

3 肉製品の結着性

岩崎智仁*

3.1 はじめに

筋肉タンパク質のゲル化は、肉製品の結着性発現のために重要である。ハムやソーセージの品質は、筋肉を構成する筋原線維タンパク質の加熱ゲル化に伴う結着性と保水性の発現により、その善し悪しが判定される。結着性とは、プレスハムや粗挽きソーセージなどの場合には肉小塊同士が接着すること、またエマルジョンタイプソーセージでは細切赤肉と脂肪ならびに水分を混和し加熱後にもこれらが一つの塊になることをいう。いずれの肉製品も接着性の発現によって外部からの力に対して一定の抵抗力を持つようになり、内部に水分を保持する保水性を発現する。したがって、これらの性質は肉製品のテクスチャーやジューシーさに直接影響を及ぼすが、結着性の良否には、筋原線維タンパク質の加熱前の性状が特に重要である。

3.2 加塩と筋原線維タンパク質の性状変化

塩漬などの加塩による筋原線維タンパク質の性状変化について述べる前に、筋肉を構成するタンパク質について概説する。筋肉を構成するタンパク質には、筋原線維タンパク質、筋漿タンパク質、筋基質タンパク質がある。筋原線維タンパク質は0.5 M以上の塩溶液に溶解する筋原線維構成タンパク質であり、筋漿タンパク質は細胞質に溶存する水溶性のタンパク質、筋基質タンパク質は、0.5 M以上の塩溶液にも溶解しない結合組織のタンパク質である。筋原線維の主なタンパク質はミオシンとアクチンであり、その割合は筋肉全体の50-60%を占める。またアクチンとミオシンの相互作用により筋収縮が生じる。これらのことから、筋原線維タンパク質は運動器官としての筋肉組織の量的質的主体である。ミオシンとアクチンは、トロポニン、トロポミオシン、 α -アクチニン、コネクチン、ネプリリンなどのタンパク質と共に、高度に組織化された筋原線維構造として骨格筋組織中に存在している。

食肉製品の製造において塩漬は、肉中に塩を拡散させるための必須の行程である。結着性の発現には、筋原線維タンパク質中のミオシンが主要な役割を担っている。筋原線維タンパク質は高塩濃度溶液下では溶解する性質をもつ。と殺直後のATPが残存している家畜の骨格筋を、高塩濃度溶液で処理するとミオシンが抽出される。しかし、死後の時間が経過しATPが消失した筋肉を用いた場合には、ミオシンとアクチンが結合したいわゆるアクトミオシンが抽出される。アクトミオシンの加熱ゲル化能は低く、またと殺直後の筋肉を原料として用いることが難しいことから、肉製品製造時には塩溶性タンパク質中のミオシンの比率を高めるために、通常は重合リン

* Tomohito Iwasaki 酪農学園大学 酪農学部 食品科学科 准教授

酸塩を添加する。重合リン酸塩の一種であるピロリン酸塩はミオシンと結合することで、その立体構造の一部を変化させてミオシンはアクチンフィラメントから解離し、ピロリン酸自体はミオシンによる加水分解作用を受けないために、ミオシンは解離した状態で存在し続けるとされている¹⁾。さらに、多くの重合リン酸塩の水溶液は弱アルカリ性の緩衝能を示し、肉中のpHは酸性から中性側にシフトすることも、ミオシンがモノマーとして抽出される一因となっている。塩漬して塩濃度を高めた肉塊に重合リン酸塩と水を添加してカッティングすると、抽出タンパク質中には、ミオシンモノマー、ミオシンフィラメント、アクチンフィラメントならびにアクトミオシンが混在するようになる。これらのタンパク質の加熱ゲル化が、複雑に影響し合ってソーセージタイプの肉製品の結着性と保水性を発現させる。

3.3 ミオシンの加熱ゲル化の機構

ミオシンは筋原線維の太いフィラメントを構成するタンパク質で、細いフィラメントを構成するアクチンと相互作用して、筋収縮を引き起こす。骨格筋のミオシンは分子量約48万で、鎖量20万の重鎖2本と2~3万の4本の軽鎖から成り、重鎖は球状の頭部と尾部を構成している。尾部では2本の重鎖が互いに絡まりあい、helical-helix構造によって1本のロッドを構築し、4本の軽鎖はすべて頭部に結合している。ミオシンは生理的イオン強度下では尾部同士が会合してフィラメントとして存在し、0.3M以上の高塩濃度下ではモノマーとして分散している。塩漬によ

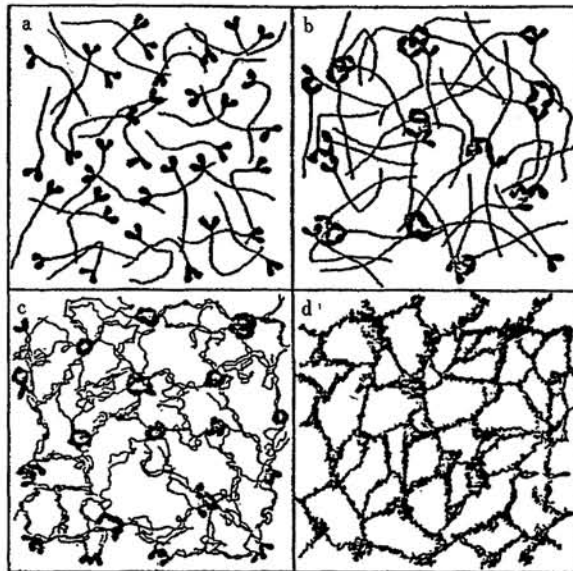


図1 ミオシンモノマーの加熱ゲル化モデル²⁾

- a: 加熱前のミオシンモノマー, b: 43℃ 付近での頭部間の凝集反応,
c: 55℃ 付近での尾部間の凝集反応, d: 60-70℃ での網目構造の形成

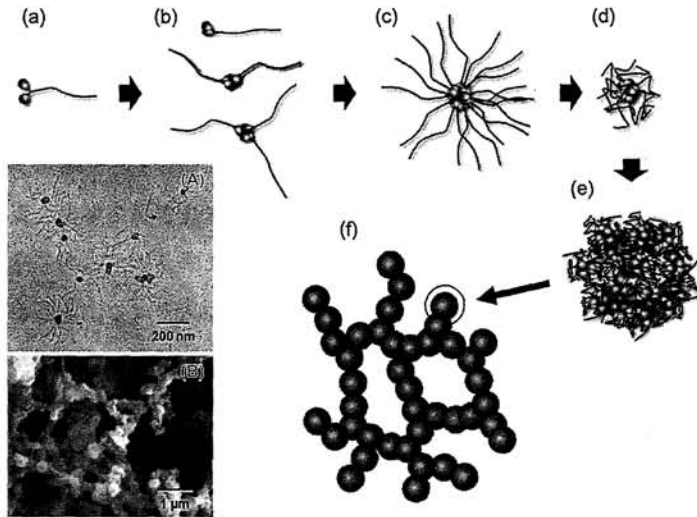


図2 新規のミオシンモノマーの加熱ゲル化モデル⁵⁾

(a)未変性, (b)加熱初期の凝集体, (c)デイジーホイール状凝集体, (d)凝集体での尾部の変性, (e)尾部変性に伴う凝集体の集合, (f)ゲルの網目構造の形成, (A)加熱凝集体 (0.5 M KCl, pH 6.0, 40°C, 10分間) の透過型電子顕微鏡 (TEM) 像, (B)加熱ゲルの電界放出型走査型電子顕微鏡 (SEM) 像

って加えられた食塩により肉中の塩濃度が増加した状態に、さらに重合リン酸塩を添加して肉塊をカッティングすることで、ミオシンモノマーがより多く抽出される。このミオシンモノマーの加熱ゲル化については多くの研究報告がある。安井と鮫島²⁾が提唱したモデル (図1) では、2段階の反応を経てゲルが形成され、第一段階では、30-35°C でミオシン頭部の凝集反応が生じ、次いで、50-60°C で、尾部の helical-helix 構造が解け、解かれた尾部同士が互いに絡まりあい3次元的な網目をもつ凝集構造が形成される。高塩濃度下のミオシンモノマーの加熱ゲルは、aggregate type と呼ばれる粒子状の構造物が数珠状に連なった網目構造を呈するが³⁾、上記の加熱ゲル化モデルでは、粒子状構造物の形成を説明できない。ミオシンモノマーの加熱ゲルの内部構造とゲル化に至る前の分子形態をそれぞれ高分解能のSEMとTEMで観察した結果から、次のようなモデルが新たに提案されている (図2)。TEMで観察されたゲル化前のミオシンは、加熱初期において分子内の2つの頭部が会合して単頭様になったものや、頭部同士の分子間会合による2量体、3量体が生じ、さらに加熱が進むと頭部同士の会合が進行し、頭部の会合体が核となり尾部が放射状に広がった形態 (デイジーホイール状凝集体) が観察される⁴⁾。この凝集会合体の大きさは一定以上大きくならず、核となる頭部会合部分の大きさは40-50 nm程度である。加熱が進むにつれて、尾部の変性が始まり、放射状に広がった尾部は折れ曲がって会合体の外部を覆うと同時に隣り合う凝集体同士で尾部のランダムコイル化に伴う相互作用が生じる。このため、

第4章 食感改良剤としてゲル化剤を用いた製品

より大きな凝集体が形成されて、SEM 像に示される粒子状構造物（直径 200-400 nm）の形成に至り、最終的にそれらの粒子が数珠状に連なった網目構造を呈する。これが最近提唱されたミオシンモノマーの加熱ゲル化モデルである⁵⁾。

ミオシンのもう一方の形態であるミオシンフィラメントのゲル化については、さらに詳細な研究が進んでいる。ミオシンフィラメントの加熱ゲルは、フィラメント表面に存在するミオシン頭部間の会合が、フィラメント間で生じることでゲルを形成する（図3）。このゲルはミオシンモノマーの加熱ゲルに比べて著しく高いゲル強度を示し、その強度はフィラメントの長さに依存して高くなることが報告されている⁶⁾。フィラメント長は、一定の条件であれば、その長さがある程度均一になり、また、その加熱ゲルの内部構造は加熱温度が異なっても、ほぼ一様な strand type を呈する。このことから、ゲル自体の物性に及ぼす構成繊維（strand）の物性の影響について調査された。図4に示したように、フィラメントゲルの弾性率は、加熱温度 55℃ で最大値を示し、それ以上の加熱温度では低下した。strand の弾性率も 55℃ で最大値を示し、それ以上の加熱温度では低下していたことから、ミオシンフィラメントのゲル物性は、ゲルを構成する strand の物性によって規定されていることが示された。さらに、ミオシンはミオシン尾部を軸としてフィラメントを形成しており、フィラメント表面に存在しているミオシン頭部の変性よりも尾部の変性の方が、ゲル自体の物性に及ぼす影響が大きいことが明らかになった⁷⁾。この知見は、様々なタンパク質ゲルの物性と構成タンパク質の変性について検討する良い指針になると考

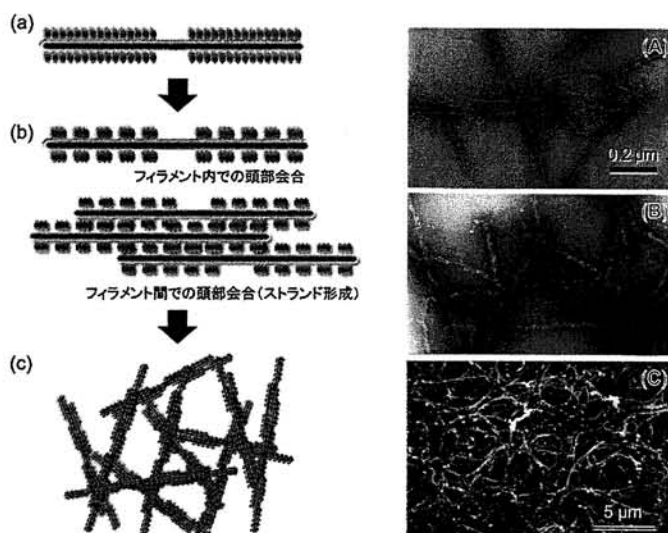


図3 ミオシンフィラメントの加熱ゲル化モデル⁵⁾

(a)未変性, (b)加熱初期, (c)網目構造の形成, (A)未変性のミオシンフィラメントのTEM像, (B)40℃, 10分間加熱後のフィラメントのTEM像, (C)フィラメントゲルのSEM像

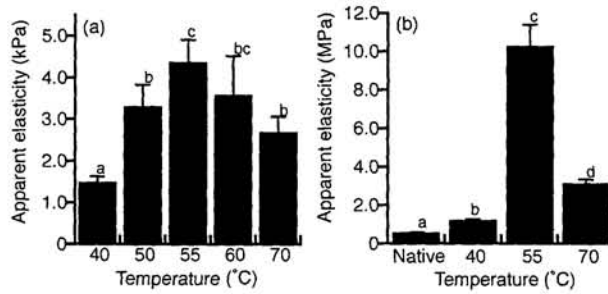


図4 ミオシンフィラメントゲルと構成繊維 (strand) の弾性率変化
(a)ゲルの弾性率, (b)ゲルを構成する strand の弾性率

えられている。

一方で、ミオシンと共に筋原線維を構成する主要なタンパク質の一つであるアクチンは、単独ではゲル化しない。しかし、ミオシンがモノマーとして存在しているときに、少量のアクチンが共存すると、一部のミオシンと相互作用したアクトミオシンとして熱変性し、ゲルの網目構造を補強してゲル強度は高くなる²⁾。ミオシンフィラメントでは、フィラメント表面のミオシン頭部とアクチンが相互作用し、ゲル化に必要なフィラメント間の頭部間相互作用が阻害されてゲルは弱くなる⁸⁾。つまりアクチンは、共存するミオシンの存在様式によって、ゲルの物性に寄与する場合としない場合に別れる。

上記のように、ミオシンの形態やアクチンの有無や量比によって、得られるゲルの物性は大きく異なる。実際のエマルジョンタイプソーセージのような食肉製品においては、加熱前の原料挽肉の pH や塩濃度、さらには原料肉自体の品質（死後の経過時間やと殺時のストレスの有無）によって、ミオシンモノマー、ミオシンフィラメント、アクチン、アクトミオシンが、様々な割合で分散していると予想される。そして、ミオシンモノマーやフィラメントの含有比を上げることが、食肉製品の結着性や保水性といった品質を向上させるために重要であると考えられている。

このように、肉製品の結着性と保水性はミオシンとその複合体の加熱ゲル化が複雑に関係して決定されていると言える。紙面の都合上、ソーセージタイプの肉製品の結着性に関わる塩漬効果に偏った内容になってしまったが、肉製品の品質に及ぼす広義の塩漬効果については、多くの成書^{1,9,10)}を参考にさせていただきたい。

文 献

- 1) 伊藤肇躬, 肉製品製造学, p.1052, 光琳 (2007)
- 2) 安井勉, 鮫島邦彦, *New Food Industry*, 27 (6), 81 (1985)
- 3) A-M. Hermansson, O. Harbitz, and M. Langton, *J. Sci. Food Agric.*, 37, 69 (1986)
- 4) K. Yamamoto, *J. Biochem.*, 108, 896 (1990)
- 5) 山本克博, 化学と生物, 46 (11), 748 (2008)
- 6) K. Yamamoto, K. Samejima, and T. Yasui, *Agric. Biol. Chem.*, 52, 1803 (1979)
- 7) 岩崎智仁, 山本克博, 中村邦男, 高圧バイオサイエンスとテクノロジー, 第15回生物関連高圧研究会20周年記念シンポジウム抄録集, 2, 161 (2008)
- 8) M. Ishioroshi, K. Samejima, and T. Yasui, *Agric. Biol. Chem.*, 47, 2809 (1983)
- 9) 阿久澤良造, 坂田亮一, 島崎敬一, 服部昭仁編, 乳肉卵の機能と利用, p.227, アイ・ケイコーポレーション (2005)
- 10) 天野慶之, 藤巻正生, 安井勉, 矢野幸男編, 食肉加工ハンドブック, p.285, 光琳 (1980)