

大豆乳清たん白質の栄養価

NUTRITIVE VALUE OF SOYBEAN WHEY PROTEIN IN YOUNG RATS AND HUMAN ADULTS

岸 恭一・寺井幸子・大栗幸子・志塚ふじ子・山本 茂（徳島大学
医学部）
井上五郎（甲子園大学）

Kyoichi KISHI¹, Sachiko TERAI¹, Sachiko Ooguri¹, Fujiko SHIZUKA,¹ Shigeru
YAMAMOTO¹ and Goro INOUE²

¹ Department of Nutrition, School of Medicine, The University of Tokushima,
Tokushima 770

² Koshien University, Takarazuka 665

ABSTRACT

Soybean whey contains 7~9% of the total protein present in the soybean meal and the quality of soybean whey protein is supposed to be higher than that of acid precipitated soy protein isolate (SPI). However, soybean whey is presently discarded as a waste product of SPI processing because of antinutritional components and presents a waste disposal problem. In the present study we determined the digestibility and the utilization of soybean whey protein (SWP) in growing rats (Expt. 1) and human adults (Expt. 2). SWP was separated from whey solution (pH 4.5 supernatant) by ultrafiltration (MW=40,000) and was heated at 168°C for two minutes followed by lyophilization. In experiment 1, male rats of the Wistar strain weighing about 60 g were fed *ad libitum* 3, 5, 10 and 15% (N x 6.25) SWP, 10% SPI, 0.3% methionine supplemented 10% SPI (SM) and 10% casein (C) for 21 days. Rats receiving SWP showed lower food intake but comparable weight gain with SM and C groups of rats. The weight gain of SPI group was lowest among groups. The digestibility of SWP was lower than SPI and C but net protein utilization was similar to SM and better than SPI and C. In experiment 2, four healthy male subjects received a SPI diet and a SWP diet for 10 days each at 90 mg/kg/day of N intake. Dry fecal weight was significantly heavier in SWP than SPI (28.8 vs. 21.0 g/day). Thus the digestibility of SWP (92.2%) was lower than SPI (99.5%). However, the biological value of SWP was comparable to SPI. It was concluded that the quality of SWP used in the present study was higher but the digestibility was lower than those of SPI. *Nutr.Sci. Soy Protein Jpn.* 7, 47-52, 1986.

豆類中にはトリプシン・インヒビター、ヘマグルチニン、ゴイトロジェン、サポニン、その他の種々の栄養阻害物質が含まれており、大豆もその例外ではない¹⁾。実際、Osborne and Mendel²⁾はラットに生大豆を与え、正常に成長しないことをずっと以前に報告している。しかし、適切に処理された分離大豆たん白質

（以下 SPI）は栄養価が高く、メチオニン添加 SPI は幼若ラットを正常に成長させ³⁾、乳幼児に対しても牛乳たん白質と同程度の効果を持つ⁴⁾。さらに、成人においては、短期間の窒素平衡の維持にはメチオニン添加は必要ではなく⁵⁾、長期間の SPI 摂取実験においても、牛肉やミルク等の動物性たん白質に匹敵することが明

らかにされている⁹⁾。

SPIを除いた残りの大豆乳清は、脱脂大豆ミール固形分の約30%に相当し、ミール中のたん白質の7~9%を占める⁷⁾にもかかわらず、ほとんど利用されていない。それは、上に述べた大豆中の栄養阻害物質の大半が乳清画分に集まり、そのままでは食用にならないからである。大豆乳清は食用に供されず無駄に捨てられているばかりではなく、生物学的酸素要求量が高いため廃液処理の上でも問題となる⁸⁾。大豆乳清たん白質の必須アミノ酸含量は、メチオニン及びシスチンを含めて、SPIよりも明らかに多く⁷⁾、大豆乳清たん白質の栄養価はSPIよりも高いと考えられる。そこで、大豆乳清を限外濾過後、加熱処理して得た大豆乳清たん白質の栄養価を成長期ラット(実験1)並びに成人男子(実験2)について調べた。

実験方法

大豆乳清たん白質

豆乳のpH 4.5 上清(ホエー)を材料とした。この上清を分画分子量40,000のフィルターを用いて限外濾過し、約20倍の濃縮ホエーを得た。洗浄のため、これに等量の水を加え、同様のフィルターによる限外濾過を2度繰り返した。これに等量の水を加え、NaOHで中和した。

予備実験

上のようにして得られたホエー中のトリプシン・インヒビターを失活させるために、以下の4種の条件で加熱処理を行なった。加熱には瞬間殺菌器を用い、1) (WP1) 140℃, 2分, バルブ¼開, 2) (WP2) 168℃, 2分, バルブ¼開, 3) (WP3) 168℃, 2分, バルブ全開, 4) (WP4) レトルト殺菌器により 135℃, 1分加熱。WP1 から4までのトリプシン・インヒビター活性はそれぞれ95, 51, 24及び9.5 TIU/mgたん白質であった(Table 1)⁹⁾。WP3のトリプシン・インヒビター

活性は非透析、非加熱ホエーの1/10以下であり、市販のSPIの2倍程度である。たん白質含量($N \times 6.25$)は乾物当たりいずれも約68%であった。これらの大豆乳清サンプルは不二製油株式会社研究所につくって頂いた。

これらのサンプルを用いてラットの成長試験を行った。初体重約69gのWistar系雄ラットに10% ($N \times 6.25$) たん白質食を自由に与えて3週間飼育した。実験期末3日間の糞を採集し、見かけの消化吸収率を算定した。

実験結果をTable 1に示す。加熱が軽度であったWP1が最もトリプシン・インヒビター活性が強く、消化吸収率も84%と他の3群よりも有意に低値であった。体重増加量及びたん白質効率(PER)もWP1が他の3群よりも有意に低く、それらの差は消化吸収率の差以上であると思われる。WP1以外の3群間には差は見られなかった。

予備実験の結果より、以下の実験1及び2においては大豆乳清たん白質源としてWP3を用いることにした。

実験1 成長期ラット

初体重約60gのWistar系雄ラット各群5匹に7種類のたん白質食を自由に与えて3週間飼育した。内因性窒素排泄量を測定するため無たん白質食群(6匹)を別に設け、同期間飼育した。たん白質源として大豆乳清たん白質(以下SWP)(3, 5, 10及び15%), SPI(10%及びそれにL-メチオニンを0.3%添加したもの)及びカゼイン(10%)を用いた。いずれのたん白質レベルも $N \times 6.25$ で計算した。それぞれのたん白質に、塩混合5, ビタミン混合1, コーンオイル5, セルロース2を加え、コーンスターチとシュクロースの2:1混合で100とした。

実験期末3日間の糞を採集し、たん白質の消化吸収率を算定した。飼育終了後、血液性状、肝組成等を分

Table 1. Effect of heat treatment on trypsin inhibitor activity and the nutritive value of soybean whey protein

Soybean whey ¹	Trypsin inhibitor ²	No. of rats	Food intake	Weight gain	Apparent digestibility	PER ³
	(TIU/mg protein)		(g/day)	(g/day)	(%)	
WP1	95	5	12.3±0.8	4.4±0.3	84.0±1.0	3.6±0.1
WP2	51	5	13.3±1.6	5.6±0.6	86.6±0.5	4.2±0.2
WP3	24	5	13.3±1.4	5.6±0.5	87.0±1.0	4.3±0.1
WP4	10	5	13.8±1.2	5.8±0.4	85.8±0.9	4.3±0.2

1. See text.

2. Activity is expressed in terms of trypsin units inhibited (ref. 9).

3. Protein efficiency ratio.

析したが、特記すべき結果は得られなかった。体組成を分析し、窒素量より正味たん白質利用効率 (NPU) を算出した。

実験 2 成人男子

健康な男子大学生 4 名を被験者とした (Table 2)。実験期間は前報⁹⁾と同じである。即ち、無たん白質食 1 日とそれに続く 10 日間の低たん白質食期からなる実験食期を、3 日間の自由食期をはさんで 2 回繰り返した。1 回目の低たん白質食期にはたん白質源として SPI (Fujipro R) を用い、2 回目は SWP (前記 WP3) を与えた。

SWP 及び SPI の粗たん白質含量 ($N \times 6.25$) は乾物当たりそれぞれ 90.5 及び 79.5% であった。これらにデンプン、調味料等を加え、カマボコの形にして食させた。摂取 N 量は両方共 90 mg/kg/day とした。エネルギー源としてコーンスターチ、グラニュー糖、粉あめ、コーンオイル、ショートニング等を用い、摂取エネルギー量は体重維持を目標として 45 kcal/kg とした (被験者の 1 人は消費エネルギーが大であったので 53

kcal/kg とした)。ビタミン混合及びミネラル混合は十分与えた。便通のため寒天 5 g/日を加えた。

尿と糞は毎日集め、各実験期末 4 日間の尿中 N と 9 日間の糞中 N より窒素出納を求め、消化吸収率並びに生物価を算定した。各実験期末に採血し、窒素成分及び脂質成分を分析した。

結 果

実験 1

各群の摂食量と体重変化を Table 3 に示した。無たん白質食群の摂食量は最も低く、体重は低下したが、飼料中の SWP 量が増すにつれ、摂食量及び体重は大となった。10% たん白質食群間で比較すると、SWP 群の摂食量はメチオニン添加 SPI 群及びカゼイン食群より有意に ($p < 0.05$) 少なかったが、体重増加量はやゝ低値であったものの有意の差ではなかった。SPI 群の成長は他の 3 群より明らかに劣っていた。

SWP の消化吸収率は全レベル平均 87.1% であり、これは SPI 並びにカゼインの 93~95% に比べ有意に

Table 2. Characteristics of the male subjects

Subj.	Age	Height	Weight	BMR ¹	Upper arm circumference	Skin-fold thickness	
						Subscapular	Upper arm
	(year)	(cm)	(kg)	(kcal/kg)	(cm)	(mm)	(mm)
A	22	177	64.9	22.7	27.5	7.8	5.9
B	20	175	66.2	21.9	29.2	11.3	4.8
C	21	169	61.0	23.5	29.5	10.4	6.4
D	23	166	60.0	23.8	26.0	9.4	5.4
Mean	22	172	63.0	23.0	28.1	9.7	5.6
SD	1	5	3.0	0.9	1.6	1.5	0.7

1. Basal metabolic rate.

Table 3. Nutritive value of soybean whey protein in growing rats

Diet ¹	No. of rats	Food intake	Weight gain	True digestibility	PER ²	NPU ³
		(g/day)	(g/day)	(%)		
PFD	6	5.7±0.7	-0.6±0.1			
W 3	5	8.7±0.9	1.3±0.3	85.5±3.2	4.8±0.5	110.7±7.2
W 5	5	9.7±1.0	2.3±0.5	85.1±3.1	4.7±0.4	90.2±5.5
W 10	5	13.8±1.5	5.9±0.7	88.5±1.6	4.3±0.2	77.3±3.7
W 15	5	15.5±1.6	7.6±1.1	89.1±1.5	3.3±0.2	64.2±3.0
S 10	5	15.0±1.5	4.5±0.6	93.4±1.3	3.0±0.1	55.7±5.2
SM 10	5	16.0±0.4	6.6±0.1	95.1±2.0	4.1±0.1	78.0±2.0
C 10	5	16.1±0.6	6.2±0.4	94.5±0.6	3.9±0.1	71.4±2.3

1. PFD: protein free diet, W3~W15, 3-15% soybean whey protein, S10: 10% soy protein isolate, SM10: 10% soy protein isolate+0.3% L-methionine, C10: 10% casein.

2. Protein efficiency ratio.

3. Net protein utilization determined from carcass nitrogen.

低い。たん白質効率 (PER) 及び NPU は同様の傾向を示し, SWP はメチオニン添加 SPI と同様最も高い利用効率を示し, メチオニン非添加 SPI 及びカゼインよりも勝れていた。3 から10%の間において, SWP の摂取N量(X: g/21 days) と体N量 (Y: g) との間に高い相関関係が認められ ($r=0.996$), $Y=0.693X+1.70$ ($n=15$) の回帰直線式が得られた (Fig. 1)。この式の傾きより求められる SWP の NPU は69.3となる。

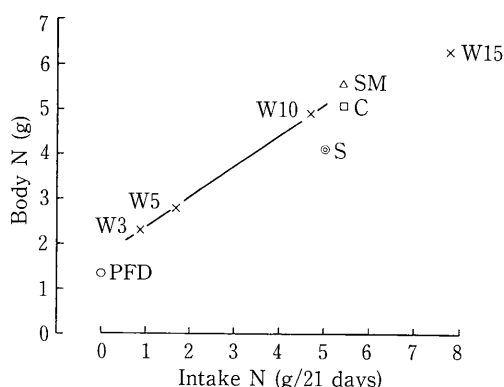


Fig. 1. Body nitrogen in relation to nitrogen intake in growing rats fed various proteins. W3-W15, 3-15% whey protein; PFD, protein free diet; S, 10% soy protein isolate; SM, 0.3% methionine supplemented 10% soy protein isolate; C, 10% casein. The regression of body N (Y: g) on whey protein intake (X: g N/21 days) between 3 to 10% diet was as follows; $Y=0.693X+1.70$ ($n=15$, $r=+0.996$).

実験2

窒素出納のデータを Table 4 にまとめた。尿中N量には, SWP と SPI の間には差は見られなかった。しかし糞重量が4人の被験者のいずれも SWP 期に増加し, SPI 期の平均1.4倍となり (Table 5), 糞中N量も明らかに多かった (Table 4)。従って消化吸収率も SWP では92.2%と低く, SPI の99.5%よりも明らかに劣っていた。

糞N量に差は見られたが, 窒素出納は両たん白質の間には差はなく (Fig. 2), その結果生物価も SPI の35.6に対し, SWP では33.7と両者ほぼ等しかった (Table 5)。

血液分析の結果を Table 6 に示したが, 測定した項目のいずれにも両たん白質の間に著しい差は見られなかった。

Table 4. Nitrogen balance data for subjects receiving soybean whey protein and soy protein isolate (mg/kg/day)

Subj.	Intake N	Fecal N	Urinary N	N balance
Soybean whey protein				
A	91.2	19.6	81.2	- 9.6
B	90.4	20.2	78.2	- 8.0
C	91.5	19.0	103.8	-31.3
D	90.6	20.5	92.5	-22.4
Mean	90.9	19.8***	88.9	-17.8
SD	0.5	0.7	11.9	11.1
Soy protein isolate				
A	91.1	11.1	85.9	- 6.0
B	90.2	13.3	75.7	+ 2.1
C	91.3	13.2	104.4	-26.2
D	91.1	13.4	104.9	-28.0
Mean	90.9	12.7	92.0	-13.8
SD	0.5	1.1	13.6	13.5

*** Significantly different from soy protein isolate.

Table 5. Digestibility and biological value of soybean whey protein (SWP) and soy protein isolate (SPI) in young men

Subj.	Dry fecal weight		Digestibility		Biological value	
	SWP	SPI	SWP	SPI	SWP	SPI
	(g/day)		(%)			
A	32.6	20.1	92.5	100	43.2	43.9
B	35.1	24.1	91.8	99.4	45.9	52.7
C	23.7	20.4	93.1	99.5	17.2	21.8
D	23.6	19.5	91.3	99.2	28.5	24.1
Mean	28.8*	21.0	92.2***	99.5	33.7	35.6
SD	6.0	2.1	0.8	0.3	13.4	15.1

*, *** Significantly different from SPI
(* $p<0.05$, *** $p<0.001$)

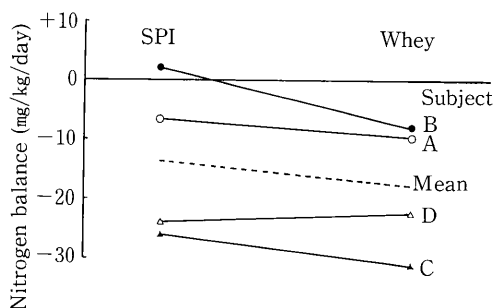


Fig. 2. Nitrogen balance in men given soy protein isolate or soy whey protein diet (90 mg N/kg/day)

Table 6. Blood analyses of the subjects receiving soybean whey protein (SWP) and soy protein isolate (SPI)

	SWP	SPI
Specific gravity		
Whole blood	1.058±0.003 ¹	1.058±0.001
Plasma	1.026±0.001	1.025±0.001
Hematocrit	45.6±2.1	44.5±3.4
Hemoglobin (g/100 ml)	16.0±1.0	16.4±1.0
Total protein (g/100 ml)	7.0±0.7	6.8±0.5
Albumin (g/100 ml)	3.2±0.2	3.3±0.2
Transferrin (mg/100 ml)	358±35	355±38
Urea N (g/100 ml)	7.0±1.9	5.7±0.9
GOT (Karmen units)	17±3	27±7
GPT (Karmen units)	12±3	14±3
Total lipid (mg/100 ml)	405±83	346±53
Triglyceride (mg/100 ml)	132±53	98±35
Total cholesterol (mg/100 ml)	160±30	155±30
HDL-cholesterol (mg/100 ml)	58±22	58±19

1. Data are means ± SD.

考 察

大豆には、アミラーゼ、リパーゼ、リボキシゲナーゼ、プロティナーゼ、ウレアーゼ等の酵素、プロテアーゼ阻害因子、ヘマグルチニン (SHA)、サポニン、その他、人間や動物に対して生理的、栄養的に影響を及ぼす多くの生理活性物質が含まれており、そのほとんどが大豆乳清区分に移行する。そのため、大豆乳清をそのままたん白質源として幼若ラットに与えると、摂食量は低下し、体重は減少する。消化吸収率も約55%と低い(未発表データ)。幸いなことに、大豆に存在する栄養阻害物質の大部分は加熱処理により失活する。例えば、トリプシン・インヒビター (TI) は108℃、15分の湿熱処理により失活¹⁰⁾、SHAは胃内消化あるいは100℃、5分の湿熱処理で容易に壊れる¹¹⁾。しかし加熱し過ぎると、TI、SHA等は消失するものの、たん白質の栄養価を逆に低下させ、機能特性を変化させる。また糖が共存すると Maillard 反応をおこし、アミノ酸の利用の低下を招く。今回、分画分子量40,000で3度限外濾過し、168℃、2分間熱処理した SWP を用いたが、消化吸収率は幼若ラットで87%、成人で92%にとどまり、SPI の95~99%に比し明らかに低値であった。用いた SWP の TI 活性は24 mg/mg たん白質であり、SPI の約2倍に過ぎず、SHA については測定していないが TI よりも容易に失活し、大豆では余り問題にならない¹²⁾ことから、それら以外の因子によると考えられる。Liener¹²⁾によれば、生大豆による成長抑

制の内 TI 作用によるものは40%に過ぎず、消化吸収率の低い理由として未変性大豆たん白質がトリプシン作用を受け難いことを挙げている。さらに、Hafez and Mohamed¹³⁾は総 TI 活性の27~55%は非たん白質性の TI であると報告しており、また Schingoethe^{14,15)}らは実際に分子量5,000以下の低分子の成長阻害因子を分離している。

実験1で SWP の消化吸収率は SPI よりも劣っていたが、幼若ラットの成長及び NPU は SPI よりも明らかに良好で、NPU はカゼインよりもさらに高値を示し、メチオニン添加 SPI と等しかった。即ち、SWP は SPI よりも良質であると言えるが、消化性を改善する必要があると残されている。成人についての窒素出納の結果では、SWP と SPI の間に差は認められなかったが、これは SPI がもともと成人にとっては十分に良質である⁹⁾ためと考えられる。今後、栄養阻害物質を失活させ、食用たん白質の栄養価や機能を損わないような加熱条件の設定、活性炭による吸着除法¹⁶⁾、透析による低分子物質の除去等について試みたいと考えている。

大豆乳清中には糖質が含まれており、加熱により褐変反応は避けられない。褐変した SWP は特有の味を呈し、実験2において被験者の食欲を低下させた。実験1で SWP 群の摂食量がカゼイン群より低値を示した一因は味にあると考えられる。食用に供する場合味の問題は大きく、味の改善法についても研究する必要があると思われる。

文 献

- 1) Liener, I. R. (1962): Toxic factors in edible legumes and their elimination. *Am. J. Clin. Nutr.*, **11**, 281-298.
- 2) Osborne, T. B. and Mendel, L. B. (1917): The use of soybean as food. *J. Biol. Chem.*, **32**, 369.
- 3) 井上五郎, 岸 恭一, 八木郁子 (1980): 分離大豆たん白質へのメチオニン補足量に関する研究. 大豆たん白質栄養研究会会誌, **1**, 6-9.
- 4) Fomon, S. J. and Ziegler, E. E. (1979): Soy protein isolates in infant feeding, in "Soy Protein and Human Nutrition", ed. by Wilcke, H. L., Hopkins, D. T. and Waggle, D. H., Academic Press, New York, pp. 79-99.
- 5) 岸 恭一, 前川みどり, 山本 茂, 志塚ふじ子, 井上五郎 (1985): 成人における分離大豆たん白質の栄養価とメチオニン添加効果. 大豆たん白質栄養研究会会誌, **6**, 88-95.
- 6) Young, V. R., Wayler, A., Garza, C., Steinke, F. H., Murray, E., Rand, W. M. and Scrimshaw, N. S. (1984): A long-term metabolic balance study in young men to assess the nutritional quality of an isolated soy protein and beef proteins. *Am. J. Clin. Nutr.*, **39**, 8-15.
- 7) van Etten, C. H., Hubbard, J. E., Mallan, J. M., Smith, A. K and Blessin, C. W. (1959): Amino acid composition of soybean protein fractions. *J. Agric, Food Chem.*, **7**, 129-131.
- 8) Smith, A. K., Nash, A. M., Eldridge, A. C. and Wolf, W. J. (1962): Recovery of soybean whey proteins with edible gums and detergents. *J. Agric, Food Chem.*, **10**, 302-304.
- 9) Kakade, M. L., Rackis, J. J., McGhee, J. E. and Puski, G. (1974): Determination of trypsin inhibitor activity of soy proteins: A collaborative analysis of an improved procedure. *Cereal Chem.*, **51**, 376-382.
- 10) Westfall, R. J. and Hauge, S. M. (1948): The nutritional quality and the trypsin inhibitor content of soybean flour heated at various temperatures. *J. Nutr.*, **35**, 379-389.
- 11) Hussein, L., El-Saied, H. M. and Abu-Salem, F. (1980): Some factors affecting the haemagglutinin of soybean. *Z. Ernährungswiss.*, **19**, 233-237.
- 12) Liener, I. E. (1976): Legume toxins in relation to protein digestibility — A review. *J. Food Sci.*, **41**, 1076-1081.
- 13) Hafez, Y. S. and Mohamed, A. I. (1983): Presence of nonprotein trypsin inhibitor in soy and winged beans. *J. Food Sci.*, **48**, 75-76.
- 14) Schingoethe, D. J., Aust, S. D. and Thomas, J. W. (1970): Separation of a mouse growth inhibitor in soybeans from trypsin inhibitors. *J. Nutr.*, **100**, 739-748.
- 15) Schingoethe, D. J., Tidemann, L. J. and Uckert, J. R. (1974): Studies in mice on the isolation and characterization of growth inhibitors from soybeans. *J. Nutr.*, **104**, 1304-1312.
- 16) Tidemann, L. J. and Schingoethe, D. J. (1974): The use of activated charcoal to remove or inactivate mouse growth inhibitors present in soybean whey. *J. Agric, Food Chem.*, **22**, 1059-1062.