総説

The Role of Rheology in Food Science

by

Sachio MATSUMOTO

(College of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Mozu-umemachi, Sakai, Osaka 591)

食品科学におけるレオロジーの役割

松本幸雄*

(原稿受理：1978年2月14日)

1. はじめに

1977年も押しつまった12月19日から4日間、ロンドン大学クイーンエリザベスコレッジで、「食品のテクスチャーとレオロジーに関する国際シンポジウム」が開かれた。日本を含む17か国から、およそ80名の参加者を得て、26の講演とそれに対する討論が行われたが、夫人に手を引かれてこれに参加した Dr. Scott Blair の姿が印象的であった。半世紀以上をレオロジーとともに過した彼は、現在ほとんど視力を失っているのである。このシンポジウムの詳細は、Dr. Sherman の編集により後日モノグラフとして刊行される予定であるが、討論の対象となった主題は、あらまし次の3項目に大別されるであろう。すなわち、「食品のテクスチャーに対する感覚的・心理学的アプローチ」、「食品のテクスチャーの客観的測定法」および「各種食品あるいは食品モデル系の組織・構造とレオロジー的性質との関係」である。このような内容は、5年前から我が国で例年開催されている食品の物性に関するシンポジウムのそれとも一致する^{1)~2)}。

食品科学は、生物化学、微生物学、栄養生理学、高分子学、化学工学等の諸学科を背景として成立する極めて総合的な研究分野の一つであり、これに上記のような主題を擁してレオロジーがかかわりを持つことに何の不思議もない。それどころか、食品材料がレオロジー研究の対象となった歴史は古く³⁾、前述のような国際シンポジウムの開催も、地味で不定期なものではあるにせよ、既に過去数回に及んでいるのである。しかし、食品レオロジーの分野を創設せよといった主張を少なくとも筆者は聞いたことがないし、またその必要性も筆者には感じられない。むしろ、理論的背景と方法論において、材料の種類を超越した普遍性のある研究分野の一つであるレオロジーが、何故食品科学の分野とかわかり

合っているのかという事情を一般化して、食品科学に析出する特徴を科学全体の中で位置づけ認識することの方が重要であると考えるのである。このような立場に立って、本稿では表題の意味を微力ながら考えてみたい。

2. 食品に対する認識と評価

人の知的活動の一つである科学の場で、人の持つ情緒的、感覚的あるいは観念的な側面は疎外され勝ちである。その姿勢は理性的ではあるが、一般からは知性のごう慢であるとして強く非難される場合もある。そして、いわゆる科学の場で、情緒と知性を調和させることは大変困難である。食品は、極めて科学的に取り扱われる一方、感覚的にも非常に厳しく評価される材料である。将来の人口増加と農業生産の限界がいろいろな立場から予測されている現在、この問題に対する理性的な処理法の一つとも言うべき微生物による食糧資源の生産が実用化の段階にまできて、我が国ではこれが社会問題になった。科学的論理性が、食品の動向を律する唯一の価値基準たりえないことを示す一例である^{4),5)}。

人は、それぞれの生活の中である範囲内の材料によって調理された食事をとり続ける。すなわち、各人の食生活はほぼ定式化されているのである。その中で、程度の差こそあれ個々の食品に対する固有の概念が蓄積され、人それぞれの主観的、観念的なし(嗜)好が形成されるようになる。このような主観的判断によって導かれる食品の評価においては、個人の意識や連想が複雑に作用するのである。このような感覚的評価の基準になると考えられるものを、食感要素と呼ぶ。アメリカの Szczesniak⁶⁾ は、種々の食品名に対する人々の反応連想語を収集し、整理して、食感要素が表1に示すような諸特性によって構成されることを明らかにした。そこに表現されている数字そのものに、人種や個人の環境を超えた普遍性があるか否かについては問題があるにせよ、食感要

* 大阪府立大学農学部農芸化学科 堺市百舌鳥梅町

表1 食感要素を構成する諸特性⁶⁾

特 性	男性の場合	女性の場合
テクスチャー	27.2%	38.2%
口で感じる香り(フレーバー)	28.8	26.5
色	17.5	13.1
外 形	21.4	16.6
鼻で感じる香り(アロマ)	2.1	1.8
そ の 他	3.0	3.8

素の内容を分析しようとしたこの試みは高く評価されている。同時に、「歯ごたえ」、「口当たり」、「舌ざわり」等の語感に相当する食品のテクスチャーが、男女とも食感要素の重要な部分を構成していることに、多くの注目が集まったのである。

食品の感覚的評価に対応して、客観的に測定されるべき食品の諸性質は多様であり、その大部分は人間の情緒的な生理感覚の問題も含めて、今後の研究や食品研究者の理解にまたねばならぬものであるが、食感要素を構成する諸特性のうちのテクスチャーについては、これが食品のレオロジー的性質やサイコロロジーと直接かかわっていることが明らかであり、同時に食品の組織・構造と関連した問題でもある。これについては既に幾つかの研究⁷⁾があり、前述のような国際シンポジウムが開催される一方、1969年からオランダで Journal of Texture Studies が刊行されるようになった。

3. 食品のテクスチャー

既に曽根⁸⁾が指摘しているように、テクスチャーという述語の持つ意味は広い、いずれにせよ、食品の力学的性質が感覚的に評価される問題を取り扱うのであるから、知覚生理学⁹⁾やサイコロロジーがその中で重要な位置を占める一方、各種食品のレオロジー的性質を測定し記述するための方法論や、食品のような多成分不均一混合系の分散状態とそのレオロジー的性質との関係等が、

表2 Szczesniak のテクスチャープロフィール¹¹⁾

クラス	一次特性	二次特性	一 般 用 語
力学特性	かたさ	soft→firm→hard	
	凝集性	brittleness →crumbly→crunchy→brittle chewiness→tender→chewy→tough gumminess →short→mealy→pasty	
	粘度	thin→viscous	
	弾性	plastic→elastic	
	粘着性	sticky→tacky→goeey	
幾何特性	粒子径と形	gritty, grainy, coarse, etc.	
	粒子形と会合状態	fibrous, cellular, crystalline, etc.	
そ の 他	水分含量	dry→moist→wet→watery	
	脂肪含量	oiliness →oily greasiness →greasy	

基礎的な背景としてテクスチャーの問題の中で取り上げられなければならない。

なかんずく、サイコロロジーについては、Scott Blair¹⁰⁾によってその研究の端緒が開かれたことはよく知られているが、その後その一つの方向は Szczesniak¹¹⁾によって示されたと考えられる。彼女は、人の感覚的判断は言葉で表現され他者に伝達されて客観化されることに注目し、前述の食感要素の分析に用いた食品名に対する反応連想語の中から更にテクスチャーに関係のある表現を選び、これらを整理して客観的に測定しうる諸特性と対置させたテクスチャープロフィールをつかった。サイコロロジーを、感覚的・主観的な評価とレオロジー的・客観的な測定結果との相関関係を研究する分野である¹²⁾とすると、Szczesniak のテクスチャープロフィールは、文字どおりサイコロロジー研究の輪郭を与えるための一つの試みではある(表2)。実際に、彼女のこのような提案は種々の論議を呼ぶ材料となり、例えば我が国では日本語によるテクスチャープロフィール作製の契機を与えた^{13),14)}。なぜなら、

表3 日本語によるテクスチャー用語の整理¹⁴⁾

表4 Sherman のテクスチャープロフィール¹⁶⁾

感覚的判断に関する表現には、到底他国語に翻訳しえない微妙なニュアンスが含まれるからである。しかし、日本語にはその言語的特徴として擬声・擬態語が多く、収集された日本語によるテクスチャープロフィールの作製が困難であったと報告されている。結局、表3に示すような因子分析による整理法が提案され¹³⁾、また使用する収集語に制限を設ける方法が考察された¹⁵⁾。一方、英国の Sherman¹⁶⁾ は、人の感覚に対応させるべき客観的諸量の物理学的意味は明確でなければならないとする立場、および食感要素は食べる動作の中から生じるところの動的な要因を含むとする見解に立って、表4のようなテクスチャープロフィールを提出した。Szczeniak のそれ(表2)に示されている力学特性のうち、かたさ、凝集性、粘着性等は、後述するような試験機(テクスチュロメーター)によって得られる値が用いられるが、このような値に物理学的意味を見いだすことが困難であるからである。

結局、前述のように食品のテクスチャーは、口腔における知覚機能の問題から、サイコロロジー、レオロジー、コロイド科学、あるいは言語学の分野にわたる問題が関連し合った研究の対象である。その中で、方法論としてのレオロジーの役割は極めて大きい。

4. 口腔における粘度知覚

この項で取り上げるのは、Wood¹⁷⁾ および Sherman ら^{18)~20)}が行った液状食品についてのサイコロロジカルな一連の研究例である。スープのような液状食品にも、人々に好まれる粘度がある。しかし、多くの液状食品は非ニュートン流体であるから、それぞれのレオロジーの性質は少なくともずり速度~ずり応力の関係で記述されなければならない。ところが、人は口腔において液体の

ニュートン性、非ニュートン性を識別せず、液体の粘度差のみを知覚することが Wood¹⁷⁾ によって見いだされた。このことは、人の口腔がある一定のずり速度~ずり応力範囲で粘度を知覚する生理機能を有することを示唆している。そこで Sherman ら^{18),19)}は、液体の粘度の感覚的な弁別に優れたパネルを26名(女性21名、男性5名)選び、多くの液状食品を用いてニュートン液体と非ニュートン液体との口腔における粘度の比較知覚を試みた。例えば、図1はこの実験に用いたA, B, C...6種類のニュートン液体と1種類の shear thinning 型非ニュートン液体Xの流動曲線を模式的に示したものである。後者の見掛けの粘度はずり速度の増加と

図1 ニュートン液体と非ニュートン液体の粘性を比較することにより粘度知覚の際のずり速度~ずり応力範囲を判定する方法の模式図(本文参照)¹⁸⁾

ともに低下するから、客観的にはニュートン液体と非ニュートン液体の粘度を比較することが全く無意味であることは言うまでもない。ところがこの実験によれば、先のパネルは、例えば図1の非ニュートン液体の粘度がニュートン液体のうちのCないしD試料の粘度と同じであると判断するのである。そうすると、この例では、人が口腔で粘度を知覚するときのずり速度～ずり応力範囲が図1の斜線の部分に相当することが示唆される。そこで、Shermanらは、あらゆる液状食品の流動曲線を同心円筒型回転粘度計で求めておき、次いでこれらの試料を種々組み合わせながら先のパネルを用いて図1のような官能検査を多数反復した。その結果、図2に示すように、人が粘度を知覚する際のずり速度～ずり応力範囲が、流動曲線を表す座標上に得られたのである。この結果は、人が口腔内で液状食品に対して無意識に作用させるずり応力が、試料粘度に対応して変化することを示しているが、口腔の動作そ

のものは非常に複雑であるので、この結果の意味を単純に解釈することはできないだろう。そこで Sherman ら²⁰⁾は、種々の粘度の液体を内径の異なる4種類の毛細管に詰め、その一端に乳首を取り付けて人の口腔に挿入し、舌を使って飲み込む動作をさせたときの液体の毛細管内の流速を高速度カメラで記録して、粘度とずり応力との関係を測定することを試みた。図3はその結果で、横軸の η は試料粘度、 L は毛細管の長さ、 R は同じく半径である。このような実験から、口腔動作によって生じるずり応力は液体の粘度とともに増大するが、その値はやがて一定値に到達することがわかる。恐らく、高粘度の液状食品に対しては、唾液による希釈や咀嚼等の生理的な動作が加わるものと思われる。

この項で述べた一連の実験は、人の感覚が物理学的次元の明確な座標上に示された点で注目され、また生物レオロジーへのアプローチが必要であることを示唆するものとして重要な研究であると考えられている²¹⁾。

5. 食品のテクスチャー測定法

食品のレオロジー的性質、すなわちひずみ、応力、時間の関係を測定するための原理に特別のものはない。しかし、その一般的な原理を、多様な形態を有する食品に実際に適用するためには、測定装置に種々の工夫を凝らす必要がある。特に、多くの食品材料に現れる形態として、水分含量が多く保型性はあっても非常に軟質であること、および組織的に極めて不均一な状態のものであること、等が挙げられよう。そのために、試料に一定のひずみや応力を加え続けることが困難な場合が多い。測定法の詳細については、幾つかの文献を参照していただきたい^{8), 22)~24)}。このような実情から、より実用的な立場に立て、個々の食品に適合した各種の試験機が作られ使用されてきた²⁵⁾。これら試験機の最近の傾向として、Muller の著書²⁶⁾や前述の国際シンポジウムにおける Voisey の講演²⁷⁾によると、インストロンの装置を基本に用いて試料を定速度で圧縮、伸張あるいは切断する際の付属装置に種々の工夫がなされているようである。

かなり以前のことになるが、主観的に判断される食品のテクスチャーを可及的に客観的に測定するために試作された興味深い装置がある²⁸⁾。これは、一組の総入れ歯のうち下あごの部分に水平に固定してスライディングを付し、上あごの部分に上下運動させて人が行っている咀嚼動作のシュミレーションを試みようとしたものである。しかし、試料と接触する部分が、形状の複雑な歯型であることなどから、結局この装置は実用にはならなかったようである。その後、Szczesniak ら²⁹⁾は、この装置の義歯の部分を一組のプレートとプランジャーに置き換えることによって、再現性のよい咀嚼曲線を測定するのに成功した。これがテクスチュロメーターと呼ばれ、食品研究者の間で広く使用されるようになった試験機の原型である。すなわち、下あごの代わりに一枚の金属性円板を固定し、試料皿とする。また上あごの代わりに一本の金属性プランジャーを試料皿の上部に設け、一定周期で上下運動させる。円板上に試料が載せられているとき、プランジャーの動きはこの試料を介して円板に伝えられる仕組である。その結果、円板が受け止める力の変化は、ごく模式的には図4のように記録されることになる。咀嚼曲線と呼ばれるこの図形は、もちろん試料の種類や状態に対応して変化するので、各試料の力学的特性をその図形から客観的に記述することが可能になる。そ

図2 人が口腔において液体食品の粘度を知覚する際のずり速度～ずり応力範囲¹⁹⁾

図3 液体食品の粘度と人が口腔において液体食品に加える舌の圧力との関係 (本文参照)²⁰⁾

図4 テクスチュロメーターにより得られる咀嚼曲線を一般化した図形²⁹⁾

ここでSzczeniakら²⁹⁾は、アナログ量として現れるこのような咀嚼曲線の第1ピークと第2ピークの各面積と A_1 と A_2 の比を凝集性、第1ピークの高さをかたさ、第1ピーク消滅後負の位置に現れるピーク的面積 A_3 を粘着性と規定したのである。これら諸特性の物理学的意味は不明確であるが、先の表2のテクスチャープロフィールに整理されている凝集性、かたさ、粘着性等は、図4の咀嚼曲線から求められる上述の諸量によく対応するといふ³⁰⁾。このようなことから、測定の簡便さと相まってこの装置は多くの食品研究者の注目を集め、我が国でもかなりの量のテクスチュロメーターが導入されていると思われる。一方、この装置の有用性が高まるほど、咀嚼曲線の物理学的意味を求めようとする研究者も現れ、最近 Journal of Texture Studies はこの問題の特集号を発行している³¹⁾。いずれにせよ、咀嚼動作には、大変形のレオロジーの問題が深く関連してくるものと考えられる。

6. モデル系による食品材料のレオロジー的性質の研究

これまでに述べた食品の感覚的評価の問題はさておいても、成分的に組織形態的に複雑な食品はやっかいな研究の対象であり、その分散状態に関する基本的な仕組や、それに伴って発現するレオロジー的性質を理解するためには、過渡的な手段ではあるにせよ、比較的単純なモデル系に依存して実験を進めなければならない場面がある。形態的なモデルに限らず、前述のように口腔での咀嚼動作を単純化したテクスチュロメーターが設計された例^{28), 29)}や、生体膜の機能を明らかにするために脂質黒膜^{32), 33)}やリポゾーム^{34), 35)}が調製された例のように、モデル系による研究は多くの分野に見られるのであるが、どの場合もこの種の実験では実在の系なり動作なりに一層アプローチさせるためのモデル系の選択と改良が常時必要であろう。

バターやマーガリンは、液状と結晶状の脂肪から成る油相と食塩やタンパク質などを含んだ水相との W/O 型分散系であるが、これら油脂食品のレオロジー的性質やその温度依存性は、伸展性のような実用上の問題と関連して重要である。Van den Tempel³⁶⁾や曽根ら³⁷⁾は、トリステアリンと流動パラフィンを混合して調製した可塑性脂肪のレオロジー的性質を測定しているが、これらの研究は油脂食品の物性に対して基礎的な情報を与えているものと考えられる。また曽根³⁸⁾は、バターの塑性粘度が熟成によって増加する現象を、脂肪の結晶化の問題と関連させ、金属の結晶化速度に関する Avrami³⁹⁾の理論を用いて説明した。

中山ら^{40)~44)}は、食肉の加工において重要であるひき(挽)肉やすり(摺)身の結着性の問題を、肉組織から分離されるミオン

ンのゲルのレオロジー的性質に注目して一連の研究を行っている。その結果、抽出されたミオンに含まれるミオンA、アクチンおよび活性トロポミオシンの量が、ゲル形成能と関連して食肉の結着力や保水性に対して重要であることが示唆された。この研究では、試料に対してオーソドックスなレオロジーの手法が用いられているので得られた結果の普遍性は高く、したがって生物レオロジーの分野に対しても有用なモデル研究の一つになるのではないかと思われる。

Sherman は食品研究者として著名であるが、同時にエマルジョン系とこれに関連したコロイド・界面科学の分野についても造詣が深く、エマルジョンの基礎的研究に関する多くの論文⁴⁵⁾を発表している。彼は、多くの食品が複雑な分散系であることから、その一般的なモデルとしてエマルジョンを取り上げているのである。筆者も、彼との協同研究で、均質化牛乳の粘度が未均質化牛乳のそれよりも高くなる現象を、種々の分散粒子径から成る O/W 型エマルジョンを用いて確かめたことがある⁴⁶⁾。また、最近筆者らは、生体組織である食品材料のような多数の細胞で構成される物質、言い換えれば膜構造を有する系のモデルとして、一連の多相型エマルジョンを調製した^{47)~49)}。このものは、薄い油膜や脂質膜に包まれた水の粒子を水の中に分散させた系であり、単純なエマルジョン系では観測しえない諸性質が現れる。例えば、油膜の厚さが薄くなるほど系全体の粘度は増し、また分散水相に電解質や糖質のような低分子物質をあらかじめ溶解しておくことにより、系全体のレオロジー的性質はその濃度に著しく影響されるのである⁵⁰⁾。

小麦粉を水と混ねつて得られるいわゆる小麦粉ドウのレオロジー的性質は、製パンや製めん(麺)の際の工程管理に欠かせない要因であるが、小麦の品種は多様でありその成分組成も複雑であるので、筆者ら^{51)~53)}は小麦粉から可及的に純粋に抽出し乾燥したグルテンタンパク質とデンプン粒子を再び混合し水と混ねつた3成分系を調製して、そのレオロジー的性質に対する成分濃度や微量成分添加の影響を調べている。問題は、このようなモデル系のレオロジー的性質が、実際の小麦粉ドウのそれを完全に再現しえない点にある⁵⁴⁾。しかし、このような点を更に追究することにより、実在の系のレオロジー的性質に及ぼす要因が明らかになると考えられる。

7. おわりに

これまで述べてきたような人の食品に対する感覚的評価をはじめ、種々の立場から、食品研究の場でレオロジーのような物理学的手法の導入は有用であるという認識は高まっている。しかし、実際に食品研究者がかかわり合っている分野は、例えば食糧生産に始まってその貯蔵、加工、調理、栄養生理、衛生、流通経済等に至る広い範囲に及び、しかもそのいずれもが早急に解決しなければならない多くの問題を抱えているのである。このような食品研究の場に析出する多様性を、いかに系統的にとらえて整理し分担するかが、食品に関係のある人々にとって今後の重要な課題である。そのためには、まずこのような多様性の中で高度に専門化された分野の中庸な位置づけと、各分野の相互理解とが必要であろう。このような中で、レオロジーの導入が新しい食品研究分野の創設につながるのではない、むしろ、その理論的背景と方法論において高い普遍性を有するが故に、多様な食品研究の中でのレオロジーの有用性が認識されるのであり、専門化された各分野の

間の相互理解に対する架橋的役割がレオロジーに期待されるのである。(昭和52年10月25日, 第25回レオロジー討論会にて講演)

文 献

- 1) 松本幸雄, 山野善正編, “食品の物性, 第1〜3集”(1975〜1977) 食品資材研究会.
- 2) 田中咸子, 表面, **14**, 406 (1976).
- 3) Scott Blair, G.W., G. Watts, and H.J. Denham, *Cereal Chem.*, **4**, 63 (1927).
- 4) 松本幸雄, 化学と工業, **28**, 488 (1975).
- 5) 松本幸雄, 化学, **31**, 332 (1976).
- 6) Szczesniak, A.S., *Food Technol.*, **17**, 74 (1963).
- 7) Sherman, P., “Structure and Textural Properties of Foods”, in A. Kramer and A.S. Szczesniak ed., “Texture Measurements of Foods”, p. 52 (1973) D. Reidel Pub. Co., Holland.
- 8) 曾根敏磨, “食品の粘稠性”, p. 1 (1966) 光琳書院.
- 9) 河村洋二郎, “食品の物性認知に関する口腔機能”, 松本・山野編 “食品の物性第2集”, p. 85 (1976) 食品資材研究会.
- 10) Scott Blair, G.W., “Elementary Rheology”, p. 81 (1969) Academic Press, London.
- 11) Szczesniak, A.S., *J. Food Sci.*, **28**, 385 (1963).
- 12) Muller, H.G., “An Introduction to Food Rheology”, p. 2 (1973) Heinemann, London.
- 13) 吉川誠次, 西丸震哉, 田代豊久, 吉田正昭, 品質管理, **19**, 66, 147 (1968).
- 14) Yoshikawa, S., S. Nishimaru, and M. Yoshida, *J. Texture Studies*, **1**, 437, 443, 452 (1970).
- 15) 吉川誠次, “テクスチャー用語の整理について”, 松本・山野編 “食品の物性第2集”, p. 191 (1976) 食品資材研究会.
- 16) Sherman, P., *J. Food Sci.*, **34**, 458 (1969).
- 17) Wood, F.W., *S.C.I. Monograph*, No. 27, p. 40 (1968).
- 18) Shama, F., C. Parkinson, and P. Sherman, *J. Texture Studies*, **4**, 102 (1973).
- 19) Shama, F., and P. Sherman, *J. Texture Studies*, **4**, 111 (1973).
- 20) Shama, F., and P. Sherman, *Biorheology*, **11**, 453 (1974).
- 21) Kapsalis, J.G., A. Kramer, and A.S. Szczesniak, “Quantification of Objective and Sensory Texture Relations”, in A. Kramer, and A.S. Szczesniak ed., “Texture Measurements of Foods”, p. 130 (1973) D. Reidel Pub. Co., Holland.
- 22) Sherman, P., “Industrial Rheology”, p. 33 (1970) Academic Press, London.
- 23) 松本幸雄, 表面, **9**, 711 (1971).
- 24) Matsumoto, S., *J. Texture Studies*, **5**, 373 (1975).
- 25) 岡部 巍, “食品のテクスチャーの測定法”, 松本・山野編 “食品の物性第1集”, p. 79 (1975) 食品資材研究会.
- 26) Muller, H.G., “An Introduction to Food Rheology”, p. 25 (1973) Heinemann, London.
- 27) Voisey, P.W., “Recent Advances in Texture Test Instrumentation”, presented at International Symposium on Food Texture and Rheology, held in Dec., 1977, London.
- 28) Proctor, B.E., S. Davison, G.J. Malecki, and M. Welch., *Food Technol.*, **9**, 471 (1955).
- 29) Friedman, H.H., J.E. Whitney, and A.S. Szczesniak, *J. Food Sci.*, **28**, 390 (1963).
- 30) Szczesniak, A.S., *J. Food Sci.*, **28**, 410 (1963).
- 31) Special Issue for Food Texture Profile, *J. Texture Studies*, **6**, No. 1 (1975).
- 32) Hanai, T., D.A. Haydon, and J. Taylor, *Proc. Roy. Soc.*, **A281**, 377 (1964).
- 33) Tien, H.T., *J. Mol. Biol.*, **16**, 577 (1966).
- 34) Bangham, A.D., M.M. Standish, and J.C. Watkins, *J. Mol. Biol.*, **13**, 238 (1965).
- 35) Papahadjopoulos, D., and N. Miller, *Biochim. Biophys. Acta*, **135**, 624 (1967).
- 36) Van den Tempel, M., *J. Colloid Sci.*, **16**, 284 (1961).
- 37) 岡 小天, 深田栄一, 曾根敏磨, 材料試験, **10**, 333 (1961).
- 38) Sone, T., *J. Phys. Soc. Japan*, **16**, 961 (1961).
- 39) Avrami, M., *J. Chem. Phys.*, **7**, 1103 (1939); **8**, 212 (1940); **9**, 177 (1941).
- 40) Sato, Y., and T. Nakayama, *J. Texture Studies*, **1**, 309 (1970).
- 41) Nakayama, T., and Y. Sato, *Agr. Biol. Chem.*, **35**, 208 (1971).
- 42) Nakayama, T., and Y. Sato, *J. Texture Studies*, **2**, 75 (1971).
- 43) Nakayama, T., and Y. Sato, *J. Texture Studies*, **2**, 475 (1971).
- 44) Nakayama, T., and Y. Sato, *J. Texture Studies*, **3**, 359 (1972).
- 45) 後藤廉平, 花井哲也編, “Sherman 博士論文選集”(1968).
- 46) Matsumoto, S., and P. Sherman, *J. Colloid Interface Sci.*, **30**, 525 (1969).
- 47) Matsumoto, S., Y. Kita, and D. Yonezawa, *J. Colloid Interface Sci.*, **52**, 353 (1976).
- 48) Matsumoto, S., M. Kohda, and S. Murata, *J. Colloid Interface Sci.*, **62**, 149 (1977).
- 49) Matsumoto, S., Y. Ueda, Y. Kita, and D. Yonezawa, *Agr. Biol. Chem.*, **42**, 739 (1978).
- 50) Matsumoto, S., and M. Kohda, “Rheological Properties of W/O/W-Type Multiple-Phase Systems”, presented at Internal Symposium on Food Texture and Rheology, held in Dec., 1977, London.
- 51) 松本幸雄, 福田英憲, 米沢大造, 材料, **21**, 387 (1972).
- 52) 松本幸雄, 福田英憲, 米沢大造, 材料, **22**, 427 (1973).
- 53) 松本幸雄, 片山幸二, 米沢大造, 日本レオロジー学会誌, **2**, 63 (1974).
- 54) Matsumoto, S., “Rheological Properties of Synthetic Flour Doughs”, presented at International Symposium on Food Texture and Rheology, held in Dec., 1977, London.