

## 馬可夫鍊理論應用於龜山島海域波浪預報之研究

李汴軍<sup>1</sup> 吳立中<sup>2</sup> 林家豐<sup>3</sup> 董東璟<sup>4</sup>

1. 副教授，華梵大學環境與防災設計學系，台北縣 223 石碇鄉華梵路 1 號，電子郵件：beng@huafan.hfu.edu.tw
2. 研究生，國立成功大學水利及海洋工程研究所，台南市 701 大學路 1 號，電子郵件：n8891107@ccmail.ncku.edu.tw
3. 研究生，國立成功大學水利及海洋工程研究所，台南市 701 大學路 1 號，電子郵件：gafonboy@yahoo.com.tw
4. 博士後研究員，國立成功大學水利及海洋工程研究所，台南市 701 大學路 1 號，電子郵件：doong@mail.ncku.edu.tw

### 摘要

本文應用馬可夫鍊移轉機率矩陣的方法，進行龜山島海域短時期波浪預報的研究，來輔助海上遊憩以及登島作業所需海況資訊之需求。為能獲得符合該海域波浪特性之馬可夫鍊移轉機率矩陣，本文透過龜山島海域長期間的實測風浪資料進行迴歸分析，作為馬可夫鍊波高移轉機率矩陣分類依據。預報結果顯示，在 3 天內波高預測之誤差平均值在 30 cm 以內。本研究進一步嘗試結合風速及波高的狀態，建立起更為複雜的風速波高聯合馬可夫鍊矩陣，分析結果發現，此一風速波高聯合馬可夫鍊矩陣適用於現場風速為 1~6 級時的波浪預報。從不同季節的波浪預報結果發現，波高預報準確性以冬季最高。颱風期間波浪預報的誤差較其它季節大，這是因為颱風期間波浪資料序列的非正常性較強烈，導致馬可夫鍊理論預報的誤差會明顯偏大。由於颱風期間一律禁止遊客登島，颱風期間的預報誤差，並不實際作為登島決策的依據。對於龜山島登島作業的決策，馬可夫鍊法有其實用的價值。

**關鍵詞：**馬可夫鍊理論，波浪預報。

### **Application of Markov Chain theory to forecast wind wave over Gueishandao water**

Beng-Chun Lee Li-Chung Wu Chia-Feng Lin Dong-Jiing Doong

### **Abstract**

By adopting the transition probability matrix of Markov Chain method, this paper attempts to predict the short-term wave height in order to fulfill the demand of visiting the

island. The result show that the mean error of 3 days forecast of the prediction wave height is less than 30 cm. It also reveals that the joint probability of transition matrix of Markov Chain, which based on the observed wind speed and wave data, is suitable for the wave forecast during the Beaufort scale 1~6 grade. From various waves forecast in different seasons it is known that the accuracy of the forecast wave height is relatively high in winter. There might be a great error for waves forecast during typhoon season, as its nonstationary characteristics, which might influence the accuracy of transition probability matrix of Markov Chain. Nevertheless, as visitors are forbidden to enter the island during typhoon season, there is no need to consider the marginal error of typhoon season. In sum, this paper demonstrates the application of Markov Chain theory and argues that it is useful to the wave forecast over Gueishandao water.

**Keywords:** Markov Chain theory, wave forecast.

## 一、前言

龜山島，位於宜蘭東方約十公里之海域，為國家明訂之海上生態公園，自民國 89 年 8 月 1 日正式開放觀光以來，該海域登島所需風浪預報日形愈顯重要。然而中央氣象局並未針對該島發佈特定的風浪預報，而是以宜蘭蘇澳沿海預報區域來發佈，其風浪預報的波高是根據蒲福風級表換算來提供。由於蒲福風級表適用於深海風浪，而龜山島位於水深約 50~100 公尺之海域，因此預報風級浪高 4~6 級或 5~6 級時常造成觀光局東北角國家公園管理處，在每日晚上或清晨決定是否開放登島作業造成困擾。

目前各國從事波浪預報主要可分為數值模式以及統計方法兩種方法。前者是利用電腦快速計算複雜的數學方程，常見有 NWW3、SWAN 等第三代數值模式( Tolman, 1998) (Hsu et al., 2005)，可預報不同尺度空間海域的海浪。後者是根據實測的風浪資料，應用統計方法來發展統計預報模式，其優點是計算速度快，對具有時效性的作業化預報較易達成。例如 Tsai et al. (2002) 利用人工類神經網路預測未來時間的波高值。Chang and Chien (2006)利用類神經網路結合 multi-trend simulating transfer function，預測颱風期間的波浪值，並預測出颱風期間最大波高的發生時間與量值。

對於海上遊憩活動而言，主管單位通常是界定一海況門檻作為是否開放遊憩船隻出海的條件，再透過氣象局所公佈的海象預報資訊決定是否開放遊客登島。由於中央氣象局的漁業氣象預報為每 6 小時更新一次，這種資訊較無法滿足龜山島登島作業需求。因此在中央氣象局所發佈蒲福風浪級的資訊條件下，若能搭配實際觀測資料所發展的統計方法，進行未來短期預報，則更能符合海上遊憩的需求。

馬可夫鍊理論(Markov Chain Theory)具有描述兩相鄰狀態間演變特性的能力(Dynkin, 1965)，可建立出即時與未來的海象資訊之間關係。董等(2002)曾應用馬可夫鍊建立兩鄰近海域之間的波高相關性，再藉此推算出被分析海域的波高值。亦有學者

將該理論應用於群波之預測(Stansell et al., 2002)、波浪極端值的預測(Liu et al., 1998)，顯示馬可夫鍊理論可應用於波浪預報的可行性。

本文之研究目的為應用馬可夫鍊理論，經由實際樣本資料所計算獲得的轉移機率矩陣，對龜山島海域進行登島風浪預報之測試，並進一步引入風浪聯合機率分佈的理論，預報出未來期間的波浪資訊。期望透過此一統計模式的建立，不但能快速獲得合理、短期的風浪預報結果，降低海上遊憩的風險，進而提升該地的觀光收益，亦可作為中央氣象局漁業氣象預報作業的另一參考方法。

## 二、理論綱要

馬可夫鍊理論屬於一種機率過程，機率是用來衡量某一現象發生的可能性，對於不能確定結果的決策問題，機率通常是決定最佳決策的依據之一。馬可夫鍊的基本理論說明如下。

### 2.1 馬可夫鍊基礎理論

假設有一連串的試驗，每次試驗發生的結果為  $S_1, S_2, \dots, S_n, \dots$ ，若某次試驗結果  $S_k$  的發生機率為  $P_k$ ，則對試驗結果為  $S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jm}$  的一連串試驗而言，其發生的機率是  $= P_{j1} \times P_{j2} \times \dots \times P_{jm}$ ，這前提必須假設每一次試驗彼此都是互相獨立。馬可夫鍊則要擺脫「事件彼此獨立」的這個假設，進而描述不同試驗之間的機率關係，其具有下列性質：

(1) 每一次試驗結果為狀態  $S_1, S_2, \dots, S_n$  中之某一個。

(2) 若某次試驗之結果為一狀態  $S_i$ ，若  $S_i$  與另一試驗(狀態  $S_j$ )之間的關係以機率表示為機率  $P_{ij}$ ，則機率  $P_{ij}$  只與  $S_i$  以及  $S_j$  有關，且  $P_{ij}$  稱為由狀態  $S_i$  轉變至狀態  $S_j$  之移轉機率(transition probability)， $P = [P_{ij}]$  則稱為馬可夫鍊的移轉機率矩陣(transition matrix)，其定義如下：

$$P_{ij} = \frac{f_{i,j}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_{i,j}} \quad (1)$$

式(1)中  $f_{i,j}$  為從狀態  $i$  的情況下轉變為狀態  $j$  之發生次數，實際應用於波浪預報時，式(1)描述出即時與未來海氣象資訊的馬可夫鍊移轉機率關係，狀態  $i$  的波高值經過一段時間之後，波高轉變成狀態  $j$  的機率為  $P_{ij}$ 。經由樣本資料所建立出每一個狀態的波高值轉變成其它狀態的機率，進而彙整成為矩陣的形式，如式(2)所示。

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 2.2 應用馬可夫鍊理論推算波浪

應用馬可夫鍊理論預報波浪的方法，是先利用現有的樣本資料建立目前時刻波高值與未來某一時刻波高值的馬可夫鍊移轉矩陣  $P_{i,j}$ ，再進一步應用式(3)預測未來某時刻波高值  $w_f$ 。

$$w_f = \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \cdot P \quad (3)$$

上式中， $\tilde{w}_i$  為波高狀態分級後，每一狀態的波高代表值，為該狀態所定義之波高範圍的上界與下界之平均值。 $P$  為波高值對應的馬可夫鍊移轉矩陣中，目前時刻波高值所屬狀態那一行的機率值。

## 三、分析與驗證

### 3.1 資料背景

中央氣象局所發佈之漁業氣象，其預報內容除天氣與風級、風向之外，波高資料可根據蒲福風級表來推算出海上的「約略波高」，如表 1(郭，2001)所示。為能更精準的描述龜山島海域的實際海況，本文嘗試應用現場實測資料的統計分析結果作為波浪預報的依據。龜山島海域(圖 1)的水深約在 100m 以內，在水深 20m 附近是由中央氣象局所設立的資料浮標站(圖中三角形記號的標示處)，觀測項目有風、氣溫、氣壓、水溫及波浪資料。本文使用龜山島資料浮標站從 2002 年 5 月到 2004 年 11 月共 31 個月的觀測資料來建立馬可夫鍊移轉機率矩陣，而後 2004 年 12 月~2005 年 11 月共 1 年的資料則使用在預測結果的驗證。樣本資料包含了四季以及颱風期間的觀測資料，有助於討論不同季節及期間海況對預測結果之影響。

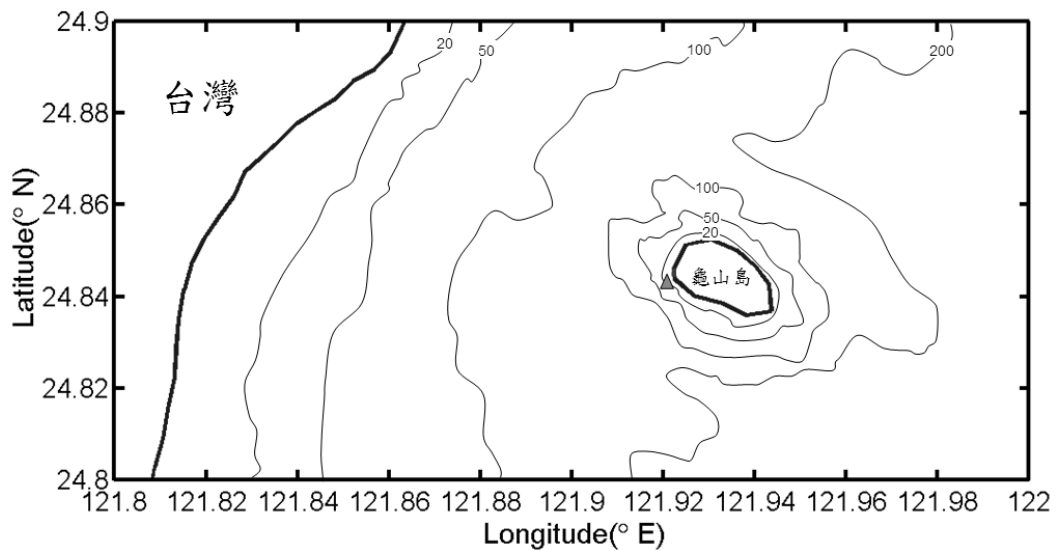


圖 1 龜山島海域水深變化

### 3.2 馬可夫鍊移轉機率矩陣之建立

建立馬可夫鍊移轉機率矩陣之前，必須先明確的對波高的狀態進行分類，進而計算出每一浪級狀態的移轉機率。本文之研究重點在波浪之預報，因此探討波浪預報前，須先瞭解該海域風速之特性。由於中央氣象局是以蒲福風級表作為預報風浪的方法，因此無論漁民出海管制或是觀光局評判是否開放龜山島的登島作業，皆以蒲福風級為依據，其分類規則如表 1 所示。

表 1 蒲福風級表以及所對應之浪級

蒲福風級 (B)	風級 名稱	風速範圍	風速代表值 (V)	浪級 名稱	海上約略波高 ( $H_e$ )
1	軟風	0.3 ~ 1.5	0.84	微波	10
2	輕風	1.6 ~ 3.3	2.4	微波	20
3	微風	3.4 ~ 5.4	4.3	小波	60
4	和風	5.5 ~ 7.9	6.7	小浪	100
5	清風	8.0 ~ 10.7	9.3	中浪	200
6	強風	10.8 ~ 13.8	12.3	大浪	300
7	疾風	13.9 ~ 17.1	15.5	大浪	400

風速單位：m/sec，波高單位：cm

由於每一風級皆有一風速範圍，為後續探討之用，須決定每一風級的風速代表值。此一風速代表值可透過式(4)的經驗式(交通部中央氣象局，1998)求得，其中  $B$  為蒲福風級， $V$  為風速代表值。每一風級所計算得之風速代表值如表 1 所示。

$$V = 0.836\sqrt{B^3} \quad (4)$$

為能確定蒲福風級表所定義之浪級分類標準是否符合龜山島海域的波浪特徵，須先瞭解該海域風與浪之間的關係，其關係如圖 2 所示。由於本文將研究重點在風浪之間的關係，因此在選用資料時，已將資料樣本中，湧浪的資料移除。圖中虛線為蒲福風級表中所定義出各種風級與其相對應波高之關係，是透過表 1 中每一風級的代表風速( $V$ )與海上約略波高( $H_e$ )所繪製而得。從結果可看出，小風速時，蒲福風級表所對應之波高較實測波高小；大風速時，蒲福風級表所對應的波高較實測波高大。這說明了若以蒲福風級表所對應的浪級作為分類標準，可能會導致預報誤差偏大，且在現場風級較大時，傳統方法預報波浪的結果會有高估的情形。預報結果的高估雖然不會影響到海域船隻航行遊憩的安全，但對於觀光產業的發展，造成了諸多的限制。因此本文對龜山島海域長期間的實測風浪資料進行統計分析，希冀藉此定義出更符合該海域實際海況的波高分類標準。方法是先將波高樣本資料依據所對應風速的風級進行分類。龜山島海域波高樣本資料所對應風速的風級範圍是 1~8 級，但由於 8 級風的樣本資料不足 5 筆，其分析結果不具任何統計意義，因此僅討論風級為 1~7 級範圍內的風浪預測。為能從每一風級範圍內的波浪樣本資料中決定一個波高代表值，作為後續波浪預報之用，本文透過實測風浪資料的迴歸分析求得該海域風浪之間的迴歸關係，如式(5)所示。

$$H_s = 0.82V^2 + 1.1V + 70.7 \quad (5)$$

將每一級風速代表值代入迴歸式中，所獲得之波高作為馬可夫鍊矩陣中的波高代表值。實測資料的迴歸結果如圖 2 的實線所示，再根據相鄰兩浪級之間的波高代表值加總後除以 2，定義為相鄰兩浪級之間的門檻，進而求出每一浪級所包含的波高範圍。經實測資料迴歸分析所求得龜山島海域每一風級所對應浪級的波高代表值以及波高範圍如表 2 所示。

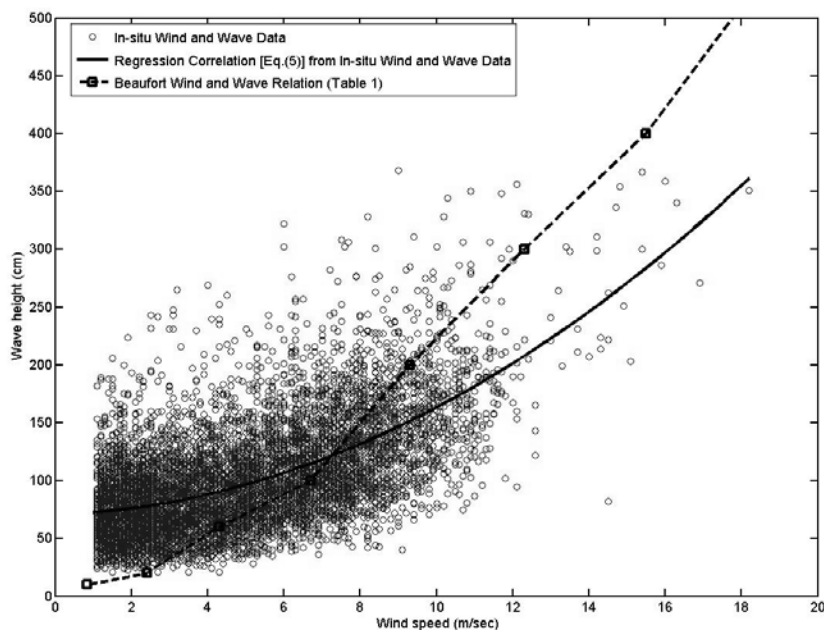


圖 2 龜山島海域風浪之間的關係

表 2 蒲福風級表以及於龜山島所對應之浪高

蒲福風級 (B)	風速代表值 (V)	浪高代表值 ( $H_s$ )	馬可夫鍊矩陣 之浪高範圍
1	0.84	74	0~76
2	2.4	79	77~85
3	4.3	91	86~103
4	6.7	115	104~135
5	9.3	154	136~183
6	12.3	211	184~251
7	15.5	290	>252

風速單位：m/sec，波高單位：cm

### 3.3 波高移轉機率矩陣與預測結果

如表 3 所示，為目前時刻與未來 2 小時之後，波高變化之馬可夫鍊移轉機率矩陣。該矩陣是利用龜山島海域的實測波高資料進行浪級分類，再透過式(1)與式(2)的數學關係計算出目前與未來 2 小時後，波高從某一浪級轉變為其它浪級的機率。波高移轉機率矩陣中，機率最大值大多出現在矩陣的對角線上，意味著 2 小時之後，波高仍保持在原來浪級的機率較高。

表 3 目前時刻與未來 2 小時之後，波高變化之馬可夫鍊移轉機率矩陣

		目前波高(級)						
		1	2	3	4	5	6	7
2 小 時 後 波 高 (級)	1	82.1	37.2	14.5	1.9	0.1	0.0	0.0
	2	8.8	22.2	14.8	3.5	0.2	0.0	0.0
	3	7.8	30.1	41.6	22.1	4.3	0.2	0.0
	4	1.2	10.1	26.2	52.6	27.0	4.2	0.0
	5	0.1	0.5	2.9	19.0	54.0	38.4	7.7
	6	0.0	0.0	0.0	1.0	14.1	50.2	33.3
	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	6.9	59.0

單位：%

根據交通部觀光局的規定，龜山島准許登島的風力條件為 6 級以下，在此一風級所對應的浪級條件下，未來時間波浪變大或減弱的變化趨勢，對於開放登島的事前準備以及預警都相當重要。從移轉機率矩陣的分析結果可得知未來波高持續變大或是減弱的機率，將矩陣中小於 6 級浪的機率值累加，即可獲得未來時刻，從 6 級浪減弱為 5 級浪以下的機率。本文建立目前時刻與未來三天內不同時間點(每隔 2 個小時)之間的波高移轉機率矩陣，再將每個矩陣中小於 6 級浪的機率值累加，藉以求出未來不同時間，從 6 級浪減弱為 5 級浪以下的機率。從圖 3 的結果可發現，若目前的浪高為 6 級，未來三天的浪級會減弱的機率大於 40%。未來 1 天之後，浪級減弱到 6 級以下的機率會超過 70%。

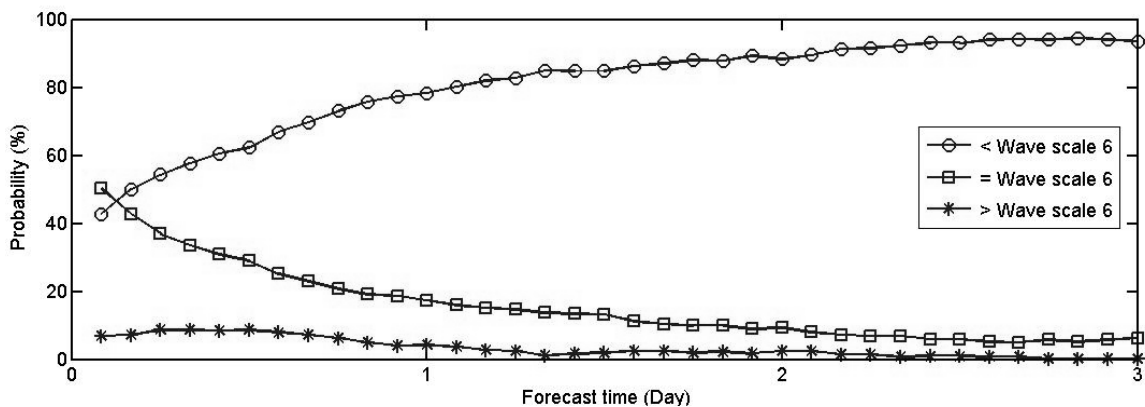


圖 3 龜山島海域 6 級浪持續成長或衰減之機率



應用馬可夫鍊移轉機率矩陣預測龜山島海域 2 小時之後的波高結果如圖 4 所示，波高預測值與實測波高的變化趨勢一致。由於本研究主要是為了解決龜山島海域登島船隻出海的安全需求，並配合中央氣象局漁業氣象局需求，因此預報的時間長度無須太長，但希望能加密預報的頻率，本研究預報時間長度為未來的 3 天之內，每隔 2 小時一次的波高值。為能瞭解為來三天內，每隔 2 小時的波浪預報準確度，本文將每一個時間點的預測結果與實測波高之間的差值以圖 5 的鬚盒圖表示之。圖 5 的鬚盒圖 (Box plot) 中，盒形上下邊界代表誤差分佈之 75% 與 25% 統計值，而其上下鬚則表示出誤差中的最大值與最小值。一般鬚盒圖大多定義盒形中的橫直線代表分析結果的中位數，為能瞭解分析結果的誤差平均，本研究則改將盒形中的橫直線代表誤差分佈的平均值 (mean)。分析結果發現波高預測的誤差平均值都在 30 cm 以內，從預測波高與實測波高之間的差異發現到，75% 的分析結果中，誤差都在 45 cm 以內，亦有一小部分的分析結果誤差偏大，此情形發生在颱風期間的浪高預測。

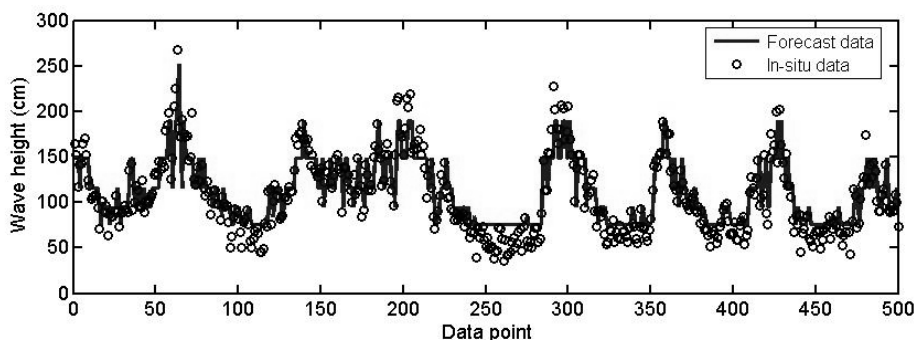


圖 4 馬可夫鍊預測未來 2 小時之後波高的結果

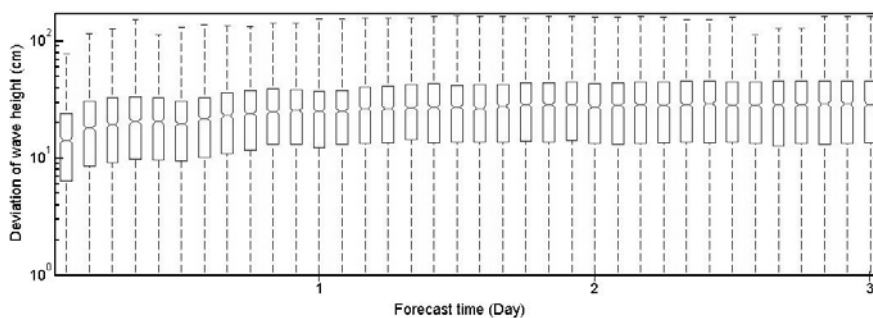


圖 5 馬可夫鍊預測波高之鬚盒圖

從波高預測的結果發現到每一時間點所預測波高的誤差的分布範圍相近，顯示應用馬可夫鍊理論預報波浪的準確度具有穩定性，隨預報時間的增加，預報的誤差分布在固定範圍內，而沒有明顯增大之趨勢。

#### 四、討論

前面章節所討論為單純波高馬可夫鍊預測模式，本文進一步嘗試結合風速以及波高的狀態，建立起更為複雜的風速波高聯合馬可夫鍊矩陣，進而利用該矩陣預測波高。

風速與波高聯合移轉機率矩陣的建構，同時考慮了樣本資料中的風速與波高值分佈範圍，假設樣本資料中的風速值的分佈範圍可細分為  $m$  種不同的狀態，波高值可分類為  $n$  種不同的狀態，風速與波高的聯合狀態則有  $m \times n$  種不同的狀態。相對的，所預測出的風速與波高也有  $m \times n$  種，而每一種狀態都可藉樣本資料計算出其發生機率，進而建構出風速與波高的聯合移轉機率矩陣。應用風速與波高聯合移轉機率矩陣來預測未來某時刻的波高，需要先找出目前時刻風速與波高聯合的狀態，再根據此一狀態所對應未來特定時刻下，每一種風速波高聯合狀態所對應的機率值  $P$ 。

應用本法的限制是需要先知道未來預測時間的風速值，根據已知未來某一時刻的風速值找出其所對應的狀態。而未來預測時間的風速值可從前述馬可夫鍊預報風速的方法、現場實測值、或是海面數值模式的結果等三種管道獲得。因三種風速資料的差異性頗大，必須審慎決定一適當風速資料來源，作為風速與波高聯合移轉機率矩陣的輸入值。實測風速值之準確度雖高，但考慮到實際應用風速與波高的聯合移轉機率矩陣時，並無實測之未來風速資料可供輸入；海面數值模式雖可預報未來時刻的風速，但需仰賴準確的海洋環境資料作為計算依據。本文嘗試透過前述之馬可夫鍊理論建立風速的預報模式，據以求得未來時刻的風速資料。為能瞭解馬可夫鍊理論應用在預測未來不同時間的成效以及準確程度，本研究將每一個時間點的預測結果與實測風速之間的差值以圖 6 的鬚盒圖表示之。結果顯示 3 天內預測風速的平均誤差在 1.7 m/sec 之內。所有的預測結果中，有 75% 的風速預測誤差都在 2.5 m/sec 之內，說明了馬可夫鍊應用於求取未來時刻風速資料的可行性。

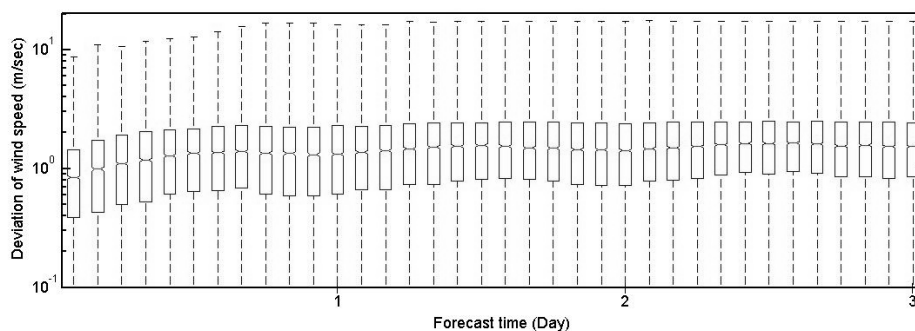


圖 6 馬可夫鍊預測風速誤差之鬚盒圖

因此本研究直接應用前面章節所述之方法預測風速資料，作為移轉機率矩陣的輸入值。在此一狀態下的風速，理論上會對應  $n$  種不同的波高狀態，每一波高狀態有其對應的發生機率  $P$ 。同樣根據式(3)的關係，即可預測出未來某一時刻的波高值。在此一方法中，式(3)的  $\tilde{w}_i$  代表波高狀態分級的各間距的平均值。

分析結果如圖 7 所示，圖中描述未來三天內，每隔 2 小時預測波高的誤差，因此每一風級條件下，都有 36 個分布點，代表不同時間的波高預測誤差。從分析結果發現，應用風速與波高聯合移轉機率矩陣，預測之波高準確度與現場的實測風速值有關，當風速在 1~5 級之間時，波高預報與實測值的平均差異在 40cm 以內；當現場風速為 6 級時，波高預測偏差在 50cm 內。在實務的應用上，算是可接受的範圍。但超過 6 級風時，波浪預報的準確度明顯偏低。顯示此一方法適用於現場風速為 1~6 級時的波浪預報。根據交通部觀光局的規定，龜山島准許登島的風力條件為 6 級以下。因此，該風級條件下，海況預報的準確度，直接影響到該海域遊艇能否出海的重要關鍵。就短期波浪預報而言，其結果可輔助中央氣象局漁業氣象預報的結果，提供龜山島海域海上遊憩之使用。探討 7 級風時，預報準確度較差的原因，發現龜山島海域 7 級風的樣本資料不足 20 筆，從統計學的角度來看，難以透過統計分析的結果獲得令人信服之答案。因此待日後該風級的樣本資料足夠後，應能提昇該風級的風浪預報準確度。

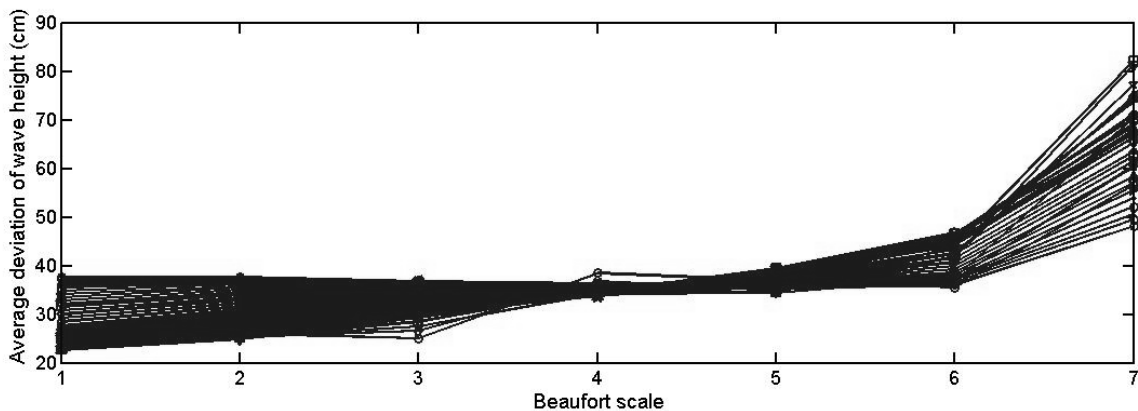


圖 7 未來 3 天內，不同風級條件下的波高預報平均誤差

由於台灣近海的波浪特性明顯受風向之影響，理論上若先針對觀測資料的風向進行分類，擷取相關性較高的風向進行波高之討論，應可獲得更明確的馬可夫鍊預報結果。但考慮到馬可夫鍊理論的基本假設為被分析的樣本資料時序列必須具有連續性，其所建立的移轉機率才有意義。假若將樣本資料依風向分類後，分類後的資料序列無法滿足時間上的連續性，將無法透過馬可夫鍊理論進行準確之波高預測。由於龜山島海域的氣象特性明顯受到季節之影響，冬季時受東北季風作用，理論上風向特性也會

受到季節之影響，因此本研究針對馬可夫鍊理論預報波高結果受季節性之影響進行探討。本文將樣本資料依據春、夏、秋、冬及颱風警報期間進行分類，應用無因次的均方根誤差(root mean square error, RMSE)作為評判誤差大小之準則。無因次的均方根誤差的定義如(6)式，其中  $w_i$  為現場實測波高值， $w_f$  為藉由馬可夫鍊模式預測得到之波高值。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum \left( \frac{w_i - w_f}{w_i} \right)^2} \quad (6)$$

利用馬可夫鍊預測不同季節波高的無因次均方根誤差結果如圖 8 所示，結果顯示，波高預測的準確度以冬季時最高。颱風期間預測波高的誤差明顯較其它季節的波高預測誤差大。判斷造成此現象的原因為：相較於其它季節風，颱風屬於短時劇烈變化的氣候特性，因此理論上颱風期間波高時序列的非定常性較強。由於馬可夫鍊理論的基礎是假設現時與未來的波高狀態之間存在一關係，此一假設應用在定常性資料的預測確實適用，但對於非定常性資料的預測，理論上誤差會偏大。為證實此一論述，本研究利用 Liu (2000)所提出的資料非定常性強度的評判方法，計算不同季節波高資料的非定常性指標(Non-stationary Index)。資料的非定常性指標值愈大，代表資料序列的非定常性愈明顯。分析結果如圖 9 所示，發現颱風期間的波高資料的非定常性確實較其它季節強烈，因而造成馬可夫鍊理論所預報的波高結果誤差較其它季節大。由於龜山島禁止遊客於颱風期間登島，因此颱風期間誤差較大的預報結果，對本文方法於登島開放作業之應用並無影響。因此對於龜山島登島作業的決策，馬可夫鍊法有其實用價值。

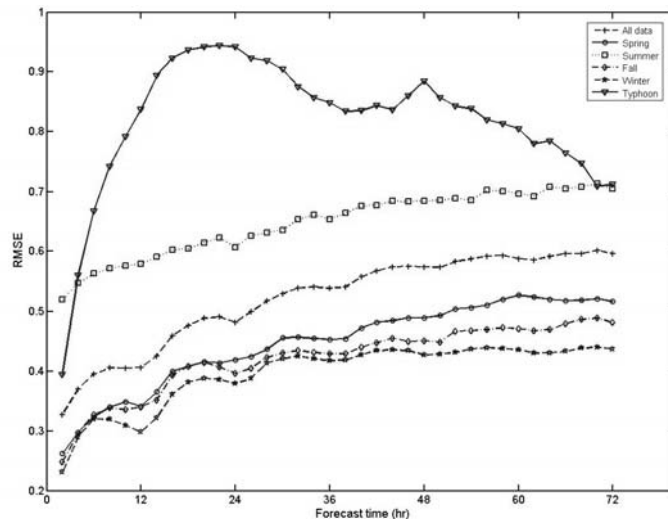


圖 8 各種資料類別之波高預測結果誤差

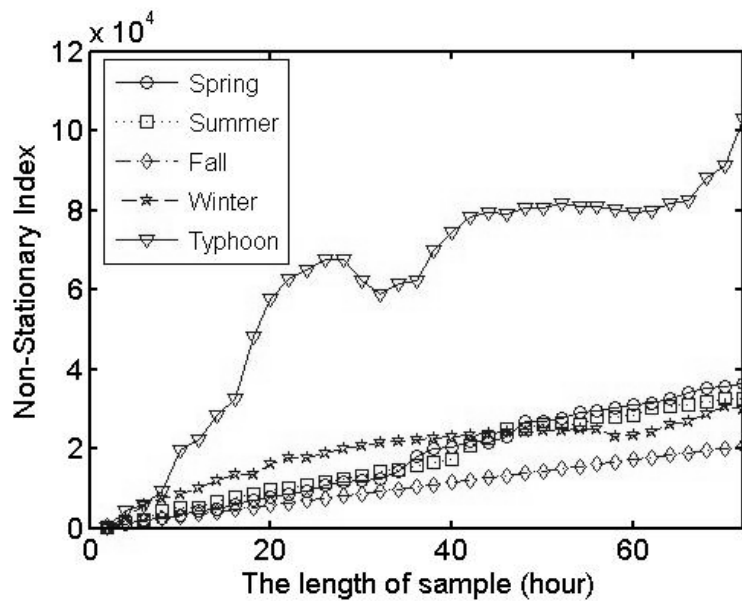


圖 9 波高資料序列的 Non-stationary Index

## 五、結論

龜山島為一海上生態公園，隨著登島遊客增加，海氣象資訊預報的需求日益廣泛，當前中央氣象局現行漁業氣象資訊無法滿足主管單位研判開放登島與否之需求。是以本文透過該海域風浪的歷史觀測資料作為統計分析的樣本，透過馬可夫鍊理論描述目前觀測值與未來觀測值之間的關係，藉以進行波浪預報。研究發現，以蒲福風級表所對應的浪級作為分類標準，會導致預報誤差偏大。因此本文對龜山島海域長期間的實測風浪資料進行統計分析，藉此定義出更符合該海域實際海況的波高分類標準。

從馬可夫鍊移轉機率矩陣預測波高值的結果發現，預測波高的誤差平均值都在 30 cm 以內，且 75% 驗證資料的波高預測誤差值都在 45 cm 以內，也仍然有一小部分的波高預測結果誤差偏大。

本文進一步嘗試在同時考慮風速以及波高的狀態，建立起更為複雜的風速波高聯合馬可夫鍊矩陣，進而利用該矩陣預報波高，結果發現應用風速與波高聯合移轉機率矩陣預測之波高準確度與現場的實測風速值有關，本文方法適用於現場風速為 1~6 級的波浪預報，對於是否開放出海的決策時，確實有其應用價值。

透過將樣本資料針對季節特性進行分類分析，發現預測波高的準確度以冬季時最高。而颱風期間的波高預測誤差，都比其它季節明顯為高。經探討後發現，是因為颱風期間波高資料序列的非定常性較強烈，導致馬可夫鍊理論預報的誤差會偏大。由於颱風期間一律禁止遊客登島，颱風期間的預報誤差，並不實際作為登島決策的依據。

## 六、誌謝

本研究承蒙中央氣象局提供龜山島資料浮標的觀測資料，在此一併致上最高謝意。

## 參考文獻

1. 交通部中央氣象局（1998）氣象天文常識，交通部中央氣象局編印。
2. 郭一羽 主編（2001）海岸工程學，文山書局。
3. 董東璟、吳立中、高家俊、莊士賢、李汴軍（2002）「利用馬可夫鍊理論建立波高相關性模式」，海洋通報，第二十一卷，第三期，第1頁-10頁。
4. Chang, H.K. and Chien W.A. (2006) “Neural network with multi-trend simulating transfer function for forecasting typhoon wave,” *Advances in Engineering Software*, Vol. 37, pp. 184–194.
5. Dynkin, E. B. (1965) *Markov Processes*, Academic Press, the United States of America.
6. Hsu, T. W., Ou, S. H. and Liao, J. M. (2005) “Hindcasting nearshore wind waves using a FEM code for SWAN,” *Coastal Engineering*, Vol. 52, No. 2, pp. 177-195.
7. Liu, D., Jiang J., Wang C. (1998) “Extreme wave prediction in Markov chain condition,” *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, Montreal, pp. 84-90.
8. Liu, P. C. (2000) “Is the wind wave frequency spectrum outdated,” *Ocean Engineering*, Vol. 27, pp. 577-588.
9. Tsai, C. P., Chang L. and Shen J. N. (2002) “Neural network for wave forecasting among multi-stations,” *Ocean Engineering*, Vol. 29, pp. 1683–1695.
10. Stansell, P., Wolfram J. and Linfoot B. (2002) “Statistics of wave groups measured in the northern North Sea: Comparisons between time series and spectral predictions,” *Applied Ocean Research*, Vol. 24, No. 2, pp. 91-106.
11. Tolman, H. L. (1998) “New global wave forecast system at NCEP,” *Proceedings of the International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, Vol. 1, pp. 777-786.

---

2006 年 4 月 10 日 收稿

2006 年 9 月 15 日 修改

2007 年 1 月 12 日 接受