

台灣海峽及鄰近海域高解析度潮流與海流模式之發展

于嘉順¹ 尤皓正¹ 江朕榮¹ 陳琬婷¹ 朱啓豪² 滕春慈²
國立中山大學海洋環境及工程系¹ 中央氣象局海象測報中心²

摘要

爲了提供台灣海峽及鄰近海域之即時資訊，中央氣象局發展了多尺度之海流預報模式，以因應民眾與相關單位之需求。爲提昇台灣鄰近海域之預報精度，同時保有相當之計算效率，模式使用非結構性網格構建台灣鄰近海域潮流與海流模式，該模式爲半隱式法求解水體運動，可透過較大之時間步長計算。由於以非結構性網格構建，適合用以解析複雜岸線與水深變化，模式範圍南至菲律賓、北至長江口南側、東至宮古島東側、西至香港東側，使用國科會海洋學門資料庫500公尺解析度水深資料(TaiDBMv6)，並以水深控制網格大小，最小解析度約爲0.75分，最大解析度爲13分，以FES2004作爲潮流邊界輸入，含8個主要分潮，模式經校驗後，模擬結果與沿岸34個潮位站之水位資料進行比對，以2009年計算結果作爲評估，全年所有測站水位時序之平均均方根誤差爲10.1cm，台灣東部測站之平均誤差約小於5cm，最大誤差爲塹港與馬祖，約爲25cm左右，其誤差造成原因除資料品質外，近岸地形資料亦影響模式計算結果。海流模式以GFS作爲氣象條件，並將氣象局NFS-MC風場納入，爲加速海流模式之計算收斂，初始場以2009年HYCOM資料作爲參考，同時利用其溫鹽資料進行同化，模式計算之黑潮主流流通量大致與文獻相符，最大值發生於夏季，約爲28.6Sv，最小值則於冬季，約爲8.3Sv，全年平均約爲17.0±3.2Sv。

關鍵字：台灣海峽、潮汐、黑潮、非結構性網格模式

一、前言

台灣四周環海，位處於西太平洋島鏈，於太平洋與歐亞大陸交界，氣候受到周圍附近海洋與鄰近大陸而變化，東接太平洋、南接呂宋海峽並與南海連結，西部以台灣海峽與中國大陸相接，北部則與東海連結，鄰近之海域地形複雜崎嶇，東部的地形坡陡，水深可達數千公尺，與中國大陸交界之台灣海峽及東海之平均水深約100公尺，但地形複雜，如章雲隆起、澎湖水道、台灣灘等區域變化較大，南邊接連之南海海盆與呂宋海峽可達4000公尺以上水深，這些崎嶇的地形造成了不同之環流系統(Zheng et al., 2006)，其中最常被討論的幾個議題爲台灣東邊之黑潮主流及其攔動、黑潮入侵南海與東海陸棚、黑潮支流經由台灣海峽與風驅流之互動機制、冬季大陸沿岸流與黑潮支流間之消長變化、颱風經過時湧升流之形成等等。其中最重要之環流爲黑潮(Kuroshio)，爲北太平洋西方邊界流，源起於北赤道洋流(NEC)，受到菲律賓島之阻擋分爲南下之民答那峨環流(Mindanao Current, MC)與北上之黑潮(Kuroshio, KS)，其流量變化約14~47Sv(Wyrki, 1961; Nitani, 1972; Chu, 1976; Liu 1983; Qu et al., 2000)，黑潮流經台灣東邊時之寬度約爲100公里、水下30公尺深之流速可達 1 ms^{-1} (Liang et al., 2003)。黑潮經由呂宋海峽入侵南海，常以流套(loop-current)方式通過呂宋海

峽(Li & Wu, 1989)，通常隨季風於東北季風時期入侵南海，而於西南季風時，黑潮便不再進入南海且南海水由呂宋海峽往東流出(Wyrki, 1961; Nitani, 1972)，其全年平均傳輸量約爲西向3.0~6.5Sv(Chu & Li., 2000; Qu et al., 2000)。黑潮進入呂宋海峽後，除進入南海外，亦往北進入台灣海峽，形成台灣暖流(TWC)後流入東海，學者普遍認爲台灣海峽內有持續往北之環流(Beardsley et al., 1985; Chuang, 1985; Zhao & Fang, 1991; Zhu et al., 2004)，其通量有季節性之變化，Wyrki(1961)的研究顯示夏季往北0.5~1Sv、冬季往南0.5Sv，由量測或數值模式計算之通量則顯示海峽之平均通量爲北向0.1~1.8Sv(Teague et al., 2003; Lin et al., 2005; Wang et al., 2003; Wu & Hsin, 2005)，其中澎湖水道之通量約爲-0.11~1.87Sv，受到風場的改變而產生變化 (Jan & Chao, 2003; Wang et al., 2004; Chang et al., 2008)，台灣海峽內水體來源可能爲黑潮入侵呂宋海峽後進入，但夏季時則無此現象(Jan et al., 2010)，然而冬季時TWC之來源可能是黑潮往台灣東北角入侵東海造成，而非台灣海峽，海峽內之黑潮支流僅能抵達海峽南部(Chen et al., 2006)。綜合以上研究顯示，台灣周邊海域之環流系統受地形與季節變化之影響，極爲複雜。

另一個影響陸棚海或流場變化之驅動力爲潮汐，針對台灣鄰近海域或潮汐的研究，除了潮汐外，通常會結合風暴潮的研究，作爲預警之主要目的，根據台灣氣象局過去的颱風記錄，每年六到十月爲西北太平洋與南海颱風生成頻率最頻

繁的月份，平均每年約有3-4個颱風侵襲台灣，爲了因應每年颱風期間可能發生的暴潮，中國發展並建構了高解析度(1/30度)之風暴潮作業化模式，範圍包含中國沿海，並於2003年正式上線(Dong et al, 2008)，其模式準確度可達到70%以上；Li et al. (2009)則以POM模式建構中國沿岸風暴潮模式，模擬暴潮水位抬升之平均誤差小於17公分；韓國亦透過POM模式來建構作業化暴潮模式，範圍包含台灣及中國沿海，其地形解析度爲5弧分，針對2005~2007年間9個颱風進行模擬，模擬水位與實測之均方根平均誤差爲10.2公分左右(You S. H., 2010)；Guo et al. (2009)則利用FVCOM探討風暴潮對杭州灣水位抬升的影響，模式範圍包含東海與台灣附近海域，並利用參數化風場作爲氣象場輸入，指出參數化風場之最大暴風半徑爲杭州灣暴潮水位峰值最重要之影響因子。台灣對於風暴潮模式的發展，大部分僅限於個別的研究，作業化預報部分則以天文潮(王, 1975)爲主，台灣最早的風暴潮預報模式則由李賢文(1984)所提出，其後劉孔孔(1987)發展風暴潮預報模式，模式中同時包含了溫度、鹽度與三維流場的計算。但由於模式範圍多侷限於台灣周邊，颱風於西太平洋形成時之影響無法納入預報，故於2003年起，Yu(1993)發展之半隱式法建置西太平洋潮汐與風暴潮作業化預報模式。

台灣海域爲東亞航運必經之地，近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，阿瑪斯號的由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，近年興起的海面箱網養殖漁業與政府爲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。發展高解析度環流與潮流模式，不但可以提供航運業者與航管單位即時的海流預報資訊，更可以提供做爲早期預警與管理的工具，船難一旦發生時，亦可有立即的海流預報資訊，提供緊急應變單位預則由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，以提供救難單位預則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，因此發展數值模式的確爲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討論的議題。由於台灣附近海域的海流極爲複雜，爲探討台灣鄰近海域之水體變化，本研究透過建立高解析度之數值模式，並與實測與衛星資料比對驗證，探討台灣鄰近海域之潮汐與海流變化。

二、模式構建

爲了解台灣周邊海域潮汐與海流變化，本研究利用SELFE(Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-Element model)模式，該模式是爲了更容易解析海洋中內陸沙洲及河

口、港灣及瀉湖等不規則陸地地形狀，而發展的三維水理模式(Zhang and Baptista, 2008)。SELFE採用有限元素的非結構性網格設置，垂直網格部分採用混合SZ座標或S座標，採用SZ座標時，除可提高表底層之解析度外，可避免採用S或 σ 座標時，由於地形變化較大產生之水平壓力梯度不一致性，該模式利用ELM(Eulerian-Lagrangian Method)計算對流項，並利用半隱式法求解，可使用較大的時間步長計算，並確保模式的穩定與精度。對於溫鹽擴散的傳輸，除可採用ELM計算外，亦可利用頂風法(upwind)或TVD演算以避免數值擴散的問題。紊流模組除採用常見的GLS紊流模組外，也可利用GOTM紊流模式進行更複雜的計算，該模式亦納入乾燥點的計算，驅動力可包含潮汐、氣象、河流等，該模式已應用於美國哥倫比亞河口之作業化預報。

模式範圍包含台灣周邊海域，北邊至長江口南側，南邊至菲律賓，東邊至宮古島東側，西至香港東側作爲邊界，同時爲了解析台灣附近地形特徵，幾個台灣附近的島嶼，包含金門、馬祖、澎湖、小琉球、龜山島、綠島、蘭嶼、以及巴丹群島、巴布延群島、琉球群島等皆納入岸線規劃，再以SMS軟體進行網格建構，網格建構時利用國科會海洋學門資料庫500公尺解析度水深資料(TaiDBMv6)作爲依據，利用水深分布控制網格大小，由於SELFE模式的計算直接採用三維計算，並不利用Mode splitting的方式分開計算來加速，而是藉由Eulerian-Lagrangian方式計算動量方程式之對流項，可提高其計算步長，得以確保計算的效率。水平網格大小則依水深分布控制，可符合近岸之高解析，並保持其計算效率，網格節點數控制於100'000點以下，產出之水平網格如圖1所示，最小網格約爲0.75分，分布於台灣近岸區域，總節點數爲94'286，網格數則爲185'105，另透過ETOPO1(Amante and Eakins, 2009)比對產出之地形資料，發現TaiDBMv6資料於澎湖、章雲隆起一帶、彭佳嶼、及台灣近岸之水深有不同的分佈，由於TaiDBMv6之資料爲國內三艘研究船收集之EK500資料，搭配INGDC、ETOPO5等水深資料，而產出較爲精細之水深，研究船通常僅於主要航線上施測，並無近岸較淺水深區域之量測資料，因此於這些地方之水深分佈採用ETOPO1之內差值代替。

垂直網格部分採用混合S-Z座標，表層爲S座標，底層爲Z座標，實際計算時則於實際水深Z上進行，除可提高表底層之解析，同時可避免因較大地形變化採用S或 σ 座標時產生的水平壓力梯度之不平衡，在此設定層數爲40層，表層以12層S座標於100公尺內之水深解析，底層則以28層固定Z座標解析，由於構建海流模式時將利用HYCOM模式之計算結果，因此將底層Z座標設定爲HYCOM原始資料之深度，可避免垂直內差產生之誤差，表層100公尺水深內之12層S座標，則利用線性內差方式計算。

潮汐邊界條件以法國LEGOS實驗室發展的FES2004(Lyard et al., 2006)全球潮汐模式作爲計算資料之來源，該模式利用多重的衛星資料，配合全球潮汐模式進行資料同化，並以有限元素法進行全球高解析之計算，其前身爲FES99(Lefevre et al., 2002)，將原有的網格節點由300'000點提升至1'000'000點，同時利用了新的地形與岸線資料計算，並配

合岸站之水位計資料進行同化，除包含主要分潮外，亦納入4個長週期的分潮(Mf、Mm、Mtm、Msqm)。在此選擇半日潮M2、S2、N2、K2及全日潮K1、O1、P1、Q1作為輸入，並將分潮納入Nodal factor的修正。

海流模式的建構採用2009年全年HYCOM計算結果資料，作為初始場及邊界的依據，項目包含水位、流速、溫度、鹽度，由於HYCOM資料為5分固定網格，需將原始資料內插至海流模式網格方能使用，由於HYCOM為日平均場，模式內之側邊界以月期間內插至對應時間點作為輸入。

表層驅動力則以中央氣象局NFS-MC風場作為風速與氣壓的輸入，其解析度為45公里，每天提供4筆資料，氣象場的部份則利用NCEP-GFS資料作為輸入，包含長短波等之計算熱通量平衡，然而其解析度為1度，對於台灣海域海流模式而言，其解析度較為不足，為了避免低解析度氣象資料造成不適當的結果，模式同時納入溫度與鹽度的同化，同化資料來源同樣亦採用HYCOM資料做為基準，以nudging的方式進行計算。

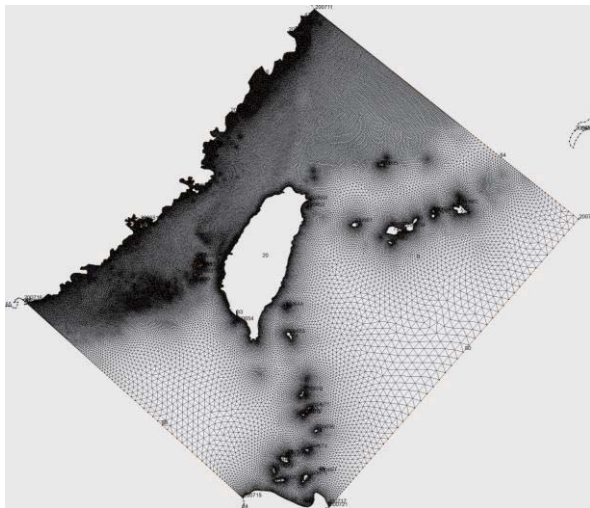


圖1 模式網格分布

三、潮流模式結果

透過前述之模式設定進行模擬後，模式結果與實測水位進行比對，實測水位為氣象局所提供2009年共34站，各站位置分布如圖4.2所示，包含台灣沿岸與離島，實測資料大致上涵蓋全年時間，除少數測站如大武、後壁湖、馬祖、台北港與蘆荊外，其餘測站涵蓋八成以上的有效時序。水位資料進行前處理後，以Matlab tide toolbox (Pawlowica et al, 2002) 進行調和分析，該工具箱以Foreman(1977)發展的調和分析程式為基礎進行改寫，除改進了輸入格式的不便外，另加入了Error analysis的部份，同時配合Matlab的圖形化工具，使得調和分析的計算與展示更加簡便。實測水位資料調和分析後僅透過天文潮重組的部份與模式進行比對，比對的部份包含天文潮時序比對與各分潮組成。

模式經校驗後之計算比對結果大致良好，以東部測站表現較佳，2009全年模擬水位與重組天文潮水位計算之均方

根誤差(RMS)平均值10.1公分以下，以蘇澳測站為最佳，測站如將軍、竹圍、料羅灣、馬祖、麥寮、箔子寮、澎湖、新竹、台中港、台北、塭港、外埔則顯示較大的均方根誤差，皆大於15公分以上，然而其中料羅灣、馬祖、新竹、台中港之潮差約為4公尺，均方根誤差亦較易於累積。模式計算與實測重組之天文潮累積之誤差值，大多為模式高估或低估實測重組之天文潮水位造成。

過調和分析2009全年水位，模式校驗後之計算之分潮振幅與相位分布以M2展示(圖2~圖3)，台灣海峽內部振幅較高，M2分潮平均約2公尺以上，台灣東部則約0.5公尺左右。各測站之調和常數比對顯示，半日潮振幅比對大致良好，但於海峽內部測站些微高估，如台中、麥寮、箔子寮、澎湖、塭港、東石、將軍等，半日潮相位的部份比對差異不大。全日潮振幅部份則顯示模式結果與實測差異不大，除O1分潮於海峽內部測站些微高估。全日潮相位之比對亦良好，並無明顯之差異。由調和常數來看，產生的誤差主要由半日潮產生，集中於海峽內部測站。

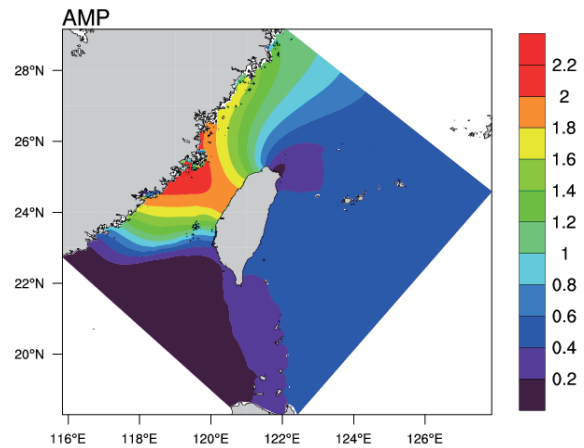


圖2 模式計算之M2分潮振幅(單位:公尺)

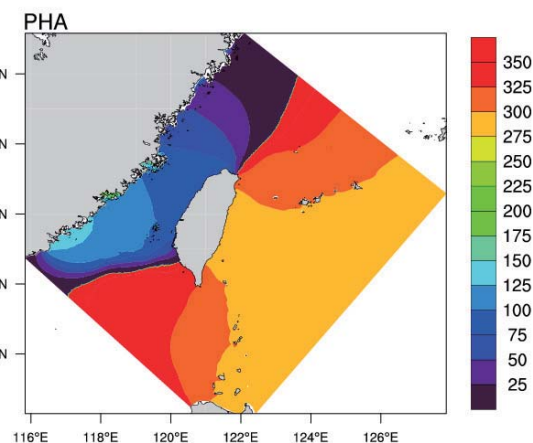


圖3 模式計算之M2分潮相位(單位:度)

四、海流模式結果

藉由HYCOM模式結果與AVISO衛星資料比對模式計算之海平面高度，由於衛星資料為海平面動力高度資料，其計算起始點為大地水準面(Geoid)，與模式計算之海平面高度定義不同，因此比對的方式以特性比對為主，模式計算結果與衛星資料有類似之平面分布，如以HYCOM模式結果比對，2009年全年平均誤差為-16 mm，模式計算結果與HYCOM比對之誤差不大。

流場的資料則採用GDP(Global Drifter Program)與AVISO衛星資料進行比對，GDP隸屬於NOAA/GOOS(Global Ocean Observing System)和DBCP(Data Buoy Cooperation Panel)，主要是為了增加混合層中關於海流、海水表面溫鹽、大氣壓力等的觀測資料密度以提供相關研究學者進行短期(季至年際之間)天氣預測、研究與監測之用。

由於2009年經過台灣鄰近海域之GDP浮標僅175顆左右，集中於黑潮主流與台灣北部，用以驗證模式計算結果稍嫌不足，因此將過去20年之浮標資料，將資料分月計算分析後，並利用模式之月平均資料進行比對，模式與GDP資料之趨勢大致相同，但夏季時台灣東側之表層黑潮流速較弱。

AVISO衛星之海流資料為利用海平面高度計算得知，可用以得知其主要之環流系統分布，其資料頻率為每週一筆，模式計算之趨勢與衛星資料類似，惟大陸沿岸較淺區域之流速些微高估，冬季時於呂宋海峽西邊產生一順時針流套(圖4，圖5)，黑潮主軸由菲律賓東邊流入呂宋海峽後，一部分繼續往北，另一部分往西形成該渦流，另外，受到東北季風的影響，海峽內部表層流場往西南移動。

針對2009年全年之模擬，嘗試計算台灣鄰近海域斷面通量，斷面以台灣東北部外海黑潮流經區域、澎湖水道、台灣海峽等作為選擇，模式計算值與國科會海洋學門資料庫以表層300公尺量測之估算值(2011)類似，台灣東北部外海之通量全年平均約為 $17.0 \pm 3.2 \text{ Sv}$ ，全年之通量變化如圖6，其變化受到季節性的影響，夏季較大，冬季較小。海峽內通量由於水深較淺，容易受到風場的改變而變化，尤以季風與颱風的影響較大，澎湖水道全年平均通量為北向 $1.0 \pm 1.46 \text{ Sv}$ ，冬季受到季風影響而往南，海峽通量則為北向 $2.0 \pm 2.17 \text{ Sv}$ ，較Wu & Hsin (2005)以模式計算之值(1.09 Sv)為高，但與海洋學門資料庫(2011)之估算值(1.93 Sv)類似。

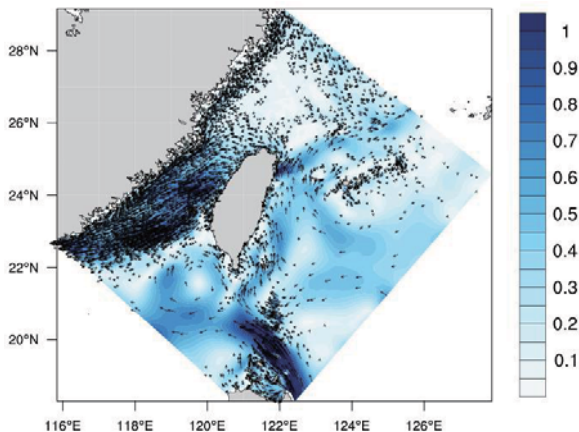


圖4 模式計算表層流速分布 (2009/12/30, 單位: ms^{-1})

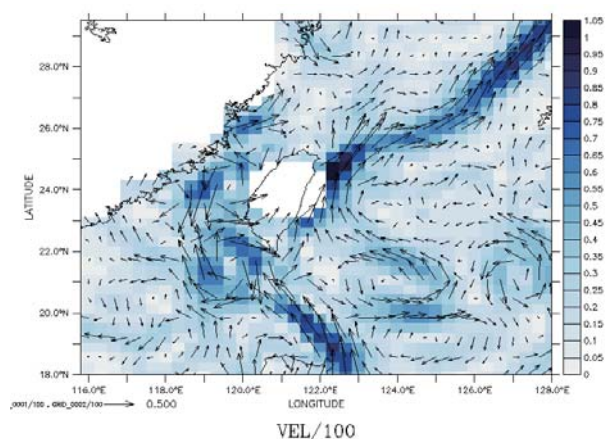


圖5 AVISO衛星資料表層流速分布 (2009/12/30, 單位: ms^{-1})

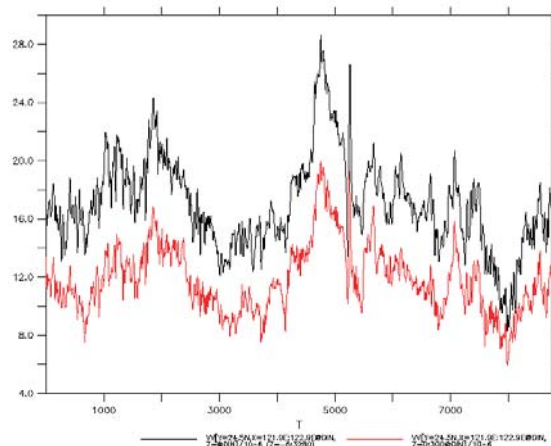


圖6 模式計算之2009年台灣東北部全年通量變化 (紅線為僅利用表層300公尺計算, 單位: Sv)

五、結論

為了解台灣鄰近海域之潮流與海流變化，本研究利用非結構性網格模式，建立高解析度之數值模式，並透過實測與衛星資料比對並驗證模式結果。高解析度潮流模式透過2009年台灣沿岸34個潮位站之水位資料比對，並調整觀察係數與邊界條件逐步校驗，全年所有潮位站之水位時序均方根誤差為10.1cm，誤差來源除資料品質外，近岸地形資料的差異亦影響模式計算結果。

海流模式則利用2009年HYCOM資料作為計算之基礎，同化其溫鹽資料，並利用中央氣象局之NFS-MC與GFS作為氣象條件之輸入，模式計算之海平面高度與衛星資料與HYCOM模式結果大致相符，其誤差值約-16mm，模式計算之表層海流與GDP月平均環流趨勢大致相符，冬季時黑潮之流套(loop-current)現象明顯，AVISO衛星資料亦呈現類似分布。台灣東側黑潮主流通量大致與文獻相符，最大值發生於夏季，約為 28.6 Sv ，最小值則於冬季，約為 8.3 Sv ，全年平均約為 $17.0 \pm 3.2 \text{ Sv}$ 。

透過建立高解析度之數值模式，連結實測資料與模式結果，了解台灣鄰近海域之變化，藉由本研

究模式之建置，可提供適當的平台，用以架構未來連結生態系統研究之動力基礎，了解物理環境變化對於生態系統之影響。

六、參考文獻

- 王揚文，1975：“潮汐電腦預報及推算一貫作業系統”，海軍海洋測量局。
- 李賢文，1984：“沿海窪地與海水堆升之研究 (1)-台灣周圍海域颱風暴潮數值模擬”，防災科技研究報告。
- 劉肖孔，1987：“台灣海域颱風暴潮及氣象潮數值預報模式研究計畫”，第三階段成果報告，中央氣象局研究報告第279號。
- 國科會海洋學門、台大海研所，2011：“國科會海洋學門資料庫1985-2010年海洋資料圖集報告”，國科會海洋學門資料庫。
- Amante, C. and B. W. Eakins, March 2009: “ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis.” *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*, 19 pp.
- Beardsley, R. C., R. Limeburner, and H. Yu, 1985: “Discharging of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea.” *Continental Shelf Research*, 4, 57-76.
- Chang, Y.-C., Tseng, R.-S. and C.-T. Liu, 2008: “Evaluation of tidal removal method using phase average technique from ADCP Surveys Along the Peng-hu Channel in the Taiwan Strait”, *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, Vol. 19, 4, 433-443.
- Chen, C.-T. A. and D. D. Sheu, 2006: “Does the Taiwan Warm Current originate in the Taiwan Strait in wintertime?”, *Journal of Geophysical Research*, 111, C04005, doi:10.1029/2005JC003281.
- Chu, P. C. and R. Li, 2000: “South China Sea Isopycnal-Surface Circulation”, *Journal of Physical Oceanography*, 30, 2419-2438.
- Chu, T. Y., 1976, “Study of the Kuroshio current between the Taiwan and Ishigakijima.”, *Acta Pceanographica Taiwanica* 13, 140-153.
- Chuang, W.-S., 1985: “Dynamics of subtidal flow in the Taiwan Strait”, *Journal of the Oceanographic Society Japan*, 41, 65-72.
- Dong Jian-xi, Fu Xiang, Wu Wei, Zhao Lian-da, Yu Fu-jiang 2008, “Operational forecast and test of the high resolution numerical storm surge forecast model for China sea” (in Chinese), *Marine forecasts*, China, 25(2), 11-17.
- Guo Yakun, Zhang Jisheng, Zhang Lixiang, Shen Yongming, 2009: “Computational investigation of typhoon-induced storm surge in Hangzhou Bay, China”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85, 530-536.
- Jan, S. and S.-Y. Chao, 2003: “Seasonal variation of volume transport in the major inflow region of the Taiwan Strait: the Penghu Channel.”, *Deep-Sea Research II*, 50, 1117-1126.
- Jan, S., Y.-H. Tseng, and D. E. Dietrich, 2010: “Sources of water in the Taiwan Strait.” *Journal of Oceanography*, 66, 211-221.
- Li, L. and B. Wu, 1989: “A Kuroshio loop in South China Sea? - On circulations of the northeastern South China Sea.” *J. Oceanogr: Taiwan Strait*, 8(1), 89-95 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongping, Yu Ruling, Zheng Yunxia (2009), “A numerical forecast system for typhoon storm surge over China coast”(in Chinese), *Acta Meteorologica Sinica*, 67(5), 884-891.
- Liang, W.-D, Tang, T.Y., Yang, Y.J., Ko, M.T. and W.-S. Chuang, 2003: “Upper-ocean currents around Taiwan”, *Deep-Sea Research II*, 50,1085-1105.
- Lin, S. F., Tang, T.Y, Jan, S. and C.-J. Chen, 2005: “Taiwan strait current in winter.”, *Continental Shelf Research*, 25, 1023-1042.
- Liu, C.-T., 1983: “As the Kuroshio turns, Characteristics of the current.” *Acta Oceanographica Taiwanica*, 14, 88-95.
- Lefèvre F., Lyard F.H., Provost C. Le, Schrama E.J.O., 2002: “FES99: a global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information”, *J. Atmos. Oceanogr. Technol.* **19**, pp. 1345-1356.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier T., 2006: “Modelling the global ocean tides modern insights from FES2004.”, *Ocean Dynamics*, 56, 394-415.
- Nitani, H., 1972: “Beginning of the Kuroshio”. In: *Kuroshio, its physical aspects*, H. Stommel and K. Yoshida, editors, University of Tokyo Press, Tokyo, 129-163.
- Qu, T., H. Mitsudera and T. Yamagata, 2000: “Intrusion of the North Pacific water into the South China Sea.” *Journal of Geophysical Research*, 105, C3, 6415-6424.

- Teague, W. J., Jacobs, G. A., Ko, D. S., Tang, T. Y., Chang, K.-I. and M.-S. Suk, 2003: "Connectivity of the Taiwan, Cheju, and Korea strait.", *Continental Shelf Research* 23, 63-77.
- Wang, Y.-H., Chiao, L.-Y., Lwiza, K. M. M. and D.-P. Wang, 2004: "Analysis of flow at the gate of Taiwan Strait.", *Journal of Geophysical Research*, 109, C02025, doi:10.1029/2003JC001937.
- Wang, Y.-H., Jan, S. and D.-P. Wang, 2003: "Transports and tidal current estimates in the Taiwan Strait from shipboard ADCP observations (1999-2001).", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 193-199.
- Wu, C.-R. and Y.-C. Hsin, 2005: "Volume transport through the Taiwan Strait: a numerical study.", *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 16, 377-391.
- Wyrki, K., 1961: "Physical Oceanography of Southeast Asian Waters", NAGA Report Vol. 2, *Scientific Results of Marine Investigations of the South China Sea and Gulf of Thailand*, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, 195 pp.
- You Sung Hyup, 2010: "Predicting Typhoon Induced Storm Surges Using the Operational Ocean Forecast System." *Terr. Atmos. Ocean Sci.*, 21 (1), 99-111.
- Yu, C.S., 1993: "Modelling Shelf Sea Dynamics and Estuarine Circulations." Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., K.U.Leuven.
- Zhao, B., and G. Fang, 1991: "Estimation of water volume transports through the main straits of the East China Sea.", *Acta Oceanographica Taiwanica*, 10 (1), 1-13.
- Zhang, Y.-L. and Baptista, A.M. 2008: "SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation", *Ocean Modelling*, 21(3-4), 71-96.
- Zheng, Q., G. Fang and Y. Tony Song. 2006: "Introduction to special section: Dynamics and Circulation of the Yellow, East, and South China Seas." *Journal of Geophysical Research* 111(C11).
- Zhu, J., C. Chen, P. Ding, C. Li, and H. Lin, 2004: "Does the Taiwan warm current exist in winter?", *Geophysical Research Letter*, 31, L12302, doi:10.1029/2004GL019997.