

# 風浪及湧浪預報

## Wind-Wave and Swell Forecasting

鮑學禮 節譯

臺灣係屬一海島，東鄰太平洋，南濱巴士海峽，西南方與南海相接，西連臺灣海峽，北接東海，因地理環境特殊，沿海居民，大部均從事漁業，以海為家。每屆冬季寒潮東北季風盛行，夏秋季更因颱風及西南季風頻仍，海浪滔天，不但對漁民生命安全構成嚴重之威脅，每常導致舟覆人亡之慘劇；更有進者，海浪挾雷霆萬鈞之勢衝擊沿海堤防，形成堤岸倒坍，海水倒灌，沿海地區之生命財產，蕩然無存，故海浪預報亦為我氣象人員之職責。茲簡介美空軍所採用預測海浪之方法，以供吾人作業之參考。該方法係美「斯克力伯斯海洋學院 (Scripps Institution of Oceanography)」研究發展而成。

### 壹、風浪與湧浪

一、風浪 (Wind-wave) 及湧浪 (Swell) 之預報，係一涉及海洋學及氣象學兩者混雜之課題，因風浪與湧浪預報作業時，需要利用一覽天氣圖，故氣象人員利用此方法來作此項預報，實較從事海洋工作人員更為方便而有利。且空軍氣象單位進駐於濱海地帶或島嶼時，其他濱海單位自然期望該氣象台能供應風浪及湧浪預報。

本文所討論對浪之預報，僅限於自遠海抵達海岸之所謂「深水浪」，並未考慮破浪或激浪。應用本文所述方法從事湧浪預報之結果，似與其它氣象預報之成效，同樣良好。

二、由於海洋廣闊測站稀少，故對浪之觀測甚為短缺，而海浪之狀態必須考慮由形成海浪之風來計算，以風之速度及吹過之海域來計算浪高、週期及浪速。故計算海浪之所有變數，均來自一覽天氣圖，諸如形成海浪該海域之風速及該海域風已持續之時間；海浪離開形成之海域後，其波之衰退亦應加以計算。當空氣以風之形式吹過洋面，由於空氣與水面間之相互作用而形成浪，其能量自風傳遞至水，其變率（快慢）之微分方程式業已建立，自此等方程式中可求出浪高、週期及持續期之浪速，以及波之衰退等。有關其他變數之方程式求出之各種關係如下所述，並將結果繪製成應用之圖表，故有

關任何特殊問題均可在最短時間內求出，此等圖表適用於風速為12哩/時及以上時所形成之顯著浪（三分之一最高浪）。

### 貳、浪之預報

風浪及湧浪之預報，可詳分為三大部分——海浪之形成、湧浪之衰退及次風區之效應。浪在形成海域內稱為風浪 (Wind wave)，當風浪離開形成之海域後即稱為湧浪 (Swell)

#### 一、浪之形成

當一風連續不變颯過一大片寧靜海面時，即形成浪。該浪之方向與風之去向相同，起初由風之渦旋僅形成小波紋，當此等小波紋漸漸變大，由於風之拉力作用及正常壓力作用而形成浪。其正常壓力將能量由風轉輸至浪。其發生原因係由於浪之向風面壓大於背風面風壓之故。拉力是由空氣傳送能量於水面，緣於兩種不同物質之質點速度（切力）之不同所致。在此拉力與壓力兩種作用中，以拉力更為重要。

預測浪之形成，首需瞭解風速之大小，該風速所吹過區域之範圍以及持續時間之久暫。

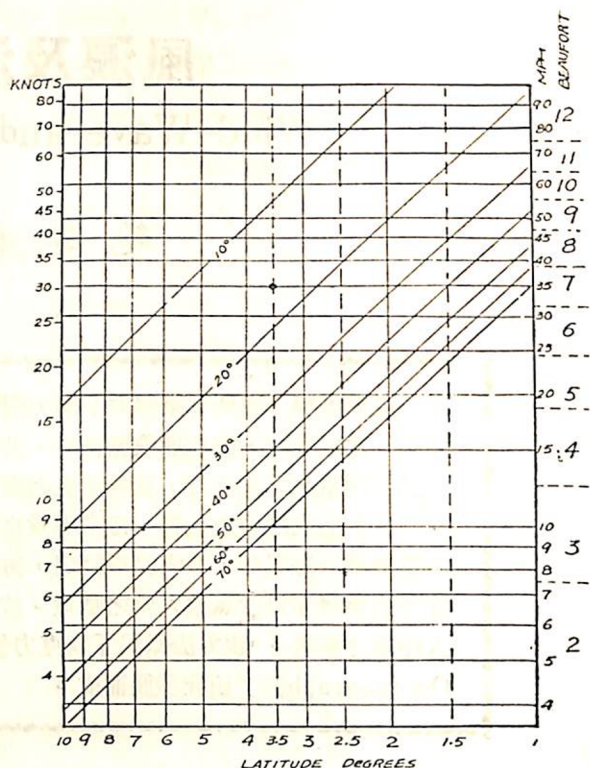
茲假定已知有一風浪生成區存在，欲預報某測站是否將受其影響，當然與兩地間之一般風向有關。易言之，生成區之風必須大致朝預報點方向吹去方有影響，否則不必考慮。而風向之決定因船舶報



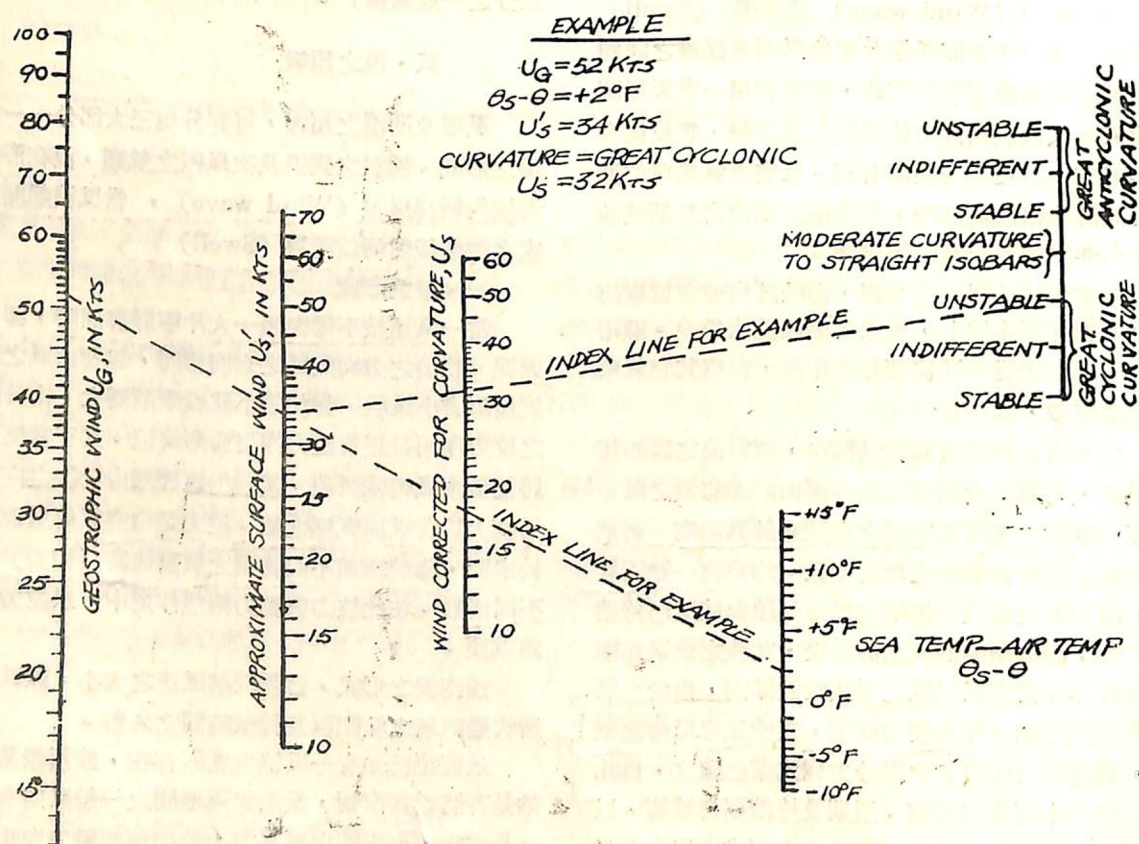
告經常甚為缺乏，故可由地面圖上等壓線走向加入摩擦作用之修正（偏向低壓10度）後得之。已知有關地區內各點之風向後，即可運用下述兩規則來初步決定某測站（預報點）是否將遭生成區之風浪所「波」及。⊖、彎曲等壓線情形：任一點上之風向與自該點到預報點間之向量未超過45度。⊖、平直等壓線情形：未超過30度。合乎上述規則時該測站將受影響。

足以影響預報測站之風浪生成區，以及合於生成區與陸地（即指預報測站）間之衰退區均可在天氣圖上鉤劃出其範圍。同時須注意天氣圖上有無足令風向改變之因素，例如鋒面、等壓線之輻散輻合及其曲率等，如有此類情況，則應將上述區域加以修正。

次一步手續為決定生成區之風速。地轉風風速  $U_g$  係由四條至五條等壓線之平均間隔、再由地轉風標尺（圖一）求出。一般言之，船舶報告，海岸及島嶼報告之風資料，其信賴程度尚不及由計算所求得者。另有一校正圖（圖二）係用來求出經曲率及穩定度訂正後之海面風速  $U_s$  值。其步驟如下：先自生成區內之船舶報告求出  $\theta_s - \theta$ （海水溫度—



圖一 地轉風標尺（等壓線間距3mb）



圖二 風速校正圖

氣溫），再自計算出之地轉風  $U_g$  及  $\theta_s - \theta$  值連一直線，此線與近似海面風  $U_s'$ （哩/時）標尺之交點，即求出近似之海面風值。其次決定空氣之穩定度，倘海水溫度高於氣溫時，空氣將呈不穩定；倘水溫較低時則空氣呈穩定；若兩者溫度相等，則空氣呈中性。等壓線之曲度及空氣穩定度刻度尺，印製於圖之右上方。自此刻度尺上決定一點，以之與近似海面風值連成一線，該線穿過  $U_s$  刻度尺（即經曲度訂正之風速尺），其交點即為海面風值（此值為下述計算已衡風（Weighted wind）之根據）。由圖上曲度訂正尺可知，僅當曲率半徑值小時（即曲度大時）穩定度之訂正方為重要。

在起浪區域之已衡風速  $U$ ，係由下法計算而得，其有括號者表示較早之值（即前一次圖資料求出者）。

已知：現在風速  $U_s$ ，前次風速（ $U_s$ ），兩者之差值為  $d$ 。

若  $U_s > (U_s)$  則

$U = U_s -$  自下表中得出之一因數

倘  $d < 3$ ，自  $U_s$  中減去 0

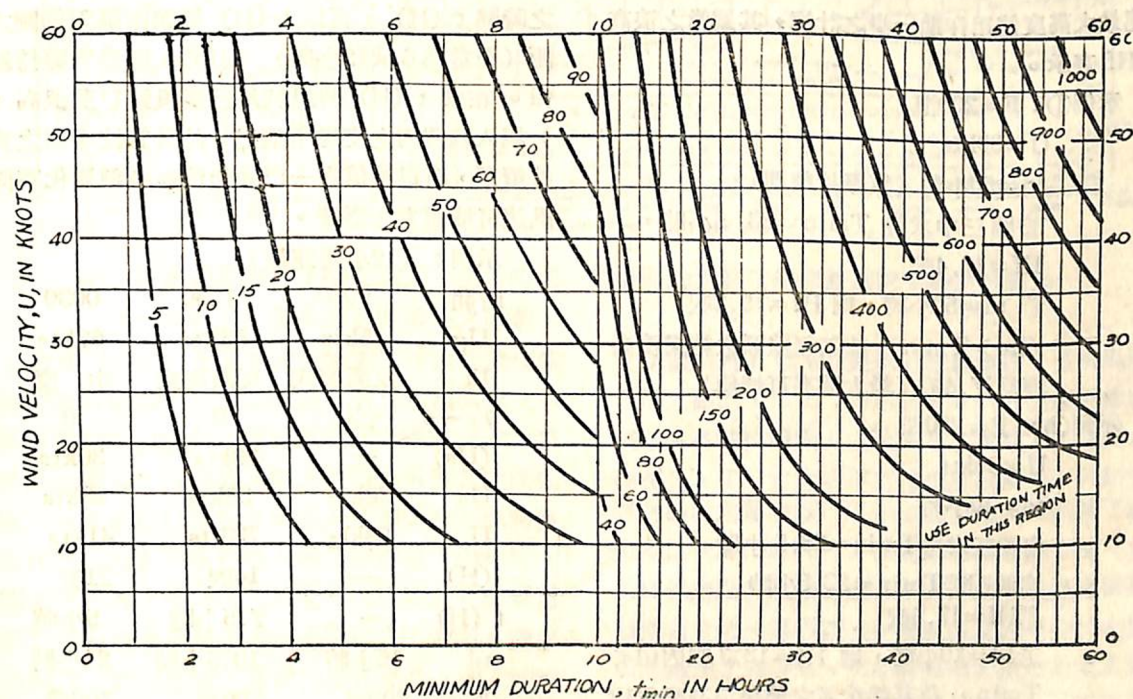
$d = 3$  至 6，自  $U_s$  中減去 1

$d = 7$  至 11，自  $U_s$  中減去 2

$d = 12$  至 17，自  $U_s$  中減去 3

$d > 17$ ，則自  $U_s$  中減去 4

倘  $U_s < (U_s)$  則



圖三 由風速及起浪區求最低持續期

$$U = \frac{1}{2} d + U_s$$

示例：①若  $(U_s) = 20$  及  $U_s = 30$ ，則  $d = 10$

及  $U = 30 - 2 = 28 \text{ kts}$

②若  $(U_s) = 28$  及  $U_s = 20$ ，則  $d = 8$

及  $U = \frac{1}{2} (8) + 20 = 22 \text{ kts}$

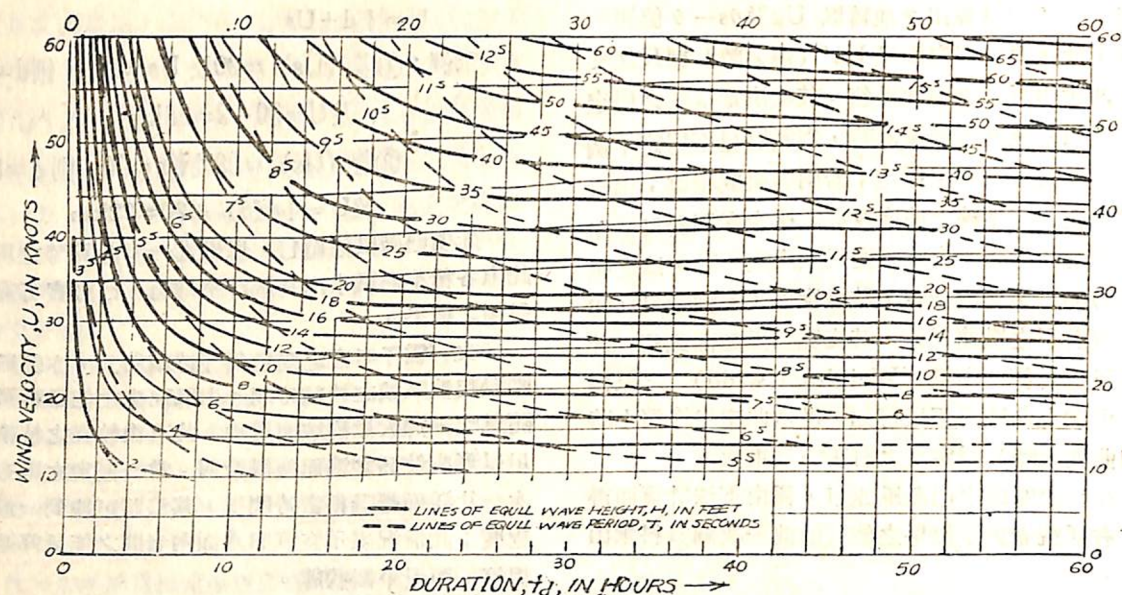
此項已衡風速值  $U$ ，以供進一步計算時之用，此由各種不同風求其統計平均值，已證實可獲得信賴之結果。

次一需予考慮之變量為「持續期」，亦即風次颶過起浪區域之持續時間。由風而來之能量積聚，隨風吹颶過大片海域而增加。此可由較長之持續期足以形成較高之浪而獲得證明。當一恆定之風次颶次一片洋面經過相當時間後，其浪將可達到一最高程度；此情況表示空氣與水面兩者間之能量傳遞已相等，而呈平衡狀態。

在風之方向浪生成區域之長度被稱之謂起浪區（Fetch），浪生成區域之上風部份稱之謂起浪開始，下風部分則稱之謂起浪終了，起浪區可自天氣圖上量出，一般所用之方法是自起浪開始之中點量至起浪終了之中點。

最低持續期  $T_{min}$ ，即為某一特殊起浪區及風速使浪高升達最高值之時間，此值可利用起浪區長度值及由計算獲得之已衡風速值自圖三決定之。圖中曲線代表起浪區（哩），圖之左半部分係便於應用之放大圖形。





圖四 由持續期及風速求浪高及週期

利用此最低持續期  $T_{min}$  及已衡風速值  $U$ ，預報員可自圖四中求得相應之浪高  $H$  (呎)，此最大浪高即在此風速及起浪區情況下能升達者。倘實際持續時間與最低持續期相等或更大時，浪高將達其最大值，但若其實際持續期較最低持續期為小時，則其浪高亦將較最高值為小，利用實際持續期及其風速值自圖四中即可求得浪之高度，倘此浪高較可能最大高度為小時，則此浪高用作進一步之計算，倘自圖四中求得之浪高較最大高度值為大時，則其可能最大高度值用作進一步之計算，其適當之浪高以  $H_f$  表示。

示例①：F=200哩

$U=30$ kts

$t_d=50$ 小時 (實際持續期)

自圖三中求得  $T_{min}=23.5$ 小時，

$H_f=17.4$ 呎

若  $t_d=50$ 小時，則  $H_f=19.2$ 呎

因  $t_d > T_{min}$ ，故其起浪區之結果浪高應為17.4呎 (最大浪高可能值)

示例②：F=200哩

$U=30$ kts

$t_d=10$ 小時

自圖三求得  $T_{min}=23.5$ 小時

自圖四若  $T_{min}=23.5$ 小時

則  $H_f=17.4$ 呎

若  $t_d=10$ 小時，則  $H_f=13.3$ 呎因  $t_d < T_{min}$ ，故其起浪區之結果浪高應為13.3呎 (風向未能使浪升至最大值)

浪之周期可自圖四中等浪週期線求出，其求法係利用圖上起浪終了時之浪高及  $U$  之交點讀出之，如以上述資料為例，則其浪之週期分別為  $T_f=7.8$ 秒 (示例①) 及 5.6秒 (示例②)。

其最小持續期  $T_{min}$ ，係利用已衡風值自圖三中求出，為欲計算實際持續期  $t_d$ ，必須在前一次一覽天氣圖中先求出起浪終了時之浪高值，此值係由前一張天氣圖時間計算而得，再利用現在之已衡風  $U$  使浪高升至計算出之浪高 ( $H$ )，求出其所需之時間  $t(H)$ ，再以  $t(H)$  值與兩張天氣圖之時距 (通常為6或12小時) 相加，即為實際持續期  $t_d$ 。在求  $t(H)$  時以利用已衡風速  $U$  及浪高 ( $H$ ) 填入圖四內之交點所讀出。此計算法求出之實際持續期，可以補償在一已知起浪區各種變化不同之風速可能產生之影響。

示例：(12小時連續)

|                     |       |        |       |
|---------------------|-------|--------|-------|
| 時間                  | 0030  | 1230   | 0030  |
| $U_g$               | 45kts | 53kts  | 67kts |
| $l_k$               | 反氣旋式  | 反氣旋式   | 中度    |
| $\theta_s - \theta$ | -2    | 0      | 0     |
| ( $U_s$ )           | —     | 28kts  | 36kts |
| $U_s$               | 28kts | 36kts  | 43kts |
| $U$                 | 28kts | 34kts  | 41kts |
| ( $H$ )             | —     | 14呎    | 21呎   |
| $t(H)$              | —     | 7.5小時  | 9小時   |
| $t_d$               | 16小時  | 19.5小時 | 21小時  |
| $F$                 | 700哩  | 700哩   | 700哩  |
| $T_{min}$           | 60小時  | 55小時   | 50小時  |

|       |      |      |      |
|-------|------|------|------|
| $H_f$ | 14呎  | 21呎  | 29呎  |
| $T_f$ | 6.5秒 | 7.9秒 | 9.1秒 |

## 二、湧浪之衰退

當浪在生成區域時稱之謂風浪，當浪遠離生成區後稱之謂湧浪。離生成區後湧浪向前推進，經過一段衰退區域外抵達預報測站，在衰退區域內浪高減小而浪之週期增大。衰退之距離  $D$  即自起浪終了至預報位置地點間之距離。倘湧浪經過一無風浪之寧靜衰退區域，則可利用圖五求出在衰退終了時之浪高及週期。以衰退距離 (哩) 及浪之週期  $T_f$  (起浪終了時) 值填入圖五中，吾人即可求出衰退終了時之浪高與起浪終了時浪高之比值及衰退終了時之浪之週期  $T_d$ ，衰退終了時之浪高值可由已知之  $H_f$  值乘以自圖五中由  $H_d/H_f$  等值線讀出之數值

而得。

一系列海浪自起浪終了時向前進移至衰退終了時之時距稱之謂浪行時間 (Travel time)  $t_d$ ，其值與上述  $T_d$  或  $H_d/H_f$  一樣，可在相同點按長虛線讀出。如將浪行時間與天氣圖時間相加，即得浪抵達之估計時間 (ETA) 值。

示例：若  $T_f=10$ 秒

$H_f=20$ 呎

$D=1300$ 哩

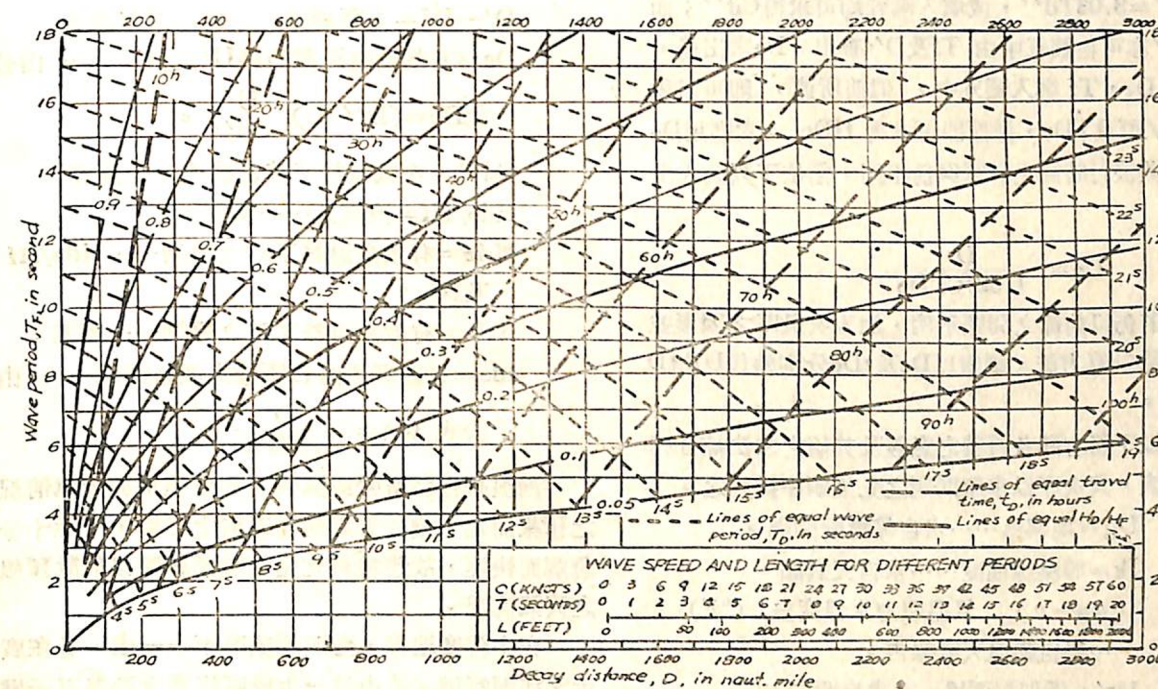
則  $T_d=15.5$ 秒

$H_d/H_f=0.30$

$H_d=0.30 \times 20=6$ 呎

浪行時間  $t_d=55$ 小時

## 三、次風區效應





衰退區以寧靜區開始，其後則為一次風區直至陸地為止。

次風區內之風速以  $U'$  表示，順風為正，逆風為負，例如  $U' = -10$  則表示逆風 10 哩/時。

次風區可增加或減少浪之能量。由於水之黏滯性而損失之能量甚微可以略而不計，故水與空氣間之相互作用方為浪之特性改變之主要原因。當湧浪移經次風區，其風速  $U'$  所能導致能量變化之方程式如下：

$$De = D - (D' - D') \frac{U'}{Dd''}$$

$De$  稱之謂有效衰退距離，其用法一如前述之  $D$ 。除  $Cd''$  值外之各值均可自一覽天氣圖中求得。欲求  $Cd''$  值，必須先決定  $Td''$ ；然後或應用公式  $Cd'' = 3.03Td''$ ，或填入圖五均可求得  $Cd''$ ；而  $Td''$  亦可自圖五中由  $Tf$  及  $D''$  查出。 $De$  求出後，再以  $De$ 、 $Tf$  填入圖五中，似前所述，即可求得  $HDe/Hf$  及  $TDe$ ，進而即可求得  $HDe$ 。當應用  $De$  時，其浪行時間之計算與前不同，需依下列公式求之。

$$tDe = \frac{D}{1.52 \times TDe}$$

若仍以前節之問題示例，加入次風區之因素並不影響計算方法，祇須以  $De$  及  $tDe$  分別替代  $D$  及  $tD$  而已。

以下將有關各符號之意義及其值之求法綜合列如下表，其次序以求解問題之先後順序排列之。

$Ug$  = 地轉風……求自等壓線間隔。

$Ik$  = 等壓線曲度……求自天氣圖。

$(\theta_s - \theta)$  氣溫與海水溫度差 (°F)

……得自壓溫天氣報告。

$Us'$  = 近似海面風……求自圖二。

$(Us)$  = 前一次已訂正風速……求自前次地面天氣圖。

$Us$  = 當時已訂正風速……自  $Ug$ 、 $Ik$ 、 $Us'$ 、 $(Us)$  及觀測資料。

$U$  = 平均已衡風……用  $(Us')$  及  $Us$  以本節一內所列求  $U$  之方法求之。

$(H)$  = 前次浪高……求自前次地面天氣圖。

$th$  =  $(H)$  所需之時間……圖四。

$td$  = 計算出之總持續期時間…… $t(h)$  加兩次天氣圖間隔時間。

$F$  = 起浪區 (距離)……地面圖。

$Tmin$  = 形成最大浪高之最低持續期。

$Hf$  = 起浪終了時之浪高……圖四。

$Tf$  = 起浪終了時浪之週期……圖四。

$D$  = 自起浪終了至 (預報) 目標間之總距離……地面天氣圖。

$Hd/Hf$  = 浪高比……圖五。

$Hd$  = 衰退終了時之浪高…… $Hf$  及  $Hd/Hf$ 。

$Td$  = 衰退終了時浪之週期……圖五。

$td$  = 浪行時間……圖五。

$D'$  = 自起浪終了至次風區開始之距離……地面天氣圖。

$D''$  = 自起浪終了至次風區終了間之距離……地面天氣圖。

$U'$  = 次風區之平衡已衡風分量……與計算  $U$  相似，然後決定其分量。

$D' - D''$  = 次寧靜區……地面天氣圖。

$De$  = 有效衰退距離  $D$  經  $U'$  之訂正……由公式  $De = (D'' - D) \frac{U'}{Cd''}$ 。

$Cd''$  = 次風區終了時之浪速……圖五。

$Hde/Hf$  = 浪高比……圖五。

$Hde$  = 有效衰退終了時之浪高…… $Hde/Hf$  及  $Hf$ 。

$Tde$  = 有效衰退終了時之週期……圖五。

$tde$  = 行經衰退區  $D$  距離之浪行時間……由

$$\text{公式 } tde = \frac{D}{1.52 Tde}$$

湧浪是否將增強或減弱，部分須基於天氣情況之預報而定，鑒於天氣情勢改變之影響，可能十分急劇而快速，故預報員宜先繪製預報圖以估計預報之天氣情況。

在中緯度地帶，海浪生成區不止一處，各在廣大之洋面行進。故由每一生成區出發之湧浪可予填入一方格紙，以湧浪之高度及到達時間為縱橫座標。有時可發現來源不同之若干波列幾乎同一時間抵達，在此情況下其合成湧浪由於相互干擾而十分複雜；浪高之極端最大值可能等於個別浪列中浪高之總和，但其平均高度往往以浪列中最高浪之浪高為度。此外，由觀測所得之實際數值，亦應填入同一圖內，以核對預報正確度。

### 叁、結 語

本文所述，已為初學者提供一套對海浪形成及衰退之預報方法，至於作業之熟練及精確度則有待於工作中體會增進之。