大豆タンパク質の加熱ゲル化に及ぼす 大豆レシチン共存の影響

三 浦 靖*・山 内 文 男*

Effect of Coexistence of Soybean Lecithin on Thermal Gelation of Soybean Protein

Makoto MIURA* and Fumio YAMAUCHI*

* Department of Food Chemistry, Faculty of Agriculture, Tohoku
University, Sendai-shi, Miyagi, 980

Effects of commercial soybean lecithin on flow properties of soybean protein-water suspension systems and coagulated gels were studied. Textural properties and geometrical characteristics of heat-induced gels were also investigated. For suspension systems and their heat-induced gels, thixotropy index (TI) decreased with increasing amounts of added lipid, but degree of consistency increased. Hardness of the gels increased with increasing amounts of the lipid under small deformation (20%), but decreased under larger deformation (>60%) in the region above the yield point. Scanning electron microscopic structure of the gels related to textural characteristics. The lipid free gels exhibited a closely packing structure with small globules. On the other hand, lecithin-added gels showed a pumice stone structure. It was revealed that bulkier flocs formed from spherical particles of protein were also responsible for high viscosity of lecithin-added systems. These findings suggested that the topological interactions between morphologically different particles were weakened by the increase of degree of polydispersibility of the lecithin-added systems. Furthermore, it seemed that the intermolecular entanglements and linkage between protein molecules were reduced by addition of polar lipids.

(Received Jan. 18, 1984)

食品は通常、多成分の不均一混合系であり、特にタンパク質は油脂、炭水化物、その他の成分と相互作用をしつつ食品素材中に広く存在しており、食品の味、香り、形状、テクスチャーなどの物理化学的な特性に影響を及ぼしている。山野ら¹⁾は、脂質を添加して調製した大豆タンパク質ゲルのテクスチャーやゲルの生成過程を研究した。また山下²⁾は、油脂を添加して調製したヨーグルトの好ましさを物性の機器測定と官能検査から検討している。このように食品の物性発現に関与していると考えられるタンパク質-脂質相互作用について、著者らは食品添加物として使用可能な中性脂質として市販大豆油、もしくは極性脂質として高純度粉末レシチンの添加が大豆タンパク質分散系の流動特性³⁾あるいはゲルの力学特性⁴⁾に及ぼす影響をレオロジー的に解析した。

本研究では、中性脂質と極性脂質の混合物と見なせ、しかも食品工業レベルで広汎に用いられている大豆レシチンが大豆タンパク質-水分散系およびその加熱ゲルの流動特性、さらに加熱ゲルの力学特性やゲル構造に及ぼす影響を検討したので報告する。

実 験 方 法

1. 試料

タンパク質試料は、粉状分離大豆タンパク（フジビュリナプロテイン（株）製）で、その一般分析値は、水分 6.0%，粗タンパク質 92.0%（N×6.25），灰分 5.0%，粗繊維 0.3%，粗脂肪 0.5%，NSI 90，pH（10%分散液）7.0である。添加脂質は、市販大豆レシチン（半井化学製）でケイ酸カラムクロマトグラフィー⁵⁾によって分析

* 東北大学農学部食糧化学科（〒980 宮城県仙台市堤通雨宮町 1-1）

した組成は、中性脂質 33.4%，糖脂質 14.9%，リン脂質 51.7% であり、薄層クロマトグラフィー⁵⁾によってリン脂質画分を分離したところ組成は、ホスファチジルコリン 13%，ホスファチジルエタノールアミン 28%，ホスファチジルイノシトール 8%，ホスファチジルセリン 10%，ホスファチジルグリセロール 27%，その他リン脂質 14% であった。

2. 分散系の調製

分離大豆タンパクを減圧下でリン酸カリウム緩衝液 (2.6 mM KH_2PO_4 , 32.5 mM K_2HPO_4 , 4 mM NaN_3 , イオン強度: $\mu=0.1$, pH 7.8) に懸濁させ、次に所定量の市販大豆レシチン (以下、レシチンという) を添加し、ハンドミキサー (MK-H2, 松下電器) を使用し、最高回転速度 950 rpm で均一になるまで混合した。タンパク質の終濃度は 12% (w/v) で、添加脂質の濃度はそれぞれ 0, 0.5, 1, 2, 4, 6% (w/v) であった。

3. 加熱ゲルの調製

力学特性測定用のゲルを以下に示す方法で調製した。大豆タンパク質-レシチン-水分分散系の調製は、前述の 2 の方法に準じたが、タンパク質濃度を 15% (w/v), レシチン添加量をそれぞれ 0, 0.5, 1, 2, 3, 4% (w/v) とした。得られたペーストを 1610 × g で遠心分離を行ない脱気した後、ガラス管を円筒状に切断して作成したガラスセル (直径 25 mm) に充てんした。次にガラス円筒の両端を塩化ビニリデンフィルムで密封して 90°C 湯浴中で 45 分間加熱後、20°C に 1 時間放置し、続いて 5°C に 18 時間静置したものを加熱ゲル試料とした。

4. 粘度測定

粘度測定には共軸円筒回転粘度計 (L 型オートビスコメーター, 岩本製作所) を用い、内筒と外筒の直径はそれぞれ 2.8 cm, 3.0 cm で、浸液長は 7.0 cm であった。実験方法 2 に示した方法で調製した大豆タンパク質-レシチン-水分分散系、ならびにその加熱生成ゲルの時間依存性の流動特性を測定する目的で Cyclic shearing test⁶⁾ を行なった。まず各測定に当って、400 rpm (649.9 s^{-1}) の激しい攪拌を 30 分間与えて分散系を均一にしてから 30 分間静置し、分散系の温度を平衡化させるとともに元の分散状態に回復させた。次に恒温槽の温度を 20°C に保ち、せん断速度を 30 rpm (48.8 s^{-1}) から 150 rpm (243.6 s^{-1}) まで 10 分間で直線的に上昇させ、続いて同様に下降させた。また、加熱・冷却過程の構造形成を粘度変化から把握する目的で Cyclic temperature test⁶⁾ を行なった。すなわち、初期条件を一定にした後、50 rpm (81.2 s^{-1}) の定常せん断変形下で恒温槽の温度を 20°C

から 90°C まで 1 時間で直線的に上昇させ、続いて同様に下降させた。上記の一連の試験は、直接デジタル制御 (DDC) によって行ない、得られたデータをコンピューターで演算処理した。

5. 流動特性の解析

見かけの降伏応力は、以下に示す CASSON の流動モデル⁷⁾ を適用して求めた。

$$\sqrt{\sigma} = K_0 + K_1 \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

ここに σ はせん断応力、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度、 K_0 と K_1 は定数であり、 K_0^2 が降伏応力、 K_1^2 が $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ における粘度 η_∞ に相当する⁸⁾。

また、分散系およびその加熱ゲルが、ともに降伏応力をもつ擬塑性流動を呈することが認められたので、流動曲線の下降曲線のデータに HERSCHEL-BULKLEY の流動方程式⁹⁾ を適用した。

$$\sigma - \sigma_y = K \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

ここに σ_y は降伏応力、 K は粘稠性定数、 n は流動性指数である。

せん断変形下における構造のブレークダウンを評価する目的で、既報⁹⁾と同様に流動曲線のヒステリシスループの面積からチキソトロピー特性値 (TI) を求めた。

6. テクスチャー特性値の測定

コンピューター (FM-8, 富士通) 接続型レオメーター (レオナー RE-3305, 山電) システム¹⁰⁾ を使用し、直径 40 mm のプランジャーを用い、試料台移動速度 1 mm/s, 圧縮度 (試料の高さに対する圧縮距離の比) 20, 60, 80% で多点測定¹¹⁾ を行ない、2 サイクルの記録曲線を得た。試料は、直径 25 mm, 高さ 18 mm の円筒形のゲルを $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に平衡化させてから測定に供した。各試料に対してテクスチャープロフィール分析 (TPA)¹²⁾ を行ない、硬さ、脆さ、凝集性、付着性を求めた。なおテクスチャー特性値は、各試料とも最低 8 個の測定値の平均値で示した。

7. 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察¹³⁾

大豆タンパク質ゲルを約 2 mm 角に切断し、これを 2% グルタルアルデヒド溶液、1% オスミウム酸溶液中で二重固定を行なった。その後、エタノール-蒸留水溶液 (50, 70, 90, 100% (v/v) エタノール) で脱水し、エタノールから酢酸イソアミルに置換後、臨界点乾燥を行なった。乾燥試料を分割して、新しい断面を観察するようにイオンスパッタリングにより Au 蒸着を行ない、走査型電子顕微鏡 (S-700, 日立製作所) を用いて加速電圧 20 kV で観察した。

実験結果

1. タンパク質-レシチン-水分散系の流動特性

いずれの系も非ニュートン性で、しかも時間依存性の流動挙動、いわゆるチキソトロピーを示した。見かけの粘度はレシチン添加量の増加につれて上昇し、特に3%添加以上で顕著であったが、履歴の変化は小さかった。なお、レシチン-水分散液の粘度は、大豆タンパク質-水分散液に比較して非常に小さく、無視し得た。流動曲線から求めたチキソトロピー特性値(TI)と流動方程式から求めた流動パラメーター(σ_y , K , n)をTable 1に示した。レシチン添加量の増加に伴い、チキソトロピー特性値と流動性指数(n)が減少して分散系の凝集構造が弱体化したことを示唆した。また、降伏応力(σ_y)と粘稠性定数(K)が増加して分散系が粘稠になった。

2. 分散系の加熱ゲル形成性

Cyclic shearing testを終えた試料に対し、引き続きCyclic temperature testを行ない、加熱・冷却過程における見かけの粘度変化を検討した(Fig. 1)。レシチンを低濃度(<2%)添加した系(Fig. 1B, C)では、粘度曲線がレシチン無添加の場合(Fig. 1A)と同様の形状を示したが粘度は高くなっていた。すなわち、温度上昇に伴い60°C付近まで粘度が低下したが70°Cを超えると粘度は増加傾向に転じたが、80°C付近で一旦、低下した。冷却過程に入ると粘度が急激に上昇し、冷却過程全般にわたって上昇し続けた。一方、高濃度(>3%)添加系

Fig. 1 Apparent viscosity of soybean protein-commercial soybean lecithin-water suspension systems. Commercial soybean lecithin content: 0% (A), 0.5% (B), 1% (C), 2% (D), 4% (E), 6% (F). Shear rate: 81.2 s^{-1} , Temperature: $\pm 70^\circ\text{C/h}$, 12% protein w/v.

(Fig. 1E, 1F) では 20°C から 30°C 領域において粘度が急激に低下し、その後 50°C から 70°C 付近まではほぼ一定値をとった。75°C から 90°C 領域では再び粘度が減少し、構造のブレイクダウンが構造形成よりも優勢になったことを示唆した。次に冷却過程に入ると、50°C 付近まではほぼ一定の粘度を保ち、それ以降は増加傾向に転じた。

3. 加熱・冷却処理後の分散系の流動特性

Cyclic temperature test によって生成した加熱ゲルについて、加熱・冷却処理前の分散系の場合と同様に Cyclic shearing test を行なった。いずれの系もチキソトロピックな流動挙動を示し、処理前の系と比較して履歴が

Table 1 Thixotropy index and viscometric parameters of lecithin-supplemented soybean protein suspension systems

Lecithin (%)	TI*1	σ_y^{**} (Pa)	K^{***} (Pa·s ⁿ)	n^{***}
0	0.087	8.93	3.48	0.59
0.5	0.083	13.14	4.91	0.54
1.0	0.063	16.58	6.37	0.48
2.0	0.059	30.85	12.86	0.41
4.0	0.051	56.58	25.52	0.35
6.0	0.049	78.93	37.55	0.32

* The approximate index of thixotropy defined in previous study. See reference 3) in detail.

** The yield stress in the CASSON flow model (Eq. 1).

*** The consistency index (K) and the flow behavior index (n) in the HERSCHEL-BULKLEY flow model (Eq. 2).

Table 2 Thixotropy index and viscometric parameters of lecithin-supplemented gels

Lecithin (%)	TI	σ_y (Pa)	K (Pa·s ⁿ)	n
0	0.108	29.27	12.43	0.40
0.5	0.091	34.49	14.27	0.39
1.0	0.074	36.83	16.83	0.35
2.0	0.074	40.50	18.41	0.35
4.0	0.042	51.97	23.87	0.34
6.0	0.027	81.60	38.84	0.32

For the thixotropy index and the viscometric parameters, see footnotes of Table 1.

大きくなったが、レシチン添加量の増加に伴い、履歴は減少する傾向にあった。Table 2 に示した通り、チキソトロピー特性値がレシチン添加量の増加に伴い著しく減少し、流動性指数がゆるやかに減少して系の分散凝集性が低下したことを示した。また、粘稠性定数と降伏応力が著しく増大して系が流動しにくく粘稠になった。

4. 加熱ゲルのテクスチャー特性

Table 3 に実験方法 3 で調製したゲルのテクスチャー特性値を示した。低圧縮度（ひずみ率 20%）においては、脆さが現われず、レシチン添加によって硬さが増加し、付着性が 1% 添加まで緩慢に減少し、それ以上では著しく増大した。また、凝集性は緩慢に上昇した。一方、圧縮度 60% においては、硬さと凝集性がレシチン添加によって減少するのに対し、付着性が 1% 添加までは緩慢に減少し、それ以上レシチンを添加すると著しく増大した。この圧縮度においても脆さは現われなかった。高圧縮度（ひずみ率 80%）では、硬さと脆さがレシチン添加によって著しく低下し、付着性は添加量 0.5% と 2% を境にして減少→増加→減少という変化を示した。また、

Table 3 Textural properties of lecithin-supplemented soybean protein gels

Deformation (%)	Lecithin (%)	Hard. (N)	Fract. (N)	Adhes. (N·m)	Cohes.
20	0	0.48	ND*	0.15	0.92
	0.5	0.46	ND	0.15	0.95
	1.0	0.52	ND	0.09	0.94
	2.0	0.55	ND	0.09	0.94
	3.0	0.60	ND	1.07	0.94
	4.0	0.63	ND	1.23	0.97
60	0	11.08	ND	0.15	0.77
	0.5	10.02	ND	0.12	0.72
	1.0	9.09	ND	0.12	0.72
	2.0	8.46	ND	0.15	0.55
	3.0	7.16	ND	0.19	0.44
	4.0	6.28	ND	0.23	0.37
80	0	17.66	17.13	0.70	0.16
	0.5	13.53	11.38	0.72	0.15
	1.0	10.89	10.20	0.74	0.16
	2.0	10.40	8.43	0.85	0.17
	3.0	7.94	6.77	0.81	0.17
	4.0	7.16	5.39	0.75	0.17

Hard., hardness; Fract., fracturability; Adhes., adhesiveness; Cohes., cohesiveness

* Not detectable

Fig. 2 Scanning electron micrographs of soybean gels

Commercial soybean lecithin content: 0% (A-1 and A-2) and 4% (B-1 and B-2). Scale bars represent 5 μm (A-1 and B-1) and 0.5 μm (A-2 and B-2), respectively.

凝集性はほぼ一定値をとった。

5. 走査型電子顕微鏡観察

大豆タンパク質ゲルの走査型電子顕微鏡像とテクスチャー特性の関連性については多くの報告がなされている^{14)~16)}。本研究においても脂質添加ゲルのテクスチャーとゲル構造との関連を検討する目的で SEM 観察を行った。レシチン無添加ゲルの microstructure¹⁷⁾は Fig. 2A-1 に示すように累層的な構造をとっており、ultrastructure¹⁷⁾は球状微粒子が密に充てんされた均一な構造であった (Fig. 2A-2)。一方、レシチンを 4% 添加したゲルの microstructure (Fig. 2B-1) は不規則なネットワーク構造をとっており、ultrastructure (Fig. 2B-2) は球状の微粒子がネットワークを形成していた。

考 察

一般にコロイド粒子の分散状態は系の流動性に反映されるので、粘度の測定からも分散状態についての知見が得られる。そこで本研究においても、まず粘度測定によ

って加熱・冷却処理前後の大豆タンパク質-市販大豆レシチン-水分分散系の分散状態の解析を行なった。本報の分散系の流動挙動は、既報³⁾の大豆油添加系と高純度粉末大豆レシチン添加系との中間的な性質を示した。すなわち、脂質添加量の増加に伴うチキソトロピー特性値と流動性指数の減少、降伏応力と粘稠性定数の増加の割合が既報での2種類の分散系の場合の中間値であった。一方、加熱・冷却処理によるゲル形成性に関しては、市販大豆レシチンを低濃度(<2%)に添加すると脂質無添加系と同様の粘度変化を示したのに対し(Fig. 1), 3%程度添加すると高純度粉末大豆レシチン(以下、粉末レシチンという)添加系と同様の粘度変化を示した。すなわち、レシチンを低濃度で添加した系では、せん断変形(81.25⁻¹)により弱い凝集構造が破壊され、温度上昇に伴い、分散系内のブラウン運動が活発化して粘度が低下することが考えられる。けれども70°Cを超えるとタンパク質分子鎖がほどけて凝集体を形成し始め、粘度が一旦、上昇したが80°C付近でまた低下すると思われる。冷却過程での粘度上昇は系内に準構造が形成され加熱ゲル化が起きたことを示した。市販大豆レシチン(以下、レシチンという)を高濃度(>4%)に添加すると、冷却過程における粘度上昇が脂質無添加系、大豆油添加系、粉末レシチン添加系に比較して緩慢になった。

以上のように、中性脂質と極性脂質との混合物であるレシチンの添加が、大豆タンパク質-水分分散系およびその加熱ゲルの流動特性に及ぼす影響は、単に中性脂質と極性脂質添加の効果の合わされたものとは限らないことが示唆された。これは分散質粒子の形状や表面特性、あるいはそれによって形成される内部構造や分散状態の変化などに基づくものと考えられる。しかし、粉末レシチンの組成¹⁸⁾がホスファチジルコリン30~32%、ホスファチジルエタノールアミン22~28%、ホスファチジルイノシトール18~20%、ホスファチジルセリン3~4%、その他リン脂質20~23%というように本報で用いたレシチンのリン脂質組成とは若干、異なっていた。このリン脂質組成も流動特性に影響することが考えられるが、その点に関しては目下、検討中である。大豆タンパク質-リン脂質-中性脂質複合体の構造については、OHTSURUら¹⁹⁾がESRを用いて検討を行なった結果、ホスファチジルコリン(PC)分子とタンパク質の疎水領域との疎水性相互作用、あるいはPCラメラのタンパク質表面への吸着によって形成された大豆タンパク質-PC複合体に中性脂質が取り込まれた構造をとっていると報告した。

本研究における大豆タンパク質-レシチン-水分分散系

にはこのタンパク質-リン脂質-中性脂質複合体のほかにレシチンのミセルコロイド、タンパク質粒子などが存在することが考えられる。したがって、レシチン添加量の増加に伴い、分散系の多分散性が増大するとともに、タンパク質分子間のからみ合いセグメント²⁰⁾が脂質によって遮蔽されるなどタンパク質-タンパク質相互作用が低下するので、タンパク質の加熱ゲル化の初期において凝集体生成の程度が低下し、それに続く凝集体間の架橋形成においても架橋の密度や強度などが減少したことが考えられる。このことは、レシチンを添加したゲルのチキソトロピー性の減少で支持される。分散系においては、分散粒子の幾何学的条件が変化すると、流体力学的、界面化学的、いずれの相互作用も変化する。すなわち、分散粒子の体積分率が増大すると分散粒子間架橋形成やからみ合いが促進され、流動抵抗が増す²¹⁾。したがって、タンパク質-脂質分散系およびその加熱ゲルの降伏応力と粘稠性定数が増大したことは、タンパク質-脂質複合体の形成により分散粒子の有効体積分率が増加することが考えられ、その結果流動抵抗が増大したことを示していると思われる。

大豆タンパク質-レシチン-水系の加熱ゲルのテクスチャー特性も大豆油添加ゲルと粉末レシチン添加ゲル⁴⁾の場合の中間的な性質を必ずしも示さなかった。すなわち、硬さに関しては、低圧縮度(ひずみ率20%)においてレシチン添加ゲルが最大の増加率を示したのに対し、高圧縮度(80%)では粉末レシチン添加ゲルと同様に脂質添加量の増大に伴い低下した。また、圧縮度20%における脂質添加量の増大に伴う凝集性の増大は、レシチン添加ゲルが他の2種類の脂質添加ゲルの中間的な挙動をとった。一方、圧縮度80%ではレシチン添加ゲルがほぼ一定の凝集性をとったのに対し、他の脂質添加ゲルでは増大した。これは、それぞれのタンパク質-脂質-水分分散系が加熱処理される以前の分散構造の差異に由来すると考えられる。添加された脂質がタンパク質-タンパク質あるいはタンパク質-水相互作用の機構や強弱に影響を及ぼした結果、中性脂質添加ゲルでは、短くて強固な架橋と長くて柔軟な架橋とが形成されて破断しにくい構造をとり、極性脂質添加ゲルでは、短くて脆い架橋と長くて脆い架橋が形成されて流動しにくい脆い構造をとったと思われる。レシチン添加ゲルでは、SEM観察(Fig. 2B-1, 2)からも裏付けされるように、この両者の構造を混合したような構造をとっていることが考えられるが、本研究でのタイムスケールにおいては、「刺激-応答」というレオロジー的挙動と試料の構造は必ずしも対応す

るとは限らないことが示唆された。

要 約

大豆 レシチンが大豆タンパク質-水分分散系の流動特性およびその加熱ゲルの力学特性やゲル構造に及ぼす影響を検討した。市販粉状分離大豆タンパク-水分散液(12% w/v, pH 7.8) に市販大豆レシチンを 0, 0.5, 1, 2, 4, 6% (w/v) の濃度で添加した分散系について、加熱・冷却処理前後の流動特性および加熱・冷却過程における粘性挙動を測定した。また、レシチンを 0, 0.5, 1, 2, 3, 4%(w/v) の濃度で添加した大豆タンパク質 (15% w/v) の加熱ゲルについて、テクスチャープロファイル分析 (TPA) および走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察を行なった。結果は以下の通りである。

(1) 分散系とその加熱ゲルは、レシチン添加物によってチキソトロピー性が減少し、粘稠性が増大した。

(2) 加熱ゲルは、レシチン添加により流動しにくいが脆いゲル特性になった。

(3) ゲルの microstructure は、レシチン添加により不規則なネットワーク構造をとり、ultrastructure も空隙率の大きい粗いネットワーク構造になった。

以上の結果から、レシチン添加によって分散系の多分散性が増大し、タンパク質分子間のからみ合いが減少するなどの分散粒子間の相互作用が低下するが、分散粒子の有効体積分率が增大することが考えられた。

本研究の大意は、昭和 58 年日本食品工業学会第 30 回大会において報告した。

終わりに、走査型電子顕微鏡の使用に際し、有益なご助言をいただきました東北大学農学部電子顕微鏡室 佐藤鶴治氏に深く感謝いたします。また、試料を提供していただいたフジビュリナプロテイン株式会社に感謝いたします。

文 献

- 1) 山野善正・三木英三・福井義明：日食工誌，28，131 (1981)。
- 2) 山下 浩：商品研究，33，21 (1982)。
- 3) MIURA, M. and YAMAUCHI, F.: *Agric. Biol. Chem.*, **47**, 2217 (1983)。
- 4) 三浦 靖・山内文男：日本家政学会東北・北海道支部総会研究発表要旨集，p. 1, 仙台 (1983)。
- 5) MIURA, M., YAMAUCHI, F., OGAWA, Y. and SHIBASAKI, K.: *Agric. Biol. Chem.*, **46**, 1631 (1982)。
- 6) 梅屋潤一郎・山内文男・柴崎一雄：日食工誌，27，459 (1980)。
- 7) CASSON, N.: A Flow Equation for Pigment-Oil Suspension of the Printing Ink Type. In *Rheology of Disperse System*, ed. by Mill, C. C. (Pergamon Press, New York), p. 84 (1959)。
- 8) RAO, M. A.: *J. Texture Studies*, **8**, 135 (1977)。
- 9) SHERMAN, P.: *Industrial Rheology with Particular Reference to Foods, Pharmaceuticals and Cosmetics*, (Academic Press, New York) (1970)。
- 10) 三浦 靖・谷井 聡・木村通秀・山内文男：日食工誌，31，126 (1984)。
- 11) BOURNE, M. C. and COMSTOCK, S. H.: *J. Texture Studies*, **12**, 201 (1981)。
- 12) SZCZESNIAK, A. S.: *J. Texture Studies*, **6**, 5 (1975)。
- 13) HAYAT, M. A. (鈴木昭男・永谷 隆 訳)：走査電子顕微鏡入門，(丸善，東京)，p. 96, 127, 225 (1979)。
- 14) LEE, C. H. and RHA, C.: *J. Food Sci.*, **43**, 79 (1978)。
- 15) FURUKAWA, T., OHTA, S. and YAMAMOTO, A.: *J. Texture Studies*, **10**, 333 (1979)。
- 16) 赤羽ひろ・小林三智子・中浜信子：家政誌，32，426 (1981)。
- 17) RAEUBER, H. J. and NIKOLAUS, H.: *J. Texture Studies*, **11**, 187 (1980)。
- 18) 阪本 武：New Food Industry，23，32 (1981)。
- 19) OHTSURU, M., KITO, M., TAKEUCHI, Y. and OHNISHI, S.: *Agric. Biol. Chem.*, **40**, 2261 (1976)。
- 20) GRAESSLEY, W. W.: *Adv. Polym. Sci.*, **16**, 1 (1974)。
- 21) YAMAGUCHI, K., SENNA, M. and KUNO, H.: *J. Colloid Interface Sci.*, **72**, 170 (1979)。

(昭和 59 年 1 月 18 日受理)