

颱風侵襲機率之預報與分析

顧欣怡 呂國臣
中央氣象局預報中心

摘要

如果預報容有誤差，量化預報產品的不準確性將是未來氣象預報產品演進的趨勢之一，客觀化之機率值將可加值預報產品的實用價值。就颱風預報產品而言，侵襲機率預報即是估計颱風致災程度的量化指標之一，亦可表示受颱風威脅的時空分佈。因此，決策者可以參考颱風侵襲機率預報值做相關的決策和應變，並以此作為風險管理的參考標準。

以 2001 至 2004 年 24/48 小時平均預報誤差，逐年計算其與前三年(1998~2000 至 2001~2003) 之 24/48 小時平均預報誤差可得到 8 個比值，其平均比值為 0.83，代表近年來中央氣象局颱風預報誤差有逐漸減少的現象。利用 2002 至 2004 年中央氣象局發佈之颱風路徑預報資料為基礎，發展預報誤差之機率分佈模式，並以上述比值推估 2005 年預報誤差機率分佈模式，與實際之 2005 年颱風路徑預報誤差做 Kolmogorov-Smirnov 檢定，可通過 99% 信賴度（顯著水準 $\alpha = 0.01$ ）以上。

為驗證本模式在颱風預報作業上之應用，以 2005 年發佈警報之颱風進行個案研究；由初步分析顯示，本模式估計之侵襲機率預報值可以合理的代表受颱風威脅的時空分佈。

一、前言

颱風侵襲往往造成台灣各地嚴重的災害和損失，而工商業日益發達的今天，颱風等天然災害所造成的經濟、人力、財物等損失更是日益加劇。近年來每逢颱風豪雨即易有嚴重土石流災情，發生地常在偏遠的山區，所需要的疏散時間也相對增加，決策者必須要有包含誤差在內的預報資訊協助評估以減少生命財產的損失。既有的海上陸上颱風警報訊息皆是在颱風即將侵襲前 18 小時發佈，並無法提供使用者較長的準備時間亦或是將預報誤差量化的資訊。然而，提供較長時間的預報並不足以解決問題。越長時間的預報其預報準度越差，容易有過度警報（over-warning）的現象，導致使用者不相信預報，進而忽略真正重要的警訊。

中央氣象局自 2002 年開始發布 72 小時的颱風路徑預報，該年 24/48/72 小時颱風路徑預報誤差為 138/243/350 公里。在天氣預報數值模式有長足進步及中央氣象局努力研發颱風運動之預測技術下，2005 年的 24/48/72 小時颱風路徑預報誤差已降低為 94/172/279 公里，與 2002 年相較下，路徑預報準確度改進率分別達到 32% /29% /20%。然而準確度雖有逐年提升，仍存在著相當的預報誤差，而且越長時間的預報困難度越高故難以提昇其改進率。因此，若能適當地提供使用者預報的誤差程度，將有助於決策者評估災防損益時的參考。

美國國家氣象局早在 1983 年即發佈颱風侵襲機率預報，提供未來 72 小時內，針對特定城市和颱風中心特定距離下之機率值的量化資訊。日本氣象廳亦於 2004 年開始發布颱風侵襲機率預報，提供各地

每三小時受颱風侵襲的機率值，並預計自 2007 年開始將提供 72 小時內侵襲機率空間分佈圖（<http://www.data.kishou.go.jp/yohou/typhoon/conf/TY-ENQ2006/figplan.html>）。

自 2003 年度颱風季起，中央氣象局新增颱風路徑潛勢預報圖（70% 機率）的產品（圖 1），此產品雖僅提供單一機率之路徑潛勢預報，對使用者而言已較過去單一預報路徑具有更多的參考資訊，但仍缺乏預報颱風威脅程度時空分佈的量化資訊。

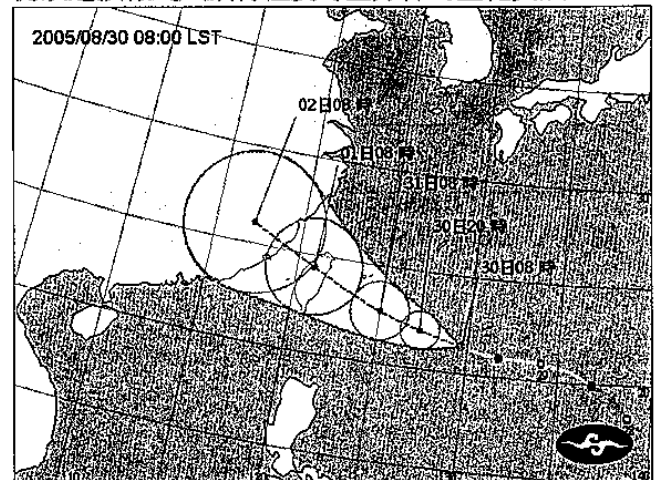


圖 1：中央氣象局 2005 年 8 月 30 日早上 8 點發布之泰利颱風路徑潛勢預報圖（70% 機率）

因中央氣象局自 2002 年開始發布 72 小時颱風路徑預報，本文為求資料的完整性，故以 2002 至 2004 共 3 年中央氣象局發佈之颱風路徑預報資料，統計其預報誤差特性，藉以開發颱風侵襲機率預報模式，並以 2005 年颱風路徑預報誤差驗證此機率模式

的適用性。由於近年來颱風路徑預報誤差有大幅改進，確實需要以近期預報誤差統計結果作為未來作業應用。

二、 颱風機率預報背景簡介

過去預報颱風在何時侵襲何地的方法有很多種，早期大多數的方法皆以氣候上的歷史紀錄為主。Hope and Neumann (1970) 以氣候上颱風的歷史紀錄當背景資料，發展出一套統計預報模式預測颱風未來可能的數種移動路徑，並以其計算某地某時之侵襲機率值。Neumann and Pelissier (1981b) 則以 NHC (National Hurricane Center) 作業上使用的 7 個模式 (5 個統計模式和 2 個動力模式) 之預報誤差進行評估，挑選其中幾個模式之預報路徑以二變量常態機率分佈 (bivariate normal probability distribution) 的方式計算該預報時間之侵襲機率，如此既可有量化指標又可保有預報路徑之不確定性。

Sheets (1985) 作者提及 Kimball (1958) 將預報誤差以環狀常態分佈表示，發展出西北太平洋地區颱風的暴風範圍影響某固定地區之機率預報模式，此方法在 1962 年被 Appleman 加以改進，將預報誤差由單一環狀常態分佈增加為根據颱風所在緯度不同而區分成的三種分佈。Jarrell (1978) 則以此方法為基礎，以更先進的電腦資源精細計算分類預報誤差分佈，發展出一套應用在西北太平洋和北大西洋之計算侵襲機率的模式。Jarrell and Brand (1983) 提到這套本在美國海軍使用的模式更延伸到其他政府部門及私人企業使用。

李等 (1988) 亦曾利用 Hurrell 法做為台灣地區颱風侵襲機率預報之初步研究，由個案分析指出，機率預報包含了預報潛在危險的性質，對於提高社會民眾的防颱警覺有一定程度的教育價值。

三、 使用資料及分析方法

Jarrell et al. (1978) 以 1966~1975 十年間之 JTWC 預報誤差作統計分析，提出經向 (E-W) 和緯向 (N-S) 之颱風中心預報誤差分布近似二變量常態機率分佈。本文收集中央氣象局 2002 至 2004 年發布之 12/24/48/72 小時颱風路徑預報 (包含熱帶低壓) 共 985/1584/1249/975 個個案，計算經向/ 緯向之平均預報誤差 μ_x / μ_y 、標準差 σ_x / σ_y 、及其相關係數 ρ_{XY} 。將預報誤差以二變量常態分配表示，以上述 μ_x 、 μ_y 、 σ_x 、 σ_y 及 ρ_{XY} 的資料可以算出不同時段、不同機率值之預報誤差橢圓的長短軸以及長軸與緯向的交角，相關數學說明及計算參考 Chase (1969)、Hope and Neumann (1970) 及胡與陳 (1976)。圖 2 橢圓由小到大為 12/24/48/72 小時之 95% 機率橢圓示意圖，X 代表橢圓中心即 (μ_x, μ_y) 。

假設預報時段之間的預報誤差為線性，則以線

性內差方法可獲得 2 至 72 小時每 2 小時之平均經緯度方向預報誤差 μ_x / μ_y 、標準差 σ_x / σ_y 和相關係數 ρ_{XY} 以計算其誤差橢圓，並再依機率值 0.05、0.15、0.25、0.35、0.45、0.55、0.65、0.75、0.85、0.95 將誤差橢圓分成十等份，故可得到 2002 至 2004 年中央氣象局官方颱風路徑預報誤差統計之機率橢圓資料。

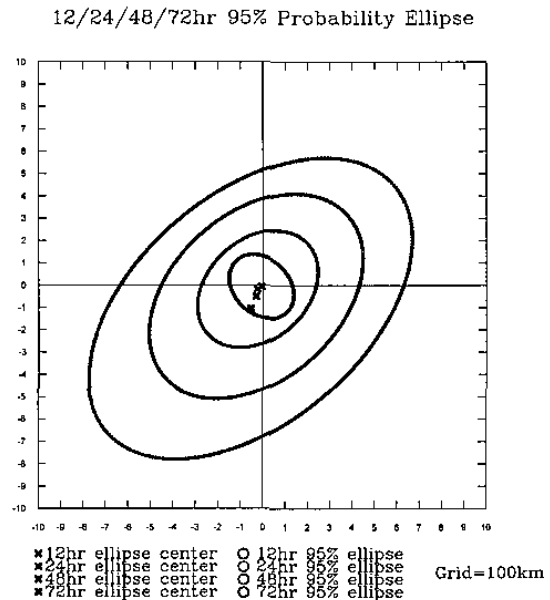


圖 2：95% 機率橢圓示意圖，格點間距為 100 公里。

計算侵襲機率首先要定義何謂侵襲。美國國家氣象局約以十級風暴風範圍定義為被侵襲區域，約即颶風中心在當地右方 93 公里或其左方 139 公里內代表該地受到侵襲，左右侵襲半徑不同主要是因為颶風的非對稱性。中央氣象局以颱風七級風暴風包含的區域為陸上警戒區，本文主要為發展現有預報產品包含預報誤差的量化資訊，故定義七級風暴風半徑範圍為計算侵襲機率時之侵襲半徑，侵襲機率值代表該地在該時段內位於颱風中心附近七級風暴風半徑內之機率值。

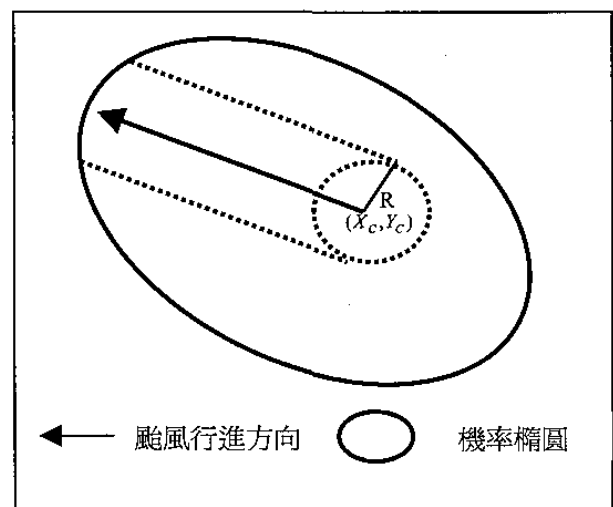


圖 3：侵襲機率空間累積示意圖。

侵襲機率的計算分為時間累積和空間累積兩種。在空間方面，機率累積要考慮到颱風移動路徑，圖 3 為計算空間累積機率之示意圖。針對 (X_c, Y_c) 為中心畫一以侵襲半徑 R 公里為半徑的圓，位於此圓形區域和沿颱風行徑方向之外延區皆符合被侵襲的定義。逐一計算當時間之 10 圈機率橢圓中虛線區域機率值將其加總即可代表該時段該地 (X_c, Y_c) 被侵襲的機率。

一段時間之累積機率在理論上應由時間積分得來，我們將預報時段切割成每 2 小時一筆以簡化無限小的時間積分。將時段內每 2 小時之機率值各當成一個事件，運用條件機率的觀念即可得到此時段內之侵襲機率值。其中各事件之機率橢圓可能存在重疊的部分則予以扣除。

以上述之方法建構一套機率預報模式，任一颱風預報路徑加上七級風暴風半徑資料皆可計算出 72 小時內台灣各地分時段的侵襲機率值並繪製侵襲機率空間分佈圖。

四、結果討論

2002 至 2004 年颱風路徑預報 12/24/48/72 小時經向平均誤差分別是 -7/-23/-30/-55 公里，緯向誤差則分別是 -5/-17/-49/-104 公里。預報誤差多數偏在第三象限，即預報位置較實際位置偏西南方。其長軸除 12 小時為西北-東南向，其餘 24/48/72 小時皆為東北-西南向（圖 2）。而 12/24/48/72 小時颱風路徑預報誤差落在 95% 機率橢圓內的個案數分別佔所有個案之 93%/94%/94%/93%，均與 95% 相當接近，代表此機率橢圓可適當的描述誤差分佈狀況。

侵襲機率的時空分佈與颱風移動速度和侵襲機率半徑有密切相關。在移動速度方面，圖 4 及圖 5 分別為 72 小時內颱風移速固定為向北 10 公里/小時及 25 公里/小時的每 2 小時之 95% 機率橢圓示意圖。在空間分佈上，移速越慢的颱風因為機率橢圓重複的部分越多，95% 機率範圍延伸的長度較短。相反的，移速越快則 95% 機率範圍延伸的長度較長。第三節中提到侵襲機率的空間累積需考慮颱風移動，故針對圖中任一固定網格點而言，同樣的侵襲半徑下，移速較慢的颱風 72 小時內的侵襲機率將較低。在侵襲機率半徑方面，當颱風移速相同時，侵襲半徑越大將包含越多時間的機率橢圓，換言之，針對固定地區之侵襲機率在時間分佈上也將會跨越較多的時段。故當颱風的暴風半徑越小時，分時段的侵襲機率值之間的差異會較明顯，亦越容易分辨該地最易被侵襲的時段。

總而言之，同樣的暴風半徑下，針對任一機率值，移速較快的颱風比移速較慢的颱風所包含的空間範圍較大；在相同的移速下，針對任一機率值，暴風半徑較大的颱風比暴風半徑較小的颱風所包含的空間範圍也會較大。若對某固定地區而言，颱風

暴風半徑較大者其侵襲機率值分佈的時段將較暴風半徑較小者更多，亦即被影響的時間將拉長。

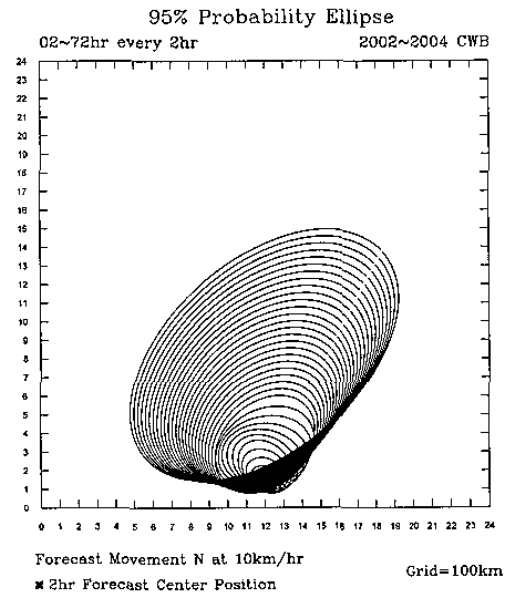


圖 4：移速向北 10km/hr 之每 2 小時 95% 機率橢圓。

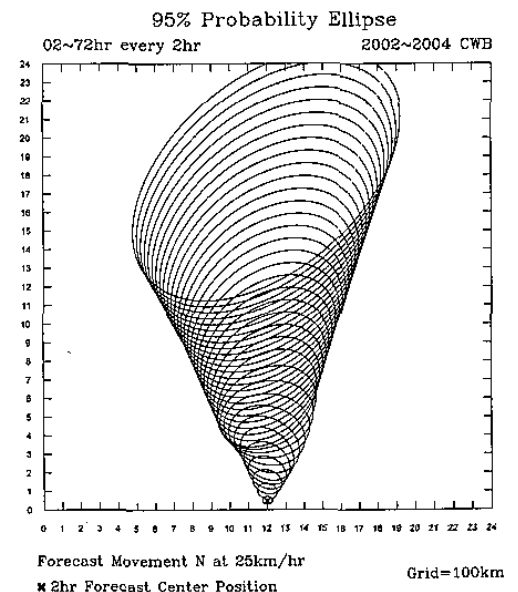


圖 5：移速向北 25km/hr 之每 2 小時 95% 機率橢圓。

五、作業應用

為了將機率預報模式應用在預報作業上，必須瞭解過去幾年中央氣象局颱風中心預報誤差趨勢，以瞭解如何調整機率橢圓以符合作業需求。以 2000 至 2004 年中央氣象局颱風中心預報誤差資料，逐年計算其平均預報誤差與其前三年（1997~1999 至 2001~2003）平均預報誤差，大致呈現預報誤差逐年下降趨勢（圖 6）。因為中央氣象局 12 及 72 小時預報分別是從 2003 及 2002 年開始，故無足夠資料計算其前三年平均預報誤差。24 及 48 小時預報則有

較長時間的預報資料，逐年與其前三年平均預報誤差比較，除了 2000 年以外皆較前三年平均為佳。故除 2000 年以外，計算逐年與其前三年預報誤差平均比值約為 0.83，其大致可以代表近年來中央氣象局颱風中心預報誤差改善的程度。

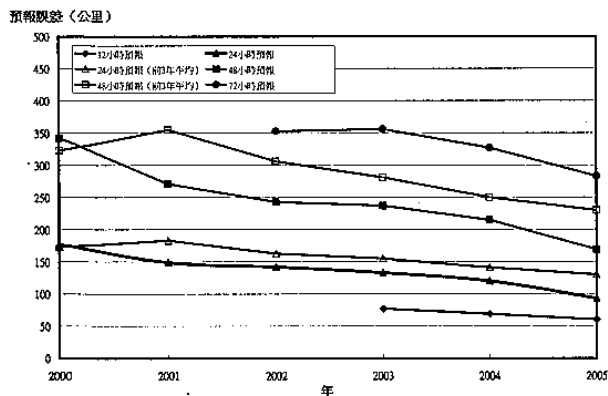


圖 6：2000~2005 年 12/24/48/72 小時預報誤差。橫軸為年份，縱軸為該年及前 3 年平均預報誤差（公里）

為瞭解機率預報模式在颱風預報作業上之應用，以 Kolmogorov-Smirnov test (K-S test) 做適合度的檢定，可決定兩組資料之間是否有明顯之差異。以 2005 年中央氣象局發佈之 12/24/48/72 小時颱風預報位置誤差，與 2002 至 2004 年之機率分佈模式做 K-S test，99% 信心度門檻值分別為 0.07/0.07/0.09/0.10 (Crutcher, 1975)，結果並無法通過測試。若以上述近年來預報誤差改進幅度 0.83 調整機率分佈模式後，與 2005 年個案作 K-S test 結果如圖 7 所示，12/24/48/72 小時之差異值分別為 0.07/0.07/0.09/0.08，則可達 99% 信心度以上。由此 K-S test 顯示，以調整過之機率橢圓代表 2005 年預報誤差分佈是一種非常適當的方式。因此，此機率橢圓計算出來之侵襲機率預報具有相當程度的參考價值。

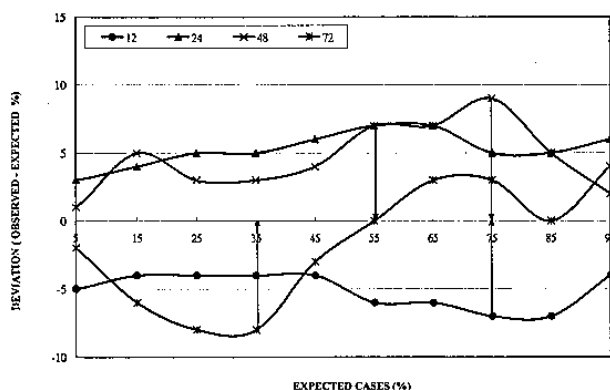
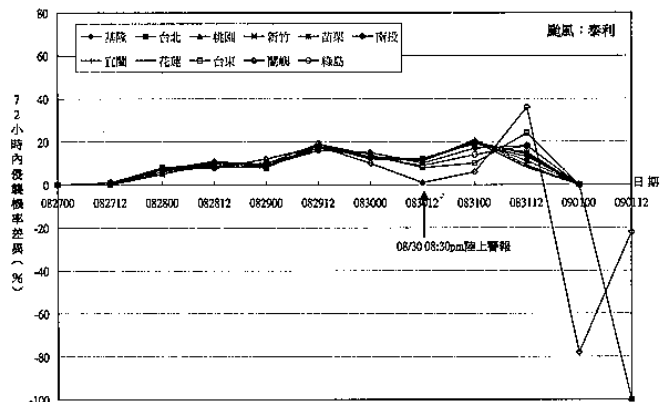


圖 7：橫軸為期待個案數百分比，縱軸為實際個案數減去期待個案數百分比。箭頭為最大誤差值。

以此調整過之機率預報模式針對 2005 年 7 個發

佈警報颱風做侵襲機率預報分析，結果在陸上警報發佈前皆發現，相較於前 12 小時的機率，72 小時內侵襲機率的變化率(圖 8)可上升達 15%~20%。

可以泰利颱風為例，8 月 30 日 12Z 陸上警報發佈，警戒區包括基隆、台北、桃園、新竹、苗栗、南投、宜蘭、花蓮、台東、蘭嶼及綠島等地。各警戒區在陸上警報發佈前，侵襲機率變化率皆上升達 15% 以上。蘭嶼在警報發佈當時，72 小時侵襲機率增加幅度為所有警戒區內最小，但仍在正值以上。隨後各警戒區之侵襲機率隨颱風接近而迅速增加，而最先脫離暴風半徑的蘭嶼在 9 月 1 日 00Z 時侵襲



機率值先有陡降的趨勢，其他地區之侵襲機率在 9 月 1 日 12Z 也開始大幅下降。

圖 8：中央氣象局 8 月 30 日 12Z 發佈之泰利颱風陸上警戒區域其 72 小時內侵襲機率變化示意圖。橫軸為以 12 小時為間距之預報發佈時間，例如 083012 代表 8 月 30 日 12Z。縱軸為相較於前 12 小時之各警戒區 72 小時侵襲機率變化率。圖上箭頭為陸上警報發佈時間。

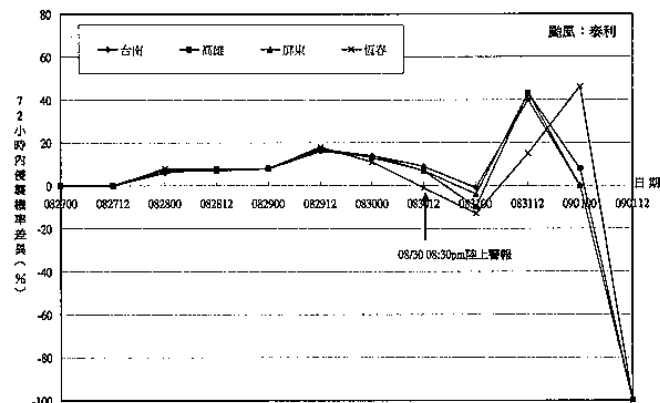


圖 9：同圖 8，區域為台南、高雄、屏東、恆春。

而在陸上警報發佈以後，8 月 30 日 12Z 恆春地區的侵襲機率為負成長，而 8 月 31 日 00Z 時台南到恆春等地區侵襲機率皆有減少的趨勢(圖 9)，主要是泰利颱風路徑略為偏北的緣故。之後隨著颱風接近，因為其暴風半徑達 250 公里，侵襲機率開始有大幅增加的現象。事實上，8 月 31 日下午開始陸上警戒區即包括台灣各地區及離島。

圖 10 為以中央氣象局 8 月 30 日 00Z 發佈之泰利颱風路徑預報計算得到之 72 小時內侵襲機率空間分佈圖，此時七級風暴風半徑為 250 公里。除金門、馬祖及澎湖地區以外，其他各地侵襲機率皆達 50% 以上。

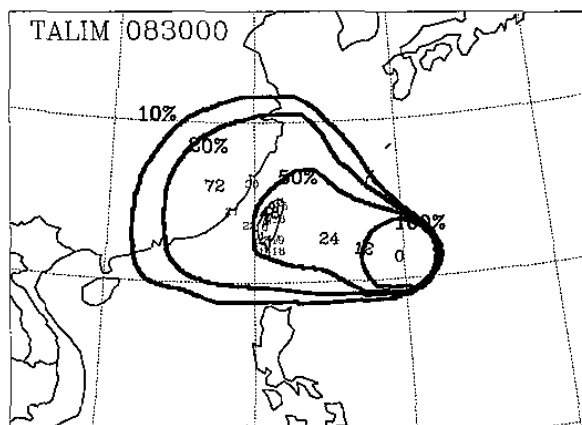


圖 10：8 月 30 日 00Z 泰利颱風 72 小時侵襲機率 10% / 20% / 50% / 100% 空間分佈圖。圖上數字 0/12/24/48/72 為中央氣象局發佈之颱風定位位置及 12hr/24hr/48hr/72hr 颱風預報路徑中心位置。

表 1 之 00-24/24-36/36-48/48-72/00-72 欄位即是 22 個地區分時段之累積侵襲機率值，四捨五入至整數，單位為%。舉例而言，台北未來 72 小時內侵襲機率為 57%，而在未來 00-24/24-36-36-48/48-72 小時內的侵襲機率各為 3%/18%/14%/22%，在未來 72 小時內，有一半以上機率在 24-48 小時內被侵襲。颱風期間，很多民眾會以颱風中心登陸點和登陸時間來作為防災準備的重要參考依據。以泰利颱風此時的預報路徑來看（圖 1），似乎以宜蘭為最可能的登陸點，登陸時間則可能落在 36-48 小時。但表 1 中宜蘭並非 72 小時內侵襲機率最高的地區，而 24-36 小時之侵襲機率並不比 36-48 小時低。東部地區的宜蘭、花蓮、台東及離島的綠島、蘭嶼侵襲機率值皆在 57%~60%之間，西半部地區的侵襲機率也都有達到 52%~57%左右，金門、馬祖及澎湖略小但也有 40%以上。而除了金門、馬祖以外，其他地區最易受侵襲的時間落在未來 24-48 小時即 8 月 31 日至 9 月 1 日，但 48-72 小時即 9 月 1 日至 9 月 2 日亦有 20%左右的侵襲機率。實際的情況是 31 日下午已有多個縣市停止上班上課，並有 1 人死亡 10 人受傷的情況。9 月 1 日、2 日中南部多個縣市有嚴重淹水情形，鐵路和空中交通也大受影響，並有多人受傷。

隨著颱風接近，發生嚴重災情的縣市其 72 小時內侵襲機率皆會大幅提昇（圖 8），而分時段的侵襲機率預報也可以明確的指出在未來 72 小時內的哪一個時段最有可能受到侵襲，其與實際發生的情況也都大同小異。顯示此項產品對提早做防颱準備具有

相當程度的幫助，並可在颱風警報發佈或警戒區域發佈之前先對此颱風威脅程度和時段有一基本的概念，並在颱風接近期間以各地侵襲機率的變化作為相關決策參考之重要依據。

由以上分析發現，若侵襲機率僅相差幾個百分比並不具有可區別的意義，為避免民眾使用此產品產生混淆，將侵襲機率值以 10% 為單位或許將是較佳的表達方式。

	00-24	24-36	36-48	48-72	00-72
基隆	3	18	14	22	57
台北	3	18	14	22	57
桃園	2	18	14	22	56
新竹	1	17	14	22	55
苗栗	1	17	14	22	54
台中	1	17	14	22	55
彰化	1	17	14	22	54
南投	2	17	14	22	55
雲林	1	17	14	22	54
嘉義	1	17	14	22	54
台南	1	16	14	22	52
高雄	1	16	14	21	52
屏東	2	16	14	21	54
恆春	3	17	15	18	53
宜蘭	5	19	14	22	59
花蓮	6	19	13	21	60
台東	6	19	14	20	58
蘭嶼	8	21	13	15	57
綠島	7	20	13	18	59
馬祖	0	5	15	24	44
金門	0	4	14	25	43
澎湖	0	12	14	22	48

表 1: 泰利颱風 8 月 30 日 00Z 未來各時段侵襲機率。(單位：%)

六、結論

由近年來颱風預報產品的演進可以知道，定量化提供預報的不準確性將是未來的趨勢。如此可以避免讓使用者誤用預報資訊或反以自己主觀經驗判定預報資訊的意義，提供一客觀且量化之機率預報將可以擴展預報產品的使用時效和價值。就颱風預報產品而言，侵襲機率預報可將颱風可能造成的災害

做量化的估計，並提供受颱風威脅的時空分佈。因此，使用者可以針對機率值做相關的決策，以作為風險管理及分析的參考標準。

美國國家氣象局提供侵襲機率預報已有多年的時間，近來更發展出暴風大於 34kt、50kt 及 64kt 的侵襲機率預報，而日本近年來也已有相關的產品於西北太平洋有颱風發生時公布在網頁上供民眾參考。本研究以過去四年的中央氣象局官方預報誤差進行研究，發展出預報誤差機率分佈模式，並以實際的個案分析，證明其可靠性和實用性，將可在颱風警報發佈前以量化數字讓使用者瞭解受到颱風侵襲的可能性和時段，如此將可增加防颱準備時間，需要撤離的民眾也可以及早做準備而減少可能的生命和財產損失。

目前機率預報模式僅考慮過去幾年中央氣象局官方預報路徑誤差，雖已可提供量化指標，但僅可表示路徑預報的誤差度。而颱風預報之不確定性不僅與路徑相關，颱風的強度和結構預報目前為止仍存在相當大的誤差。如何將颱風強度和結構預報的誤差程度加入此機率模式中，是未來值得挑戰的重要課題。

七、參考文獻

- 胡仲英及陳熙揚，1976：利用客觀比擬法預報颱風路徑之研究，氣象學報，22，8-16。
- 李清勝、謝信良及劉麗貞，1988：颱風侵襲機率可行性研究，中央氣象局委託研究報告。
- Chase,P.O.,1969:A note on drawing probability sectors. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 97, No.8, 602-603.
- Crutcher,H.L.,1975 : A note on the possible misuse of the Kolmogorov-Smirnov Test.*J.Appl.Meteor.*,14,1600-1603.
- Hope,J.R. and C. J. Neumann, 1970 : An operational technique for relating the movement of existing tropical cyclones to past tracks. *Mon. Wea. Rev.*, Dec.,925-933.
- Jarrell,J.D.,1978 : Tropical cyclone strike probability forecasting. NAVENVPREDRSCHFAC CR78-01, NEPRF, Monterey, Calif., 47pp.
- Jarrell,J.D., S. Brand and D.S. Nicklin, 1978 : An analysis of Western North Pacific tropical cyclone forecast errors. *Mon. Wea. Rev.*, Jul.,925-937.
- Jarrell,J. and S. Brand, 1983 : Tropical cyclone strike and wind probability applications. *Ame. Met. Soc.*,Vol. 64 , No. 9,1050-1056.
- Newmann,C. J. and J. M. Pelissier,1981b : Models for the prediction of tropical cyclone motion : an operational evaluation. *Mon. Wea. Rev.*, 109,522-538.
- Sheets R. C. ,1985 : The National Weather Service hurricane probability program. *Ame. Met. Soc.*,Vol. 66 , No. 1,4-13