2014 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

- 作品編號 170008
- 参展科別 地球與行星科學
- 作品名稱 西北太平洋颱風增強與上層海洋熱力結構 關係之長期變化
- 得獎獎項 大會獎:一等獎
 - 美國 ISEF 正選代表:美國第 65 屆國際科 技展覽會

- 就讀學校 臺北市立第一女子高級中學
- 指導教師 金若蘭、林依依
- 作者姓名 陳郁欣

關鍵字 颱風強度、上層海洋熱力結構、垂直風切

作者簡介



我是陳郁欣,目前就讀於台北市立第一女子高級中學三年良班。開始進行專題研究後,才發現地球科學真是一個廣大又奇妙的領域。在實驗的過程中,可以 學習各種分析方法,也能多吸收一些有趣的知識,讓我有了大大的收穫和成長。 謝謝一路上幫助我的師長、父母和同學們,讓我能有這樣的機會接觸科學,也體 會其中樂趣!

西北太平洋颱風增強與上層海洋熱力結構關係之長期變化

摘要

近年來的研究(Pun et al.2013)指出,西北太平洋颱風主要發展區的海洋熱力條 件有越來越溫暖的趨勢。本研究透過分析 1993-2011 年 7-10 月,在 120-170°E 北 部 (19-26°N)及南部 (10-19°N)颱風主要發展區增強的 category1-5 颱風,觀察並分 析其長期以來所行經之海表面溫度、海洋暖水層熱力狀況及垂直風切與颱風強度 的關係。

比較後發現,長期以來,北部海域颱風的強度受風切影響較大,呈現減弱的 趨勢;而南部海域颱風的強度則受海洋熱力條件影響較大,呈現增強的趨勢。根 據擴大分析熱力條件影響較大的南部颱風主要發展區(1993-2012,4-21°N)的結果 顯示,生成於此海域的颱風個案,長期以來所行經海洋的暖水層有增厚的現象, 研判其為造成本區域颱風增強的重要因素。

Abstract

The Western North Pacific Ocean is the most active and hazardous tropical cyclones (TCs) region in the world. Each year, 20-30 TCs (also called typhoons) impose severe threats to a billion population and mega volume (US \$5 billion per year, Peduzzi et al. 2012) of economical activities in Asia. It is thus of great importance to examine the long-term variability of these TCs.

In this research, I examined 21 years (1993-2013) of TC records over the Western North Pacific TC Main Development Region (MDR, 4–19°N, 122–170°E). It was found that there is an ongoing increase in typhoon intensity and the averaged intensity has increased by 26 %. Also, in November 2013, a record-breaking supertyphoon, Haiyan, was observed. Haiyan's peak intensity reached 170 kts, an astonishing high intensity ever observed in the global TC records. Haiyan subsequently devastated the Philippines with more than 6000 lives claimed and economic loss of \$US 1.5 billion.

The possible environmental atmospheric and ocean factors which contribute to such increase in intensity are examined. The three most important factors to TCs intensification were examined, namely the atmospheric vertical wind shear, sea surface temperature and subsurface warm layer thickness (depth of the 26°C isotherm). It was found that the subsurface warm layer was the most important factor to favor the intensification of super typhoon Haiyan and the averaged increase in typhoon intensity. As the Western North Pacific MDR is undergoing significant warming (Pun et al. 2013), there is an increase in energy supply for TC intensification.

壹、研究動機

西北太平洋是最多颱風生成與增強的海域,而颱風頻繁的侵襲,也對其周圍 人口稠密的亞洲地區造成了嚴重的災害和損失(圖1),因此颱風警報系統的改善更 顯重要。近30年來,全球對於熱帶氣旋(tropical cyclone)路徑預報的準確性越來越 高,但對於颱風強度預報的準確性卻沒有顯著的提升。各式各樣的因素都可能影 響颱風強度,其中包括大氣條件、颱風結構以及海洋條件等,而上層海水熱力狀 況對颱風強度變化的影響,是目前還沒有被深入探討及應用的部分。

1990 年代衛星測高儀的升空,讓我們有機會去了解海面下的海水狀況,前人 (Pun et al. 2007)利用雙層模式與海面高度差異(sea surface height anomalies, SSHA) 數據資料,建構上層海洋的熱力結構,也計算海洋暖水層相關參數,包括海溫 26℃ 等深線 (D26)、上層海水熱含量 (UOHC, upper ocean heat content)、海面至深度 100 公尺海水的平均溫度 (T100)。其中,26℃以上的海溫是有利於颱風增強的溫 度,因此我們可以用海溫 26℃ 等深線(D26)代表海洋的暖水層厚度。這樣的方式, 讓我們在海表面溫度(SST, sea surface temperature)之外,得以較準確地獲得上層海 水的相關熱力資訊,並進行分析與研究。

Pun et al. 2013 中提到,西北太平洋颱風主要發展區(Main Development Region, MDR),熱力影響所造成的海面高度差異(SSHA)數值(經測量地球重力場變化的 Grace 衛星校正後之數值),在過去 20 年來呈現上升的趨勢,並且整個海域平均的 暖水層厚度也有增厚的情形,代表海洋熱力條件在長期以來有越來越溫暖的趨勢 (圖 2)。同時,西北太平洋颱風主要發展區的海面高度,在長期以來是全球上升最 明顯的海域,表示其變暖幅度約為平均值的4倍(圖 3),因此,本研究希望檢驗長 期以來,颱風在增強過程中所行經海洋之熱力條件是否變暖?如果所行經海洋之 熱力條件確實較溫暖,是否有助於颱風的增強?並希望進一步探討除了目前較常 被使用的大氣因素和海表面溫度(SST)等條件外,上層海洋熱力狀況對於颱風強度

1



圖 1 2010 年熱帶氣旋侵襲頻率及造成傷亡程度比較圖。Peduzzi et al. 2012 中 提到,西北太平洋(黑色方框處)是全球颱風侵襲頻率最高、造成人員傷亡最嚴重 的地區。



圖 2 (a)西北太平洋颱風主要發展區之 SSHA 數值長期變化圖;(b)西北平洋颱風 主要發展區之暖水層厚度長期變化圖 (Pun et al .2013)。影響衛星遙測所取得之海 面高度差異數值(SSHA)的因素有兩種,分別是地球的重力場變化以及熱力造成海 水體積的熱脹冷縮。而 26℃以上的海溫是有利於颱風增強的溫度,因此我們可以 用海溫 26℃等溫線代表海洋的暖水層厚度。Pun et al .2013 中發現西北太平洋 10-26°N, 122-170°E 海域的平均海洋海面高度差異(SSHA)在利用測量地球重力場變 化量的 Grace 衛星校正後,熱力條件所造成的海面高度差異數值長期以來仍呈現 上升趨勢,如圖(a)所示,並且(b)圖中海溫 26℃等深線(D26)在長期以來也有上升 的情形,代表西北太平洋的海洋熱力條件越來越溫暖。



圖 3 1993-2009 年全球海面平均每年上升高度比較圖。圖中呈現出 1993-2009 年間,西北太平洋颱風主要發展區 (圖中紅色方框處)的海面高度每年約上升 12mm (已扣除全球平均每年上升的 3mm),增加幅度為全球最大。(Cazenave, A., and F. Remy, 2011)

貳、 研究目的

影響颱風增強的因素可以分為大氣狀況、海洋條件及颱風本身的結構三個部 分。一般而言,越溫暖的海洋條件及越小的垂直風切,越有助於颱風的增強。而 從參考文獻中可以發現,西北太平洋整體的海洋熱力狀況在長期以來有越來越溫 暖的趨勢,因此我希望觀察這樣的長期變化對颱風強度的影響,同時以垂直風切 來檢驗颱風所受之大氣動力條件的變化情形。因此本研究的研究目標有以下兩 項:

- 一、初步分析:將西北太平洋颱風主要發展區(MDR)依照海洋熱力性質的不同分為兩個部份(南部颱風主要發展區:10-19°N, 120-170°E;北部颱風主要發展區: 19-26°N, 120-170°E),分別觀察海洋熱力條件、垂直風切和颱風強度在 1993-2011年間的長期變化,並比較兩種因素與颱風強度間的關係。
- 二、深入分析:擴大並深入分析颱風強度受海洋熱力條件影響較顯著的南部颱風 主要發展區 (4-21°N, 120-170°E),觀察海洋熱力條件、大氣因素及颱風強度 的長期趨勢,考慮數據之統計意義,並歸納出此區域內影響颱風強度的主要 因素。

參、研究設備及器材

- 一、 個人電腦
- 二、 使用軟體: Microsoft Word、Microsoft Excel、IDL、GrADS、GMT

肆、 研究過程與方法



圖 4 本研究之研究步驟流程圖

一、資料預備

(一) 選取颱風樣本

1. 地理與時間範圍

從參考文獻(Cazenave and Remy 2011 and Pun et al. 2013)中發現,長期 以來,西北太平洋颱風主要發展區(MDR)的海洋熱力狀況變化情形是 全球最顯著的,且該海域上層海洋的平均熱力狀況也呈現越來越溫暖 的趨勢,因此,研究中我先依照海洋熱力性質的不同,將西北太平洋 颱風主要發展區(MDR)分為海洋渦漩(尺度較小)數量豐富的北部颱風 主要發展區(north MDR,120-170°E,19-26°N,以下簡稱為北部海域)以 及屬於大尺度海洋熱力變動的南部颱風主要發展區(south MDR, 120-170°E,10-19°N,以下簡稱為南部海域)(圖 5),分別觀察 1993-2011 年7-10月間在此兩海域生成之颱風,所受到的海洋熱力條件和垂直風 切與颱風強度間關係的長期變化。並依照觀察結果,進一步分析受熱 力條件影響較大的南部颱風主要發展區,且將範圍擴大為 1993-2012 年7-10月,在120-170°E,4-21°N(圖 6)間增強的颱風個案。



圖 5 西北太平洋颱風主要發展區 SSHA 分布圖。本研究第一部分將颱風樣本選取 區域分為屬於大尺度海洋熱力變動的南部颱風主要發展區(120-170°E, 10-19°N)和 海洋渦漩數量豐富的北部颱風主要發展區(120-170°E, 19-26°N)。



圖 6 1993-2009 年全球海面平均每年上升高度比較圖。本研究第二部分擴大分析 之颱風樣本選取區域,為西北太平洋南部颱風主要發展區(south MDR) 120-170°E, 4-21°N(圖中紅色方框處)。

2. 颱風強度選取

本實驗以 JTWC(Joint Typhoon Warning Center)的颱風強度標準 (Saffir-Simpson hurricane wind scale)做為個案選取依據。選擇於上述範 圍內增強的 Category1-5 颱風。表1為分級標準比較與單位換算表。 (1knot=1.85km/h)

表1 中央氣象局颱風分級與本研究所採用之 Saffir-Simpson 颱風分級對照表

Category	1	2	3	4	5			
(美國)	119 ~ 153km/h 64 ~ 82 kt	154 ~ 177km/h 83 ~ 95 kt	178 ~ 209km/h 96 ~ 113 kt	210 ~ 249km/h 114 ~ 135 kt	> 249 km/h > 135 kt			
中央 氣象局	中度 118 - 183 km/	颱風 /h;64 - 99 kt	 強烈颱風 ≧184 km/h;≧100 kt					

(二)海洋資料處理

1. 觀測數據來源

採用 JTWC(Joint Typhoon Warning Center)最佳路徑(best-track data)資料,及台灣大學衛星遙測實驗室提供之海洋相關衛星資料(SST:TRMM satellite;SSHA:TOPEX/Poseidon(從1993年開始)、JASON-1(從2002年開始)),每項資料均為每6小時一筆。

2. 選擇數據日期

為了取得還未被颱風干擾的海水各項性質數據,本實驗選擇各颱風個 案強度到達 category1 的最早時間(簡稱 first category1)兩天前的數據。

3. 海洋熱力條件

本實驗中,以颱風增強期間行經海水的 SST、D26、UOHC、SSHA 與 T100,做為海洋熱力條件之判斷依據。各項代號之說明如下:

- (1) SST(℃): sea surface temperatures,海表面溫度。
- (2) D26(m): the depths of the 26℃ isotherm,海溫 26℃等深線。代表 暖水層厚度。
- (3) SSHA(cm): sea surface height anomalies,海面高度差異。用以換 算暖水層相關數據。
- (4) UOHC(kj): upper ocean heat content, 上層海水熱含量。
- (5) T100(℃): temperature at 100m depth,海面至深度 100 公尺海水之
 平均溫度。
- 4. 各項海洋資料計算及處理方式

將海表面溫度(SST)和海面高度差異(SSHA)的衛星測高資料,利用 IDL(Interface description language)軟體與參考資料(Pun et al. 2007)中的 雙層模型(圖7),計算出海溫26℃等深線(D26)、上層海水熱含量(UOHC) 和海面至深度 100 公尺海水之平均溫度(T100)的數據資料,並整理成 表格。 **(a)**



圖 7 海洋熱力參數計算方式及相關定義示意圖。(a)海洋熱力參數計算方式與(b) 相關定義 (SST 與 SSHA 為衛星測高資料) (Pun et al. 2007) 5. 颱風生命期之定義

實驗中以風速判斷颱風強度,並將其生命期定為三個階段(圖8)。

- (1) 增強期間:颱風風速到達 categoryl 的第一筆資料(簡稱 first 1)至 其到達最大風速的第一筆資料(簡稱 peak category)為個案之增強 期間。
- (1) 最大風速期間:颱風最大風速保持在最大風速之期間。
- (2) 減弱期間:颱風風速為最大風速的最後一筆資料至其風速為 category1的最後一筆資料為個案之增強期間。計算減弱期間數據 時,去除碰到陸地及26°N以北之資料。



圖 8 颱風生命期依風速變化情形分為三個階段

(三) 繪製海面高度差異及颱風路徑疊合圖:

實驗中利用 GrADS(Grid Analysis and Display System)繪出範圍包含 120-170°E, 4-26°N, 與颱風最佳路徑資料(best track data)疊合的海面高度 差異(SSHA)圖, 觀察颱風個案行經海洋的 SSHA 分布狀況。

(四) 風切資料選取與計算:

本研究的風切資料為採用歐洲中期天氣預報中心(ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)的再分析風場資料(解析度: 1.125°×1.125°)以計算垂直風切(vertical wind shear, VWS)。

(五) 製作颱風個案海洋熱力狀況、垂直風切及風速資料統整表:

以颱風個案為單位,標示其年份、編號、風速與生命期,將上述海洋與 垂直風切資料整理成表格,方便分析比較與紀錄時使用。經統計, 1993-2011 年間,7-10 月在西北太平洋 120-170℃,10-26°N 間增強的 category1-5 颱風個案,共有 139 例;1993-2012 年間,7-10 月在西北太平 洋 120-170℃,4-21°N 間增強的 category1-5 颱風個案,共有 77 例。

二、分析比較

(一) 年度個案數

分別統計1993-2011年,7-10月間,在西北太平洋120-170°E,10-19°N(south MDR)及19-26°N(north MDR)和1993-2012年,7-10月間,在西北太平 洋120-170°E,4-26°N間增強的 category1-5 颱風個案數目,製成表格。

(二)海洋熱力條件

以颱風個案之海溫 26℃等深線(D26)、上層海水熱含量(UOHC)、海面至 深度 100 公尺海水之平均溫度(T100)、海表面溫度(SST)和海面高度差異 (SSHA),做為海水熱含量的比較依據。由於 D26、UOHC 及 T100 都是由 SSHA 換算而成的上層海水相關數據,在研究結果中長期以來有相同的變 化趨勢,因此報告中僅呈現 D26 之比較圖表來代表海洋暖水層之熱力狀 況,而海表面溫度資訊則以 SST 代表。

(三) 颱風強度的三種判斷依據

本研究根據以下三種判斷依據,分別討論颱風強度與其他參數間關係

1. 颱風所達之最大風速(簡稱 peak)

2. 颱風增強或減弱期間平均風速(簡稱 average during increase/decay)

3. 颱風增強或減弱期間每12小時風速變化量(簡稱 increase/decay)

由研究結果中可以發現以上三者在長期以來均呈現相同的變化趨勢,因此報告中僅以平均風速的比較圖表來代表颱風強度的變化情形。

(四)海面高度差異(SSHA, sea surface height anomalies)大小對颱風增強之影響

影響海面高度差異(SSHA)數值的因素主要有地球重力場及海水的熱 脹冷縮兩種,在低緯度地區,海面高度差異(SSHA)主要是受到熱力造成 的海水體積改變影響。。而 Lin et al.2008 中,利用浮球實測 SSHA 數值 為正的海域,發現該地點之海溫 26℃等溫線深度較整個海域的背景平均 值深,代表暖水層較厚的海洋狀況。(圖 10) 因此,在西北太平洋颱風主 要發展區,我們可以利用海面高度差異(SSHA)來判斷颱風所行經海洋的 熱力狀況。海面高度會因為海水溫度不同造成的體積不同而有差異。一 般來說,較高溫的海域,海面高度會較高,代表暖水層較厚的海域,而 較低溫的海域,海面高度則較低,代表暖水層較薄的海域。

- SSHA 為正:代表溫度較高的區域,圖中以紅色表示。顏色越深,高度差異越大。在研究中的北部颱風主要發展區(120-170°E,19-26°N),將 SSHA 數值大於 6 公分的海域稱為暖渦,是屬於較小尺度的海洋熱力分布。(請見圖 9)
- 2. SSHA 為負:代表溫度較低的區域,圖中以藍色表示。顏色越深,高度差異越大。在研究中的北部颱風主要發展區(120-170°E,19-26°N),將 SSHA 數值小於-6 公分的海域稱為冷渦,是屬於較小尺度的海洋熱力分布(請見圖 9)
- 一般區域:海面高度與該海域平均值差異介於+6至-6公分之間,圖
 中以白色表示。(請見圖 9)

12



圖 9 海面高度差異與颱風路徑疊合圖。將颱風路徑疊合在 SSHA 數值分布圖上。





圖 11 颱風風切平均值計算範圍示意圖

圖10 SSHA為正的海域之浮球實測暖水層 厚度與背景平均值比較圖。

Lin et al.2008 中提到, SSHA 為正的海域(圖中紅線),其暖水層厚度較整個海洋的背景平均值(圖中黑線)來的深。

(五) 垂直風切(vertical wind shear, VWS)計算方法

以颱風為中心,計算半徑800公里到半徑200公里內(圖11中著黃色部分) 風場平均值,並根據此風場平均值於200百帕等壓面和850百帕等壓面 間之差做為颱風所受到的垂直風切。

- 將個案資料整理成一覽表,並利用整理好之數據繪製各種折線圖與趨勢線,觀察生成於西北太平洋颱風主要發展區的颱風個案,所行經海洋熱力狀況以及風切大小的長期趨勢。
- 分別比較 1993-2011 年間,南部颱風主要發展區(120-170°E,10-19°N)
 及北部颱風主要發展區(120-170°E,19-26°N)生成颱風之強度與海洋熱
 力條件及垂直風切間的關係。
- 3. 進一步觀察分析受海洋熱力條件影響較顯著的南部颱風主要發展區
 - (1)將南部颱風主要發展區之範圍擴大為1993-2012,120-170°E,4-21°N, 比較並歸納出影響颱風強度的可能因素。
 - (2)利用 T 檢定(T-test)來檢視所繪製趨勢線與實際情形的相關性,判別 其是否具有統計意義。
- 觀察二十年來,西北太平洋颱風主要發展區 category1-5 颱風生命期中, 颱風所行經海洋海水熱含量與風切數值之變化,討論海洋熱力及大氣 條件的對颱風強度的影響。

伍、研究結果

一般而言,海水越温暖、垂直風切越小,越有利於颱風的增強。

實驗中以海表面溫度(sea surface temperature, SST)、海溫 26℃等深線(D26)、 上層海水熱含量 UOHC)、海面至深度 100 公尺海水之平均溫度(T100)及海面高度 差異(SSHA),五種參數來代表海洋熱力條件,其中 D26、UOHC 及 T100 都是由 SSHA 換算而成的上層海水相關數據,所代表的意義相近,因此長期以來有相同的 變化趨勢。而颱風最大風速、颱風增強期間平均風速及颱風增強期間每 24 小時風 速增加量,這三種颱風強度的判斷依據也呈現相同的變化情形。因此,以下僅以 代表**海表面資訊的 SST、**代表**暖水層厚度**的 D26 作為海洋熱力條件變化的代表, 並以**垂直風切(VWS)** 代表大氣動力條件的變化,並將這兩種影響颱風強度的重要 因子與**颱風平均風速**進行比較,以得出不同影響因子之長期變化與颱風強度間的 關係。

- 一、將西北太平洋颱風主要發展區(MDR),依照海洋熱力性質的不同,分為海洋 渦漩數量豐富的北部颱風主要發展區(north MDR, 120-170°E, 19-26°N)及屬 於大尺度海洋熱力變動的南部颱風主要發展區(south MDR, 120-170°E, 10-19°N),分別觀察在兩海域內生成之颱風個案,長期以來所受到的海洋熱 力條件及垂直風切與增強期間颱風強度的關係。
 - (一)將 1993-2011 年各年度 category1-5 颱風的個案數目進行調查與統計後結 果如表2。
 - 由表2可知,第一部分研究期間與區域範圍之個案共有139例。各年度7-10月於本研究範圍(120-170°E,10-26°N)間增強的颱風數目不盡相同,北部海域平均每年有大約3.4 個颱風,南部海域每年平均颱風數量較多,將近4個。至於此兩個研究分區中皆以 category4 的個案數目最多。

		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	總和
	C1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	1	0	1	0	0	8
北	C2	0	1	1	0	0	0	0	0	3	0	0	2	1	1	0	2	0	1	0	12
部	C3	1	1	1	2	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	10
海	C4	1	2	0	0	1	1	0	2	2	3	1	0	4	1	2	2	0	1	1	24
域	C5	0	0	1	2	1	0	1	1	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	11
	總和	2	4	3	6	2	2	2	4	6	6	3	3	6	4	3	4	1	3	1	65
	C1	2	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	0	1	8
南	C2	0	0	1	2	2	1	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0	1	0	0	11
部	C3	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	5
海	C4	2	6	1	3	0	1	0	1	0	1	2	3	0	2	2	0	1	0	2	27
域	C5	1	1	1	1	4	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	3	1	2	23
	總和	5	8	3	6	7	3	1	3	3	2	5	5	3	4	3	2	5	1	5	74

表 2 1993~2011 年西北太平洋颱風主要發展區各年度不同颱風等級個案數目統計 表。

(二)比較颱風強度與海洋熱力條件及垂直風切間的關係

- 分析北部颱風主要發展區(19-26°N)生成之颱風個案年度海洋熱力狀況及垂直風切(VWS)對颱風強度的影響。
 - (1) 由圖 12-14 的綠色折線可以看出,北部海域颱風個案的增強期間平 均風速長期以來呈現下降的趨勢。
 - (2) 由圖 12 可以看出,北部海域颱風個案增強過程中所行經海洋的海 表面溫度(SST)長期以來呈現上升情形。
 - (3) 由圖 13 可以看出,D26 長期以來有些微增加的趨勢,代表颱風行 經海洋之暖水層厚度有增加趨勢。
 - (4) 由圖 14 可以看出,颱風增強過程中所受到的垂直風切在長期以來 有些微上升的趨勢,其中在風切最大的 2009 年,颱風平均風速為 最小。



圖 12 颱風平均風速(綠色曲線)與 SST (紫色曲線)之變化圖。



圖 13 颱風平均風速(綠色曲線)與 D26(紫色曲線)之變化圖。



圖 14 颱風平均風速(綠色曲線)與垂直風切(紫色曲線)之變化圖。

- 分析南部颱風主要發展區(10-19°N)生成之颱風個案年度海洋熱力 狀況及垂直風切(VWS)對颱風強度的影響。
 - 由圖 15-17 的綠色折線可以看出,南部海域颱風個案的增強期 間平均風速長期以來呈現上升的趨勢。
 - (2) 由圖 15 可以看出, 颱風個案增強期間所行經海洋的海表面溫度

(SST)長期以來呈現微幅的下降趨勢。

- (3) 由圖16可以看出,D26長期以來呈現明顯的上升趨勢,近幾年 來維持在較深的深度,代表暖水層厚度增加。
- (4) 由圖 17 可以看出,颱風增強過程中受到的垂直風切(VWS)長期 以來呈現上升的情形。



圖 15 颱風平均風速(綠色曲線)與 SST (紫色曲線)之變化圖。



圖 16 颱風平均風速(綠色曲線)與 D26(紫色曲線)之變化圖。



圖 17 颱風平均風速(綠色曲線)與垂直風切(紫色曲線)之變化圖。

(三) 觀察南部及北部颱風主要發展區之海洋熱力分布情形

- 北部颱風主要發展區(19-26°N)是海洋渦漩數量豐富的地區,可以根據 海洋渦漩來代表颱風增強過程中行經海洋的熱力狀況。其中,暖渦代 表海面高度高於背景平均值6公分以上的海域,代表較溫暖的海洋狀況,海洋暖水層也較厚,而冷渦則是海面高度低於背景平均值6公分 以上的海域,代表較低溫的海洋狀況,海洋暖水層較薄。
 - (1) 由圖 18 可以看出,北部海域颱風個案增強過程中行經暖渦所佔的 距離百分比長期以來呈現上升的情形,而行經冷渦所佔的距離百 分比則明顯下降。



圖 18 北部(19-26°N)海域颱風行經暖渦距離 (紅色折線)與行經冷渦距離 (藍色折線)佔增強期間總路徑百分比長期變化圖。

- 2. 由於南部颱風主要發展區(10-19°N)是較易受到聖嬰現象等條件影響的 大尺度海洋熱力分布區域,研究中以 SSHA 數值來觀察海洋暖水層之分 布情形。當 SSHA 為正且數值越大,海面高度差異越大,暖水層越厚; 當聖嬰現象越強,則聖嬰指數(Oceanic Niño Index, ONI)數值越大。
 - (1) 由圖 19 可以看出,在聖嬰現象較明顯的年分,南部海域颱風個案 增強期間所行經海洋的 SSHA 數值會較小。



圖 19 南部(10-19°N)海域颱風行經海洋之 SSHA 數值與 ONI 聖嬰指數比較圖

- 二、由上述的比較可以發現在西北太平洋南部颱風主要發展區,颱風增強過程所 行經的上層海洋熱力狀況確實有越來越溫暖的情形,而這樣的暖水層條件似 乎真的有助於颱風增強。於是,我將此範圍擴大為屬於大尺度海洋熱力分布, 並且適宜颱風生成的 120-170°E,4-21°N,進一步觀察 1993-2012 年 7-10 月 間生成於此海域之颱風個案,在生命期的三個階段(增強、最大風速及減弱期 間)之颱風強度與海洋熱力條件及垂直風切關係的長期趨勢,計算各項因素的 變化幅度,並利用T檢定來檢測數據之統計意義。
 - (一)將 1993-2012 年各年度 category1-5 颱風的個案數目進行調查與統計後結 果如表3。
 - 由表3可知,第二部分研究期間與區域範圍之個案共有77例。各年度 7-10月於本研究範圍(120-170℃,4-21°N)間增強的颱風數目不盡相同, 以 category4 的個案數目最多。

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	總和
C1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3
C2	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	6
C3	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	7
C4	2	8	1	2	0	1	0	1	0	3	3	3	0	1	2	1	2	0	2	0	32
C5	1	1	2	1	7	1	0	1	1	0	0	1	1	2	1	1	3	1	2	2	29
總和	3	10	3	5	10	2	1	2	4	3	4	5	1	4	3	3	6	1	4	3	77

表 3 1993~2012 年西北太平洋南部颱風主要發展區各年度不同颱風等級個案數目統計表。

(二)比較颱風增強期間平均風速與海洋熱力條件及垂直風切間的關係

- 由圖 20 可以看出,在西北太平洋南部颱風主要發展區生成的颱風個案, 增強過程中行經海洋的表面溫度(SST),長期以來有些微的下降趨勢。
- 由圖 21 可以看出, D26 長期以來有上升的趨勢,代表此區域內颱風增 強行經的海洋暖水層增厚。
- 3. 由圖 22 可以看出, 颱風增強過程中所受到的垂直風切有增強的情形。
- 4. 由圖 23 可以看出,長期以來,此區域內增強的颱風個案之增強期間平 均風速有增大的趨勢。
- 由表4可以看出,近20年來SST沒有明顯增減、變化幅度幾乎為0, D26則增厚約10%,颱風所受到的垂直風切也顯著增加。



圖 20 1993-2012 颱風增強期間行經海洋之 SST 折線變化圖。



圖 21 1993-2012 颱風增強期間行經海洋之 D26 折線變化圖。 (趨勢線通過 95%統計檢定)



圖 22 1993-2012 颱風增強期間所受到的垂直風切(VWS)折線變化圖。 (趨勢線通過 90%統計檢定)



圖 23 1993-2012 颱風增強期間平均風速折線變化圖。 (趨勢線通過 95%統計檢定)

颱風增強期	颱風增強期間各項因素前後10年變化幅度比較表										
	1993-2000	2001-2012	幅度(%)								
SST(℃)	29.41	29.26	0								
D26(m)	95	107	12								
VWS(m/s)	3.4	5.3	56								
SSHA(cm)	0	7									
UOHC(kj)	105	108	3								
T100(°C)	28.32	28.41	0								

表 4 1993-2000 年及 2001-2012 年颱風增強期間各項數據變化幅度比較圖。

(三)觀察颱風最大風速期間及減弱期間所受到的海洋熱力條件及垂直風切長 期變化幅度

本研究中,颱風個案生命期各階段的海洋熱力相關數據會因為碰到 陸地而無法取得或位置過北而使其準確性下降,造成可計算之颱風個案 數目減少,因此此部份之分析較不具有統計意義,以下僅以表格呈現研 究結果。

由表5可以發現,雖然最大風速期間的個案數目較少,長期的變化趨勢較不具客觀意義,但仍可發現颱風所行經的海洋之暖水層狀況在研究時間範圍內有增暖的趨勢。

表 5 1993-2000 年及 2001-2012 年颱風最大風速期間各項數據變化幅度比較圖。

颱風最大風速期間各項因素前後10年變化幅度比較表								
	1993-2000	2001-2012	幅度(%)					
SST(℃)	29.39	29.11	-1					
D26(m)	83	90	8					
VWS(m/s)	3.1	4.9	58					
SSHA(cm)	0	6						
UOHC(kj)	92	89	-3					
T100(°C)	27.91	27.90	0					

2. 由表 6 可以發現,雖然颱風減弱期間的個案數目較少,長期變化趨勢

較不具客觀意義,但颱風所行經海洋的暖水層仍有增厚的趨勢。

颱風減弱期間各項因素前後10年變化幅度比較表										
	1993-2000	2001-2012	幅度(%)							
SST(℃)	28.96	28.65	-1							
D26(m)	66	77	17							
VWS(m/s)	4.5	4.8	8							
SSHA(cm)	1	7								
UOHC(kj)	64	67	5							
T100(°C)	27.01	27.26	1							

表 6 1993-2000 年及 2001-2012 年颱風減弱期間各項數據變化幅度比較圖。

陸、討論



圖 24 研究範圍與相關比較結果

- 一、由表2和表3統計可知1993-2012年間,每年度7-10月於西北太平洋120-170°E, 4-26°N 間增強的颱風數目各不相同。推測因颱風路徑受大氣與海洋動力狀況 所影響,使每年的行經路徑情形與生成個案數目有所差異。
- 二、將西北太平洋颱風主要發展區(120-170°E)分為北部(19-26°N)及南部(10-19°N) 兩部分,分別觀察颱風增強期間行經之海洋熱力條件、垂直風切與颱風強度 間的關係:
 - (一)由圖12到圖14可知,1993-2011年以來,西北太平洋北部海域(120-170°E, 19-26°N) 颱風的平均風速呈現下降的趨勢,雖然此區域颱風行經的海洋 熱力條件有越來越溫暖的趨勢,但颱風所受到的垂直風切在此區域卻有 些微增強,因此推測在此海域,垂直風切對颱風強度產生的不利影響大

於海洋熱力條件提供的有利條件,故造成颱風強度的下降。

- (二)由圖15到圖17可知,1993-2011年以來,西北太平洋南部海域(120-170°E, 10-19°N) 颱風的平均風速呈現上升的情形,在此同時,該區域之海洋熱 力條件也有越來越溫暖的趨勢,雖然此區之同樣時間下,颱風所受到的 垂直風切越來越大,但颱風強度仍有增強的趨勢,因此推測在此區域內, 颱風的強度受到海洋熱力條件的影響更為顯著。
- (三)綜合以上兩點結果,我們可以知道,風切對於北部海域(19-26°N)颱風的 強度影響較大,而海洋熱力條件則對南部(10-19°N)海域颱風之強度有較 大的影響。
- 三、分別觀察北部颱風主要發展區(19-26°N)及南部颱風主要發展區(10-19°N)不 同性質的海洋熱力分布情形:
 - (一)由圖18可知,在海洋渦漩數量豐富的北部海域,颱風個案行經暖渦距離 佔增強期間總路徑的百分比長期以來呈現上升的趨勢,而行經冷渦所佔 的距離百分比則明顯下降。推測是因整體海洋變得越來越溫暖,使颱風 行經海洋的熱力狀況也越來越溫暖。
 - (二)在屬於大尺度海洋熱力分部的南部海域,颱風個案每年所行經海洋的 SSHA 數值不盡相同,因此我將其與可代表聖嬰現象明顯程度的 ONI 聖 嬰指數作比較。由圖 19 可知,在聖嬰現象較明顯的年份,當年在研究範 圍內的颱風個案所行經海洋之 SSHA 數值較小,推測因為聖嬰現象產生, 會使得海洋暖水層東移,造成較西部的太平洋之暖水層厚度變薄。
- 四、進一步分析颱風強度受海洋熱力條件影響較顯著之南部颱風主要發展區,並 將範圍擴大為120-170°E,4-21°N:

(一)觀察颱風增強期間,颱風強度與海洋熱力條件及垂直風切間的關係

- 由圖 20 及表 4 可知,此海域之颱風個案長期以來所行經海洋的表面溫 度有下降趨勢,但變化幅度近乎 0。
- 由圖 21 及表 4 可知,此海域颱風個案增強期間所行經海洋的暖水層厚 度長期以來上升約 10%,代表海洋熱力條件越來越溫暖。
- 3. 由圖 22 可知,南部颱風主要發展區生成之颱風個案在增強期間所受到的垂直風切長期以來有增強的趨勢。Li et al. 2012 中提到,北太平洋的夏季副熱帶高壓有越來越強的趨勢,推測可能是低層的副熱帶高壓增強造成垂直風切增大。
- 由圖 23 可知,在此區域內增強的颱風個案,增強期間平均風速長期以 來有上升的趨勢,代表颱風強度增強。
- 5. 由上述四點討論可知,在西北太平洋南部颱風主要發展區,長期以來 颱風個案增強時所行經的海表面溫度(SST)沒有明顯增減(圖 20)、暖水 層增厚(D26)(圖 21)、垂直風切增強(圖 22),而颱風強度增強(圖 23)。 推測在此海域,颱風的強度確實受到越來越溫暖的上層海洋熱力狀況 影響而增強。

(二)觀察颱風最大風速及減弱期間,所受到海洋熱力條件及垂直風切狀況

 由於在颱風生命期的這段時間,颱風往往會碰到陸地或位置過北,因 此可取得資料的個案數目會較少,因此,本研究中關於在颱風最大風 速及減弱期間的統計資料較不具有客觀意義,僅以表5及表6呈現前 後十年之數據變化情形。日後可進行進一步的觀察與討論。

柒、 結論

本研究對於過去 20 年(1993-2012)影響台灣及週邊地區(120-170°E, 4-26°N)的 西北太平洋颱風的強度變化進行分析,發現此區域之颱風強度變化及造成其變化 的因素推論如下:

- 一、北部海域(19-26°N)海洋熱力條件自 1993 年以來有漸暖的趨勢,但颱風強度 卻漸減,推測北部海域(19-26°N)越來越大的垂直風切對颱風強度的影響較顯 著。
- 二、南部海域(10-19°N)垂直風切長期以來有些微的上升趨勢,但颱風強度與海洋 熱力條件呈現一致的上升趨勢,推測南部海域(10-19°N)颱風強度受到海洋熱 力條件的影響較大。
- 三、擴大觀察受海洋熱力條件影響較顯著的南部颱風主要發展區(120-170°E, 4-21°N),可知颱風個案確實有行經熱力條件越來越溫暖的海洋,並且較溫暖 的暖水層熱力狀況有助於颱風增強。
- 四、長期以來南部颱風主要發展區(120-170°E,4-21°N)之颱風個案,所行經海洋 的海表面溫度(SST)變化幅度不大,而暖水層厚度卻明顯增厚,推測暖水層熱 力狀況對颱風強度的影響較海表面溫度大。

捌、未來展望

除海洋熱力條件與風切大小之外,颱風的強度也可能受其他因素影響。推測 其他可能的因素有:生成位置的條件、各式氣候現象的影響、未知的因素與颱風 移動速度等等。未來除了增加本研究中的資料分析方式的準確性外,還可以利用 模擬找出颱風增強與海洋、大氣等各種參數間的相關性,完整歸納出颱風強度的 影響因素。

玖、參考資料

- Cazenave, A., and F. Remy (2011). Sea level and climate: Measurements and causes of changes [Abstract]. *Wires Climate Change*, 2, 647–662.
- Frank, William M., Elizabeth A. Ritchie. (2001). Effects of Vertical Wind Shear on the Intensity and Structure of Numerically Simulated Hurricanes [Abstract]. *Monthly Weather Review*, Vol. 129, p. 2249–2269.
- Li, Wen-hong, Lai-fang Li, Ming-fang Ting & Yi-min Liu. (2012). Intensification of Northern Hemisphere subtropical highs in a warming climate [Abstract]. *Nature Geoscience* 5, 830–834, doi:10.1038/ngeo1590
- 四、 Lin, I I, Chun-Chieh Wu, Kerry Emanuel, I-Huan Lee, Chau-Ron Wu, and Iam-Fei Pun. (Sep. 2005). The interaction of Supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy [Abstract]. *Monthly Weather Review*, p. 2635-2649, doi: 10.1175/MWR3005.1,
- 五、Lin, I I, Chun-Chieh Wu, Iam-Fei Pun, and Dong-Shan Ko. (Sep. 2008).
 Upper-Ocean Thermal Structure and the Western North Pacific Category 5
 Typhoons. Part I: Ocean Features and the Category 5 Typhoons' Intensification.
 Monthly Weather Review, Vol. 136, p. 3288-3306, doi: 10.1175/2008MWR2277.1,
- Peduzzi, P., B. Chatenoux, H. Dao, A. De Bono, C. Herold, J. Kossin, F. Mouton & O. Nordbeck. (2012). Global trends in tropical cyclone risk [Abstract]. *Nature Climate Change*, 289–294, doi:10.1038/nclimate1410
- セ、 Pun, I. F., I-I Lin, C. -R. Wu, D. -S. Ko, W. -T. Liu. (Jun. 2007). Validation and

Application of Altimetry-derived Upper Ocean Thermal Structure in the Western North Pacific Ocean for Typhoon Intensity Forecast. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45, No. 6, p. 1616-1630, doi: 10.1109/TGRS.2007.895950,

- N Pun, I. F., I-I Lin, and Min-Hui Lo. (Sep. 2013). Recent Increase in High Tropical Cyclone Heat Potential Area in the Western North Pacific Ocean, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/grl.50548, 3
- 九、ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, http://www.ecmwf.int/
- + JTWC : Joint Typhoon Warning Center, <u>http://www.usno.navy.mil/JTWC/</u>
- +- Remote Sensing Systems : *Research-quality geophysical products from* satellite data, <u>http://www.ssmi.com/</u>
- + ∴ 、 UNISYS : Western Pacific Hurricane Tracking Data by Year from Joint Typhoon Warning Center Best Track Data , http://weather.unisys.com/hurricane/w_pacific/index.php
- 十三、 中央氣象局: http://www.cwb.gov.tw/V7/

Introduction

The western North Pacific Ocean is the most active and hazardous tropical cyclones (TCs) region in the world. Each year, 20-30 TCs may impose severe threats to the densely populated Asia (Fig. 1).

The launch of meteorological satellites in 1993 endows us an unprecedented view of the subsurface ocean. As record-breaking TCs (e.g. Megi 2010; Haiyan 2013) seem to appear more frequently (Table 1), this research aims to examine change in WNP TC intensity in the past 2 decades.



Fig. 1 Tropical cyclones during 1945-2006 (From: Citynoise at en.wikipedia)

 Table 1
 Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale

	Wind speed	knots	mph	m/s	
T	ropical Depression	< 34	<39	<17	
	Tropical Storm	34-63	39-73	18-32	
(Y)	1 }19	kts 64-82	74-95	33-42	
in US	2 (Sandy 2012)	83-95 kts	96-110	43-49	
ane	3 }18	kts 96-113	111-129	50-58	
Hurric	4 (Nargis 2008)	114-135 kts	130-156	59-69	
called	5 (Katrina 2005) _{}25}	>135 kts	>157	>70	
Typhoon (c	Cat 6 ? Megi 2010 Cat 7 ? Haiyan 2013	160 kts <i>kts</i> 170 kts			

Scientific Questions

- 1. Is there an increase in TC intensity over the WNP main development region (MDR)?
- 2. If so, what is the cause which contributed to such intensity increase?

Data and Methodology

A. Collecting tropical cyclone samples

Study domain: Main Development Region in the western North Pacific Ocean (MDR, 122-170°E, 4-19°N)

- Study period: July-November, 1993-2013
- Tropical cyclone: tropical depression (TD)/ tropical storm (TS)/ typhoon (TY, also called hurricane in the US) (Table 1)
- > Total case (record) number: 325 (5147) (Table 2)

Table 2Number of cases and records collected in MDR from 1993-2013

Num	Number of cases and records that collected in the MDR (including TD, TS, TY)										
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Tropical Depression	4	2	4	4	2	1	1	3	0	1	1
Tropical Storm	7	6	6	6	0	2	6	3	3	2	1
Typhoon	17	15	11	12	14	8	5	8	12	11	13
case number	28	23	21	22	16	11	12	14	15	14	15
record number	486	496	413	486	448	135	123	144	186	209	249
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Total
Tropical Depression	1	0	0	4	0	3	1	3	0	0	35
Tropical Storm	1	2	3	2	4	4	1	2	4	7	72
Typhoon	12	8	11	11	5	10	7	6	10	12	218
case number	14	10	14	17	9	17	9	11	14	19	325
record number	255	133	190	161	95	262	102	132	160	282	5147

> Observational Data Sets

- 1. Typhoon: Best-track data from the US JTWC (Joint Typhoon Warning Center)
- 2. Ocean: Sea Surface temperature from the Satellite microwave observations and

subsurface thermal condition derived from satellite altimetry (Pun *et al.* 2013). Mooring observations from the US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)'s Tropical Atmosphere Ocean (TAO) buoy.

 Atmosphere: ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Interim reanalysis data

B. Observing the long-term trend of TC intensity

Intensity definition: 1-min. averaged maximum sustained wind speed at every 6 hrs interval

C. Analyzing the environmental factors in TC intensification

The upper ocean thermal (SST & D26) and atmospheric (VWS) conditions along TC track were analyzed in this research.

Sea surface and subsurface conditions (Fig. 3) along TC track:

- 1. SST ($^{\circ}$ C): sea surface temperature
- D26 (m): the depth of 26°C isotherm and represent the thickness of subsurface warm layer



Fig. 3 Two parts of upper ocean thermal structure

Though SST is similar in the western North Pacific Ocean (WNP), D26 is much deeper in the MDR (Fig. 4 & 5).



Fig. 4 Distribution of (a) SST and (b) D26 in WNP (Lin et al. 2008)



Fig. 5 Pre-cyclone ocean temperature profiles in 3 different TC cases (Lin *et al.* 2013)



Fig. 6 (a) Steps that are involved in the calculation and (b) illustration of the method in retrieving upper ocean thermal profile (Pun *et al.* 2007)

 $\overline{h_1}$ is the mean climatological upper layer thickness (i.e., the climatological D20), ρ_1 and ρ_2 are the density of the upper (sea surface to 20°C isotherm) and lower (20°C isotherm to ocean bottom) layers, respectively and θ is a climatological ratio.

Atmospheric condition

VWS (m/s): vertical wind shear (m/s), the azimuthal average wind difference between 200 hPa (higher layer) and 850 hPa (lower layer) in a 200-800 km annulus around the tropical cyclone center (Fig. 7)



Fig. 7 Calculation of VWS (a)Area to calculate VWS is within the 200 - 800 km annulus. (b)VWS is the azimuthal average wind difference between higher layer (200 hPa) and lower layer (850 hPa).

TC-ocean coupled temperature (Tmix)

Modeling of Tmix based on input from the TAO mooring observations to the Price 2009 ocean model with input wind speed of 60 m/s.

> Air-sea enthalpy flux (W/m²): LHF + SHF

Use Tmix output by the Price 2009 model as new input to the bulk aero-dynamic formulae to calculate air-sea sensible and latent heat flux for TC intensification.

latent heat flux (LHF) = $C_E W(q_s - q_a)\rho_a L_{va}$

sensible heat flux (SHF) = $C_H W (T_{mix} - T_a) \rho_a C_{pa}$

 C_H and C_E are the sensible and latent heat exchange coefficients, W is the wind speed, T_{mix} and T_a are SST and near surface air temperature, q_s and q_a are surface and air specific humidity, ρ_a , C_{pa} , and L_{va} are air density, heat capacity of the air and latent heat of vaporization. (Lin *et al.* 2013)

Use T-test to get statistical significance of the trend

Results and Discussion

A. Long-term trend of TCs intensity in the MDR

Three criteria were used to analyze the long-term trend of tropical cyclone (TC) intensity.

1. Average TC intensity over the ocean



Fig. 8 Average grid-point TC intensity in the WNP MDR from 1993-2013 (total grid records: 5147).

2. Landfall intensity: first point at landfall



Fig. 9 5-year running mean of landfall intensity (a) the average of 5 countries (case number = 159) (b) the average of the Philippines and Taiwan (case number =108) [criterion: > 50% of the case's track was in the MDR]

TC intensity and landfall intensity have increased by 26% (from 38 kts to 48 kts, (first pentad vs. last pentad) and 34% (from 59 kts to 79 kts) respectively in the past 21 years (Fig. 8 & 9). This is an important alert to the Asia Pacific countries.

3. Catetory-4 and 5 TC point percentage



Fig. 10 Percentage of data points reaching (a)super typhoon and (b)category-4&5 typhoon wind speed in MDR

Compared to the early 1990s, the percentage of category-4 and 5 data points (i.e. top 2 categories, \geq 115 knots) has doubled (from 6% to 12%) (Fig. 9).

B. Main factor that contributed to the intensification of TC

The relationship between possible environmental oceanic, atmospheric factors and TC intensity were examined.

1. Possible environmental effects: SST, D26 and VWS



Fig. 11 Long-term trend of (a)SST, (b)D26 and (c)VWS (July-November, 1993-2013, MDR, 122-170°E ,4-19°N)

Table 3 Correlation between 5 years running mean of environmental parameters and TC intensity(average maximum sustained winds)

Parameters	5 years running mean correlation between TC intensity						
SST/TC	-0.063						
D26/TC	0.763, the highest!						
VWS/TC	-0.447						

In MDR, SST has nearly no change and the vertical wind shear has fluctuated in the past 21 years while D26 has increased by 22% (from 98 to 120 m, first pentad vs. last pentad, Fig. 11). Table 3 shows that the long-term increasing trend of D26 was consistent with average maximum sustained winds. So I supposed that TC intensity had been boosted by the warmer upper ocean thermal conditions.

2. Ocean subsurface warming, modeling, and air-sea flux analyses

- TAO: Tropical Atmosphere Ocean project, moorings array in the Tropical Pacific Ocean
- ➤ Data from one of moored ocean buoys, location: 137°E, 8°N (Fig. 12)
- > Calculation of TC-ocean coupled temperature (T_{mix}) : Price 2009 Model
- Ocean's energy supply for TC intensification:

enthalpy flux (W/m^2) = sensible heat flux + latent heat flux



Fig.12 Photo of TAO buoy (From: http://www.pmel.noaa.gov/tao/)



Fig. 13 (a) TC-ocean coupled temperature (Price 2009), (b) enthalpy flux and (c) latent heat flux and sensible heat flux, based on 60 m/s TC wind speed, averaged from July-November, 2002-2013

Cooling of the upper ocean by TC-induced mixing is an important process that impacts TC intensity. The mixing will stir up cool ocean water, decrease the temperature of upper ocean and reduce the supply of heat.

Real-time data from one of moored ocean buoys were examined. Due to the thickening of warm subsurface ocean layer, TC-ocean coupled temperature and energy (enthalpy flux) supplied by the ocean to TC both have increased in the past 10 years (Fig. 13).

3. Case study: super typhoon Haiyan (Nov. 2013) (Fig. 14)

- Lifetime: 2013/11/01/00Z-2013/11/11/00Z
- > Peak wind speed: 170 kts (314 km/hr); Landfall intensity: 160 kts
- ➤ Main affected country: the Philippines
- ≻ Economic loss: \$US 1.5 billion
- Death toll: > 6,000 ; Missing: > 1,800 ; Injured: > 27,000 (people)



Fig. 14 Satellite view of typhoon Haiyan (From: http://www.washingtonpost.com/)



Fig. 15 Path of Haiyan and SSHA map



Fig. 16 Comparison of (a) SST and (b)D26 along Haiyan's track in 2013 with respect to the average of 1993-2012.

Super typhoon Haiyan, which devastated the Philippines on 8 November, was probably the strongest typhoon to make landfall and caused great damage to Southeast Asia.

Fig. 16 showed that the subsurface ocean thermal condition along Haiyan's track (Fig. 15) was unusually warmer than the past. The sufficient energy supply could be the main factor to favor the intensification of it.

C. Cause of ocean subsurface warming

In this chapter, I want to find the possible factors that caused the ocean subsurface warming. Three natural variability were compared in the research, namely the global observed air temperature, El Niño/ Southern Oscillation (ENSO) and Pacific Decadal Oscillation (PDO).

1. Global observed air temperature



Fig. 17 Relation between warming scenario (simulation included oceanic effect, in red), just radiative changes (in purple) and observed air temperature (in black) (Kosaka and Xei, Nature, 2013)

Recent study (Fig. 17, Kosaka and Xei, Nature, 2013) found that the increase in global observed air temperature has slowed down in the past 10 years. The result of simulation that included radiative forcing and tropical Pacific SST is better than the one that considered radiative forcing alone at reproducing the observed global-mean temperature.

- **2.** El Niño/Southern Oscillation (ENSO): A natural phenomenon that involves fluctuating ocean temperatures in the equatorial Pacific.
 - ➢ Period: 6-18 months
 - Index used in this research: Oceanic Niño Index (ONI), 3 month running mean of SST anomalies in the Niño 3.4 region (5°N-5°S, 120°-170°W)

SST is warmer than normal central and eastern equatorial Pacific in the warm phase of ENSO (ONI ≥ 0.5) and will cause the eastward extension of subsurface warm layer in the western Pacific Ocean.



Fig. 18 Ocean conditions of ENSO (From: http://science.nasa.gov/)

- **3. Pacific Decadal Oscillation (PDO):** a long-lived El Niño-like pattern of Pacific climate variability
 - ➢ Period: 20-30 years
 - Index used in this research: PDO index, monthly sea surface temperature anomalies over the North Pacific



Fig.19 Monthly SST anomalies (PDO index) in the North Pacific Ocean from1900-2013 (From: http://jisao.washington.edu/pdo/)

SSTs are anomalously cool along the North American coast (PDO index < 0) and the western Pacific Ocean is warm in the cool phase of PDO.

(Source: http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo.php)

4. Correlation between the three natural variability and D26



Fig. 20 Correlation between D26 and (a) PDO, (b) ONI and (c) global observed temperature

From comparing these three indexes (PDO, ENSO and global observed air temperature), the increase in warm ocean layer thickness is more likely associated with the variability in PDO. Change in the global observed air temperature (including global warming signal and the recent hiatus, Kosaka and Xie 2013) or ENSO index appear to play a secondary role.

Conclusions

In the most important TC basin on earth, the WNP MDR:

- Over ocean: TC intensity has increased by 26% (from 38 kts to 48 kts, first pentad vs. last pentad) as compared to 1990s. Increase in the category-4&5 TC point percentage is also found. [This is based on a total of 5147 TC grid point analyses over 21 years]
- 2. At land: TC-landfall intensity in major Asia Pacific countries is observed to undergo a long-term increase. After removal of 5-year running mean, the landfall intensity has been found to increase from 59 kts to 79 kts (a 34% increase). This finding should be useful to alert governmental agencies.
- 3. Among the 3 critical environmental factors (SST, D26, VWS), thickening of subsurface warm ocean layer (showing 22% increase, from 98 to 120 m in the past 21 years) is the most likely factor favoring the increase in TC intensity. SST and VWS finds no trend in the past 21 years but an evident warming trend in the subsurface ocean thermal condition is observed. Further analysis shows that thickening of subsurface warm layer can increase TC-ocean coupling temperature and hence air-sea flux supply for TC intensification, as quantified from the modeling and flux analysis in section 2-2.
- 4. Ocean subsurface warming is more likely to associate with variability in PDO (r= -0.722), while change in global observed air temperature (including global warming and hiatus from 1990 to 2013, Kosaka and Xie, 2013) and ENSO index may play a secondary role (r= -0.476 and 0.449).

Acknowledgements

Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

Professor: I-I Lin

Remote sensing lab: all seniors

Department of Atmospheric Sciences, National Central University, Taoyuan,

Taiwan

Professor: Pay-Liam Lin

Taipei First Girls High School, Taipei, Taiwan

Earth science teacher: Ruo-Lan Jin

Equipment Section

Many thanks to all other professors, teachers, seniors and friends who have generously helped me in many ways.

References

- Cazenave, A., and F. Remy, "Sea level and climate: Measurements and causes of changes" [Abstract], *Wires Climate Change*, 2, 647–662, 2011.
- [2] Kosaka, Y. and Xie, S.-P., "Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling," *Nature*, 501, 403-407, 2013.
- [3] Lin, I-I, Wu, C. -C., Pun, I. -F. and Ko, D. -S., "Upper-Ocean Thermal Structure and the Western North Pacific Category 5 Typhoons. Part I: Ocean Features and the Category 5 Typhoons' Intensification," *Monthly Weather Review, Vol. 136*, p. 3288-3306,2008.
- [4] Lin, I-I, Black, P., Price, J. F., Yang, C.-Y., Chen, S.-S., Lien, C.-C., Harr, P., Chi, N.-H., Wu, C.-C. and D'Asaro, E. A., "An ocean coupling potential intensity index for tropical cyclones," *Geophysical Research Letters, Vol. 40*, Issue 9, p. 1878-1882, 2013.
- [5] Normile, D., "After the Deluge," Science, Vol 344, no. 6182, p. 355-357.
- [6] Peduzzi, P., B. Chatenoux, H. Dao, A. De Bono, C. Herold, J. Kossin, F. Mouton & O. Nordbeck, "Global trends in tropical cyclone risk," *Nature Climate Chang*, *2*, 289 294, 2012.
- [7] Price, J. F., "Metrics of hurricane-ocean interaction: Vertically-integrated or vertically-averaged ocean temperature?" *Ocean Science*, *5*, 351–368,2009.
- [8] Pun, I. F., Lin, I-I, Wu, C. -R., Ko, D. -S., Liu., W. -T., "Validation and Application of Altimetry-derived Upper Ocean Thermal Structure in the Western North Pacific Ocean for Typhoon Intensity Forecast," *IEEE Transactions On Geoscience and*

Remote Sensing, Vol. 45, No. 6, p. 1616-1630, 2007.

[9] Pun, I. -F., Lin, I-I and Lo, M. -H., "Recent Increase in High Tropical Cyclone Heat Potential Area in the Western North Pacific Ocean," *Geophysical Research Letters*, *Vol 40*, Issue 17, pages 4680–4684, 2013.

- 主題契合目前非常熱門的強烈颱風生成與發展環境條件之探討,特別是 颱風增強與上層海洋熱力結構關係長期變化之趨勢有創新之發現。
- 颱風增強與上層海洋熱力結構之關聯性遠高於傳統只針對表層海面溫度 SST 探討之觀點,具有創新性與對海氣環境對強烈颱風發展機制影響之 了解。