

博士（農 学） 森 建 太

学 位 論 文 題 名

コハク酸モノグリセリドによる食肉の軟化機構に関する研究

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は総頁数 71 頁の和文論文で、図 31、表 1、引用文献 44 を含み、他に 3 編の参考論文が添えられている。

食肉の品質を決定する要因の中で、軟らかさは人の嗜好性にとって最も重要である。食肉の軟らかさに直接影響を及ぼすのは、物理的衝撃に対して比較的堅固な高次構造を組んで存在する筋原線維と筋肉内結合組織であり、両者の性状は食肉の軟らかさに大きく影響する。一般に、老齢な家畜および家禽から生産される食肉は硬くて品質が劣るが、老廃牛から得られる牛肉などの硬い食肉を人為的に軟らかくすることは食肉の有効利用の点から重要な意義を有する。食肉を軟化するためには、パパインを製剤化したものが最も広く利用されているが、反応の制御が難しいために、過度の軟化や外観の劣化などが起こってしまう欠点がある。一方、タンパク質に結合し、その高次構造を変化させる物質として界面活性剤がある。著者は、界面活性剤の作用を利用し、食肉の硬さに関与している筋原線維および筋肉内結合組織を形成するタンパク質の高次構造を変化させることによって食肉を軟らかくできるのではないかと考えた。本研究では、各種界面活性剤の食肉軟化効果を検討し、その効果の最も大きかった陰イオン性界面活性剤であるコハク酸モノグリセリド (SGMS) を用いて、食肉の軟化機構を究明することを目的とした。

（1）各種界面活性剤の食肉軟化効果

本研究では、食品添加物として認められている界面活性剤の食肉軟化効果について、結合組織からなる羊腸ケーシングを用いてスクリーニングした。検討した界面活性剤の中で、剪断力値（硬さ）が最も小さかったのは脂肪酸鎖長 C=18 の SGMS であった。また、食肉の加熱収縮の程度は硬さと密接に関係していることから、種々の界面活性剤を添加して羊腸ケーシングの加熱収縮率を測定した結果、加熱収縮を抑制する効果は C=18 の SGMS が最も大きいことが分かった。

羊腸ケーシングに対して軟化効果を示した界面活性剤を選び、ローストした牛肉に対する効果を検討した。SGMS はローストした牛肉に対しても最も軟化効果が大きく、剪断力値は対照区の 2 分の 1 以下であった。官能試験においても、評価値が最も高かったのは SGMS であり、SGMS はローストした牛肉に対しても顕著な軟化効果を有することが認められた。

（2）コハク酸モノグリセリドによる食肉の軟化機構

食肉表面に塗布した顆粒状の SGMS が加熱後にどの程度、内部へ浸透しているのかが重要な問題となる。厚さ 5 mm の牛肉に SGMS を塗布してローストした時、浸透した SGMS 全量の 67% が表面から 0.5 mm 以内に存在し、2% が牛肉の中心部に存在していた。浸透した SGMS が牛肉のどの部位に存在するのかをメチレンブルーを用いて調べたところ、筋肉内結合組織の一つである筋周膜が特異的に染色され、筋原線維は全く染色されなかった。これらの結果

から、SGMS を塗布して加熱すると、牛肉表面で加熱溶解した SGMS は筋周膜に沿って内部へ浸透していくことが明らかになった。

SGMS は筋肉内結合組織に作用している可能性が考えられたので、牛肉中の筋肉内結合組織や単離した筋肉内結合組織に対する SGMS 処理の影響を検討した。筋肉内結合組織として筋上膜を用いて、SGMS の影響を調べたところ、SGMS 処理によって剪断力価は顕著に低下し、加熱収縮が抑制された。SGMS 処理による加熱収縮に及ぼす影響を調べたところ、50°C 付近で起こる筋線維に由来する収縮と、60°C 付近で起こる筋肉内結合組織に由来する収縮の二相性を示した。また、60°C 以上での加熱収縮率は SGMS 処理により有意に抑制された。これらの結果は、SGMS が筋肉内結合組織に作用し、その加熱収縮率を抑制するとともに、物理的強度を低下させることを示している。

(3) 走査電子顕微鏡を用いて形態変化を追究すると、ローストした牛肉の筋周膜ではコラーゲン細線維上に球状構造が観察されたのに対し、SGMS を塗布してローストした場合には球状構造に加えて板状構造が観察された。また、単離した筋周膜でもローストした牛肉中の筋周膜と同様の構造が観察された。これらの結果により、SGMS 処理区でみられた板状構造物は SGMS と筋周膜を形成しているコラーゲンが加熱時に結合して生成したものであることが判明した。

さらに、単離した筋上膜を用いて、SGMS 処理がコラーゲン細線維におけるコラーゲン分子の配列に及ぼす影響を透過電子顕微鏡および X 線小角散乱によって調べた。65°C で加熱した筋上膜においては、コラーゲン細線維の周期構造を示すバンドのコントラストが低く、不鮮明であったが、SGMS 処理して 65°C で加熱した筋上膜のコラーゲン細線維では対照と比べて鮮明であった。しかし、バンドの周期に対する SGMS 処理および加熱の影響はみられなかった。80°C で加熱すると、SGMS 処理の有無にかかわらずコラーゲン細線維の周期構造は認められなくなった。未加熱の筋上膜においては、X 線小角散乱のピークからコラーゲン細線維の周期構造の存在が確認できたが、65°C で加熱した筋上膜ではピークが消失しており、コラーゲン細線維の周期構造が存在しなくなってしまうこと、すなわち、コラーゲン分子の配列が乱れすることが示された。一方、SGMS で処理して 65°C で加熱した筋上膜の X 線小角散乱では、小さくなったピークが未加熱の筋上膜と同じ位置に認められ、SGMS はコラーゲン分子の配列の乱れを抑制する作用のあることが明らかになった。

以上の結果に基づいて、SGMS による食肉の軟化機構は以下のように考えることができる。食肉の筋肉内結合組織を構築するコラーゲン分子は常温では整然と配列しているが、加熱に伴って変性し、コラーゲン細線維における分子の配列が乱れて、筋肉内結合組織は著しく収縮する。この収縮は、筋肉内結合組織の物理的強度の増加につながり、加熱変性した筋原線維の物性変化と相まって、加熱した食肉は硬くなる。一方、食肉に SGMS を塗布してから加熱すると、コラーゲン細線維の表面に付着した、あるいは内部に浸透した SGMS 分子とコラーゲン分子が結合することによって、コラーゲン分子の配列の乱れが抑制される。従って、SGMS で処理して加熱した食肉においては筋肉内結合組織の収縮の程度が小さく、筋肉内結合組織の物理的強度が増加し難いために、加熱に伴う食肉の硬さの増加が抑制され、軟らかい加熱調理肉になると結論することができる。タンパク質分解酵素による食肉の軟化が酵素の活性を制御することの困難性からしばしば過度の軟化をもたらすのに対して、SGMS 処理では過度の軟化が起こらないのは、全く異なる機構によって軟化が起こるからである。SGMS による食肉の軟化は、タンパク質分解酵素法の欠点である消化時間や温度を制御することの難しさ、および外観や色、呈味性の劣化などの問題を解決する新しい方法であり、SGMS は食肉の種類を問わず有効なので、優れた食肉軟化剤であることを明示した。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 高橋 興威

副査 教授 島崎 敬一

副査 助教授 服部 昭仁

副査 助教授 西邑 隆徳

## 学位論文題名

### コハク酸モノグリセリドによる食肉の軟化機構に関する研究

本論文は総頁数 71 頁の和文論文で、図 31、表 1、引用文献 44 を含み、他に 3 編の参考論文が添えられている。

食肉の品質を決定する要因の中で、軟らかさは人の嗜好性にとって最も重要であり、軟らかさに直接影響を及ぼすのは筋原線維と筋肉内結合組織である。従って、硬い食肉を人為的に軟らかくすることは食肉の有効利用の点から重要な意義を有する。食肉を軟化するためには、パパインを製剤化したものが最も広く利用されているが、反応の制御が難しいために、過度の軟化や外観の劣化などが起こってしまう欠点がある。著者は、界面活性剤の作用を利用し、筋原線維および筋肉内結合組織を形成するタンパク質の高次構造を変化させることによって食肉を軟らかくできるのではないかと考えた。本論文では、各種界面活性剤の食肉軟化効果を検討し、その効果の最も大きかった陰イオン性界面活性剤であるコハク酸モノグリセリド (SGMS) について、食肉の軟化機構を究明することを目的としている。得られた結果は以下の通りである。

#### (1) 各種界面活性剤の食肉軟化効果

食品添加物として認められている界面活性剤の食肉軟化効果について、結合組織からなる羊腸ケーシングを用いてスクリーニングした。剪断力価（硬さ）を最も小さくしたのは SGMS であった。また、食肉の加熱収縮の程度は硬さと密接に関係しているが、加熱収縮を抑制する効果も SGMS が最も大きかった。次に、ローストした牛肉に対する界面活性剤の効果を検討し、SGMS は軟化効果が最も大きく、剪断力価は対照区の 2 分の 1 以下であることが分かった。官能試験においても SGMS の評価値が最も高く、SGMS は牛肉に対しても顕著な軟化効果を有することを認めた。

#### (2) コハク酸モノグリセリドによる食肉の軟化機構

食肉表面に塗布した顆粒状の SGMS が加熱後にどの程度、内部へ浸透しているのかが重要な問題となる。厚さ 5 mm の牛肉の両面に SGMS を塗布してローストした時、浸透した SGMS 全量の 67% が表面から 0.5 mm 以内に、2% が中心部に存在して

いた。浸透した SGMS が牛肉のどの部位に存在するのかをメチレンブルーを用いて調べたところ、筋肉内結合組織の一つである筋周膜が特異的に染色され、筋原線維は全く染色されなかった。これらの結果から SGMS を塗布して加熱すると牛肉表面で加熱溶解した SGMS は筋周膜に沿って内部へ浸透し、筋原線維には全く影響を及ぼさないことが明らかになった。牛肉中の筋肉内結合組織や単離した筋肉内結合組織に対する SGMS 処理の影響を検討したところ、剪断力価は顕著に低下し、60°C 以上の加熱収縮率は有意に抑制された。これらの結果は、SGMS が筋肉内結合組織に作用し、その加熱収縮率を抑制するとともに、物理的強度を低下させることを示している。

(3) 走査電子顕微鏡を用いて形態変化を追究すると、ローストした牛肉の筋周膜ではコラーゲン細線維上に球状構造が観察されたのに対し、SGMS を塗布してローストした場合には球状構造に加えて板状構造が観察された。単離した筋周膜でもローストした牛肉中の筋周膜と同様の構造が観察され、板状構造物は SGMS と筋周膜を形成しているコラーゲンが加熱時に結合して生成したものであることが判明した。さらに、筋肉内結合組織を構築しているコラーゲン細線維におけるコラーゲン分子の配列に及ぼす SGMS の影響を透過電子顕微鏡および X 線小角散乱により調べた。SGMS で処理して 65°C で加熱した場合、コラーゲン分子の配列は対照と比べて規則性を保持していたが、80°C で加熱すると、SGMS 処理の有無にかかわらずコラーゲン分子の規則的配列は認められなくなった。従って、SGMS はコラーゲン分子の配列の乱れを抑制することが明らかになった。

以上の結果に基づいて、食肉に SGMS を塗布してから加熱すると、コラーゲン細線維の表面に付着した、あるいは内部に浸透した SGMS 分子とコラーゲン分子が結合するために、コラーゲン分子の配列の乱れが抑制される。このことにより、筋肉内結合組織の収縮の程度が小さくなり、物理的強度が増加し難いので、加熱に伴う食肉の硬さの増加が抑制されて、軟らかい加熱調理肉になると結論している。SGMS による食肉の軟化は、タンパク質分解酵素法の問題点を解決する新しい方法であり、SGMS は食肉の種類を問わず有効なので、優れた食肉軟化剤であることを明示している。

以上の研究成果は SGMS による食肉の軟化機構を多面的かつ詳細に追究して多くの新知見を見出したものであり、学術上応用上貢献するところが大きく、高く評価される。よって審査員一同は、森 建太が博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。