

一個西進颱風引起臺灣沿海暴潮之數值實驗

徐月娟

中央氣象局 海象測報中心

摘要

本文使用一個依據流體動力學方程式構成的天文潮與暴潮數值模式。天文潮的引潮力是由開放邊界輸入；颱風暴潮的動力因素則使用一個移動颱風參數化模式。因為在動力方程式中，與摩擦、地形等有關的動力因素為非線性項，故在數值模式中納入天文潮與氣象潮有關的各項動力因素，同時組合運算。

為驗證數值模式的預報能力，本文蒐集了民國 83 年 7 月份台灣沿海共十二個潮位站的海水位觀測資料。民國 83 年提姆颱風在 7 月 10 日晚上 8 時從花蓮秀姑巒溪口登陸，向西北越過中央山脈後在台中附近出海。提姆颱風過後的天氣則相當穩定，且這種穩定情形一直持續至 7 月底。首先，本文選用後半個月沒有特殊天氣擾動期間的水位資料，來考察模式對潮汐現象的預報能力。除了台灣南北兩端地形轉彎處以外，在大潮期間模式推算的天文潮誤差都很小，在小潮期間誤差才略為增加，潮時誤差在 ± 20 分鐘以內。

其次，對提姆颱風過境時在台灣東西兩岸測得的暴潮位和颱風風場加以分析，並做數值模擬研究。研究結果發現颱風的結構在東岸登陸前與西岸出海後迥然不同。由於颱風參數化模式中並未將颱風受地形的影響納入考慮，故輸入暴潮模式中的海平面氣壓場和海面風場與實際情形有所出入，對颱風暴潮模擬結果影響很大。本文對天文潮引潮力、暴潮的氣壓梯度力項和風剪力項分別從事了敏感度實驗，以增進對於颱風暴潮特性的了解。台灣沿海海底和岸區有非線性交互作用的關係，暴潮位並非由個別項效應線性相加而得。台灣東邊水較深，暴潮幾乎完全是山頂倒氣壓計效應造成的。但在台灣海峽水較淺，氣壓梯度力項和風剪力項對暴潮模擬結果的影響則同樣重要。

一、前言

當颱風過境臺灣時，由於中心氣壓很低對海水產生吸吮作用，使得颱風中心附近的海面上升；又由於氣旋式強勁風力能吹透海水，使得迎風面海岸地帶海水堆升。颱風所引起的氣象潮，常對臺灣沿海地區造成災害，稱之為颱風暴潮。如暴潮正巧發生於天文潮漲潮期間，則將造成更高的暴潮位，使得海水侵入陸地，氾濫成災。

過去颱風來臨時，在台灣的暴潮記錄很少。因

為真正嚴重的暴潮發生時，常使得觀測儀器受損，資料流失。要想根據歷史資料以統計方法來預測最大暴潮高度實有困難。使用流體動力學數值模式來預測暴潮乃是世界各國的趨勢(李賢文, 1994)。數值模式還可用來預報沒有設潮位站地區的潮位變化。本研究是使用一個依據流體動力學方程式構成的天文潮與暴潮數值模式。天文潮的引潮力是由開放邊界輸入；颱風暴潮的動力因素則使用一個移動颱風參數化模式。因為在動力方程式中，與摩擦、地形等有關的動力因素為非線性項，故在數值模式

中納入天文潮與氣象潮有關的各項動力因素，同時組合運算。

為驗證數值模式的預報能力，在本研究中蒐集了民國 83 年 7 月份台灣沿海共十二個潮位站的海水位觀測資料。這些潮位站散佈在台灣沿海且這段期間資料相當完整。民國 83 年提姆颱風在 7 月 10 日晚上 8 時從花蓮秀姑巒溪口登陸，向西北越過中央山脈後在台中附近出海。提姆颱風乃是一個西進分裂過山的颱風個案。提姆颱風過後的天氣則相當穩定，且這種大氣穩定情形一直持續至 7 月底。在本研究中先選用後半個月沒有特殊天氣擾動期間的水位資料，來初步校驗模式對天文潮推算的準確性。然後對提姆颱風過境所引起之觀測暴潮位加以分析，最後將移動颱風參數化模式的海平面氣壓場和風場納入暴潮模式中，來模擬提姆颱風暴潮個案。本文對天文潮引潮力、暴潮的氣壓梯度力項和風剪力項分別從事了敏感度實驗，以增進對於颱風暴潮特性的了解。

二、數值模式描述

本研究使用一個依據流體動力學理論構成的天文潮與暴潮數值模式，亦即根據海水運動的動量不滅原理及質量不滅定律。模式所使用的控制方程式主要是水平動量平衡方程式和連續方程式。由於海水溫度和鹽度對水位變化的影響不大，故對偏微分方程式做垂直積分，在垂直向僅考慮一層均勻流體。在海面及海底再加上運動和動力邊界條件，形成一個封閉的預報方程組。在水平向預報變數為風場 u 、 v 和自由水面偏離平均海面的位移 ζ ，其空間配置係採用 Arakawa C 交錯網格。水平空間差分法是採用二階精確的中差法(centered finite difference scheme)；在時間積分方面則採用跳蛙法(leap frog scheme)。

台灣海域模式採用經緯度網格點，係投影在一個橢圓球面上。模式涵蓋範圍西自東經 116.375 度，東至東經 122.75 度；南由北緯 21.375 度，北達北緯 26.75 度。水平方向共有 52 乘 44 個網格

點，水平解析度為八分之一度。在 Y 方向的水平網格距是常數， Δy 約為 13.9 公里；在 X 方向則因投影的關係， Δx 隨緯度的增加而減小。模式積分的時間間隔為 45 秒。模式涵蓋的水平範圍在台灣東岸最大水深達 4500 公尺，西岸的水深最淺處則少於 10 公尺。海水密度設定為 1.026 g/cm^3 。大氣海洋交界處的溫度差則採用氣候值，例如 7 月份的氣海溫差 (air-sea temperature difference) 為 0.5°C 。

台灣沿岸的潮是太平洋潮波進入台灣海域之後淺水化的結果。數值模式中天文潮的引潮力是由開口邊界輸入，目前在模式邊界點輸入包括 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 等九至十六種主要深海潮分潮。除了輸入各分潮的振幅及相位遲角(phase lag)之外，也輸入一些包含長週期(如 18.61 年)時間函數的推算係數(劉肖孔，1983)。時間為潮自西元 1983 年元月 1 日零時與模式啟動時間原點的小時差。因彼時海域內最主要分潮一太陰半日潮 M_2 一正好在節點上。台海模式共有 134 個開口邊界點，邊界條件均由大洋潮各分潮之理論值，再經台灣沿海潮位站觀測值反復修正而得。因模式內已含有各分潮 18.61 年長週期變化的關係式，故可從事不同年、月、日之潮汐推算。

由於颱風數值模式的預報精確度，在短期內還很難有極大的改進。故暴潮模式尚不能直接使用大氣數值模式供應的預報風場。在暴潮模式中，颱風暴潮的動力因素乃是來自一個移動颱風參數化模式。少許的颱風路徑預報誤差，將可以造成極不同的暴潮推算結果。目前在颱風來臨時是根據中央氣象局預報中心發布的預測颱風路徑及強度，納入一個移動颱風參數化模式，來決定海平面氣壓場及海面風場。颱風眼附近的氣壓剖面是使用一個根據颱風中心氣壓、周邊海平面氣壓、最大暴風半徑和最大風速的經驗式(劉肖孔, 1985)。海平面氣壓場根據此經驗式決定後，接著利用梯度風方程式計算出理論風速，然後再根據海氣交界處的穩定條件來估算海面風速與向心偏角，即可得到海面風場。在模式中依據輸入的預測颱風路徑和強度，使颱風中心

沿著預測路徑移動，所伴隨的海平面氣壓場和海面風場也隨著移動。模式的海水位從靜止狀態先納入過去 48 小時內的颱風路徑和強度，啟動(spin up)兩天後才開始預報未來的暴潮位。

三、天文潮初步校驗

為驗證數值模式的預報能力，我們首先蒐集民國 83 年 7 月份臺灣沿海各潮位站的海水位觀測資料，計有淡水、新竹、臺中(7 月 13 日以後資料從缺)、澎湖、箔子寮、東石、永安、彌陀(二處)、高雄、蘇澳及成功共十二處。民國 83 年 7 月強烈颱風提姆從花蓮秀姑巒溪口登陸後，繼續向西北越過中央山脈，然後在台中附近出海，對台灣東部和北部造成災害。提姆颱風過後的天氣則相當穩定，這種情形一直持續到 7 月底。我們選用後半個月沒有特殊天氣擾動期間的水位資料，來考察模式對潮汐現象的預報能力。

模式中所使用的 7 月份氣候風場為南南西風，海面風速為 7.5 節，風向為 202.5 度。模式的海水位從靜止狀態先啟動兩天後才開始推算未來 15 天的海水位變化。自 7 月 15 日至 30 日的實測水位資料與模式推算的天文潮水位值做比較。由於潮位站大多設在港灣內，而模式的預報網格點則在海域中。潮波自外海行進至港灣內的潮位站有時會落後 10-15 分鐘，這種現象在東石最為明顯。模式推算的潮位變化也與實測潮位相當接近，其中又以成功和新竹為最佳。除了台灣南北兩端地形轉彎處以外，在大潮期間(spring tide)模式推算的天文潮誤差都很小，在小潮期間(neap tide)誤差才略為增加，潮時誤差在±20 分鐘以內。由於模式的開口邊界以納入九至十六個主要分潮，在小潮期間其他未納入模式之振幅較小分潮的影響並不可忽視。

台灣西南部外海有很深的海溝，潮波行進較快，天文潮潮差較小。在大潮期間全日潮較為明顯，在小潮期間半日潮才漸顯著。當太平洋潮波繞過恆春半島抵達西南沿海時，受到複雜的海岸形狀

及海底地形的影響很大，數值模式的解析度和開口邊界條件都可再加以改進。

四、暴潮分析

提姆颱風於事後分析(王時鼎，1995)是屬於颱風中心分裂過山的個案。從民國 83 年 7 月 10 日清晨起，在彰化 and 雲林附近逐漸有一個副低壓形成。在 7 月 10 日上午 8 時，台南和高雄沿海地區也有一個副低壓形成。隨著提姆颱風中心向台灣東海岸漸漸逼近；西岸的副低壓也逐漸加深。當 7 月 10 日晚上 8 時，颱風中心在花蓮秀姑巒溪口登陸時，中心低壓為 950 百帕；台灣西岸的副低壓則加深至 974 百帕。接著 2 小時中，西岸的副低壓中心就逐漸取代了原來的颱風中心，中心低壓約為 970 百帕，較在東岸登陸前已減弱許多。提姆颱風從台中附近出海後，繼續向西北進行撲向大陸。提姆颱風在台灣東岸登陸前，中心低壓很深，中心附近的氣壓梯度很大，最大陣風曾高達 105 節，十級風暴風半徑達 120 公里。但在西岸出海後的颱風結構則迥然不同，中心低壓減弱很多，且氣壓梯度分佈均勻，風速也減弱很多。

暴潮的發生主要是由於颱風中心氣壓降低造成海水位上升，以及颱風中心附近的強風吹襲造成迎風面海岸海水的堆積。我們推算自 7 月 5 日至 20 日的天文潮，並與潮位站觀測資料作比較。從潮位站觀測資料減去模式推算的天文潮位所表示的暴潮位上升值中可看出，提姆颱風發生於天文潮的大潮期間。根據第三節的天文潮初步校驗結果得知，大潮期間模式推算的天文潮誤差較小，可當作一個參考點。台東成功於 7 月 10 日有顯著的暴潮，最高水位發生於晚上 8 時，為當日天文潮第二次滿潮發生的時候，也是颱風中心在東岸登陸的時候，海水位約增加 72 公分。颱風過後自 12 日至 14 日海水位則似有降低的情形。蘇澳也有類似的暴潮發生，因距離颱風中心較遠，暴潮位較低一些。蘇澳位於颱風中心以北，受很強的向岸風吹襲，最高水位發生於 10 日晚上 9 時，海水位約增加 62 公分。

台灣西部潮位站乃是稍後在 7 月 10 日至 11 日發生暴潮，最高水位出現在 7 月 10 日晚上 11 時，發生的時間較東岸落後，正是颱風中心從台中出海的時候。台中的海水位最多約增加 47 公分，澎湖約增加 84 公分，箔子寮約增加 64 公分，東石約增加 52 公分。自 7 月 10 日起澎湖、箔子寮和東石的海水位便持續上升，與西岸副低壓生成的時間一致。東石潮位站位於內港，積水宣洩不易，水位升高的時間持續最久。台灣西北部的淡水在 7 月 11 日晚上 11 時的海水位約降低 36 公分，當時該處為離岸風，但風速並不太大。台灣西南部的永安、彌陀和高雄從 7 月 9 日中午起至 12 日晚上，海水位都有顯著升高的情形出現。永安最大水位上升值出現在 7 月 10 日晚上 7 時，上升約 37 公分；彌陀最大水位上升值出現在 10 日晚上 6 時，上升約 39 公分；高雄最大水位上升值也是出現在 10 日晚上 6 時，上升約 37 公分。

五、暴潮模擬

民國 83 年 7 月 10 日晚上 8 時，颱風中心的位置在花蓮秀姑巒溪口，中心氣壓為 950 百帕。週邊氣壓在 7 月份的氣候值為 1007 百帕。如使用第二節描述的經驗式計算颱風影響半徑內的海平面氣壓場，則在颱風中心附近的氣壓梯度極大，這種結構適用於大洋上的颱風。根據此海平面氣壓場，再依照梯度風方程式和海面大氣穩定條件來推算海面風場。如與地面分析圖比較，則颱風參數化模式得到的海平面氣壓場和海面風場與實際情形有所出入。臺灣西部和西南部的海平面氣壓值都比實際高出很多；臺灣北部沿海的海面風速也比實際還大。這是由於模式並未將颱風受地形的影響納入考慮。到了 7 月 11 日清晨 2 時颱風從臺中出海。此時颱風在台灣海峽中，氣壓梯度分佈相當均勻；但模式氣壓場在颱風中心附近仍有很集中的氣壓梯度。颱風過山後在台灣西岸出海時的颱風結構應採用不同的經驗式。

本研究暫時採用第二節的移動颱風參數化模

式來模擬提姆颱風暴潮個案，並從事了六個天文潮和暴潮敏感度實驗如表一。實驗 T1 和 T2 只做天文潮推算，其結果在第三節中已做了詳細的討論。實驗 S0 中納入移動颱風參數化模式；但除去了開口邊界上的天文潮引潮力，而只做暴潮推算。實驗 ST 則將天文潮和暴潮同時組合運算。為了考查氣壓梯度力項和風應力項對颱風暴潮的個別影響，在實驗 STP 中忽略了颱風風場應力，只考慮海平面氣壓梯度力的貢獻；在實驗 STS 中則忽略了海平面氣壓梯度力，只考慮颱風風場應力的貢獻。

在台灣東岸模式推算的最大暴潮水位發生時間和觀測資料一致，推算的水位上升值在成功稍微偏高。如忽略風應力項，對台灣東岸暴潮推算值並無影響；但如忽略氣壓梯度力，則只剩下天文潮位。由此可見，在臺灣東邊水較深，暴潮幾乎完全是由海平面氣壓梯度力造成的。臺灣西北部淡水和新竹在 11 日清晨模式推算的暴潮水位較天文潮水位為低。如忽略風應力，水位就升高至天文潮水位；如忽略氣壓梯度力，則結果與實驗 ST 類似。由此可見，臺灣西北部海水位下降主要是受到離岸風應力的影響。事實上，西北部的離岸風並不強，所以淡水的海水位降低並不多，而新竹的海水位並未下降。在臺中和澎湖，模式推算的暴潮水位都不及實測的暴潮水位。如忽略風應力，台中的暴潮水位推算值可達到觀測水位值；但如忽略氣壓梯度力，則臺中和澎湖的海水位都降低。因此，實驗 ST 臺中和澎湖的海水位是氣壓梯度力和風應力兩者非線性交互作用的結果。在箔子寮和東石，模式推算的最高暴潮水位和觀測水位很接近。在箔子寮氣壓梯度力對推算的水位值影響較大。在東石推算的水位時序圖形狀受風應力的影響較大。台灣西南部天文潮潮差較小，可能是因外海有很深的海溝。在 7 月 10 日至 12 日永安、彌陀和高雄觀測水位都顯著增高，可能與當時西南部一直存在的低氣壓有關。但模式的海平面氣壓場無法模擬西南部的低氣壓，且台中以南的向岸風速也不大，故模式推算的暴潮水位只比天文潮位略增加一些。

六、結論

本文在了解和改進天文潮與暴潮數值模式上做了初步研究，對發生於 83 年 7 月的提姆颱風暴潮個案也做了分析和模擬。初步研究結論如下：

- 1、除了台灣南北兩端地形轉彎處以外，在大潮期間模式推算的天文潮誤差都很小，在小潮期間誤差才略為增加，潮時誤差在±20 分鐘以內。在小潮期間，其他未納入模式之振幅較小分潮的影響並不可忽視。
- 2、台灣西南部外海有很深的海溝，潮汐行進較快，天文潮潮差較小。在大潮期間全日潮較為明顯，在小潮期間半日潮才漸顯著。當太平洋潮波繞過恆春半島抵達西南沿海時，受到複雜的海岸形狀及海底地形的影響很大，數值模式的解析度和開口邊界條件都可再加以改進。
- 3、提姆颱風是屬於颱風中心分裂過山的個案，颱風的結構在東岸登陸前與西岸出海後迥然不同。提姆颱風登陸前，在西太平洋上中心低壓很深，颱風中心附近有很集中的氣壓梯度；但從西岸出海後，中心低壓減弱很多，颱風在台灣海峽中的氣壓梯度分佈相當均勻。颱風過山前後的結構應採用不同的

參數化經驗式。

- 4、在暴潮模式中輸入正確的海平面氣壓場和海面風場，對颱風暴潮模擬結果影響很大。在台灣地區颱風參數化模式應將颱風受地形的影響納入考慮。
- 5、台灣沿海海底和岸區有非線性交互作用的關係，暴潮位並非由天文潮引潮力、暴潮的氣壓梯度力項和風剪力項等個別項效應線性相加而得。
- 6、台灣東邊水較深，暴潮幾乎完全是由顛倒氣壓計效應造成的。但在台灣海峽水較淺，氣壓梯度力項和風剪力項對暴潮模擬結果的影響則同樣重要。

參考文獻

- 李賢文，1994：潮汐及暴潮預報模式之發展。氣象學報，39，1，24-29。
- 劉肖孔，1983：中國海域三度空間數值模式。行政院科技顧問組印行。
- 劉肖孔，1985：臺灣海域颱風暴潮及氣象潮數值預報模式研究計畫，第一階段成果報告。交通部中央氣象局。

天文潮和暴潮數值實驗

| 實驗別 | 天文潮引潮力 | 海平面氣壓梯度力 | 颱風風場應力 | 起始時間 |
|-----|--------|----------|--------|---------|
| T1 | 有 | 無 | 無 | 83/7/05 |
| T2 | 有 | 無 | 無 | 83/7/15 |
| SO | 無 | 有 | 有 | 83/7/10 |
| ST | 有 | 有 | 有 | 83/7/10 |
| STP | 有 | 有 | 無 | 83/7/10 |
| STS | 有 | 無 | 有 | 83/7/10 |

表一