

利用衛星測高偵測颱風所引起的中尺度氣旋渦

鄭宜婷¹ 曾若玄^{2*} 張育嘉³ 陳昭銘⁴

摘要

當颱風的行進速度小於該海域的第一斜壓模之相位速度時，定義為緩慢移動，本研究探討颱風在緩慢移動狀態下所造成的表層流場特性，在 1993-2015 期間全球一共有 22 個緩慢移動的超級颱風，分析其衛星海面測高資料、衛星追蹤表面漂流浮球與實測海洋水溫剖面數據，發現其中有 7 個超級颱風促使(或加強)中尺度氣旋渦的產生。這些氣旋渦的特徵比起一般大洋的渦旋更為明顯，其中又以西北太平洋與南太平洋的超級颱風渦旋最強，流速可達 2 m/s，渦旋動能達到 4800 cm²/s²，存活時間多達 8 個月。水溫資料顯示，當颱風消失後，氣旋渦結構持續增強且形成湧升流。此外，渦旋動能與颱風行進速度亦呈現負相關性。

關鍵詞：超級颱風、中尺度氣旋渦、衛星高度儀、表面漂流浮球、絕對動力地形

1. 前言

熱帶氣旋，這個劇烈的大氣現象所造成的海洋反應以及它對於環境與生態的衝擊與影響受到許多科學家的關注。許多前人研究指出，當熱帶氣旋經過之後常伴隨著海水溫降、慣性震盪、尾渦流或者湧升流等現象的產生。由大氣傳遞到海洋的能量，通常表現在海表波浪的增強、近慣性頻率的波動以及強勁的海流上面(Jaimes and Shay, 2009; Chang *et al.*, 2013; Chang *et al.*, 2016)。在探討熱帶氣旋對於兩層海洋的反應研究裡，Geisler (1970) 利用理論解析與數值運算提出一個重要的結果，以熱帶氣旋的行進速度 (Translation speed, U_h)與第一斜壓模的相位速度 (Phase speed of the first baroclinic mode, c_1)之比值，將其分成兩類：當 $U_h < c_1$ 時，定義為行進緩慢 (slow-moving) 的熱帶氣旋，此時暴風中心下方主要的海洋反應為湧升流現象；當 $U_h > c_1$ 時，定義為行進速度較快的熱帶氣旋，此時沿著熱帶氣旋行進方向的後方會有尾流 (wake) 產生。Chang *et al.* (2013)分析西北太平洋海域 1985-2009 年間所有的熱帶氣旋與漂

流浮球海流之數據，利用大量的實測資料呈現出不同暴風強度和移動速度下的熱帶氣旋底下的合成流場，顯示出海流的空間分佈，也間接證實了 Geisler (1970) 的數值理論。

由於海洋渦旋具有長生命期與獨立旋轉體的結構，很適合透過衛星海面高度和流場資料來觀察其演變過程，Yuan *et al.* (2007)的研究顯示在臺灣東南方經常有反氣旋渦的存在，鄭宇昕及何宗儒(2013)則是使用 1992 至 2011 年的衛星海面測高資料，發展了一個渦旋自動偵測與追蹤演算法，探討臺灣西南海域反氣旋渦在海洋表面的分佈與移動。另一方面，前人研究也發現颱風會將原本存在於大洋中的渦旋增強(Sun *et al.*, 2009; Sun *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2010)，Sun *et al.* (2014)發現 2000-2008 年西北太平洋有 15 個強度 4 級以上的颱風，增強了 18 個原本就存在於該區域的渦旋，另外也產生了 2 個新的渦旋。

Geisler (1970)的研究結果指出緩慢移動的颱風會在其暴風中心處形成湧升流與中尺度氣旋渦，對此種氣旋渦的產生提供了一個良好的理論基礎。在更強風速與更低氣壓的作用下，超級颱風對於

¹ 國立中山大學海洋科學系 碩士生

² 國立中山大學海洋科學系 教授

³ 國立成功大學水利及海洋工程學系 博士後研究員

⁴ 國立高雄海洋科技大學海事資訊科技系 教授

* 通訊作者，電話：07-5252000 轉 5033, E-mail: rstseeng@mail.nsysu.edu.tw

收到日期：民國 106 年 08 月 18 日

修改日期：民國 106 年 11 月 16 日

接受日期：民國 106 年 12 月 14 日

海洋氣旋渦的形成與強度的增加應該是更為顯著。綜上所述，本研究欲探討的問題為：需要多緩慢的行進速度以及維持多少時間的緩慢型態才能夠產生中尺度渦旋？全球符合緩慢移動型態的超級颱風有多少個案會引起中尺度渦旋？這些案例的渦旋特性為何？本研究期望藉由分析衛星高度計以及表面漂流浮球等資料，來回答這些問題。

2. 資料來源

2.1 全球超級颱風

本研究分析 1993-2015 期間全球超級颱風的路徑及強度資料，由美軍聯合颱風警報中心 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC) 以及美國國家颶風中心 (National Hurricane Center, NHC) 所提供，其格式為每 6 小時一筆，包含颱風的發生時間、經緯度位置、最大持續風速 (1 分鐘平均) 以及最大風速半徑等資料，超級颱風指的是 JTWC 所定義之最大持續風速達到 130 節 (knots) 或以上。

2.2 衛星海表面高度

本研究利用絕對動力地形與絕對地轉流資料以研究颱風期間海洋的渦旋特性，絕對動力地形 (absolute dynamic topography) 是指大地水準面到海水面間的高度，由法國的 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) 提供，該資料結合了 TOPEX/POSEIDON、Jason-1/2、ERS-1/2 以及 ENVISAT 等多衛星測高儀的海面高度資料，並進行了儀器誤差、海況誤差與潮汐干擾等影響因素的校正，內插成全球 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 的空間解析度以及時間解析度為日平均的網格點資料。

2.3 衛星追蹤表面漂流浮球

表面浮球的拖傘中心位於水面下 15 公尺，以量測海洋混合層的海流，海流的直接量測是利用 Argos 方式以衛星追蹤的 Surface Velocity Program (SVP) 所獲得。SVP 浮球資料來自於美國 NOAA/AOML 浮球資料庫，由 DAC (Drifter Data

Assembly Center) 收集並進行資料品管，刪除浮球擱淺以及一些錯誤的資料後，內插成間隔為每 6 小時一筆的資料，格式包含浮球編號、時間、經緯度、東西與南北方向的流速分量以及海表面溫度。

2.4 實測海水溫度剖面

海水溫度剖面實測資料由美國 NOAA/NODC (National Oceanographic Data Center) 所提供，本研究使用 WOA13 v2 (World Ocean Atlas 2013 version 2) 全球海水溫度數據剖面內插到標準水深的月統計平均值，網格為 $1^\circ \times 1^\circ$ 。另外也針對颱風個案使用 GTSP (Global Temperature and Salinity Profile Program) 所提供的實測水溫剖面資料，探討颱風經過前後的海水溫度剖面與混合層厚度的變化。

3. 分析方法

3.1 緩慢移動型態之定義

根據 Geisler (1970) 的理論，可以利用熱帶氣旋行進速度 U_h 與第一斜壓模的相位速度 c_1 之比值，來定義該熱帶氣旋為緩慢或快速移動的型態， c_1 之計算方式參考 Jaimes and Shay (2009)，其運算公式如下：

$$c_1^2 = g \frac{(\rho_2 - \rho_1) h_1 h_2}{\rho_2 (h_1 + h_2)} \dots\dots\dots (1)$$

其中 g 為重力加速度， h_1 為該海域上層海洋的溫度動盪層厚度 (Jaimes and Shay, 2009)，圖 1 為熱帶氣旋季節 (夏季) 西北太平洋海域的溫度與密度剖面圖，圖中可以明顯看出約於海水溫度 18°C (大約 250 米深度) 處溫度與密度剖面線疊合，以該疊合處作為水層分界，以上代表溫度密度動盪層，也就是第一層分層 h_1 (如圖 1 紅色虛線之上的厚度)；而 h_2 則是定義為 1,000 米扣掉 h_1 的厚度 (如圖 1 紅色虛線以下至水深 1,000 公尺的厚度)。根據 WOA13 提供之數據所計算的全球各海域在熱帶氣旋季節時的平均 c_1 值，分別如下：北大西

洋~2.3 m/s、西北太平洋~2.9 m/s、東北太平洋~1.8 m/s、北印度洋~2.8 m/s、南太平洋~3.1 m/s以及南印度洋~1.5 m/s，由公式(1)可知當 h_l 愈大時 c_l 也愈大，這也表示海面混合層愈厚，海洋的熱含量愈大，其中以南太平洋和西北太平洋的 c_l 最大，南印度洋的 c_l 最小。北半球海域平均 c_l 約為 2.5 m/s，南半球海域則約為 2.3 m/s。

依據 Geisler (1970)之理論來定義全球行進速度緩慢的颱風，當北(南)半球颱風的 $U_h < 2.5$ (2.3) m/s 時，本研究將其定為緩慢移動型態。統計 1993-2015 年間，緩慢移動型態的超級颱風於北半球只占 3%，於南半球則為 19%，表示此種案例相當稀少。

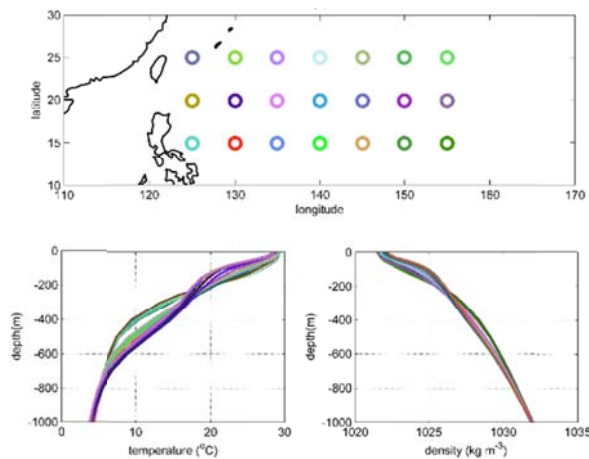


圖 1 西北太平洋海域夏季 (7-10 月) 的溫度與密度剖面圖 (WOA13 v2)

3.2 中尺度渦旋之定義

本研究繪製了 1993 至 2015 年間緩慢移動之超級颱風行進路徑範圍內每日的 SSH 分布圖，等高線距離為 4 cm，並參考 Chow *et al.* (2008) 以及 Chang *et al.* (2012)等研究中尺度渦旋的定義來鑑別氣旋渦的存在。

- (1) 封閉等高線呈現出近似橢圓或圓形；
- (2) 封閉等高線面積需大於 50x50 km²；
- (3) 渦旋中心定義為該封閉等高線最內層輪廓的中心；
- (4) 渦旋中心與最外圍等高線之高度差需大於 6

cm；

- (5) 以上四點特性須在絕對海平面高度圖中，至少連續存在 3 周以上，才被定義為渦旋。

其中，渦旋高度差為渦旋邊緣等高線高度值減去渦旋中心的高度值，此值定義為 Diff (SSH difference)，Xiu *et al.* (2010) 指出 Diff 愈大的渦旋，存活時間愈久。渦旋傳播速度是將渦旋從開始到結束所移動的距離除以渦旋的存活時間。渦旋半徑 (R) 為渦旋中心取四個方向至封閉高度線邊緣的平均半徑。

4. 結果與討論

4.1 促使氣旋渦形成之條件

1993-2015 年間，全球符合緩慢移動型態的超級颱風總共有 22 個(北半球 13 個、南半球 9 個)，其中有 7 個超級颱風(北半球 3 個、南半球 4 個)形成了明顯的中尺度氣旋渦，此 7 個超級颱風軌跡如圖 2 所示，分別為北半球的 Podul (2001)、Nida (2009)與 Amanda (2014) 以及南半球的 Zoe (2002)、Carina (2006)、Hondo (2008)與 Bansi (2015)。表 1 列出這七個超級颱風氣旋渦的海域、形成條件與氣旋渦的高度差、旋轉速度、壽命等特性。

探討這 22 個緩慢移動型態的超級颱風，在風速相同強烈 ($V_{max} > 130$ knots) 以及一樣符合緩慢移動定義的條件下，為何只有 7 個超級颱風被發現有中尺度氣旋渦的產生？結果顯示這 7 個超級颱風皆包含三個共同點：(1)緩慢移動型態資料點平均移動速度小於 2 m/s；(2)緩慢移動速度持續 12 小時以上；(3)超級颱風軌跡無經過陸地 (只經過開放性大洋)。其餘只符合上述一或兩點的超級颱風皆無氣旋渦的產生。在 c_l 最大的西北太平洋(2.9 m/s)與南太平洋(3.1 m/s)海域，在相同的超級颱風風速與緩慢的移動速度($U_h < 2$ m/s)條件之下，Froude number (即 U_h 和 c_l 的比值)將更小於 1，因此湧昇流和渦旋將更為強烈，渦旋中心的海表面高度差也就會更大，西北太平洋的 Nida-eddy 和南太平洋的 Zoe-eddy，其 Diff 分別為 26 和 38 cm(表 1)，的確比起其他海域的 eddy 要大。

表 1 本研究的七個超級颱風氣旋渦的特性

Name	Ocean	c_1	Diff (cm)	V (m/s)	Life (month)
Podul	NW Pacific	2.9	22	0.9	3
Nida	NW Pacific	2.9	26	1.6	7
Amanda	NE Pacific	1.8	14	0.7	1
Zoe	S Pacific	3.1	38	1.3	6
Carina	S Indian	1.5	14	0.6	5
Honda	S Indian	1.5	18	1.0	8
Bansi	S Indian	1.5	22	0.9	4

本研究以 2009 年西北太平洋超級颱風 Nida 呈現氣旋渦的形成過程與其特性，圖 3 為 AVISO 衛星海表面測高資料，包含絕對地轉流與海表面高度每五天的平面分佈，Nida 於 11 月 26 日起以緩慢移動型態且風速超過 130 節時，中尺度氣旋渦開始形成，Diff 為 6 cm，於 12 月 3 日颱風警報解除之後中尺度氣旋渦仍持續存在，其流速與結構有變大以及穩固的趨勢，12 月 12 日渦流的最大流速達到 1.6 m/s，渦流中心的高度差距增至 26 cm，且渦流半徑增大，渦流繼續向西方傳遞約 7 個月後才消散。

4.2 表層海流與水溫

從 2009/11/25 到 2010/01/16 期間剛好有兩個 drifter(ID：71417 和 81961)被捲入 Nida-eddy 的氣旋渦範圍，兩個浮球的漂流軌跡都呈現逆時針轉圈(Loop)，浮球 71417 繞了三圈，浮球 81961 則繞了四圈，圖 4(a)是浮球 71417 的漂流軌跡以及 Nida 颱風的路徑，圖 4(b)是將三個 Loop 分別畫出來，並參考 Rabinovich *et al.* (2002)的分析方法，將每個 Loop 的週期(T)、半徑(r)、轉速($U_{rot} = 2\pi r/T$)、平均流速 (U_{mean}) 以及最大流速 (U_{max}) 紀錄於表 2。Loop 半徑為約略估算，如為橢圓則以其半長軸與半短軸的平均值做為 Loop 的半徑值；最大流速 (U_{max}) 為單一 Loop 中最大的流速值。浮球 71417 在 24 天期間向西移動了約 330 公里，平均水平傳遞速度約為 13.8 km/day，平均週期為 8 天，Loop 的平均半徑約為 60 公里，平均流速為 0.8 m/s，最大流速出現在 Loop1 且達到 2 m/s，Loop2 與

Loop3 最大流速值皆達 1.4 m/s 以上。浮球 81961 的平均水平傳遞速度為 16.4 km/day，週期為 6 到 15 天不等，Loop 的半徑約為 60-80 公里，平均流速為 0.5 m/s，最大流速達到 2 m/s。這兩個浮球所記錄到的 Nida-eddy 最大流速皆為 1.8-2 m/s，都是出現在 11/30-12/23 期間，也就是 Nida-eddy 中心的海表面高度差 Diff 逐漸增加到最大值的階段。

表 2 Nida-eddy 的各參數值 (浮球#71417)

Loop	週 期 (days)	半徑 (km)	U_{mean} (m/s)	U_{max} (m/s)
1	7.8	55.0	0.8	2.0
2	7.5	55.0	0.8	1.4
3	8.5	82.5	0.7	1.5

圖 5 為浮球 71417 所紀錄的流速與海表溫時序圖，2009/12/3 的流速達到最大值 2 m/s，表水溫也降到最低值 24.2°C，在 2009/11/25 浮球尚未進入 Nida-eddy 時環境表水溫為 28.5°C，在 2009/12/5 浮球被捲入氣旋渦時，海水表面溫度明顯降低約 4.5°C，應該與氣旋渦之湧升流將下層低溫海水往上舉有關。

4.3 實測水溫剖面資料

利用 GTSP 所提供的全球實測溫度剖面資料，找出 2009 年颱風 Nida 形成中尺度冷渦 Nida-eddy 時，颱風中心附近的測站，經緯度範圍為東經 135 度至 140 度以及北緯 17 度至 22 度，時間範圍為 2009 年 11 月 15 日到 12 月 15 日 (圖 6(a))。依據時間將其分類為 Nida 還未經過時 (Before Nida pass)、Nida 正在經過該海域時 (During Nida pass) 以及 Nida 消散後中尺度氣旋渦增強的時段 (After Nida pass)，並且繪出該範圍三個時段的溫度剖面，如圖 6(b)所示，海表溫度在 Nida 還未經過時約為 28.6°C，Nida 正在經過該區域時海表溫度降低約 0.5 度 (28.1°C)，當 Nida 已經消失且 Nida-eddy 結構穩固時，其海表溫度比原先降低了 1~2 度 (約為 26~27°C)。

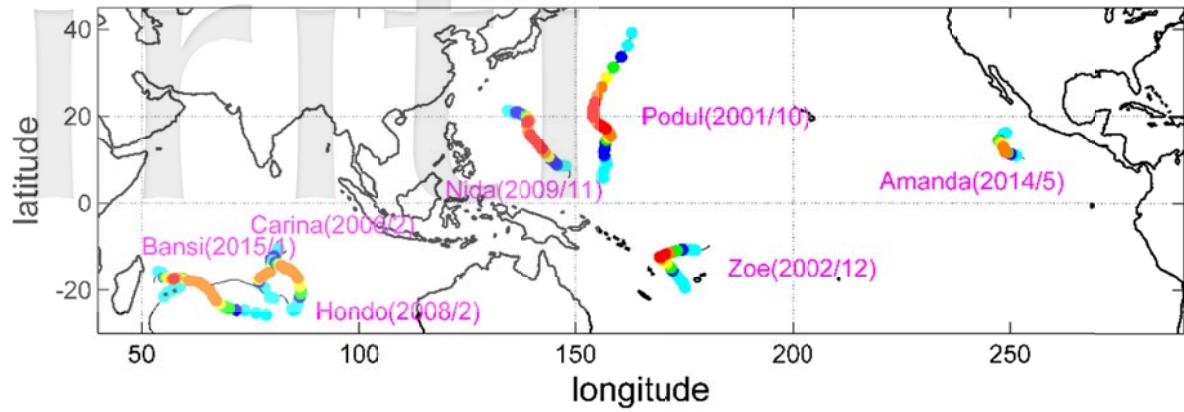


圖 2 全球 1993-2015 年間有中尺度氣旋渦形成的緩慢移動型態之超級颱風行進軌跡分布圖，顏色代表颱風強度，粉色字標示颱風名字以及生成的年份與月份

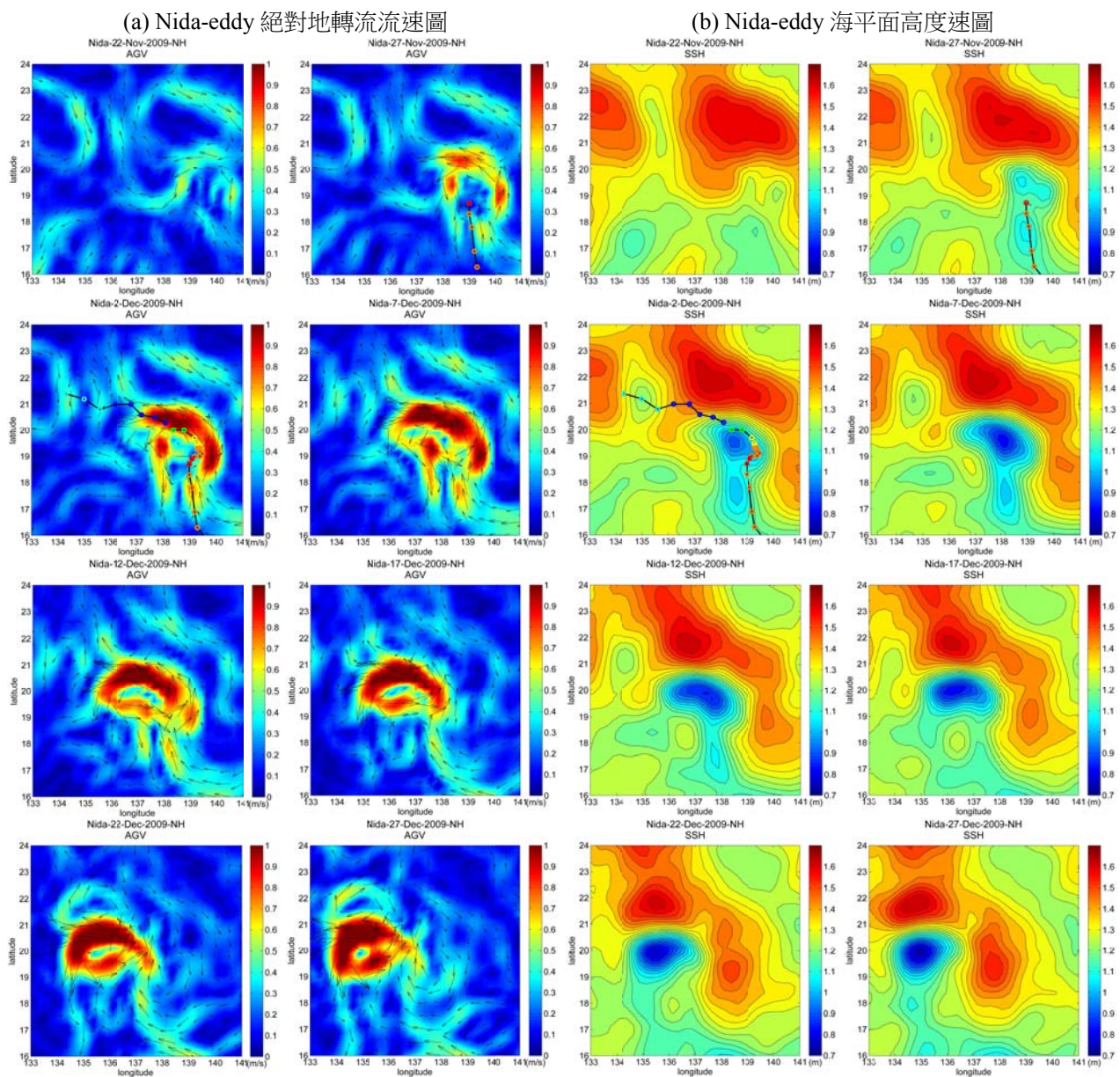


圖 3 (a) Nida-eddy 絕對地轉流流速圖，單位為 m/s，(b) Nida-eddy 絕對動力地形圖，等高線間距為 0.04 m，自 2009/11/22 開始每 5 天的衛星海表面測高資料，圖中包含 Nida 之行進路徑

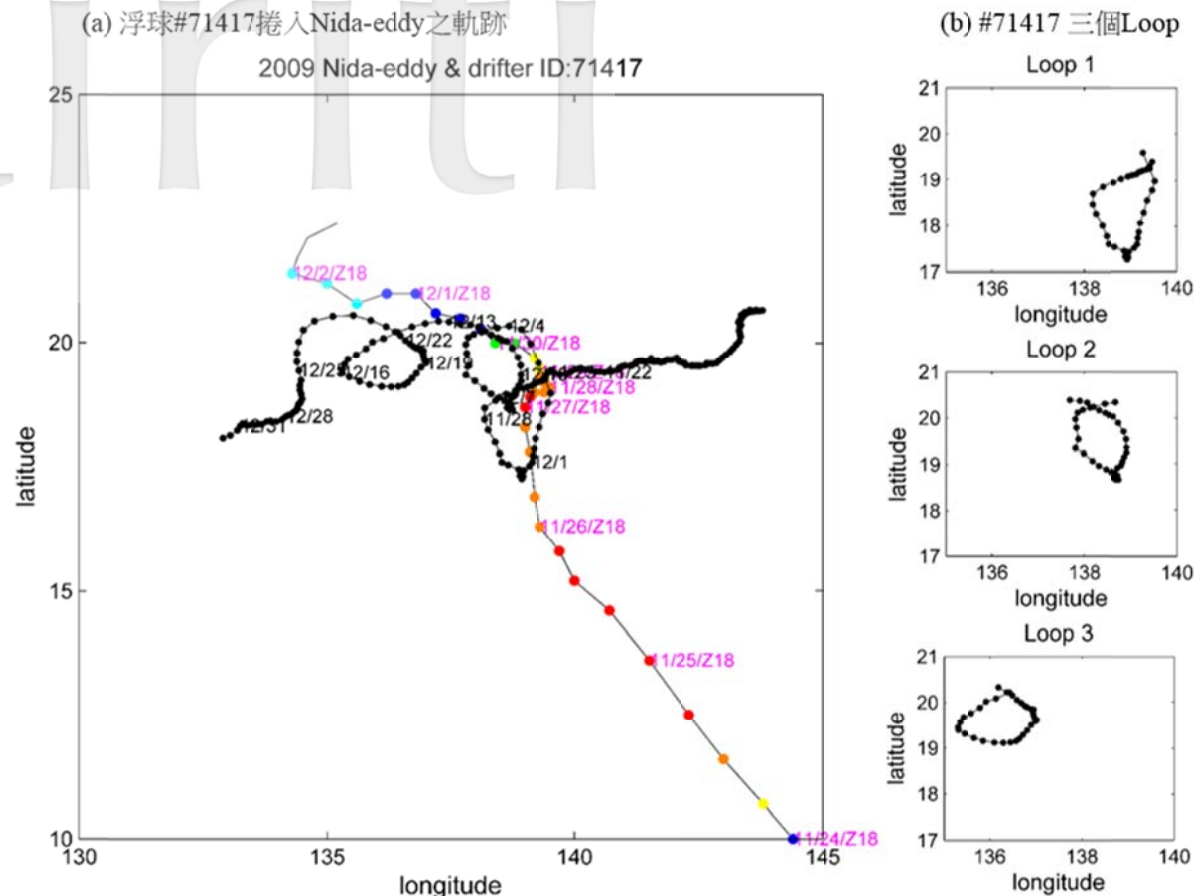


圖 4 (a)捲入Nida-eddy 中的浮球 ID #71417 軌跡 (黑色粗線，紅色點為紀錄起始點)與Nida之行進路徑(黑色細線，顏色點表示颱風強度)，(b) 浮球軌跡的三個Loop之分解圖示；Loop1: 2009/11/25 ~ 12/3，Loop 2：2009/12/4 ~ 12/12，Loop 3：2009/12/14 ~ 12/22

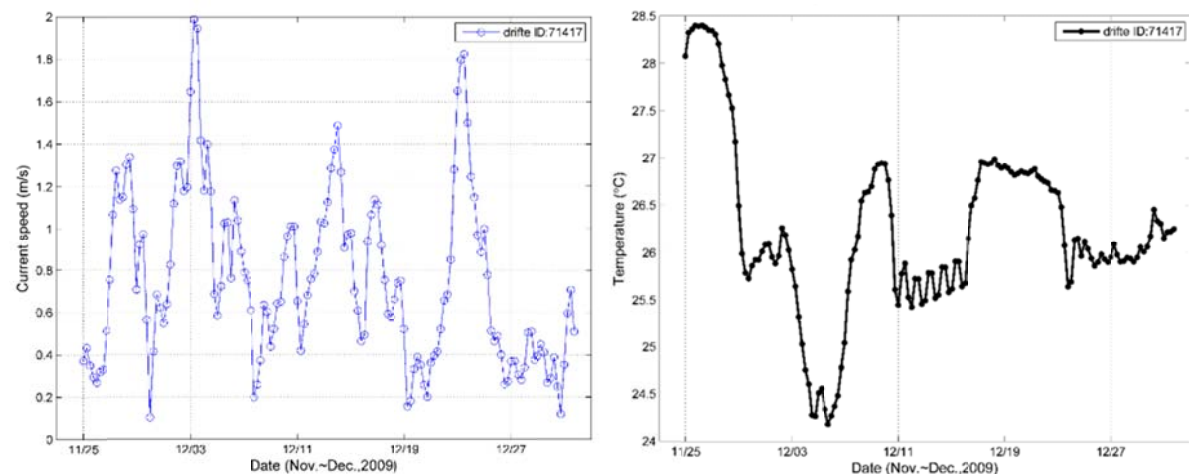


圖 5 浮球 ID#71417 在 Nida-eddy 中的流速與海表溫時序圖

從水溫垂直變化上來看，當 Nida 正在行經該海域之時 (圖 6(b)中藍色線)，風為影響上層海洋擾動的主要因素，因此可以明顯看到混合層約從 70 米加深至 100 米；而 Nida 消失之後，Nida-eddy

結構增強並且穩固，漸有湧升流形成，使其在同一深度下之水溫降低，水溫剖面線明顯被往上推 (圖 6(b))。

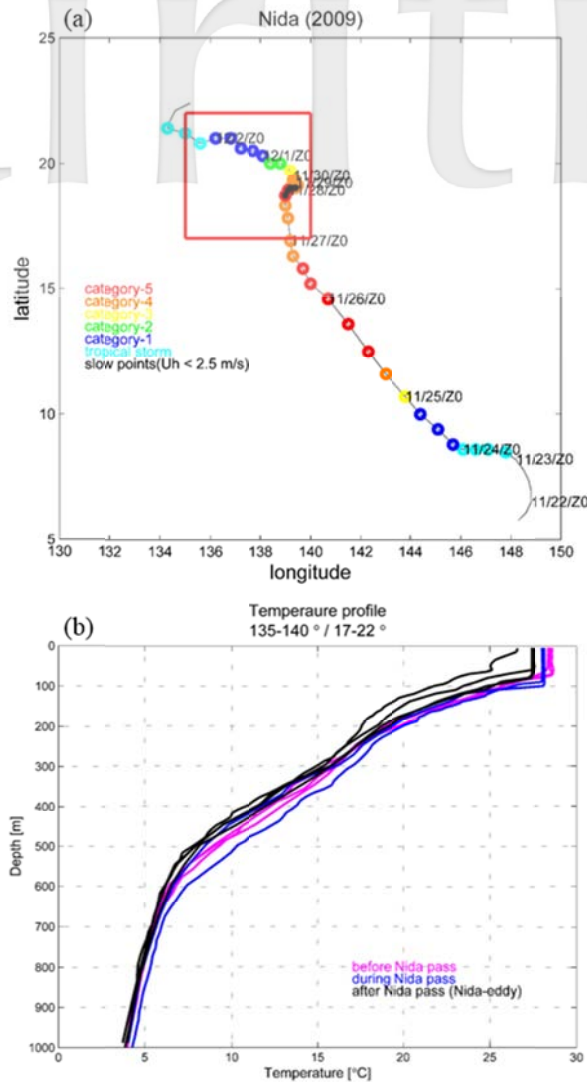


圖 6 (a) Nida 軌跡以及 GTSP 水溫剖面測站範圍 (紅色框)，(b)所有測站之水溫剖面圖，包含 Nida 影響前、中、後的時段

4.4 渦流動能

本研究利用 AVISO 衛星高度計的絕對地轉流資料來計算渦流之動能 (Eddy Kinetic Energy, EKE)，並與颱風行進速度做相關性分析，計算渦流動能所使用的公式如下：

$$EKE = \frac{1}{2} [(u')^2 + (v')^2]$$

$$u' = u - \bar{u} \dots \dots \dots (2)$$

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

其中， u ， v 分別代表渦流最大流速的東西方

向與南北方向流速分量； $\bar{u}$ ， $\bar{v}$ 分別代表渦流的東西方向與南北方向流速分量之平均值。

當超級颱風最大持續風速達到 130 節以上，且暴風中心位置於渦流產生的區域附近時，其颱風行進速度 (U_h) 與渦流動能 (EKE) 之相關性為何？EKE 數值由衛星高度計數據計算而得，資料格式為 1 天一筆，而颱風 U_h 之資料格式為 6 小時一筆，為了使兩者格式一致，本研究將颱風資料點平均成 24 小時一筆，一共得到 13 個資料點，並且與 EKE 數據作相關性如圖 7 所示，結果呈現負相關的趨勢，相關係數為 -0.7848，換言之，相同的最大持續風速 (超級颱風， $V_{max} \geq 130$ knots) 之下，颱風行進速度 (U_h) 愈快，所給予的渦流動能 (EKE) 愈小，當行進速度愈緩慢，所產生的中尺度渦流動能則愈大。

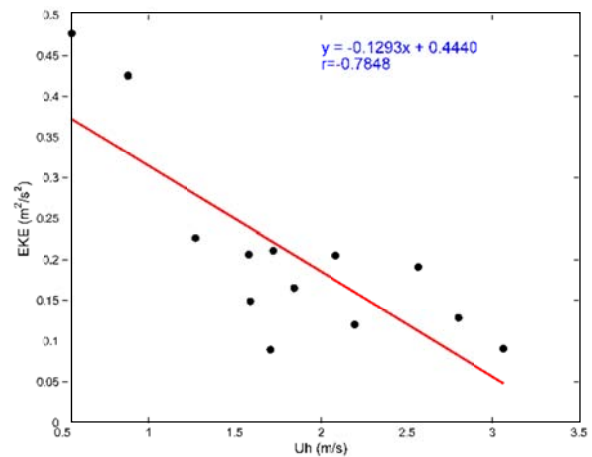


圖 7 Nida-eddy 渦流動能與 Nida 行進速度之相關性

4.5 與大洋常見渦流之比較

中尺度渦流是大洋中很常見且很重要的海洋動力現象(Wyrtki *et al.*, 1976；Richardson, 1983)，較活躍的渦流海域為北太平洋黑潮延伸區(KE)、副熱帶逆流區 (STCC) 以及東北太平洋熱帶海域，Cheng *et al.* (2014)統計 1992-2012 期間 STCC 的氣旋渦特性，平均半徑約為 85 公里，平均存活時間約為 18 周。本研究所發現的 7 個超級颱風生成的中尺度氣旋渦，其中最小存活時間約為 1 個月 (Amanda-eddy, NH)，而最大則約為 8 個月

(Hondo-eddy, SH), 7 個渦旋平均壽命約為 5 個月, 約為 STCC 氣旋渦平均壽命的 1.3 倍, 最小渦旋半徑約 55 公里, 最大值達到 192 公里, 平均半徑約為 119 公里, 約為 STCC 氣旋渦半徑的 1~1.8 倍。平均旋轉流速介於 0.51 到 0.80 m/s 之間, 是大洋渦旋流速的 1.1~1.8 倍。

Qiu (1999) 的研究指出 STCC 的渦旋平均動能約為 $338 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, 而 KE 的渦旋平均動能約為 $661 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。本研究的渦旋動能最大值約為 $4,800 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, 最小值約為 $1,000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, 分別為 STCC 與 KE 渦旋動能平均值的 16 倍和 6 倍。且當超級颱風行進速度小於 1 m/s 時, 渦旋動能達到 $4,000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 以上。根據以上的比較, 超級颱風所形成的氣旋渦要比大洋渦旋更大、更強烈而且更為持久。

5. 總結

根據 23 年的衛星海表面高度、衛星追蹤浮球海流以及颱風資料, 發現全球一共有 22 個符合緩慢移動型態的超級颱風, 其中只有 7 個超級颱風產生了氣旋渦, 該 7 個產生氣旋渦的超級颱風皆符合三個共通點: [1] 平均行進速度小於 2 m/s; [2] 緩慢移動型態維持 12 小時以上; [3] 位於開放性大洋 (無行經陸地)。在西北太平洋和南太平洋海域, 由於其獨特的水溫垂直分佈使得 c_1 值較大, 因此緩慢移動的颱風比較會形成較強的氣旋渦。

觀測資料顯示, 這些超級颱風所引發的中尺度氣旋渦比起一般大洋渦旋的特徵更為明顯, 以西北太平洋的 Nida-eddy 和南太平洋的 Zoe-eddy 為例, 其渦旋中心與外圍的海面高度差可達 26-38 cm, Nida-eddy 的表層流速極快, 最大約 2 m/s, 氣旋渦的大小、轉速、壽命等性質也比大洋渦旋更顯著, 因此超級颱風之氣旋渦可能對於大尺度的動量、熱量、鹽度通量以及海氣交換會有很重要的影響, 詳細的動力過程分析與生成機制未來值得吾人去做更深入的探討。

誌謝

本研究得以順利完成, 首先要感謝「中山-高

海大合作計畫」的經費支持, 多衛星測高儀資料是由法國 AVISO 提供, 實測水溫資料是由美國 NOAA/NCEI 孫兩傳博士提供, 在此一併致謝。

參考文獻

- 鄭宇昕, 何宗儒, 2013。應用衛星測高偵測臺灣西南海域渦旋, 航測及遙測學刊, 17(4): 287-293。[Cheng, Y.H., and Ho, C.R., 2013. Oceanic eddy detection in the sea off southwestern Taiwan using satellite remote sensing data, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 17(4): 287-293.(in Chinese)]
- Chang, Y.C., Chen, G.Y., Tseng, R.S., and Chu, P.C., 2012. Effect of cylindrically shaped atoll on westward-propagating anticyclonic eddy—A case study, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 9(1): 43-46.
- Chang, Y.C., Chen, G.Y., Tseng, R.S., Centurioni, L.R., and Chu, P.C., 2013. Observed near-surface flows under all tropical cyclone intensity levels using drifters in the northwestern Pacific, Journal of Geophysical Research, 118(5): 2367-2377.
- Chang, Y.C., Tseng, R.S., Chu, P.C., Chen, J.M., and Centurioni, L.R., 2016. Observed strong currents under global tropical cyclones, Journal of Marine Systems, 159: 33-40.
- Cheng, Y.H., Ho, C.R., Zheng, Q., and Kuo, N.J., 2014. Statistical characteristics of mesoscale eddies in the North Pacific derived from satellite altimetry, Remote Sensing, 6(6): 5164-5183.
- Chow, C.H., Hu, J.H., Centurioni, L.R., and Niiler, P.P., 2008. Mesoscale Dongsha Cyclonic Eddy in the northern south China sea by drifter and satellite observations, Journal of Geophysical Research, 113(C4), DOI: 10.1029/2007JC004542.
- Geisler, J.E., 1970. Linear theory of the response of a two layer ocean to a moving hurricane,

- Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, 1(1-2): 249-272.
- Jaimes, B., and Shay, L.K., 2009. Mixed layer cooling in mesoscale oceanic eddies during hurricanes Katrina and Rita, *Monthly Weather Review*, 137(12): 4188-4207.
- Qiu, B., 1999. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific Subtropical Countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory, *Journal of Physical Oceanography*, 29(10): 2471-2486.
- Rabinovich, A.B., Thomson, R.E., and Bograd, S.J., 2002. Drifter observations of anticyclonic eddies near Bussol' Strait, the Kuril Islands, *Journal of oceanography*, 58(5): 661-671.
- Richardson, P.L., 1983. Eddy kinetic energy in the North Atlantic Ocean from surface drifters, *Journal of Geophysical Research*, 88(C7): 4355-4367.
- Sun, L., Yang, Y.J., and Fu, Y.F., 2009. Impacts of typhoons on the Kuroshio large meander: observation evidences, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2(1): 45-50.
- Sun, L., Yang, Y.J., Xian, T., Wang, Y., and Fu, Y.F., 2012. Ocean responses to typhoon Namtheun explored with Argo floats and multiplatform satellites, *Atmosphere-Ocean*, 50(sup1): 15-26.
- Sun, L., Li, Y.X., Yang, Y.J., Wu, Q., Chen, X.T., Li, Q.Y., and Xian, T., 2014. Effects of super typhoons on cyclonic ocean eddies in the western North Pacific: A satellite data-based evaluation between 2000 and 2008, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 119(9): 5585-5598.
- Wyrski, K., Magaard, L., and Hager, J., 1976. Eddy energy in the oceans, *Journal of Geophysical Research*, 81(15): 2641-2646.
- Xiu, P., Chai, F., Shi, L., Xue, H.J., and Chao, Y., 2010. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993–2007, *Journal of Geophysical Research-Ocean*, 115(C3), DOI: 10.1029/2009JC005657.
- Yang, Y.J., Sun, L., Liu, Q., Xian, T., and Fu, Y.F., 2010. The biophysical responses of the upper ocean to the typhoons Namtheun and Malou in 2004, *International Journal of Remote Sensing*, 31(17- 18): 4559-4568.
- Yuan, D., Han, W., and Hu, D., 2007. Anticyclonic eddies northwest of Luzon in summer–fall observed by satellite altimeters, *Geophysical Research Letters*, 34: L13610, DOI: 10.1029/2007GL029401.

Detecting Cyclonic Eddies Induced by Global Super Typhoons by Using Satellite Altimetry

Yi-Ting Cheng ¹Ruo-Shan Tseng ^{2*}Yu-Chia Chang ³Jau-Ming Chen ⁴

Abstract

This study analyzed data from satellite altimeter measurements, satellite-tracked surface drifters and global typhoons from 1993 to 2015 to investigate mesoscale cyclonic eddies induced by slow-moving super typhoons, defined as that the translation speed of typhoon is less than the phase speed of first baroclinic mode in that ocean. Our results show that among 22 slow-moving super typhoons found globally in this period, only seven typhoons produced or strengthened cyclonic eddies (3 in Northern Hemisphere, and 4 in Southern Hemisphere). Comparing to the averaged characteristics of eddies in open oceans, these typhoon-induced eddies had stronger intensity and longer lifespan, especially for the Northwestern Pacific and South Pacific Oceans. Take TC-Nida-eddy for instance, maximum current speeds of over 2 m/s, lifespan of 8 month, temperature drop of 4.5 °C and formation of upwelling were observed. A negative correlation is also found between eddy's EKE and TC's translation speed.

Keywords: Super Typhoon, Mesoscale Cyclonic Eddy, Satellite Altimetry, Surface Drifter, Absolute Dynamic Topography

¹ Graduate Student, Department of Oceanography, National Sun Yat-sen University

² Professor, Department of Oceanography, National Sun Yat-sen University

³ Post-Doctor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

⁴ Professor, Department of Maritime Information and Technology, National Kaohsiung Marine University

* Corresponding Author, Tel: 886-7-5252000 ext.5033, E-mail: rstseng@mail.nsysu.edu.tw

Received Date: Aug. 18, 2017

Revised Date: Nov. 16, 2017

Accepted Date: Dec. 14, 2017