

第七章 如何預報波浪

7.1 波浪的組合

在前面幾章已說明波浪之產生與風的特性有很大之關係，最早系統地由風來推估波浪大小為 Beaufort 所提出之蒲福風級表。歐美國家於 1968 年進行一個大型觀測計劃，為明確瞭解風浪的成長及減衰的機構，稱為 JONSWAP (JOint North Sea Wave Project)，其研究學者從實測數據分析，獲得波浪成長過程之重要結果為，風浪波譜中急速發達的部份，非由風直接吸取能量，乃由成份波間的非線性互相作用後，從尖峰附近成份波供給能量，整個波群之全能量未有增減，波譜能量的尖峰變低，而其左、右兩側的能量反而增高，在群波中的能量只重新分配，但波浪則未持續發達。

往昔研究波浪的基本方法大可分三種，SMB 推估法、波譜法及數值推算法，其中之基本架構及原理如圖 38 所示。新的類神經網路科技提供推算波浪之利器，此一方法在第三節有詳細之介紹。

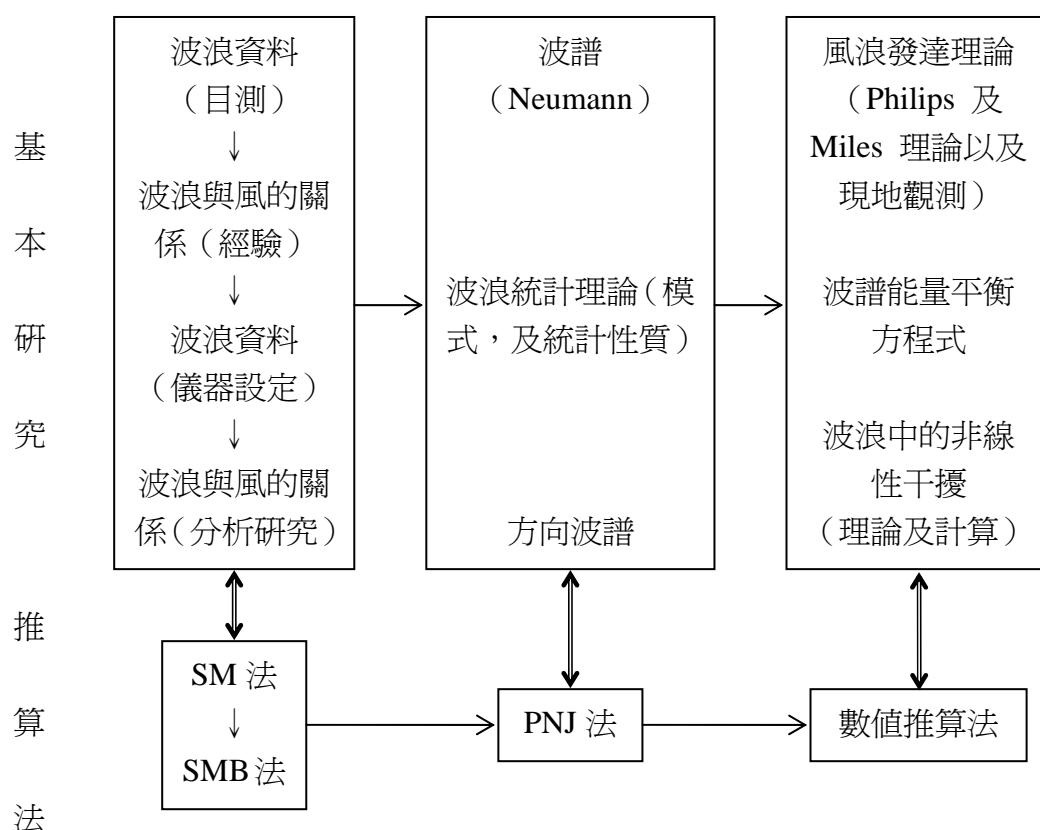
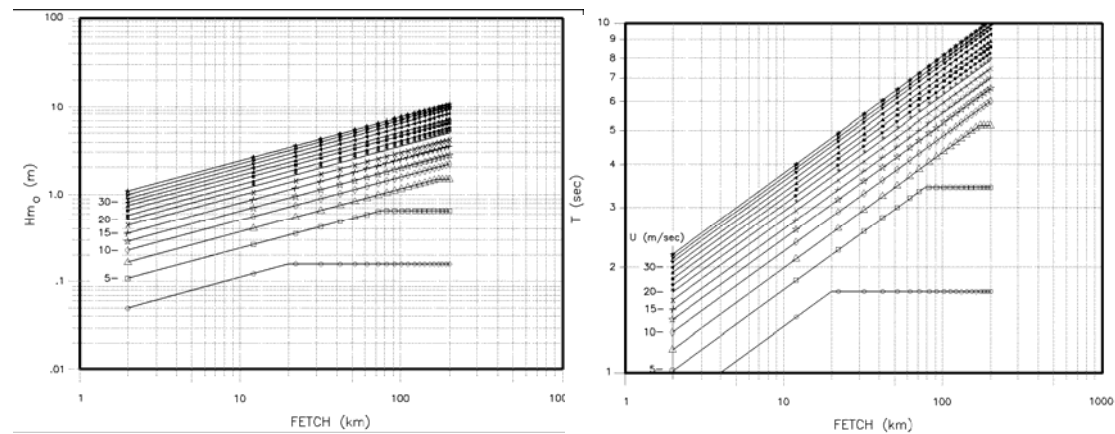


圖 38 往昔研究波浪的基本方法

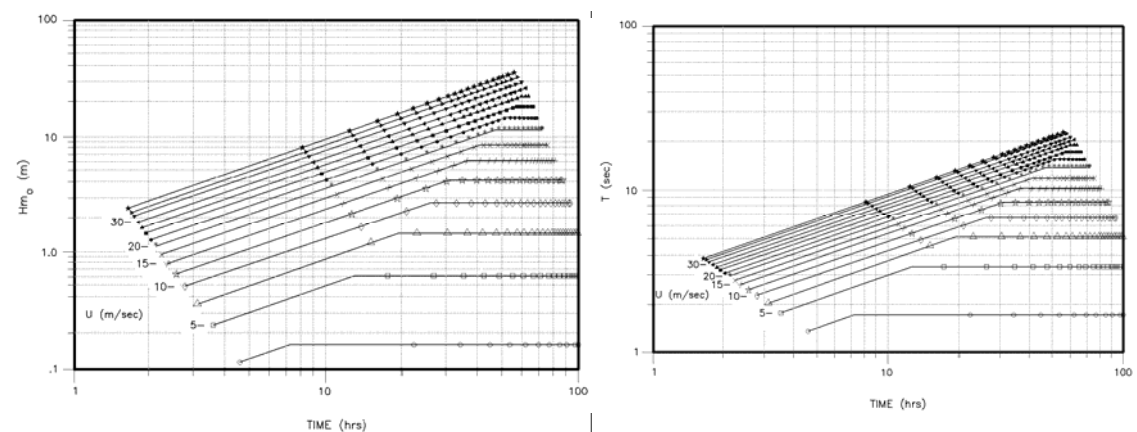
7.2 季風波浪推估

7.2.1 SMB 推估法

1942 年美國海軍爲了兩棲登陸作戰，要求更高精度之波浪推算技術，由 Sverdrup 和 Munk (1942-1947) 嘗試將波浪大小與風速，吹送距離，做定量關係分析。SMB 法導入統計的示性波概念來描述隨機海面波浪，其理論架構包括風浪發生、發達、傳遞及減衰等連串現象的系統推導，最後建立指示波波高及週期與風速吹送距離、延時等公式，因此本法之使用極爲方便。Bretschneider (1952) 進一步改善 Sverdrup 和 Munk (1947) 的方法，爾後，此類方法一般稱爲 SMB 法。在美國海岸工程手冊中使用的 SMB 法推算如圖 39 所示。



(a) 以有限吹送距離控制



(b) 以有限吹送延時控制

圖 39 美國海岸工程手冊中使用的 SMB 法推算圖

圖 39 中 U 為海面 10 公尺高之平均風速，若主風向及主波向不一致，而有夾角 β 情況，則需修正風速為 $U \cdot \cos\beta$ ，再代入圖 39 中。

如果推算點在有限水域中，吹送距離因為地形限制而產生風域寬度不一，及風向風速不同的情況，在應用上述方法時，吹送距離需修正為有效吹送距離 (effective fetch)。實際風浪可在風域下端 $\pm 90^\circ$ 之任何方向上生成。若風域寬度大，其主風向偏角之吹送距離較風域狹小者長，因此形成之波浪較大。相同長度之風域寬度較狹窄者所產生之風浪比風域寬度大者產生之風浪為小，此種影響尤以吹送距離長，或風速快之情況特別明顯。

7.2.2 經驗式推算法

利用 SMB 法必需引用海面上平均風速，吹送距離及吹送延時，資料取得及分析技巧上較為不易且費時。對局部海域的季節風波浪特性與風速應有相當關係，若收集往昔之風速及相對應時間之波浪，建立二者之關係，即波高對風速之迴歸公式，即可簡易來推算波浪。在有限風域波高及週期與風之關係為：

$$H_s = C_1 U \sqrt{F} \quad (3)$$

及

$$T_s = C_2 U \quad (4)$$

而在吹風距離極大時，波高及週期與風之關係為：

$$H_s = C_3 U^2 \quad (5)$$

及

$$T_s = C_4 U \quad (6)$$

上式中， $C_1 - C_4$ 為係數，波高之單位為 m ，風速之單位為 m/s ，吹風距離單位為 m 。 $C_1 - C_4$ 之係數需由實測之風速及波浪迴歸後求得，因此具有區域性。Soares (1986) 迴歸目視法與儀器實測之波高與週期之關係，發現目視之波高較實測值為低，而目視週期在 8 秒以下者，目視週期較儀器實測值為低，反之當目視波浪週期超過 8 秒時，目視結果較實測值為高。因為此種經驗式推算法過於簡化波浪及風間複雜的關係，雖然使用相當方便，但是其推算結果可靠度低。

7.3 颱風波浪推算

7.3.1 颱風特性

熱帶海洋面上常發生低氣壓，當低氣壓強度增強，且挾帶豪雨及猛烈風暴時，稱為颱風。颱風最易形成的區域在北緯 10 度至 15 度間，而侵襲台灣的颱風大都來自北太平洋西部，發生地點以加羅林群島(Carolines)，馬利安納群島(Marianas)和帛琉群島(Paleu)一帶最多，另外也有部分來自中國南海海面。

依台灣氣象局之分類，當低氣壓中心附近之最大風速小於 17 m/s 時稱為熱帶低氣壓，最大速在 $17\sim 32.5\text{ m/s}$ 者稱為輕度颱風，最大風速在 $32.6\sim 50.9\text{ m/s}$ 者稱為中度颱風，最大風速大於 51 m/s 者則稱為強度颱風。

颱風常發生於夏秋之際，而冬春二季則較少，因為夏秋二季太陽直射北半球較多，海面上產生較高的氣溫及大量的水汽，而易發生對流現象，加上不同方向、不同性質的風場，造成旋渦狀之颱風。反之，過了秋季，太陽直射南半球，南半球之東南信風不能侵入北半球，形成颱風機會自然降低。根據統計，全球每年約有 79 個颱風生成，以生成於北太平洋西部及中國南海地區的颱風最多也最強，平均每年約有 23 個，一半以上發生在七、八、九等三個月份。台灣中央氣象局統計 1897 年至 2003 年的統計資料顯示，這段期間一共有 383 次颱風侵襲台灣地區，每年的 7-9 月發生颱風機會最高，是台灣的颱風季。

至於颱風的路徑在南半球和在北半球大致是對稱的，都是先向西，在南半球漸漸偏左，在北半球漸漸偏右，到了高緯度時，慢慢轉回向東進行。影響颱風進行路徑大致可分為直線型及拋物線型兩種。前者向西或西北方向前進，登陸菲律賓進入中國海，或橫切台灣或通過台灣附近進入福建省，此種颱風移動速度較慢約為 20 km/hr 。夏末秋初颱風之路徑多屬拋物線，最初以 20 km/hr 之速度向西北西至西北方向進行，中途轉向，以 $20\sim 40\text{ km/hr}$ 之移動速度向北至東北方向進行，再橫過日本列島或進入上海。

7.3.2 颱風結構

颱風內有強烈之風速，且在一個結構呈漏斗狀之渦流之內，下層空氣流向中心並向上竄升，高至 10 公里左右後，向四周流出，四周空氣涵蓋之範圍可達數百公里，此風結構與季節風有長吹風範為不太一樣。由天氣圖上所見之颱風，形成約同心圓等壓線分佈之低氣壓，在近中心附近之壓力梯度愈大，風速愈強，但在颱風中心附近反呈無風狀態，天氣晴朗，稱為颱風眼。整個颱風風速分佈大約分為颱風內域與颱風外域。颱風內域為颱風眼至離颱風中心約 $40\sim 60\text{ km}$ 之最大風速處，此段風速呈直線向外增加，而颱風外域為最大風速處至暴風半徑，此段風速與離中心 r 處呈 $1/\sqrt{r}$ 遞減，而在颱風圈外之風速與離中心距 r 呈反比。一般所指暴風半徑為風速大於 10 m/s (6 級風力)以上之區域。

颱風詳細結構稍有不對稱的現象。颱風滯留時，氣壓梯度所造成之傾度風 (gradient wind), U_{gr} ，在北半球因受科氏力 (Coriolis force) 影響，颱風會逆時鐘旋轉，風向一般會向中心傾斜 $20\sim 25$ 度左右，滯留風速與傾度風速比值約為

0.6。若當颱風移動時，滯留風速與颱風前進速度合成之總風速在颱風之右邊，則總風速比滯留風速大，反之，若其在颱風之左邊，總風速小於滯留風速，其幾何示意圖如圖 40 所示。因此，颱風進行方向之右半圈稱為危險半圈，而左半圈稱為安全半圈。

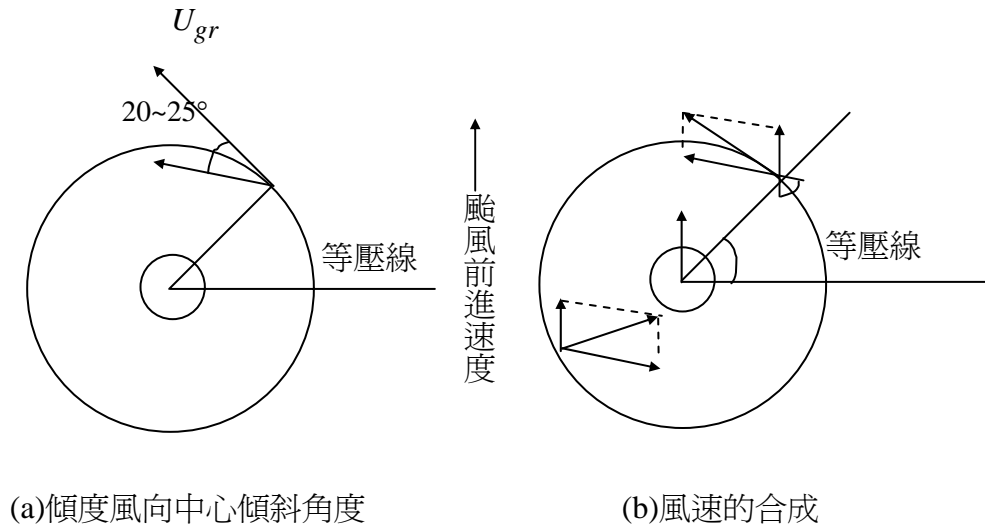


圖 40 颱風內傾度風及風速的合成

颱風風場的流速向量圖示如圖 41，圖中橫軸及縱軸為相對於最大風速半徑之距離颱風中心之長度。從圖 41 可知梯度風都是以圓切線向圓心方向，且颱風眼的右半圈的风速較左半圈為大。圖 42 為離地 10 公尺風速與颱風中心距離之關係，從圖 42 可知颱風右邊的最大風速高於左邊最大風速，而颱風中心之風速最低，自最大風速往外之風速呈現指數遞減的趨勢。

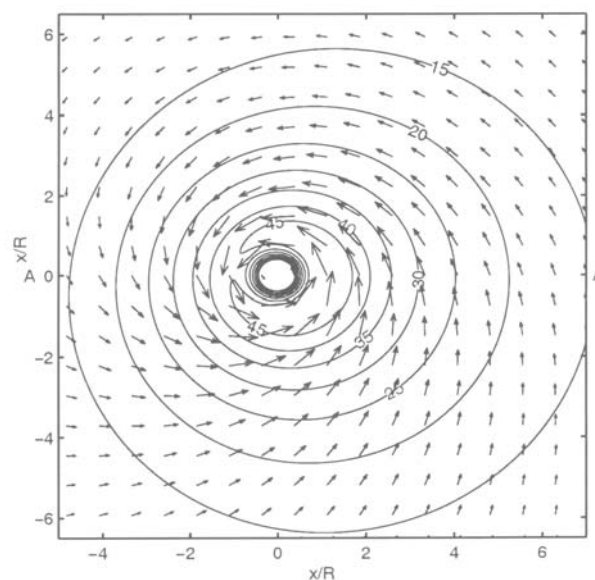


圖 41 颱風風場流速向量圖

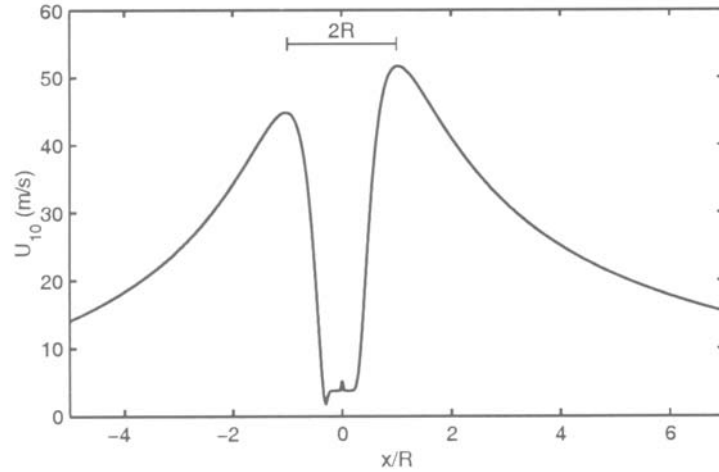


圖 42 離地 10 公尺風速與颱風中心距離之關係

7.3.3 最大波浪推算法

根據美國海岸保護手冊(Shore Protection Manual, SPM, 1984)，當颱風緩慢移動時，風域內最大指示波高及其週期，與能量指標 $R\Delta p$ (energy index) 有關，其公式為

$$H_s = 5.03e^{\frac{R\Delta p}{4700}} \left[1 + \frac{0.29V_F}{\sqrt{U_R}} \right] \quad (7)$$

及

$$T_s = 8.60e^{\frac{R\Delta p}{9400}} \left[1 + \frac{0.145V_F}{\sqrt{U_R}} \right] \quad (8)$$

式(7)及式(8)中， H_s 單位為 m ， U_R 為海面上 10 公尺處之最大風速，其單位為 m/s ， R 為最大風速離颱風中心之距離， Δp 為氣壓差。至於颱風圈內其他各處之示性波高分佈，示如圖 43。由圖 43 依相對座標位置查出相對波高值，再乘以最大示性波高即可得移動颱風內之波高，而此處波浪週期則可由式(9)估算

$$T_s = 3.83\sqrt{H_s} \quad (9)$$

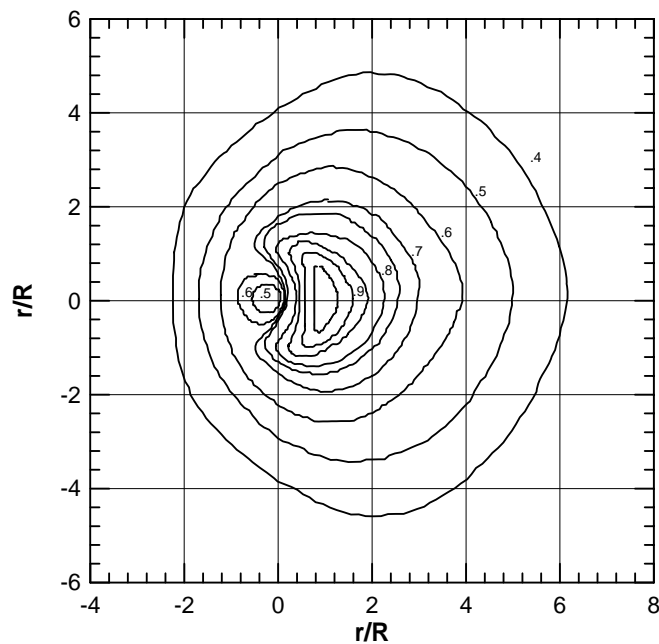


圖 43 緩慢移動颱風內示性波高等值分佈圖(Shore Protection Manual, 1984)

其他颱風推算方法，尚有 Wilson (1955)之移動風域法，Wilson (1955)應用 SMB 之公式，以圖解或數值計算來推算颱風波浪，其基本觀念為以觀測點向外繪出射線，每一射線長視為風域，在此風域上的風速分量為造成此方向波浪大小的風力。移動風場為時間與空間的函數，由起始點逐時計算，求出觀測點逐時之波高與週期，此法因需查圖方可推算，現今應用上較為不方便。湯(1970)改善 Wilson 法，建立淺水風浪之模式，考慮海底摩擦影響，湧浪及碎波，直接由氣象資料推算颱風至近岸前之波浪狀況。此法的颱風路徑需指定之固定方向，即稱為模型颱風，方能計算。因為模型颱風為直線前進，風浪在推浪點上波能直線累加，可能獲得較高之波浪推算值，此為模型颱風與實際颱風移動上的差異。

7.4 風浪數值推算

數值推算模式基本概念為基於波浪能量平衡方程式(wave energy action equation)，此方程式主要描述波浪傳遞的機制及風能與波能之傳遞機制，後者包括風能如何傳入波浪、波浪不同成份波之能量傳遞及因碎波的波浪能量消散。雖然此種方法有物理原理之基礎，然而在執行上需要把計算的空間網格化成數千或數萬個點，透過數值分析中差分技術將原方程式轉變成可以程式化的數值方程式，比如數學之微分在數值計算是無法依數學定義來進行，僅能用很短的區間當做微分中極限之很小值，而且計算的結果只是在指定的網格點上才有值。

當然在計算過程中，風的大小及方向條件在各網格點要作輸入，這也是一個問題，因為不可能在上千萬格網點上都有觀測風速，所以格網點上風速也要一個

風場模式來事先計算，以做為外力輸入之條件。另外因為颱風涵蓋的範圍很大，如整個北太平洋，所以需千萬格網點才能計算出所要之精度。然而，因為龐大的格網點所以為在計算每一個時間之所有點上值的所花的電腦計算時間相當的長，這種問題可用超級電腦或者利用個人電腦以平行運算(parallel algorithm)之技巧來克服。

1970 年後，因為波浪實測數據增多，能校核模式中未能確定的參數或係數，所以計算結果與實測更加一致。目前只要風場計算結果能夠信賴，波浪模式即能提供相當正確之結果。直至目前波浪模式已發展至第三代，考慮更嚴謹之波浪能浪傳遞及計算架構，使效率及精度提高，而且應用至近岸之波場，詳細內容可見 Hsu et al.(2005)。

7.5 類神經網路的推算波浪法

類神經網路(artificial neural network, ANN)，是一種以電腦來模擬人類腦神經細胞網路的科學。根據神經科學家與醫學家的研究，我們的腦中有無數的神經元。每一種神經元均掌管不同的感知、推理、記憶與學習工作。在類神經網路發展之初，最主要的目的也就是為了模擬人腦中神經元的工作方式。圖 44 是我們腦中每個神經元結構的簡圖：

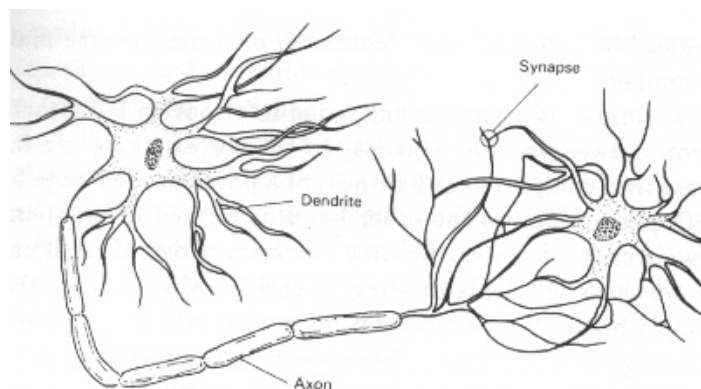


圖 44 神經元結構示意圖

其中重要部分包括:(1)神經元 (Neuron)為主要的處理單元。蒐集訊號並決定如何處理；(2)胞突連接 (Synapses)為此部份為神經元間訊號傳遞的連接點 (Junction)；(3)樹狀突 (Dendrites)為此為樹狀傳遞線，負責接受其它神經元的訊號；(4)軸突 (Axon)為主要的傳遞介質。軸突負責將訊號傳至其他神經元的樹狀突。

神經元系統的工作機制原理如下：

某神經元由樹狀突與胞突連接接受多個其它神經元傳來的訊號。訊號在神經元累積後，如果超過某個臨界值，表示此神經元將被激發。若是激發的條件成立，

該神經元會將訊號輸出至軸突，並且加強後送到其它的神經元，若是輸入訊號累積不足臨界值，則表示此神經元受抑制，且不會再輸出訊號至其他神經元。許許多多的神經元彼此互相連接，且不停地傳遞訊號。目前神經元內部實際的工作方式我們並不確知，但是類神經網路便因模擬此運作方式而興起。

類神經網路是利用大量的神經元來模擬人腦的基本單元，其網路建構的目標在於映射輸入與輸出之間關係的數學。基本神經網路架構有三層，分別為輸入層(input layer)、隱藏層(hidden layer)和輸出層(output layer)，如圖 45 所示，圖中每一個圈圈稱為節點(Node)或神經元(neuron)，每一個神經元都是以平行方式進行資料處理，其中輸入層是將外界的資訊輸入到網路，隱藏層則將輸入資料進行處理,但使用者看不到整個資料處理過程，故稱為隱藏層，輸出層則將處理的結果傳送出去。

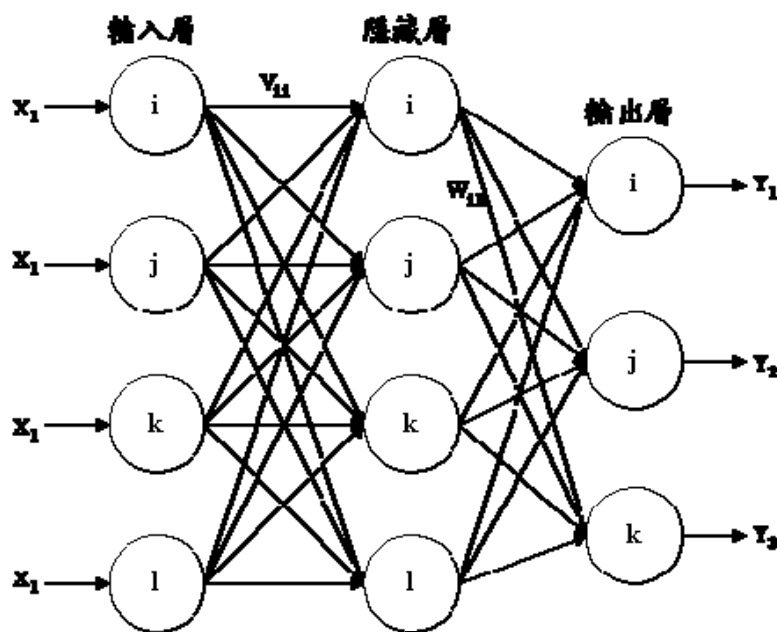


圖 45 類神經網路的架構示意圖

神經網路的優點為：

- 1.高度平行處理能力：神經網路利用大量的神經元仿生物的神經系統而具有高度平行處理的能力。
- 2.學習與記憶能力：神經網路調整網路的權重值來學習並記憶輸入與輸出資料的關係。
- 3.容錯能力：網路有大量的鏈結,當部份鏈結失效，網路還是可以提供相當正確的輸出。

神經網路的缺點：

1. 類神經網路因為其中間變數（即隱藏層）可以是一層或二層，數目也可設為任意數目，而且有學習速率等參數需設定，工作相當費時。
2. 類神經網路以迭代方式更新鍵結值與閾值，計算量大，相當耗費電腦資源。
3. 類神經網路的解有無限多組，無法得知哪一組的解為最佳解。
4. 類神經網路訓練的過程中無法得知需要多少神經元個數，太多或太少的神經元均會影響系統的準確性，因此往往需以試誤的方式得到適當的神經元個數。
5. 類神經網路因為是以建立數值結構（含加權值的網路）來學習，其知識結構是隱性的，缺乏解釋能力。而歸納學習以建立符號結構（如：決策樹）來學習，其知識結構是顯性的，具解釋能力。

類神經網路訓練的目的，就是讓類神經網路的輸出越接近目標值。亦即，相同的輸入進入到系統與類神經網路，得到的輸出值亦要相同。類神經網路未訓練前，其輸出是凌亂的，隨著訓練次數的增加，類神經網路的鍵結值會逐漸的被調整，使得目標值與神經網路的輸出兩者誤差越來越小。當兩者的誤差幾乎不再變化時，我們稱此類神經網路已收斂(convergence)，此時類神經網路便訓練完成。通常我們會定義一個價值函數(cost function)作為神經網路收斂的指標，價值函數將會隨著網路的訓練次數越變越小最後幾乎不再變化。

目前已有利用類神經於波浪之推算之研究如 Deo and Shidhar Naidu (1998)，Deo et al. (2001), Makarynsky (2004)，Chang and Chien (2006a, b)。這些研究尚屬於發展階段還有進步空間。主要因為一個好類神經網路需要可靠的資料來學習，所建立的網路與資料品質有關而且具有區域性，如何結合數值推算所依據之物理方程式及原理來建構較一般的模式，是未來可進行的方向。

7.6 衛星測高法

自從各高科技國家發射多量太空衛星，從人造衛星上看地球更不受地殼變動影響，可提供大量廣範圍之海、氣象資料。如 TOPEX/POSEIDON 衛星測高資料，TOPEX / POSEIDON 於 1992 年 8 月 10 日由法國太空總署 (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) 和美國太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 合作發射升空，其利用兩組最新雷達測高系統 (NASA 製造之雙頻測高儀和 CNES 製造之單頻測高儀) 量測海水面高度，用來研究全球海洋動態環流及波高。圖 46 即為由衛星測高所推算出海域之波高變化。由圖 46 的結果啟發我們一個新的技術，提供我們研究的新方向及領域。

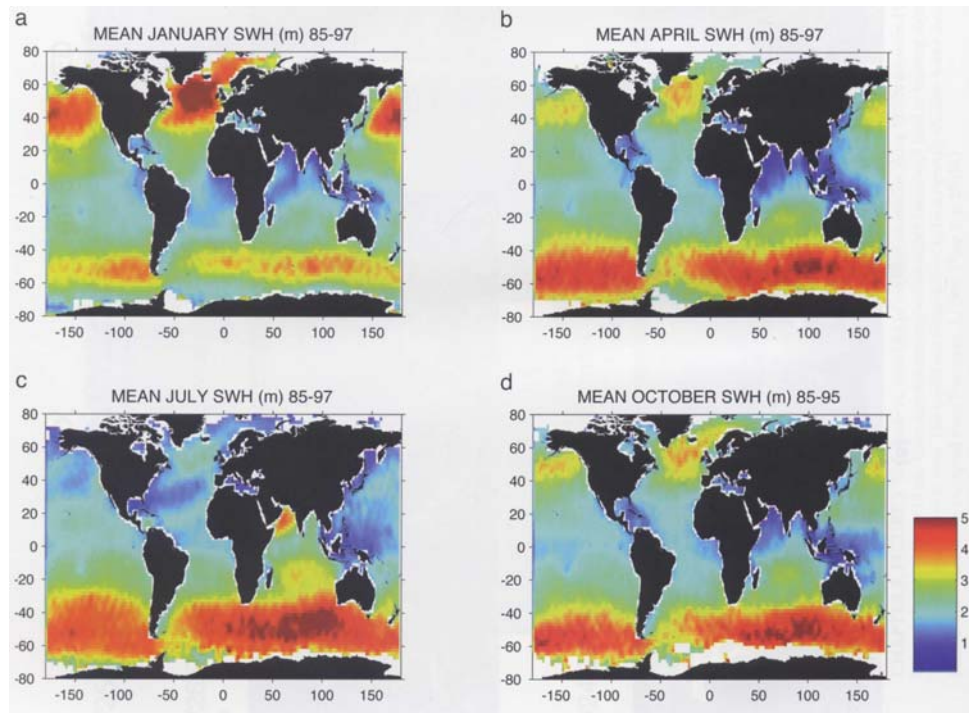


圖 46 由人造衛星測高資料(SWH)分析出全球之每月分佈(引自 Fu and Cazenave, 2000)

第八章 波浪是千面人

8.1 猙獰的面孔

有一部電影叫「天搖地動(The perfect storm)」，故事描述 1991 年 10 月，比利船長欲開到弗萊明角海域捕魚，雖然出發前聽說有個暴風正在形成，然而，對此充滿冒險精神的比利船長最後還是選擇出海，不料天氣形態卻出現罕見的變化，當地氣象人員告知居民，超級颶風葛瑞絲正以不正常的形態快速成形，她是由三個海上颶風集結而成，其威力可能遠超越史上任何紀錄。電影最動人的是船長與其他船員面臨前所未有這個大自然的大波浪危機，同舟共濟正面交戰大浪襲擊的恐懼。這些的珍貴鏡頭是導演碰巧遇上了超級颶風「佛洛伊德」襲擊東海岸，獵取到的。從電影我們可以體會到海洋中大風大浪的情境，也見識到大浪的面孔)。

2004 年 12 月 26 日，印尼蘇門答臘外海發生芮氏規模 9.0 級大地震，強烈的海底地震引發大規模海嘯，印度洋周邊國家均因海嘯傳出重大災情，近十萬人因此罹難，此稱為南亞海嘯。發生海嘯的地區有許多觀光聖地，因此罹難人士包函世界各國，這是世紀大劫難，人間天堂頓時成為地獄(見照片 7)。這種因為海底底床之變動所造成長週期之海嘯，以前述可知其傳播速度很快，且到近岸會因為淺化而波高變得很高，導致海岸會出現極嚴重的災害(如繪圖 47 所示)。



照片 7 南亞海嘯產生海岸道路鋪面破壞(引自網址 teach.whes.tpc.edu.tw)

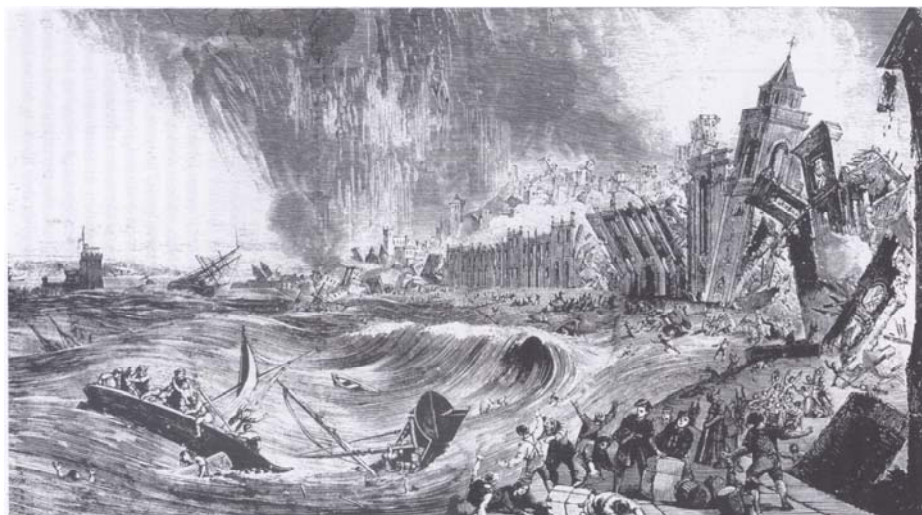


圖 47 海嘯產生海岸災害之繪圖(引自 Bryant, 2001)

8.2 祥和的面孔

當其實平常的海洋大多在風和日麗下是平和的，只是表面有一些的波動，此波動顯現一種活力，這又和陸上極靜湖面的感受不同，也是許多人所熱愛的。像漁民以海為生，對海洋一份敬意又有一份恐懼，不管如何對於海洋的喜愛是無庸置疑。更有有許多學者對海洋或波浪有一份強烈的熱愛，投身於海洋，Borgese (1992)就撰書記念往昔供獻於海洋研究學者及單位。一位法國出生的 Discover 雜誌主編 Kunzig，於 1999 年寫了一本書叫「永不靜止的海洋(The restless sea)」，從一個對海洋熱衷的作者，發表海洋的歷史及一些現象，讓讀者看完更喜歡海洋，就如書中前言所述 “To tell the story of the ocean today, one must begin in space, and a long time ago”。

當太空太陽系存在最美麗的藍星(Blue star)，是因為其 2/3 是含蓋海洋，而地球生命的來源也起自海洋，我們應對他要多一點了解，對在他裡面常期運動表現的波浪也要有所認知，好好的利用他，也好好的愛他。

參考文獻

- Borgese (1992), E. M. (editor), 1992. Ocean Frontiers-explorations by oceanographers on five continents, Harry N. Abrams, Inc., New York, 268pp.
- Bretschneider, C. L., 1952. The generation and decay of wind waves in deep water. *Transaction American Geophysical Union*, 33(3), 381-389.
- Bryant, E., 2001. Tsunami- The underrated hazard, Cambridge University Press, 320pp.
- Chang, H. K., Chien, W.A., 2006. Neural network with multi-trend simulating transfer function for forecasting typhoon wave. *Advances in Eng. Software* 37, 184-194.
- Chang, H. K., Chien, W.A., 2006. A fuzzy-neural hybrid system of simulating typhoon waves. *Coastal engineering*. (in press)
- Deo, M.C., Jha, A., Chaphekar, A.S., Ravikant, K., 2001. Neural networks for wave forecasting. *Ocean Eng.* 28, 889-898.
- Deo, M. C., Shidhar Naidu, C., 1998. Real time wave forecasting using neural networks. *Ocean Eng.* 26, 191-203.
- Fu, L. L. and Cazenave, A. (Editors), 2001. Satellite altimetry and earth sciences- A handbook of techniques and applications. Academic Press, California, 463pp.
- Garrison, T. 1993, *Oceanography- An introduction to marine science*, Wadsworth Publishing Company, Belmont, California.
- Hsu, T. W., Ou, S. H., Liao, J. M., 2005. Hindicasting nearshore wind waves using a FEM code for SWAN. *Coastal Eng.* 52, 177-195.
- Kunzig, R., 1999. *The restless sea- exploring the world beneath the waves*. W. W. Norton & Company, Inc., New York.
- Lamb, H. 1945, *Hydrodynamics*, 6th ed., Cambridge University Press.
- Makarynsky, O. 2004. Improving wave predictions with artificial neural

- networks. *Ocean Eng.* 31, 709-724.
- Shore Protection Manual, 1984. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Vol. I-III.
- Soares, C. G., 1986. Calibration of visual observations of wave period. *Ocean Engineering*, 13, 539-547
- Sverdrup, H. U. and W. H. Munk, 1947. Wind, sea and swell, theory of relation for forecasting. U. S. Navy Hydrographic Office, Pub. No. 601. 44
- Wilson, B. W., 1955. Graphical approach to the forecasting of waves in moving fetches. Technical Memo, No. 73, Beach Erosion Board.
- Wright, J., Cooling, A. and Park, D., 2005, Waves, tides, and shallow-water processes, The open university, Walton Hall, Milton Keynes, England. 223pp.
- 柯文典，1978，海洋的奧秘，成文出版社。
- 湯麟武，1970，「淺灘海岸上波浪推算方法之研究」，成功大學土木水利學術彙刊第一期，第 105~164 頁。