

平面造波水池之特性探討

尹 彰¹ 周宗仁² 林昭圭¹ 黃偉柏³

摘要

本研究是利用海洋大學「海洋工程綜合實驗館」裡的平面造波水槽(50m×50m×1m)及多方向蛇形造波機等設備，於實驗室造出以 Bretschneider-Mitsuyasu 和 JONSWAP 為目標頻譜的多方向不規則波。實驗的主要目的主要分成兩個部份。分別是(1)瞭解該造波機和水槽的特性，以提供往後利用這些設備模擬自然海域波場時的一個參考；(2)探討所造出的多方向不規則波的波高和週期的統計特性，並利用頻譜分析波浪在頻率域能量的分佈狀況。試著建立分析多方向不規則波的基本模式。分析實驗結果發現，當以 JONSWAP 為目標頻譜時，各測點的譜形與目標譜較為相近，但是整體的頻譜能量似乎會偏向於高於目標頻譜的主頻；當以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜時，在能量愈集中的實驗條件(散佈參數 S_{max} 值愈大)，所得的各種統計結果與目標值也愈相近，但是各測點頻譜的主頻則會散佈在目標頻譜的主頻四周。另外，水槽的波高機率分佈大致符合 Rayleigh 模式，且與 Goda(1985)所得到的統計結果十分吻合。

On the Characteristics of Wave Field in a Laboratory Basin

Yim John Z.¹ Chung-Ren Chou² Jaw-Guei Lin¹ Wei-Po Huang³

Abstract

It is very important for the researchers of coastal engineering to develop the theory to generate the ocean wave field in an experimental basin. The experiments were carried out in the multidirectional wave basin of "Ocean Engineering Laboratory" in National Taiwan Ocean University, which has a length of 50m, a width of 50m, a depth of 1m. A segmented wave generator consisting of 56 segments, which a width is 28m. The target spectrum are JONSWAP and Bretschneider-Mitsuyasu. The purposes of this experiment are: Understanding the characteristics of directional waves that generated in basin and established the model of analyzing directional waves. Generating directional irregular waves by using JONSWAP as target spectrum is closed to the theory spectrum in shape. The shift of the peak of spectrum to high frequency is observed. The relationship between the parameter S_{max} and the shape of spectrum is closed in using Bretschneider-Mitsuyasu as target spectrum to generate waves. And the distribution of wave heights in the basin is closed to Rayleigh distribution and similar to Goda's(1985) statistical result.

1. 國立台灣海洋大學副教授
2. 國立台灣海洋大學教授
3. 國立台灣海洋大學博士班研究生

一般進行水工模型試驗是在一有限的水域裡進行。試驗水槽的大小、水深都有限度，而且機械性造波裝置的特性也有不同。如何在實驗室裡正確地造出與現場具相同特性的波浪行為，一直被海洋工程專家學者所關注，相關的研究也一直在進行中。而一般都有的一個共識便是要進行一嚴謹的水工模型試驗前，首先必須要對試驗水槽與造波機的特性有一定程度的瞭解，以期日後能模擬出更接近實際海象的結果。

本文利用海洋大學『海洋工程綜合實驗館』裡的平面實驗水槽及多方向蛇形造波機，進行一系列的實驗，並整理出實驗結果，試著探討它們的特性，以供往後在利用此設備模擬海洋波浪時的參考。相關的研究不勝枚舉，以下僅就與本文所需要用到的做一概述。有關波高週期統計方面的研究有：

示性波高與示性週期的觀念由 Sverdrup 和 Munk(1947)建立。在波高記錄中，經零切法決定波高後，從大至小排序，前 1/3 波高之平均值為示性波高。而這 1/3 波高所屬的週期的平均值為示性週期。這種方法對紛紜的波浪記錄提供了一種簡單的表示方式。

1952 年，Longuet-Higgins 利用 Rice (1945) 的喧擾理論(random noise theory)，發現若波場頻譜為窄頻(narrow band)的，亦即波浪能量集中在很窄的頻率範圍內，同時水面變化是合乎高斯分佈的條件下，海面上的波高分佈應屬於 Rayleigh 分佈。

Goda (1985)利用名古屋港的波高記錄，計算示性波高、示性週期、最大波高、和最大週期，並回歸出各種參數之間的相互關係。他藉著擷取不同長短的記錄，比較波浪個數對統計結果的影響。他認為由於海洋波浪的不規則性，在尋求上述各種參數之間的關係時，會因擷取的波浪個數、場地、和時間的不同，而導致不同的結果。因此，在波高為 Rayleigh 分佈之假設前提下，他提出幾個簡單具體的統計公式表示各個參數之間的關係。

有關頻譜方面的研究有：Phillips(1958)指出，在一個完全發展的海域上，因為波場所能吸收的

能量已經達到飽和，所以風場進入到波場裡的能量應該完全被碎波消散掉。在這個假設下，他把各參數無因次化，認為頻譜裡高頻的部份應該是呈 f^{-5} 的形式。

而一些藉著實際量測資料所得到的頻譜如下：

JONSWAP 頻譜，由 Hasselmann 等人 (1973) 整理北海聯合觀測(Joint North Sea Wave Project)波浪記錄資料所求得。特點是把 Pierson-Moskowitz 頻譜加入了尖峰集中度係數(peak enhancement factor)，其能量集中度較高，適用於波浪成長的海域。

所謂的 Bretschneider-Mitsuyasu (1980)頻譜，是 Mitsuyasu 等人觀測經長時間吹送同時風域甚大的波場，波場的能量密度已呈一定不再增大。藉著由多組記錄，分析其波高、波長的分佈及波高與週期結合分佈等求得的 Bretschneider 頻譜的修正式。

二、實驗設備及量測方法

2.1 實驗設備

本實驗是在海洋大學的『海洋工程綜合實驗館』裡的平面水槽中進行，使用到的相關設備簡述如下：

- 1、實驗水槽：水槽長、寬各 50 公尺，深 1 公尺。水槽底部及側壁為鋼筋混凝土結構。實驗是在等水深的條件下進行。
- 2、造波機：實驗館內現有造波機組為由七部日本本田工業株式會社(Honda Engineering Co. Ltd)出廠的多方向不規則造波機所組成。每部造波機控制八片造波板，造波板總長為 28 公尺，可造出任一方向($0 \leq \theta_0 \leq \pi$)， θ_0 是造波主方向、不同週期($0.5 \text{ sec} \leq T_{1/3} \leq 5 \text{ sec}$)之規則波與不規則波波列。
- 3、波高計及波高計增幅器：進行實驗時，使用全英公司製造之 50 公分長之容量式波高計擷取數據。經由增幅器，與個人電腦連線記錄。波高計增幅器每部為 6 頻道。本試驗使用 26 個頻道，包含一組量測入射波高(兩根波高計)及六組量測方

向頻譜的波高計陣列(每組四根)。實驗配置圖如(圖 1)。

4、記錄器：由 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 1.2MB 軟式磁碟機，資料擷取頻率是 50Hz 每次實驗擷取 6144 個資料點。

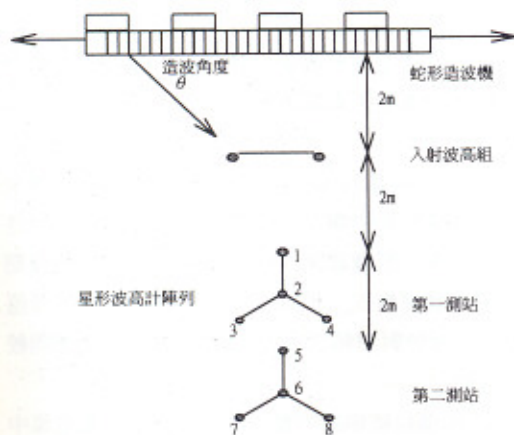


圖 1 實驗配置圖

5、分析軟體：造波完成後，把 DR-F1 類比 / 數位轉換器所記錄訊號，轉換成波面記錄後再做處理。但受限於轉換器只有八個頻道，因此在處理實驗數據時，僅能對兩組波高計陣列(八個測點)做處理。

2.2 實驗條件

經計算結果得到，主頻 f_p 需大於 1.25Hz 才可以視為深水波。考慮到造波機性能後，本實驗採用 $f_p = 1.0, 1.2, 1.4$ Hz 三種條件。由於造波程式在輸入造波條件時，需以示性波高及示性週期輸入，經由式(3)換算輸入條件如下表：

表 1 造波條件

造波條件/造波目標波譜	Bretschneider-Mitsuyasu JONSWAP
主頻(Hz)	1.0; 1.2; 1.4
示性波高 $H_{1/3}$ (cm)	9.6; 6.7; 4.9
示性週期 $T_{1/3}$ (sec)	0.93; 0.78; 0.67
造波主方向	90°; 135°
散佈函數參數 S_{max}	10; 20; 50

三、資料分析與討論

3.1 波高與週期的統計特性

3.1.1 各示性波高參數比

Goda(1985)曾用 171 個波列做分析，他發現 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 的平均比值為 1.27，而 $H_{1/3}/\bar{H}$ 的平均比值為 1.59。本實驗結果與 Goda 所歸納出的統計值相當吻合。見表 2。

如果波場的波高符合 Rayleigh 分佈的話，示性波高與均方根波高應成下列關係：

$$H_{1/3} = 1.416H_{rms} \quad (1)$$

表 2 各示性波高參數之比較

Goda(1985)統計結果	實驗結果
$H_{1/10} = (1.15 \sim 1.45)H_{1/3}$	$H_{1/10} = 1.22202H_{1/3} - 0.075$
$H_{1/3} = (1.4 \sim 1.75)\bar{H}$	$H_{1/3} = 1.477\bar{H} - 0.0567$

表 3 示性波高與均方根波高比較表

目標頻譜	實驗結果
Bretschneider-Mitsuyasu	$H_{1/3} = 1.37012H_{rms} - 0.08257$
JONSWAP	$H_{1/3} = 1.36117H_{rms} - 0.02548$

由表 3 可知示性波高與均方根波高在造波時不會因目標頻譜的不同而有所偏差，然而卻小於理論值。這表示實驗所得的頻譜及示波高的關係式小於 Rayleigh 分佈的理論值。

3.1.2 各示性週期參數比

表 4 示性週期參數之比較

Goda 統計結果	實驗結果
$T_{1/10} = (0.9 \sim 1.1)T_{1/3}$	$T_{1/10} = 1.01454T_{1/3} - 0.0050$
$T_{1/3} = (0.9 \sim 1.4)\bar{T}$	$T_{1/3} = 1.10559\bar{T} - 0.05267$

從表 4 可以看出，本實驗結果，週期與 Goda(1985)所做的統計結果大致符合。

由本實驗的各種波高回歸結果可以看出，平面水槽裡的波高分佈大致符合 Rayleigh 分佈，且與 Goda(1985)所做的統計結果極為相近。各種示性週期參數的回歸結果也與 Goda 的結果吻合。但是在波高較大及週期較長時，則比較會偏離平

均值。

3.2 造波週期與波高準確性

在造波前要輸入目標示性波高與示性週期，經反覆實驗，調整造波機輸出功率(gain)，直到所量測到入射波高計符合輸入值。在此，以一個量測站做一單位探討所量測資料是否符合原始輸入值。各個測站含四根波高計(四個測點)。造波板、入射波高量測組、第一量測站、第二量測站間各距離都是 2m。

3.2.1 目標值與實驗值比

在比較示性週期及示性波高與輸入值的結果後，可歸納出下列幾點特性：

- 1、波高有明顯的隨距離而減弱的情形，而週期變化則不甚明顯。由於實驗水槽為等水深地形，不應該發生淺化效應。除底床磨擦，水分子黏滯力的能量消耗外，在實驗進行時目視觀測時曾發現有碎波現象。這可能是波高減低的因素。不過，這是一個初步的推測，真正的原因，有待更進一步的實驗來做探討。
- 2、比較誤差率的變異數 σ ，週期的偏異並不隨著距離而變小，波高則否。

表 5 示性週期之誤差

目標頻譜	第一量測站	
	平均誤差 \bar{Er} %	誤差偏異 $Er\sigma^2$
B-M 頻譜	-4.210	1.8646E-3
JONSWAP 頻譜	-1.468	7.4693E-4

表 6 示性波高之誤差

目標頻譜	第一量測站	
	平均誤差 \bar{Er} %	誤差偏異 $Er\sigma^2$
B-M 頻譜	-10.38	3.5102E-3
JONSWAP 頻譜	-8.229	5.8044E-3

3、從表 5 表 6 的統計結果可以看出，無論是就週期，或是波高來說，目標頻譜是 JONSWAP 時的造波誤差率都比 Bretschneider-Mitsuyasu 時來得

小。由於 JONSWAP 是頻譜屬於能量較集中的窄頻頻譜，所以推斷目標頻譜能量集中的程度對實驗誤差會有所影響。因此，再藉由不同的散佈參數 S_{max} 值對波高及週期的影響，對此假設做一驗證。

3.2.2 能量集中程度對示性週期與波高之影響

散佈參數 S_{max} 值愈大，表示能量愈集中。因此可對前述示性波高與示性週期的改變與造波時能量集中度是否有關的假設進行探討。由實驗結果得到：

- 1、對頻譜較寬的 Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜來說，能量的集中與否，對實驗中示性週期與示性波高的誤差影響非常明顯。不論是波高或是週期皆隨著散佈參數 S_{max} 值變大(能量愈集中)而誤差值減少。至於對窄頻之 JONSWAP 頻譜，影響則較不明顯。
- 2、在兩個目標頻譜的實驗結果發現，能量愈集中變異數值愈大，表示偏離愈嚴重，意即隨著能量愈集中，波場的誤差率偏離度愈大。這個現象，在 JONSWAP 頻譜的實驗結果表現極為明顯。是否是因為能量集中超過某一程度後，波浪的振幅變大，相對的，波形尖銳度變高，因此碎波發生的機率也跟著變大，造成此結果，有待更進一步的實驗來證明。
- 3、假設把散佈參數 S_{max} 視做一個對目標頻譜能量集中程度的加權係數，對於頻寬較寬的 Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜來說，因為散佈函數的改變而更加強了能量的集中程度，另一方面，對 JONSWAP 頻譜來說，能量集中程度原本就已經很高，再乘上加權係數後，反而使能量過度的集中，因而發生第二點討論所做的假設，即會造成所量測到的結果更偏離目標值。不過，這只是根據目前有限的資料所做的一個推測，真正的原因還要等進一步的實驗與更詳盡的理論才能知道。

3.3 頻譜分析

3.3.1 主頻與示性週期間的關係

Goda 和 Suzuki (1985)經實驗推導發現主頻與

示性週期關係應符合下式：

$$f_p = 1/(1.05T_{1/3}) = 0.952381/T_{1/3} \quad (2)$$

以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜造波所得到主頻與示性週期的關係為：

$$f_p = 1.02959/T_{1/3} - 0.131562 \quad (3)$$

以 JONSWAP 為目標頻譜造波所得到主頻與示性週期的關係為：

$$f_p = 0.952971/T_{1/3} + 0.0698527 \quad (4)$$

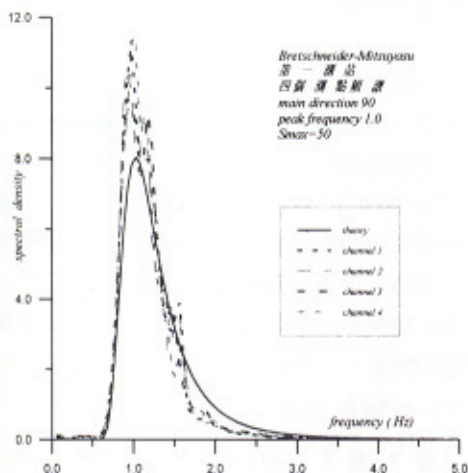


圖 2 Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜

1、圖 2 與圖 3 分別是 Bretschneider-Mitsuyasu 與 JONSWAP 頻譜在實驗條件是主頻 1.0 Hz、散佈參數 $S_{max} = 50$ 、造波主方向 $\theta_0 = 90^\circ$ 時、第一站的頻譜分佈情形。由實驗的結果已知，示性波高與示性週期是否符合造波機的設定值與能量集中程度有絕對的相關性。因為圖 2 和圖 3 裡的實驗是在所有實驗中能量最集中的條件，所以理論上來講，其結果的誤差度應最小。從 Bretschneider-Mitsuyasu 目標頻譜的實驗結果來看，卻可發現在各站的主頻位置相當分散。不過，JONSWAP 目標頻譜的各站主頻位置則相當一致。從這裡可推斷造成主頻的分散的原因，應與目標頻譜的特質有關。

2、目標頻譜 JONSWAP 在散佈參數 S_{max} 值是 20 及 50 時，主頻與示性週期的關係幾乎與理論式完

全相符。從這裡可以知道，如果實驗時是以 JONSWAP 為目標頻譜的話，那麼在能量集中時，所得到的主頻與示性波高，偏離設定值的誤差率就愈小。

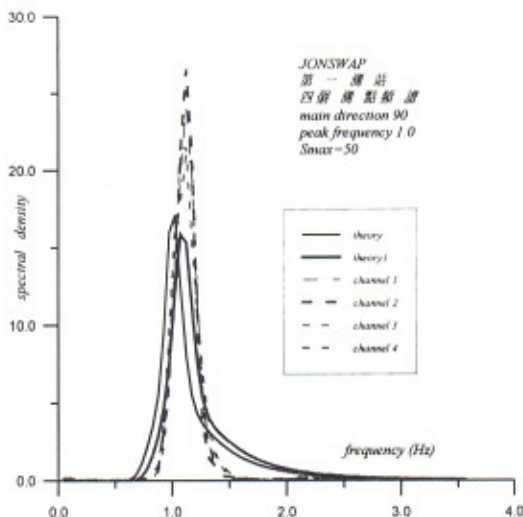


圖 3 JONSWAP 頻譜

3.3.2 實驗主頻值與目標主頻值比較

1、就目前所得到的結果來看，如果實驗時是以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜的話，那麼所量測到的主頻，就會比較接近設定值，但在各測點所量測到的主頻值並不一致；而以 JONSWAP 為目標頻譜的話，主頻較為一致，但是偏離設定值則較大。平均誤差前者是後者 1/3，變異數則為 2.6 倍。

2、如果與 Goda(1985)所回歸的示性週期與主頻的結果比較，由於誤差平均值皆為正，表示兩種頻譜的造波結果主頻都有向高頻移動的趨勢。而以 JONSWAP 移動較多。但是如果以本實驗結果回歸的示性週期與主頻的關係代入原理論頻譜，發現以 JONSWAP 為目標頻譜的造波結果，主頻則與回歸結果較符合。(圖 3)

3、以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜造波時，如果所設定的目標頻譜在能量愈集中時的話，所量測到的主頻就愈接近理論值，不過各個測點所量測到的主頻，則散佈在設定值的附近並不一致。目標頻譜的能量愈大，各個測點所量測到的主頻就愈有可能偏離設定值。

4、從實驗結果發現 JONSWAP 頻譜的主頻與示性波高的關係雖與理論值較符合但是與實際上輸入值的差則較大；由計算所得的平均誤差及變異數來看，所量測到的主頻的偏離目標值屬於整體性的，與能量集中度無關。

3.3.3 測站與能量之關係

為了探究造波水槽的示性波高、能譜能量與測點位置的關係，把每一測點的實驗結果回歸後進行討論。在波高分佈屬 Rayleigh 分佈的假設下，理論上兩者應成式(5)的關係；而 Goda(1985)的統計結果則是式(6)。

$$H_{1/3} = 4.004\sqrt{m_0} \quad (5)$$

$$H_{1/3} = 3.8\sqrt{m_0} \quad (6)$$

表 7 示性波高與頻譜能量回歸結果

測站	實驗結果
CHANNEL 1	$H_{1/3} = 3.67247\sqrt{m_0} - 0.013969$
CHANNEL 2	$H_{1/3} = 3.74063\sqrt{m_0} - 0.096672$
CHANNEL 3	$H_{1/3} = 3.69461\sqrt{m_0} - 0.0635496$
CHANNEL 4	$H_{1/3} = 3.61828\sqrt{m_0} + 0.146531$
CHANNEL 5	$H_{1/3} = 3.66255\sqrt{m_0} + 0.0242075$
CHANNEL 6	$H_{1/3} = 3.70791\sqrt{m_0} - 0.0992181$
CHANNEL 7	$H_{1/3} = 3.72398\sqrt{m_0} - 0.06895$
CHANNEL 8	$H_{1/3} = 3.74024\sqrt{m_0} - 0.0846792$

1、由表 7 的數據可以發現，整個水槽的譜能量與示性波高之間關係，並不因測點位置有所改變。

2、整體回歸結果與 Goda 的統計結果十分接近，因此可推斷示性波高與能量之間的關係符合 Rayleigh 分佈的特性。

3.3.4 距離與能量之關係

為瞭解能量的消散與距離是否成一定關係，因此挑出第一、二、五、六根波高計的量測結果做一比較。四測點連結成一條與造波機法線方向平行的直線。它們與造波板的相對距離分別為 4、4.46、6、6.46 公尺(請參考圖 1 的配置位置)。

由實驗結果可以歸納出下列幾點：

1、以多方向造波的結果來看，總能量確實會隨著離開造波機距離的增加，而愈形消散。而單方向造波則無此明顯現象。

2、就目標頻譜 Bretschneider-Mitsuyasu 的造波結果來說，隨著散佈參數 S_{max} 值的增加，能量消散的結果也愈明顯。推測結果可能是，散佈參數 S_{max} 值愈大，能量集中度也愈高，波形尖銳度愈大，導致形成碎波現象，因而造成能量消散程度也愈明顯。由第一測點， $S_{max} = 50$ 的實驗結果可以看出，能量集中造成量測到的頻譜能量值大於目標頻譜能量，接著隨距離消散至小於目標頻譜能量。

3、比較目標頻譜 JONSWAP， $S_{max} = 20$ 時第一測點和第二測點的造波結果後，推測能量最集中的地方應該是在第一測點和第二測點間。

4、如以變異數來看，大部份的實驗結果都會隨著與造波板距離的增加，即是偏離目標值的程度愈大。不過，從第五支波高計起即距離造波板六公尺後，變異數則變小，似乎表示這時候的波場已經趨向穩定。

3.3.5 頻譜與造波主方向之關係

圖 2 圖 4 是實驗條件為以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜，主頻等於 1.0 Hz、散佈參數 $S_{max} = 50$ 、造波主方向 θ 分別為 90° 和 45° 時，第一個測站四個測點所量測到的頻譜與理論值的比較。這是在所有實驗中能量最集中的條件。實驗結果討論如下：

1、就目標頻譜 Bretschneider-Mitsuyasu 的實驗結果來說，可以發現當造波主方向為 90° 時，各測點的頻譜較為一致；而當 45° 時除頻譜不一致外，主頻也相當分歧。推測是造波機的特性所致。在其他條件相同時下，分別以 90° 和 45° 為造波主方向造波時，如造波機的增益值保持不變，所量測到的波高，主方向 45° 時的結果會小於 90° 的。因此如果要以主方向 45° 造波的話，為了要使量測到的示性波高和示性週期符合輸入條件，就需要用比 90° 造波時更大的造波機增益值，這樣一來就可能造成輸出能量較不穩定。因而使得各測點所得到的主頻也相當離散。

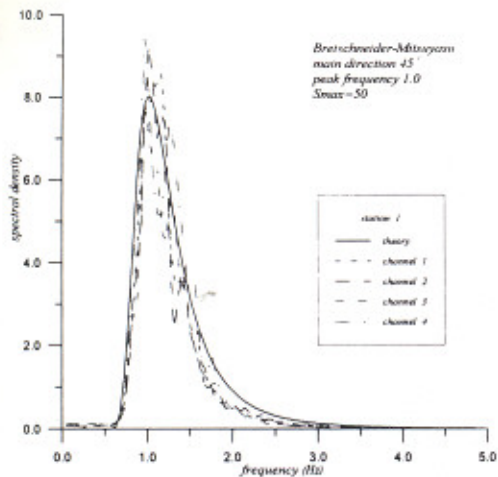


圖 4 波浪入射角 45° 頻譜比較圖

2、在上述實驗條件下，分析以 Bretschneider-Mitsuyasu 為目標頻譜後，發現不論以主方向 90° 還是 45° 的實驗結果，在高頻部分的能量皆同樣有不足的現象。Miles(1987)認為，當波形尖銳度變大，產生碎波時，非線性的擾動現象會使高頻部份的能量消散掉，這個現象會比較明顯的發生在頻譜大於 1 Hz 的地方。從圖 4 上可明顯發現這種現象。另外在 1.7Hz 皆產生另一峰值，由於出現的位置並非在倍頻處，推斷應該是波浪尚未完全發展所導致的結果。

四、結論與建議

本研究的主要目的是探討海洋大學『海洋工程綜合實驗館』裡平面造波水槽的對特性。根據前面等章的討論與分析，整理後得到下列結論和建議。

4.1 結論

1、就波高和週期的統計結果來說，比較了各種示性波高、示性週期和零次譜矩之間的關係後，發現本實驗室平面造波水槽裡的波浪大致都符合 Rayleigh 分佈的特性。雖然各種統計關係式的係數都要比理論值低些，但是卻與 Goda(1985)實測結果則相當吻合。

2、在 Bretschneider-Mitsuyasu 和 JONSWAP 兩種目標頻譜的實驗中，主頻是 1.0 Hz、示性波高 9.6 cm、示性週期 0.93 sec 的條件下，各測點所得示

性波高的偏離程度要比其它設定示性波高較小的實驗結果大，而又造波主方向 90° 要比 45° 偏離較小。可知如果造波給定的示性波高愈大，所量測到的波高，偏離目標值可能也就愈大；週期則較不受影響。

3、實驗結果顯示，波浪隨著行進距離越遠波高變小、週期變短、整體能量有衰減的現象。此現象以多方向造波時要比單方向造波時明顯許多。造多方向不規則波時會因散佈參數 S_{max} 的不同，而產生能量聚集在第一測點的現象。有時候這裡的能量，甚至會大於輸入的造波條件，但是接下來能量消散的速度也較快。

4、以 Bretschneider-Mitsuyasu 和 JONSWAP 為目標頻譜的造波結果在主頻 1.5 倍後的能量都有明顯不足的情形。而 Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜在 1.2 ~ 1.5 倍主頻處還會產生另一峰值。至於這是由於非線性的擾動、造波水槽反射波亦或是觀測點所量測的波尚未完全發展所造成，則有待更進一步實驗及探討。另外，各測點所量到的主頻也十分分歧。而以 JONSWAP 為目標頻譜的造波結果，各測點所量測的主頻較為一致，能量消散也較不明顯，但是所量到的主頻卻要比原設定值來得高些。

5、就各測點的所量得的頻譜是否一致來說，JONSWAP 頻譜實驗結果要比 Bretschneider-Mitsuyasu 佳。可得到較佳實驗結果的條件是散佈參數 S_{max} 等於 50，主頻是 1.0Hz 和造波主方向為 90°。由此可知，造波時如果設定波場能量較集中的實驗條件就可以得到較佳的結果，但是主頻卻會發生偏離給定值的現象。

4.2 建議

1、由於對於多方向不規則波的能量消散機制並不是很瞭解，因此本實驗未找到造波水槽中較佳的實驗位置。目前為止只能推斷出能量愈集中的實驗條件時可得到的譜形較符合目標值；但是相對的，波場能量的偏離目標值則愈大，而且能量消散的速度也較快，因此有待更進一步的實驗來進行。建議日後波高計的擺設以網格點的方式進行。

2、高頻部份能量的不足，究竟是由於造波機特性，亦或是給定散佈參數 S_{max} 的值得使得能量集中而導

致碎波所造成，並不清楚。有待日後更進一步實驗的驗證。

3、造波程式在造波前需輸入目標示性波高和示性週期，但是如果原始資料以主頻來做目標值，則需先經過換算，一般以 Goda(1985)所回歸的示性週期與主頻的關係式，作為換算依據，實驗結果發現種個頻譜與目標值比較有向高頻移動的趨勢，因此建議再次進行實驗時，以本文的回歸式做為新的換算依據，則可得到與目標值較相近的結果。

參考文獻

- 1.周宗仁 (1970) “海岸水力學” 國立台灣海洋學院河海工程學會,基隆,97-113 頁
- 2.黃嘉佑、李黃 (1984) “氣象中的譜分析” 氣象出版社,北京,30-32 頁
- 3.宇宙文、文勝常 (1985) “海洋理論與計算原理” 科學出版社,北京,127-262 頁
- 4.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,北京,481-515 頁
- 5.蔡東興 (1996) “斷面水槽中不規則波特性探討” 碩士論文,國立台灣海洋大學,基隆,5 頁
- 6.黃偉柏 (1998) “平面造波水槽之特性探討” 碩士論文,國立台灣海洋大學,基隆,27-30 頁
- 7.Borgaman,L.E. (1969) “*Directional spectra models for design use*” Technical Report HEL 1-14,Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkely
- 8.Bendat, J.S. and A.G. Piersol (1971) “*Random data: Analysis and measurement procedures*” 2nd ed. John Wiley, New York ,pp.56-85
- 9.Goda,Y. (1985) “*Random seas and design of maritime structures*”University of Tokyo Press,Tokyo, pp.11-39
- 10.Goda,Y. (1990) “*Random waves and spectra*” Handbook of Coastal and Ocean Engineering in J.B. Herbich(ed), Gulf Pub. Co., Houston, Vol. 1, pp.175-209
- 11.Goda,Y. (1993) “*Statistics of waves crest lengths based on directional wave simulation*” Proceedings,12th International Offshore Mech. and Arctic Engineering Symp. ASME(OMAE),Vol. 2, pp.161-168
- 12.Miles,M.D. and E.R.Funke (1987) “*A comparison of method for synthesis of directional seas*” Proceedings,6th International Offshore Mech. and Arctic Engineering Symp. ASME(OMAE), Vol. 11, pp.247-255
- 13.Massel,S.R (1996) “*Ocean surface waves: their physics and prediction* ” Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific Publishing Co. Ltd., London, Vol. 11 pp.69-87
- 14.Plate,E. (尹彰譯) (1995) “連續時間序列的分析”Unpublished manuscript,1-39 頁