

高齢者用食品の創製を目的とした混合ゲルの相分離構造制御

藤 井 恵 子 (山形大学教育学部助教授)

1. はじめに

高齢者の増加に伴い国民の医療費も年々増加し、高齢者介護も社会問題となりつつある。高齢社会では「いかにして健康な長寿生活を営むか」が重要であり、その基本は食生活にあるといっても過言ではない。このような社会的背景から、高齢者用食品の開発が望まれている。高齢者用食品は、医学的・栄養学的見地から高齢者が摂取するのに適したものであるだけでなく、健康な長寿生活を営むという観点から明るい食生活に貢献する食べやすいものでなければならない。加齢に伴って咀嚼や嚥下などの生理機能が低下すると、食品に求められる特性は、栄養価・味・生体調節機能に加えて食べやすさが重要になってくる。食品ゲルの力学物性は食べやすさに直接的に関連すると考えられるため、その体系的な把握がますます重要となっている。

食品ゲルとして最も利用されているものに寒天とゼラチンがあげられるが、寒天ゲルは扱いやすいが口どけがやや悪く、一方ゼラチンゲルは口どけは良いが扱いにくいという特徴があり、両方の長所を生かし欠点を補う目的でこれまで混合ゲルの研究が数多くなされてきた。従ってそのほとんどが組成や添加物の影響を検討するものであり、ゲルの調製法に相分離現象を積極的に活用するのはこれまでなかった。寒天／ゼラチン混合ゲルに代表されるような非相溶性素材からなる複合材料は、相分離を起こし様々な海島構造を形成するため、その物性は、組成のみならず相分離構造に

も依存することが知られている¹⁾。本研究では、相分離を充分に進行させて海島構造を形成させることによって、同一組成であっても相分離構造の異なる寒天／ゼラチン混合ゲルを調製し、その物性と相分離構造との関係について検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 材 料

寒天は粉末寒天（ナカライテスク）、ゼラチンは粉末ゼラチン（精製粉末／ナカライテスク）を用いた。

2.2 試料の調製

(1) 寒天／ゼラチン混合ゲル：試料の調製は、一般的なゼリーの硬さを基本として寒天濃度を0.7% (w/w) に設定し、これと破断応力が等しくなるように、ゼラチンの濃度を4.5% (w/w) に設定した。これを低破断応力系とした。また、0.7%寒天ゲルの4倍の濃度の2.8% (w/w) を設定し、これと破断応力が等しくなるようにゼラチンは10.4% (w/w) に設定した。これを高破断応力系とした。

寒天とゼラチンは環流冷却管付きナス型フラスコ中で10分間膨潤させ、その後、マントルヒーター（70V）を用い寒天は98℃、ゼラチンは60℃で加熱溶解させた。

溶解後、ゼラチンをタンパク質染色試薬クマシブリーリアントブルーで染色した。混合温度は、凝固したゲル状の寒天を攪拌混合する低破断応力系20℃、高破断応力系37℃、寒天が固まりはじめる条件を攪拌混合する低破断応力系37℃、高破断

応力系45°Cに設定した。混合割合は、寒天：ゼラチンが、25：75、50：50、75：25とし、混合温度に設定した水槽中で保持した。対照として、60°Cで混合した均一ゲルも調製した。攪拌はスリーワンモータ（BL300/HEIDON）を用い、回転速度300rpmで攪拌した。攪拌時間は1分、3分、5分、10分とした。

混合後、円筒形のガラスリング（直径2.5cm，高さ1.7cm）を並べたピーカーに試料を注ぎ、10°Cの恒温器中で24時間冷却し、混合ゲル試料を得た。試料を、直径2.5cm，高さ1.7cmの円筒形に成型し、各測定に用いた。

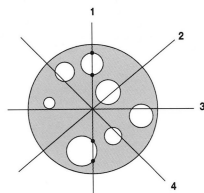
（2） ガラスビーズ／ゼラチン混合ゲル：モデル分散系として、ガラスビーズ／ゼラチン混合ゲルを調製した。寒天の代わりにガラスビーズをゼラチン溶液に混合し、分散粒子径の影響をみるためにガラスビーズは粒子径の異なる2種（0.1mm，1mm）を用いた。混合割合は寒天：ゼラチンが25：75と同様に、ガラスビーズの混合比を0.25とした。ゼラチンの濃度は10.4%とした。また粒子径1mmのガラスビーズを用いて、混合割合を3，5，10，25%と変化させ、4種の混合割合の異なるガラスビーズ／ゼラチン混合ゲルを調製した。

2.3 平均線分長の測定

試料を厚さ3mmに切り、断面を写真撮影した。得られた断面写真上において中心を通る4本の試験線を引き、その試験線の長さを分散している寒天との交点の数でわった値を線分長とし、平均線分長を算出した（図1）²⁾。

2.4 力学特性の測定

（1） 破断特性：クリープメータ（RHEONER RE-3305/山電）を用いて、応力-ひずみ曲線を測定した。測定条件は、プランジャー直径：4.0cmφ，圧縮速度：3.0cm/min，変形率：80%，測定温度10°Cである。応力-ひずみ曲線から破断



線分長 [mm] = 試験線の長さ / 交点の数
平均線分長の逆数：単位体積あたりの界面面積

図1 分散状態の解析方法

ひずみ、破断応力、破断エネルギーおよび初期弾性率を求めた³⁾。

（2） 静的粘弾性：クリープメータ（RHEONER RE-3305/山電）を用いて、クリープ曲線を測定した。測定条件は、圧縮速度：30cm/min，圧縮時間5分，測定温度10°Cである。なお、荷重は全ひずみが試料の高さの10%以内（線形性の範囲内）になるように選定した。クリープ曲線を4要素モデルで解析し、フック部の弾性率、フォークト部の弾性率、フォークト部の粘性率およびニュートン部の粘性率を求めた⁴⁾。

3. 結果及び考察

3.1 平均線分長による二相分散構造の評価

同一組成で異なる二相分散構造を有する混合ゲルを得るために、ゼラチンがゲル化しない温度条件で保持し、攪拌した後ゼラチンがゲル化する温度条件にまで冷却する方法を選んだ。

本研究で検討した調製方法で得られた混合ゲルは、いずれも連続相がゼラチンで分散相が寒天である海島構造を有していた。海島構造のような二相分散構造を評価する方法として断面写真から単純に二次元の粒子径を測定する方法や、断面の粒子径分布から三次元の粒子径分布を求める方法があるが、本研究では断面写真から平均線分長を求

めた。平均線分長は二相分散構造の代表長であるばかりでなく、その逆数はステレオロジーの理論から単位体積あたりの界面面積に等しい²⁾。

混合ゲル断面の平均線分長の結果を図2に示す。攪拌時間の影響については、攪拌時間が長くなるに従い平均線分長は小さくなる傾向を示したが、その傾向は高破断応力系の方が顕著であった。低破断応力系、高破断応力系いずれも、混合温度が異なると分散相の大きさに違いが見られ、高い温度で攪拌したほうが平均線分長は小さくなった。平均線分長は、寒天の混合比が小さい方が混合温度の違いにより差が大きく、混合比が大きくなるに従い差も小さくなった。また寒天の混合比が大きくなるに従い、平均線分長は小さくなった。

60℃で混合した試料は光学顕微鏡では分散構造が観測できなかった。

以上の結果から、保持温度と攪拌時間を変えることによって、二相分散構造の異なる混合ゲルを調製できることが確かめられた。

3.2 破断特性に及ぼす二相分散構造の影響

破断特性に及ぼす二相分散構造の影響について検討した。低破断応力系の結果を図3に示す。対照として二相分散構造が確認できなかった60℃で混合した試料のデータを平均線分長ゼロの所にプロットした。点線はゼラチン単独試料の値を示す。

破断ひずみは、分散相の大きさの影響をあまり受けなかったのに対し、破断応力と破断エネルギーは、平均線分長が大きくなるに従い顕著に低下

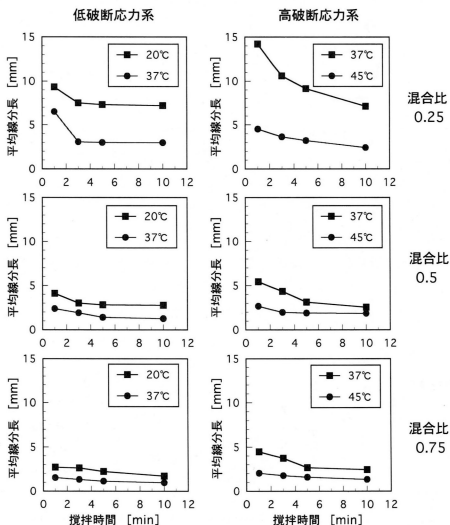


図2 混合ゲルの二相分散構造

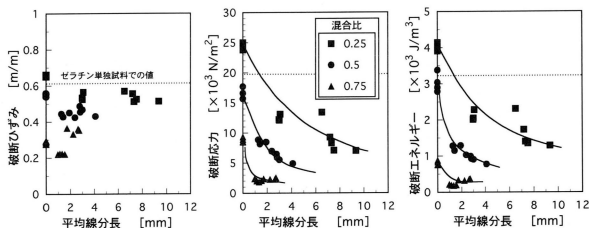


図3 破断特性に及ぼす二相分散構造の影響 (低破断応力系)

した。このことから、同一組成であっても二相分散構造に依存して破断特性が変わることが明らかとなった。ただし寒天の混合比が0.75の試料は、分散構造の影響をあまり受けなかった。寒天の混合比0.25、60°Cで混合した試料は、単独ゲルよりも破断応力、破断エネルギーが高くなり、混合による相乗効果がみられた。また存在する粒子の大きさはほぼ同じでも組成の影響を受け、寒天の混合比が増加するに従い破断ひずみ、破断応力、破断エネルギーは低下した。

高破断応力系の破断特性については、図4に示すように低破断応力系と同様、平均線分長が大きくなるに従い値は低下した。低破断応力系では二相分散構造の影響をあまり受けなかった破断ひず

みも、高破断応力系では平均線分長が大きくなるに従い低下する傾向を示した。低破断応力系において単独ゲルより破断応力が高くなった寒天の混合比0.25、混合温度60°Cの試料は、高破断応力系では単独ゲルより破断応力、破断エネルギーが低下した。また、寒天の混合比が増加するに従い破断ひずみ、破断応力、破断エネルギーは低下した。

3.3 静的粘弾性に及ぼす二相分散構造の影響

低破断応力系での静的粘弾性に及ぼす二相分散構造の影響を図5に示す。フック部の弾性率については、平均線分長の大きさに依存せずほぼ一定の値を示し、分散構造の影響をあまり受けなかったが、ニュートン部の粘性率は平均線分長が大きくなるに従い低下する傾向を示した。フック部の

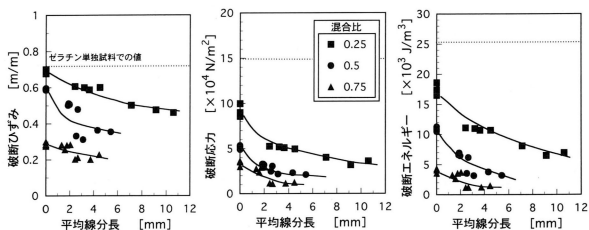


図4 破断特性に及ぼす二相分散構造の影響 (高破断応力系)

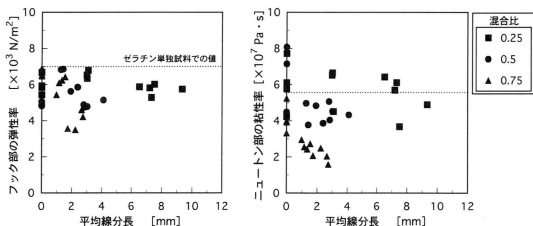


図5 静的粘弾性に及ぼす二相分散構造の影響（低破断応力系）

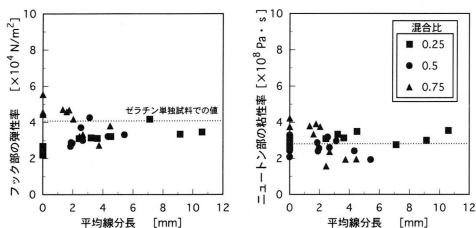


図6 静的粘弾性に及ぼす二相分散構造の影響（高破断応力系）

弾性率，ニュートン部の粘性率いずれも，寒天の混合比が増加するに従い低下する傾向を示した。

高破断応力系での結果を図6に示す。低破断応力系の場合と異なり，フック部の弾性率，ニュートン部の粘性率いずれも，平均線分長の大きさに依存せずほぼ一定の値を示した。しかもこれらの粘弾性率は，点線で示したゼラチン単独試料の値とほぼ一致していた。また，寒天の混合比が変化してもフック部の弾性率，ニュートン部の粘性率はほとんど変わらなかった。以上のことから，ゼラチンを連続相とする混合ゲルの場合には，静的粘弾性は連続相の物性が支配的で，分散構造や組成の影響をあまり受けないことが示された。

3.4 ガラスビーズ添加の影響

二相分散構造の影響をさらに詳細に検討するために，寒天の代わりにガラスビーズを分散させたモデル分散系を調製し，破断応力について検討した。

図7にガラスビーズ／ゼラチン混合ゲルと寒天／ゼラチン混合ゲルの代表的な応力－ひずみ曲線を示す。ガラスビーズと寒天の混合比はいずれも0.25である。ゼラチン単独ゲルと比較して，ガラスビーズを添加することによって破断応力は大きく減少し，寒天／ゼラチン混合ゲルでの破断応力と同程度となったことから，モデル分散系として適当と判断された。寒天／ゼラチン混合ゲルでは立ち上がりの角度がわずかに小さくなったのに対し，ガラスビーズ混合ゲルは立ち上がりの角度

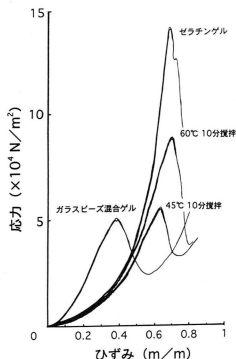


図7 混合ゲルの応力-ひずみ曲線
(混合比0.25, 高破断応力系)

がかなり大きくなった。これは、ガラスビーズ内部には水が浸入しないため混合ゲルの希釈効果が現れなかったためと考えられた。

図8にガラスビーズの粒子径と破断応力との関係、及びガラスビーズ含量と破断応力との関係を示す。ガラスビーズの粒子径が大きくなるに従い、また含量が多くなるに従い破断応力は低下した。この結果は寒天/ゼラチン混合ゲルの場合と同じ傾向であった。

これらのガラスビーズおよび寒天を用いた結果

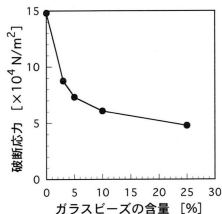
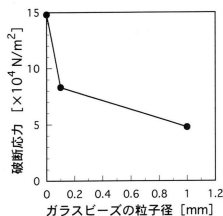


図8 ゼラチンゲルの破断応力に及ぼすガラスビーズ添加の影響

から、混合ゲルの破断機構について考察する。脆性破壊では、つながっている構成要素のうち最も弱い要素が破壊すれば全体が破壊するという最弱リンク説が知られており⁵⁾、破壊されやすい要素(欠陥)が固体内部ではなく界面に存在するとすれば、ガラスビーズの含量が多くなるに従い二相の界面面積が大きくなるので、ガラスビーズ含量に依存して破断応力が小さくなる結果を説明できる。しかし、同一組成で粒子径が大きくなり、界面面積が減少したにもかかわらず、破断応力が小さくなった結果は説明できない。一方、破壊力学におけるGriffithの理論によれば、crackが成長を開始するためには新しい表面エネルギーが必要であり、長さ2cのcrackを成長させるのに必要な応力は $c^{-1/2}$ に比例することが示されている⁶⁾。混合ゲルにおいては、分散相と連続相との界面がGriffith crackとして働くことと仮定すれば、体積分率が等しい場合に粒子径が大きいほど破断応力が小さくなるという結果、及び粒子数が増加するほど破断頻度が増して破断応力が小さくなるという結果を説明することができる(図9)。従って、定性的な議論ではあるが、分散相と連続相の界面がGriffith crackとして働き、そこから破壊が起こることが示唆された。

3.5 高齢者用食品創製への提言

本研究の結果より、寒天/ゼラチン混合ゲルの

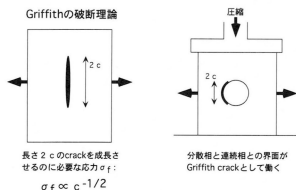


図9 混合ゲルの破断モデル

力学特性は、内部の二相分散状態に依存しており、混合ゲルの内部状態を制御することにより、同一の材料からさまざまな食感をもつ混合ゲルを調製できる可能性が示された。例えば2つのものが硬くても混合し、相分離を積極的に活用することにより、好ましい力学物性のものを調製できる。

高齢者にとって飲み込みやすい食品の形態の工夫として、豆腐、粥、マッシュポテト、ポタージュ状のもの、ゼリー、すりおろし状のものなどが挙げられ、厚生省による食品群別許可基準によると、ゲル状のものはかたさが $1 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 以下のものが高齢者に適しているとされている（表1）⁷⁾。従って、食べたい食材がかたくて高齢者にとって飲み込みにくいものであっても、適当なサイズに細片化しゲル中に分散させることによって、高齢者に適した $1 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 以下のかたさのゲル状食品とすることができるであろう。また、このことを利用すれば、同一素材でも調製条件を変えることにより、異なる食感をもつ飲み込みやす

いゼリーを調製することが可能であり、単調な食感になりがちな高齢者用食品・嚥下障害者用介護食に食感の面から選択の幅が広がり、高齢者や嚥下障害者に「選ぶ喜び」を享受してもらえることにつながることを期待したい。

4. 要 約

- (1) 本研究で検討した調製法によって、ゼラチンの連続相に寒天が分散した混合ゲルを得ることができた。
- (2) 混合ゲルの破断強度は単独ゲルに比べ低下し、分散相の割合が高くなるに従い破断強度は低下した。同一組成においては、分散粒子の大きさが大きくなるに従い、破断強度が低下する傾向を示した。
- (3) 分散相と連続相の界面がGriffith crackとして働き、そこから破壊が起こることが示唆された。
- (4) 寒天/ゼラチン混合ゲルの力学特性は、内部の相分離状態に依存しており、混合ゲルの内部状態を制御することにより、同一の材料からさまざまな食感をもつ混合ゲルを調製できることが示唆された。

本研究を遂行するにあたり、多大なるご援助を賜りました浦上食品・食文化振興財団に厚く御礼申し上げます。

表1 食品群別許可基準

食 品 群		規 格	
種別	形状	硬さ（一定速度で圧縮した時の抵抗）	備考（硬さ、食べやすさの目安）
咀嚼・嚥下困難者用食品	ゾル	$5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 以下	かまなくてもよい
	ゾル中に固形物	$1 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 以下	かまなくてもよい
	ゲル	$1 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 以下	舌でつぶせる
	ゲル中に固形物	$5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 以下	歯ぐきでつぶせる

* 固形物の大きさの上限の目安は、立方体に近いもの、球形に近いもの、不定型な塊状のもの等にあてははる 1 cm^3 とする。但し扁平、細長いもの等にあてははる、長さの上限をおおむね 2 cm とする。

厚生省（生活衛生局新開発食品保健対策室）

文 献

- 1) L.E. Nielsen 著, 小野木重治 訳: 高分子と複合材料の力学的性質, 化学同人 (1976)
- 2) 諏訪紀夫: 定量形態学, 岩波書店, p.24 (1977)
- 3) 大村公仁子, 赤羽ひろ, 中浜信子: 家政誌, 29, 22 (1978)
- 4) 中川鶴太郎, 神戸博太郎: レオロジー, 岩波書店, p.237 (1960)
- 5) 横堀武夫: 材料強度学 第2版, 岩波全書 (1964)
- 6) A.A. Griffith, Phil. Trans. Roy. Soc., A221, 163 (1921)
- 7) 厚生省生活衛生局長通達「特別用途食品の表示許可について」

Study on phase separation in mixed gels and its application to developing foods for persons of advanced age

Keiko Fujii (Faculty of Education, Yamagata University)

The agar/gelatin mixed gels which had biphasic dispersion structure to be different with the same composition were prepared and their mechanical properties were investigated. Agar/gelatin mixture was first kept over the gelling temperature of gelatin and under that of agar with stirring for the selected period, and then cooled under the gelling temperature of gelatin. The mixed gels prepared by this method consisted of a dispersed phase of agar and a continuous phase of gelatin. The rupture stress of mixed gels decreased as the content of a dispersed phase increased. In the same composition the rupture stress showed the lower tendency as the size of dispersed particles became larger. These results suggested that the interface between a dispersed phase and a continuous phase played a role as Griffith crack, and the rupture of mixed gels occurred from that place. In this work, it was found that the mechanical properties of agar/gelatin mixed gels were dependent on internal phase separation structure and that we could prepare the mixed gels which had a various texture from the same composition by controlling their internal structures. Furthermore, even if a food is too hard for persons of advanced age to swallow it, we could prepare a gelatinous food suitable for them by processing.