

博士（農 学） 方 虹

学位論文題名

豚の成長および豚肉の熟成に伴う筋肉内結合組織の変化に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は総頁数104頁の和文論文で、図49、表1および引用文献92を含み、他に1篇の参考論文が添えられている。

食肉の品質を決め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。食肉の軟らかさは筋肉内結合組織に起因する部分と筋原線維に起因する部分からなっている。筋肉内結合組織に関しては、筋内膜および筋周膜を構築するコラーゲン細線維の量および性質が食肉の硬さに直接的に影響を及ぼす要因である。老齢な家畜から生産される食肉は硬くて品質が劣るのはコラーゲンの分子間架橋がコラーゲン細線維の堅牢化を招くことによるものであり、異なる部位の鶏肉の硬さが違うのはコラーゲン含量および筋周膜の厚さの差異によるものであることが明らかにされている。一方、家畜の骨格筋を食肉として利用する場合には屠畜後に一定の熟成期間が必要であり、豚肉の場合は6-7日であるが、この間に豚肉は軟化し風味も改善されて食味が向上する。豚肉の熟成に伴う筋原線維構造の変化については、これまでに多くの研究が行われてきたが、筋肉内結合組織に起因する変化については明確な結論が得られていない。本研究では、豚肉の軟らかさに密接に関連している筋内膜および筋周膜の構造が、1) 豚の成長に伴ってどのように発達するのか、2) 異なる部位の豚肉においてどのような差異があるのか、および3) 熟成に伴ってどのように変化するのかを詳しく検討し、筋内膜および筋周膜の構造変化の機構を解明することを目的とした。

(1) 豚の成長に伴う筋肉内結合組織の発達

豚の加齢に伴い体重、半腱様筋の重量および筋線維の直径はいずれもS字状に增加了。出生直後から28日齢までは緩やかに增加了が、28日齢から183日齢までは急激に增加了、その後は緩慢になった。剪断力価は28日齢まではほとんど変化しなかつたが、28日齢以後には直線的に增加了。剪断力価が增加する原因を解明するためには豚の成長に伴うコラーゲンの性状変化を追究した。筋肉内コラーゲンの加熱溶解性は出生直後の36%から1688日齢では6%に低下した。このことはコラーゲン分子間の架橋結合が豚の成長に伴い安定な成熟架橋へ変化するのでコラーゲン細線維が堅牢になるためであると考えられる。成長に伴う剪断力価の增加と加熱不溶性コラーゲン量の增加は良く一致し、両者の相関関係は有意に高かった($r^2=0.98$)。

筋肉内結合組織の構造変化を光学顕微鏡で調べた結果、豚の成長に伴う半腱様筋の第二次筋周膜の厚さの增加と剪断力価の增加は極めて良く一致し、両者の相関関係は有意に高かった($r^2=0.96$)。更に、細胞消化・走査電子顕微鏡法により、半腱様筋の筋肉内結合組織を調べた結果、出生直後では筋内膜および第一次筋周膜の構造

はまだ完成していないが、豚の成長に伴い筋内膜を構築するコラーゲン細線維の網目構造が緻密になり、筋周膜を構築するコラーゲン線維が規則的に配列するようになると共にコラーゲン線維の太さが増加し、第二次筋周膜の厚さが増加することが明らかになった。

これらの事実から成長に伴う豚肉の硬さの増加は、筋肉内コラーゲンの分子間架橋が安定な成熟架橋へ変化するためコラーゲン細線維が堅牢になるとともに、筋内膜のコラーゲン細線維の配列が緻密になり、筋周膜のコラーゲン線維の直径および第二次筋周膜の厚さが増加することによって引き起こされると結論した。

(2) 各種骨格筋における筋肉内結合組織の差異

豚の各種骨格筋および筋肉内結合組織モデルの剪断力価はいずれも大腰筋、胸最長筋、半膜様筋、半腱様筋、大腿二頭筋および上腕三頭筋の順に大きくなつた。剪断力価が小さい骨格筋の切断応力像では小さいピークしか認められなかつたが、剪断力価が大きい骨格筋の切断応力像には多数の大きなピークが認められた。コラーゲン含量は大腰筋では 1.3 mg/g であったのに対し、上腕三頭筋では 4.7 mg/g であり、コラーゲン含量と骨格筋の硬さとの間には正の相関関係が認められた($r^2=0.86$)。Picro-Sirius Red で染色した顕微鏡像では、第二次筋周膜の厚さが骨格筋間で非常に異なり、大腰筋では第二次筋周膜の厚さが最も薄く、わずか 8 μm であったが、次いで、胸最長筋、半膜様筋、半腱様筋および大腿二頭筋の順で厚くなり、上腕三頭筋では最も厚く 50 μm であった。第二次筋周膜の厚さと豚肉の硬さとの間には高い正の相関関係が認められた ($r^2=0.90$)。また、第二次筋周膜の厚さと筋肉内結合組織モデルの硬さとの間には非常に高い正の相関関係が認められた ($r^2=0.97$)。コラーゲンの加熱溶解性は大腰筋で 24.5%，胸最長筋で 27.8%，半膜様筋で 20.6%，半腱様筋で 22.9%，大腿二頭筋で 24.9% および上腕三頭筋で 30.6% であり、コラーゲンの加熱溶解性と豚肉の硬さとの間には相関関係が認められなかつた。以上の結果から、豚肉の硬さの差異はコラーゲン含量および第二次筋周膜の厚さの違いによるものであると結論した。

(3) 豚肉の熟成に伴う筋肉内結合組織の脆弱化

4°Cで熟成した半腱様筋および胸最長筋の剪断力価はいずれも熟成5日目までは急速に低下し、その後熟成14日目まで漸減するという二相性を示した。一方、筋肉内結合組織モデルの剪断力価は熟成3日目まではほとんど変化せず、その後の熟成に伴い直線的に減少した。光学顕微鏡および細胞消化・走査電子顕微鏡法により観察した結果、熟成3日目では筋内膜のコラーゲン細線維の網目構造が乱れるようになったが、筋周膜の構造変化は認められなかつた。熟成5日目では筋内膜の構造は崩壊し、コラーゲン細線維間の間隙が多くなつた。筋周膜の構造も部分的に崩壊し、筋周膜を構築するコラーゲン線維が疎になり、細いコラーゲン線維にほぐれていた。熟成8日目では筋内膜および筋周膜の構造とも著しく崩壊しており、コラーゲン線維はさらに細い束に解離した。さらに、熟成11日目および熟成14日目の筋周膜においてはコラーゲン線維が一本一本のコラーゲン細線維にほぐれているのが観察された。また、コラーゲンの加熱溶解性は豚肉の熟成中に全く変化しないことから、コラーゲンの分子レベルの変化が起こるのではなく、コラーゲン細線維同士の接着性が低下してコラーゲン線維が脆弱になることが明らかになつた。熟成初期に見られる剪断力価の急速な低下は主に筋原線維構造の脆弱化に起因し、熟成後期に見られる剪断力価のゆっくりした低下は主に筋肉内結合組織の脆弱化に起因していると結論し、軟化を目的とした豚肉の熟成期間は 4°C で 1 週間程度が適当であることを立証した。

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

学位論文題名

豚の成長および豚肉の熟成に伴う筋肉内結合組織の変化に関する研究

本論文は総頁数104頁の和文論文で、図49、表1および引用文献92を含み、他に1篇の参考論文が添えられている。

食肉の品質を決め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。食肉の軟らかさは筋肉内結合組織に起因する部分と筋原線維に起因する部分からなっている。筋肉内結合組織に関しては、筋内膜および筋周膜を構築するコラーゲン細線維の量および質が食肉の硬さに直接的に影響を及ぼす。家畜の骨格筋を食肉として利用する場合には屠畜後、4°C内外で一定の熟成期間が必要であり、豚肉の場合は6-7日であるが、この間に豚肉は軟化し風味も改善されて食味が向上する。本論文では、豚肉の軟らかさに密接に関連している筋内膜および筋周膜の構造が、1)豚の成長に伴ってどのように発達するのか、2)異なる部位の豚肉においてどのような差異があるのか、および3)豚肉の熟成に伴ってどのように変化するのかを詳しく検討し、筋肉内結合組織の構造変化の機構を解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) 豚の成長に伴う筋肉内結合組織の発達

豚の加齢に伴い剪断力価は28日齢まではほとんど変化しなかったが、28日齢以後は直線的に増加し、豚肉が顕著に硬くなった。剪断力価が増加する原因を解明するために豚の成長に伴うコラーゲンの性状変化を追究し、筋肉内コラーゲンの加熱溶解性が出生直後の36%から56ヶ月齢では6%に低下することを明らかにした。成長に伴う剪断力価の増加と加熱不溶性コラーゲン量の増加は良く一致し、両者の相関関係は有意に高かった ($r^2=0.98$)。豚の成長に伴う筋周膜の厚さの増加と剪断力価の増加も極めて良く一致し、両者の相関関係は有意に高かった ($r^2=0.96$)。細胞消化・走査電子顕微鏡法により調べた結果、出生直後では筋内膜の構造はまだ完成していないが、成長に伴い筋内膜を構築するコラーゲン細線維の網目構造が緻密になり、筋周膜を構築するコラーゲン線維は規則的に配列するようになると共にコラーゲンの量が増加する。

ゲン線維の太さが増加して筋周膜の厚さが増加することを見出した。これらの事実から成長に伴う豚肉の硬さの増加は、筋肉内コラーゲンの分子間架橋が安定な成熟架橋へ変化するためコラーゲン細線維が堅牢になるとともに、筋内膜のコラーゲン細線維の配列が緻密になり、筋周膜の厚さが増加することによって引き起こされると結論している。

(2) 各種骨格筋における筋肉内結合組織の差異

豚の各種骨格筋および筋肉内結合組織モデルの剪断力価はいずれも大腰筋、胸最長筋、半膜様筋、半腱様筋、大腿二頭筋および上腕三頭筋の順に大きくなつた。コラーゲン含量は大腰筋では1.3 mg/gであったのに対し、上腕三頭筋では4.7 mg/gであり、コラーゲン含量と骨格筋の硬さとの間には相関関係が認められた ($r^2=0.86$)。筋周膜の厚さは大腰筋が最も薄く、わずか8 μm であったが、上腕三頭筋では最も厚く50 μm であった。筋周膜の厚さと骨格筋の硬さとの間には高い相関関係が認められた ($r^2=0.90$)。さらに、筋周膜の厚さと筋肉内結合組織モデルの硬さとの間には非常に高い相関関係が認められた ($r^2=0.97$)。以上の結果から、豚肉の硬さの差異はコラーゲン含量および筋周膜の厚さの違いによるものであると結論している。

(3) 豚肉の熟成に伴う筋肉内結合組織の脆弱化

4°Cで熟成した豚肉の剪断力価は熟成5日目までは急速に低下し、その後熟成14日目まで漸減した。細胞消化・走査電子顕微鏡法により観察した結果、熟成3日目では筋内膜のコラーゲン細線維の網目構造が乱れており、熟成5日目では筋内膜の構造は崩れ、筋周膜の構造も部分的に崩れていた。熟成8日目では筋内膜および筋周膜の構造はともに著しく崩壊しており、コラーゲン線維は細い束に解離した。さらに、熟成11日目の筋周膜においてはコラーゲン線維が個々のコラーゲン細線維にほぐれていた。コラーゲンの加熱溶解性は豚肉の熟成中に全く変化しないことから、コラーゲンの分子レベルの変化は起こらず、コラーゲン細線維同士の接着性が低下してコラーゲン線維が脆弱になることを明らかにした。剪断力価の熟成初期に見られる急速な低下は主に筋原線維構造の脆弱化に起因し、熟成後期に見られる緩慢な減少は主に筋肉内結合組織の脆弱化に起因していると結論し、軟化を目的とした豚肉の熟成期間は4°Cで1週間程度が適当であることを立証している。

以上の研究成果は豚の成長および豚肉の熟成に伴う筋肉内結合組織の変化を多面的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、最終試験の結果と合わせて、本論文の提出者 方 甦虹は博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。