

雙颱風渦旋交互作用之新詮釋架構

台灣大學大氣科學系 吳俊傑

一、前言

有關雙渦旋及多重渦旋之交互作用一直是流體力學及渦旋動力學的重要基礎議題，而大氣中所看到的雙颱風渦旋交互作用則是此議題的經典範例。由於颱風渦旋本身正旋(逆時針旋轉)的特性，使得鄰近的雙颱風產生逆時針方向互繞的現象。此互繞型態恰巧與雙子星互繞過程類似，唯其物理機制全然不同。Fujiwhara (1921)最早提出此一構想，即鄰近雙颱風會有呈逆時鐘方向互轉的過程，或所謂的「藤原效應」(Fujiwhara effect)。但更多的觀測資料、水工模擬、及數值模擬顯示，雙颱風交互作用的過程相當複雜，除互繞之外，更包含互吸、合併或分開的過程(Dritschel and Waugh 1992; Lander and Hollander 1993)，這些過程不僅影響颱風的移動，更決定颱風強度發展及其動力結構。

Carr(1997)針對 20 年的真實颱風個案進行詳盡分類探討，以了解真實雙颱風渦旋的直接或間接交互作用過程及與週遭綜觀尺度大氣系統的互動關係。但由於大氣環流本身的複雜性，這些分類是相當主觀且定性的。為解決上述難題，筆者在最近所發表的期刊論文(Wu et al. 2003)中，提出一套新的架構，藉以清晰量測雙颱風交互作用的規模。此論文應可對有關雙颱風交互作用建立嶄新的詮釋架構，以下即針對此論文之主要內容進行回顧。

二、原理及方法

(一) 位渦觀點

由於位渦之保守及可反演特性，使其成為了解大氣動力系統之重要物理量(Hoskins et al. 1985)。本論文主要透過非線性平衡條件下之位渦反演特性以了解各位渦擾動場對於颱風駛流的影響(Wu and Emanuel 1995a,b; Shapiro 1996)，特別是定量評估 2000 年的寶發颱風受

到桑美颱風影響而異常地南移過程(見圖一)。

(二) 反演方法

(1) 全位渦反演

基本上是以連續超鬆弛數值方法求解球狀座標下的位渦及非線性平衡方程(Charney 1955)

$$q = \frac{gk\pi}{p} \left[(f + \nabla^2\psi) \frac{\partial^2\Phi}{\partial\pi^2} - \frac{1}{a^2 \cos^2\phi} \frac{\partial^2\psi}{\partial\lambda\partial\pi} \frac{\partial^2\Phi}{\partial\lambda\partial\pi} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial\phi\partial\pi} \frac{\partial^2\Phi}{\partial\phi\partial\pi} \right]$$

$$\nabla^2\Phi = \nabla \cdot (f\nabla\psi) + \frac{2}{a^4 \cos^2\phi} \frac{\partial(\partial\psi/\partial\lambda, \partial\psi/\partial\phi)}{\partial(\lambda, \phi)}$$

其中 q 為位渦， Φ 為重力位高度， ψ 為氣流線函數，"a" 為地球半徑，"f" 為科氏參數， $k = R_d/C_p$ ， λ 及 ψ 分別為經緯度。

只要給定 q ， Φ 及 ψ 之邊界條件及 $\theta \left(\theta = -\frac{\partial\Phi}{\partial\pi} \right)$ 之上下邊界條件，即可求出 Φ 與 ψ ，而非輻散風場及位溫亦可由以下關係求出：

$$\vec{v} = \hat{k} \times \nabla\psi, \theta = -\frac{\partial\Phi}{\partial\pi}$$

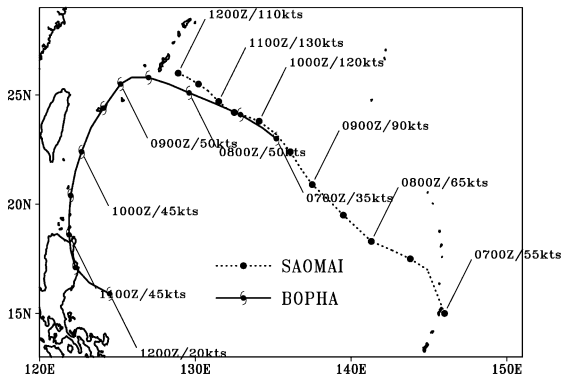
(2) 片斷位渦反演

首先建立相對與颱風中心軸對稱平均 $\bar{\psi}$ ，接著推導基本 $\hat{\Phi}$ 場及 \hat{q} 場

$$\nabla^2\hat{\Phi} = \nabla \cdot (f_0\nabla\bar{\psi}) + \frac{2}{a^4 \cos^2\phi} \frac{\partial(\partial\bar{\psi}/\partial\lambda, \partial\bar{\psi}/\partial\phi)}{\partial(\lambda, \phi)}$$

$$\hat{q} = \frac{gk\pi}{p} \left[(f + \nabla^2\bar{\psi}) \frac{\partial^2\hat{\Phi}}{\partial\pi^2} - \frac{1}{a^2 \cos^2\phi} \frac{\partial^2\bar{\psi}}{\partial\lambda\partial\pi} \frac{\partial^2\hat{\Phi}}{\partial\lambda\partial\pi} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2\bar{\psi}}{\partial\phi\partial\pi} \frac{\partial^2\hat{\Phi}}{\partial\phi\partial\pi} \right]$$

在建立平均基本場之後，即可進行擾動場分割



圖一 2000年9月7日0000 UTC至9月12日0000 UTC間，美國聯合颱風警報中心(JTWC)每12小時發佈，寶發颱風(實線)與桑美颱風(點線)的最佳路徑圖，與最大風速(單位：knots)。

$$\Psi' = \Psi - \bar{\Psi}$$

$$\Phi' = \Phi - \bar{\Phi}$$

$$q' = q - \bar{q}$$

為了解桑美颱風之影響，

$$q' = q'_s + q'_{ns}$$

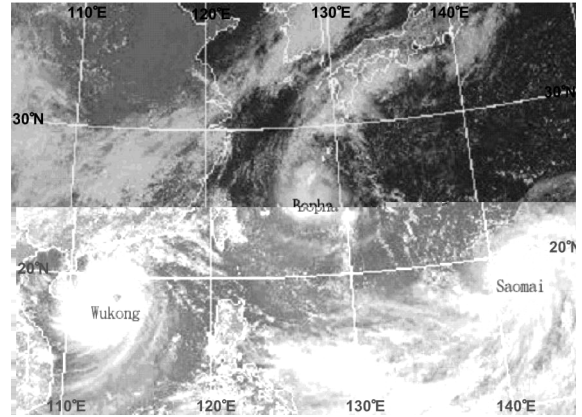
其中 q'_s 及 q'_{ns} 分別代表桑美(見圖三之陰影區)及其它桑美以外區域之位渦擾動。

三、結果

(一) 寶發颱風綜觀分析

寶發颱風於9月6日0000 UTC生成後，至9月8日1500 UTC主受副熱帶高壓脊西南側風影響持續向西北西移動，逐漸接近台灣(圖一)。在這段期間內寶發南方及西南方另有兩個颱風存在：桑美(Saomai)颱風與悟空(Wukong)颱風(圖二)。桑美颱風2000年9月3日0600 UTC，位在北緯15.8°、經154.2°，由熱帶性低氣壓增強為颱風，且逐漸往西北西方向移動。至9月6日0000 UTC寶發颱風形成後，桑美颱風開始偏向西北移動，此時兩者約相距1600公里，之後逐漸接近。

9月8日1800 UTC，桑美颱風移至北緯20.3°、經138.3°，強度開始增強。同時，寶發颱風位北緯25.7°、經125.7°，即在台灣宜蘭北方約420公里的海面上，兩者相距



圖二 2000年9月8日0600 UTC，日本氣象廳GMS衛星可見光雲圖，由左至右分別是悟空、寶發與桑美颱風。

約1500公里。此時，寶發颱風突然由向西轉為西南移動，中心逐漸接近台灣東方海面，並於9日1200 UTC時轉向南南西方移動。至9日1700 UTC寶發颱風位於花蓮東方約180公里的海面上，由南南西方向繼續通過台灣東方海面轉南往呂宋島移動，且其強度由9月9日1200 UTC逐漸減弱。之後於11日1200 UTC減弱為熱帶性低氣壓並持續往東南移動，最後在菲律賓附近消散。

寶發颱風自9月6日0000 UTC生成後，如一般的西北太平洋颱風一樣向西移動(圖一)，但隨後於9月8日1800 UTC時突然地轉折，在琉球群島附近開始偏向南方移動，與一般偏北移動的颱風路徑大異其趣，造成罕見的颱風路徑。寶發相對桑美颱風之路徑(圖一)顯示，寶發之南偏顯然與受到桑美之雙颱風作用影響有關。

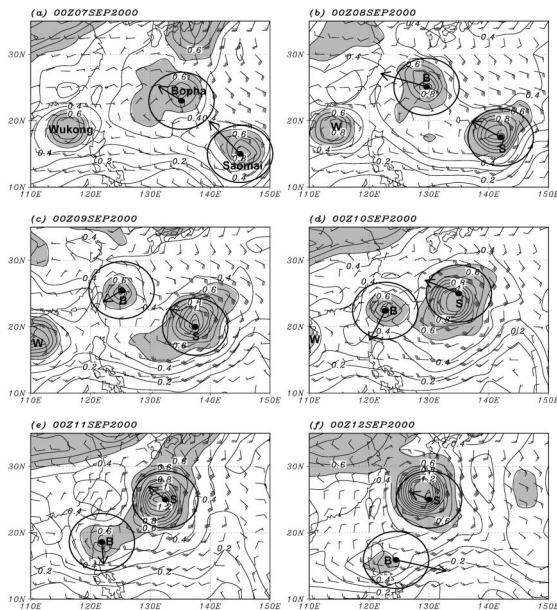
(二) 位渦診斷

圖三顯示500hPa位渦場、深層平均(925-400 hPa)風場與駛流場向量，其中駛流場(\vec{V}_{SDLM})的定義為颱風中心3°內的平均風場

$$\vec{V}_S(p) = \frac{\int_0^3 \int_0^{2\pi} \vec{V}_r dr d\theta}{\int_0^3 \int_0^{2\pi} dr d\theta},$$

其中

$$\vec{V}_{SDLM} = \frac{\int_{925hPa}^{400hPa} \vec{V}_S(p) dp}{\int_{925hPa}^{400hPa} dp}.$$

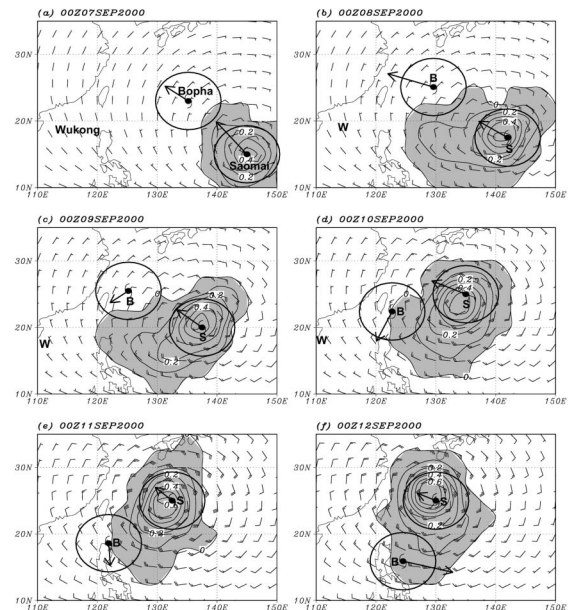


圖三 中央氣象局全球分析(GFS)，2000年9月7日0000 UTC至2000年9月12日0000 UTC每24小時一張(a-f)，500 hPa位渦(單位：PVU，陰影區表位渦大於0.5 PVU)，與925 hPa至400 hPa之深層平均風場(全桿為10 knt)。颱風符號為寶發颱風位置，箭頭表寶發前後6小時之運動向量，大小以半徑 5 m s^{-1} 之圓表示。

9月7日0000 UTC時，寶發和桑美颱風在一個廣大高位渦的區域。同時，悟空颱風則逐漸往南海朝西移動。寶發颱風強度在隨後的24小時之內稍微增加，但之後兩日內其範圍則逐漸縮小，而桑美颱風在此段期間則明顯增強(中心位渦從0.9增加至1.5 PVU)，且變得更有組織。由圖三很明顯可以發現，寶發颱風的運動主要受到桑美颱風所主導。

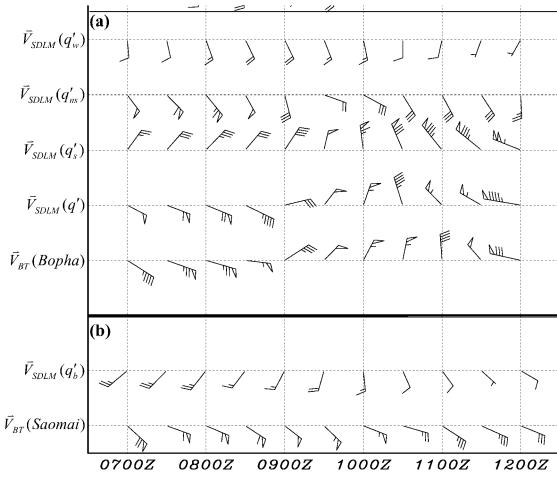
計算與桑美颱風位渦擾動有關的平衡風場，我們得到桑美對寶發颱風的相對駛流 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_s)]$ ，藉此量化桑美對寶發颱風的影響。圖四顯示在9月7日和8日(圖四a, b)間，桑美颱風強度未明顯增強之前，寶發受到桑美颱風之影響較小而朝西運動。但從9月9日起，當桑美颱風移向由西南轉為南向時，寶發的運動已明顯與由桑美所造成寶發颱風的伴隨駛流平行。

圖五顯示每一片段位渦造成寶發颱風相對



圖四 中央氣象局全球分析，2000年9月7日0000 UTC至2000年9月12日0000 UTC每24小時一張(a-f)，500 hPa桑美颱風之位渦擾動(單位：PVU，陰影區表位渦擾動大於0 PVU)，與925 hPa至400 hPa之深層平均風場(全桿為10 knots)。颱風符號為寶發颱風位置，箭頭表寶發前後6小時之運動向量，大小以半徑 5 m s^{-1} 之圓表示。

深層平均駛流的時間序列，其中所有擾動位渦(q')造成寶發颱風的伴隨駛流 $[\vec{V}_{SDLM}(q')]$ 與寶發颱風運動的最佳路徑向量(使用12小時的最佳路徑位置估計， $\vec{V}_{BT} = \frac{\bar{X}_{t+6h} - \bar{X}_{t-6h}}{12h}$)相當吻合，顯示寶發颱風移動可利用位渦方法計算的深層平均駛流表示。由 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_s)]$ 與 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_{ns})]$ 的比較(注意： $q' = q'_s + q'_{ns}$)顯示寶發與桑美颱風的互動關係。圖五a中，9月7日至8日之間，桑美颱風的相對駛流 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_s)]$ 顯然比桑美颱風以外的片段位渦造成寶發颱風的相對駛流 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_{ns})]$ 要小，但從9日以後寶發颱風的運動便受到桑美颱風引起的駛流 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_s)]$ 主導。換言之，圖五可以清楚顯示寶發受到桑美颱風導引而造成南偏的運動。因此，由片段位渦診斷的結果可以獨立探討各個環境場影響寶發運動的情形，進而提供一有效的工具來研究雙颱風的交互作用問題。



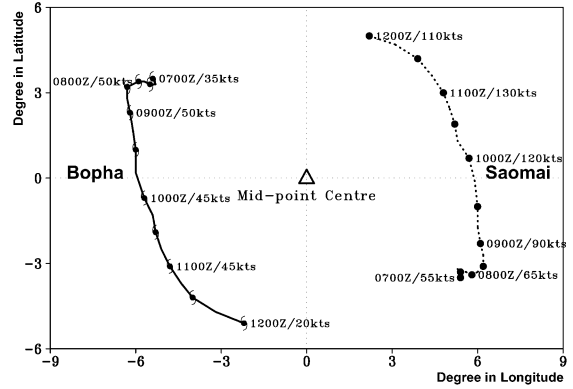
圖五 (a) 從 2000 年 9 月 7 日 0000 UTC 至 12 日 0000 UTC 每 12 小時，寶發颱風之最佳運動向量 $[\vec{V}_{BT}(\text{Bopha})]$ 、所有片段位渦 $[\vec{V}_{SDLM}(q')]$ 、桑美颱風 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_s)]$ 、桑美颱風以外 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_{ns})]$ 及悟空颱風 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_w)]$ 對寶發颱風引起的伴隨深層平均(925-400 hPa)駛流場；(b) 桑美颱風之最佳運動向量 $[\vec{V}_{BT}(\text{Saomai})]$ 與寶發颱風對桑美所引起之伴隨駛流場 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_b)]$ 。其中一個全風標表示 1 m s^{-1} 。

本研究以相同的方法來探討悟空影響寶發颱風的相對駛流 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_w)]$ ，結果如圖五 a，悟空因距離寶發颱風太遠，所以影響相當有限。同樣的，圖五 b 顯示寶發對桑美颱風造成的深層平均駛流 $[\vec{V}_{SDLM}(q'_b)]$ 並非桑美颱風運動的主要分量，顯然寶發對桑美颱風只有次要影響。

(三) 雙颱風交互作用之量化

(1) 定義 AT：各片段位渦擾動伴隨駛流在沿颱風行進方向的投影比值

上一段的研究可以用表一的量化方法表示，所有片段位渦的相對駛流 $[\vec{V}_{SDLM}(q')]$ 在所有的分析時間都非常接近最佳路徑 (\vec{V}_{BT}) ，路徑誤差也很小，平均誤差(標準差)只有 -0.03 m s^{-1} (1.04 m s^{-1})，而方向誤差(標準差)則為 -5° (18°)。為了進一步量化各個片段位渦對寶發在移動方向造成的貢獻，我們定義各片段位渦伴隨駛流在沿颱風行徑方向的投影比值：



圖六 以寶發與桑美颱風之相對中心所繪製，2000 年 9 月 7 日 0000 UTC 至 9 月 12 日 0000 UTC 間，美國聯合颱風警報中心(JTWC)每 12 小時發佈，寶發颱風(實線)與桑美颱風(點線)的相對中心互繞圖，與最大風速(單位：knots)。

$$AT(q'_s) = \frac{[\vec{V}_{SDLM}(q'_s) \cdot \vec{V}_{BT}]}{|\vec{V}_{BT}|^2}$$

由定義我們可知， $AT(q') = AT(q'_s) + AT(q'_{ns})$ ，而 1.0 表沿路徑方向的伴隨駛流和實際移速相同。表一顯示 $AT(q')$ 的平均(標準差)為 0.97 (0.2)，由此分析再次顯示所有片段位渦引起寶發颱風的相對駛流和寶發颱風運動相當接近。同時，在分析的前兩天， $AT(q'_s)$ 接近 0，而 $AT(q'_{ns})$ 接近 0.7，可知寶發颱風在此段時間內並沒有明顯受桑美導引。但從 9 月 9 日以後桑美對寶發颱風的相對駛流場開始持續增加，到了 10 日 1200 UTC 時甚至超過 1.5，此結果與圖五 a 的結論相當一致。另一方面，悟空造成對寶發颱風的相對駛流都在 0.3 以下，顯然寶發受悟空颱風的影響是次要的。同樣的寶發對桑美颱風造成的相對駛流也都在 0.3 以下，因此寶發對桑美颱風的影響也十分有限。

(2) 定義新的質量中心重繪雙颱風相對質心互繞圖

過去的研究常使用地理相對中心的方法繪製雙颱風交互作用的過程，如圖六所顯示，但這樣的雙颱風交互作用並沒有考慮到彼此大小與強度的差異的影響，因此很容易產生雙颱風以相同的中心運動的誤解。我們認為較合理的方法應是繪製相對質量中心雙颱風的互繞圖。

表一 最佳駛流風場 $\vec{V}_{BT}(Bopha)$ 與所有片段位渦擾動造成寶發颱風的駛流 $\vec{V}_{SDLM}(q')$ 比較， $\vec{V}_{BT}(Bopha)$ 與 $\vec{V}_{SDLM}(q')$ 的風速/風向差異 [$DIF(Bopha)$] (以速度/方向表示)。同時亦顯示 $AT(q'_s)$ 、 $AT(q'_{ns})$ 和 $AT(q'_w)$ 。最右邊的二欄則是 $\vec{V}_{BT}(Saomai)$ 與 $AT(q'_b)$ 。

Time	$\vec{V}_{BT}(Bopha)$ (m s ⁻¹ /°)	$\vec{V}_{SDLM}(q')$ (m s ⁻¹ /°)	$DIF(Bopha)$ (m s ⁻¹ /°)	$AT(q')$	$AT(q'_s)$	$AT(q'_{ns})$	$AT(q'_w)$	$\vec{V}_{BT}(Saomai)$ (m s ⁻¹ /°)	$AT(q'_b)$
07/00Z	4.4/306	4.8/301	0.4/-5	1.07	-0.02	1.11	0.16	7.1/316	0.00
07/12Z	7.6/292	6.2/294	-1.4/2	0.82	0.09	0.72	0.07	6.1/292	-0.13
08/00Z	7.3/288	6.8/295	-0.5/6	0.92	0.18	0.74	0.14	5.9/296	-0.07
08/12Z	5.6/278	4.7/299	-0.9/21	0.79	0.27	0.52	0.18	6.0/307	0.02
09/00Z	3.5/234	2.9/255	-0.6/21	0.77	1.11	-0.34	-0.11	5.1/311	0.08
09/12Z	5.1/221	4.8/215	-0.3/-6	0.94	0.82	0.12	-0.12	5.6/317	0.20
10/00Z	5.7/205	5.4/197	-0.3/-8	0.93	0.98	-0.05	-0.21	5.7/294	0.14
10/12Z	5.5/190	4.7/165	-0.8/-26	0.76	1.22	-0.45	-0.22	2.5/288	0.32
11/00Z	3.9/176	5.7/140	1.8/-37	1.18	1.90	-0.72	-0.28	3.5/306	0.31
11/12Z	4.9/143	5.5/123	0.6/-19	1.06	1.67	-0.61	-0.08	3.4/297	0.21
12/00Z	7.8/104	9.5/101	1.7/-3	1.41	1.31	-0.09	0.01	3.1/295	0.26
Mean			-0.03/-5	0.97					
STD			1.04/18	0.20					

對於理想渦旋來說，定義相對的質量中心是比較容易的，但對於實際大氣中的熱帶氣旋，相對質心的定義則一直沒有理想的方法。本研究中因為桑美颱風強度比寶發還強，而且範圍更為廣闊，因此可以預期寶發颱風的運動受桑美颱風影響較明顯，也就是說相對的質心會比較接近桑美颱風。

為繪製相對質心運動圖，本研究利用桑美對寶發颱風的伴隨駛流 [$\vec{V}_{SDLM}(q'_s)$] 及寶發對桑美颱風的伴隨駛流 [$\vec{V}_{SDLM}(q'_b)$] 定義相對質量中心(圖七 a)，定義如下：

$$\bar{r}_c = \frac{|\vec{V}_{SDLM}(q'_b)|}{|\vec{V}_{SDLM}(q'_s)| + |\vec{V}_{SDLM}(q'_b)|} \bar{r}_b + \frac{|\vec{V}_{SDLM}(q'_s)|}{|\vec{V}_{SDLM}(q'_s)| + |\vec{V}_{SDLM}(q'_b)|} \bar{r}_s$$

其中 \bar{r}_b 和 \bar{r}_s 分別是寶發颱風和桑美颱風的相對位置。如圖七 b 顯示，桑美與寶發颱風大約在 1200 公里處開始互繞，而質心位置較靠近桑美颱風，由圖七 b 我們亦可以將寶發颱風的運動歸類為 Carr et al. (1997) 所提到的單向直接的影響。我們亦相信透過此研究，利用片段位渦理論定義新的質心方法可以清楚的描述雙颱風交

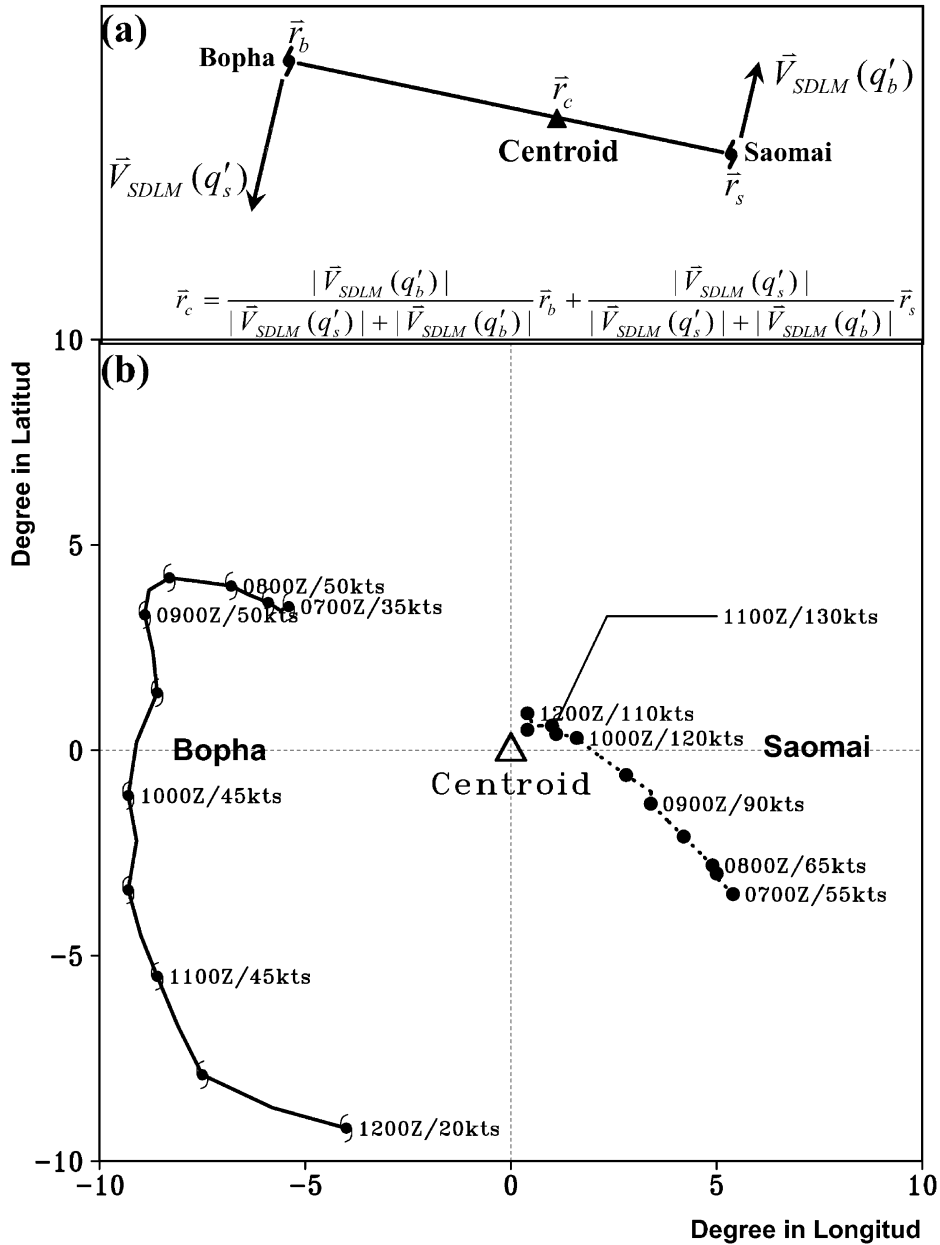
互作用的過程。

四、結論

輕度颱風寶發(2000)在通過台灣附近時，受強烈颱風桑美導引產生不尋常的向南偏移運動。在實際大氣中由於複雜的環境大氣所影響，雙颱風的互動過程並不容易量化分析。然而透過片段位渦反演的的方法，本研究可以定量的計算桑美影響寶發颱風南移、寶發影響桑美颱風運動及另一颱風悟空影響寶發移動的過程。

透過表一可清楚的量化各個片段位渦之間的交互作用過程，並得到以下結論：1) 寶發颱風的運動與所有片段位渦之駛流場相符；2) 寶發對桑美颱風造成的駛流與悟空對寶發颱風造成的駛流都遠小於桑美對寶發颱風造成的駛流。因此寶發與桑美颱風之間是單向直接(one-way direct)的雙颱風交互作用過程，亦即桑美是主導寶發南移的主要因子。

本研究並以雙颱風彼此引起的伴隨駛流為權重，重新繪製新的相對質心雙颱風互繞圖，透過此方法我們甚至可以瞭解實際大氣或數值實驗中複雜的多渦旋合併與互動過程。而透過



圖七 (a) 定義寶發颱風位置向量(\vec{r}_b)與桑美颱風位置向量(\vec{r}_s)之相對質心(\vec{r}_c)示意圖；(b) 由圖(a)的定義重新繪製,2000年9月7日0000 UTC至9月12日0000 UTC間,美國聯合颱風警報中心(JTWC)每12小時發佈,寶發颱風(實線)與桑美颱風(點線)的相對質心互繞圖,與最大風速(單位:knots)。

此研究所建立的嶄新雙颱風交互作用詮釋架構,當可重新瞭解雙颱風互動的過程,並得應用以改進雙颱風路徑預報。

參考文獻

Carr, L. E., III, M. A. Boother, and R. L. Elsberry, 1997: Observational evidence for alternate modes of track-altering binary tropical cyclone

scenarios. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2094-2111.

Charney, J. G., 1955: The use of primitive equations of motion in numerical prediction. *Tellus*, **7**, 22-26.

Dritschel, D. G., and D. W. Waugh, 1992: Quantification of the inelastic interaction of unequal vortices in two-dimensional vortex dynamics. *Phys. Fluids A*, **4**, 1737-1744.

- Fujiwhara, S., 1921: The mutual tendency towards symmetry of motion and its application as a principle in meteorology. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **47**, 287-293.
- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential-vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877-946.
- Lander, M. and G. J. Holland, 1993: On the interaction of tropical-cyclone-scale vortices. I: Observations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 1347-1361.
- Shapiro, L. J., 1996: The motion of Hurricane Gloria: A potential vorticity diagnosis. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1497-2508.
- Wu, C.-C., and K. A. Emanuel, 1995a: Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part I: A case study of Hurricane Bob (1991). *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 69-92.
- _____, and _____, 1995b: Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part II: Tropical storm Ana (1991) and Hurricane Andrew (1992). *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 93-109.
- _____, T.-S. Huang, W.-P. Huang, and K.-H. Chou, 2003: The unusual southward movement of Tropical Storm Bopha (2000): Potential vorticity diagnosis of its binary interaction with Supertyphoon Saomai (2000). *Mon. Wea. Rev.*, **130**, in press.