

海洋數值模式資料同化模擬驗證

廖建明¹ 楊益¹ 賴堅戊¹ 陳思樺¹

台灣海洋科技研究中心¹
財團法人國家實驗研究院

摘要

本研究利用AVISO衛星測高資料同化至海洋中心POM (Princeton Ocean Model)海流模式，透過巢狀格網計算方式，使用全球、西北太平洋及台灣海域三層格網，逐步縮小計算範圍，藉以提高台灣鄰近海域海流模擬的解析度。利用衛星測高偏差資料轉化為溫度、鹽度偏差同化至模式中，在西北太平洋海流模式測試中顯示資料同化技術可以有效改善台灣東部海域中尺度渦流形成與傳遞現象，透過與海面高度之比較中顯示，資料同化模擬可表現出渦流靠近台灣東南海域對黑潮所造成的影響。而利用溫度與流速剖面浮標串列資料進行驗證，發現經資料同化的模擬可有效改善模擬結果，其測試結果將作為資料同化參數後續修正之依據，藉此強化台灣海域海洋預測應用之可信度。

關鍵字：海洋模式、資料同化

一、前言

台灣位於東亞大陸棚架緣上，全年有強勁的黑潮由南而北流經東部海域，冬季則有中國沿岸流由北而南沿流經台灣海峽。而狹長的台灣海峽引致半日型潮波共振效應，在海峽的南北兩端開口，常年有潮波的無潮點存在，導致海峽內潮流流速強勁。在洋流匯集與強勁潮流的雙重影響下，台灣附近海域流況極為複雜。而近年來台灣海域發生許多重大海上急難與溢油汙染事件，在處理過程中凸顯了國內亟須充分了解台灣海域海流分佈狀況的迫切性，而發展一套高解析度海流預測模式則為當務之急。在觀測資料的校驗下，有依據地調整模擬海流的合理性，提供相關單位或社會大眾運用，或開發計畫進行前之背景資料來源，以提升相關計畫執行成效。

此外，基於海洋與大氣的大尺度特性，其彼此間複雜的交互作用與影響，因此海流的研究，長久以來一直是跨國界、跨學門領域的艱鉅工作，其不僅牽涉層面廣泛，更需要大量水下、海上、太空等人力與物力資源的整合。先進的海洋國家無不積極參與投入其中，臺灣及日本即曾有黑潮觀測計畫，韓國亦曾有東北亞海洋觀測系統等。隨著計算機的進步，數值海洋模式更是蓬勃發展，如COHERENS (COUPLED Hydrodynamical Eological model for REgional Shelf seas) 、 POM (Princeton Ocean Model) 、 ROMS (Regional Ocean Modeling System) 、 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) 等模式都是使用者眾多的分享模式。

本研究所使用的美國普林斯頓大學海洋模式 (Princeton Ocean Model, POM) 的發展，早期是由於 Blumberg 和 Mellor (1983) 在大西洋南方海灣作的一連串預測的數值模擬，該數值模式發展一個時變三維動量方程式並使用貼地座標的模式，包含一個由 Mellor 和 Yamada (1982) 研發的紊流閉合模式 (turbulence closure model)。接著 Oey 等人 (1985a；1985b；1985c) 利用該模式模擬 1980 年七月到九月這段期間的 Hudson-Raritan 河口，模擬結果展現時間獨立、三維的速度和鹽度場結構，其結果描述複雜的海域循環和河口的混合過程。直到 1987 年 Blumberg 和 Mellor 再整理及撰寫過去幾年來發展的三維數值循環模式，稱為 Princeton Ocean Model，簡稱 POM 模式。Mellor 和 Ezer (1991) 使用 POM 原始動量方程式，跟隨底部平滑的垂直座標系統和一個跟隨近岸的水平正交座標系統，進行大範圍水力特性計算，延伸範圍包括墨西哥灣流，並可同時模擬如溫度、鹽度等水理特性。而 Oey (2005；2006) 則增加一乾溼格網技巧，延展 POM 模式於沿海地區對於海水漲退或潮升降之模擬。

數值模式的目的在於可提供詳細的模擬資料，以了解模擬區域的海流特性，如 Zavatarelli 和 Mellor (1995) 則模擬實際的地中海流況，並與各種觀測結果比較。Aikman 等人 (1995) 將 POM 模式和其他發展中的近岸海洋預測系統 (Coastal Ocean Forecast System, 簡稱 COFS) 作比較。近年來，大部分應用在近岸和小範圍地區的模式也開始使用在大範圍的海洋、海岸地區，例如 Ezer 和 Mellor (1997；2000) 、 Ezer (1999) 第一次將曲線座標模式應用在整個大西洋海域水理特性的數值模擬，藉由模式計算獲得基本的

海洋循環特性。對於臺灣附近海流的研究，Hsin等人(2008)利用POM模式建置了解析度之東亞邊緣海模式，利用模式結果討論1982至2005年間的黑潮變化。其結果發現黑潮流經台灣東岸時，在近岸區域可延伸至300公尺水深，在離岸區域可達600公尺深度，在某些區域甚至可達1000公尺深度，而黑潮於台灣東岸之平均流量約為 $32.7 \pm 4.4 \text{ Sv}$ 。而Wu等人(2007)利用高解析度POM模式、風場與海面溫度資料模擬台灣海峽之海流變化，其結果發現夏季黑潮支流直接越過彰雲隆起，冬季由於東北季風的影響中國沿岸流阻擋海峽中向北流的流動，於彰雲隆起北側形成一逆時針渦流。于等人(2012)為了海流預測作業需求，使用ROMS、SELFE模式研究建構台灣海域海流模擬系統。

對於海洋模式資料同化的研究，Mellor和Ezer(1991)利用衛星測高資料同化至大西洋灣流模式中，可增加模式預測能力天數與改善精度。Yu等人(2012)利用變分法同化高頻雷達表面測流資料至美國太平洋Oregon沿岸之ROMS模式中，發現高頻測流雷達資料可以除了改善表面流速的預測精度，亦可改善近岸海面溫度與高度的預測。

本研究利用POM模式建置台灣海域海流預測模式，利用巢狀格網計算方式，逐步縮小計算範圍，藉以提高台灣鄰近海域海流模擬的解析度，為了海洋數值預測模式之精確度提升，進行海洋資料同化技術的開發與測試，以彌補模式模擬機制與數值方法的缺陷，降低模式系統偏差與不可預期之錯誤，希冀能提供更合理的海流預測結果。

二、模式設定

本研究利用海洋中心海象預測平台(廖等人，2013)架構配合大氣預測模式，完成建立台灣海域高解析度海流模式之建置，而相關的模式設定與說明如下：

(一) 格網設定

為了提高解析度降低計算資源的需求，採用巢狀格網方式進行台灣附近海域高解析度海流模擬，採用近全球、西北太平洋、台灣海域格網進行逐層計算。如圖1分別為近全球(G1)、西北太平洋(N2)、台灣海域(T3)之計算領域地形水深圖，其計算格網間距小於水深資料庫格網間距區域則採線性內插方式，而模式格網設定亦如表1中所示。

(二) 海流數值模式

而海潮流數值模式則使用美國普林斯頓海洋模式(Princeton Ocean Model, POM)，其能描述三維的海洋變化物理現象，控制方程式包含採用垂直 σ 座標之連續方程式、動量方程式、鹽度與溫度守恆方程式。在數值技巧方面，水平網格可利用正交曲線網格，提高解析度並增加計算效率，並採用分割技

巧，利用水深積分將三維方程式轉換成二維模式，將模式分成二維模式來模擬快速變動的慣性重力波，而三維模式來模擬緩慢變化的內部波動或熱動力變化等，可以有效率的解決三維模式模擬速度較慢的缺陷，關於模式詳細內容可參考Mellor (2003)。

表 1 巢狀格網之範圍與計算條件

| 模式 | 模式範圍 | 解析度 | 地形水深 |
|----|--------------------------|--------|------------|
| G1 | 180E~180W 70N~75S | 0.25 度 | ETOPO1 |
| N2 | 99E~149E 2N~41.2N | 0.08 度 | ETOPO1 |
| T3 | 117E~124.5E 18N~26.5N | 0.02 度 | 海洋資料庫 500m |

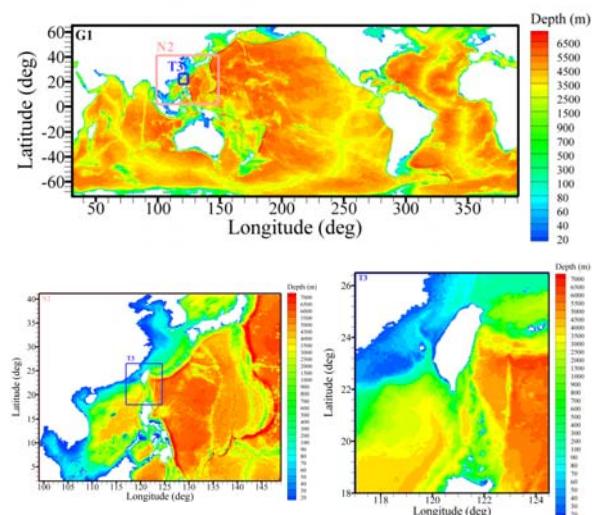


圖 1 近全球(G1)、西北太平洋(N2)、台灣海域(T3)之計算範圍與地形水深圖

(三) 大氣模式與邊界資料

由於海流模式中包含了一個提供大洋邊界條件的洋流模式，為提供此模式所需的氣象邊界條件，故蒐集了NCEP/NCAR再分析場資料(NCEP/NCAR Reanalysis 1) (Kalnay等人，1996)，其資料為模式運算後資料同化之分析場結果，資料時間範圍自1948年至今，時間解析度為每6小時一筆，空間格網為T62 Gaussian Grid，資料範圍涵蓋全球。而海流數值模式之表面邊界條件包含10米高海面風場(uwnd、vwnd)、海平面大氣壓力(slpr)、2米高氣溫(air)、2米高比濕(shum)、表面長波輻射通量(nlwrs)、表面短波輻射通量(nswrs)、表面潛熱通量(lhtfl)、表面顯熱通量(shtfl)、降雨率(prate)等變數，利用海面通量計算方式，進行海面風剪應力、溫度與鹽度通量等表面邊界條件之計算，而模式鹽度與溫度起始資料以WOD13 (Boyer等人，2013)海洋資料庫的月平均氣候值。

考慮天文潮汐為近岸海域之重要影響因素，故利用邊界條件處理方式來模擬台灣海域洋流與潮流同時存在之流況。其利用台灣海域洋流模式(T3模式)為基礎，採用OTPS (OSU Tidal Prediction Software, <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>) 來建立天文潮位邊界，配合西北太平洋海域模式(N2模式)所輸出之海流流速與水位，將潮汐與洋流模式之水位兩者相加後，並考慮遠域之潮汐流速影響分量很小，以洋流模式結果做為流速主要成分，提供台灣海域模式(T3)所需的水位與流速邊界條件進行模擬計算。

(四) 資料同化

本研究以AVISO (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs>)衛星海面測高資料做為資料同化的主要來源，其為整合多個衛星資料的資料庫，進一步統整彙集而成。海流模式資料同化為，

$$\phi_A = \phi_p + \alpha \Delta \phi \quad (1)$$

其中 ϕ 分別表示模式中的溫度 T 與鹽度 S ， ϕ_p 為模式預測值、 ϕ_A 為分析值、 $\Delta \phi$ 為更新值， α 為權重函數，依據Ko和Wang (2014)表示為，

$$\alpha = \Delta t / t_{scale} \cdot f(z) \quad (2)$$

其中 Δt 為資料同化執行時間間隔， t_{scale} 為時間尺度係數， $f(z)$ 為水深修正函數。依據Mellor和Ezer (1991)， $\Delta \phi = F \Delta \eta$ ， F 為修正函數， $\Delta \eta$ 為海面高度偏差值(anomaly)。

三、模式結果驗證

關於模式設定，模式起始時間為1980年1月1日，模擬至2014年12月31日，而資料同化模式起始時間為1993年1月1日至2014年12月31日，衛星海面高度偏差更新時間間距為1日，而模式參數如廖等人(2013)中所述，相關海表面大氣資料邊界條件利用內插方式引入模式計算。如圖2為西北太平洋模式於1993-2014年季平均之AVISO海面高度、未同化及同化模擬之海面高度與表面流速、50公尺深度流速分布圖(圖中由左至右)，由上而下分別為春、夏、秋、冬季，由於本研究所使用的資料同化方式是利用衛星測高資料轉化為溫鹽變化同化至模式中，並不是直接進行海面高度的資料同化，故透過衛星海面高度與模式結果比較中顯示，此資料同化技術可有效改善西北太平洋海流模式中尺度渦流形成與傳遞現象，使得台灣東部海域的渦流現象造成海流特性改變，如秋冬季節黑潮於呂宋海峽的入侵南海的角度改變，造成台灣東部海域黑潮流動特性的型態改變等，由50公尺深度海流分布更可明顯看出資料同化所造成的順時針暖渦、逆時針冷渦現象。圖3、4分別為1993-2014年之未資料同化與同化海面高度偏差與AVISO海面高度偏差於水深1000公尺以上海域之相關係數比較圖，圖3、4分別為相關係數之空間分布與時間變化。由空間分布中明顯表示資料同化明

顯改善模式對於台灣東側太平洋海域的海面高度模擬合理性，對於中尺度渦流所產生的海面偏差高低變化可以合理掌握；在時間序列比較上，同化後的海面高度偏差相關係數平均可達0.65，表示西北太平洋模式之模擬合理性。

而圖6為利用SEATS觀測計畫中位於南海的KK-1測站(測站位置如圖5中所示，資料時間為2000/10~2002/07)之溫度剖面資料，由上至下分別為觀測值、西北太平洋模式未同化及同化模擬溫度結果，其顯示資料同化可改善局部時間的溫度變化趨勢。圖7為不同深度之觀測與模擬值統計偏差結果，圖中紅色與綠色點分別代表未同化與同化模擬，由圖中顯示資料同化可以有效提升水深50至500公尺之觀測與模擬溫度值間的相關係數，降低50至150公尺深度斜溫層上部的溫度偏差。

圖8為台灣海域模式於1993-2014年季平均之AVISO海面高度、未同化及同化模擬之海面高度與表面流速、50公尺深度流速分布圖(圖中由左至右)，由上而下分別為春、夏、秋、冬季，由圖中明顯可見未同化與同化模式結果於台灣西南部海域之海面高度季平均分布有明顯差異，同化後的海面高度分布較接近AVISO衛星測高資料。圖9為台灣東部流速剖面觀測值與台灣海域模式未同化與同化模擬結果比較圖(K2-1與K2-2測站位置如圖5中所示)，圖中左側為K2-1測站流速剖面時序列，其位於台灣黑潮流經之蘭嶼西側海域，資料時間為2001/10/20~2002/04/29，而流速在2001年11月底開始減小，至12月中下旬達到流速最小，在2002年1月中旬後流速恢復至1公尺每秒，而2002年3月上旬表面流速逐漸變大至1.5公尺每秒，由資料同化模擬結果中可反映出該海域的秋冬季節的流速變化趨勢，有效改善海流模擬合理性。而右側為K2-2測站，資料時間為2002/04/10~2002/09/25，其觀測流速於2002年5月與7月皆出現流速最大值，由流速大小變化的趨勢可看出資料同化亦可合理的改善未同化模擬結果。圖10為觀測值與未同化、同化模擬值於不同深度的流速偏差統計結果，紅色與綠色點分別表示未同化與同化模擬結果，顯示資料同化技術可有效改善該處海域的海流流速模擬與觀測值的偏差。由上述測試與驗證結果將作為資料同化參數後續修正之依據，藉此強化台灣海域海洋預測應用之可信度。

四、結論

本研究利用AVISO衛星測高資料同化至海洋中心POM海流模式，驗證結果發現在西北太平洋海流模式中顯示資料同化技術可以有效改善台灣東部海域中尺度渦流形成與傳遞現象，亦對於黑潮於台灣西南海域的特性有所影響，後續將透過更多實測資

料的比對驗證確認資料同化技術的合理性，藉此強化台灣海域海洋預測應用之可信度。

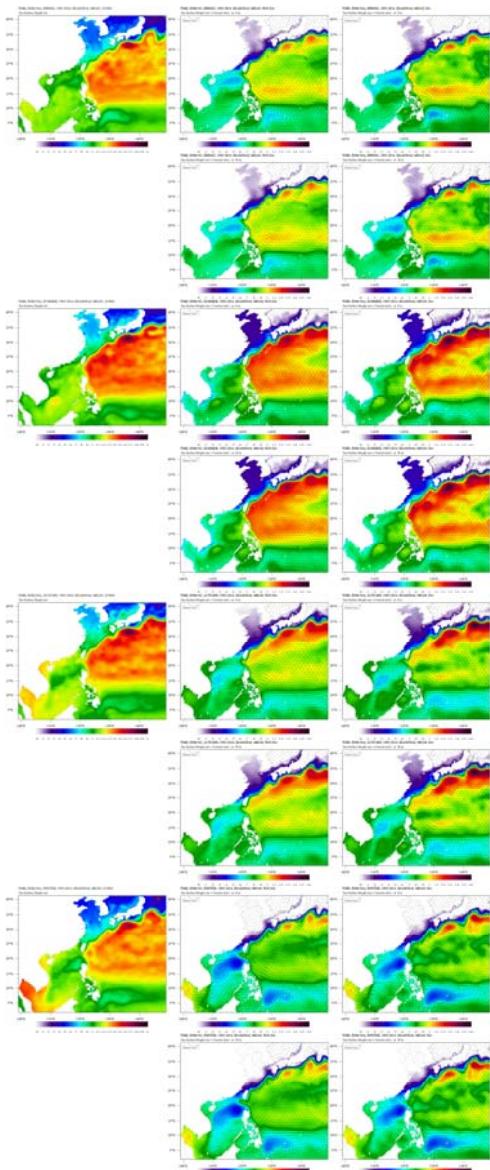


圖2 西北太平洋模式1993-2014年季平均之AVISO海面高度、未同化及同化模擬之海面高度與表面流速、50公尺深度流速分布圖(由上而下分別為春、夏、秋、冬季)。

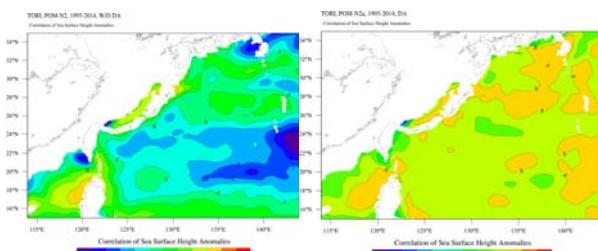


圖3 1993-2014年之未同化、同化模式值與AVISO海面高度偏差於水深1000公尺以上海域之相關係數分佈圖。

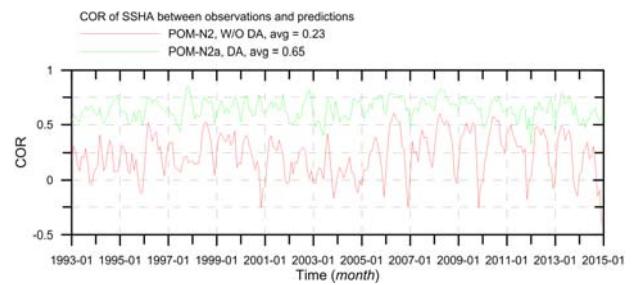


圖4 1993-2014年之未同化、同化模式值與AVISO海面高度偏差於水深1000公尺以上海域之相關係數時間序列變化。



圖5 SEATS KK-1、K2-1及K2-2測站位置圖

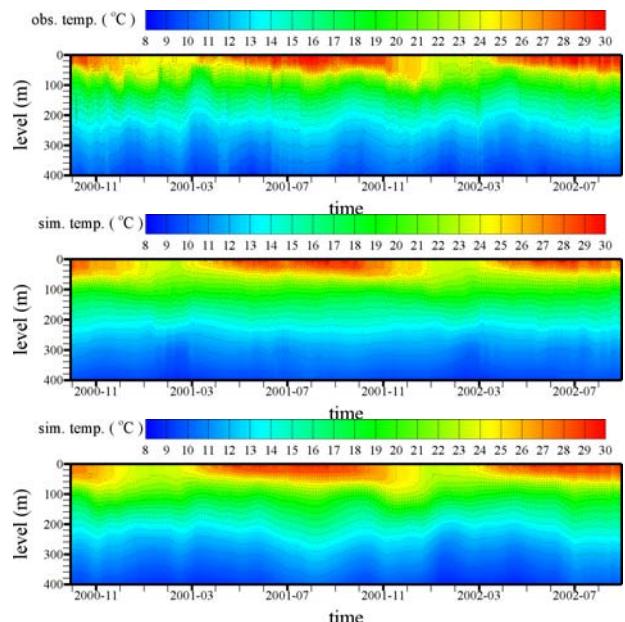


圖6 於KK-1測站之觀測值、西北太平洋模式未同化及同化溫度模擬結果

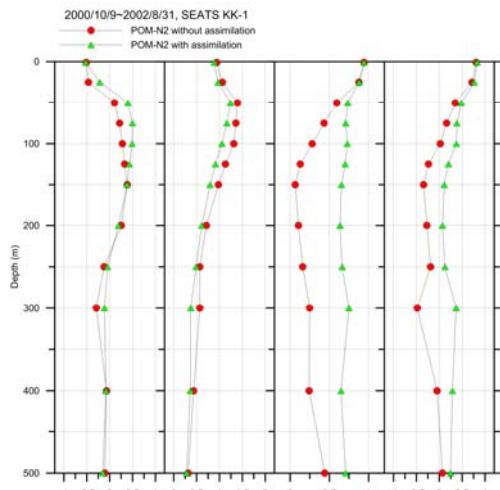


圖7 於KK-1測站不同深度之觀測與模擬值溫度偏差統計結果

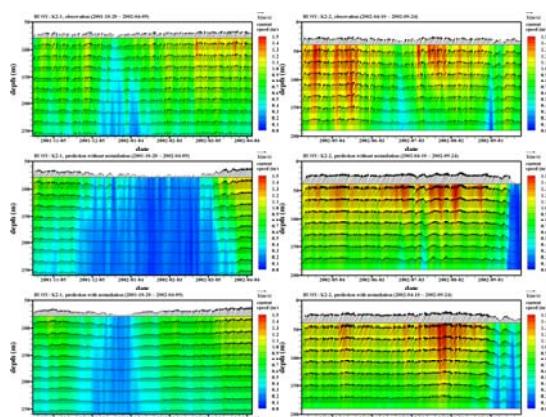


圖9 台灣東部K2-1、K2-2測站流速剖面觀測值與台灣海域模式未同化與同化模擬結果比較圖

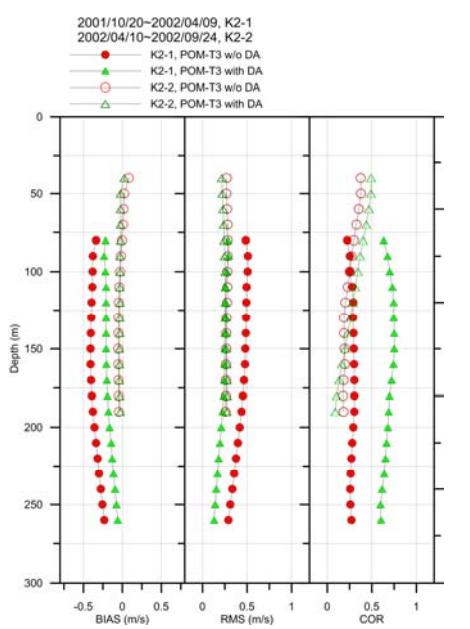


圖10 於K2-1、K2-2測站不同深度之觀測與模擬值流速偏差統計結果。

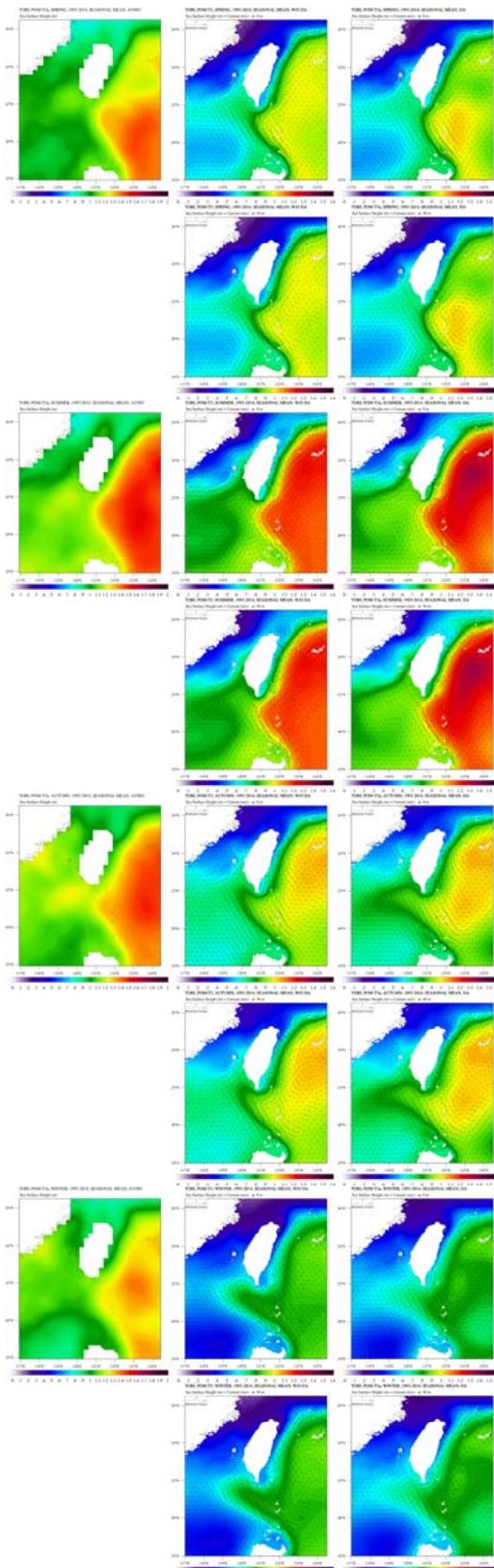


圖8 台灣海域模式1993-2014年季平均之AVISO海面高度、未同化及同化模擬之海面高度與表面流速、50公尺深度流速分布圖(由上而下分別為春、夏、秋、冬季)。

誌謝

本研究承蒙已故台灣大學海洋研究所唐存勇教授提供台灣東部K2-1、K2-2測站流速剖面資料，使本研究得以進行，亦感謝唐教授對於台灣海洋研究界的貢獻。

參考文獻

- Aikman, F., G. L. Mellor and D. B. Rao, T. Ezer, D. Shenin, K. Bosley and P. Chen, 1996: "Toward an operational nowcast/forecast system for the U.S. east coast," Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling, P. Malanotte-Rizzoli, Ed., Elsevier, 347-376.
- Blumberg, A.F., and G.L. Mellor, 1983: "Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight," J. Geophys. Res., 88, 4579-4592.
- Boyer, T.P., J. I. Antonov, O. K. Baranova, C. Coleman, H. E. Garcia, A. Grodsky, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T.D. O'Brien, C.R. Paver, J.R. Reagan, D. Seidov, I. V. Smolyar, and M. M. Zweng, 2013: World Ocean Database 2013, NOAA Atlas NESDIS 72, S. Levitus, Ed., A. Mishonov, Technical Ed.; Silver Spring, MD, 209 pp., <http://doi.org/10.7289/V5NZ85MT>
- Ezer, T., 1999: "Decadal variabilities of the upper layers of the subtropical North Atlantic: An ocean model study," J. Phys. Oceanogr., 29(12), 3111-3124.
- Ezer, T. and G. L. Mellor, 1997: "Simulations of the Atlantic Ocean with a free surface sigma coordinate ocean model," J. Geophys. Res., 102, 15647-15657.
- Ezer, T. and G. L. Mellor, 2000: "Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model," Dynamics of Atmospheres and Oceans, 32, 155-208.
- Hsin, Y.-C., C.-R. Wu and P.-T. Shaw, 2008: "Spatial and temporal variations of the Kuroshio east of Taiwan, 1982-2005: A numerical study," J. Geophys. Res., 113, C04002.
- Kalnay et al., 1996: "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project," Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470.
- Ko, D. S. and D-P Wang, 2014: Intra-Americas Sea Nowcast/Forecast System Ocean Reanalysis to Support Improvement of Oil-Spill Risk Analysis in the Gulf of Mexico by Multi-Model Approach, Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Herndon, VA. BOEM 2014-1003.
- Mellor, G. L., 2003: Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton.
- Mellor, G. L. and T. Ezer, 1991: "A gulf stream model and an altimetry assimilation scheme," J. Geophys. Res., 96, 8779-8795.
- Mellor, G.L. and Yamada, T.,1982: "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems," Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20, 851-875.
- Oey, L. Y., 2005: "A wetting and drying scheme for POM," Ocean Modelling, 9, 133-150.
- Oey, L. Y., 2006: "An OGCM with movable land-sea boundaries," Ocean Modelling, 13, 176-195.
- Oey, L. Y., G. L. Mellor and R. I. Hires, 1985a: "A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary, Part I: Description of the model and model simulations," J. Phys. Oceanogr., 15, 1676-1692.
- Oey, L. Y., G. L. Mellor and R. I. Hires, 1985b: "A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary, Part II: Comparison with observation," J. Phys. Oceanogr., 15, 1693-1709.
- Oey, L. Y., G. L. Mellor and R. I. Hires, 1985c: "A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary, Part III: Salt flux analyses," J. Phys. Oceanogr., 15, 1711-1720.
- Wu, C.-R., S.-Y. Chao and C. Hsu, 2007: "Transient, seasonal and interannual variability of the Taiwan strait current," J. Oceanogr., 63, 821-833.
- Yu, Peng, Alexander L. Kurapov, Gary D. Egbert, John S. Allen and P. Michael Kosro, 2012: "Variational assimilation of HF radar surface currents in a coastal ocean model off Oregon," Ocean Modelling, 49-50, 86-104.
- Zavatarelli, M. and G. L. Mellor, 1995: "A numerical study of the Mediterranean Sea Circulation," J. Phys. Oceanogr., 25, 1384-1414.
- 于嘉順、尤皓正、陳琬婷、朱啟豪、滕春慈, 2012 : 西北太平洋作業化海流模式之發展, 101年天氣分析與預報研討會, 台北, 511-516。
- 廖建明、陳思樺、賴堅戊、詹森、龔國慶, 2013 : 海象預測模擬之校驗, 第35屆海洋工程研討會論文集, 高雄, 155-160。