

國立交通大學土木工程研究所
Institute of Civil Engineering National Chiao Tung University

碩士論文

以衛星測高資料探討台灣海域之外海
與近岸波高之統計特性

Wave-height statistics at offshore and nearshore
waters around Taiwan using sea surface heights
observation of satellite altimeters

指導教授：張憲國 博士
研究生：陳俊榮

中華民國一百年七月

以衛星測高資料探討台灣海域之外海與近岸波高之 統計特性

研究生：陳俊榮

指導教授：張憲國 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

本文使用 ERS-2、ENVISAT-1 及 JASON-1 等三顆衛星的測高資料，將全台灣周圍海域依海底地形及距岸遠近分區，加以分析 2002 年至 2008 年間衛星測高資料在不同地區的波高分布結果，綜合三顆衛星的測高資料之每月波高進行分布套配以了解波高之最適分布，並以 K-Means 群集分析方法明確指出夏冬季節分類的月份。本文另外使用定點港口實測資料，推定各港口波高資料在空間上的分布情形，及夏冬季節分類之月份。

最後比較衛星測高資料與定點港口實測波高後發現，衛星測高資料約為定點實測波高之 1~6 倍，其中臺北港更有 12 倍差異。整體來說台灣周圍海域的衛星測高資料與定點實測波高並無明顯關係，且外海波浪資料比近岸較無一致性。本文藉此希望能建立台灣周圍外海各區域與其近岸之關係，若是能從廣域範圍之衛星測高資料得知近岸波浪分布之情形，則必能夠在未來對於海洋工程或是海象預測有一定程度之幫助。

Wave-height statistics at offshore and nearshore waters around Taiwan using sea surface heights observation of satellite altimeters

Author : Chun-Jung Chen

Advisor : Dr. Hsien-Kuo Chang

Institute of Civil Engineering National Chiao Tung University

ABSTRACT

The thesis is to investigate Wave-height statistics at offshore and nearshore waters around Taiwan using sea surface heights (SSH) observation of satellite altimeters. SSH data collected by ERS-2, ENVISAT-1 and JASON-1 during 2002 to 2008 were separated into monthly groups to fit possible distributions. K-Means method, which is a kind of cluster analysis, is used to group seasonal months of summer time and winter time. Probability fitting and K-means method are also applied to measured wave data at some observations established by the Harbor and Marine Technology Center.

Comparison between SSHs and observed wave heights in separated zones show that SSHs are higher than observed wave heights in common. In Taipei Harbor, SSHs are 12 times than observed wave heights. SSHs at offshore and nearshore waters around Taiwan have low correlation coefficients with corresponding observed wave heights. The paper is a prior study to connect SSHs to observed wave heights at some particular points. In further researches more data can be carried out to develop solid connection between SSHs and observed wave heights for application of ocean engineering and wave forecasting.

誌謝

兩年的碩班生涯將要劃下句點了，想一想也在交大待了六個年頭，雖然在大學時期沒有修過恩師 張憲國教授的課，但是僅僅兩年的時間卻也承蒙老師許多的細心教誨。亦師亦友的風格讓我獲益良多，上課時候認真細心的講解各種物理意義，平常時候也會跟我們開開玩笑，強調邏輯的正確訓練使得學生能夠在學術及各種方面都有獨立思考的能力。感謝老師，在此致上對您最高的敬意。另外也謝謝論文審核的委員們，何良勝科長、劉勁成學長及陳蔚瑋學長，感謝諸位先進對於這份論文的建議，經過改正後讓其更趨完善整齊。

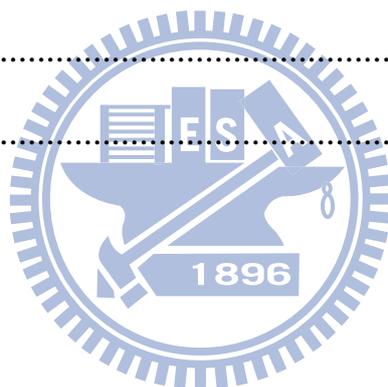
偶爾才會出現在研究室的勁成學長，四次出差都承蒙你的照顧了，稍微訓練過的酒量雖然不到千杯不醉但卻也足夠自保了。同宗的蔚瑋學長，感謝你在研究室付出的一切，替我們學弟妹們排解了許多困難。還有畢業的力豪、信昱大大、俊儒、奐辰以及政杰大大，謝謝各位在學習心態及人生思考都給予我莫大的幫助。永遠的碩一新生明璋大大，也謝謝你這兩年來的嘴砲式教導，向著你看齊讓我的嘴上功夫也不容易輸人。420 裡面最早認識的小嘉，所有大大裡應該算是跟你最熟了吧，除了在學術方面的許多指點，你也是我面對未來人生的一盞明燈。再來是我的好同學們：同窗六年的姿宏，給妳的忠言讓你委屈了六年，這是致歉不是致謝；王董及勳哥，炒熱研究室的氣氛就是我們設備三人組的責任。lag 很大的偉恩，祝福你順利成為死公務人員，不過也希望你別再當怪咖了！好似偉恩他爸的賢銘，兩年來實在是給你罩很大，多謝了，希望有朝一日你還能來幫我揉麵糰。張門的學弟妹們，紳彥我知道你海量不用擔心；米血你要加油，要想辦法證明自己；小嬛不要被帶壞了，鬼跑嬛三人組我只是說說而已。希望你們跟立儒與家志能夠讓研究室更加有向心力，也祝福你們五個之後論文順利完成。

最後要感謝我的父母，沒有你們就沒有今日的我，謝謝你們的養育之恩，對於我的升學之路總是永遠的支持。還有陪伴我碩班生涯的女友小蓉，謝謝妳包容我那兩年來時而喊著休學的陰晴不定，辛苦妳了。感謝所有我認識的人，你們都可能是啟發我人生的大功臣，謝謝。

目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
符號說明.....	IX
第一章 緒論.....	1
1-1 研究動機與目的.....	1
1-2 文獻回顧.....	2
1-3 文章架構.....	3
第二章 波高資料來源及分區劃分.....	4
2-1 衛星測高資料.....	4
2-2 定點實測波高資料.....	5
2-3 區域劃分之原則.....	6
第三章 衛星測高資料與波高時空分布特性.....	9
3-1 波高機率分布函數.....	9
3-1-1 機率分布密度函數.....	9
3-1-2 Ksdensity 法.....	11
3-1-3 評估指標.....	13
3-2 空間最適波高分布之推定.....	15

3-3 波高季節特性.....	25
3-3-1 K-means 群集分析.....	25
3-3-2 波高之季節分類.....	25
第四章 定點波高資料之時間特性.....	27
4-1 最適波高分布之推定.....	27
4-2 波高分布之季節特性.....	34
4-3 與衛星測高資料之比較.....	41
第五章 結論與建議.....	48
5-1 結論.....	48
5-2 建議.....	49
參考文獻.....	50



圖目錄

圖 2-1 台灣周圍海域海底地形圖 (引自國科會海洋科學研究中心)...	7
圖 2-2 本文劃分衛星測高資料的分區範圍示意圖.....	8
圖 3-1 Ksdensity 推估之機率密度函數示意圖.....	12
圖 3-2 不同資料區間寬度 h 之機率函數圖.....	13
圖 3-3 S1 區近岸之波高機率密度分布圖.....	18
圖 3-4 (如圖 3-3, S1 區遠岸).....	18
圖 3-5 S2 區近岸之波高機率密度分布圖.....	19
圖 3-6 (如圖 3-5, S2 區遠岸).....	19
圖 3-7 S3 區近岸之波高機率密度分布圖.....	20
圖 3-8 (如圖 3-7, S3 區遠岸).....	20
圖 3-9 S4 區近岸之波高機率密度分布圖.....	21
圖 3-10 (如圖 3-9, S4 區遠岸).....	21
圖 3-11 S5 區近岸之波高機率密度分布圖.....	22
圖 3-12 (如圖 3-11, S5 區遠岸).....	22
圖 3-13 S6 區近岸之波高機率密度分布圖.....	23
圖 3-14 (如圖 3-13, S6 區遠岸).....	23
圖 3-15 S7 區近岸之波高機率密度分布圖.....	24
圖 3-16 (如圖 3-15, S7 區遠岸).....	24
圖 4-1 定點臺北港之波高機率密度分布圖.....	28
圖 4-2 定點安平港之波高機率密度分布圖.....	30
圖 4-3 定點花蓮港之波高機率密度分布圖.....	31

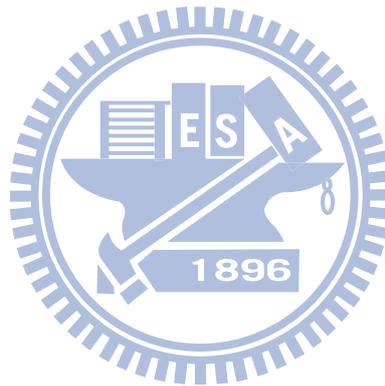
圖 4-4 定點臺中港之波高機率密度分布圖	32
圖 4-5 定點高雄港之波高機率密度分布圖	33
圖 4-6 臺北港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖	35
圖 4-7 臺中港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖	36
圖 4-8 安平港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖	37
圖 4-9 高雄港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖	38
圖 4-10 花蓮港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖	39
圖 4-11 臺北港實測資料與 S1 地區近岸測高資料月平均圖	43
圖 4-12 (如圖 4-11, S1 地區遠岸)	43
圖 4-13 臺中港實測資料與 S6 地區近岸測高資料月平均圖	44
圖 4-14 (如圖 4-13, S6 地區遠岸)	44
圖 4-15 安平港實測資料與 S5 地區近岸測高資料月平均圖	45
圖 4-16 (如圖 4-15, S5 地區遠岸)	45
圖 4-17 高雄港實測資料與 S4 地區近岸測高資料月平均圖	46
圖 4-18 (如圖 4-17, S4 地區遠岸)	46
圖 4-19 花蓮港實測資料與 S2 地區近岸測高資料月平均圖	47
圖 4-20 (如圖 4-19, S2 地區遠岸)	47

表目錄

表 3-1 不同空間波高四種機率密度函數套配之結果.....	17
表 3-2 利用最適波高分布的推定參數分類各地區夏冬季節的月份..	26
表 4-1 臺北港波高最適分布之評估結果.....	28
表 4-2 臺北港示性波高與各分布函數評估結果 (李, 2007).....	29
表 4-3 安平港波高最適分布之評估結果.....	29
表 4-4 安平港示性波高與各分布函數評估結果 (李, 2007).....	30
表 4-5 花蓮港波高最適分布之結果.....	31
表 4-6 花蓮港示性波高與各分布函數評估結果 (李, 2007).....	31
表 4-7 臺中港波高最適分布之評估結果.....	32
表 4-8 高雄港波高最適分布之評估結果.....	33
表 4-9 套配臺北港各月份波高機率密度函數之評估.....	35
表 4-10 套配臺中港各月份波高機率密度函數之評估.....	36
表 4-11 套配安平港各月份波高機率密度函數之評估.....	37
表 4-12 套配高雄港各月份波高機率密度函數之評估.....	38
表 4-13 套配花蓮港各月份波高機率密度函數之評估.....	39
表 4-14 以最適波高分布的推定參數分類各港口波浪之夏冬分季節.	40

符號說明

α	Weibull 分布之形狀參數(式 3-1)
β	Weibull 分布之尺度參數(式 3-1)
α	Gamma 分布之形狀參數(式 3-3)
β	Gamma 分布之尺度參數(式 3-3)
σ	Log-Normal 分布之標準偏差(式 3-7)
μ	Log-Normal 分布之平均值(式 3-7)
σ	Normal 分布之標準偏差(式 3-9)
μ	Normal 分布之平均值(式 3-9)
h	Ksdensity 法之資料區間寬度
AE	絕對誤差(absolute error)
ΔR^2	殘餘確定係數(residual of coefficient of determination)
μ_i	K-Means 群集分析中 S_i 群體的平均
S_i	K-Means 群集分析之群體



第一章 緒論

1-1 研究動機與目的

台灣位於太平洋西側，四面環海的地理位置使得我們與海洋環境有著重大關聯，然而對於廣大的海洋我們依然只能一窺一二，因為波浪是一種複雜的波動現象，會隨著空間與時間有不同的變化。然而，在這些不規則的起伏表面卻隱藏著某種特性，此特性通常就需要統計的方法來分析瞭解。Longuet-Higgins (1952)以理論證明了波高的機率分布為 Rayleigh 分布，但就統計學理論而言，這樣的結果並無法滿足海面上各種的波浪現象，只能描述部份波高機率分布是趨近於 Rayleigh 分布。

過去台灣對於波浪的觀測一般使用各種波浪儀(如水壓式、超音波式、電極式、浮標式等)，雖然能夠簡單的觀測到波浪、週期、波向等的海象資料，但是其觀測之水深範圍約在 50 公尺以內，對於廣大的海洋是屬於較為近岸的波浪特性，且資料常因儀器的損壞而無法有效且連續的做為分析資料。另一方面，儀器往往是設置在某幾個測站的，這對於想要了解整個海域的風浪特性似乎稍嫌不足。對於遠域的外海則因為儀器設置的困難，而無法取得外海相關之波浪及氣象資料。隨著科技日新月異，衛星測高技術是可快速獲取大區域或整體地表資訊的科技，若將之發展並應用於海洋上，可以擷取廣大的海洋波場及風速等海象資料，解決傳統觀測方法的缺失，故利用衛星測高技術則是另一套觀測海洋風浪的有效方法。

因此本文使用 ERS-2、JASON-1 及 ENVISAT-1 三顆衛星所搭載的雷達測高計得到的測高資料，對於台灣周圍的外海海域做其波高分布特性的探討，並以傳統定點浮標之類的波高資料做為一個比較的依據，嘗試建立起衛星測高資料與其之間的關係，希望未來對於全台灣各地方之海洋工程施作或是海象預測等等，能有進一步的幫助。

1-2 文獻回顧

對於衛星測高於波浪之研究有 Cox 等人(1999)同時使用實測及衛星波高資料與全球波浪推算模式(GROW)進行比較，模式與其波高之誤差約為 0.68m。Abdalla 等人(2004)應用 ERS 及 ENVISAT 之衛星波高資料於 ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) 歐洲中尺度預報中心風速之數值波浪推算，以衛星資料進行模式之同化，提高波浪推算之精度。Skandrani(2004)等人亦以多顆衛星資料進行波浪模式之同化，以預測全球之波浪。而衛星波高資料之校正與改正則有 Cotton 等人(2002, 2003)、Queffeulou(2003)及 Ray 和 Beckley(2003)提出相關之方法。朱(2007)則是應用衛星測高資料發現台灣周圍海域波高與風速有著逐年增加的情況。

Longuet-Higgins (1952)藉著通訊學裡面有關雜訊的理論(Rice, 1944, 1945)，以(1)海面上的變動是一個高斯分佈的隨機過程。(2)這個變動是由無限多個具有相似的頻率，但是不同相位之正弦波所重疊累加而成的。(3)這些波浪的相位分佈是所謂的隨機相位(random phase)等三項基本假設為前提，證明了海面上的波高應該近似於 Rayleigh 分佈。雖然 Longuet-Higgins 以理論證明了波高的機率分佈應該是 Rayleigh 分佈之後，但幾十年來仍有諸多學者認為，在不同的實際狀況下，Rayleigh 分布適合度也不同。Pan(1992)利用中國沿海各地至少三年以上的波浪資料，驗證出海上波高的機率分布為 Log-Normal 分布。錢(1991)也提到海面波高的機率分佈為 Normal 分布；此外，Guedes (2001)也根據葡萄牙的港外波高資料，証實出波高合適的機率分布為 Weibull 分布。江(2006)提出以 2004 年花蓮港全年資料探討波高分布及統計特性。李(2007)對臺北港、花蓮港以及安平港所做的波高分布及統計特性。賴(2008)更針對台灣海域的短期波高與週期做最適機率分布的研究結果。

由往昔的文獻可以知道，衛星可以提供無論是在廣度或是密度都比傳統測量方式還要來的優異的資料，因此本文即是希望以衛星測高資料探討台灣周圍海域的波浪特性。

1-3 文章架構

本文主要使用衛星測高資料及定點港口實測資料來探討台灣周圍海域波浪特性，並依照五個章節內容，依序探討其空間及時間上的分布特性。

第一章是前言，主要說明本文研究動機與目的、研究方法及文獻回顧。

第二章則是簡介衛星測高資料與定點港口實測資料來源以及本文將全台灣劃分成七個區塊，遠近岸各兩個小區域，總計 14 個分塊，其中的劃分原則以及範圍界線。

第三章則是主要分析衛星測高資料在空間上的分布特性，以及使用群集分析，更客觀地決定兩季之範圍。

第四章主要分析全台灣五個港口之實測資料，及其季節分類特性，最後與衛星測高資料做一比較，藉此了解兩種資料之關連性。

第五章為結論與建議，對於前面幾章之結果定出結論，並針對未來可繼續深入之課題做建議。

第二章 波高資料來源及分區劃分

2-1 衛星測高資料

本文使用之衛星測高資料是由荷蘭代爾夫特理工大學建立的雷達高度計資料庫系統(Radar Altimeter Database System)而來，總計採用三顆衛星之測高資料，分別為 ERS-2(European Remote Sensing)、ENVISAT-1(Environmental Satellite)及 JASON-1。為配合定點實測波高資料，共同採計時間為 2002 年至 2008 年，以下對各衛星做基本介紹：

1. ERS-2

ERS-2 為歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 於 1995 年發射，是以太陽同步軌道運行，軌道高度約為 785 公里，軌道傾斜角約為 98.5 度，軌道周期目前是以 35 天為一周期運作。

2. ENVISAT-1

ENVISAT-1 是歐洲迄今建造最大也是費用最高的地球環境觀測衛星，總研製成本約 25 億美元，於 2002 年七月發射，衛星上載有 10 種探測設備，其中 4 種是 ERS-1/2 所載設備的改進型。ENVISAT-1 數據主要用於監視環境，即對地球表面和大氣層進行連續的觀測，供製圖、資源勘查、氣象及災害判斷之用。

3. JASON-1

JASON-1 於 2001 年 12 月在美國加州空軍基地發射，屬於海洋觀測衛星，由法國空間中心與美國航宇局噴氣推進實驗室聯合研製，接替已經營運了 9 年的 Topex/Poseidon 衛星，為國際科學界迅速提供幾個小時或幾天內海洋狀態的有關情況。軌道高度為 1336 公里的圓形軌道，傾角 66 度，地面重複訪問周期為 10 天，全球數據覆蓋範圍為 66°N~66°S。

2-2 定點實測波高資料

本文採用的定點實測波高資料來自交通部運輸研究所港灣技術研究中心，主要採計 2002 年至 2008 年臺北港、臺中港、安平港、高雄港及花蓮港等五個港口。

臺北港波浪資料之蒐集，為淡水觀測樁水下 5 公尺處之 Inter Ocean S-4ADW 潮波儀所測得之 2Hz 水位變化時間序列處理而得。較早於 1996 年 10 月至 2004 年 9 月舊觀測樁測站，2004 年 12 月以後更換之新觀測樁測，因 S-4 觀測儀器老舊，另更換為 NORTEK 公司之剖面海流表面波浪與潮汐之監測系統(AWCP)。缺漏部分為 2002 年 1~3 月、2004 年 10~11 月、2006 年 5 月、2007 年 10~11 月及 2008 年 3 月。

臺中港波浪之觀測方面，因臺中港務局北防波堤延長工程開始展開整平拋石工作影響到儀器安全，2000 年 8 月 18 日暫時停止量測並將設備收回。2003 年 5 月臺中港務局北防波堤延長工程完成後本所隨即在 2003 年 7 月 5 日就安裝完成(挪威 NORTEK 公司)波高波向與剖面海流即時傳送監測系統，安裝在臺中港北防波堤堤頭 150 公尺外、水深 25 公尺處。缺漏部分為 2002 年至 2003 年 7 月、2005 年 12 月、2007 年 11~12 月及 2008 年 10~12 月。

安平港波浪資料之蒐集，為安平觀測樁水下 5 公尺處之 Inter Ocean S-4ADW 潮波儀所測得之 2Hz 水位變化時間序列處理而得，因 S-4 觀測儀器老舊，另更換為 NORTEK 公司之剖面海流表面波浪與潮汐之監測系統(AWCP)。缺漏部分為 2002 年 12 月及 2003 年 3 月與 12 月。

高雄港以往的各项觀測工作均是視工程需要才臨時設立觀測站，但海象觀測應該是屬於長期的觀測，所以港灣技術研究中心在八十九年度成立預算購置挪威 NORTEK 公司之剖面海流與波浪即時監測系統，2000 年 12 月中旬經會勘後選定在高雄一港口與二港口間，亦即高雄市中區污水處理廠附近海域，以進行長期觀測。2001 年 6 月 23 日奇比颱風經過形成之外圍環流影響以致海底電纜遭受到外力

拉扯受損後，以自記方式量測，2002 年 6 月重新補放運轉狀況良好，本站於 2005 年 8 月移至第二港口附近海，水深約 18m。缺漏部分為 2002 年 1~5 月、2003 年 1 月與 12 月、2004 年 1~2 月，2005 年 4~5 月、2006 年 5~8 月、2007 年 1~2 月及 2008 年 12 月。

花蓮港部分則是在東防波堤往南延長 380 公尺水深 34 公尺處，於 2000 年 9 月 8 日安裝挪威 NORTEK 公司之剖面海流與表面波浪(波高、週期及波向)即時傳送監測系統(簡稱 AWCP)。缺漏部分為 2003 年 9 月、2006 年 8 月及 2008 年 12 月。

2-3 區域劃分之原則

國科會海洋科學研究中心海洋資料庫及台灣大學海洋研究所共同繪製的台灣周圍海域海底地形圖，示如圖 2-1。由圖 2-1 顯示，台灣沿岸海域有海脊(ridge)圍成海溝(oceanic trench)，如東北角之沖繩海溝或南端的呂宋海溝等，波浪經過這些區域時，可能因為地形水深改變而產生特性上的變化，因此本文利用海底地形特性，將台灣周圍海域切割成七個分區。

S1 區分界線為新北市貢寮、瑞芳區交界向外海沿沖繩海槽延伸，與宜蘭縣蘇澳港沿著琉球島弧延伸，此二延伸線至東經 123 度為止所包含之區域即為 S1 區。S2 區分界線為台東成功漁港沿呂宋島弧往南延伸至北緯 20 度，與 S1 區另一條分界線所包圍之區域即為 S2 區。依此順序，S3 區包含至恆春鵝鑾鼻燈塔往南沿恆春海脊延伸之範圍。S4 區則為高雄永安天然氣廠沿著台灣海峽大陸棚南端整體方向延伸，與恆春海脊包含之範圍。S5 區為嘉義東石沿水平方向延伸至東經 118 度，與大陸棚南端包含之範圍。S6 區為新竹南寮漁港沿整體新竹海岸法線方向向外延伸，與 S5 區另一條界線包含之範圍。S7 區則為 S6 與 S1 之分界線所包含之範圍，即為台灣整個北部海岸。

而台灣東西岸地形水深變化差異極大，因此在距岸遠近的部分若依照水深做為分區依據，則會造成台灣東岸的選取上太過接近陸地範圍。依據漁業署規定，沿岸漁業為距離岸邊 12 海浬之內，近岸漁業為 12 至 200 海浬，有鑑於 12 海浬在整個台灣周圍海域是很小範圍

的，因此本文把距離延伸至距岸 50 公里，此距離之內為本文定義之近岸區，超過此限則為遠岸區。而本文採用之衛星測高資料範圍為東經 118 度至 123 度，北緯 20 度至 27 度，分區示意圖如圖 2-2。

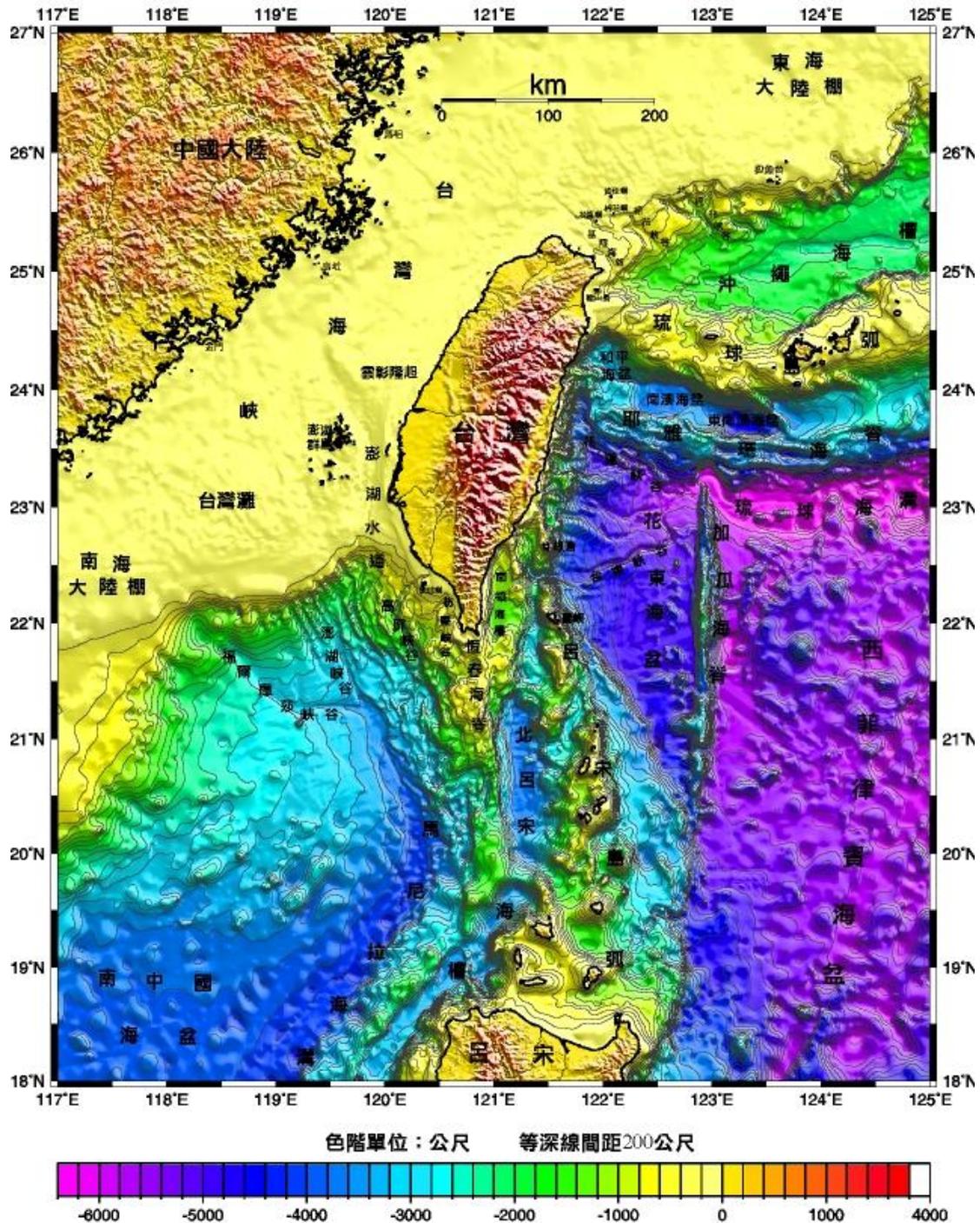


圖 2-1 台灣周圍海域海底地形圖 (引自國科會海洋科學研究中心)

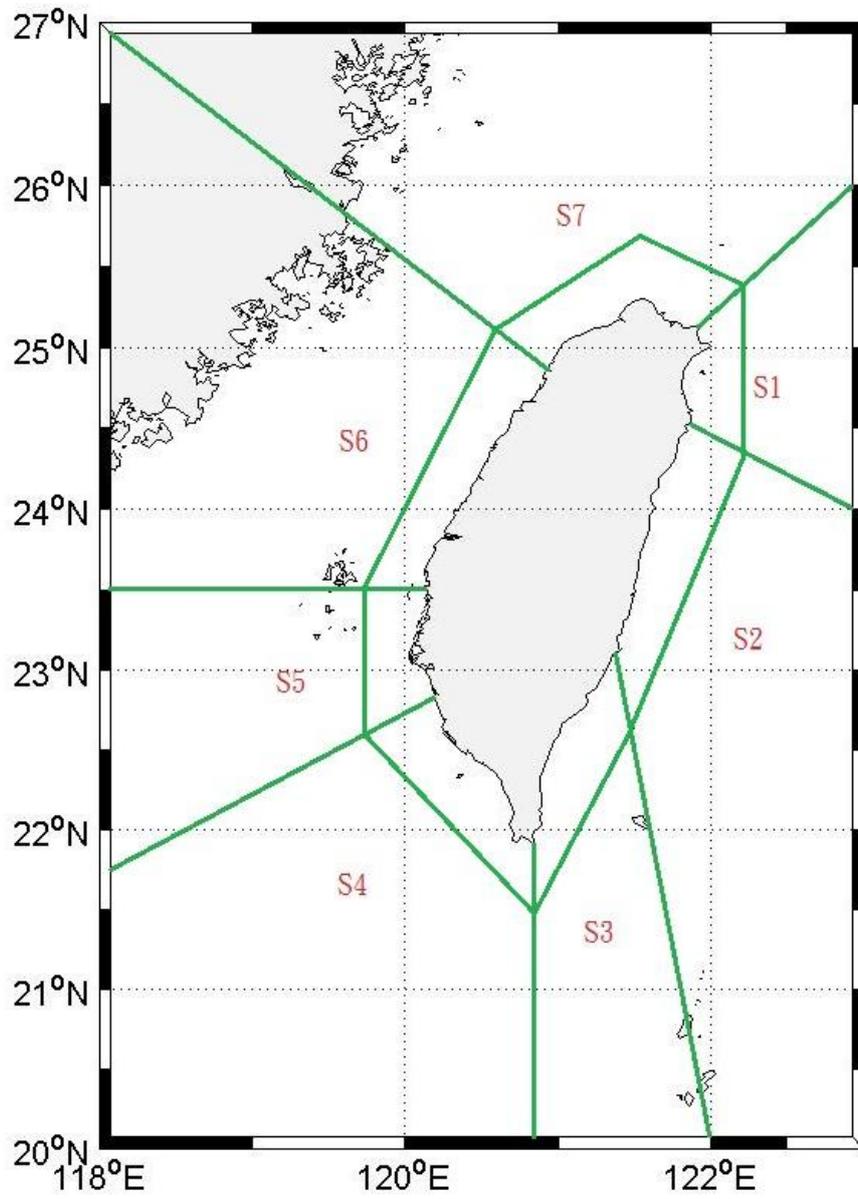


圖 2-2 本文劃分衛星測高資料的分區範圍示意圖

第三章 衛星測高資料與波高時空分布特性

3-1 波高機率分布函數

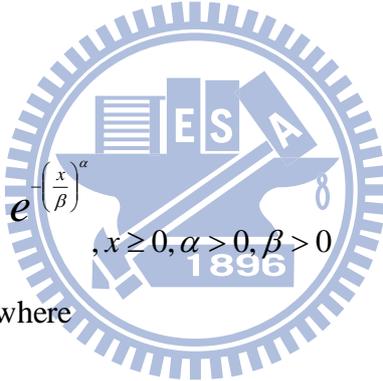
往昔研究認為要描述海面上的波浪現象，Rayleigh 分布是最能描述此情形之分布，但是實際情況上，海面上的波浪是非常複雜的，因此本文就前人研究台灣各地區情況之結果，採用 Weibull、Gamma、Log-Normal 與 Normal 四種分布做為本文選定之機率密度分布函數。

3-1-1 機率分布密度函數

本文所使用的機率密度函數分布介紹如下：

1. Weibull 分布

機率密度函數為

$$f(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, & x \geq 0, \alpha > 0, \beta > 0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3-1)$$


其中 β 為尺度參數 (scale parameter)， α 為形狀參數 (shape parameter)。

機率函數為

$$F(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, & x \geq 0, \alpha > 0, \beta > 0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3-2)$$

2. Gamma 分布

機率密度函數為

$$f(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{x}{\beta}}, & x \geq 0, \alpha > 0, \beta > 0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3-3)$$

機率函數為

$$F(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\frac{x}{\beta}} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}} d\left(\frac{t}{\beta}\right), & x \geq 0, \alpha > 0, \beta > 0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3-4)$$

$$= \begin{cases} P\left(\frac{x}{\beta}, \alpha\right), & x \geq 0, \alpha > 0, \beta > 0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!(m+\alpha)} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{m+\alpha}, & x \geq 0, \alpha > 0, \beta > 0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}$$

其中 α 及 β 均參數， $\Gamma(\alpha)$ 為 Gamma 函數， $P(x/\beta, \alpha)$ 為不完整 Gamma 函數 (incomplete Gamma function)，二者分別定義如下。

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (3-5)$$

及

$$P(x/\beta, \alpha) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\frac{x}{\beta}} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (3-6)$$

式(3-6)中當之 $x \rightarrow 0$ ， $P(0, \alpha) \rightarrow 0$ ，當 $x \rightarrow \infty$ ， $P(0, \alpha) \rightarrow 1$ 。

3. Log-Normal 分布

機率密度函數

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(x)-\mu]^2}{2\sigma^2}}, x \geq 0, -\infty \leq \mu \leq \infty, \sigma > 0 \quad (3-7)$$

其中 σ 為標準偏差(standard deviation)， μ 為平均值(mean value)

機率函數為

$$F(x) = \frac{1}{2} (1 + \operatorname{erf}(\frac{\ln x - \mu}{\sqrt{2}\sigma})), \quad 0 < x < \infty \quad (3-8)$$

4. Normal 分布

為常態分布的機率密度函數，示如式(3-9)：

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty, -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0 \quad (3-9)$$

常態分布主要有兩個參數， σ 為標準偏差(standard deviation)， μ 為平均值(mean value)。且由式(3-10)及式(3-11)推算標準偏差及平均值：

$$\mu = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3-10)$$

$$\sigma^2 = s^2 = \frac{1}{N-1} (\sum_{i=1}^N x_i - \bar{x})^2 \quad (3-11)$$

機率函數為

$$F(x) = \frac{1}{2} (1 + \operatorname{erf}(\frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma})), \quad -\infty < x < \infty \quad (3-12)$$

其中 $\operatorname{erf}(x)$ 為誤差函數(error function)，其定義如下

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3-13)$$

3-1-2 Ksdensity 法

Kernel Smoothing Method 是一種不需要推求參數可將資料本身推估出一連續性密度函數的方法，即為一種無因數推定法。其理論可參考 Bowman (1997)，以下對其做一簡單介紹：

假設有一隨機變數 $X_1, X_2 \dots X_n$ ，則會得到以下機率密度函數

$$\hat{f}(x, h) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (3-14)$$

其中 K 為核函數(Kernel function)， h 為資料區間寬度，如圖 3-1。

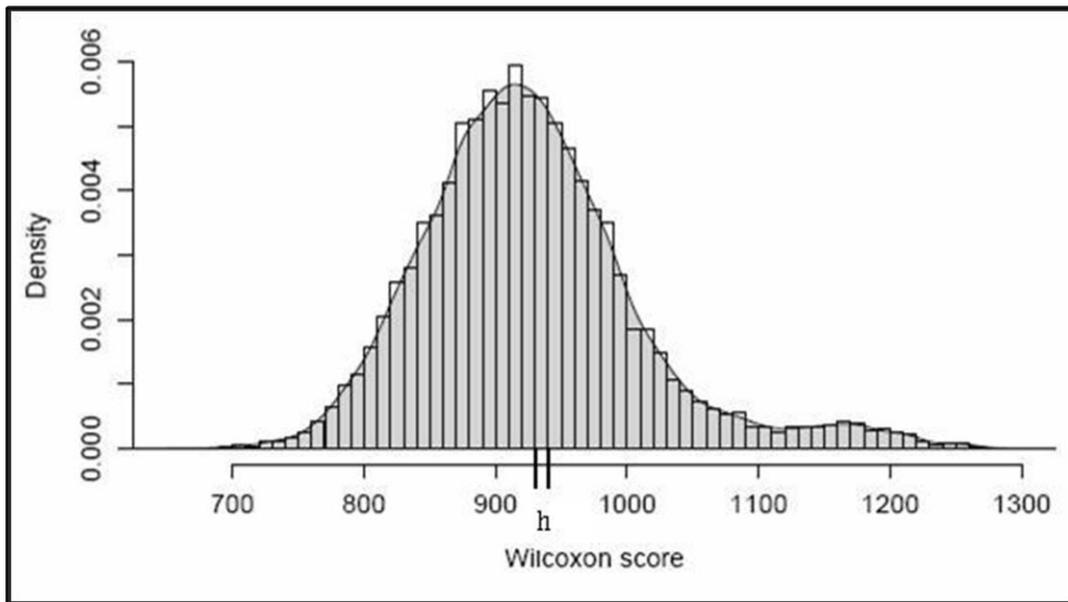


圖 3-1 Ksdensity 推估之機率密度函數示意圖

本文將資料代入 Matlab 軟體中之 Ksdensity 指令推估出實測值之機率密度，而在 Matlab 軟體中 Kernel function 是採用 Normal 型式，公式如下：

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (3-15)$$

資料區間寬度 h 為影響推估出的實測值機率密度圖型平滑化的主要因素，圖 3-2 顯示出不同的區間寬度所推估出的結果，當 h 取得越小函數圖型會趨近於不規則化導致與各分布函數套配時，增加分析的困難；而當 h 取得越大，則會越趨向於 Normal 分布。而 Matlab 軟體將資料分成 100 個區間，由直方圖分組觀念可知，區間分組數量將會影響到資料分析結果，太多會造成分析困難，太少則會分析不出資料特性，所以利用 Ksdensity 方法應該可以得到連續機率分布結果。

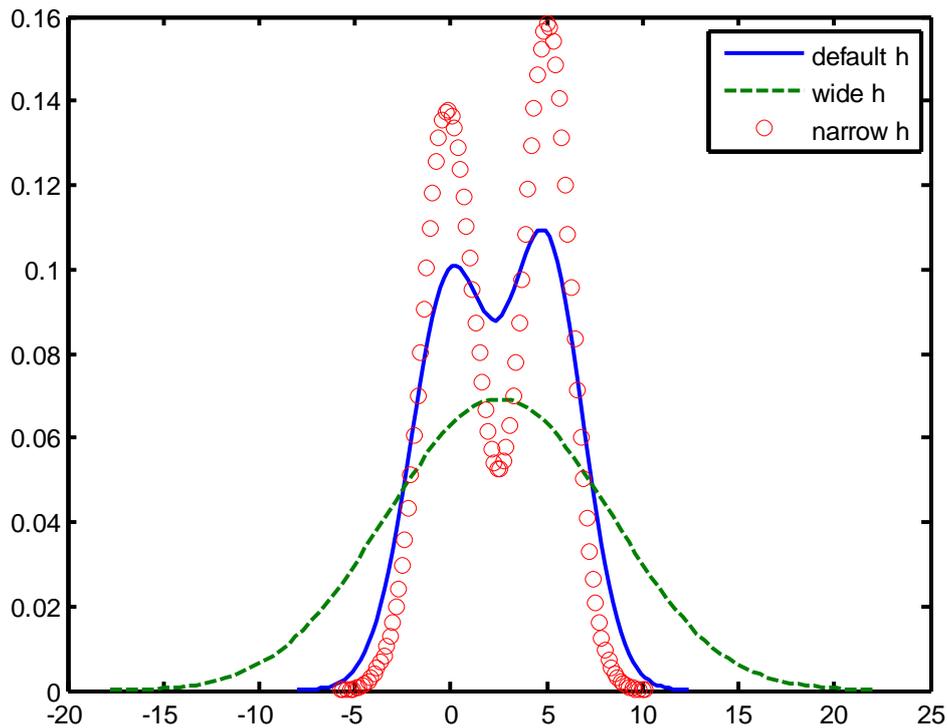


圖 3-2 不同資料區間寬度 h 之機率函數圖

3-1-3 評估指標

本文將衛星測高資料經過所選四種機率密度函數套配後，由所推估出來的參數計算出一代表之示性波高，再將此波高值與原始資料之前三分之一大之所有波高值平均後做比較，故其結果只有一個值，因此選用絕對誤差 AE(absolute error)做為評估指標，另外，Ksdensity 法套配之機率密度函數對其餘四種機率密度函數之吻合程度，則可以相關係數 R 表示之。兩種指標之差異在於，若是從工程角度上則較為關心較大波高值，這時便可採用絕對誤差 AE(absolute error)做為推定最適波高分布之依據。若是想要關心整體所有波高值的分布情形，就需要以殘餘確定係數 ΔR^2 來做為依據。

1. 絕對誤差 AE(absolute error)：

絕對誤差為常用之統計學上的技巧，其定義如下：

$$AE = |Hm - Hc| \quad (3-16)$$

其中 Hm 及 Hc 為實測值與推估值。實測值的計算是將所有波高依照大小排序後，取前三分之一大的波高值做平均。推估值則是各種機率密度函數經由最大概似法先推估出其參數後，再將參數代回計算後即可求出。

2. 殘餘確定係數 ΔR^2 (residual of coefficient of determination) :

當兩個變數之關係強度可以用相關係數 R 來表示，其定義如下：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right]^{1/2}} \quad (3-17)$$

此值若取平方，在統計上代表另外之確定係數(Coefficient of Determination, R^2)或稱相關係數平方，其表示式為

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3-18)$$

上式中 Y_i 及 y_i 分別表示實測值及推估值。 R^2 值在 0 至 1 之間，當 R^2 值越接近 1，統計上代表 Y_i 變數的總變異量中，相對於迴歸模式所得之 y_i 的變異量百分比高低。Stephens (1986) 提出以 $n(1-R^2)$ 來探討極值分布之檢定指標，此值越低表示所計算出的迴歸模式的適配度 (goodness-of-fit) 越好。Lockhart and Spinelli (1990) 及 McLaren and Lockhart (1987) 也探討此指標檢定其它分布之適配度。

本文以各種機率函數配套 Ksdensity 計算樣本機率密度適合度時，因為所用之樣本個數相同，所以用 $\Delta R^2 = 1 - R^2$ ，殘餘確定係數 (residual of coefficient of determination)，即可代表 $n(1-R^2)$ 大小順序，而此值會界於 0 與 1 之間，並且與上述相對絕對誤差一樣以小值代表配套適合度較佳。

3-2 空間最適波高分布之推定

由衛星測高計所能取得的資料範圍非常廣泛，然而在不同地理位置之波高分布亦有所不同，在不考慮時間的影響下，本文依據前章所述之原則，將全台灣依照海底地形及近遠岸條件做分區，探討各地區關於空間上之波高分布。

本文蒐集 2002 年至 2008 年台灣周圍外海之衛星測高資料，依照各分區範圍分類，將類屬該地區之所有衛星測高資料投入上一節所述之四種機率密度函數做套配，並與原始資料之前三分之一大的資料平均做絕對誤差之評估，選擇絕對誤差最低之分布為最適該地區之機率密度分布。各地區波高分布圖如圖 3-3 至圖 3-16 所示，圖中圓點為衛星測高資料之分布情形，實線則為 Weibull 分布，虛線為 Gamma 分布，短虛線為 Log-Normal 分布，長虛線則是 Normal 分布。而評估最示分布結果如表 3-1，分區中佔台灣東部多數資料之宜蘭地區(S1)及花蓮台東地區(S2)為同樣情況，近岸為 Gamma 分布，而遠岸則為 Weibull 分布。在台東屏東地區(S3)則是不管近遠岸皆為 Normal 分布，高雄屏東地區(S4)皆為 Gamma 分布。台南地區(S5)在近岸為 Weibull 分布，遠岸為 Gamma 分布，臺中苗栗地區(S6)則又是不管近遠岸皆為 Weibull 分布。臺北地區(S7)近岸為 Gamma 分布，遠岸為 Normal 分布。

而因為本節在資料的選取上是不考慮時間，只考慮空間上的差異，因此若是僅採用前三分之一大的資料可能會有選取到颱風發生較多之月份資料，因此若是想要了解所有波高之符合情況，即使是用殘餘確定係數做為判斷，採各分布計算之殘餘確定係數最小值推定該分布為最能描述該地區所有波高。如圖 3-4 與圖 3-6 可明顯看出，S1 地區與 S2 地區之遠岸整體波高在 Log-Normal 分布上與實際資料最為貼近，因此該分布之 ΔR^2 最小，但是只看前三分之一大的資料時，其計算平均後的絕對誤差卻是 Weibull 分布為最好。因此，在不同情況之下所推定出的分布結果可能有所不同。上述結果與絕對誤差為依據之結果亦可以由表 3-1 發現，S1 地區近岸與 S2 地區近岸皆為 Gamma 分布，而此兩者之遠岸卻是 Log-Normal 分布最好，而非 Weibull 分布。

S3 地區近岸為 Gamma 分布，此結果雖然與使用絕對誤差判斷之 Normal 分布有所不同，但在使用絕對誤差做判斷依據時 Gamma 分布是僅次於 Normal 分布而已，而遠岸是 Log-Normal 分布，其可能原因為 S3 地區之涵蓋範圍較大，且該地區常為颱風經過之路徑等原因。S4 地區則不管近遠岸都是 Gamma 分布，與使用絕對誤差判定之結果相同。S5 地區近岸和遠岸都同為 Gamma 分布，但是近岸是與另一種推定結果不同。S6 地區則是不管近岸或遠岸都與上一種推定結果不同，但在近岸方面雖是 Log-Normal 分布，但是是以 Weibull 分布次之，遠岸則亦為 Log-Normal 分布最好。S7 地區近岸結果一致，皆為 Gamma 分布，遠岸地區則有所不同，整體波高以 Log-Normal 分布描述為最好。

由分析結果顯示，臺北地區(S7)在近岸方面與賴(2007)在臺北港之研究結果為 Gamma 分布相同，不管是利用絕對誤差或是殘餘確定係數判定皆為如此。花蓮港在內之近岸區域則與江(2006)結果一致，亦為 Gamma 分布。綜合所有結果發現，台灣周圍外海之波浪是無法使用同一種分布描述之，惟有配合空間上的不同使用較恰當的分布，才能在工程應用上推估合理的波高值。

表 3-1 不同空間波高四種機率密度函數套配之結果

分區		Weibull		Gamma		Log-Normal		Normal	
		AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2
S1	近岸	0.038	0.039	0.003	0.026	1.410	0.052	0.082	0.142
	遠岸	0.013	0.112	0.088	0.050	1.984	0.016	0.051	0.246
S2	近岸	0.007	0.029	0.000	0.028	2.311	0.055	0.058	0.115
	遠岸	0.021	0.065	0.028	0.014	1.562	0.007	0.030	0.140
S3	近岸	0.042	0.048	0.010	0.010	2.470	0.026	0.001	0.147
	遠岸	0.030	0.076	0.034	0.022	1.833	0.011	0.013	0.178
S4	近岸	0.090	0.075	0.007	0.025	1.469	0.054	0.081	0.168
	遠岸	0.013	0.016	0.011	0.003	1.599	0.034	0.061	0.096
S5	近岸	0.004	0.042	0.035	0.011	1.045	0.024	0.027	0.185
	遠岸	0.032	0.034	0.007	0.018	1.165	0.035	0.077	0.133
S6	近岸	0.033	0.032	0.053	0.020	5.175	0.039	0.068	0.236
	遠岸	0.025	0.073	0.080	0.035	4.400	0.015	0.044	0.285
S7	近岸	0.065	0.040	0.008	0.006	1.965	0.028	0.037	0.136
	遠岸	0.025	0.088	0.055	0.028	1.840	0.007	0.011	0.206

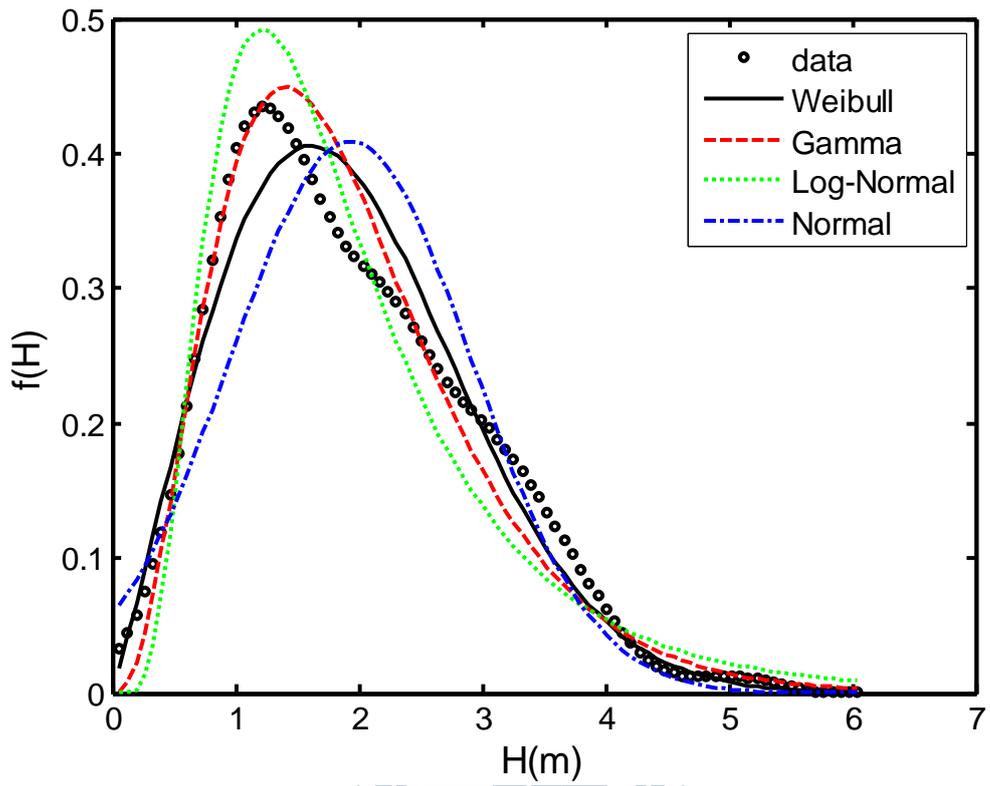


圖 3-3 S1 區近岸之波高機率密度分布圖

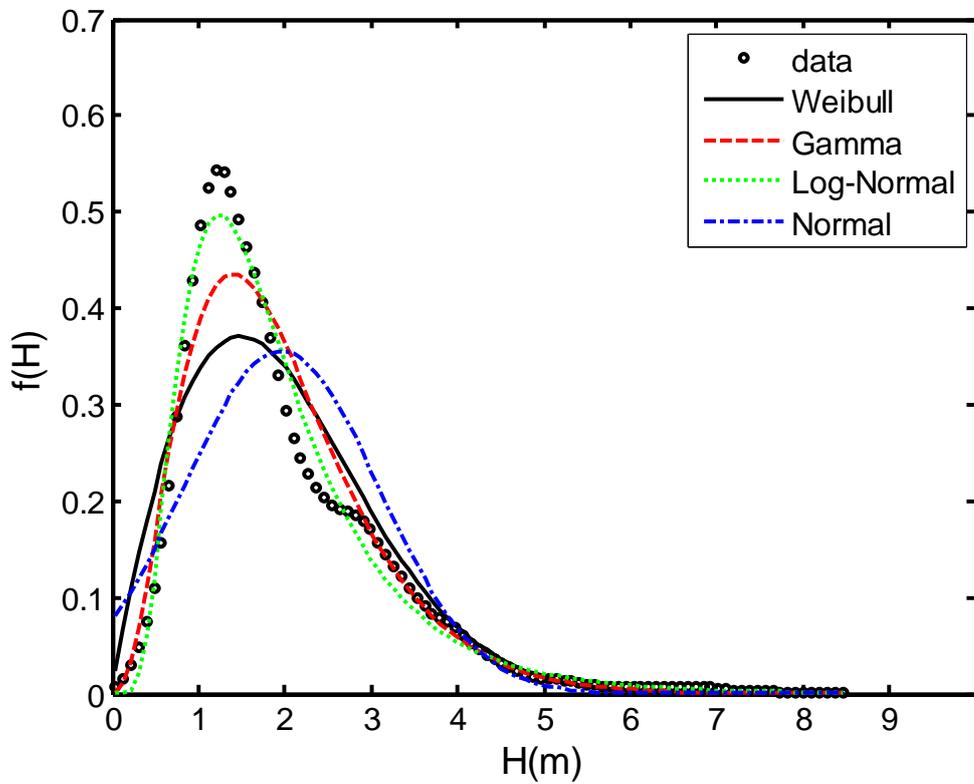


圖 3-4 (如圖 3-3, S1 區遠岸)

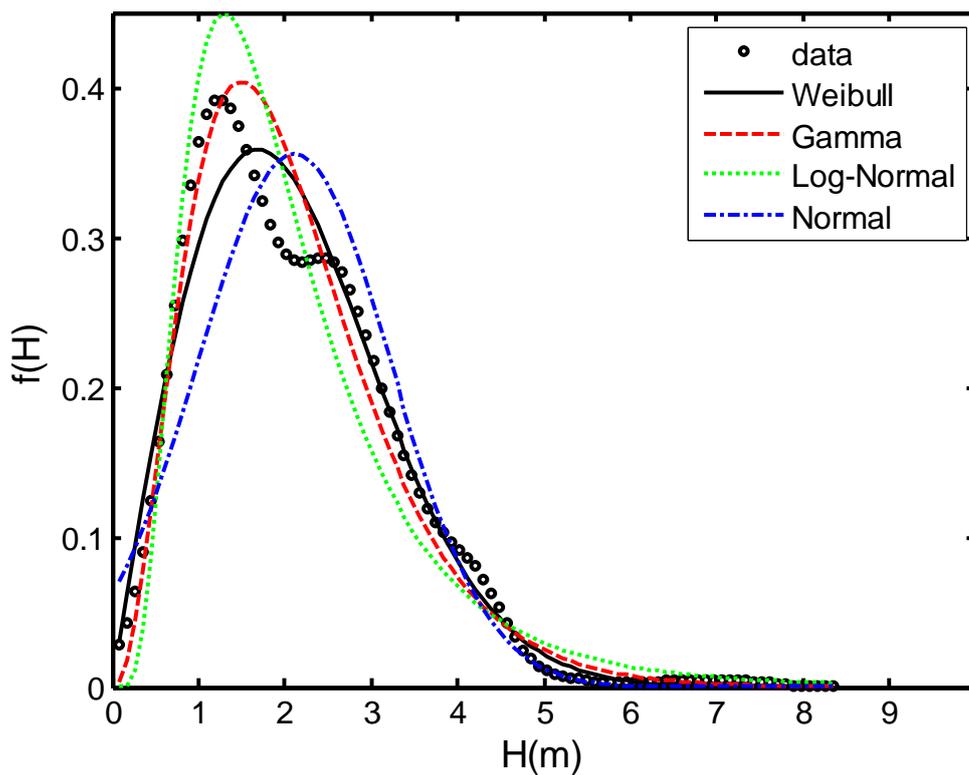


圖 3-5 S2 區近岸之波高機率密度分布圖

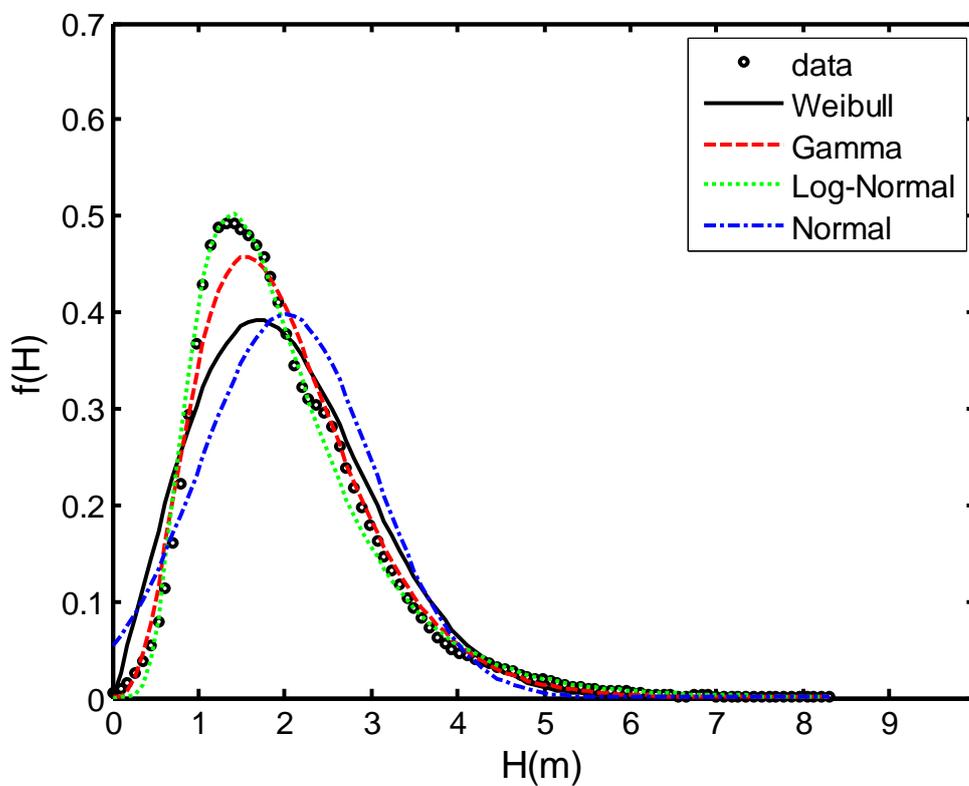


圖 3-6 (如圖 3-5, S2 區遠岸)

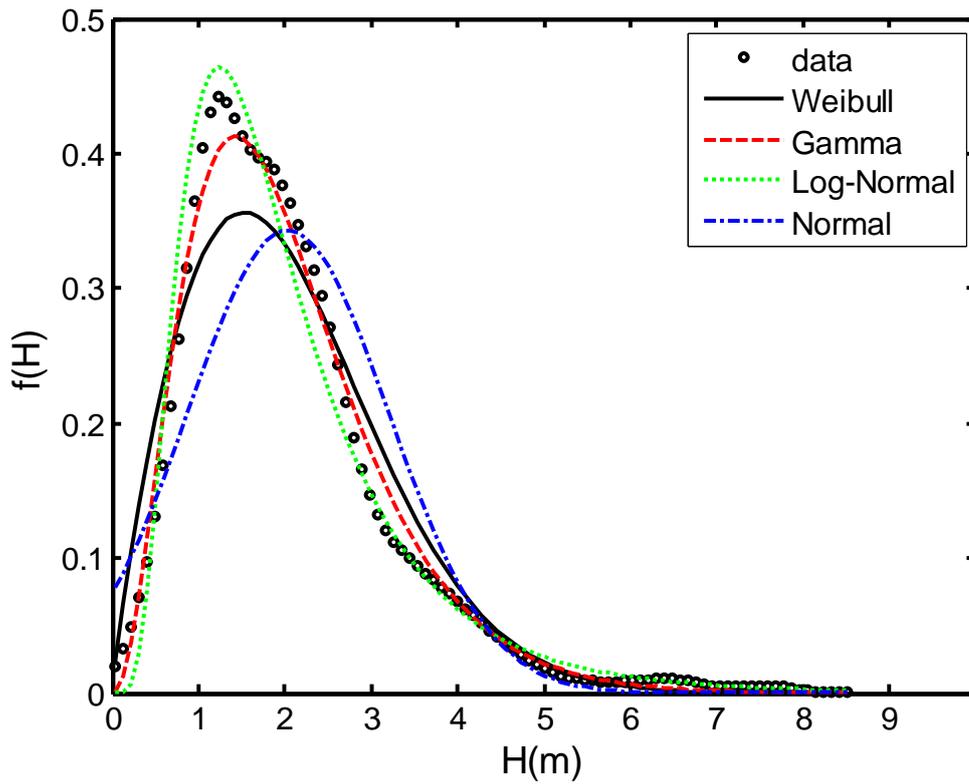


圖 3-7 S3 區近岸之波高機率密度分布圖

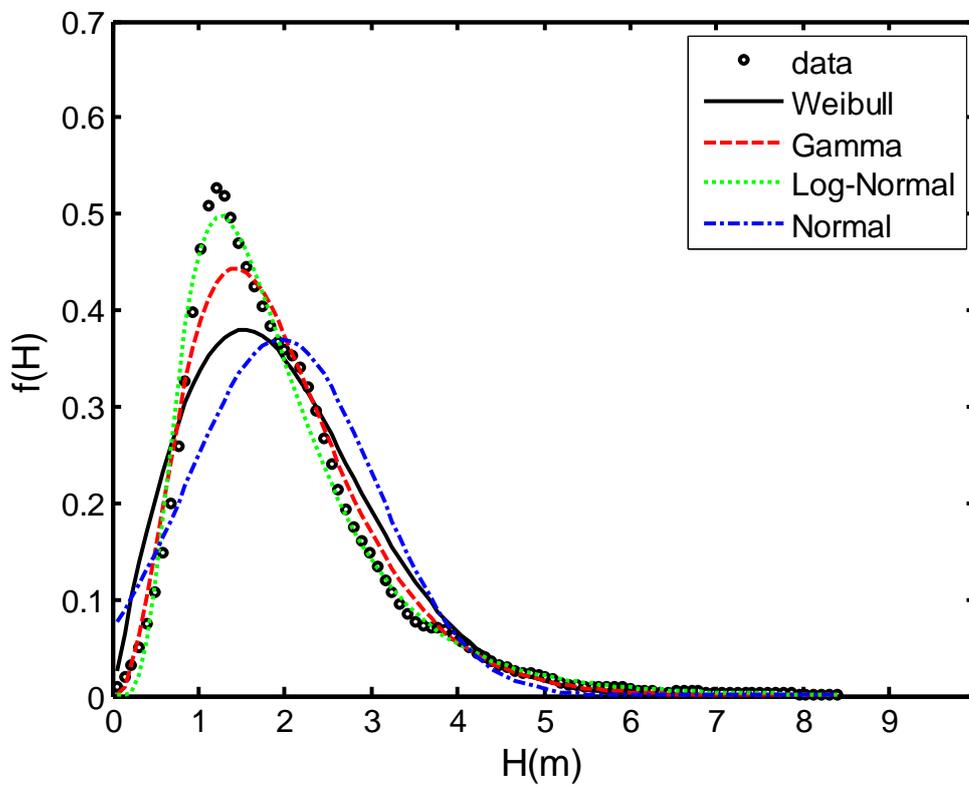


圖 3-8 (如圖 3-7，S3 區遠岸)

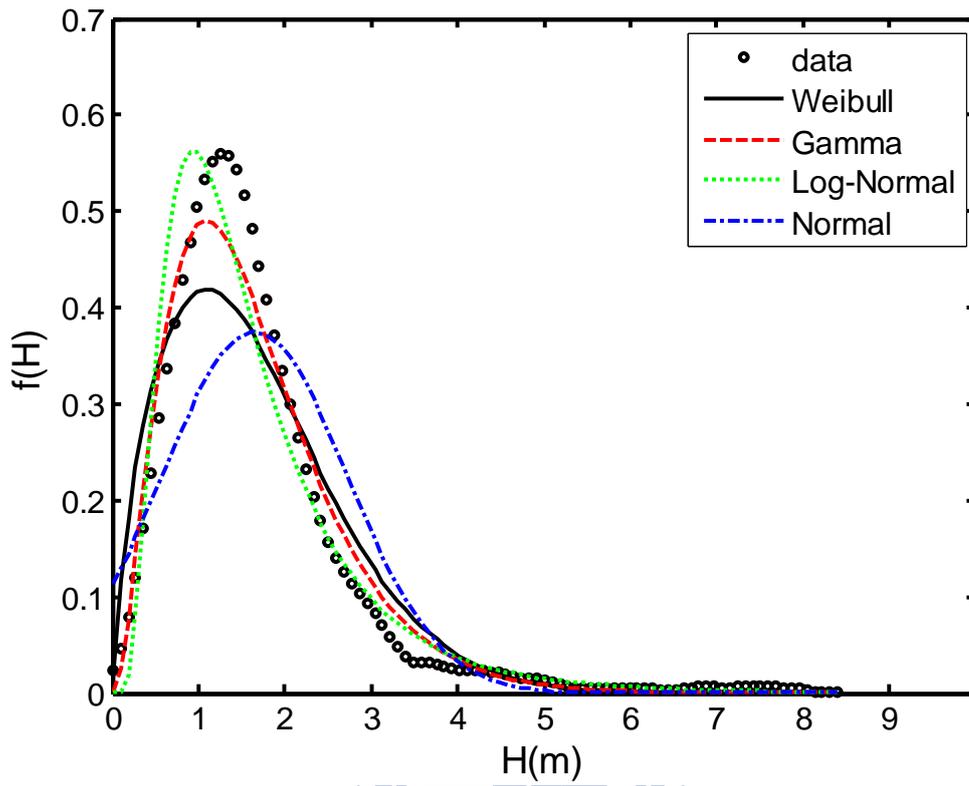


圖 3-9 S4 區近岸之波高機率密度分布圖

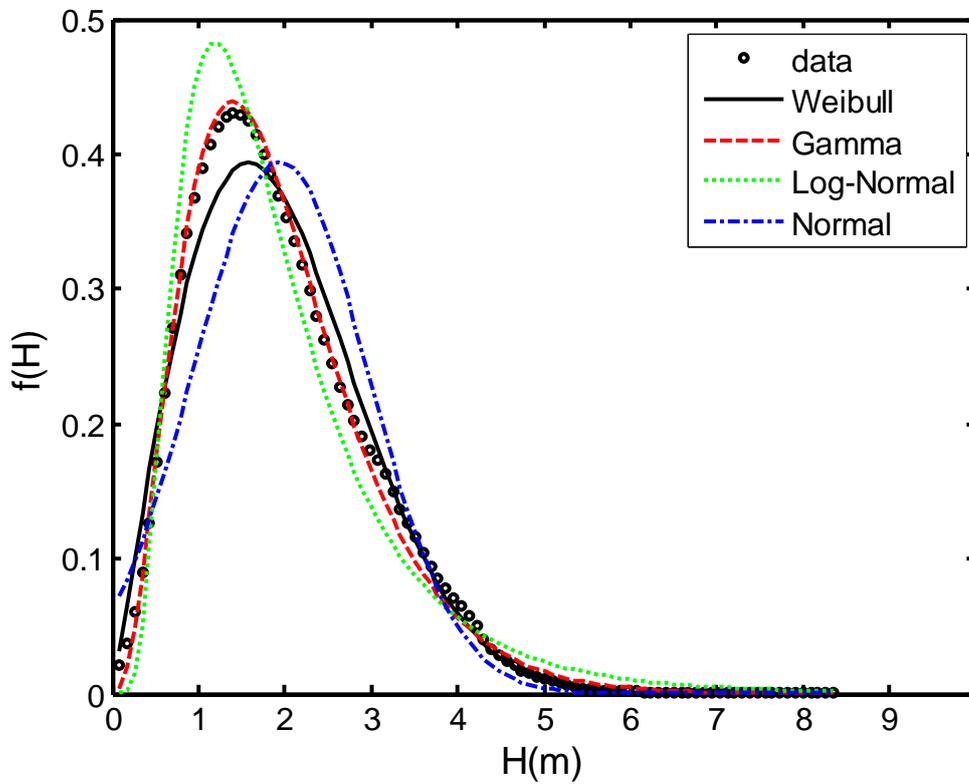


圖 3-10 (如圖 3-9, S4 區遠岸)

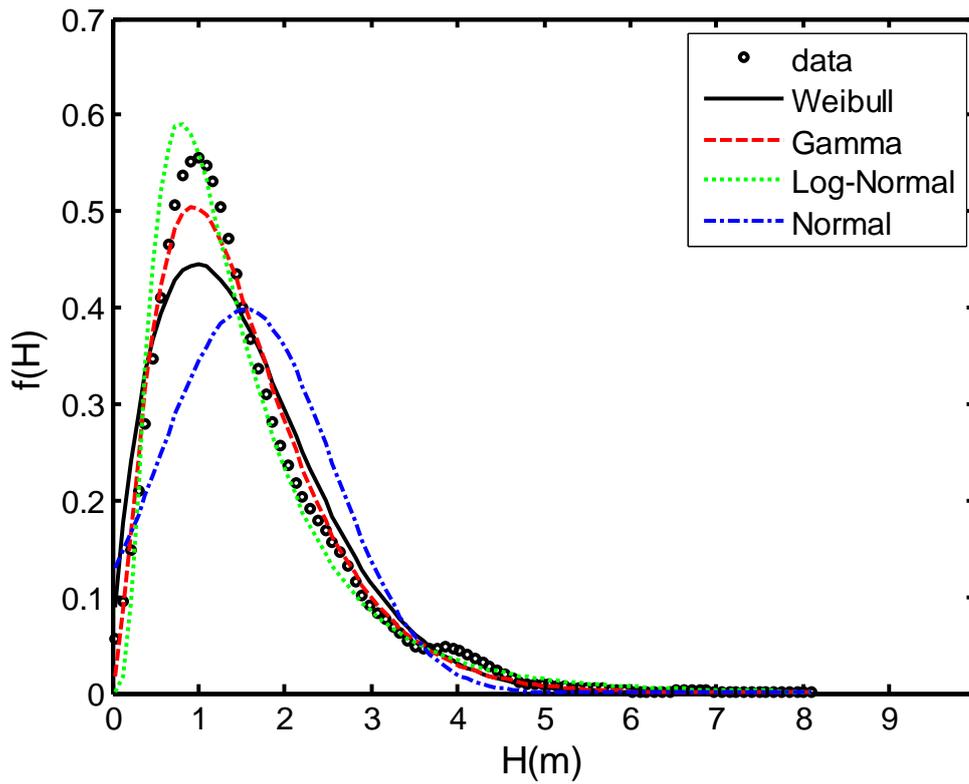


圖 3-11 S5 區近岸之波高機率密度分布圖

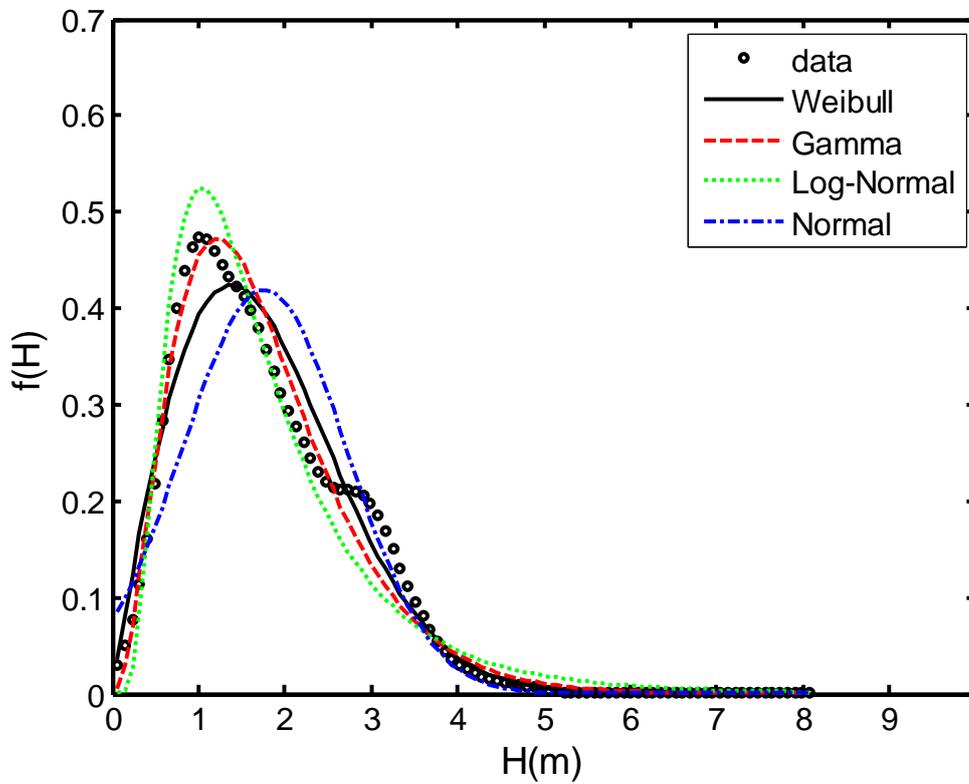


圖 3-12 (如圖 3-11，S5 區遠岸)

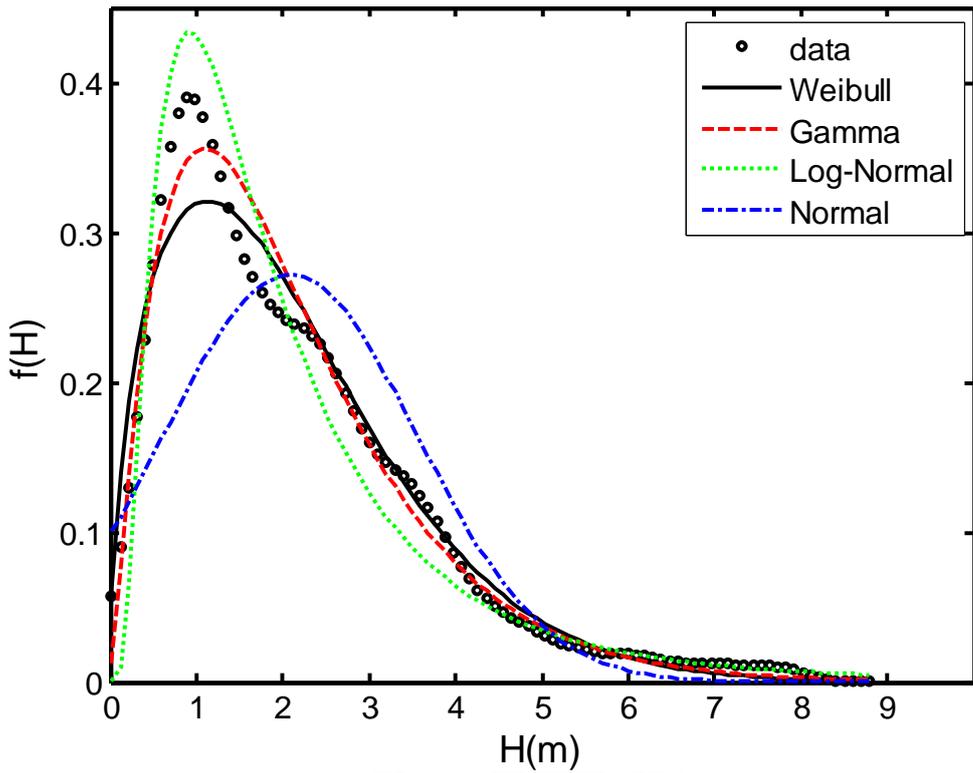


圖 3-13 S6 區近岸之波高機率密度分布圖

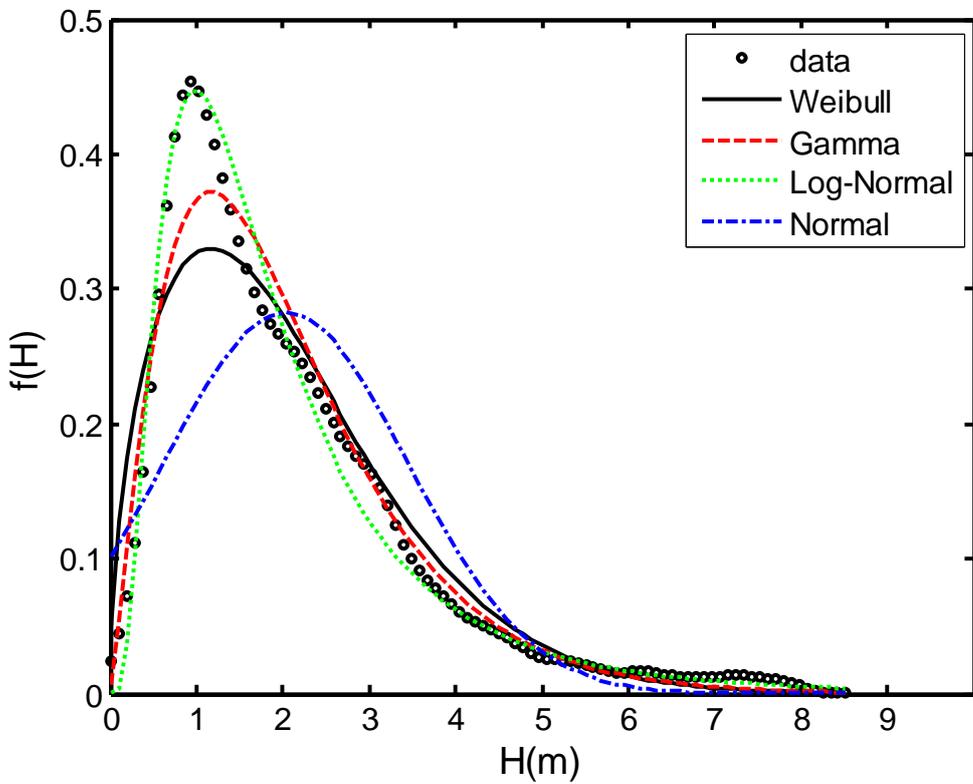


圖 3-14 (如圖 3-13, S6 區遠岸)

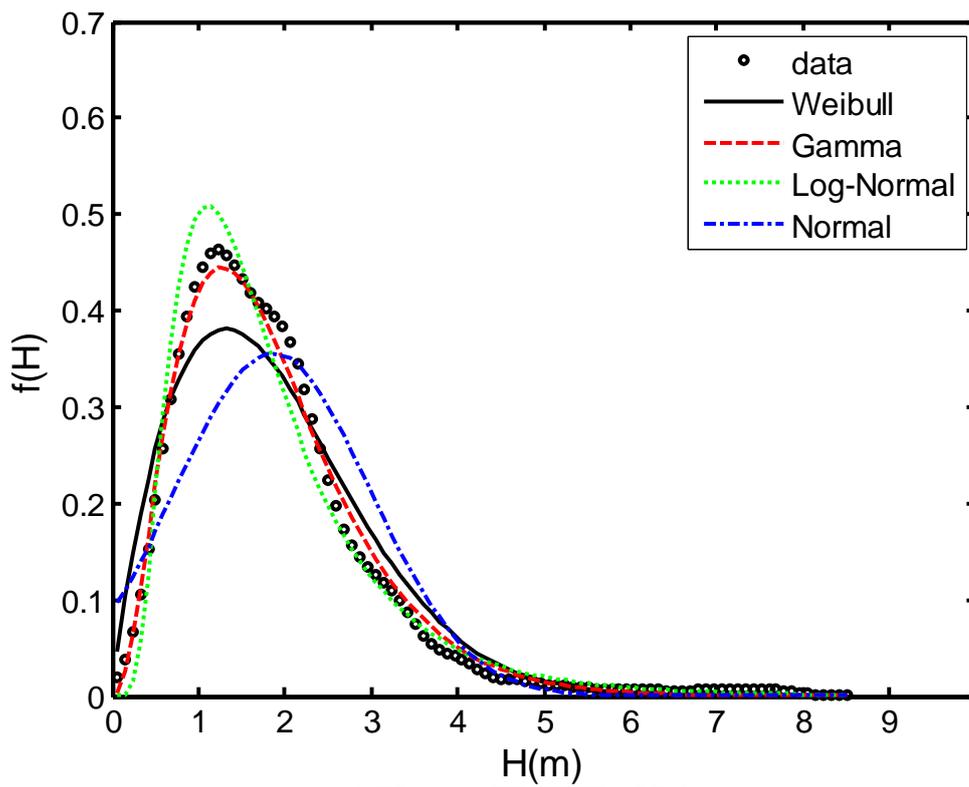


圖 3-15 S7 區近岸之波高機率密度分布圖

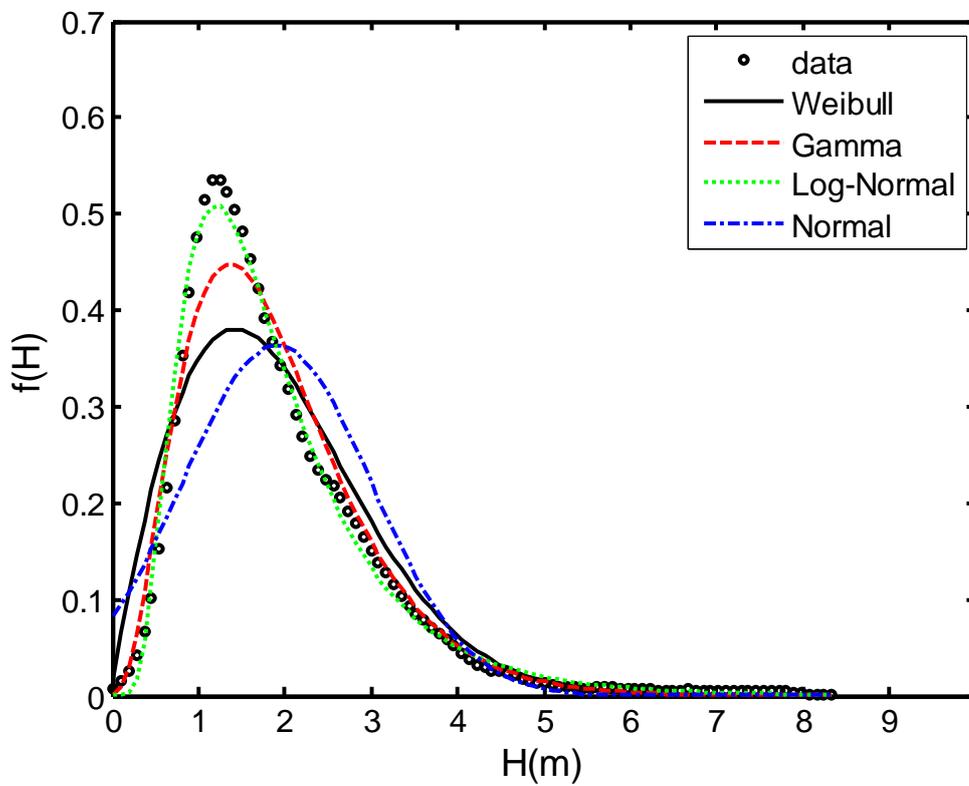


圖 3-16 (如圖 3-15, S7 區遠岸)

3-3 波高季節特性

3-3-1 K-means 群集分析

群集分析是一種利用邏輯程序來探討如何將目標群分成幾個類似的群體。K-Means 是 J. B. MacQueen 於 1967 年所提出的分群演算法，必須先設定 K 個群集，藉由隨機選取目標群中 K 個群集中心，計算群集內各資料與群集中心之距離，使得群集內差異最小，群集間差異最大，迭帶計算後直到群集中心不在變動為止。其過程即為尋求下式之極大值：

$$\arg \min \sum_{i=1}^k \sum_{X_j \in S_i} \|X_j - \mu_i\|^2 \quad (3-19)$$

其中 μ_i 是 S_i 群體的平均。

本文將各區域 2002 年至 2008 年各月份之衛星測高資料套以四種機率密度函數，由上節所述之絕對誤差及相關係數，選擇出最適合該地區之機率密度函數，以最大概似法推估出各分布之參數後，將 12 個月分推估出的 12 筆參數以 K-means 群集分析做分類，而在此僅將各區域分為冬夏兩季。

3-3-2 波高之季節分類

若波高分布越類似的月份，其各月份所推估出來的參數應會越相近，因而其在分群中分在同一個群集的機會也越高。本文由推估出來的參數以 K-Means 群集分析，各區域之季節分類情形示如表 3-2，大多數的區域冬夏季有著非常明顯的分別，而在高雄屏東地區之結果則是顯示分類為夏季之月份為 3 月至 11 月，擁有較長的夏季波高分布情形。臺南地區則是略為凌亂，分類結果在 3 月至 10 月之間跳過了 6 月及 8 月，此情形可能為用來群集分析之依據為機率密度推估出的參數，而只有參數是不夠的，若是能將更多因素，如風速等資料加入，甚能將季節分類再細分為四季。

表 3-2 利用最適波高分布的推定參數分類各地區夏冬季節的月份

地區	距岸遠近	機率密度函數	冬季月份	夏季月份
S1	近岸	Normal	10~3	4~9
	遠岸	Weibull	9~3	4~8
S2	近岸	Normal	10~3	4~9
	遠岸	Gamma	10~4	5~9
S3	近岸	Gamma	10~4	5~9
	遠岸	Gamma	10~4	5~9
S4	近岸	Gamma	12~2	3~11
	遠岸	Weibull	10~2	3~9
S5	近岸	Gamma	11~3,6,8	3~5,7,9~10
	遠岸	Weibull	10~2	3~9
S6	近岸	Normal	10~3	4~9
	遠岸	Weibull	9~3	4~8
S7	近岸	Gamma	10~2	3~9
	遠岸	Normal	9~3	4~8

第四章 定點波高資料之時間特性

4-1 最適波高分布之推定

如同前章所述，本文將交通部運輸研究所港灣技術研究中心之臺北港、臺中港、安平港、高雄港及花蓮港之定點波高資料分別套配 Weibull、Gamma、Log-Normal 及 Normal 四種機率密度分布函數。

臺北港缺漏部分為 2002 年 1~3 月、2004 年 10~11 月、2006 年 5 月、2007 年 10~11 月及 2008 年 3 月。臺中港缺漏部分為 2002 年至 2003 年 7 月、2005 年 12 月、2007 年 11~12 月及 2008 年 10~12 月。安平港缺漏部分為 2002 年 12 月及 2003 年 3 月與 12 月。高雄港缺漏部分為 2002 年 1~5 月、2003 年 1 月與 12 月、2004 年 1~2 月，2005 年 4~5 月、2006 年 5~8 月、2007 年 1~2 月及 2008 年 12 月。花蓮港缺漏部分則為 2003 年 9 月、2006 年 8 月及 2008 年 12 月。本文在剔除缺漏部分後，將各港口之每小時一筆的示性波高資料，計算其前 1/3 大的波高值平均，再以各機率密度函數套配後的統計值做絕對誤差之計算。此外，也將使用 ksdensity 法之結果對原始資料做殘餘確定係數的計算，由此兩種評估指標決定出各定點之最適波高分布。

除此之外，過去在各定點波高資料的研究上皆有許多成果，以下除了本文之結果之外，尚引用李(2007)在臺北港、安平港及花蓮港之研究成果，希望能從各種資料年限選取上的不同而探討出波高在空間上的分布現象為何。各港口之結果如下：

1. 臺北港

本文採用 2002 年至 2008 年之結果發現，如果針對臺北港前 1/3 大的波高值來看，分布的結果可由絕對誤差判定應為 Weibull 分布較佳；若是針對所有波高資料而言，則是由殘餘確定係數顯示出 Log-Normal 為最好，示如表 4-1 及圖 4-1，圖中圓點為港研中心定點實測資料之分布情形，實線則為 Weibull 分布，虛線為 Gamma 分布，短虛線為 Log-Normal 分布，長虛線則是 Normal 分布。李(2007)之研

究時間為 2006 全年資料，並利用其最適分組數 20 組，與 Gamma、Normal、Rayleigh 及 Weibull 四個分布函數進行套配(fitted)，根據 MSE 及 R^2 做為評估指標，結果由表 4-2 可發現臺北港全年波高是 Gamma 分布較佳。

表 4-1 臺北港波高最適分布之評估結果

定點	評估指標	Weibull	Gamma	Log-Normal	Normal
臺北港	AE	0.031	0.040	0.064	0.043
	ΔR^2	0.040	0.025	0.018	0.265

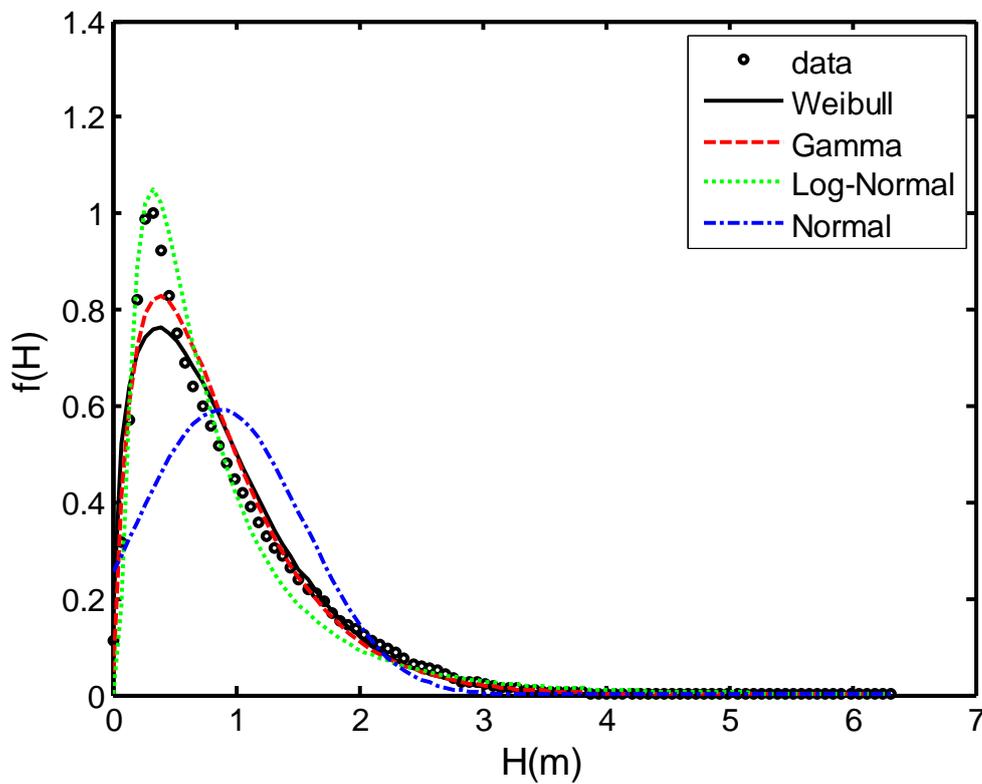


圖 4-1 定點臺北港之波高機率密度分布圖

表 4-2 臺北港示性波高與各分布函數評估結果 (李, 2007)

	Gamma		Normal		Rayleigh		Weibull	
	MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²
全年	0.011	0.999	0.111	0.921	0.057	0.964	0.026	0.999

2. 安平港

安平港的缺漏部分相對其餘四個定點港口較少，而本文整理出來的結果由表 4-3 及圖 4-2 可知，若從前 1/3 大的波高值來看，安平港的結果是 Gamma 分布較符合，Log-Normal 分布最差；而從所有波高來看，則是 Log-Normal 分布最佳，Gamma 分布次佳，Normal 分布最差。而李(2007)之研究時間為 2006 全年，並利用其最適分組數 20 組，與 Gamma、Normal、Rayleigh 及 Weibull 四個分布函數進行套配 (fitted)，根據 MSE 及 R² 做為評估指標，結果由表 4-4 可知安平港全年波高是 Gamma 分布最佳。

本文之結果在整體波高雖然是 Log-Normal 分布最佳，但 Gamma 分布為次佳之情形，其原因可能為與李(2007)選用資料之時間不同所導致，但整體來說大致符合。

表 4-3 安平港波高最適分布之評估結果

定點	評估指標	Weibull	Gamma	Log-Normal	Normal
安平港	AE	0.045	0.036	0.102	0.085
	ΔR^2	0.220	0.104	0.031	0.367

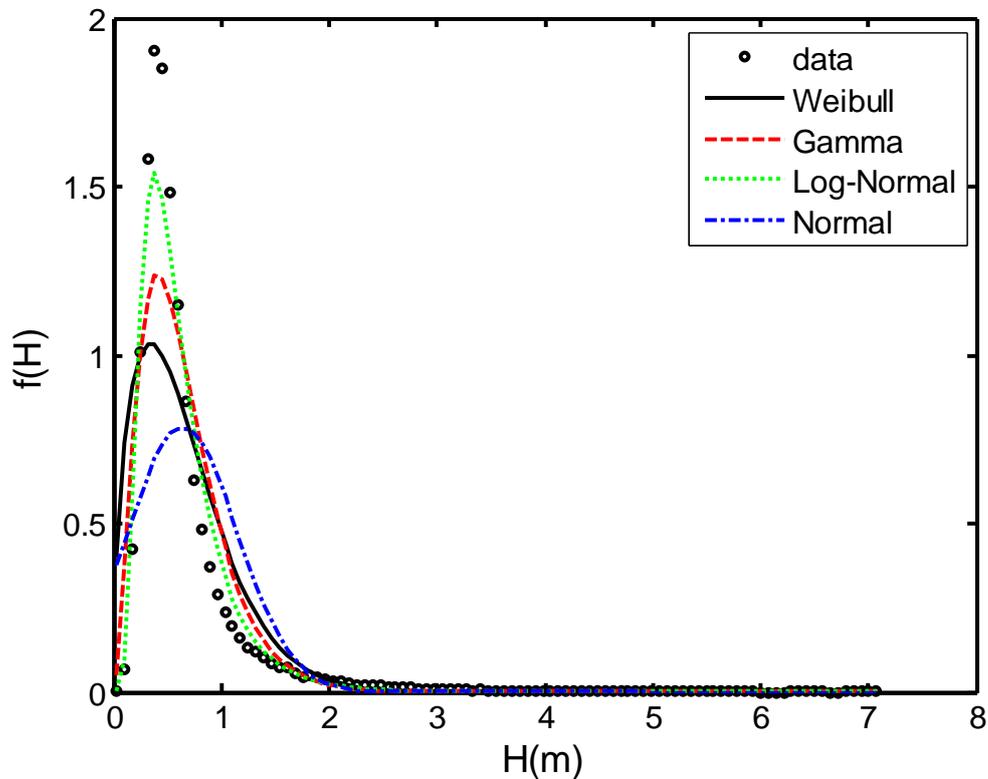


圖 4-2 定點安平港之波高機率密度分布圖

表 4-4 安平港示性波高與各分布函數評估結果 (李, 2007)

	Gamma		Normal		Rayleigh		Weibull	
	MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²
全年	0.012	0.999	0.112	0.984	0.027	0.996	0.049	0.996

3. 花蓮港

花蓮港在 2002 年至 2008 年間僅有 3 個月資料缺漏，是五個港口之中與安平港為資料較齊全的，而根據本文計算的結果，前 1/3 大波高值的最適分布為 Normal 分布，所有波高值的最適分布為 Gamma 分布，如表 4-5，圖 4-3。但在李(2007)的研究中，花蓮港每月波浪雖然有很多月份為 Weibull 分布。但 Gamma 與 Weibull 分布的 MSE 與

R^2 相當接近，就整個分析結果而言，由表 4-6 可得知全年最適分布為 Gamma 分布，與本文探討所有波高之結果相符。

表 4-5 花蓮港波高最適分布之結果

定點	評估指標	Weibull	Gamma	Log-Normal	Normal
花蓮港	AE	0.036	0.008	0.245	0.003
	ΔR^2	0.028	0.001	0.016	0.081

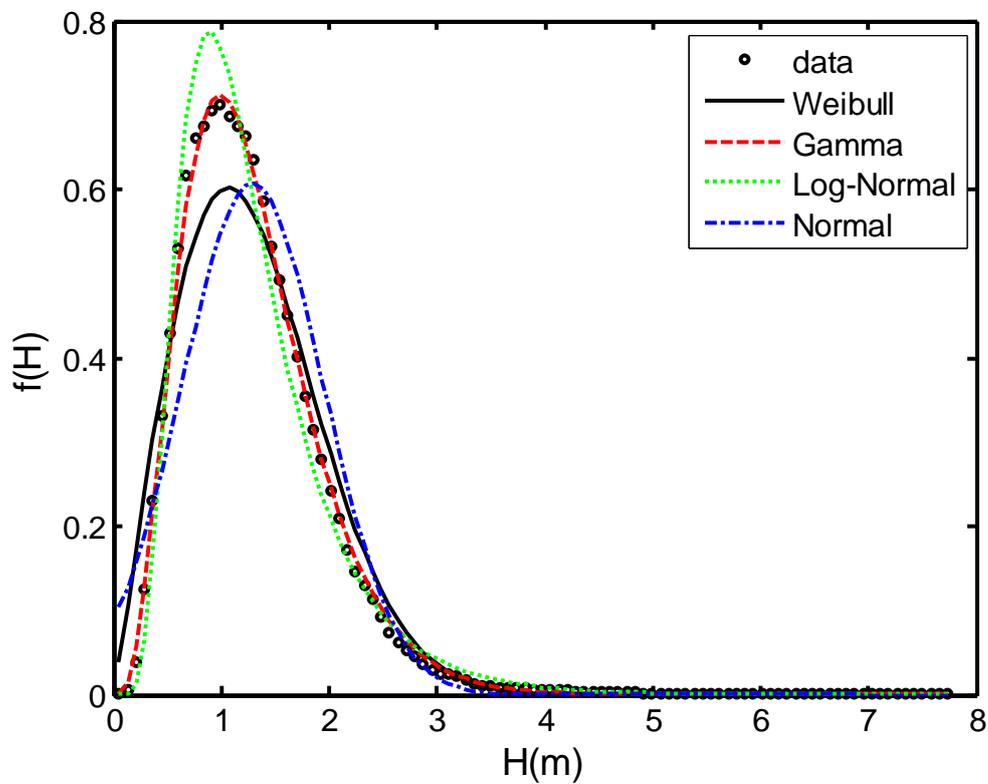


圖 4-3 定點花蓮港之波高機率密度分布圖

表 4-6 花蓮港示性波高與各分布函數評估結果 (李, 2007)

	Gamma		Normal		Rayleigh		Weibull	
	MSE	R^2	MSE	R^2	MSE	R^2	MSE	R^2
全年	0.010	0.989	0.035	0.865	0.023	0.938	0.022	0.946

4. 臺中港

臺中港因防波堤工程的進行，2002 年開始一直至 2003 年七月都是沒有觀測資料的，但其在 2008 年十至十二月也有資料缺漏，因此本文在選取上依然是採用 02 至 08 這七年的資料。由表 4-7 可知，臺中港在前 1/3 大的波高值分布上雖然是 Gamma 分布最好，但是與 Weibull 分布的結果亦相當接近。所有波高值的分布上為 Log-Normal 分布最佳，Gamma 分布次佳，示如圖 4-4。

表 4-7 臺中港波高最適分布之評估結果

定點	評估指標	Weibull	Gamma	Log-Normal	Normal
臺中港	AE	0.062	0.059	0.962	0.103
	ΔR^2	0.091	0.074	0.059	0.294

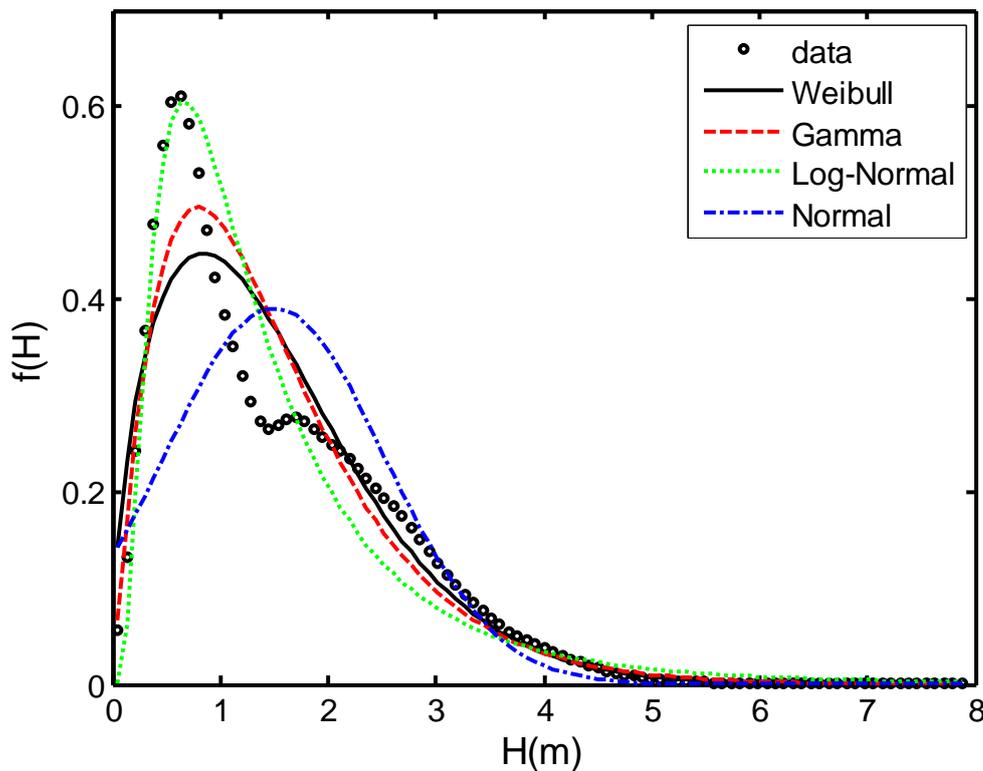


圖 4-4 定點臺中港之波高機率密度分布圖

5. 高雄港

高雄港與安平港在地理位置上相當接近，其最適分布的分析結果與安平港也約略相似，高雄港前 1/3 大的波高值最適分布結果為 Gamma 分布，Log-Normal 分布次佳。針對所有波高值的最適分布，其結果為 Log-Normal 分布，Gamma 分布次佳。示如表 4-8 及圖 4-5。

本文選取的資料年為 2002 至 2008 年，這七年中高雄港與安平港都是每月波浪缺漏許多的港口，因此在尚未剔除缺漏過多的年份時，即有可能使高雄港與安平港之分析結果有此差異存在。

表 4-8 高雄港波高最適分布之評估結果

定點	評估指標	Weibull	Gamma	Log-Normal	Normal
高雄港	AE	0.062	0.012	0.017	0.070
	ΔR^2	0.162	0.069	0.050	0.260

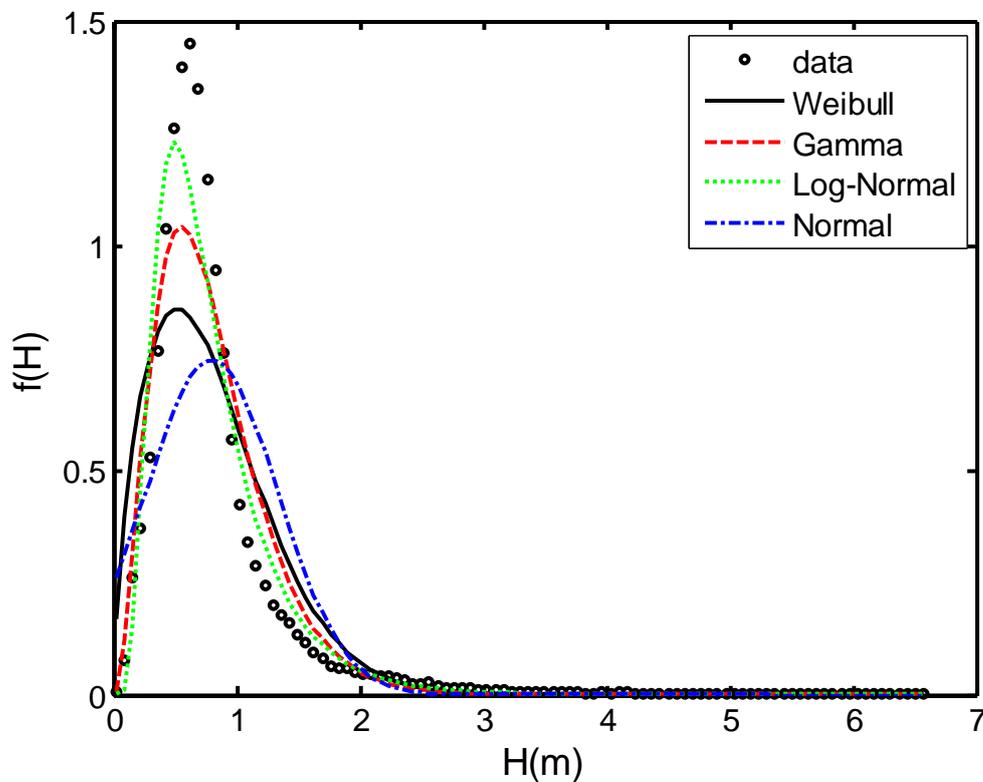


圖 4-5 定點高雄港之波高機率密度分布圖

4-2 波高分布之季節特性

依照 3-3 節之方法，將五個定點港口各月份波高資料以四種機率密度函數套配，由於波高資料較小，因此根據全部十二個月份之殘餘確定係數，為該定點挑選出一種機率密度函數，然後再將挑選出來的機率密度函數之參數以 K-Means 群集分析方法分類季節。

各定點港口之各月份波浪套配機率密度函數結果如表 4-9 至表 4-13，表格中灰階底為表示該月份中，四個機率密度函數所評估出最好結果，即該月份中殘餘確定係數最小之分布，再進一步繪製成圖，示如圖 4-6 至圖 4-10。雖然大部分的情況可直接選出最適合之分布函數，但並非各定點港口情況皆為同一分布最好，因此在遇到此情況時本文將會輔以絕對誤差來幫助評估。如臺北港之情形，雖然整體上在一至三月、十及十二月之 ΔR^2 為最小，但其中五、七至九月波高套配 Weibull 分布函數之絕對誤差在整體結果表現良好，因此臺北港最後決定使用的分布函數即是 Weibull 分布。

所有分析結果以殘餘確定係數來看，臺北港方面在 1 月至 3 月、10 月與 12 月是 Weibull 分布的結果最好，4 月、6 月及 11 月是 Gamma 分布較佳，其餘月分則是 Log-Normal 分布最好，而輔以絕對誤差做輔助的判定依據，因此臺北港最後採用的是 Weibull 分布，其結果顯示，擁有夏季型態的波高分布情形為四到九月。臺中港可能因為資料缺漏的關係，十二個月份中皆有四種分布為最佳之情況，但整體而言還是為 Weibull 分布最多，因此選用 Weibull 分布，分季結果為三到九月為夏季，十至四月為冬季。安平港部分雖然是 Log-Normal 分布為擁有較多殘餘確定係數最小之月份，但是輔以絕對誤差做為依據，本文還是選用 Gamma 分布為安平港之群集分析選用分布，結果為五至十月是夏季型態，十一月至四月為冬季型態。而高雄港地理位置與安平港接近，其選用之分布亦為 Gamma 分布，結果顯示五至十月為夏季型態，十一月至四月為冬季型態。花蓮港則是有十個月份是 Log-Normal 分布為最佳，因此選用 Log-Normal 分布之參數做為依據，夏季為五至九月，冬季為十月至四月。

表 4-9 套配臺北港各月份波高機率密度函數之評估

臺北港	Weibull		Gamma		Log-Normal		Normal	
	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2
一月	0.008	0.014	0.034	0.044	0.343	0.110	0.038	0.058
二月	0.023	0.028	0.007	0.049	0.228	0.124	0.060	0.152
三月	0.019	0.011	0.007	0.020	0.117	0.073	0.049	0.137
四月	0.006	0.014	0.010	0.010	0.088	0.044	0.021	0.155
五月	0.020	0.067	0.027	0.039	0.133	0.024	0.030	0.271
六月	0.006	0.024	0.013	0.007	0.125	0.032	0.011	0.192
七月	0.014	0.056	0.035	0.027	0.160	0.012	0.009	0.259
八月	0.025	0.161	0.037	0.067	0.152	0.022	0.126	0.355
九月	0.011	0.064	0.053	0.027	0.077	0.010	0.013	0.292
十月	0.000	0.003	0.048	0.026	0.114	0.125	0.034	0.072
十一月	0.038	0.017	0.022	0.012	0.209	0.052	0.073	0.238
十二月	0.024	0.016	0.098	0.063	0.472	0.192	0.021	0.028

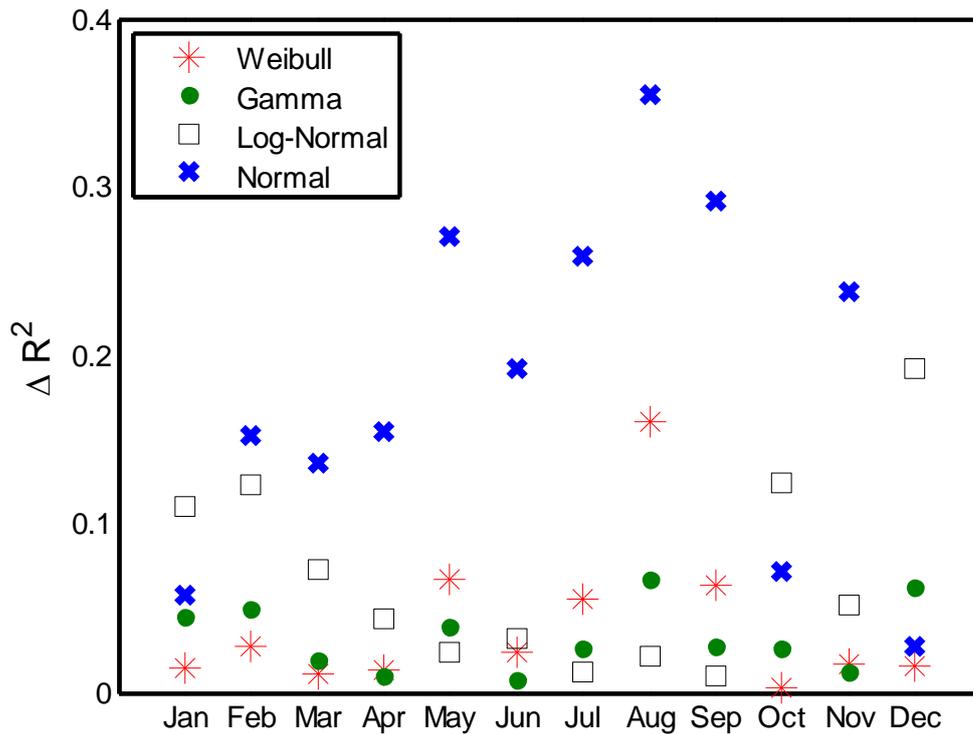


圖 4-6 臺北港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖

表 4-10 套配臺中港各月份波高機率密度函數之評估

臺中港	Weibull		Gamma		Log-Normal		Normal	
	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2
一月	0.036	0.030	0.111	0.069	1.435	0.160	0.000	0.024
二月	0.017	0.099	0.214	0.188	2.918	0.366	0.074	0.082
三月	0.023	0.068	0.137	0.109	2.348	0.249	0.082	0.116
四月	0.000	0.030	0.011	0.050	0.454	0.128	0.035	0.146
五月	0.006	0.101	0.068	0.049	0.028	0.011	0.005	0.261
六月	0.021	0.061	0.016	0.013	0.032	0.018	0.004	0.150
七月	0.091	0.340	0.037	0.197	0.046	0.093	0.160	0.493
八月	0.042	0.119	0.033	0.038	0.027	0.006	0.047	0.241
九月	0.008	0.009	0.008	0.005	0.705	0.046	0.019	0.117
十月	0.036	0.008	0.085	0.039	1.275	0.107	0.006	0.011
十一月	0.025	0.034	0.042	0.059	1.781	0.130	0.077	0.113
十二月	0.011	0.055	0.211	0.243	1.309	0.423	0.015	0.036

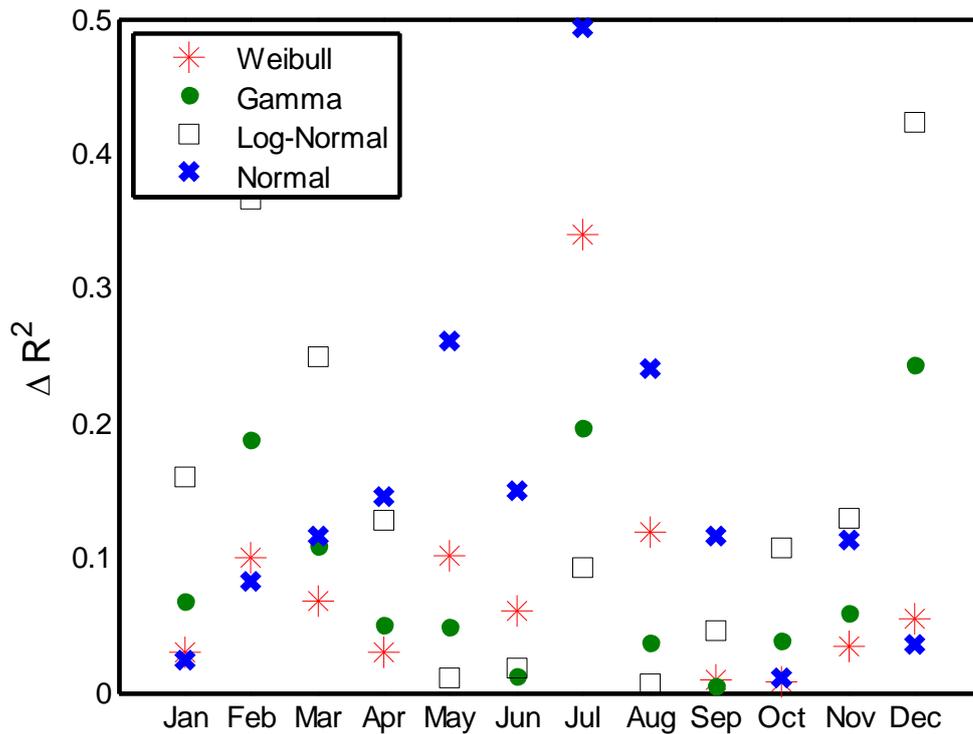


圖 4-7 臺中港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖

表 4-11 套配安平港各月份波高機率密度函數之評估

安平港	Weibull		Gamma		Log-Normal		Normal	
	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2
一月	0.005	0.080	0.008	0.011	0.030	0.003	0.008	0.089
二月	0.002	0.080	0.011	0.016	0.041	0.004	0.011	0.116
三月	0.002	0.029	0.002	0.003	0.027	0.017	0.008	0.049
四月	0.014	0.110	0.008	0.025	0.046	0.007	0.002	0.160
五月	0.070	0.218	0.018	0.067	0.098	0.012	0.165	0.355
六月	0.002	0.060	0.032	0.025	0.059	0.016	0.011	0.183
七月	0.006	0.029	0.045	0.007	0.129	0.024	0.001	0.228
八月	0.017	0.080	0.079	0.035	0.177	0.005	0.014	0.305
九月	0.012	0.218	0.049	0.122	0.120	0.044	0.028	0.394
十月	0.084	0.309	0.002	0.127	0.058	0.067	0.094	0.372
十一月	0.006	0.019	0.007	0.013	0.014	0.043	0.003	0.023
十二月	0.062	0.167	0.008	0.035	0.038	0.010	0.033	0.160

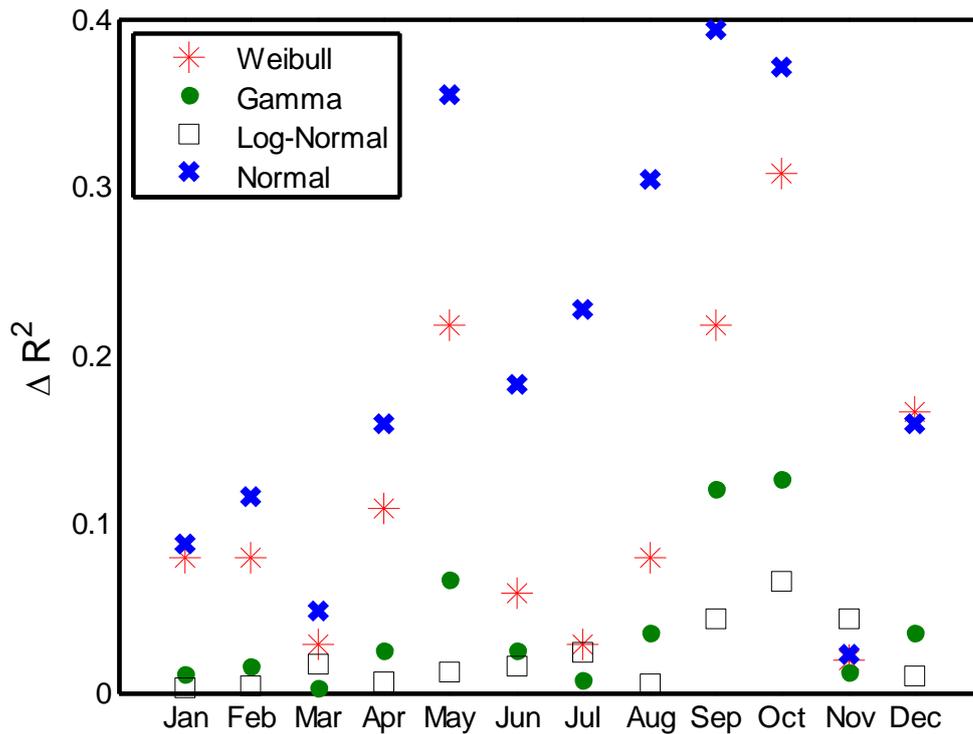


圖 4-8 安平港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖

表 4-12 套配高雄港各月份波高機率密度函數之評估

高雄港	Weibull		Gamma		Log-Normal		Normal	
	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2
一月	0.005	0.025	0.029	0.044	0.034	0.089	0.004	0.012
二月	0.008	0.055	0.024	0.073	0.018	0.134	0.001	0.043
三月	0.007	0.067	0.008	0.013	0.033	0.019	0.019	0.110
四月	0.013	0.019	0.008	0.013	0.017	0.040	0.000	0.028
五月	0.014	0.060	0.004	0.042	0.049	0.078	0.000	0.113
六月	0.011	0.095	0.041	0.036	0.022	0.011	0.010	0.201
七月	0.015	0.058	0.031	0.024	0.249	0.049	0.038	0.231
八月	0.012	0.017	0.004	0.010	0.371	0.056	0.005	0.150
九月	0.021	0.201	0.053	0.110	0.058	0.047	0.033	0.365
十月	0.092	0.208	0.025	0.102	0.007	0.121	0.080	0.212
十一月	0.010	0.029	0.017	0.015	0.007	0.046	0.001	0.019
十二月	0.083	0.108	0.035	0.044	0.026	0.084	0.046	0.041

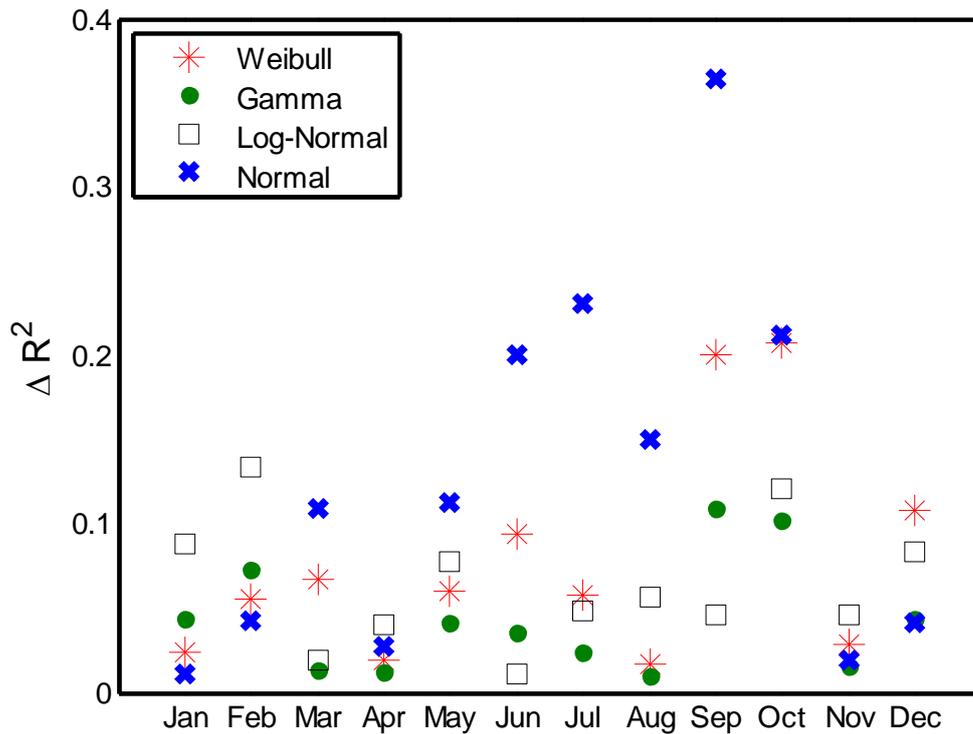


圖 4-9 高雄港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖

表 4-13 套配花蓮港各月份波高機率密度函數之評估

花蓮港	Weibull		Gamma		Log-Normal		Normal	
	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2	AE	ΔR^2
一月	0.014	0.057	0.003	0.004	0.149	0.010	0.013	0.042
二月	0.008	0.053	0.006	0.002	0.123	0.006	0.018	0.040
三月	0.031	0.104	0.018	0.016	0.094	0.004	0.009	0.104
四月	0.041	0.149	0.022	0.039	0.028	0.012	0.000	0.149
五月	0.013	0.150	0.031	0.050	0.031	0.013	0.013	0.206
六月	0.066	0.215	0.015	0.083	0.010	0.042	0.035	0.244
七月	0.091	0.240	0.176	0.182	0.472	0.069	0.031	0.524
八月	0.001	0.131	0.079	0.072	0.085	0.025	0.010	0.292
九月	0.034	0.147	0.067	0.062	0.281	0.013	0.037	0.294
十月	0.102	0.120	0.023	0.023	0.383	0.005	0.059	0.159
十一月	0.009	0.089	0.031	0.060	0.236	0.056	0.041	0.122
十二月	0.045	0.084	0.000	0.011	0.186	0.009	0.002	0.055

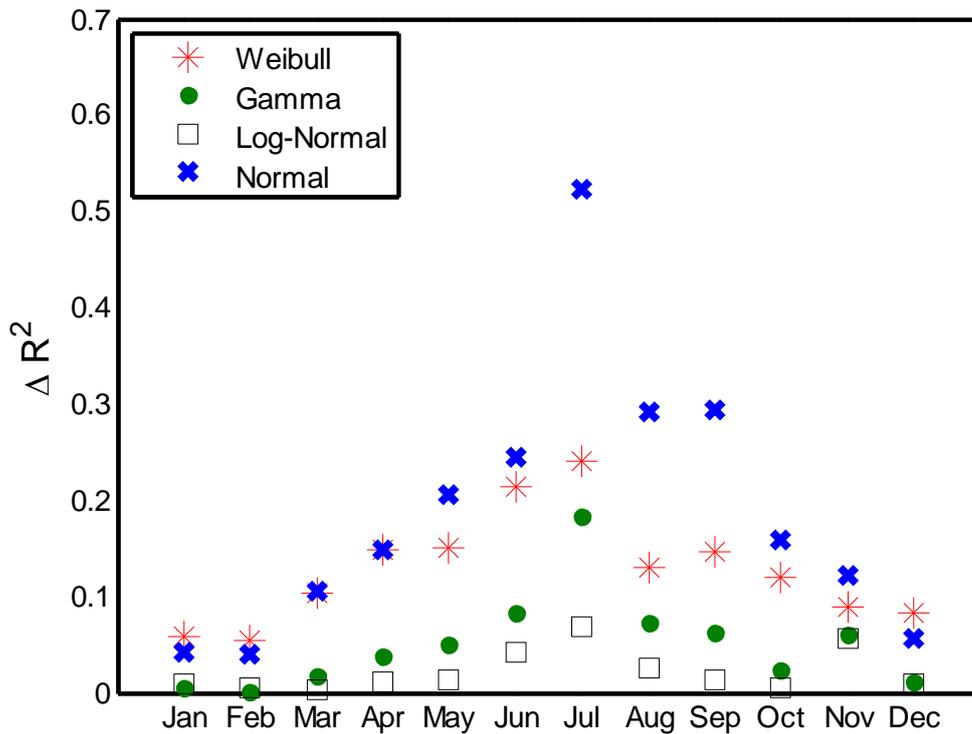


圖 4-10 花蓮港各月份波浪之 ΔR^2 分布圖

綜合五個定點港口之分析結果，各定點港口季節分類選用的分布函數，臺北港與臺中港為 Weibull 分布，安平港與高雄港為 Gamma 分布，花蓮港則是 Log-Normal 分布，各分類結果也符合直觀上的認定，夏季多為五月至九月間，示如表 4-14。其中臺中港季節分類結果之月份較長，為三月至九月，此一結果可能為用來做群集分析之依據僅有機率密度函數之參數，故若有更多分析依據，如風速等資料，將能使季節分類更趨完善。

表 4-14 以最適波高分布的推定參數分類各港口波浪之夏冬分季節

定點港口	機率密度函數	冬季月份	夏季月份
臺北港	Weibull	10~3	4~9
臺中港	Weibull	10~2	3~9
安平港	Gamma	11~4	5~10
高雄港	Gamma	11~4	5~10
花蓮港	Log-Normal	10~4	5~9

4-3 與衛星測高資料之比較

傳統使用的海上觀測樁、浮標站及浮球站，在得知海面情形的能力上，其精準程度常常僅限於距離岸邊不遠處，然而漁業作業情形皆在離岸更遠的地方。本文主要希望日後不管是在做工程設計或是對海象做預報時，能夠以擁有廣泛測量範圍之衛星測高資料，來做為其一之依據，因此，首要的工作即是建立一個明確的定點波高資料與衛星測高資料間的關係。

本文蒐集五個定點港口 2002 年起至 2008 年為止之所有波浪資料，將其依時間序排列，把所有有效資料做月平均計算，並將其與相對應之分區衛星測高資料繪製成圖。而本文將全台灣劃分成七個大分區，再將七個大分區細分為近遠岸，共 14 個區塊，但定點港口之資料僅有臺北港、臺中港、安平港、高雄港及花蓮港，因此在無港口資料之地區將無法得知確切的衛星測高資料與實測資料之關係。

臺北港方面，如圖 4-11 可看出，近岸的結果雖然顯示衛星測高資料較為凌亂，但是依舊可以看出在四、五月時，波高月平均會是整年之中最小的；進一步與定點港口之實測資料比較則可發現，自 2003 年開始至 2008 年，每年年初時衛星測高資料約為定點港口資料之 14 倍，逐月遞減至十月、十一月為最低之 3 倍，年初時則又驟升，有此一週期特性存在。圖 4-12 則說明遠岸部分之衛星測高資料從 2004 年開始，有最大月平均波高變大，最小月平均波高變小之情形，而且也有著週期特性情況發生；與定點港口時測資料相比，比值約介於 2~12 之間，相較於近岸來的小。

臺中港位處台灣西側，受到地形影響之關係，海上波浪相對其他地區來說較小，而前段資料缺漏多，見圖 4-13，僅能從 2003 下半年開始判斷，衛星測高之最小月平均波高約為 1 公尺左右，定點港口實測資料則是較小一些，約為 0.6 公尺。與臺北港不同的是，臺中港在遠岸的衛星測高資料較近岸的小，最大月平均約為 2 公尺而已，與實測資料之比值也只有 3.5 倍而已，如圖 4-14。但不管是近岸或遠岸，因為衛星測高資料與定點實測資料大小很接近，因此甚至出現了外海波浪資料比定點港口還要小的情況。

圖 4-15 與圖 4-16 顯示，安平港的情況較接近臺中港，遠岸的衛星測高資料比近岸的小，且每月平均的跳動幅度較大，但不管遠岸近岸，衛星測高資料與定點實測資料相比都可達 4.5 倍。相形之下，定點實測資料就有著良好週期特性，每年約七至八月是月平均波高最大的時候，月平均波高介於 0.3 公尺至 1.3 公尺之間，比起臺中港的 0.5 公尺至 2.5 公尺之間，算是較為安定的結果。

高雄港的結果與臺北港類似，衛星測高資料在遠岸的月平均比近岸來的大，2002 年至 2008 年間最大月平均甚至可達 2.5 公尺，如圖 4-17，近岸的情況則是鮮少有超過 2 公尺，示如圖 4-18。而在 2004 年至 2007 年間，遠岸衛星測高資料有類似的規律，一月開始月平均遞減，到四、五月份最低，而後又上升到十一月、十二月時達最高。整體而言，不管是近岸或遠岸，每月平均與定點實測資料之比值在 1 至 6 倍之間。

花蓮港方面的衛星測高資料近岸與遠岸也有著不同的特性，遠岸的資料幾乎每年都有最大月平均波高到達 2.5 公尺，示如圖 4-19，甚至 3 公尺的情況發生，而近岸方面雖然有一次超過 3.5 公尺，但是普遍情況還是較遠岸小，示如圖 4-20。而與定點實測資料相比，近岸的衛星測高資料約為其 0.5 至 3 倍之間，反而在遠岸卻發生了從 2004 年開始，衛星測高資料與定點實測資料之比約在 1 至 2 倍之間，但是會在四月份時驟降至約 0.5 倍，相較於其他月份是一個很明顯的特性。

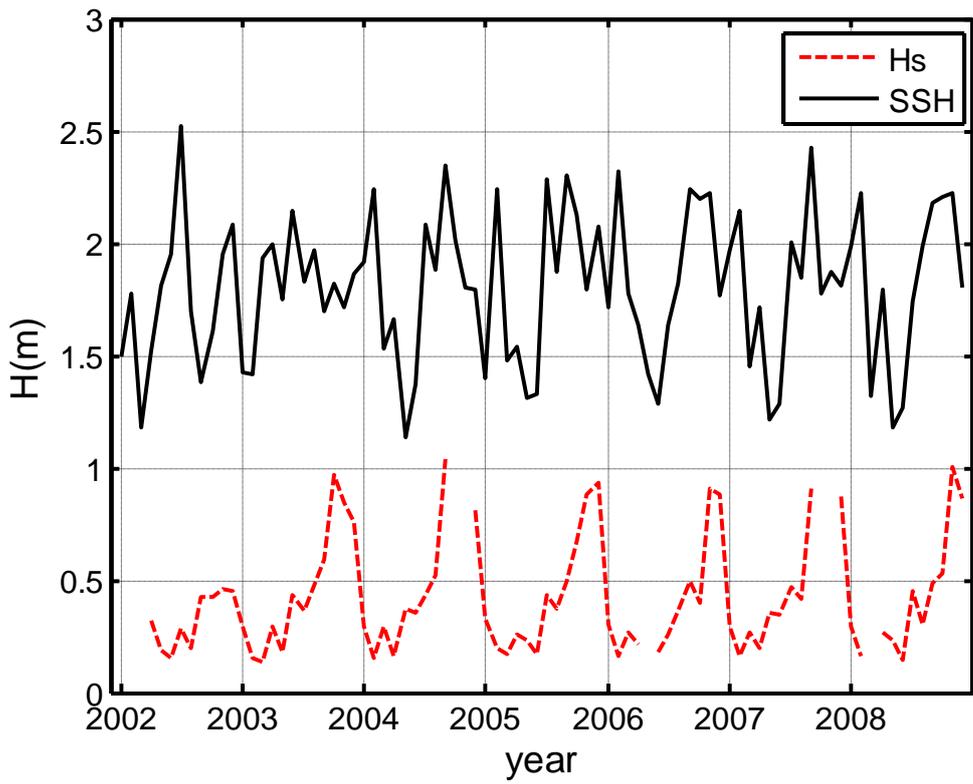


圖 4-11 臺北港實測資料與 S1 地區近岸測高資料月平均圖

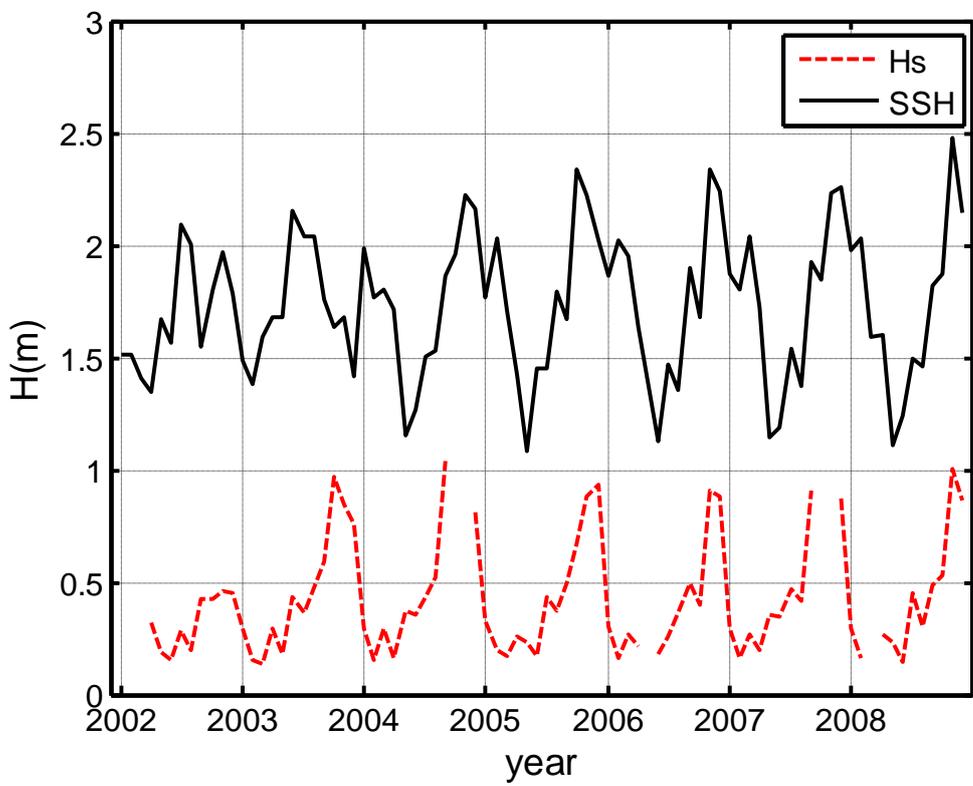


圖 4-12 (如圖 4-11，S1 地區遠岸)

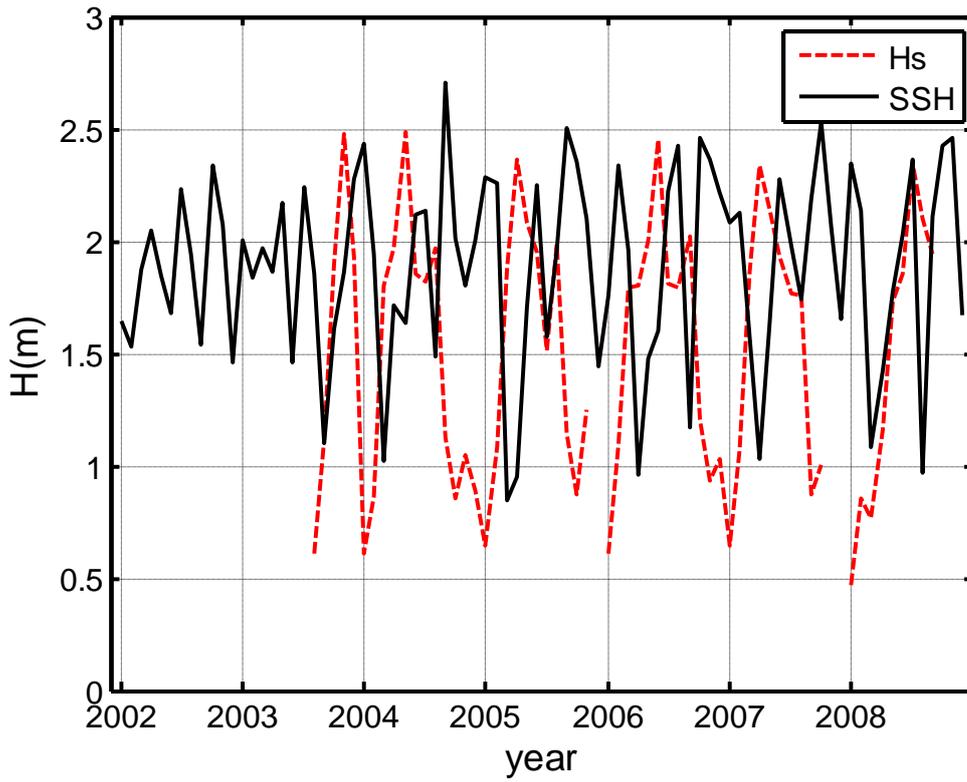


圖 4-13 臺中港實測資料與 S6 地區近岸測高資料月平均圖

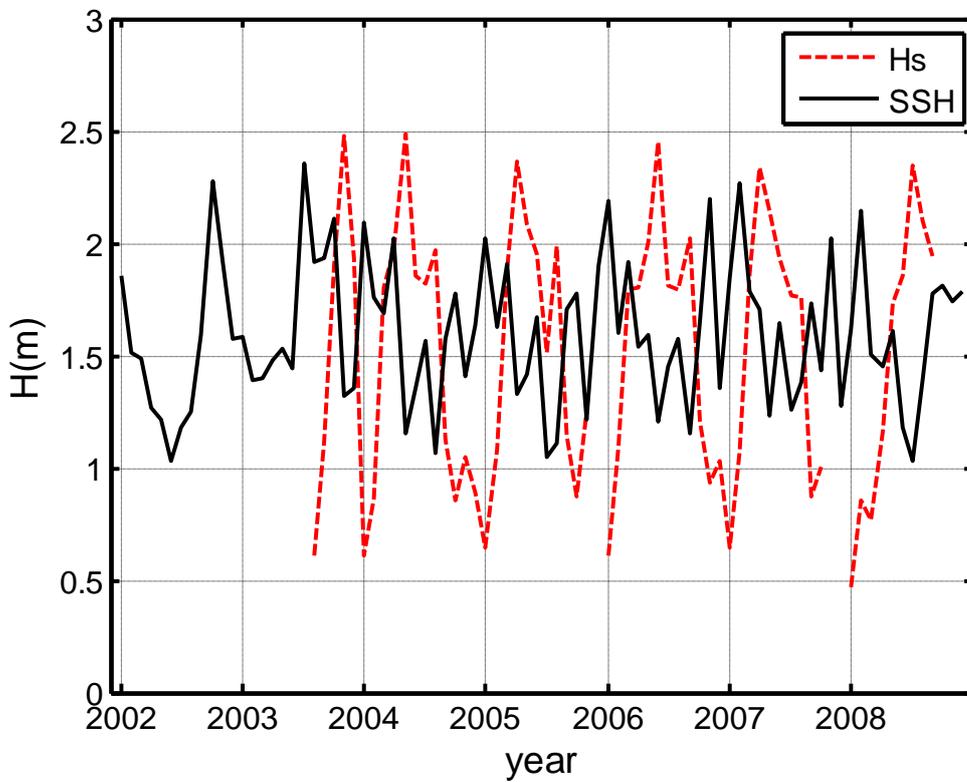


圖 4-14 (如圖 4-13，S6 地區遠岸)

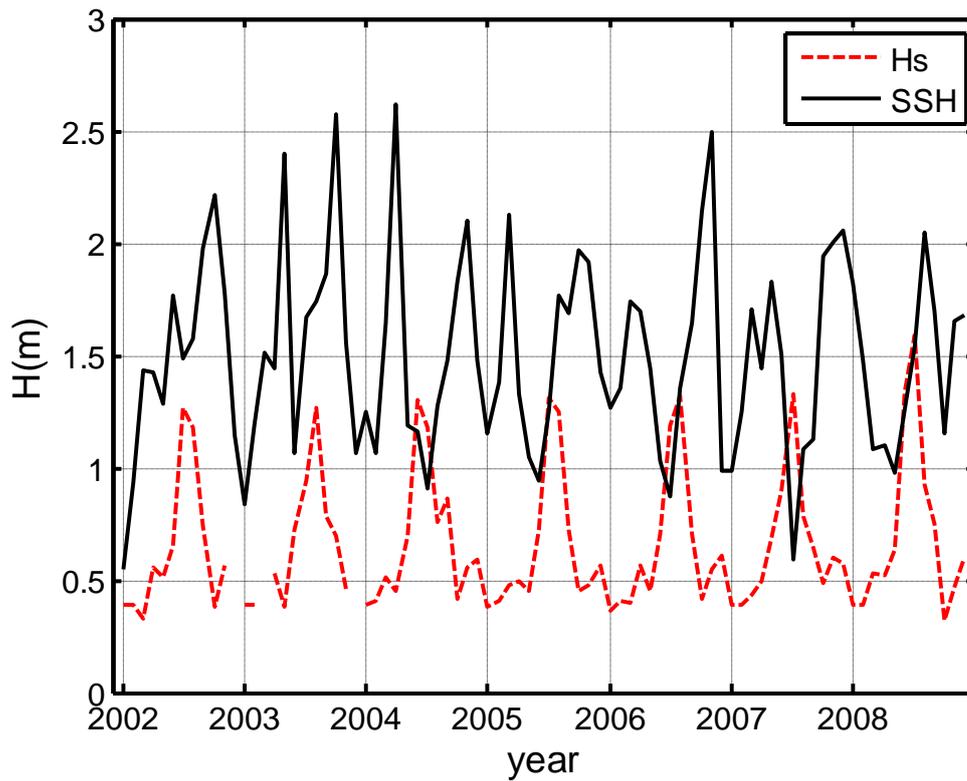


圖 4-15 安平港實測資料與 S5 地區近岸測高資料月平均圖

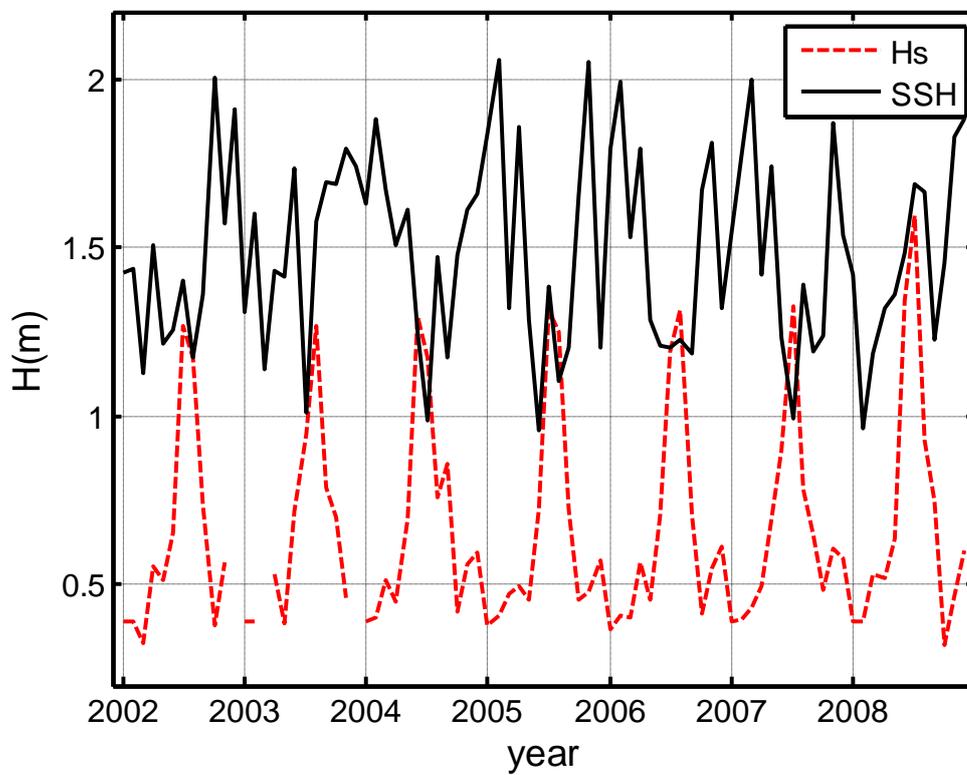


圖 4-16 (如圖 4-15，S5 地區遠岸)

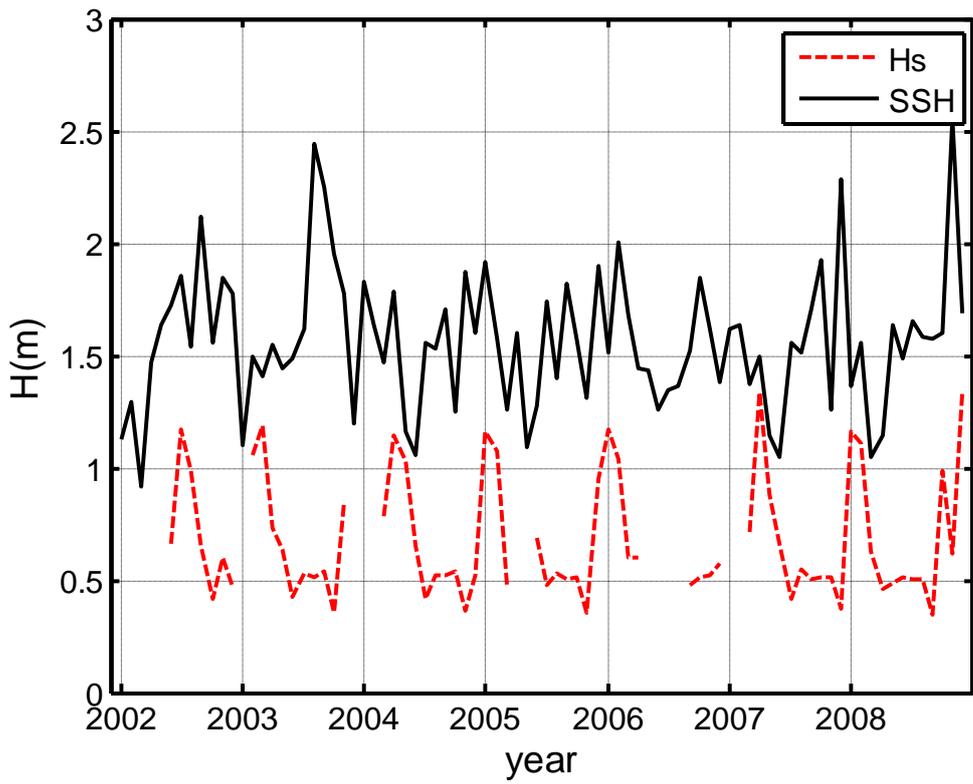


圖 4-17 高雄港實測資料與 S4 地區近岸測高資料月平均圖

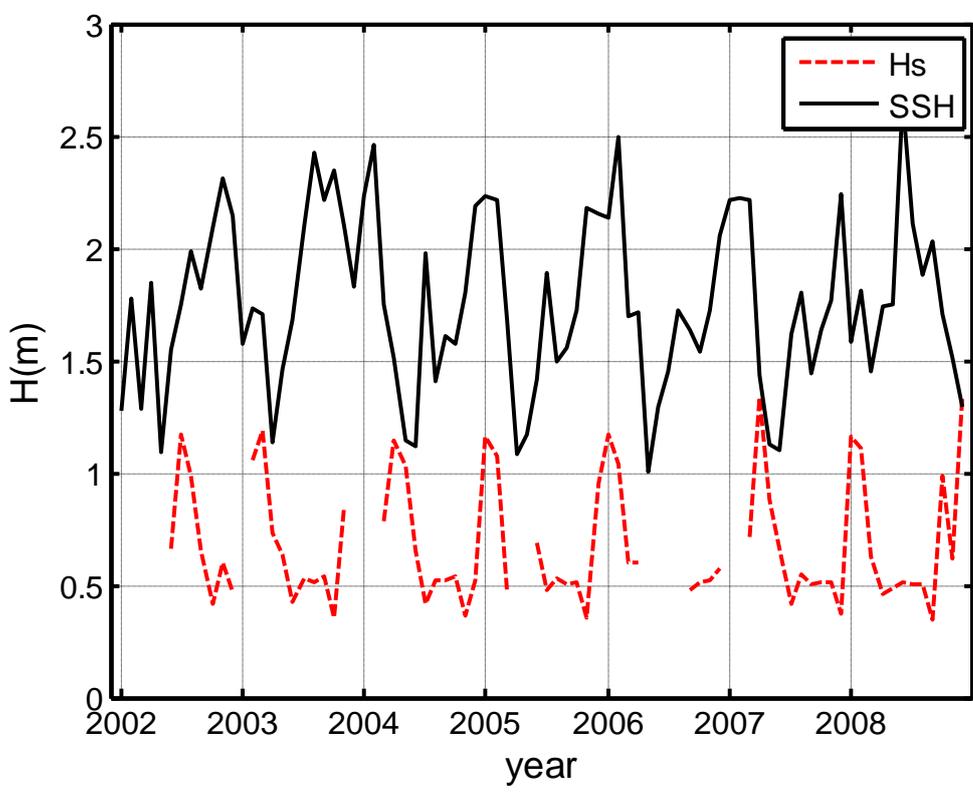


圖 4-18 (如圖 4-17，S4 地區遠岸)

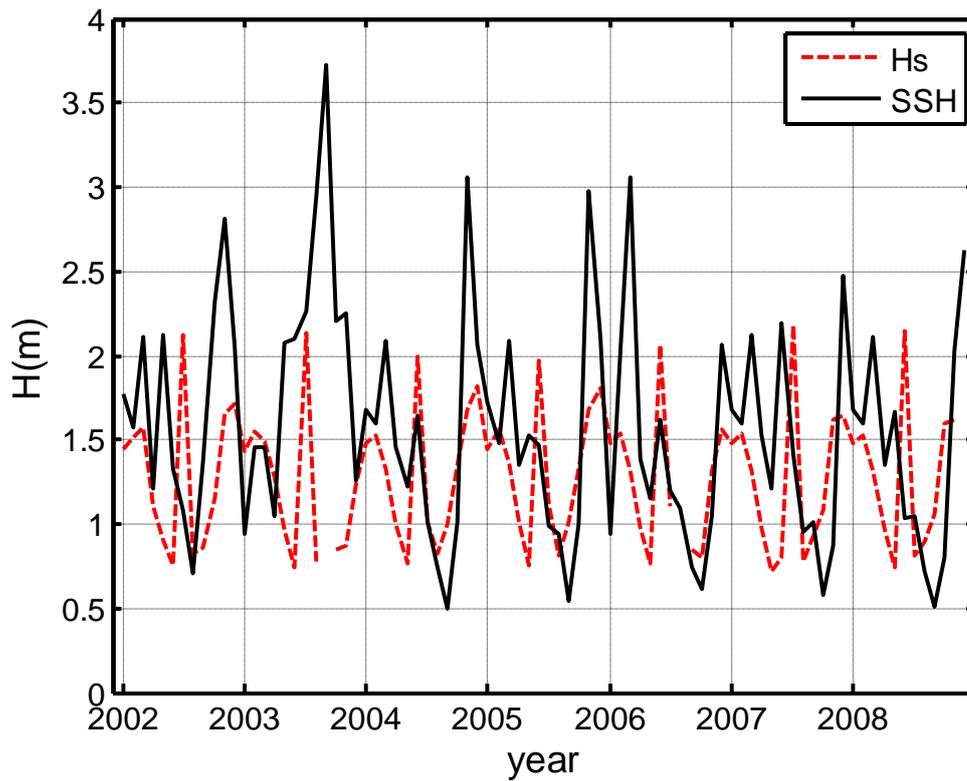


圖 4-19 花蓮港實測資料與 S2 地區近岸測高資料月平均圖

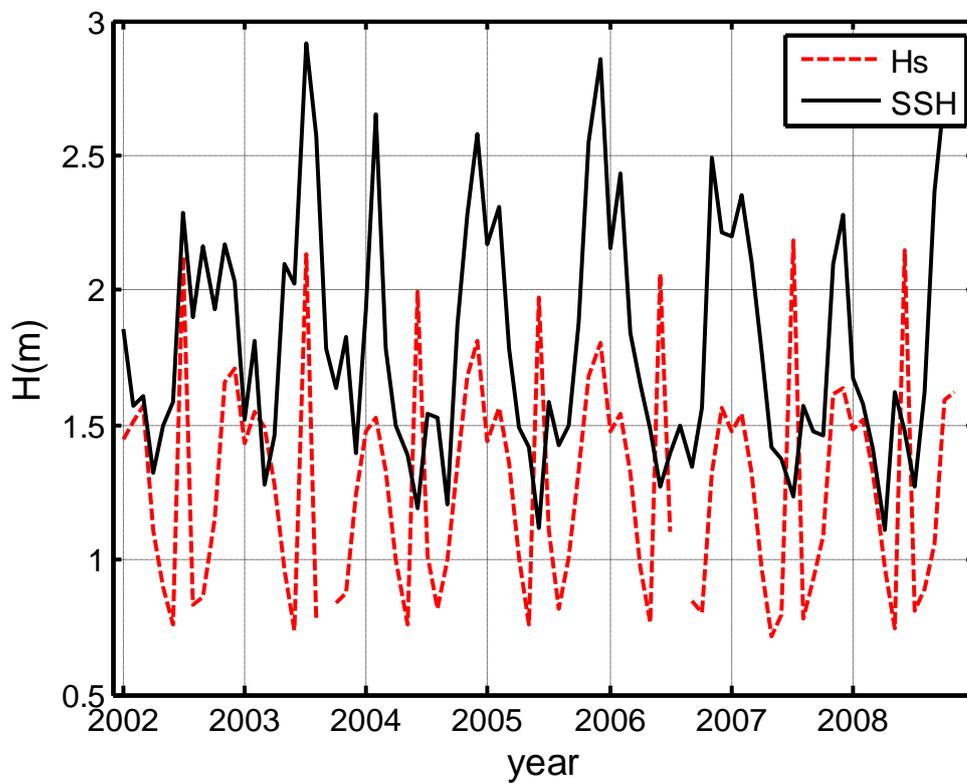


圖 4-20 (如圖 4-19，S2 地區遠岸)

第五章 結論與建議

5-1 結論

本文利用荷蘭代爾夫特理工大學建立的雷達高度計資料庫系統 (Radar Altimeter Database System)，採用 2002 年至 2008 年之間的衛星測高資料，分析在台灣周圍外海波浪的時空特性，最後並與傳統定點實測資料做比較，建立兩者關係。

衛星測高資料的分析上，根據本文結果在宜蘭地區(S1)及花蓮台東地區(S2)為同樣情況，近岸為 Gamma 分布，而遠岸則為 Weibull 分布。在台東屏東地區(S3)則是不管近遠岸皆為 Normal 分布，高雄屏東地區(S4)皆為 Gamma 分布。台南地區(S5)在近岸為 Weibull 分布，遠岸為 Gamma 分布，臺中苗栗地區(S6)則又是不管近遠岸皆為 Weibull 分布。臺北地區(S7)近岸為 Gamma 分布，遠岸為 Normal 分布。然而不管是依據絕對誤差或是殘餘確定係數，結果都顯示臺北地區(S7)在近岸方面與賴(2007)在臺北港之研究結果為 Gamma 分布相同。花蓮港在內之近岸區域則與江(2006)結果一致，亦為 Gamma 分布。綜合所有結果發現，台灣周圍外海之波浪是無法使用同一種分布描述之，惟有配合空間上的不同使用較恰當的分布，才能在工程應用上推估合理的波高值。

另一方面，若波高分布越類似的月份，其各月份所推估出來的參數應會越相近，在分群中分在同一個群集的機會也越高，因此本文由推估出來的參數以 K-Means 群集分析。各區域衛星測高資料之季節分類情形，大多數的區域冬夏季有著非常明顯的分別，而在高雄屏東地區之結果則是顯示分類為夏季之月份為 3 月至 11 月，擁有較長的夏季波高分布情形。臺南地區則是略為凌亂，分類結果在 3 月至 10 月之間跳過了 6 月及 8 月，此情形可能為用來群集分析之依據只有機率密度推估出的參數是不夠的。至於定點港口之分析結果，各定點港口季節分類選用的分布函數分別為，臺北港與臺中港為 Weibull 分布，安平港與高雄港為 Gamma 分布，花蓮港則是 Log-Normal 分布，而各分類結果也符合直觀上的認定，夏季多為五月至九月間。其中臺

中港分類結果較長，為三月至九月，此一結果可能為用來做群集分析之依據僅有機率密度函數之參數，故若能有更多分析依據，如風速等資料，將能使季節分類更趨完善。

最後衛星測高與定點實測之比較這方面，結果顯示臺北港的差異最大，每月的月平均波高最大可差異到 12 倍之多，其餘港口至多皆在 6 倍之內。而其中臺中港的衛星測高與定點實測資料最為接近，甚至是有衛星測高資料比定點實測資料還要小的情況發生。花蓮港則是有在四、五月時發生衛星測高突然比定點實測還要小的情形，其於月份又是衛星測高資料較大之情況。綜合所有比較結果，在五個港口所在的劃分區域上，衛星測高資料普遍上比定點港口資料來的大。

5-2 建議

本文期望建立衛星測高與定點實測此兩者間的關係，能夠對未來工程或學術研究上能夠有所幫助，而在此對於相關問題上提出以下幾點建議：

1. 本文將台灣周圍海域依海底地形分成七區，再以距岸距離之遠近做為細分之依據。而其中之 50 公里為本文所訂定之距離，因此是否在東西岸皆以此值仍是需要探討之課題，若是能夠更確定其分界範圍，則必能更加完整描述海上波浪之特性。
2. 為求季節分類之準確性，因此本文在衛星測高資料及定點實測資料的選用上皆使用所有有效波高，分析上可能也將颱風期間之波高納入考慮範圍，有鑑於颱風波浪皆是較大的值，在使用絕對誤差此評估指標時可能會影響結果，因此可能將屬於颱風波浪的部份剔除，並以殘餘確定係數做為主要評估指標是較為妥當的。

參考文獻

1. 錢志春(1991) 「海浪及其預報」，氣象出版社，第 189 頁。
2. 郭一羽(2001) 「海岸工程學」，文山書局。
3. 江俊銘(2006) 「花蓮港海域波浪之波高分佈及其統計特性研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
4. 李明璋(2007) 「台灣海域之波高分佈及其週期分佈之較」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
5. 朱景鉅(2007) 「應用衛星測高資料探討台灣外海波浪特性」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
6. 賴佳裕(2008) 「台灣海域短期波高與週期的最適機率分佈之研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
7. Abdalla, S., J. R. Bidlot, and Janssen, P. A. E. M. (2004) "Assimilation of ERS and ENVISAT wave data at ECMWF", *Proceedings of the ENVISAT ERS Symposium*, Salzburg, Austria.
8. Bowman, A. W. and A. Azzalini (1997) *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis*, Oxford University Press.
9. Cotton, P. D., Carter, D. J. T. and Challenor, P. G. (2003) Geophysical validation and cross calibration of ENVISAT RA-2 wind and wave products at Satellite Observing System and Southampton Oceanography Centre, *Satellite Observing System*, Goldaming, UK.
10. Cox, A. T., Cardone, V. J. and Swail, V. R. (1999) "On the use of in-situ and satellite wave measurements for evaluation of wave hindcasts," *CLIMAR 99, WMO Workshop on Advances in Marine Climatology*, Vancouver, Canada.
11. Krogstad, H. E. and Barstow, S. F. (1999) "Satellite wave measurements for coastal engineering applications," *Coastal*

- Engineering*, Vol. 37(3), pp. 283-307.
12. Longuet-Higgins, M. S. (1952) "On the statistical distribution of the heights of sea waves," *J. Marine, Res.*, Vol. 9, pp. 245-265.
 13. Pan, J. (1992) "Long-term joint distribution of one-tenth large (or significant) wave height with average period," *China Ocean Eng.*, Vol. 6, pp. 383-394.
 14. Putz, R. R. (1952) "Statistical distribution for ocean waves," *Trans. AGU.*, Vol.33, pp. 685-692.
 15. Queffeulou, P. (2003) *Cross validation of ENVISAT RA-2 significant wave height, sigma0 and wind speed*, CCVT final report, IFREMER, BP 70, 29280 Plouzané, France.
 16. Queffeulou, P., Bentamy, A. and Guyader, J. (2004) "Satellite wave height validation over the mediterranean sea", *Proceedings of the ENVISAT ERS Symposium*, Salzburg, Austria.
 17. Satheesh, S. P., V. K. Praveen, V. Jagadish Kumar, G. Muraleedharan and P. G. Kurup (2005) "Weibull and Gamma distribution for Wave Parameter Predictions," *J. Ind. Geophys. Union*, Vol. 9, No. 1, pp. 55-64.
 18. Skandrani, C., Lefèvre, J. M. and Queffeulou, P. (2004) "Impact of Multisatellite altimeter data assimilation on wave analysis and forecast," *Marine Geodesy*, Vol. 27, pp. 1-23.