

雙熱帶氣旋的氣流場分析與路徑預報

何台華

中正理工學院
應用物理學系

Gandikota V. Rao

美國聖路易大學
地球及大氣科學系

(中華民國七十九年七月二十五日收稿；七十九年十一月九日定稿)

摘 要

在印度季風開始之前或衰竭之際，印度洋上有時可見成對的熱帶氣旋出現，其中一個位於赤道北邊，另一個則在赤道南邊，這些氣旋對的移動並不完全受導引氣流的主宰，而是需要考慮它們彼此間流體動力的牽引作用。民國68年(西元1979年)5月6日至12日有一雙熱帶氣旋發生在印度洋，而且以赤道分隔。本文利用Lamb(1972)所描述的方法計算此氣旋對的藤原參數再加上駛流的考慮，最後預測它們未來的位置。結果顯示此對氣旋具有藤原效應式的移行，而且24小時的預測可信度高，與實際觀測位置相差150公里，但18小時以上的計算和當氣旋接近陸地時則不盡理想。

關鍵詞：雙熱帶氣旋，藤原效應，駛流

一、前 言

在廣大的熱帶海洋上，吾人經常可以從氣象衛星雲圖中看見兩個以上的熱帶氣旋同時出現，其中不乏風力強度達颱風的水準($> 17 \text{ ms}^{-1}$)，它們的移動不但受大氣駛流的牽制，也會因彼此的交互作用而影響行徑。George與Gray(1976)利用風場合成分析(The composite analysis of winds)研究西北太平洋颱風移動與環境風場的關係，發現500 hPa的環境駛流(與颱風中心相距 $1^\circ \sim 7^\circ$ 緯度半徑的平均風)是影響颱風運動的最重要指標，而700hPa的風場則與颱風行進的速度十分相關。Gray(1977)對西大西洋熱帶氣旋的合成分析亦有類似的結果。至於雙熱帶氣旋(Binary tropical cyclones)之間交互作用的研究則始自Fujiwhara(1923)。他從地球流體動力學的觀

點以實驗來探討相鄰二渦旋的交互作用情形，發現：若雙渦旋相隔不遠，而且駛流不強，則彼此以系統質心做氣旋式的繞行，而且此二渦旋中心的距離會逐漸拉近，出現互相吸引的效應，此即為有名的藤原效應(Fujiwhara effect)。圖1是1988年8月30日發生在太平洋上的雙熱帶氣旋，左邊是Fabian颱風，右邊是Elsie熱帶低壓，從8月29日至31日之間此二氣旋相對於中點的位置可以清楚的看出逆時針方向的相互繞行與吸引(如圖2)，這是藤原效應的一個實例。

Haurwitz(1951)假設雙熱帶氣旋屬於阮肯渦旋(Rankine vortices)並利用壓力分佈來計算此氣旋對的旋轉速率，發現預測的旋轉速率準確度與壓力分佈有很深的關聯。Khandekar與Rao(1971)以兩層渦旋模式研究熱帶氣旋的位移，證明雙氣旋系統的確

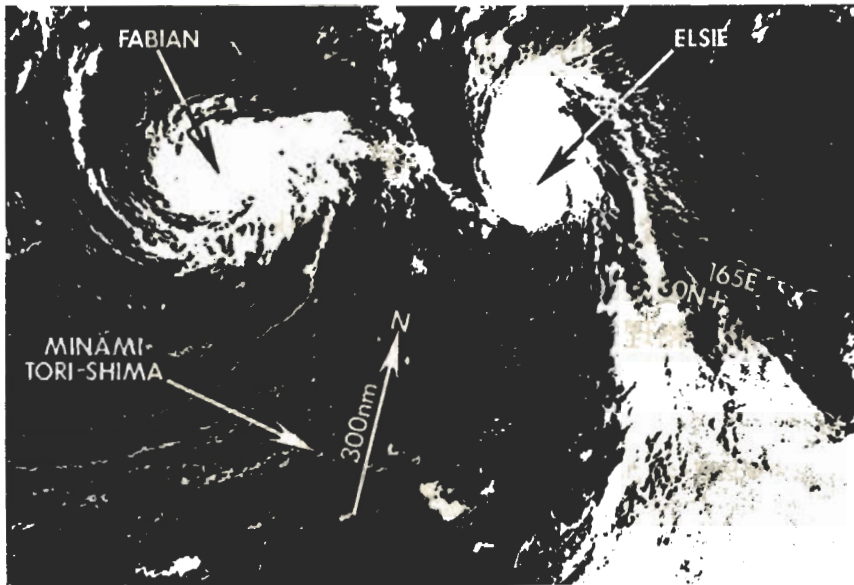


圖1 1988年8月30日2240 UTC 美國DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 氣象衛星以可見光拍攝的北太平洋雙熱帶氣旋，左邊是Fabian 颱風，右邊是 Elsie 熱氣低壓。

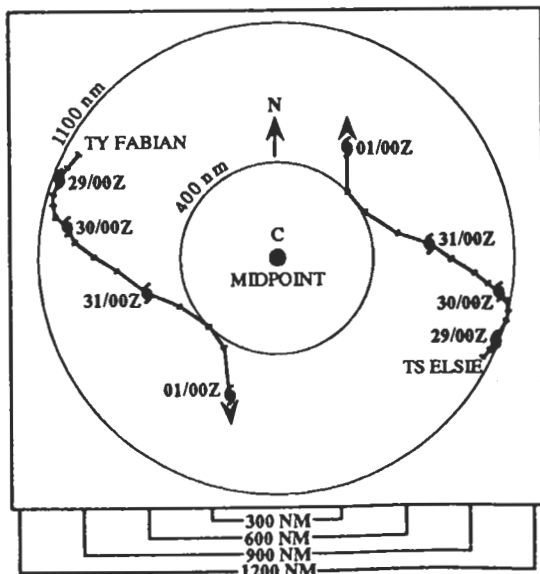


圖2 說明圖1 熱帶雙氣旋Fabian 和Elsie 相對於中點C 的運動情形，時間自1988年8月28日12 UTC 至9月1日00 UTC (JTWC, 1989)。

有逆時針方向的相互旋轉，而且也會受到其他鄰近氣旋的影響。Brand (1970) 的研究結果則顯示：在西北太平洋上，若雙氣旋相距750 海哩 (~1340 公里) 以內，互旋運動相當突出；而相距在400 海哩 (~740 公里) 以內，則出現輕微的吸引力。根據 Jarrel 等(1978) 的研究證明：在太平洋地區當熱帶氣旋對出現時的路徑預報誤差有明顯的增加。一般來說，西北太平洋出現的雙熱帶氣旋要比北大西洋多，西元1946 至1981 的36 年內，大約是1.5 與0.33 之比，這可歸因於此二區域的間熱帶輻合區(ITCZ) 具有不同的特性使然。劉廣英等(1982) 曾就1968-1981 年間存在西太平洋及南海中的136 對雙颱風分析其交互作用，發現駛流場對雙颱風的相對運動有決定性的影響，而藤原效應則不盡配合。

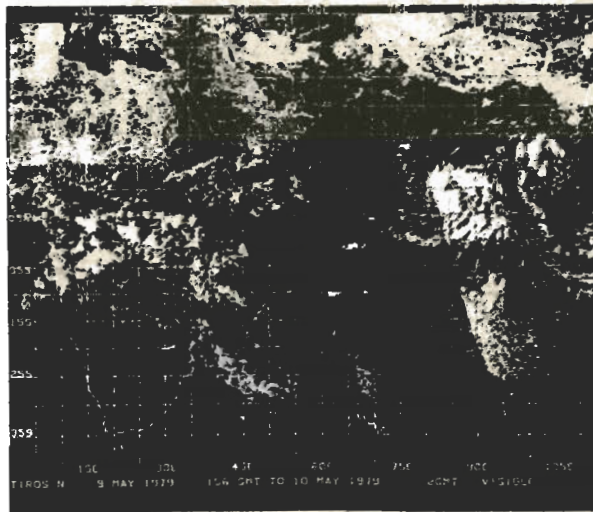
雙熱帶氣旋發生在同一半球的廣大洋面上十分頻繁，但同時出現在以赤道為界的洋面上則屬少見。本文是以1979年5月6日至12日發生在印度洋上、以赤道分隔的雙熱帶氣旋為研究對象，先從氣流線的分析來決定雙氣旋的中心位置和探討其運動方

式，再以藤原偏轉和駛流大小所產生的合力預測未來24小時的可能位置，以評估此種合成效應的可靠性。

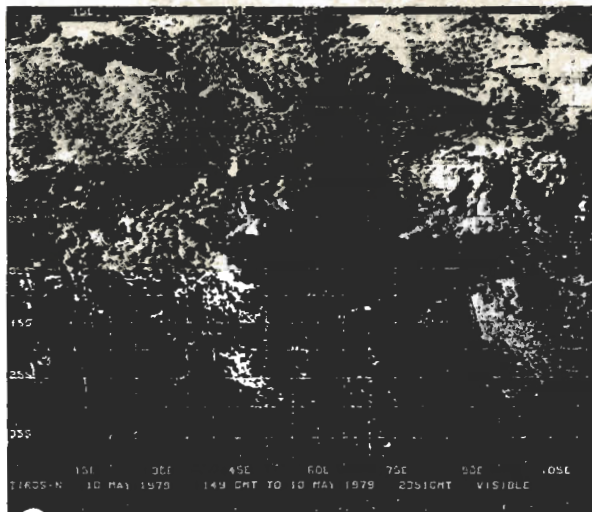
二、資料來源與分析方法

西元1979年5月6日至12日在孟加拉灣南邊的廣大印度洋上出現一對熱帶氣旋，彼此以赤道

為界，在5月9日當天，南氣旋位於(10° S, 90° E)附近，北氣旋則在(9° N, 87° E)附近，如圖3(a)的TIROS-N (Television and Infrared Observing Satellite) 氣象衛星雲圖所示，詳細的雙氣旋位置可從下一節的氣流場分析得知。各層風場的資料來自FGGE (First GARP Global Experiment) 和MONEX (Monsoon Experiment) 兩個國際性大型實驗計畫期間密集而多樣化的偵測，包含飛機實測資料(In-situ data)、

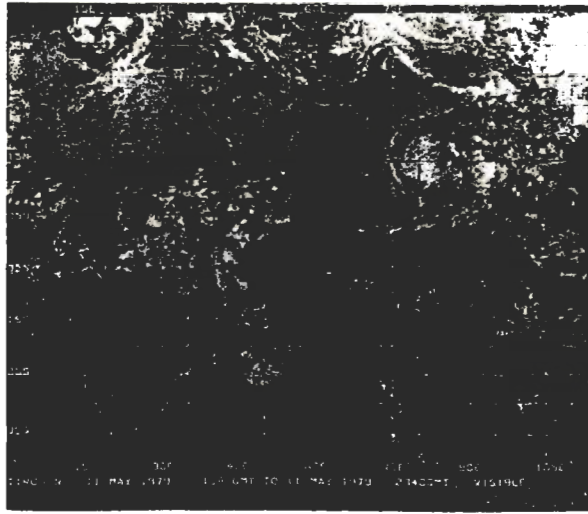


(a)

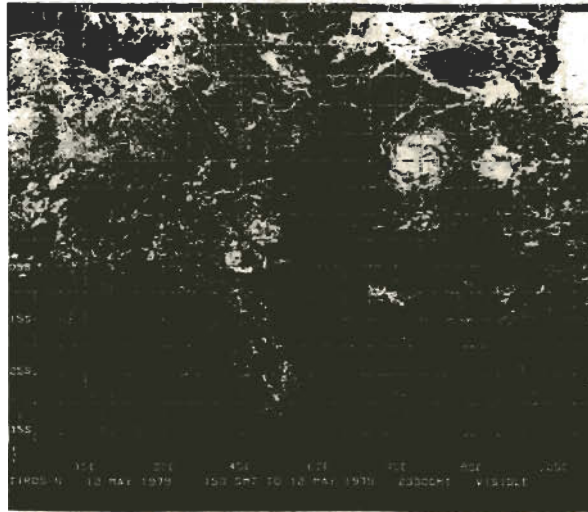


(b)

圖3 (圖說見下頁)



(c)



(d)

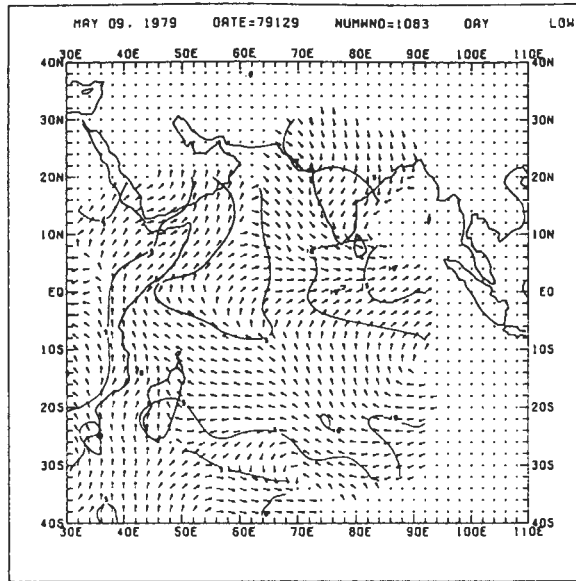
圖3 (a)~(d)：1979年5月9日至12日TIROS-N軌道氣象衛星所拍攝的可見光合成雲圖。雙熱帶氣旋發生在 $15^{\circ}\text{S} \sim 15^{\circ}\text{N}$ 和 $75^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ 的區域內。

投落送(Dropwindsonde)資料、汽球和船舶高空定層偵察資料、同步和軌道氣象衛星雲圖推算的風場資料以及世界氣象守視(World Weather Watch)的雷文送(Rawinsonde)加強觀測資料。資料的分析是根據Bergthorsson與Doos(1955)和Cressman(1959)的連

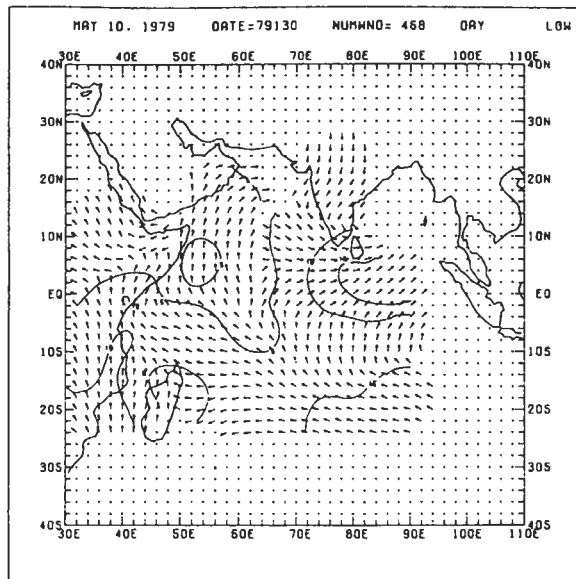
續訂正法，而各種不同資料的整合，如衛星資料、船舶資料、飛機資料和世界氣象守視網的觀測資料是經由Tripoli與Krishnamurti(1975)的分析法組織而成，詳細的分析步驟可參考Krishnamurti等(1980)的研究報告。圖4顯示1979年5月9日至12日

僅以GOES-I (Geostationary Operational Environment Satellite-Indian Ocean) 同步氣象衛星雲圖所推導出的低層(1000 hPa ~ 700 hPa) 和高層(300 hPa ~ 100 hPa) 風場分佈，網格距離 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。從圖4(a) 到4(d)

可以清楚的說明低層的西南季風(Southwest monsoon)，即索馬利噴流(Somali jet) 甚強，從東非洲海岸延伸到印度，即使在東印度洋地區這種跨越赤道的西南氣流亦明顯可見。索馬利噴流西北方沒有畫出風

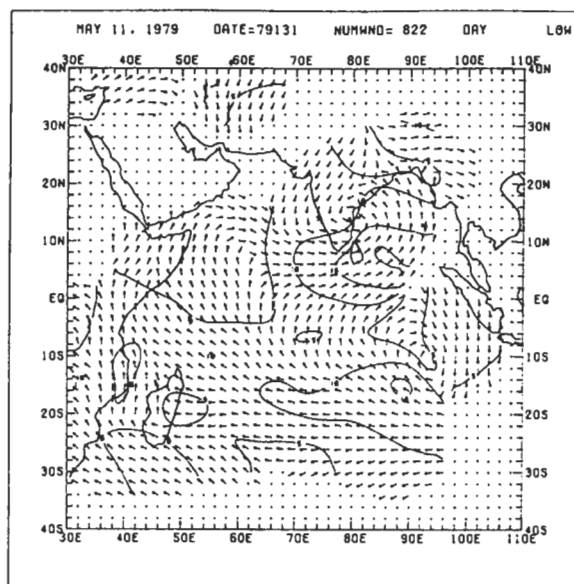


(a)

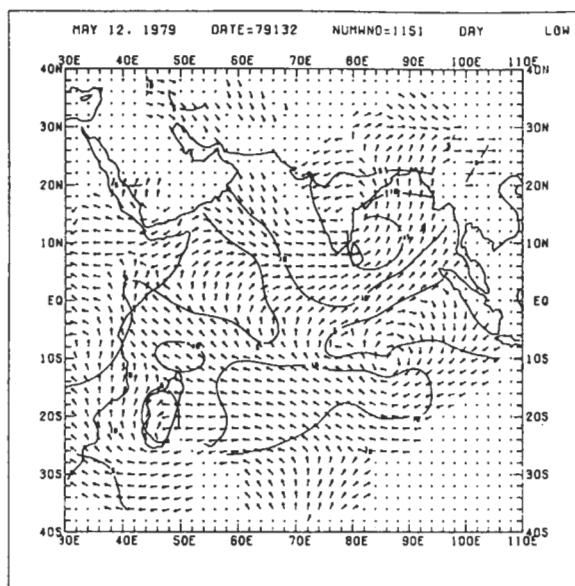


(b)

圖4 (圖說見下頁)

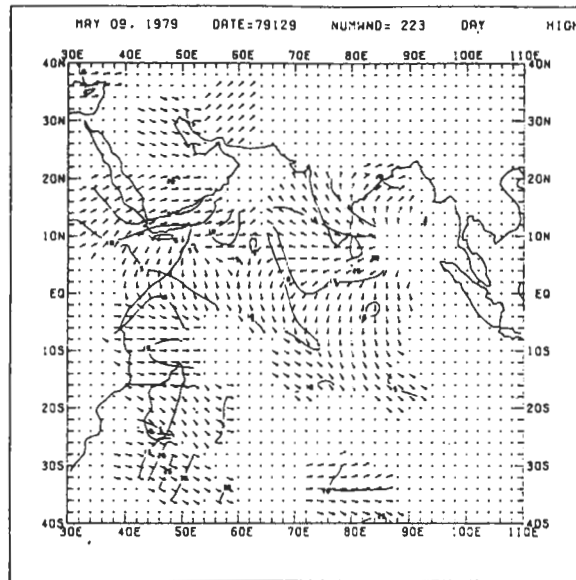


(c)

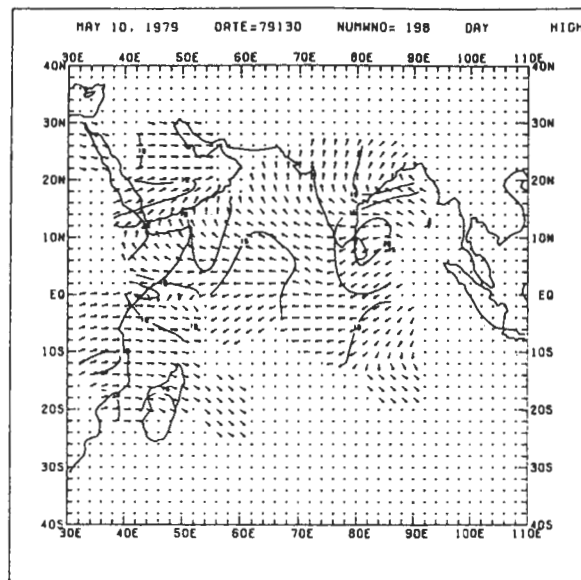


(d)

圖4 (a)~(d)：1979年5月9日至12日0830 UTC以GOES-I同步氣象衛星雲圖推算出的低層風場(1000 hPa~700 hPa)。

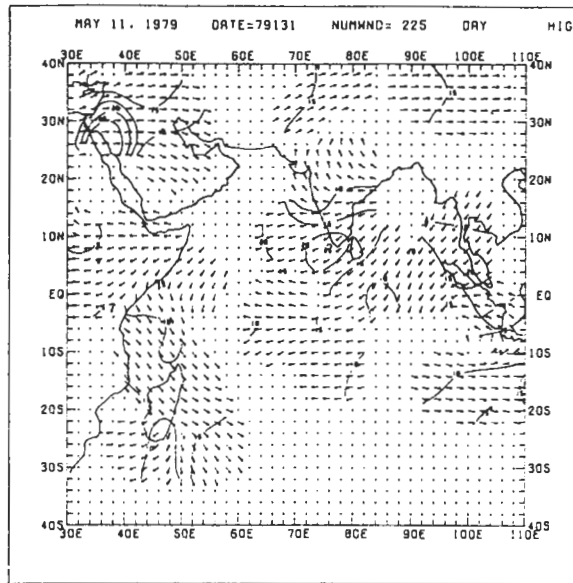


(e)

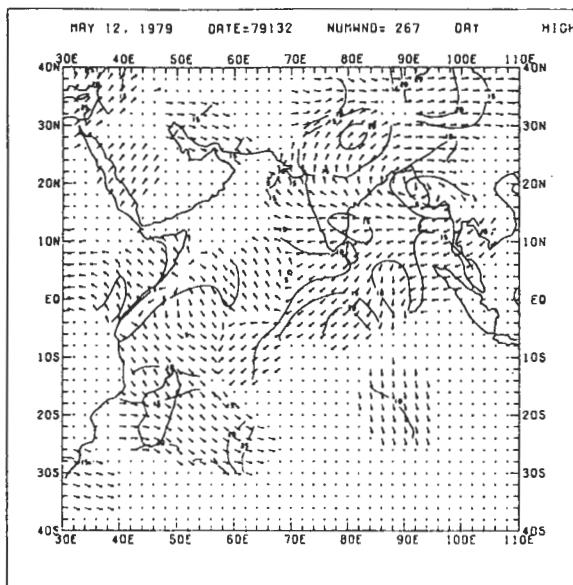


(f)

圖4 (圖說見下頁)



(g)



(h)

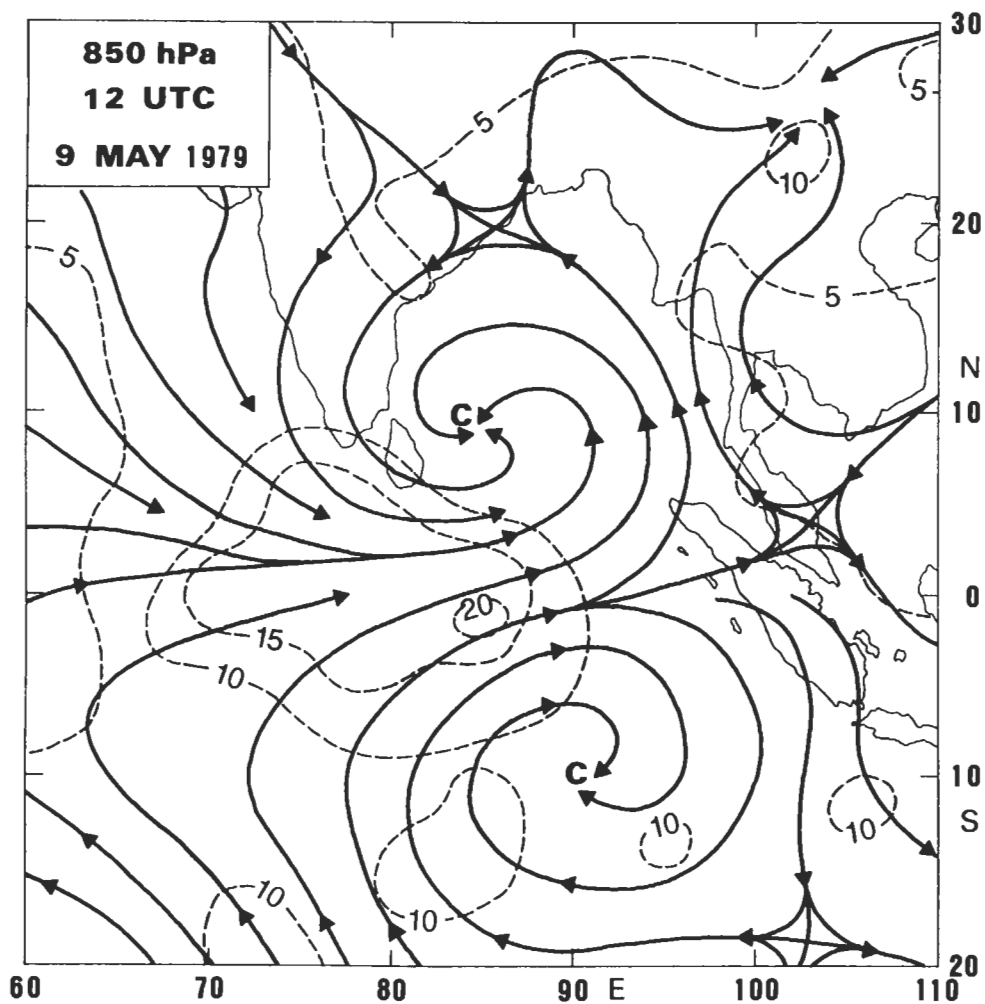
圖4 (e)~(h) : 1979年5月9日至12日0830 UTC以GOES-1同步氣象衛星雲圖推算出的高層風場(300 hPa~100 hPa, 風速單位 ms^{-1})。(Young et al, 1980)

場的資料，是因為靠近沙烏地的乾燥地區，沒有明顯的對流雲出現。在圖4(c)和4(d)中清晰可見南北對峙的雙熱帶氣旋，此時北氣旋已入侵印度半島，然後逐漸減弱，中心附近風力平均可達 20 ms^{-1} 以上，已屬颱風強度。南氣旋則勢力較弱，平均風力 10 ms^{-1} 。比較圖1(e)~1(h)的高空風場，印度半島的北部熱帶東風噴流盛行，孟加拉灣上空有明顯的反氣旋式輻散氣流，高層南氣旋所在位置則因為對流不夠旺盛，缺少卷雲追蹤參數而使得資料不全，無法描繪出另一反氣旋流場。不過這個缺點可用本

節一開始所描述的海陸空三度空間的密集觀測資料獲得甚多的改進。

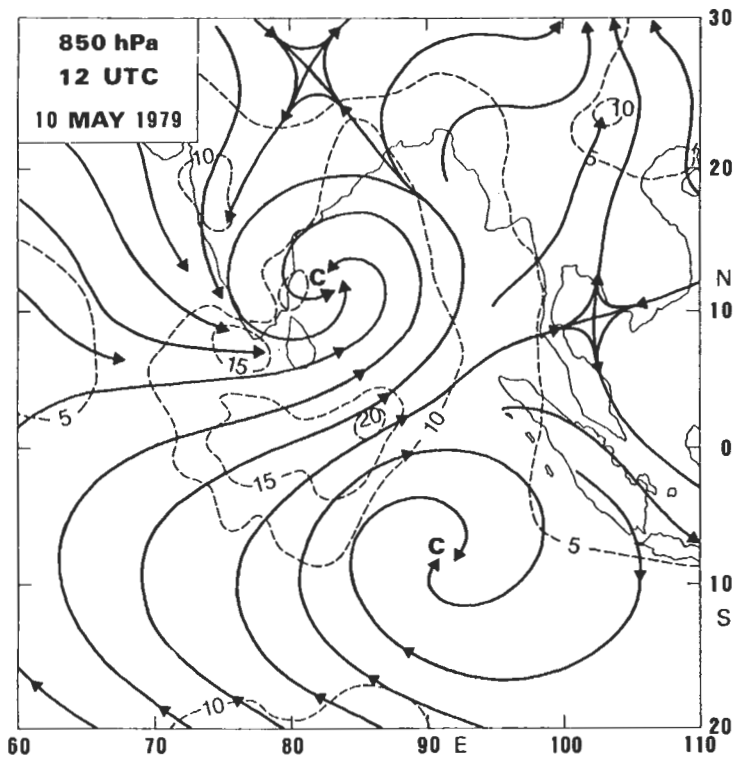
三、合成的 850 hPa 和 200 hPa 氣流場分析

根據以上客觀分析組合而成的風場資料，不難繪出1979年5月9日至12日850 hPa 流線圖和等風速圖(如圖5)以及5月8日和10日200 hPa 流線圖和等

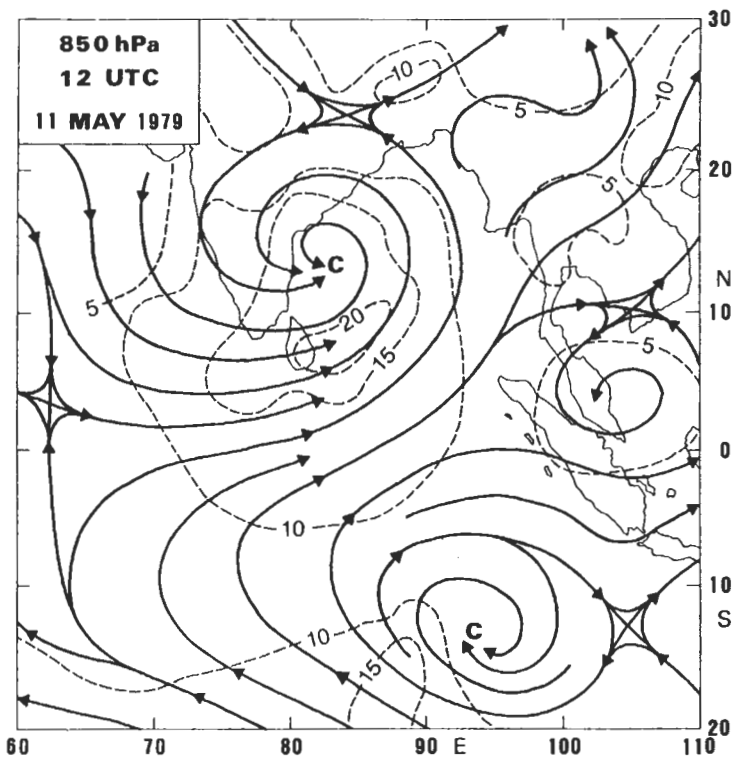


(a)

圖5 (圖說見下頁)



(b)



(c)

圖5 (圖說見下頁)

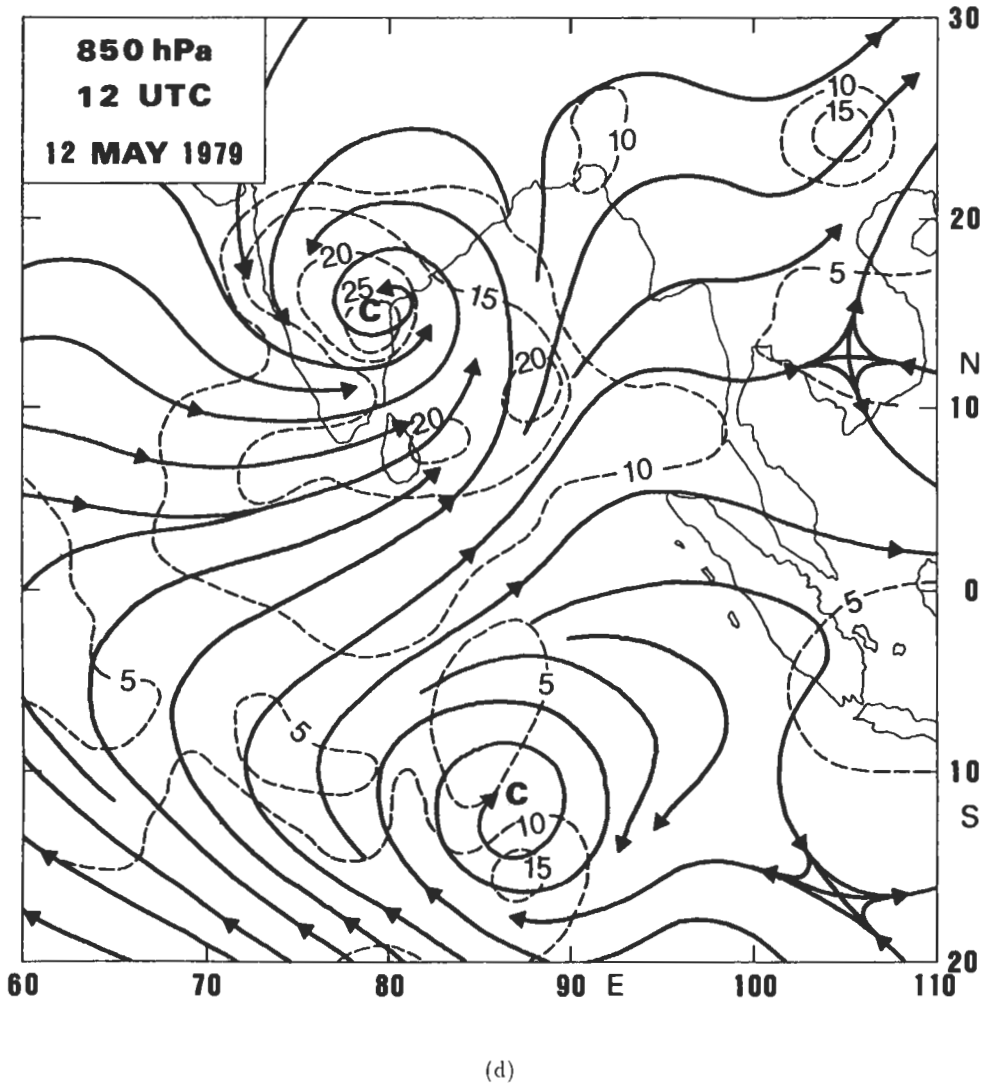


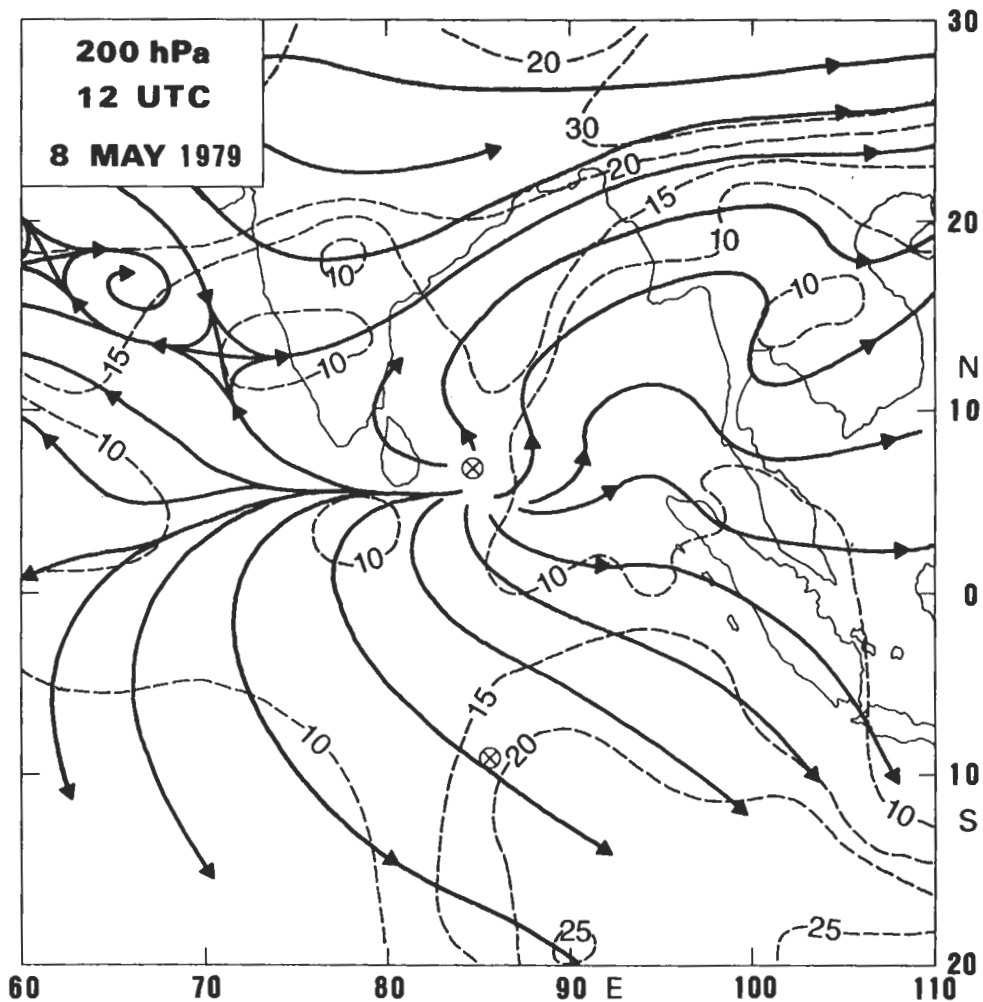
圖5 (a) ~ (d) : 經由FGGE II a 和MONEX II a 的合成資料分析成的850 hPa 氣流圖和等風速圖 (單位 ms^{-1})。時間自1979年5月9日12 UTC至5月12日12 UTC。

風速圖(如圖6)。從850 hPa 流線圖中可以看出脊線從阿拉伯半島向東延伸至阿拉伯海,中度的東南季風($\sim 10 ms^{-1}$)在南半球出現。當孟加拉灣東南邊的熱帶氣旋北移時,才有明顯而強盛的跨越赤道流發生。值得注意的是這對南北遙望的熱帶氣旋,在

5月4日時兩者強度不相上下(根據連續的GOES-I 衛星雲圖分析),5月7日以後,北氣旋明顯的佔有絕對的優勢,而且在5月10日當天,海平面風力還曾達到中度颱風($> 32 ms^{-1}$)的程度。合成分析(Composite analysis)所決定的氣旋中心位置是目前

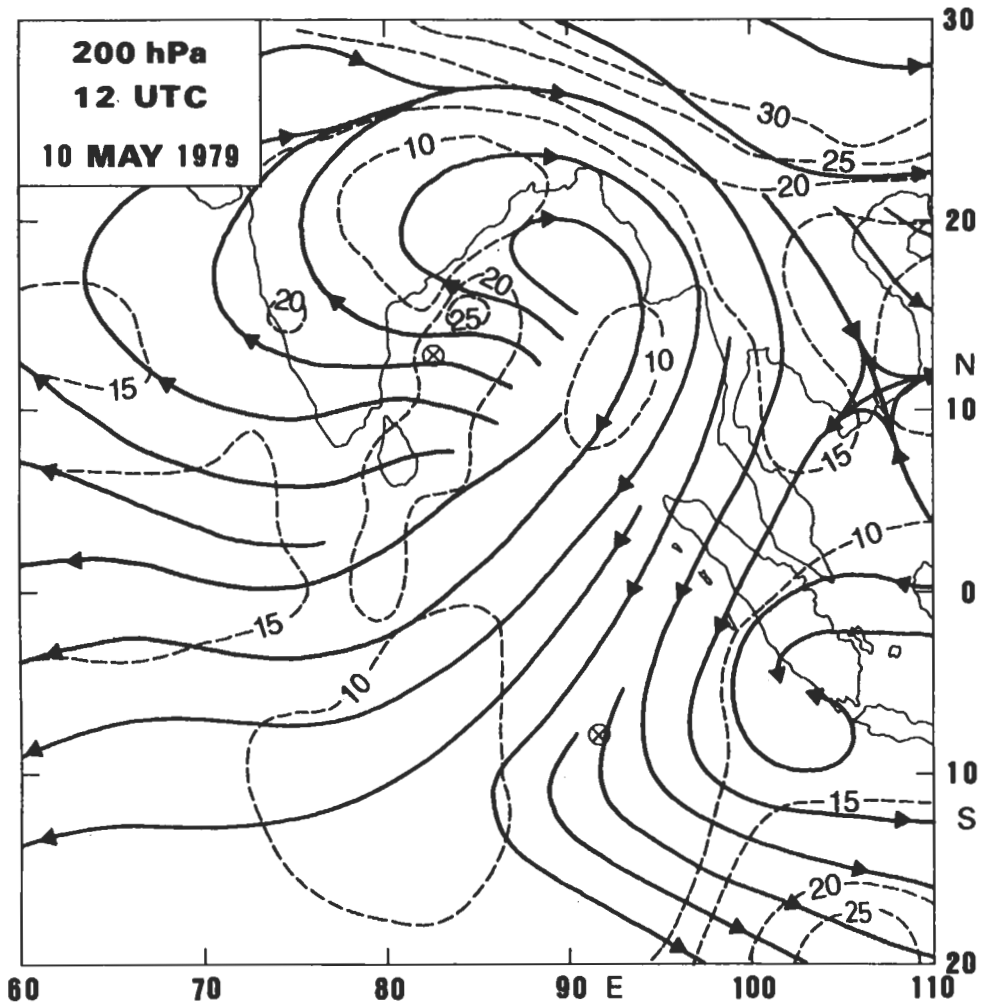
比較可靠的方法，這些位置將做為下節路徑預報比較的基準點。至於200 hPa 流線圖和等風速圖可以看到15° N 以北盛行西風，而10° S 以南和90° E 以東的地區亦盛行西風，5月10日的氣流圖（如圖6(b)所示）顯示跨越的赤道流是來自東北向，而且清晰可見兩個熱帶反氣旋，分屬南北兩半球，顯然的，北

邊的反氣旋範圍較大，勢力也較強。當高空西風脊線東移至105° E 時，北邊反氣旋則呈南北向運動，從此這反氣旋的外流(Outflow)則暫時佔滿整個孟加拉灣及其鄰近地區，直至5月15日以後才開始減弱和消散。北邊反氣旋的移動主要是與西南季風的開始有關係。



(a)

圖6 (圖說見下頁)



(b)

圖6 (a)~(b)：由FGGE II a和MONEX II a的合成資料分析成的200 hPa氣流圖和等風速圖(單位ms⁻¹)。時間分別是1979年5月8日12 UTC和5月10日12 UTC。

四、藤原效應和駛流對此雙氣旋路徑的影響

首先以1979年5月9日12 UTC的850 hPa氣流圖為藍本計算此北南二熱帶氣旋的相對渦度(ζ_1 和 ζ_2)和強度(k_1 和 k_2 ，此即環流大小)，即

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \tag{1}$$

$$k = \pi R^2 \zeta. \tag{2}$$

式(2)中 R 為氣旋半徑，通常以氣旋中心為圓心，而以風速大於 10 ms^{-1} 的圓半徑代表之。因此北氣旋的半徑約為 380 km ，而南氣旋則為 280 km 。然後量出此二氣旋的相對距離 AB (A 和 B 分別代表北氣旋和南氣旋的中心位置)，若以 O 表此雙氣旋系統的質心(Center of gravity)，則北氣旋與質心間的距離為

$$AO = \frac{k_2}{k_1 + k_2}(AB), \quad (3)$$

同理，南氣旋與質心的距離為

$$BO = \frac{k_1}{k_1 + k_2}(AB). \quad (4)$$

依據Lamb (1972) 的方法計算此雙氣旋繞質心O的旋轉角速率應為

$$\omega = \frac{k_1 + k_2}{2\pi(AB)^2}. \quad (5)$$

從式(5)可推算24小時後(即1979年5月10日12 UTC)的北氣旋和南氣旋之藤原偏轉(Fujiwhara deflection)的北氣旋和南氣旋之藤原偏轉(Fujiwhara deflection)。至於駛流對此南北氣旋的影響亦必須考慮，尤其此二氣旋分屬南北半球，各自有不同的環境駛流。因缺乏500 hPa的風場資料，此處以資料充足的200

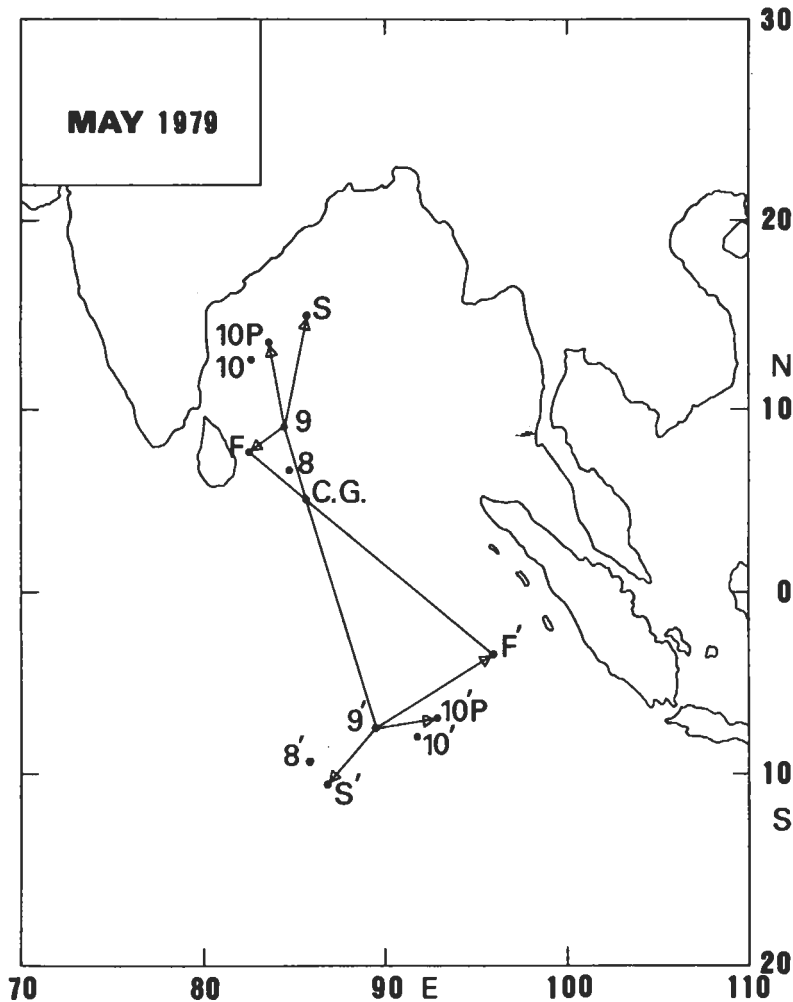


圖7 以1979年5月9日12 UTC 850 hPa的氣流圖(如圖5(a))計算藤原偏轉與駛流大小所合成的24小時預測位置和實際觀測位置比較。圖中顯示此雙氣旋相距約1800公里，C. G.代表雙氣旋的質心，S(S')表北(南)氣旋的駛流，方向和大小分別為 13° 和 7.5 ms^{-1} (280° 和 5 ms^{-1})，F(F')表北(南)氣旋的藤原偏轉(確實的藤原偏轉值列於表一)，8(8')、9(9')和10(10')分別代表5月8日、9日和10日北(南)氣旋的實際位置，10P(10'P)則是5月10日北(南)氣旋的預測位置。

表一 以1979年5月9日12 UTC, 850 hPa的氣流圖計算雙熱帶氣旋藤原參數值。此時雙氣旋相隔約1800公里。

氣旋 藤原參數	北熱帶氣旋	南熱帶氣旋
氣旋強度(m^2s^{-1})	10.5×10^7	3.15×10^7
與質心距離(km)	420	1390
24小時後 藤原偏角(deg)	33	33
24小時後 位移(km)	240	800

hPa風場決定影響此雙氣旋的駛流強度。從1979年5月9日12 UTC的200 hPa氣流圖上可以算出北氣旋的駛流大小(與氣旋中心相距 $1^\circ \sim 7^\circ$ 緯度半徑的平均風)和方向分別是 7.5 ms^{-1} 和 13° ,而南氣旋則分別為 5 ms^{-1} 和 220° ,實際計算出來的藤原參數(Fujiwhara parameters)各值清楚的列於表一。未來24小時雙氣旋的位置則以藤原偏轉加駛流大小的向量合成決定之,如圖7所示。如以24小時的預測位置與實際以氣流場分析所獲致的位置相比較,可以發現藤原偏轉對北氣旋有低估的現象,對南氣旋而言,則顯得估計過大,使得南北氣旋中心位置的預測誤差約達150公里。

五、結 論

本文是以1979年5月6日至12日發生在印度洋上、受赤道分隔的雙熱帶氣旋為討論對象,由於類似的雙氣旋在熱帶海洋上並不少見,但限於觀測資料的嚴重不足,吾人對它們之間以及它們和環境之間的交互作用,瞭解十分有限。但此雙氣旋的發生地點正好有FGGE和MONEX兩個大型實驗計畫同時進行,始獲得寶貴的三度空間資料,以從事流線場分析和未來路徑預報。從以上的討論可獲致兩個結論:

1. 這個以赤道相隔的雙熱帶氣旋在印度洋上持續有9天以上,而且相互影響運行路徑,實在少見。在5月9日12 UTC,雖然二者相隔1800公里之遙,但明顯出現逆時針的互旋運動,而且相互遠離。這與Brand (1970)所觀

察到的西北太平洋雙氣旋運動不盡相同,也與實驗室中的藤原效應有些差異,顯示不同半球的駛流場強弱和方向對雙氣旋的運動特性有相當程度的影響。由於資料的限制,不能定出500 hPa的駛流大小,無法驗證George與Gray (1976)的研究結果:500 hPa的環境駛流是影響颱風運動的最重要因素,這是美中不足的地方。

2. 前面曾經提過Jarrel等(1978)的經驗,當有熱帶氣旋成對出現時,因二者彼此間的牽制作用使得路徑預報變得複雜而不易掌握。此個案利用藤原偏轉和駛流大小的向量合成來預估24小時後的雙中心位置,仍與實際觀測位置有150公里左右的誤差,偏角也有錯估的現象(北氣旋 16° ,南氣旋 22°),可見其言不差和問題的複雜,因此Chan與Gray (1982)建議在決定熱帶氣旋的運行時必須把氣旋與環境場之間的交互作用考慮進去。但僅考量藤原偏轉和駛流大小來預測雙氣旋的未來24小時位置,在實際預報作業上有簡單和迅速的優點,仍具有參考價值。今後如何加強對類似的雙熱帶氣旋做深入而密集的資料蒐集和案例研究,以建立某種形式的修訂辦法,提昇雙熱帶氣旋或颱風的預報準確度,實有待全世界所有氣象學者專家的努力與合作。

誌 謝

本文的完成有賴中正理工學院王志鴻先生的協助繪圖始竟全功,謹此誌謝。

參考文獻

- 劉廣英、張儀峰與李紀恩, 1982: 雙颱風運動特性之分析與探討。第三屆大氣科學學術研討會論文彙編, 102-111。
- Bergthorsson, P. and B. Doos, 1955: Numerical weather map analysis, *Tellus*, 7, 329-340.
- Brand, S., 1970: Interaction of binary tropical cyclones

- of the western North Pacific Ocean. *J. Appl. Meteor.*, 9, 433-441.
- Chan, J. C. L., and W. M. Gray, 1982: Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 1354-1374.
- Cressman, G. P., 1959: An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367-374.
- Dong, K., and C. Neumann, 1983: On the relative motion of binary tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 945-953.
- Fujiwhara, S., 1923: On the growth and decay of vortical systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 49, 75-104.
- George, J. E., and W. M. Gray, 1976: Tropical cyclone motion and surrounding parameter relationships. *J. Appl. Meteor.*, 15, 1252-1264.
- Gray, W. M., 1977: Tropical cyclone motion and steering flow relationships in the western Atlantic and in the western Pacific. Preprints, 11th Tech. Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami Beach, *Amer. Meteor. Soc.*, 472-477.
- Haurwitz, B., 1951: The motion of binary tropical cyclones. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim.*, A4, 73-86.
- Jarrell, J. D., S. Brand and D. S. Nicklin, 1978: An analysis of western North Pacific tropical cyclone forecast errors. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 925-937.
- Joint Typhoon Warning Center, 1989: 1988 annual tropical cyclone report. Guam, Mariana Island.
- Khandekar, M. L., and G. V. Rao, 1971: The mutual interaction of multiple vortexes and its influence on binary and single tropical vortex systems. *Mon. Wea. Rev.*, 99, 840-846.
- Krishnamurti, T. N., P. Greiman, Y. Ramanathan, R. Pasch and P. Adanuy, 1980: Quick Look' Summer MONEX Atlas' Part I: Saudi Arabia Phase. FSU Report No. 804.
- Lamb, H., 1972: *Hydrodynamics*. 6th edition, Dover Publication, New York, N. Y., 738pp.
- Tripoli, G. J., and T. N. Krishnamurti, 1975: Low-level flows over the GATE area during summer 1972. *Mon. Wea. Rev.*, 103, 197-216.
- Young, J., H. Virji, D. P. Wylie and c. Lo, 1980: Summer Monsoon Windsets From Geostationary Satellite Data: Summer MONEX: 1 May-31 July, 1979. Space Science and Engineering Center and Department of Meteorology, University of Wisconsin-Madison.

Discussion on the Observed Movement of Binary
Tropical Cyclones in the Indian Ocean

Tai-Hwa Hor

Gandikota V. Rao

Dept. of Applied Physics
Chung Cheng Institute of Technology

Dept. of Earth and Atmospheric Sciences
Saint Louis University

(manuscript received 25 July 1990; in final form 9 November 1990)

Abstract

In the pre-monsoon season two cyclonic vortices appear occasionally over the Indian Ocean, one south and a second to the north of the equator. The movement of these vortices is not guided by any well defined steering flow. Under such a circumstance the two vortices may interact hydrodynamically, influencing the path of each. This interaction was first studied by Fujiwhara in a laboratory. During 9-12 May 1979 binary tropical cyclones were noted over the Indian Ocean. The observed movement is explained and the interaction between these tropical cyclones and their environment is calculated by combining the Fujiwhara deflection and the steering flow. The result shows that within 24 hours the predicted location of the pair is reasonable and applicable.

Key words: binary tropical cyclone, Fujiwhara effect, steering flow.