坐りの効果に対する理論的考察

丹羽 栄二・中山 照雄

(1984 年 4 月 12 日受理)

Theoretical Approaches on the Strengthening Fish Flesh Gel by Setting

Eiji NIWA*¹ and Teruo NAKAYAMA*¹

It has been known that the protein network structure disperses more finely and homogeneously in the elastic fish flesh gel and the gel strengthened by setting than in the brittle gel. Here, an elastic model was assumed in order to clarify the mechanism of strengthening the gel by the setting. N_1 and n_2 numbers of spring coil were connected respectively in parallel ($n_1 \geq n_2$, n_1 plus n_2 equals constant). The paralleled coil of former numbers n_1 signified a micro-portion where the protein network structure existed abundantly in the gel, while the other paralleled coil signified the portion where the structure existed scarcely. Two sets of the paralleled coil were connected each other in series. From the assumption that each coil was broken at a limiting strain, thus obtained compound coil was calculated to be maximum in the breaking strain, breaking stress and elastic modulus at $n_1 = n_2$.

From these results, it was presumed that the gel was strengthened by the homogeneous dispersion of protein network structure induced by the setting.

かまぼこ中のたん白の網状構造の分散は均一ではなく、それが密に分布する個所と疎に分布する個所がくり返す^{1,2)}。この粗密の差は足の弱いかまぼこや戻りを経て作られたものにいちじるしいが、足の強いものや坐りを経て作られるものではこの分散は均一となる。

さきに筆者らは合成バネのモデル網状構造の分散が均一になるほど、かまぼこの弾性率が増す理由を考えた。³⁾

一方、プランジャーの貫入度試験から得られるジェリー強度や凹みの大きさは足の強いもの、坐りを経たものに大きい。⁴⁾ このジェリー強度と凹みの大きさは引張試験における引張強度と破断伸びにそれぞれ対応し、⁵⁾ 後 2 者のパラメーターも足の強いもの、⁶⁾ 坐りを経たもの⁷⁾ で値が大きい。ここでは、坐り工程を加えることによって網状構造の分散が均一になると、これらいずれのパラメーターも大きくなる理由を考える。

方法と結果

かまぼこ中のたん白の網状構造の分散状態のモデル化さきに述べたように、かまぼこ中ではたん白の網状構造が密にある個所と粗にある個所がくり返すので、網状構造の分散の最小基本単位は密にある個所と粗にある個所の相隣れる一対と考えることができる。そして、密にある個所では粗にある個所より弾性率への寄与が大きいと

考えて当然であろう。そうすれば、密にある個所の弾性模型は同一規格のバネ (長さ x_0 , 弾性率 k_0) を並列に沢山 (n_1 個) 接続したもの、粗にある個所は少なく (n_2 個) 接続したもので表わされる ($n_1 \geq n_2$)。そして、粗密の個所が隣り合うので、Fig. 1 のようにこの 2 組の並列バネをさらに直列にしたものを最小基本単位のモデルと考える得る。上段の並列バネの弾性率は $n_1 k_0$ 、下段のそれは $n_2 k_0$ で、これらを直列にしたものの合成弾性率 K は (1) となる。

$$K = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} \cdot k_0 \quad (1)$$

ここで、かまぼこを圧縮あるいは引張って破断するときを考えるかまぼこにひずみを与えるとそれが小さいうちは応力との関係はフックの法則 (応力 = 弾性率 × 変形量) にしたがう。ひずみが徐々に大きくなるにつれてこの関係は失われ、やがてある点 (破断ひずみ) で破断する。ミクロに見れば網状構造を形成する結合の弱い部分が崩壊することによると思われる。一方、バネにもそれぞれ許容応力が決められ、それを超えるひずみを与えると崩壊する。このひずみはバネの材質、太さ、剛性率などによって異なるが、ここでは Fig. 1 におけるそれぞれのバネのひずみが α を超えると破断すると考える (圧縮のとき $\alpha \geq 0$, 引張りのとき $\alpha \leq 0$)。そして、かま

*¹ 三重大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Mie University, Tsu 514, Japan).

*² 佐藤繁雄・土屋隆英・松本重一郎: 日水会昭和 59 年度春季大会講演要旨集, p. 242.

Fig. 1. Elastic model for the minimum fundamental unit of the dispersion of protein network structure in fish flesh gel. The upper step of paralleled spring coil signifies a micro-proportion where protein network structure exists abundantly in the fish flesh gel and the lower step signifies the portion where the structure exists scarcely ($n_1 \geq n_2$).

ほこもバネも破断までフックの法則にしたがうと近似する。さらに、Fig. 1 の模型を x だけ圧縮 (引張) したとき、上段のバネの縮み (伸び) を x_1 、下段におけるそれを x_2 とする ($x_1 + x_2 = x$)。このとき、バネ全体に生ずる応力は (1) で求められる K と x の積となる。やがて、上、下段いずれかのバネの縮み (伸び) が ax_0 を超えるとバネは破断する。この様子を Fig. 2 に示したが、このグラフは貫入度試験や引張り試験で画かれるテクスチュロメーターパターンにはかならない。

さらに、Fig. 1 における破断箇所はひずみの小さい上段部よりも、その大きい下段部となる。組織的に不均一な物質が破壊するとき応力集中現象にみられるようにまず弱い部分にそれが起るのは当然で、かまぼこでもさきに述べたように網状構造の少ない部分 (したがって結合エネルギーの少ない部分) に起るものとみられる。このときの破断応力 F_0 と下段のバネの縮み (伸び) x_2 の関係は (2) であらわされる。

$$F_0 = n_2 k_0 x_2 = n_2 a k_0 x_0 \quad (2)$$

下段のバネが破断した瞬間の上段のバネの縮み (伸び) x_1 は、上段および下段のバネの受ける応力がいずれも F_0 であることから (3) となる。

$$x_1 = \frac{F_0}{n_1 k_0} \quad (3)$$

破断時におけるバネ全体の縮み (伸び) L_0 は ax_0 と x_1 の和であるが、(2) を (3) に代入して F_0 を消去して x_1 を求め、これに ax_0 を加えれば (4) となる。

$$L_0 = \frac{n_1 + n_2}{n_1} \cdot ax_0 \quad (4)$$

(2) における破断応力 F_0 と (4) における破断時の縮み (伸び) L_0 は岡田式ジェリー強度試験器におけるジェ

Fig. 2. Approximate texturometer pattern shown in a compression (elongation) test for fish flesh gel.

OA: Breaking strain (Maximum elongation),
AB: Breaking stress, Jelly strength (Tensile strength).

リー強度と凹みの大きさであり、志水一清水式フードレオメーターにおける引張強度と破断伸びにそれぞれ相当する (正確には、 L_0 にかまぼこ中での最小基本単位のくり返し数を乗じなければならない。また、岡田式ジェリー強度試験器ではプランジャーは等速で進行するのではなく、荷重が時間に対して直線的に増加するように設計されている。しかし、現在のようにプランジャーを等速で進行させるフードレオメーター*が汎用されるようになって、ジェリー強度と凹みの大きさという言葉は習慣的に使われている)

坐りに対するモデルの取扱い ねり製品を作るとき坐りを行おうと行なうまいと、製品のたん白含量に変化がないのは当然である。このとき、形成される網状構造の総量にも変化がないと近似すれば、バネの合計数も変わらないと考えられるので (5) が成立する。

$$n_1 + n_2 = n \quad (5)$$

(5) を (4) に代入して n_1 を消去すると、 L_0 は (6) のようになる。

$$L_0 = \frac{n}{n - n_2} \cdot ax_0 \quad (6)$$

そうすれば、(2) での F_0 、(6) での L_0 は n_2 の増加につれめ大きくなる。しかし、さきの前提条件 ($n_1 \geq n_2$) から、 n_2 は無制限に大きくなるのではなく、 $n_2 = n_1$ のとき F_0 と L_0 は極大になる。さきにも述べたように F_0 はジェリー強度 (引張強度)、 L_0 は凹みの大きさ (破断伸び) である。そして、Fig. 1 における上、下 2 段のバネ模型でそれぞれ並列に接続したバネの数 n_1 , n_2 が網状構造の分布密度であることを考えると、それらが均一に分散したとき上記 2 つのパラメーターが極大になることが判る。

一方、 L_0 と F_0 の積あるいはその 1/2 (パターン面の積) をゲル強度と呼び、品質のパラメーターとすること

* 中には時間軸に対して正弦波形を画く機種もある。

Fig. 3. Relationship between breaking strain and breaking stress, when n_1 plus n_2 equals constant in Fig. 1.

—: Breaking strain vs breaking stress,
 ----: Approximate texturometer pattern,

As n_1 approaches n_2 , the breaking stress, breaking strain and elastic modulus ($\angle A_1OB_2$) approach maximum.

---: Actual texturometer pattern of fish flesh gel recorded by plunger test, (OB_2 : fish flesh gel produced by heating the flesh sol at 90°C for 55 min, OB_3 : the gel produced by preheating the flesh sol at 35°C for 2 hr before heating at 90°C).

がある。(2) と (6) の積からゲル強度は (7) となる。

$$\frac{1}{2} \cdot L_0 \cdot F_0 = \frac{n_2 n}{2(n-n_2)} \cdot \alpha^2 k_0 x_0^2 \quad (7)$$

(7) も n_2 に対して増加関数となるが, n_2 の制約から $n_2 = n_1$ が極大条件となる。母体である L_0 , F_0 の極大条件がその誘導関数の極大条件に一致して当然であろう。つぎに, これらジェリー強度 (引張強度), 凹みの大きさ (破断伸び), ゲル強度とさきに報告した弾性率 (硬さ) の関係を考える。

(2) と (6) から n_2 を消去すると L_0 と F_0 の関係 (8) が導びかれる。

$$F_0 = \alpha k_0 n x_0 \left(1 - \frac{\alpha x_0}{L_0} \right) \quad (8)$$

L_0 を横軸, F_0 を縦軸とした直交座標に (8) の関係を目盛ると Fig. 3 の実線のようなグラフとなる。

このグラフの任意の点 B_1 から横軸に垂線を下したときの交点を A_1 とすると OA_1 が凹みの大きさ (破断伸び) で, AB_1 がジェリー強度 (引張強度) である。そうすれば, O, B_1 , A_1 の 3 点を点線で結んで画かれる直角三角形はテクスチロメーターパターンそのものとなる。

そして, この 3 角形の面積がゲル強度をあらわす。 n_2 が増加するにつれ B_1 は曲線上を上向きに移動し, $n_2 =$

n_1 で B_m となる。そして, このとき F_0 , L_0 , $(1/2)F_0 \cdot L_0$ が極大となる。

さらに, パターンの立上り角 $\angle A_1OB_1$ は n_2 とともに増加する。この角度は弾性率であって, 岡田式ジェリー強度試験器ではやわらかさ (やわらかければ角度が小さい), 志水清水式のそれでは硬さの指標として利用される。なお, n_2 の増加につれて弾性率が増すのは (5) と (1) から n_1 を消去しても導びかれる。さきに筆者らが網状構造の分散が均一になると弾性率が上ることを導びいたのはこれらによる。

以上のように, 坐り工程を加えると硬さだけでなく破断応力, 破断伸びなどのパラメーターの値が高くなることが判ったが, これらはねり製品製造現場における日常の経験的事実と一致する。Fig. 3 に坐りを経て作られたスケソウダラのかまぼこ OB_3 とそうでないもの OB_2 の貫入度試験による結果を相対的に併記したが, この辺の事情をよく説明している (OB_3 : 坐り 35°C, 2 時間, 本加熱 90°C, 55 分で作られたもの; OB_2 : 同じすり身から本加熱だけで作られたもの)。

考 察

かまぼこの足には, かみ切るときの硬さ, 粘り, しなやかさ, 弾力性のほか, ふっくらとしたやわらかさといった多面性が要求される。最初の硬さは F_0 に, 粘りやしなやかさは L_0 に, そして最後のやわらかさは $\angle A_1OB_1$ に関係する。いずれのパラメーターも重要で $F_0^{4)}$, $L_0^{4)}$, $(1/2)F_0 \cdot L_0^{4)}$ は品質と正の相関が, $\angle A_1OB_1^{3)}$ は負の相関があるとされる。

さきに述べたことから, 網状構造の分散が均一になるほど F_0 , L_0 , $(1/2)F_0 \cdot L_0$, $\angle A_1OB_1$ が大きくなることが判った。坐りの工程を加えることによって網状構造の分散が細かく均一になれば, これらの値が増えて当然である。と同時にふっくらとしたやわらかさが失われ, ゴム状の固い食感に変わるもよく理解できる。

しかし, 縦軸が荷重であらわされるテクスチロメーターパターンでは, OB_1 は現実に直線ではない。プランジャーにもよるが多くの場合, 圧縮や貫入度試験では上に, 引張試験では下にわん曲しがちである。圧縮や引張りによる断面積変化を考えて応力に書き直すといく分直線に近付くが, このわん曲は単に断面積変化によるものといきれない面がある。このわん曲度そのものがかまぼこの品質に大きく影響されるからである。例えば引張試験ではわん曲度は歯ぎれに関係し, それが大きいものほど歯ぎれが悪い。逆に圧縮試験ではその大きいものほど品質がよいことはテクスチロメーター感応性⁹⁾ や圧縮特性値⁹⁾ が官能値に大きく相関することから明らかである。だから, これらのパラメーターとの関連を含めて説

明しようとするれば別のモデルを考えるか、条件設定を再考するよりほかはない。*

しかし、本来強足と言われる魚種から作られたかまぼこと坐りで補強したそれとでは明らかに食感が違うのに、これらの間の網状構造の分散の微妙な差異を見出し得ない現在、これ以上のモデル化は危険にさえ感ずる。

本研究は昭和 58 年度文部省科学研究費助成による魚肉ゲル中のたん白の高次構造論的研究の一環として行なわれた。

* 例えば Fig. 1 のモデルで並列になったパネのそれぞれの α が異なり、その値の小さなものから破断すると考えれば引張試験における歯ぎれは説明できるが、同じモデルで圧縮試験における感応性や圧縮特性値を説明することはできない。

文 献

- 1) 三宅正人・上住南八男：三重県大紀要，6, 313-316 (1965).
- 2) 三宅正人・林孝市郎・田中明子・丹羽栄二：日水誌，37, 534-539 (1971).
- 3) 丹羽 栄二・中山 照雄・浜田 巖：日水誌，49, 245-249 (1983).
- 4) 岡田 稔：東海区水研報，No. 36, 22-126 (1963).
- 5) 志水 寛・清水 亘：日水誌，26, 911-916 (1960).
- 6) 丹羽 栄二：食品の物性—III (松本幸雄編)，食品資材研究会，東京，1977, pp. 19-30.
- 7) 志水 寛：食品の物性—VII (山野善正編)，食品資材研究会，東京，1981, pp. 149-160.
- 8) 山野善正・江本三男・吉岡正久・福井義明：食工誌，20, 358-363 (1975).
- 9) 福島 清：食品工業，11, 37-46 (1968).