

美國加州海洋漁業聯合調查計畫簡介



陳郁凱

水產試驗所海洋漁業組

計畫緣起

掌握漁海況之變動情形為良好漁業管理之基礎，加州海洋漁業聯合調查計畫 (California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations, CalCOFI) 係美國國家海洋漁業局 (National Marine Fisheries Service, 隸屬美國國家海洋暨大氣總署) 之西南漁業科學中心 (Southwest Fisheries Science Center, SWFSC) 最具代表性的計畫，以結合跨海洋生態系各領域的系統性長期調查而聞名。調查內容包括海洋物理、海洋化學而生物方面則從浮游植物到浮游動物的詳盡調查，以及對魚卵及仔稚魚的透徹研究，迄今已邁入第 68 個年頭未曾間斷。目前定期調查的範圍為加州外海北緯 30–35 度，西經 117–124 度之間的海域 (圖 1)，共計 75 個測站。1920–1930 年代沙丁魚為北美洲產量最高的漁獲物，但 1947–1948 年間漁獲量卻大幅減少，僅達過去最高漁獲量 20% 左右，整個加州沿岸的漁民及加工產業深受其害，CalCOFI 是為了因應沙丁魚危機而成立。因此，加州政府開始對沙丁魚漁業開徵稅收，作為漁業資源研究的基金，並由科學家與產業界代表共同組成了海洋研究委員會 (Marine Research Committee)，於 1953 年改為 CalCOFI 的名稱並沿用至今。CalCOFI 計

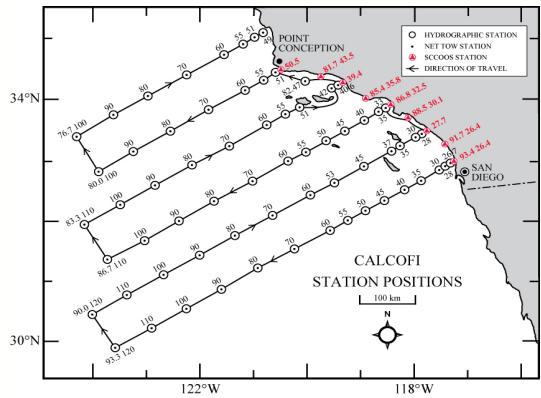


圖 1 CalCOFI 標準採樣測站，共有 75 個測站 (圖片擷取自 CalCOFI 網站)

畫的目標係希望透過觀測沙丁魚所處生態系之物理、化學狀態以瞭解其資源變動之原因，相較於其他海洋觀測計畫，特別的地方在於其以產業目的為出發點，海洋學家、漁業科學家、漁業管理者及產業界均參與其中。CalCOFI 目前是由三個團體共同推動：隸屬於聯邦政府的西南漁業科學中心、加州大學聖地牙哥分校的 Scripps 海洋研究所 (Scripps Institution of Oceanography, SIO) 以及加州政府的漁業管理局 (California Department of Fish and Game, CDF&G)。目前推動 CalCOFI 的經費 1 年約 300 萬美元，由 SIO 與 SWFSC 共同支應，並分別負責兩航次的採集。目前 CalCOFI 的主要目標已由針對沙丁魚資源動態，轉移至研究加州洋流區的海洋環境，監測聖嬰現象與氣候變遷指標，並管理其漁業生物資源。

觀測項目

核心調查包括各測站之水溫、鹽度、營養鹽、透光度、溶氧、葉綠素、基礎生產力、二氣化碳、浮游植物及浮游動物鑑定、魚卵及仔稚魚鑑定等 (如表)。航行中則蒐集氣象資料、海流 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)、聲納探測生物量及目視觀測海洋哺乳類與鳥類等。除核心項目外，2004 年 CalCOFI 與 CCE-LTER (California Current System - Long Term Ecological Research) 計畫結合，許多的附加研究隨 CalCOFI 共同進行，包括了從灑鐵粉減少海洋酸化的實驗到浮游動物的分子生物學、海中微量元素、細菌、超微自營性生物 (pico-autotrophs)、溶解態有機物 (DOC, DON)、浮游植物色素、生物光學特性 (bio-optics)、PRPOOS (Planktonic Rate Processes in Oligotrophic Ocean Systems) 網具等。這些計畫都是建立在 CalCOFI 的大規模海洋調查基礎上方得以實行，增添了 CalCOFI 歷年資料庫的豐富度。

CalCOFI 與 CCE-LTER 共同執行觀測項目

Variable	Investigator/Program	Method
Temperature, salinity, Chl α fluorescence	CalCOFI	CTD, fluorometer
Light transmission @ 660 nm	CalCOFI	Transmissometer
Oxygen	CalCOFI	CTD, auto-Winkler
Nutrients (N, P, Si)	CalCOFI	Auto analyzer
Primary production	CalCOFI	C-14 uptake
Chl α extracted	CalCOFI	Fluorometer
Sea surface pCO ₂	CalCOFI	IR absorbance
Zooplankton, ichthyoplankton	CalCOFI	Bongo net tows
Iron concentration	Barbeau/CCE LTER	FeLume flow injection
Other bio-optical properties	Goericke/CCE LTER	cDOM, beam c vs. l
Particulate C&N	Aluwihari/CCE LTER	Dry combustion
Dissolved organics (DOC, DON)	Aluwihari/CCE LTER	Combustion
Upper ocean currents	Chereskin/CCE LTER	ADCP
Taxon-specific pigments	Goericke/CCE LTER	HPLC high performance liquid chromatography
Bacteria & picoautotrophs	Landry/CCE LTER	Flow cytometry (Hawaii)
Nano- & microneuston	Landry/Venrick	Microscopy, FlowCAM(making slides)
Mesozooplankton, optical size classes	Checkley/CCE LTER	OPC, LOPC
Mesozooplankton, sentinel species	Ohman/CCE LTER	Microscopy, ZOOSCAN
Acoustics: krill, microneuston, pelagics	Koslow	Multi-frequency EK-60
Seabirds	Pt Reyes Bird Observatory/Farallon Institute	Observer
Marine mammals	Hildebrand	Observers, passive acoustics

海上調查

CalCOFI 計畫每年按季進行 4 航次的調查，每航次約需時 16 天，使用的船隻包括 NOAA 的 4 艘以及 SIO 的 3 艘研究船。海上樣本採集是 24 小時持續作業，分日班與夜班各輪值 12 小時負責各項工作。各項樣本多數係直接於船上進行實驗分析，因此隨船出海的研究人員多達 18 名，成員包括了 SIO 的技術人員、SWFSC 的漁業生物學家、博士研究生、研究助理以及海上志工等。研究船啟程後，船長立刻集合所有研究人員，宣告各種船上安全注意事項及規定 (圖 2)，包括各項求生器材使用說明、發生緊急狀況的鈴聲、作業中上甲板必須配戴安全帽以及救生衣，以及生活起居相關事項等。由於加州外海水溫相當低，逃生時最重要的就是要先穿上乾式的救生衣，因此船員及研究人員每個禮拜都必須進行一次的求生裝備演練。



圖 2 每週五必須進行一次求生演練

海洋觀測

CalCOFI 之標準水樣採集深度為 500 m，共 20 個水層，採用可裝載 24 支 10 公升採水瓶之輪盤採水系統，採水系統內共配置

了兩組溫鹽深探針及螢光探針、透光探針、溶氧探針各乙組，並外接一組電源供應器。所有探針及組件均有一組以上之備品，航程中若遇到無法排除之儀器故障，可立即更換備品以利航程順利進行。到達測站後，即開始準備採水系統的投放作業。在 New Horizon 研究船上採水器之投放係於舷側以 J 型吊臂進行，投放時由領隊指揮絞機與吊臂的作業，另外 3 位研究人員配合領隊指揮以纜繩控制採水器（圖 3），避免搖晃過大發生碰撞，待採水器入水後即可將纜繩抽離。採水器入水後，人員於電腦中心監控採水器投放情形，並與絞機人員以無線電通訊，將採水器控制在以每秒 50 cm 的速度緩緩下放，到達預定深度後，以電腦控制擊發採水瓶（圖 4）。在採水器回收過程中，同時以紙本記錄採水瓶擊發時的實際深度、溫度、鹽度、經緯度等資訊，完整記錄每個測站採水器採樣時的資訊。由於採取之水樣數量眾多，CalCOFI 自行開發程式來記錄採水器在各測站作業時的擊發與各項實驗採取之水層資訊，可避免人員採取水樣時發生誤取的情形。採水器投放作業結束，將探針測得之資料作剖面圖並列印紙本保存，若發生電子儀器故障仍可保有紙本原始資料。

採水器於甲板固定完畢，即開始採集各項實驗所需水樣。溶氧樣本於裝瓶後立刻於溶氧測定實驗室進行化學實驗，以 SIO 設計之自動溶氧滴定法，利用波長 365 nm 的紫外線測量其吸光程度。營養鹽樣本則是置於冰箱內，隔天以自動分析儀 (Auto Analyzer 3) 進行測量。此外，部分水樣則以濾紙過濾冷凍保存，攜回實驗室進行高效能液相層析

(HPLC)、顆粒態有機物 (POM)、溶解態有機碳、氮等實驗。另一部份水樣則以藥劑保存，攜回實驗室進行細菌、超微自營性生物、微型小型浮游生物 (nano-microplankton) 等實驗。於白天航行中，2 位海洋哺乳類觀測人員分別於駕駛台左右側以目視及望遠鏡記錄海洋哺乳類數量與種類，1 位人員則於船艙電腦前聆聽拖曳於船尾的水下麥克風 (hydrophone) 即時回傳之訊號 (圖 5)，監聽海洋哺乳類發聲訊號並記錄種類以及數量。鳥類觀測人員於航行中及各測站作業時以目視及望眼鏡記錄鳥類種類及數量。此外，航行中並投放數十個水文觀測浮標，接收衛星回傳訊號以觀測海流狀態。



圖 3 輪盤採水器投放作業



圖 4 電腦中心監控採水器投放情形，並於各水層擊發採水瓶



圖 5 於航行中拖曳水下麥克風

魚卵及仔稚魚採集

目前採集浮游生物所使用的網具有

PRPOOS, Pairovet, Manta 及 Bongo 等四種。PRPOOS 網具係為採集浮游植物所設計（圖 6），結附重錘投放至水深 300 m 後垂直上揚，出水後則以海水噴霧器徹底沖洗網具避免殘留。隨後拆卸網具並更換重錘，結附 Pairovet 網具（圖 7），投放至水深 70 m 後垂直上揚，主要係為採集早期魚卵，採集完畢同樣以海水噴霧器徹底沖洗。隨後更換 Manta 網具（圖 8），以水平方式拖曳 15 分鐘採集較成熟的魚卵，此外，鋼纜上結附量角器以記錄拖曳過程中鋼纜角度之變化。Bongo 為 CalCOFI 調查的標準網（圖 9），以採集仔稚魚為主要目的，投放至水深 210 m 後以 45 度斜拖的方式進行採集，上揚過程中以 10 m 為間距記錄鋼纜角度變化，網具回收後徹底沖洗。以上各網具中央均結附流量計以估算濾水體積，網具末端則有可拆卸之囊網，浮游生物樣本分別以酒精以及福馬林予以保存。



圖 6 投放 PRPOOS 網具至 300 m 後垂直上揚



圖 7 投放 Pairovet 網具至 70 m 後垂直上揚



圖 8 Manta 網具以水平方式拖曳 15 分鐘



圖 9 將 Bongo 投放至 210 m 以斜拖方式上揚，並記錄角度變化

MOHT (Matsuda-Oozeki-Hu Trawl) 為美、日合作設計之新型中層仔稚魚拖網（圖 10），可捕獲體型較大，具游泳能力的中層魚類（圖 11），亦可捕獲到一般仔稚魚網具較難捕捉的體型較大之幼魚及頭足類，為目前採集效率較高的中層仔稚魚拖網。網口由長方形不鏽鋼 (SUS-316 L) 框架構成，面積為 5 m²，網目較大 (1.59 mm)，材質是高強度無結聚乙烯 (Dyneema SK60, Toyobo Co. Ltd)。日間下網前，先由聲探人員利用五種頻率 (18, 38, 70, 120, 200 kHz, multi - frequency acoustic systems) 之聲探觀測散漫層分布狀態，以決定網具投放深度，投放深度通常介於 350—500 m。夜晚作業時，因水層生物已上浮，故網具改投放至水深 150 m。MOHT 網作業時，需 6—7 名研究人員合力操作，待網具下放至預定深度後，以 4 節的船速斜拖上揚。MOHT 係以採集沙丁魚、鰯魚之幼魚及磷蝦等中營養位階物種為主要目的，配合現場魚探資料以決定採集水層，並經由比較漁獲體型大小與聲納探測結果，以網具採集量結合聲探資料進行資源量估計的模式建構。某些中層魚類，例如燈籠魚科魚類，數量相當龐大為多種魚類、頭足類及海洋哺乳類的重要食物來源，在生態系模式建構上的重要生物類群，而 MOHT 便是採集上的重要利器。



圖 10 MOHT 網具下放至預定深度後以斜拖方式上揚



圖 11 MOHT 可捕獲體型較大，具游泳能力的水層魚類

沙丁魚資源評估

魚卵自動連續採集系統 (Continuous Underway Fish Eggs Sampler, CUFES) 係 CalCOFI 為採集魚卵所設計 (圖 12)。據過去研究指出水深 3 m 為沙丁魚卵最密集處。因此將不鏽鋼管入水口設計於水下 3 m 處，於航行中以幫浦將海水抽上來，再經由不同孔徑的濾網先將魚卵與仔稚魚分離。當樣本累積至一定程度後，由研究人員在船上以顯微鏡計數與鑑定。由於加州洋流區的沙丁魚在春季產卵，魚卵通常呈塊狀分布。CUFES 在航行中可偵測何處魚卵密度較高而進一步使用 Pairovet 以 4 涼間距密集採樣，取得較佳的魚卵量估計值並利用日產卵量估算法 (Daily Egg Production Model, DEPM) 可建立相對資源量指標。除了以魚卵分布來推估沙丁魚產卵場外，其春季航次也會搭配拖網採

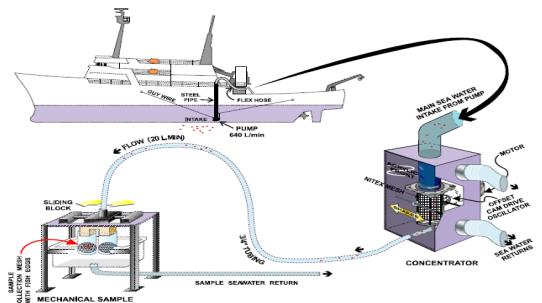


圖 12 魚卵自動連續採集系統 (圖片擷取自 CalCOFI 網站)

集沙丁魚樣本，並研究其生殖腺發育狀態以推斷產卵場。沙丁魚是美國加州沿岸最重要的漁業資源，估計來年加入量是進行漁業管理相當重要的一環。因為較成熟的魚卵及仔稚魚僅分布於表層，故使用 Manta 網於表層採樣。若用 Bongo 可能根本採不到較成熟的魚卵及仔稚魚。發育早期的魚卵主要分布於水深 40 m 左右，且較細密網目採集之魚卵較完整而易於鑑定，故使用 Pairovet 投放至水深 70 m。透過比較不同網具採集的魚卵，可用來推估魚卵的死亡率 (egg mortality rate)。因此 CalCOFI 網具採樣設計係分別以水平 (Manta)、垂直 (Pairovet)、斜拖 (Bongo) 以及連續採集 (CUFES) 等方式估計單位立方水體中的卵量，以期獲得準確的估值進行後續資源評估。

CalCOFI 定期調查計畫本身並無資源評估項目。每年 9 月西南漁業中心針對沙丁魚、鯧魚、鯖魚等種類，結合研究船調查資料 (fishery independent) 及漁獲量資料 (fishery dependent) 提出資源評估報告，並由另一群科學家檢視西南漁業中心的報告書所使用研究方法與評估結果的正確性，與委員進行約兩個月的密集討論，訂定明年的總容

許漁獲量 (total allowable catch, TAC)，並於隔年 1 月 1 日起實施。總容許漁獲量總是低於漁民的期望，漁民甚至自掏腰包雇用直昇機來調查沙丁魚的絕對資源量，但資源現存量並不能保證明年度會有相對應的加入量，故 TAC 的設定會存在爭議。沙丁魚漁獲量管制僅適用於美國，與加拿大及墨西哥等國家之協議則是由聯邦政府負責。

資料運用

1980 年前的約 30 年間，CalCOFI 的樣本與資料主要被用來探討在生態上與經濟上重要魚種的產卵場、分布與豐度的時空變化，以及與其相關的海洋物理、化學特性。計畫目的為瞭解加州洋流區海洋物理、化學與生物的初期發育階段。除了相關研究報告外，共出版了 27 冊調查報告與圖集 (Atlas)。隨著時間的資料累積，CalCOFI 的資料在近期經常被用來探討聖嬰現象、太平洋年代際震盪等長期氣候周期變化對加州洋流區生態系統的影響。嘗試以任何單一年或有限的數年資料來推估生態系的動態可能會產生謬誤的結果，且漁業管理決策與措施會因為未考量生態系內在的長期變動而導致失敗。因此，CalCOFI 對於加州洋流區約 400 種經濟性以及非經濟性魚類之仔稚魚豐度做了長期而完整的紀錄，提供魚類資源動態研究相當好的題材。Hsieh 等人於 2006 年發表在 *Nature* 期刊的突破性研究，便是利用這個獨特的仔稚魚資料序列來證明漁撈行為會提高系群豐度的變異性，此假說在過去雖已被提出，但因欠缺長期觀測資料而無法證實，說

明了 CalCOFI 長期累積資料的重要性。

CalCOFI 累積的資料量相當龐大，包括水文 (Hydrographic Data) 資料庫、基礎生產力 (Primary Productivity Data) 資料庫、浮游動物生物量 (Macrozooplankton Biomass Data) 資料庫、水文分布 (Spatial Pattern Figure) 資料庫、鳥類分布 (Bird Figures) 資料庫、溫鹽 (Dual SBE 3 plus & SBE 4) 資料庫、溶氧 (SBE 13 & SBE 43) 資料庫、螢光探針 (Seapoint Fluorometer) 資料庫、透光探針 (Wetlabs 25 cm Transmissiometer) 資料庫、魚卵與仔稚魚數量 (IchthyoDB) 資料庫、浮游性無脊椎動物 (SIO Pelagic Invertebrates Collection) 資料庫、浮游動物 (ZooDB) 資料庫，年代、採集方法、不同海域的魚卵與仔稚魚 (Fish Egg and Larvae Volumes - Vertical Tows, Manta Tows, Oblique Tows) 資料庫，年代、採集方法、不同海域的磷蝦類 (Euphausiid Plot Gallery) 資料庫、年度會議報告 (CalCOFI Reports) 以及各式的航次報告 (Data Reports) 及圖集。各觀測項目過去是獨立建置資料庫，而目前則導入 Ocean Informatics DataZoo 的觀念 (圖 13)，準備將所有資料庫整合以利運用。

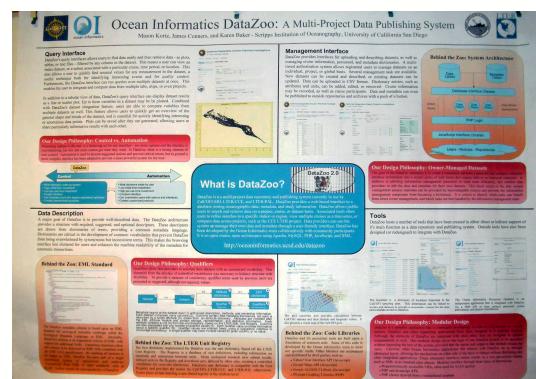


圖 13 CalCOFI 資料庫整合架構海報