

國立臺灣大學理學院海洋研究所

碩士論文

Graduate Institute of Oceanography

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis



浮標觀測颱風中心附近海域的海氣象變化之研究

Investigation of data buoys observed sea surface atmosphere and
upper ocean variations during typhoons

謝佳穎

Chia-Ying Hsieh

指導教授：楊穎堅 博士、張明輝 博士

Advisor: Yiing-Jang Yang, Ph.D., Ming-Huei Chang, Ph.D.

中華民國 106 年 8 月

August 2017

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

颱風中心附近海域的海氣象變化

Meteorological and upper oceanic variations from within typhoons

本論文係謝佳穎君 (R04241101) 在國立臺灣大學海洋研究所完成之碩士學位論文，於民國 106 年 07 月 24 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

楊韻亞

(簽名)

曾若玄 (指導教授)

張明輝

詹森

張宏毅

系主任、所長

趙慶琳 (簽名)

誌謝



兩年的碩士生涯終於要畫下句點了，感謝楊老師與張老師的指導，以及口試委員們提供的意見，我才能完成這本論文，謝謝楊老師在課業方面總是不厭其煩地回答我每個問題；在生活方面也總是像個爸爸一樣的關心著我們。而張老師則是提供我一些研究上的想法，使論文內容更加完整。在此也要感謝我的父母，從小給我一個溫暖的家，使我開心的成長，建立許多正向的價值觀，並讓我能一直身在良好的學習環境中。也謝謝姐姐們的陪伴，你們的一通電話、一封訊息，總讓獨自在外生活的我知道還有人在關心著我。除了家人之外，也要謝謝研究室的夥伴們，謝謝成皓每天陪我一起耍費、一起趕進度，偶爾晚上還被迫聽我在實驗室發出噪音。感謝致廷的加入，大大減少我們實驗事前準備的工作量，也幫我們解決了許多瑣事，除此之外，有你的加入我在吃零食的時候罪惡感下降許多。謝謝慧慈，沒有你，我們就不能每個月都準時的拿到薪水，而且有你在，研究室總有許多新奇的話題。還要感謝其他一起研究的夥伴們，謝謝珈瑄陪我一起出國、出差，喜歡每次跟你聊天的時候，每次聊完情緒總是能得到宣洩，也會得到許多正面的想法。謝謝凱富和治綸，很開心能和你們一起進入海洋所，有你們在的碩士生涯，增添了許多有趣的事。謝謝婕媛、凱絮以及天俠提供我課業上或研究上的協助。還要感謝許多一起工作的長輩們，張技術師、華哥、馬妹、祥志、政佳、瑋廷、文慧姊，以及海研一號作業室的各位，謝謝你們耐心的教導我出海實驗該注意到的每件事，偶而還要幫忙收拾我犯的錯，真是麻煩你們了。還要感謝我的室友馥瑜以及同學哲偉與音蓁，謝謝你們在我在台大這兩年給了我許多的幫助與陪伴，常陪我聊生活的瑣事、陪我運動、陪我吃飯等等。最後，感謝我的伴侶文源，謝謝你一直在我身邊，雖然在你碩二時，我總是每周都去煩你，把一周的話濃縮在兩天內說完，相信你耳朵都長繭了，不過在我碩二時，果然如你所說的，我會嚐到苦頭，一堆事做不完，你還要來煩我一下，不過謝謝有你，一直以來除了陪伴之外，也在課業上、研究上給我很多幫助。謝謝一路走來協助過我的每個人，或許有些人漏掉了，但我是也是真心的感謝你們。

中文摘要



西北太平洋為颱風生成的熱區，此海域的颱風較其他海域多且強。颱風生命週期中，大多時間滯留於海面上，因此除了當時的大氣環境會影響其生長，海洋狀態亦非常重要，若能即時掌握上層海洋的改變，將有助於改善對颱風強度的預報。本研究利用國立臺灣大學海洋研究所的海氣象即時傳輸浮標，在 2015 和 2016 夏天於鵝鑾鼻東南方海域約 375 與 175 公里處，進行測試實驗時所收集到的資料，搭配衛星遙測資料與數值模式資料討論颱風造成的海洋變化。在觀測期間內，計有 2015 年的蓮花、昌鴻、蘇迪勒與天鵝；及 2016 年的尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡、梅姬與艾利，等 9 個颱風經過附近海域，其中 NTU1 和 NTU2 站分別進到馬勒卡與尼伯特颱風的颱風眼範圍內。在分析後得到以下結論：慣性運動在颱風逐漸靠近即開始形成，且颱風的到達時間點會影響慣性流之大小。此外，近慣性運動週期除了可能受到背景場或渦旋影響外，亦可能受到颱風尚在南邊時的影響，致使觀測所得之慣性週期略大於當地慣性週期。在強烈颱風靠近時，會因強風造成的流切不穩定使混合層之厚度可以在 5 小時內增加 100 公尺，且可能為了維持位渦守恆，使颱風來時所造成之厚的混合層，在颱風中心離開後隨即快速變薄。此外，在颱風中心通過之後，因水平平流帶來颱風左側之較暖的海水，使表層海洋有回溫現象。

關鍵詞：海氣象浮標、颱風、熱通量、近慣性運動、混合過程

ABSTRACT



Western North Pacific is the most active area for typhoons in the world. To understand the changes of upper ocean is necessary for optimizing the typhoon intensity forecasts. In summer of 2015 and 2016, the Institute of Oceanography, National Taiwan University (IONTU) deployed two air/sea-observing buoys at distances of approximately 375 km (station NTU1) and 175 km (station NTU2) from the southernmost tip of Taiwan. During the trails, buoys survived nine typhoons (Linfu, Chanhom, Soudelor, Goni, Nepartak, Meranti, Malakas, Megi, and Aere). Among them, the stations NTU2 and NTU1 almost coincided with the paths of typhoon Nepartak and Malakas, respectively. In this research, buoy data, satellite and numerical model products were used to figure out the ocean responses resulting from typhoon. Observation data shows two major conclusions. First, the near inertial motion started when typhoon approached, and the arrival time could be related with magnitude of inertial current speed. Furthermore, the observed inertial period was larger than local inertial period. It is probably related to interactions between near- and sub-inertial currents or the inertial motion generated at the southern side of buoy. Second, the thickness of mixed layer increased 100m in 5 hours by current shear instability. Besides, the thickness of mixed layer rapidly decreased after typhoon's center has passed. It could be related to potential vorticity conservation. Moreover, the temperature of sea surface increased is due to the horizontal advection.

Keywords: Air/sea-observing buoy, Typhoon, Heat flux, Near inertial motion,

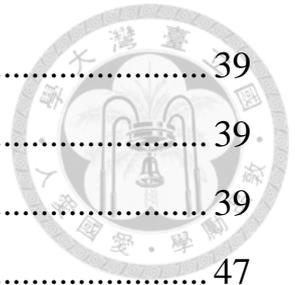
Mixing process

目 錄



口試委員會審定書	I
誌謝	II
中文摘要	III
英文摘要	IV
目錄	V
圖目錄	VII
表目錄	XI
符號表	XII
第一章 緒論	1
1.1 研究背景回顧	1
1.2 研究動機與目的	3
第二章 海氣象即時傳輸浮標介紹	5
第三章 實驗與資料介紹	15
3.1 實驗設計	15
3.1.1 2015 年	15
3.1.2 2016 年	16
3.2 資料介紹	17
3.2.1 浮標資料	17
3.2.2 表面高度異常資料	17
3.2.3 大氣模式資料	17
3.2.4 海表溫資料	18
3.2.5 熱含量資料	18
第四章 資料分析	24
4.1 資料初步分析	24
4.1.1 觀測資料簡述	24
4.1.2 資料比對	26

4.2 上層海洋熱含量與海氣熱通量之分析.....	39
4.2.1 上層海洋熱含量	39
4.2.2 海氣熱通量	39
4.3 颱風造成之慣性運動.....	47
4.4 上層海洋變化過程.....	66
第五章 討論與結論.....	71
5.1 討論.....	71
5.1.1 近慣性運動	71
5.1.2 上層海水混合後之恢復過程	72
5.1.3 熱通量之年際變化	73
5.2 結論.....	80
參考文獻.....	81



圖目錄

圖 1-1、西元 1851 到 2006 年間的熱帶氣旋強度與路徑分布圖(取自 Rohde, 2006)。	4
圖 2-1、海氣象即時傳輸浮標示意圖。	7
圖 2-2、校正前後氣溫比較圖。	8
圖 2-3、校正前後相對濕度比較圖。	9
圖 2-4、校正前後氣壓比較圖。	10
圖 2-5、校正前後太陽輻射量比較圖。	11
圖 2-6、於檢校中心 4 組氣壓計之氣壓校正數據。	12
圖 3-1、(a) 聖嬰年期間颱風途經次數分布圖。(b) 強聖嬰年(ONI>1.0) 後 1 年，且為反聖嬰年之 6 到 10 月的颱風途經次數分布圖。	19
圖 4-1、2015 年經過浮標附近之颱風路徑圖。	27
圖 4-2、2016 年經過浮標附近之颱風路徑圖。	28
圖 4-3、2015 年在 NTU1 站氣象觀測資料。	29
圖 4-4、2015 年在 NTU1 站海洋上層 500 公尺溫度剖面圖。	30
圖 4-5、由左至右為 2015 年 6 月 9 日到 6 月 15 日、6 月 17 日到 6 月 23 日、7 月 1 日到 7 月 7 日三段時間之海表高度異常值，綠色星號分別為 NTU1 站(右)與 NTU2 站(左)站點位置。	30
圖 4-6、2016 年在 NTU1 站氣象觀測資料。	31
圖 4-7、2016 年在 NTU2 站氣象觀測資料。	32
圖 4-8、2016 年在 NTU1 站海洋上層 500 公尺溫度剖面圖。	33
圖 4-9、2016 年在 NTU2 站海洋上層 500 公尺溫度剖面圖。	33
圖 4-10、由上而下為 2016 年在 NTU1 站水深 25 與 75 公尺、NTU2 站水深 25 與 75 公尺的流速資料。	34
圖 4-11、2015 年在 NTU1 站之氣象觀測資料與 NCEP 資料之時間序列。	35

圖 4-12、2015 年在 NTU1 站之氣象觀測資料與 NCEP 資料散佈圖。	36
圖 4-13、2016 年之海表溫觀測資料與 AVHRR 之時間序列。	37
圖 4-14、2016 年海表溫觀測資料與 AVHRR 資料之散佈圖。	37
圖 4-15、2015 年在 NTU1 站上層海洋熱含量。	42
圖 4-16、2016 年在 NTU1 站上層海洋熱含量。	42
圖 4-17、2016 年在 NTU2 站上層海洋熱含量。	42
圖 4-18、2015 年於 NTU1 站之熱含量時間序列。	43
圖 4-19、蓮花與昌鴻颱風影響期間之熱含量時間序列。	43
圖 4-20、蘇迪勒颱風影響期間之熱含量時間序列。	44
圖 4-21、天鵝颱風影響期間之熱含量時間序列。	44
圖 4-22、2015 年觀測期間由浮標料推估之潛熱通量(上)與可感熱通量(下)和 OAFlux 產品之比較。	45
圖 4-23、蓮花與昌鴻颱風靠近浮標期間由浮標料推估之潛熱通量(上)與可感熱通量(下)和 OAFlux 產品之比較。	45
圖 4-24、蘇迪勒颱風靠近浮標期間由浮標料推估之潛熱通量(上)與可感熱通量(下)和 OAFlux 產品之比較。	46
圖 4-25、天鵝颱風靠近浮標期間由浮標料推估之潛熱通量(上)與可感熱通量(下)和 OAFlux 產品之比較。	46
圖 4-26、NTU1 站 75 公尺流速資料之旋轉能譜圖。	49
圖 4-27、NTU2 站 75 公尺流速資料之旋轉能譜圖。	49
圖 4-28、NTU1 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。	50
圖 4-29、NTU1 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。	50
圖 4-30、NTU2 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。	51
圖 4-31、NTU2 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。	51
圖 4-32、尼伯特颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。	52
圖 4-33、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖	53

圖 4-34、莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。	54
圖 4-35、莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。	55
圖 4-36、尼伯特颱風影響期間 NTU1 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。	56
圖 4-37、尼伯特颱風影響期間 NTU1 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。	56
圖 4-38、尼伯特颱風影響期間 NTU2 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。	57
圖 4-39、尼伯特颱風影響期間 NTU2 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。	57
圖 4-40、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間 NTU1 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。	58
圖 4-41、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間 NTU1 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。	58
圖 4-42、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間 NTU2 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。	59
圖 4-43、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間 NTU2 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。	59
圖 4-44、尼伯特颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。	60
圖 4-45、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。	61
圖 4-46、莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。	62
圖 4-47、莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。	63
圖 4-48、75 公尺之流矢圖。	64
圖 4-49、累進矢量圖。	65
圖 4-50、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。	68
圖 4-51、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。	69
圖 4-52、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之海溫剖面圖。	70
圖 5-1、尼伯特颱風之移動速度。	74

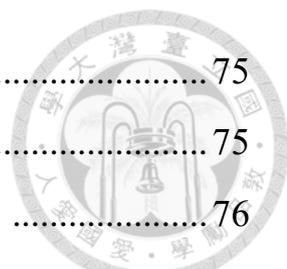


圖 5-2、尼伯特颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。.....	75
圖 5-3、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。.....	75
圖 5-4、尼伯特颱風影響期間之 SSHA 與海流分布圖。.....	76
圖 5-5、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間之 SSHA 與海流分布圖。.....	76
圖 5-6、尼伯特颱風靠近 NTU2 站時之海氣象變化。.....	77
圖 5-7、颱風離開 NTU2 站時，之風向與溫度分布示意圖。.....	77
圖 5-8、可感熱通量(上)與潛熱通量(下)和 ONI 之對照時間序列圖。	78

表目錄



表 2-1、掛載於浮標上之探針之儀器特性表	13
表 2-2、大氣系觀測坪中用於校驗儀器之儀器特性表	13
表 2-3、掛載於浮標上之氣象探針的校正前後數據表	14
表 3-1、2015 年實驗所使用的儀器列表	20
表 3-2、2016 年 NTU1 站實驗所使用的儀器列表	21
表 3-3、2016 年 NTU2 站實驗所使用的儀器列表	22
表 3-4、採用之衛星與模式產品彙整表	23
表 4-1、2015 年颱風特性彙整表	38
表 4-2、2016 年颱風特性彙整表	38
表 5-1、慣性運動特性彙整表	79

符號表



A	太陽高度	C	雲量
C_l	第一斜壓模相位速度	C_h	可感熱傳輸係數
C_p	空氣比熱	C_e	潛熱傳輸係數。
e_s	海面水蒸氣壓	f	當地慣性頻率
Fr	福祿數	H	水深
H_l	潛熱通量	H_{net}	熱通量
H_s	可感熱通量	L_v	蒸發潛熱
L_w	淨長波輻射量	N	浮揚頻率
Q_{cls}	晴天短波入射量	Q_{sol}	觀測的短波輻射量
q_a	大氣中的比濕	q_s	海洋中的比濕
q'	水氣擾動量	R_{s-in}	量測到的太陽輻射量
r_s	海水反射率	S^2	流切平方
S_w	淨短波輻射量	T_a	氣溫
T_s	海表溫	T'	溫度擾動量
U	距海面 10 公尺高之風速	U_h	颱風移動速度
u'	水平風速擾動量	w'	垂直的風速擾動量
ε	海面長波發射率	ζ	環境渦度
θ_a	空氣的位溫	ρ	空氣密度
σ	史蒂芬波次曼常數	ω	觀測到之頻率

第一章 緒論



1.1 研究背景回顧

熱帶氣旋屬於中尺度的天氣現象，此氣旋不大卻有很強的破壞性，熱帶氣旋在西太平洋稱為颱風；在東太平洋與大西洋稱為颶風；在印度洋則稱為氣旋風暴，熱帶氣旋形成於溫暖的海面上，其生命期有大多時間停留在海面上。颱風生成除了天氣狀態允許之外，海洋的狀態也很重要，Gray (1968)提出颱風生成須符合 6 點條件，包含熱力條件：海表溫須大於 26°C 、於對流層之中下層有較高的相對溼度、條件性不穩定的大氣狀態；動力條件：柯氏效應、低層較大的相對渦度、擾動中心附近存在弱垂直風切。其中海表溫要大於 26°C 是因為在這樣溫暖的洋面上，颱風可以從海表高溫傳遞至大氣中的可感熱與海洋供應之水蒸氣凝結所產生的潛熱中獲取能量(Anthes, 1982)，然而颱風能從海洋獲取多少能量，不全取決於海表溫度，更與表層暖水層($\geq 26^{\circ}\text{C}$)厚度有關。例如，當海表溫度很高，但表層暖水層較薄、斜溫層較淺、或溫度垂直梯度較大，當颱風經過時可能會迅速將較冷的海水抽至表面、或是強烈的垂直混合造成海表溫度下降，進而抑制颱風成長(Price et al., 1986; Huang et al., 2015)。

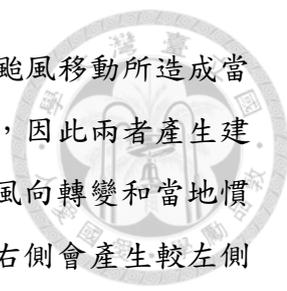
美國國家航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)彙整了 1851 到 2006 年間的熱帶氣旋強度與路徑，並繪製成圖，如圖 1-1 所示(Rohde, 2006)。該圖中顯示西北太平洋上的熱帶氣旋不僅多於其他地區，且強度也較其他地區強，Pun et al. (2011)統計，西北太平洋平均每年有 16.5 個颱風；大約是大西洋颶風生成數量的兩倍，且其中有 38% 為薩費依-辛普森颶風等級(Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale)中的第 4 與第 5 等級，也就是所謂的超級颱風。邱和余(2006)提到西北太平洋的颱風會這麼多且強是因為熱帶西北太平洋 ($0^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N} / 120^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$) 位於全球海面溫度最高之西太平洋暖池範圍內，溫暖的海水提供該區大氣充足的水蒸氣來源，加上北半球夏季南亞低層大氣的西南季風和由東太平洋而來之盛行東風正好在熱帶西北太平洋附近輻合，於低層大氣提供颱風發展所需之正渦度擾動，使得熱帶西北太平洋地區成為全球熱帶氣旋生成最為頻繁之區域。此外，富含熱量的西北太平洋，因為有黑潮將低緯度熱量往北傳送，

還有位於北太平洋中部的北太平洋副熱帶反流(Subtropical Countercurrent, STCC)，其接近北太平洋副熱帶環流的西邊，因其不穩定而頻繁的生成渦旋(Qiu, 1999; Hwang et al., 2004)，這些渦旋可分為暖心與冷心，生成後便往向西傳遞，會影響周圍的海洋熱量分布，進而可能影響颱風的強度。Lin et al. (2005)觀察到梅米(Maemi)颱風在通過一個暖心渦旋後，在 24 小時內強度由原本的第 4 等級升為第 5 等級，暖心渦旋在颱風劇烈混合海洋時，能有效阻隔較深的冷海水湧升至表層，並持續提供颱風熱能以維持其強度。

Geisler (1970)利用福祿數(Froude number, Fr)的大小來做為颱風經過後產生之海洋反應的分類，福祿數為颱風移動速度(U_h)和第一斜壓模相位速度 (the phase speed of the first baroclinic mode, C_1) 的比值，當颱風移動速度大於第一斜壓模相位速度，也就是 $Fr > 1$ 時，上層海洋海水運動的主要特徵會是慣性波；若 $Fr \gg 1$ ，則在第一個慣性週期內，颱風後方冷尾跡(cold wake)區域的海水運動將會更加接近慣性頻率(Chang and Anthes, 1978)；若颱風移動速度近似第一斜壓模相位速度，也就是 $Fr \sim 1$ 時，擾動的湧升流流場型態會產生於颱風後方的冷尾跡區域；而 $Fr < 1$ 時，颱風正下方海表將產生伴隨著湧升流的正壓地轉渦旋。此外，慣性運動為科氏力與慣性力之平衡下之產物，在北半球水粒子呈順時鐘運動南半球呈逆時鐘運動，在海水分層的狀態下，當受到外力作用時，將會產生密度介面間的波動，稱為內波，內波之頻率(ω)定義上需符合方程式【1】

$$f < \omega \leq N \quad \text{【1】}$$

即觀測到之頻率(ω)須大於當地慣性頻率(f)且小於等於浮揚頻率(Brunt-Vaisala frequency, N)，因颱風所產生之近慣性運動(near inertial internal motion)受海水分層之影響，因此亦須符合上述內波運動之頻率限制。Pollard (1970)提出風場的突然轉變對近慣性運動的生成和破壞都很重要，而風場有多少能量能進到近慣性運動，和當地的成層效應與風場之水平尺度而定。在一般的觀測中，颱風所引起的近慣性運動頻率，如前所述會稍微大於 f (Day and Webster, 1965)，但也有人觀測到 $\omega < f$ 的現象，這可能是因為此近慣性運動受到當地背景的次慣性運動(sub-inertial motion)影響所致(Kunze, 1985; D'Asaro, 1995; Shay et al., 1998; Hormann et. al, 2014)



Price (1981)提出當颱風經過海面時，在颱風路徑右側，因颱風移動所造成當地感受到的風向轉變速度和當地慣性流轉動方向與速度皆近似，因此兩者產生建設性干涉；而在颱風路徑左側，颱風移動所造成當地感受到的風向轉變和當地慣性流轉動方向相反，因此兩者產生破壞性干涉，使得颱風路徑右側會產生較左側明顯的近慣性運動與流切，且近慣性運動最大振幅會出現在混合層底部及斜溫層上層，且可持續數周不等；而強的流切會增強海水垂直混合，下層冷海水往上層推，混合層厚度增加且上層溫度下降，此現象稱為逸入(entrainment)。因此在颱風路徑之右側常有海表溫下降之現象，冷卻幅度約攝氏 1~6°C，時間尺度長達 1~2 周，空間尺度約數百公里，影響降溫幅度的因素包含：颱風強度、移動速度、初始混合層厚度與斜溫層之溫度梯度。除此之外，若颱風移動速度較慢，在颱風風場的作用下，風應力旋度引起的艾克曼旋轉會使颱風中心的表層海水有輻散的現象，而下層冷海水則會快速湧升補充，亦會使混合層溫度下降。

海溫的改變會影響海氣間熱通量之大小，海氣間的熱通量交換為海氣交互作用中的重要過程之一，熱通量(H_{net})包含淨短波輻射量(S_w)、淨長波輻射量(L_w)、潛熱通量(H_l)與可感熱通量(H_s)。熱通量會決定海洋要貯存或傳遞能量，且熱通量分別為海洋和大氣模式中的上、下邊界參數，Schlesinger and Mitchell (1987) 指出，若在模式間多提供 10 W/m² 的能量通量，模式結果有顯著的不同，而在熱帶地區的海洋，短波輻射量與潛熱通量為主要的影響要素，在颱風期間潛熱通量較短波輻射量大，是影響颱風強度的重要因素之一(Gao and Chiu, 2010)。此外，Ma et al. (2014)提出移除可感熱通量後，颱風強度會下降 20%，在颱風影響期間，可感熱通量之極值約占可感熱通量與潛熱通量之總和的 30%，因此精準的熱通量估算，對海、氣象模式、颱風的強度預報皆相當重要。

1.2 研究動機與目的

臺灣位於颱風好發海域—西北太平洋，每年夏秋之際容易遭受颱風的破壞，要提高颱風強度和路徑的數值預報準確度，除了需要準確的大氣觀測資料外，亦需海洋上層約 200 公尺厚的溫度垂直分布和相對應的熱含量資料作為颱風數值預報模式之初始條件，雖然現今衛星遙測技術已可快速提供大洋的海表面溫度與冷、暖渦旋的位置等資訊，但仍無法提供海面下水文結構的訊息，因此在 2015 和 2016

的夏季，我們透過歷史颱風路徑統計，將國立臺灣大學海洋研究所開發的海氣象即時傳輸浮標佈放於鵝鑾鼻東南方海域約 375 與 175 公里處進行測試，此測試實驗所回傳之資料可供研究颱風在開放海域中造成的海洋反應。於觀測期間，在 2015 年計有蓮花(Linfa)、昌鴻(Chan-Hom)、蘇迪勒(Soudelor)、天鵝(Goni)等 4 個颱風；2016 年計有尼伯特(Nepartak)、莫蘭蒂(Meranti)、馬勒卡(Malakas)、梅姬(Megi)、艾利(Aere)等 5 個颱風經過附近海域，其中屬第 5 等級的尼伯特颱風先經過 NTU1 站的北側再經過 NTU2 站的南側，颱風中心與浮標距離分別為 5.7 km 和 15 km，而屬第 4 等級的馬勒卡颱風中心與 NTU1 站之最短距離僅數百公尺，浮標記錄到了經颱風中心的密集海氣象觀測資料。本文將藉由此兩年測試所收集到的資料討論海氣熱量通量變化、颱風所造成的慣性運動、颱風所引發的上層海洋高頻變化過程及產生這些現象的動力機制。

全文共分成五章，於第二章介紹臺大海洋所開發的海氣象即時傳輸浮標；第三章說明實驗的設計與介紹所用來輔助討論的衛星資料；第四章為本研究資料的分析；最後第五章為討論與結論。

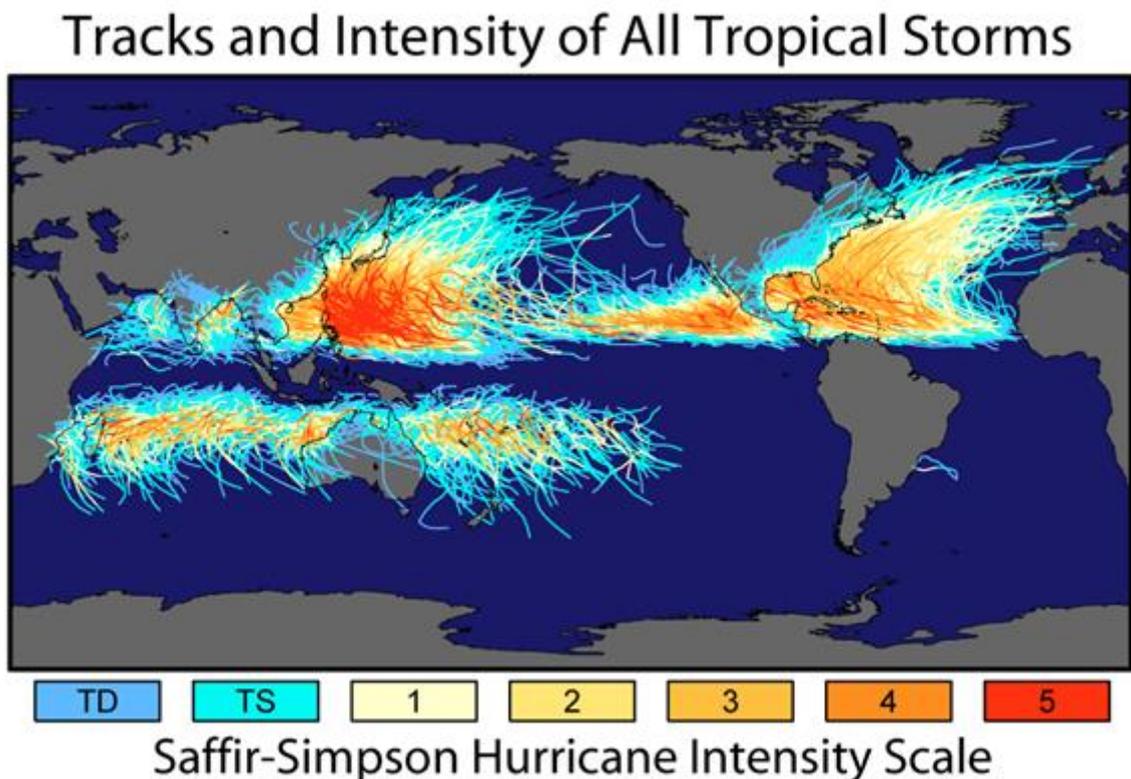


圖 1-1、西元 1851 到 2006 年間的熱帶氣旋強度與路徑分布圖(取自 Rohde, 2006)。

第二章 海氣象即時傳輸浮標介紹



在本文當中所提及的海氣象即時傳輸浮標是由國立臺灣大學海洋研究所浮標團隊自主開發，團隊成員包含了本所電子儀器室、貴儀中心及部分海洋物理組師生，開發項目包含了中控系統設計、錨錠設計、探針校驗與海上測試等。此浮標是為了觀測颱風期間的海氣象變化，並將接收到的資料即時回傳至地面作業單位所設計，中控系統的電路部分具有精小、省電、穩定等優點。而錨錠設計部分累積過去多年台美合作計畫之經驗，外觀與儀器深度配置參考自動化溫度資料收集系統(Autonomous Temperature Line Acquisition System, ATLAS) (Hayes et al., 1991) 浮標之原型，並將其改造，使其更加堅固。在圖 2-1 中展示了浮標示意圖，可從圖中知道浮標外觀與各探針相對位置，掛載探針之廠牌、型號與規格皆詳列於表 2-1 中。

本所設計之浮標是採用玻璃纖維材質的浮體，浮體之上，安裝氣象儀器與中控系統，氣象儀器與中控系統係直接由電線連結，而浮體之下則是連接絕緣鋼纜，此鋼纜是感應式傳導數據機(Inductive Modem, IM)的傳輸導體，將其與中控系統間利用感應傳導耦合器(Inductive Cable Couple)連接或是直接連接水下鋼纜，再於鋼纜上安裝具有感應式傳導功能之水下儀器，藉由電磁感應的方式將資料傳送至海面。且因為整條鋼纜皆為導體，故可在任意選定的深度安裝儀器，使得實驗設計較為彈性。而中控系統主要可以分成 2 大部分：氣象資料收集單元(Meteorological data Acquisition Unit, MAU)以及控制與通訊單元(Control and Communication Unit, CCU)。其運作過程為，當 CCU 命令 MAU 開始依指定頻率採樣後，MAU 會持續收集氣象資料，而水下儀器則是由 CCU 控制啟動時間與採樣頻率，接著 CCU 會定時向水下探針和 MAU 發送命令，使其回傳最新一筆的海、氣象資料，收到的資料會存在 CCU 中並且同時藉由銜衛星通訊數據機，將資料以電子郵件的方式傳送到作業單位(楊等人 2015; 2016a; 2016b; Chang et al. 2017)。

透過採用低耗電的電子零件與電路設計，此浮標系統使用 40 顆一號鋰電池，即可在海上執行一年以上的觀測，無須加裝太陽能板，且可透過衛星可將重要的水下觀測資料即時回傳。在系統控制部分，目前除了可以用電腦連線進行設定外，

還能接受無線電或是衛星遙控。如此一來，便可在颱風靠近浮標期間，藉由衛星遙控調整資料收集與回傳之頻率，也可以利用研究船在浮標附近作業時，藉由無線電遙控浮標作業亦或是下載原始資料。

在每次施放之前，浮標系統會放置到國立臺灣大學大氣科學系之氣象觀測坪進行系統整合測試與氣象儀器的比較校正，大氣系觀測儀器之廠牌、型號與規格皆詳列於表 2-2 中。圖 2-2 展示了 2015 年測試中氣溫校正前後之結果，在圖的上半部為校正前(左)與校正後(右)之氣溫散佈圖，圖中橫軸為浮標探針之觀測值；縱軸為觀測坪內探針之觀測值，圖中顯示校正之前兩者相關性很好，相關係數達 0.9996。而圖的下半部則是浮標儀器校正前(藍)、後(綠)以及觀測坪(紅線)資料之時間序列圖。從圖中可以看到在校正之後浮標之值和觀測坪內探針之觀測值幾乎重疊在一起。而圖 2-3~ 2-5 分別展示相對濕度、氣壓、太陽輻射量之校正前後差異，這 3 個觀測項目和觀測坪內的探針皆有很好的相關性，相關係數分別為 0.9966、0.9992、0.9876，此相關係數驗證了浮標氣象儀器之資料的可信度。而在 2016 年的校驗中也有相似的結果，2015 與 2016 年完整的校驗比較結果皆展示於表 2-3 當中。此外在 2016 年時，亦將使用到的 4 組氣壓計送至氣象局氣象儀器檢校中心進行氣壓校正，圖 2-6 繪製了這 4 組探針之校正結果，圖中橫軸為安裝於浮標上儀器讀值；縱軸為檢校中心內儀器讀值，以上 4 組資料的相關係數皆達 0.9999，再次確認了此氣壓計資料之可信度。

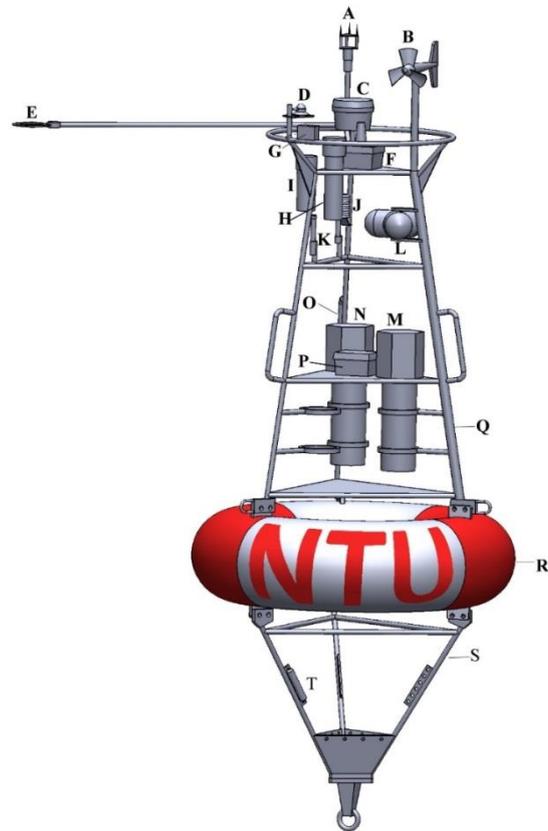


圖 2-1、海氣象即時傳輸浮標示意圖。A. 超音波風速計、B. 螺旋槳式風速計、C. 航行警示燈、D. 短波輻射儀、E. 淨輻射儀、F. 鈦衛星傳輸天線、G. 縮時攝影機、H. 雨量計、I. 獨立鈦衛星 GPS 位置發報器、J. 溫、溼度計、K. 無線電傳輸天線、L. 雷達反射器、M. CCU、N. MAU、O. 氣壓計、P. 磁羅經、Q. 上架、R. 玻璃纖維浮體、S. 下架、T. 海表溫度計。

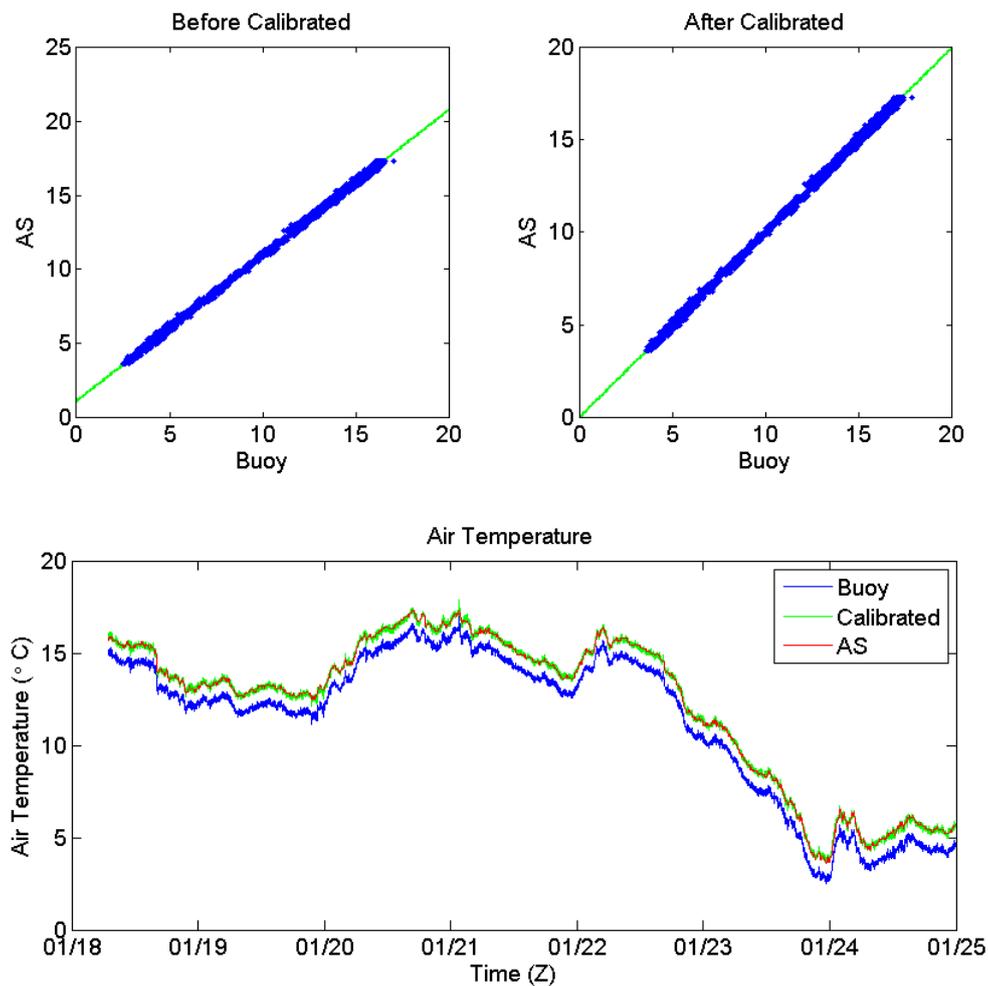


圖 2-2、校正前後氣溫比較圖。上面兩張縱軸為觀測坪儀器資料(以 AS 代稱之)，橫軸為浮標儀器資料(以 Buoy 代稱之)，綠線為線性迴歸後得到之趨勢線，左邊是校正前氣溫比較圖，右邊是校正後氣溫比較圖。下圖藍線和綠線分別為浮標儀器校正前、後以及觀測坪(紅線)資料之時間序列圖。浮標儀器與觀測坪中儀器之相關係數為 0.9996，校正迴歸式為 $y=0.99x+1.11$ ，其中 x 代表浮標探針校正前之值； y 代表浮標探針校正後之值。而校正後之樣本標準差為 0.11°C 。

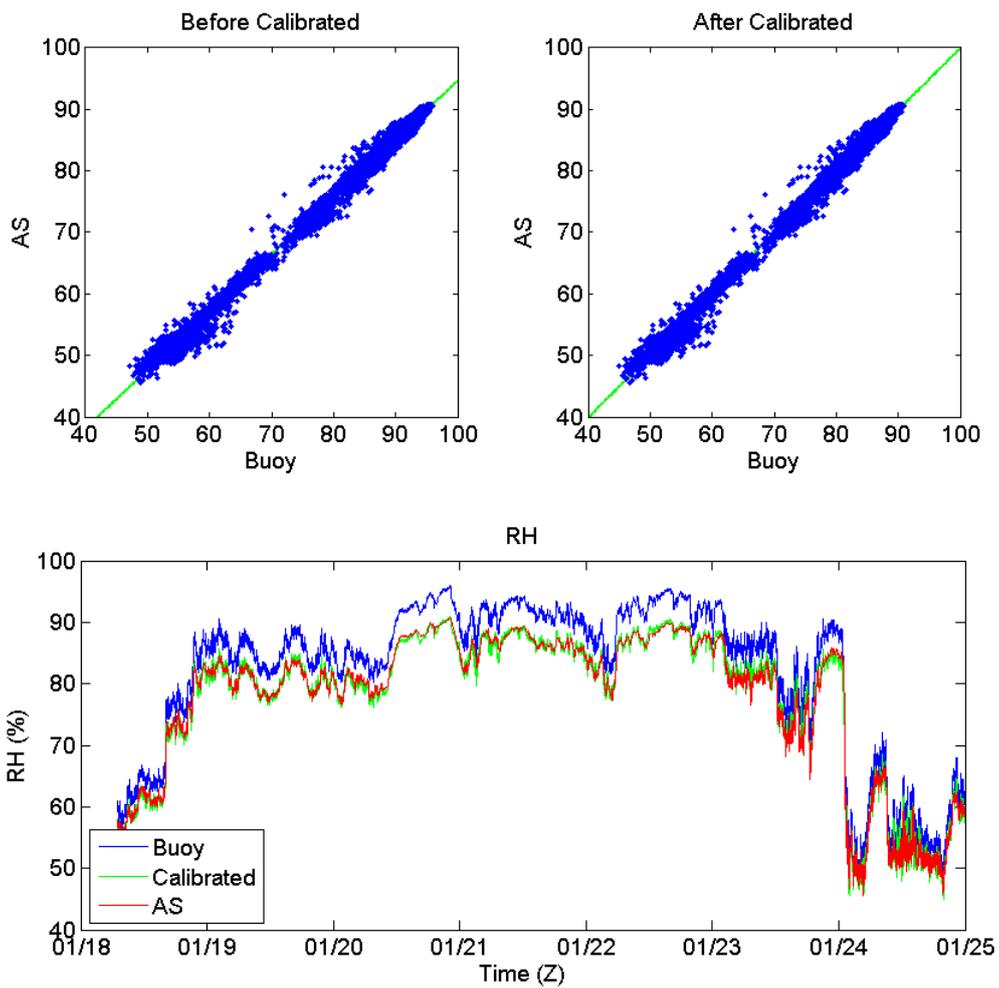


圖 2-3、校正前後相對濕度比較圖，縱軸與橫軸與線條顏色代表意義和圖 2-2 相同。浮標儀器與觀測坪中儀器之相關係數為 0.9966，校正迴歸式為 $y=0.94x+0.7$ ，其中 x 代表浮標探針校正前之值； y 代表浮標探針校正後之值。而校正後之樣本標準差為 0.96 %。

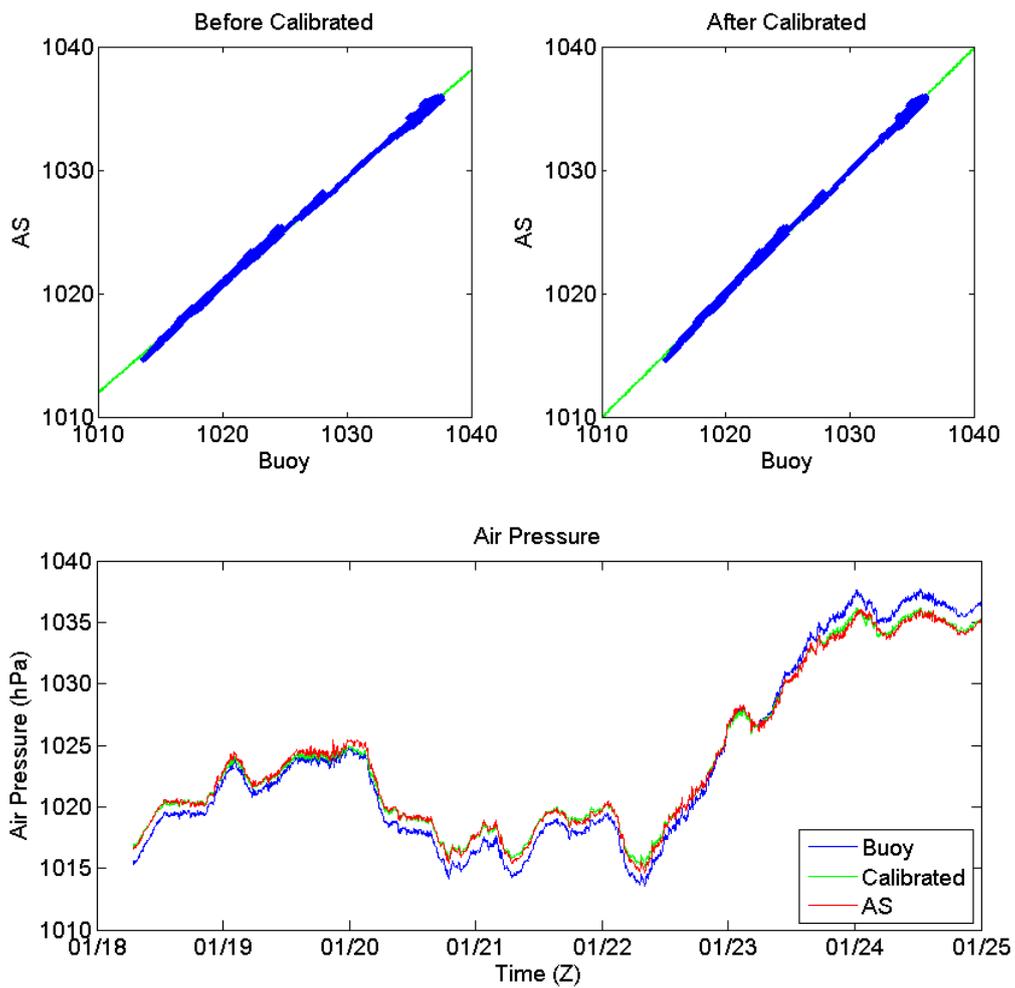


圖 2-4、校正前後氣壓比較圖，縱軸與橫軸與線條顏色代表意義和圖 2-2 相同。浮標儀器與觀測坪中儀器之相關係數為 0.9992，校正迴歸式為 $y=0.87x+131.95$ ，其中 x 代表浮標探針校正前之值； y 代表浮標探針校正後之值。而校正後之樣本標準差為 0.24 hPa。

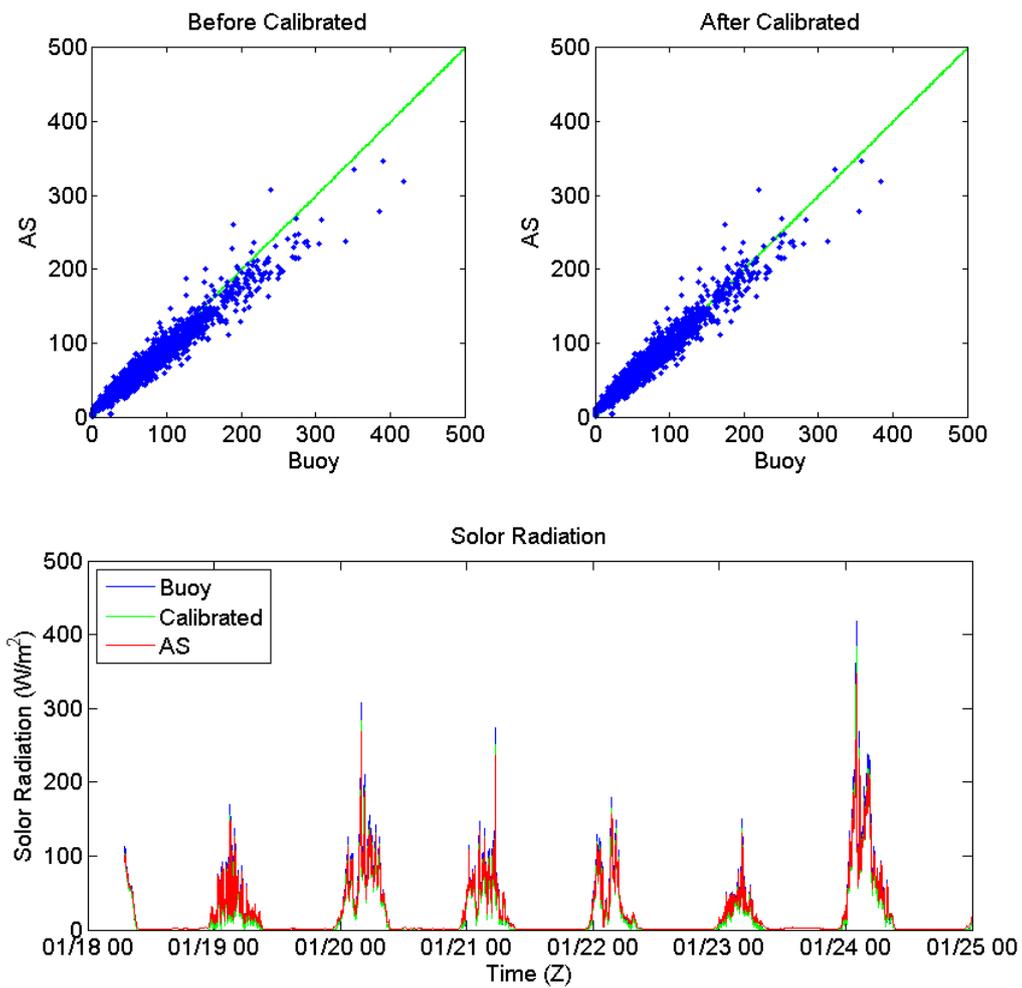
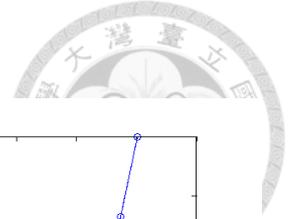
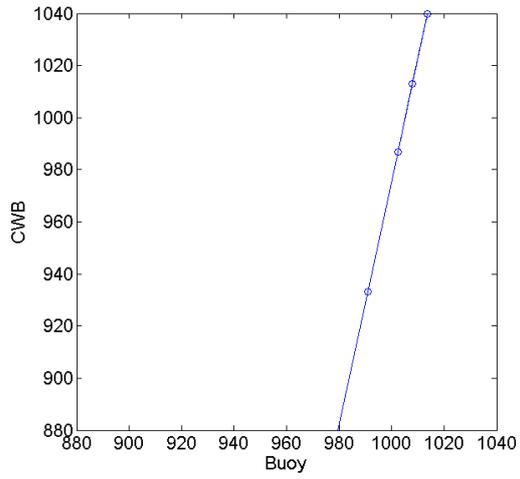


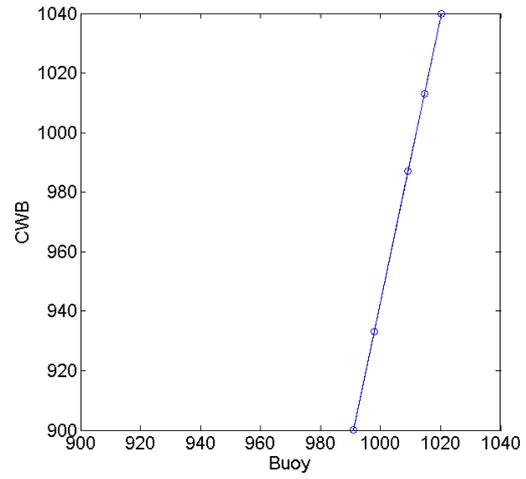
圖 2-5、校正前後太陽輻射量比較圖，縱軸與橫軸與線條顏色代表意義和圖 2-2 相同。浮標儀器與觀測坪中儀器之相關係數為 0.9876，校正迴歸式為 $y=0.92x$ ，其中 x 代表浮標探針校正前之值； y 代表浮標探針校正後之值。而校正後之樣本標準差為 5.68 W/m^2 。



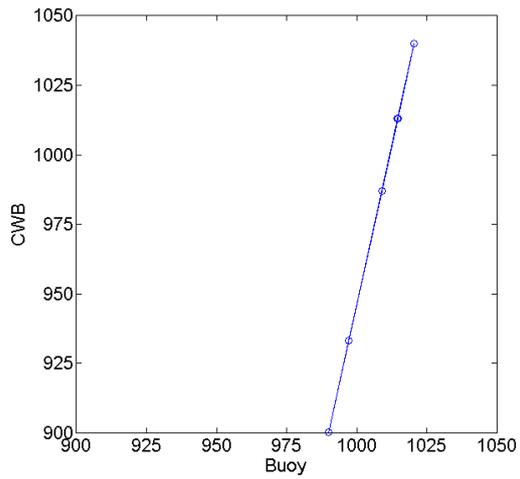
(A)



(B)



(C)



(D)

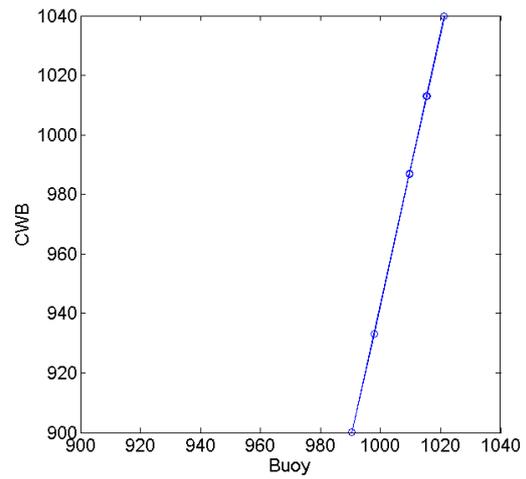


圖 2-6、於檢校中心 4 組氣壓計之氣壓校正數據。圖中橫軸為安裝於浮標上儀器讀值；縱軸為檢校中心內儀器讀值，每組相關係數皆為 0.9999。

表 2-1、掛載於浮標上之探針之儀器特性表

儀器	廠牌	型號	量測範圍	解析度
溫、溼度計	Vaisala	HMP 155	溫度：-80 ~ 60 °C	0.1 °C
			相對溼度：0 ~ 100 %	0.1 %
氣壓計	SINO	70A	800 ~ 1200 hPa	0.1 hPa
螺旋槳式 風向風速計	R.M. Young	05106	風速：0 ~ 100 m/s	0.01 m/s
			風向：0 ~ 360 °	0.1 °
超音波式 風向風速計	R.M. Young	86106	風速：0 ~ 70 m/s	0.01 m/s
			風向：0 ~ 360 °	0.1 °
短波輻射儀	EKO	MS-602	285 ~ 3000 nm	0.14 W/m ²
淨輻射儀	Kipp & Zonen	NR_Lite2	200 ~ 10 ⁶ nm	0.1 W/m ²
雨量計	R.M. Young	50202	0 ~ 50 mm	1 mm
縮時攝影機	Brinno	MAC200DN	6 m, 100 °	X
溫深鹽儀	Sea-Bird	37 IMP	鹽度：0 ~ 7 S/m	0.00001 S/m
			溫度：-5 ~ +45 °C	0.0001 °C
			深度：0 ~ 3500 m	0.07 m
溫深儀	Sea-Bird	39 IM	溫度：-5 ~ +45 °C	0.0001 °C
			深度：0 ~ 600 m	0.012 m
溫深儀	Sea-Bird	39	溫度：-5 ~ +45 °C	0.0001 °C
			深度：0 ~ 1000/3500/7000m	0.002% of full scale range
單點流速計	Nortek	Aquadopp Current Meter 2mHz	流速：±5 m/s	0.5 cm/s
			溫度：-4 ~ +40 °C	0.01 °C
表水溫度計	SINO	70T	0 ~ 70 °C	0.1 °C

表 2-2、大氣系觀測坪中用於校驗儀器之儀器特性表

儀器	廠牌	型號	量測範圍	解析度
溫、溼度計	Vaisala	WXT520	溫度：-52 ~ 60 °C	0.1 °C
			相對溼度：0 ~ 100 %	0.1 %
氣壓計	Vaisala	WXT520	600 ~ 1100 hPa	0.1 hPa
短波輻射儀	Licor	LI-200R	400 ~ 1100 nm	0.075 W/m ²

表 2-3、掛載於浮標上之氣象探針的校正前後數據表

觀測項目	與觀測坪中儀器比對之相關係數	校正迴歸式	校正後之樣本標準差
2015 (NTU1)			
氣溫	0.9996	$y=0.99x+1.11$	0.1150°C
相對溼度	0.9966	$y=0.94x+0.7$	0.9662 %
氣壓	0.9992	$y=0.87x+131.95$	0.2494 hPa
日照量	0.9876	$y=0.92x$	5.6865 W/m ²
2016 (NTU1)			
氣溫	0.9759	$y=1.0743x-1.5603$	0.2297°C
相對溼度	0.9544	$y=0.9952x-5.6628$	1.5210 %
氣壓	0.9364	$y=3.5503x-2.6806$	0.3510 hPa
2016 (NTU2)			
氣溫	0.9597	$y=0.9758x+1.1285$	0.2958°C
相對溼度	0.9435	$y=0.9172x-0.3801$	1.6882 %
氣壓	0.8011	$y=3.12x-2285$	0.5986 hPa

第三章 實驗與資料介紹



3.1 實驗設計

本實驗的目的為測試海氣象即時傳輸浮標在海上之穩定性，並測試是否能抵擋颱風來襲時的惡劣海況，為取得颱風資料，實驗皆於夏季進行，在實驗過程中成功收集到 9 個颱風的資料，接下來將分別敘述在 2015 年和 2016 年時的實驗地點的選擇、儀器配置、系統設定與過程。

3.1.1 2015 年

2015 年的測試實驗從 6 月 9 日開始，到 9 月 2 日結束，地點選擇是參考颱風路徑統計結果與當地水文特性及地形而定，因為 2015 年為聖嬰年，所以統計過去聖嬰年的颱風路徑，其中聖嬰年的定義是和海洋聖嬰指數(Oceanic Niño Index, ONI)有關，其中當連續 5 個月高於 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 即視為聖嬰年，反之連續 5 個月低於 -0.5°C 為反聖嬰年，而 ONI 是以 ERSST.v4 的海表溫資料，在 Niño 3.4 區域($5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ} \sim 170^{\circ}\text{W}$)內先做 3 個月的滑動平均(running mean)再移除此區域 30 年的海表溫平均值求得。颱風路徑資料則採用日本氣象廳的最佳路徑資料。路徑統計是先將颱風路徑用線性內插為半小時 1 筆後，然後再計算每 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的網格中有幾個颱風經過，統計結果展示在圖 3-1a，利用此圖找出聖嬰年的颱風熱區後，再選擇對臺灣會有較大危害之臺灣東南邊的熱區並避開強流與地形崎嶇的區域，選定部放在東經 123.9 度，北緯 21.1 度，約鵝鑾鼻東南方約 375 公里處，並命名為 NTU1 站，當地水深約 5500 公尺。

2015 的實驗中，浮標於浮體上安裝了溫、溼度計、螺旋槳式風向風速計、氣壓計、短波輻射儀等氣象儀器，水下部分則有多組溫深鹽儀、溫深儀，水下儀器的深度配置是參考 1984 年美國國家海洋暨大氣管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)在赤道太平洋海域執行熱帶大氣-海洋計畫(Tropical Atmosphere Ocean project, TAO)中 ATLAS 浮標之設計，詳細配置請見表 3-1，而採樣頻率的設定在氣象部分探針為 6 分鐘 1 筆；海象探針則為 1 分鐘 1 筆，而每 6 分鐘所有氣象和水下有 IM 功能的儀器就會回傳最新 1 筆的資料到中控系統，



而中控系統每 30 分鐘就會經由鈹衛星回傳 6 筆資料到陸地中控站。實驗過程中，在蘇迪勒颱風經過後，風向與風速資料，因訊號處理的盒子進水使得資料有誤；氣溫資料則是在天鵝颱風過後，因探針濾蓋軟化進水使資料品質不佳，以上兩段品質不佳的資料將不採用；另外 1400 公尺以下的探針因回收時纜線斷裂致使落海無資料；水下部分探針受魚線纏繞、纜線高頻震盪影響，探針內部電路受損，所以部分時段無資料。

3.1.2 2016 年

2016 年的測試實驗從 6 月 27 日開始，於 10 月 13 日結束，除了 2015 年所放的 NTU1 站外，還多放了 1 組浮標於鵝鑾鼻東南方約 175 公里處，並命名為 NTU2 站，因 2016 為強聖嬰年的後 1 年，且可能成為反聖嬰年，因此選取前 1 年為強聖嬰年(ONI>1.0)的反聖嬰年，即 1964、1973、1988、1995、1998、2007、2010 等 7 年間 6 月到 10 月的歷史颱風路徑，統計後繪於圖 3-1b 中，利用此結果找出強聖嬰年後一年之 6 到 10 月間的颱風熱區後，再選擇對臺灣會有較大危害之臺灣東南邊的熱區並避開強流與地形崎嶇的區域，將 NTU2 站定在東經 21.9 度，北緯 122.6 度，當地水深約 4860 公尺。

2016 的實驗中，除了 2015 年已安裝於浮標上的儀器項目之外，在氣象儀器部分多了超音波式風向風速計、淨輻射儀、雨量計、縮時攝影機等；水下儀器則多了單點流速計、表水溫度計，儀器深度配置近似 2015 年，詳細深度與採樣頻率配置請見表 3-2，而每 6 分鐘所有氣象和水下有 IM 功能的儀器就會回傳最新一筆的資料到中控系統，在非颱風影響與颱風影響期間中控系統分別為每 30 分鐘與每 12 分鐘經由鈹衛星回傳最新一筆資料到陸地上的中控站。測試過程中，因受到超級颱風尼伯特的侵襲，使部分儀器有故障的問題，因此在 2016 年 8 月 3 日和 4 日分別到 NTU2 站與 NTU1 站更換備品。而資料部分，因兩站的雨量計集水蓋因尼伯特颱風的強力吹襲皆遺失，所以在後面的資料討論中將不會使用；而位於水深 25 m 的單點流速計皆因颱風引起的強流使鋼纜高頻震盪，進而使得電池爆炸，只留下 NTU2 站在尼伯特颱風離開前的資料。在 NTU1 站因梅姬颱風的肆虐使風速計折損；在 NTU2 站 8 月以前氣溫探針故障、馬勒卡颱風後氣溫探針濾蓋進水，以上資料品質不佳的部分在研究中將不使用。



3.2 資料介紹

本研究主要利用海氣象即時傳輸浮標所量測的海象與氣象資料來討論當颱風經過海面時會造成的海氣象變化，由於錨碇觀測僅限於空間上少數幾個點，因此配合使用了衛星遙測資料與模式資料輔助研究，此小節將依序介紹本研究所使用的資料，並將遙測與模式資料選用時間與解析列於表 3-4 中。

3.2.1 浮標資料

浮標資料為前一節提到的實驗而得，在 2015 年 6 月 9 日到 9 月 2 日的觀測期間內收到的氣象資料有氣溫、氣壓、風向、風速、相對濕度、太陽輻射量，水下則是有溫度與鹽度資料，資料長度與筆數紀錄於表 3-1 當中。而 2016 年 6 月 27 日到 10 月 13 日的觀測期間中，除了 2015 年就有的資料外，氣象部分增加了淨輻射量、雨量與縮時攝影的觀測；水下部分則是多了位於水深 25 m 與 75 m 的單點流速觀測，NTU1 與 NTU2 兩站的資料長度與筆數紀錄於表 3-2 和 3-3 當中。

3.2.2 表面高度異常資料

本研究所使用的表面高度異常值(Sea Level Anomaly, SLA)資料取自法國 Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO)，該資料整合 OSTM/Jason-2、AltiKa、Cryosat-2、Haiyang-2A 等衛星的測高儀測到的海表面高度資料，再減去 1993 到 1999 間 7 年間的海表面高度資料之平均而得，該資料中心將資料網格化成 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，且時間解析度為 7 天 1 筆，資料包含了海面氣壓與潮汐修正(AVISO, 2017)。本研究使用 2015 年 6 月 9 日到 9 月 2 日與 2016 年 6 月 27 日到 10 月 13 日之資料做為大範圍背景場之參考。

3.2.3 大氣模式資料

颱風引起的惡劣天氣使得部分氣象儀器在颱風侵襲後有損壞的情形，為補足缺失資料，因此援用美國環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)產出的全球每日分析資料(NCEP Daily Global Analyses)，該資料為放入衛星遙測資料、部分地面測站資料再由預報模式產出之資料，我們選用位於海表面的氣溫、氣壓、相對溼度、風向和風速等分析場資料，該資料時間解析

為 1 天 1 筆，而空間解析則是 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (NCEP, 2017)。本研究使用 2015 年 6 月 9 日到 9 月 2 日與 2016 年 6 月 27 日到 10 月 13 日之資料做為浮標資料補遺之參考。



3.2.4 海表溫資料

本研究使用之海表溫資料來自 NOAA 底下的美國國家環境資訊中心(National Centers for Environmental Information, NCEI)，海表溫透過進階極高解析度輻射儀(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)測得，此輻射儀搭載在一系列 NOAA 繞極衛星上，利用紅外線的波段量測海表溫度，該資料中心整合數個衛星，並將資料網格化為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，其時間解析度為 1 天 1 筆(AVHRR, 2017)。本研究使用 2016 年 6 月 27 日到 10 月 13 日之資料做為海表溫衛星產品之代表。

3.2.5 熱通量資料

本研究使用之熱通量資料來自於伍茲霍爾海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI) 底下的客觀分析海氣通量計畫(Objectively Analyzed air-sea Fluxes, OAFlux)，該計畫提供之熱通量產品包含潛熱通量與可感熱通量，空間解析度為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ；時間解析度有 1 天 1 筆與 1 個月 1 筆兩種。此熱通量產品是將各衛星產品提供之氣象資料透放入 TOGA COARE 第 2.6a 版的計算套件中求得，而放入的氣象資料包含來自多個衛星或模式的產品，包含：SSM/I、Quick Scatterometer (QuikSCAT)、AVHRR、TMI、AMSR-E、European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)、the 40-year ECMWF Re-Analysis (ERA-40)、NCEP 再分析資料等(OAFlux, 2017)。本研究在 2015 年 6 月 9 日到 9 月 2 日與 2016 年 6 月 27 日期間，使用每日一筆的 OAFlux 資料，用於比較實測推估與遙測推估之熱通量差異。此外，選用西元 1958 年到 2016 年的每月一筆的 OAFlux 資料，來了解聖嬰與反聖嬰年在 NTU1 站這位置上，熱通量之變化。

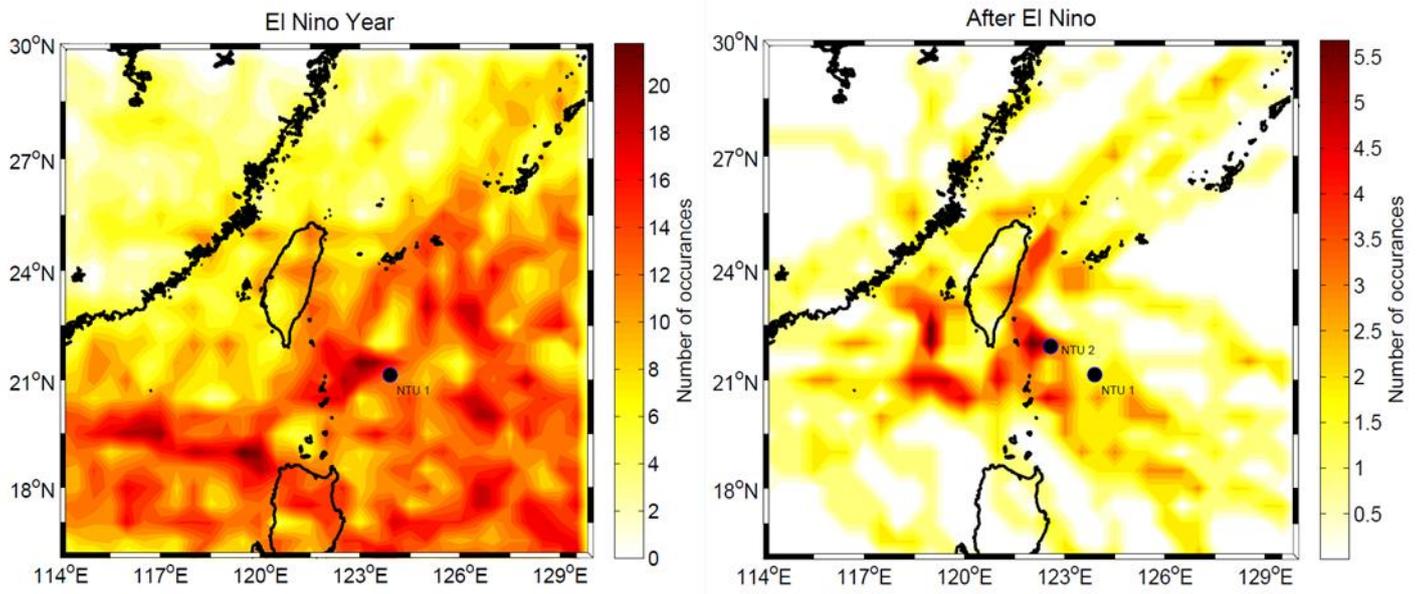


圖 3-1、(a) 聖嬰年期間颱風途經次數分布圖。(b) 強聖嬰年(ONI>1.0)後 1 年，且為反聖嬰年之 6 到 10 月的颱風途經次數分布圖。

表 3-1、2015 年實驗所使用的儀器列表

深度(公尺)	儀器	採樣頻率	採樣時間	資料筆數
*	溫、溼度計	6 分鐘	6/9 07:02:04 ~ 8/22 20:53:05	17899
*	氣壓計		6/9 07:02:04 ~ 9/2 23:59:09	20570
*	螺旋槳式風 向風速計		6/9 07:02:04 ~ 8/7 02:40:05	14117
*	短波輻射儀		6/9 07:02:04 ~ 9/2 23:59:09	20570
5	溫深鹽儀	1 分鐘	6/9 07:00:28 ~ 9/2 23:59:28	123420
25			6/9 07:00:28 ~ 8/24 21:13:28	109913
50			6/9 07:00:28 ~ 8/7 05:21:28	84855
75			6/9 07:00:28 ~ 8/7 04:00:28	84767
100			6/9 07:00:28 ~ 9/2 23:59:28	123420
125	溫深儀(IM)		7/17 00:08:16 ~ 8/31 10:53:16	65446
150			6/9 07:00:00 ~ 8/31 03:42:27	119323
200			6/9 07:00:00 ~ 8/31 03:42:27	119323
250			6/9 07:02:27 ~ 7/10 05:19:26	10129
300			故障	故障
500	溫深儀	6/9 07:02:27 ~ 8/6 16:34:26	13913	
700		6/9 07:00:00 ~ 8/31 18:48:00	120229	
900		6/9 07:00:00 ~ 8/31 14:28:00	119969	
1400		落海遺失	落海遺失	
1900		落海遺失	落海遺失	
3000		落海遺失	落海遺失	

*水面上之探針

表 3-2、2016 年 NTU1 站實驗所使用的儀器列表

深度(公尺)	儀器	採樣頻率	採樣時間	資料筆數
*	溫、溼度計	6 分鐘	6/27 08:20:19 ~ 10/13 10:41:39	25901
*	氣壓計			25901
*	螺旋槳式風 向風速計		6/27 08:20:19 ~ 9/23 10:59:39	21108
*	超音波式風 向風速計		6/27 08:20:19 ~ 9/16 06:53:39	12612
*	短波輻射儀		6/27 08:20:19 ~ 10/13 10:41:39	25901
*	淨輻射儀			25901
*	雨量計		X	X
0	表水溫度計	6 分鐘	6/27 08:20:19 ~ 10/13 10:41:39	25901
5	溫深鹽儀	1 分鐘	6/27 10:00:16 ~ 10/13 17:29:43	54771
25	單點流速計	10 分鐘	6/27 08:12:00 ~ 7/4 08:32:00	1968
50	溫深鹽儀	1 分鐘	6/27 10:00:16 ~ 10/13 17:29:43	54772
75	單點流速計	10 分鐘	6/27 07:07:00 ~ 10/13 09:37:00	15568
100	溫深鹽儀	1 分鐘	6/28 10:24:01 ~ 10/13 17:29:43	53309
125			6/27 10:00:16 ~ 10/13 16:17:43	54747
150	溫深儀(IM)		6/27 10:00:17 ~ 10/13 17:29:43	54774
200			6/27 10:00:17 ~ 10/13 17:29:43	54774
250			6/27 10:00:26 ~ 10/13 17:29:47	54773
300			6/27 10:00:26 ~ 10/13 17:29:47	54773
500			6/27 10:00:26 ~ 10/13 17:29:47	59962
700			溫深儀	6/27 10:00:00 ~ 9/22 10:04:00
900	6/27 10:00:00 ~ 9/14 11:07:00	113828		

*水面上之探針

表 3-3、2016 年 NTU2 站實驗所使用的儀器列表

深度(公尺)	儀器	採樣頻率	採樣時間	資料筆數
*	溫、溼度計	6 分鐘	6/26 07:30:23 ~ 10/14 11:24:17	13877
*	氣壓計		6/26 07:30:23 ~ 10/14 11:24:17	26347
*	螺旋槳式風 向風速計		6/26 07:30:23 ~ 10/14 11:24:17	26347
*	超音波式風 向風速計		6/26 07:30:23 ~ 10/14 11:24:17	19563
*	短波輻射儀		6/26 07:30:23 ~ 10/14 11:24:17	26347
*	淨輻射儀		6/26 07:30:23 ~ 10/14 11:24:17	26347
*	雨量計			X
0	表水溫度計	6 分鐘	6/26 07:30:23 ~ 10/14 11:24:17	26347
5	溫深鹽儀	1 分鐘	6/26 10:10:20 ~ 10/14 19:22:44	63940
25	單點流速計	10 分鐘	6/26 03:30:00 ~ 8/4 11:10:07	3619
50	溫深鹽儀	1 分鐘	6/26 10:10:20 ~ 10/14 19:22:44	63940
75	單點流速計	10 分鐘	6/26 03:40:00 ~ 10/14 09:51:13	14943
100	溫深鹽儀	1 分鐘	6/26 10:10:20 ~ 10/14 19:22:44	90923
125			6/26 10:10:20 ~ 10/14 19:22:44	63940
150	溫深儀(IM)		6/26 10:10:21 ~ 10/14 19:22:45	90914
200			6/26 10:10:21 ~ 10/14 19:22:41	63930
250			6/28 13:02:10 ~ 10/14 19:22:50	87856
300			6/26 10:10:54 ~ 10/14 19:24:54	158955
500			6/26 10:13:46 ~ 10/14 19:24:10	37255
700			溫深儀	6/26 10:10:00 ~ 9/21 02:35:00
900	8/25 20:00:00 ~ 10/14 19:25:00			71966

*水面上之探針

表 3-4、採用之衛星與模式產品彙整表



衛星產品	採用時間	空間解析	時間解析
AVISO 表面高度異常值	2015/06/09 ~ 2015/09/02、 2016/06/27 ~ 2016/10/13	0.25° × 0.25°	7 天
NCEP 氣象資料	2015/06/09 ~ 2015/09/02、 2016/06/27 ~ 2016/10/13	0.25° × 0.25°	1 天
AVHRR 海表溫	2016/06/27 ~ 2016/10/13	0.25° × 0.25°	1 天
OAFlux 熱通量	2015/06/09 ~ 2015/09/02(daily)	1° × 1°	1 天
	1958 ~ 2016 (monthly)		1 個月

第四章 資料分析



在 2015 和 2016 年兩年的實驗中，共有 9 個颱風經過浮標所在位置之附近海域，分別是 2015 年觀測到的蓮花、昌鴻、蘇迪勒、天鵝等 4 個颱風及 2016 年觀測到的尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡、梅姬、艾利等 5 個颱風。在接下來的文章中，將先簡述觀測期間內收集到的海氣象資料，其中因為部分觀測儀器在實驗中有故障的問題發生，所以擬用遙測與模式資料補遺，故需進行其與實測資料比對，確認其準確性，此部分將會在 4.1 節中說明。接著會運用補遺後之資料估算其上層海洋熱含量與海氣熱通量，估算方法與結果將在 4.2 節中說明。而在 4.3 節中將利用 2016 才有的流速資料探討颱風所造成之慣性運動。最後利用尼伯特經過浮標期間，說明颱風短時間內所造成的上層海洋變化，個案分析的選擇與變化過程將在 4.4 節中說明。

4.1 資料初步分析

4.1.1 觀測資料簡述

參考中央氣象局最佳化的颱風路徑資料其路徑顯示於圖 4-1 與圖 4-2 當中，圖中顯示昌鴻、蘇迪勒、梅姬從浮標的北邊通過；蓮花、莫蘭蒂、艾利從浮標的南邊通過；天鵝是先經過浮標的南方再右轉北上經過浮標西側；尼伯特先經過 NTU1 站的北側再經過 NTU2 站的南側；馬勒卡從 NTU1 站東南方逐漸北上通過 NTU1 站後持續北上，經過 NTU2 站的東側，這 9 個颱風之中，最靠近浮標的颱風分別為尼伯特與馬勒卡，皆在 2016 年觀測到，尼伯特的颱風中心與 NTU1 站和 NTU2 站距離分別為 5.7 km 和 15 km，而馬勒卡颱風距離 NTU1 站僅數百公尺，若定義颱風影響期間定為浮標在 7 級暴風半徑籠罩下的時間，蘇迪勒影響時間為 2015 年 8 月 6 日 18 時到 8 月 7 日 17 時；天鵝影響時間為 2015 年 8 月 21 日 21 時到 8 月 22 日 21 時；尼伯特影響時間為 2016 年 7 月 6 日 18 時到 7 月 7 日 23 時；莫蘭蒂影響時間為 2016 年 9 月 13 日 3 時到 9 月 14 日 2 時；馬勒卡影響時間為 2016 年 9 月 16 日 0 時到 9 月 16 日 21 時；梅姬影響時間為 2016 年 9 月 26 日 5 時到 9 月 27

日 6 時，整體而言，影響時期都接近 24 小時，以上 9 個颱風的特性整理請見表 4-1 與表 4-2。

圖 4-3、4-6、4-7 分別是 2015 年在 NTU1 站、2016 年在 NTU1 和 NTU2 站所收集到的氣象資料，從圖中可以看到在非颱風影響期間，因每日規律的日出日落而使氣溫、日照都有明顯的日變化。而因有大氣潮汐的存在，氣壓亦有規律的日變化。而在颱風影響期間，颱風為強烈的氣旋，當颱風逐漸靠近氣壓隨之下降、風速隨之上升，當颱風強度越強或與浮標距離越近，氣壓會下降的越多而風速會增加的越多，例如：在 2015 年的颱風案例，雖然天鵝颱風與浮標之距離較蘇迪勒颱風的小，但因蘇迪勒颱風較強，因此浮標在蘇迪勒颱風經過時量到的最低氣壓小於天鵝颱風時的 6 hPa 左右；還有 2016 年的尼伯特和馬勒卡颱風，雖然馬勒卡颱風與 NTU1 站之距離較尼伯特颱風的小，但因尼伯特颱風的強度為第 5 等級而馬勒卡颱風的強度為第 4 等級，因此浮標在尼伯特颱風和馬勒卡颱風經過時觀測到相同的最低氣壓 936 hPa，而記錄到的風則大上 6 m/s。接著因颱風靠近，大量的雲層遮蔽天空使太陽輻射量減少，太陽提供的熱無法到地面加上降水冷卻效應則使氣溫降低。

在圖 4-4 為 2015 年在 NTU1 站所測到的上層海溫剖面資料，圖中可以看到從 6 月 11 日到 6 月 19 日暖水層厚度在 8 天之內增加了約 100 公尺，並且在 6 月 19 日到 6 月 29 日約 10 天內又恢復到原本的厚度；暖水層厚度在蘇迪勒颱風經過時有略為減少，且海表溫下降；而天鵝颱風滯留在該區域較久，因此當地海表溫降的較多，且在颱風過後暖水層厚度有明顯的近慣性運動，針對 6 月初暖水層厚度的改變，參考 AVISO 所提供的海表高度異常資料，將暖水層增厚前、增厚時、增厚之後所對應的時間繪製在圖 4-5，發現因當時有暖心渦旋經過，使暖水層在 8 天之內增厚了約 100 公尺，且在 10 天內又恢復到原本的厚度，然而暖水層變厚或變淺的時間各約莫 10 天，但衛星提供的海表高度異常資料時間解析卻是 7 天 1 筆，由此可知，若要利用衛星所提供的海表高度異常資料來作為暖水層厚度的估計，可能無法提供快速且變化大的訊息。而 2016 年在 NTU1 和 NTU2 站的上層海溫剖面資料分別在圖 4-8、4-9 中展示，因當年第 1 個颱風一直到 7 月才形成，因此在 7 月 7 日尼伯特颱風靠近前，兩站的海表溫都高達 32°C，而颱風過後則明顯的降了 3°C 左右，而 7 月中到 9 月初亦沒有颱風經過此海域，使得海表溫持續回暖，一直

到莫蘭蒂、馬勒卡、梅姬接連出現，使暖水層中的水溫下降，但厚度增加。而圖 4-10 當中的海流資料顯示，在莫蘭蒂與馬勒卡颱風靠近時，在 NTU1 站的 75 公尺海流速到約達 1.5 m/s。



4.1.2 資料比對

因觀測期間有部分儀器故障，因此擬用遙測資料補遺，故需進行遙測與實測資料比對，確認其準確性。首先將浮標觀測到的氣象資料與 NCEP 產出之氣象預報模式分析場資料相比(圖 4-11)，以 2015 年資料為例，看到相對溼度、溫度、風速有低估的現象，且因為 NCEP 資料為 1 天 1 筆，因此無法表現出溫度與氣壓的日變化，以及颱風或其他事件造成的短時間變化之極值，此外將觀測資料與 NCEP 資料畫成散佈圖後(圖 4-12)，這 5 個參數相關性最高的是氣壓，相關係數達 0.95，而最差的是風速，相關係數只有 -0.02，如此低的相關性主要是颱風的高風速時期，兩者差異甚大，從圖中可發現，在風速低的時候，兩者大致依附在等值線(綠色線)附近，相關性不低，但在風速高的時候，NCEP 的資料則有明顯的低估，故整體趨勢來看，NCEP 的資料還是有一定的參考性，因此在之後海氣熱通量的估算上，將以 NCEP 的資料補足資料缺失的部分。

而 2016 年新增了海表溫這個觀測項目，將標觀測到的與 AVHRR 的海表溫資料做比較，並將時序圖畫在圖 4-13 當中，圖中顯示兩者趨勢相似，但在海溫快速變化時，如 NTU1 站與 NTU2 站在 7 月 7 日時，AVHRR 的資料是不能及時掌握的，推測原因有兩個，一、時間尺度差異太大，海表溫快速變化只需要數小時但 AVHRR 的資料是 1 天 1 筆；二、若是在颱風靠近時，海表溫觀測受大量雲層遮蔽的影響，致使資料品質不佳。而兩者的散射圖繪於圖 4-14 上，圖中顯示 NTU2 站 AVHRR 資料的相關性較 NTU1 站佳，而此散射圖顯示 AVHRR 的海表溫資料位於 NTU1 站有高估的趨勢。

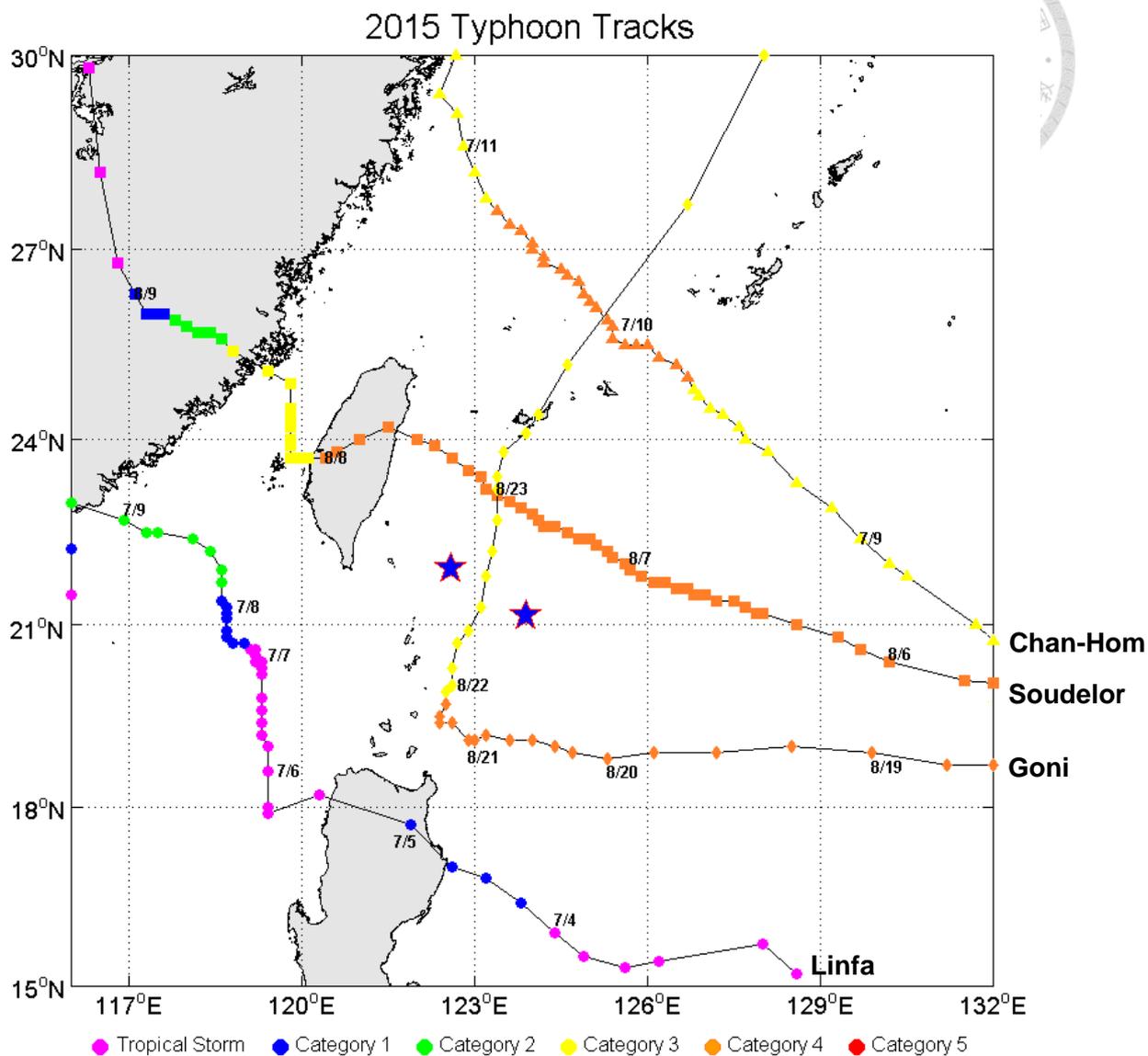


圖 4-1、2015 年經過浮標附近之颱風路徑圖，圖中星號為 NTU1 站浮標；圓形代表蓮花颱風；正三角形為昌鴻颱風；正方形為蘇迪勒颱風；菱形為天鵝颱風。而圖形中填滿的色彩代表颱風等級，紫色是熱帶氣旋；第 1 等級到第 5 等級分別是藍色、綠色、黃色、橘色、紅色。

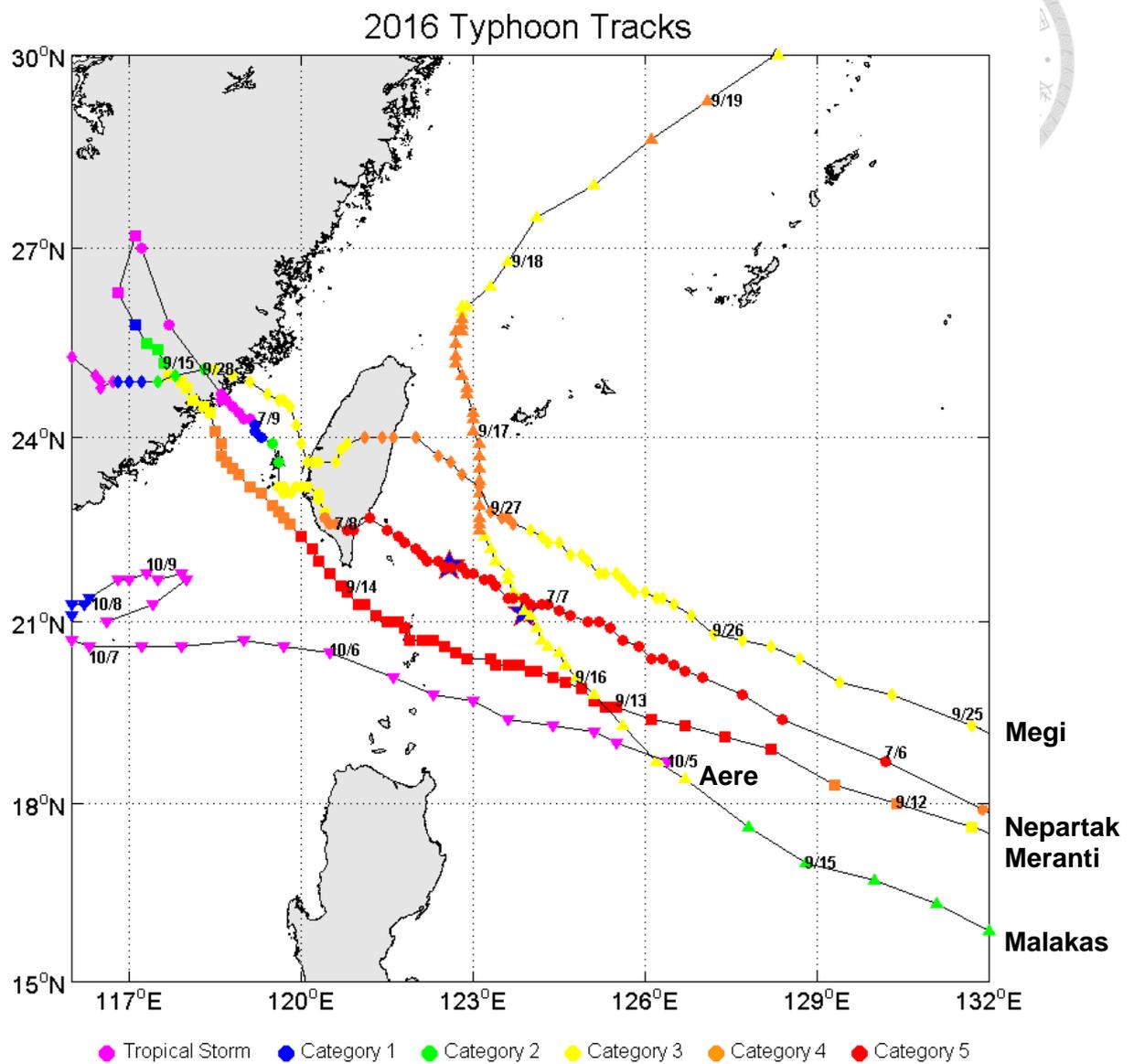


圖 4-2、2016 年經過浮標附近之颱風路徑圖。圖中星號為 NTU1(右)與 NTU2(左)站浮標；圓形代表尼伯特颱風；正三角形為馬勒卡颱風；正方形為莫蘭蒂颱風；菱形為梅姬颱風；倒三角形為艾利颱風。而圖形中填滿的色彩代表颱風等級，紫色是熱帶氣旋；第 1 等級到第 5 等級分別是藍色、綠色、黃色、橘色、紅色。

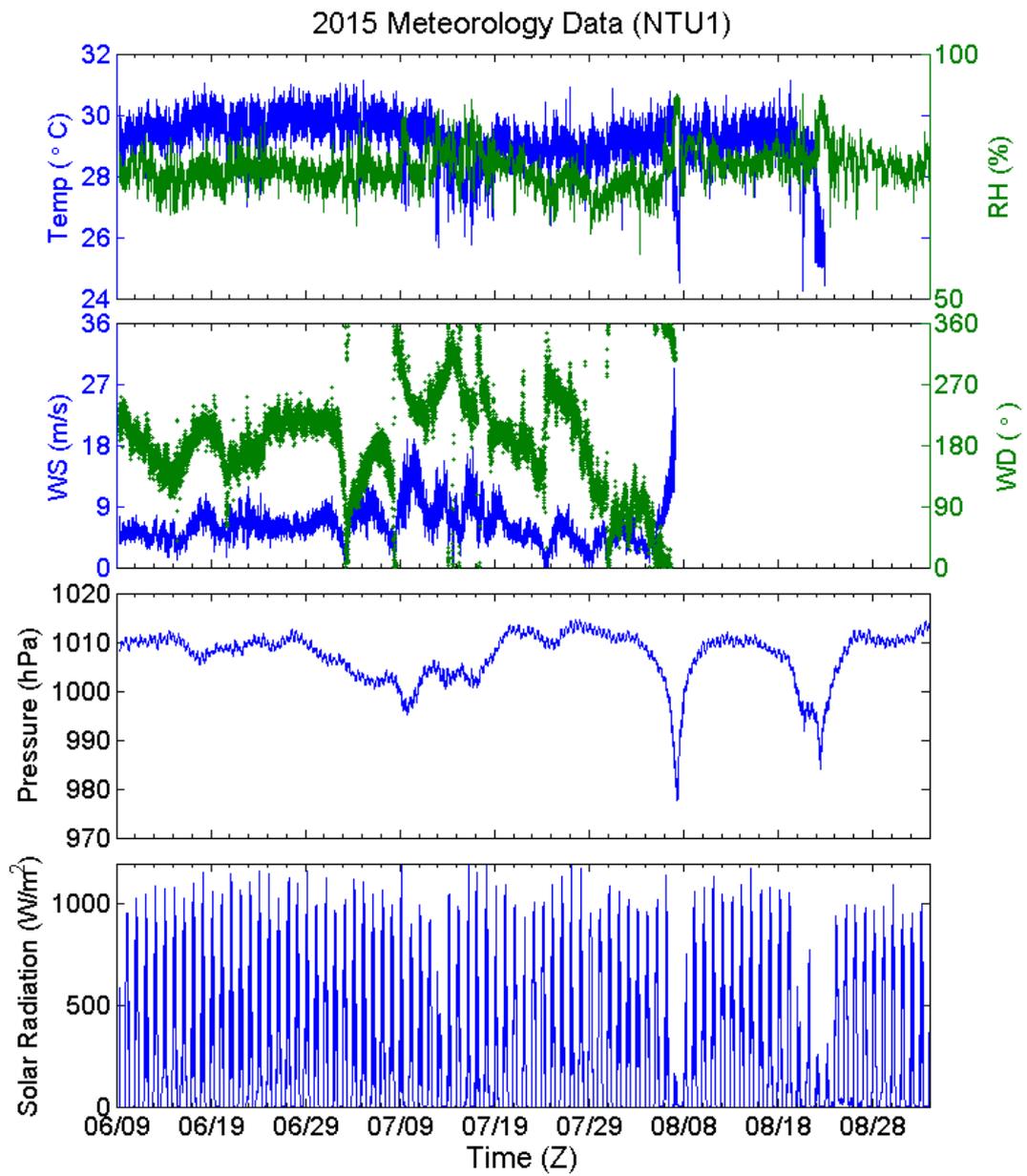


圖 4-3、2015 年在 NTU1 站氣象觀測資料，由上往下分別為溫度(藍)和相對溼度(綠)、風向(藍)和風速(綠)、氣壓、太陽輻射量。

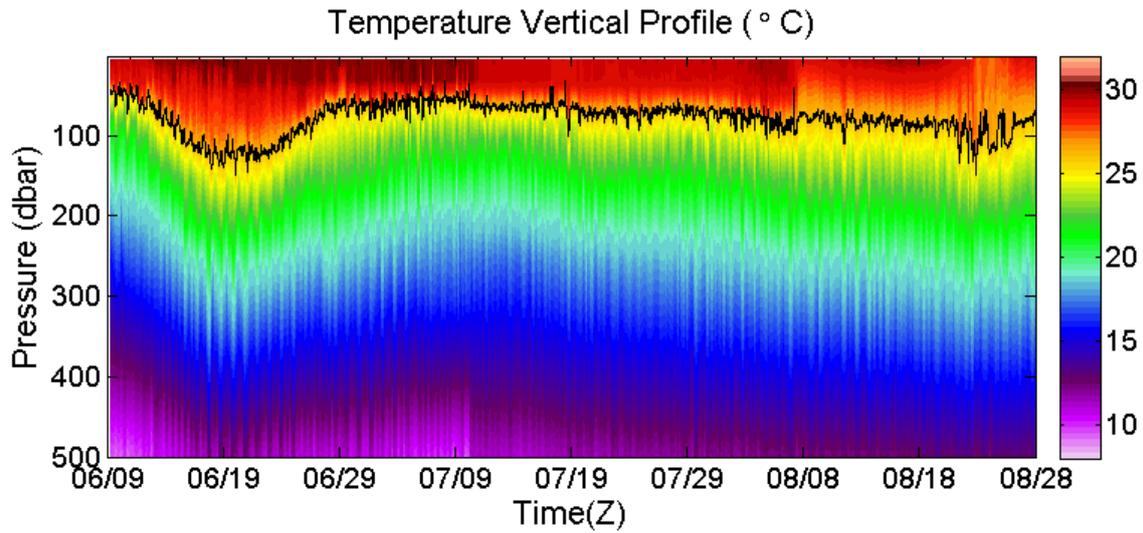


圖 4-4、2015 年在 NTU1 站海洋上層 500 公尺溫度剖面圖，圖中黑線為 26°C 等溫線。

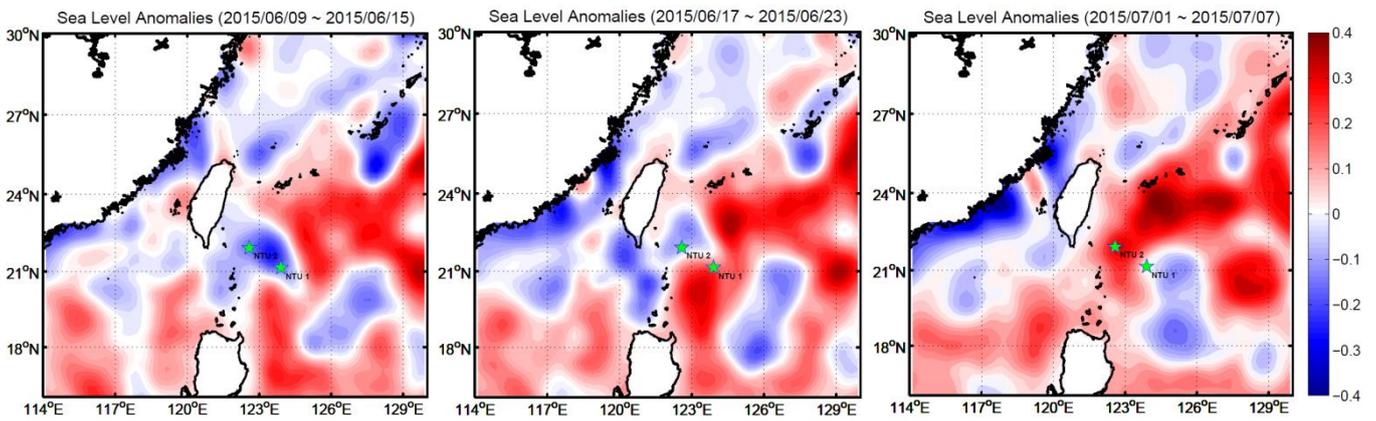


圖 4-5、由左至右為 2015 年 6 月 9 日到 6 月 15 日、6 月 17 日到 6 月 23 日、7 月 1 日到 7 月 7 日三段時間之海表高度異常值，綠色星號分別為 NTU1 站(右)與 NTU2 站(左)站點位置。

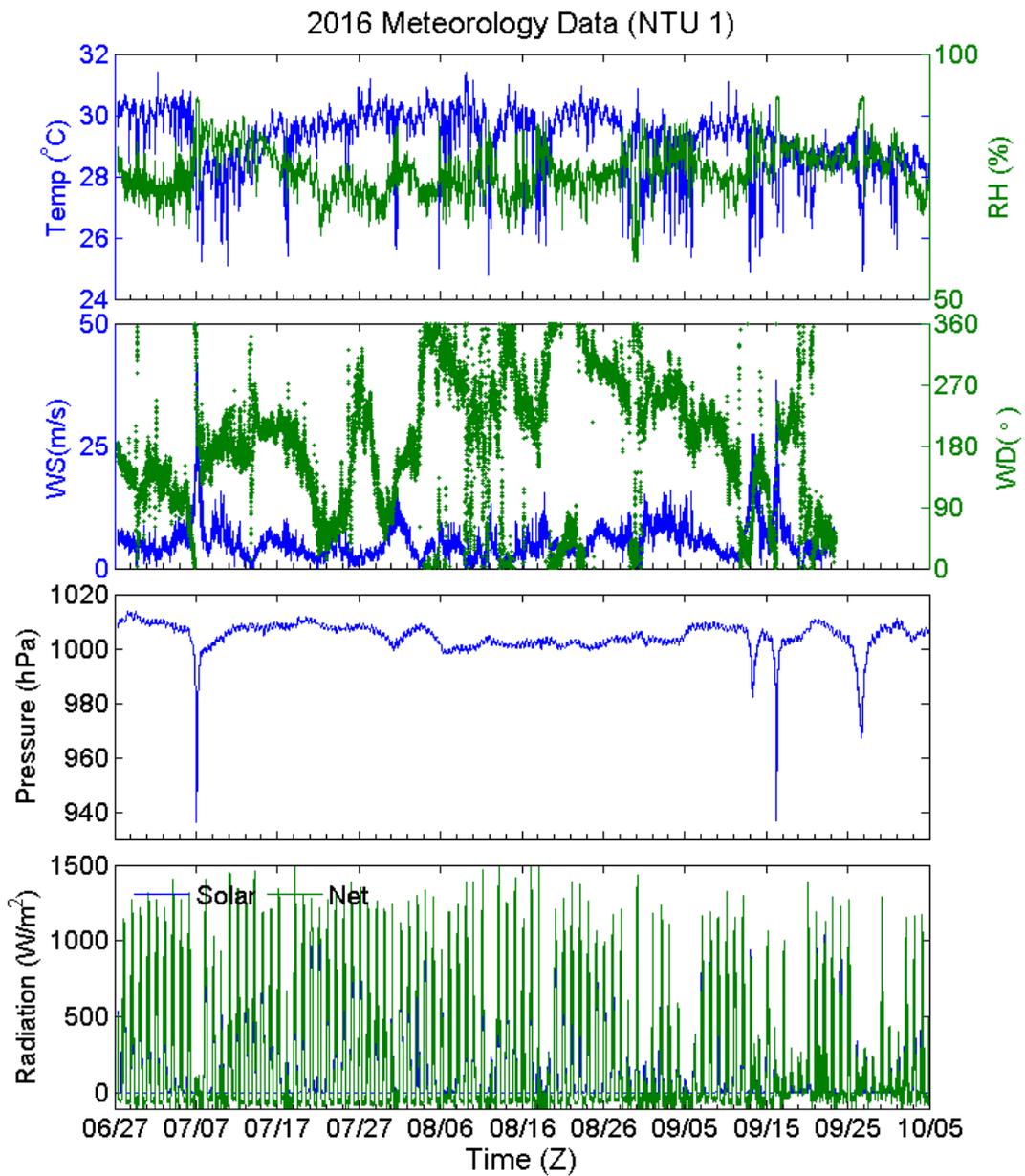


圖 4-6、2016 年在 NTU1 站氣象觀測資料，由上往下分別為溫度(藍)和相對溼度(綠)、風向(藍)和風速(綠)、氣壓、太陽輻射量(藍)和淨輻射量(綠)。

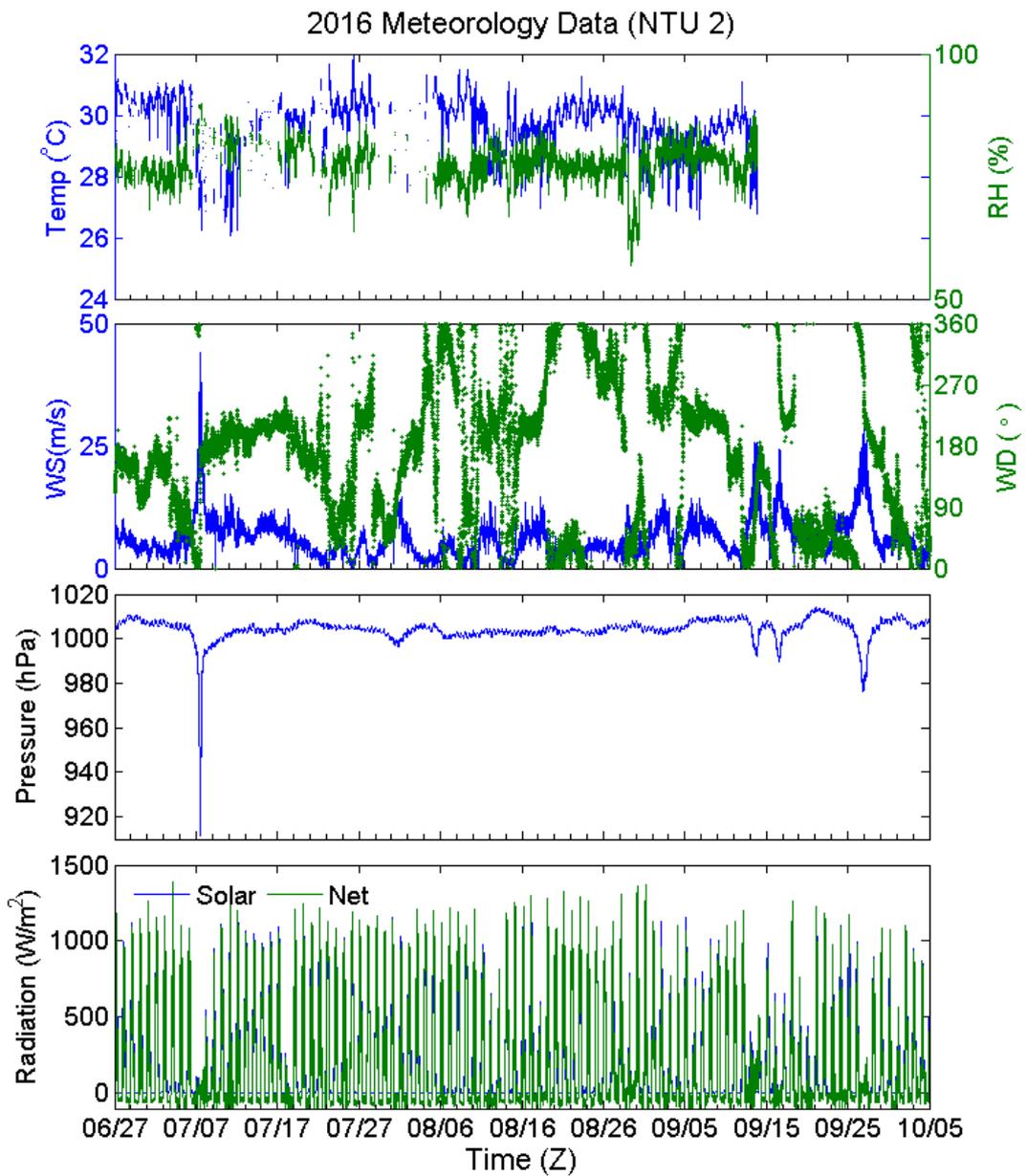


圖 4-7、2016 年在 NTU2 站氣象觀測資料，由上往下分別為溫度(藍)和相對溼度(綠)、風向(藍)和風速(綠)、氣壓、太陽輻射量(藍)和淨輻射量(綠)。

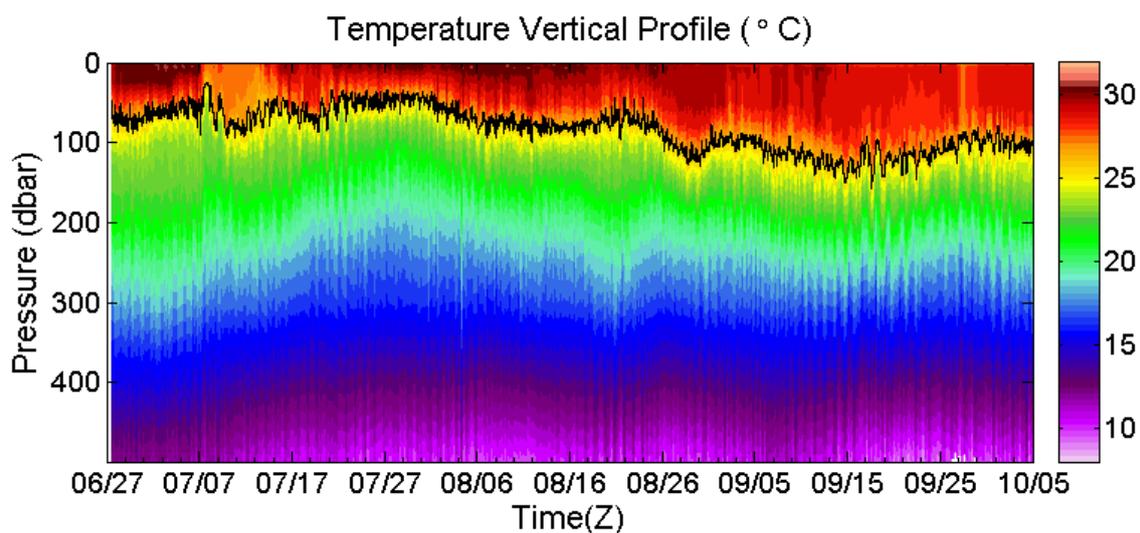


圖 4-8、2016 年在 NTU1 站海洋上層 500 公尺溫度剖面圖，圖中黑線為 26°C 等溫線。

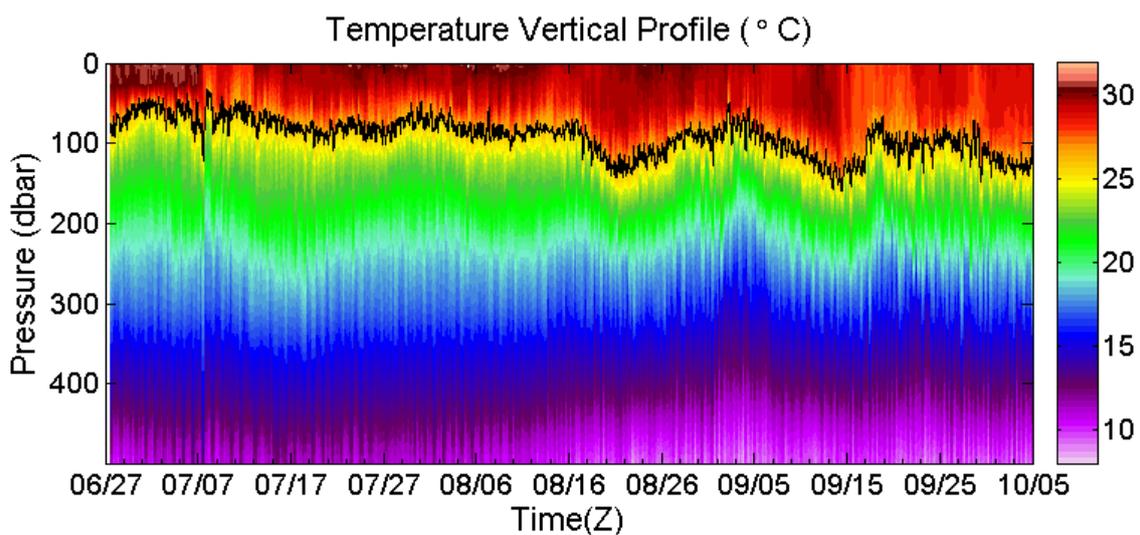


圖 4-9、2016 年在 NTU2 站海洋上層 500 公尺溫度剖面圖，圖中黑線為 26°C 等溫線。

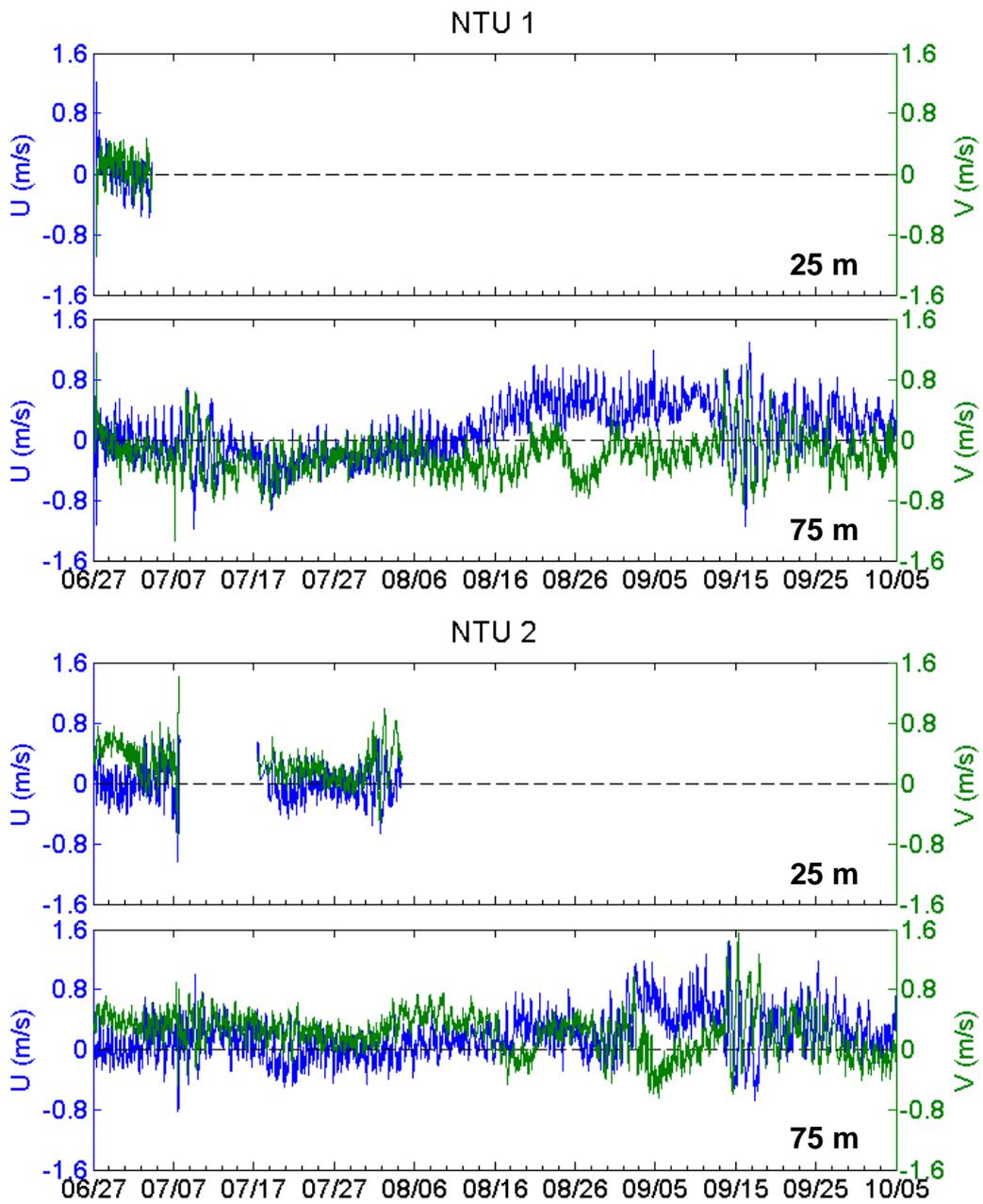


圖 4-10、由上而下為 2016 年在 NTU1 站水深 25 與 75 公尺、NTU2 站水深 25 與 75 公尺的流速資料。

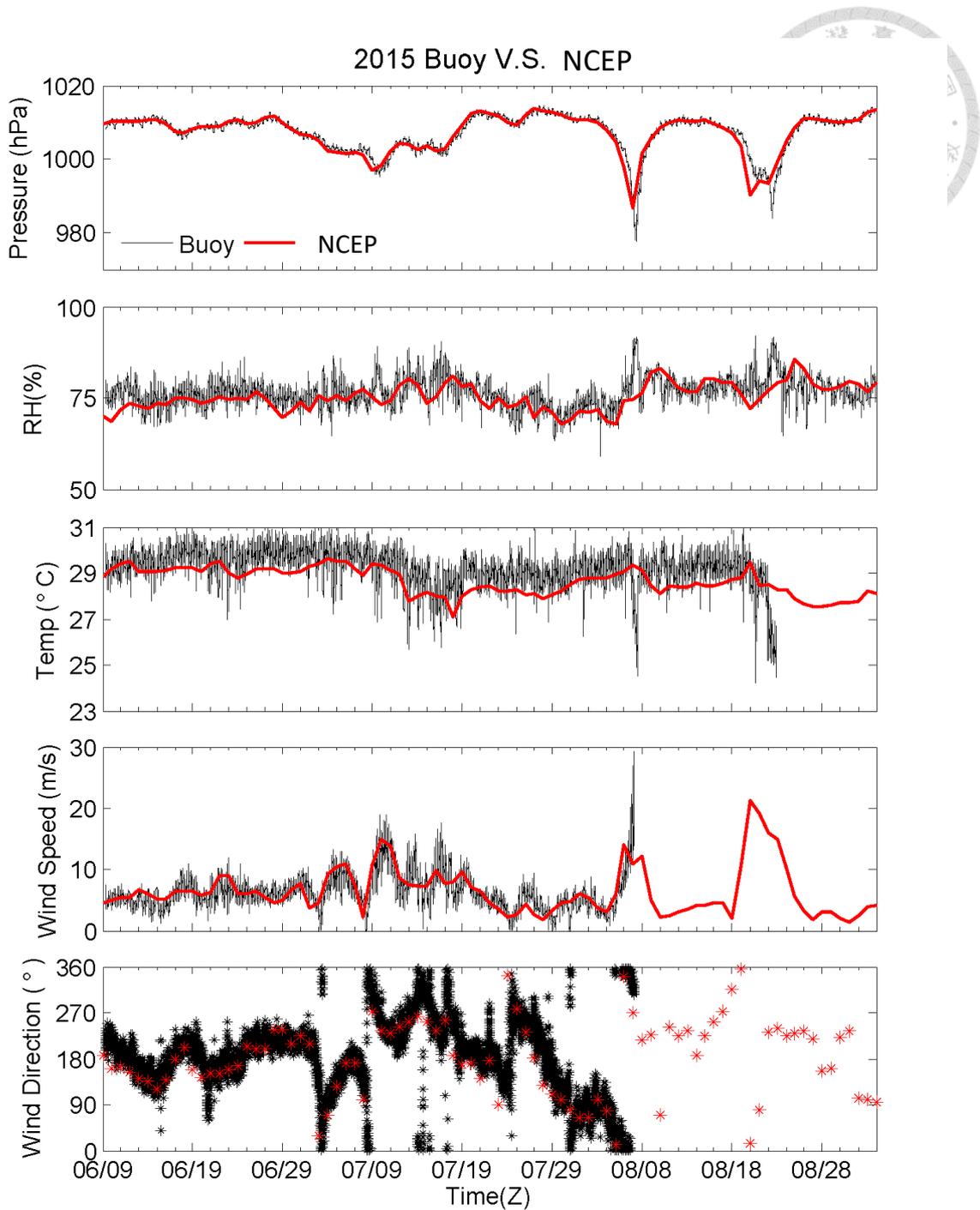


圖 4-11、2015 年在 NTU1 站之氣象觀測資料與 NCEP 資料之時間序列，圖中黑線為浮標觀測資料；紅線為 NCEP 資料，由上往下分別為氣壓、相對溼度、溫度、風速、風向。

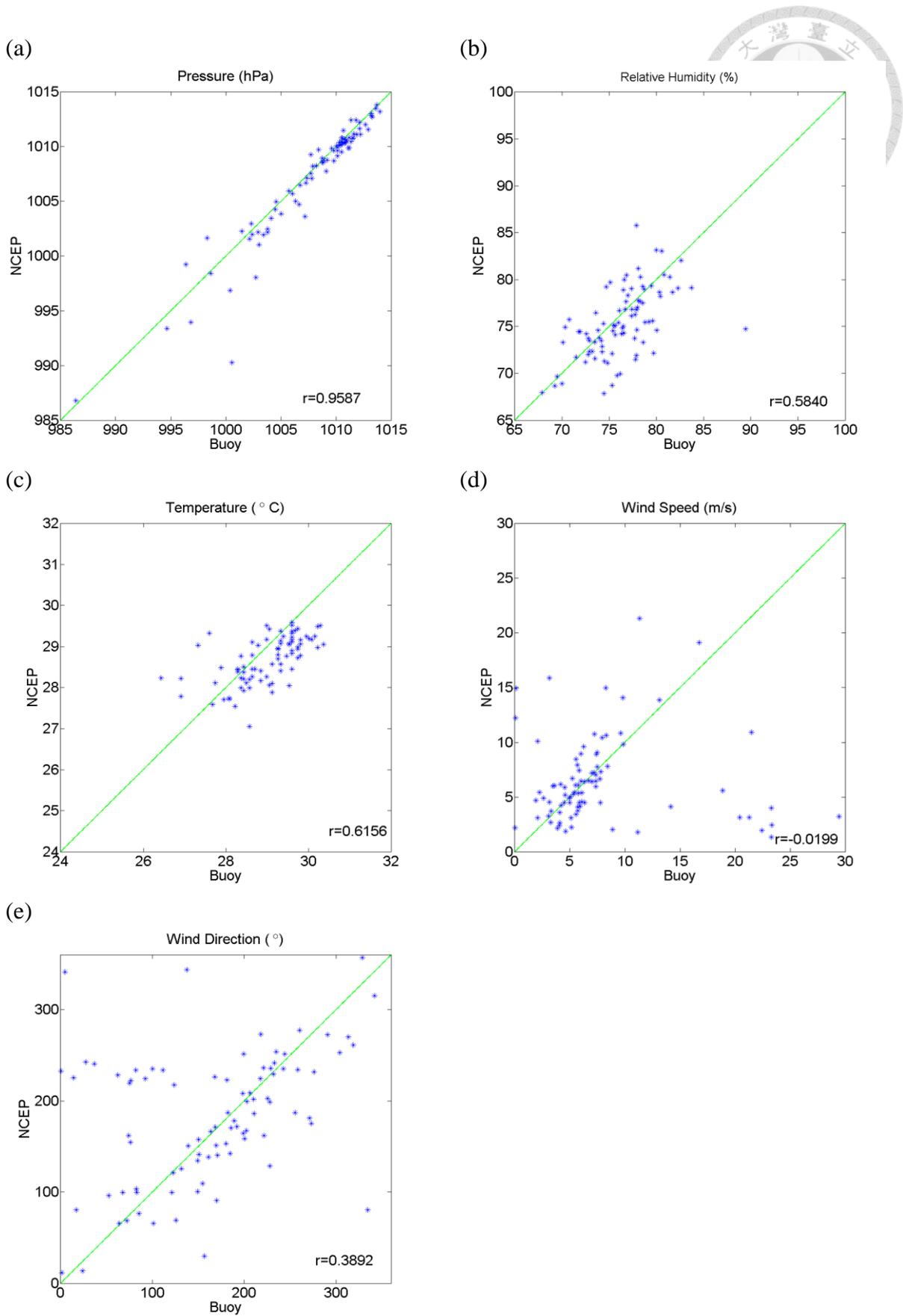


圖 4-12、2015 年在 NTU1 站之氣象觀測資料與 NCEP 資料散佈圖，圖中橫軸為浮標資料縱軸為 NCEP 資料。(a)氣壓 (b)相對溼度 (c)溫度 (d)風速 (e)風向。

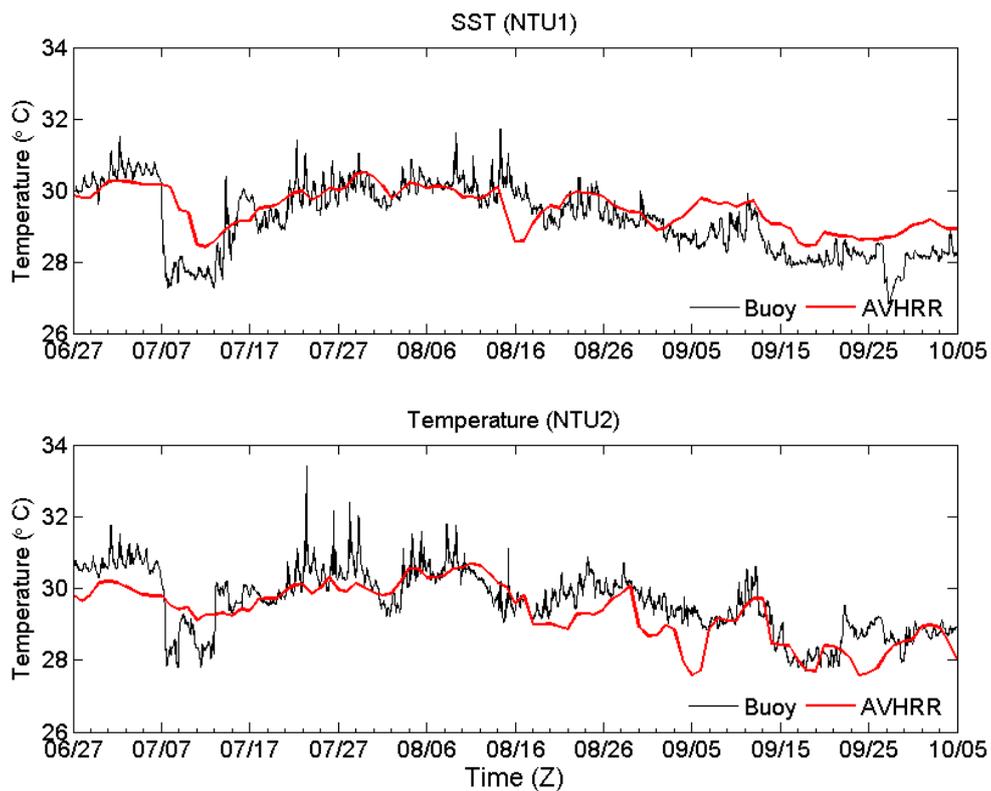


圖 4-13、2016 年之海表溫觀測資料與 AVHRR 之時間序列，圖中黑線為浮標觀測資料；紅線為 AVHRR 資料，上圖為 NTU1 站之比較；下圖為 NTU2 站之比較。

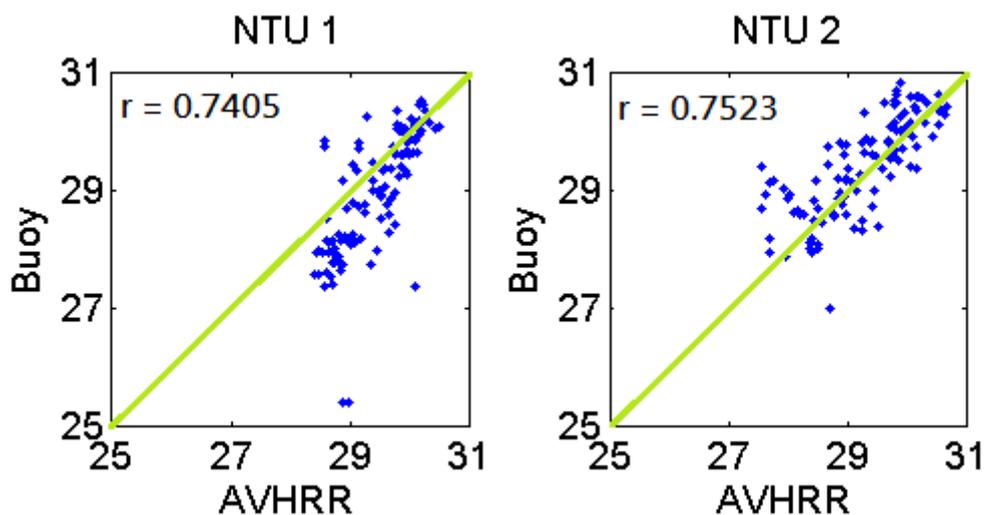


圖 4-14、2016 年海表溫觀測資料與 AVHRR 資料之散佈圖，圖中橫軸為 AVHRR 資料縱軸為浮標資料，左圖是 NTU1 站之比較；右圖為 NTU2 站之比較。

表 4-1、2015 年颱風特性彙整表

	蓮花	昌鴻	蘇迪勒	天鵝
與浮標最近距離 (km)	436	497	165	85
颱風眼相對浮標的方位	南	北	北	先南後西
中心氣壓 (hPa)	985	945	930	945
7 級暴風半徑 (km)	121	283	303	202
Saffir-Simpson scale (最靠近浮標時之強度)	TS	3	3	3
浮標量到最低氣壓(hPa)	995.9	1001	977.8	983.9
浮標量到最大風速(m/s)	12.93	18.87	29.28	故障
7 級暴風半徑影響時間	N/A	N/A	8/6 18:00 ~ 8/7 17:00	8/21 21:00 ~ 8/22 21:00

表 4-2、2016 年颱風特性彙整表

		尼伯特	莫蘭蒂	馬勒卡	梅姬	艾利
與浮標最近 距離 (km)	NTU1	5.7	98	0.3	130	190
	NTU2	15	140	81	120	230
颱風眼相對 浮標的方位	NTU1	北	南	南	北	南
	NTU2	南	南	北	北	南
中心氣壓 (hPa)		910	905	945	950	998
7 級暴風半徑 (km)		202	222	151	252	121
Saffir-Simpson scale (最靠近浮標時之強度)		5	5	4	3	TD
浮標量到最 低氣壓(hPa)	NTU1	936.1	982.3	936.7	967.1	1008
	NTU2	911.5	993.2	989.9	976.3	1009
浮標量到最 大風速(m/s)	NTU1	44	27.5	38.34	故障	故障
	NTU2	46.5	25.59	24.29	29.1	14
7 級暴風半徑影響時間		7/6 18:00 ~ 7/7 23:00	9/13 3:00 ~ 9/14 2:00	9/16 0:00 ~ 9/16 21:00	9/26 5:00 ~ 9/27 6:00	N/A



4.2 上層海洋熱含量與海氣熱通量之分析

4.2.1 上層海洋熱含量

本研究中所使用之上層海洋熱含量(Upper Ocean Heat Content, UOHC)估算公式是由 Leipper and Volgenau. (1972)所提出，熱含量公式如下：

$$\text{UOHC} = \int_i^n \rho C_p \frac{T_{i+1} + T_i}{2} (Z_{i+1} - Z_i) \quad \text{【2】}$$

上述式子代表的意思是將海溫大於 26°C 以上之水層的熱含量累加起來，其中 ρ 代表海水密度； C_p 為海水比熱係數； T 為溫度； Z 為深度； i 代表起始水層； n 代表終止水層。

使用上述公式推估當地的上層海洋熱含量，將 2015 年在 NTU1 站、2016 年在 NTU1 和 NTU2 站的資料畫在圖 4-15、4-16、4-17 中，將這 3 張圖分別對照圖 4-4、4-8、4-9 的海溫剖面圖後，可以得知上層海洋熱含量和 26°C 等溫線趨勢一致，代表暖水層厚度對熱含量的影響比暖水層中的溫度對熱含量的影響大。典型例子如 2015 年的 6 月 11 日到 6 月 19 日，暖心渦旋經過浮標站，造成 26°C 等溫線下降(圖 4-4 與 4-5)，同時也使得上層海洋熱含量增加(圖 4-15)。

4.2.2 海氣熱通量

海氣間的熱通量交換為海氣交互作用中的重要過程之一，在 1.1 小節已提過其重要性，Chia (2006)提到一般對於海氣熱通量估算的方法有耗散法(dissipation method)、渦流相關法(eddy correlation method)、剖面法(profile method)、衛星遙測推估、整體參數法(bulk-parameterization method)等方法，並將這 5 種方法分為兩類，分別是直接量測與間接求得，其中渦流相關法為直接量測變數，而其餘 4 種皆為間接求得，接著再比較各方法之差異。耗散法由觀測變數擾動量的波譜，根據紊流慣性次範圍(inertial subrange)具有 -5/3 斜率的性質，估計耗散率(dissipation rate)，進而估算通量值(Fairall and Larsen, 1986)。渦流相關法須精確的測量水平與垂直的風速擾動量(u' , w')、水氣擾動量(q')、溫度擾動量(T')再計算其互變異數而得到渦流通量(Bradley et al., 1991)。剖面法則由相似理論，找出溫度尺度、濕度尺度和摩擦風速，再推估通量。整體參數法是屬於間接、半經驗的渦流通量推估。前述的 5 種推估方法中，渦流相關法與耗散法量測海氣通量之準確度，會受到觀測平台的

運動、環境條件和氣流的擾動等因素的影響，因本研究使用浮標觀測，浮標的移動會造成許多誤差，且此浮標無垂直風的觀測，因此不能使用此二法。而剖面法一般需要觀測儀器在邊界層內(一般定義約 10 公尺)量測各層的觀測資料進而推估，但本實驗為單點觀測因此也不能使用此方法。雖然整體參數法會因為係數選擇不同而造成海氣通量估算之差異(Blanc, 1987; Zeng et al., 1998)，且量測海溫的深度、降雨造成的鹽度效應、海表皮海溫(skin temperature)等亦會影響通量的估算(Fairall et al., 2003)，但整合前段之分析，適合本研究的估算方法乃為目前被廣泛用於全球模式的整體參數法。

海氣熱量通量(H_{net})包含 4 個要素，分別是淨短波輻射量(S_w)、淨長波輻射量(L_w)、可感熱通量(H_s)與潛熱通量(H_l)，

$$H_{net} = S_w - L_w - H_s - H_l \quad 【3】$$

淨短波輻射量參考 Payne (1972)的公式並考慮海水反照率，將淨短波輻射量表示如下式：

$$S_w = R_{s-in}(1 - r_s) \quad 【4】$$

其中 R_{s-in} 是量測到的太陽輻射量； r_s 為海水反照率(0.07)。

淨長波輻射量利用 Berliand and Berliand (1952)、Fung et al.(1984)的方法來估計海面長波輻射通量即：

$$L_w = -\varepsilon\sigma T_a^4 (0.39 - 0.05\sqrt{e_s})(1 - 0.64C^2) - 4\varepsilon\sigma T_a^3(T_s - T_a) \quad 【5】$$

其中 ε 為海面長波發射率(0.98)； σ 為史蒂芬波次曼常數(Stefan-Boltzmann constant, 5.67×10^{-8})； e_s 為是海面水蒸氣壓； T_a 和 T_s 分別為氣溫與海表溫，單位為凱氏溫標， C 則代表雲量的影響。而雲量資料的推估則採用 Reed (1977)的方法，式子如下：

$$Q_{sol} = Q_{cls}(1 - 0.62C - 0.0019A) \quad 【6】$$

其中 Q_{sol} 為觀測的短波輻射量； Q_{cls} 為晴天短波入射量； A 為太陽高度。

而在潛熱通量與可感熱通量的估算是用 Fairall et al. (2003)所建立的 TOGA COARE 3.0 計算套件，而在這計算套件中，潛熱通量與可感熱通量的基本架構是建立在 Liu et al. (1979) 提出的計算方法，計算公式如下：



$$H_s = \rho C_p C_h U (T_s - \theta_a) \quad [7]$$

$$H_l = \rho L_v C_e U (q_s - q_a) \quad [8]$$

其 ρ 代表空氣密度； C_p 代表空氣比熱； L_v 代表蒸發潛熱； C_h 代表可感熱傳輸係數； C_e 代表潛熱傳輸係數； U 為距海面 10 公尺高之風速； T_s 為海表溫； θ_a 為空氣的位溫； q_s 和 q_a 分別是海洋與大氣中的比濕。

在海氣熱量通量的分析中，將以 2015 年的資料為例，運用 4.1 節中補遺後的資料搭配上上述式子與 TOGA COARE 3.0 計算套件求得熱通量，並將其時間序列繪製於圖 4-18，接著再取出 2015 年蓮花、昌鴻、蘇迪勒、天鵝等 4 個颱風的影響期間畫在圖 4-19 到 4-21，在本研究中對於熱通量正負值的定義是若能量由大氣輸入海洋則為正值；若由海洋提供給大氣則為負值。圖中顯示在颱風靠近之前，淨長波輻射量和可感熱通量每日的變化量是非常小的，總體熱量通量的改變主要是受到淨短波輻射量和潛熱通量的影響，其中，短波輻射量約占總體熱量通量的 7 成，大氣提供給海洋的能量占多數，而在颱風影響期間，淨長波輻射量會因為海氣溫差減弱、雲量增多使得其值較平常還要小；而淨短波輻射量則是因為雲層遮蔽進到海表的太陽光，使海面接收到的短波輻射量遠小於非颱風影響期間，而隨著風速的增加，潛熱通量與可感熱通量逐漸增大，因此在颱風影響期間，總體熱量通量的變化是以潛熱通量與可感熱通量為主，且能量傳輸方向是由海洋提供給大氣。

為了想瞭解運用觀測資料與運用衛星產品估算潛熱通量與可感熱通量之差異，因此將我們求得的潛熱通量與可感熱通量和 OAFlux 的產品做比較，在圖 4-22 當中可以看到，在非颱風影響期間，對潛熱通量與可感熱通量而言，觀測推估之值約為 OAFlux 的產品推估的 1~2 倍；而在颱風影響期間，對潛熱通量而言，觀測推估之值約為 OAFlux 的產品推估的 3~4 倍，而將各颱風影響期間取出來看(圖 4-23~4-25)，在蓮花和昌鴻影響期間，因這兩個颱風距離較遠，衛星估算之風速和實際風速相差較小，使得觀測推估之值和衛星產品推估之值差異較小；而蘇迪勒颱風強度強且距離浮標較近，衛星估算之風速和實際風速相差較大，使得觀測推估之值和衛星產品推估之值差異較蓮花和昌鴻影響期間大；然而對於天鵝颱風，因為觀測儀器的損壞，部分資料是使用模式產品，因為選用的風速資料和 OAFlux

並不同，因此在熱通量的估算上仍有差異，而對於可感熱通量之差異，除了風速資料的不同外，因衛星對於海表溫變化的掌握不如觀測的準確，亦會產生誤差。衛星資料推行的海氣通量廣為大氣及海洋模式所使用，在颱風時期與實測的差異量對模式造成之影響，值得未來進一步探究。

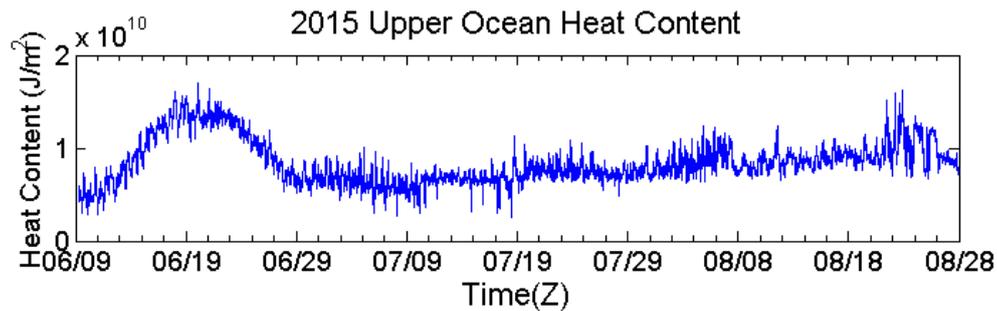


圖 4-15、2015 年在 NTU1 站上層海洋熱含量。

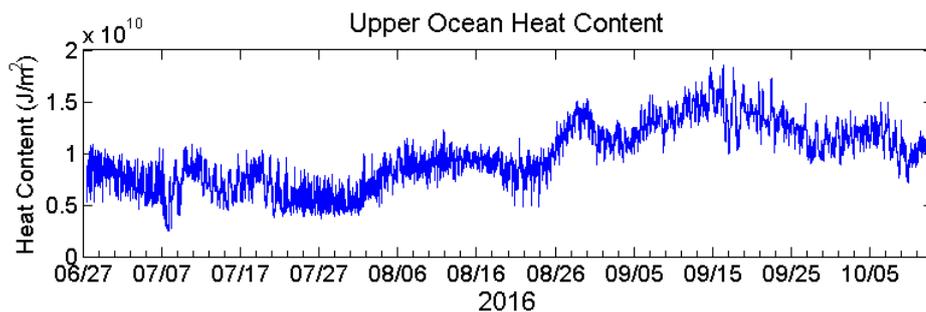


圖 4-16、2016 年在 NTU1 站上層海洋熱含量。

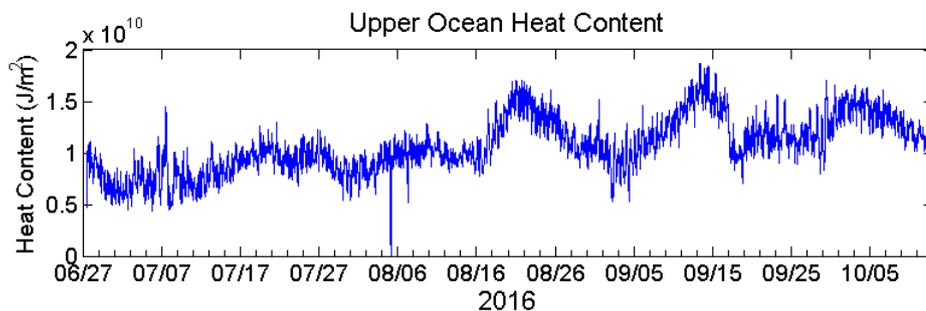


圖 4-17、2016 年在 NTU2 站上層海洋熱含量。

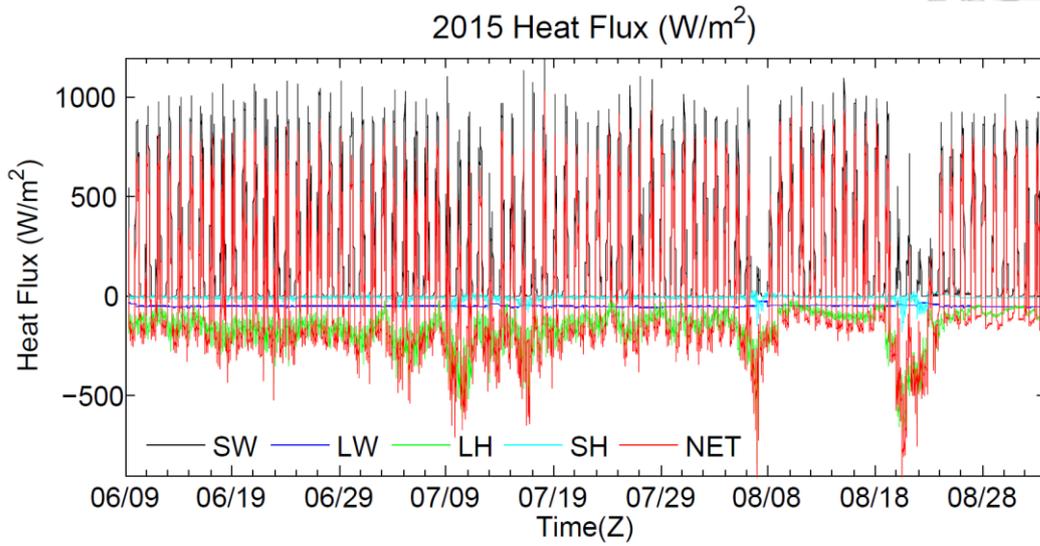
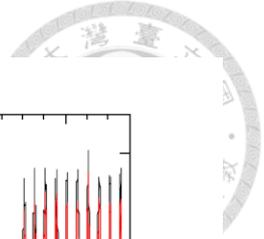


圖 4-18、2015 年於 NTU1 站之熱含量時間序列。黑線為短波輻射量；藍線為長波輻射量；綠線為潛熱通量；青線為可感熱通量；紅線為淨熱通量。

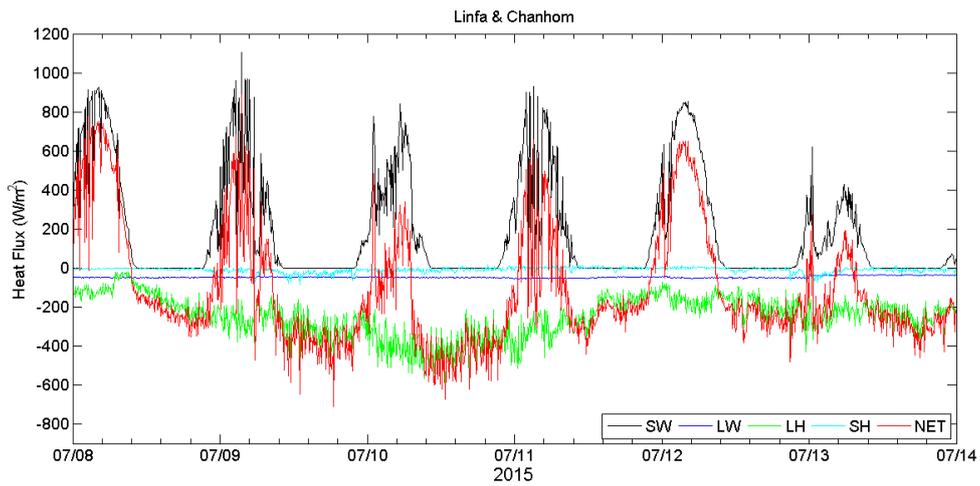


圖 4-19、蓮花與昌鴻颱風影響期間之熱含量時間序列。黑線為短波輻射量；藍線為長波輻射量；綠線為潛熱通量；青線為可感熱通量；紅線為淨熱通量。

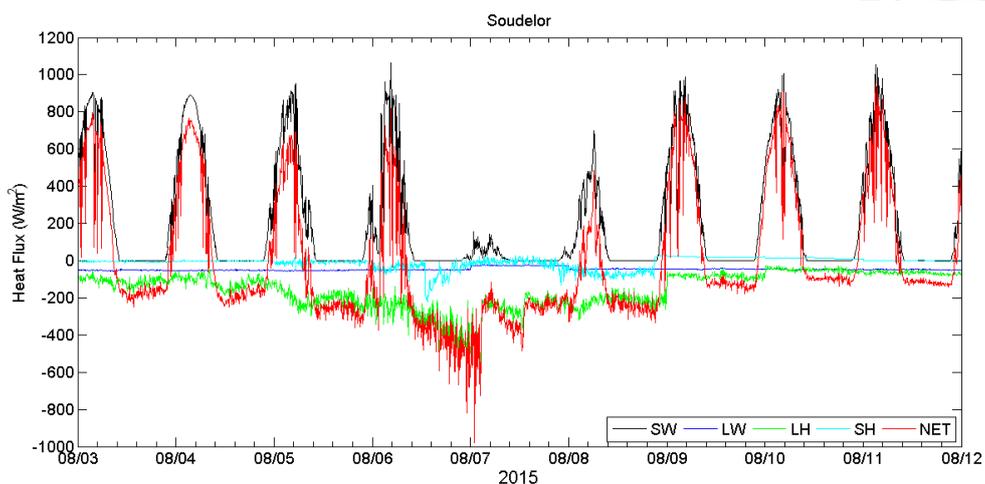
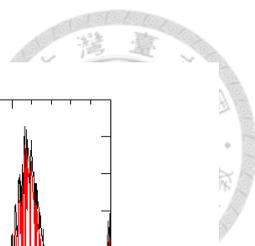


圖 4-20、蘇迪勒颱風影響期間之熱含量時間序列。黑線為短波輻射量；藍線為長波輻射量；綠線為潛熱通量；青線為可感熱通量；紅線為淨熱通量。

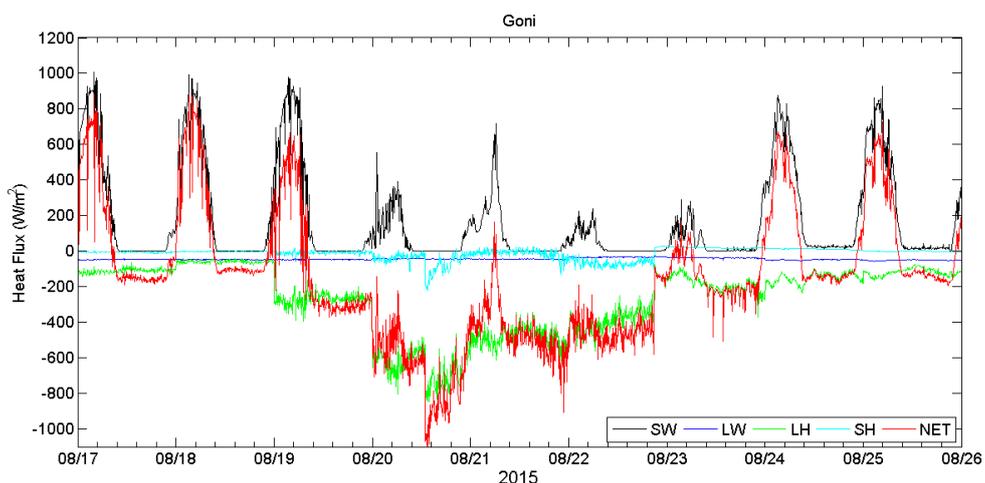


圖 4-21、天鵝颱風影響期間之熱含量時間序列。黑線為短波輻射量；藍線為長波輻射量；綠線為潛熱通量；青線為可感熱通量；紅線為淨熱通量。

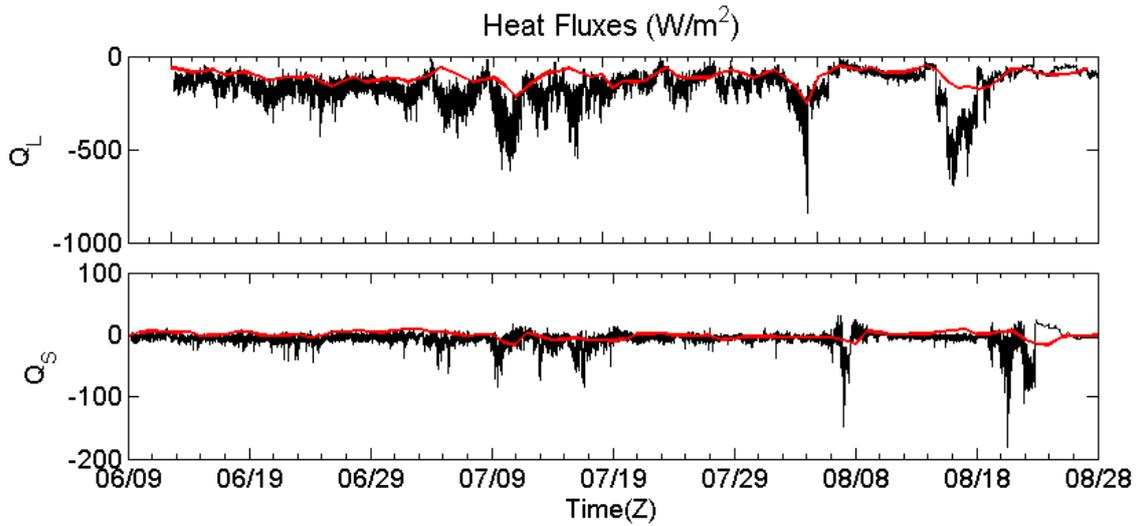


圖 4-22、2015 年觀測期間由浮標推估之潛熱通量(上)與可感熱通量(下)和 OAFlux 產品之比較。黑線為浮標推估的值；紅線為 OAFlux 產品。

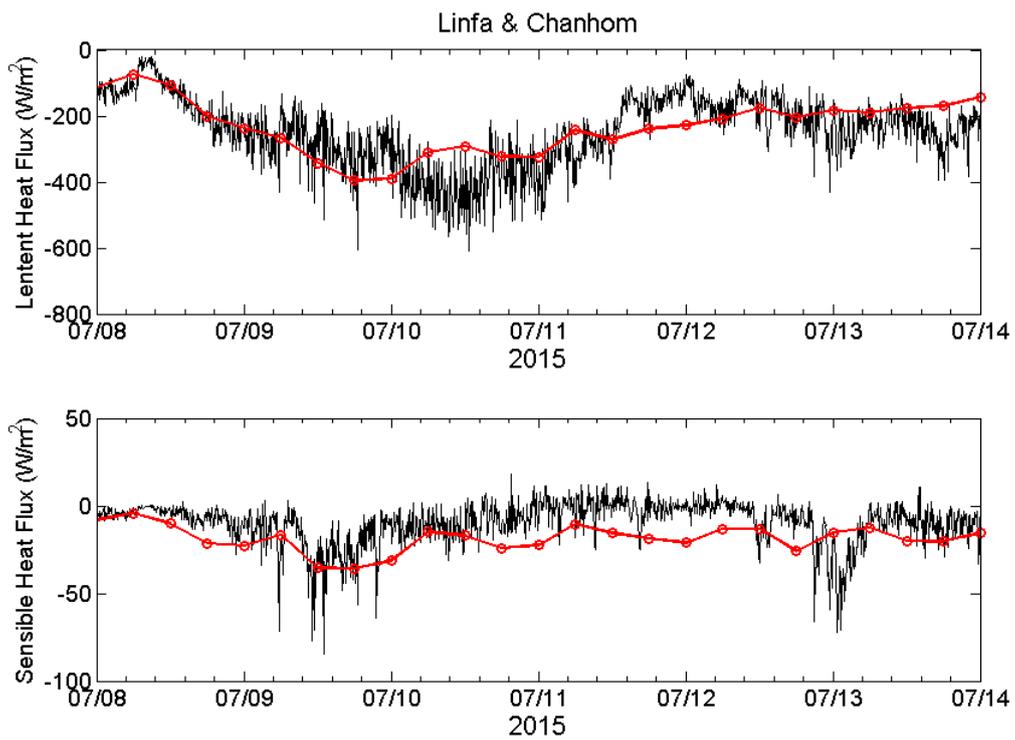


圖 4-23、蓮花與昌鴻颱風靠近浮標期間由浮標推估之潛熱通量(上)與可感熱通量(下)和 OAFlux 產品之比較。黑線為浮標推估的值；紅線為 OAFlux 產品。

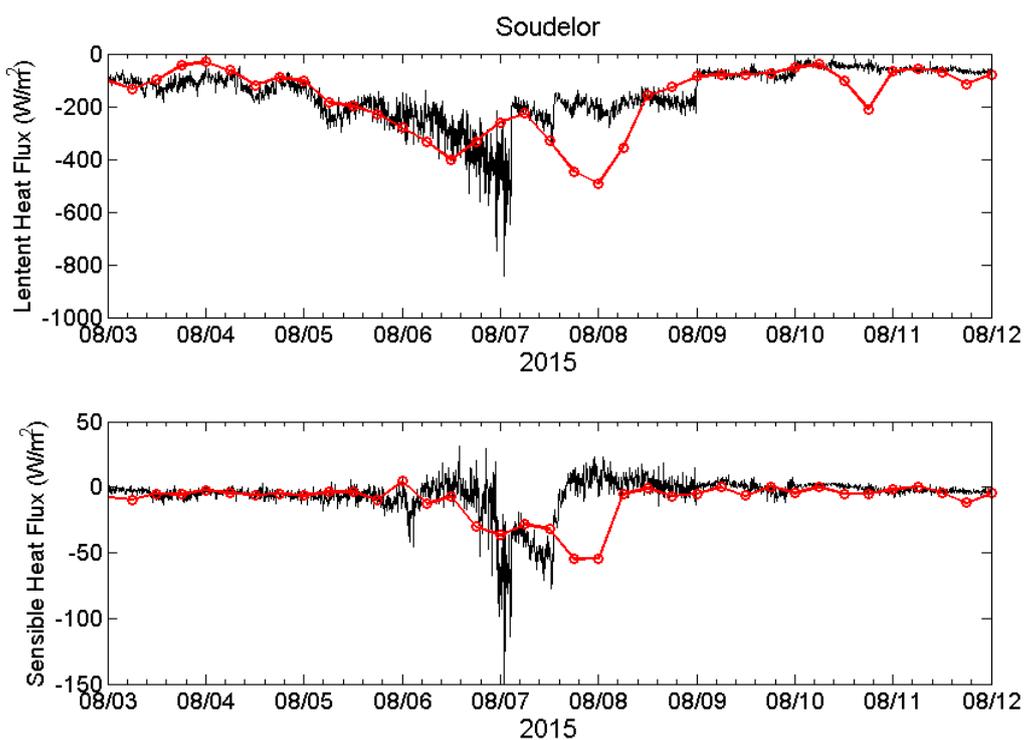
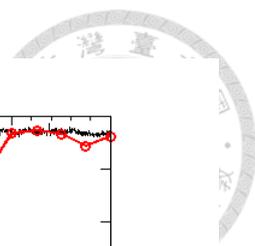


圖 4-24、蘇迪勒颱風靠近浮標期間由浮標推估之潛熱通量(上)與可感熱通量(下)和 OAF flux 產品之比較。黑線為浮標推估的值；紅線為 OAF flux 產品。

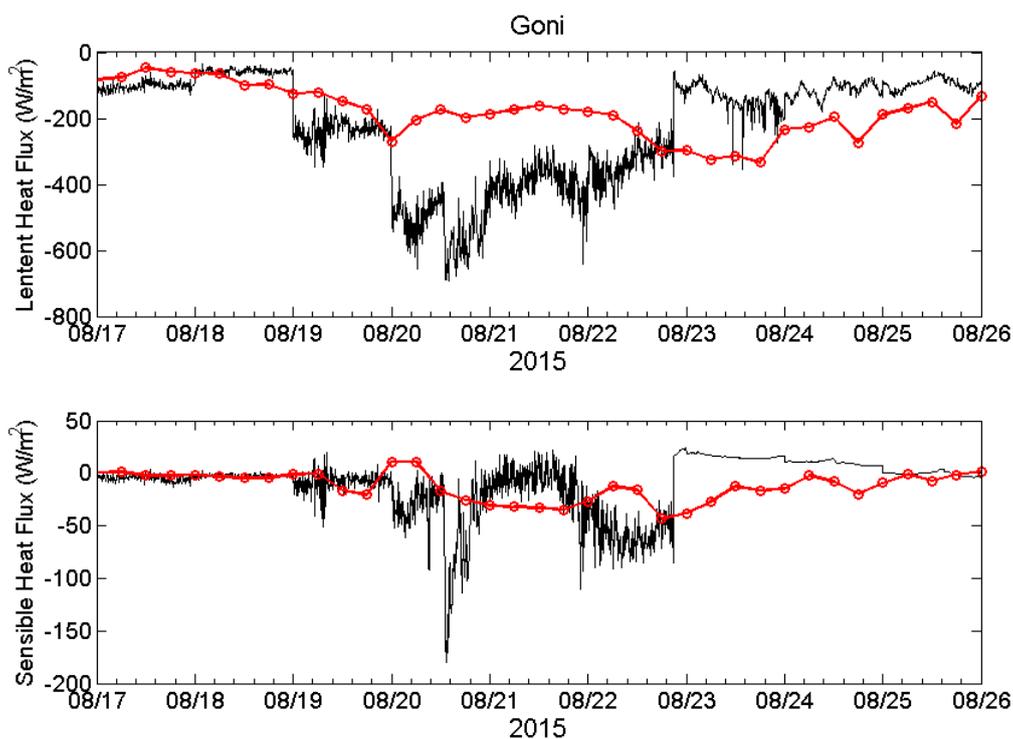


圖 4-25、天鵝颱風靠近浮標期間由浮標推估之潛熱通量(上)與可感熱通量(下)和 OAF flux 產品之比較。黑線為浮標推估的值；紅線為 OAF flux 產品。



4.3 颱風造成之慣性運動

運用旋轉能譜分析 2016 年兩站浮標中位於水深 75 m 每 10 分鐘一筆的流速資料。其中 NTU1 站與 NTU2 站資料筆數分別為 15568 筆和 14943 筆，取基礎頻率 (fundamental frequency) 為 6.25×10^{-6} cpm 經快速傅立葉轉換後，再經卷積 (convolution) 平均後，其自由度 (degree of freedom) 為 13，分析結果如圖 4-26 與圖 4-27 所示。從圖中看到在順時鐘的分量上有 3 個極值，頻率由小到大分別是近慣性運動、全日潮運動與半日潮運動，因為在北半球慣性運動為順時鐘的運動，因此慣性運動只在順時鐘的分量上有極值而逆時鐘的分量上沒有極值。透過旋轉能譜分析發現此兩站有明顯的近慣性運動後，整理 2016 年尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡、梅姬、艾利等 5 個颱風影響期間之流場資料，從中發現離浮標較近的 3 個颱風——尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡颱風有明顯的慣性運動。除此之外，也將流速資料做小波 (Wavelet) 分析，分析結果如圖 4-28 ~ 4-31 所示，在圖中橫軸為時間序列；縱軸為周期；上面的顏色則代表頻譜的強弱。此四圖除了有明顯的全日與半日潮之訊號外，在尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡颱風靠近 NTU1 站期間，在慣性週期附近皆有較強的訊號。而在接下來的討論中，因為馬勒卡颱風和莫蘭蒂颱風經過浮標的時間相當接近，因此兩者會放在一起討論。

為分析在不同颱風經過時，在不同站點所量到之慣性運動有何差異，將圖 4-26 和 4-27 中慣性運動之頻段 (圖中黑色虛線框出之範圍) 濾出，此頻段週期範圍為 28.07 小時到 49.38 小時，選擇 28.07 小時做為下限是因為這麼一來可以去除所有潮汐的因素，而濾波之後的流速資訊繪製於圖 4-32 到 4-35，圖中的溫度剖面皆使用 T-Tide 調和分析程式套件 (Pawlowicz et al., 2002) 進行潮汐訊號濾除，從這四張圖皆可看到，流向是隨著時間增加而呈線性遞增的，因為濾波的頻段本就只有順時鐘的分量，所以流向必為隨時間遞增的，但因為這裡的運動僅受慣性運動主導，因此流向變化呈線性遞增。此外，在圖中可以發現慣性運動在颱風逐漸靠近就開始成長，而非 Geisler (1970) 所提及的慣性流在半個慣性週期 (Inertial Period, IP) 後才生成。

在慣性週期的估算部分，因為流向角度的改變量除以時間的改變量代表頻率，而 2π 除以頻率就是週期，因此只要求出圖 4-32 到圖 4-35 中最下方的直線之斜率，進而可求得慣性週期。在求該線之斜率時，為了避免流速較小時，流向變化的誤

差轉移到週期估算之上，因此設定了閾值避免此現象的發生，在尼伯特颱風影響期間，選擇流速大於 0.18 m/s 的資料做線性迴歸；而莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間，則選擇流速大於 0.45 m/s 的資料做線性迴歸。計算後，求得尼伯特颱風經過 NTU1 站與 NTU2 站時所造成之慣性運動周期分別為 33.373 小時與 33.334 小時；而莫蘭蒂與馬勒卡颱風經過 NTU1 站與 NTU2 站時所造成之慣性運動周期分別為 33.983 小時與 32.198 小時，此估算結果亦顯示於圖中。

除此之外，將颱風期間的小波分析結果繪製於圖 4-36 到 4-43 當中，比較後發現尼伯特颱風經過 NTU2 站時近慣性週期的訊號特別的弱；莫蘭蒂與馬勒卡颱風經過 NTU1 站時近慣性週期的訊號特別的強。訊號強是因為在莫蘭蒂經過之後，馬勒卡接著出現，並且與本站距離非常近，使慣性運動有雙重的作用。並且在莫蘭蒂與馬勒卡的案例中，皆在颱風最靠近之前就有近慣性週期的訊號出現，而且圖中極值顯示，此近慣性週期的運動是由一寬頻帶組合而成，並非單一頻率。

在圖 4-32 到 4-35 中，除了在馬勒卡颱風經過 NTU1 站後溫度剖面有看到近慣性運動之外，其他的颱風不論在哪一站都無法直接從溫度剖面上看到慣性運動的存在，因此吾人將各層溫度資料濾出和前面流速資料同頻段之波，將其畫在圖 4-44 到 4-47，在圖中可以得知當尼伯特颱風經過時，溫度上看到的慣性變化振幅約 1 度左右；莫蘭蒂颱風和馬勒卡颱風經過 NTU2 站時，溫度上看到的慣性變化振幅不到 1 度；而馬勒卡經過 NTU1 站造成最大的溫度振幅約 1.5 度左右，而此段也是唯一可從未濾波前的溫度剖面上看到的，在過去研究中大家大多從溫度剖面來看慣性運動，然而本研究告訴我們在溫度剖面上看不到慣性運動並不代表其不存在。

圖 4-48 為每站每個颱風經過前後的流矢圖，可發現在颱風靠近之前，慣性流就開始逐漸增強，圖中顯示尼伯特從 NTU1 站到 NTU2 站大約經過半天的時間，其強度無明顯的變化，且颱風中心與浮標的距離是 NTU2 站小於 NTU1 站，然而在 NTU2 站所觀測到的慣性流卻小於 NTU1 站，並且在圖 4-36 到圖 4-39 中也顯示，不論 U 分量還是 V 分量的海流，尼伯特在 NTU2 站的慣性流強度較 NTU1 站的小，其詳細的原因將在第五章當中討論。而圖 4-49 為颱風期間的累進矢量圖 (Progressive Vector Diagram, PVD)，根據慣性運動之解析解，流的路徑應該是正圓，然而有些的 PVD 接近正圓而有些卻不是，這是因為慣性流速不是常數所致。

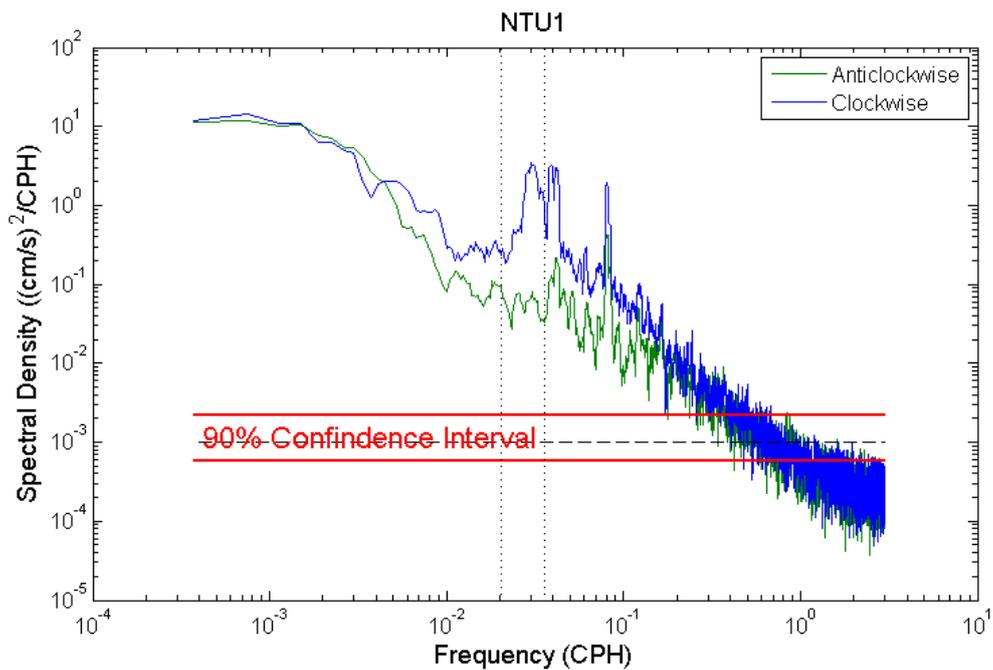


圖 4-26、NTU1 站 75 公尺流速資料之旋轉能譜圖。藍線是順時鐘的旋轉能譜；綠線則是逆時鐘的旋轉能譜；虛線代表頻帶選取範圍。

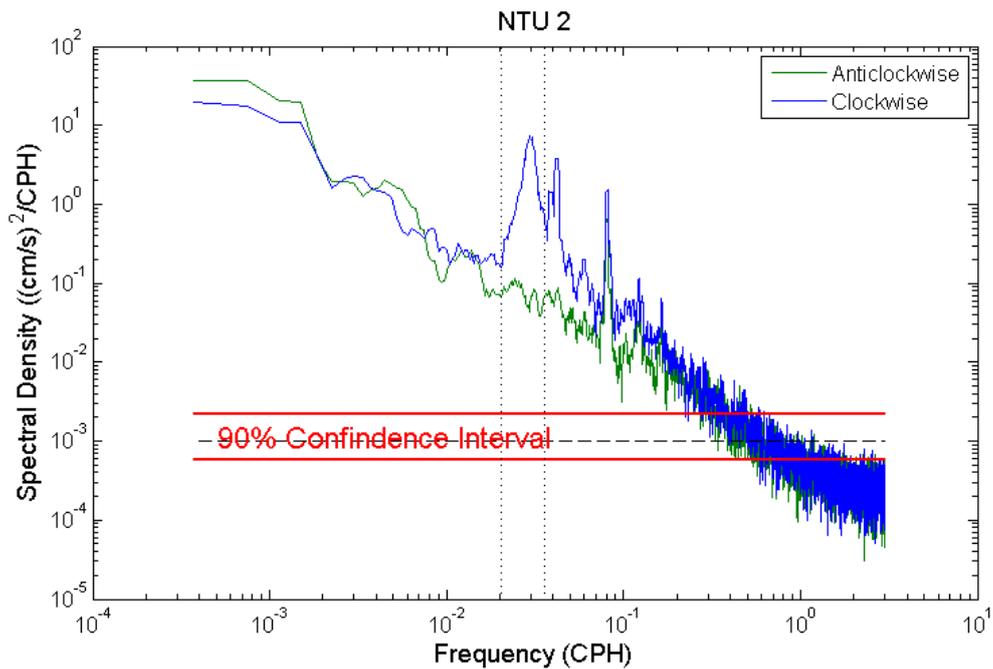


圖 4-27、NTU2 站 75 公尺流速資料之旋轉能譜圖。藍線是順時鐘的旋轉能譜；綠線則是逆時鐘的旋轉能譜；虛線代表頻帶選取範圍。

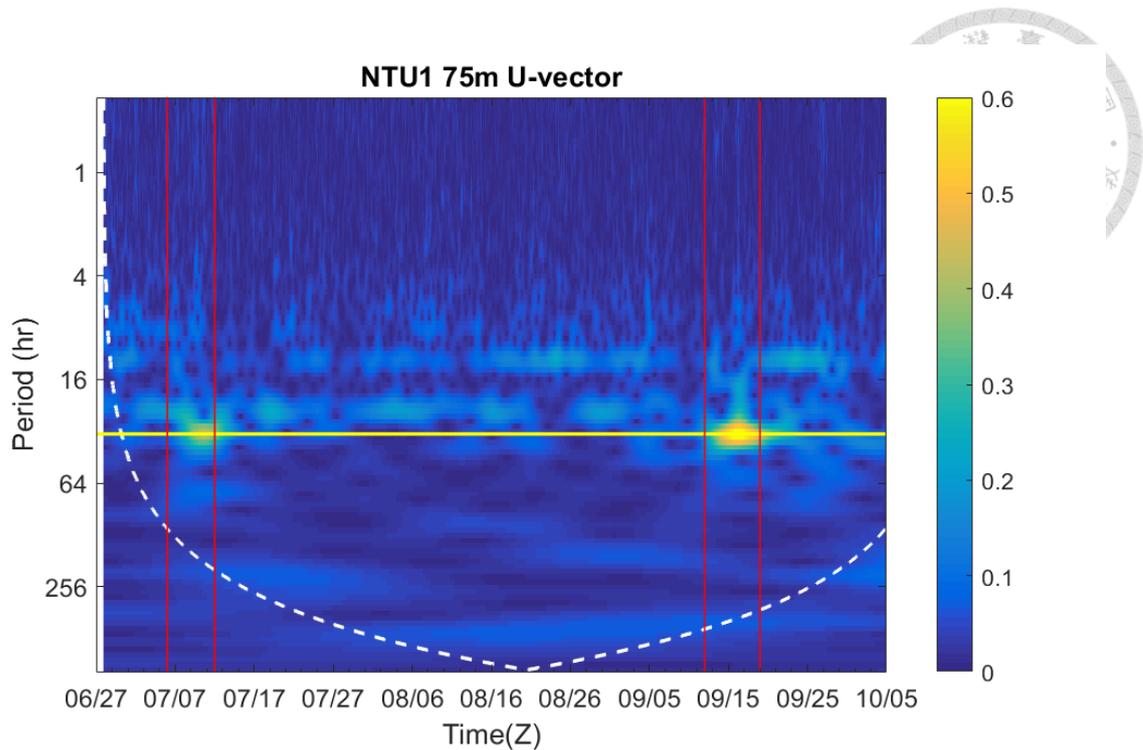


圖 4-28、NTU1 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖，圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 33.185 小時，紅線框出來的區域分別是尼伯特、莫蘭蒂與馬勒卡影響期間。

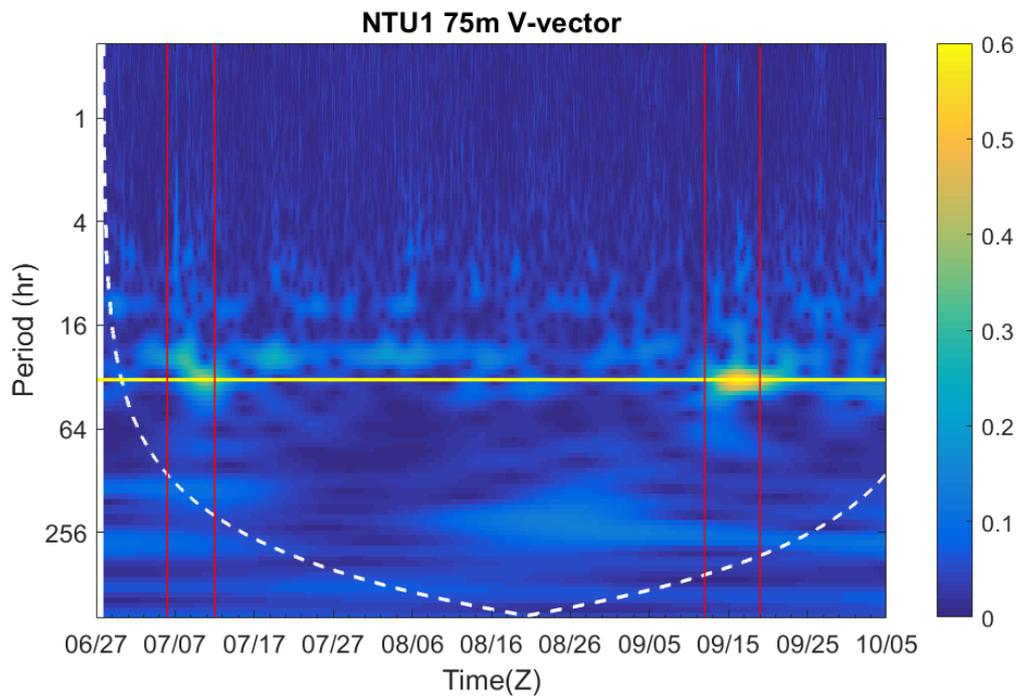


圖 4-29、NTU1 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖，圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 33.185 小時，紅線框出來的區域分別是尼伯特、莫蘭蒂與馬勒卡影響期間。

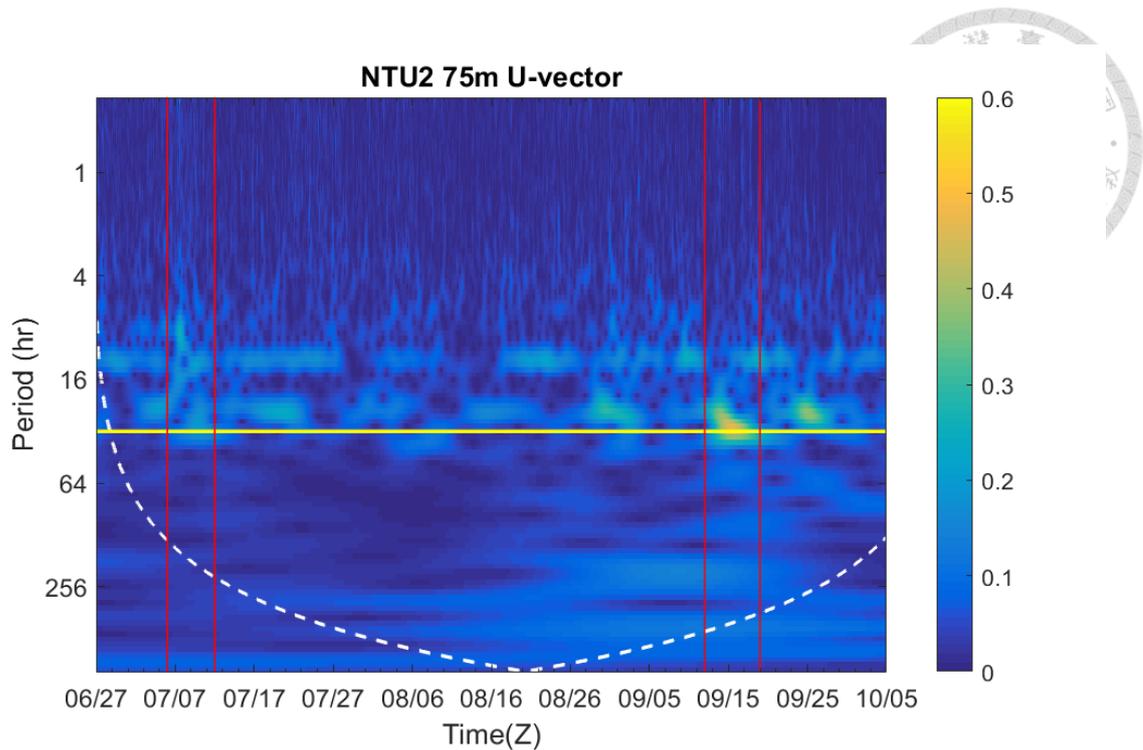


圖 4-30、NTU2 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖，圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 32.011 小時，紅線框出來的區域分別是尼伯特、莫蘭蒂與馬勒卡影響期間。

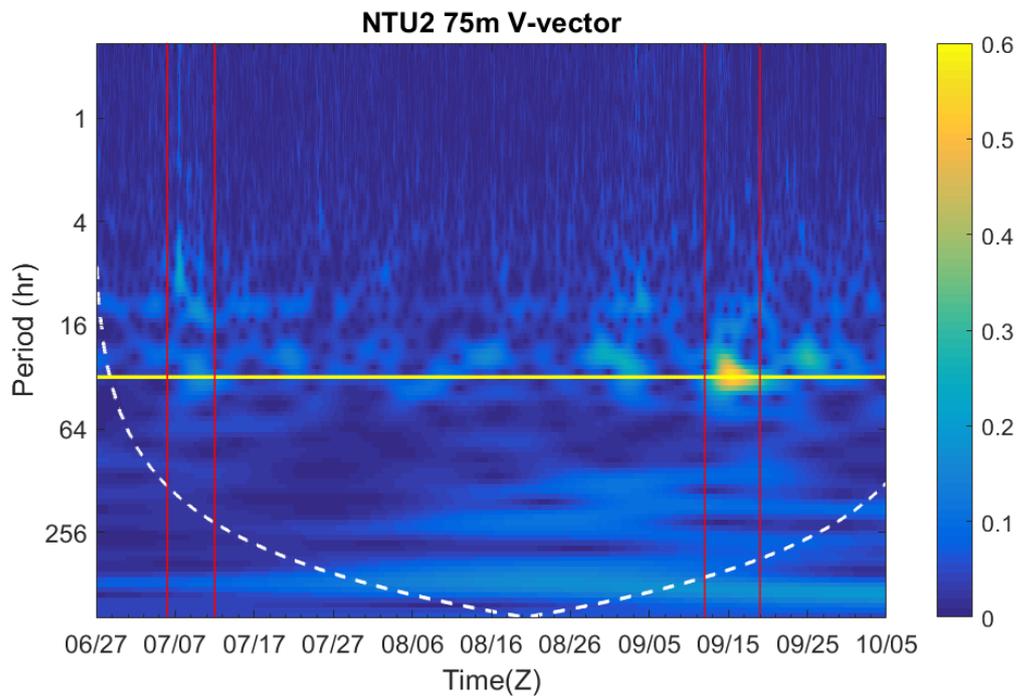


圖 4-31、NTU2 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖，圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 32.011 小時，紅線框出來的區域分別是尼伯特、莫蘭蒂與馬勒卡影響期間。

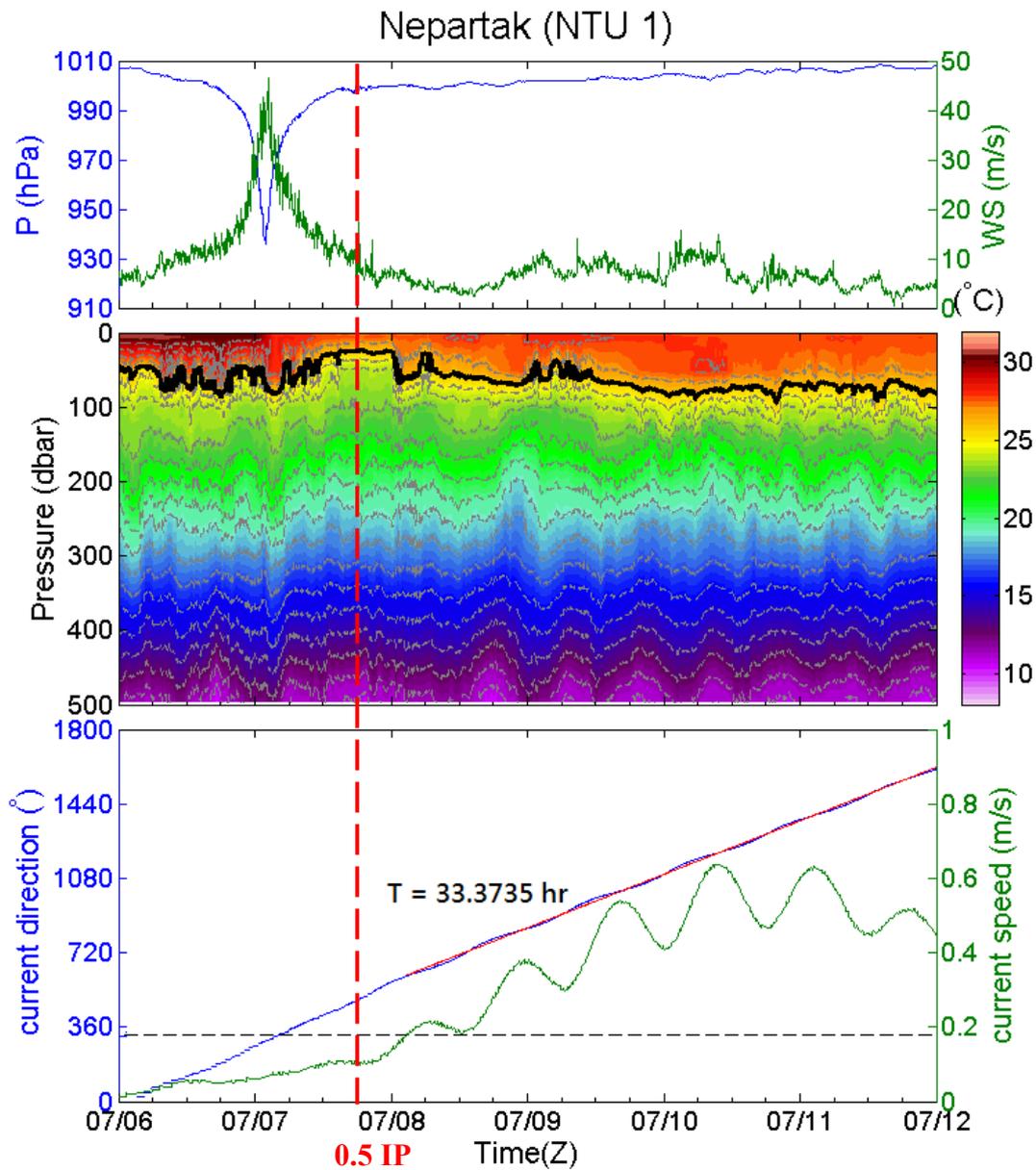


圖 4-32、尼伯特颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。上圖中的藍線是氣壓；綠線是風速。中圖是上層 500 公尺海溫剖面圖，其中粗黑線是 26°C 等溫線；灰線是以 1°C 為間距之等溫線。下圖藍線是流向；綠線是流速；虛線是定義計算流向線性迴歸時的流速閾值。

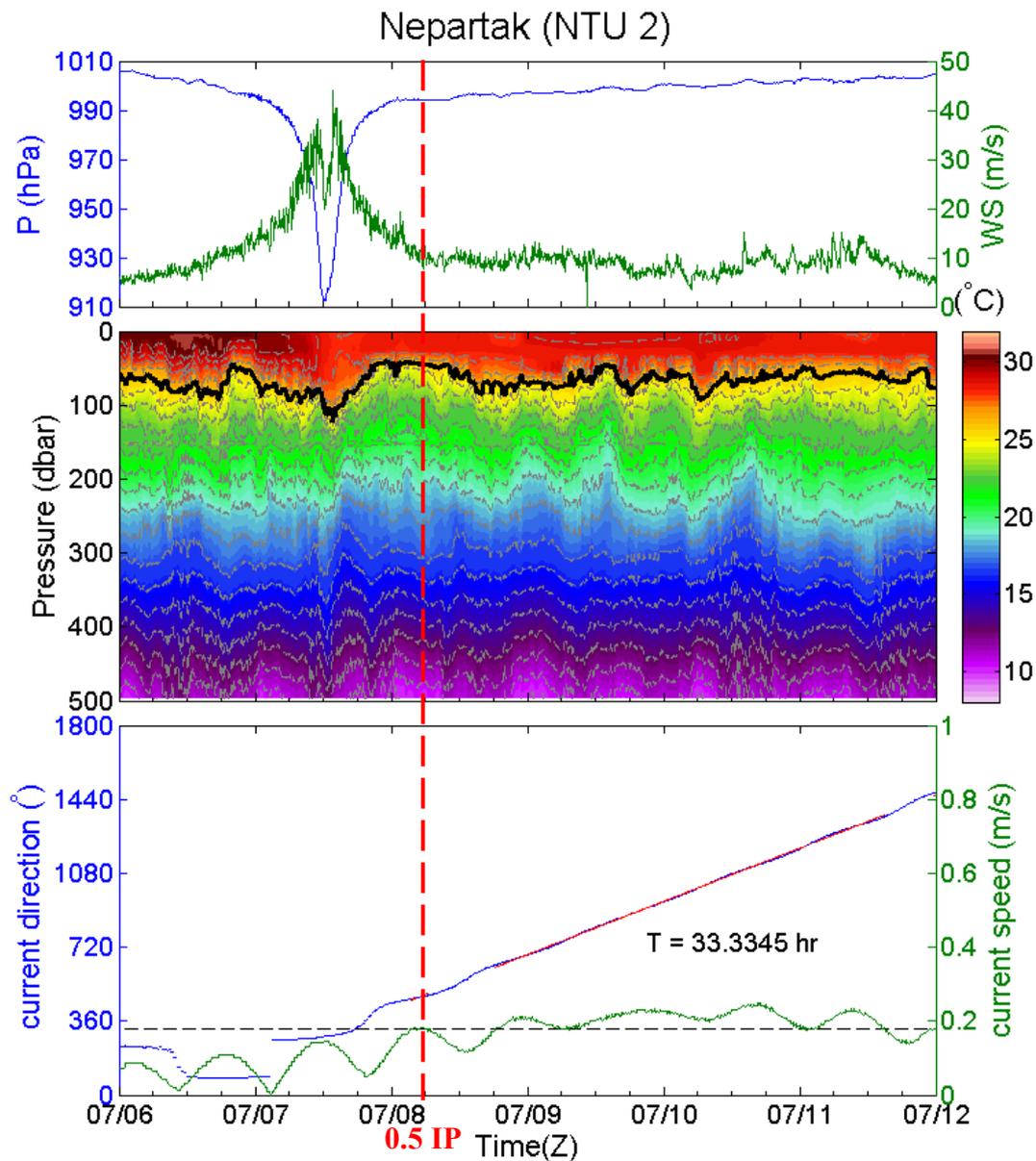


圖 4-33、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。上圖中的藍線是氣壓；綠線是風速。中圖是上層 500 公尺海溫剖面圖，其中粗黑線是 26°C 等溫線；灰線是以 1°C 為間距之等溫線。下圖藍線是流向；綠線是流速；虛線是定義計算流向線性迴歸時的流速閾值。

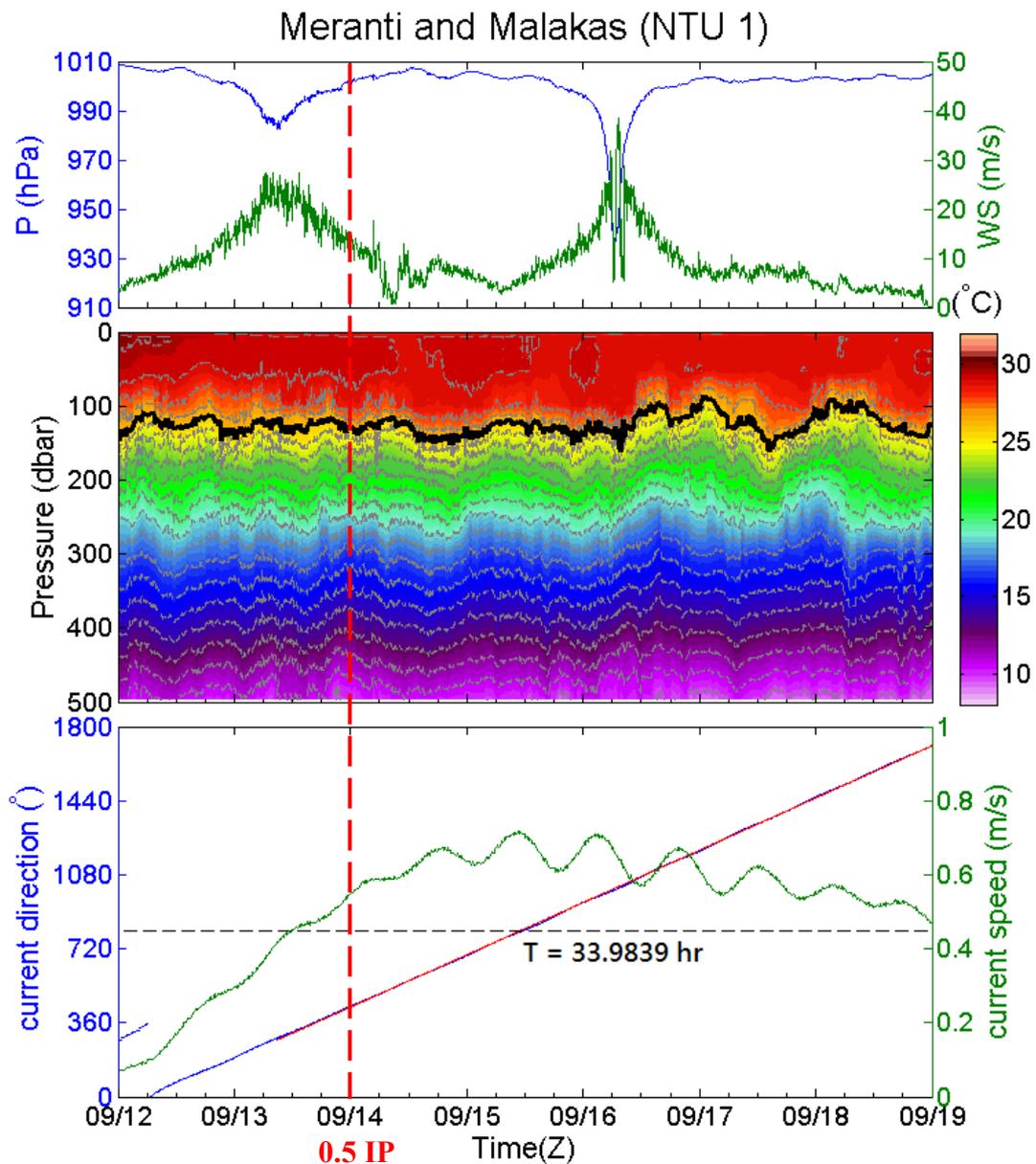


圖 4-34、莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。上圖中的藍線是氣壓；綠線是風速。中圖是上層 500 公尺海溫剖面圖，其中粗黑線是 26°C 等溫線；灰線是以 1°C 為間距之等溫線。下圖藍線是流向；綠線是流速；虛線是定義計算流向線性迴歸時的流速閾值。

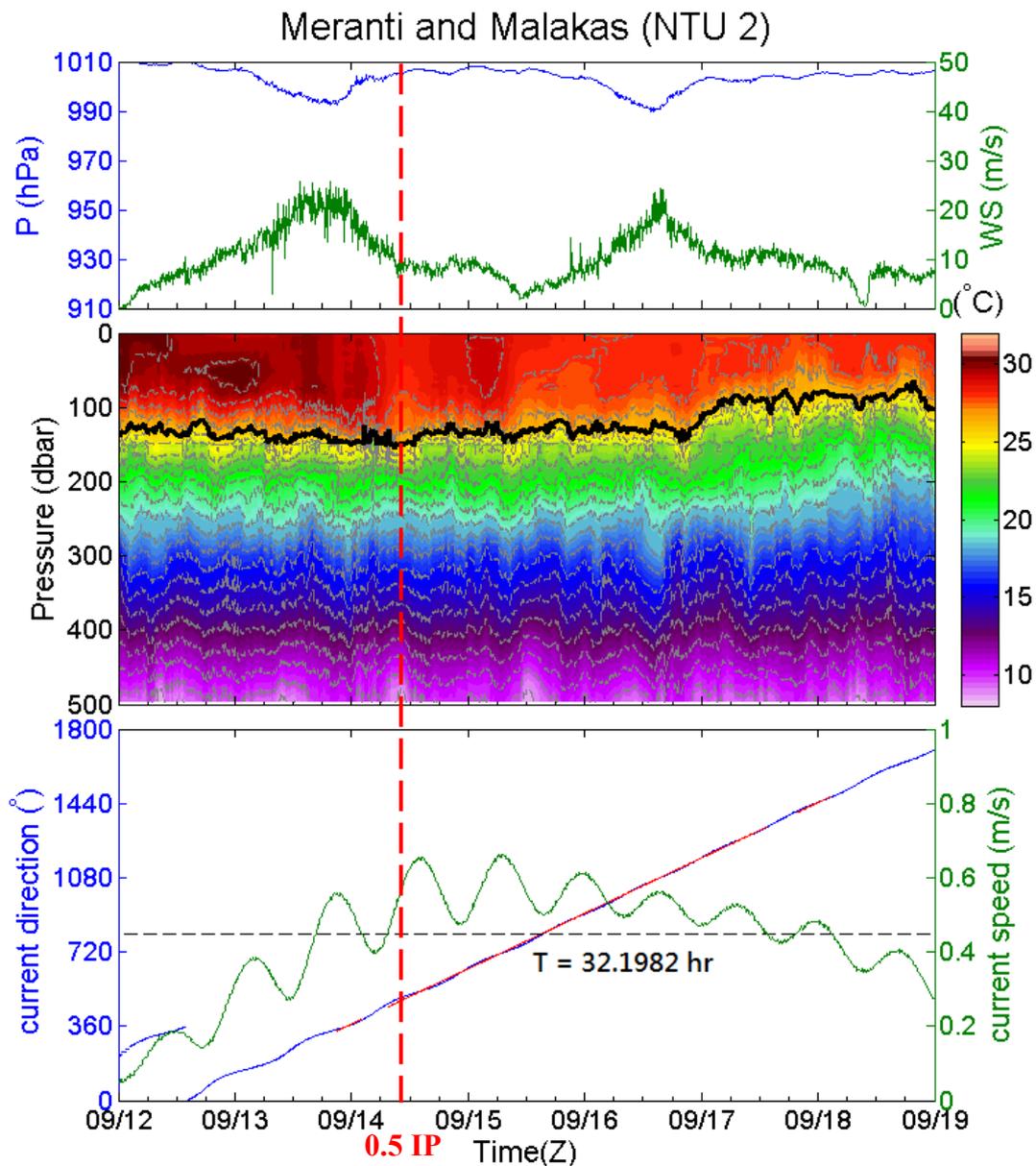


圖 4-35、莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。上圖中的藍線是氣壓；綠線是風速。中圖是上層 500 公尺海溫剖面圖，其中粗黑線是 26°C 等溫線；灰線是以 1°C 為間距之等溫線。下圖藍線是流向；綠線是流速；虛線是定義計算流向線性迴歸時的流速閾值。

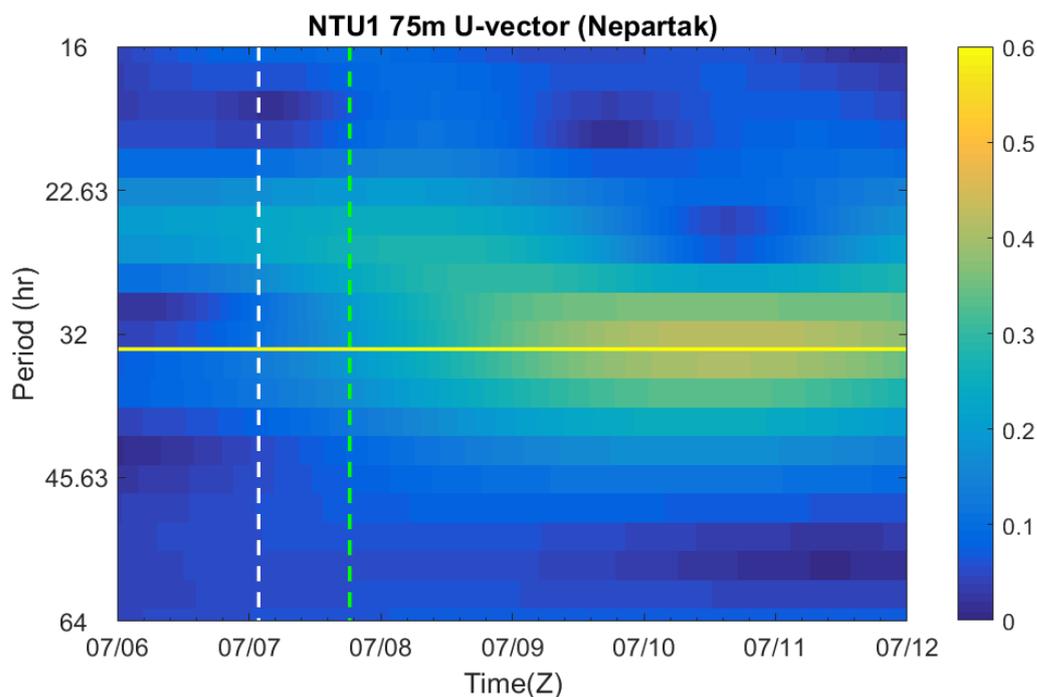


圖 4-36、尼伯特颱風影響期間 NTU1 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 33.185 小時；白線為颱風最靠近浮標時；綠線為颱風最靠近後 0.5 IP 的時間點。

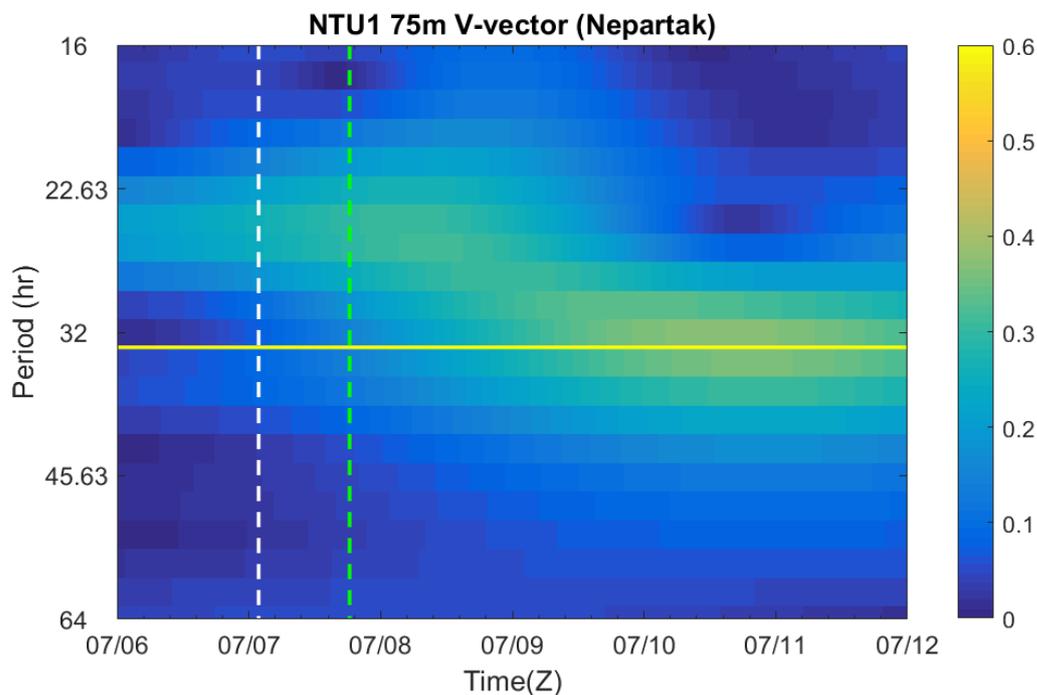


圖 4-37、尼伯特颱風影響期間 NTU1 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 33.185 小時；白線為颱風最靠近浮標時；綠線為颱風最靠近後 0.5 IP 的時間點。

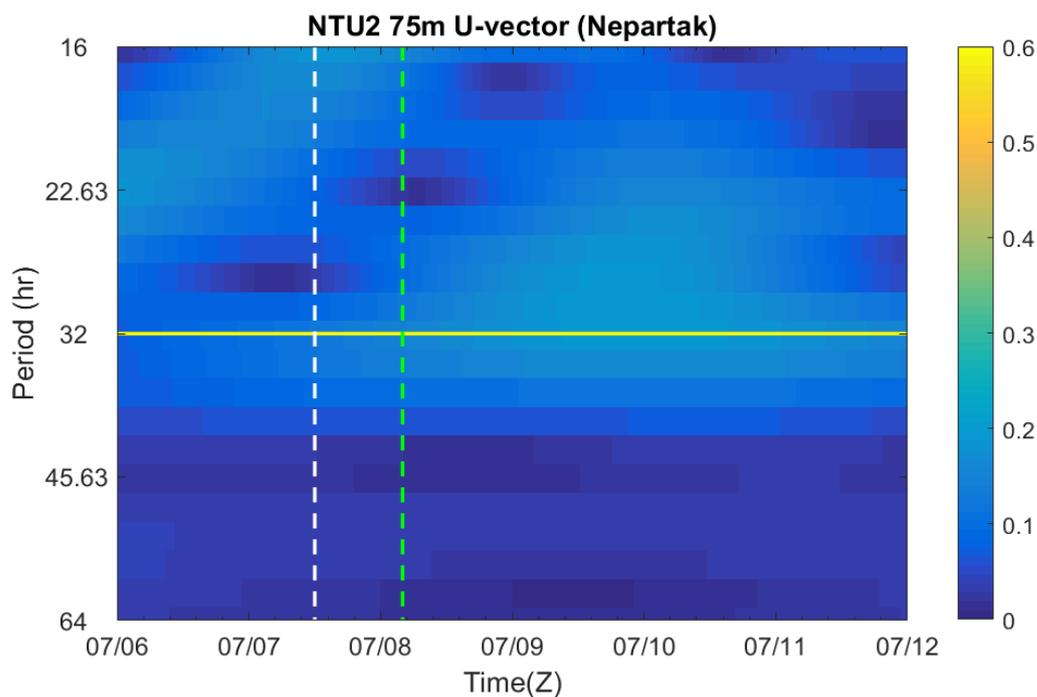


圖 4-38、尼伯特颱風影響期間 NTU2 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 32.011 小時；白線為颱風最靠近浮標時；綠線為颱風最靠近後 0.5 IP 的時間點。

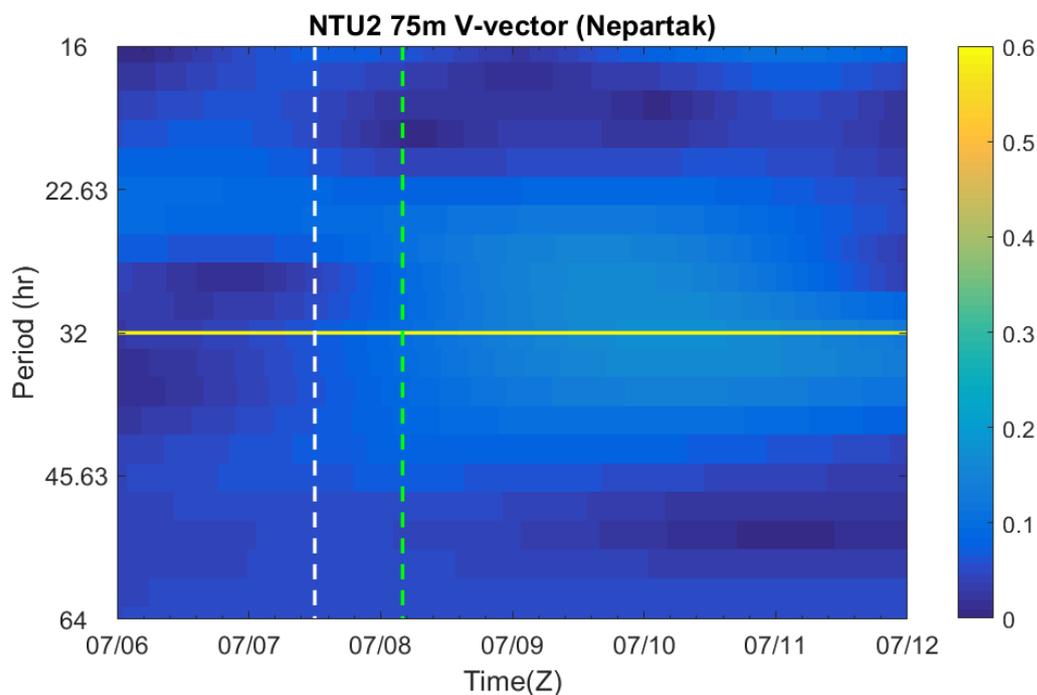


圖 4-39、尼伯特颱風影響期間 NTU2 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 32.011 小時；白線為颱風最靠近浮標時；綠線為颱風最靠近後 0.5 IP 的時間點。

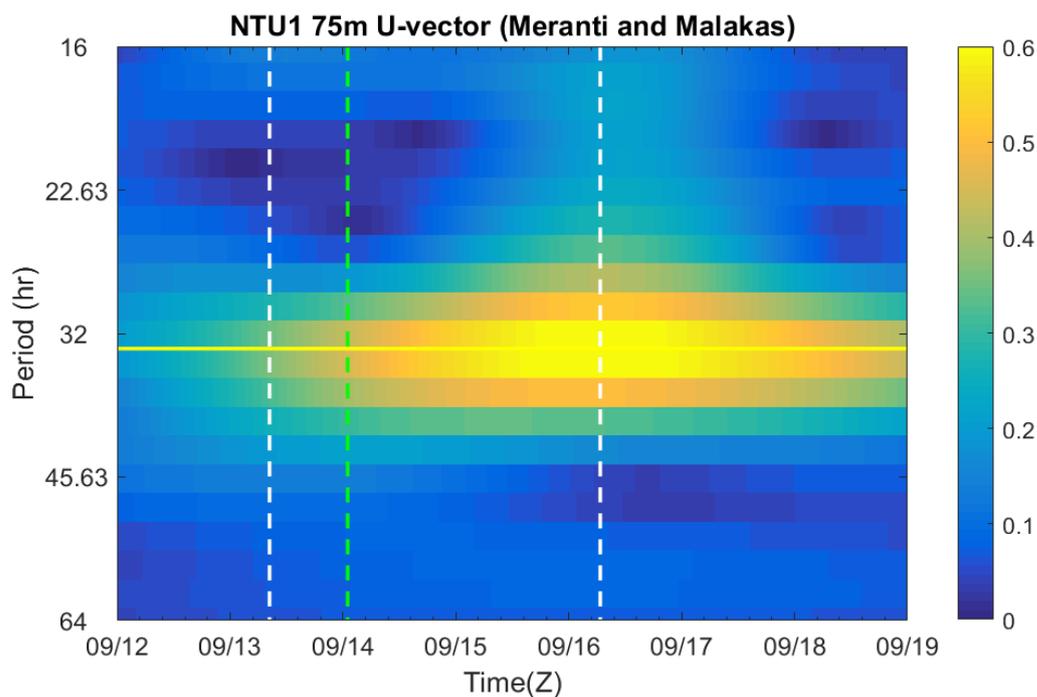


圖 4-40、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間 NTU1 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 33.185 小時；白線為颱風最靠近浮標時；綠線為颱風最靠近後 0.5 IP 的時間點。

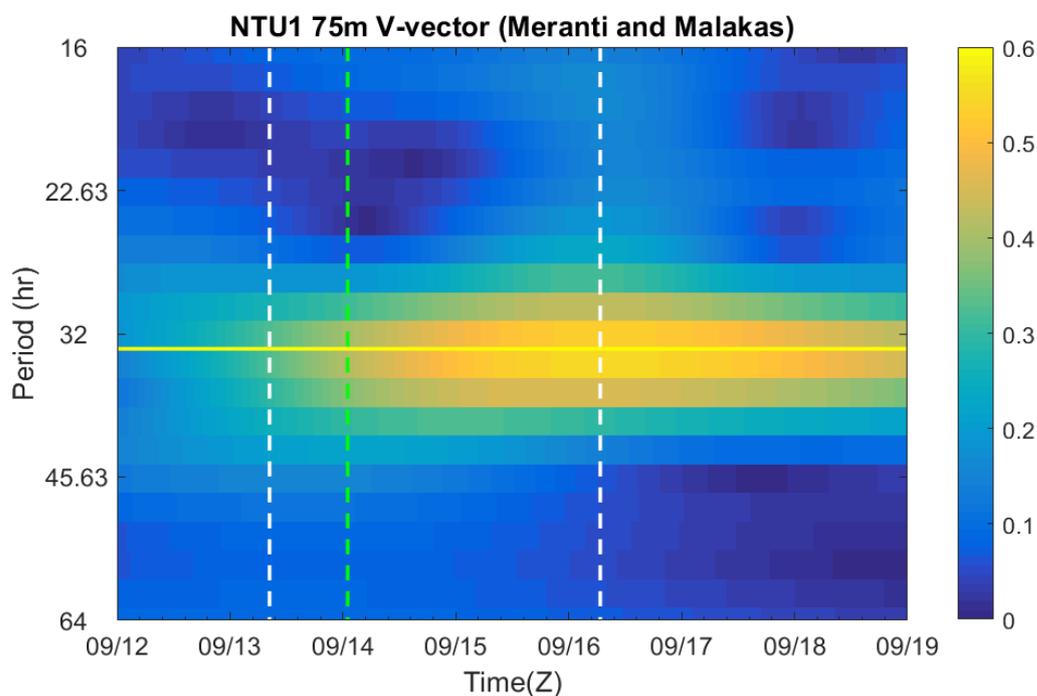


圖 4-41、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間 NTU1 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 33.185 小時；白線為颱風最靠近浮標時；綠線為颱風最靠近後 0.5 IP 的時間點

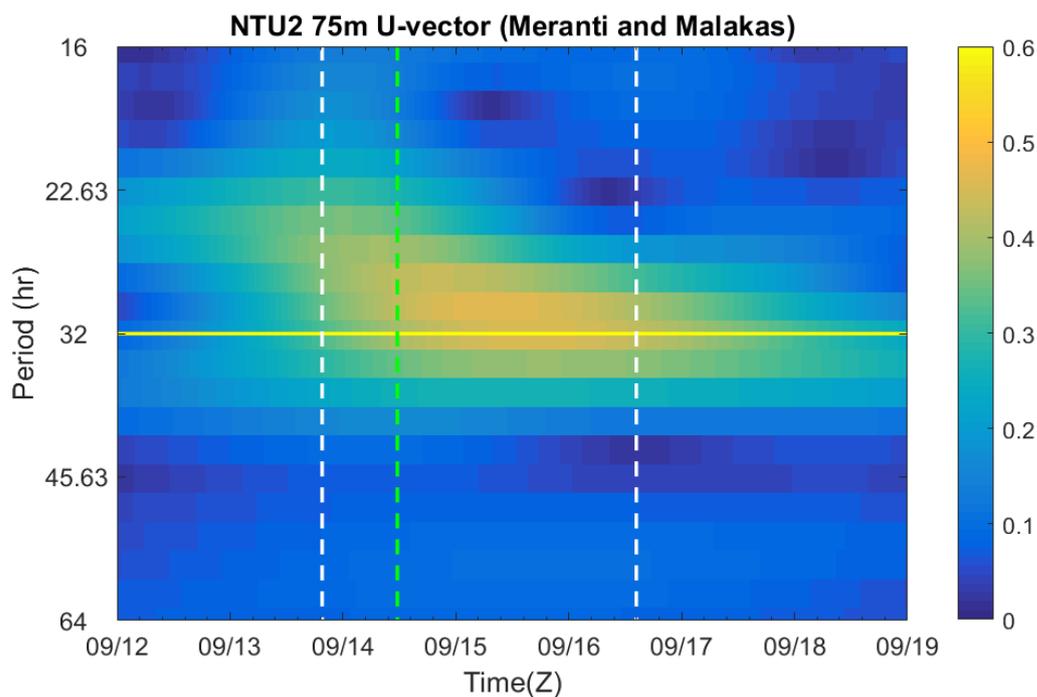


圖 4-42、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間 NTU2 站 75 公尺 U 分量流速資料之頻譜強弱圖。圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 32.011 小時；白線為颱風最靠近浮標時；綠線為颱風最靠近後 0.5 IP 的時間點

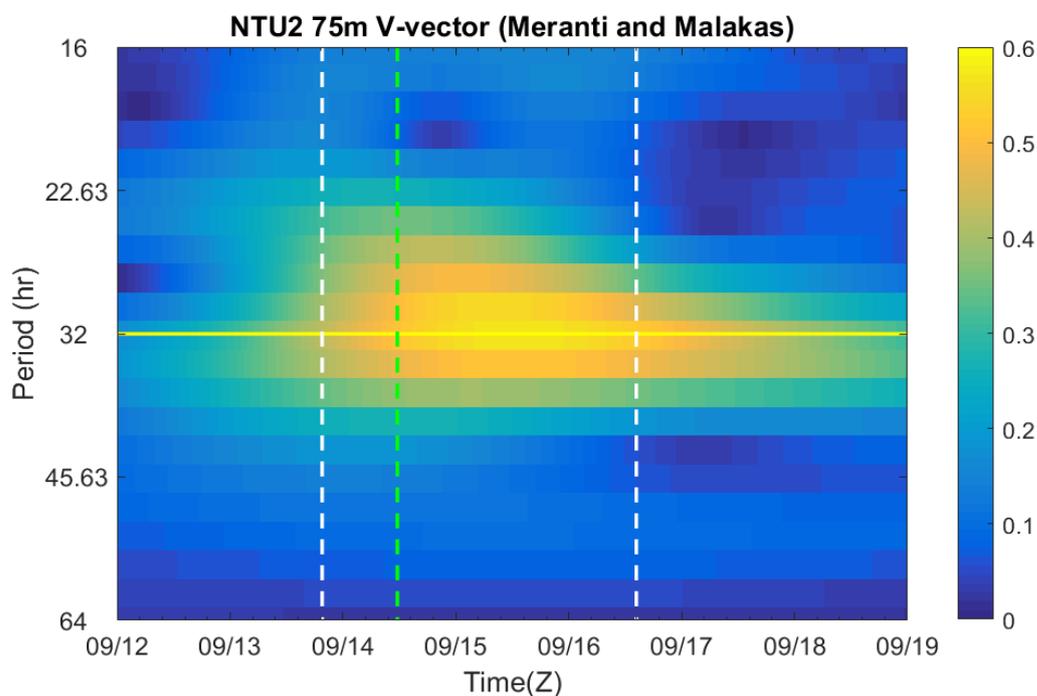


圖 4-43、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間 NTU2 站 75 公尺 V 分量流速資料之頻譜強弱圖。圖中橫軸為時間；縱軸為周期。黃線為當地慣性週期 32.011 小時；白線為颱風最靠近浮標時；綠線為颱風最靠近後 0.5 IP 的時間點

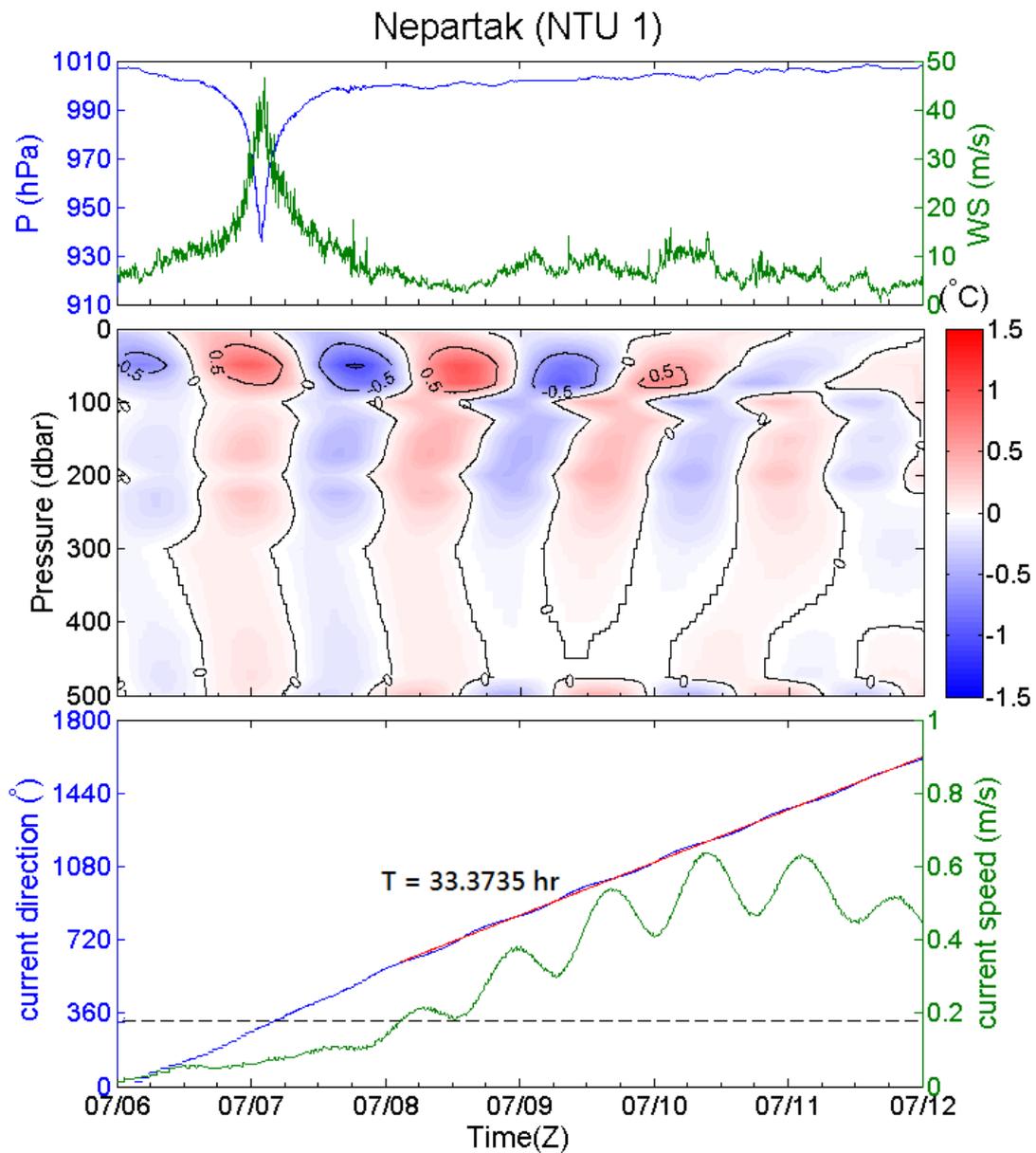


圖 4-44、尼伯特颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。上圖中的藍線是氣壓；綠線是風速。中圖是上層 500 公尺濾波過後的海溫剖面圖。下圖藍線是流向；綠線是流速；虛線是定義做流向線性迴歸的閾值。

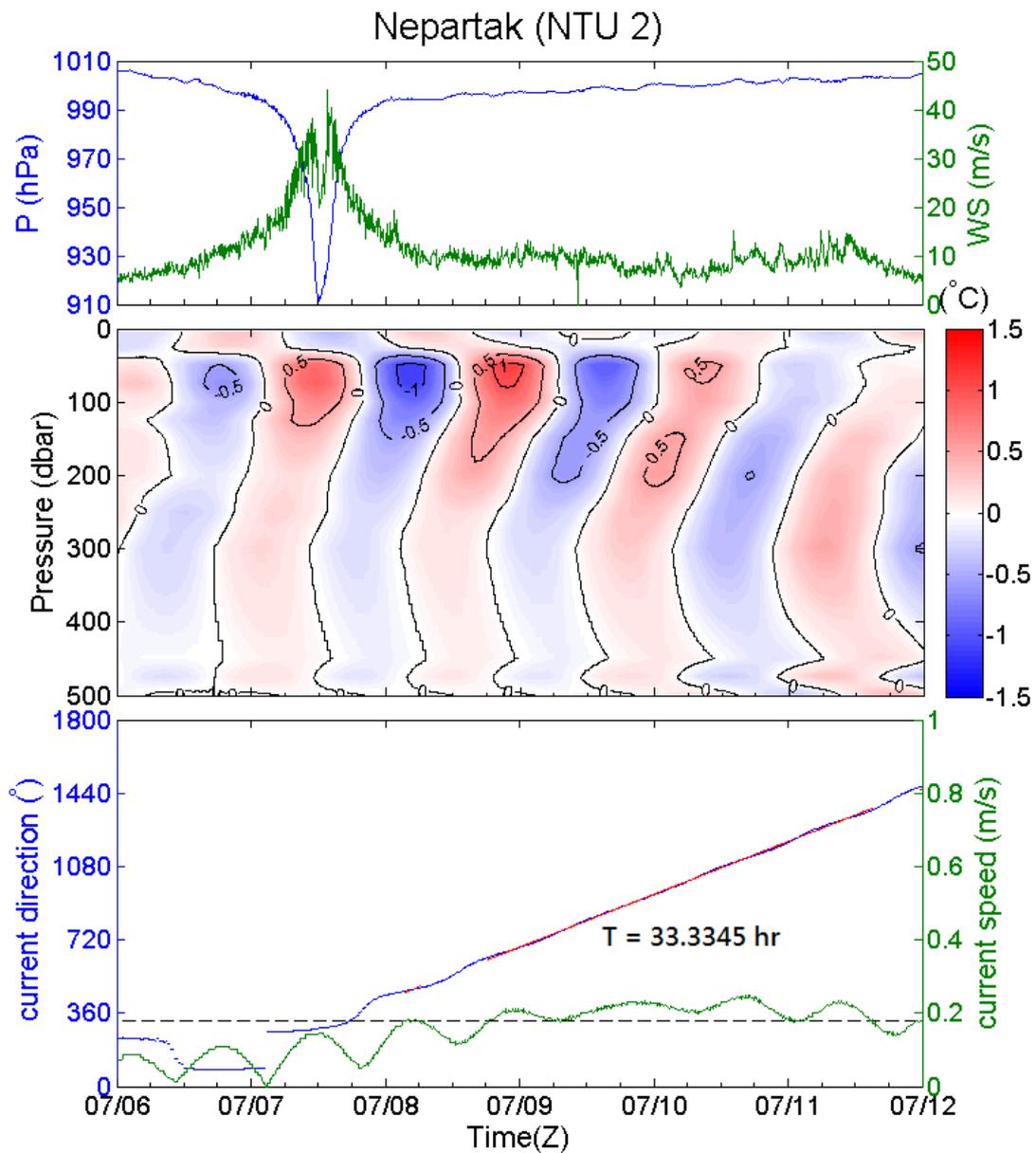


圖 4-45、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。上圖中的藍線是氣壓；綠線是風速。中圖是上層 500 公尺濾波過後的海溫剖面圖。下圖藍線是流向；綠線是流速；虛線是定義做流向線性迴歸的閾值。

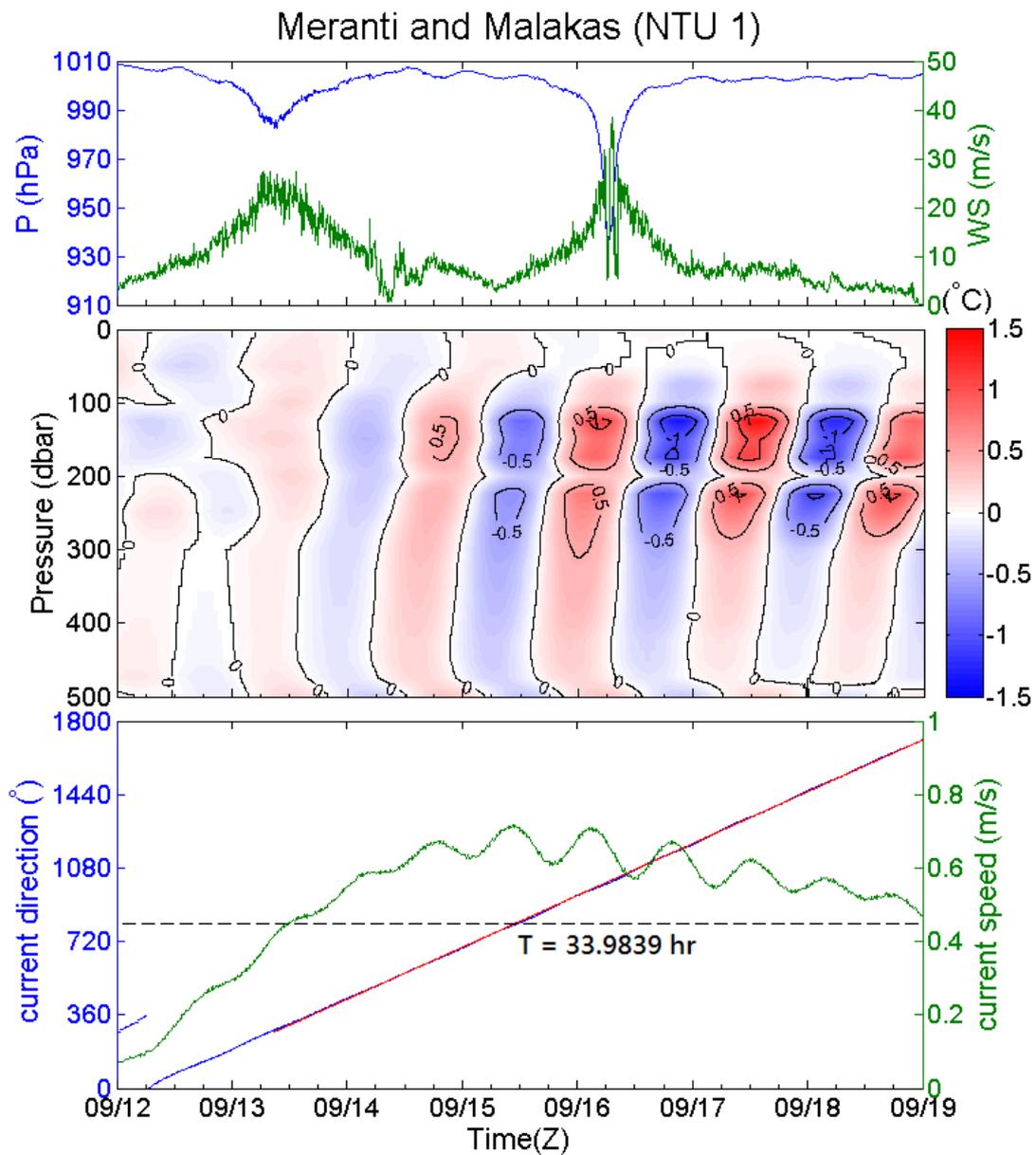


圖 4-46、莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。上圖中的藍線是氣壓；綠線是風速。中圖是上層 500 公尺濾波過後的海溫剖面圖。下圖藍線是流向；綠線是流速；虛線是定義做流向線性迴歸的閾值。

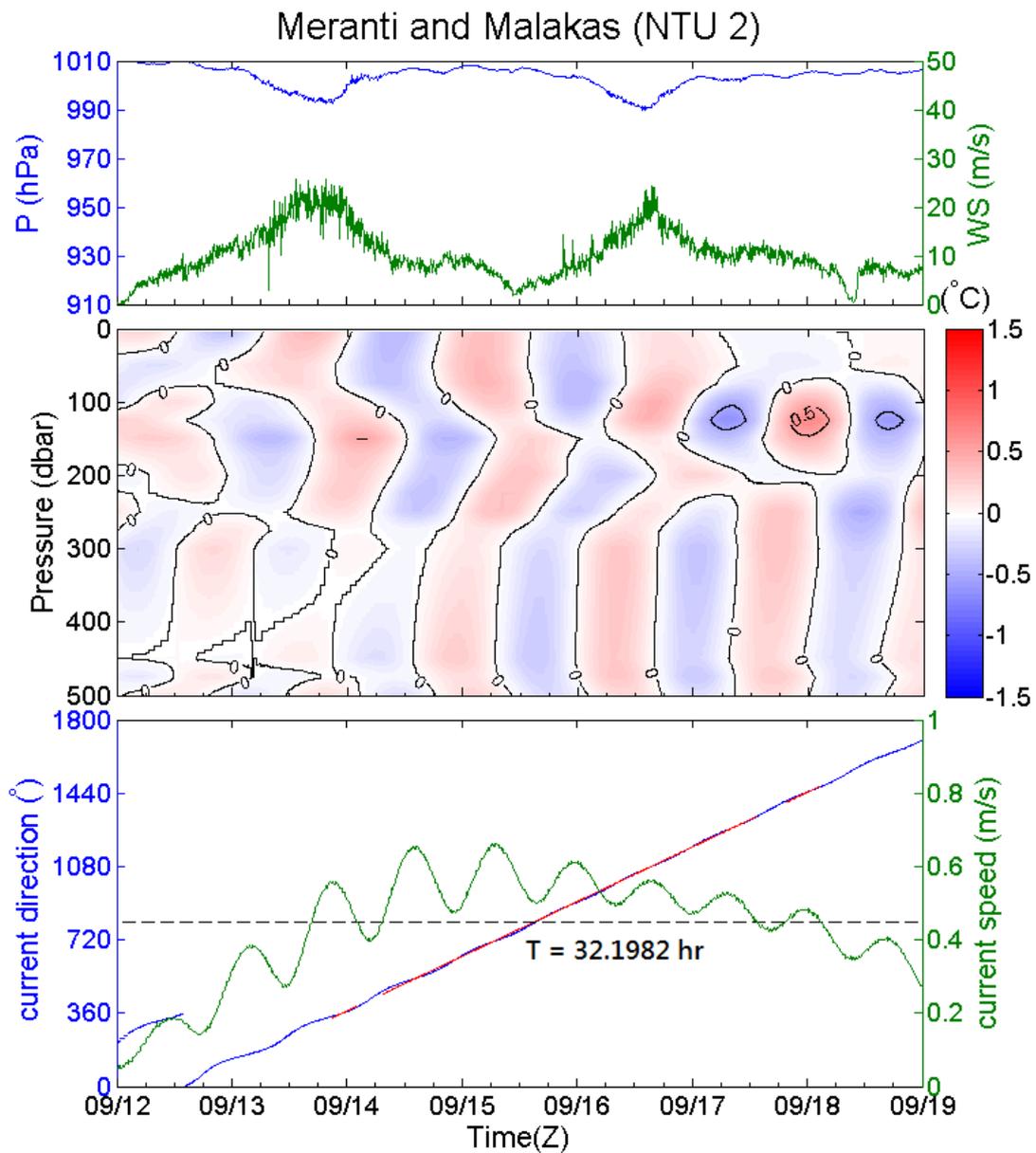


圖 4-47、莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。上圖中的藍線是氣壓；綠線是風速。中圖是上層 500 公尺濾波過後的海溫剖面圖。下圖藍線是流向；綠線是流速；虛線是定義做流向線性迴歸的閾值。

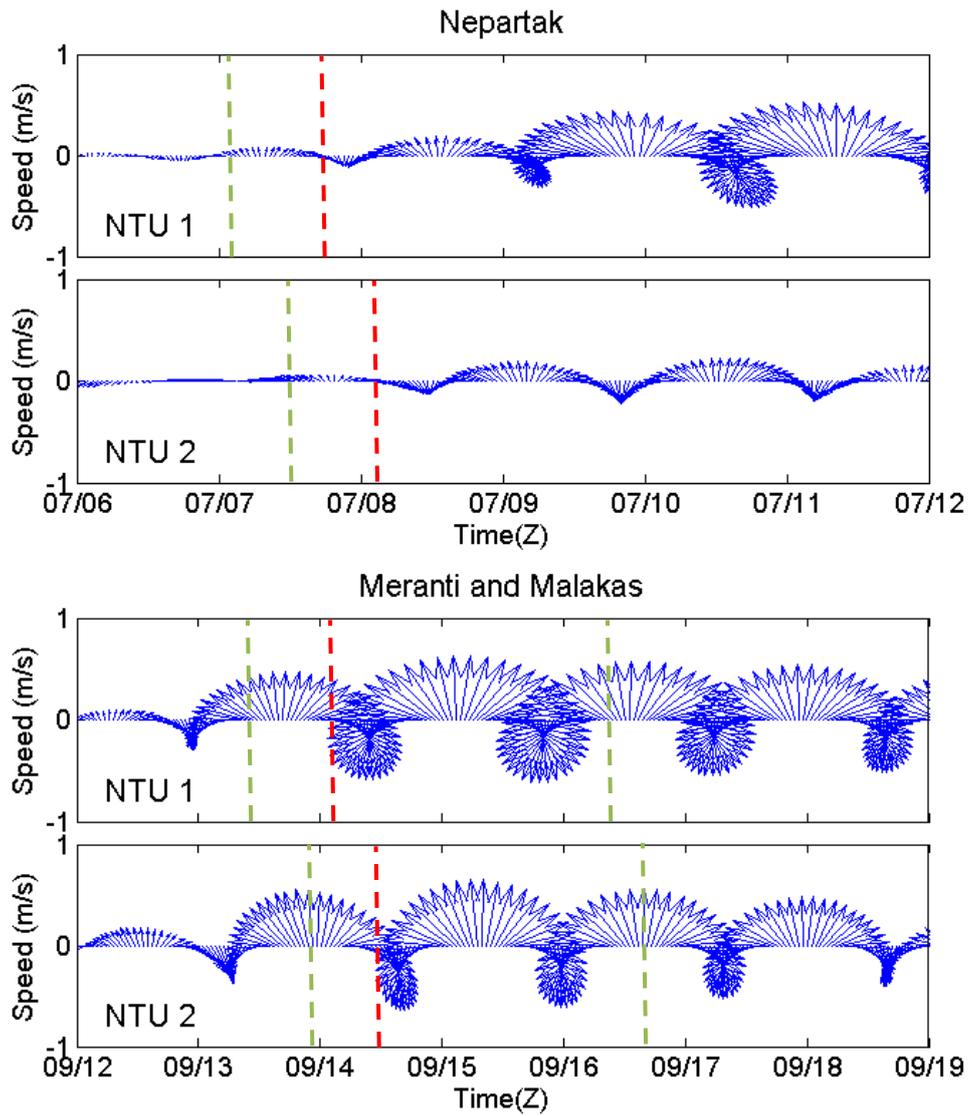


圖 4-48、75 公尺之流矢圖。上二圖為尼伯特颱風經過 NTU1 和 NTU2 站前後，下二圖為莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU1 和 NTU2 站前後。圖中綠虛線為颱風最靠近浮標時；圖中紅虛線為颱風最靠近浮標後 0.5 個 IP 時。

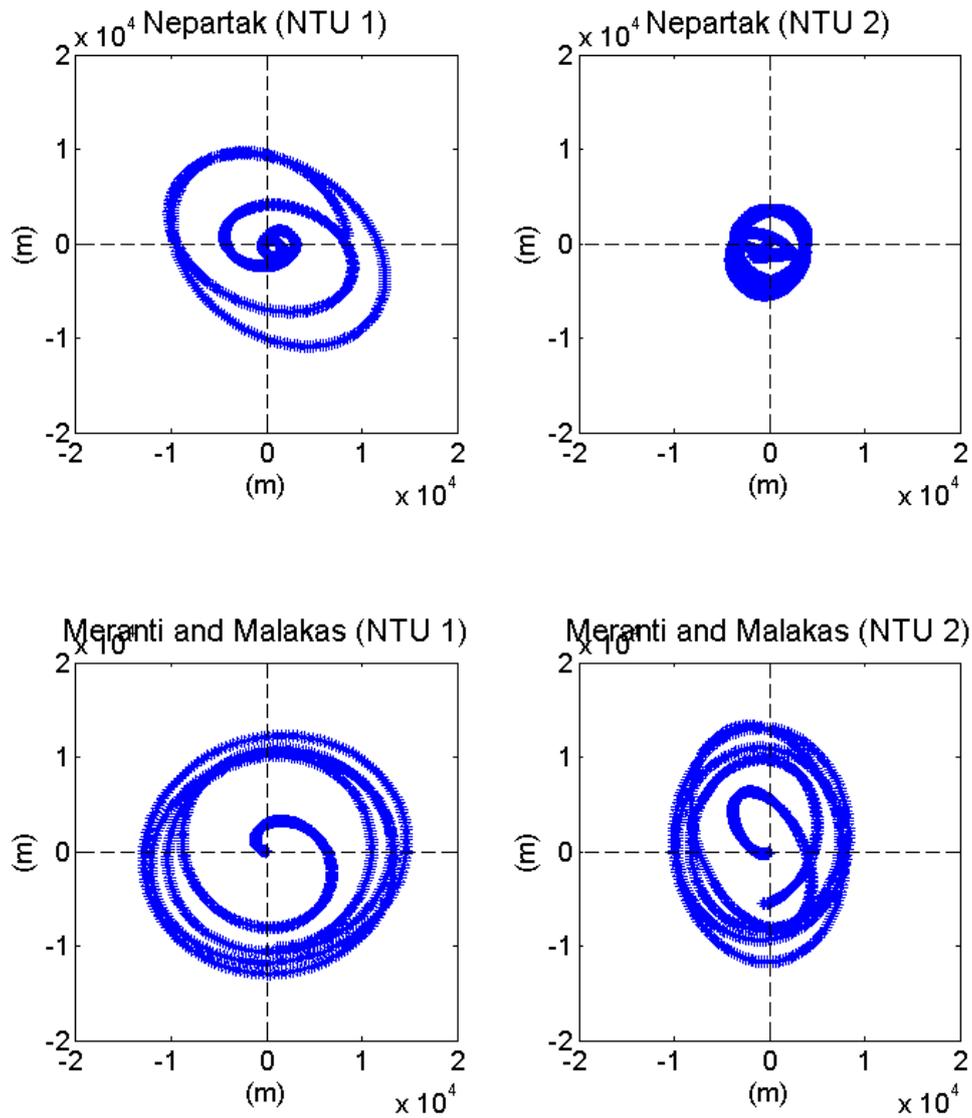
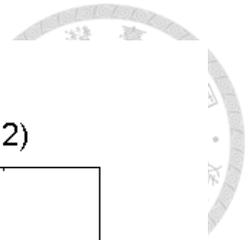


圖 4-49、累進矢量圖。左上和右上分別為尼伯特颱風經過 NTU1 和 NTU2 站前後，左下和右下分別為莫蘭蒂和馬勒卡颱風經過 NTU1 和 NTU2 站前後。



4.4 上層海洋變化過程

在本研究中，有兩個颱風中心與浮標的距離非常的近，分別是尼伯特颱風與馬勒卡颱風。尼伯特颱風之中心距離 NTU1 站約 15 公里；離 NTU2 站約 5.7 公里，而馬勒卡的颱風中心與浮標之最近距離僅數百公尺，對於討論當颱風經過海面時上層海洋會產生怎樣的變化是一筆相當重要的資料。本研究選擇了尼伯特在 NTU2 站時的資料來做分析，選擇這個個案主要有幾個原因，一、距離。二、颱風前的海洋狀態。三、資料完整度。僅談論距離而言馬勒卡颱風在 NTU1 站是最佳選擇，其次才是尼伯特在 NTU2 站時，但因為在馬勒卡颱風經過浮標前 3 天有莫蘭蒂颱風的經過，因此當時海洋狀態已受到其他因素影響，不是一個相對平靜的狀態，再加上強流使得纜線高頻震盪，因而使 25 公尺的流速計在尼伯特颱風經過後數小時電池就爆炸，因此只有這站有完整的兩層流速資料，綜合以上原因尼伯特在 NTU2 站時是分析颱風經過時海洋變化的最佳個案。

在圖 4-50 當中可以看到在颱風經過時，風速逐漸增強到 46 m/s 而氣壓逐漸降到 911 hPa，海表溫也下降約 3°C 左右，且不只海表溫有下降，約上層 25 公尺的海水都有明顯降溫，且暖水層厚度有快速的增加，暖水層的快速增加也使得上層海洋熱含量亦上升許多，而熱通量的部分，和 4.1 小節提到的現象相似，在颱風靠近時雲層的遮蔽使淨輻射量大幅下降，強烈的風使潛熱明顯增加，但因為本站風速非常大，因此在部分區間內，潛熱的估算是適用於 TOGA COARE 3.0 的計算套件，但因為目前尚未找到更好的工具，所以仍使用此套件估算之值作為一個參考，不適用的區間在圖中有使用黑框標示。此外為討論動力部分，圖中最下面兩張圖畫了 N^2 與流切(shear)平方(S^2)，其中藍線與黑線是將內插好的溫度資料取出在 25 公尺與 75 公尺處的 N^2 ，而流切是利用預設在 25 公尺與 75 公尺的兩組流速資料去算流切，其中整體(bulk)的 N^2 是利用預設在 25 公尺與 75 公尺的兩組溫度資料所求得，而 N^2 與 S^2 之比值代表的是理查遜數(Richardson number, Ri)，前人定義當流切不穩定(current shear instability)發生時，理查遜數必小於 0.25，且整層海水中只要有一處發生，則整層海水將會是不穩定的狀態，因此在此使用 25 公尺和 75 公尺的資料來推論流切不穩定的發生是合理的，而圖中當 $4N^2-S^2$ 小於零表示可能有流切不穩定。而圖中的 Di 代表的是將內插好的溫度資料減去颱風來之前約 1 周的溫度平均值，以便討論 25 公尺與 75 公尺這兩層溫度隨時間之變化。為了解詳

細上層海洋溫度變化過程，將圖 4-50 中紅框區域放大，置於圖 4-51 中，並選取幾個時間點的海溫剖面繪製於圖 4-52。

在此選取了 7 月 7 日 4 點的時候，當作颱風來之前的海洋狀態，在此時混合層大約 25 公尺左右到 8 點的時候混合層仍維持一樣的厚度，但在這段期間，上層海溫有些微的下降，此溫降為主要是受熱通量減少所致。而到 9 點 45 分時，風速已增強到 25 m/s 以上，使 25 公尺與 75 公尺的流切達到極大值，此時也達到產生流切不穩定的條件，因此流切不穩定致使整層海水混合，上層海水降溫下層海水增溫，混合層逐漸加深，直到 11 點半因混合層持續加深，75 公尺剛好位於斜溫層的位置，因此圖中 75 公尺的 N^2 產生一個極大值，到 13 點混合層約加深到 125 公尺的位置，此時 25 公尺與 75 公尺都位在混合層內，因此兩者的 N^2 都非常的小，相較 8 點半時的海洋狀態，混合層在短短 5 小時內增加了約 100 公尺的厚度，然而當颱風中心經過風速開始下降，海水混合的強度減弱，26°C 的等溫線所在深度有快速變淺，同時混合層厚度在 17 點與 19 點半時也有逐漸淺化的現象。由以上的過程可以得知，在颱風靠近時，熱通量的減少是造成海溫下降的要素之一，但其造成的溫降有限，而另一個溫降要素—流切不穩定為主要的溫降來源，當流切不穩定發生時，可使整層海水混合，產生明顯的溫降。除此之外，此站點經過颱風中心，因此圖 4-51 中可看到中心兩側之眼牆所帶來的最大風速，在此對稱的風速下，然而卻帶來不同程度的海水混合。這次因為在達到第一個風速極大值時，亦是流切不穩定產生時，當上層海水因流切不穩定完整混合後，即使第二個風速極大值和第一個一樣大，但因為海水分層的改變，使海溫沒有看到對稱的現象。

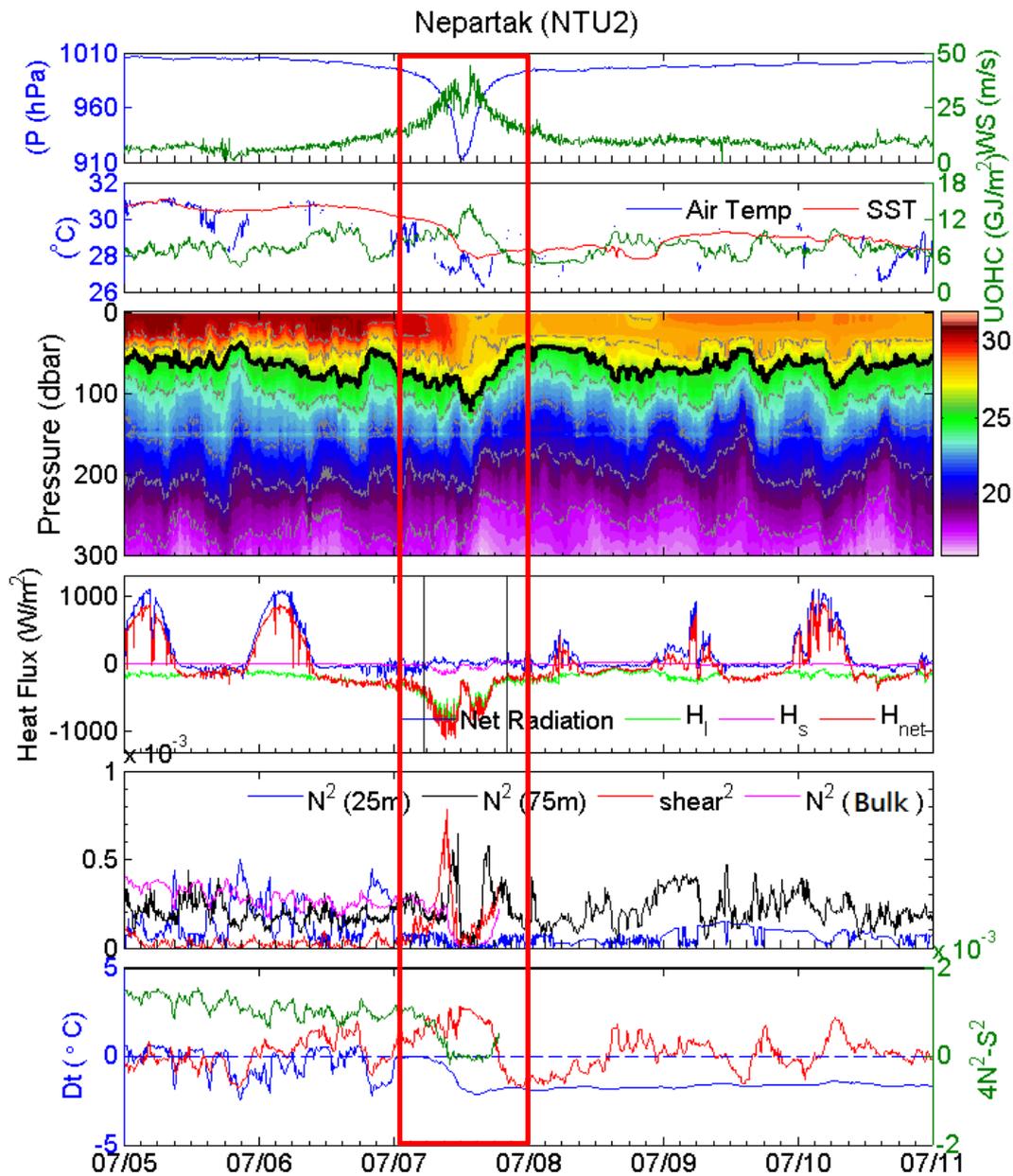


圖 4-50、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。由上而下，第一格中的藍線是氣壓；綠線是風速。第二格的綠線是上層海洋熱含量；藍線是氣溫；紅線是海表溫。第三格是上層 300 公尺海溫剖面圖，其中粗黑線是 26°C 等溫線。第四格中藍線是淨輻射量；綠色是潛熱通量；紅色是可感熱通量；紅色是淨熱通量，其中黑線框出的範圍是超出 TOGA COARE 3.0 適用範圍的區域。第五格中藍線是 25 公尺的 N^2 ；黑線是 75 公尺的 N^2 ；紅線是 25 公尺和 75 公尺之間的流切，而紫線是 25 公尺到 75 公尺之間整層的 N^2 。第六格圖則是 25 公尺(藍)和 75 公尺(紅)的溫度距平，而綠線是代表理查遜數。

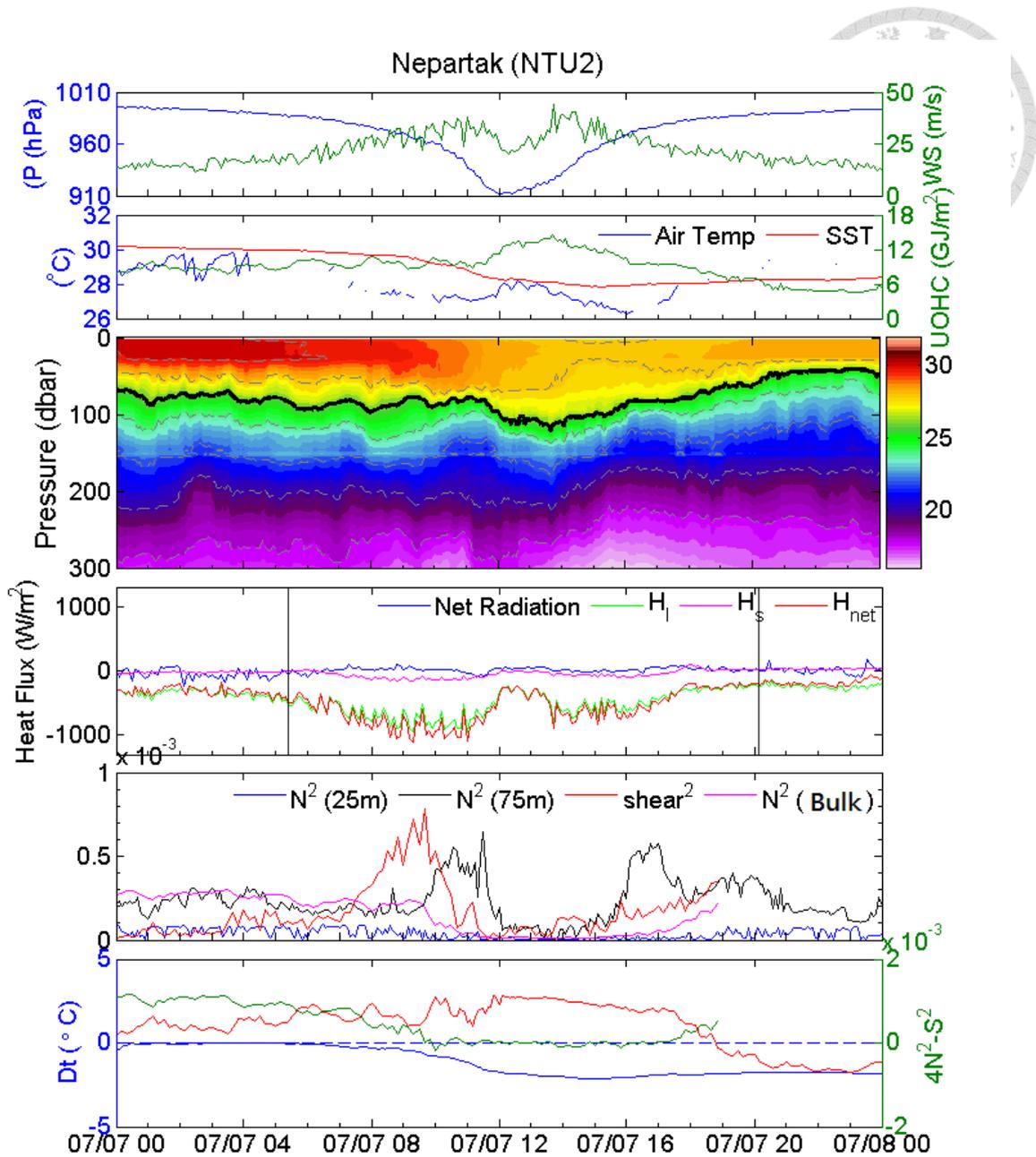


圖 4-51、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖，本圖是圖 4-50 紅框線中圈出之範圍，詳細圖說同圖 4-50。

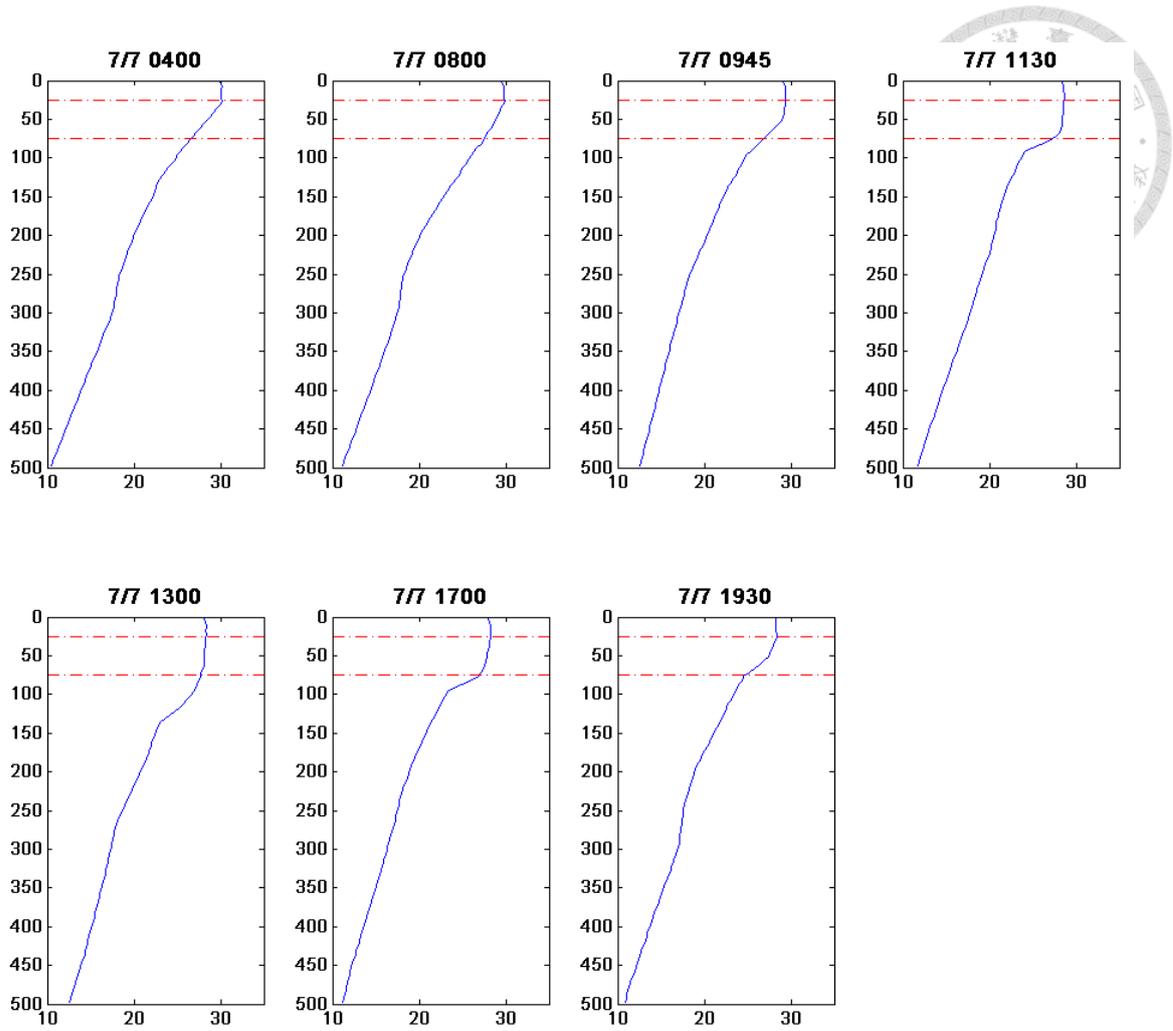


圖 4-52、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之海溫剖面圖，由左至右由上到下分別是格林威治標準時間的 7 月 7 日的 4 點、8 點、9 點 45 分、11 點半、13 點、17 點與 19 點半。

第五章 討論與結論



5.1 討論

本節將針對上一章所提及之慣性運動、上層海洋變化、熱通量之分析，分別於 5.1.1 到 5.1.3 節中進行更進一步的討論。

5.1.1 近慣性運動

在 4.3 節當中，曾提到同樣是尼伯特颱風但在相距不是很遠的 NTU1 與 NTU2 站，所產生的慣性運動速度大小卻有明顯的差異。為找出原因，首先比較颱風的移動速度和當地第一斜壓模相位速度，根據蓋斯勒線性理論(Geisler, 1970)討論尼伯特颱風在這兩站點所造成的海水主要特徵。從圖 5-1 可以看到尼伯特颱風的移動速度平均上皆大於當地第一斜壓模相位速度，因此這區域的海水運動的主要特徵皆是慣性波。確定海水特徵相同之後，將 2.5 公尺的風速作用在 75 公尺海流方向上之分量畫在圖 5-2 和 5-3 中，當此投影量為正，代表風和流的作用是同向；若投影量為負，則代表風和流的作用是反向的，而值的大小代表作用量的多寡，從圖中發現尼伯特經過 NTU1 站時，多為同向的作用量，而尼伯特經過 NTU2 站時，其反向的作用量很大，這樣的風使得海流被抵銷，這也是為什麼尼伯特在經過 NTU2 站時，海流小於 NTU1 站所觀測到的。因此慣性流非常小，所以在圖 4-38 和圖 4-39 中的小波分析結果無法在慣性週期附近看到明顯的訊號，但是在圖 4-33 中的流向變化，依舊能看出近慣性運動的產生，由此比較可發現，海流的流向變化比小波分析更容易看出慣性運動的生成。

前面提到慣性運動在颱風最靠近之前約 9 小時到 2.25 天就已生成，且開始時的颱風位置與浮標相距約 150 km 到 1050 km 不等，詳細時間與相對位置請見表 5-1。在颱風靠近浮標，甚至 7 級暴風半徑未接觸到浮標時，颱風早已影響表面海水，而整團海水的運動傳遞到浮標所在位置，使慣性運動在颱風最靠近之前就已生成。

在慣性週期的分析上，發現估算出來的慣性週期理論上要小於當地慣性週期，然而依前述資料所算出來的結果卻都大於當地慣性週期(表 5-1)。根據 Hormann et.

al (2014)的說法，可能因為受到背景流場或是渦旋的影響，且當地感受到的頻率 (f_{eff}) 會相等於當地的行星渦度(f)加上 1/2 倍的環境渦度(ζ) (Kunze, 1985)，即

$$\omega = f + \frac{\zeta}{2} \quad \text{【9】}$$

然而使用圖 5-4 與圖 5-5 中，尼伯特、莫蘭蒂與馬勒卡影響期間之 AVISO 背景流場資料來做環境渦度估算，發現其結果尺度不相符。有可能是因為浮標站點的尺度和資料網格相比，有很明顯的差異，又或是和前面提到的慣性運動起始時間有關，即當颱風尚未到達站點時，颱風尚在緯度較低的地方其效應已北傳，使得浮標量到之慣性週期大於當地慣性週期，亦或是受到其他運動影響所致。

5.1.2 上層海水混合後之恢復過程

在混合過程的分析上，從圖 5-6 中可看到當風逐漸增強，在 2017 年 7 月 7 日 13 時 40 分時混合層逐漸增加到 102 公尺，但在颱風遠離後混合層的厚度不會持續維持，而是快速變淺，在 2017 年 7 月 7 日 20 時混合層只有到 29 公尺，在短時間內混合層厚度改變了 73 公尺，此快速的變化吾人推測有幾個可能，第一是颱風風場造成的艾克曼抽汲(Ekman pumping)；第二是位渦守恆，因為當颱風靠近時，當地的環境渦度會受颱風的風場影響而增強，但為了維持位渦守恆(式子如下)

$$\frac{f + \zeta_1}{H_1} = \frac{f + \zeta_2}{H_2} \quad \text{【10】}$$

渦管高度(H)也就是這裡的混合層厚度應同時增加，而在颱風遠離後，風變弱使得環境渦度較颱風靠近時小，就必須對應到較短的渦管。

為驗證上述假設，首先假設颱風的風場是對稱的，接著選擇颱風中心及其兩側各一個點所量到的風場與流場，來估算中心兩側渦度以及艾克曼抽汲造成之垂直位移量。而三個時間點分別為 25 公尺流場資料最後一筆的時間(2017 年 7 月 7 日 18 時 50 分)，令此點為 C 點；混合層最深時(2017 年 7 月 7 日 13 時 40 分)，令此點為 B 點，接著依 B、C 兩點直線距離往前反推，找到等距的時間點(2017 年 7 月 7 日 7 時)，令此點為 A 點。而艾克曼抽汲的影響，是利用 A、C 兩點來估算，此兩點的風應力大小分別為 1.36 Pa 與 1.67 Pa，將其投影至垂直颱風移動路徑之分

量後，可估算出在這樣風場的作用下，於此時段內的垂直位移量約 13 公尺，不足完全解釋 73 公尺的變化量。

估算位渦守恆的影響則是利用 A、B 兩點之間求得渦度為 $3.4 \times 10^{-6} \text{ 1/s}$ ；B、C 兩點之間求得渦度為 $-3.6 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$ ，由【10】式可得混合層厚度可由 102 公尺，淺化為 50 公尺，變化量為 52 公尺。這兩個要素中，位渦守恆貢獻的 52 公尺，遠大於艾克曼抽汲貢獻的 13 公尺，兩個要素加總後會使混合層厚度減少 65 公尺，只比實際值 73 公尺略小一些，會有這樣的結果是因為，估算時最終一點取的時間並非混合層最淺的時間點，代表估算之值代表的是淺化的過程，所以應當略小於實際值一些。

除此之外，在颱風逐漸遠離後，約 20 點時，表層海水有增溫的現象，但對應當時的熱通量，那個時間點並無太陽提供熱量，因此推估是因為颱風的風場所帶來的水平平流所致，從圖 5-7 的示意圖中可看到當颱風離開時，颱風外圍接觸到 NTU2 站時是吹西南風，在前面的文獻回顧中有提到在颱風路徑的右側會有較左側強烈的溫降，因此當吹西南風時，可能會帶來路徑左側溫降略少的海水到溫降較多的路徑右側，因此使浮標量到上層海洋有回溫的現象。

5.1.1 熱通量之年際變化

因為此研究的觀測區域位於西北太平洋，一個會受到聖嬰現象所影響的區域，且觀測期間有 1 年為聖嬰年，因此將 OAFlux 的產品和 ONI 歷年的資料做比較，試找出兩者之間的關係。而對 OAFlux 的產品亦做了 3 個月的滑動平均與移除歷年平均值後，在圖 5-8 當中可發現，在聖嬰發生期間，因西太平洋地區海溫較平時低，所以可感熱與潛熱通量會因為海氣溫差變大，使聖嬰年海洋獲得的可感熱與潛熱通量會較多；而反聖嬰年海洋獲得的可感熱與潛熱通量會較少。

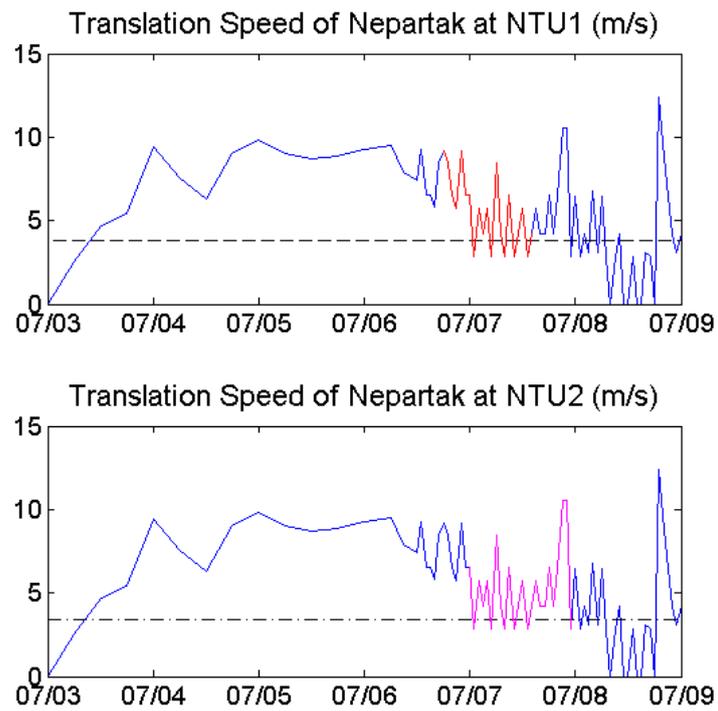


圖 5-1、尼伯特颱風之移動速度。紅色和紫紅色區域分別為為尼伯特之 7 級暴風半徑影響 NTU1 與 NTU2 站之時間；其中黑色虛線為在 NTU1(上)與 NTU2(下)站第一斜壓模相位速度。

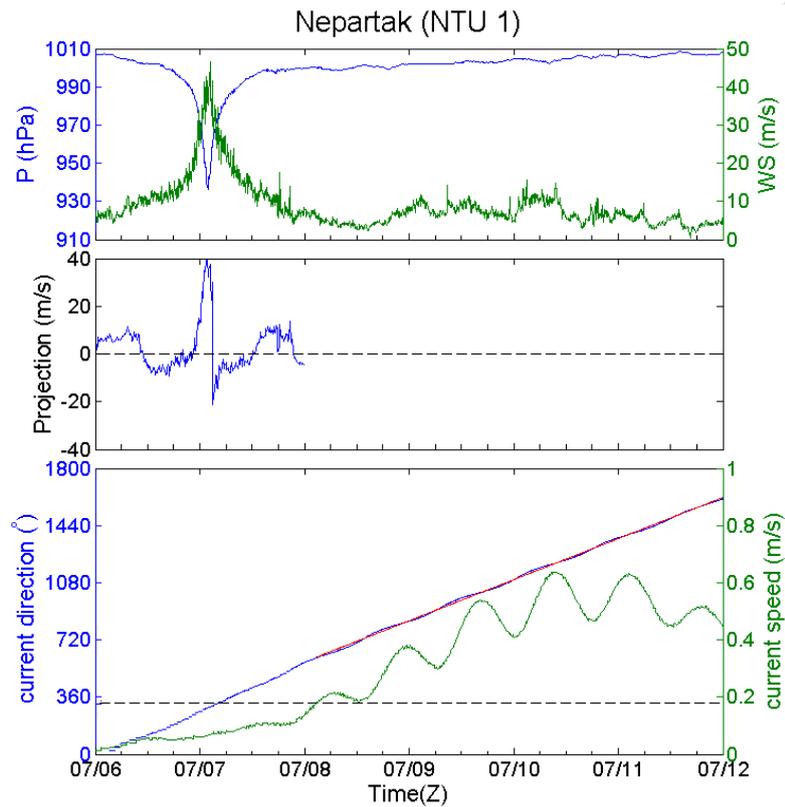


圖 5-2、尼伯特颱風經過 NTU1 站前後之時序圖。第一張中的藍線是氣壓；綠線是風速。第二張是 2.5 公尺的風速作用在 75 公尺海流方向上之分量。第三張藍線是流向；綠線是流速；虛線是定義做流向線性迴歸的閾值。

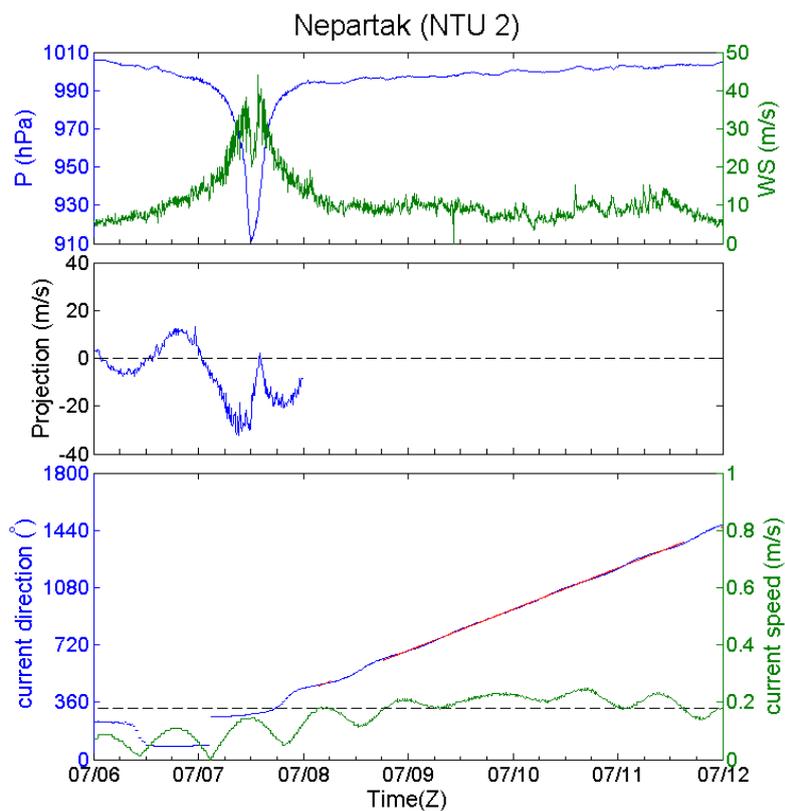


圖 5-3、尼伯特颱風經過 NTU2 站前後之時序圖。各圖代表的意思同圖 5-2。

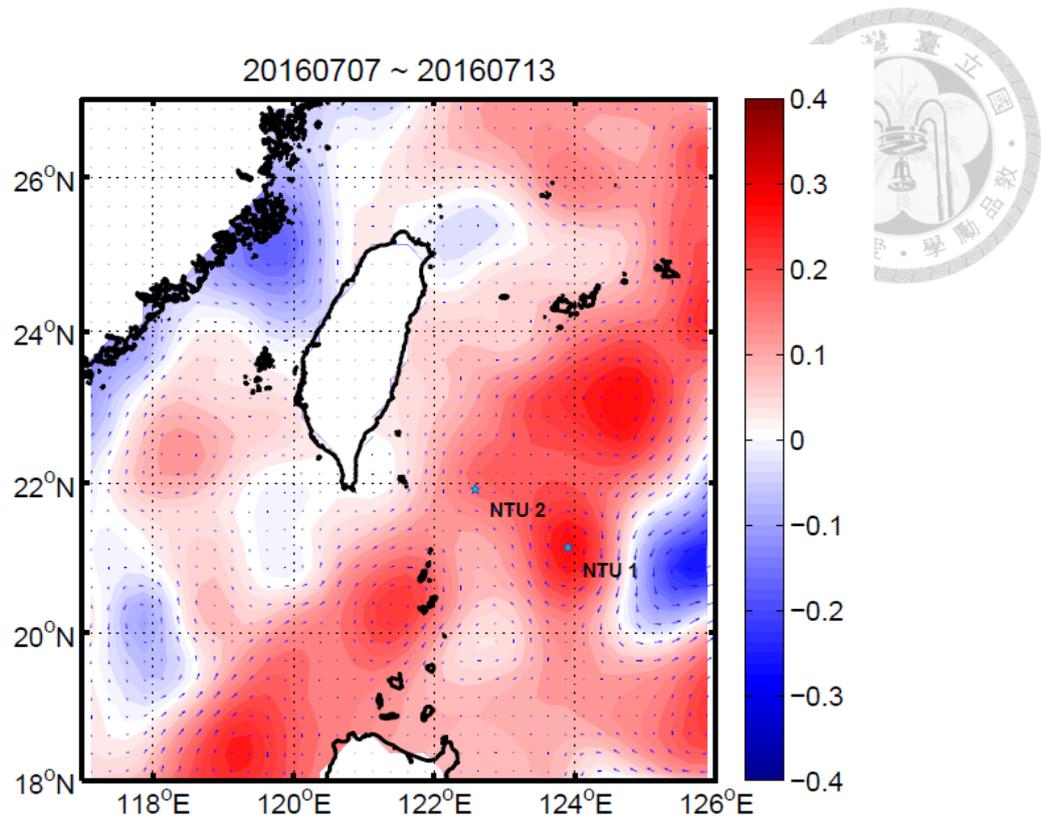


圖 5-4、尼伯特颱風影響期間之 SSHA 與海流分布圖。

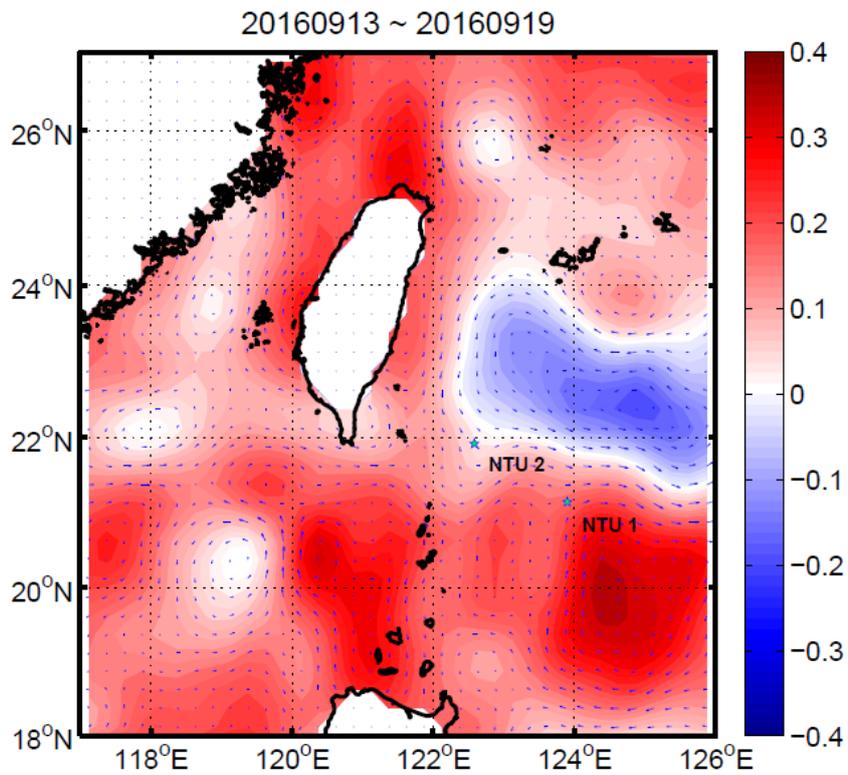


圖 5-5、莫蘭蒂與馬勒卡颱風影響期間之 SSHA 與海流分布圖。

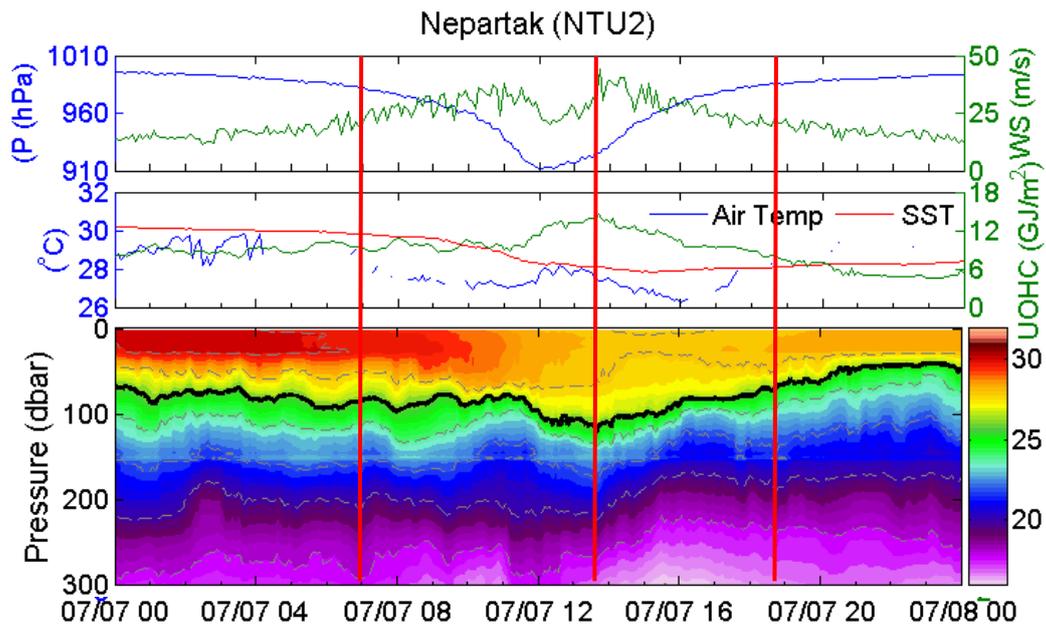


圖 5-6、尼伯特颱風靠近 NTU2 站時之海氣象變化，上圖為氣壓(藍)與風速(綠)圖；中圖為氣溫(藍)、海表溫(紅)與上層海洋熱含量；下圖為上層 300 公尺海溫剖面圖。圖中三條紅線為估算渦度與垂直速度時所選取的三個時間點。

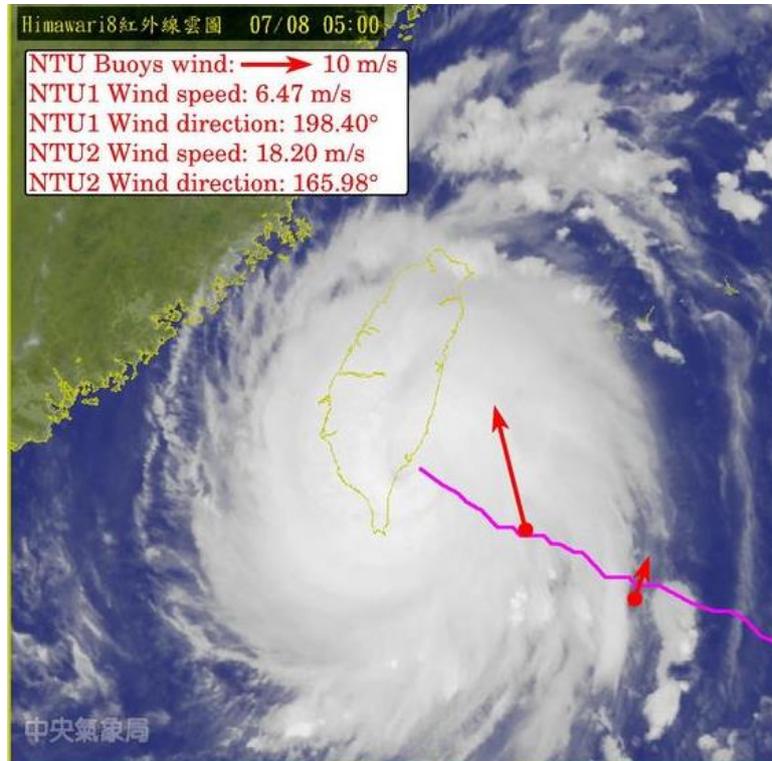


圖 5-7、颱風離開 NTU2 站時，之風向與溫度分布示意圖。圖中紫色線是尼伯特颱風之軌跡；紅色箭頭分別是 NTU1(右)與 NTU2(左)站之風速大小。背景底圖為中央氣象局紅外線雲圖。

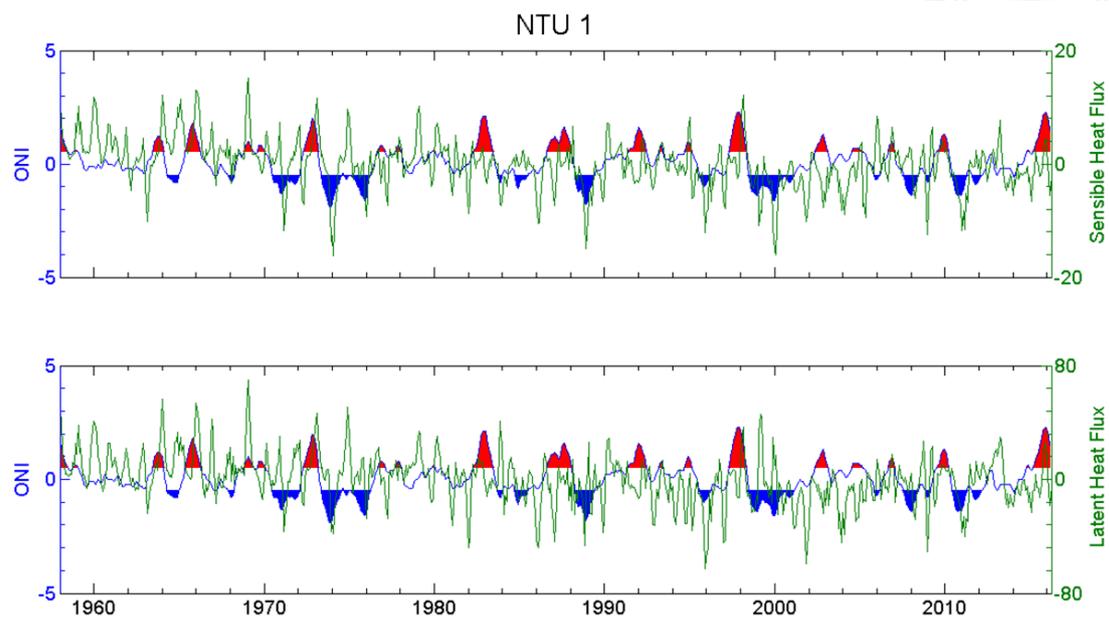


圖 5-8、可感熱通量(上)與潛熱通量(下)和 ONI 之對照時間序列圖。綠線為 OAF flux 產品；紅色區域為聖嬰年；藍色區域為反聖嬰年。

表 5-1、慣性運動特性彙整表

	Nepartak (NTU1)	Nepartak (NTU2)	Meranti and Malakas (NTU1)	Meranti and Malakas (NTU2)
颱風七級暴風半徑 (km)	202	202	222, 151	222, 151
當地慣性週期(hr) (所在緯度 °N)	33.185 (21.145)	32.011 (21.960)	33.185 (21.145)	32.011 (21.960)
迴歸得到之 慣性週期(hr) (對應緯度 °N)	33.374 (21.020)	33.335 (21.046)	33.984 (20.625)	32.198 (21.826)
Δf (s ⁻¹)	-2.9754e-07	-2.1653e-06	-1.2369e-06	-3.1751e-07
颱風眼相對浮標的方位	北	南	南	南
慣性運動開始時間 (相對颱風最靠近時)	前 1 day	前 0.375 day	前 1.75 day	前 2.25 day
慣性運動開始時之颱風位置	18.7 °N, 130.2 °E	21.4 °N, 123.9 °E	17.2 °N, 133.1 °E	17.6 °N, 131.7 °E
慣性運動開始時之颱風與浮標之距離(km)	712	150	1060	1070

5.2 結論

透過海氣象即時傳輸浮標在 2015 與 2016 年於台灣東南海域的觀測，收集到 9 個颱風的資料，且其中有兩個颱風的中心近乎通過浮標所在位置，此資料極為珍貴，在經過分析後，以下整理出幾點結論。

- 一、NCEP 之大氣模式資料在相對溼度、溫度及風速上皆有低估的現象。相對溼度相差約 0.9 %；氣溫相差約 1°C；風速則相差約 1.2 m/s。
- 二、將觀測資料估算之熱通量和 OAFlux 的產品做比較後，發現在非颱風影響期間，對潛熱通量與可感熱通量而言，觀測推估之值約為 OAFlux 的產品推估的 1~2 倍；而在颱風影響期間，對潛熱通量而言，觀測推估之值約為 OAFlux 的產品推估的 3~4 倍。
- 三、慣性運動在颱風逐漸靠近即開始形成。且颱風到達時間點會決定風向與流向之相對關係是建設性干涉還是破壞性干涉，進而使慣性流大小受之影響。此外，近慣性運動週期除了可能受到背景場或渦旋影響外，亦可能受到颱風尚在南邊時的影響，致使觀測所得之慣性週期略大於當地慣性週期。
- 四、在強烈颱風靠近時，強風造成的流切不穩定能使混合層之厚度在 5 小時內增加 100 公尺，且可能為了維持位渦守恆，使颱風來時所造成之厚的混合層，在颱風中心離開後隨即快速變薄。此外，在颱風中心通過之後，因水平平流帶來颱風左側之較暖的海水，使表層海洋有回溫現象。

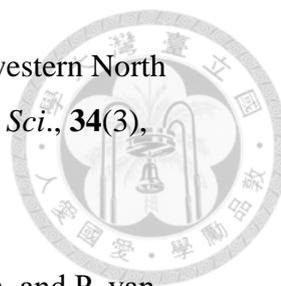
最後，期望日後能搭配數值模式之輔助，驗證本文討論部分提出之假設並進行更進一步的分析。



參考文獻



- Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO), 2017: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/global/msla-h.html>
- Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), 2017: <https://www.ncdc.noaa.gov/oisst/data-access>
- Anthes, R. A., 1982: Tropical cyclones: Their evolution, structure and effects, *Amer. Meteor. Soc.*, **41**(19), 1982 – 208.
- Berliand, M. E., and T. G. Berliand, 1952: Measurement of the effective radiation of the earth with varying cloud amounts (in Russian). *IZV. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geofiz.*, **1**, 64-78.
- Blanc, T. V., 1987: Accuracy of bulk-method-determined flux, stability, and sea surface roughness. *J. Geophys. Res.*, **92**, 3867-3876.
- Bradley, F., P. A. Coppin and J. S. Godfrey, 1991: Measurements of sensible and latent heat flux in the western equatorial Pacific ocean. *J. Geophys. Res.*, **96**, 3375-3389.
- Chang, H.-I, Y.-F. Ma, W.-H. Her, Y. J. Yang, M.-H. Chang, S. Jan, and C.-L. Wei (2017, Jun). The NTU Buoy for Typhoon Observation, Part 1: System. *Oceans 2017*, Aberdeen, UK.
- Chang, S.W. and R.A Anthes, 1978: Numerical simulations of the ocean's nonlinear baroclinic response to translating hurricanes, *J. Phys. Oceanogr.*, **8**, 468–480.
- Chia, H. -H. and C.-C. Wu, 2006: Air-sea turbulent fluxes of the western equatorial Pacific, *Atmos. Sci.*, **34**(2), 127-141.

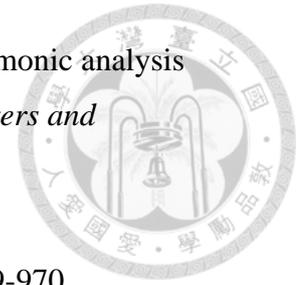


- Chiu, P. -G. and J.-Y. Yu, 2006: Examining typhoon activity in the western North Pacific: Difference between active and non-active years, *Atmos. Sci.*, **34**(3), 201-215.
- D'Asaro, E. A., C. C. Eriksen, M. D. Levine, P. Niiler, C. A. Paulson, and P. van Meurs , 1995: Upper-ocean inertial currents forced by a strong storm. Part I: Data and comparisons with linear theory, *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 2909–2936.
- Day, C. G., and F. Webster, 1965: Some current measurements in the Sargasso sea. *Deep-Sea Res.*, **12**, 805-814.
- Fairall, C., W. and S. E. Larsen, 1986: Inertial dissipation method and turbulent fluxes at the air ocean interface, *Bound. Layer Meteorol.*, **34**, 287-301.
- Fairall, C., 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.
- Fung, I. Y., D. E. Harrison, and A. A. Lacis, 1984: On the variability of the net longwave radiation at the ocean surface. *Rev. Geophys, Space Phys.*, **22**, 177-193.
- Gao, S., and L. S. Chiu, 2010: Surface latent heat flux and rainfall associated with rapidly intensifying tropical cyclones over the western North Pacific. *Int. J. Remote Sens.*, **31**, 4699-4710.
- Geisler, J.E., 1970: Linear theory of the response of a two-layer ocean to a moving hurricane, *Geophys. Fluid Dyn.*, **1**, 249-272.
- Gray, W. M., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, **96**(10), 669-700.
- Hayes, S. P., L. J. Mangum, J. Picaut, A. Sumi, and K. Takeuchi, 1991: TOGA TAO: A moored array for real-time measurements in the tropical Pacific Ocean. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **72**, 339–347.



- Hormann, V., L. R. Centurioni, L. Rainville, C. M. Lee, and L. J. Braasch, 2014: Response of upper ocean currents to Typhoon Fanapi, *Geophys. Res. Lett.*, 3995-4003.
- Huang, P., I-I Lin, C. Chou, and R.-H. Huang, 2015: Change in ocean subsurface environment to suppress tropical cyclone intensification under global warming. *Nat. Commun.*, **6**(7188), 1-9.
- Hwang, C., C.-R. Wu, and R. Kao, 2004: TOPEX/Poseidon observations of mesoscale eddies over the Subtropical Countercurrent: Kinematic characteristics of an anticyclonic eddy and a cyclonic eddy. *J. Geophys. Res.*, **109**(C08013), 1-17.
- Kunze, E., 1985: Near-Inertial wave propagation in geostrophic shear. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 544–565.
- Leipper, D., and D. Volgenau, 1972: Hurricane heat potential in the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, **2**, 218–224.
- Lin, I-I, C.-C. Wu, K., A. Emanuel, I-H. Lee, C.-R. Wu and I.-F. Pun, 2005: The interaction of supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 2635-2649.
- Liu, W. T., K. B. Katsaros, and J. A. Businger, 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.
- Ma, Z., J. Fei, X. Huang, and X. Cheng, 2014: Contributions of surface sensible heat fluxes to tropical cyclone. Part I: Evolution of tropical cyclone intensity and structure. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 120-140.
- National Centers for Environmental Prediction (NCEP) ,2017: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.html>
- Objectively Analyzed air-sea Fluxes (OAFlux) ,2017: <http://oaflux.whoi.edu/index.html>

Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz, 2002: Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE., *Computers and Geosciences*, **28**, 929-937.



Payne, R. E., 1972: Albedo of the sea surface. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 959-970.

Pollard, R. T., 1970: Surface waves with rotation: An exact solution. *J. Geophys. Res.*, **75**, 5895-5898.

Price, J. F., 1981: Upper ocean response to a hurricane. *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 153–175.

Price, J. F., R. A. Weller, and R. Pinkel, 1986: Diurnal cycling: observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing. *J. Geophys. Res.*, **91**, 8411-8427.

Pun, I.F., Y.-T. Chang, I.-I. Lin, T.Y. Tang, and R.-C. Lien, 2011: Typhoon-ocean interaction in the western North Pacific: Part 2. *Oceanography*, **24**(4), 32–41.

Qiu, B, 1999: Seasonal eddy field modulation of the North Pacific subtropical countercurrent: TOPEX/Poseidon observation and theory. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 2471-2486.

Reed, R., 1977: On estimating insolation over the ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **7**, 82-485.

Rohde, R. A., (2006, November 2): Historic tropical cyclone tracks. Retrieved June 28, 2017, from <https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=7079>

Schlesinger, M. E., and J. F. B. Mitchell, 1987: Climate model simulations of the equilibrium climate response to increased carbon dioxide. *Rev. Geophys.*, **25**, 760-798.

Shay, L. K., A. J. Mariano, S. D. Jacob, and E. H. Ryan, 1998: Mean and near-inertial current response to Hurricane Gilbert, *J. Phys. Oceanogr.*, **28**, 858–889.

Zeng, X., M. Zhao, and R. E. Dickinson, 1998: Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data. *J. Climate*, **11**, 2628-2644.



楊穎堅, 張宏毅, 何文華, 馬玉芳, 邱協棟, 謝佳穎, 李文慧, 謝祥志, 連政佳, 鄭欣雅, 魏慶琳 (2016a)。海氣象即時傳輸浮標之精進與海上測試。105 年天氣分析與預報研討會, 臺北。

楊穎堅, 張宏毅, 何文華, 邱協棟, 謝佳穎, 李文慧, 馬玉芳, 謝祥志, 連政佳, 洪瑋廷 (2016b)。新一代海氣象即時傳輸浮標對颱風觀測之應用。第十八屆水下技術研討會暨國科會成果發表會, 台南。

楊穎堅, 張宏毅, 張明輝, 詹森, 邱銘達, 何文華, 邱協棟, 李文慧, 馬玉芳, 謝祥志, 連政佳, 洪瑋廷, 魏慶琳 (2015)。海氣象即時傳輸浮標發展及其對颱風觀測之應用。104 年天氣分析與預報研討會, 臺北。