

出國報告（出國類別：進修）

農委會農業菁英培訓計畫

鰻魚洄游產卵之生態資源研究

服務機關：行政院農業委員會水產試驗所

東部海洋生物研究中心

姓名職稱：周爰瑱 助理研究員

派赴國家：英國

出國期間：108-04-11~112-04-30

報告日期：112 年 8 月 2 日

摘要

鰻魚是一種高度洄游性魚種，其棲息海域與洄游路徑經常跨越各沿海國家經濟海域，然而，該族群結構與生態習性的探討一直是漁業科學研究的一大挑戰。在這方面，標識放流研究成為探索魚群動態、分佈特徵與漁撈行為對魚群影響的最佳方法。目前，標識器已被應用於鰻魚、鯊魚、海龜和海洋哺乳動物等物種，主要追蹤技術包括衛星遙測和聲學標記。隨著電磁技術的進步，發報器的重量也精簡到不到 1.4g。然而，對於應用於鰻魚仔稚魚的生物追蹤，標識器目前仍然受限於大小、高死亡率和低回收率的問題。

耳石是魚類生長過程中形成的碳酸鈣結晶，其具有易於收集和保存的特點，其化學成分可記錄水文環境的特徵，並提供大量動物在自然環境中生物間及環境與生物間互動的訊息。這些訊息揭示了魚類的遷移路線、覓食行為和能源消耗模式，因此對於進行鰻魚的仔稚魚洄游產卵研究具有極大的潛力。

在獲得行政院農業委員會農業菁英計畫的資助下，筆者於 108 年 4 月 12 日赴英國南安普敦大學海洋與地球科學學院進修博士學位課程。然而，受疫情影響，於 110 年 3 月 30 日不得不返回台灣，一年後的 111 年 3 月 23 日再次前往英國，並於 112 年 4 月 30 日返回台灣。該學院致力於海洋科學領域的研究與教育，提供學生優秀的學術環境和設施，特別關注環境變化對海洋生物的影響以及面臨的氣候變化挑戰。

在研究期間，發現使用耳石氧同位素結合海洋環流模型進行鰻魚仔稚魚洄游研究會面臨以下困難：(1)無法取得精確的氧同位素地理位置地圖，並且對於跨越大的熱和/或鹽度梯度的使用受限；(2)同位素分析成本高，且難以區分數值的微小差異。目前該技術尚未廣泛應用於仔稚魚個體洄游行為研究，因此透過以海洋環流模型建立幼體洄游模型結合耳石氧同位素，對於鰻魚仔稚魚追蹤的可行性進行預測。

研究結果顯示，模擬粒子漂移用於先驗預測鰻魚仔稚魚的高分辨率耳石分析是否有可能區分不同的仔稚魚漂移路徑，有利於節省人力物力，並提高該分析之效能。本研究提出使用耳石 $\delta_{18}O$ 研究鰻魚仔稚魚洄游之潛力和局限性。此方法亦可直接轉移至日本鰻及其他所有有浮游期的仔稚魚研究，並可能有助於將資源集中在對仔稚魚漂移問題中可以合理處理的物種和地區。

最後，感謝服務機關及農委會提供本次進修之機會，筆者期待未來能將所學應用

於鰻魚及其他經濟性魚類的追蹤研究，促進國際及跨領域交流。

目錄

摘要	i
(一)目的	1
(二)過程	2
(三)成果	3
(四)心得與建議	7
(五)附錄	8

(一)目的

鰻魚是一種溯河性物種，鰻魚的洄游時間可達一到兩年，鰻魚仔稚魚極易受到環境的影響，但鰻魚的仔稚魚的產卵生態學目前尚未完全了解，其中包含一些假設：

(1)

鰻魚的主要產卵區：雖然有強烈的證據表明馬尾藻海是主要產卵區，但這尚未得到確定性的證明。有些研究人員提出這種魚類可能在北大西洋的其他地區還有其他的產卵區。

(2)

產卵期：目前已知歐洲鰻在春季和夏季產卵，但具體的時間和區域尚不清楚。

(3)

鰻魚仔稚魚可能有不同的遷徙路徑和行為：一些研究人員建議仔稚魚在遷徙過程中可能會表現出方向性的游泳行為。

(4)

鰻魚在漂流階段的环境條件可能會影響招募成功率。在鰻魚相對較長的漂流階段中，仔稚魚可能受到環境因子的影響，進而影響其生存成功率。例如，一些研究人員認為，自 1980 年代初以來鰻魚產卵區的海洋暖化已改變了海洋生產力，最終影響了歐洲鰻早期生命階段的存活率，而北大西洋振盪 (NAO) 影響鰻魚遷徙和歐洲鰻入添成功的時機和持續時間。

最近在高精度採樣和微量同位素分析 (如 SIMS $\delta_{18}O$ 耳石分析和連續流同位素質量分析系統 (CFIRMS)) 方面的進展，使得能夠準確地對 0.2 微克以下的 $CaCO_3$ 進行 $\delta_{18}O$ 分析 ($<\pm 0.1\%$)。這些方法已應用於對玻璃鰻的耳石核心區域進行穩定同位素微量分析，表明穩定同位素微量分析是一種揭示魚類未知產卵生態學的強大方法。然而，在廣泛應用於仔稚魚階段的地理定位方面，這些方法由於在環境梯度可能不那麼明顯的情況下檢測氧同位素比例的分析困難而受限。這些系統成本高且耗時，因此有必要預測高分辨率耳石同位素分析可能產生準確結果的時間。

大量漂移微粒的拉格朗日模擬具有量化早期生命階段傳播的潛力。這些漂流數據可以進一步分析在微粒軌跡上的同位素歷史。將來自流體動力學模型的早期生命階段傳播模式與原位同位素方法相結合，使我們能夠研究使用同位素方法和模擬來識別早期生命階段的洄游運動模式。

(二)過程

行政院農業委員會農業菁英計畫原定期程為 108 年 4 月 11 日至 110 年 4 月 10 日赴英國南安普敦大學海洋與地球科學學院進修博士學位課程，但因為疫情影響，於 110 年 3 月 30 日不得不返回台灣，一年後的 111 年 3 月 30 日再次前往英國，並於 112 年 4 月 30 日返回台灣。期間相關研究工作摘要如下：

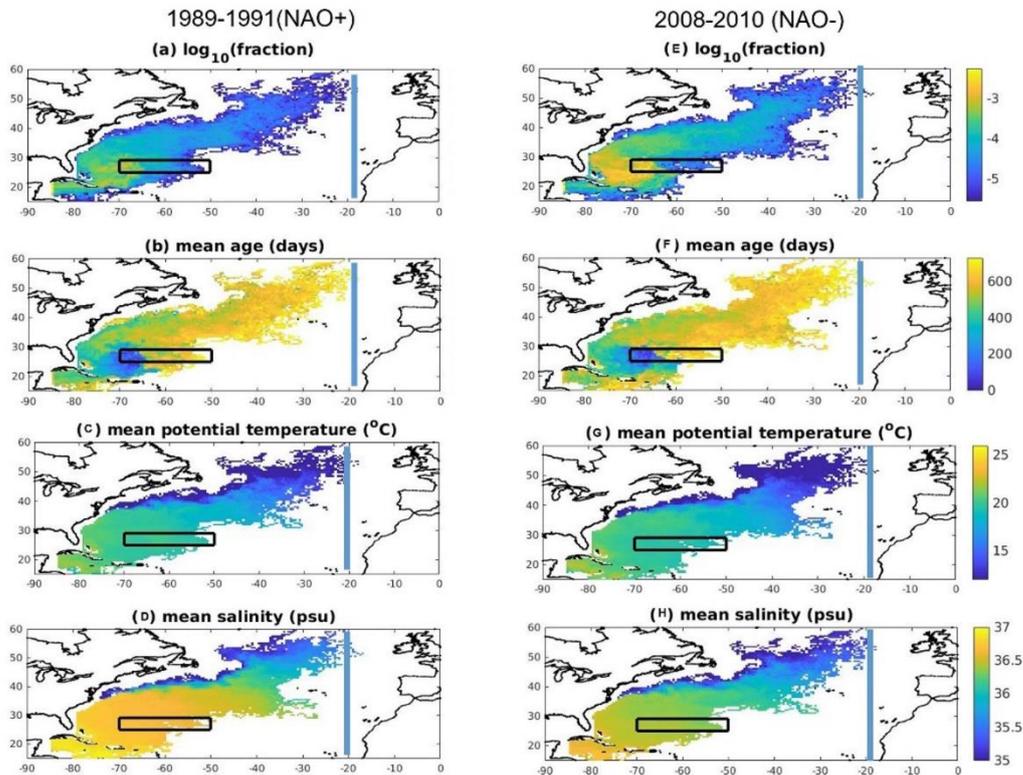
- 獲英國南安普敦大學海洋與地球科學學院錄取，完成相關註冊事宜，並完成博士研究構想書，並通過校內審查作業。
- 參與英國魚類學會舉辦的魚類學研討會，並參加相關領域的博士論文發表。
- 學習 Matlab 及 R 等數據分析方法及程式語言，解析相關資料，探索鰻魚洄游與環境的交互影響，並視覺化呈現分析結果。
- 推估鰻魚產卵場及可能之洄游路徑海域海洋水文數據模型建立 依據鰻魚仔稚魚調查推估可能之產卵場區域，對海洋粒子的運輸和生物地球化學過程（使用 PISCES）進行了模型建立。
- 學習建立模擬鰻魚仔稚魚洄游路徑：該洄游模型假設鰻魚為被動漂流，使用阿麗亞娜（Ariane）進行模擬，並設定阿麗亞娜依據產卵場資料設定虛擬起始點位置，並為每個網格單元分配一個分佈函數，以量化粒子最終的位置和傳質，而在定性模式下，依據指定釋放的每個粒子並追蹤其精確軌跡。
- 學習耳石氧同位素估算及氧同位素可行性分析：透過模擬鰻魚仔稚魚洄游路徑得到的溫度鹽度資料後，計算海水中 Vienna Pee Dee Belemnite 標準（VSMOW）環境水（w）氧同位素值，之後進行標準化後，預測耳石的氧同位素值，用以了解是否可作為不同產卵場及追蹤鰻魚仔稚魚洄游路徑之方法。
- 蒐集耳石同位素調查報告、學術文獻採樣及分析方法、數據分析。

(三) 成果

本研究首先測試不同的 4 個深度在不同月份和位置開始的被動漂流顆粒的成功抵達岸邊的機率。然後，我們比較成功及失敗在 nao+ 及 nao- 的年份知的漂流路徑，及所經歷的溫度和鹽度。利用這些資訊，我們最終推斷出所得預測的耳石記錄。

1. 預測仔稚魚的成功抵達的機率

本研究測試起始位置和產卵時期之 2 月到 5 月間以及深度還有 nao+ 及 nao- 的年份等因素對仔稚魚遷移成功的重要性。深度和年份對到達 20°W 的成功率有很大影響。水深 0 米和 46.6 米的到達成功率最低；這是因為很大一部分顆粒向南進入赤道逆流，在 19°N 和赤道之間穿越了 20°W。



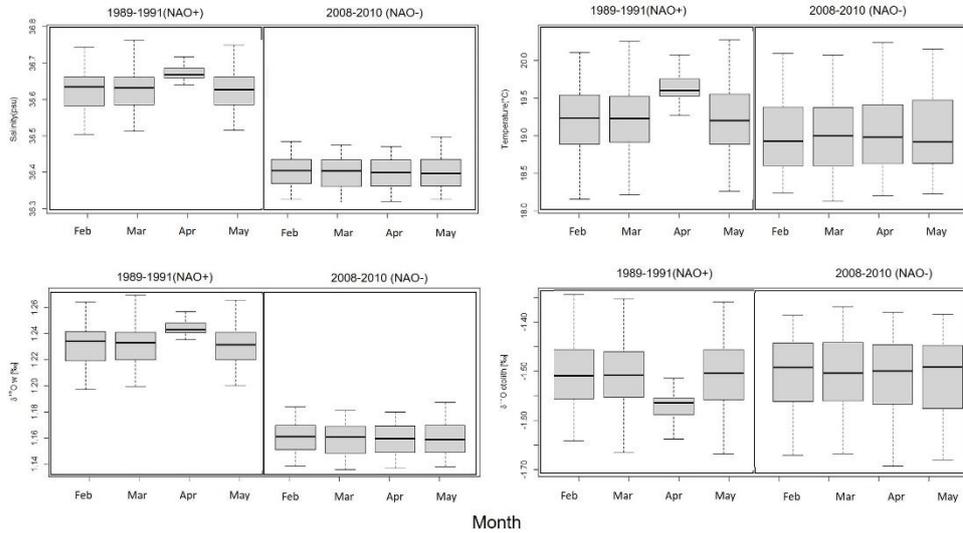
圖一、不同深度模擬期之粒子機率

1989 年至 1991 年 (NAO+) 和 2008 年至 2010 年 (NAO-) 的四個深度中，在 200 米處成功穿越 20°W 的顆粒百分比最高。NAO- 時期的成功率 (0.0012%) 明顯高於 NAO+ 時期 (6.9×10^{-4})。在設定深度為 200 米的模擬過程中不管在 NAO+ 的 1989 年至 1991 年或是 2008 年至 2010 年 (NAO-)，4 月至 5 月期間到達率明顯較高。而 NAO- 的年度高於 NAO+。除此之外起始位置對到達率有很大的影響，在 1989 年開始模擬的結果顯示只有來自產卵區西部產卵區 1 的粒子遷移成功，成功率為 0.002%，而 2008-2010 年 (NAO-) 的模擬過程中，也是產卵區

1 成功率最高 為 0.0027%，還有產卵區 3 也有零星的個體成功穿越 20°W。

2. 產卵場的水文特徵

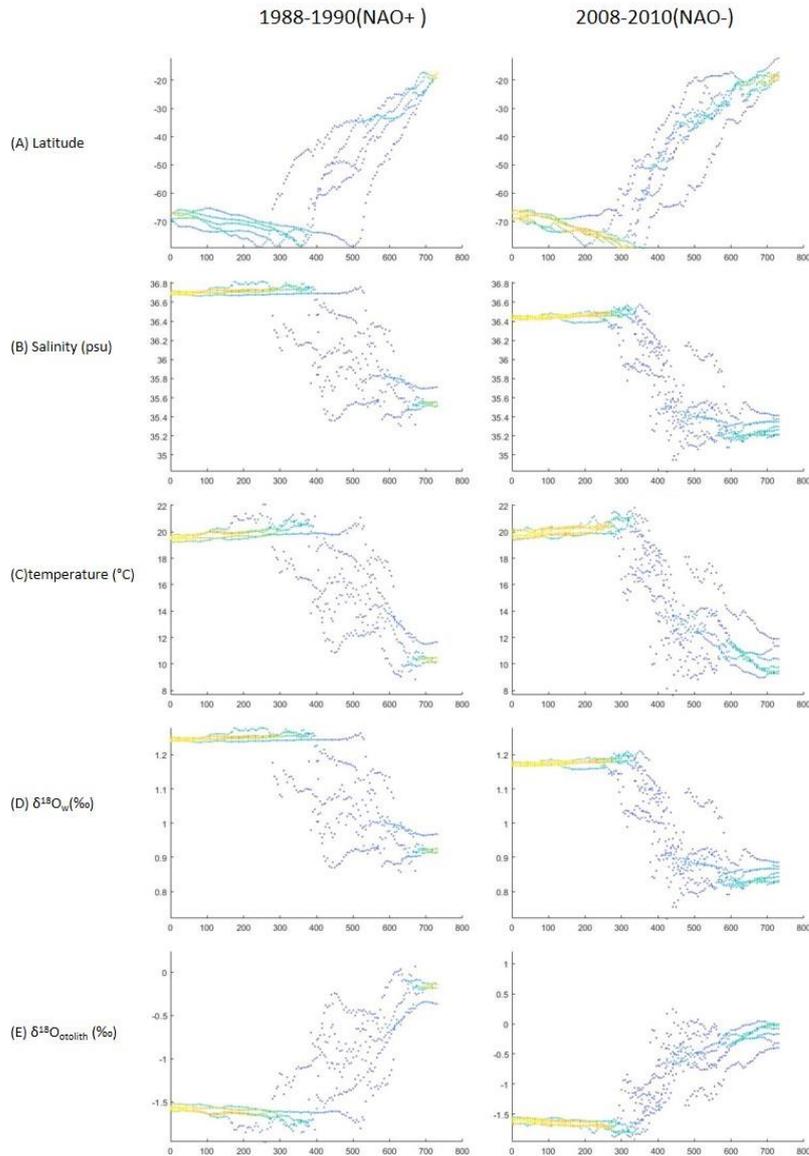
在 NAO+ 的時期產卵場鹽度較 NAO- 更低，溫度在這兩個時期沒有明顯的差異，值得注意的是 4 月 在 NAO- 的時候不管是溫度還是鹽度都有明顯的差異，因此氧同位素相較其他年份跟月別都更低。然而產卵場之間差異皆不顯著。



圖二、鰻魚產卵場環境特徵

2. 水文地理和沿漂流路徑推斷的同位素比率

研究中記錄了沿顆粒軌跡的環境鹽度和溫度，這是對 $\delta^{18}O_w$ 和 $\delta^{18}O_{otolith}$ 的推斷估計。於 1989 年 (NAO+) 和 2008 年 (NAO-) 5 月產卵 1 區釋放的粒子模擬實驗中。在圖三中，我們顯示了成功到達的顆粒的環境因子的時間序列。在這兩年中，成功穿越 20°W 的粒子遵循類似的軌跡。軌跡顯示，粒子隨著墨西哥灣流流經佛羅里達海峽，繼續沿東海岸到海角，然後流向遠離大陸。然而，與 NAO+ 時期 (400 天) 相比，NAO- 時期 釋放的顆粒不管是在漂移到墨西哥灣流之前 (300 天) 以及藉著墨西哥灣流抵達北緯 50 度的漂流時間 (150 天) 都比 NAO+ 短，從鹽度和溫度的時間序列來看 (圖三 (B, F))，在 NAO+ 期間，大多數顆粒在 400 天後有明顯的下降。溫度和鹽度的下降趨勢反映在 $\delta^{18}O_{otolith}$ 值上，使其呈上升趨勢。對於 NAO- 時期，顆粒漂移到高緯度的時間比 NAO- 時期早，漂移的時間短。溫度和鹽度，隨著粒子漂移到高緯度，從 300 天開始下降，500 天後保持穩定。該信號也反映在 $\delta^{18}O_{otolith}$ 上。對於未能穿越 20°W 的顆粒，在 1989-1991 年的實驗中，(圖三 (A))。然而，在 2008-2010 年，有更高比例的顆粒軌跡顯示隨赤道逆流向南流動較高比例的顆粒隨海灣流流向 50°W，然後轉為隨亞速爾海流向東南漂移，最後返回並迴圈到亞熱帶大洋 (圖三 (E))。然而這兩種漂流軌跡由於未經歷大範圍的向北漂移，且水團性質相近，因此無法在 $\delta^{18}O_{otolith}$ 值上顯示出明顯的差異。



圖三、成功抵達之粒子所經歷之環境變化

結論：

(1) 理解鰻魚仔稚魚的行為和路徑對於有效的管理和保育策略至關重要，特別是長途遷徙可能使鰻魚更容易受到氣候變化的影響。在本研究中，我們使用嵌入在海洋流場中的虛擬微粒軌跡來預測歐洲鰻的漂流。這些鰻魚最初在產卵區的四個子區域中，在2月至5月之間的四個不同深度中進行定位。我們發現，在5月份，200米深度的鰻魚遷徙成功率最高。利用這個設置，我們比較了不同北大西洋振盪（NAO）時期對鰻魚行為的影響，發現在NAO+時期，由於亞熱帶地區的強烈回流，鰻魚需要較長的遷徙時間且遷徙成功率較低。我們還證明了成功返程所需的游泳行為，並發現了兩個潛在的鰻魚遷徙路徑，NAO+時期更多的鰻魚會選擇需要較長遷徙時間的路徑。

(2) 我們從微粒軌跡獲得的溫度和鹽度數據被用於推斷耳石的 $\delta^{18}O$ 值。通過模

型預測的穩定同位素和遷徙路徑，我們發現耳石氧同位素比值可以區分 NAO+ 時期四月份的產卵區特徵，並可以區分成功和失敗的漂流。通過對成功遷徙的鰻魚標本進行取樣並在 300 至 700 天內分析耳石樣本，我們觀察到耳石氧同位素的斜率以及急劇增加的起始和結束時間，進一步揭示了海洋流場對鰻魚遷徙路徑和返程時間的影響。

(3) 研究結果表明，使用耳石分析穩定同位素可以提供有價值的資訊，了解仔稚魚在遷徙過程中所經歷的環境條件，這有助於了解影響其存活和入添成功的因素。本研究展示了使用結合模型和耳石分析來驗證研究結果的潛力。該研究的結果還可以應用於其他具有類似浮游幼蟲階段和海洋遷徙模式的物種，為評估入添動態和制定有效的保育措施提供有價值的工具。總的來說，本研究突顯了了解影響遷徙性物種入添成功的生態和環境因素的重要性，以及使用穩定同位素來解決這些問題的潛力。

(四)心得與建議

- (1) 感謝服務機關及農委會提供本次進修之機會，我深感榮幸能參與此次學習，並盼望未來能回饋所學，將研究成果應用於日本鰻魚以及其他經濟型魚類的仔稚魚洄游研究。這樣的交流和合作有助於促進國際間的合作，並拓展跨領域的交流，推動海洋生物學研究的發展。
- (2) 英國南安普敦大學的博士課程，不需要修習傳統的課程，而是主要著重實驗室討論和指導教授共同學習研究課題。這種自主學習的方式，讓學生能夠更深入地思考並發掘專業領域中的知識。此外，通過三次博士資格考試的要求，學生能在早期階段得到寶貴的交流和回饋，也能更好地為最終的論文口試做好準備。這樣的教育模式對台灣的教育體系具有借鏡意義，或許我們也可以嘗試引進類似的培訓方式，培養更具獨立思考和研究能力的博士生。
- (3) 隨著資訊化時代的發展，學術研究的重心也隨之改變。過去學者更專注於單一領域的研究，而現在則需要跨領域結合，特別是在探討氣候變遷對生物影響的研究中。透過海洋物理、海洋化學以及生物學的角度共同研究，這種多領域交叉的研究方法，不僅能夠提供更全面的視角，也能更深入地理解生態系統的複雜性。然而，這也帶來了數據分析的複雜性，需要更強大的計算資源和程式語言的應用能力，如 R、Matlab 等。因此，我們需要在教育中強調跨領域合作和數據科學技能的培養，以應對這些挑戰。
- (4) 南安普敦大學位於英格蘭南部的工業港口，這裡有著龐大的研究人員群體以及高師生比例，這意味著我們有更多的機會能與來自不同國家的研究生和學者交流。而且，南安普敦大學與多個研究單位保持著密切的合作關係，每年舉辦大型的海洋儀器展示會議，這使得學術交流更加豐富多樣。這樣的學術環境和合作模式，值得我們學習和效仿，將這種跨機構和跨國家的合作模式引入台灣，有助於提高學術研究的水平。
- (5) 南安普敦大學與 c e f a s (Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science) 以及英國博物館合作，這兩個研究單位歷史悠久，他們的研究資料被完整保存且持續應用於新的研究中，這種長期的研究成果讓我深感敬佩。我們應該學習這種持續性的資料保存和管理方式，避免因研究人員離職或退休而導致寶貴的研究資料遺失。透過系統化的資料保存，我們能夠更好地累積知識和成果，並讓後續的研究人員能夠更輕鬆地接續前人的工作，推動研究領域的穩步發展。

(五)附錄



南安普敦 nocs 校區



周間專題演講



學習耳石樣本分析技術



博士生辦公室



參訪 cefas