栄養価を示したのは, オートクレーブ処理によりたん白質の消化性が向上したためではなく (事実, ペプシンによる人工消化試験では, むしろ RBPC のほうが heated RBPC より高い消化率であった⁶⁰⁾), 熱処理によりインヒビターの生育抑制機作は, 単純なラット腸内におけるインヒビターの消化阻害のみでは説明できず, 大豆インヒビターで認められたように⁵⁹⁾, すい液の過剰分泌による内的窒素損失も一つの原因となっていると考察された。なお, この過剰分泌された内因性窒素成分は腸内細菌等の作用により体にあまり利用されない形で吸収されているものと思われる。この点に関しては, 今後明確な実証が必要と思われるし, また他の反栄養因子の存在の有無やその影響についても検討する必要がある。

8. おわりに

粟や米糠などの低利用あるいは未利用穀類資源の有効利用という立場から, これらのたん白質の諸性質ならびに栄養価に関して研究を進めてきた。その結果, 粟たん

Table 8. Amino acid composition of casein and rice bran protein concentrate (RBPC).*

Amino acid	Casein	RBPC
Lysine	7.77	6.11
Histidine	2.61	3.08
Arginine	3.72	9.62
Aspartic acid	6.90	9.24
Threonine	4.06	3.81
Serine	5.45	4.64
Glutamic acid	20.91	14.62
Proline	10.73	2.90
Glycine	1.95	6.16
Alanine	2.91	6.19
Cystine	0.22	1.87
Valine	6.23	5.25
Methionine	2.78	1.67
Isoleucine	5.60	3.21
Leucine	10.32	5.98
Tyrosine	6.27	2.93
Phenylalanine	5.64	3.59

* Grams of amino acid per 16 g of nitrogen.

Table 9. Body weight gain, food consumption and feed efficiency of rats fed experimental diets.

	Casein	RBPC	Heated-RBPC
Body-wt. gain (g)	44.7±14.8	13.8± 5.9	29.1±14.8
Food intake (g)	141.5±18.8	116.3±19.5	131.1±22.8
Feed efficiency	0.311±0.07 ^a	0.116±0.04 ^b	0.205±0.08 ^c

Values represent mean±SD of 5 rats per group.

Values without common superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

Table 10. Apparent nitrogen digestibility for rats fed experimental diets.

	Casein	RBPC	Heated-RBPC
2- 3 day	88.7±1.54 ^a	74.4±7.73 ^b	76.1±8.14 ^b
7- 8 day	89.4±2.47 ^a	78.3±2.08 ^b	81.3±1.82 ^b
12-13 day	91.1±2.08 ^a	80.6±2.47 ^b	81.9±4.45 ^b

Values represent mean±SD of 5 rats per group.

Values without common superscripts are significantly different ($p < 0.01$).

白質の大部分を占めるプロラミン様たん白質が分子量を異にする2種のサブユニットの重合体から構成されていることを明らかにした。また、粟たん白質全体の低い栄養価は、プロラミンの著しく低いリジン含量に由来すること、したがって必須アミノ酸パターンを改善するよう不足するリジンやスレオニンを補強した場合はその栄養価を飛躍的に高めうることを実証した。このことは同時に、粟の必須アミノ酸パターンを改善するのに適した他の食品、たとえば比較的にリジンに富む大豆などの豆類と粟の混食が優れた栄養価を示すであろうことを推測させる。古来より粟は“健康増強の食物”と伝えられてきたが、この理由の一部は上述の食事構成が期せずしてとられてきたことにあるのではないだろうか。今後、これらの点を実証することも興味あることと思われる。

一方、米糠たん白質は優れた必須アミノ酸組成を有し、栄養的に満足できるたん白質として利用できると考えられてきた。しかしながら、筆者が明らかにしたように条件によっては、たん白濃縮物あるいは単離物中に大量のインヒビターが混入してくる可能性がある。そしてこの反栄養因子の存在は明らかにラットに対しては障害となった。この筆者の得た成績が直接人間の場合にもあてはまるとはいいがたいが、少なくともその存在は好ましいものではない。したがって米糠たん白質などの新資源の開発には、インヒビターを含め種々の反栄養因子に関して、それらの諸性質や動態を明らかにし、有効な対策法を準備することが必要と思われる。

筆者のこの一連の研究はまだ緒についたばかりであり、まだいろいろと突っ込み不足の感も否めないと感じる次第であるが、今後さらに研究を進め、食品学と栄養学の境界を埋めていきたいと考えている。

本稿を終えるにあたり、執筆の機会をいただきました日本栄養・食糧学会に厚くお礼申し上げます。また本研究は京都府立大学生活科学部食物学科栄養学・調理学講座で行なわれたものであり、終始変わらぬご指導、ご鞭撻を賜りました本講座の牧 善輔教授、ならびに本学農学部金森正雄教授、伊吹文男助教授に深甚の謝意を表します。また本実験に協力していただきました数多くの講座専攻の皆様にも心より感謝の意を表します。

文 献

- 1) Badi, S.M., Hoseney, R.C. and Casady, A.J.: *Cereal Chem.*, 53, 478 (1976)
- 2) Freeman, J.E. and Bocan, B.J.: *Cereal Sci. Today*, 18, 69 (1973)
- 3) Casey, P. and Lorenz, K.: *Bakers Digest*, 2, 45 (1977)
- 4) 戸刈義次, 菅 六郎: 食用作物, 296 (1965), 養賢堂 (東京)
- 5) Mangay, A.S., Pearson, W.N. and Darby, W.J.: *J. Nutr.*, 62, 377 (1957)
- 6) Houston, D.F.: *Rice; Chemistry and Technology* (Houston, D.F., ed.), 272 (1972), Am. Assoc. Cereal Chemists (St. Paul)
- 7) Adolph, W.H. and Cheng, F.W.: *Chem. J. Physiol.*, 9, 245 (1935)
- 8) 平 宏和: 栄養と食糧, 15, 57 (1962)
- 9) 平 宏和: 植物学雑誌, 75, 242 (1962)
- 10) 平 宏和: 植物学雑誌, 75, 273 (1962)
- 11) 李 鉉琪: 栄養と食糧, 23, 140 (1970)
- 12) Burton, G.W., Wallace, A.T. and Rachie, K.O.: *Crop Sci.*, 12, 187 (1972)
- 13) Galyean, R.D., Laney, J.A., Harden, M. and Krieg, D.: *J. Food Sci.*, 45, 1165 (1980)
- 14) 高橋理平, 一寸木宗一, 前川昭男, 鈴木隆雄, 松本信二, 小原哲二郎: 栄養と食糧, 31, 491 (1978)
- 15) Lynn, L.: *Protein-enriched Cereal Foods in World Needs*, 154 (1969), Am. Assoc. Cereal Chemists (St. Paul)
- 16) Houston, D.F., Allis, M.E. and Kohler, G.O.: *Cereal Chem.*, 46, 527 (1969)
- 17) Chen, L. and Houston, D.F.: *Cereal Chem.*, 47, 72 (1970)
- 18) 満田久輝, 村上和雄, 高木宗司: 栄養と食糧, 23, 80 (1970)
- 19) Liener, I.E.: *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 56, 121 (1979)
- 20) Osborne, T.B.: *The Vegetable Proteins*, 2nd ed. (1924), Longmans, Green and Co. (London)
- 21) Jones, R.W. and Beckwith, A.C.: *J. Agric. Food Chem.*, 18, 33 (1970)
- 22) Jones, R.W., Beckwith, A.C., Khoo, U. and Inglett, G.E.: *J. Agric. Food Chem.*, 18, 37 (1970)
- 23) Sodek, L. and Wilson, C.M.: *J. Agric. Food Chem.*, 19, 1144 (1971)
- 24) Haikerwal, M. and Mathieson, A.R.: *J. Sci. Food Agric.*, 22, 142 (1971)
- 25) Wu, Y.V., Sexson, K.R., Cavins, J.F. and Inglett, G.E.: *J. Agric. Food Chem.*, 20, 757 (1972)
- 26) Tashiro, M.: *Doctor's Thesis* (Kyoto Univ., Fac. Agr.), 5 (1980)
- 27) 牧 善輔, 田代 操, 堀内晶子: 京府大学報 (理学・生活科学), 28号, 17 (1977)
- 28) 牧 善輔, 田代 操: 栄養と食糧, 32, 317 (1979)
- 29) Beckwith, A.C., Wall, J.S. and Jordan, R.W.: *Arch. Biochem. Biophys.*, 112, 16 (1965)
- 30) Danno, G. and Nataka, M.: *Agric. Biol. Chem.*, 44, 913 (1980)
- 31) Block, R.J. and Mitchell, H.H.: *Nutr. Abst. Rev.*, 16, 249 (1946)
- 32) Mitchell, H.H. and Smuts, D.B.: *J. Biol. Chem.*, 95, 263 (1932)
- 33) Howe, E.E., Jansen, G.R. and Gilfillan, E.W.: *Am. J. Clin. Nutr.*, 16, 315 (1965)
- 34) Deyoe, C.W. and Shellenberger, J.A.: *J. Agric. Food Chem.*, 13, 446 (1965)
- 35) Baptist, N.G. and Perera, B.P.M.: *Brit. J. Nutr.*, 10, 334 (1956)
- 36) 田代 操, 牧 善輔: 栄養と食糧, 32, 299 (1979)
- 37) 井上五郎 (訳), 必須アミノ酸研究委員会 (編): エネルギー・蛋白質の必要量 (FAO/WHO 合同特別専門委員会報告), 62 (1974), 日本必須アミノ酸協会刊, 医歯薬出版 (東京)
- 38) Jansen, G.R., DiMuo, L.R. and Hause, N.L.:

- J. Agric. Food Chem.*, 10, 62 (1962)
- 39) 田代 操, 牧 善輔: 京府大学報 (理学・生活科学), 28号, 23 (1977)
 - 40) Barber, S.: Proc. 5th Intern. Cong. Food Sci. Tech. (Chiba, H., Fujimaki, M., Iwai, K., Mitsuda, H. and Morita, Y., eds.), 112(1979), Kodansha (Tokyo)
 - 41) Barber, S.: Rice; Production & Utilization (Luh, B.S., ed.), 790 (1980), Avi Publishing Co. (Westport)
 - 42) 田代 操, 牧 善輔: 京府大学報 (理学・生活科学), 30号, 27 (1979)
 - 43) Houston, D.F., Iwasaki, T., Mohammad, A. and Chen, L.: *J. Agric. Food Chem.*, 16, 720 (1968)
 - 44) Cagampang, G.B., Cruz, L.J., Espiritu, S.G., Santiago, R.G. and Juliano, B.O.: *Cereal Chem.*, 43, 145 (1966)
 - 45) Hochstrasser, K. and Werle, E.: *Hoppe-Seyler's Z. Physiol. Chem.*, 350, 249 (1969)
 - 46) Mikola, J. and Suolinna, E.-M.: *Eur. J. Biochem.*, 9, 555 (1969)
 - 47) Hochstrasser, K., Muss, M. and Werle, E.: *Hoppe-Seyler's Z. Physiol. Chem.*, 348, 1337 (1967)
 - 48) Swartz, M.J., Mitchell, H.L., Cox, D.J. and Reeck, G.R.: *J. Biol. Chem.*, 252, 8105 (1977)
 - 49) Horiguchi, T. and Kitagishi, K.: *Plant Cell Physiol.*, 12, 907 (1971)
 - 50) Tashiro, M. and Maki, Z.: *Agric. Biol. Chem.*, 42, 1119 (1978)
 - 51) Tashiro, M. and Maki, Z.: *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, 25, 255 (1979)
 - 52) Maki, Z., Tashiro, M., Sugihara, N. and Kanamori, M.: *Agric. Biol. Chem.*, 44, 953 (1980)
 - 53) 田代 操, 衫原伸夫, 有地和世, 牧 善輔, 金森正雄: 第34回日本栄養・食糧学会総会講演要旨集, 137 (1980)
 - 54) Liener, I.E. and Kakade, M.L.: Toxic Constituents of Plant Foodstuffs (Liener, I.E., ed.), 7 (1969), Academic Press (New York)
 - 55) Saxena, H.C., Jensen, L.S. and McGinnis, J.: *J. Nutr.*, 80, 391 (1963)
 - 56) Kwong, E. and Barnes, R.H.: *J. Nutr.*, 81, 392 (1963)
 - 57) Nitsan, Z. and Alumot, E.: *J. Nutr.*, 84, 179 (1964)
 - 58) Khayambashi, H. and Lyman, R.L.: *J. Nutr.*, 89, 455 (1966)
 - 59) Kakade, M.L., Simons, N. and Liener, I.E.: *J. Nutr.*, 100, 1003 (1970)
 - 60) 田代 操, 牧 善輔: 第33回日本栄養・食糧学会総会講演要旨集, 127 (1979)

(昭和56年2月4日受理)