

西北太平洋長期海氣象觀測系統：莫拉菲(Molave)颱風個案探討

劉欣怡¹ 戴仁華¹ 張雅婷¹ 楊益² 唐存勇¹

國立台灣大學 海洋研究所¹

國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心²

摘 要

西北太平洋為全球熱帶氣旋(颱風)發生頻率最高且強度最強的區域，但海洋面積廣大，除衛星資料可得知海洋表面狀態外，仍缺乏海洋長期觀測資料。由國科會資助下之研究計劃：西北太平洋及其邊緣海之颱風-海洋交互作用與內波之研究，三組台灣自行研發之海氣象觀測即時傳輸系統(Tele- Ocean-Atmospheric Data buoy, TOADY)佈放於西北太平洋最常侵台颱風之路徑上，長期觀測大氣與上層海洋(500m 以上)的變化情形，觀測資料即時經由銱衛星系統傳回陸上，提供研究颱風通過時海洋的環境條件、研究海洋對颱風之反應及颱風海洋交互作用機制。

自 2008 年 6 月觀測迄今，已量測到多個颱風通過測站附近，以莫拉菲(Molave)颱風為例，其於 2009 年 7 月 15 日在菲律賓呂宋島東南海面形成，行進路線為典型西北颱的形式。當颱風接近測站時，除颱風的中心氣壓持續的下降外，經衛星海平面高度異常值之檢視，發現觀測站附近有暖心渦旋的存在，其可有效減少海洋降溫情形，以提供潛熱(Latent Heat)予颱風，增強颱風強度。

由長期的觀測資料顯示海洋多重尺度運動對於當地水文背景之影響，除季節性變化僅影響近表層處溫度外，季節內變化(Intra-seasonal variation)亦頻繁，變化幅度較大且多為渦旋通過所引起；頻譜分析中顯示，全日潮與半日潮具有相當大的能量存在，且推測亦有內潮之存在；於觀測資料中亦發現，海溫資料有巨大振幅(約 100 m)的內波訊號，顯示當內波於呂宋海峽生成後，會往東、西方向傳遞。

關鍵字：海氣象觀測即時傳輸系統、莫拉菲颱風、海-氣交互作用。

一、前言

相較其他區域，西北太平洋地區有強且持續的東北風和西南季風，使得風切過度夠大、上層輻散較強及垂直風切較弱等動力條件下，都有利於熱帶氣旋的生成(Lee et al., 2006)。

海-氣交互作用與渦旋對於熱帶氣旋的熱力結構影響很大，特別是海表溫及混合層深度，對於颱風的形成、增強與移動速度亦扮演重要的角色。

Price(1981)提出當熱帶氣旋行經溫暖的海洋時，常見於颱風路徑右側有海表溫冷卻的現象，颱風

後形成之尾波區(wake)，是由於颱風強大的風應力於混合層中產生強烈的紊流(turbulence)，垂直混合增加，下層較冷的海水往上層捲入，使海表面溫度冷卻，幅度可達 1°C~6°C(Lin et al., 2003)，且持續時間可至數天。

而暖渦旋對於增強颱風強度上亦扮演了相當重要的角色，Lin et al.(2005)研究 2003 年超級颱風(Super Typhoon)梅米(Maemi)結果發現，位於太平洋上的暖渦旋(warm eddy)可能是造成梅米颱風在強度上急速增強的主因，此海洋暖特徵現象對應著之海洋暖水層異常增厚的現象，使得熱含量增加，增強颱風

強度。

對於目前的研究而言，多以衛星觀測與模式模擬為主，但衛星觀測以海表面觀測為主，對於垂直解析度仍有所限制，藉由佈放於西北太平洋颱風路徑上之海-氣觀測錨錠，探討長期大氣與海洋上之變化情形，並結合海水位高度變化資料，進而討論颱風時大氣與海洋上層結構的變化、海洋-颱風的交互作用與海洋中渦旋存在對於颱風的影響。

二、海氣觀測系統

西北太平洋及其邊緣海之颱風-海洋交互作用與內波之研究(ITOP)實驗先導期已於 2008 年 6 月開始，於西北太平洋最常侵襲之颱風路徑上佈放觀測平台。

觀測平台為參考 ATLAS(Automated Temperature Line Acquisition System)之設計，使用由台灣大學海洋研究所自行研發之銓衛星資料傳輸系統之海氣象觀測即時傳輸系統(Tele- Ocean-Atmospheric Data buoY, TOADY)。量測空氣溫度(Air Temperature)、相對溼度(Relative Humidity)、氣壓(Air Pressure)、海表面溫度(Sea Surface Temperature, SST)、風速(Wind Speed)、風向(Wind Direction)與全天日射量等氣象資料與上層 500 m 之海洋溫度；其中風速、風向的觀測高度約為 2.5m，氣溫、相對濕度的觀測高度約為 2m，SST 則由海面下 1m 處測得。藉由台灣大學海洋研究所張宏毅技正研發設計之微電腦記錄器(Logger)，除了供給 ATLAS 上儀器電力，並整合每 5 分鐘記錄一筆之所有大氣儀器資料與參數，以每 6 個小時間隔將資料壓縮並透過銓衛星回傳到電腦端，可得進即時的資料觀測。除海表面溫度計(深度約 1m)外，觀測錨錠站(A2)於海面下尚有 1、4、8、12、20、30、40、50、65、100、120、150、250、360、500 m 等 15 組溫度計，其觀測時間間隔為 15 分鐘。

三、分析結果

(一) 長期觀測

近海表面氣壓隨季節性變化，除極端天氣(熱帶氣旋、鋒面等)之影響，其範圍介於1005~1020mb之間。海表溫隨季節性變化，介於24~30℃之間，於夏

季時，海表溫受短波輻射之加熱，可高達30℃，而近海表面空氣溫度變化則介於22~28℃之間。海溫與氣溫相比之下，海表溫較氣溫高；僅少數情形下，氣溫會比海水表面溫度來的高。風速變化皆小於15ms⁻¹之間，其亦受季節性的變化，夏季以西南風為主，冬季以東北風的為主。全天日射量變化小於1250Wm⁻²，若有極端事件發生時，則受雲量、降雨等影響而減少。

根據溫度長期資料之顯示【圖3】，海洋具有多重尺度的運動，表層海溫受到天氣現象影響，變動較大，有明顯的夏暖冬冷之季節性變化(seasonal variation)，而季節內變化(Intra-seasonal variation)較為頻繁且變化幅度大，除颱風影響上層海洋結構之變化外，由衛星量測之海表面高度異常值(Sea Level Anomaly)相比之下，顯示其可能為渦旋通過所引起，影響深度可從50到300m。頻譜分析中顯示(圖略)，全日潮與半日潮中具有相當大的能量存在，且越近溫躍層其全日潮與半日潮的能量越明顯，半日潮能量大於全日潮能量，推測亦有半日內潮之存在；於觀測資料中亦發現，海溫資料有巨大振幅(約100 m)的內波訊號，顯示當內波於呂宋海峽生成後，會往東、西方向傳遞。

(二) 颱風個案

莫拉菲【圖1】之初始擾動位於菲律賓呂宋島東北方海面，於7月15日0600UTC形成熱帶擾動，Joint Typhoon Warning Center(JTWC)隨後發佈熱帶氣旋警報；颱風與錨錠測站於7月17日0700UTC距離錨錠測站最近，此時為輕度颱風，行進路線為典型西北颱風的形式，平均以23.7km/h速度前進；於7月18日1200UTC位於東沙島東北東方附近，此時強度達到最強(中度颱風)，中心氣壓下降至975mb，風速最大可達32.5m/s，並於7月18日1800UTC登陸，隨後強度快速減弱與消散。

當颱風莫拉菲開始接近測站時，氣壓開始逐漸下降【圖4】，至颱風眼與錨錠測站最接近時，量測到於颱風外圍的氣壓約可下降至998hPa，且氣壓有似半日變化(semi-diurnal cycle)的現象。於颱風影響前(7月14日-7月16日)，風場主要從西北風轉向東北

風，平均風速約在5-10 m/s，後逐漸受到颱風外圍的風場的影響，進入7級暴風半徑(7月16日-7月17日)後，風速明顯增強至10-20m/s，所量測到之最大平均風速可達18 m/s，風向開始明顯由東北風轉向至西南風，直至颱風離開7級暴風半徑後，風向逐漸轉回西南風，風速也逐漸減小至10 m/s。

對於相對濕度而言，於颱風影響時，颱風帶來較潮濕的水氣，相對濕度顯著增加，最多約可增加10%，約可至90%，平均相對濕度約為85%。資料亦顯示【圖4】，海、氣溫皆具有較小振幅之半日週期(日夜變化)現象。颱風影響前氣溫日夜變化振幅約在1°C、SST日夜變化振幅較氣溫小(約0.5°C)。受颱風影響時，由於強烈的對流降雨系統所引發的下沖流，將高層乾冷空氣帶入低層大氣中，使得氣溫明顯下降至26.5°C，而颱風伴隨之強烈對流性降水與雲量影響，皆使氣溫與海溫之日夜變化皆不明顯，氣溫和SST明顯降低。氣溫的降幅最大可達2.5°C，由最高的29°C降至約26.5°C；SST的降幅較小，於颱風前的29°C降至28°C左右。於颱風離開(7月18日)後，氣溫逐漸回升，日夜變化的現象亦恢復。比較颱風前和颱風後之氣溫與SST，SST相差約0.5°C，而氣溫可相差約2°C。

由於颱風主要的能量來源是海洋，因此海洋-大氣間的熱量與動量交換對颱風的發展變得相當重要。使用 Liu-Katsaros-Businger 總體輸送法(bulk transfer method; Liu et al., 1979)，藉由傳輸係數的參數化來估算海-氣間的熱通量。因此，可感熱與潛熱通量和風應力可表示如下：

$$H_s = \rho_a c_{pa} C_H V (T_s - \theta_a)$$

$$H_e = \rho_a L_e C_E V (q_0 - q_a)$$

$$\tau = \rho_a C_D V (u_0 - u_a)$$

其中， C_H 、 C_E 與 C_D 為可感熱、潛熱和風切應力通量的傳輸係數， ρ_a 為空氣密度， C_{pa} 為空氣的定壓比熱係數， L_e 為水汽的潛熱係數， V 是觀測儀器在 z_r 高度所量測到的風速(一般而言 $z_r=10m$)， u_0 為近海表面的風場，受摩擦力的影響最大，其值通常為零。

海面淨熱通量(H_N)可表示為 $H_N = R_N - H_L - H_s$ ，式中 R_N 為淨輻射通量、 H_L 為潛熱通量、 H_s 為可感熱通量，淨熱通量(H_N)主要由 S_w 、 H_e 的量值決定。 $H_N>0$ 時，表示淨熱通量加熱海洋； $H_N<0$ 時，淨熱通量冷卻海洋。【圖5】顯示，在白天時 $H_N>0$ ，主要是由於 R_N 的貢獻，且 H_N 呈現明顯的日夜變化；夜間及清晨由於輻射冷卻使得 $H_N<0$ 。颱風時， H_N 日夜變化的現象明顯減弱，受到雲量增加和降雨現象，使得全天日射量明顯減弱，白天最大的 H_N 約降為200-400W/m²。但颱風離開後，降雨現象逐漸消失，天氣逐漸晴朗， H_N 即顯著回升至900W/m²，但若當降雨出現時， H_N 又顯著下降。

潛熱通量(H_e)除了受風速影響外，也和海氣溼度差值的多寡與穩定度有關。颱風前，由於風速較小，潛熱通量的變化不大；颱風期間，海-氣間強烈的交互作用，海溫與氣溫有較大溫度差值、降雨與風速的增加所導致等影響，使具有較大的潛熱釋放到大氣中，潛熱通量的變化亦可高達400W/m²。於颱風後，海-氣間的交互作用減小，風速減弱，潛熱通量降低。

可感熱通量(H_s)則與海氣溫度差值及風速大小有關。相較於潛熱通量，可感熱通量的值較小，約為8.9W/m²；於颱風後，於可感熱通量(H_s)的時序變化圖，發現 H_s 有些許的負值，即表示氣溫較海水表面溫度來的暖，可感熱通量往下傳遞。

海洋供給颱風生成的能量，當颱風形成後又作用於海洋，在颱風的作用下，於颱風中心的表層海水會產生輻散現象，使其將深層的冷海水往上層傳送，深層的冷海水帶至海洋表面，引起海水表面溫度的降低，而颱風離開後此冷卻現象繼續留在海面上，其過程可達兩週才逐漸消失。而不同強度的颱風所產生的冷卻效應並不相同，強度愈強、區域內颱風活動愈頻繁，所造成的冷卻效應也會愈顯著。

由海溫之深度隨時間變化之剖面圖，如【圖6】顯示，於颱風前，SST具有日夜變化的特性，其1/4的時間被加熱，3/4的時間是被冷卻(Price et al., 1986)，且上層海洋溫度相當暖，平均海洋溫度約近30°C。

當颱風時，因為風應力的混合作用和海面浮力

項的作用，使得海洋上層溫度之日夜變化消失。此時，上層海洋之溫度降低，平均海洋溫度約為 27℃，比颱風前低了約 3℃。另外，由於颱風帶來大量降雨，使海洋表層亦形成一相對低海溫層，此低海溫層於海面風速減弱後、大量降水現象停止與大氣恢復穩定之後逐漸消失。

由於浮力頻率(Buoyancy frequency) 為海水垂直結構中穩定與否的重要參數，因此，藉由此作為定義混合層深度(Mixed layer depth, MLD)為指標，其表示如下：

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz}$$

於颱風前，平均風速大小約為3.6m/s，海洋混合層厚度平均約為42.5m【圖7】。颱風通過時，風速明顯增強，產生上層海洋混合作用，海洋混合層厚度加深，約為70m。

由於 SST 只能代表的海表面溫度而無法代表上層海洋的垂直結構，故藉由 Upper Ocean Heat Content(UOHC)將能夠清楚地描述海洋的暖特徵現象。定義 UOHC 為從海面到 26℃等溫線的垂直溫度積分，如下：

$$OHC = \rho_0 C_p \int_{Z_{26}}^0 (T - 26) dz$$

隨著 26℃ 等溫線的垂直溫度積分得到之海洋上層熱含量，如【圖 5】顯示。颱風時，海-氣間的強烈交互作用影響，海洋釋放潛熱於大氣，且颱風引起之湧升現象，將深層的冷海水往上層傳送，使得海洋上層熱含量降低。於颱風後，海洋上層熱量受到海表面溫度的降低與湧升現象之影響，導致海洋上層熱量持續地維持較小的熱量。

四、討論

藉由 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)之海水位異常(Sea Level Anomaly, SLA)資料，討論渦旋與颱風間的相互關係。【圖8】為2009年7月10日至7月25日期間之SLA資料。於錨錠觀測站(A2)附近有一較小的暖渦旋存在，其可能為北方之暖渦旋分支，而以穩定的狀況持續向西傳遞或滯留於原地。

於颱風時，由於大量的潛熱釋放，提供能量給颱風，由SLA中亦發現有微弱的降低趨勢，推測其由於溫暖渦旋提供熱量給予颱風，且積分海洋上層之垂直渦旋通量可發現，此時垂直渦旋通量降低，亦可推測暖渦旋其本身因提供溫暖的水氣給颱風，而使其之本身熱量降低。

在大洋上，由於渦旋與颱風之間為複雜之交互作用運動，且缺乏背景流場的瞭解，無法準確的計算出渦旋之運動過程與其和颱風之間的相互作用關係。暖渦旋能提供颱風熱量，使颱風強度增加，但相較之下，颱風對於渦旋之影響則較為複雜，於推論SLA逐漸降低趨勢與垂直渦旋通量減少之可能原因，除潛熱的釋放外，推測於颱風後引起之upwelling，與暖渦旋所造成之downwelling，於兩者之相互作用下，亦會導致SLA有逐漸降低的趨勢。

五、小結

分析佈放於西北太平洋上海-氣觀測錨錠之資料顯示，除近表層處溫度有季節性變化外，季節內變化頻繁且變化幅度較大；另外，除全日潮與半日潮存在外，亦有內潮的存在，並於海溫資料顯示有巨大振幅(約100 m)的內波訊號，表示當內波於呂宋海峽生成後，會往東、西方向傳遞。

探討莫拉菲颱風經過前、中、後之上層海洋結構的變化、海洋-颱風的相互作用，並藉由衛星觀測資料之SLA上映證颱風前暖渦旋的存在，對於颱風強度的影響，因此，研究結果顯示：

(一)當颱風行經於海洋上方時，由於風應力增強，造成海水垂直混合能力增加，海表溫度下降，混合層深度加深。

(二)颱風在強烈的海-氣交互作用下，由於海溫與氣溫的溫度差、降雨等所造成的潛熱釋放，為颱風前的3~4倍。

(三)由前人研究已知大洋上之暖渦旋在增強颱風強度上扮演了相當重要的角色。於莫拉菲颱風也映證了前人的研究，當颱風接近暖渦旋時，暖渦旋提供溫暖的水氣，釋放熱量至大氣，暖渦旋減弱，颱風獲得熱量，颱風強度增強。

(四) 颱風遠離後，釋放到大氣的潛熱減少，日照的增加使海表面溫度增溫，海洋上層溫度開始重新再分層(re-stratification)，使海洋恢復穩定狀況。

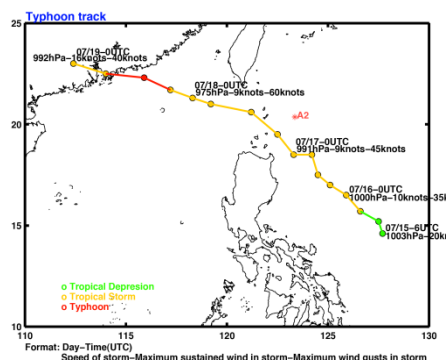


圖1、觀測錨錠站(A2)位置與Molave颱風路徑、強度、中心氣壓兩平均風速。

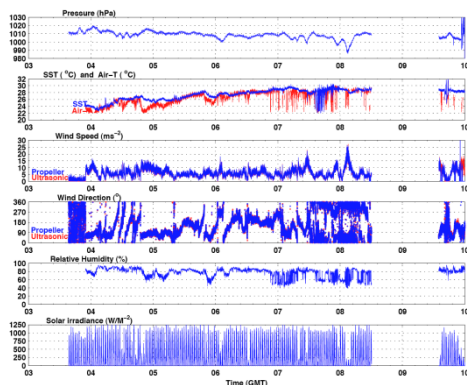


圖2、錨錠觀測站(A2)觀測大氣及海洋的基本參數資料，由上至下分別為氣壓、海溫與氣溫、風速、風向、相對濕度與全天日射量。

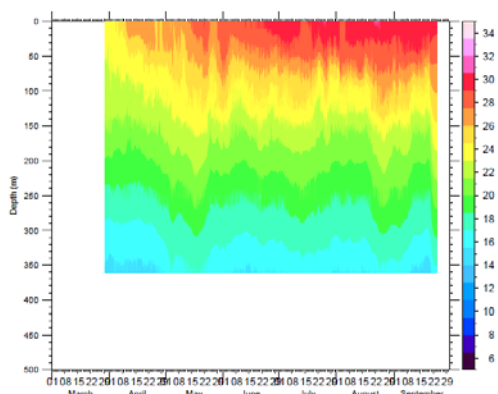


圖3、錨錠觀測站(A2)之垂直等溫線剖面之時間序列，橫軸為時間，縱軸代表深度。

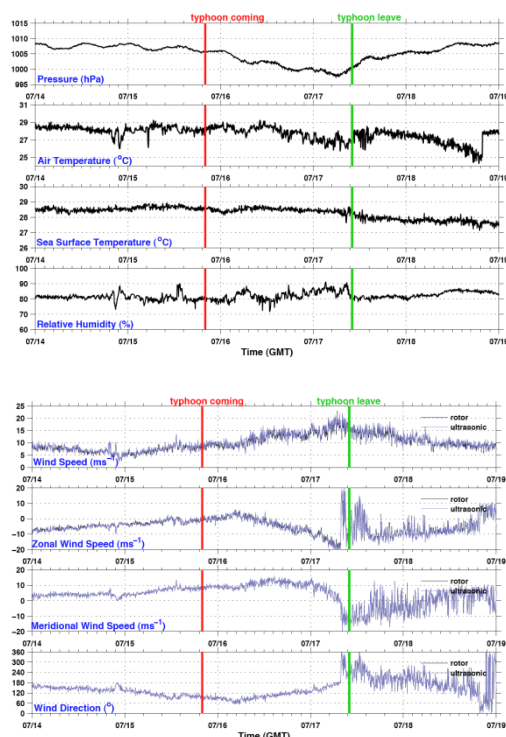


圖4、錨錠觀測站(A2)觀測颱風前、中、後期之大氣及海洋的基本參數資料，由上至下分別為氣壓、氣溫、海溫、相對濕度、風速、緯向風速、經向風速與風向，時間為7月14日至7月19日之觀測，紅色線表示錨錠觀測站(A2)開始進入颱風7級暴風半徑，綠色線表示錨錠觀測站(A2)離開颱風7級暴風半徑。

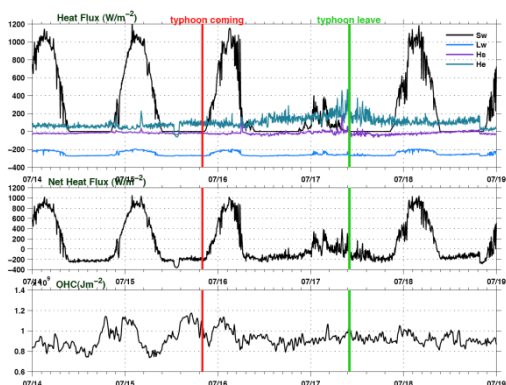


圖5、颱風通過前、中、後之海面淨能量收支圖。其中，上圖Sw為短波輻射通量、Lw為長波輻射通量、He為潛熱通量與Hs為可感熱通量，中圖為淨熱輻射通量，下圖為海洋上層熱含量(UOHC)變化。

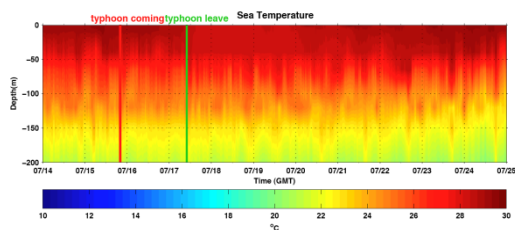


圖6、颱風通過前、中、後之垂直等溫線剖面之時間序列。

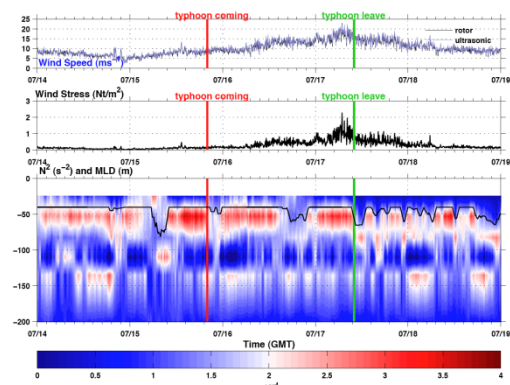


圖7、由上至下分別為颱風通過前、中、後之風速、風應力與浮力頻率剖面之時間序列。其中，下圖之黑色線為海洋混合層深度之變化。

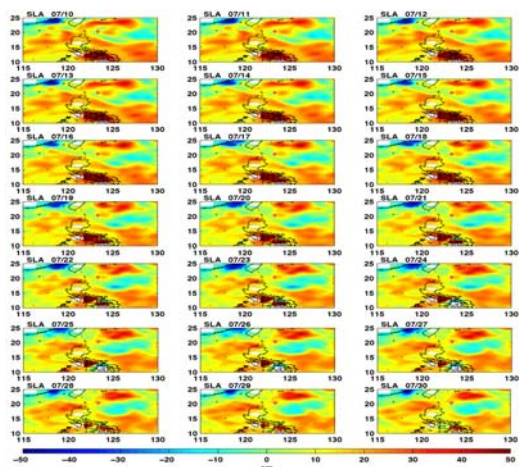


圖8、海水位異常(SLA)資料，由左至右、由上至下之時間為7月10日至7月30日之SLA變化。圖中紅圓點為錨錠觀測站(A2)之位置。

參考文獻

Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev and J. B. Edson, 2003: Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm, *J. Climate*, 16, 571-591.

Lee, C.-S., Y.-L. Lin, and K. K. W. Cheung, 2006: Tropical cyclone formations in the South China Sea associated with the Mei-yu front. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2670-2687.

Lin, I.-I., C.-C. Wu, K. A. Emanuel, I.-H. Lee, C.-R. Wu, and I.-F. Pun, 2005: The interaction of super typhoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy. *Mon. Wea. Rev.* 133, 2635-2649.

Liu, W. T., Katsaros, K. B., and Businger, J. A., 1979 : Bulk Parameterization of Air-Sea Exchanges of Heat and Water Vapor Including the Molecular Constraints at the Interface, *J. Atmos. Sci.* 36, 1722-1735.

Price, J., 1981: Upper Ocean Response to a Hurricane. *American Meteorological Society.* , 11, 153-175.

Wu, C.-C., P.H. Lin, S. Aberson, T.-C. Yeh., W.-P. Huang, K.-H. Chou, J.-S. Hong, G.-C. Lu, C.-T. Fong, K.-C. Hsu, I.-I. Lin, P.-L. Lin, and C.-H. Liu, 2005: Dropwindsonde Observation for Typhoon Surveillance near Taiwan Region (DOTSTAR): An Overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 787-790.