



淺談魚類年齡估算之技術進展— 傅立葉轉換近紅外線光譜之應用

莊家續¹、周爰琪²、張可揚^{1/2} 水產試驗所海洋漁業組、²東部漁業生物研究中心

魚類年齡估算是漁業資源管理的核心工作之一，舉凡有關系群 (stock) 之性成熟年齡、初捕年齡 (age at first capture)、加入年齡 (age at recruitment)，或年齡體長關係 (age-length key) 等資料之取得，皆有可能需進行年齡估算。年齡及其他生物學參數有助於推估系群資源量、族群成長潛能或制定漁業管理政策。

魚類年齡倘以形質分析法進行估算，可使用之形質，主要有耳石 (otolith)、鱗片 (scale)、鰓蓋骨 (operculum)、脊椎骨 (vertebrae) 及硬棘 (spine) 等，而其中最常用的是耳石。耳石是伴隨著魚體成長而增長之小型鈣化結構，位於魚的內耳，主要由碳酸鈣 (CaCO_3)、有機物質及微量元素週期性交互沉積而成，沉積速率同時受到外在環境因子及內在個體生理發育之影響；當各項調控因子出現週期性變化時，便會在耳石上留下明暗交替之輪紋。耳石之輪紋，例如日週輪、年輪，具有樹木年輪之特性，可以用來測量日齡及年齡，惟往往須先進行清洗、乾燥、包埋、研磨等繁瑣之製備前置作業，方能於顯微鏡下進行觀察 (圖 1)。

傳統以顯微鏡進行之年齡估算方法屬於高度勞力密集作業，首先需投入大量的樣本製備前置作業時間與人力，而顯微鏡下之判讀結果易受觀察者主觀判斷影響 (i.e., reader variability)，因而同時影響作業之效率及準

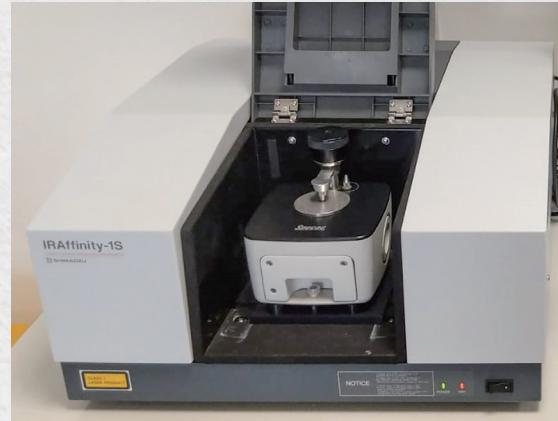
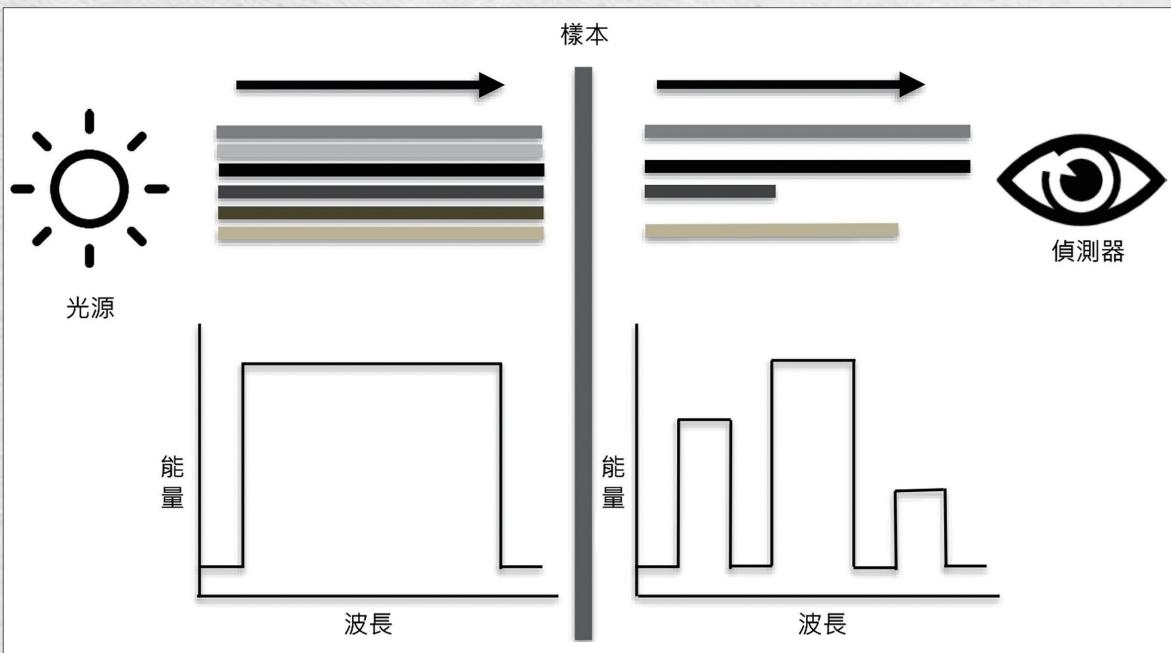
確性。近年來，澳洲、美國及歐洲等研究人員嘗試採用傅立葉轉換近紅外線光譜 (Fourier transform near-infrared spectroscopy, FT-NIR) 儀器 (圖 2) 進行魚類年齡估算。

光譜儀器原理是光束照射樣本後，部分光束被樣本吸收，部分光束會穿過 (透射) (圖 3)，後續再透過電腦轉換為吸光圖譜或吸光度 (absorbance patterns)。FT-NIR 係使用約 900 – 2,500 nm 波長，換算成光譜圖後呈現 4,000 – 10,000 波數 (cm^{-1} wavenumbers) 範圍之光束，將其照射樣本後，藉由樣本化學成分官能基 (functional group) 吸收特定波長能量，導致化學鍵震動所呈現不同之吸光圖譜，據以反推樣品之成分或含量，以達到定性及定量分析之目的。

早期之色散型近紅外光譜 (dispersive NIR) 技術，係採用單一頻率光束、重複照射樣本方式進行，頗為耗時；現今改進後 FT-NIR 可突破上述限制，藉由照射同時含有多種頻率的光束，便可單次、同步、快速反映所有近紅外光的吸光度；其中近紅外光能量由鹵素 (halogen) 光源打到干涉儀 (interferometer)，其所產生的干涉圖 (interferogram) 經由傅立葉轉換，最終可得到完整吸光譜圖以供分析。此外，本項技術操作過程無需複雜耗時的樣品製備前置作業，不會對樣品造成破壞 (non-destructive)，甚至可



圖 1 顯微鏡下觀察之花腹鯖耳石

圖 2 傅立葉轉換近紅外光譜儀器 (引自維基百科
Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0, By Keshavana)圖 3 光譜儀原理簡圖
(改繪自 <https://www.chem.uci.edu/~dmitryf/manuals/Fundamentals/FTIR%20principles.pdf>)

穿透過玻璃及包裝直接量測，初步分析結果也可於數十秒內快速獲得。

FT-NIR 具非侵入性特質，已長期廣泛應用於農、林、漁、牧、食品科學、製藥等領域，例如針對核果品質、木材特徵、鮭魚脂肪及色素成分等之檢測分析；澳洲 Wedding 等 (2014) 率先將其應用至魚類年齡估算，他們

將馬拉巴笛鯛 (*Lutjanus malabaricus*) 成對之矢狀耳石 (paired sagittal otoliths) 中的一個透過顯微鏡觀察輪紋以取得參考年齡 (i.e., reference age determination)，另一個耳石 (i.e., sister otolith) 來採集光譜數據，最後再以統計方法將兩者 (參考年齡、光譜數據) 建立預測年齡模型及迴歸關係，俾供後



續新的耳石樣本能快速藉由 FT-NIR 估算年齡；後續又有許多學者進行相似之研究，例如美國 Passerotti 等 (2020) 針對西大西洋笛鯛 (*Lutjanus campechanus*) 及 Healy 等 (2021) 針對太平洋鱈 (*Gadus macrocephalus*) 年齡估算；最近美國 Benson 等 (2024) 針對阿拉斯加鱈 (*Gadus chalcogrammus*)、多棘平鮋 (*Sebastes polyspinis*)，以及義大利 Basilone 等 (2024) 針對大西洋的竹筍魚 (*Trachurus trachurus*) 研究，進一步結合人工智慧 (artificial intelligence, AI) 之深度學習演算法 (deep learning algorithms)，以求精進上述年齡估算方法。

由於光譜之呈現主要與耳石化學成分有關，因此無法直觀對應至耳石的微細構造，故應用於耳石年齡定量分析結果驗證上，仍須仰賴傳統年齡形質法估算之數據支持，俾藉以建立分析模型及多變量校準，其目標是找到光譜測量值與傳統顯微鏡觀察結果之關係。常用的模型如偏最小平方法迴歸 (partial least squares regression, PLS) 和主成分迴歸 (principal component regression, PCR)，惟此二種模型如同其他經典化學計量學建立模型方式，高度依賴使用者擁有處理非選擇性和非線性參數的高階計算能力，難度頗高，可能不易求得最佳模型。目前最新的做法是結合人工智慧 (AI) 的深度學習演算法，例如：透過多模態卷積神經網路 (multimodal convolutional neural networks, MMCNN) 接受和學習來自光譜、地理空間、生物數據等多重特徵資訊，以精進上述模型。

目前學術界仍然不完全了解魚類耳石與光譜變化間的完整機制，畢竟耳石成分極為

複雜，除含量最多的碳酸鈣 (佔 90% 以上)，尚有諸多有機物質及微量元素，有機物質部分又包含數百種蛋白質，此涉及蛋白質體學 (proteomics) 之深入研究，俾能揭示哪些耳石成分對透過 FT-NIR 判別魚齡影響最大。

綜合上述說明可知，如果不計入依據光譜來建立預測年齡模型所需花費之時間（以上述學者之研究個案顯示，耳石樣本數往往需達數千個），FT-NIR 技術無疑可縮短模型建立後之魚類年齡估算之作業時間；惟 FT-NIR 光譜與傳統顯微鏡觀察年齡之間所存在的未知連結，仍是一個學術上的挑戰，有待未來之持續研究及釐清。

主要參考文獻：

- 1.Benson, I. M., T. E. Helser and B. K. Barnett (2024) Fourier transform near infrared spectroscopy of otoliths coupled with deep learning improves age prediction for long-lived northern rockfish. *Fisheries Research*, 278(107116).
- 2.Passerotti, M. S., T. E. Helser, I. M. Benson, B. K. Barnett, J. C. Ballenger, W. J. Bubley, M. J. M. Reichert and J. M. Quattro (2020) Age estimation of red snapper (*Lutjanus campechanus*) using FT-NIR spectroscopy: feasibility of application to production ageing for management. *ICES Journal of Marine Science*, 77(6): 2144-2156.
- 3.Wedding, B. B., A. J. Forrest, C. Wright, S. Grauf, P. Exley and S. E. Poole (2014) A novel method for the age estimation of Saddle tail snapper (*Lutjanus malabaricus*) using Fourier Transform-near infrared (FT-NIR) spectroscopy. *Marine and Freshwater Research*, 65: 894-900.