

## 斷面和平面造波模擬-量測水面變化雜訊之考量

尹 彰<sup>1</sup> 周宗仁<sup>1</sup> 黃偉柏<sup>2</sup>

### 摘要

爲了要建立起一套完全由自己開發的造波系統，以供日後國內相關單位從事波浪研究之用，本研究嘗試在國科會的支持下，在海洋大學、河海工程學系、周宗仁教授所主持的「海洋工程綜合實驗館」裡，把一個現有的小斷面水槽改裝。目的是希望從最基本的硬體結構，到控制程式的設計都全部由國內自行完成。雖然在執行這個計劃的過程中，遭遇了一些困擾，進度非常緩慢，然而仍然有一些膚淺的心得，在這裡大膽地提出來，希望能從國內專家的批評中吸取一些經驗。本文藉著不同的取樣時間量測、分析波高計所反應出的電子雜訊的特性。並進一步試著用數值濾波器濾掉這些雜訊，以期日後分析量測數據時能將這些雜訊的影響減到最小。

### Wave generation in Ocean Engineering Laboratory - Some considerations concerning noises during measurements

J. Z. Yim C. R. Chou W. P. Huang

### ABSTRACT

To be able to generate waves with desired properties, the project, supported by NSC, have attempted to rebuild a small wave flume. The flume is located in the Ocean Engineering Laboratory of the Department of Harbour & River Engineering, National Taiwan Ocean University. The objective of this project is to develop, both in hard- and software, a control system by our own. Although progress of this project is very slow, we have, nevertheless, discovered some interesting aspects. These are presented here in this paper with the expectation of a broad-banded responses and suggestions. In this paper, we discuss the characteristics of (electronic) noises due to the device as measured by the wave gauges. With the hoped that, contaminations of the experimental results due to noises can be reduced in future, we further present our attempts in applying digital filters to reduce their effects.

### 一、前言

海面上的波浪經過不同的生成原因，從四面八方受到各種作用後到達某一地，它結構的複雜是不言而喻的。然而爲了要能夠開發、利用海裡的資源，同時確保海上工程的安全，進一步地瞭解海面波場是必要的。大致上來說，描述海面上波浪的方式可以分成四種：(1)直接用肉眼觀測；(2)利用(傳統的)

統計方式把觀測的結果分類，再套配成各種模式；(3)利用傅利葉轉換求取一維波場在頻率領域裡的特徵；以及近一、二十年來比較流行的(4)利用各個測站間的交互譜求取波場能量的分佈方式等。

不論是以哪一種方式觀測到波場的特性後，爲了要探討它們對目標物(海事工程、海岸變遷等等)的影響，就需要利用數學模式，或是在實驗室裡進行模擬實驗。早先的學者們受到了造波機的限制，只能在水槽(池)內打出單方向的規則波。隨著技術的進步，利用電腦控制造波板動作的造波方式漸漸取代了只能做單調往返運動的造波，而不規則波的

1. 國立台灣海洋大學教授

2. 國立台灣海洋大學博士後研究

模擬實驗也逐漸地取代了示性波實驗。

近些年來學者們發現，不論是要能夠合理地計算工程結構物所受的力，還是要考慮它們所可能產生的振動，如果能夠考慮到海面上不同方向、不同頻率波浪的分佈情形的話，所得到的結果會比只考慮單一方向的長峰不規則波浪精確很多。Funke 和 Mansard (1992)指出，在某些條件下短峰波實驗所得到的結果會和長峰波的結果相差到 25%左右。另外，文和宇(1985)也指出，波場能量的分佈方向對泥沙的沖積以及海岸的變遷都有很大的影響。雖然說，早在五〇年代人們就已經把有關方向波譜的理論應用到波浪預報及船體運動等問題的研究上了。可是一直到目前為止，各國學者對怎麼測定一個波場裡波浪能量在不同方向的分佈情形也還沒有一個定論(Brissette, 1992; Nwogu, 1989)。進年來國內外的學者對方向波譜的研究不遺餘力，可是就像 Funke 和 Mansard (1992)所指出的，有關方向波譜在海岸(洋)工程的應用上還並不是很成熟。由於這類的工程往往花費龐大，如果能夠在實驗室內以模型方式進行測試，就可以節省下一筆可觀的經費。

然而，僅僅是想要在一個斷面水槽的某個特定地方，模擬出一個較接近真實海面所量測到的(單向)頻譜就已經是一件不容易的事。雖然就理論上來說，只要(1)把現場實際量測到的波浪資料轉換成頻譜；(2)把這些頻譜裡各個不同能量的成份波依照某種模式 - 譬如說，隨機相位或是隨機振幅法 - 組合成不規則的水面變化；(3)再藉著電腦依照這些合成的水面變化控制造波機的推程就可以了(Hughes, 1993)。可是因為這裡面除了必須考慮到波浪的分散性以外，還牽涉到了波 - 波之間可能的交互作用等問題。筆者(尹)曾在國科會的支持下，在海洋大學、河海工程學系的「海洋工程綜合實驗館」裡利用全長一百公尺，寬、高各三公尺的大斷面水槽、及 50×50×1.2 公尺的平面水池裡做了一些實驗，希望能設計出一套完整的程式來探討斷、平面造波的結果。雖然也獲得了一些初步的成果。不過，不論是在有關規則波、還是單、多方向不規則的造波部份，和先進國家的水準比較起來都有相當的一段差距。用機械方式造波有許多困難。舉個例來說，要造個(線性的)簡諧波的話，原則上只要使造波板做規則的運動就可以了。但是，因為連結各個桿件

之間的非線性(運動)的緣故，往往使得所造出來的波變成是非線性的。如果再考慮到波浪的所造成水面的上下起伏是要由造波板的水平移動所『轉換』出來的話，就可以想像得到機械造波的困難了。圖 1 是在「海洋工程綜合實驗館」大斷面水槽所造出來的、頻率是 1.0 Hz 的『規則波』。可以很清楚地看出來，水槽裡除了 1.0 Hz 的主頻波以外，至少還有 7 個高階階的倍頻伴同它存在。另外，低頻的地方也有一些不規則的『振動』。

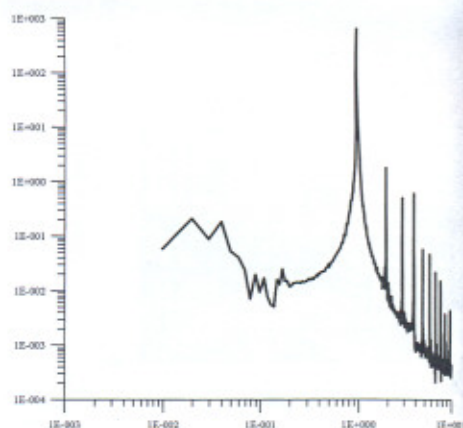


圖 1 主頻是 1.0 Hz 的規則波頻譜 (林, 1999)

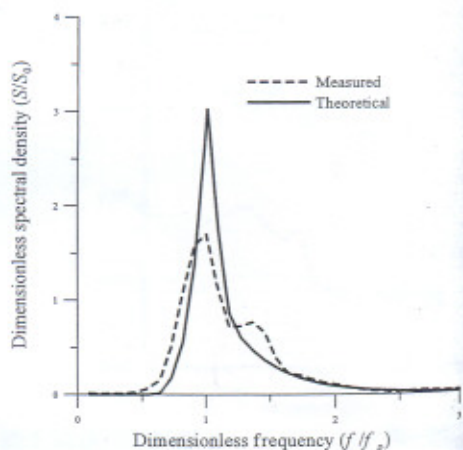


圖 2 量測到的與理論頻譜的比對。目標頻譜：  
JONSWAP

僅僅是造規則波就有一些問題，那麼如果模擬單方向不規則波的時候又是怎麼樣的呢？前面也提到過了，目前做有關海洋工程研究的時候，為了模擬當地的風波場，學者大多是用頻譜法。把量測到



的波浪資料轉換成頻譜後，再利用一些標準的模式頻譜(Bretschneider, 1959; Pierson-Moskowitz (P-M), 1964; JONSWAP, 1973 等)找出適當的形狀、位置等參數，再把這些頻譜化成各個含有不同能量的成份波，由電腦控制造波機造出。

圖 2 是在水槽內所量測到的、與理論頻譜的比對圖。可以看出來這兩者之間有相當大的差異。要說明的是，這並不是一個特例。幾乎所有的實驗結果差不多都是這個樣子。有關之所以會有這樣結果的原因，會在「研究方法及進行步驟」裡談到。

最後，再舉一個多方向波的例子來說明本文的重點。圖 3 是多方向不規則波的實驗結果。圖 3 是主頻 1.1 Hz、波浪行進主方向 112.5° 多方向不規則波的實驗結果。從圖裡可以看出來，波浪在各個無因次的角度上都或多或少地有一些能量。這固然和所用來估算方向頻譜的方法有關，可是也和造波機有關。

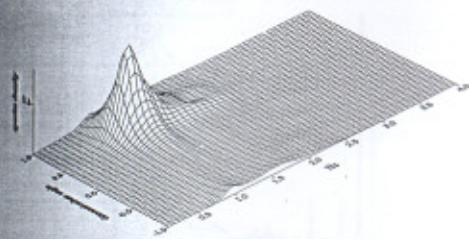


圖 3 多方向不規則波場的方向頻譜圖 (黃等人, 2000)

一般來說，可以簡單地把利用機械造波的目的分成兩大類。一是要利用所造的波來從事學術性的探討有關波浪的種種性質。譬如說，Lake 等人 (1977; 同時請參考：Su, 1982; Pierson 等人, 1992; Tulin & Waseda, 1999) 利用機械造波探討非線性波的演變。另一種則是利用機械造波來從事有關海事工程的實驗。然而，不論利用造波機造波的主要目的是什麼，總是希望能夠完全地控制造波機，纔能在所要的地方造出所想要的波。雖然國內有許多的單位都有電腦控制的造波機，理論上來說，應該能夠造出具有所想要特性的波浪。可是，事實上卻可能都像本文所附的幾個圖所呈現的結果一樣，離所需要的結果有一段距離。本計劃的主要目的是想以

三年的時間，建立起一套完全由國內自己開發的控制造波機的程式，以供日後國內相關單位利用從事波浪研究。

## 二、實驗設備

小斷面水槽是由水槽本體、造波機所組成的。水槽本體的尺寸為 50 m × 1 m × 0.8 m (長、寬和深)。造波動力採用富田(Fukuta)電機公司所生產的感應伺服馬達驅動(servomotor)。訊號系統則由西門子(Siemens)公司所生產的伺服器控制(simovert masterdrives)。

量測系統則是由波高計、波高計增幅器以及記錄器所組成的。進行實驗時，使用全英公司製造之 50 公分長之電容式波高計擷取數據。經由增幅器，與記錄器連線記錄。波高計增幅器每部為 6 頻式。目前所用的記錄器是 TEAC 公司製造的 DR-F1 類比/數位轉換器(A-D converter)。將波高計所傳回之類比訊號(電壓值)轉換成數位訊號以機械碼記錄於 1.2 MB 軟式磁碟機。

## 三、實驗條件與分析方法

有關雜訊的實驗分成三個部份，即靜電雜訊、小斷面造波機馬達開動時的雜訊、以及平面多方向造波機馬達開動時的雜訊。為了瞭解取樣時間間隔(sampling rate,  $\Delta t$ )與雜訊之間的關係，量測時用了三種取樣頻率，分別是 20、50、以及 200 Hz。表 1 是這個實驗的條件。

表 1 實驗條件

實驗條件	取樣時間間隔 ( $\Delta t$ ) [sec]
靜電雜訊	0.05, 0.02, 0.005
小斷面造波機馬達開動	0.05, 0.02, 0.005
多方向造波機馬達開動	0.05, 0.02, 0.005

分析量測結果時所用的方法和一般處理時間序列所用的步驟一樣，即

### 1. 去除平均值

根據宗和胡(1993)的說法，這個平均值代表一個「直



分量」，因為直流分量的傅利葉轉換是在  $\omega = 0$  的地方出現一個很大的譜峰，這就會影響在  $\omega = 0$  左、右的頻譜曲線，因而產生了比較大的誤差。因此，必需把時間序列的平均值去除掉。

## 2. 去除可能含有的趨勢

所有比所要探討對象週期要長很多的變化都稱做「趨勢」(trend)。可以把去除趨勢的方法粗略地分成兩種：(a)線性或近似線性的趨勢和(b)其它類型的趨勢。一般用多項式來擬合前者後再把它直接從訊號記錄裡扣除；而對後者來說，就要用數值濾波器(digital filter)來把不要的訊號濾掉。有關的方法可以參考 Bendat 和 Piersol (1986)的書。

## 3. 求取頻譜

因為所要探討的對象是所謂的隨機變數，所以必須要減少譜估計的方差。因此，就不能直接計算頻譜，而必須要對樣本粗譜進行平滑處理，以便增加  $\chi^2$  分佈的自由度，進而得到理論譜的無偏估計。本文採取時間和頻率領域平滑法。有關較詳細作法的描述可以參考 Bendat 和 Piersol (1986)，以及陳和馬 (1991)。

## 4. 再計算、套配它們的統計分佈

為了日後分析隨機波的統計分佈，本文裡使用了多個統計模式。不過，與本次實驗關係較大的模式只有兩個，它們分別是：常態或高斯分佈以及均勻分佈。

# 四、結果與討論

在本節裡將依本次實驗的條件分成三小節，即靜電雜訊、小斷面造波機馬達開動時的雜訊、以及平面多方向造波機馬達開動時的雜訊，來討論。

## 4.1 靜電雜訊

當實驗室裡所有造波機馬達都關閉時，理論上來說，從波高計→增幅器→類比-數位轉換器這個組合裡所接收到的就只有所謂的「靜電雜訊」了。圖 4 是取樣時間間隔  $\Delta t = 0.02$  秒時，第一測站所量測到靜電雜訊的時間序列圖。就筆者所知，理論上來說，所謂的「靜電雜訊」應該是隨機分佈的。因為它是由許多不同來源的干擾所構成的，所以似乎應該是形成高斯分佈的狀態纔對。不過，從圖 4 的結果看起來，却不是這樣。為了檢驗它的組成成份，

把這時間序列畫成頻譜，從頻域裡面來檢驗它們的成份(圖 5)。從圖 5 裡可以發現，從最低的解析頻率-0.0488 Hz-開始，一直到 1 Hz 為止，頻譜的能量從大約是  $5 \times 10^{-6}$  的地方下降到  $5 \times 10^{-7}$ ，然後保持幾乎是水平的狀態，分辨不出來有什麼特殊的主頻率。而在 10 和 20 Hz 的地方則有兩個主成份，這期中又以 10 Hz 處主成份的能量最大。10 Hz 處之所以會有一個主成份的原因很簡單，這是交流電的周期成份折疊回來的結果。然而，在 20 Hz 處的主成份就比較難解釋了。目前不知道是由什麼原因造成這樣的結果。

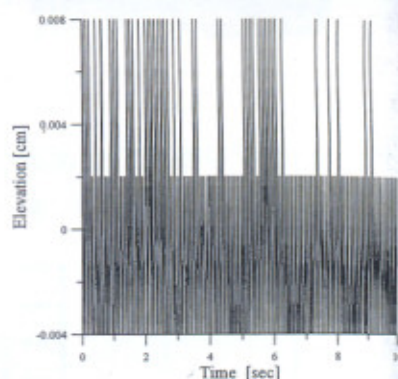


圖 4 取樣時間間隔  $\Delta t = 0.02$  秒時，第一測站所量測到靜電雜訊的時間序列圖

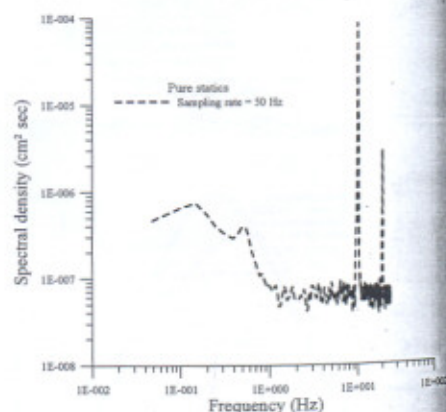


圖 5 取樣時間間隔  $\Delta t = 0.005$  秒時，第一測站所量測到靜電雜訊的頻譜圖

圖 5 是取樣時間間隔  $\Delta t = 0.005$  秒時，第一測站所量測到靜電雜訊的頻譜圖。從圖中可以看出來，在頻率是 20、40、60、80、以及 100 Hz 處各自有一個小尖峰。其中在 60 及 80 Hz 處的峰值



比其它的峰值要來得高。比對圖 2 和圖 3 後，推估圖 2 裡在 20 Hz 處的主成份可能是原本在 20 Hz 處的振動成份再加其它更高頻 - 譬如說, 80 Hz - 的振動折疊回來的結果。然而, 目前除了可以很肯定地指出, 60 Hz 處的峰值是交流電的周期成份外, 其它峰值所代表的意義就不清楚了。

爲了進一步瞭解這些量測結果的特性, 本文對這些數據再進行統計分析。因爲不能確定這些數據的統計特性, 本文一共用了四種統計模式, 分別是: 高斯分佈、Gram-Charlier 序列、均勻分佈、beta 分佈。圖 7 是所有馬達均未開啓時所量到時間序列的機率分佈圖。取樣的時間間隔是  $\Delta t = 0.05$  sec。從圖中可以看到, 四種模式的套配結果都不好。事實上, 由圖中的柱狀圖可以發現, 這個時間序列只在某些特定的區間纔有較大的出現機率。而這種分佈, 並沒有任何的統計模式可以套配。其它取樣時間間隔的套配結果也與圖 7 類似, 在這裡不再重覆。

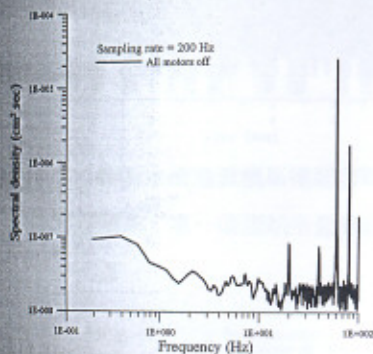


圖 6 取樣時間間隔  $\Delta t = 0.005$  秒時, 第一測站所量測到靜電雜訊的頻譜圖

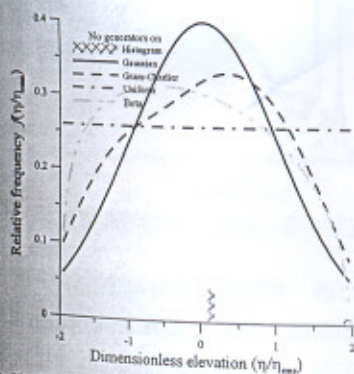


圖 7 取樣的時間間隔是  $\Delta t = 0.05$  秒時的時間序列的機率分佈圖。

爲了瞭解一個亂數的高斯, 或均勻, 分佈的時間序列的特性, 本文以平均值是 0, 以所量測時間序列的變異爲變異的方式 - 即  $N[0, \sigma^2]$ , 或  $U[0, \sigma^2]$  - 並以 20、50、及 200 Hz 爲取樣頻率模擬出六組時間序列。然後再依一般分析時間序列的方法, 分別計算它們的頻譜, 及套配它們的統計分佈。圖 8 是取樣時間  $\Delta t = 0.02$  秒時的部份常態亂數時間序列圖。圖 9 是三種取樣頻率的頻譜圖。從圖 9 裡可以看出來, 頻譜的能量均勻地分佈在整個頻率領域裡, 並沒有那個地方有主成份。這個特性符合亂數時間序列 - 亦即所謂的白噪音(white noise) - 的特性。

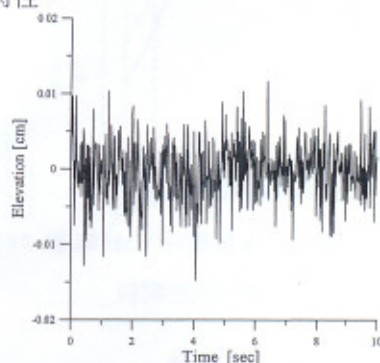


圖 8 取樣時間  $\Delta t = 0.02$  秒時的部份常態亂數時間序列圖

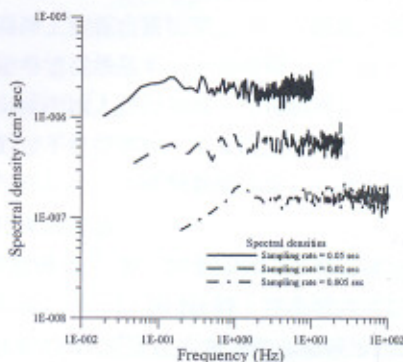


圖 9 三種取樣頻率的常態亂數時間序列頻譜比對圖

圖 10 是取樣時間  $\Delta t = 0.005$  秒時常態亂數時間序列的機率分佈圖。從圖中可以看出來, 高斯分佈的曲線和 Gram-Charlier 序列的曲線融合在一起, 幾乎分辨不出來了。這表示這個時間序列確實是似乎合乎常態分佈的。圖 11 則爲同樣取樣時間的均勻亂數(時間序列)的機率分佈套配圖。和圖 7 比

起來，圖 10 和圖 11 的統計特性顯得清晰的多了。其它的結果和這些圖相似，在這裡省略。

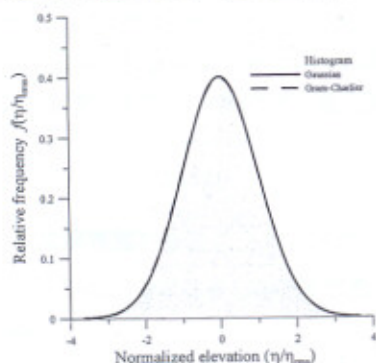
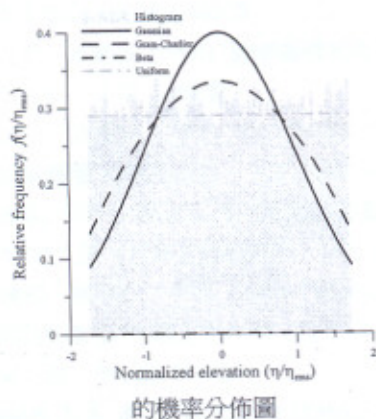


圖 10 取樣時間  $\Delta t = 0.005$  秒時常態亂數時間序列



的機率分佈圖

圖 11 取樣時間  $\Delta t = 0.005$  秒時勻亂數時間序列的機率分佈圖

#### 4.2 造波機馬達開啟時的靜電雜訊

理論上來說，當實驗室裡造波機的馬達開啟時，既使並未造波，因為馬達處於「熱機」狀態 (idling)，所以會有某一個固定的轉速。爲了要知道這個因素對波高計量測結果的影響，分成兩個部份來討論，分別是：小断面水槽造波機馬達開啟時所量測到的結果；及平面水池造波機馬達開啟時所量測到的結果。

##### 4.2.1 小断面水槽造波機馬達開啟時所量測到的結果

圖 12 是當小断面水槽造波機馬達開啟時，用 50 Hz 採樣頻率，在第一個測站所量測到的部份時間序列圖。與所有造波機馬達都關閉時的結果(圖

4)比較起來，這個結果顯得規律的多了。從圖 12 中可以看到，這個時間序列裡似乎隱含著有一或多個有固定頻率的振動。爲了驗證這個推論，把它們的頻譜畫出來。圖 10 是用三種採樣頻率，在第一測站的頻譜比對圖。

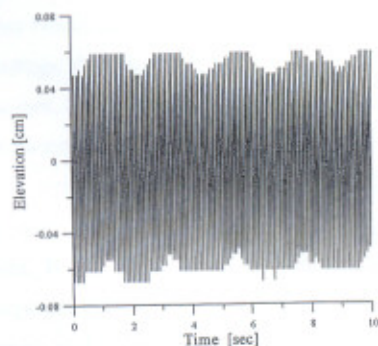


圖 12 當小断面水槽造波機馬達開啓時，用 50 Hz 採樣頻率，第一個測站所量測到的部份時間序列圖

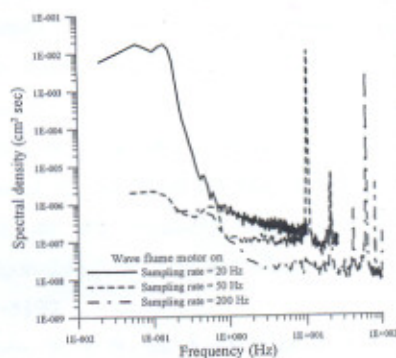


圖 13 用三種採樣頻率，在第一測站的頻譜比對圖

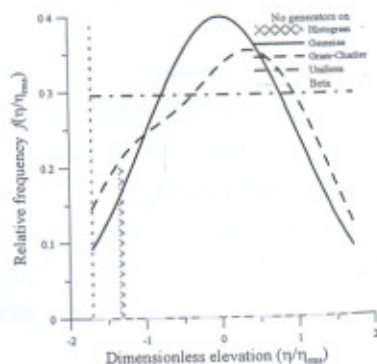


圖 14 用 200 Hz 的採樣頻率，在第一測站所量測到時間序列的機率分佈圖

從圖 13 裡可以看出來，當小断面水槽造波機馬



達開啓時，用 20 Hz 採樣頻率在第一測站所量測到的頻譜，在低頻處的能量明顯地變得較大。其它的採樣頻率結果則似乎與上一小節裡的結果沒有什麼特別地不同之處。在本文的後面會進一步地探討這個問題。

圖 14 則是用 200 Hz 的採樣頻率，在第一測站所量測到時間序列的機率分佈圖。雖然說，在這個圖裡，振動在各個區間的出現機率較圖 4 要均勻的多，但是嚴格地說起來，不論是常態(圖 10)，或是均勻，分佈的套配結果都不是很好。

#### 4.2.2 平面水池造波機馬達開啓時所量測到的結果

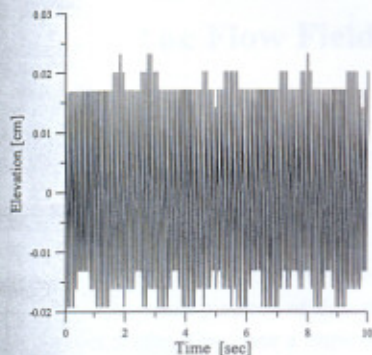


圖 15 當小斷面水槽造波機馬達開啓時，用 50 Hz 採樣頻率，第一個測站所量測到的部份時間序列圖

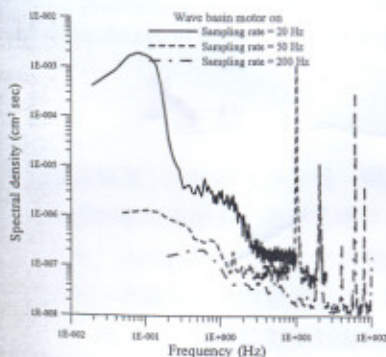


圖 16 用三種採樣頻率，在第一測站的頻譜比對圖

當平面水池造波機馬達開啓，而小斷面水槽造波機馬達關閉時，理論上來說，因為這時的干擾源離波高計較遠，所以所量測到的，除了靜電的干擾外，還有從較遠的地方所傳來的干擾。由於造波機馬達離量測點較遠，所以受到的影響會比小斷面水

槽造波機馬達開啓時要小一點。這可以從所量測到的時間序列記錄(圖 15)要比後者不規則(圖 12)得到証實。至於由三種不同取樣頻率所得到的頻譜，則似乎與圖 13 沒有什麼很大的差異(圖 16)。另外，由量測結果的機率套配結果(圖 17)來看，也與前面兩種情況類似。所用的統計模式裡沒有一個可以用來描述實際的情形。

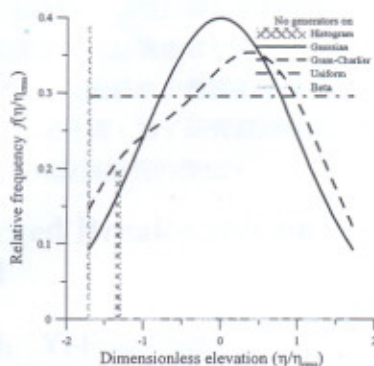


圖 17 用 20 Hz 的採樣頻率，在第一測站所量測到時間序列的機率分佈圖

## 五、結論

在國科會的支持下，筆者(尹)試著把一個座落於海洋大學、河海工程學系、周宗仁教授所主持的「海洋工程綜合實驗館」裡的小斷面水槽改裝。目的是希望從最基本的硬體結構，到控制程式的設計都全部由國人自行完成。不可諱言地，整個計劃進行的並不是很順利。本文就已完成的部份，有關電子雜訊和馬達振動對量測結果的干擾，提出一些估算結果與討論。

1. 取樣時用了 20、50 和 200 Hz 等三種取樣頻率。當取樣頻率大於 20 Hz 時，在高頻處可以看到交流電振動頻率(或是它折疊到較低頻後)的成份。然而在其它如 20、40 以及 80、100 Hz 處都有規則振動的成份存在。由於目前不知道廠商在製造波高計有沒有加裝所謂的「高阻」(band-stop)或「反折疊」(anti-aliasing)的設計。因為目前還沒有辦法造波，所以不能判斷這些高於 10 Hz 的振動成份是如何造成的。

2. 不論是高斯分佈，還是均勻分佈，都不能合理地描述所謂「靜電雜訊」的統計特性。筆者日前看到

一份有關用 Poisson 分佈來模擬雜訊的文章。如果可能的話，倒是值得一試的。

3. 雖然從頻譜上看起來，使用低通的數值濾波計的確可以達到削減高頻成份振動的效果。然而，同樣地因為目前還沒有辦法造波，所以也不知道使用這些濾波器後對要分析對象 - 規則或不規則波 - 的影響。

### 謝誌

本文係獲國科會補助方得以完成。計劃編號：NSC-91-2611-E-019-008。特此致謝。

### 參考文獻

1. 文聖常、宇宙文(1985) "海浪理論與計算原理" 科學出版社，北京，662 頁。
2. 宗孔德、胡廣書 (1988) "數字信號處理" 清華大學出版社，北京，445 頁。
3. 陳上及、馬繼瑞 (1991) "海洋數據處理分析方法及其應用" 海洋出版社，北京，660 頁。
4. 林銘欽 (1999) "斷面水槽內規則波的實驗與模擬" 海洋大學，河海工程研究所，碩士論文。
5. 黃偉柏、周宗仁、尹彰 (2000) "離岸堤對波場方向性的影響" 中國土木水利工程學刊，第十二卷第三期，591 頁-599 頁。
6. Bendat, J. S. & A. G. Piersol (1986) "Random data. Analysis and Measurement procedures" 2nd ed. John Wiley, New York, N.Y., pp. 566.
7. Bretschneider, C. L. (1959) "Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves", *Tech. Memo. No. 118, Beach Erosion Board, U. S. Army Corps of Engineers*, pp. 192.
8. Brisette, F. P. (1992) "Estimation of wave directional spectra and applications to the study of surface gravity water waves", *Ph.D. Thesis, Dept. Civil Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada*, pp. 333.
9. Funke, E. R. & E. P. D. Mansard (1992) "On the testing of models in multidirectional seas" *Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy, ASCE*, pp. 3454-3467.
10. Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Mueller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell & H. Walden (1973) "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)" *Deut. Hydrogr. Z., Suppl. A8, No. 12*, pp. 95.
11. Hughes, S. A. (1993) "Physical models and laboratory techniques in coastal engineering", *World Scientific Pub. Co., Singapore*, pp. 568.
12. Lake, B. M., H. C. Yuen, H. Rungaldier & W. E. Ferguson (1977) "Nonlinear deep-water waves: theory and experiment. Part 2. Evolution of a continuous wave train" *J. Fluid Mech.*, Vol. 83, pp. 49-74.
13. Nwogu, O. (1989) "Analysis of fixed and floating structures in random multi-directional waves" *Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, B. C. Canada*, pp. 261.
14. Pierson, W. J. Jr. & L. Moskowitz (1964) "A proposed spectral form for fully developed seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii", *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, pp. 5181-5190.
15. Pierson, W. J. Jr., M. A. Donelan & W. H. Hui (1992) "Linear and nonlinear propagation of water wave groups", *J. Geophys. Res.*, Vol. C97, pp. 5607-5621.
16. Su, M.-Y. (1982) "Evolution of groups of gravity waves with moderate to high steepness" *Phys. Fluids*, Vol. 25, pp. 2167-2174.
17. Tulin, M. P. & T. Waseda (1999) "Laboratory observations of wave group evolution, including breaking effects" *J. Fluid Mech.*, Vol. 378, pp. 197-232.