



初生階段與發展階段颶風 中之動力不安定

陳良曜節譯

*On the occurrence of Dynamic instability
in incipient and Developing Hurricanes*

摘 要

美國國立颶風研究計劃使用特殊儀器裝備之飛機以探測颶風。根據此等飛機所得觀測資料，發現颶風黛茜 (hurricane Daisy) 在形成後不久，其上空有動力不安定現象。此種動力不安定乃以異常風 (anomalous winds) 之形態見於對流上層。由推論可知，此項異常風 (代表空間之反氣旋旋轉) 觸發「黛茜」之發展。

因測得之動力不安定乃發生於中度範圍下 (mesoscale) 故無法由天氣圖直接證實。僅就利於發展異常風之天氣圖情況加以討論，發現在颶風「黛茜」與「格萊絲」(Gracie) 到達颶風強度前不久，其對流上層均有異常風存在。

負絕對旋率 (Negative absolute vorticity) 之作用則不一定。在有異常風出現時，負絕對旋率為一安定因子。但在正常風時則為一不安定因子，且由若干佐證可知某些颶風可能由負絕對旋率所發動。

1. 引 言

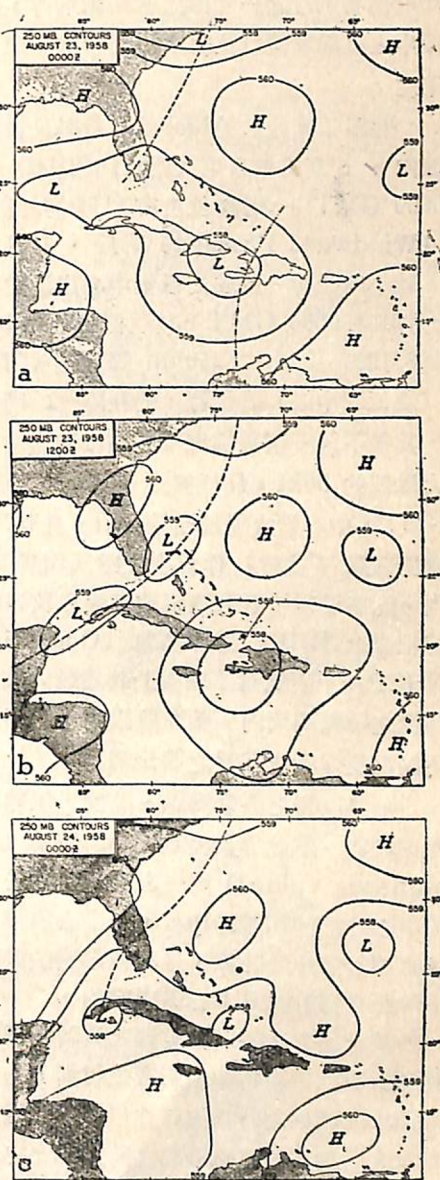
颶風為熱力推動之環流，其主要能源為凝結之潛熱。欲獲得此項熱源，颶風中心之空氣必有組織地上升，且無可置疑的是，大部份的上升空氣必來自近地面層，因只有低層空氣方含有足量之熱量與水汽，產生颶風中所需之密度變化。

加之颶風乃為一能量輸出系統。颶風所生之動能乃為其釋出熱能之大小部份，而欲維持其環流，則有賴於除去此項過剩之熱能。Palm'en 與 Riehl 二氏 (1957) 曾指出颶風環流內並無足多大之冷源以吸收此項過剩熱能。故熱量之除去必賴空氣外流至周圍大氣而完成之。

基於上述理由，可知使颶風發生與生存之主要諸條件之一乃為一種機械運動，使空氣有組織地自地面向上而在風暴頂部排除。吾人雖已承認必須有如此之機械運動，然其確實之性質，迄今尚無觀測佐證之確切陳述。

本文之目的在提供觀測之佐證以支持一項假說，

即上述之機構乃為一種動力不安定。在適宜之情況下，此種動不安定發生於業已存在之東風擾動上空，且使該擾動增強而為颶風。此項觀念當然並不新穎。例如 Sawyer (1947) 及 Kleinschmidt (1951) 二氏均用以解釋颶風之生成。但二氏認為僅當發生負絕對旋率時方有動力不安定釋出。但作者則認為動力不安定則以異常風之形式出現，而異常風則代表空間之反氣旋旋轉。現有之觀測佐證支持此說，陳述如下。



圖一：250mb圖：(a) 1958年8月23日 0000GMT，圖中點劃線示海面東風波位置，此波後來發展為颶風黛茜。(b) 1958年8月23日 1200GMT。黑點示海面低壓中心之位置。(c) 1958年8月24日 0000GMT。黑點示熱帶擾動之海面位置，此擾動在次日到達颶風強度。

2. 天氣圖歷史及觀測資料來源

在過去數年內，國立颶風研究計劃 (National Hurricane Research Project 以下簡稱 NHRP) 使用裝有特殊儀器之飛機，在颶風中心及附近作詳細之探測，對於研究颶風已提供有價值之新資料。

颶風「黛茜」內部及周圍之探測飛行，實為最成功的任務飛行之一。由此探測飛行，獲得一明顯而集中之颶風環流以及清晰雷達影像，使風暴中心易於確定。

颶風「黛茜」於1958年8月24日發展於一個東風波內，該東風波自東大西洋向西移動，在8月23日0000 GMT，此波位於古巴與海地間之向風航路 (Windward Passage) 附近，且具有平均之波幅。12小時後有一微弱之低壓中心出現於海地之北方。8月24日0000 GMT，其最低氣壓約1010mb。圖一為8月23日及24日之250mb等壓圖並附繪地面東風波 (或低壓中心) 之位置，約在圖一c時強度迅速增大，其後不久一架美國海軍偵察機確定出颶風眼，其最大風速約50kt，最低氣壓1002mb。至8月25日1200 GMT，中心最大風速已達70kt。此時NHRP乃派飛機對颶風「黛茜」作首次之穿入探測。在此後數日內，此颶風頗接近佛羅里達海岸以及該時設於佛州西棕櫚灘之NHRP工作基地 (Operation Base of NHRP)。因此當「黛茜」到達最大強度及已過最大強度之連續四天內，能在颶風中心內部及中心附近之不同高度作數次冗長之探測飛行。

飛機所測之要素為風、溫度、無線電高度，及氣壓高度等。將此等參變數之準瞬時值 (quasi-instantaneous values) 按一定間隔打洞於卡片上，在颶風中心外打洞間隔為10秒，在中心內為2秒。然後此項打洞卡用機器計算，且將各參變數填繪於坐標系統上，此坐標對颶風中心係固定的。

按上述方式選取而處理之資料實屬可觀而詳細。此項資料已供應為數項研究之材料，一篇關於颶風「黛茜」之結構之詳盡敘述亦以此為依據。此項資料亦為本文討論颶風形成之動力不安定之主要依據。

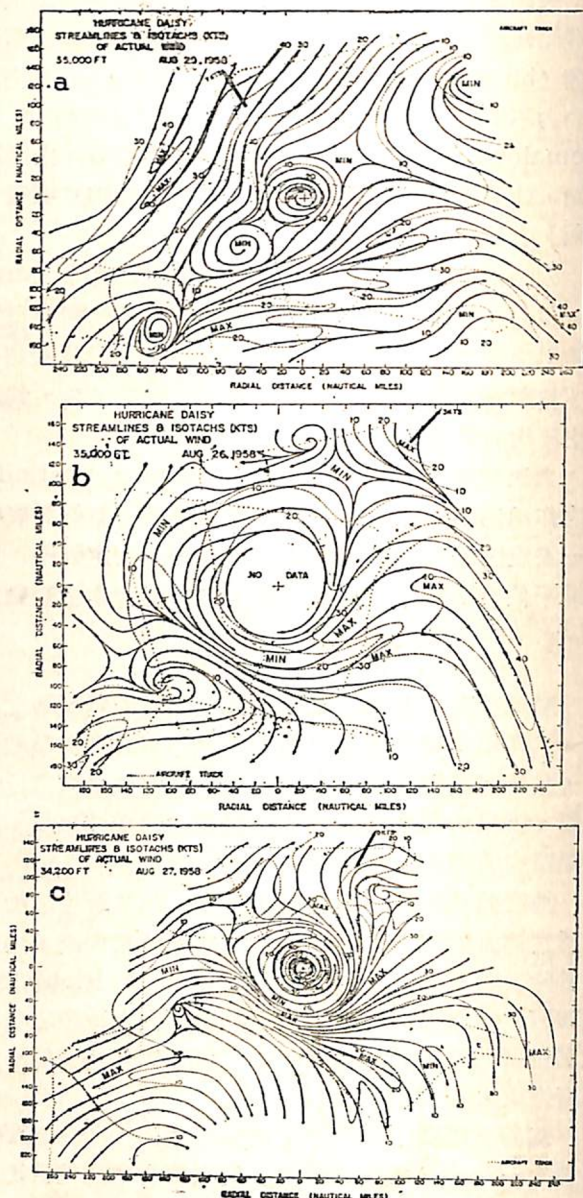
3. 發生動力不安定之觀測佐證

欲決定在初生及發展之颶風上空發生動力不安定，必須確定伴隨此項不安定之情況。根據過去若干氣象家之研究指出，釋出動力不安定之標準約為：

$$\zeta_a \left(\frac{2V}{R_t} + f \right) < 0 \dots\dots\dots (1)$$

式中 ζ_a 為絕對旋率， V 為風速， R_t 為流徑之曲率半徑， f 為柯氏參變數。此項標準乃用以在颶風「黛茜」內決定動力不安定之發生。

分析上節所述之飛機觀測報告，乃得1958年8月25、26及27三日在颶風「黛茜」上空上部對流層之風場如圖二之 a-b。根據此項分析，將風向風速值填於垂直方格坐標上，各點間隔為20哩，然後用 IBM650 電腦計算旋率及 $2V/R_t$ 。 $2V/R_t$ 之值乃按下列關係



圖二：颶風黛茜周圍之風場。(a) 1958年8月25日高度35,000呎，(b) 1958年8月26日，高度35,000呎。(c) 1958年8月27日，高度34,200呎。(高度為美國標準大氣氣壓高度)

推得。

如 u 及 v 分別代表風之西分速與南分速，且如吾人界定

$$\psi = \tan^{-1} \frac{U}{V} \dots\dots\dots (2)$$

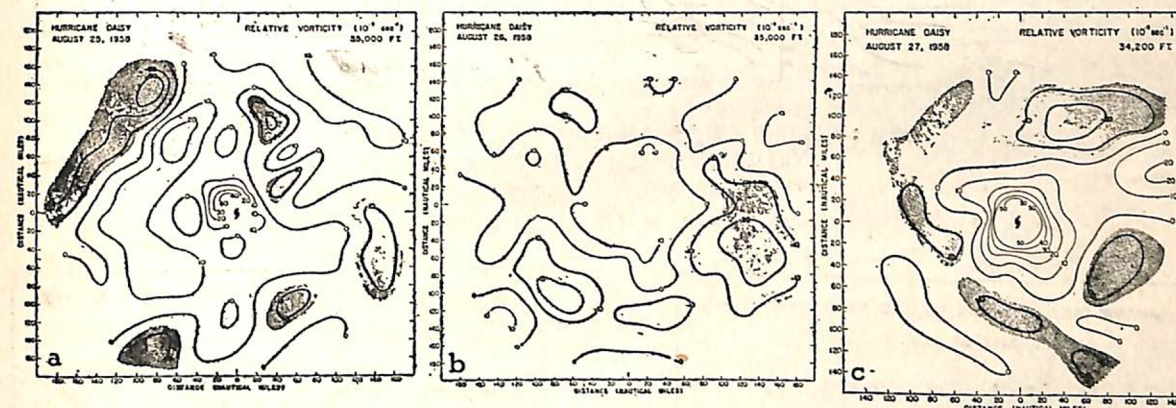
則

$$\frac{1}{R} = -\frac{d\psi}{ds} = \cos^2 \psi \left(\frac{U}{V^2} \frac{dv}{ds} - \frac{1}{v} \frac{du}{ds} \right) = \frac{1}{V^2} \left(u \frac{dv}{dt} - v \frac{du}{dt} \right) \dots\dots\dots (3)$$

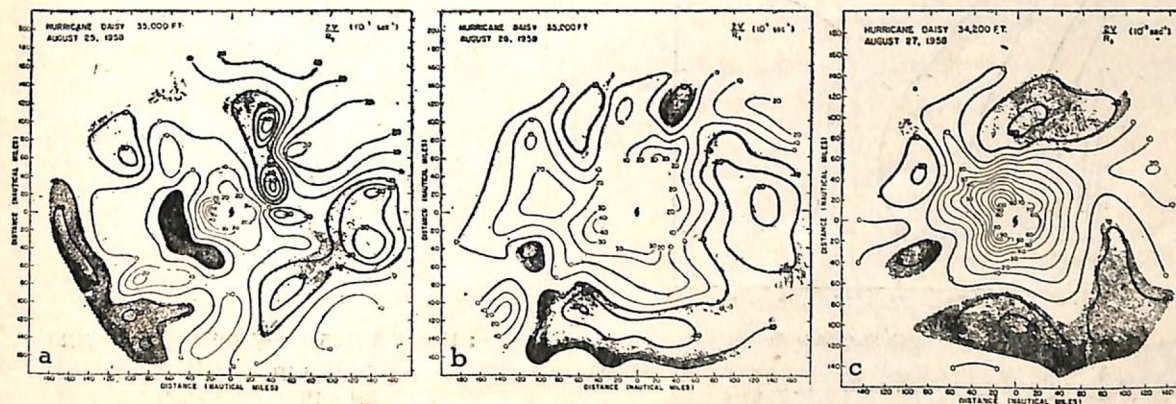
如颶風之移動以向量 C 表之，其向東與向北之分量分別為 C_x 與 C_y ，且如吾人假定係在穩定狀態 (steady state condition)，則

$$\frac{2V}{R_t} = \frac{2}{V^2} \left\{ u \left[(u - C_x) \frac{\partial v}{\partial x} + (v - C_y) \frac{\partial v}{\partial y} \right] - v \left[(u - C_x) \frac{\partial u}{\partial x} + (v - C_y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right\}$$

圖三a-c 代表旋率場，陰影區為負絕對旋率區。圖四 a-c 表示相當之 $2V/R_t$ 值；陰影區表示反氣旋



圖三：相當於圖二風場之相對旋率場。陰影指示負絕對旋率。



圖四：相當於圖二風場之 $2V/R_t$ 數值場，陰影示異常風地區。

風區，且其風速大於 $fR_t/2$ 。此項風代表空間之反氣旋轉動，即與地球轉動方向相反，故名之曰反常風 (anomalous wind)；其發生性質及意義作者最近在另文內曾予討論。

圖三及四指出，在颶風「黛茜」上空之上對流層內，異常風及負絕對旋率常重疊出現，而據不等式(1)可知動力不安定發生於此等重疊地區之外緣，如圖五a-c中之陰影區所示。

不安定區之最值得注意者乃為其與颶風之外流相伴隨。在25日颶風之左前象限與右後象限均有此二者之伴隨發生，而在此二地區均有一最大風速同時存在。(圖二a)

在26日 (圖五b) 之外流更有組織，且主要發生於一流路上，此流路與一狹窄之不安定地帶至為吻合。該不安定地帶自颶風西南之反氣旋旋渦伸出，延伸於中心以南，然後隨氣流線以反氣旋型彎至北、東及東南。在此區內，圖二b顯示一似激流之形態，與不安定形式至為吻合。

由此可知颶風「黛茜」在上對流層之外流乃與動

力不安定密切相關，而動力不安定又與颱風周圍之反氣旋渦流相關。此項颱風之上對流層外流與反氣旋渦流之關聯會為 Simpson 氏 (1954) 在研究颱風「道萊」(Dolly) 中所指出。

4. 異常風在觸發颱風中之作用

尚待提出之問題乃為在颱風發展前發生之動力不安定為颱風發展之產物。此一問題如欲有一明白答案則需在熱帶擾動轉變為颱風之前以及轉變之當時均需有詳細之觀測報告。吾人無法獲得此種觀測，故只能由資料之間接證據以求結論。

吾人由圖五 a 可知在 8 月 25 日，動力不安定差不多全由異常風所生，而在 8 月 27 日 (圖五 c) 則動力不安定約半由異常風所生，半由負絕對旋率所生，圖六與七為颱風周圍之 ζ 及 $2V/R_t$ 之平均值剖面，由此二圖更可清楚看出在 25 日動力不安定差不多全由異常風所生。平均作用使負絕對旋率之出現完全不顯，但不能掩蔽異常風。

25 日至 27 日間，在產生動力不安定上，負絕對旋率之作用之增加乃由於在該期間為負絕對旋率所涵蓋地區增大所致 (圖三)。而在圖四中異常風所佔地區則不見增大。圖八與九為上對流層中之 ζ 及 $2V/R_t$ 之

平均徑距剖面 (mean radial profile)。在 25 日旋率剖面之全部均在零線以上，而在 27 日則旋率剖面大部份居零線之下。相反地， $2V/R_t$ 之剖面曲線在零線以下部份在 25 日與 27 日大致相同。唯一不同的是在 27 日在零線以下之曲線更遠離中心，反映中心氣旋型渦流在水平方向之擴大。

如在時間上向過去反推，吾人或可推論：異常風乃先於負絕對旋率發生，且在熱帶擾動轉變為颱風時出現，此時約在第一次飛機偵察前 24 小時。此項異

常風所釋出之不安定為觸發迅速轉變所必需之動力作用。

上述結論為初生颱風上空上對流層之天氣圖形勢所支持。此處應指出者，吾人乃論及二種大小範圍不同之運動。圖三與四負絕對旋率與異常風二者均為中度範圍之數值，發生於一或二緯度寬之狹窄地帶，在通常之測報網無法測得。因之藉通常天氣圖之直接計算不能產生肯定之結論，尤其在缺乏稠密測報網處。在缺乏稠密之測報網與詳細之飛機偵測下，吾人最多只能在熱帶擾動將轉變為颱風之緊要時間，決定天氣圖情勢是否宜於異常風之發生。

作者最近在另一文章內曾對導致發展異常風之情況加以探究，且曾建議當一反氣旋中之氣壓梯度力增大至與最大梯度風 (以 $-fR_t/4$ 表之) 甚為接近時，則將發生上述情況。

圖一之連續高空圖中強烈顯示僅當地面擾動上空變為宜於發展異常風時，熱帶擾動始加強而成颱風。圖一 a 及 b 指出此擾動居上空氣旋環流下，顯然該處不發生異常風。而在圖一 c 中，相當於最迅速增強之時間，則顯示初生颱風居高空高壓之邊緣。當然此種情況為發展異常風之必須條件，但非充分條件，因如上述尚需反氣旋流徑曲率甚接近最大氣壓梯度。繪製每隔 12 小時之連續高空氣流圖自 23 日 (0000 GMT 至 24 日 1200 GMT) 可大略估計流徑曲率。吾人以

$$K_t = k_s + \frac{1}{V} \frac{\partial \psi}{\partial t} \dots \dots \dots (5)$$

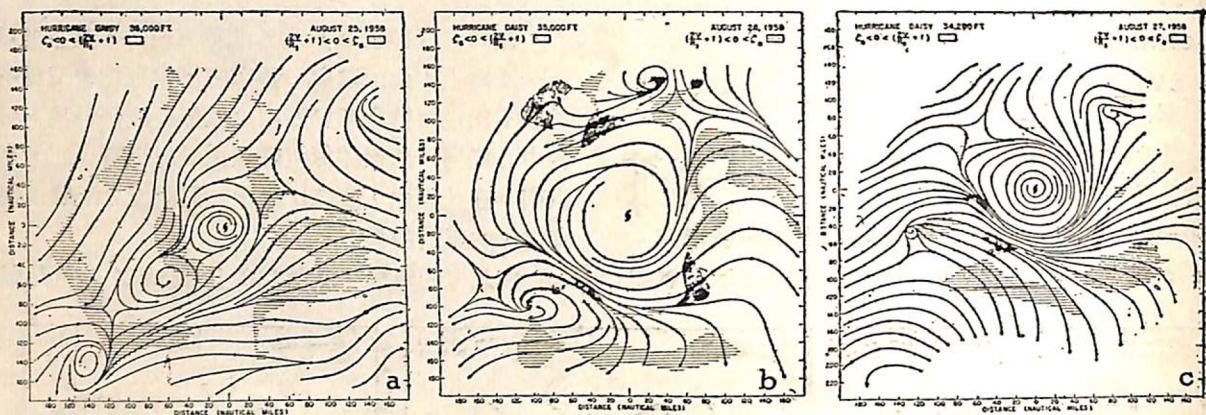
式中 k_s 為氣流線曲率， $\partial \psi / \partial t$ 為風向隨時間之當地轉向，以反氣旋轉向為正。

8 月 24 日 0000 GMT，在海面擾動上空垂直於氣流線之等高線梯度估計約為 5.5 呎/1 緯度。在緯度 25° 處相當於此梯度之最大反氣旋流徑曲率 ($K_{t \max}$) 為 $-0.7 \times 10^{-8} \text{ Cm}^{-1}$ 。自氣流線圖量得此點之 k 為 $-0.3 \times 10^{-8} \text{ Cm}^{-1}$ 。如欲滿足發展異常風之條件，即如 $K_t = K_{t \max}$ ，則自方程 (5)

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \psi}{\partial t} = (-0.7 + 3.0) \times 10^{-8} = 2.3 \times 10^{-8} \text{ Cm}^{-1}$$

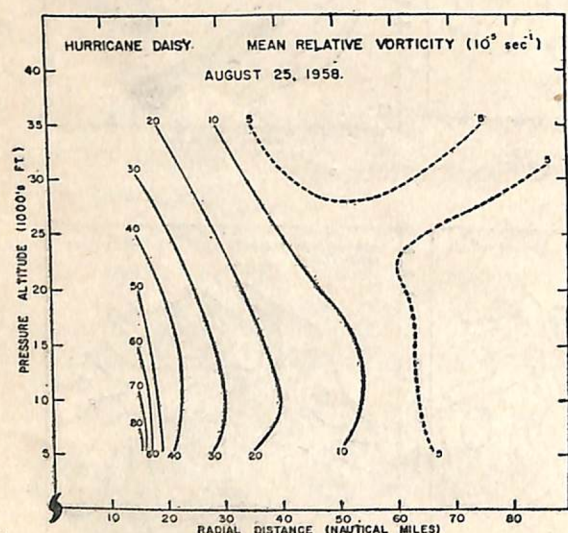
如 V 為 15 kt，則上述方程相當於 24 小時內風向逆轉 90° 按自氣流線圖計算，自 24 日 1200 GMT 至 25 日 1200 GMT，圖一 c 中所示之海面初生氣旋上空，24 小時之風向逆轉估計約為 100°。

此種強烈之等高線梯度與強大之反氣旋流徑曲率在上對流層之綜合出現，在 1959 年之「葛萊絲」颱風

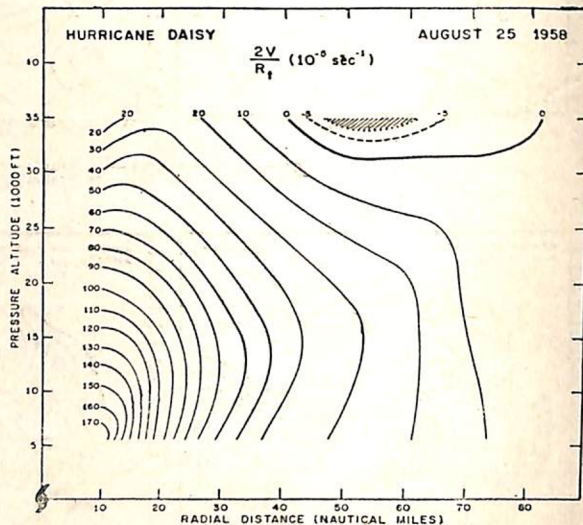


圖五：颱風黛茜周圍之氣流線。陰影示動力不安定地區。

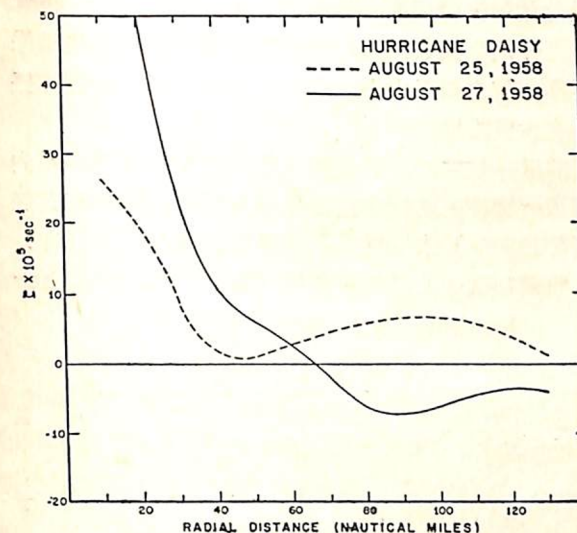
- (a) 1958 年 8 月 25 日，高度 35,000 呎
- (b) 1958 年 8 月 26 日，高度 35,000 呎
- (c) 1958 年 8 月 27 日，高度 34,200 呎



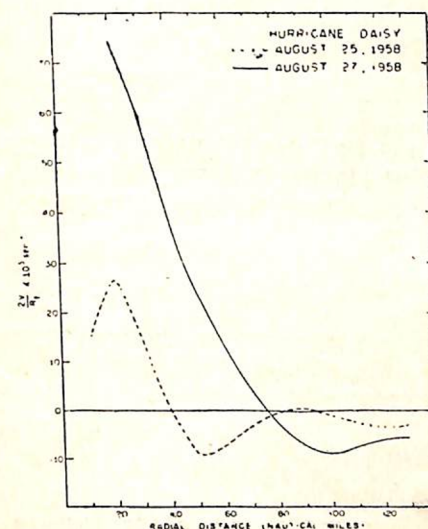
圖六：1958 年 8 月 25 日颱風黛茜周圍之平均相對旋率剖面，由 NHRP 之偵察飛機在 35,000 呎，15,600 呎及 5,500 呎高度測得。



圖七：1958 年 8 月 25 日颱風黛茜周圍之 $2V/R_t$ 平均值剖面圖，由 NHRP 之偵察飛機在 35,000 呎，15,600 呎及 5,500 呎高度測得。



圖八：1958 年 8 月 25 日及 27 日颱風黛茜周圍在 35,000 呎高度之相對旋率之平均徑距剖面。



圖九：1958 年 8 月 25 日及 27 日颱風黛茜周圍在 35,000 呎高度 $2V/R_t$ 之平均徑距剖面。

初生期上空再度證實。

5. 負絕對旋率對於颶風發展之作用

由圖三及圖四吾人可知即使在颶風發展之早期，異常風與負絕對旋率在若干地區重疊出現。此種有意義之情況值得加以評論。

傳統之氣象學家常認負絕對旋率為一非安定性因素，在正常情形下確屬如此。然如有異常風時，則其作用適相反，如不等式(1)所示，此時負絕對旋率成為一安定因子，在此新奇之情況下，其重要性不容低估，在無負絕對旋率時，圖四中所有之陰影地區均將為不安定的，鑒於在此諸地區將發生大量之側向空氣交換，故有組織之外流似不能維持。圖三中負絕對旋率之發展有助於不安定之集中，從而促進外流之組成。

負絕對旋率在颶風中之影響並不完全是安定的。如圖五所示，負絕對旋率發生於若干小地區內，該處颶風是正常的，此等地區是不安定的。加之有若干颶風，觸發其形成之最初不安定似應歸功於負絕對旋率而非由於異常風。1958年之颶風「珍妮絲」(Janice)即係如此。圖十為1958年10月6日 1200GMT 之等高圖並附等風速線，該圖為首次測得颶風前6小時之情況。此初生颶風之位置係直接居於激流心之暖側，該處吾人已知有負絕對旋率發生，在此例中，海面颶風位置上空之反氣旋風切估計為 $1.5 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1}$ ，加之氣流線(圖中未示)僅微呈氣旋型，故實際上必有負絕對旋率發生。由氣旋型氣流線及等高線形態觀之，該時該地似不致發生異常風。

因之「黛茜」與「葛萊絲」及「珍妮絲」實代表颶風之兩種類型。二類均為高空之動力不安定所觸發，但在「黛茜」與「葛萊絲」中，不安定為異常風之發展所開始，而在「珍妮絲」中不安定似為負絕對旋率所策動。

對上述二類颶風在結構與形式上之異同加以研究

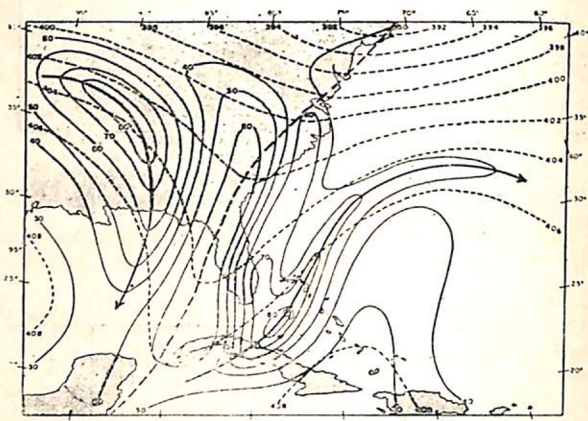
將是有趣之事。

6. 結 論

吾人試圖證明在觸發颶風之生成上，動力不安定為一主要因子。此項不安定之最初釋出至少部份有賴於在海面擾動上空有適當之高空氣流之偶然經過。此點說明颶風之所以相當罕見。在另一方面，颶風之生成乃與對流帶(convective bands)有密切之關聯，此項對流帶伴隨地面擾動而生，而動力不安定可能由於此種對流帶與高空氣流間之交互作用而生。但此項交互作用之確實性質以及此二因素在產生最後結果上所作貢獻之相對大小尚未明瞭，而為進一步研究提供一有希望之途徑。

颶風一旦成功地觸發後，動力不安定乃為颶風內部環流所維持。此種內在之作用說明何以颶風在其能源(凝結潛熱)未切斷前差不多能永遠存在。(完)

原載1962年2月美氣象局(Monthly Weather Review)



圖十：1958年10月6日1300GMT，200mb 之等風速線(實線)及等高線(斷線)。黑點為首次測得颶風前6小時珍妮絲之海面位置。

更 正

本刊上(十二)期因校對及重製圖倉促稍有錯誤，特更正如下：

- (1)第17頁第16字泰洛斯之「泰」字應更正為「愛」字。(原文 Aeros)
- (2)第30頁“圖九”五十一年八月歐珀(Opal)颶風侵臺期間各地逐時氣壓及風向風速圖所標之氣壓數字上行(996.0)應更正(960.0mb)下行(993.25mb)應更正為(93.25mb)