

颱風路徑客觀預報方法之評介

蔡清彥

國立臺灣大學大氣科學系

1. 前言

颱風路徑之客觀預報觀念可以說是起始於1940年代末及1950年代初。在1947年，Grady Norton首先認為颱風在大範圍氣流場中可被看成為一個點渦旋，從大範圍氣流場計算出來的空氣塊軌跡即可代表颱風的移動路徑，此即所謂的駛流(steering)觀念(參考Simpson, 1974)。Riehl et. al. (1956)則首先利用網格系統計算颱風附近的500mb大範圍平均氣壓梯度等，然後建立500mb分析資料與颱風位移之迴歸曲線，作為大西洋颶風路徑預報之基礎。Wang (1954, 1956, 1960)則以統計迴歸方程式，利用700mb重力位高度預報西太平洋地區颱風的24小時位移。當時，這些預報方法都是依據主觀分析圖資料所作的。因此預報結果與主觀分析圖的好壞有直接的關係。雖然如此，這些方法却是統計選擇預報方法的先驅。

隨著電子計算機的進步，複雜的統計和類比步驟以及正壓數值預報模式等跟據客觀分析資料的颱風路徑預報在1960年代初開始發展。目前颱風路徑之客觀預報方法大致可分為統計方法及數值模式兩大類別。本文將在第2節中介紹統計預報方法，第3節介紹數值模式，第4節作綜合討論。

2. 統計預報方法

颱風路徑之統計預報又可分類比(analog)法和迴歸方程式(regression equation)法兩類。

2.1 類比法

Haggard et. al. (1965)首先發表一個颱風會侵襲美國甘迺廸角之或然率計算方法。Hope and Neumann (1970)採用這個觀念繼續研究發展，設計了颱風類比法(hurricane analogs, 簡稱HURRAN)，並被美國國家颶風中心(National Hurricane Center, 簡稱NHC)列為日常作業的客觀預報方法之一。目前這種方法已經被許多國家所採用。美國

海軍設於關島的聯合颱風警報中心(Joint Typhoon Warning Center, 簡稱JTWC)也將這種方法列入日常作業中，稱為TYFN75。

颱風類比法乃利用電子計算機從八、九十年的颱風資料中選擇日期、位置、移動方向及速度等與當前颱風接近的所有資料，然後將這些颱風置於當前的位置為共同的起點，利用這一組相似颱風在緯度和經度方向的位移來預報當前颱風的未來位置和侵襲或然率橢圓。

這種方法的優點是計算簡易，預報結果可以迅速提供預報員作為參考。其缺點則為對於不規則或個案少的颱風路徑預報能力較差。

2.2 迴歸方程式法

這類方法主要利用選擇迴歸法(screening regression method)從觀測氣象要素中選擇預報因子，並導出迴歸方程式，作為颱風路徑的預報公式。依所採用的氣象要素又可分為氣候持續(climatology - persistence), 統計一天氣(statistical - synoptic), 統計一動力(statistical-dynamical)等方法。

2.2.1 氣候持續法(模擬類比法)

為了彌補前述類比法不能預報不規則颱風路徑的缺點，Neumann (1972)設計了氣候持續法(climatology - persistence, 簡稱CLIPER)。採用與類比法相同的預報因子包括颱風的日期、位置、移動方向和速度等，以這些預報因子所組成的高次迴歸方程式預報颱風未來的位置。

這種氣候持續法能準確預報在東風帶中移動的颱風，但由於沒有採用當前天氣資料，對於轉彎進入西風帶颱風的預報則較差。

在這方面，香港天文台則採用一種簡單的氣候持續法預報颱風路徑。他們先建立每2.5經度和緯度方格內之颱風移動方向和速度氣候值。在預報颱風未來位置時，則採用氣候值與過去12小時位移之算術平均作為預報值。這種方法一般在北緯25度以

北或颱風轉彎以後較不準確。最近他們也比較對氣候與持續法採用不同加權因子所作的預報，但發現沒有產生較佳的預報結果 (Hope and Neumann, 1977)。

2.2.2 統計一天氣法

此類方法從當時天氣圖資料選擇預報因子，並導出預報迴歸方程式。最早的颱風客觀預報方法，譬如第 1 節前言中所介紹的 Riehl et. al.(1956) 及 Wang (1954, 1956, 1960) 等方法，又如 Miller and Moore (1960)

Arakawa (1964) 及 Tse (1966) 均屬此類預報方法。目前 Tse 的方法仍被香港天文台列為日常作業的客觀預報方法之一 (Chin, 1977)。這些早期的統計一天氣法均依據主觀分析圖資料所作的，因此預報結果與初始資料的分析有直接關係。而且，由於考慮範圍較小，只能預報 24 小時以內的颱風位移。

當電子計算機在 1950 年末和 1960 年初開始在氣象學中扮演重要角色的時候，R. G. Miller (1958) 介紹了可應用在氣象學上的逐步選擇 (stepwise screening) 方法。Veigas et. al. (1959) 引用此法分析以颱風為中心包括範圍很廣的網格資料，選擇預報因子，並求取其與颱風未來位移的相關。Miller and Chase (1966) 參考這些方法，並設計了選擇迴歸計算程式，從地面 700mb 和 500mb 天氣圖上選擇預報因子，求取預報迴歸方程式，稱為 NHC-64。此模式是造成美國 NHC 對颱風路徑預報在 1960 年初有顯著改進的主要原因。

Miller et. al. (1968) 後來又增加資料，提出新的模式，此即 NHC-67。此方法目前仍被美國 NHC 所採用。這些方法從 1960 年中期開始即利用美國國家氣象中心 (National Meteorological Center, 簡稱 NMC) 的 1000, 700 和 500 mb 客觀分析圖，作為選擇預報因子的資料來源。

在 1972 年，Neumann et. al. 又推出 NHC-72 模式。此模式先用選擇迴歸步驟製造兩組獨立的預報；一組是利用 1000、700 和 500mb 重力位高度資料所作的，另一組則利用 CLIPER 方程式。然後從這兩組獨立預報值求取最後的預報迴歸方程式。

2.2.3 統計一動力法

很顯然的，若要改進不規則颱風的統計預報，

我們必須在選擇迴歸步驟中考慮天氣資料的預報值。Renard (1968) 首先設計了利用數值預報資料所作的統計一動力預報模式。Renard et. al. (1973) 並修正此模式，稱為 MOHATT (Modified Hurricane and Typhoon Tracking)。這個由美國海軍研究發展出來的統計模式，並沒有用選擇迴歸技術，而是直接採用 500mb 或 700mb 數值預報之地轉風作為颱風駛引氣流的。

Veigas (1966) 曾利用選擇迴歸步驟從美國 NMC 之天氣分析圖及正壓預報圖中選取颱風路徑之預報因子。其預報結果並不成功，主要乃由於正壓預報在低緯度的效果較差之故。Neumann and Lawrence (1975) 首先完成了完整的統計一動力模式，稱為 NHC-73。他們除了利用 NHC-72 的步驟合併統計一天氣法 (NHC-67) 和 CLIPER 的迴歸方程式之外，還從美國 NMC 原始方程式數值模式所作之 500mb 預報圖中選擇預報因子。此預報系統是目前美國 NHC 日常作業中所採用的最準確預報方法之一。

Nomoto et. al. (1976) 也為日本氣象廳 (Japan Meteorological Agency) 發展了一套統計一動力預報系統。他也採用選擇迴歸技術從下列三種資料中選擇預報因子：(1) 500mb 之 24 小時預報重力位高度值，(2) 颱風目前及過去之位移，(3) 氣候因子。但在颱風取樣中，他只考慮了登陸或接近日本的個案。一般而言，這種方法之預報成效在 12 及 24 小時跟其他統計預報結果近似，但在 36 及 48 小時則較佳。

2.3 統計方法之預報成效

美國國家颶風中心目前所採用的颱風路徑客觀預報方法均列在表 1 中，其中 HURRAN、CLIPER、NHC-67、NHC-72 及 NHC-73 等均屬統計方法，而 SANBAR 則為正壓颱風路徑預報方法。在統計方法中，HURRAN 及 CLIPER 屬於類比及模擬類比法，沒有採用天氣資料。Neumann (1977a) 曾評介類比及模擬類比方法。一般而言，在低緯度地區其預報成效稍佳，而用天氣資料的統計預報則在緯度高的地區成效較佳。此結論可由表 2 所列出之 CLIPER 及 NHC-72 在北區及南區之預報誤差中看出來。NHC-72 雖多考慮了當時天氣資料，但其在 24.5°N 以南地區的預報誤差反而大於 CLIPER

表 1.. 目前美國國家颶風中心所採用之颱風路徑客觀預報方法

名 稱	原 理	所 用 之 天 氣 資 料
HURRAN	類比法	不用天氣資料
CLIPER	模擬類比法	不用天氣資料
NHC - 67	統計—天氣法	當時天氣資料
NHC - 72	(NHC - 67) + (CLIPER)	當時天氣資料
NHC - 73	統計—動力	當時及預報天氣資料
SANBAR	正壓數值預報	初始天氣資料

表 2 NHC - 72 及 CLIPER 之 5 年 (1972 - 1976) 平均預報誤差 (單位為哩) 。 (參照 Hope and Neumann, 1977) 。

	預 報 期 間	NHC - 72	CLIPER
24.5°N 以北地區	24 小時	124	139
	48 小時	273	308
	72 小時	405	464
24.5°N 以南地區	24 小時	126	123
	48 小時	294	272
	72 小時	432	376

表 3 各種客觀預報方法之平均預報誤差 (哩) ， 1973 - 1976 。 (參照 Sanders et. al., 1977)

模 式	預 報 期 間		
	24 小時	48 小時	72 小時
NHC - 67	117	287	433
NHC - 72	117	266	386
CLIPER	123	268	369
NHC - 73	113	248	388
SANBAR	117	236	348
個 案 數	183	135	94

之誤差。這可能是由於所用低緯度地區資料品質較差的結果。表3則列出所有客觀預報方法之誤差比較。在所有的統計預報方法中，12及24小時預報誤差以NHC-73為最小，NHC-72次之，而72小時預報誤差則以CLIPER為最小。

這些統計方法的預報成效在近年來並沒有顯著的改進，Neumann (1977b)認為若能在選擇迴歸步驟中注意改善缺點，則應可進一步改進統計方法之預報誤差。他指出在目前的統計模式中有五個問題值得研究改進。

(1) 統計上的意義

由於許多目前的統計模式包含著在統計上不具重要意義的預報因子，因此這些模式的預報值也就包含著隨意誤差的分量。若能嚴格遵守Miller (1966)及Neumann et. al. (1977)定出來的規則，則必能減小問題並增加統計模式之預報能力。

(2) 預報因子之選擇

由於逐步選擇迴歸之計算程式是現成的，因此預報因子之選擇都是自動化的。可能太自動化或機械化了，以致於找出許多多餘的預報因子。因此事前的主觀過濾工作是十分有幫助的。譬如有了500 mb 資料也許就可刪除700 mb 資料或者也許可以用整個對流層的平均等高線取代各層之等高線數值等

(3) 初始資料分析

統計預報方程式是從一組過去的資料發展出來的。在作預報時要注意作業資料具有與導公式那組資料有相近似的統計特性。譬如美國NMC 剛開始採用波譜資料客觀分析法時就曾造成美國NMC作颱風路徑統計預報的困擾。

(4) 過份偏重持續性

由於代表持續性的預報因子都是從事後的颱風“best-track”求得的。而實際預報作業中，這些因子就無法如此準確的獲得，因此這些預報因子在迴歸分析時都被過份重視了。

(5) 注重統計一天氣法的觀念

統計一天氣模式是以時間T的資料預報時間 $T + \Delta T$ 的數值，而統計一動力模式則利用MOS (Model Output Statistics) 的觀念。雖然後者的預報能力較好些 (參考表3)，但後者要等待數值模式預報完成之後才能計算，因此預報完成時間落

後了3小時，這就抵消了統計一動力模式的一部份長處。未來統計模式也許可以採用在時間T已經作好的數值預報資料。

3. 數值模式

作業上之颱風路徑數值預報可分為正壓 (barotropic) 及原始方程式 (primitive equation, 簡稱PE) 模式兩類。

3.1 正壓模式

最簡單的數值預報模式是正壓 (或相當正壓) 模式。此模式主要利用正壓 (或相當正壓) 渦旋度方程式預報500 mb 或垂直平均渦旋度的變化。在中緯度地區，我們可以利用地轉關係，在正壓渦旋度方程式中以重力位高度取代流線函數，此即地轉正壓模式。但一般颱風均位於緯度較低的地區，地轉關係不一定成立，也就是說不可以用重力位高度計算渦旋度，作數值預報。我們可以用觀測之重力位高度代入平衡方程式中求流線函數，再代入正壓渦旋度方程式中作預報，即所謂的平衡正壓模式 (balance barotropic model)。但更直接而且準確的方法是由觀測的風場計算流線函數，再代入渦旋度方程式中作預報。以這種方式預報颱風路徑是所謂的Sanders正壓模式，簡稱SANBAR (Sanders and Burpee, 1968)。

日本氣象廳 (JMA) 首先針對威脅日本的颱風作其路徑之數值預報 (Ito and Nitta, 1962)。他們採用北半球500 mb 平衡正壓模式作48小時之路徑預報，其颱風位置是以500 mb 最大渦旋度中心來決定的。美國國家颶風中心則於1968年開始將SANBAR列入日常預報作業 (Sanders et. al., 1977)。此模式曾經過Pike (1972) 及Sanders et. al. (1975) 等人之修正，以改進初始流場及減小預報誤差。目前此模式的作法是先分析1000 ~ 100 mb 共十層的平均風，計算流線函數，然後利用相當正壓模式的原理預報流線函數的變化。颱風路徑之預報則由追蹤最小流線函數及最大渦旋度中心而獲得。其初始風場資料之客觀分析則採用Eddy (1967) 的方法。最近之預報結果 (表3) 顯示，SANBAR預報誤差在24小時與其他統計方法相接近，但在48及72小時則小於所有統計方

法之誤差值。

Sanders et. al. (1975) 認為若能更完善的利用現有資料做初始資料的分析以及改進颱風的處理方法，則必能更進一步改進正壓模式之預報成效。目前有許多這方面的研究在進行中（例如 Sanders et. al., 1977; Jarvinen, 1977等）。他們特別着重在海洋等資料缺乏區域，研究如何加強船舶、飛機及衛星等之風場觀測資料。

3·2原始方程式模式

利用三度空間颱風模式來預報實際颱風路徑，可以說是近幾年的事情。颱風模式包括將運動方程式、熱力方程式、連續方程式、靜力方程式和水汽方程式寫成差分方程式，然後在三度空間的網格系統中求取這些差分方程式之數值解。颱風模式中所用的技術與中緯度日常作業之數值模式技術十分相似。其主要相異之處在於各物理過程之相對重要性以及解析颱風中尺度特徵所需的特殊水平解像度（resolution）。譬如積雲對流和潛熱釋放作用對中緯度大尺度系統是不重要的，但對颱風模式却具絕對重要性。又如颱風模式包括眼附近的十公里尺度到外圍幾百公里尺度和影響其移動的幾千公里綜觀尺度。因此颱風中心附近用細網格系統，而外圍用粗網格系統，如此安排的解像度系統是必需的。我們將在此節中介紹颱風數值模式的演進，以及目前實際資料之預報情形。

3·2·1 颱風數值模式的演進

早期的颱風模式都是軸對稱的（兩度空間）。Kasahara (1961) 最早從事颱風之數值模擬，他的模式在垂直方向有19層，在水平方向之解像度為18.5公里。潛熱釋放是以溼絕熱型式考慮的，亦即潛熱釋放是直接由模式可分析到的飽和上升運動所造成的。而線性理論（Bjerkness, 1938）說明在條件性不穩定大氣中，溼絕熱加熱所帶動的運動以1公里尺度的積雲對流運動最為不穩定，尺度愈大其成長率則愈小。在Kasahara的實驗中，波長為兩倍網格距離（即37公里）的波動迅速長大，在128分鐘其上升速度已達 30mb h^{-1} ，而大尺度環流僅稍微加強而已。

後來的颱風模式就用較粗的解像度，而用積雲參數化法來處理潛熱釋放作用。Kuo (1965) 的風

風模式雖然只能使最大風速達到 25m s^{-1} ，但他已經能夠成功獲得穩定的渦旋了。他的積雲參數化法到目前仍然被許多成功的颱風模式所採用。

第一次成功的颱風模式可以說是由Ooyama (1969) 和Yamasaki (1968a, b) 所完成的。Ooyama的平衡模式包括三層不可壓縮的均勻流體並採用他自己的積雲參數化法。他的模擬颱風與實際颱風有許多相似的特性。最大風速為 60m s^{-1} ，中心氣壓較外圍低60mb，動能收支情形等均與實際颱風相近似。Yamasaki則用四層原始方程式模式。他的模式能顯示加熱之垂直分佈對颱風發展和結構的重要性。

以後就有許多軸對稱颱風模式之研究，譬如Sundqvist (1970), Rosenthal (1970, 1978), Anthes (1971), Kurihara (1975), Yamasaki (1977), Chang and Anthes (1979) 等。這些颱風模式都是PE模式，大部份採用郭氏參數化法。他們的研究目的主要是分析各種物理過程對颱風發展及其結構的影響。

雖然兩度空間的軸對稱模式對於改進我們對颱風的瞭解有很大貢獻，但它們顯然無法處理非對稱效應以及與環境的交互作用，因此不適於模擬實際的颱風。Anthes et. al. (1971) 首次提出三度空間颱風模式的報告。他們能模擬許多實際颱風的非對稱特徵。許多科學家對這方面的研究工作有所貢獻。譬如Kurihara (1976) 分析螺旋雲帶的發展，Madala and Piacsek (1975) 研究可移動的巢狀網格（movable nested grid）。Johnes (1977) 研究可相互作用的巢狀網格，Tuleya and Kurihara (1978) 模擬颱風登陸時的改變等。

3·2·2 實際颱風預報

發展三度空間模式的最主要原因之一，就是為了實際颱風的預報作業。目前數值模式雖然無法正確預報颱風強度及結構的變化，但却似乎能顯著改進颱風路徑預報。表4列出目前幾個颱風作業數值模式及其特性。美國國家氣象中心的可移動細網格模式（Movable Fine Mesh Model，簡稱MFM）已經列入作業有幾年的歷史了（Hovermale and Livezey, 1977）。美國海軍數值天氣中心（Fleet Numerical Weather Center）的熱帶氣旋模式（Tropical Cyclone Model，簡稱TCM）已經對太

表4 幾個颱風作業數值模式的特性

單位	名稱	層數	網格距離 (公里)	可移動網格	邊界條件
美國國家氣象中心	MFMM	10	60	是	單向
美國海軍數值天氣中心	TCM	3	205	否	單向
日本氣象廳	MNG	3	145,73,36	是	雙向

平洋颱風做了作業實驗 (Hinsman, 1977)。日本氣象廳的可移動多重巢狀網格模式 (movable multiply-nested grid model, 簡稱MNG) 也已試驗了幾個逼近日本的颱風 (Ookochi, 1978)。Elsberry (1979) 比較了MFMM及TCM對1977年太平洋幾個颱風的預報誤差 (表5)。結果顯示颱風作業數值模式似能顯著改進關島聯合颱風警報中心的官方預報, 特別是長時間 (48小時) 的預報。此結果所代表的個案雖少, 但至少顯示這種動力颱風模式對颱風路徑預報作業是深具潛力的。

表5 對於1977年太平洋颱風的平均軌跡誤差 (公里)。(參照Elsberry, 1979)

	24小時	48小時
官方預報	250	544
MFMM	206	333
TCM	176	343
個案數	9	8

目前颱風數值模式仍有許多困難待解決, 才能顯著改進颱風之路徑預報。在此列出幾個待改進的項目:

(1) 預報完成時間落後

所有颱風作業模式都需要從北半球PE模式的預報值中獲得邊界條件。因此一般需要等待畫圖時間 (map time) 後6小時以上才能開始颱風模式之計算, 而要到畫圖時間12小時後才完成颱風預報。預報完成時間的落後將抵消部份準確度。目前已有科學家實驗以12小時前的北半球PE模式預報值當颱風模式之邊界條件, 以改進此缺點 (參考Elsberry

, 1979)。

(2) 初始資料分析

對於緯度較低或尺度較小的運動而言, 一般是質量場調整到風場的, 也就是說風場較氣壓場變化小。故一般颱風初始資料分析步驟是從風場計算氣壓場的。因此需要足夠代表基本氣流和颱風環流的風場觀測資料。在缺乏大範圍風場觀測之區域, 就需要衛星雲圖導出的雲移動風場或飛機、船舶報告來補足。在作颱風風場資料分析時, 需要注意減少其初始衝擊。在缺乏飛機偵查報告時, 還需要考慮模式颱風風場。

(3) 數值方面

改進水平及垂直解像度, 可移動巢狀網格系統, 數值差分方法等均為改進颱風模式的重要工作。

(4) 物理過程表示法

空氣與海洋之交互作用, 邊界層內的現象, 潛熱釋放等物理過程表示法仍待進一步改進。

(5) 颱風之追蹤

因為颱風結構是非對稱的, 颱風移動軌跡是搖擺的, 因此颱風定位也是值得研究改進的地方。

(6) 利用統計修正數值預報

建立統計迴歸方程式, 以調整模式預報之颱風路徑。

4. 結 論

本文對颱風路徑之統計及數值預報方法作有系統的評介工作。其目的在於介紹認識各種客觀預報方法, 其優劣點, 困難及未來發展潛力等。希望我們對於颱風路徑客觀預報方法有通盤的了解之後, 能夠盡速選擇一些適當的方法納入我們的氣象日常作業中, 以改進颱風路徑的預報, 減少許多無謂的損失。

在統計預報方面，汪群從及張月珠(1974)首先引介 HURRAN 方法作四個個案的預報實驗，胡仲英及陳熙揚(1976)加以改進並作六個颱風個案實驗。陳毓雷及鮑學禮(1974及1975)則引進NHC-67，並以西太平洋資料求取預報迴歸方程式。陳毓雷及雷萬清(1976)，陳毓雷(1978)曾引進 CLIPER 並從事颱風暴雨量預報之研究。可惜這些方法經過引進及研究階段之後，未能被有系統整理，比較預報成效的優劣點而進一步納入氣象作業之中。其他較新的統計預報方法仍待我們的研究引進工作，其中NHC-72 屬於統計一天氣法，合併NHC-67及CLIPER的預報迴歸方程式，引進工作目前就可進行；而NHC-73屬統計一動力法，引進工作則有待於數值預報列入日常作業之後才能進行。

在颱風路徑之數值預報方面，蔡清彥(1976, 1977, 1978)曾經對正壓颱風路徑預報方法作有系統的研究，改進數值方法及颱風資料處理等問題，並針對1975—1978威脅台灣地區的18個颱風個案作預報實驗。他發現，採用四點內插的準拉格蘭基平流法是相當正壓模式預報颱風路徑的最佳數值方法。採用這種方法似能大幅改進目前的颱風路徑預報作業。蔡清彥(1979)又研究了正壓颱風路徑預報之資料客觀分析。他發現採用Eddy(1967)客觀方法分析垂直平均流線函數，再代入前述正壓模式中乃是簡單而效果良好的颱風路徑預報方法，值得早日納入預報作業之中。

至於三度空間颱風數值模式，在國外也仍在發展階段之中，仍有許多數值方法，物理過程、資料處理等許多問題待改進。目前國內限於人力、計算機時間、氣象資料等之不足，可能在近年內仍無法研究納入日常作業之中。

參考資料

汪群從及張月珠，1974：颱風中心之運動，

Proceedings National Sci. Council., 7, 93—108。

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。

陳毓雷，1978：大漢河流域颱風暴雨量預報之研究，天氣預報與分析，74，16—26。

陳毓雷及雷萬清，1976：蘭陽河流域洪水預報研究計畫—颱風暴雨降雨量之推估，Proceedings National Sci. Council.，9。

陳毓雷及鮑學禮，1974：颱風移動路徑及強度之客觀預報，氣象預報與分析，58，15—22。

陳毓雷及鮑學禮，1975：颱風路徑客觀預報方法之進一步研究，氣象學報，21，26—35。

蔡清彥，1976：颱風路徑之數值預報，國立臺灣大學研究報告NWP-02號，12pp。

蔡清彥，1977：颱風路徑之數值預報實驗。國立臺灣大學研究報告NWP-04號，20pp。

蔡清彥，1978：正壓颱風路徑預報之數值方法比較，國立臺灣大學研究報告NWP-08號，14pp。

蔡清彥，1979：正壓颱風路徑預報之資料客觀分析，國立臺灣大學研究報告NWP-10號，26pp。

Anthes, R. A. 1971: Numerical experiments with a slowly varying model of the tropical cyclone. Mon. Wea. Rev., 99, 636-643.

Anthes, R. A., S. L. Rosenthal and J. W. Trout, 1971: Preliminary results from an asymmetric model of the tropical cyclone. Mon. Wea. Rev., 99, 744-758.

Arakaiwa, H., 1964: Statistical Method to Forecast the Movement and the Central Pressure of Typhoons in the Western North Pacific. J. Appl. Meteor., 3, 524-525.

Bjerknes, J., 1938: Saturated-adiabatic ascent through dry-adiabatically descending environment. Quart. J. Roy. Met. Soc., 64, 325-330.

Chang, S. W. and R. A. Anthes, 1979: The mutual response of the tropical cyclone and the ocean. Jour. Phys. Ocean., 9, 128-135.

Eddy, A., 1967: The statistical adjective analysis of scalar data fields, J. Appl. Meteor., 6, 597-609.

Elsberry, R. L., 1979: Applications of tropical cyclone models, Bull. Amer.

- Meteor. Soc., 60, 750-762.
- Haggard, W. H., H. L. Crutcher and G. C. Whiting, 1965: "Storm Strike Probabilities" paper presented at the Fourth Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL.
- Hinsman, D. E., 1977: Preliminary results from the Fleet Numerical Weather Central tropical cyclone model. Preprints, Third Conference on Numerical Weather Prediction (Omaha), AMS, Boston, pp. 19-34.
- 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., 98, 925-933.
- Hope, J. R. and C. J. Neumann, 1977: A survey of worldwide tropical cyclone prediction models. Postprint Volume, AMS 11th Tech. Conf. on Hurricane and Tropical Meteor., Miami, Dec. 13-16, 1977, pp. 367-374.
- Hovermale, J. B. and R. E. Livezey, 1977: Three-year performance characteristics of the NMC hurricane model. 11th Tech. Conf. on hurricanes and tropical meteorology, Dec. 13-16, 1977. Reprints published by Amer. Meteor. Soc., Boston, MA 02108, 122-124.
- Ito, H., and T. Nitta, 1962: Typhoon movement in the baroclinic barotropic forecast over the northern hemisphere. Paper presented at the Proc. of the international symp. NWP, Tokyo, 309-327.
- Jarvinen, B. R., 1977: Comparison of initial analysis schemes on the barotropic hurricane model (SANBAR), Postprint Volume, AMS 11th Tech. Conf. on Hurricane and Tropical Meteor., Miami, Dec. 13-16, 1977, pp. 397-400.
- Jones, R. W., 1977: A nested grid for a three-dimensional model of a tropical cyclone. J. Atmos. Sci., 34, 1528-1553.
- Kasahara, A., 1961: A numerical experiment on the development of a tropical cyclone. Jour. of Meteor., 18, 259-282.
- Kuo, H. L., 1965: On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. J. Atmos. Sci., 22, 40-63.
- Kurihara, Yoshio, 1975: Budget analysis of a tropical cyclone simulated in an axisymmetric numerical model. Jour. Atmos. Sci., 32, 25-59.
- Kurihara, Y., 1976: On the development of spiral bands in a tropical cyclone. Jour. Atmos. Sci. 33, 940-958.
- Madala, R. V. and S. A. Piacsek, 1975: Numerical simulation of asymmetric hurricanes on a β -plane with vertical shear. Tellus, 27, 453-468.
- Miller, B. I., and P. L. Moore, 1960: A comparison of hurricane steering levels. Bull. Amer. Meteor. Soc., 41, 59-63.
- Miller, B. I., and P. P. Chase, 1966: "Prediction of hurricane motion by statistical methods." Mon. Wea. Rev., 94: 399-405.
- Miller, B. I., E. C. Hill and P. P. Chase, 1968: Revised technique for forecasting hurricane motion by statistical methods. Mon. Wea. Rev., 96, 540-548.
- Miller, R. G., 1958: The screening procedure, Studies in Statistical Weather Prediction. Final Report, Contract Number AF19(604-1590), Hartford, Conn., Travelers Weather Research Center, 137-153.
- Miller, R. G., 1966: Advanced topics of statistical prediction in meteorology. WMO Technical Note Number 71, 115-132.
- Neumann, C. J., 1972: An alternate to the

- HURRAN tropical cyclone forecast system. NOAA Tech. Memo. NWS SR-62, 32 pp.
- Neumann, C. J., 1977a: Simulated analog models. Preprint Volume, AMS 5th Conf. on Prob. & Statis., Las Vegas, Nevada, November, 1977, pp. 47-52.
- Neumann, C. J., 1977b: A critical look at statistical hurricane prediction models. Postprint Volume, AMS 11th Tech. Conf. on Hurricane and Tropical Meteor., Miami, Dec. 13-16, 1977, pp. 375-380.
- Neumann, C. J., J. R. Hope and B. I. Miller, 1972: "A statistical method of combining synoptic and empirical tropical cyclone prediction systems" NOAA Technical Memorandum NWS SR-63, Fort Worth, Texas, 32pp.
- Neumann, C. J. and M. B. Lawrence, 1975: An operational experiment in the statistical dynamical prediction of tropical cyclone motion. Mon. Wea. Rev., 103, 665-673.
- Neumann, C. J., M. B. Lawrence and E. L. Caso, 1977: Monte Carlo significance testing as applied to statistical tropical cyclone prediction models. J. Appl. Meteor., 16, 1165-1174.
- Nomoto, S., K. Takenaga, M. Shimamura and T. Hara, 1976: A statistical prediction for typhoon movement using numerically forecasted data as predictors, J. of Met. Soc. of Japan, 54, 99-104.
- Ookochi, Y., 1978: Preliminary test of typhoon forecast with a moving multi-nested grid (MNG). J. Meteorol. Soc. Japan, 56, 571-583.
- Ooyama, K., 1969: Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones. J. Atmos. Sci., 26, 3-40.
- Pike, A. C., 1972: Improved barotropic track prediction by adjustment of the initial wind field. NOAA Tech Memo. NWS SR-66, 16 pp.
- Renard, R. J., 1968: "Forecasting the motion of tropical cyclones using a numerically derived steering current and its bias", Mon. Wea. Rev., 96, 453-469.
- Renard, R. J., S. G. Colgan, M. J. Daley and S. K. Rinard, 1973: "Forecasting the Motion of North Atlantic Tropical Cyclones by the Objective MOHATT Scheme", Mon. Wea. Rev., 101, 206-214.
- Riehl, H., W. H. Haggard and W. R. Sanborn, 1956: On the prediction of 24-hour hurricane movement. J. Appl. Meteor., 13, 415-420.
- Rosenthal, S. L., 1970: Experiments with a numerical model of tropical cyclone development: Some effects of radial resolution. Mon. Wea. Rev., 98, 106-120.
- Rosenthal, S. L., 1978: Numerical simulation of tropical cyclone development with latent heat by the resolvable scales I: Model description and preliminary results. J. Atmos. Sci., 35, 258-271.
- Sanders, F., and R. W. Burpee, 1968: Experiments in barotropic hurricane forecasting. J. Appl. Meteor., 7, 313-323.
- Sanders, F., A. L. Adams, N. J. B. Gordon, W. D. Jensen, 1977: A study of forecast error in a barotropic operational model for predicting paths of tropical storms. Postprint Volume, AMS 11th Tech. Conf. on Hurricane and Tropical Meteor., Miami, Dec. 13-16, 1977, pp. 389-396.
- Sanders, F., A. C. Pike and J. P. Gaertner 1975: A barotropic model for the operational prediction of tracks of tropical storms, J. Appl. Meteor., 14, 265-280.
- Simpson, R. H., 1974: Hurricane prediction skill: progress and prospects. Preprint Volume, International Tropical

- Meteor. Meeting, Nairobi, Kenya, Jan. 31-Feb. 7, 1974, pp. 145-150.
- Sundqvist, H., 1970a: Numerical simulation of the development of tropical cyclones with a ten-level model. Part I. Tellus, 22, 359-390.
- Sundqvist, H., 1970b: Numerical simulation of the development of tropical cyclones with a ten-level model. Part II. Tellus, 22, 504-510.
- Tse, S. Y. W., 1966: A new method for the prediction of typhoon movement using the 700 mb chart, Quart. J. Roy. Met. Soc., 92, 239-253.
- Tuleya, R. E. and Y. Kurihara, 1978: A numerical study on the role of diabatic heating in the genesis of tropical depressions. 12th Tech. Conf. Hurricanes and Tropical Meteorology. Abstract in Bull. Amer. Meteor. Soc. 11, 1548.
- Veigas, K. W., R. G. Miller and G. M. Howe, 1959: "Probabilistic prediction of hurricane movements by synoptic climatology." Travelers Weather Research Center, Occasional Papers in Meteorology, 54 pp.
- Veigas, K. W., 1966: The development of a statistical-physical hurricane prediction model. Final Report, U. S. Weather Bureau Contract Cwb-10966. The Travelers Research Center, Inc., Hartford, Conn., 19 pp.
- Wang, G., 1954: The development and movement of typhoons, Proc. United Nations Educ. Sci. and Cultural Org. Sympos. on Typhoons, Tokyo, 165-174.
- Wang, G., 1956: An objective method of forecasting typhoon movement., Tech. No. 1, First Wea. Wing. USAF.
- Wang, G., 1960: A method in regression equations for forecasting the movement of typhoons, Bull. Amer. Meteor. Soc., 41, 115-124.
- Yamasaki, M., 1968a: Numerical simulation of tropical cyclone development with the use of primitive equations. J. Meteor. Soc. Japan, 46, 178-201.
- Yamasaki, M., 1968b: A tropical cyclone model with parameterized vertical partition of released latent heat. J. Meteor. Soc. Japan, 46, 202-214.
- Yamasaki, M., 1977: A preliminary experiment of the tropical cyclone without parameterizing the effects of cumulus convection. J. Meteor. Soc. Japan, 55, 11-31.