

颱風發展及其結構之數值模擬

唐聿雲譯

Numerical Simulation of Hurricane Development and Structure

Y. Y. Tang

提 要

現在對熱帶氣旋發展及其結構的數值模擬的研究，分為兩種，一種是假定熱帶氣旋是圓形而對稱的，這種研究是用七個平面來代表熱帶氣旋的垂直結構。另一種是研究水平結構並不對稱的熱帶氣旋，其垂直構造係劃分為三個氣層來從事研究。此兩種模式均已獲得典型之實例，對成熟颱風結構之模擬亦有相當優異之成果。

一、前言

為了支援「風暴女神」計劃 (Project Storm-fury)，國家颱風研究實驗所和環境科學服務署決定研究熱帶氣旋生命史之理論模式，設計之模式有兩種，一種是假定為圓形而對稱者，已產生極有興趣之成果 (參考文獻17)，唯實際發生之颱風，其所包含之各種重要特性均為明顯的不對稱，諸如螺旋形之雨帶，對流層上部之外流氣流形式，以及與隣近氣壓系統間相互之作用等，均非對稱者。

此類研究之最終目標為建立颱風及其周圍環境之三度空間模式，誠為一極具雄心之計劃，欲達到此一目標，將來需作深入之研究方可。目前發生之最大困難是分解颱風所用之柵隔之大小，分解颱風中心部份需用之柵隔應為每邊10公里，但此種小型柵隔對颱風之周圍環境並不適宜，適於周圍環境之柵隔為每邊100公里者，遠較中心部份之柵隔為大，此種考慮直接導出之觀念為將小柵隔鑲在大柵隔中，並隨颱風中心而運行，這是研究發展此項模式所遭遇之實際困難。

同時，吾人對靜止孤立之非對稱熱帶氣旋之模式研究，亦已獲得若干成就，除圓形對稱之颱風模式外，研究成熟期颱風各種不對稱特性，應該是合理的起步。

二、圓形對稱之颱風模式

有關此模式在數學方面之推演過程，在參考文獻17中已予詳為列出，本文從略，此處僅作文字敘述。對圓形對稱颱風模式之研究，是以七個平面來代表大氣之垂直構造，與這個平面相應之平均大氣氣壓為：1015, 900, 700, 500, 300, 200及100毫巴，在各個面上標出應予以計算之變數，計算所用之基本方程為消去外部重力波之簡化連續方程，並

以頂部與底部無垂直運動作為其頂底邊界條件，計算範圍之半徑限於440公里，系統之側面邊界係屬開放式，其邊界條件為：水平輻散、相對渦旋之垂直向分力、位溫與比濕之水平梯度等均為零，實驗所用之半徑分度有10公里與20公里兩種。

此模式可以模擬出對流型降水 (由於潛熱之釋放而形成之大量加熱) 以及由於積狀雲出現而顯示水汽含量之充裕。對流活動可在任何氣層中發生，以表示該氣層有水平方向之輻合作用，並顯示條件性不穩定空氣之存在，促使該氣層之空氣質點具有舉昇力量。此模式亦能模擬非對流型降水，對流調節之變化與降水量之計算，在參考文獻17中均有詳細說明。

海面與大氣間之可感熱量、潛熱以及動量等之交換，均以氣體動力方程處理。

答案之數值部份，包含有：預定之時間階段、平流項之溯流差異、以及部份不明之計算圈等；有一例外，見於計算水汽之連續方程，其平流項所用之集中流動方式，以及使用時間積分之Matsuno法，詳細情形見參考文獻16。

積狀雲內氣流將水平動量作垂直輸送，此項因素在颱風大範圍動力學方面扮演一重要角色 (參考文獻6、18)。在參考文獻18中，已討論與垂直平流項之溯流差異相借之計算擴展，且成為與積雲輸送相類似之方法，並曾討論經由多次之數值實驗，用溯流差異所獲得之解答，遠較用集中差異所獲得者為可靠，因為集中差異並不能提供積雲所作垂直輸送之代表性，在該文獻中並曾說明積狀雲運動所生之側向混和，可由水平平流項之溯流差異所生之計算擴展，予以適當之代表，此項說明乃經由連串之數值實驗所獲之顯示，在諸實驗中，用集中公式

所得之解答與用潮流公式所獲之結果互相比較。計算之側向粘性係數乃作為時間與空間之函數予以計算，發現此種計算與Riehl和Malkus二氏在1958年為颱風DAISY所作側向混和係數之經驗估計極為相符。

大部份實驗之原始情況乃由在梯度平衡方面之微弱而非輻散之渦旋所組成，中心氣壓1013毫巴，在半徑約250公里處最強地面風速為7公尺/秒，原始之比濕場僅隨高度而變，且與颱風季節平均探空資料之相對濕度相對應（參考文獻8）。

圖一顯示一典型實驗在海平面發展之情況，開頭四天左右之醞釀時期中，具有無輻散氣流之熱帶氣旋模式之特徵（參考文獻11及17），第一天之計算應視作起始程序，而不能視作預測。

在此期間，非粘性的，絕熱的且為平衡之系統將轉變為緩慢的變化系統，其中之磨擦、輻散和傳熱等效應均甚為重要。在醞釀時期之所餘時日中，似乎有一性質上之相對情況。由於Riehl（參考文獻14）及其他人士之強調，說明僅在先期存在之擾動與加深中形成之熱帶風暴，常有需時數日之緩慢程序。

中心之最低氣壓與最大風速均發生在168小時，此顛峯值之出現乃代表對平衡狀態之超越，較接近之穩定狀態見於192與216小時之間，一種相當緩慢之衰退現象為計算後期之特徵，此與積雲對流將熱量向上輸送所產生之靜力穩定性之增加相偕，自144小時至計算終結均呈現颱風強度之風（hurricane force winds），當加深時，地面最大風速之半徑即迅速減小，隨後之變化不大。

圖二與圖三分別顯示成熟期中（192小時）風速與溫度反常（temperature anomaly）之垂直剖面圖，並經證實此項解答之高度正確性。圖四為900毫巴氣壓面（192小時）之垂直運動半徑剖面圖，25公里處出現之頂點與颱風眼之壁圈相吻合，此乃表示在風暴中心四周之狹窄圓圈處有完全之上升運動，計算與實測（參考文獻15）極為一致。

由此模式計算所獲得之中心氣壓，乃與最大風速相配合，用Colon氏的研究可予證實，如圖五，Colon利用很多熱帶風暴和颱風的觀測資料，包括其生命史中之各個階段（醞釀期、成熟期和消散期）的中心氣壓與最大風速，獲得其間之關係而作成此圖，圖中兩直線間空間，幾包含全部資料點，吾

人計算所得之點亦予繪出，即可知各計算點均落在Colon之資料限度線內。

圖六之下圖為在環流半徑100公里以內之平均降水率，這是另一種具有代表性之計算，在成熟期中，每日之平均降水量約為25厘米（約為10吋），此項計算結果極為合理，非對流型降水量約為對流型降水量之2/3。Hawkins和Rubsam二氏在1964年搜集颱風HILDA的雷達資料，發現實際降水量均來自層狀雲，觀測並指出HILDA之環流內，大部份含有相當可觀之降水，僅在風眼之雲牆區域內有活躍之積雨雲，故圖六所示之對流型降水之分量與非對流型分量，為合理之結果。

圖六之上圖顯示出同一實驗在200公里以內之效率（%），即靜能產生率與潛熱釋放率之間的比例。在成熟期中，計算所得之值極為接近於Palmer和Riehl二氏發現之經驗值2.7%。

圖七乃同一實驗中，計算各不同半徑之圓內所含之靜能，每一半徑之圓內，其所含靜能可到達一定之最高數值，靜能並無對時間之單方面增加，這與過去作的老的熱帶氣旋模式不同（參考文獻11與16）。

Riehl在參考文獻14中曾討論說：大量水汽含量及於高空，為熱帶氣旋顯著加強之必要條件。

在另一方面，潮濕氣層之厚度係隨低空輻合而增加，並轉變為大範圍之運動（參考文獻14），先期存在之擾動或醞釀時期可能就是由於深厚潮濕氣層之發展而存在，此潮濕氣層之原來濕度分佈即接近於平均熱帶大氣，如是項構想屬實，則水汽含量高之風暴模式，其發展至成熟期之速度，必較水汽含量較低者為快。

圖八是證實上述構想之兩個實驗，其原始狀況僅有濕度分佈不同，實驗W₂之濕度分佈乃以平均熱帶大氣所具有之濕度為起始點，但實驗W₆之水汽含量則較高，各層之相對濕度均為90%，兩者計算所得之最大地面風速與最低中心氣壓約相似，惟出現之時間却大相逕庭，在W₆中，出現在48小時（？），較W₂為早；W₂之醞釀期為72小時，但W₆僅需24小時。

實驗W₆之降水量及降水效率（圖九）與W₂相比（並未繪出，但與圖六所示W₁之情況相似），並無太大之差異，這兩種計算所得之最大效率約相等，W₆之平均降水量約為10厘米/日，較W₂為大。

綜上所述，此類模式發展之最初動機，乃作為「風暴女神」計劃之理論支援，圓形對稱模式曾試用於去年的颱風DEBBIE（參考文獻5），計算之詳細情形將另行發表（參考文獻19）。

三、不對稱模式

此項模式之發展，迄今尚未能到達圓形對稱模式之階段，但確已產生令人滿意且極饒趣味之結果，足以編撰詳細之研究報告（參考文獻3），本文僅作簡明之描述，並提報部份研究成果。

此模式之垂直構造係劃分氣壓為三個氣層，兩個上層氣層各厚約450毫巴，底層約厚100毫巴，以代表地面界層，垂直坐標為該高度之氣壓與地面氣壓之比（參考文獻13），計算所用之基本方程之形式，與Smagorinsky研究環流所用者（參考文獻20）大致相似。以卡笛兒坐標作為水平坐標，周界呈不規則形，約似半徑435公里之圓，該系統之側面周界為開放者，其條件為：氣壓與溫度均屬穩定狀態，沿徑風向量之切變為零。為計算經濟起見，其水平分解乃以30公里為間隔。

對水汽之處理，約與上節圓形對稱模式之情況相仿（參考文獻16及21）。溫度之對流調節，其處理方法在最早之圓形對稱模式之論文（參考文獻16）中可見到。

有限差異結構之水平部份乃與Smagorinsky所用者（參考文獻20）相類似，其垂直部份又與Kerihara和Holloway二氏所用者極為相似（參考文獻9），並用Matsuno方法來作時間積分（參考文獻10）。

海面與大氣間之熱量與動量交換，乃用空氣動力方程處理之，積雲對流而產生之動量垂直輸送，迄今尚未予列入計算。動量之側向混合，在實效上之處理乃採用可變之側向混合係數，在形式上與圓形對稱模式計算粘性係數相似。

原始狀況之組成有下列兩項，一為梯度，一為在半徑240公里處最大風速為18公尺/秒且無輻散之渦旋。此原始渦旋為相當強烈者，以類似之對稱風暴與不對稱之模式比較試驗，發現如果原始狀況不同，則風暴最終之成熟期即稍有差異。到達最終成熟期所需之時間，直接由原始渦旋之強度而定，因此，原本強烈之渦旋，在計算上比較省事。

假如原始狀況與周界條件為完全之圓形而對稱者，則任何時間階段所計算而得之解答，均應與圓

形對稱者之解答一致，但是由原來之圓之切線方向之風換算為卡笛爾坐標之風分力所產生之割截和成圓誤差，以及周界並非整圓，則形成以四號波為主之微弱不對稱。

圖十為風暴之生命史中，其中心氣壓與低空最強風力之計算結果，由該圖可以看出在初期「醞釀時期」以後，風暴逐漸加強，到達颱風之最低強度，然後呈極為穩定之狀態，一直延續至120小時，120小時以後，風暴再度增強，迄230小時達最強之強度，此時風速64公尺/秒，中心氣壓低至965毫巴，嗣後即逐漸填塞，計算終止於260小時。

在最初之120小時中，此系統極為近似圓形且對稱，並無螺旋形雨帶，外流氣流層亦無明顯之不對稱，圖十一為84小時對流層上部之氣流線，圖十二則為同時間之降水量分佈。

在120小時以後，風暴再度開始加深，情況全部改觀，圖十三是表示156小時之降水型態，與颱風之螺旋形雨帶極為吻合，此時，高空外流氣流之型式（圖十四）有明顯之不對稱，在東南象限與西北象限有大量外流氣流，吾人亦可看到兩個反氣旋式之小渦旋，對一成熟颱風而言，此種外流型式乃絕對可靠（參考文獻1）。

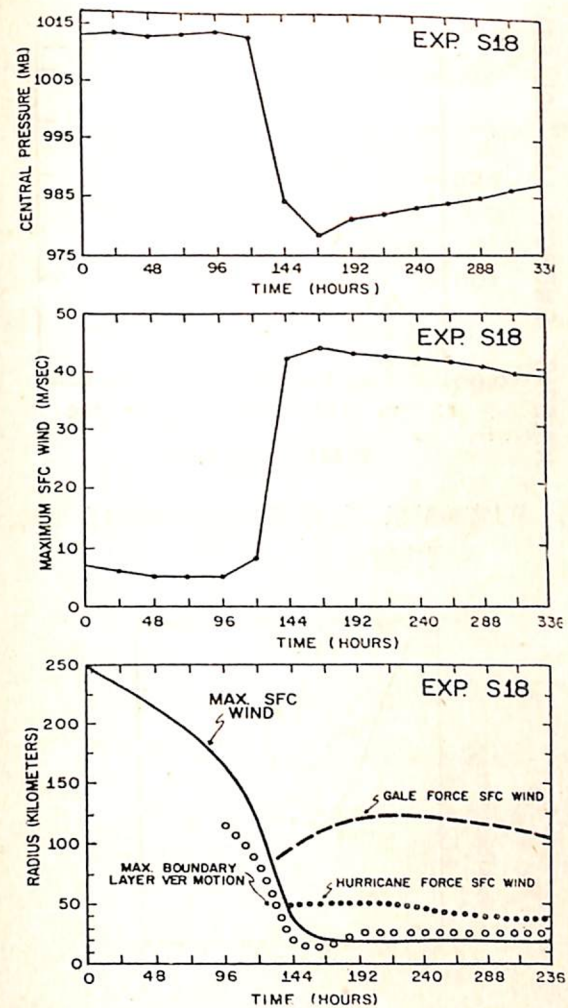
上述對稱形式之遭遇破壞，以及風暴之再度增強等情況，似與外流氣層之發生動力不穩定有密切之關係，圖十五之上半部是相對渦旋之最小值隨時間之變化，在對流層上部隨處可見此種相對渦旋，用於計算之科氏參數為5×10⁻⁵秒⁻¹，在100小時以前，最小絕對渦旋值非常接近於零，僅偶而出現輕微之負值，但到100小時，即開始迅速降低，在風暴再度增強以前是如此，在氣流開始發生明顯之不穩定以前亦復如此。

動力不穩定之條件可以寫成 $S_a \{ 2 \sqrt{|V|} / R + f \} < 0$ ，式中之S_a代表絕對渦旋，V表風之水平向量，R表氣流線之曲率半徑，f表科氏參數，如括號內得負值，則顯示有不規則之風出現，因此，在兩種情況下，空氣質點之水平運動可以出現動力不穩定：一為絕對渦旋為負值而風為正常時；一為絕對渦旋為正值而有不規則之風時。

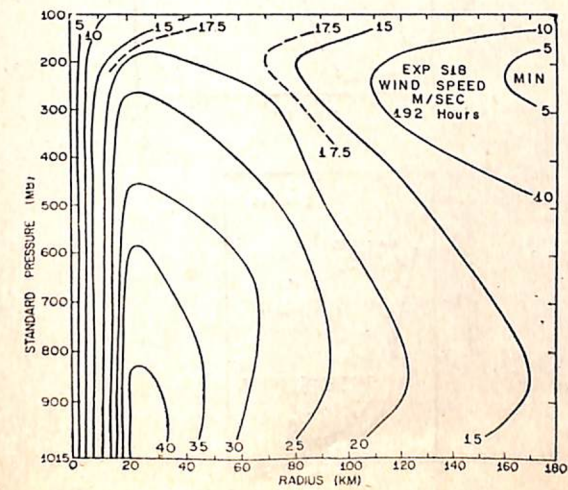
絕對渦旋出現負值之起始時間，約在100小時，故此時即可能出現動力不穩定，在成熟期中之計算結果，證實有反氣旋式絕對渦流（下轉33頁）

參 考 文 獻

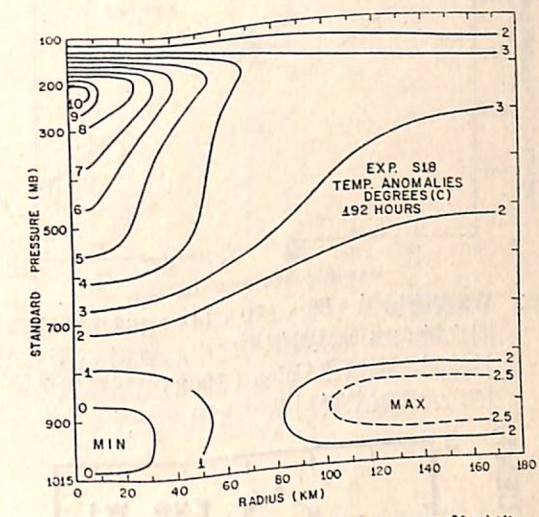
1. Alaka, M.A., "The Occurrence of Anomalous Winds and their Significance," National Hurricane Research Project Report No. 45, U.S. Weather Bureau, Miami, Fla., June 1961, 26 pp.
2. Alaka, M.A., "Instability Aspects of Hurricane Genesis," National Hurricane Research Project Report No. 64, U.S. Weather Bureau, Miami, Fla., June 1963, 23 pp.
3. Anthes, R.A., Rosenthal, S.L., and Trout, J.W., "Preliminary Results from an Asymmetric Model of the Tropical Cyclone," Paper submitted for publication in the Monthly Weather Review.
4. Colón, J.A., "On the Evolution of the Wind Field During the Life Cycle of Tropical Cyclones," National Hurricane Research Project Report No. 65, U.S. Weather Bureau, Miami, Fla., November 1963, 36 pp.
5. Gentry, R.C., "The Modification Experiment on Hurricane Debbie, August 1969," Science, Vol. 168, No. 3930, April 1970, pp 473-475.
6. Gray, W.M., "The Mutual Variation of Wind, Shear, and Baroclinicity in the Cumulus Convective Atmosphere of the Hurricane," Monthly Weather Review, Vol. 95, No. 2, February 1967, pp 55-73.
7. Hawkins, H.F., and Rubsam, D.T., "Hurricane Hilda, 1964: II. Structure and Budgets of the Hurricane on Oct. 1, 1964," Monthly Weather Review, Vol. 96, No. 9, Sept. 1968, pp 617-636.
8. Hebert, P.J., and Jordan, C.L., "Mean Soundings for the Gulf of Mexico Area," National Hurricane Research Project Report No. 30, U.S. Weather Bureau, Miami, Fla., April 1959, 10 pp.
9. Kurihara, Y., and Holloway, L.J., "Numerical Integration of a Nine-Level Global Primitive Equations Model Formulated by the Box Method," Monthly Weather Review, Vol. 95, No. 8, August 1967, pp 509-530.
10. Matsuno, T., "Numerical Integrations of the Primitive Equations by a Simulated Backward Difference Method," Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 44, No. 1, February 1966, pp 76-83.
11. Ooyama, K., "Numerical Simulation of the Life-Cycle of Tropical Cyclones," NSF Grant No. GA-623, New York University, New York, Dec. 1967, 133 pp.
12. Palmén, E. and Riehl, H., "Budget of Angular Momentum and Energy in Tropical Cyclones," Journal of Meteorology, Vol. 14, No. 2, March 1957, pp 150-159.
13. Phillips, N.A., "A Coordinate System Having Some Special Advantages for Numerical Forecasting," Journal of Meteorology, Vol. 14, No. 2, April 1957, pp 184-185.
14. Riehl, H., Tropical Meteorology, McGraw-Hill, New York, 1954, 392 pp.
15. Riehl, H. and Malkus, J.S., "Some Aspects of Hurricane Daisy, 1958," Tellus, Vol. 13, No. 2, May 1961, pp 181-213.
16. Rosenthal, S.L., "Experiments with a Numerical Model of Tropical Cyclone Development; Some Effects of Radial Resolution," Monthly Weather Review, Vol. 98, No. 2, February 1970, pp 106-120.
17. Rosenthal, S.L., "A Survey of Experimental Results Obtained from a Numerical Model Designed to Simulate Tropical Cyclone Development," ESSA Technical Memorandum ERLTM-NHRL 88, U.S. Department of Commerce, National Hurricane Research Laboratory, Miami, Fla., January 1970, 78 pp.
18. Rosenthal, S.L., "A Circularly Symmetric, Primitive Equation Model of Tropical Cyclone Development Containing an Explicit Water Vapor Cycle," Monthly Weather Review, Vol. 98, No. 9, September 1970 (In Press).
19. Rosenthal, S.L., "A Circularly Symmetric, Primitive Equation Model of Tropical Cyclones and its Response to Artificial Enhancement of the Convective Heating Functions," Monthly Weather Review (In Press).
20. Smagorinsky, J., Manabe, S., and Holloway, J.L., "Numerical Results from a Nine-Level General Circulation Model of the Atmosphere," Monthly Weather Review, Vol. 93, No. 12, December 1965, pp 727-768.
21. Yamasaki, M., "Detailed Analysis of a Tropical Cyclone Simulated with a 13-Layer Model," Papers in Meteorology and Geophysics, Vol. 19, No. 4, December 1963b, pp 559-585.



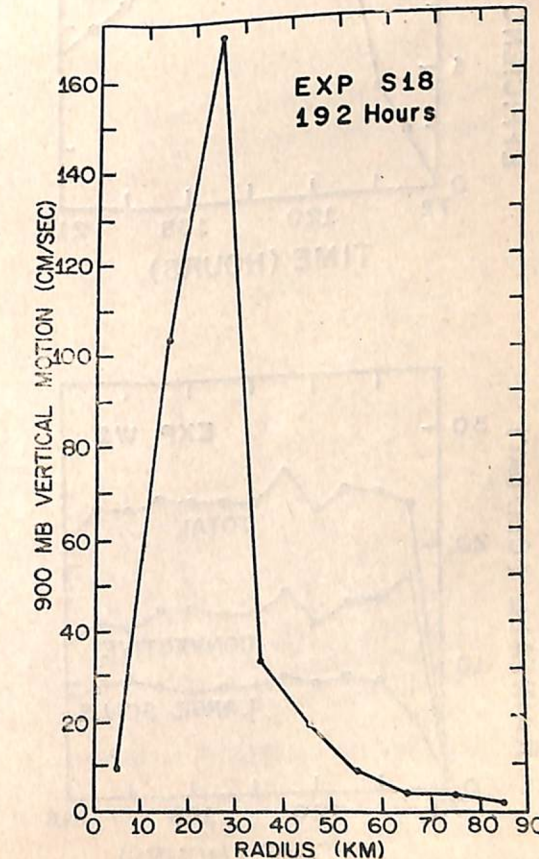
圖一 S18實驗成果。上圖：中心氣壓隨時間之變化。中圖：地面最大風速隨時間之變化。下圖：地面最大風速半徑、地面颱風風力與大風風力半徑及900 毫巴等壓面最大垂直運動之半徑。



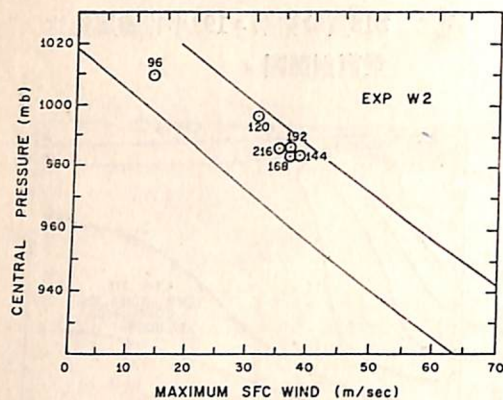
圖二 S18實驗結果。192小時總風速之垂直剖面圖。



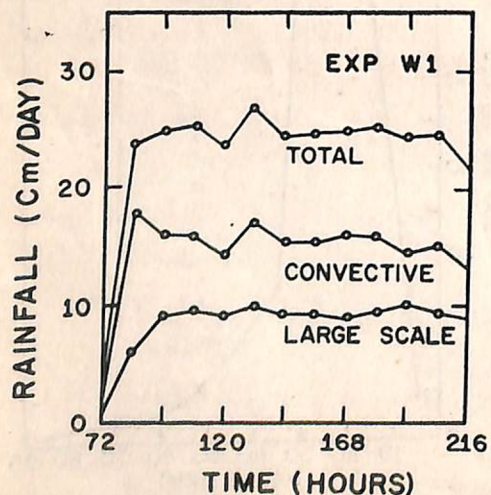
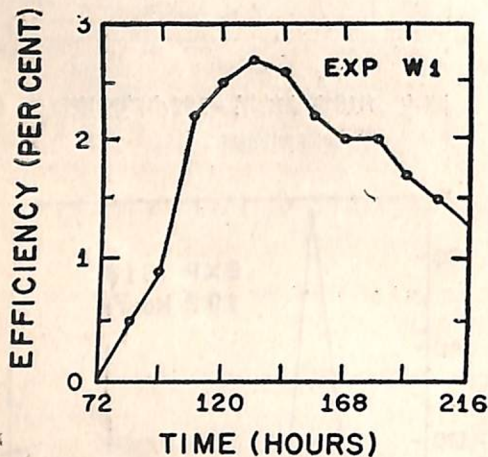
圖三 S18實驗結果。192小時溫度反常之垂直剖面圖。



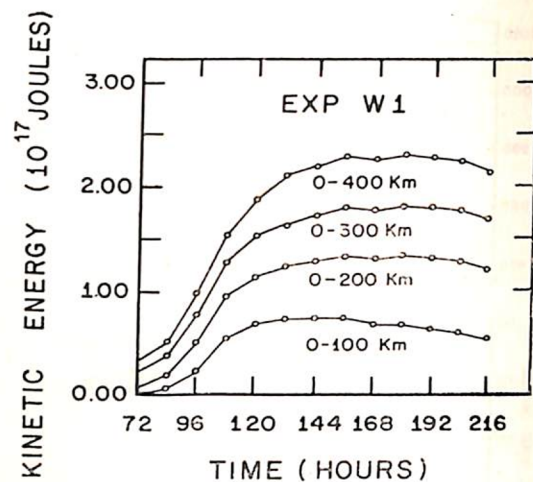
圖四 S18實驗結果。192小時900毫巴等壓面垂直運動之半徑剖面圖。



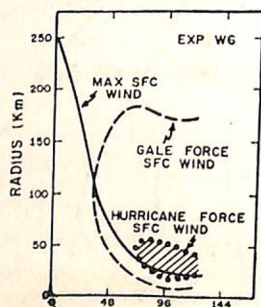
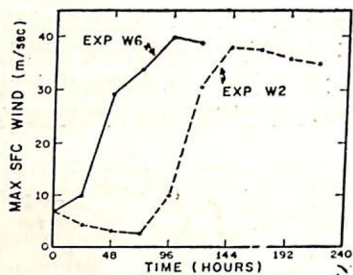
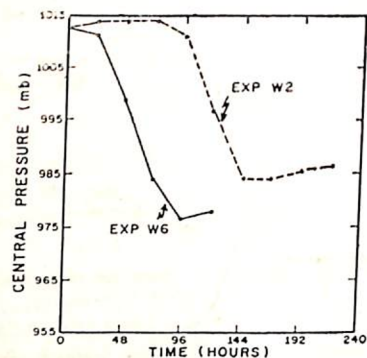
圖五 W2實驗結果。96、120、144和168小時等時間之最大地面風與相應之中心氣壓。平行二斜線間之區域乃 Colon (1963) 氏用颱風各時期之大量實際資料點所表示之空間。



圖六 W1實驗結果。上圖：半徑200公里以內之效率。下圖：半徑100公里以內之平均降水量。

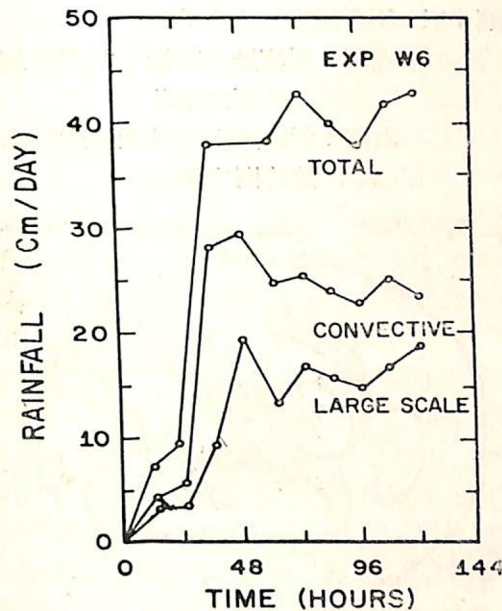
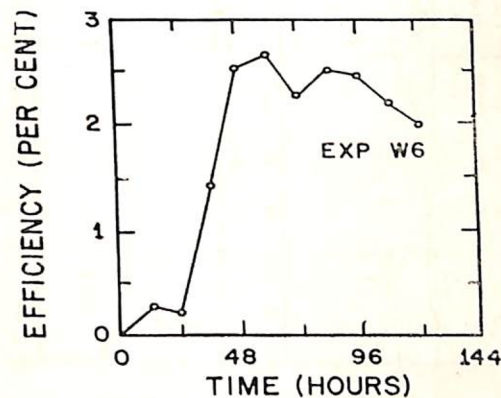


圖七 W1實驗結果。各種半徑範圍內靜能含量隨時間之變化。

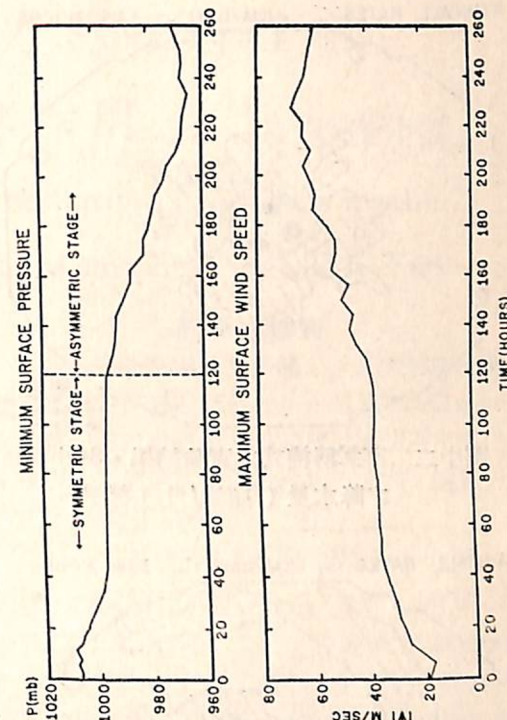


圖八 上圖：在W2及W6兩項實驗中，中心氣壓隨時間變化之比較。
中圖：W2與W6兩項實驗中，地面最大風速之比較。
下圖：W6實驗結果，地面最大風速半徑、地面颱風強度風力與大風強度風力之內限與外限。

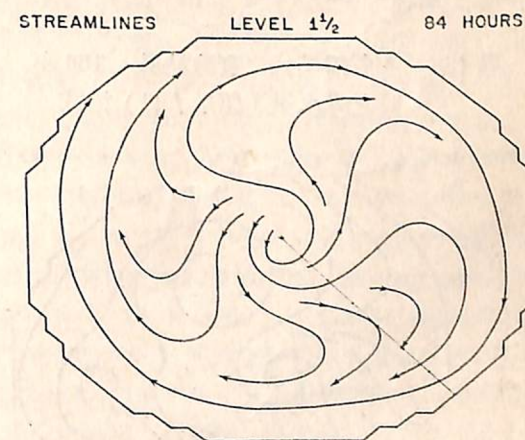
圖八 上圖：在W2及W6兩項實驗中，中心氣壓隨時間變化之比較。
中圖：W2與W6兩項實驗中，地面最大風速之比較。
下圖：W6實驗結果，地面最大風速半徑、地面颱風強度風力與大風強度風力之內限與外限。



圖九 W6實驗結果。
上圖：半徑200公里內之效率。
下圖：半徑100公里以內之平均降水量。

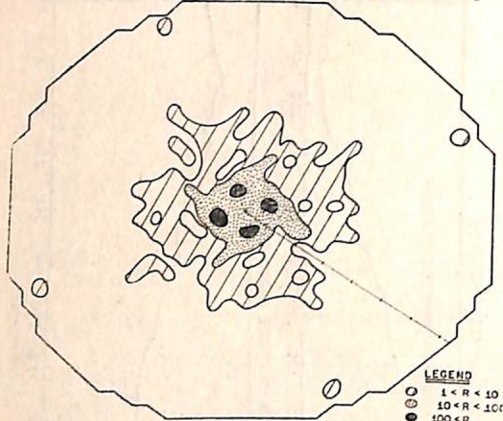


圖十 不對稱模式之實驗結果。
左圖：中心氣壓隨時間之變化。
右圖：最大界層風隨時間之變化。



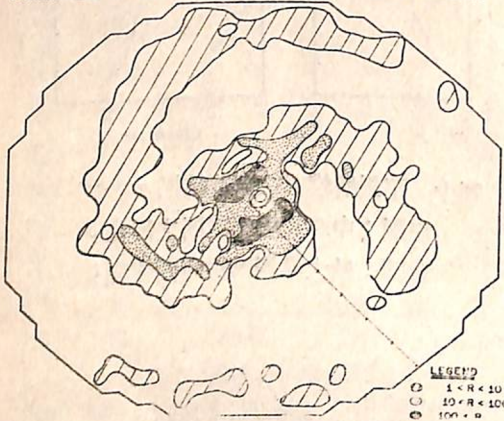
圖十一 不對稱模式之實驗結果。84小時對流層上部之氣流線模式。東南象限之半徑線之刻度乃以60公里為間隔。

RAINFALL RATES (CM/DAY) 84 HOURS



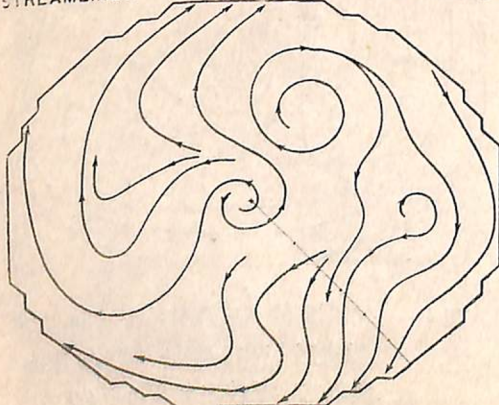
圖十二 不對稱模式之實驗結果。84小時之降水量（厘米/日）模式。

RAINFALL RATES (CM/DAY) 156 HOURS

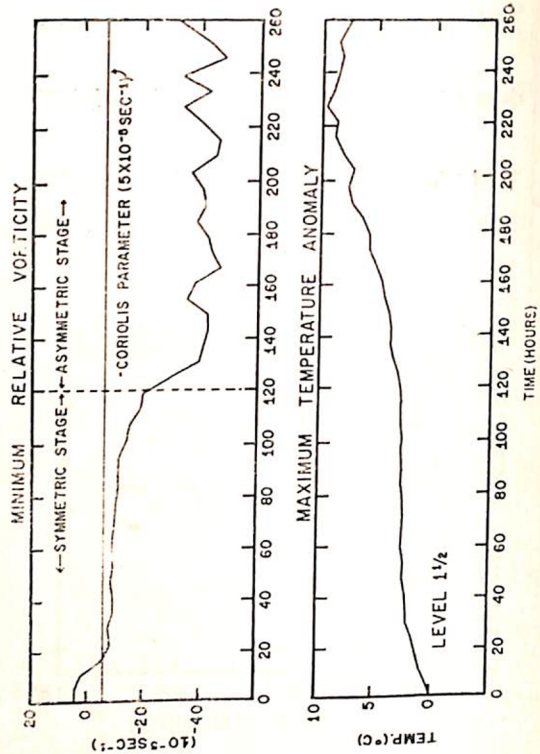


圖十三 不對稱模式之實驗結果。156小時之降水量（厘米/日）模式。

STREAMLINES LEVEL 1 1/2 156 HOURS



圖十四 不對稱模式之實驗結果。156小時對流層上部之氣流線模式。

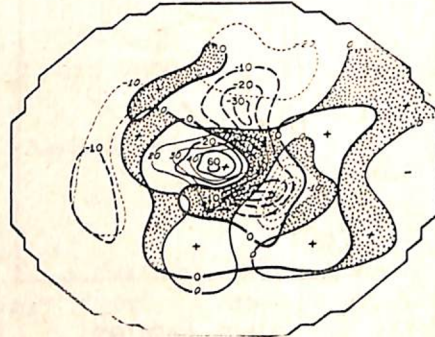


圖十五 不對稱模式之實驗結果。

左圖：對流層上部最小相對渦旋隨時間之變化。

右圖：對流層上部最大溫度反常隨時間之變化。

..... $\frac{2|V|}{R} (10^{-6} \text{ sec}^{-1})$ == RELATIVE VORTICITY (10^{-6} sec^{-1})



圖十六 不對稱模式之實驗結果。156小時之對流層上部。粗實線與（粗虛線）表相對渦旋，細實線與細虛線表 $2|V|/R$ 。有點區域表水平質點位移之動力不穩定能滿足標準之區域。（下轉33頁）