

實測風浪關係與蒲福風級浪級之探討

徐月娟 張國強 李汴軍 高家俊 莊士賢 董東環
海象測報中心 水文技術組 環境及設計學系 水利及海洋工程學系 近海水文中心 近海水文中心
中央氣象局 水利署 華梵大學 成功大學 成功大學 成功大學

摘要

波浪預報的方式很多，常用理論複雜的數值模式推算法，然而很多漁民或海上遊憩者仍沿用由蒲福風級(Beaufort Scale)推斷浪級的方式來預測海浪，這是一種經驗法則。中央氣象局和水利署目前在台灣環島已建置了完善的海氣象觀測網，現場實測資料相當豐富，本文旨在利用實測資料研究蒲福風級浪級關係的相關問題，探討實際風浪關係和蒲福風級浪級之間是否一致，利用蒲福風級來推測浪級是否合理，檢討其地域上的變異性，以作為日後應用蒲福風級推估波浪狀況時的參考。

The Study on the Wind-Wave Correlation from Beaufort Scale and Field Data Analysis

Y.J. Hsu K.C. Chang B. C. Lee C.C. Kao L.Z.H. Chuang D.J. Doong

Abstract

The Beaufort Scale empirical defines the wind-wave correlation by Francis Braufort, 1774-1857. It is common used for simple wave forecasting by fishermen. This study is going to study that if the Beaufort Scale can be used at the coastal ocean normally without modification. After the establishment of coastal ocean monitoring network around Taiwan, there are a lot of field wind and wave data. This study is done by analyzing the field data and comparing the resulted filed wind-wave correlation with Beaufort wind-wave scale. The results show that the Beaufort wind wave scale is a little larger than the in-situ wind wave correlation. The correlation is also found that it is depend on the locations and seasons. The Beaufort Scale cannot be used to forecast wave height by wind speed at all places.

一、研究背景與目的

在日常的天氣預報中，通常預報員會用「和緩」、「清勁」或「強風」等術語來描述風力。風的強弱程度，通常是用風力等級來表示的，而風力的等級，可由地面或海面物體被風吹動之情形加以估計得之。長久以來，對天氣最關心的是農民和海員，海員尤其關心風力的大小，他們根據風對地面物體影響的程度把風力分級，英國海軍上將蒲福爵士(Sir Francis Braufort, 1774-1857)對於風速提出一個簡單的分級辦法，主要是用船舶在海上前進的速度和可以扯起多少張帆來區別風力的大小，他於 1805

年首創風力分級標準，基本上將風級分為十三級，每一級風都有其描述風力的術語，無風列入零級，風力越大，級數越高，表 1 說明了蒲福風級(Beaufort Scale)、風力術語和風速的對應關係，雖然用十九世紀船舶的性能做標準來劃分風力的等級，雖然和現代的要求可能不完全符合，但是因為大家用慣了，而且容易記憶，所以到現在仍採用這種分級法。

風是引起波浪的主要原因，波浪的預報對於海上漁業、航行甚至遊憩是相當重要的工作，在台灣的海象預報結果係由中央氣象局海象測報中心所發布為準。海象波浪預報的方式很多，常用理論複雜的數值模模式推算法，如 WAM、WW3、SMB 等數

值模式，這些模式可以藉由風場的狀況，推估廣大海面的波浪情形，然而當沒有數值模式或者要簡便快速地推估波浪大小時候，此時的蒲福風級浪級關係就是最簡便的方法了，蒲福風級浪級關係是蒲福氏經過 67 年堅持海上氣象觀察與日記，歸納風的狀況(風級)所會產生的波浪狀況(浪級)的一個經驗法則，蒲福風級浪級關係早在 1838 年就被英國海軍正式採用，並於 1874 年在國際氣象組織(世界氣象組織前身)的會議上被正式採納，今天仍被各國氣象部門普遍採用，蒲福風級浪級表長久以來是估算海面波浪的實用方法。

民國九十一年辛樂克颱風(Sep 4-8, 2002)期間，曾有媒體陳述辛樂克颱風可能會為台灣帶來「滔天巨浪、舟船翻覆」的重大災情，然而事實上颱風

期間並沒有真正發生上述狀況，事後媒體表示得知中央氣象局預報資料將有「十二級的強風」，依據「蒲福氏風級表」記載，十二級的風會造成「滔天巨浪、舟船翻覆」，因此發布上述海上狀況，造成民眾恐慌。藉由該事件吾人開始檢討直接利用蒲福風級來推估海浪狀況是否合理，是否有該修正的必要，基本上，蒲福風級浪級是描述的風浪的成長，由於各地的海域環境可能有所差異，因此蒲福風級浪級關係在不同的位置是否相同也是我們所感興趣的問題之一。因此本文的研究目的即是在於探討(1)蒲福風級浪級關係與實際風浪關係是否一致，是否可直接利用，甚至作為海況預報的依據，(2)探討風浪關係在不同的地域環境是否有異，本文比較深海的風浪關係和近岸的風浪關係，以及分析風級浪級關係在台灣北、東、南、東四處的差異性。

表 1 蒲福風級與浪級關係

風級	風速(m/s)	風的稱謂	浪高(m)	海浪的稱謂	*風的描述 **浪的描述
0	0-0.2	無風	---	微波	*煙直上 **海面平靜如鏡
1	0.3-1.5	軟風	0.1-0.1	微波	*微弱的風令煙轉向，但不能轉動風標 **波紋柔和，狀似魚鱗，浪頭不起白沫
2	1.6-3.3	輕風	0.2-0.3	微波	*使人感覺有風，樹葉搖動，普通之風標轉動。 **小形微波，相隔仍短但已較顯著，波峰似玻璃而不破碎。
3	3.4-5.4	微風	0.6-1.0	小浪	*樹葉搖動，旗幟飄揚。 **微波較大，波峰開始破碎，白沫狀似玻璃，間中有白頭浪。
4	5.5-7.9	和風	1.0-1.5	小浪-中浪	*塵上及碎紙被風吹揚，樹之分枝搖動。 **小浪，形狀開始拖長，白頭浪較為頻密。
5	8.0-10.7	清風	2.0-2.5	中浪-大浪	*小樹開始擺動。 **中浪，形狀顯著拖長，白頭浪多，間有浪花飛濺。
6	10.8-13.8	強風	3.0-4.0	大浪	*達三號風球的程度，大樹搖動，電線發出嗚聲，張傘前進也有阻力。 **大浪開始出現，周圍都是較大的白頭浪，浪花多。
7	13.9-17.1	疾風	4.0-5.5	非常大浪	*全樹搖動，逆風行走感困難。 **海浪堆疊，碎浪產生之白沫隨風吹成條紋。
8	17.2-20.7	大風	5.5-7.5	非常大浪-巨浪	*到達八號風球的程度，小樹枝被吹折，逆風而行舉步維艱。 **將達高浪階段，波峰開始破碎，成為浪花，條紋更覺顯著。
9	20.8-24.4	烈風	7.0-10.0	巨浪-非常巨浪	*大樹枝折斷，建築物輕微損毀。 **高浪，白沫隨風吹成濃厚條紋狀，波濤洶湧，浪花飛濺，影響能見度。
10	24.5-28.4	狂風	9.0-12.5	非常巨浪	*到達九號風球的程度，樹被風拔起，建築物有相當破壞。 **非常高浪，出現拖長的倒懸浪峰；大片泡沫隨風吹成濃厚白色條紋，海面白茫茫一片，波濤互相衝擊，能見度受到影響。
11	28.5-32.6	暴風	11.5-16.0	非常巨浪-極巨浪	*狂風怒吼，堅固的屋也有損毀的危險，廣泛破壞。 **波濤澎湃，浪高足以遮掩中型船隻；長片白沫隨風擺佈，遍置海面，能見度受到影響。
12	32.7-36.9	颶風	>14.0	極巨浪	*到達十號風球的程度，大樹可能連根拔起，大件的物件可能會吹上半空，極度破壞。 **海面空氣充滿浪花白沫，巨浪如江河倒瀉，遍海皆白，能見度大受影響。

二、蒲福風浪級與風浪成長關係

“無風不起浪”是一句常聽到的俗語，這句話說明了在海洋中風浪生成的原因，在風直接作用下海面產生的波動叫做風浪(wind wave)，而跑區吹風區域的海浪稱之為湧浪(swell)。風浪生成主要有兩種解釋，一種解釋認為由於風的壓力分布不一致，使得局部水面受壓而產生波動，風浪一旦產生，風力便可以直接發生作用，浪就會繼續增長。另一種解釋則是根據流體力學的觀點，認為兩種相互接觸的流體發生相對運動的時候，流體的接觸面就變得不穩定，必須形成一定的波面才能維持平衡，當水面上稍微出現一些凹凸時，在凹凸面上各點氣流的速度便不相同，凸處的風速增大，壓力減小，造成有上升的趨勢，而在凹處卻相反，風速減小，壓力加大，造成下降的趨勢，這樣一來，水面的不平就增大了，而水的表面張力和重力又有使水面恢復原狀的趨勢，這就形成了風浪運動。

風很弱時，海面保持平靜，當風速達到一定速度時，海面就開始出現毛細波。毛細波的波長很短，波高很小，可以把這種波看成是海面上的皺紋，它只存在於海面的很薄一層水面上，風再繼續刮時，促使毛細波的波長和波高增大，變成重力波，風的能量借助於氣流和海面的摩擦作用，直接施加在波浪的迎風坡上，當風速大於波速時，波浪始終受到風的壓力作用，風的能量不斷地輸入水體，使風浪的波高和波長不斷增大，逐漸形成較大的風浪。隨著風浪的增大，波的速度也相應增大，直到波速等於風速時，波浪就不再從風接受能量，風浪停止發展，這時候的浪也就是在這種風速下的最大浪了，稱之為完全發展波(fully developed wave)。

一般而言，影響風的成長的因素可歸納為風速、吹風區域(fetch)與吹風延時(duration)三項，風速愈強，歷時愈長，風域愈大，所形成的風浪愈大，本文將表1所列的蒲福氏風級與浪級關係繪如圖1

所示，其中灰色陰影部分即為蒲福所描述的風浪級區域，另外，SMB 預報方法中的完全成熟波曲線也同時繪在圖1，當風域與吹風延時均超過有限風域與歷時時，波浪僅為風速的函數，可以利用下式計算，

$$H_s = 2.482 \times 10^{-2} U_A^2 \quad (1)$$

式中 U_A 為考慮高度、地形、與溫差等因素的修正風速(adjusted wind speed)(郭，1999)。圖1中的另一條曲線是未成熟波浪曲線，當風域(F)有限時，波高的大小由風速與及風域長度決定，其推估式如下，圖1繪製了 $F=100\text{km}$ 的波浪成長曲線。

$$H_s = 5.112 \times 10^{-4} U_A F^{1/2} \quad (2)$$

從圖1中我們得知，事實上蒲福風級與浪級的關係相當於完全發展波浪曲線，這說明了當年蒲福氏所收集的記錄大部分應當是屬於完全發展的成熟波，依此推論，蒲福氏所收集的資料可能都收集自外海航行的船隻上，也就是風浪比較有可能發達到成熟的環境，若可進一步獲得蒲福氏原始的記錄則可驗證此推論。

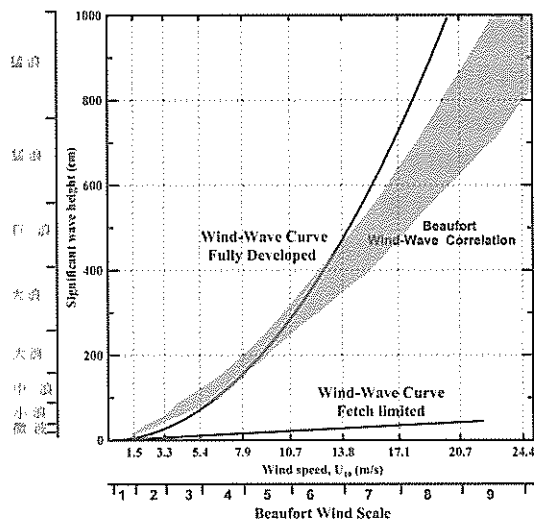


圖1 蒲福風級浪級關係與風浪成長曲線

三、臺灣鄰近海域之風級與浪級關係

(一) 資料來源

中央氣象局海象測報中心爲了從事台灣沿海的海氣象測報作業，於台灣鄰近海域設置了海氣象觀測網，波浪觀測儀器係以自行發展的資料浮標(data buoy)與測波浮球(waverider)爲主，每日 12 次所觀測的海氣象資料透過無線電或 GSM 等設備即時地傳送到中央氣象局，搭配數值模式從事短中長期的海象預報作業，截至目前爲止，中央氣象局所操作的波浪測站超過 10 座，爲了增加預報的時間，中央氣象局目前正著手進行從近岸的波浪觀測推展到深海的觀測上。經濟部水利署爲了防災禦潮的需要也設置了三座資料浮標來觀測海氣象資訊，並與中央氣象局的觀測網結合組成台灣環島的海氣象觀測網。

爲了探討蒲福風級浪級關係是否有受到地域位置的影響，本文分別針對台灣北、東、南、西四處收集同時觀測的波浪與風速資料，選用的測站分別是代表北部海域特性的龍洞測站、代表東部海域特性的花蓮測站、代表南部海域特性的鵝鑾鼻浮標以及代表西部台灣海峽海域特性的新竹浮標資料，資料期限均爲設置迄今的長期資料，以使統計分析更具代表性。另外，本文還選用了位於台灣海峽中段的國光平台資料，資料浮標的水深大概都在 30 公尺左右，而國光平台則設置於水深 60 公尺的海域，屬於深海資料，表 2 列出了本文選用測站與資料的說明，圖 2 則標示出各個測站的位置。

表 2 本文所採用的測站說明

測站	位置	水深 (m)	資料期間	分析資料數目	所屬單位
龍洞資料浮標	龍洞遊艇港外海	32	1998/10~2003/7	12404	中央氣象局 觀光局
花蓮資料浮標	花蓮七星潭外海	30	1997/5~2003/7	17196	中央氣象局
鵝鑾鼻資料浮標	墾丁香蕉灣外海	40	2000/11~2003/7	7928	水利署
新竹資料浮標	新竹南寮漁港外海	23	1997/5~2003/7	14891	中央氣象局
國光平台	新竹外海 25 公里處	60	1997/5~1998/10	2955	中央氣象局

(二) 蒲福風級浪級關係在不同位置之特性

本文分析表 2 五組分別代表北部、東部、南部、西部與外海的風浪資料，繪製風速與浪高關係，蒲福風級浪級關係亦繪製於同一圖上，分析結果如圖 3~圖 7 所示，其中的風速資料已利用 Log 風速剖面(如 3 式)轉換至海面十米高風速，而浪高爲有義波高(significant wave height)，由於量測的原理不同的關係，資料浮標係以(4)式計算有義波高(H_s)，至於國光平台則是以零上切法計算 1/3 有義波高($H_{1/3}$)，基本上這兩種有義波高之間有一定比率存在。下式中 z 爲 U_0 量測高度， m_0 爲波浪一維頻譜面積。

$$U_{10} = U_0 \left(\frac{10}{z} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$H_s = 4.0 \sqrt{m_0} \quad (4)$$

1. 僅東北角海域風浪關係與蒲福風級浪級關係一致

從圖 3 至圖 7 可以看出，整體而言以圖 3 的龍洞海域風浪關係與蒲福風級浪級的描述最接近，其餘東部花蓮、南部鵝鑾鼻、西部新竹海域的風浪關係與蒲福風級浪級關係差異都不小，且都是低估的情形，也就是說，吹相同大小的風所引起的實際浪高比蒲福風浪對照表所描述者爲小，蒲福風浪級關係有高估的情形，尤其是在風速較大時，根據前節的說明，圖 4(花蓮)、圖 5(鵝鑾鼻)與圖 6(新竹)所表現出來的是未發展成熟的風浪，在東北角龍洞海域由於吹風的風域較大，因此波浪成長不受限制，產生完全發展風浪的機率較高，因此最接近蒲福風浪關係，此點說明了若要使用蒲福風級來推測近岸浪高，在台灣北部或許誤差還不大，但在台灣其他海域則必須斟酌考量。

2. 深海與近岸資料的風級浪級差異

本文另外分析了位於新竹外海的國光平台風浪資料，這些資料是代表的是較深海域(水深 60 公尺)的風浪關係，先前的研究結果也發現國光平台與新竹浮標浪高之間存在一定的關係，可以相互推算(董等人，2000)。比較圖 6(近岸新竹浮標)與圖 7(深海國

光平台)結果,發現即使在深水的國光平台海域之風浪關係仍未達蒲福所描述的成熟風浪級關係,位於海峽內部,風域受限,風浪成長動能不足可能為其原因之一,然而國光平台在相對位置上較新竹浮標為深海,相對地風域較大,因此其風浪關係相較於新竹浮標是較趨近於蒲福風浪級關係的。

3. 風級浪級關係受地域環境之影響大

圖 5 顯示的是台灣南部墾丁香蕉灣外海約 3 公里處的鵝鑾鼻浮標風浪關係,與其他幾個位置差異很大的是,在鵝鑾鼻浮標,即使吹風很強,浪高均不大,風浪成長關係在此地並不明顯,這是因為此處(墾丁近岸)受地形影響,大部分時間是由陸地山頭向海上吹的離岸風,由於風域受限(僅短短兩、三公里),因此波浪無法成長,即使在吹七級的強風下,浪高亦在 2 公尺以下,在這種環境下,若要用蒲福風級來推估浪級恐怕會有相當大的出入。同樣地,在圖 4 花蓮浮標發現的小風速(3 級風以下)卻產生大波高(超過 2.0 公尺)的狀況,也是由於在花蓮浮標吹弱的離岸風但卻有較大的入射波(湧)浪之緣故。上述兩個案例都說明了,在近岸的風浪關係受地形的影響很大,然以全面可以用蒲福風浪級來推估,並非僅是量值的差異,有時是風浪之間根本上就沒有明顯關係地,此為在近岸要利用風推估浪的時候所必須特別注意的狀況。

(三) 向、離岸風資料之風級浪級關係

為了能更深入地檢討風與浪之間的關係,本文將代表台灣東南西北四區的四個浮標站資料區分為向岸風資料與離岸風資料,根據各浮標位置當地的海岸地形,以二分法分離出向岸風的風浪資料與離岸風的風浪資料,各地向、離岸風的定義如圖 2 所示,圖中角度值的定義亦以正北為零度順時針計算。

從圖 8、圖 9 龍洞浮標處的向離岸風浪關係可以更清楚地看出向岸風的風浪關係比圖 3 更明顯地符合蒲福風浪級關係,此乃因為理論上不易造成風浪成長的離岸風資料已被分離出,如圖 9,且確實這些離岸風資料的風浪關係是相對雜亂無章的。更明顯的是,從圖 10、圖 11 花蓮浮標的向離岸風浪關係

驗證了先前說明的花蓮離岸風的影響,圖 11 可以發現離岸風的風浪關係是相當獨特的,風小浪卻大,合理的懷疑是從外海垂直岸線所傳入的湧浪,是否真是如此,亦或這 4 級以下的小風速真會產生如此大的浪高,有待進一步資料的分析以確認。至於前述鵝鑾鼻浮標處的離岸風狀況從圖 12、圖 13 就可以很明顯地看出,在分析資料期間(2000/11~2003/7),圖 13 的離岸風有 6063 筆超過向岸風的 2009 有三倍之多,與花蓮浮標處之離岸風不同的是,鵝鑾鼻處是離岸強風(有高達 7 級以上的離岸風,類似恆春的落山風),而花蓮浮標處的離岸風則是微弱的小風(風速僅在 3 級以下),在離岸風域均僅為 2、3 公里的情形下,卻引起結然不同的浪,花蓮小風卻生成大浪(約 2.0 公尺),鵝鑾鼻強風卻只生成小浪(2.0 公尺以下),此現象是相當有去而值得未來進一步探討的。總而言之,蒲福風浪級在這種海域環境下的適用性是必須斟酌考量的。

(四) 不同季節資料之風級浪級關係

本文以季節進行資料分類,將各站的風浪資料區分為夏季風浪資料與冬季風浪資料,夏季的定義是每年的 5、6、7、8 月,冬季的定義為每年的 11、12、1、2 月,各站的風浪關係分析結果如圖 16~圖 23 所示。其中有一點是特別值得說明的,在圖 17(龍洞浮標冬季風浪資料)和圖 19(花蓮浮標冬季風浪資料)中,發現實測資料的風浪關係與蒲福風級浪級關係有特定的關係,亦即吹 4 級風(約 6m/s)以下時,實測浪高大於蒲福浪級,而當風大於 4 級時,實測浪高小於蒲福浪級。發現此點相當重要,因為蒲福風級即是描述波浪受風成長之曲線,前文也證明了與 SMB 法的成熟波曲線相似,因此上述結果可作為 SMB 波浪數值預報模式結果的修正參考,即是風大時該當將模式結果向下修,而風小時則必須將模式預報結果向上修,此結果係由近岸資料所分析而得。

四、結果與討論

本文採用中央氣象局與經濟部水利署在台灣環

島設置的長期波浪站資料分析比較實際海面上的風浪關係和蒲福所描述的風級浪級關係，獲得以下幾點結果：

1. 實際海面的風浪關係與蒲福風級浪級關係並不完全相符，有地域性存在。由於風域不受限，僅台灣北部近岸海域的風浪資料與蒲福所描述的風級浪級關係一致(雖然資料散佈較廣，如圖 3)，在其他近岸海域利用蒲福風級推估浪高會有高估的情形(實測較低)。
2. 雖然新竹海域實測資料之風浪關係低於蒲福風浪級，但由於新竹近岸海域資料大都屬於風浪資料，風浪關係圖的變異相對地較小(如圖 6)，因此新竹近岸海域可說是利用風來推估浪高的最適合地點。
3. 深海的風浪關係比近岸風浪關係更接近蒲福描述的風級浪級關係。近岸地區常常受地形影響，波浪無法發展完全，因此與蒲福浪級差異較大，深海地方的風浪資料則接近蒲福風浪級關係。
4. 風浪之間的關係與地域位置有明顯的關係，龍洞海域由於沒有受遮蔽，所以風浪成長的曲線與蒲福風級浪級相當接近，然而新竹浮標海域和鵝鑾鼻浮標海域由於地形的關係，風浪成長受限，因此相同的風在此兩處的浪卻比蒲福風級浪及所描述的小很多。
5. 本文之浪高所用為有義波高，或許某風速狀況下確實可能出現了如蒲福氏描述的浪高，但可能僅是瞬間的幾筆，從資料統計的觀點看此問題，基本上蒲福風浪級對海面浪高的描述略為偏大，為避免定率式報告的爭議，建議未來可將機率觀念引入蒲福風浪級關係。

致謝

本計畫係中央氣象局海象測報中心委辦之“海上資料浮標監控與品管”案，與經濟部水利署“近海水文網基本站建置”計畫的成果。

參考文獻

- 郭金棟，1999，海岸工程，中國土木水利工程學會。
- 郭一羽，2001，海岸工程學，文山書局。
- 吳立中、董東環、莊士賢、李汴軍，2000，國光平台與新竹浮標波高相關性分析，中央氣象局天氣分析與預報研討會。
- Goda, Y., 1985, Random Seas and Design of Marine Structures, University of Tokyo.

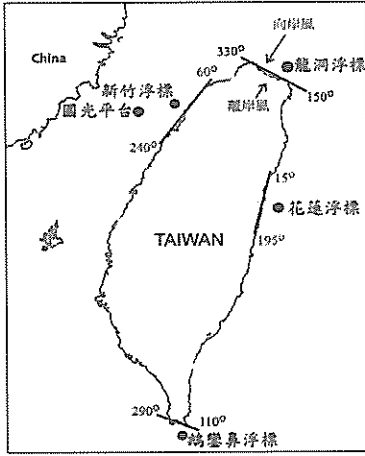


圖 2 本文選用的測站位置

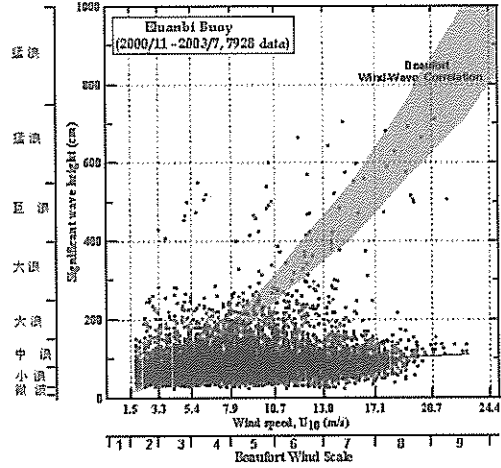


圖 5 鵝鑾鼻浮標實測風浪與蒲福風浪級關係(全部資料)

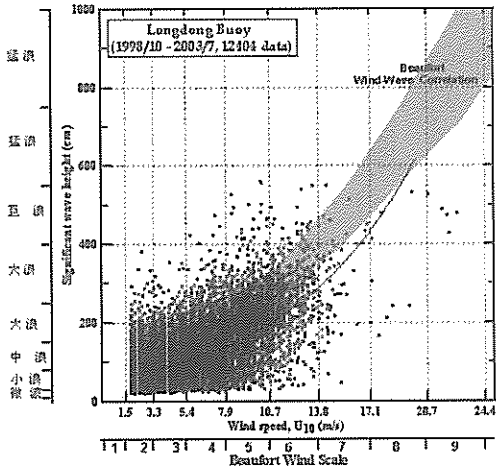


圖 3 龍洞浮標實測風浪與蒲福風浪級關係(全部資料)

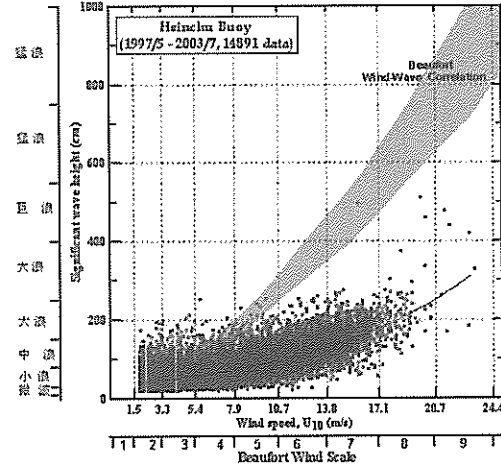


圖 6 新竹浮標實測風浪與蒲福風浪級關係(全部資料)

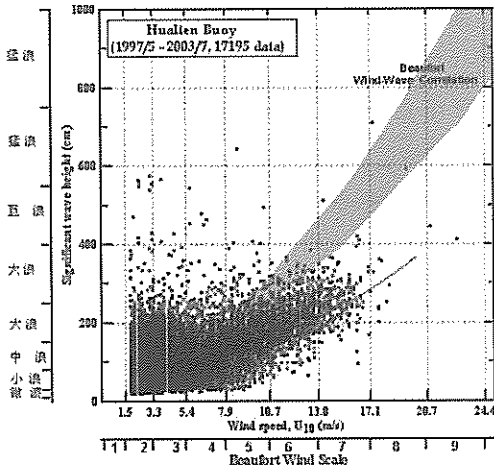


圖 4 花蓮浮標實測風浪與蒲福風浪級關係(全部資料)

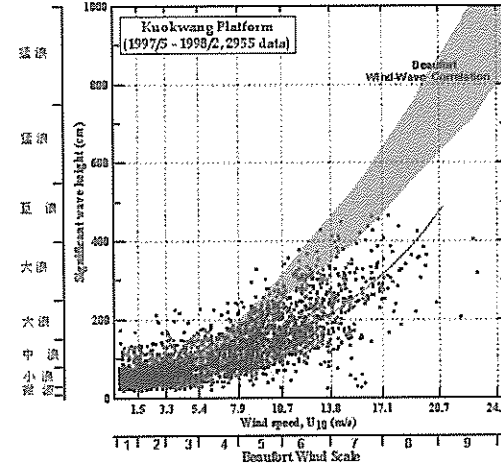


圖 7 國光平台實測風浪與蒲福風浪級關係(全部資料)

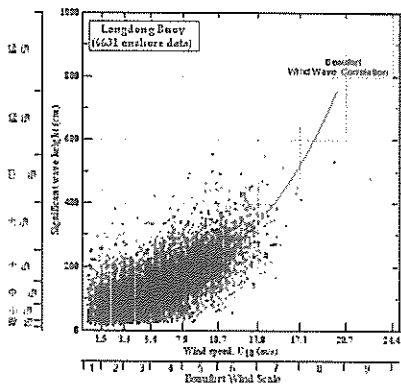


圖 8 龍洞浮標吹向岸風時的風浪關係

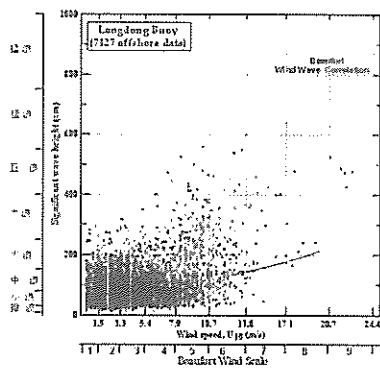


圖 9 龍洞浮標吹離岸風時的風浪關係

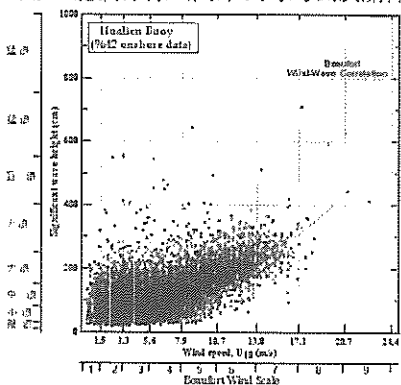


圖 10 花蓮浮標吹向岸風時的風浪關係

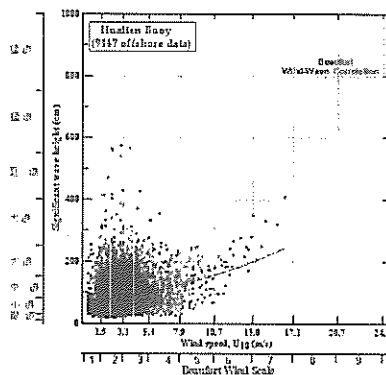


圖 11 花蓮浮標吹離岸風時的風浪關係

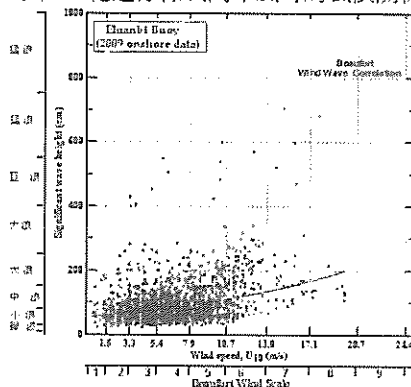


圖 12 鵝鑾鼻浮標吹向岸風時的風浪關係

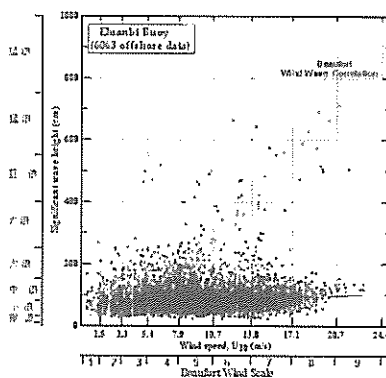


圖 13 鵝鑾鼻浮標吹離岸風時的風浪關係

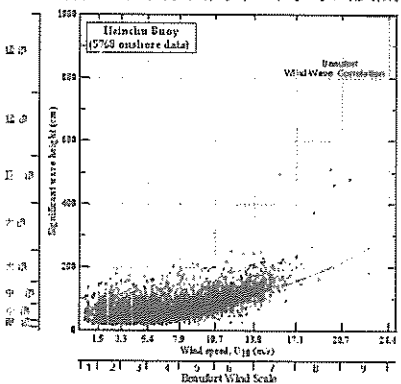


圖 14 新竹浮標吹向岸風時的風浪關係

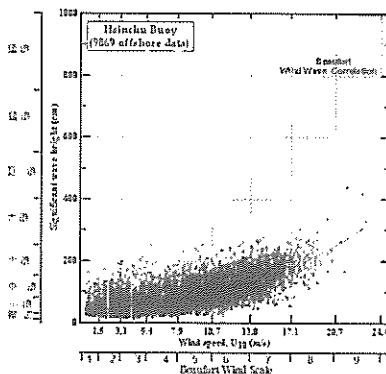


圖 15 新竹浮標吹離岸風時的風浪關係

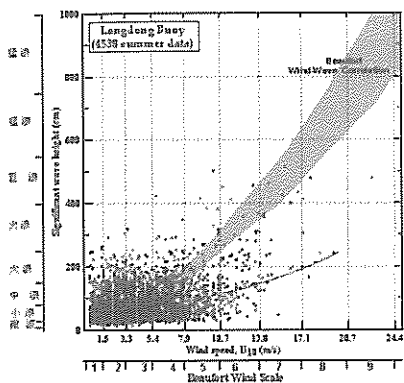


圖 16 龍洞浮標夏季時的風浪關係

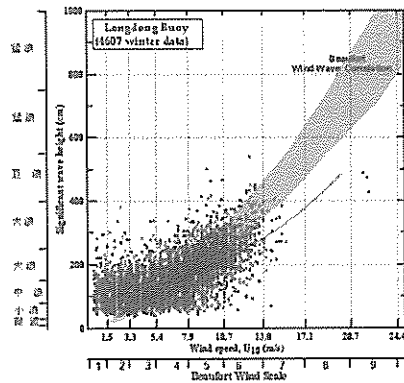


圖 17 龍洞浮標冬季時的風浪關係

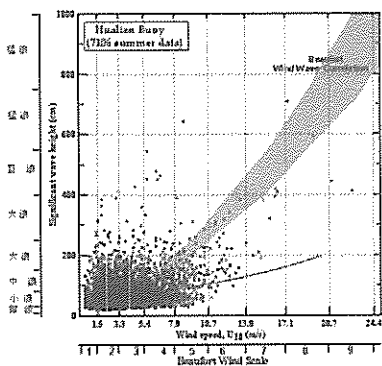


圖 18 花蓮浮標夏季時的風浪關係

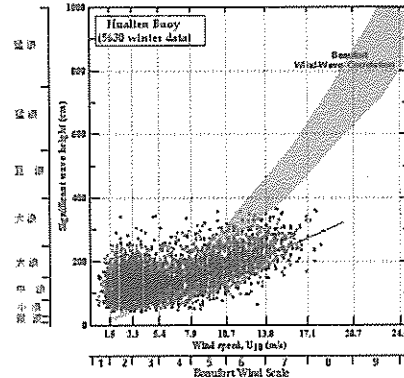


圖 19 花蓮浮標冬季時的風浪關係

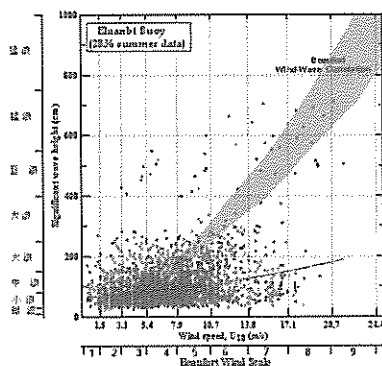


圖 20 鵝鑾鼻浮標夏季時的風浪關係

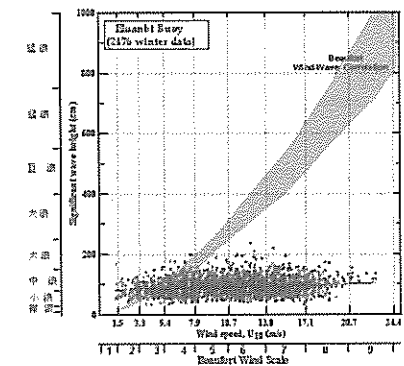


圖 21 鵝鑾鼻浮標冬季時的風浪關係

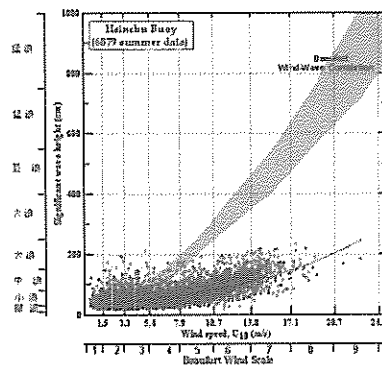


圖 22 新竹浮標夏季時的風浪關係

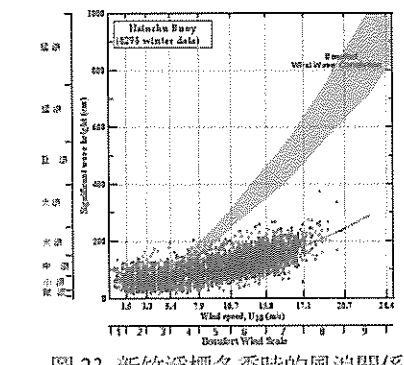


圖 23 新竹浮標冬季時的風浪關係