

台灣海域多尺度三維海流預報作業模式建置

江朕策¹ 余杏儒¹ 于嘉順² 陳琬婷³ 朱啟豪³ 滕春慈³

國立中山大學海工系博士班¹ 國立中山大學海工系助理教授² 中央氣象局海象測報中心³

摘要

海流預報作業一直是海象(洋)預報作業中最为艱鉅的一項工作,亦是近年歐美先進國家中一項積極發展及改進的項目。一方面提供即時預報海流作為航運、遊憩、漁業等公私部門做為規劃管理及作業之參考,另一方面並可隨時提供救難與緊急應變之需。應用現代高速電腦之計算與儲存技術之提高,運用在預報作業的時效與精度,提供有效的即時預警。研發多尺度台灣海域的海洋預報作業模式是急需完成的重點工作。

本研究分四個階段進行:(一)台灣海域多尺度三維即時海流預報作業模式建置可行性評估,訂定工作目標與預期成果,收集分析相關文獻與資料(二)建置大範圍(太平洋及西北太平洋尺度,西北太平洋尺度,需涵蓋黑潮及大部分颱風路徑)模式(三)建置台灣沿海及台灣海峽細格點模式(1/60 度解析度), (四)建立模式接合介面,將各種不同尺度與解析度的模式進行單向巢式接合,提升預報的精度與效率,巢式接合模式平行化作業,並以中央氣象歷年潮位、水溫、氣溫、颱風等紀錄進行分析,長期模擬分析,作業化模式上線參與每日預報作業。本文敘述研究背景、研究架構、模式分析評估並展示目前完成的初步成果。

關鍵字：海流預報作業、環流模式、多尺度

一、前言

台灣海域為東亞航運必經之地,近幾年來的經濟快速開發,台灣對外的航運更趨頻繁,尤其是石化工業的興起,油品及化學品的進出口更增加了海域遭受船難與污染的危機,阿瑪斯號的油污染以及韓籍化學輪三湖兄弟號在新竹外海沈沒所造成的長期影響更是深遠。由於台灣附近海流經過所形成的生態系統豐富,亦是漁產豐盛的海域,近年興起的海面筏網養殖漁業與政府為保護漁業資源在台灣海域投擲大量的人工魚礁,更是易遭受污染的傷害。即時的海流預報作業,不但可以提供航運業者與航管單位即時的預報資訊,更可以提供做為早期預警與管理的工具,一旦船難發生時,亦可有立即的海流預報資訊,提供緊急應變單位預測油污染或化學品污染的漂移方向及擴散區域。此外,緊急的海難救助之搜尋工作,亦亟需詳盡的全域三維海流資訊,以提供救難單位即時預測評估搜救對象的可能地點,減低搜尋資源投入的成本,確保搜尋作業時效,因此即時海流預報作業確為緊急應變不可或缺的重要資訊。

近年來世界各地的氣象及海洋學者積極研究全球氣候變遷的問題,尤其是海流及海水溫度對海象及氣象的影響,海流的預報與長期模擬分析更是廣泛的被討論著。台灣附近海域的海流極為複雜,北太平洋環流「黑潮」流經台灣東部海域,除了強盛的海流亦帶來高溫與高鹽度的海水環境,進入琉球海峽時亦有部分進入台灣北部海域,與來自台灣海峽的海流結合進入東海,每年東北季風期又會

阻擾部分的表層洋流而促成黑潮的支流經過台灣南部海域進入南海北部及台灣海峽的南部。除了黑潮洋流的影響,秋冬的東北季風及夏季的西南季風均對台灣附近的海流有相當的影響。在台灣海峽及東海等大陸棚海域,潮汐又是一個主導海流的動力,季節變動所造成的溫度與可水排放的淡水亦會影響海流的分布,颱風所造成的擾動期間雖然不長,但是可以造成非常劇烈的局部影響,因此,為能夠及時提供台灣海域的海流資訊,一套涵蓋大範圍、多尺度、能夠達成預報時效的海流即時預報模式是海象預報作業極為重要的工作。

海流預報作業一直是海象(洋)預報作業中最为艱鉅的一項工作,亦是近年歐美先進國家中一項積極發展及改進的項目。一方面提供即時預報海流作為航運、遊憩、漁業等公私部門做為規劃管理及作業之參考,另一方面並可隨時提供救難與緊急應變之需。應用現代高速電腦之計算與儲存技術之提高,運用在預報作業的時效與精度,提供有效的即時預警。研發多尺度台灣海域的海洋預報作業模式是急需完成的重點工作。

本研究擬分四階段進行:(一)台灣海域即時海流預報作業模式建置可行性評估,訂定未來工作目標與預期成果,並收集分析相關文獻與資料,(二)建立大範圍(太平洋及西北太平洋尺度,西北太平洋尺度需包含黑潮路徑及大部分颱風路徑)模式,(三)建置台灣沿海及台灣海峽細格點模式(需使用 1/60 度解析度或非正交網格), (四)建立模式接合介面,將各種不同尺度與解析度的模式進行單向巢式接合,提升預報的精度與效率,巢式接合模式平行化作業,並以中央氣象歷年潮位、水溫、氣溫、颱風等紀錄之

分析，長期模擬分析，作業化模式上線參與每日預報作業。

由於目前本研究目前處於初期階段，因此本文於第一部份敘述研究背景，第二部份為國外海流預報系統，第三部份則提出台灣海流預報系統架構，第四部份展示目前完成的初步成果，最後為結論及未來仍需努力進行的目標。

二、國外海流模式系統

近年來，西歐各國海流作業化模式的發展趨勢，由於模式技術已趨穩定，由於大範圍模式（全球海洋模式或大西洋海流模式等）之範圍、邊界、驅動力等條件多類似甚至相同，所以模式之發展已由各國或研究機構獨自發展建置而趨向於共同研發的模式系統，目前以 MERSEA 及 NEMO 為較大型的跨國海洋環流作業化模式的平台，美國則以海軍研究所 (NRL) 發展的 HYCOM/MICOM 系統，以及 ROMS 及 POM 模式系統為主流，大型環流系統逐漸以 HYCOM 為系統整合方向，區域作業化預報則以 ROMS/TOMS 為主要整合方向，POM 大多以陸棚或沿海為主要應用方向，另有較屬於沿岸河口應用的模式如比利時結合歐盟幾國研究機構所發展的 COHERENS 及以有限體積去發展的 FVCOM 等，亞洲各國亦多以這幾種系統為主要發展及應用為主，以下僅就其組織與模式系統略述於後：

MERSEA (Marine Environment and Security for the European Area)

MERSEA project 是歐洲聯盟贊助之大型跨國研究計畫，是屬於 GMES (Global Monitoring for Environment and Security) 全球海洋監測架構計畫下相關計畫，目的在整合歐洲各國所發展應用中的海洋模式及作業化相關技術（衛星資料分析整合、資料同化技術發展、提升計算效率及作業化技術發展等），自 2001 年起進入第二階段，經比較評估後，以五個模式系統進行大西洋海域的模式分析比對：FOAM (Met. Office, United Kingdom), MERCATOR (MERCATOR-OCEAN, France), MFS (INGV, Italy) and TOPAZ (NERSC, Norway) 等歐洲系統並與美國 HYCOM/MICOM (US) 系統，如圖 1，目前 MERSEA 計畫進行到 2008 年後，即會併入 NEMO 系統中。僅就這五個模式系統略述如後：

- FOAM (UK)
Hadley Centre 所發展的模式，Z coordinate / Rigid Lid，涵蓋北大西洋、北極海、地中海及相關陸棚海域 (10° to 70°N, coast to coast)，水平解析度為 1/9° (12 km)，垂直分為 20 層。
- Mercator (France)
OPA 模式，iso-pycno coordinate / Rigid Lid，涵蓋北大西洋、北極海、地中海及相關陸棚海域 (10° to 70°N, coast to coast)，水平解析度為 1/15° (5-7 km)，垂直分為 43 層。
- Topaz (Norway)

HYCOM 模式 (HYbrid Coordinate Ocean Model)，hybrid coordinates / free surface，涵蓋北大西洋、北極海、波羅底海 (北極至 60°S)，水平解析度為 20 to 30 km，垂直分為 22 hybrid layers。

- MFS (ITALY)
Modular Ocean Model (MOM-1), Z coord/Rigid Lid, 僅涵蓋地中海水平解析度為 1/8°，垂直分為 31 層。
- HYCOM/MICOM (US)
HYCOM 模式 (HYbrid Coordinate Ocean Model)，hybrid coordinates / free surface，涵蓋北大西洋 (28°S-70°N, 98°W-36°W)，水平解析度為 1/12° (平均 6.5km)，垂直分為 26 複合等密度層 (hybrid isopycnal levels)。

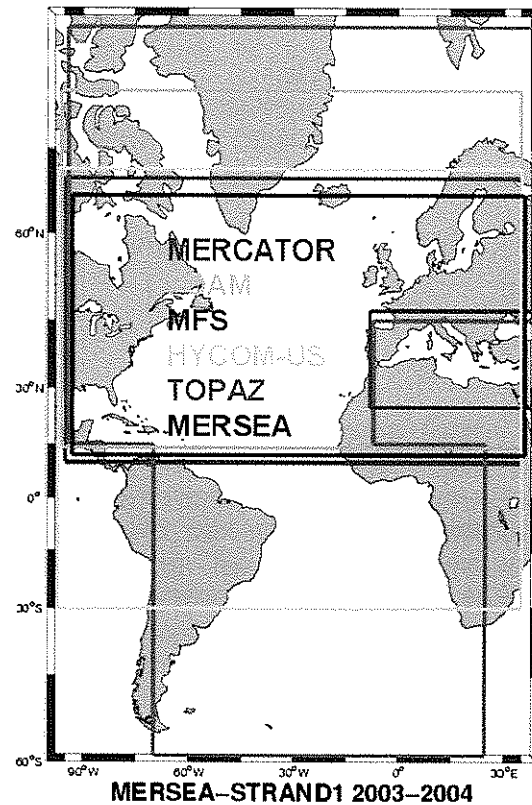


圖 1 MERSEA project model domains.

(<http://strand1.mersea.eu.org/html/strand1/model.html>)

NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean)

NEMO 模式系統平台結合了歐洲幾個主要的海洋環流作業化模式的發展與執行單位，主要成員為法國國家氣象研究中心 (CNRS) 及 國家海洋作業化模式發展計畫 (Mercator-Ocean) 與英國氣象局 (UKMO) 及英國國家環境研究委員會 (NERC) 轄屬的相關研究機構 (POL, SOTTON 等)，以共同研究發展先進海洋作業化模式為主要目標，目前的大型作業化計算單位除英法去主要研究與預報

單位外，亦有德國、西班牙、義大利、日本等國之研究單位，區域型的應用亦極為廣泛。模式系統目前的發展進度為：

- the blue ocean (NEMO-OPA)：最新版 OPA9.0 海洋模式系統，以 OASIS 地球資源耦合系統結合相關之環境影響系統（如邊界海、陸源、大氣、冰層等），並完全以 FORTRAN90 程式語言改寫為適用於高速計算（平行計算）的編譯平台，以便提升計算效率。
- the white ocean (NEMO-LIM) 使用比利時魯汶大學發展的南北極水層動力模式 (LIM2)，以便準確計算海洋環流與南北極水層的溫度動力，尤其近年來受全球氣候變化的影響，冰層與洋流的關係，愈趨重要。
- the green ocean (NEMO-TOP) 以 OPA9.0 內部的對流及擴散傳輸模式 (TOP-1) 驅動二個主要的海洋生地化模式 (LOBSTER, PISCES) 提供海洋生地化相關學者探討海洋生態平衡及全球碳循環等先驅研究。

NOAA/NRL

利用 HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) 進行即時預報，HYCOM 模式主要由 HYCOM 協會發展，此協會是由 National Ocean Partnership Program (NOPP) 等多個組織贊助，成員包含 Office of Naval Research、National Science Foundation、Department of Energy 以及 NOAA。目前運行的系統共有三組，第一組為全球即時現報系統，第二組為大西洋半即時現報/預報系統，此兩組系統皆運行於 NRL Stennis Space center，第三組為大西洋即時預報系統 (Real-Time Ocean Forecast System, RTOFS)，此組系統運行於 NOAA/NCEP，以下就此三組系統進行介紹。

即時全球現報系統：

- 網格水平解析度於赤道為 1/12 度，隨著緯度增加，最細解析度為 7 公里。垂直分層為 32 層。
- 輸出資料包含水位 (SSH)、表層溫度 (SST)、表層流場以及中層溫度及鹽度。
- 使用 Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA) 系統進行資料同化。

大西洋半即時現報/預報系統

- 模式範圍為南緯 28 度至北緯 70 度
- 網格為直角網格，水平解析度於赤道為 9 公里，隨著緯度增加，最細解析度為北緯 60 度的 4.5 公里，北緯 45 度則為 6.5 公里。垂直分層為 26 層。
- 輸出資料包含水位 (SSH)、表層溫度 (SST)、表層流場以及中層溫度及鹽度。
- 使用每日的 Modular Ocean Data Assimilation System (MODAS) 進行資料同化。
- 每週執行一次。

大西洋即時預報系統 (RTOFS)

- 模式範圍為南緯 25 度至北緯 70 度。
- 網格為正文曲面網格，水平解析度於美國海岸為 5

公里，東部大西洋海岸為 9-17 公里。

- 輸出資料包含水位 (SSH)、表層溫度 (SST)、表層流場以及中層溫度及鹽度。
- 使用 GOES AVHRR、JASON GFO、ARGOS、XBT、CTD 及現場資料進行資料同化。
- 每日 GMT 0 時計算，GMT 14 時計算完成，含 1 日資料同化現報，120 小時預報。

日本氣象廳 (JMA)

日本氣象廳下，目前進行海流運算的共有三個系統，一為 MOVE/MRI.COM-G (the Ocean Data Assimilation of JMA)，一為 JMA/MRI-CGCM (Coupled ocean-atmosphere General Circulation Model of JMA)，最後一個為 MOVE/MRI.COM-NP 及 WNP (Multivariate Ocean Variation Estimation/Meteorological Research Institute Community Ocean Model-Northern Pacific 及 Western North Pacific)，以下就此三組系統進行介紹。

MOVE/MRI.COM-G

- 使用 MRI.COM (MRI Community Ocean Model) 進行全球範圍運算，南緯 75 度至北緯 75 度，不包括北極海。
- 模式水平網格解析度在南緯 15 度至北緯 15 度以外為 1 度，內縮至南緯 6 度至北緯 6 度為 0.3 度。
- 垂直網格為 sigma 及 z-coordinate 混合 (Hybrid) 網格，共分為 50 層，200 公尺以上為 24 層。
- 使用 JMA Climate Data Assimilation System (JCDAS) 資料進行驅動。
- 使用 MOVE scheme 進行資料同化。

JMA/MRI-CGCM

- 此為海洋大氣耦合模式，海洋部份使用的模式為 MRI.COM，大氣部份使用較低解析度的 global spectral model (JMA 作業氣象預報模式系統) 進行耦合。
- 模式設定與 MRI.COM-G 相同。
- 模式每小時進行耦合運算，海洋模式提供表層溫度與大氣模式，大氣模式則提供熱通量、風場及降雨等資訊耦合海洋模式。
- 資料同化部份，大氣模式及海洋模式利用每日的實測風場及表層溫度進行修正。
- 大氣模式初始場由 JCDAS 提供，海洋模式初始場則由 MOVE/MRI.COM-G 提供。
- 每五天執行一次。

MOVE/MRI.COM-NP 及 WNP

- 使用 MRI.COM 模式。
- NP 模式範圍為南緯 15 度至北緯 65 度，東經 100 度至西經 75 度。模式水平網格解析度為 1/2 度，垂直分層為 54 層
- WNP 模式範圍為北緯 15 度至北緯 65 度，東經 117 度至西經 160 度。模式水平網格解析度為 1/10 度，垂直分層為 54 層。

- WNP 模式邊界由 NP 提供。
- 提供日本周圍海域、西北太平洋及北太平洋每日及每月的溫度及流速平均資料。

上述為國際質尺的海流模式系統，可瞭解系統皆是由多組解析度模式及觀測系統組成，可作為台灣海流模式預報系統規劃之參考。

三、台灣海流模式預報系統

參考國際海流預報系統，規劃台灣海流預報作業化模式系統，如圖 2，整體海洋環流預報作業化模式系統架構，主要分為兩個部份，一為模式系統，包括太平洋環流模式、北太平洋模式、西北太平洋模式及台灣海域模式，另一部份則為觀測資料系統，包括衛星資料、測站資料、浮標資料及船測資料，用以讓模式進行資料比對，並且可與模式進行資料同化，得到更精確的模式結果。

影響海流的因素相當多，而且各因素的尺度也不同，有全球尺度的大氣因子、洋流及潮流，中尺度的渦流系統，也有受到海岸線及區域地形影響的小尺度因子。為了要將大尺度的影響因素包含進來，模式的模擬範圍需要擴大，而為了解析區域因素，模式網格的精度需要增加，如此條件下，計算的網格數會以數十倍甚至數百倍增加，以目前現有的電腦計算架構，並無法達成此一目標，利用單一網格來模擬海流的狀況是不可能的，因此最好的方式就是利用多式網格系統，所以在模式系統的部份，本研究設定了三個階層的網格系統，如圖 3。

第一層太平洋環流模式，利用全球大氣模式作為驅動條件，進行太平洋洋流(北太平洋環流及南太平洋環流系統)系統的模擬，使用 ROMS 做為模式建置基礎，結果可作為下一層模式的邊界條件。西北太平洋模式則進行更細部的太平洋環流模擬，精度提高，並將黑潮的路徑以及大部分的颶風路徑涵蓋在內，由於使用太平洋環流模式的結果當成邊界條件，因此可將洋流的影響包含進西北太平洋模式內，同時因為解析度較高，也可將中尺度的渦流系統包含在內，亦使用 ROMS 建置模式。最後一層則是解析度及範圍最小的台灣海域模式，利用西北太平洋模式的結果當成邊界輸入，將洋流及渦流的影響帶進此系統，而解析度小可以解析更細部的海岸線及海底地形，透過此巢狀網格的機制，可以得到更精確的台灣海流狀況，使用 FVCOM 建置模式。

模式系統建置完成，需要實測資料進行模式效驗及比對，因此海洋環流預報作業化模式系統架構包含了觀測資料系統。由於模式系統涵蓋的範圍從全球範圍到區域範圍，因此所需資料量相當龐大，包括衛星資料(大範圍)、測站資料(區域)、浮標資料(區域)及船測資料(區域)。取得的資料除進行模式的比對之外，同時也希望建立一套資料同化的方式，以增加模式作業化預報的準確度。

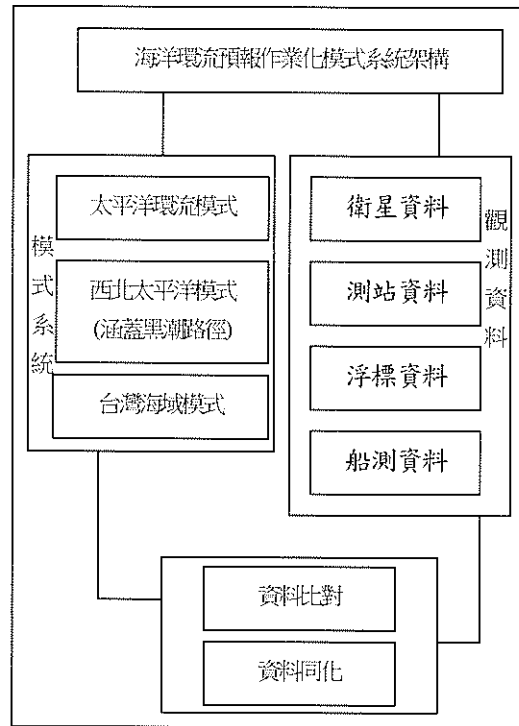


圖 2 台灣海流模式預報系統架構圖

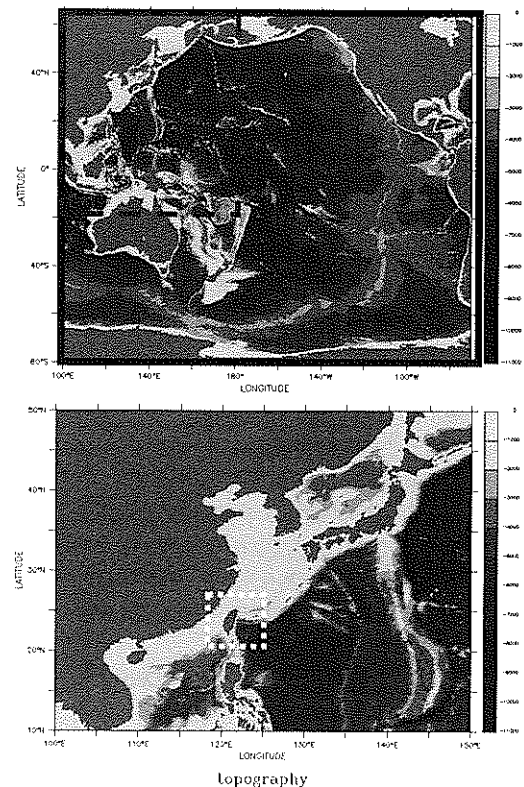


圖 3 海流模式系統模擬範圍示意圖(實線：太平洋環流模式、虛線：西北太平洋模式、點線：台灣海域模式)

四、太平洋環流模式

依海洋環流模式架構，本研究首先建置太平洋環流模式，以便未來提供下二層模式未來運算的邊界條件及初始條件，使用的模式為 ROMS。

4.1 模式範圍網格設定

模式範圍涵蓋整個太平洋海域，因此選定範圍由南緯 80 度至北緯 67 度，東經 90 度至西經 67 度，如圖 4 所示，可將南北太平洋環流及南極環流包含進來，西邊邊界延伸至東經 90 度，可將西邊透過印尼群島間隙的進入太平洋海域的流場影響包含進來。模式地形資料透過 etop5 全球地形資料半網取出來，由於近岸地區在此模擬範圍對太平洋環流的影響不大，因此最小地形網格設定為 40 公尺。

模式網格分辨率為 1/3 度，水平網格數為 626(經度方向) x 450(緯度方向)點，經度方向最小網格距離為 6.3 公里，最大網格距離為 36 公里，垂直分層為 40 層，採用 sigma 座標分層，如此在淺淺海每層厚度可達到 1 公尺，最大厚度為 480 公尺。

ROMS 在實際計算點的選擇是透過乾濕點的設置決定，如此可將沒影響(內陸湖泊)或影響極小(半封閉海域、海灣)的計算區域排除，節省模式計算時間。圖 5 為太平洋環流模式計算點(濕點)配置，由於美洲地區五大湖區及墨西哥灣與太平洋海域並無連通點，並不會影響太平洋環流，因此透過乾濕點配置將此區海域設定為非計算點(乾點)；北邊白令海峽連接北極海的北邊界，因為並未有可配合的北極海模式運算，加上此區海流交換影響較小，也將此區設定為非計算點(乾點)。

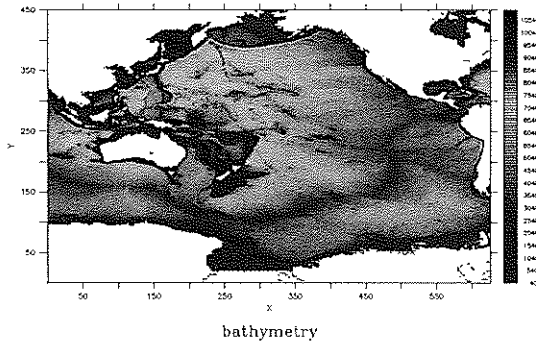


圖 4 太平洋環流模式範圍地形圖

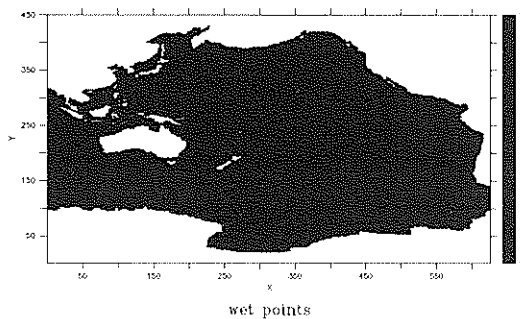


圖 5 太平洋環流模式計算點(濕點)配置

4.2 模式邊界條件、初始條件及驅動力

由於太平洋模式範圍相當大，初始條件若從零開始運算，需要相當長的時間才有辦法達到模式穩定，為了加快模式穩定的時間，因此目前使用 HYCOM 全球模式(解析度為 1/12 度)2003 年 1 月 2 日的計算結果作為太平洋環流模式的初始條件，使用資料為水表面高度、三維流速、溫度及鹽度資料。模式邊界條件同樣也使用 HYCOM 模式結果輸入，輸入的項目與初始條件相同。

ROMS 驅動力輸入可分為兩種形式，第一種為輸入風速、氣壓、雲遮量、相對濕度、降雨量、蒸發量、短波輻射、長波輻射、海表面反射率及海表面氣溫等氣象因子，於模式內自行計算所需使用的變數；第二種則為輸入風剪力、靜熱通量、短波輻射、淨降雨量及海表面溫度等變數資料，直接供模式計算使用。透過氣象資料的收集，取得 2003 年 NCEP 重分析氣象資料(目前取得的資料為月平均值)可直接提供相關變數的數值資料，因此本次太平洋環流模式的驅動力設定採用第二種方式，直接將變數值輸入模式計算。

目前本研究仍持續收集相關資料，並與日本氣象研究所達成協議，可提供日本氣象廳過去 15 年全球海洋模式計算結果(解析度為 1 度)供本研究使用。

由於目前較常使用的驅動力資料多為重分析的歷史資料，因此對於未來模式開始預報後，會產生無法取得預報時所須得資料，所以為配合未來預報時程，且經與氣象局專家學者討論後，決議使用 NCEP Climate Forecast System (CFS)氣候預報資料，作為模式建置完後未來預報時期的驅動力。

4.3 模式初步結果

太平洋環流模式開始模擬日期為 2003 年 1 月 1 日，由於目前仍處於初期建置狀態，加上模式計算時間較長，因此僅完成初步模擬，圖 6 至圖 9 為執行一個月後之海表面高度、溫度、鹽度及流速分佈圖。透過流速分佈圖，目前流速仍相當紊亂，因此目前模式仍處於未穩定的狀態，還需要一段時間的計算才可達到穩定。

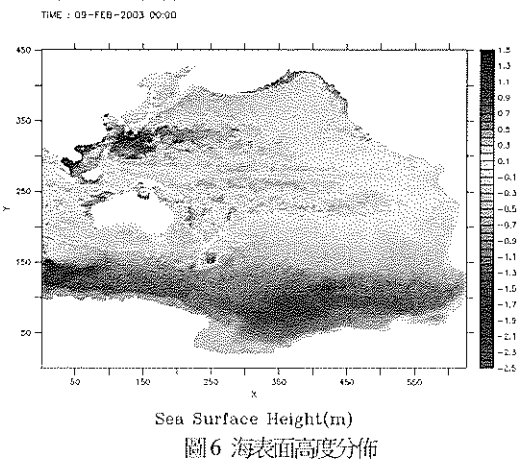


圖 6 海表面高度分佈

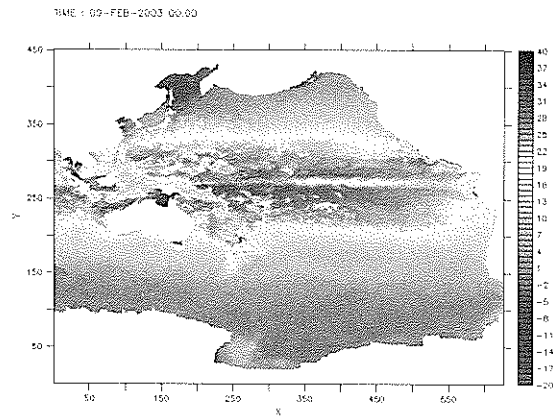


圖7 海表面溫度分佈

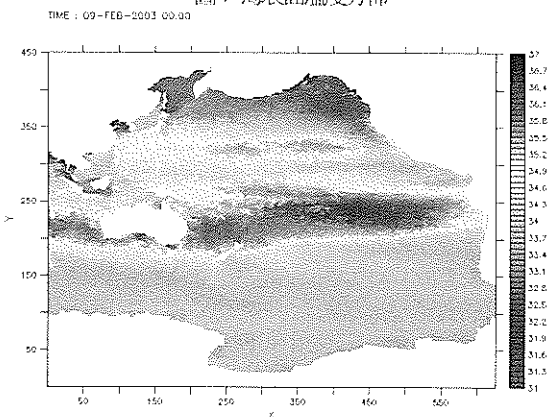


圖8 海表面鹽度分佈

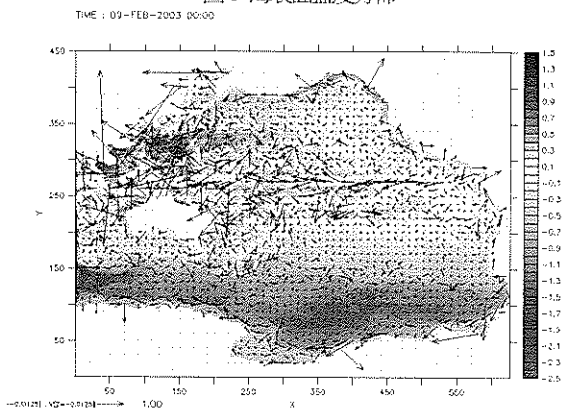


圖9 海表面流場分佈

五、結論

目前初步完成太平洋環流模式的設定，持續進行模擬及校驗，未來仍需建置西北太平洋環流模式及台灣海域海流模式，並建置三個尺度模式接合介面，並進行線上預報測試以及長期模擬，可提供未來防救災及相關研究參考。

謝誌

感謝氣象局專家學者、日本氣象廳氣象研究所 Dr. Masafumi Kamachi, NOAA/NOS Dr. Eugene Wei, UCSD Dr. Luca Centurioni, 澳洲 IMOS Dr. Roger Proctor 提供本研究的各種經驗及建議，以及模式發展過程中所需要得資料。

參考文獻

1. HYCOM 網站 <http://hycom.rsmas.miami.edu/index.shtml>
2. MERSEA 網站 <http://www.mersea.eu.org/>
3. Naval Research Laboratory 網站 <http://www.7320.nrlssc.navy.mil/html/7320-home.html>
4. NEMO 網站 <http://www.lodyc.jussieu.fr/NEMO/>
5. Ocean-modeling 網站 <http://www.ocean-modeling.org/index.php>
6. ROMS/TOMS 論壇 <https://www.myroms.org/forum/index.php>
7. ROMS 網站 <http://www.myroms.org/>
8. Wiki ROMS 網站 https://www.myroms.org/wiki/index.php/Regional_Ocean_Modeling_System_ROMS
9. Hurlburt, H.E., M.J. Bell, G. EVENSEN, C.N. Barron, A. HINES, O.M. SMEDSTAD and D. STORKEY, 2002: "Operational Global Ocean Prediction Systems. En route to GODAE", 13-15 juin/june 2002, Biarritz, France, pp 97-105
10. Shchepetkin, A.F. and James C. McWilliams., 2005: "The regional oceanic modeling system(ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model". *Ocean Modelling*, Vol. 9, pp 347-404
11. Smedstad, O.M., H.E. Hurlbut, E.J. Metzger, R.C. Rhodes, J.F. Shriver, A.J. Wallcraft and A.B. Kara, 2003: "An operational Eddy resolving 1/16 ° global ocean nowcast/forecast system". *Journal of Marine Systems*, Vol. 40-41, pp 341-361
12. Wallcraft, A.J., A.B. Kara, H.E. Hurlburt, and P.A. Rochford, 2003: "The NRL Global Ocean Model (NLOM) with an Embedded Mixed Layer Submodel: Formulation and Tuning". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 20, pp 1601-1615
13. Wei, Eugene and Manchun Chen, 2001: "Hydrodynamic Model Development for the Port of New York/New Jersey Water Level and Current Nowcast/Forecast Model System". NOAA Technical Report NOS OCS 12