

1. 軟化現象にともなうコラーゲン繊維の形態変化*1

安藤 正史*2

近畿大学農学部

近年の流通機構の発達により、比較的新鮮な魚介類が、海外をはじめとする遠隔地からでも容易に消費者に届くようになってきている。また健康ブームなどの影響もあり、魚介類の鮮度に対する消費者の関心がより強くなりつつある。ところで、魚類の場合は鮮度低下が速く、短期間の冷蔵により食品としての品質が低下する。この鮮度低下の速さは、流通の早さだけではなく補いきれない面が大きい。そのため鮮度保持法の改良・開発は水産物の生産流通をはじめとする水産業界全体にとって、いまなお非常に重要な課題である。

鮮度の基準としては光沢・香りなどが用いられているが、このほかに筋肉の硬さも大変重要な指標である。しめた直後の魚においては、筋肉は強い弾力性を持っているが、この弾力性は冷蔵中に速やかに失われ、いわゆる「軟化」現象が生ずる。この原因として、最近ではコラーゲンの影響が大きいことが報告されているが、今なお不明な点が多く残されている。そこで今回は、魚肉の軟化現象とコラーゲンとの関わりについて、組織学的な側面を中心に現在までの研究例を概説する。

1. 冷蔵中における筋肉の構造変化

筋肉の大部分は筋細胞で占められており、筋細胞の中に筋原繊維が存在する。従来、軟化現象に関わる研究例はこの筋原繊維に関するものが大多数を占めていた。一方、筋細胞の間には結合組織が存在し、筋細胞間を結合し筋肉の強度を支えている。そして結合組織はその大部分がコラーゲンによって構成されている。かつては筋肉中における量的な少なさ（約0.4%）、あるいは生化学的な解析が難しいこともあってコラーゲンの死後変化への影響は認められていなかった。そこで、生化学的な手法ではなく組織学的な手法による軟化機構の解明が試みられた。

まず光学顕微鏡による観察を、通常のパラフィン切片法により行ったところ、軟化した筋肉であるにもかかわらず、軟化現象と相関するような構造変化は全く認められなかった。しかし、筋肉は確実に軟らかくなっており、必ず脆弱化している部位があると考えられたので、

その部位を特定するために荷重試験を行った。¹⁾ この方法は筋肉に対して一定の荷重をかけて変形させ、その後常法に従って観察するものである。その結果、即殺直後と1日後の筋肉を比較すると、筋細胞間が分離することが確認された。軟化が進行する3日後ではさらに分離する傾向が認められた。この結果は、冷蔵中に筋細胞間の結合組織が脆弱化し、細胞間の結合力が低下していることを示しており、これが軟化現象の原因となっていると思われた。また同様の結果がこの他軟化現象を示すハマチ・マダイ・ヒラメ・マサバにおいても認められている。²⁾ これに対し、軟化をほとんど示さないトラフグにおいては、このような変化は全く認められず、この点からも軟化現象は結合組織の脆弱化によることが確かであると思われた。

また、この方法は人工的に組織を一部破壊する方法であるので、次に結合組織のありのままの構造変化の観察を試みた。まず、大谷の方法³⁾により水酸化ナトリウムによって筋細胞を除去し、残った結合組織を走査型電子顕微鏡により観察する方法を試みた。この方法によれば蜂の巣状の結合組織の立体構造が観察可能である。その結果、軟化が進行した筋肉では壁状に見える結合組織が薄くなっていく様子が認められた。⁴⁾ これに対し、やはりトラフグではそのような変化は認められなかった。ここで認められた構造変化は、結合組織に何らかの変化が生じ、その結果、試料作製工程においてアルカリにより結合組織の一部が溶出されてしまった結果であると考えられた。

次に、結合組織のさらに詳細な構造変化を観察するため、透過型電子顕微鏡による観察を行なった。すると、即殺後のニジマス筋肉では、筋細胞間に明瞭なコラーゲン繊維が認められたが、1日冷蔵後になると、即殺後に明瞭に認められたコラーゲン繊維が切断したり、消失した像が観察された。⁵⁾ 一方、軟化しないトラフグの場合はやはりそのようなコラーゲン繊維の構造変化は認められなかった。これらの結果から、光学顕微鏡により認められた結合組織の脆弱化は、このコラーゲン繊維の

*1 Morphological Change of Collagen Fibrils in Association with Post-Mortem Softening of Fish Meat.

*2 Masashi Ando (Department of Fisheries, Faculty of Agriculture, Kinki University, Nara 631-8505, Japan).

崩壊が原因であると考えられた。

ところで、結合組織の構造について不思議な現象が認められた。マイワシは軟化が非常に早く細胞間のコラーゲン繊維の崩壊も明瞭に認められるが、筋隔膜（いわゆる「すじ」）においては、死後1日においてもコラーゲン繊維の構造に変化は生じなかった。⁶⁾つまり、コラーゲン繊維はその存在する部位により壊れるものと壊れないものがあるということが示された。

2. 血抜きによるコラーゲン繊維の崩壊の遅延

品質の劣化である軟化をいかにしてくいとめるかという応用面について、血抜きとコラーゲン繊維の構造との関係から調べた。⁷⁾その結果、回遊性の魚であるハマチ・マアジ・シマアジの場合、血を抜かない対照区では即殺直後から死後6から15時間にかけて軟化したのに対し、血抜きした試験区ではいずれの魚種も軟化が3-9時間ほど遅れる傾向にあった。一方、回遊性ではないマダイ・ヒラメ・メジナの場合は、血抜きの有無にかかわらず、両区とも死後3日間にわたりゆっくりと軟化が進行する様子が認められ、血抜きによる軟化現象への影響は認められなかった。

また、血抜きによる軟化の遅延効果が認められた魚種についてコラーゲン繊維の構造を観察したところ、軟化が始まっている対照では、コラーゲン繊維の構造が崩壊したのに対し、血抜き個体ではコラーゲン繊維の構造は崩壊することなく安定していた。つまり、この時点でのコラーゲン繊維の構造の違いが、筋肉の硬さの違いの原因となっていると考えられた。以上の結果は、血液中に存在するなんらかの物質がコラーゲン繊維の崩壊の原因のひとつとなっていることを示すものである。

ま と め

これまでの研究結果により、魚肉の冷蔵初期における軟化にはコラーゲンが大きく関係していることが推察される。現在、冷蔵中のコラーゲンに変化が起こる原因は

不明であるが、恐らくは、プロティナーゼの作用によって起こると思われ、回遊魚の軟化が速いこと、および血抜きにより軟化の進行が遅れるという現象は、軟化の原因解明のための重要なヒントになると思われる。コラーゲンを分解する酵素が明らかになれば、その阻害剤を検索することにより、新しい鮮度保持剤の開発が期待される。また、血抜きの例のようにコラーゲンの分解を外部から調節することで、新たな鮮度保持方法の開発も期待され、今後のさらなる研究成果が待たれるところである。

文 献

- 1) M. Ando, H. Toyohara, Y. Shimizu, and M. Sakaguchi: Post-mortem tenderization of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) muscle caused by gradual disintegration of the extracellular matrix structure. *J. Sci. Food Agric.*, **55**, 589-597 (1991).
- 2) M. Ando, H. Toyohara, Y. Shimizu, and M. Sakaguchi: Post-mortem tenderization of fish muscle due to weakening of pericellular connective tissue. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **59**, 1073-1076 (1993).
- 3) O. Ohtani: Three-dimensional organization of the connective tissue fibers of human pancreas: A scanning electromicroscopic study of NaOH treated-tissues. *Arch. Histol. Jpn.*, **50**, 557-566 (1987).
- 4) M. Ando, Y. Yoshimoto, K. Inabu, T. Nakagawa, and Y. Makinodan: Post-mortem change of three-dimensional structure of collagen fibrillar network in fish muscle pericellular connective tissue corresponding to post-mortem tenderization. *Fisheries Sci.*, **61**, 327-330 (1995).
- 5) M. Ando, H. Toyohara, Y. Shimizu, and M. Sakaguchi: Post-mortem tenderization of rainbow trout muscle caused by the disintegration of collagen fibers in the pericellular connective tissue. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **58**, 567-570 (1992).
- 6) K. Sato, M. Ando, S. Kubota, K. Origasa, H. Kawase, H. Toyohara, M. Sakaguchi, T. Nakagawa, Y. Makinodan, K. Ohtsuki, and M. Kawabata: Involvement of type V collagen in softening of fish muscle during short-term chilled storage. *J. Agric. Food Chem.*, **45**, 343-348 (1997).
- 7) M. Ando, A. Nishiyabu, Y. Tsukamasa, and Y. Makinodan: Post-mortem softening of fish muscle during chilled storage as affected by bleeding. *J. Food Sci.*, **64**, 423-428 (1999).