

魚類肌肉特性與肉質分析技術



郭喬培、劉清碩、楊順德

水產試驗所淡水繁養殖研究中心

前言

肉質是評斷魚類鮮度和品質的重要因素，直接影響到收購價格、加工製程和消費者的接受度，本文介紹魚類肌肉的組成構造以及死後的變化，從細胞層級探討肌肉構造對肉質變化的影響，並透過感官分析和質構儀法，將複雜的肉質特性以科學化數據表示，達到客觀且精準的分析，提供肉質研究的參考依據。

魚類肌肉構造

魚肉可分為背部、腹部和尾部肌肉，肌隔 (myocommata) 結締組織主要由膠原蛋白所組成，負責連結魚皮和骨骼肌，並將肌肉區分為多個肌節 (myotomes) (圖 1)。遠洋洄游性魚類在側線皮下還具有明顯的血合肉 (dark muscle) (圖 2)，由於富含肌紅蛋白，顏色呈現暗紅色，其脂肪、醣原和維生素的含量也較一般白肉組織高。血合肉負責供應肌肉運動時所需的能量與氧氣，因此游動快速的魚類，血合肉的比例也較高，如鮭魚和鯖魚的血合肉比例高達魚體重的 48%。

骨骼肌構造如圖 3 所示，由多條肌纖維 (muscle fiber) 組成，肌纖維再由數條肌原纖維 (myofibril) 構成，肌原纖維進一步細分為

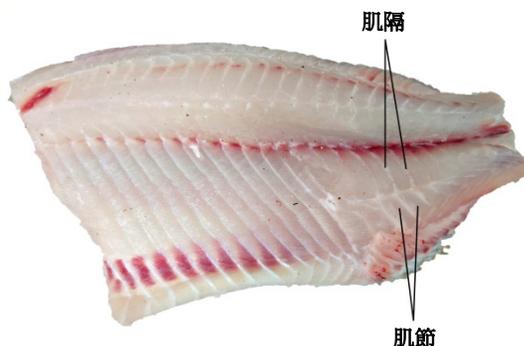


圖 1 臺灣鯛無刺魚片

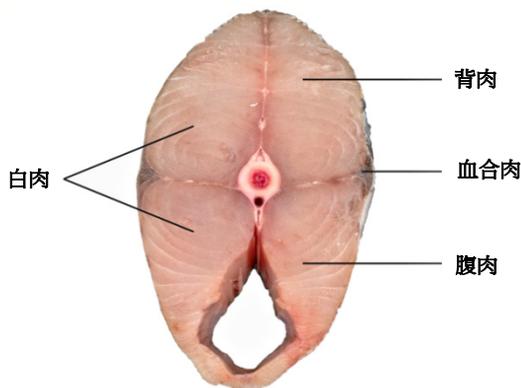


圖 2 鮭魚輪切魚片

由肌凝蛋白 (myosin) 和肌動蛋白 (actin) 分別構成的粗肌絲和細肌絲，每條粗肌絲嵌合於 6 條細肌絲排列組成的六角形中央。肌纖維在光學顯微鏡下，由於折光度的不同，可觀察到明暗相間的紋路，暗色部分為重折光帶 (anisotropic band, A 帶)，為粗肌絲和細肌絲重疊區；亮色部分為單折光帶 (isotropic bands, I 帶)，僅有細肌絲不含粗肌絲。A 帶中央略明亮的 H 帶 (heller band) 為粗肌絲

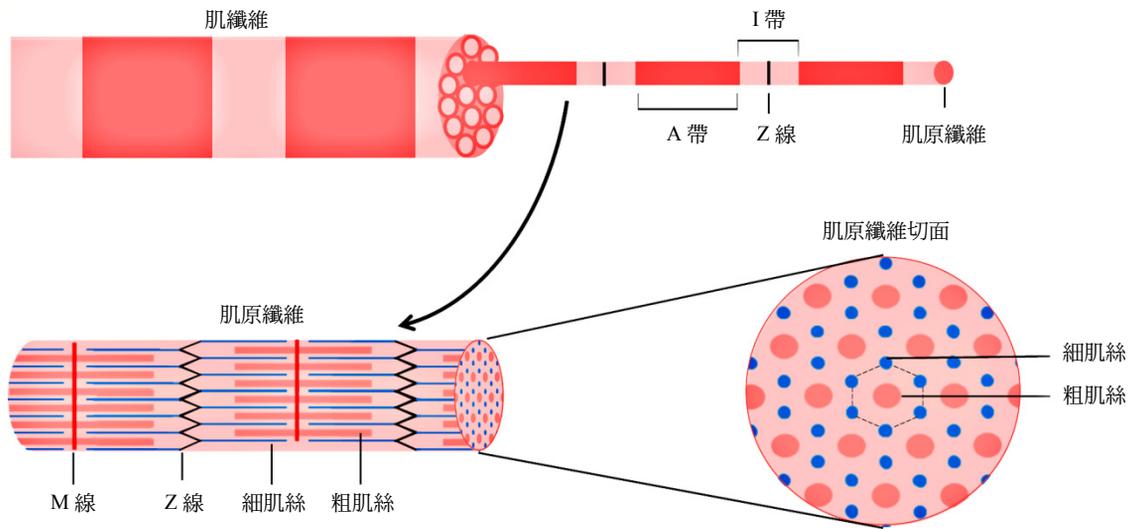


圖3 骨骼肌構造 (參考 Frontera and Ochala, 2014 繪製)

不重疊細肌絲的區域，H 帶中間的 M 線 (mittel line) 為粗肌絲相接處。I 帶中間有一條縱向的 Z 線，兩條 Z 線間的區域為肌小節 (sarcomere)，是肌肉收縮的基本單位 (圖 4)。

當受到神經刺激時，肌纖維細胞中的肌質網 (sarcoplasmic reticulum) 會從終端槽 (terminal cisterna) 釋放鈣離子，活化肌凝蛋白上的三磷酸腺苷酶 (adenosine triphosphatase, ATPase)，並改變肌動蛋白的構造形成與肌凝蛋白連接的橫橋 (cross bridge)，三磷酸腺苷酶將三磷酸腺苷 (adenosine triphosphate, ATP) 水解為腺苷二磷酸 (adenosine diphosphate, ADP)，提供橫橋能量，讓細肌絲拉動粗肌絲，造成肌肉收縮，收縮時 I 帶變短，但 A 帶長度不變 (圖 4)。

肌肉構造和肉質的關係

肌纖維的結構會影響肉質表現，肉質硬

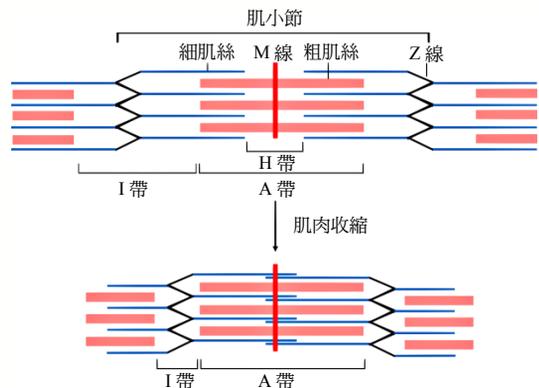


圖4 肌肉收縮機制 (參考 Tortora and Grabowski, 2002 繪製)

度越高的魚種，肌纖維平均直徑有較小的趨勢 (Hatae et al., 1990; Hurling et al., 1996)。Mørkøre 等人 (2009) 分析相同體型的大西洋鮭 (*Salmo salar*) 之肌纖維和肉質硬度的關係，依據肌纖維橫斷面積 (cross-sectional area) 區分為小 ($< 12,500 \mu\text{m}^2$)、中 ($12,500 - 17,000 \mu\text{m}^2$) 和大 ($> 17,000 \mu\text{m}^2$) 3 個組別，結果顯示小肌纖維組的肉質硬度顯著較高；但若以個體的肌纖維橫斷面積和硬度值進行線性迴歸分析，則相關係數小於 0.35，

代表肌纖維大小雖會影響肌肉硬度，但並非唯一決定因子。此外，肉質較硬的魚種也被發現在烹煮後，肌纖維會釋放出較多的肌漿蛋白質至肌纖維間隙，加熱變性形成凝固物，阻礙咀嚼時的肌纖維滑動，造成較硬的口感 (Hatae et al., 1990)。

以蠶豆投餵草魚 (*Ctenopharyngodon idella*) 所養殖出的脆肉鯪，肉質較一般草魚更加結實和爽脆，分析結果顯示，脆肉鯪的肌原纖維蛋白和肌漿蛋白含量顯著較高，進一步比較兩者的蛋白質二級結構，脆肉鯪肌肉蛋白的 α 螺旋 (α -helix) 較低、 β 摺板 (β -sheet) 較高，造成咀嚼時產生特殊的脆肉口感 (Lin et al., 2012)。

魚片由於頭尾和背腹的厚度不均，不同的檢測位置會影響檢測數值，如鮭魚的尾部肌肉硬度較高 (Casas et al., 2006)，檢測時必須明確定義檢測點，避免將不同檢測部位的數值混和分析，根據文獻研究，魚片中段的肉質代表性最佳 (Hyldig and Nielsen, 2007)。此外，部分魚種還須注意烹煮後，肌隔結締組織會溶解，導致魚肉形成片狀的分散型態，造成肉質分析的困難。

魚類肌肉死後變化

一、死後僵直 (rigor mortis)

死後僵直為魚類死亡後發生肌肉收縮的肉質硬化，且肌肉逐漸混濁失去透明感，依據魚種和屠宰方法的不同，死後僵直發生的時間點和持續時間有很大的差異，發生時間從魚體死後 10 分鐘至數小時，持續時間 2—20 小時。魚類死亡後，ATP 會緩慢分解為

ADP，ADP 再和肌酸磷酸 (creatine phosphate) 反應轉換回 ATP，當肌酸磷酸被消耗，ATP 開始快速下降，細胞膜和肌質網的鈣泵通道開啟，造成大量的鈣離子進入細胞質，引發肌肉收縮，開始進入死後僵直期。若屠宰時對魚造成的緊迫與掙扎越強，ATP 的消耗就越多，會縮短進入死後僵直期的時間，影響魚肉的保存。

二、自家消化 (autolysis)

肌肉中的鈣離子持續釋出，會活化溶體酶 (lysosome) 中的組織蛋白酶 (cathepsin) 和肌漿中的鈣蛋白酶 (calpain)，造成肌纖維 Z 線的斷裂、粗肌絲和細肌絲間的結合力下降以及肌聯蛋白 (connectin) 和結締組織脆弱化，進而導致魚肉解硬恢復柔軟。

三、腐敗 (putrefaction)

微生物作用下，魚肉會產生不良的風味和色澤，如色胺酸分解產生的吲哚 (indole)、氧化三甲胺還原的三甲胺 (trimethylamine, TMA) 以及含硫胺基酸轉化成的硫化氫、甲硫醇、乙硫醇和二甲硫醚等具腥臭味物質。此外，ATP 降解為 ADP 後，會再依序分解為單磷酸腺苷 (adenosine monophosphate, AMP)、肌苷酸 (inosine phosphate, IMP)、肌苷 (inosine, HxR) 和次黃嘌呤 (hypoxanthine, Hx) 等，依據分解物含量所計算的 K 值，可作為鮮度評估指標。
$$K (\%) = (HxR + Hx) / (ATP + ADP + AMP + IMP + Hx + HxR) \times 100\%$$

肉質分析方法

一、感官分析法

國際標準化組織 (International Organization for Standardization, ISO) 對感官分析的定義為利用感覺器官對產品的感官特性進行檢驗，包括觸覺、視覺、聽覺、嗅覺和味覺。感官分析是最直接的質構分析法，受試者必須經由專業訓練才能成為訓練型品評員 (trained panel)，建立標準化的評分共識，降低受試者的主觀差異，確保品評員間的評分無顯著差異。此外，感官描述語必須明確定義，避免一字多義或多字同義造成的誤解，常用的感官分析法大致分為下列幾種：

(一) 差異性試驗 (discriminatory test)

分析樣品間是否有能被感官察覺的差異，通常用於兩個差異度較小的樣品比較，依據實驗設計，可細分為三角品評法 (triangle procedure)、對比品評法 (duo-trio procedure) 和配對比較法 (paired comparison)，根據答對率或選擇比例進行統計分析 (Lawless and Heymann, 2010)。

1. 三角品評試驗：品評員對三份樣品進行感官分析，其中兩份樣品為同一產品，目標為找出不同的產品。
2. 對比品評法：先給予品評員標準品，再從兩個樣品中找出和標準品相同者。
3. 配對比較法：從兩個樣品中，挑選出目標特性較強者 (如哪個樣品的口感較硬)。

(二) 描述性試驗 (descriptive test)

將樣品的感官特性進行描述以及數值量化，概念上將品評員對樣品的感官拆分為多個明確的特性指標，再將感官差異對應至一個或多個特性指標進行相對強度評分。以質地分析 (texture profile) 為例，硬度定義為造

成樣品型變所需要的力量，品評員依照標準對照表 (表 1) 針對樣品硬度進行評分，描述性試驗常用於科學研究或是品質控管。

表 1 ISO 11036 感官硬度標準對照表

| | 評分 | 參 考 品 |
|---|----|--------------------|
| 軟 | 1 | 奶油乳酪 |
| | 2 | 水煮蛋蛋白 |
| | 3 | 法蘭克福腸 (去皮未烹煮) |
| | 4 | 美國黃加工起司 |
| | 5 | 綠橄欖 (大顆規格) |
| | 6 | 花生 (cocktail type) |
| | 7 | 胡蘿蔔 (未烹煮) |
| 硬 | 8 | 花生脆糖 (糖果部分) |
| | 9 | 冰糖 |

(三) 嗜好性試驗 (hedonic test)

用於分析產品的喜好程度，受試員為一般消費者，不需經專業訓練，一個試驗約需 75—150 位受試員，以美國 Army Food and Container Institute 開發的九分喜好表為例，9 分極喜歡 (like extremely)、8 分非常喜歡 (like very much)、7 分喜歡 (like moderately)、6 分些微喜歡 (like slightly)、5 分不喜歡也不討厭 (neither like nor dislike)、4 分些微不喜歡 (dislike slightly)、3 分不喜歡 (dislike moderately)、2 分非常不喜歡 (dislike very much)、1 分極不喜歡 (dislike extremely)。

二、質構儀分析

質構儀依據量測方法，可分為剪切、穿刺和壓縮法，其中透過兩次壓縮量測得到的全質構分析 (texture profile analysis)，在固定探針移動速率和目標型變下，紀錄探針壓縮

過程的力量以及時間 (圖 5)。相同速率下，探針移動時間和距離呈正比，可換算出硬度 (hardness)、脆度 (fracturability)、黏性 (adhesiveness)、彈性 (springiness)、回復性 (resilience)、凝聚性 (cohesiveness)、膠著性 (gumminess) 和咀嚼性 (chewiness) 等多種肉質指標，且沒有剪切和穿刺造成魚肉破壞的問題，廣泛作為多種食品的標準質構分析方法，計算公式與代表意義如表 2。

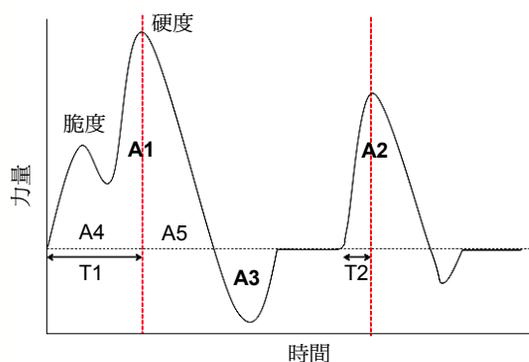


圖 5 力量-時間全質構分析圖

結語

為滿足消費者對於高品質水產品日益攀升的需求，生產者開始注重水產品的肉質保鮮與調控，透過肌肉構造的微觀探討，能幫助研究人員瞭解肉質變化的原理，再藉由科學化肉質檢測技術的導入，將描述性的口感轉化為具分析意義的數值，相關研究如提高白蝦 (*Penaeus vannamei*) 飼料粗蛋白含量，能增加蝦肉的硬度 (Rivas-Vega et al., 2001)；植物性蛋白替代塞內加爾鱒 (*Solea senegalensis*) 飼料魚粉，會降低魚肉硬度表現 (Valente et al., 2004)；放養密度過高，會降低尼羅吳郭魚 (*Oreochromis niloticus*) 肌肉硬度、彈性、膠著性和咀嚼性 (Wu et al., 2018) 等，有助於研發肉質表現更佳的養殖調控技術，進而促進傳統水產養殖產業朝向精緻化升級轉型。

表 2 多種食品的標準質構分析方法之計算公式與代表意義

| 肉質指標 | 計 算 公 式 | 代 表 意 義 |
|-------|--------------------------|----------------------------------|
| 硬 度 | 第一次壓縮至目標型變所需的最大力量值 | 第一口咬下食物所需的力 |
| 脆 度 | 硬度前的峰值 (僅具有酥脆外皮的樣品才有此峰值) | 咬碎酥脆外皮所需的力 |
| 黏 性 | A3 面積 | 黏牙程度 |
| 彈 性 | T2 時間/T1 時間 | 兩次壓縮間，樣品恢復的高度比值 |
| 回 復 性 | A5 面積/A4 面積 | 樣品在第一次壓縮的恢復能力 |
| 凝 聚 性 | A2 面積/A1 面積 | 第二次壓縮相對於第一次壓縮的抗型變能力，反映肌肉細胞間的結合能力 |
| 膠 著 性 | 凝聚性 × 硬度 | 咀嚼半固體食物至吞嚥狀態所需的能量 |
| 咀 嚼 性 | 膠著性 × 彈性 | 咀嚼固體食物至吞嚥狀態所需的能量 |