

冬季鋒面過境型臺中港波浪成長之研究

李 汧 軍

中 央 氣 象 局

(中華民國六十七年九月二十七日收到)

摘 要

初步嘗試採用 FAM 理論及移動風域之觀念，解析臺中港冬季鋒面過境型風域之變化，在風域變化中根據鋒面移速與波能傳播速度之互相比較，可發現波浪之成長可分為三種截然不同的型式。由此三種型式而可判斷波浪成長之現象，同時將有效風域之邊界條件定出後，可直接求出波浪能量得到在固定風速下其成熟波之預測波高。

一、前 言

臺灣全年有三分之一以上的時間，受冬型天氣所支配，其中最激烈之天氣現象，多發生於鋒面過境之際，例如狂風巨浪隨着冷鋒通過測站時，浪之成長曲線十分複雜，至今尚未完全了解，尤其受地形限制下之臺灣海峽，冷鋒過境後，浪之生長過程，更是變化萬千，是非常值得去研究探討。

在鋒面過境時，臺中港所實測之波浪資料中顯示波浪成長斜率有的很陡，有的較緩，而其成熟波之高低也不一致，初步推測影響其波浪變化因素有鋒面強度、鋒面移速、風速大小、風域廣狹……等有關，可是這些因素都是隨鋒面本身之類型不同而不同，在此複雜氣象條件，如何假設、如何簡化、及採用何種方法來研判是本文主要的目的。

我們知道，鋒面過境時，臺中港風域*之變化屬於移動型，以往移動風域大都用於求颱風波浪，其效果並不十分良好，僅適用於工程設計波高之用，至於鋒面過境型之波浪生長情形之研究，尚少見於研究文獻，鑑於在穩定東北季風時，面積風域法 (FAM) (Fetch Area Method) 所導出季風模式，經試用於臺中港東北季風之波浪推算，效果不錯 (Liang, 1976)，故本文擬應用 FAM 及移動風域之觀念 (Wilson, 1955) 進行鋒面過境時，移動風域之解析，俾能對冬季鋒面來臨前後，臺中港附近海面波浪之發生，成長狀況有所了解，

有助於臺灣海峽內漁業氣象預報。

二、面積風域法基本理論

根據元素波理論，單位面積上之元素波，從風所獲得之功率 RE 為

$$RE = \xi U^2 \quad \xi = \xi(\eta) \dots\dots\dots(2.1)$$

式中 ξ 為風能傳授係數， η 為水位變化， U 為單位面積上之平均風速，所以單位面積上平均功率為

$$\overline{RE} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RE_i = \bar{\xi} U^2 \dots\dots\dots(2.2)$$

式中 $\bar{\xi}$ 為平均風能傳授係數，故面積 ΔA 上所獲得之總功率為 $\bar{\xi} U^2 \Delta A$ 。

考慮元素波傳播之方向離散效應與受黏性或亂流耗損能量而產生之指數衰減，則某海岸測站所觀測到單位面積上之平均能量 (Liang, 1973) 為

$$E(t) = \frac{C}{G_{eq}} \int_r \int_{\theta} \bar{\xi}(r, \theta) U^2(r, \theta, t - \tau) R[\beta(r, \theta, t - \tau)] \exp\left(-\frac{0.08}{U^2(r, \theta, t - \tau)} r\right) dr d\theta \dots\dots\dots(2.3)$$

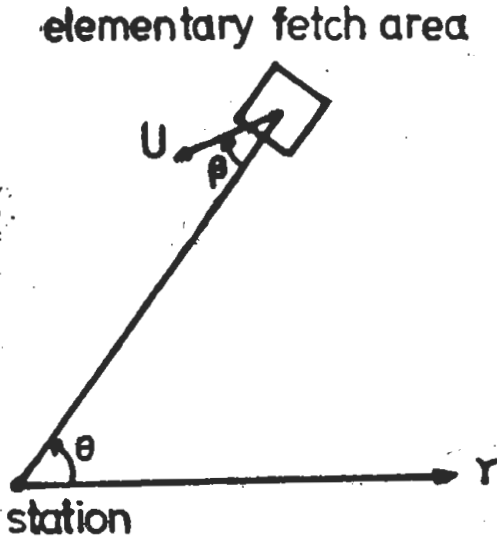
式中 C 為常數

$$G_{eq} = \frac{g}{2} \frac{m-1}{m_0} = \frac{g}{2} \int_0^{\infty} \sigma^{-1} \phi(\sigma) d\sigma \int_0^{\infty} \phi(\sigma) d\sigma,$$

$\phi(\sigma)$ 為波浪之能譜， σ 為角頻率， $R[\beta]$ 為

* 風域：指吹風之區域

方向離散函數， $|\beta| \leq 90^\circ$ 為風向與射線之夾角 (圖一)



圖一 元素波座標圖

- 為測站向外散射之任一射線 (radical line)
- θ 為任一射線之角度
- t 為鋒面在任一位置之時間
- τ 為鋒面通過任一線風域上端之時間
- A 為所有有效風域 * 之面積

(2.3) 式為根據元素波模式所導出在任一時間 t ，某測站所有有效風域所提供之能量

同元素風域已相當大，即使單獨存在，其風域末端波浪亦已接近半成熟 **，而且冬季臺灣海峽及中國東海海面上，多少總有些波，很容易達到半成熟狀態，又依 JONSWAP (Hasselmann, 1973) 之報告，在風浪成長過程中，高頻率之波能向低頻率移動，整個波譜之波速以最大波能頻率之波速為代表。當波浪接近半成熟時，此波速與風速大致相同，所以元素波波能傳播速度可以取風速之半即 $0.5 U$ 為代表。

三、鋒面過境時，風浪生長之解析

為了數學分析，有以下主要之假設

- * 有效風域：任一位置 (r, θ) 其波能在某時間能傳到觀測站及滿足 $|\beta| \leq 90^\circ$ 時稱之。
- ** 半成熟波：簡單說波速約等於 $0.5U$ 時之波，或由 $\frac{gF}{U^3} \sim 10^4$ 來看 F 約 100 km 即可產生半成熟波。

(一) 風域範圍為平行四邊形

考慮鋒面波動大部份從長江口出海，亦就是說風浪產生區域可以以舟山羣島附近為上限加上臺灣海峽受到兩邊陸地影響，及採用線風域 * 觀念，所以風域範圍選為平行四邊形。

(二) 地面鋒面為東北—西南走向

根據陳氏 (1974) 指出，在中國東南沿海地區所出現之冷鋒其走向多是東北—西南走向。

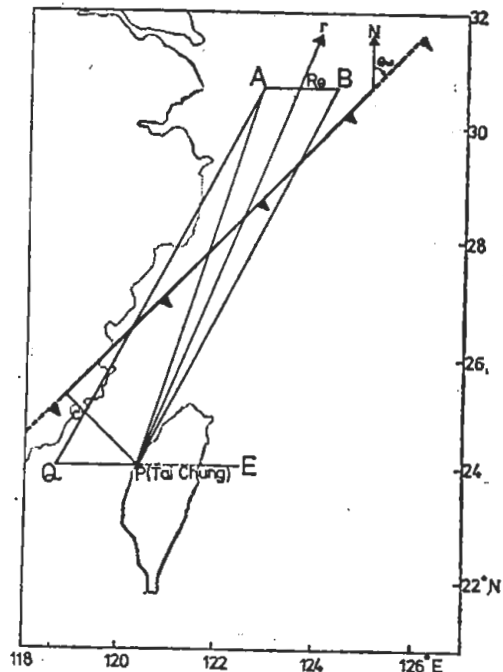
(三) 鋒面前後之風速，為一階梯函數

因考慮鋒面前後為一不連續面，同時也為了數學處理方便之故。

(四) 鋒面後面之風向與鋒面走向平行即為 θ_w (風向之度數)

因為氣旋中心在東海時，其冷鋒後面所伴隨東北季風向西南延伸，加上冷鋒呈東北—西南走向，所以地面風向與鋒面走向平行。

假設鋒面落在平行四邊形風域時 (圖二)，P 為觀測點，ABPC 為 P 點在鋒面過境後之有效風域範圍 (因 $\beta=90^\circ$, $\cos \beta=0$)，AC, BP 為自然



圖二 鋒面位置與風域分析圖

$\theta_0: \angle BPE, \theta: \angle rPE, \theta_{AP}: \angle APE$

* 線風域：在某一方向假設該方向之波浪均由吹風距離上之風速所造成

邊界， θ_0 為自然邊界 BP 之起始角度， θ 為任一射線 (r) 之角度，在 AB 戴面之交點為 R_0 。依據假設，由三角函數之關係，可導出鋒面在不同射線 (r) 之移速：

(1) 在任一射線 (R_0 以內) 之移動速率， V_θ

$$V_\theta = V_x \cos \theta_w \sec(\theta + \theta_w - \pi) \dots \dots \dots (3.1)$$

式中 V_x 為鋒面向東移之速率

(2) 在 AC 上之移動速率 V_v

$$V_v = - \frac{V_x \cos \theta_w}{\cos(\theta_0 + \theta_w)} \dots \dots \dots (3.2)$$

依據移動風域之觀念可導出

$$R_i = \frac{UV_\theta (T + \tau - t)}{U - 2V_\theta} \dots \dots \dots (3.3)$$

(3.3) 式指某一 θ 射線之 (r, t) 面上風域分界線斜率為 V_θ 與 t 時到達測站之波浪進行線 (斜率為 $0.5U$) 之交點，由 R_i 可知風域隨時間變化的情形

式中 (i) $T = \frac{R_0}{V_\theta} - \frac{AP \cos(\theta - \theta_0)}{V_x \cos \theta_w}$

當 $\theta \leq \theta_{AB}$ ，而 $\theta_s = \pi - \theta_w$

(ii) $T = \frac{R_0}{V_\theta} = \frac{QP \sin \theta_0 \csc(\theta - \theta_0) \cos(\theta - \theta_s)}{V_x \cos \theta_w}$

當 $\theta > \theta_{AP}$

(iii) $\tau = \frac{1}{V_x} [AB - BP \sin(\theta - \theta_0) \csc \theta]$

當 $\theta < \theta_{AP}$

$\tau = 0$ 當 $\theta = \theta_{AP}$

$\tau = \frac{1}{V_v} [BP - AB \sin(\pi - \theta) \csc(\theta - \theta_0)]$

當 $\theta > \theta_{AP}$

故任一時間 t 之風域 $F(t)$ 可表為 (設 $t=0$ ，鋒面正在 A 點)

$$F(t) = H(\theta - \theta_1) H(\theta_0 - \theta) \times \begin{cases} UH(r - R_i) H(R_0 - r) \\ H(r) \text{ 當 } U - 2V_\theta > 0 \\ UH(r) H(R_0 - r) \\ \text{當 } U - 2V_\theta = 0 \dots (3.4) \\ UH(r) H(R_i - r) \\ H(R_0 - r) \\ \text{當 } U - 2V_\theta < 0 \end{cases}$$

式中 $H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \text{ 為 Heavisides 階梯函數} \\ 1 & x > 0 \end{cases}$

$\theta_1 = \theta_{AP} - \tan^{-1} \left(\frac{V_x t}{AP} \right)$ 當 $\theta_1 \leq \theta_0$ 時， $\theta_1 = \theta_0$

θ_1 為鋒面所在位置之起始角度

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left[\frac{(AC - V_v t) \sin \theta_0}{(AC - V_v t) \cos \theta_0 - CP} \right]$$

當 $\theta_0 \geq \pi - \theta_w$

$\theta_0 = \pi - \theta_w$

θ_0 為鋒面所在位置之終止角

(3.4) 式是指任一鋒面位置之邊界條件：1, θ 要在 θ_1 及 θ_0 之間。2, r 要在鋒面及 AB、AC 所夾面積之內故

$$E(t) \sim \int_{r(t)} \int_{\theta(t)} U^3 \cos^2 \left(\theta + \theta_w - \frac{\pi}{2} \right) \exp \left(- \frac{0.08}{U^2} r \right) dr d\theta \dots \dots \dots (3.5)$$

可直接積分，可是由於上述風域非常複雜，因為每一射線均要判斷 $U - 2V_\theta$ 之大小，而決定波浪是什麼形態傳到測站，所以必須應用數值積分求出解答。

四、計算結果與討論

由 (3.3) 式中 $U - 2V_\theta$ 項有三種現象產生，其意義如下：

(1) $U - 2V_\theta > 0$ 意指波能傳播速率比 θ 射線上鋒面移速快，顯示該 θ 射線上波浪將以湧浪型態傳出，故當鋒面向離測站有相當距離時，波浪即已傳到測站。

(2) $U - 2V_\theta = 0$ 意指波能傳播速率與 θ 射線上鋒面移速相等，所以鋒面過境時，狂風與大浪偕至，表示波浪成長曲線甚為陡峭。

(3) $U - 2V_\theta < 0$ 意指波能傳播速率比 θ 射線上鋒面移速慢，所以鋒面過境後，其波浪才開始成長，臺中港實際波浪紀錄中多屬此情形。

又根據 (2.3) 式與 (3.5) 式知

$$E(t) = \frac{c \bar{\xi}}{Geq} \int_{r(t)} \int_{\theta(t)} U^3 \cos^2 \left(\theta + \theta_w - \frac{\pi}{2} \right) \exp \left(- \frac{0.08}{U^2} r \right) dr d\theta \dots (4.1)$$

為鋒面過境時，觀測點所測之波能量，因為 $E(t) \sim H \ddagger$ ，所以可由 (4.1) 式直接積分後換算出預測之波高 (在固定風速下，所達到成熟波*之波高)。

* 成熟波：在一定風速下，所能達到最大波，時間增加，也不增加其波高。

實際計算時，根據前節假設(三)風速 U 為一階梯函數，但是鋒面在任一時間風速均不同，為了滿足假設(三)，所以將鋒面落在平行四邊形風域時，至測站所觀測之第一次成熟波高止（其期間叫歷時），取其每次鋒面後面風速平方平均開方之值為風速，取其移動速率之算術平均為平均移速，又根據梁及李氏（1978），在臺中、鹿港附近海面之平均風能傳授係數 $\bar{\xi}$ ，相差不多，可視為一常數，故 $\bar{\xi}$ 取 0.15×10^{-2} ，故

$$E(t) = \frac{c \bar{\xi}}{G_{eq}} \frac{U^4}{0.08} \int_{\theta_0(t)} \cos^2(\theta + \theta_w - \frac{\pi}{2})$$

$$\exp(-\frac{0.08}{U^2} r) \Big|_a^b d\theta \dots \dots \dots (4.2)$$

式中 a 、 b 為 r 之積分上下限，對於某一時間 t ， $d\theta$ 及 r 可由 (3.4) 式求 θ ， (θ_1, θ_0) 及 (3.3) 式求 r (R_0, R_1) 之邊界條件，在此邊界條件下，均要判斷每一射線 θ 上之 $U - 2V_\theta$ 值之大小，由 $U - 2V_\theta$ 之值與上述之意義，決定積分之上下限， a 、 b 值，如此繼續演算，直到推算波高不再變化為止，才能得到推算波高。

在 16 次臺中港鋒面過境時所做推算波高與實測值之結果如表一。由表一中可歸納幾點影響推算波高之因素：

表一 實測波高、歷時；推算波高、歷時及平均移速、風速表

個案	實測波高 (米)	推算波高 (米)	歷時* (時)	推算歷時 (時)	平均移速** (公里/時)	風速*** (米/秒)	備註 (歷時迄止時間)
1	3.2	1.8	28	90	22	16	61年1月4日2時— 61年1月5日8時
2	2.8	2.7	34	33	29	15	61年1月24日14時— 61年1月25日24時
3	2.6	2.6	24	36	32	14	61年2月25日14時— 61年2月26日14時
4	2.7	2.8	20	27	45	15	61年11月6日2時— 61年11月6日22時
5	2.1	2.8	18	21	64	13	61年11月10日2時— 61年11月10日20時
6	2.4	2.2	40	63	17	14	61年11月15日14時— 61年11月17日6時
7	2.8	3.4	18	15	88	20	61年11月30日2時— 61年11月30日20時
8	2.4	3.0	32	30	41	16	62年1月24日2時— 62年1月25日10時
9	3.0	2.9	34	33	34	13	62年2月10日20時— 62年2月12日6時
10	2.6	2.7	24	30	40	16	62年2月23日8時— 62年3月1日8時
11	2.4	2.9	18	21	57	16	62年3月4日14時— 62年3月5日8時
12	2.1	2.8	24	30	38	12	63年2月19日14時— 63年2月20日14時
13	3.0	2.8	16	15	88	15	63年2月22日20時— 63年2月23日12時
14	2.1	2.5	38	21	60	12	63年3月6日8時— 63年3月7日22時
15	2.1	2.7	30	30	40	11	63年3月9日2時— 63年3月10日8時
16	3.0	2.4	30	27	43	14	63年3月25日14時— 63年3月26日20時

* 歷時：鋒面落在平行四邊形風域時至觀測站所測第一次成熟波高止。

** 平均移速：歷時之每次鋒面移速之算術平均值。

*** 風速：歷時之每次鋒面後面風速平方平均開方值。

因我們假設風速 U 為一階梯函數，而實際上風速是隨時間而不同，又當鋒面通過臺灣北部海面時，受到地形影響，風速急速增加，而本文採用平方平均開方值，與實際風速有出入。而鋒面移速 V_x 採用算術平均值，而實際上鋒面移速可能為一曲線或是其他形式，因而造成誤差。

波能傳播速率 $0.5U$ ，在穩定東北季風時頗為合理，因在東北季風時鋒面移速為一常數值，但是實際鋒面過境時，移速不為常數值，所以波能傳播移速不為 $0.5U$ 需要實驗才能解答。

由風速 U ，鋒面移速 V_x ，鋒面傳播速率 $0.5U$ 之假設。所以 $U - 2V_0$ 值有誤差，因而影響積分之上下限而直接影響推算波高。

若鋒面滯留一段時間，而且鋒面移速在 25km/hr 以下時，則 $U - 2V_0 > 0$ ，表示推算波高比實際波高為低，因為波以湧浪型式傳播到測站。如個案 1。

若鋒面移速在 $30\text{km/hr} \sim 50\text{km/hr}$ 時，推算波高與實際波高，頗為接近，顯示 FAM 理論適用這種情形。如個案 2、3、4、9、10。

若鋒面移速在 60km/hr 以上時，推算波高比實際波高偏高，表示推算波高時之波速比 $0.5U$ 大所致。如個案 5、7、11、14。

平均風能傳授係數 $\bar{\xi}$ 為東北季風所得之實際值，然而鋒面不是穩定天氣系統需要更多這種例子資料來求 $\bar{\xi}$ 值，以適用移動性鋒面過境時波高之預測。

推算歷時較不穩定，除了上述之因素外，尚有其他因素未考慮。

五、結 論

若鋒面在平行四邊形 A 點附近時，只要預報此次鋒面南下時之風速及平均移速，就可以預測鋒面過境後成熟波高及歷時。

若鋒面移速在 $30\text{km/hr} \sim 50\text{km/hr}$ 時，推算波高與實際波高很接近，顯示 FAM 理論可適用這種移動性鋒面過境波高之預測。

$(U - 2V_0)^{-1}$ 說明波浪成長有三種現象從理論

推算之波高可看出有此現象之趨勢。

風速 U 、鋒面移速 V_x 均是估計值及 $\bar{\xi}$ 值採用穩定東北季風之值，這些都與實際情形有別。今後進一步要研究風速 U 鋒面 V_x 及 $\bar{\xi}$ 值均是變數下之波浪成長之情形若有更多鋒面過境例子之波浪資料，來分析其波浪之成長，其準確度在 80% 以上則可在風域延伸之處，均可利用本文所導出之分析所得移動性鋒面過境之預測波高，作為中央氣象局發佈海峽之定點測站之波浪預報。

六、誌 謝

本文承國科會補助國內進修下完成，並蒙梁乃匡教授悉心指導，王宵先生提供不少意見及協助，臺中港務局提供波浪資料，得以順利完成，特此申謝！

七、參 考 文 獻

- Hasselmann, K. et al 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (Jonswap), *Ergänzungsheft Zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*, Reihe A, Nr. 12, DHI, Hamburg 95 PP.
- Liang, N. K. 1973: Elementary wave model and the definition of "Fetch Area" in wave prediction, *Acta Oceanographical Taiwanica*, 3, 87-96
- 1976: Application of fetch area method in monsoon wave hindcasting, *Proc, 15th International Coastal Engineering Conference, Hawaii, Vol 1, 258-272*
- Wilson, B. W. 1955: Graphical approach to the forecasting of wave in moving fetches, *Tech Memo, NO. 73, B. E. B*
- 陳正改 1974: 中國東南沿海地區冷鋒之移動速度及其伴生天氣之研究，私立中國文化學院碩士論文 88 pp。
- 梁乃匡、李汴軍 1978: 臺灣海峽冬季風波浪現場調查初步研究，第二屆海洋工程研討會論文集 1-22，中國土木與水利工程學會。

The Wave Growth Near by Taichung Harbour during the Cold Front Passage in the Winter Seasons

Ben- Juen Lee

Central Weather Bureau

Abstract

Using the FAM theorem and the concept of moving fetch the variation of fetch area during the Winter Seasons in the Vicinity of Taichung Harbour is analyzed. With the different speeds of wave energy it can describe the physical phenomena of wave growth. After the integral solution of the wave energy equation under the condition of constant wind speed we can use the equation of predict the fully developed wave heights near by Taichung Harbour.