

# 台灣東部外洋資料浮標觀測之風湧浪資料 特性分析

黃嘉緯<sup>1</sup> 饒國清<sup>2</sup> 黃清哲<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系研究生

<sup>2</sup> 國立成功大學近海水文中心組長

<sup>3</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系教授及近海水文中心主任

## 摘要

中央氣象局在台灣東部海域 300 公里外、水深 5600m 處（北緯 21°40'36.28"、東經 124°03'48.44"）設置有一深海資料浮標。本文利用浮標的風速資料，選定 2010 年 9 月 26 日 12 時至 30 日 23 時穩定風場時段之波浪資料加以分析。根據示性波高、平均波浪週期及波齡等資料篩選分類出強烈湧浪特性的第一波齡時區、湧浪及風浪混合的第二波齡時區及成熟風浪的第三波齡時區。並依聯合國氣象組織（WMO）於 1998 年所建議之波浪分析及預報準則得到馬勒卡颱風造成之湧浪。資料分析顯示第三個波齡時區的浮標波浪中仍有微弱湧浪，之後隨著風浪逐漸明顯；風浪能譜之尖峰頻率由 0.2Hz 往較低頻 0.16Hz 移動。在 9 月 30 日 22 時浮標所量得之波譜與 P-M 波譜尖峰頻率及能量分佈幾乎相同，顯示從當時起波浪型態趨近完全成熟風浪。但低頻部分之波浪型態仍受非線性作用之影響。

關鍵詞：深海資料浮標、完全成熟波浪、湧浪、波齡、P-M 波譜

## Wind and Swells Monitored by an Open Ocean Data Bouy at the East of Taiwan

Jia-Wei Huang\* Kuo-Ching Jao Ching-Jer Huang

\* Graduate student, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

## ABSTRACT

The Central Weather Bureau of Taiwan has deployed an ocean data buoy at the 400 km offshore of eastern Taiwan (21°40'36.28" N, 124°03'48.44" E) where the water depth is 5600m. This open area is suitable for the existence of fully developed waves, which further helps explore the wind wave characteristic in the presence of swells. A stable wind prevailed during the period of 26<sup>th</sup> of September to 30<sup>th</sup> of September, 2010, following the wind data acquired from the data buoy. The wave data during this period were sorted according to the significant wave height, average wave period and wave age into three parts, i.e. first wave age with strong swells, the second wave age with wind wave and swell matures and the third wave age with fully-developed waves. Following WMO's guideline of wave analysis and forecasting analysis in 1998, we analyzed the swells out of Typhoon Malakas. A weak swell in third wave age is identified, and later on wind wave is becoming most-obvious. Finally, the peak frequency of wind-wave spectra shifts gradually from 0.2Hz to 0.16Hz. At 22 o'clock on 30<sup>th</sup> of September, the wave spectral properties derived from data buoy matched well the peak frequency and energy distribution of corresponding P-M spectrum, indicating that the waves are approaching fully-developed sea. But the nonlinear interaction influence on low-frequency waves.

Keywords: Deep ocean data buoy; Fully-developed sea; Swell; Wave age; P-M spectrum

## 一、前言

台灣四周的海域波浪型態不同，尤其是台灣西部海域差異更大。台灣西部海域為台灣海峽，吹風距離受限，造成成熟風浪的波高及週期相對較小。東部海域為西太平洋，吹風距離遼闊，在此海域形成風浪規模相對也就較大。本文研究對象為位於台灣東南海域上的台東外洋資料浮標的湧浪 (swell) 及完全成熟風浪 (fully developed sea state) 特性。然而若要研究完全成熟風浪，除了該海域處於特定穩定風場外，並需要足夠吹風延時，風浪規模才能成長到達飽和階段，這時的波浪就是所謂完全成熟風浪。這些成熟風浪脫離當地風場以穩定之形式傳遞至其他風域時稱作湧浪。但是實際大洋上是風浪及湧浪的混合波浪，所以需要選擇一種判別風湧浪的指標，從中挑選湧浪成分不明顯的時刻的波浪，才能分析成熟風浪特性。關於判別風湧浪的研究，波齡是最被常引用的指標之一，Mitsuyasu (1981) 提出當波齡大於 1，甚至接近 1.4，此時波速大於風速，表示波浪已經離開風場，發展為成熟的波浪，此時即為湧浪 (swell)。Donelan (1993) 亦提出波齡大於 1.29，就是成熟湧浪的範圍。本文以波齡 1.29 為風浪成熟與否的判別界線，且當波齡超過 1.4 則為湧浪明顯的依據，因此波齡值越大，表示波浪愈成熟，湧浪的成分越多。對於無限風域成熟波譜的研究，Pierson and Moskowitz (1964) 在北大西洋的船舶上安裝波浪儀觀測而提出 P-M 波譜，本文由台東外洋資料浮標觀測到一維波譜資料與 P-M 波譜做比對，藉以瞭解台灣東部太平洋無限風域波譜的特性。

## 二、台東外洋資料浮標

### 2.1 位置與功能

台東外洋資料浮標位置決定是根據近十年通過台灣附近的颱風路徑統計而定，平均影響或侵襲台灣本島之颱風有超過 67% 於侵台之前通過台灣東方之海域，由台灣東岸海域西行為最常發生之侵台颱風路徑。在考量可提前 24 小時掌握這些颱風環流特性，所以 2009 年起將資料浮標位置確定於台東的東南邊約 300 公里處 (圖 1)，水深達 5600 公尺，如此可協助預報員提早掌握颱風環流暴風半徑的大小，提昇颱風未來動向預報的能力。

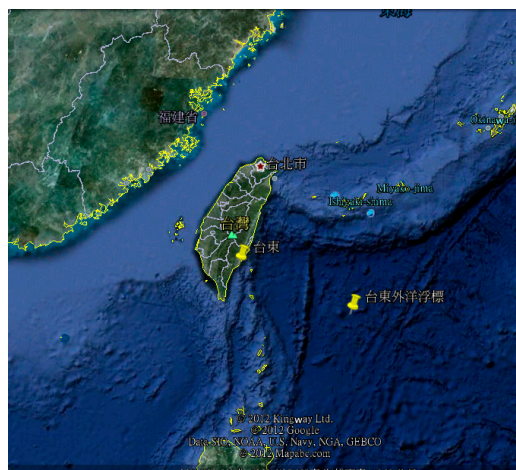


圖 1 台東外洋資料浮標位置圖

### 2.2 觀測系統

台東外洋資料浮標觀測項目包括兩組風速風向計、一組波浪儀、一組氣壓計、一組全球衛星定位系統、一組氣溫計及兩組水溫計。此外考量東部外洋為黑潮主要影響區域，所以 2012 年起亦新增一組剖面流速儀。

### 2.3 監控品管

為了確保資料品質與正確性，安裝在浮標系統的觀測儀器皆通過氣象局檢校中心的檢校合格，並與標準站於浮標出廠前進行 7 天以上資料比對合格。外洋浮標資料在整點 10 分鐘後透過衛星自動發報回傳至監控中心後，隨即由自動監控程式將資料自動品管與累積即時回傳近 24 小時的觀測成功率，並由專人定時執行人工品管，確認及過濾回傳資料的品質。

## 三、研究方法

### 3.1 風浪分析方法

資料浮標風速觀測為整點前 10 分鐘記錄一次，取樣頻率為 2Hz，平均風速為 1,200 點原始資料平均值，平均風向為 1,200 點原始風向資料以向量法相加後平均值，陣風為 1,200 點原始資料中每 3 秒之平均值，其平均最大值即為陣風值。資料浮標波浪觀測亦為整點前 10 分鐘記錄一次，取樣頻率為 2Hz。由浮標隨波三維空間運動經過分析可獲得浮標加速度譜，再從浮標加速度譜減去雜訊修正函數後計算一維水位譜，最後利用一維水位譜及方向分布函數之乘積求得方向波譜。其中示性波高  $H_s$  為

$4.004 \times \sqrt{m_o}$ ，平均週期  $T_z$  為  $\sqrt{m_o/m_2}$ ，波向為方向波譜能量最大之處所對應之方向。

### 3.2 波齡分析方法

本文利用波齡(wave age)值做為判斷風浪、成熟風浪(fully developed wind sea)與湧浪(swell)之依據。波齡值定義為  $C_p/U_{10}$ ，其中  $C_p$  為波譜主頻之相位速度， $U_{10}$  為距離海面 10 公尺處之風速。當波齡小於 1，波速  $C_p$  低於風速  $U_{10}$ ，表示波浪屬於發展中之未成熟波；波齡接近 1 時，波速跟風速一致，表示波浪逐漸成熟；當  $C_p/U_{10}$  大於 1.0 時，相位速度大於 10 公尺處風速，表示風浪逐漸脫離風域形成湧浪。因此波齡值越大，表示資料越具有湧浪特性。依 P-M 波譜理論(Pierson and Moskowitz, 1964)，波譜達到完全發展時波齡值約為 1.22。此外，Mitsuyasu (1981)提出當波齡大於 1.4 時，此時波速已大於風速，表示波浪已經離開風域發展為湧浪。因此當波齡值介在 1.22~1.4 之間時，表示當時波浪主要成分為完全成熟波，而若波齡值大於 1.4 以上，波浪主要成分為湧浪。

### 3.3 湧浪傳遞分析方法

本文採用 WMO (1988)波浪推預測章節中的方法，以颱風至觀測點  $P$  間距離  $R_p$  除以群波速度  $C_g$  來推算湧浪傳遞時間  $t$  (如圖 2)。

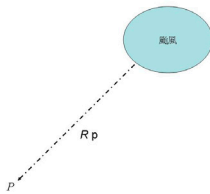


圖 2 颱風湧浪傳遞至觀測點示意圖

群波速度  $C_g$  可由下式求得：

$$C_g = \frac{C}{2}(1 + 2kh/\sinh(2kh)) \quad (1)$$

式中  $C$  為波速， $k$  為波數， $h$  為水深。在深水的情況下，(1)式可簡化為

$$C_g = 0.5C_o \quad (2)$$

上式中  $C_o$  為深水波速，且可表示為

$$C_o = gT/2\pi \quad (3)$$

故深水群波速度為

$$C_g = 0.5C_o = gT/4\pi \quad (4)$$

因此湧浪傳遞時間  $t$  為

$$t = R_p/C_g \quad (5)$$

## 四、結果與討論

### 4.1 穩定風域時段的挑選

本研究預定從台東外洋資料浮標挑選穩定風域所造成的成熟波，並與 1964 年在大西洋船舶上觀測到完全成熟 PM 波譜做比較探討，由於兩者海域皆是深水的開闊海域，所以本研究選定較為穩定之風速及風向情況下時段作為研究案例。圖 3 與圖 4 為 2010 年 9 月 26 日 12 時到 30 日 23 時風速及風向情況，其 10 m 平均風速為  $6 \pm 2$  m/s、風向為  $73 \pm 20$  rad。

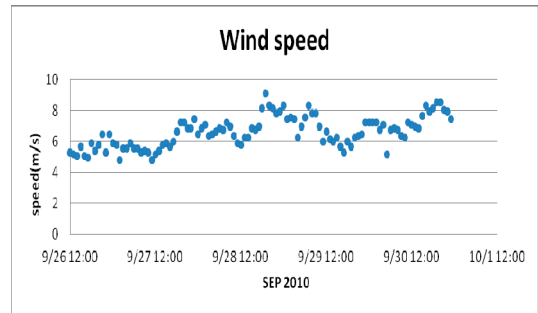


圖 3 台東外洋浮標推算 10m 風速時序列變化

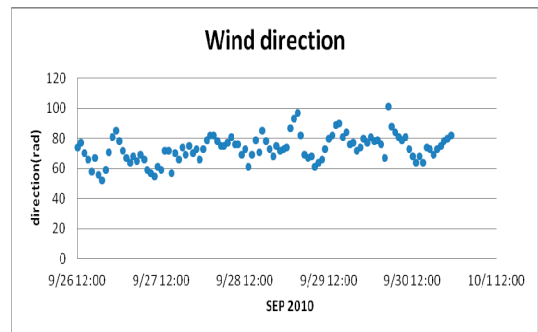


圖 4 台東外洋浮標推算 10m 風向時序列變化

### 4.2 波齡研判成熟風浪與湧浪

上述所挑選穩定風域時段有兩個情形的資料是需要進一步分離，包括非成熟波浪時區及湧浪影響的時區，這可由圖 5 波齡變化圖來判斷。依照波齡變化趨勢分為三個時區，第一個時區為 9 月 26 日 12 時~27 日 20 時；波齡值在 2.5~3.8。這個時期的示性波高約在 1.7~2.39 m 左右(如圖 6)，平均示性波高為 1.88m，平均週期約在 8~9.3 秒(如圖 7)，10 m

的平均風速在 5.2~7.2 m/s，所以其湧浪成分非常的強烈。第二時區為 9 月 27 日 20 時~28 日 20 時；波齡值在 1.7~2.5。這個時區的示性波高約在 1.3~1.8 m 左右，平均示性波高為 1.47m，平均週期約在 6.1~8 秒，10m 的平均風速在 5.8~8.1 m/s，這個時期湧浪成分有略微降低，風速略增。

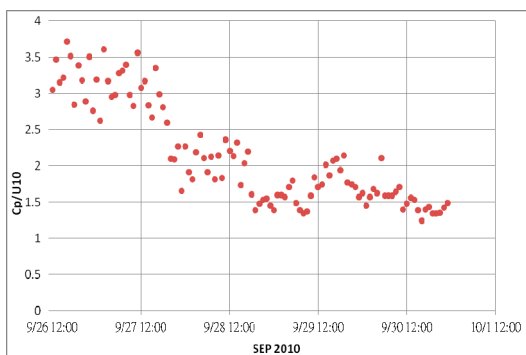


圖 5 台東外洋浮標推算波齡變化

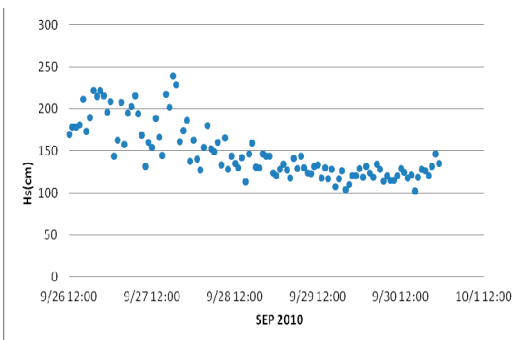


圖 6 台東外洋浮標示性波高時序變化

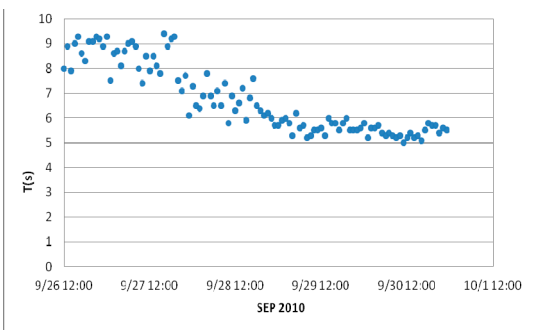


圖 7 台東外洋浮標平均週期時序變化

第三時區為 9 月 28 日 20 時~30 日 23 時；波齡值在 1.3~2.2。這個時區的示性波高約在 1.2~1.46 m 左右，平均示性波高為 1.25m，平均週期約在 5~6.2 秒，10m 的平均風速在 5.2~8.5(m/s)。其中在 9 月 29 日 10 時~9 月 29 日 20 時的波齡值在 1.7~2.2，這是由於這個時段風速略微為降低的關係，第三時區

其他時間點的波齡則在 1.3~1.7。整體而言，這個時區風速與第二時區相當，但湧浪已不明顯，其波浪為最接近完全成熟波的時段。

### 4.3 颱風對浮標處的湧浪影響

本文已在 4.2 節中由波齡及風浪資料判斷湧浪影響時區及完全成熟波時段，本節再將這些不同波齡時區與天氣系統間相關性作進一步分析。在 9 月 26 日 12 時到 27 日 20 時之湧浪非常明顯時區中，利用天氣圖檢視天氣系統對此造成的影響。由圖 8 天氣圖可看出那一段時期確實有馬勒卡 (Malakas) 颱風在台東外洋浮標東北方的海域。為推算此颱風所造成湧浪對浮標影響，參考 3.3 節湧浪傳遞分析方法。首先由圖 7 浮標的平均週期時序變化，發現 26 日 12 時起的最大平均週期  $T_z$  約 9 秒。由(4)式可得群波速度  $C_g = 7.025 \text{ m/s}$ ，再由圖 8 天氣圖上推算 9 月 24 日 6 時(UTC)台東外洋浮標的東北邊颱風邊緣到測站距離  $R_p$  約為 1165 km，故湧浪傳遞時間約為 46 小時。其中湧浪傳遞時間：

$$t = R_p / C_g = 46.06 \text{ hr}$$

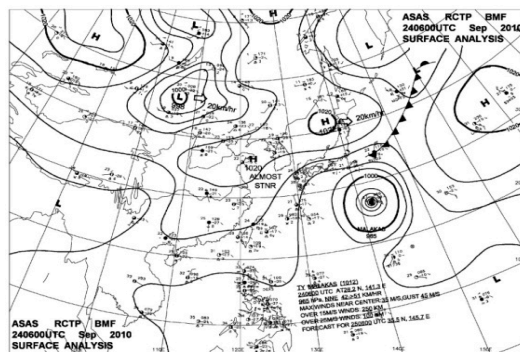


圖 8 台東外洋浮標周圍天氣圖(9月24日6時UTC)

圖8天氣圖上時間為UTC時間，加8小時轉換成台灣時間為24日14時(TST)，所以再加上推算湧浪傳遞時間46小時，則可得到馬勒卡颱風造成湧浪對台東外洋浮標影響的時間為26日12時(TST)，這和圖5波齡值起始時間點相同，證明第一個波齡時區上湧浪確實受到浮標東北邊遠處向日本移動的馬勒卡颱風影響所致。此外由圖9浮標方向波譜進一步檢視，發現在頻率0.0859 Hz (尖峰頻率)處存在低頻波浪能量，主要方向為東北東方位，與馬勒卡颱風所處位置一致，但也和當時風場方向相近，進一步檢視，發現在較高頻處0.12 Hz亦存在一較低能量，此能量

研判是當時浮標所處的風場造成波浪能量。

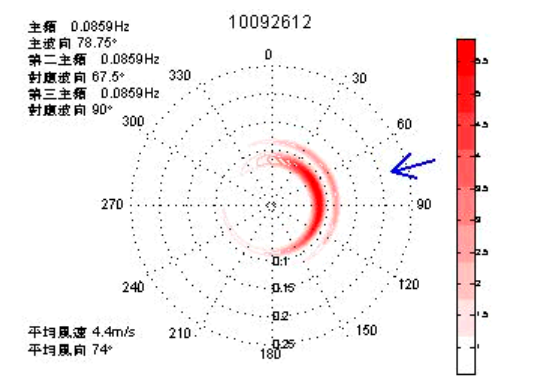


圖 9 台東外洋浮標方向波譜(9月26日12時)

由圖10天氣圖看出馬勒卡颱風在9月25日18時(UTC)時登陸日本，由圖7浮標的平均週期時序列變化在第二波齡時區時最大平均週期 $T_z$ 約8秒，由(4)式可得群波速度 $C_g = 6.25\text{ m/s}$ 。再由圖10天氣圖上推算12月25日18時(UTC)馬勒卡颱風邊緣到台東外洋浮標距離 $R_p$ 約為1800 km，由(5)式可得到湧浪傳遞時間為80小時。圖10天氣圖上時間為UTC時間，加8小時轉換成台灣時間為26日20時(TST)，所以再加上推算湧浪傳遞時間80小時，則可得到圖10中颱風造成湧浪對台東外洋浮標影響的時間為29日10時(TST)，這個時間點對照圖5波齡及圖7平均週期變化值，湧浪的影響確實有明顯減少情形。

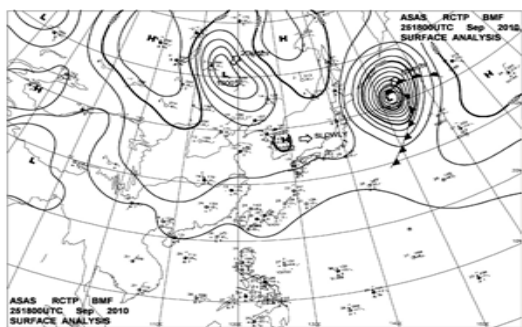


圖 10 浮標周圍天氣圖(9月25日18時UTC)

#### 4.4 浮標波譜與 P-M 譜的比較

由圖 11 台東外洋浮標一維波譜變化中發現在波齡變化的第一個及第二時區中的波譜能量尖峰頻率約 0.085 Hz，為長週期的湧浪影響。且此長週期的能量在圖 13(9月28日8時)的第二波齡時區較圖 12(9月27日6時)第一波齡時區有消退趨勢，兩者

與 P-M 波譜差距皆較大。

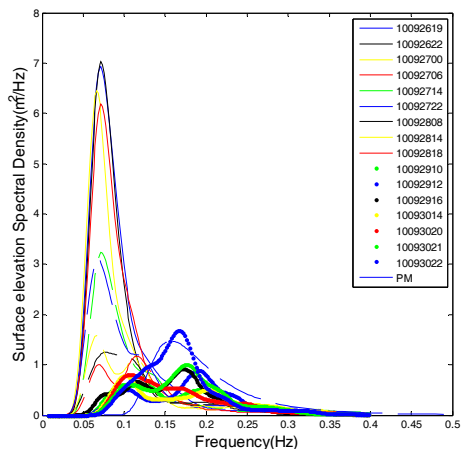


圖 11 台東外洋浮標一維波譜變化

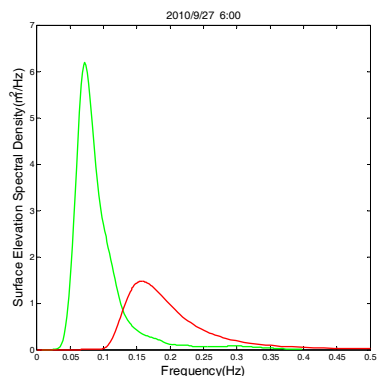


圖 12 波譜與 PM 譜比較(第一波齡時區)

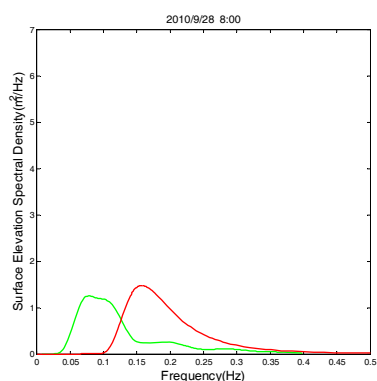


圖 13 波譜與 PM 譜比較(第二波齡時區)

此外，由圖 14(9月30日14時)浮標波譜能量可看出低頻處的第一尖峰頻率 0.1 Hz 持續減少，高頻處的第二尖峰頻率 0.2 Hz 則有些微能量生成，圖 15(9月30日21時)波譜能量第一尖峰頻率轉至 0.18 Hz 處，而原來 0.1 Hz 尖峰頻率已降為第二尖峰頻

率，顯示第三波齡時區的湧浪已逐漸消去而風浪能量逐漸明顯，且主要風浪能量往低頻移動。

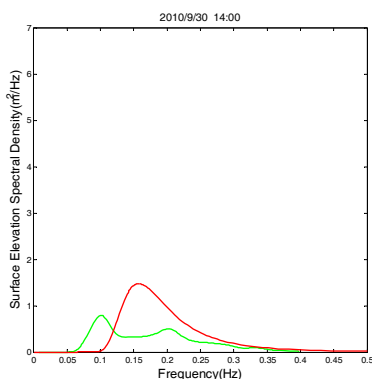


圖 14 波譜與 PM 譜比較(第三波齡時區之一)

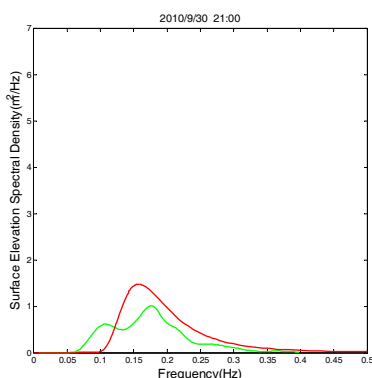


圖 15 波譜與 PM 譜比較(第三波齡時區之二)

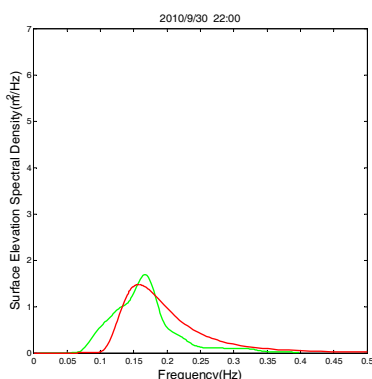


圖 16 波譜與 PM 譜比較(第三波齡時區之三)

圖 16(9 月 30 日 22 時)中低頻 0.1 Hz 長週期能量已完全消失，風浪尖峰頻率繼續從 0.18 Hz 移動至與 P-M 譜尖峰頻率 0.16 Hz 相同處，此時浮標一維頻譜的尖峰頻率及能量分佈與 P-M 譜幾乎完全相同。所以第三波齡時區的浮標波浪中剛開始仍有微弱湧浪，風浪則逐漸明顯，在 9 月 30 日 22 時起，波浪型態趨近完全成熟風浪。

## 五、結論

本文選擇台灣東南邊 300 公里外之開闊海域台東外洋資料浮標，透過挑選特定穩定風域，並以示性波高、平均週期及波齡等資料篩選，分類出強烈湧浪特性的第一波齡時區、湧浪及風浪混合的第二波齡時區及風浪與接近成熟風浪的第三波齡時區。其中第一波齡時區及第二波齡時區配合天氣圖及方向波譜，並依據 WMO 的湧浪傳遞分析法，去推算及驗證馬勒卡颱風所造成湧浪對台東外洋資料浮標的影響，且利用一維波譜說明這兩個波齡時區湧浪的成長及衰減變化。最後從浮標的一維波譜去檢視與完全成熟波假設下的 P-M 波譜相關性，發現前兩個湧浪明顯的波齡時區與 P-M 波譜相差甚遠，第三個波齡時區的浮標波浪中剛開始仍有微弱湧浪，後續風浪則逐漸明顯，風浪能量之尖峰頻率由 0.2 Hz 逐漸往較低頻移動。在 9 月 30 日 22 時浮標所量得之波譜與 P-M 波譜尖峰頻率及能量分佈幾乎相同，顯示波浪型態趨近完全成熟風浪。但低頻部分之波浪型態仍受非線性作用之影響。

## 謝誌

本文作者感謝中央氣象局提供台東外洋資料浮標之觀測資料，並謝謝成功大學水利及海洋工程學系訪問教授湯世燦博士在論文撰寫期間所提供的寶貴意見，使本論文得以順利完成。

## 參考文獻

1. Donelan, M.A., Dobson, F.W., Smith, S.D. and Anderson, R.J. (1993) "On the dependence of sea surface roughness on wave development," *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 23, pp. 2143-2149.
2. Mitsuyasu, H. (1981) "Directional spectra of ocean waves in generation area," *Proc. Conf. Directional Wave Spectra Appl.*, ASCE, pp. 87-102.
3. Pierson, W.J. and Moskowitz, L. (1964) "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii," *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, pp. 5181-5190.
4. World Meteorological Organization (1988) *Guide to Wave Analysis and Forecasting*.