

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



探討浮標觀測颱風中心附近海域的風、波浪與海表熱通量變化

Study of Metocean Buoys Observed Wind, Wave, and
Surface Heat Flux Variations Within Typhoons

蕭宇呈

Yu-Cheng Hsiao

指導教授：楊穎堅 博士

Advisors: Yiing-Jang Yang, Ph.D.

中華民國 111 年 9 月

Sep 2022

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

探討浮標觀測颱風中心附近海域的風、波浪與海表熱通量變化

Study of Metocean Buoys Observed Wind, Wave, and Surface Heat Flux
Variations Within Typhoons

本論文係蕭宇呈君（R08241107）在國立臺灣大學海洋研究所完成之碩士學位論文，於民國 111 年 08 月 23 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Institute of Oceanography on 23 Aug, 2022 have examined a Master's thesis entitled above presented by Yu-Cheng, Hsiao (R08241107) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

楊顯堅

（指導教授 Advisor）

2022.08.23

滕春慈

詹森

謝志豪

系主任/所長 Director:

致謝



想不到總有一天，我居然能坐在這寫著致謝，現在回想起來，總覺得三年的碩士生活真的很不可思議，而這趟奇妙旅程也終於走到了終點。

真的很感謝楊老師這三年來的指導，對於什麼都不會的我依然盡心盡力教導，在討論時也給予我很多研究上的啟發；感謝華哥與貴儀中心的技術員們，在出海作業的時候教了我很多關於現場觀測的作業流程，若沒有你們的幫助，就沒有如此珍貴的實測資料能讓我分析，這本論文肯定也無法順利誕生，真心感謝；也謝謝口委們的寶貴意見，讓這本論文能夠更完整、更有價值。感謝這三年來在 219 遇到的每一個人，回想起剛進來時的菜鳥樣，幸好有凱富、致廷學長帶領我進入狀況，在實驗室的生活上給予我不少的幫助。謝謝慧慈，如果沒有你的準時報帳，我可能就沒錢吃飯了。感謝芊奕，我的優秀老戰友，總是看著你的背影在追逐你，但能與你一起共事真的是我的榮幸，也祝福妳未來能夠做自己想做的事情。感謝維常、欣怡和千霈的加入，身為海洋系前輩的我確實無法給你們太多研究上的幫助，畢竟你們都十分優秀，放心將 219 交給你們一定是個正確的選擇，很期待你們日後活躍的表現。另外，還要感謝我碩士生涯中不離不棄的高中與大學同學們，謝謝冠廷和今珮，這三年中總是一起互相扶持，偶爾喝酒玩遊戲到天亮，在低潮中不斷鼓勵彼此，沒有你們的陪伴我絕對走不到這裡的。也感謝海大幫和東山幫的各位都會不定時來陪我吃飯關心我，多次的聚會讓我能紓解研究上卡關的壓力，也讓我回想起，原來自己還有朋友。

特別感謝我的父母，培養我到研究所畢業，賦予我日後在職場上有很好的地基，我會繼續努力成為你們的驕傲，我愛你們。最後，不免俗的感謝一下自己，這三年來所有的酸甜苦辣都是自己親身體會，而這份碩士文憑也絕非靠捷徑獲得，途中有好幾次都想放棄，最後依舊頂住壓力，一步一步走到現在，真的很感謝之前那麼拼命、沒有放棄的自己。謝謝你，台大人，我的超人。

中文摘要



西北太平洋為颱風產生的熱點地區，每年有超過 5 個颱風登陸東亞沿岸地區，對其造成嚴重破壞。而在颱風的生命週期中，所經之地的大氣與海表環境皆有大幅度變化，若能連續觀察極端天氣下的海氣象變化，對於日後改善颱風預報將是一大幫助。

本研究利用國立臺灣大學海洋研究所於鵝鑾鼻東南方海域約 375 與 175 公里處佈放的海氣象即時傳輸浮標所收集到的氣象、波浪與海表溫資料，探討 2018 至 2021 年間共 8 個颱風中所觀測到的風浪變化，並搭配 Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment v3.6 演算法套件進行海表熱通量估計，並與衛星遙測產品之資料討論颱風期間的潛熱通量與可感熱通量變化。而 8 個颱風名稱分別為 2018 年的山竹(Mangkhut)；2019 年的丹娜絲(Danas)、利奇馬(Lekima)、白鹿(Bailu)、玲玲(Lingling)、米塔(Mitag)；2020 年的閃電(Atsani)；2021 年的璨樹(Chanthu)。

經過分析後的結果發現，在颱風影響期間的風浪變化與浮標和颱風中心的相對位置變化有較高的相關性，其中包含浮標位於颱風中心之左右側以及最近相對距離，除了會影響到浪高的成長幅度，風向與浪向開始轉向的時間差異也有所不同，位於颱風中心右側，風向與浪向開始轉向的時間差約為 0 至 3 小時，而位於颱風中心左側，風向與浪向開始轉向的時間差約為 6 至 9 小時。另外，海表熱通量在颱風影響期間主要受到氣溫與海表溫差所影響，而在一些個案中可看到海表溫降是受到大氣從海洋獲取能量所致，不過降溫的幅度也與颱風本身結構以及大氣比濕有關。除此之外，與衛星資料推估的潛熱通量與可感熱通量進行比對後，可了解到因資料變化的掌握度與時間間隔的不同，觀測資料更能準確觀察短時間尺度內的趨勢變化。

關鍵詞：海氣象浮標、颱風、風浪變化、海表熱通量

ABSTRACT



The Western North Pacific Ocean is a hotspot area for generating tropical cyclones, also known as typhoons. Annually, over five typhoons make landfall on the coastal regions of East Asia, which causes serious damage. To better understand the variations of air-sea change under those extreme weather conditions, this study uses the *in-situ* observation data, including meteorological, wave, and sea surface temperature collected from two air/sea-observing buoys from the southernmost of Taiwan, about 375 km and 175 km, respectively, deployed by the Institute of Oceanography of National Taiwan University (NTU). From 2018 to 2021, NTU buoys recorded eight typhoons: Mangkhut, Danas, Lekima, Bailu, Lingling, Mitag, Atsani, and Chanthu. In addition, the Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment algorithm v3.6 is used to estimate the latent and sensible heat flux, and the variation of heat flux is discussed with the satellite product.

The meteorological and wave data showed that the wind and wave variations during typhoons could be related to the relative position between buoys and the typhoon center. Suppose the buoy is on the right-hand side of the typhoon center. In that case, the time lag between the wind and wave direction starting to turn is about 0 to 3 hours, while on the left-hand side of the typhoon center, the time lag between the wind and wave direction starting to turn is about 6 to 9 hours. Those effects would also affect the growth rate of the significant wave height. Additionally, the trend of the surface heat fluxes in extreme weather is mainly affected by the air and sea surface temperature difference. In some cases, it can be seen that the heat flux change causes the sea surface temperature to cool, but the magnitude of cooling is also related to the typhoon's structure and the moisture in the air. Besides, by comparing the heat flux estimated by satellite data, the measured data is more suitable for observing the trend on a short time scale than the satellite data.

Keywords: Metocean buoy, Typhoon, Wind and wave variation, Surface heat flux

目錄



口試委員會審定書.....	I
致謝.....	II
中文摘要.....	III
ABSTRACT	IV
目錄.....	V
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XIII
符號表.....	XIV
第一章 緒論.....	1
1.1、研究背景回顧.....	1
1.2、研究動機與目的.....	2
第二章 資料介紹.....	3
2.1、海氣象浮標資料介紹.....	3
2.2、颱風資訊來源.....	15
2.3、經過浮標之颱風介紹.....	17
2.3.1、2018 年.....	17
2.3.2、2019 年.....	18
2.3.3、2020 年.....	21
2.3.4、2021 年.....	22
2.4、熱通量資料.....	23
第三章 分析方法介紹.....	31

3.1、颱風參考座標軸之正規化.....	31
3.2、海表熱通量分析.....	34
第四章 颱風個案探討.....	39
4.1、颱風影響期間之風浪變化.....	39
4.1.1、2018 年.....	40
4.1.1.1、山竹颱風.....	40
4.1.2、2019 年.....	46
4.1.2.1、丹娜絲颱風.....	46
4.1.2.2、利奇馬颱風.....	52
4.1.2.3、白鹿颱風.....	58
4.1.2.4、玲玲颱風.....	64
4.1.2.5、米塔颱風.....	67
4.1.3、2020 年.....	70
4.1.3.1、閃電颱風.....	70
4.1.4、2021 年.....	76
4.1.4.1、璨樹颱風.....	76
4.2、颱風影響期間之海表熱通量變化.....	82
4.2.1、2018 年.....	83
4.2.1.1、山竹颱風 (NTU1).....	83
4.2.1.2、山竹颱風 (NTU2).....	84
4.2.2、2019 年.....	89
4.2.2.1、丹娜絲颱風 (NTU1).....	89
4.2.2.2、丹娜絲颱風 (NTU2).....	90
4.2.2.3、利奇馬颱風 (NTU1).....	95
4.2.2.4、利奇馬颱風 (NTU2).....	96

4.2.2.5、白鹿颱風 (NTU1).....	101
4.2.2.6、白鹿颱風 (NTU2).....	102
4.2.2.7、玲玲颱風 (NTU1).....	107
4.2.2.8、米塔颱風 (NTU2).....	110
4.2.3、2020 年.....	113
4.2.3.1、閃電颱風 (NTU1).....	113
4.2.3.2、閃電颱風 (NTU2).....	114
4.2.4、2021 年.....	119
4.2.4.1、璨樹颱風 (NTU1).....	119
4.2.4.2、璨樹颱風 (NTU2).....	120
4.3、估算海表熱通量差異(實測資料與衛星產品).....	125
第五章 討論與總結.....	135
5.1、颱風期間風浪變化.....	135
5.2、颱風期間海表熱通量變化.....	142
5.3、總結.....	147
參考文獻.....	148

圖目錄



圖 2-1-1、海氣象即時傳輸浮標示意圖	4
圖 2-1-2、2018 年 NTU1 站的海氣象資料之時間序列圖	5
圖 2-1-3、2018 年 NTU2 站的海氣象資料之時間序列圖	6
圖 2-1-4、2019 年 NTU1 站的海氣象資料之時間序列圖	7
圖 2-1-5、2019 年 NTU1 站的海氣象資料之時間序列圖	8
圖 2-1-6、2020 年 NTU1 站的海氣象資料之時間序列圖	9
圖 2-1-7、2020 年 NTU2 站的海氣象資料之時間序列圖	10
圖 2-1-8、2021 年 NTU1 站的海氣象資料之時間序列圖	11
圖 2-1-9、2021 年 NTU2 站的海氣象資料之時間序列圖	12
圖 2-3-1、2018 年山竹颱風的路徑以及八級暴風圈半徑示意圖	24
圖 2-3-2、2019 年丹娜絲颱風的路徑以及八級暴風圈半徑示意圖	25
圖 2-3-3、2019 年利奇馬颱風的路徑以及八級暴風圈半徑示意圖	25
圖 2-3-4、2019 年白鹿颱風的路徑以及八級暴風圈半徑示意圖	26
圖 2-3-5、2019 年玲玲颱風的路徑以及八級暴風圈半徑示意圖	26
圖 2-3-6、2019 年米塔颱風的路徑以及八級暴風圈半徑示意圖	27
圖 2-3-7、2020 年閃電颱風的路徑以及八級暴風圈半徑示意圖	27
圖 2-3-8、2021 年璨樹颱風的路徑以及八級暴風圈半徑示意圖	28
圖 2-3-9、2021 年圓規颱風的路徑以及八級暴風圈半徑示意圖	28
圖 3-1-1、2019 年玲玲颱風期間 NTU1 站與颱風中心之相對位置變化圖(以北方為正上方)	32
圖 3-1-2、2019 年玲玲颱風期間 NTU1 站與颱風中心之相對位置變化圖(以颱風前進方向為正上方).....	33
圖 3-2-1、2019 年 NTU1 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖	38

圖 3-2-2、2019 年玲玲颱風影響期間之潛熱通量與可感熱通量時序列圖	38
圖 4-1-1、2018 年山竹颱風期間 NTU1 站之風浪時空變化圖	42
圖 4-1-2、2018 年山竹颱風影響期間 NTU1 站的風浪時序列圖	43
圖 4-1-3、2018 年山竹颱風期間 NTU2 站之風浪時空變化圖	44
圖 4-1-4、2018 年山竹颱風影響期間 NTU2 站的風浪時序列圖	45
圖 4-1-5、2019 年丹娜絲颱風期間 NTU1 站之風浪時空變化圖	48
圖 4-1-6、2019 年丹娜絲颱風影響期間 NTU1 站的風浪時序列圖	49
圖 4-1-7、2019 年丹娜絲颱風期間 NTU2 站之風浪時空變化圖	50
圖 4-1-8、2019 年丹娜絲颱風影響期間 NTU2 站的風浪變化時序列圖	51
圖 4-1-9、2019 年利奇馬颱風期間 NTU1 站之風浪時空變化圖	54
圖 4-1-10、2019 年利奇馬颱風影響期間 NTU1 站的風浪變化時序列圖	55
圖 4-1-11、2019 年利奇馬颱風期間 NTU2 站之風浪時空變化圖	56
圖 4-1-12、2019 年利奇馬颱風影響期間 NTU2 站的風浪變化時序列圖	57
圖 4-1-13、2019 年白鹿颱風期間 NTU1 站之風浪時空變化圖	60
圖 4-1-14、2019 年白鹿颱風影響期間 NTU1 站的風浪變化時序列圖	61
圖 4-1-15、2019 年白鹿颱風期間 NTU2 站之風浪時空變化圖	62
圖 4-1-16、2019 年白鹿颱風影響期間 NTU2 站的風浪變化時序列圖	63
圖 4-1-17、2019 年玲玲颱風期間 NTU1 站之風浪時空變化圖	65
圖 4-1-18、2019 年玲玲颱風影響期間 NTU1 站的風浪變化時序列圖	66
圖 4-1-19、2019 年米塔颱風期間 NTU2 站之風浪時空變化圖	68
圖 4-1-20、2019 年米塔颱風影響期間 NTU2 站的風浪變化時序列圖	69
圖 4-1-21、2020 年閃電颱風期間 NTU1 站之風浪時空變化圖	72
圖 4-1-22、2020 年閃電颱風影響期間 NTU1 站的風浪變化時序列圖	73
圖 4-1-23、2020 年閃電颱風期間 NTU2 站之風浪時空變化圖	74
圖 4-1-24、2020 年閃電颱風影響期間 NTU2 站的風浪變化時序列圖	75

圖 4-1-25、2021 年璨樹颱風期間 NTU1 站之風浪時空變化圖	78
圖 4-1-26、2021 年璨樹颱風影響期間 NTU1 站的風浪變化時序列圖	79
圖 4-1-27、2021 年璨樹颱風期間 NTU2 站之風浪時空變化圖	80
圖 4-1-28、2021 年璨樹颱風影響期間 NTU2 站的風浪變化時序列圖	81
圖 4-2-1、2018 年山竹颱風期間 NTU1 站之海表熱通量時空變化圖	85
圖 4-2-2、2018 年山竹颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象資 料時序列圖	86
圖 4-2-3、2018 年山竹颱風期間 NTU2 站之海表熱通量時空變化圖	87
圖 4-2-4、2018 年山竹颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象資 料時序列圖	88
圖 4-2-5、2019 年丹娜絲颱風期間 NTU1 站之海表熱通量時空變化圖	91
圖 4-2-6、2019 年丹娜絲颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	92
圖 4-2-7、2019 年丹娜絲颱風期間 NTU2 站之海表熱通量時空變化圖	93
圖 4-2-8、2019 年丹娜絲颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	94
圖 4-2-9、2019 年利奇馬颱風期間 NTU1 站之海表熱通量時空變化圖	97
圖 4-2-10、2019 年利奇馬颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣 象資料時序列圖	98
圖 4-2-11、2019 年利奇馬颱風期間 NTU2 站之海表熱通量時空變化圖	99
圖 4-2-12、2019 年利奇馬颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣 象資料時序列圖	100
圖 4-2-13、2019 年白鹿颱風期間 NTU1 站之海表熱通量時空變化圖	103
圖 4-2-14、2019 年白鹿颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	104

圖 4-2-15、2019 年白鹿颱風期間 NTU2 站之海表熱通量時空變化圖	105
圖 4-2-16、2019 年白鹿颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	106
圖 4-2-17、2019 年玲玲颱風期間 NTU1 站之海表熱通量時空變化圖	108
圖 4-2-18、2019 年玲玲颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	109
圖 4-2-19、2019 年米塔颱風期間 NTU2 站之海表熱通量時空變化圖	111
圖 4-2-20、2019 年米塔颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	112
圖 4-2-21、2020 年閃電颱風期間 NTU1 站之海表熱通量時空變化圖	115
圖 4-2-22、2020 年閃電颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	116
圖 4-2-23、2020 年閃電颱風期間 NTU2 站之海表熱通量時空變化圖	117
圖 4-2-24、2020 年閃電颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	118
圖 4-2-25、2021 年璨樹颱風期間 NTU2 站之海表熱通量時空變化圖	121
圖 4-2-26、2021 年璨樹颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	122
圖 4-2-27、2021 年璨樹颱風期間 NTU2 站之海表熱通量時空變化圖	123
圖 4-2-28、2021 年璨樹颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量、可感熱通量與海氣象 資料時序列圖	124
圖 4-3-1、2018 年 NTU1 站與 OAFlux 之潛熱通量與可感熱通量時序列圖	127
圖 4-3-2、2018 年 NTU2 站與 OAFLUX 之潛熱通量與可感熱通量時序列圖	128
圖 4-3-3、2019 年 NTU1 站與 OAFLUX 之潛熱通量與可感熱通量時序列圖	129
圖 4-3-4、2019 年 NTU2 站與 OAFLUX 之潛熱通量與可感熱通量時序列圖	130

圖 4-3-5、2020 年 NTU1 站與 OAFLUX 之潛熱通量與可感熱通量時序列圖.....	131
圖 4-3-6、2020 年 NTU2 站與 OAFLUX 之潛熱通量與可感熱通量時序列圖.....	132
圖 4-3-7、2019 年白鹿颱風影響期間 NTU2 站與 OAFLUX 之潛熱通量與可感熱通量 時序列圖.....	133
圖 4-3-8、2019 年玲玲颱風影響期間 NTU1 站與 OAFLUX 之潛熱通量與可感熱通量 時序列圖.....	134
圖 5-1-1、為 2018 至 2021 年各颱風個案之風速變化圖.....	138
圖 5-1-2、為 2018 至 2021 年各颱風個案之示性波高變化圖	139
圖 5-1-3、為 2018 至 2021 年各颱風個案之主波方向與風向角度差值變化圖	140
圖 5-2-1、為 2018 至 2021 年各颱風個案之潛熱通量變化圖.....	144
圖 5-2-2、為 2018 至 2021 年各颱風個案之可感熱通量變化圖	145

表目錄



表 2-1-1、2018 年 NTU1 站與 NTU2 站資料整理表.....	13
表 2-1-2、2019 年 NTU1 站與 NTU2 站資料整理表.....	13
表 2-1-3、2020 年 NTU1 站與 NTU2 站資料整理表.....	14
表 2-1-4、2021 年 NTU1 站與 NTU2 站資料整理表.....	14
表 2-2-1、颱風強度分級對照表.....	16
表 2-3-1、2018 至 2021 年間 8 個颱風最靠近 NTU1 站時的資訊.....	29
表 2-3-2、2018 至 2021 年間 7 個颱風最靠近 NTU2 站時的資訊.....	30
表 5-1-1、2018 至 2021 年間各颱風個案之風浪變化資訊彙整表.....	141
表 5-2-1、2018 至 2021 年間個颱風個案的海表熱通量變化特性彙整表.....	146

符號表



C_D	動量傳輸係數	cp	波齡
C_{pa}	空氣比熱	em	大氣蒸氣壓
es	海面水蒸氣壓	g	重力
H_L	潛熱通量	H_{sen}	可感熱通量
H_s	示性波高	κ	von Kármán 常數
L_e	蒸發潛熱	P	海表氣壓
q_a	大氣比濕	q_s	海洋比濕
R_{34}	34 節風暴風半徑	RH	相對濕度
S	海水鹽度	SVP	飽和蒸氣壓
T	氣溫	T_s	海表溫
U_{10}	距地 10 公尺之風速	u_*	風的摩擦速度
ν	運動黏度	z	距地高度
z_o	表面粗糙度	z_{owave}	考慮波浪效應之表面粗糙度
α	Charnock 係數	α_s	考慮波浪效應之 Charnock 係數
ρ	空氣密度	θ_a	空氣位溫
R_{min}	以 R_{34} 正規化之最近距離		

第一章 緒論




1.1、研究背景回顧

颱風是發生在西北太平洋的中尺度天氣現象，通常帶來豐沛的降水外，也因高風速的關係造成東亞沿岸地區極大的破壞。

颱風的風應力作用會引起海表的波浪成長，Price (1981) 提到當颱風經過海面時，位於颱風路徑右側區域會因颱風移動造成當地風向轉變與當地慣性流旋轉方向和速度相似，會讓慣性流加速，進而產生建設性干涉；而位於颱風路徑左側區域的當地風向轉變與當地慣性流旋轉方向和速度相反，會讓慣性流成長受限，產生破壞性干涉，使颱風路徑右側的海表溫下降與近慣性運動較颱風路徑左側明顯。

在前人觀測資料的波浪分析中，Wright *et al.* (2001) 利用探測飛機的雷達掃描測高儀觀察 1998 年邦妮(Bonnie)颱風作用於海面的波浪地形，經過多趟飛行探測分析後發現，波高最高區域是位於颱風的右前方，最低則是出現在颱風的左後方；並利用定向波譜分析確認波場的各分量特徵去得知主波方向，且確認主波方向為朝向波浪傳播的方向，也發現邦妮颱風結構上半部的主波場能量最大，而其結構的第四象限區域波場能量則延伸到第三波場。Potter *et al.* (2015) 則利用 Impact of Typhoons on the Ocean in the Pacific 實驗計劃中的觀測資料分析 2010 年佳芭(Chaba) 颱風影響期間的風向、風應力方向與主波方向之變化，發現在颱風接近期間為雙峰波場，其中雙峰能量的主導項分別為風與湧浪，而風應力項的方向因受湧浪的影響使其偏離風向約 20° ；在颱風作用期間，風速與浪高迅速活躍，主波方向也受強風影響轉向；颱風經過後為單峰波場，在強風作用下使波浪能集中在同一區，而風應力方向與主波方向在兩天內呈現高正相關。



在颱風影響期間，由於受到風應力引起的上層海洋混合、湧升流、水平流、潛熱和可感熱通量作用，海洋溫度通常會有降溫的情形。其中上層海洋混合與湧升流是其主要的降溫機制(D'Asaro *et al.*, 2007；Yang *et al.*, 2019)，海表熱通量則為次要作用(Elsberry *et al.*, 1976；Price *et al.*, 1981)，而海表降溫較明顯區域通常位於颱風的路徑右側。另外，颱風強度較強、颱風移動速度較緩慢與混合層較淺時，海洋降溫的情形會更明顯。

1.2、研究動機與目的

先前研究指出位於颱風左側與右側的區域，浪高變化與波浪能之分佈皆有明顯的差距，但較多為在高空使用雷達掃描波浪狀況，較少直接於海上佈放儀器進行觀測，可能對於波浪的分析存在偏差；另外，在海表降溫機制中，許多研究皆提出詳細的物理機制解釋，其主要受到上層海洋混合或湧升流的影響，而通常在颱風結構的右側會出現冷尾跡(cold wake) (D'Asaro *et al.*, 2007；Mrvaljevic *et al.*, 2013)，不過卻鮮少文章探討因海表熱通量變化而影響到海表溫的降溫。國立臺灣大學海洋研究所於臺灣東南方海域佈放之海氣象浮標掛載完整的氣象、波浪、海表溫儀器，記錄 2018 至 2021 年間颱風生成旺季的海氣象資料，並於期間觀測到共 8 個颱風，分別為 2018 年的山竹(Mangkhet)；2019 年的丹娜絲(Danas)、利奇馬(Lekima)、白鹿(Bailu)、玲玲(Lingling)、米塔(Mitag)；2020 年的閃電(Atsani)；2021 年的璨樹(Chanthu)，而上述各颱風在結構、移動速度、強度、與浮標相對位置上的時空變化上各有不同特性，加上擁有短時間間隔的連續觀測資料，對於分析或觀察颱風期間的風浪與海表熱通量變化是個很好的機會，因此本研究想藉由這四年中觀測到的珍貴資料來探討在不同的颱風特性下風浪與海表熱通量的變化為何，並試著將其統整與歸納。

全文共分成五章，第二章將介紹本研究所使用的各式資料；第三章介紹分析資料的方法；第四章為呈現與說明分析後的結果；最後第五章為討論與總結。

第二章 資料介紹



本研究為探討颱風影響期間的風浪以及海表熱通量之時序列特性變化，主要使用佈放於西北太平洋颱風路徑熱區的兩組海氣象即時觀測浮標於 2018 至 2021 年間共四年度的觀測資料。而在浮標佈放期間的颱風相關資訊主要參考美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)所提供的全球颱風最佳路徑分析資料(International Best Track Archive for Climate Stewardship, IBTrACS)以輔助浮標資料進行相關分析，採用的相關資料如下。

2.1、海氣象浮標資料介紹

國立臺灣大學海洋研究所自 2015 年起每年於台灣東南方外海約 375 公里及 175 公里佈放兩組海氣象浮標，分別為 NTU1 站及 NTU2 站，同時進行大氣與海洋剖面的觀測。本研究採用其氣象資料，包含風速、風向、短波輻射通量、氣溫、氣壓、相對濕度等；海洋資料則採用了水下一公尺溫度計之溫度資料；另外，自 2017 年起，兩組浮標皆加裝了波浪儀，提供了主波方向、示性波高、主波週期等波浪資訊，不過 2017 年的主波方向資料為主導波方向(Dominant Wave Direction)，而 2018 至 2021 年的主波方向資料為頻域波方向(Frequency Domain Wave Direction)，為保持資料統一性，則分析 2018 至 2021 年共 4 個年年度的資料。擁有了長時間觀測與高時間解析度兩大特點，對於短時間尺度能提供更精密的連續資料，以利於分析颱風影響期間之物理現象。在圖 2-1-1 中展示了以 2021 年為例的浮標示意圖，可了解浮標外觀與各儀器的位置。

綜觀 2018 至 2021 年的各式資料，除 2020 年 NTU1 站於 11 月 13 日因鋼纜斷裂漂離原位置外，其他年度之兩站浮標於回收前皆完整記錄佈放期間該區域的氣

象、波浪與海表溫資料。NTU1 與 NTU2 站於 2018 至 2021 年之氣象、波浪及海表溫資料時序列圖繪製於圖 2-1-2 至圖 2-1-9。

氣象與海表溫資料的採樣頻率為 3 分鐘或 6 分鐘一筆，波浪資料採樣頻率為 60 分鐘一筆，而波浪資料中除主波方向保持原採樣頻率外，示性波高與主波週期將會進行線性內插，使其資料筆數與氣象和海表溫資料一致；另為保持資料穩定與時間區間統一，將會忽略處於佈放與回收中的資料並篩選該時間軸，令同一年度兩站資料的頭尾時間一致，使其時間序列更具統一性，歷年的浮標各式資料之資訊整理請見表 2-1-1 至表 2-1-4。

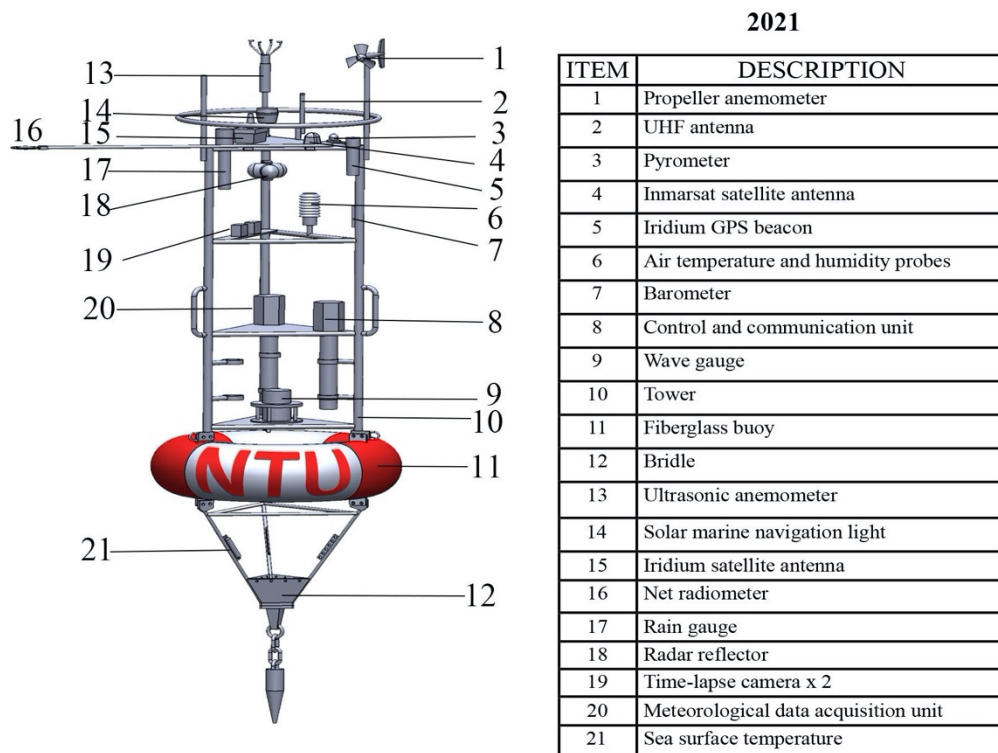


圖 2-1-1、海氣象即時傳輸浮標示意圖；左圖為浮標主體結構圖；右表為搭載於浮標主體上之儀器探針清單。[圖取自臺大海研所海氣象即時傳輸浮標網]



NTU1 in 2018

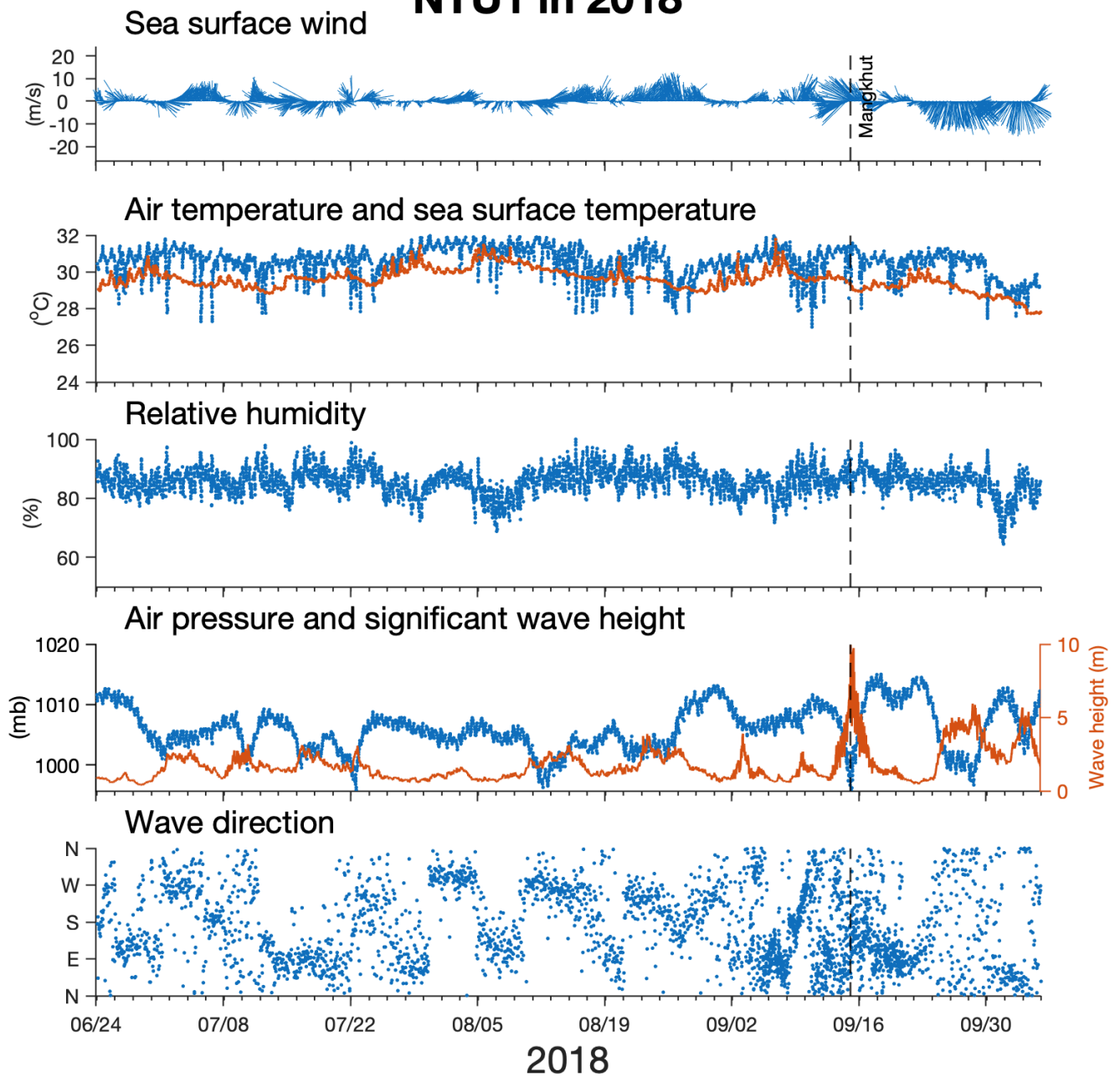


圖 2-1-2、由上而下分別為 2018 年 NTU1 站的海表面風矢、氣溫與海表溫、相對濕度、氣壓、示性波高(橘線)與浪向之時間序列圖；其中，溫度圖中藍線為氣溫、橘線為海表溫；虛線則為觀測到之個案颱風中心最靠近浮標的時間點。



NTU2 in 2018

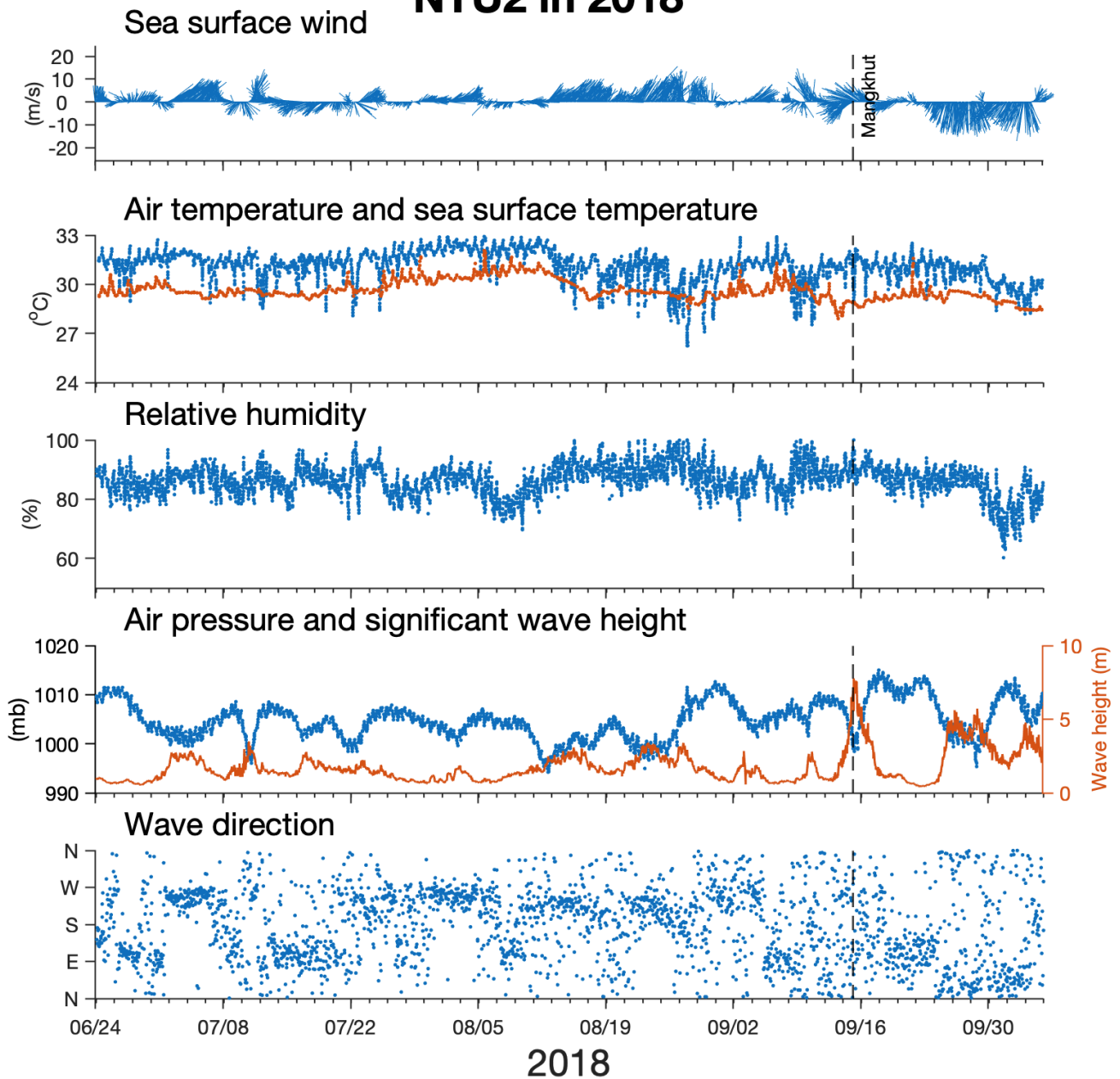


圖 2-1-3、由上而下分別為 2018 年 NTU2 站的海表面風矢、氣溫與海表溫、相對濕度、氣壓、示性波高(橘線)與主波方向之時間序列圖；其中，溫度圖中藍線為氣溫、橘線為海表溫；虛線則為觀測到之個案颱風中心最靠近浮標的時間點。

NTU1 in 2019

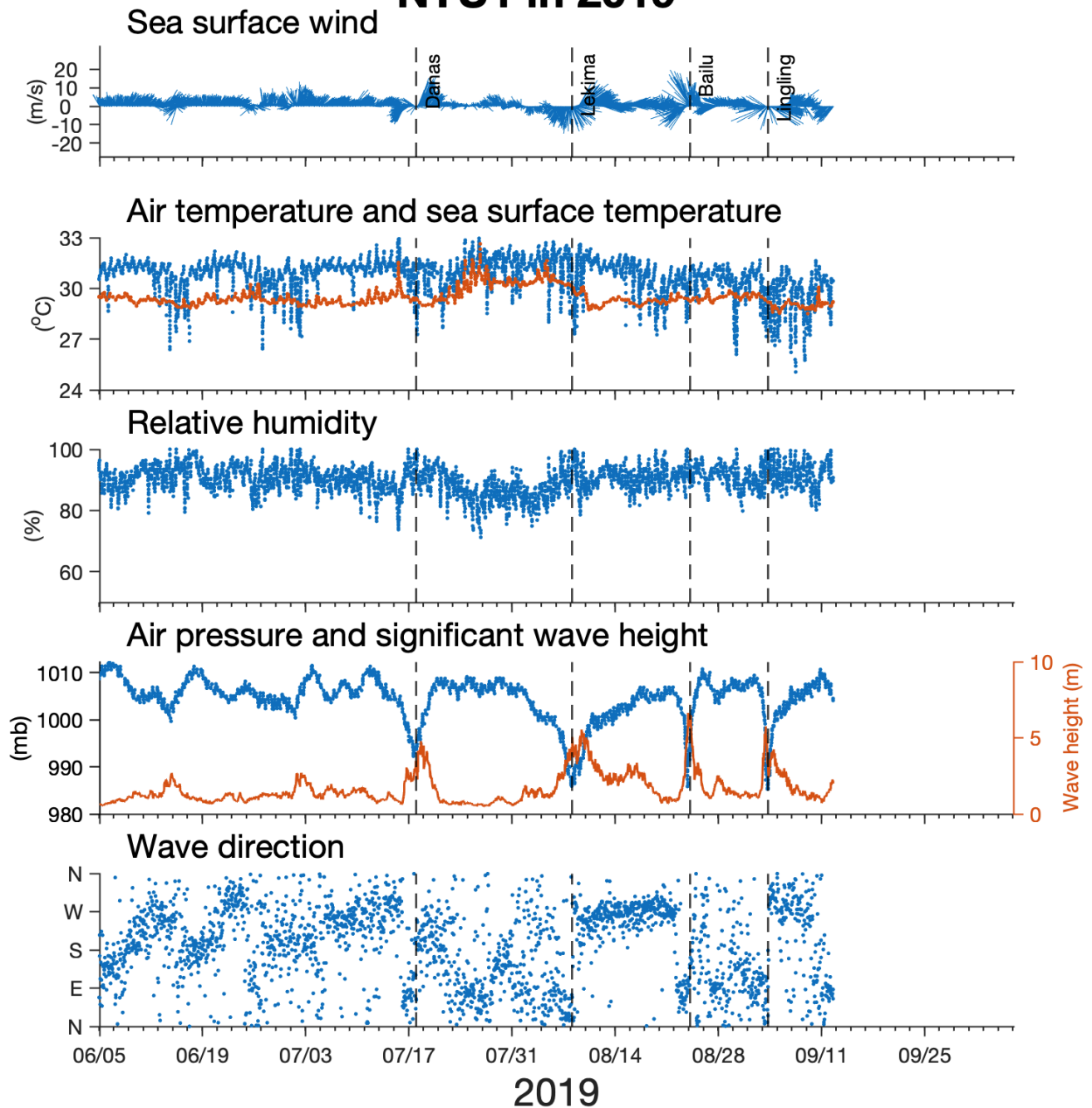


圖 2-1-4、由上而下分別為 2019 年 NTU1 站的海表面風矢、氣溫與海表溫、相對濕度、氣壓、示性波高(橘線)與主波方向之時間序列圖；其中，溫度圖中藍線為氣溫、橘線為海表溫；四條虛線則為觀測到之個案颱風中心最靠近浮標的時間點。



NTU2 in 2019

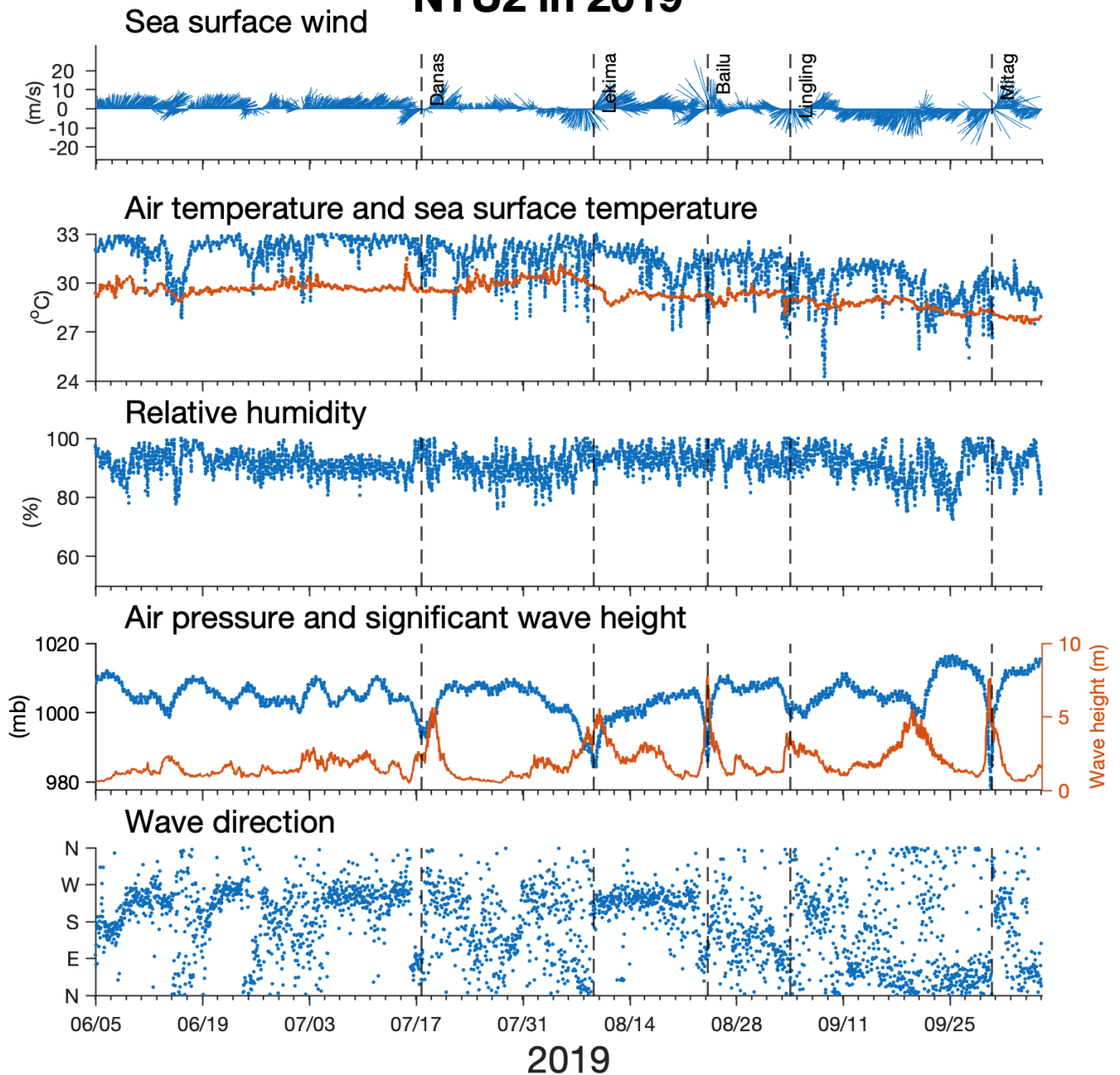


圖 2-1-5、由上而下分別為 2019 年 NTU1 站的海表面風矢、氣溫與海表溫、相對濕度、氣壓、示性波高(橘線)與主波方向之時間序列圖；其中，溫度圖中藍線為氣溫、橘線為海表溫；五條虛線則為觀測到之個案颱風中心最靠近浮標的時間點。

NTU1 in 2020

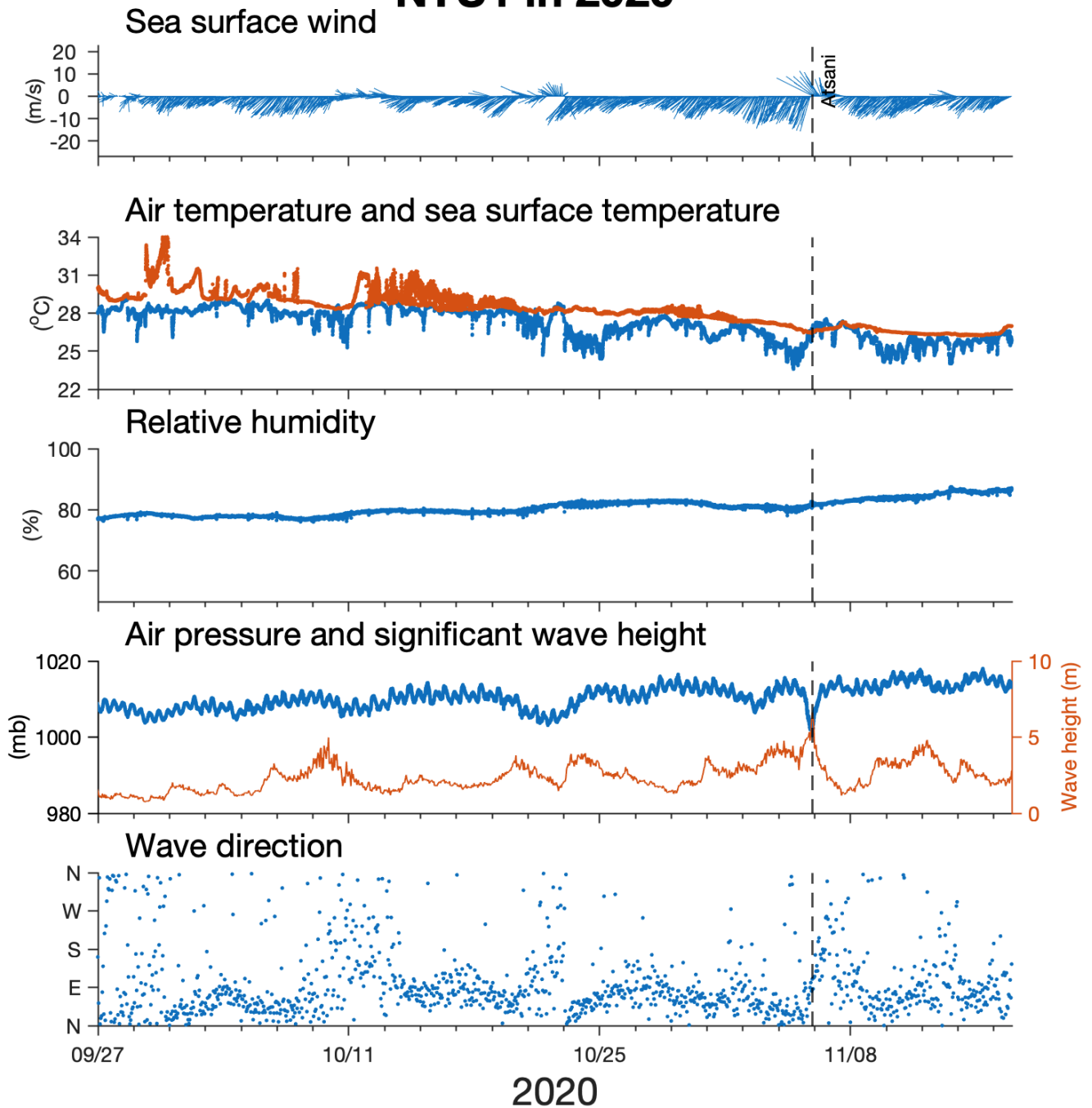


圖 2-1-6、由上而下分別為 2020 年 NTU1 站的海表面風矢、氣溫與海表溫、相對濕度、氣壓、示性波高(橘線)與主波方向之時間序列圖；其中，溫度圖中藍線為氣溫、橘線為海表溫；虛線則為觀測到之個案颱風中心最靠近浮標的時間點。



NTU2 in 2020

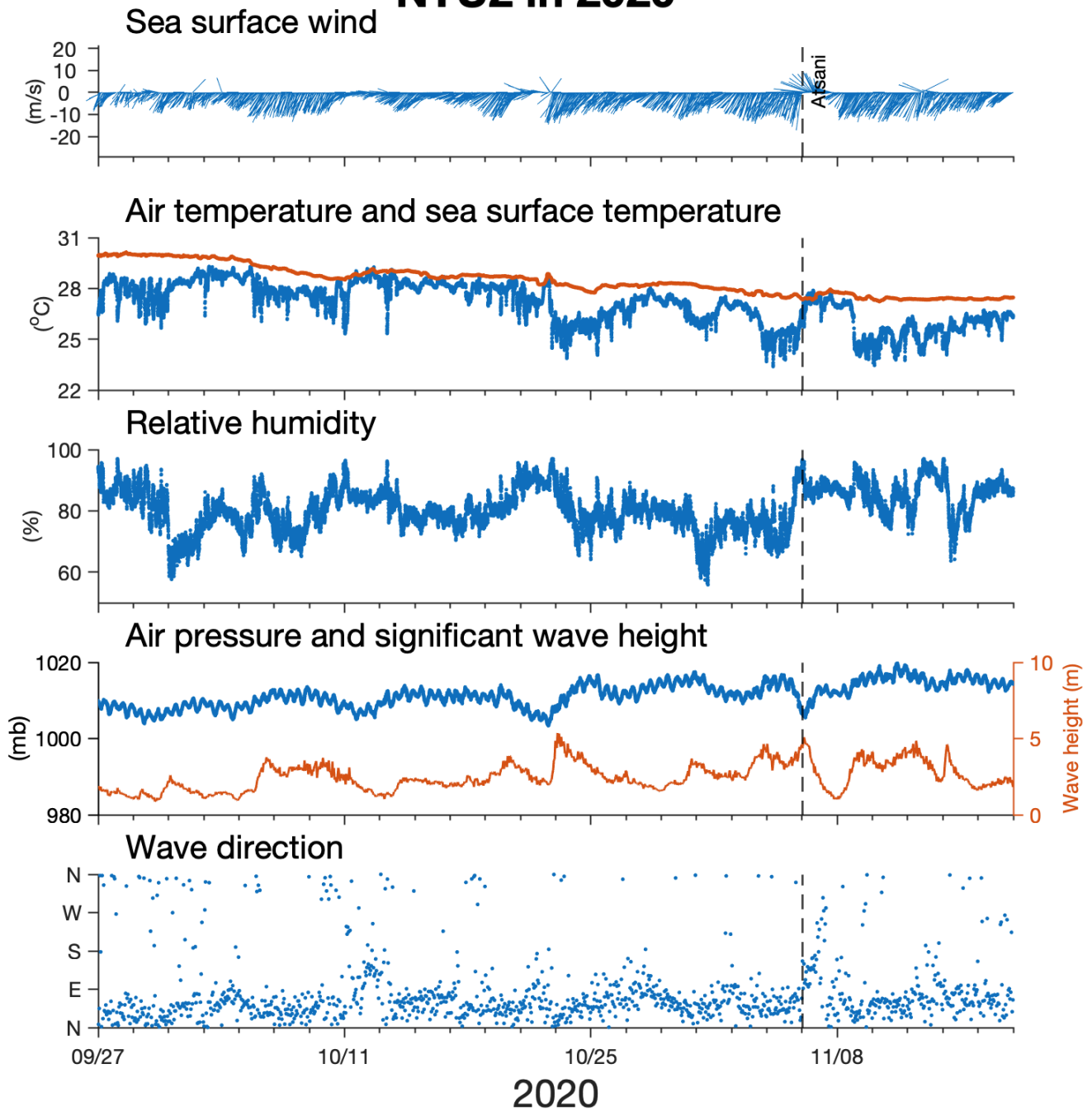


圖 2-1-7、由上而下分別為 2020 年 NTU2 站的海表面風矢、氣溫與海表溫、相對濕度、氣壓、示性波高(橘線)與主波方向之時間序列圖；其中，溫度圖中藍線為氣溫、橘線為海表溫；虛線則為觀測到之個案颱風中心最靠近浮標的時間點。

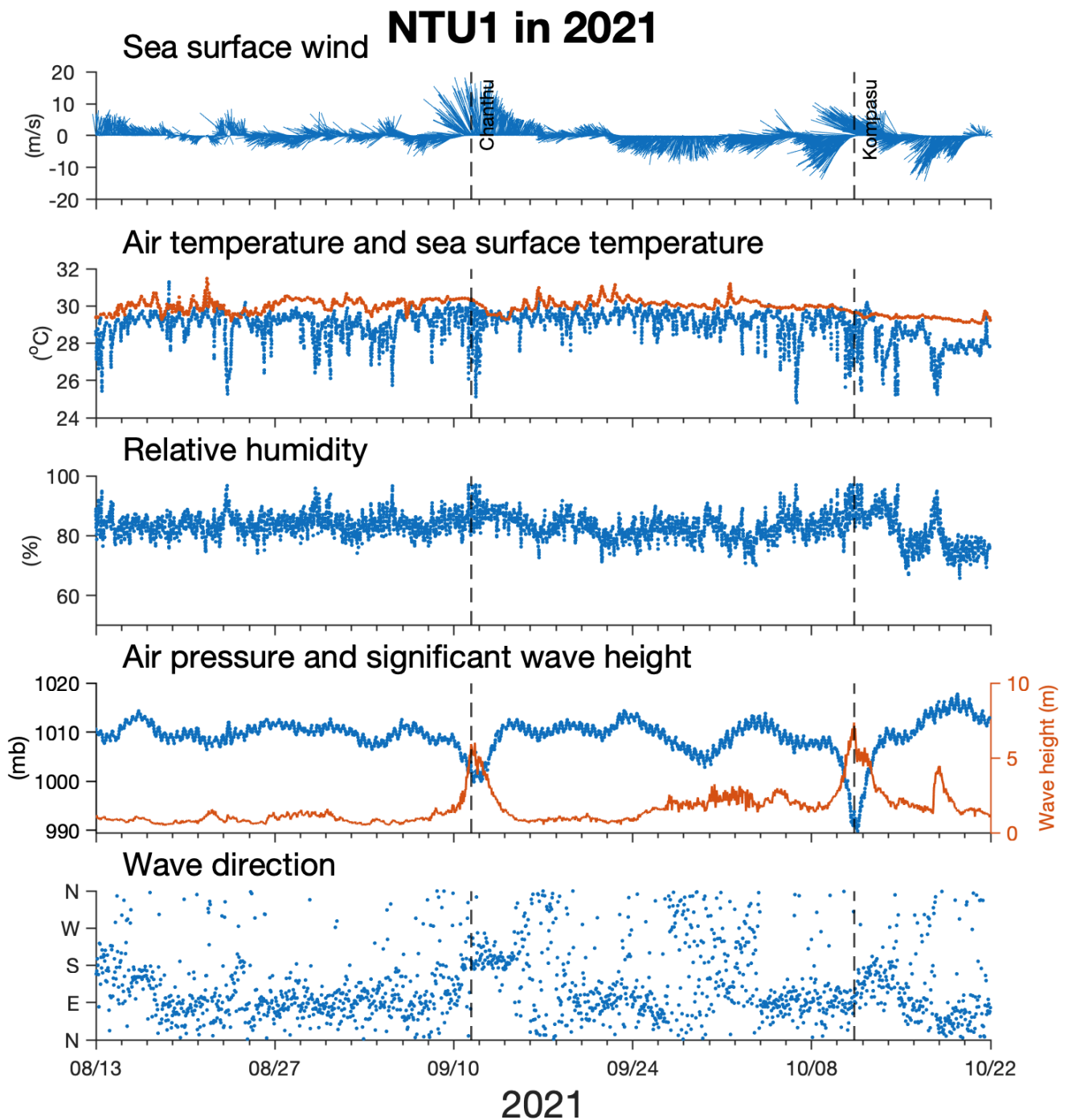


圖 2-1-8、由上而下分別為 2021 年 NTU1 站的海表面風矢、氣溫與海表溫、相對濕度、氣壓、示性波高(橘線)與主波方向之時間序列圖；其中，溫度圖中藍線為氣溫、橘線為海表溫；兩條虛線則為觀測到之個案颱風中心最靠近浮標的時間點。

NTU2 in 2021

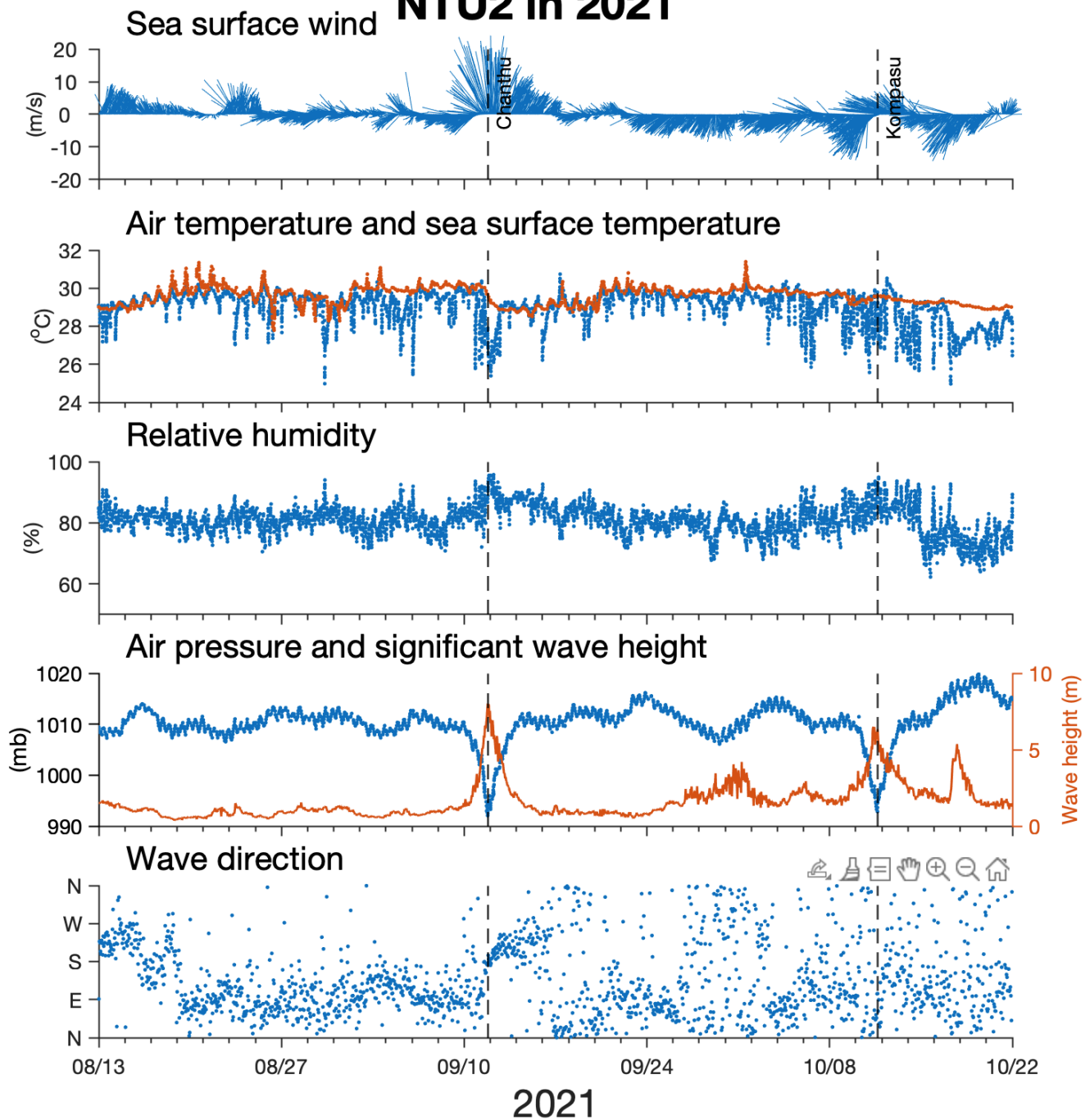


圖 2-1-9、由上而下分別為 2021 年 NTU2 站的海表面風矢、氣溫與海表溫、相對濕度、氣壓、示性波高(橘線)與主波方向之時間序列圖；其中，溫度圖中藍線為氣溫、橘線為海表溫；兩條虛線則為觀測到之個案颱風中心最靠近浮標的時間點。

表 2-1-1、2018 年 NTU1 站與 NTU2 站資料整理表



站點	資料類型	採樣時間 (UTC)	採樣頻率 (min)	資料筆數
NTU1	氣象	06/21 ~ 10/06	3	55207
	波浪		60	3599
	海表溫		3	55207
NTU2	氣象	06/23 ~ 10/24	3	59389
	波浪		60	2981
	海表溫		3	59389
	資料篩選後	NTU1 : 06/24 ~ 10/06	3	49909
		NTU2 : 06/24 ~ 10/06	3	49999

表 2-1-2、2019 年 NTU1 站與 NTU2 站資料整理表

站點	資料類型	採樣時間 (UTC)	採樣頻率 (min)	資料筆數
NTU1	氣象	06/04 ~ 09/12	3	48044
	波浪		60	2402
	海表溫		3	48044
NTU2	氣象	06/03 ~ 10/07	3 and 6	41985
	波浪		60	3000
	海表溫		3 and 6	41985
	資料篩選後	NTU1 : 06/05 ~ 09/12	3	47824
		NTU2 : 06/05 ~ 10/07	3	59521

表 2-1-3、2020 年 NTU1 站與 NTU2 站資料整理表



站點	資料類型	採樣時間 (UTC)	採樣頻率 (min)	資料筆數
NTU1	氣象	09/25 ~ 11/17	3	25540
	波浪		60	1280
	海表溫		3	25540
NTU2	氣象	09/26 ~ 11/18	3	25426
	波浪		60	1271
	海表溫		3	25426
	資料篩選後	NTU1 : 09/27 ~ 11/17	3	24481
		NTU2 : 09/27 ~ 11/17	3	24481

表 2-1-4、2021 年 NTU1 站與 NTU2 站資料整理表

站點	資料類型	採樣時間 (UTC)	採樣頻率 (min)	資料筆數
NTU1	氣象	08/10 ~ 10/22	3 and 6	31791
	波浪		60	1754
	海表溫		3 and 6	31791
NTU2	氣象	08/12 ~ 10/24	3	35178
	波浪		60	1756
	海表溫		3	35178
	資料篩選後	NTU1 : 08/13 ~ 10/21	3	33601
		NTU2 : 08/13 ~ 10/21	3	33601

2.2、颱風資訊來源

本研究所使用的颱風資訊為 IBTrACS 之提供資訊其中包含颱風中心路徑的經緯度以及四個象限之 34 節風速的暴風半徑，其資料頻率為三小時一筆；有別於中央氣象局所提供的同心圓暴風半徑，IBTrACS 所提供四象限的暴風半徑能更確切了解颱風的結構，也能得知浮標位於 34 節風暴風圈中的時間軸和相對位置資訊。

颱風強度等級之分類參考薩菲爾-辛普森颶風風力等級 (Saffir-Simpson Scale)，其判斷基準為颱風中心一分鐘內持續吹拂的最大風速。

- 低於 34 節時稱為熱帶低壓 (Tropical Depression, TD)
- 介於 34~63 節時稱為熱帶風暴 (Tropical Storm, TS)
- 介於 64~82 節時稱為等級一 (Category one, C1)
- 介於 83~95 節時稱為等級二 (Category two, C2)
- 介於 96~112 節時稱為等級三 (Category three, C3)
- 介於 113~136 節時稱為等級四 (Category four, C4)
- 大於 137 節時稱為等級五 (Category five, C5)

在後續章節中對於颱風等級的敘述將以 TD 至 C5 作為說明，而 34 節風速相當於蒲氏風力級數的八級風，因此之後章節中對於八級風暴風半徑的敘述將以 R_{34} 稱之。另外，為方便了解強度分級上的不同，以下將薩菲爾-辛普森颶風等級、中央氣象局與蒲氏風力級數對於颱風強度分級整理於表 2-2-1。



表 2-2-1、颱風強度分級對照表

中心平均風速 (kt)	薩菲爾-辛普森颶風等級	中央氣象局	蒲氏風力級 數對照
≤ 33	熱帶低壓 (TD)	熱帶低壓	6
			7
34 ~ 63	熱帶風暴 (TS)	輕度颱風	8
			9
			10
			11
64 ~ 82	一級颶風 (Cat. 1)	中度颱風 64 ~ 99 kt	12
			13
83 ~ 95	二級颶風 (Cat. 2)		14
			15
96 ~ 112	三級颶風 (Cat. 3)	強烈颱風 ≥ 100 kt	16
113 ~ 136	四級颶風 (Cat. 4)		17
≥ 137	五級颶風 (Cat. 5)		



2.3、經過浮標之颱風介紹

綜合 2.1 節浮標基本資訊以及 2.2 節颱風路徑資料來源，在 2018 至 2021 年間兩組海氣象浮標一共進入了 9 個颱風的八級暴風圈半徑內，本研究將對此 9 個颱風個案進行分析與討論，各颱風詳細資訊與特性整理請見表 2-3-1 與表 2-3-2。

2.3.1、2018 年

2018 年只有 1 個颱風經過浮標附近海域，為 9 月中的山竹(Mangkhut)颱風。山竹颱風的路徑與 NTU1 站、NTU2 站的相對位置示意圖繪製於圖 2-3-1。

由圖 2-1-2 可看到 NTU1 站整年度的大氣與海洋的時序列資料，其中山竹颱風於 9 月 14 日最接近 NTU1 站，即為圖中黑色虛線位置；風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在颱風期間有快速成長，最高達到 10 m；並從圖 2-3-1 可看到，山竹颱風的強度為 C5，而後續個案的颱風強度可從圖中暴風圈半徑的顏色得知；NTU1 位於颱風結構的右側，最近相對距離為 390 公里，此時該象限的八級暴風圈半徑為 510 公里，代表 NTU1 站有進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 31 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間為 21 個小時。

由圖 2-1-3 可看到 NTU2 站整年度的大氣與海洋的時序列資料，其中山竹颱風於 9 月 15 日最接近 NTU2 站，即為圖中黑色虛線位置；風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在颱風期間有快速成長，最高達到 8 m；並從圖 2-3-1 可看到，山竹颱風的強度為 C5，且 NTU2 位於颱風的右側，與颱風中心的最近距離約為 420 公里，此時該象限的八級暴風圈半徑約為 510 公里，代表 NTU2 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 24 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 19 個小時。



2.3.2、2019 年

2019 年一共有 5 個颱風經過浮標附近海域,分別是 7 月中的丹娜絲(Danas)、8 月初的利奇馬(Lekima)、8 月底的白鹿(Bailu)、9 月初的玲玲(Lingling)以及 9 月底的米塔(Mitag)。上述 5 個颱風的路徑與 NTU1 站、NTU2 站的相對位置示意圖將依照時間軸依序繪製於圖 2-3-2 至圖 2-3-6。

由圖 2-1-4 可看到 NTU1 站於 2019 年度的大氣與海洋的時序列資料，圖中黑色虛線為颱風與浮標距離最近的時刻，其中丹娜絲颱風於 7 月 18 日最接近 NTU1 站，風矢方面受颱風影響呈逆時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 5 m；並從圖 2-3-2 可看到，當浮標與颱風為最近相對距離時，颱風的強度為 TS，結構較不對稱，且 NTU1 位於颱風的左側，與颱風中心的最近距離約為 24 公里，而該象限的八級暴風圈半徑約為 360 公里，代表 NTU1 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 24 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 14 個小時。

由圖 2-1-5 可看到 NTU2 站於 2019 年度的大氣與海洋的時序列資料，圖中黑色虛線為颱風與浮標距離最近的時刻，其中丹娜絲颱風於 7 月 18 日最接近 NTU2 站，風矢方面受颱風影響也呈逆時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 4.8 m；在颱風影響期間 NTU2 位於颱風的左側，與颱風中心的最近距離約為 160 公里，此時該象限的八級暴風圈半徑約為 360 公里，代表 NTU2 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 24 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 9 個小時。


由圖 2-1-4 可得知，利奇馬颱風於 8 月 8 日最接近 NTU1 站，風矢方面受颱風影響呈逆時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 5.5 m；並從圖 2-3-3 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 C4，且 NTU1 位於颱風的左側，與颱風中心的最近距離約為 280 公里，而該象限的八級暴風圈半徑為 370 公

里，代表 NTU1 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 20 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 19 個小時。

由圖 2-1-5 可得知，利奇馬颱風於 8 月 8 日最接近 NTU2 站，風矢方面受颱風影響呈逆時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 5.2 m；並從圖 2-3-3 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 C4，且 NTU2 位於颱風的左側，與颱風中心的最近距離約為 360 公里，而該象限的八級暴風圈半徑為 400 公里，代表 NTU2 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 17 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 7 個小時。

白鹿颱風於 8 月 23 日最接近 NTU1 站，風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 6.6 m；並從圖 2-3-4 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 TS，且 NTU1 位於颱風的右側，與颱風中心的最近距離約為 80 公里，而該象限的八級暴風圈半徑約為 270 公里，代表 NTU1 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 21 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 16 個小時。

白鹿颱風於 8 月 24 日最接近 NTU2 站，風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 7.7 m；並從圖 2-3-4 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 TS，且 NTU2 位於颱風的右側，與颱風中心的最近距離約為 90 公里，而該象限的八級暴風圈半徑約為 310 公里，代表 NTU2 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 24 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 19 個小時。



玲玲颱風於 9 月 3 日最接近 NTU1 站，風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 5.8 m；並從圖 2-3-5 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 C1，且 NTU1 位於颱風的左側，與颱風中心的最近距離約為 20 公里，而該象限的八級暴風圈半徑約為 150 公里，代表 NTU1 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 10 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 29 個小時。

玲玲颱風於 9 月 3 日最接近 NTU2 站，風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 3.9 m；並從圖 2-3-5 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 C1，且 NTU2 位於颱風的左側，與颱風中心的最近距離約為 180 公里，而該象限的八級暴風圈半徑約為 150 公里，代表 NTU2 站並無進入其暴風圈範圍內，因本研究僅討論於暴風圈內之個案，因此玲玲颱風僅討論 NTU1 站之結果。

米塔颱風於 9 月 3 日最接近 NTU2 站，風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 7.7 m；並從圖 2-3-6 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 C1，且 NTU2 位於颱風的左側，與颱風中心的最近距離約為 60 公里，而該象限的八級暴風圈半徑為 270 公里，代表 NTU2 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 20 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 21 個小時。因米塔颱風影響期間時 NTU1 站已回收，因此米塔颱風僅討論 NTU2 站的分析結果。



2.3.3、2020 年

2020 年只有 1 個颱風經過浮標附近海域，為 11 月初的閃電(Atsani)颱風。閃電颱風的路徑與 NTU1 站、NTU2 站的相對位置示意圖繪製於圖 2-3-7。

由圖 2-1-6 可看到 NTU1 站於 2020 年度的大氣與海洋的時序列資料，圖中黑色虛線為颱風與浮標距離最近的時刻，而閃電颱風於 11 月 5 日最接近 NTU1 站，風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 6.6 m；並從圖 2-3-7 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 TS，颱風結構較不對稱，且 NTU1 位於颱風的右側，與颱風中心的最近距離約為 90 公里，而該象限的八級暴風圈半徑約為 160 公里，代表 NTU1 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 21 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 21 個小時。

由圖 2-1-7 可看到 NTU2 站於 2020 年度的大氣與海洋的時序列資料，圖中黑色虛線為颱風與浮標距離最近的時刻，其中閃電颱風於 11 月 6 日最接近 NTU2 站，風矢方面受颱風影響也呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 5.1 m；從圖 2-3-7 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 TS，颱風結構較不對稱，且 NTU2 位於颱風的右側，與颱風中心的最近距離約為 120 公里，此時該象限的八級暴風圈半徑約為 160 公里，代表 NTU2 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 24 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 9 個小時。



2.3.4、2021 年

2021 年一共有 2 個颱風經過浮標附近海域，分別為 9 月中的璨樹(Chanthu)以及 10 月中的圓規(Kompasu)颱風。上述 2 個颱風的路徑與 NTU1 站、NTU2 站的相對位置示意圖將依照時間軸依序繪製於圖 2-3-8 與圖 2-3-9。

由圖 2-1-8 可看到 NTU1 站於 2021 年度的大氣與海洋的時序列資料，圖中黑色虛線為颱風與浮標距離最近的時刻，而璨樹颱風於 9 月 11 日最接近 NTU1 站，風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 6 m；並從圖 2-3-8 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 C4，且 NTU1 位於颱風的右側，與颱風中心的最近距離約為 220 公里，而該象限的八級暴風圈半徑約為 260 公里，代表 NTU1 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 17 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 20 個小時。

由圖 2-1-9 可看到 NTU2 站於 2021 年度的大氣與海洋的時序列資料，圖中黑色虛線為颱風與浮標距離最近的時刻，其中璨樹颱風於 9 月 11 日最接近 NTU2 站，風矢方面受颱風影響也呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 8 m；在颱風影響期間 NTU2 位於颱風的右側，與颱風中心的最近距離約為 80 公里，此時該象限的八級暴風圈半徑約為 250 公里，代表 NTU2 站曾進入其暴風圈範圍內，颱風移動速度約為 17 km/hr，位於颱風八級暴風圈內時間約為 31 個小時。

由圖 2-1-8 可得知，圓規颱風於 10 月 11 日最接近 NTU1 站，風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 7 m；並從圖 2-3-9 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 TS，且 NTU1 位於颱風的右側，與颱風中心的最近距離約為 270 公里，而該象限的八級暴風圈半徑約為 430 公里，代表 NTU1 站曾進入其暴風圈範圍內，不過圓規颱風於格林威治時間 10 月 10 日

19 時短暫減弱為熱帶性低氣壓 (TD)，並於 10 月 11 日 16 時回到颱風強度 TS 之狀態，此時 NTU1 站已在颱風八級暴風圈半徑之外，因此後續將不做討論。

由圖 2-1-9 可得知，圓規颱風於 10 月 11 日最接近 NTU2 站，風矢方面受颱風影響呈順時針旋轉，浪高在受強風作用下成長，最高達到 6 m；並從圖 2-3-9 可看到，當浮標與颱風為最近距離時，颱風的強度為 TD，且 NTU2 位於颱風的右側，與颱風中心的最近距離約為 360 公里，但並無八級暴風圈半徑，因此後續將不做討論。

2.4、熱通量資料

本研究在熱交換的探討中主要將海氣象浮標的氣象、海表與波浪等實測資料利用 TOGA COARE v3.6a 演算法套件求得，也配合衛星遙測資料算出的熱通量資料與其進行比對。而使用的熱通量資料來自於伍茲霍爾海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI)的客觀分析海氣通量計畫(Objectively Analyzed air-sea Fluxes, OAFlux)，其計畫的海氣通量包含潛熱通量與可感熱通量，空間解析度為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，時間解析度有分一天一筆與一個月一筆兩種。本研究在 2018 年至 2020 年的浮標佈放期間，使用每日一筆的 OAFlux 資料，用於比較實測資料推估與衛星遙測資料推估海表熱通量之差異，而後續比較與說明將會在第四章中呈現。

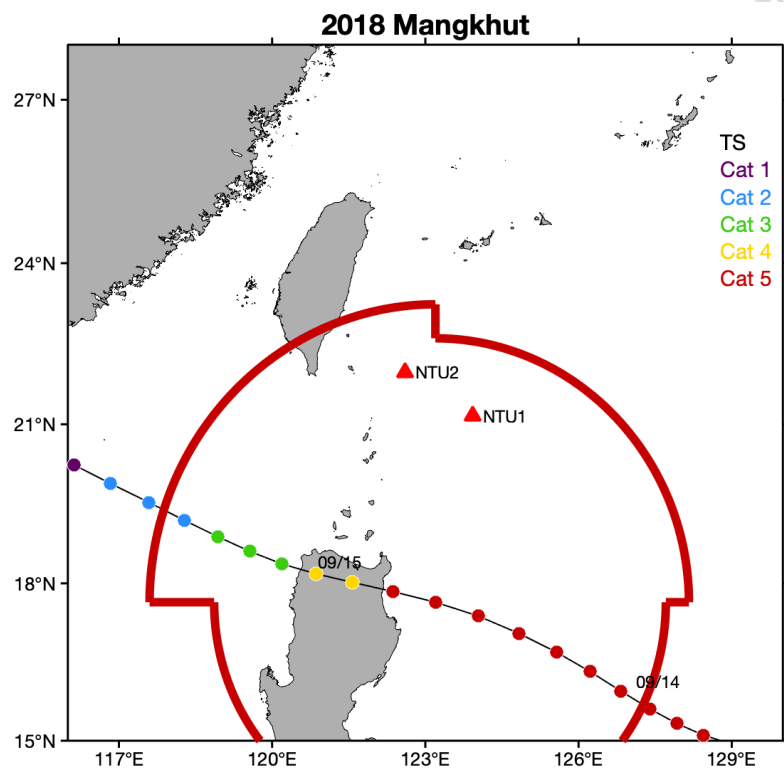


圖 2-3-1、為 2018 年山竹颱風的路徑以及 9 月 14 日 15 時之八級暴風圈半徑示意圖；右上文字為依照 2.2 章節的颱風強度分級，並對應到路徑上的圓點顏色，代表颱風於該點位時的強度；兩個紅色三角形為兩浮標的位置；點上的時間點為該日期的 UTC 0 時。

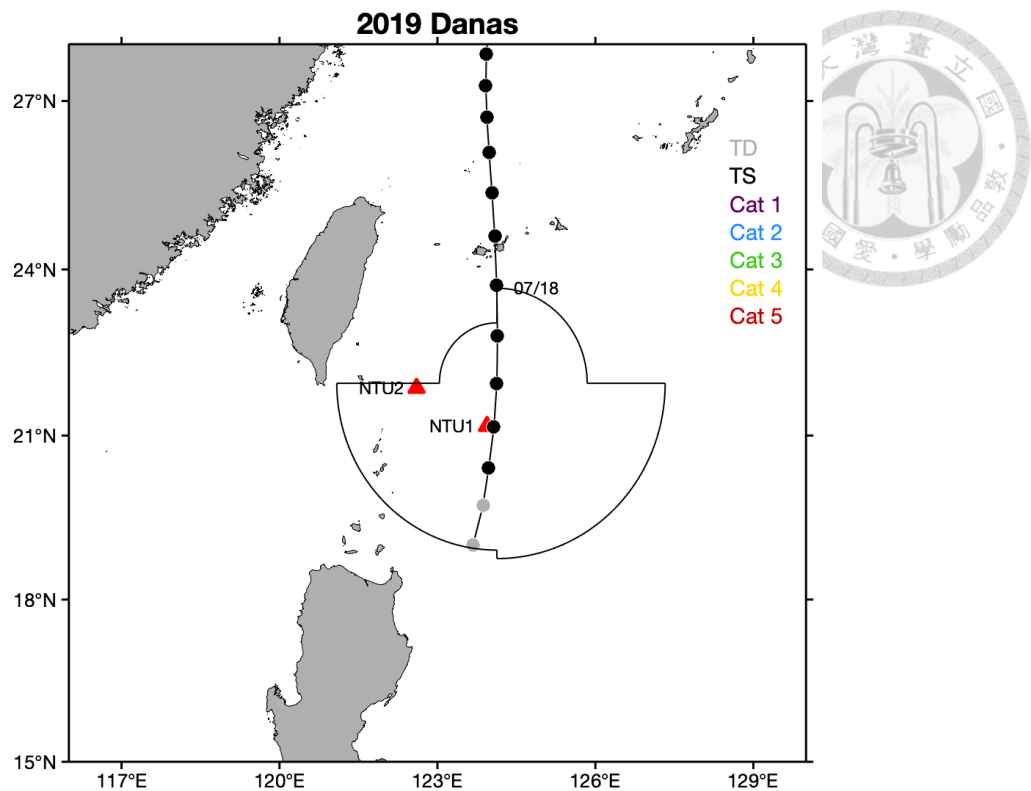


圖 2-3-2、為 2019 年丹娜絲颱風的路徑以及 7 月 17 日 15 時之八級暴風圈半徑示意圖；圖說同圖 2-3-1。

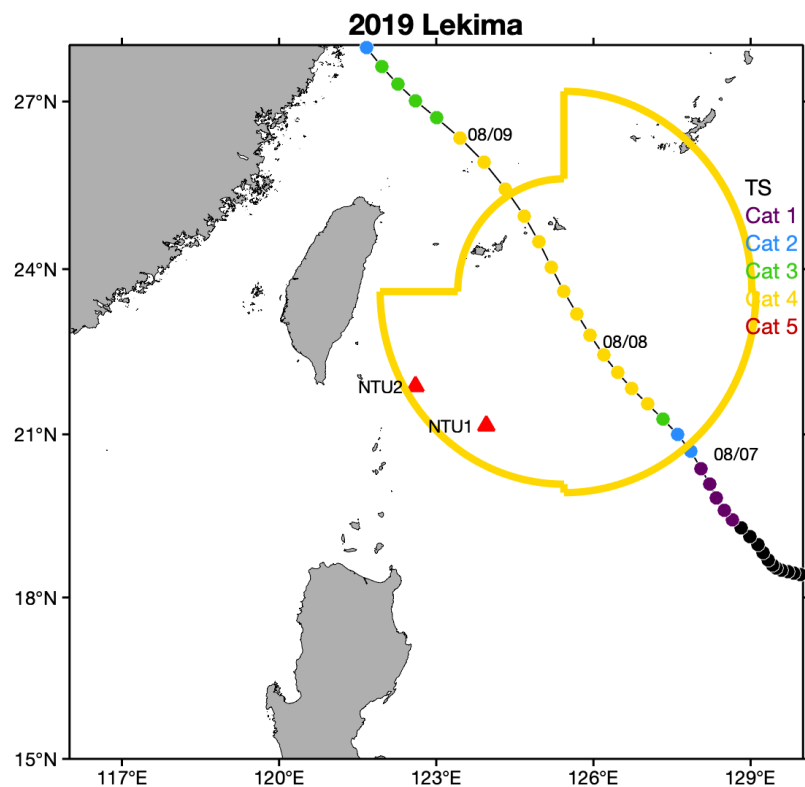


圖 2-3-3、為 2019 年利奇馬颱風的路徑以及 8 月 8 日 09 時之八級暴風圈半徑示意圖；圖說同圖 2-3-1。

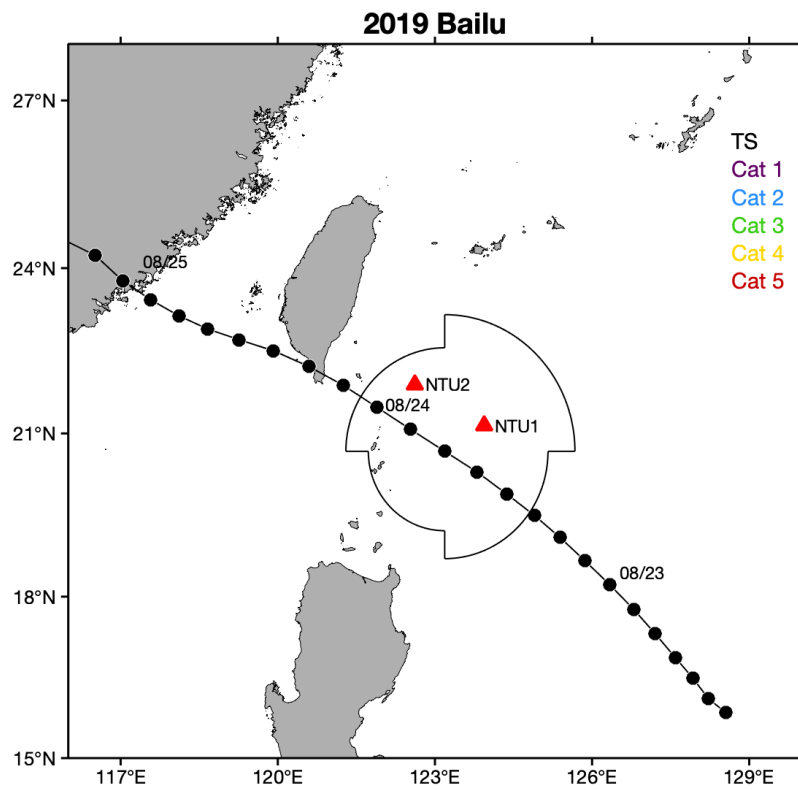


圖 2-3-4、為 2019 年白鹿颱風的路徑以及 8 月 23 日 18 時之八級暴風圈半徑示意圖；圖說同圖 2-3-1。

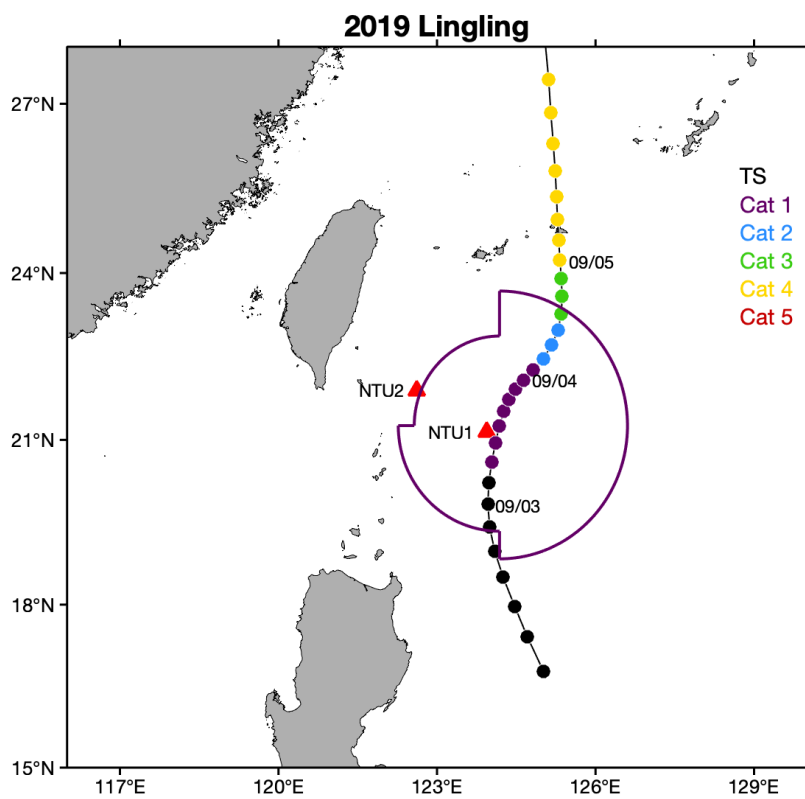


圖 2-3-5、為 2019 年玲玲颱風的路徑以及 9 月 3 日 12 時之八級暴風圈半徑示意圖；圖說同圖 2-3-1。

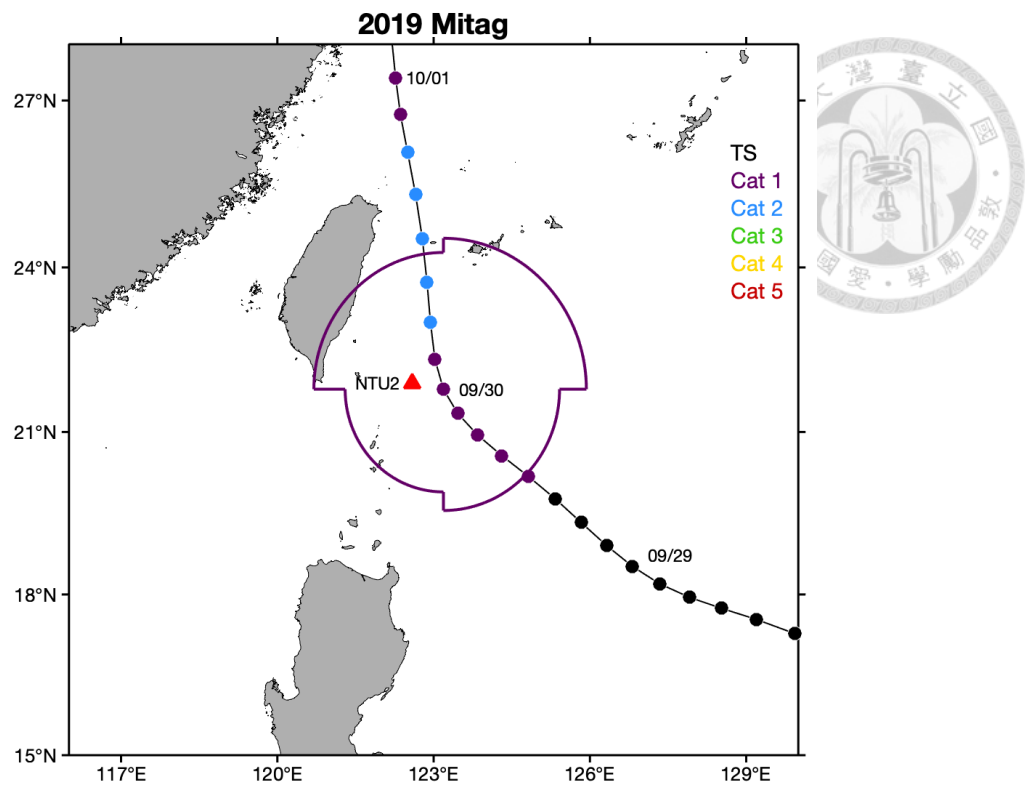


圖 2-3-6、為 2019 年米塔颱風的路徑以及 9 月 30 日 00 時之八級暴風圈半徑示意圖；圖說同圖 2-3-1。

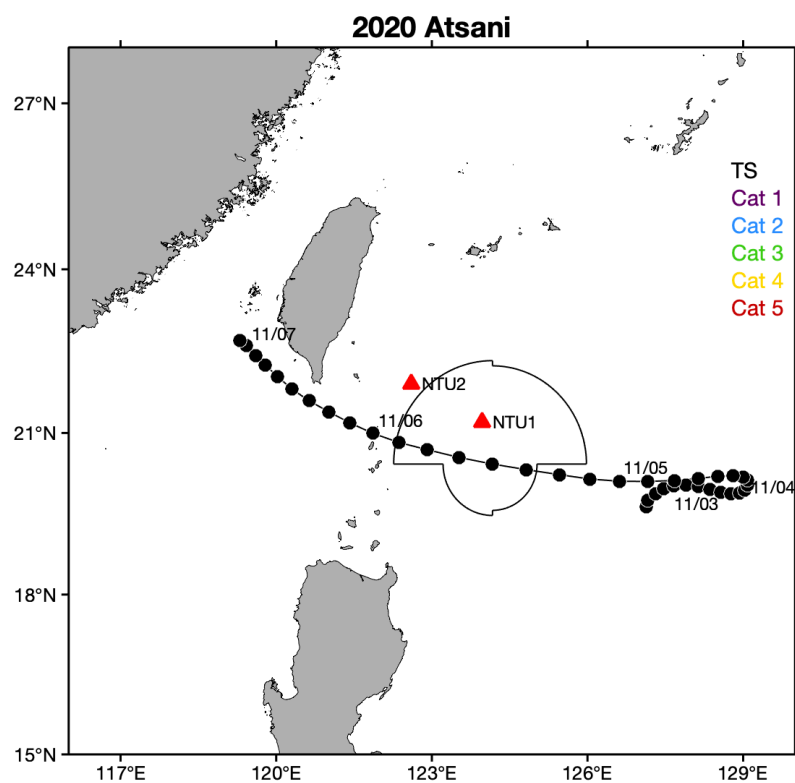


圖 2-3-7、為 2020 年閃電颱風的路徑以及 10 月 5 日 12 時之八級暴風圈半徑示意圖；圖說同圖 2-3-1。

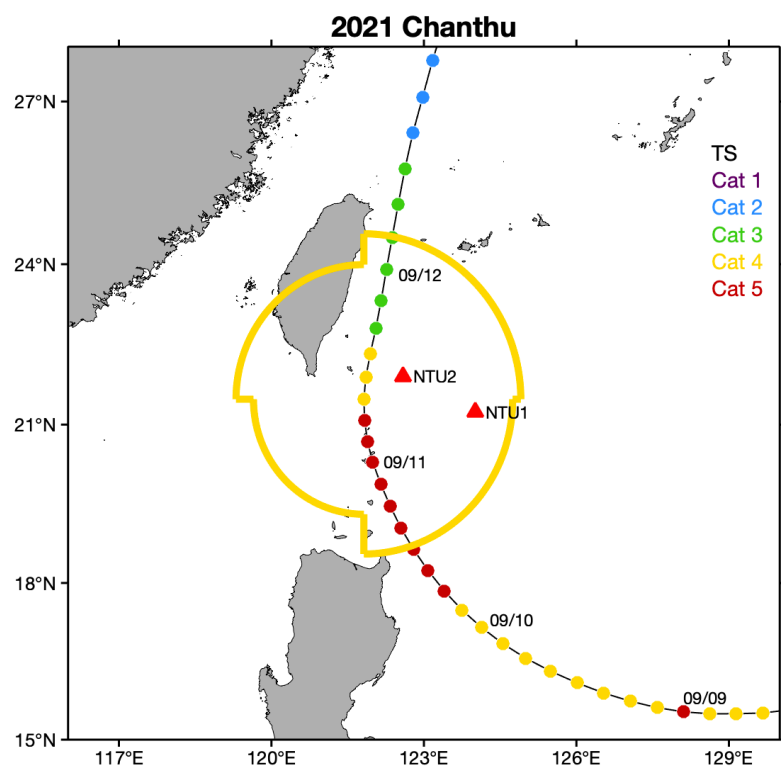


圖 2-3-8、為 2021 年璨樹颱風的路徑以及 9 月 11 日 09 時之八級暴風圈半徑示意圖；圖說同圖 2-3-1。

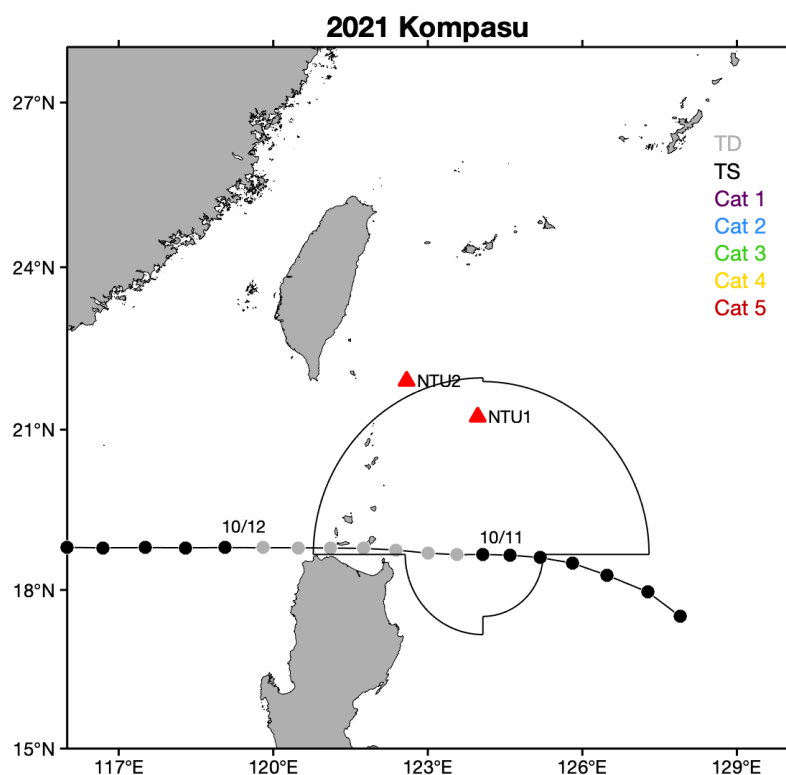


圖 2-3-9、為 2021 年圓規颱風的路徑以及 10 月 11 日 00 時之八級暴風圈半徑示意圖；圖說同圖 2-3-1。

表 2-3-1、2018 至 2021 年間 8 個颱風最靠近 NTU1 站時的資訊

颱風名稱	強度	八級暴風半徑影響時間區間 (UTC)	最近距離 (km)	移動速度 (km/hr)	浮標相對於颱風眼的方位	該方位的八級暴風圈半徑 (km)
山竹 (Mangkut)	C5	2018/09/14 06:00 ~ 2018/09/15 03:00	390	31	右	510
丹娜絲 (Danas)	TS	2019/07/17 12:00 ~ 2019/07/18 02:00	18	24	左	360
利奇馬 (Lekima)	C4	2019/08/07 19:00 ~ 2019/08/08 14:00	280	20	左	370
白鹿 (Bailu)	TS	2019/08/23 10:00 ~ 2019/08/24 02:00	80	21	右	270
玲玲 (Lingling)	C1	2019/09/03 00:00 ~ 2019/09/04 05:00	20	10	左	150
閃電 (Atsani)	TS	2020/11/04 23:00 ~ 2020/11/05 20:00	90	21	右	160
璨樹 (Chanthu)	C4	2021/09/10 18:00 ~ 2021/09/11 14:00	220	17	右	260
圓規 (Kompasu)	TS	2021/10/10 12:00 ~ 2021/10/11 00:00	270	18	右	430

表 2-3-2、2018 至 2021 年間 7 個颱風最靠近 NTU2 站時的資訊

颱風名稱	強度	八級暴風半徑影響時間區間 (UTC)	最近距離 (km)	移動速度 (km/hr)	浮標相對於颱風眼的方位	該方位的八級暴風圈半徑 (km)
山竹 (Mangkhut)	C5	2018/09/14 10:00 ~ 2018/09/15 05:00	420	24	右	510
丹娜絲 (Danas)	TS	2019/07/17 19:00 ~ 2019/07/18 04:00	160	24	左	360
利奇馬 (Lekima)	C4	2019/08/08 00:00 ~ 2019/08/08 07:00	360	17	左	400
白鹿 (Bailu)	TS	2019/08/23 14:00 ~ 2019/08/25 08:00	90	24	右	310
米塔 (Mitag)	C1	2019/09/29 13:00 ~ 2019/09/30 10:00	50	20	左	270
閃電 (Atsani)	TS	2020/11/05 15:00 ~ 2020/11/06 00:00	120	24	右	160
璨樹 (Chanthu)	C4	2021/09/10 18:00 ~ 2021/09/12 01:00	80	17	右	250

第三章 分析方法介紹



本研究主要探討颱風影響期間的風浪以及海表熱通量之時序列特性變化，採用了 IBTrACS 提供的颱風最佳路徑與浮標上的 GPS 定位資料轉換並確認其相對位置，能客觀了解整個颱風影響過程，以及颱風與浮標之相對位置變化，此部分會在 3.1 節中說明。另外，將運用浮標的氣象、波浪與海表溫等實測資料估算潛熱通量與可感熱通量，估算方法將在 3.2 節中說明。

3.1、颱風參考座標軸之正規化

一般常見的颱風路徑圖皆以第三人稱視角去觀察颱風的移動路徑，不過於浮標觀測中，颱風個案往往會搭配其暴風圈半徑資料來檢視浮標是否進入其暴風圈中，而暴風圈大小以及與浮標之相對距離皆會隨時間變化，因此在判斷上可能會稍不準確，若將相對距離用浮標所在方位的暴風圈半徑進行正規化，即可正確判別其相對距離。再以颱風中心為座標軸原點、颱風前進方向為正前方，以位於颱風中心隨著前進的視角去觀察浮標相對於颱風的方位變化，搭配上上述之距離正規化後，可更了解浮標相對於颱風的精確位置。

本研究座標軸正規化是採用 Potter *et al.* (2015)的方法，利用浮標上的 GPS 資料與 IBTrACS 提供的颱風經緯度與暴風圈半徑資訊，利用上述方法將 2018 至 2021 年共 14 個個案進行轉換，以 2019 年 NTU1 站玲玲颱風為例，玲玲颱風之一般颱風路徑圖請見圖 2-3-5，以颱風為座標軸中心的浮標相對路徑圖繪製於圖 3-1-1。

由圖 2-3-5 可看到玲玲颱風形成初期為朝西北方移動，接近 NTU1 站時呈順時針轉彎，當颱風最靠近 NTU1 站時，此時浮標是位於颱風中心之左側，颱風遠離浮標後呈逆時針轉彎，並朝北方繼續前進。

在進行浮標與颱風間的座標中心轉換與八級暴風圈半徑正規化後，由圖 3-1-1 可看出，NTU1 站的位置在颱風期間皆位於颱風的第二、第三象限，颱風與浮標之最近距離為 0.14 倍的八級暴風圈半徑；若考慮到颱風前進方向，可將圖 3-1-1 的座標軸再次轉換為以颱風前進方向為正上方的路徑圖，並繪製於圖 3-1-2。以颱風視角去得知浮標的相對位置，在判斷浮標位於颱風結構的左右側會更為準確，以利後續利用該位置的氣象與波浪資料來探討颱風期間風浪的物理現象。最後將浮標資料中在該時間點的風與浪的向量資料疊上相對應的位置上，並詳細探討在八級暴風圈影響前後的風浪時序列變化，各年的颱風個案討論將在第四章中呈現。

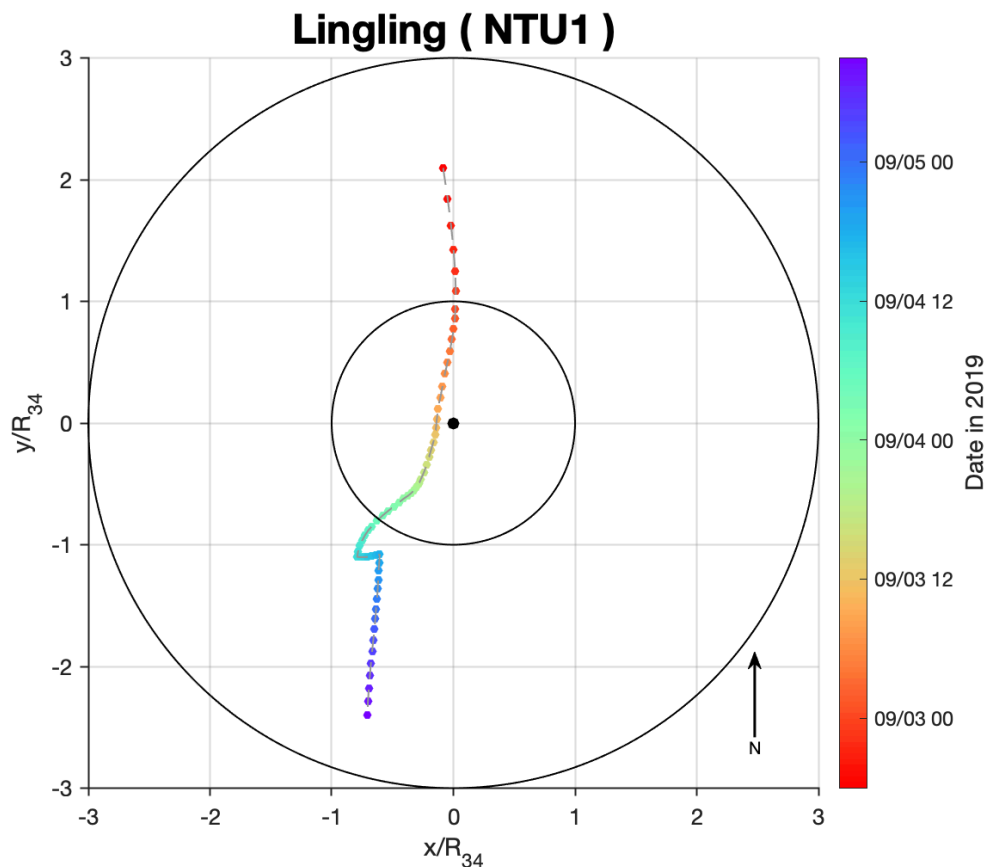


圖 3-1-1、2019 年玲玲颱風期間 NTU1 站與颱風中心之相對位置變化圖(以北方為正上方)；各點代表 NTU1 站相對於玲玲颱風中心的位置，其色階變化為時間軸；相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化；黑點為颱風中心；內圈與外圈分別為 1 倍與 3 倍的八級暴風圈半徑。

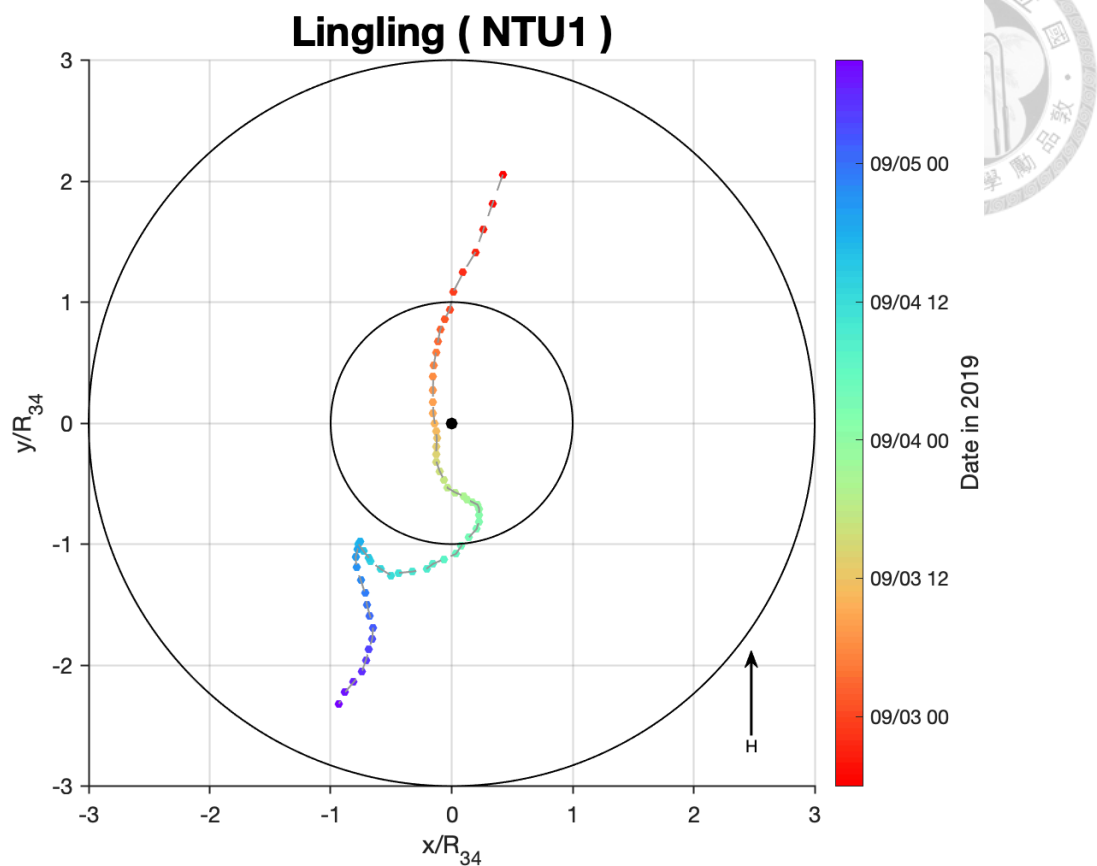


圖 3-1-2、2019 年玲玲颱風期間 NTU1 站與颱風中心之相對位置變化圖(以颱風前進方向為正上方)；各點代表 NTU1 站相對於玲玲颱風中心的位置，其色階變化為時間軸；相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化；黑點為颱風中心；內圈與外圈分別為 1 倍與 3 倍的八級暴風圈半徑。



3.2、海表熱通量分析

海洋與大氣間的熱通量交換一直都是海氣交互作用中的重要過程之一，本研究對於海表熱通量估算的方法採用了整體參數法(Bulk-parameterization method)，其屬於間接、半經驗公式的熱通量推估，除了考量大氣擾動項之外，也考慮到波浪效應、降雨造成的鹽度效應以及海表溫變化等，上述海洋的參數也會影響到海表熱通量的估算，而該方法中的各參數選擇是經過多次現場實驗所得出，目前則被廣泛用於全球模式中。

海表熱通量包含了潛熱通量與可感熱通量，而估算是使用 Fairall *et al.* (2003)所建立的 COARE (Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment) 演算法套件，本研究採用了 3.6 版本，在此版本中，潛熱通量(H_L)與可感熱通量(H_{sen})的計算公式如下：

$$H_L = \rho L_e u_* (q_s - q_a) \quad 【1】$$

$$H_{sen} = \rho C_{pa} u_* (T_s - \theta_a) \quad 【2】$$

其中 ρ 代表空氣密度； L_e 代表蒸發潛熱； C_{pa} 代表空氣比熱； u_* 代表風的摩擦速度； q_s 代表海洋比濕； q_a 代表大氣比濕； T_s 代表海表溫； θ_a 代表空氣位溫。

空氣比熱與在演算法中為常數值，為 $1004.67 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ；而計算蒸發潛熱的公式如下：

$$L_e = (2.501 - 0.00237 \times T_s) \times 10^6 \quad 【3】$$

大氣比濕與海洋比濕的計算則分別考慮到相對濕度以及鹽度效應影響，計算公式如下：



$$q_a = \frac{622 \times em}{P - 0.378 \times em} \quad 【4】$$

$$q_s = \frac{622 \times es}{P - 0.378 \times es} \quad 【5】$$

其中 P 為海表面氣壓； em 為空氣蒸氣壓； es 為海表水蒸氣壓。其分別考慮相對濕度與鹽度影響，計算公式如下：

$$SVP_a = \left[6.1121 \times \exp \left(\frac{17.502 \times T}{T + 240.97} \right) \times (1.0007 + 3.46 \times 10^{-6} \times P) \right] \quad 【6】$$

$$SVP_s = \left[6.1121 \times \exp \left(\frac{17.502 \times T_s}{T_s + 240.97} \right) \times (1.0007 + 3.46 \times 10^{-6} \times P) \right] \quad 【7】$$

$$em = SVP_a \times \frac{RH}{100} \quad 【8】$$

$$es = SVP_s \times \left(1 - \frac{0.02 \times S}{35} \right) \quad 【9】$$

其中 SVP_a 為大氣飽和蒸氣壓； SVP_s 為海表飽和蒸氣壓； T 為氣溫； RH 為相對濕度； S 為鹽度。

式 6 與式 7 為分別使用氣溫(T)、海表溫(T_s)以及氣壓(P)計算出的大氣與海表飽和蒸氣壓，再分別考量受相對濕度(RH)與鹽度(S)之影響，其中鹽度因變化程度並不大，在式 9 中的鹽度參數設定為 34.7 psu。



而在推估風的摩擦速度之前，會先計算出表面粗糙度，在 COARE v3.6 之前的版本中，表面粗糙度的推估是利用 Smith (1988)的方法，式子如下：

$$z_o = 0.11 \frac{\nu}{u_*} + \alpha \frac{u_*^2}{g} \quad 【10】$$

其中 u_* 為風的摩擦速度； ν 為運動黏度； g 為重力； α 為 Charnock 係數。

不過上述方法僅考慮大氣對於表面粗糙度的影響；而波浪效應對於表面粗糙度估算是不可或缺的，後續研究則在計算表面粗糙度時加入了波浪影響，分別利用示性波高與波齡去計算探討(Taylor and Yelland, 2001；Oost *et al.*, 2002)，並在 COARE 3.0 版本中提供估算。另外，在式 10 中總表面粗糙度可分為平滑項與粗糙項，前者為低風速時的主導項，主要受黏滯力的影響；後者為高風速時的主導項，主要受到風速與 Charnock 係數的影響(Edson *et.al.*, 2013)。而本研究為探討颱風期間的情形，後續將對於粗糙項與波浪效應的關係有進一步的計算與說明。

另外，在 3.6 版本中則使用了波譜分析來計算表面粗糙度，式子如下：

$$z_{o_{wave}} = H_s \times a \times \left(\frac{u_*}{cp} \right)^b \quad 【11】$$

其中 H_s 為示性波高； cp 為波齡； a 與 b 為波浪係數，分別為 0.091 及 2.02。

利用式 11 計算出的考慮波浪效應之表面粗糙度($z_{o_{wave}}$)則利用式 10 的後項得到考慮波浪影響的 Charnock 係數，式子如下：

$$\alpha_s = \frac{z_{o_{wave}} \times g}{u_*^2} \quad 【12】$$

計算出 α_s 後，再將其放入 Smith (1988)的計算方法，式子如下：

$$z_o = 0.11 \frac{\nu}{u_*} + \alpha_s \frac{u_*^2}{g} \quad 【13】$$

將考慮波浪效應後計算出的粗糙項結合平滑項後得出的表面粗糙度，即可利用 Fairall *et al.*(2003)對於估計動量傳輸係數的參數化方程式中去推估風的摩擦速度，式子如下：

$$C_D = \frac{-\overline{uw}}{U_r^2 G} = \left[\frac{\kappa}{\ln(z/z_o) - \psi_m(z/L)} \right]^2 \quad 【14】$$

其中 C_D 為動量傳輸係數； $u_* = \sqrt{-\overline{uw}}$ ； U_r 為平均風速； G 為陣風參數，該定義為觀測風速與平均風速的比值； κ 為 von Kármán 常數； z 為距離地表高度； $\psi_m(z/L)$ 為說明因穩定性而造成半對數形式實際風速剖面偏移量的函數。

在得出 u_* 後，潛熱通量與可感熱通量即可於式 1 與式 2 被推估出，而在演算法中將上述估算方法進行 10 次迭代使其收斂，得出迭代後的海表熱通量值，最後配合整年度的實測資料將該年度的潛熱通量與可感熱通量推估出；而此演算法在各版本在風速上皆有使用範圍，其中 3.0 版本中為 $4 \text{ m/s} < U_{10} < 15 \text{ m/s}$ ；3.6 版本中為 $4 \text{ m/s} < U_{10} < 25 \text{ m/s}$ ，其中 U_{10} 為距海面 10 公尺高之風速。

在此分析中，以 2019 年 NTU1 站的資料為例，藉由該站的氣象、波浪與海表溫資料利用 TOGA COARE v3.6 演算法中上述推估方法求得潛熱通量與可感熱通量，並將其時間序列圖繪製於圖 3-2-1，接著再取出颱風影響期間的資料，在此將以玲玲颱風為例繪製於圖 3-2-2。在後續將根據潛熱通量與可感熱通量的正負值改變搭配該時間段的浮標氣象、波浪與海表溫資料，也會將 3.1 節中的座標軸正規化，以颱風結構來檢視海表熱通量的變化，進而討論颱風影響期間熱量在大氣和海洋之間的傳輸方向進而造成海表的溫度變化，個案探討也將在第四章中詳細說明。

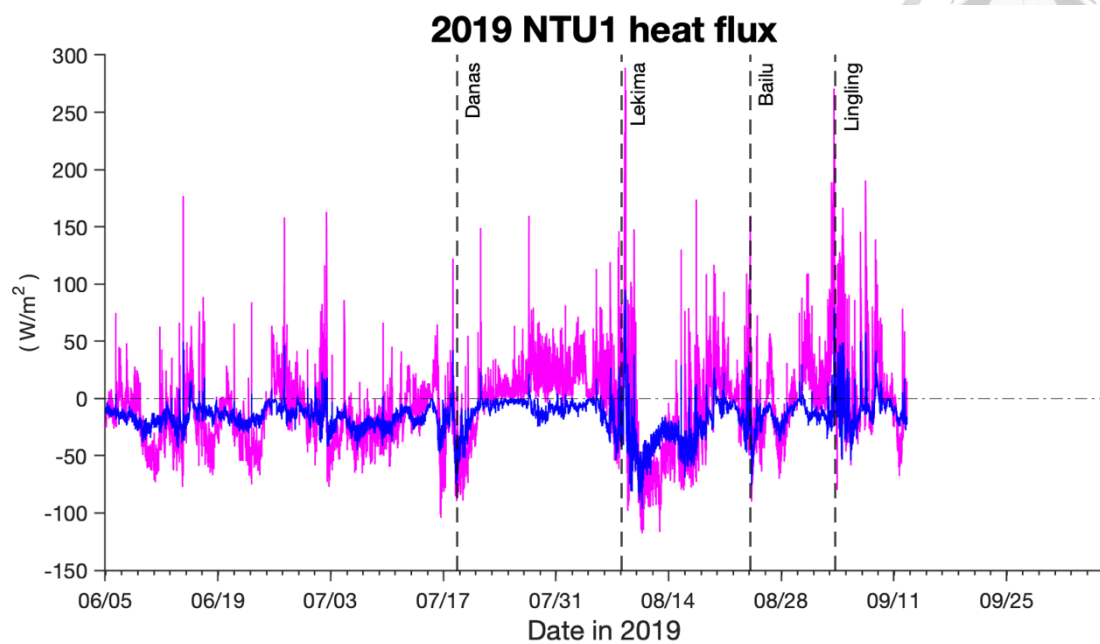


圖 3-2-1、2019 年 NTU1 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖;洋紅線為潛熱通量;藍線為可感熱通量,四條虛線分別代表丹娜絲、利奇馬、白鹿以及玲玲颱風最靠近浮標的時間點。

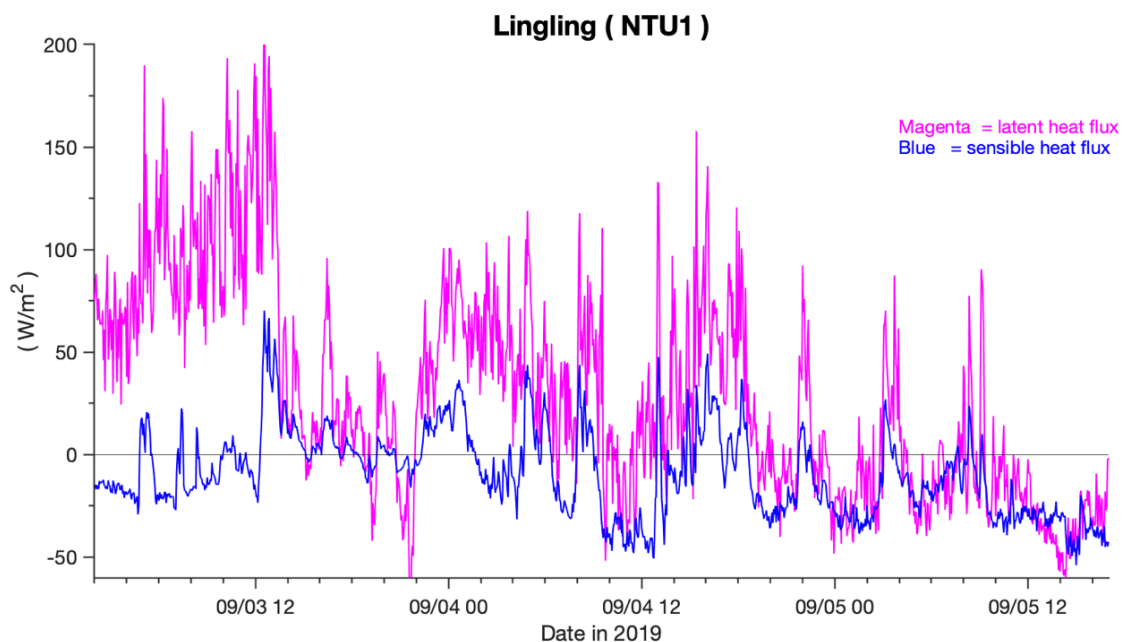


圖 3-2-2、玲玲颱風影響期間之潛熱通量與可感熱通量時序列圖;洋紅線為潛熱通量;藍線為可感熱通量。

第四章 颱風個案探討



在 2018 年至 2021 年期間共有 8 個颱風經過 NTU1 站與 NTU2 站浮標所在位置附近海域，分別是 2018 年的山竹颱風；2019 年的丹娜絲、利奇馬、白鹿、玲玲與米塔颱風；2020 年的閃電颱風以及 2021 年的璨樹颱風。在此章節中，將利用海氣象浮標上的風速計與波浪儀所記錄的各颱風個案期間之風與浪向量變化，並觀察在不同的相對距離以及位於颱風中心之左右側的條件下，風與浪向量是否會因上述變數會有不同的時空變化，此部分將在 4.1 節中詳細說明。另外，在颱風期間的海表熱通量變化也鮮少有利用實測資料推估出，所幸海氣象浮標上的觀測儀器多元，提供完整的觀測資料，而接續章節將利用觀測資料搭配 COARE 演算法 3.6 版本推估出的潛熱通量與可感熱通量，探討颱風期間海表熱通量的時空變化，並於 4.2 節中呈現。而除了觀測資料推估出海表熱通量外，衛星資料也能推估出，本研究將採用 OAFlux 衛星產品所推估的熱通量資料進行比對，並探討雙方的差異與可能的原因，細節將在 4.3 節中做說明。

4.1、颱風影響期間之風浪變化

臺大海氣象浮標自 2017 年開始加裝了波浪儀，對於極端天氣中的示性波高、主波方向與主波週期等波浪資訊幫助甚大，本研究將 2018 年至 2021 年度兩浮標觀測到共 14 個颱風個案的氣象與波浪資料整合分析，並根據不同的颱風強度與結構特性，搭配浮標與颱風中心的相對位置來探討颱風期間的風與浪向量變化；另一方面也根據 Kashima *et al.*(2008)對於湧浪週期的定義為 10 至 30 秒，再以浮標的主波週期觀察颱風事件中受風浪或湧浪影響的時間變化，以下將依照年份依序介紹。



4.1.1、2018 年

4.1.1.1、山竹颱風

山竹颱風於 9 月 14 日最接近 NTU1 站，最近距離為 390 公里，此時 NTU1 站位於颱風右側，颱風移動速度約為 31 km/hr，颱風強度為 C5，該方位的八級暴風圈半徑約為 510 公里。根據第三章的颱風參考座標軸正規化，並考慮颱風前進方向所畫出浮標相對與颱風的路徑，配合該時間點的風與浪向量如圖 4-1-1 所示，另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-2。

雖然相對距離較遠，不過山竹颱風的結構扎實且八級暴風圈半徑超過 500 公里，從圖 4-1-1 中可看出，NTU1 站最初位於颱風右前方，並於颱風右後方離開暴風圈，最近距離為 $0.73R_{34}$ ，位於暴風圈內時間為 21 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的右側而呈現順時針旋轉，其轉變角度為 60 度， U_{10max} 為 24 m/s。波浪方面主波方向在 NTU1 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持一銳角差，颱風影響期間受強風作用也呈順時針變化，與風向變化一致。

從圖 4-1-2 的方向時序列圖可發現，因 NTU1 站位於颱風八級暴風圈邊緣，在尚未進入暴風圈前，風向皆保持一致，並在進入暴風圈後緩慢轉向，其角度並不大，呈現順時針旋轉，於暴風圈後半部轉向完成。而主波方向在進暴風圈前雖保持同向，但變化幅度稍大，進入暴風圈後受到強風作用開始轉向，在暴風圈後半部轉向完成，轉向完成的時間點較風向晚約 4 小時。而波浪的週期為 15 秒，颱風期間為湧浪所主導。

另從圖 4-1-2 的風速與示性波高時序列圖可看出，因浮標位於颱風暴風圈邊緣，風速在颱風期間並無明顯的變化，並在八級暴風圈前半部達到最大值；浪高方面在八級暴風圈後半部快速成長，最高到 9 m，最大風速的時間點與最大浪高的時間點則有 5 個小時的時間差。

山竹颱風於 9 月 15 日最靠近 NTU2 站，最近距離為 420 公里，此時 NTU2 站位於颱風右側，颱風移動速度約為 24 km/hr，颱風強度為 C5，該方位的八級暴風圈半徑約為 510 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-3，另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-4。

從圖 4-1-3 中可看出，NTU2 站最初位於颱風右前方，並隨著颱風前進進入八級暴風圈內，並於颱風右後方離開暴風圈，最近距離為 $0.83R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 19 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的右側而呈現順時針旋轉，其轉變角度為 50 度， U_{10max} 為 22 m/s。而波浪方面，浪向在 NTU2 站進入八級暴風圈前與風向較無一致性，不過在颱風影響期間受強風作用也呈順時針旋轉，與風向變化方向一致。

從圖 4-1-4 的方向時序列圖可發現，因 NTU2 站位於颱風八級暴風圈邊緣，在尚未進入暴風圈前，風向皆保持一致，並在進入暴風圈後緩慢轉向，轉變角度並不大，呈現順時針旋轉，於暴風圈後半部轉向完成。而主波方向在進暴風圈前與風向的差角較大，但在進入暴風圈後受到強風作用開始轉向，不過可看到在暴風圈內方向依舊無統一方向性，直到離開暴風圈後才與風向同向，轉向完成的時間點較風向晚約 4 小時。而波浪的週期為 15 秒，颱風期間為湧浪所主導。

另從圖 4-1-2 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在颱風期間並無明顯的變化，並在八級暴風圈前半部達到最大值；浪高方面在八級暴風圈中快速成長，最高到 8 m，最大風速的時間點與最大浪高的時間點則有 2 個小時的時間差。

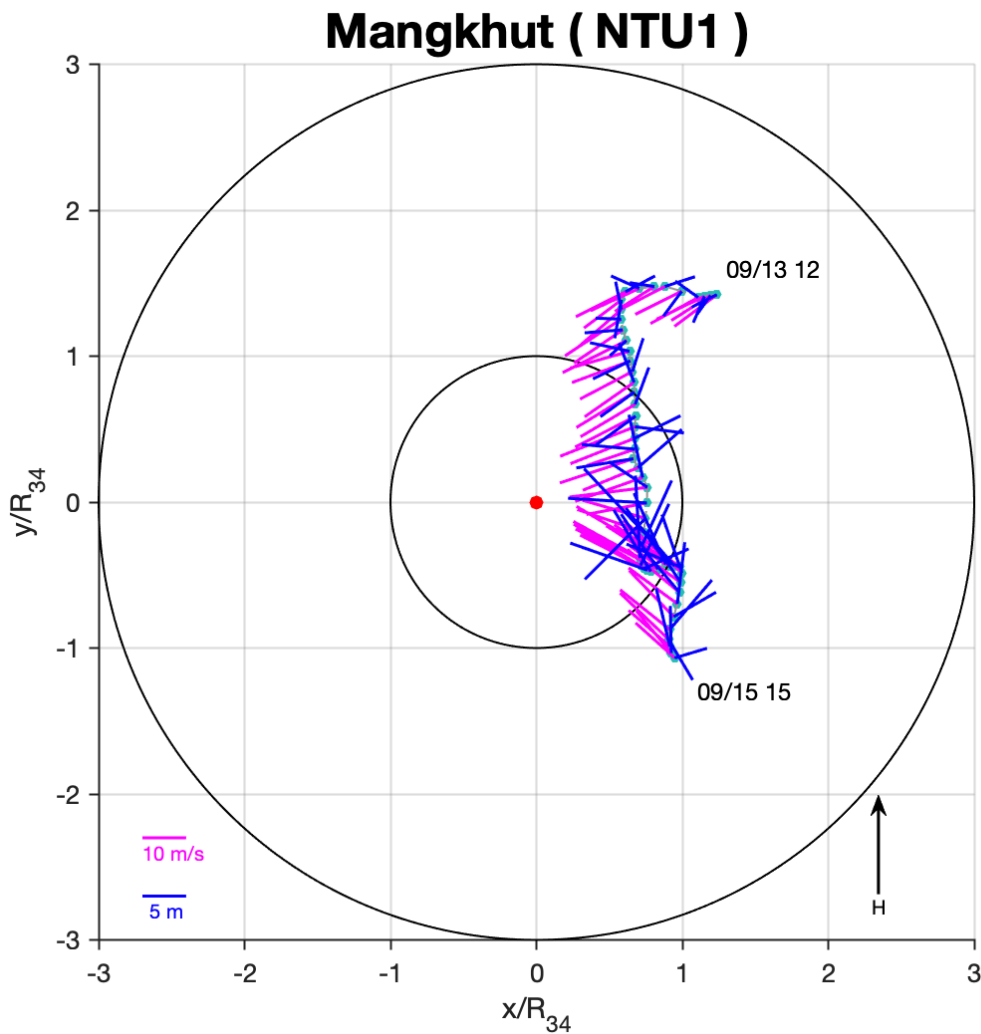


圖 4-1-1、為 2018 年山竹颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU1 站相對於山竹颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；其中紅點為颱風中心；洋紅色與藍線分別為表面風與浪矢，線條方向為視風向與視主波方向，線條長代表風速與浪高大小，左下角為風速與波高的比例尺；內圈與外圈分別為 1 倍與 3 倍的八級暴風圈半徑；文字為資料頭尾時間。



Mangkhut (NTU1)

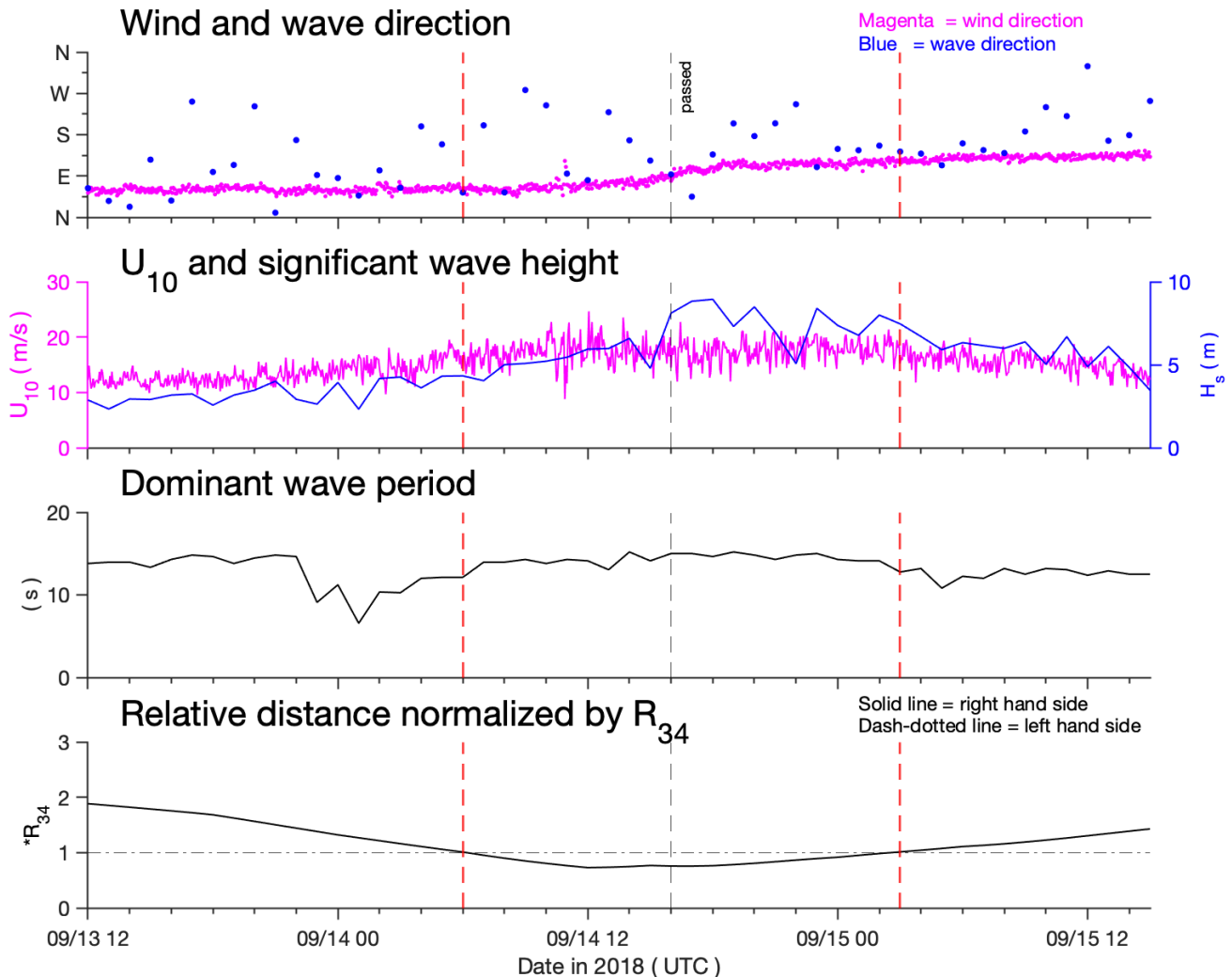


圖 4-1-2、由上而下分別為 2018 年山竹颱風影響期間 NTU1 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖。其中風浪方向為來源方向；紅虛線為海氣象浮標進入與離開八級暴風圈半徑時間點；黑虛線為浮標在暴風圈前半部與後半部的交界時間點；洋紅色線與藍線分別為風與浪參數；相對距離圖中實線為浮標位於颱風中心之右側，點虛線代表浮標位於颱風中心之左側。

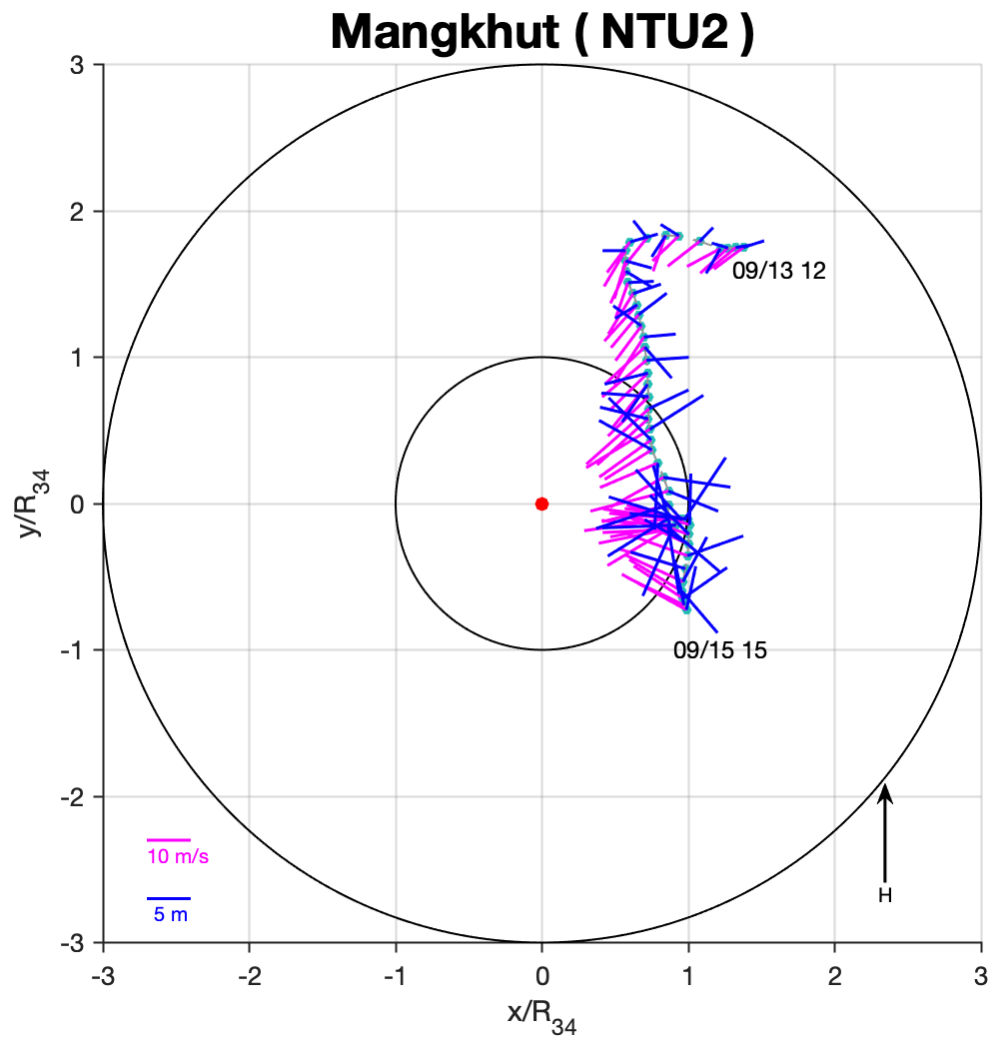


圖 4-1-3、為 2018 年山竹颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU2 站相對於山竹颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Mangkhut (NTU2)

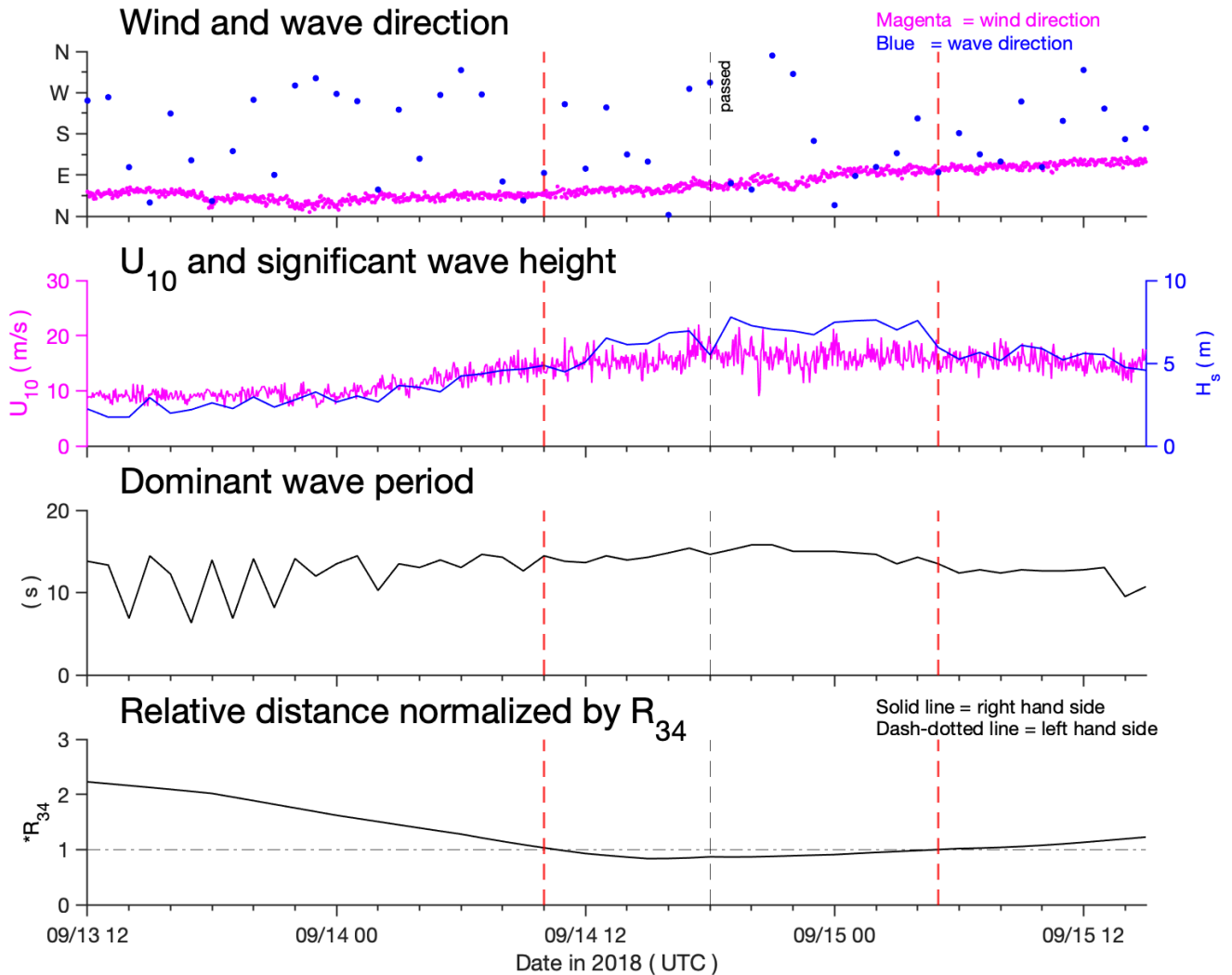


圖 4-1-4、由上而下分別為 2018 年山竹颱風影響期間 NTU2 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。



4.1.2、2019 年

4.1.2.1、丹娜絲颱風

丹娜絲颱風於 7 月 18 日最接近 NTU1 站，最近距離為 18 公里，此時 NTU1 站位於颱風左側，颱風移動速度約為 24 km/hr，颱風強度為 TS，該方位的八級暴風圈半徑約為 360 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-5，另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-6。

從圖 4-1-5 中可看出，因丹娜絲颱風較晚形成輕度颱風，形成時 NTU1 站已在其暴風圈內，而 NTU1 站最初位於颱風左前方，並隨著颱風移動於其左後方離開暴風圈，最近距離為 $0.07R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 14 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的左側而呈現逆時針變化，其轉變角度為 250 度， U_{10max} 為 20 m/s。波浪方面主波方向在 NTU1 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持一銳角差，颱風影響期間受強風作用也呈逆時針變化，轉變角度為 210 度，與風向變化一致。

從圖 4-1-6 的方向時序列圖可發現，因 NTU1 站與颱風的相對距離很近，風向在颱風經過期間角度變化超過 180 度，並於暴風圈後半部轉向完成，轉變方向為逆時針；主波方向可看到風向在快速變化時，方向來源依舊來自東邊，並未及時與風向一起轉變，5 個小時後才快速呈逆時針變化，離開暴風圈後兩者保持同向。而波浪的週期為 10 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-6 的風速與示性波高時序列圖可看出，因 NTU1 站有進入丹娜絲颱風眼的範圍內，風速在颱風期間內明顯能看出其變化，並於離開暴風圈後風速達到最大值；浪高方面在暴風圈後半部成長約 2 m，也於離開暴風圈後達最高值，兩者最大值的時間點有 4 個小時的時間差。

丹娜絲颱風於 7 月 18 日最接近 NTU2 站，最近距離為 160 公里，NTU2 站位於颱風左側，颱風移動速度約為 24 km/hr，颱風強度為 TS，該方位的八級暴風圈半徑約為 360 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-7。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-8。

因丹娜絲颱風為在浮標附近海域才成長為輕度颱風，並從圖 2-3-2 可得知，浮標位於颱風的第二、三象限，而兩象限的半徑相差約 3 倍，結構較為鬆散且不完整；從圖 4-1-7 中可看出，NTU2 站最初位於颱風左前方，並隨著颱風移動進入暴風圈第三象限，最後於其左後方離開，最近距離為 $0.45R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 9 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的左側而呈現逆時針變化，其轉變角度為 230 度， U_{10max} 為 17 m/s。波浪方面主波方向在 NTU2 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持一銳角差，颱風影響期間受強風作用也呈逆時針變化，轉變角度為 200 度，不過與風向變化一致。

從圖 4-1-8 的方向時序列圖可發現，NTU2 站最初雖無進入八級暴風圈內，但風向也隨颱風移動而變化，其轉變方向為逆時針；主波方向來源在尚未進入暴風圈時保持東北方，在颱風後半部呈大幅度逆時針變化，並於離開暴風圈後與風向有約 50 度的夾角。而波浪的週期為 10 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-8 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在颱風靠近時成長，並於颱風暴風圈後半部達到最大值；浪高方面在暴風圈內並無明顯成長，不過於離開暴風圈後達最高值，兩者最大值的時間點有 7 個小時的時間差。



Danas (NTU1)

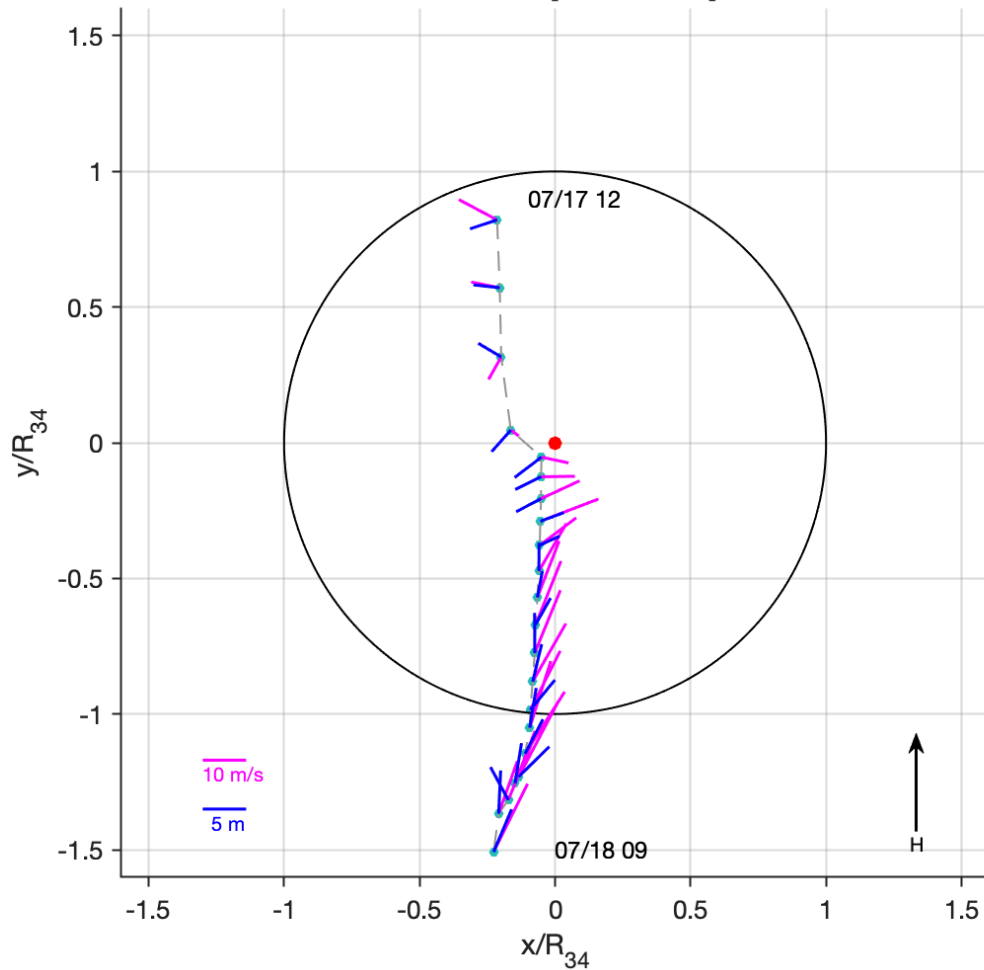


圖 4-1-5、為 2019 年丹娜絲颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU1 站相對於丹娜絲颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方，黑圈為 1 倍的八級暴風圈半徑；其餘部份圖說同圖 4-1-1。



Danas (NTU1)

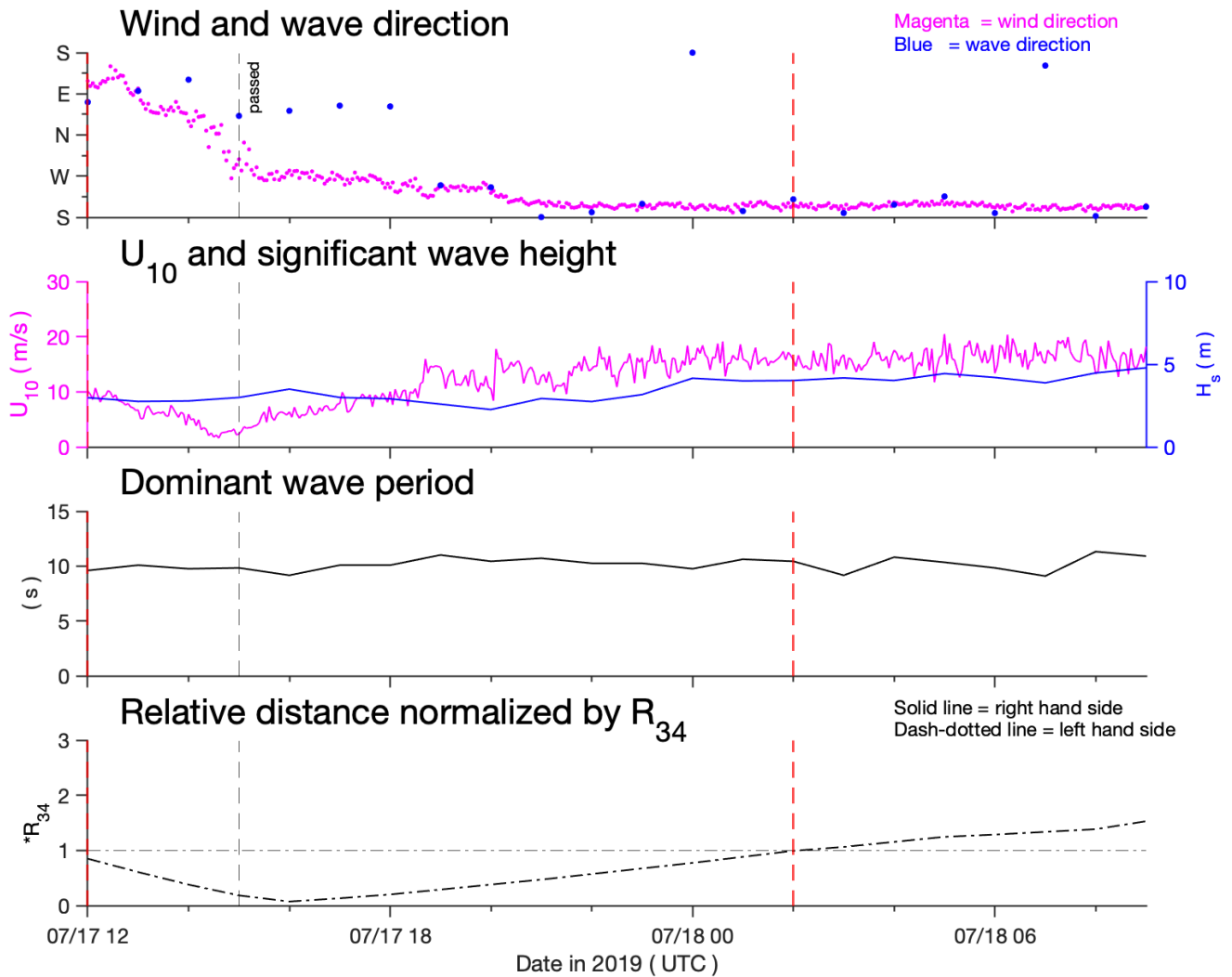


圖 4-1-6、由上而下分別為 2019 年丹娜絲颱風影響期間 NTU1 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。

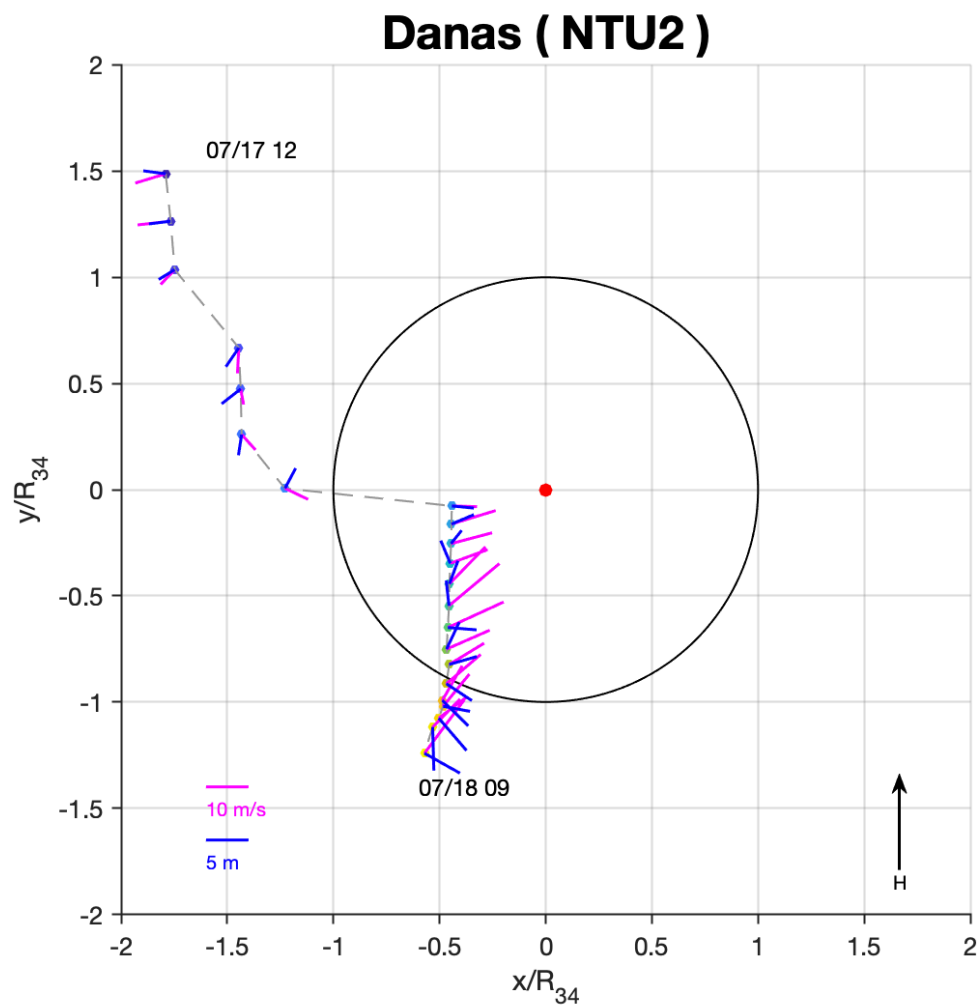


圖 4-1-7、為 2019 年丹娜絲颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU2 站相對於丹娜絲颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方，黑圈為 1 倍的八級暴風圈半徑；其餘部份圖說同圖 4-1-1。



Danas (NTU2)

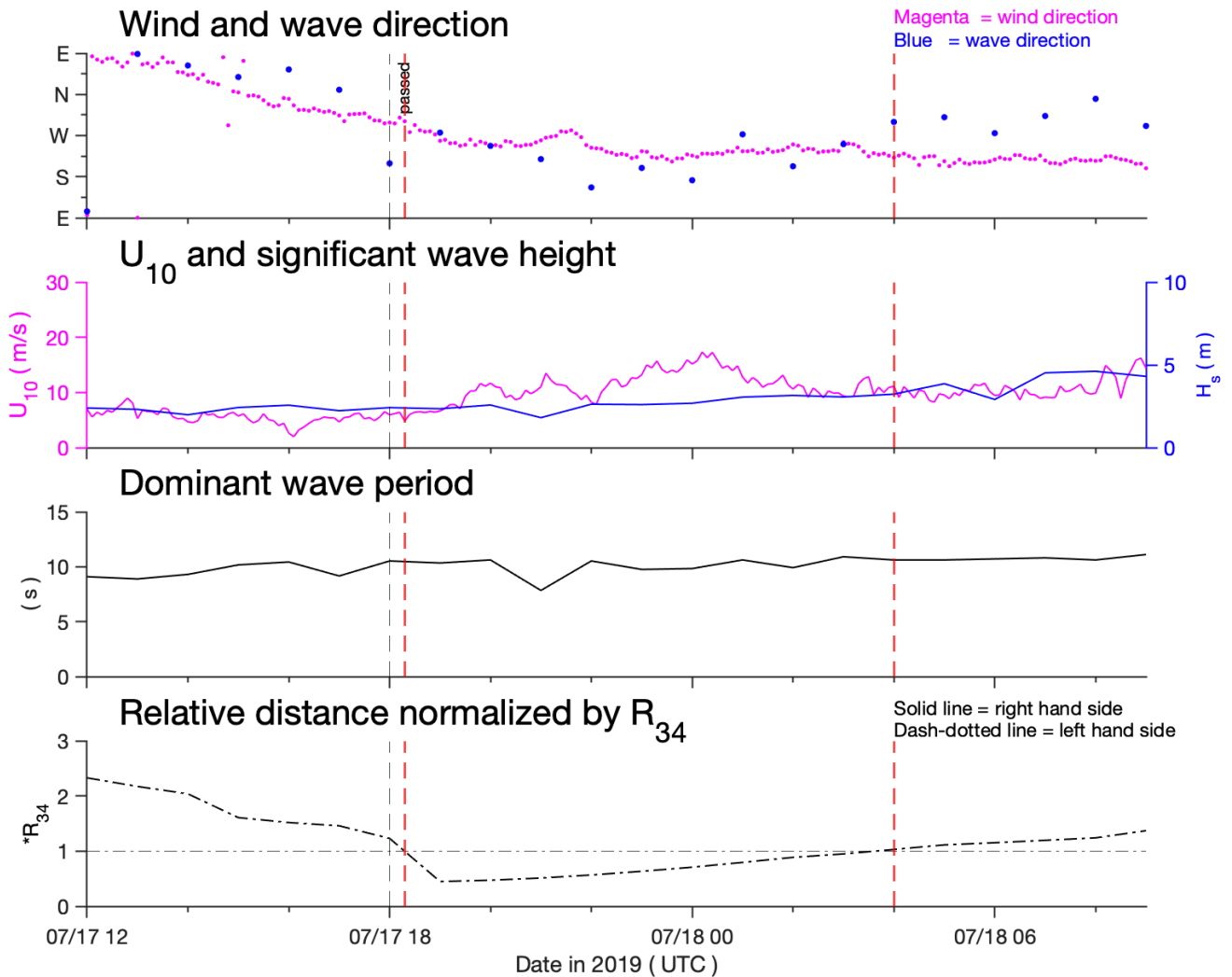


圖 4-1-8、由上而下分別為 2019 年丹娜絲颱風影響期間 NTU2 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。



4.1.2.2、利奇馬颱風

利奇馬颱風於 8 月 8 日最接近 NTU1 站，最近距離為 280 公里，此時 NTU1 站位於颱風左側，颱風移動速度約為 20 km/hr，颱風強度為 C4，該方位的八級暴風圈半徑約為 370 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-9。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-10。

利奇馬颱風雖為強颱，不過從圖 2-3-9 中能看出其結構的第二、三象限暴風圈半徑約差 1.7 倍，對於浮標與颱風的相對位置時序列來說，結構較不完整。從圖 4-1-9 中可看出，NTU1 站最初位於颱風左前方，並隨著颱風移動於其左後方離開暴風圈，最近距離為 $0.77R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 19 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的左側而呈現逆時針變化，其轉變角度為 150 度， U_{10max} 為 28 m/s。波浪方面浪向在 NTU1 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持一銳角差，颱風影響期間受強風作用也呈逆時針變化，轉變角度為 160 度，與風向變化一致。

因利奇馬颱風暴風圈左側外的區域有受其影響的雲系存在，NTU1 站則受到該雲系的影響。從圖 4-1-10 的方向時序列圖可發現，風向在進入暴風圈前已開始呈逆時針變化，並於暴風圈後半部邊緣轉向完成；主波方向方面可看到風向在轉向時，方向來源依舊保持東北方，進入暴風圈後 9 個小時後才快速呈逆時針轉變並與風向同向，轉向期間角度變動較大，可能受 NTU1 站位於八級暴風圈半徑邊緣所致，離開暴風圈後兩者皆保持同向。而波浪的週期在暴風圈內為 8 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-10 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在剛進入暴風圈時並無明顯成長，不過在暴風圈後半部快速成長，並出現最大值；浪高方面暴風圈內也無明顯成長，並於離開暴風圈後達最高值 5.5 m，兩者最大值的時間點有 22 個小時的時間差。

利奇馬颱風於 8 月 8 日最接近 NTU2 站，最近距離為 360 公里，此時 NTU2 站位於颱風左側，颱風移動速度約為 17 km/hr，颱風強度為 C4，該方位的八級暴風圈半徑約為 400 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-11。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-12。

NTU2 站與 NTU1 站位於颱風暴風圈同一側，而上述有提到，利奇馬對於浮標來說其結構較不完整，使浮標位在八級暴風圈內的時間較短，風浪的作用也較不顯著。從圖 4-1-11 中可看出，NTU2 站最初也位於颱風左前方，並隨著颱風移動於其左後方離開暴風圈，最近距離為 $0.88R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 7 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的左側而呈現逆時針變化，其轉變角度為 120 度， U_{10max} 為 25 m/s；波浪方面主波方向在 NTU2 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持一銳角差，颱風影響期間受強風作用也呈逆時針變化，轉變角度為 120 度，與風向變化一致。

從圖 4-1-12 的方向時序列圖可發現，與 NTU1 站不一樣的是，風向在進入颱風暴風圈前保持北風狀態，在浮標進入颱風第三象限後才開始明顯逆時針轉變，於離開暴風圈後轉向完成；主波方向方面可看到風向在轉向時，方向來源依舊保持北方，在風向開始轉變後 7 個小時後也開始轉向，不過在轉變時變動是比較大的，若從趨勢性來看，與風向變化是同向的，也於離開暴風圈後才轉向完成。而波浪的週期在暴風圈內為 9 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-12 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在暴風圈內時並無明顯成長，反而在離開暴風圈後出現最大值；浪高方面暴風圈內也無明顯成長，也於離開暴風圈後達最高值 5.2 m，兩者最大值的時間點有 7.5 個小時的時間差。

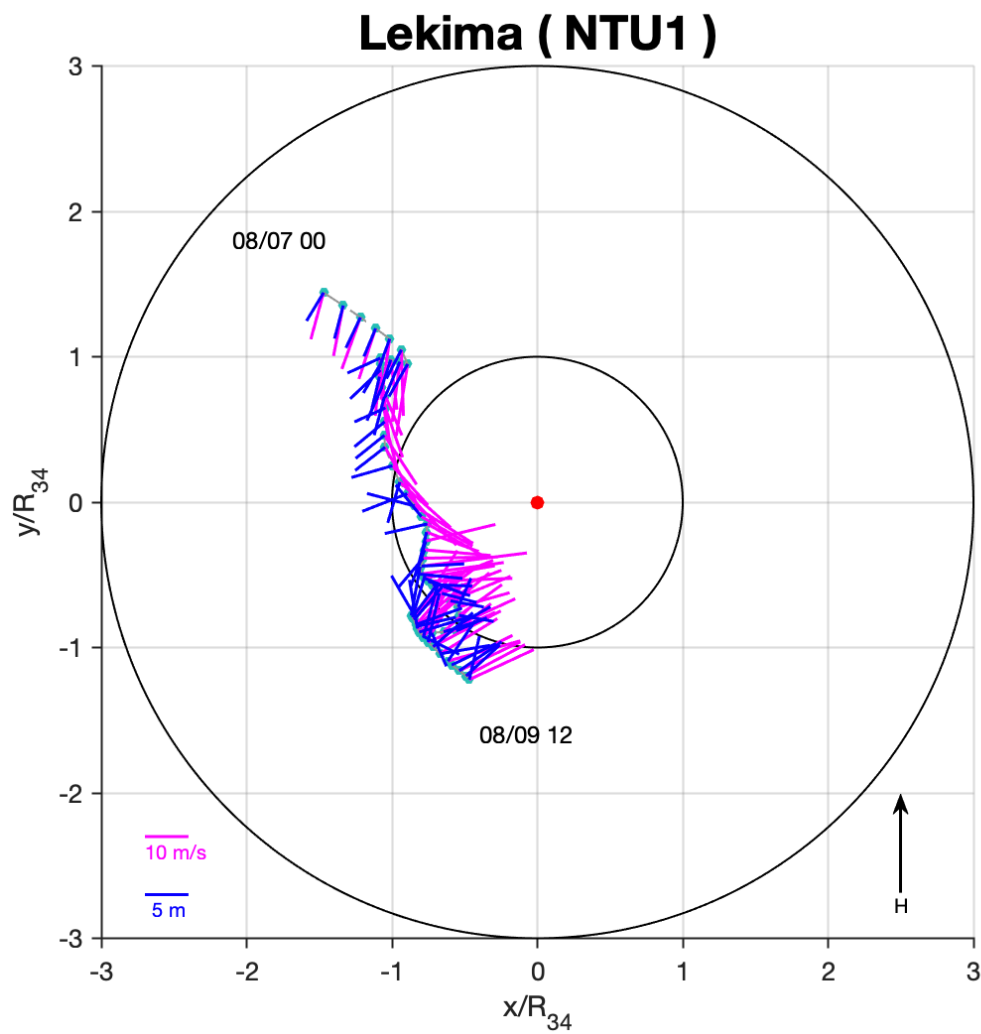


圖 4-1-9、為 2019 年利奇馬颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU1 站相對於利奇馬颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Lekima (NTU1)

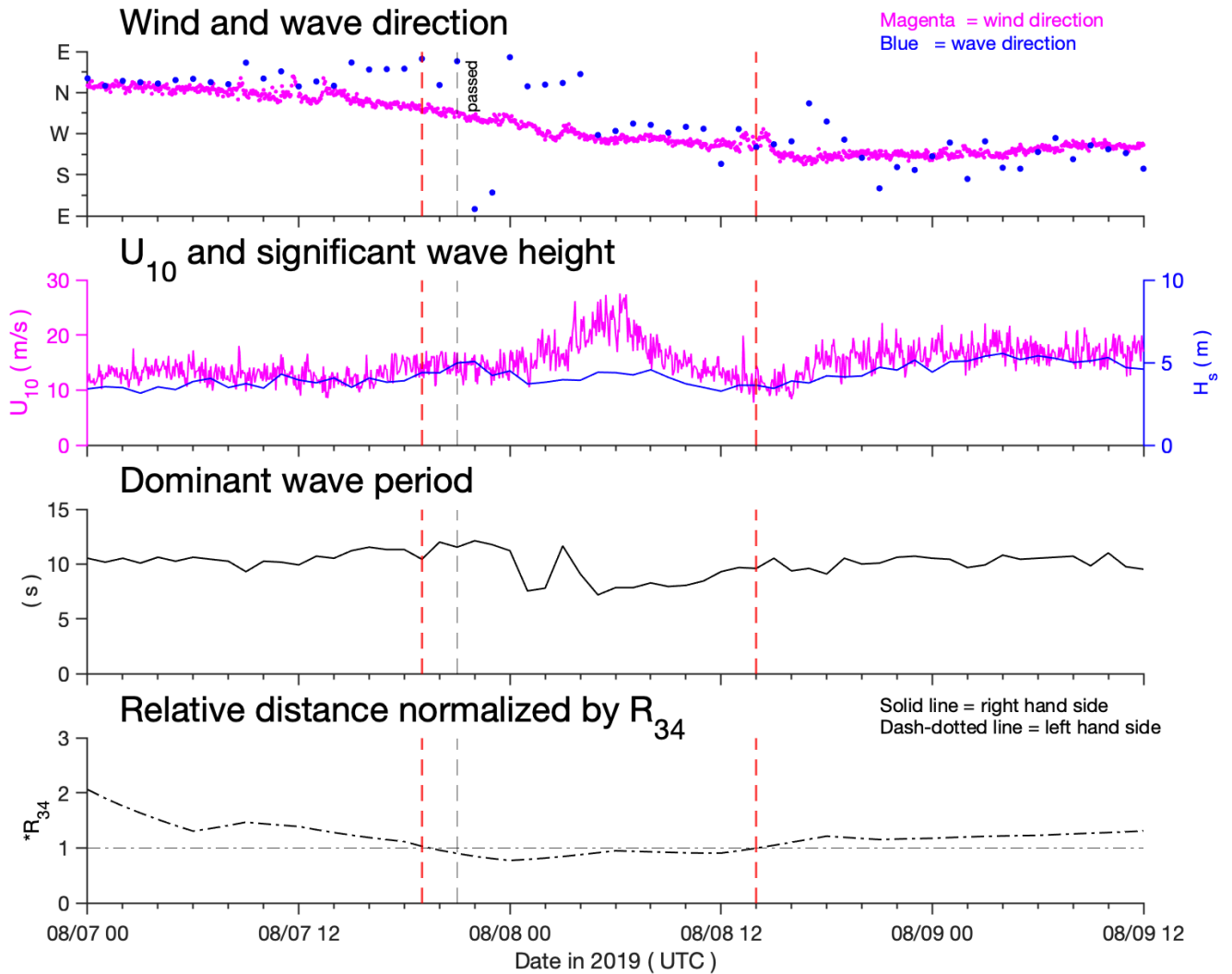


圖 4-1-10、由上而下分別為 2019 年利奇馬颱風影響期間 NTU1 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。

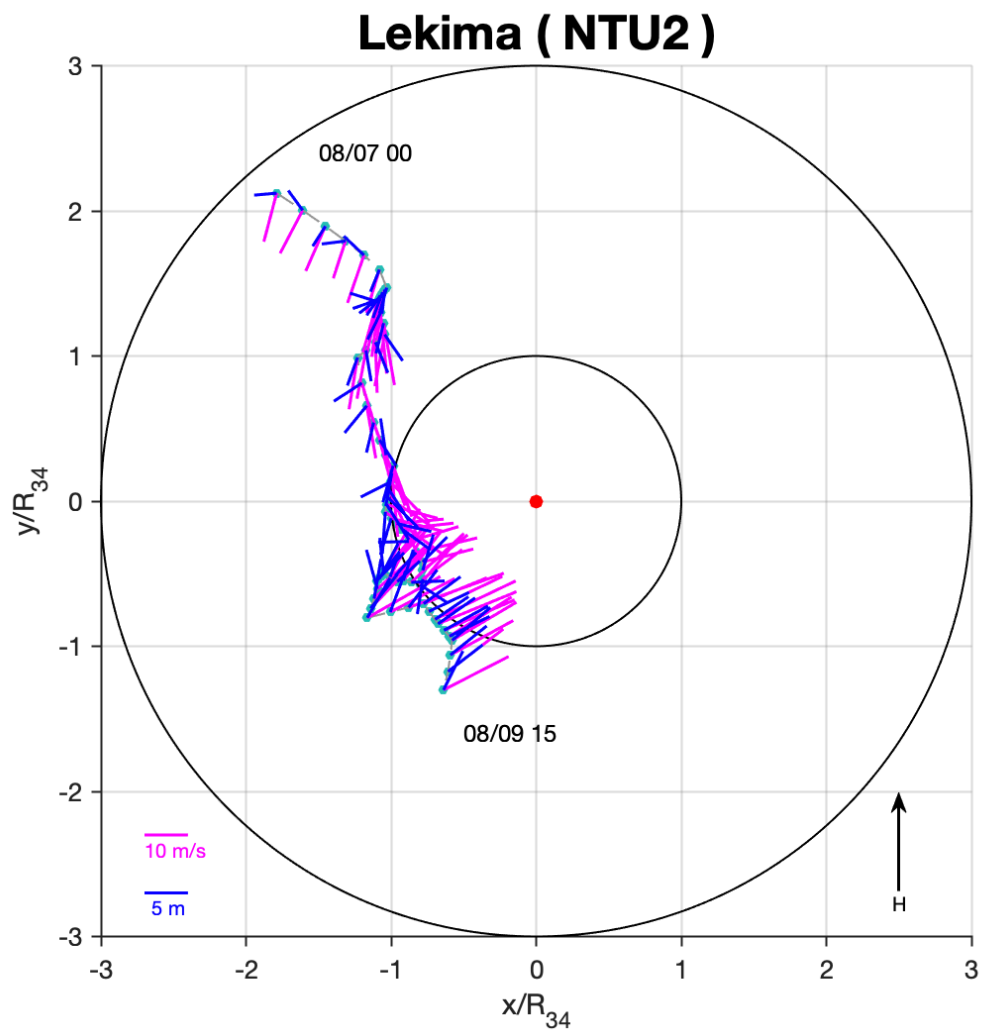


圖 4-1-11、為 2019 年利奇馬颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU2 站相對於利奇馬颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Lekima (NTU2)

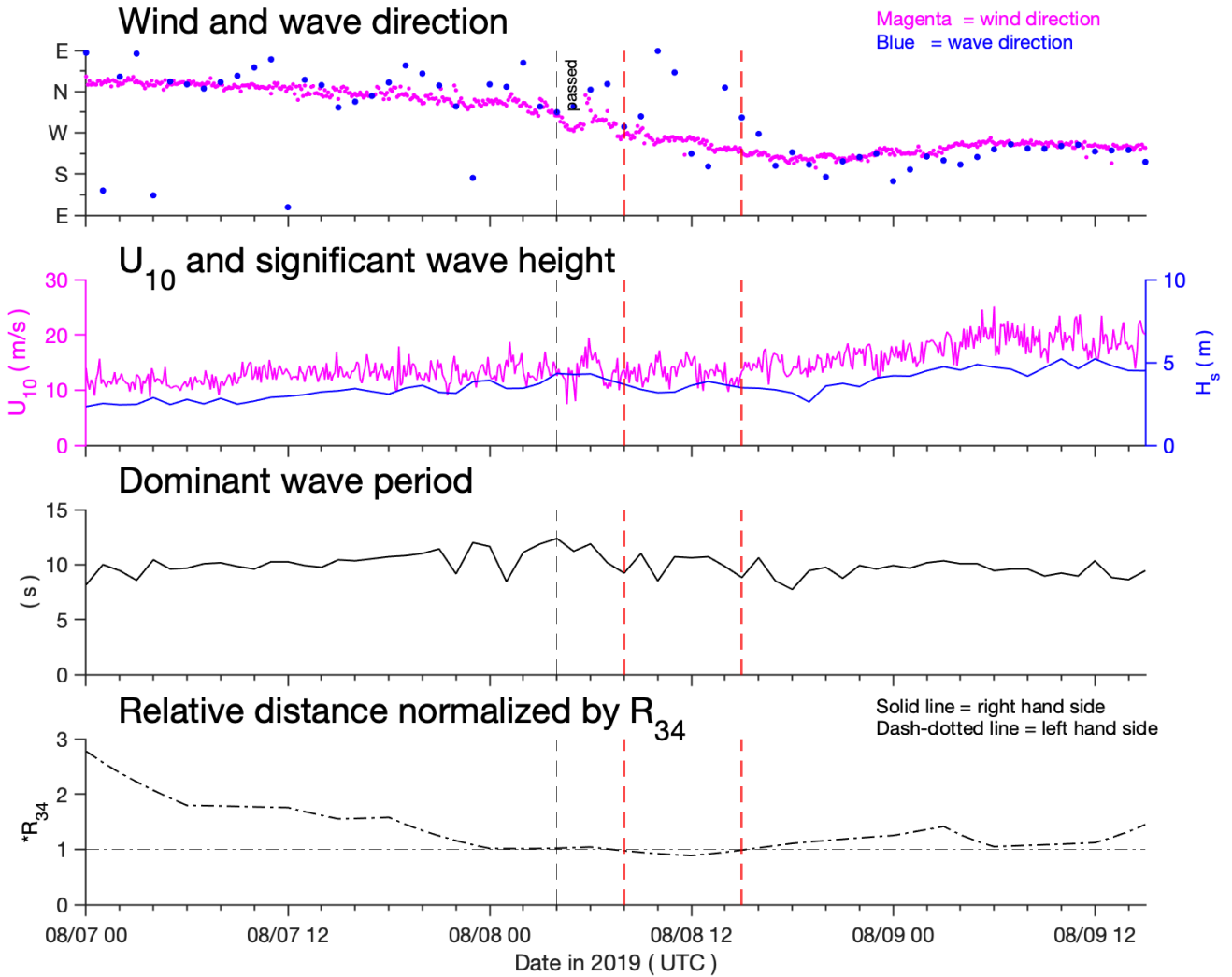


圖 4-1-12、由上而下分別為 2019 年利奇馬颱風影響期間 NTU2 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。



4.1.2.3、白鹿颱風

白鹿颱風於 8 月 23 日最接近 NTU1 站，最近距離為 80 公，此時 NTU1 站位於颱風右側，颱風移動速度約為 21 km/hr，颱風強度為 TS，該方位的八級暴風圈半徑約為 270 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-13。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-14。

白鹿颱風雖結構不太扎實，但其結構的暴風圈半徑是較為對稱的，從圖 4-1-13 中可看出，NTU1 站最初位於颱風右前方，並隨著颱風移動於其東南方離開暴風圈，最近距離為 $0.32R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 16 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的右側而呈順時針變化，其轉變角度為 120 度， $U_{10\max}$ 為 28 m/s。波浪方面主波方向在 NTU1 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持同向，颱風影響期間受強風作用也呈順時針變化，轉變角度為 90 度，與風向變化一致。

從圖 4-1-14 的方向時序列圖可發現，風向在進入暴風圈前為東北向，進入暴風圈後開始呈順時針轉變，並於暴風圈後半部轉向完成；主波方向方面可看到風向在轉向時，方向來源依舊保持東方，6 個小時後才開始呈順時針轉變，並於暴風圈後半部與風向保持一致。而波浪的週期在暴風圈內為 11 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-14 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在尚未進入暴風圈時已緩慢成長，在暴風圈前半部出現最大值，離開暴風圈後逐漸減弱；浪高方面也在進入暴風圈前受其影響而增高，於暴風圈前半部達最高值 6.6 m，兩者最大值的時間點有 2.5 個小時的時間差。

白鹿颱風於 8 月 24 日最接近 NTU2 站，最近距離為 90 公里，此時 NTU1 站位於颱風右側，颱風移動速度約為 24 km/hr，颱風強度為 TS，該方位的八級暴風圈半徑約為 310 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-15。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-16。

從圖 4-1-15 中可看出，NTU2 站與 NTU1 站一樣，皆位於颱風右側進入與離開，最近距離也差不多，為 $0.29R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 18 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的右側而呈現順時針變化，其轉變角度為 110 度， U_{10max} 為 30 m/s。波浪方面浪向在 NTU2 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持一銳角差，颱風影響期間受強風作用也呈順時針變化，轉變角度為 100 度，與風向變化保持一致。

從圖 4-1-16 的方向時序列圖可發現，風向在進入暴風圈前保持東北風，進入暴風圈後開始呈順時針轉變，並於暴風圈後半部轉向完成；主波方向方面可看到風向開始轉向時，方向來源還是維持東方，4 個小時後才開始呈順時針轉變，並於暴風圈後半部與風向保持一致。而波浪的週期在暴風圈內為 11 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-16 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在尚未進入暴風圈時已緩慢成長，在暴風圈後半部出現最大值；浪高方面也在進入暴風圈前受其影響而增高，於暴風圈前半部達最高值 7.7 m，兩者最大值的時間點有 2 個小時的時間差。

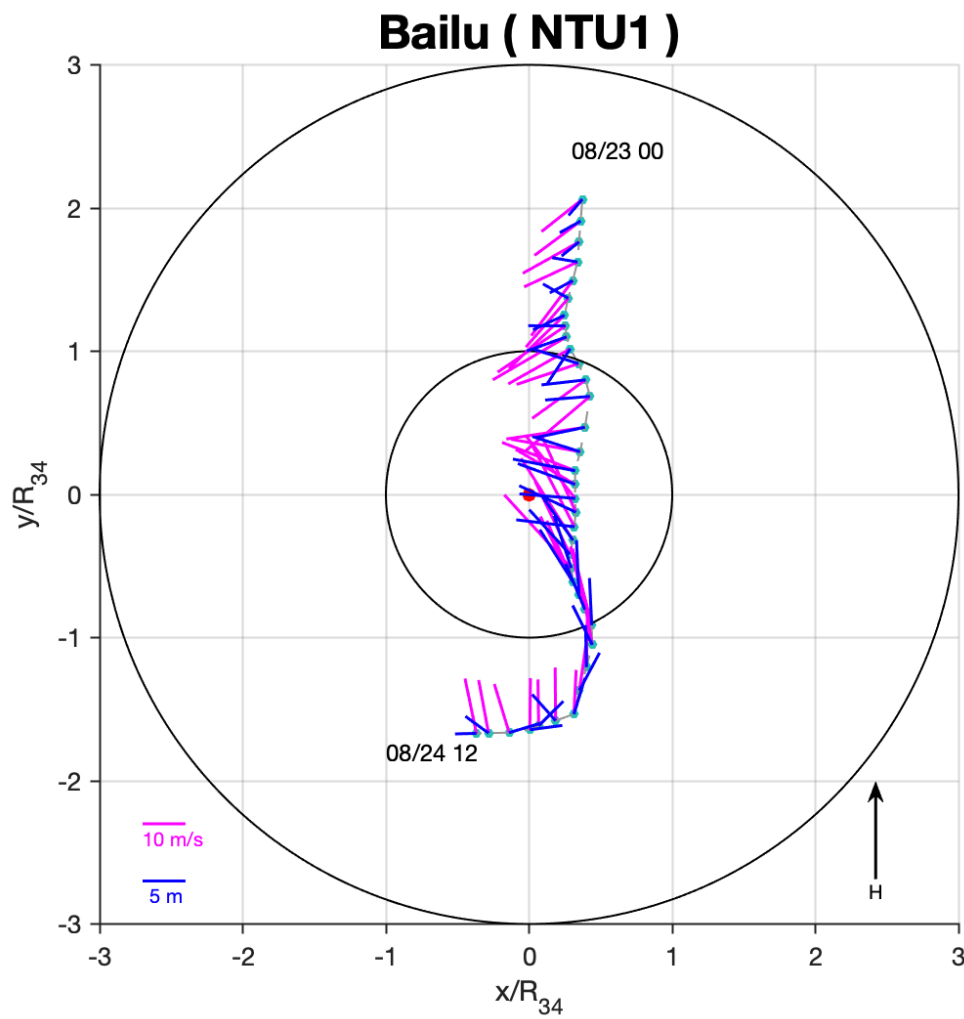


圖 4-1-13、為 2019 年白鹿颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU1 站相對於白鹿颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Bailu (NTU1)

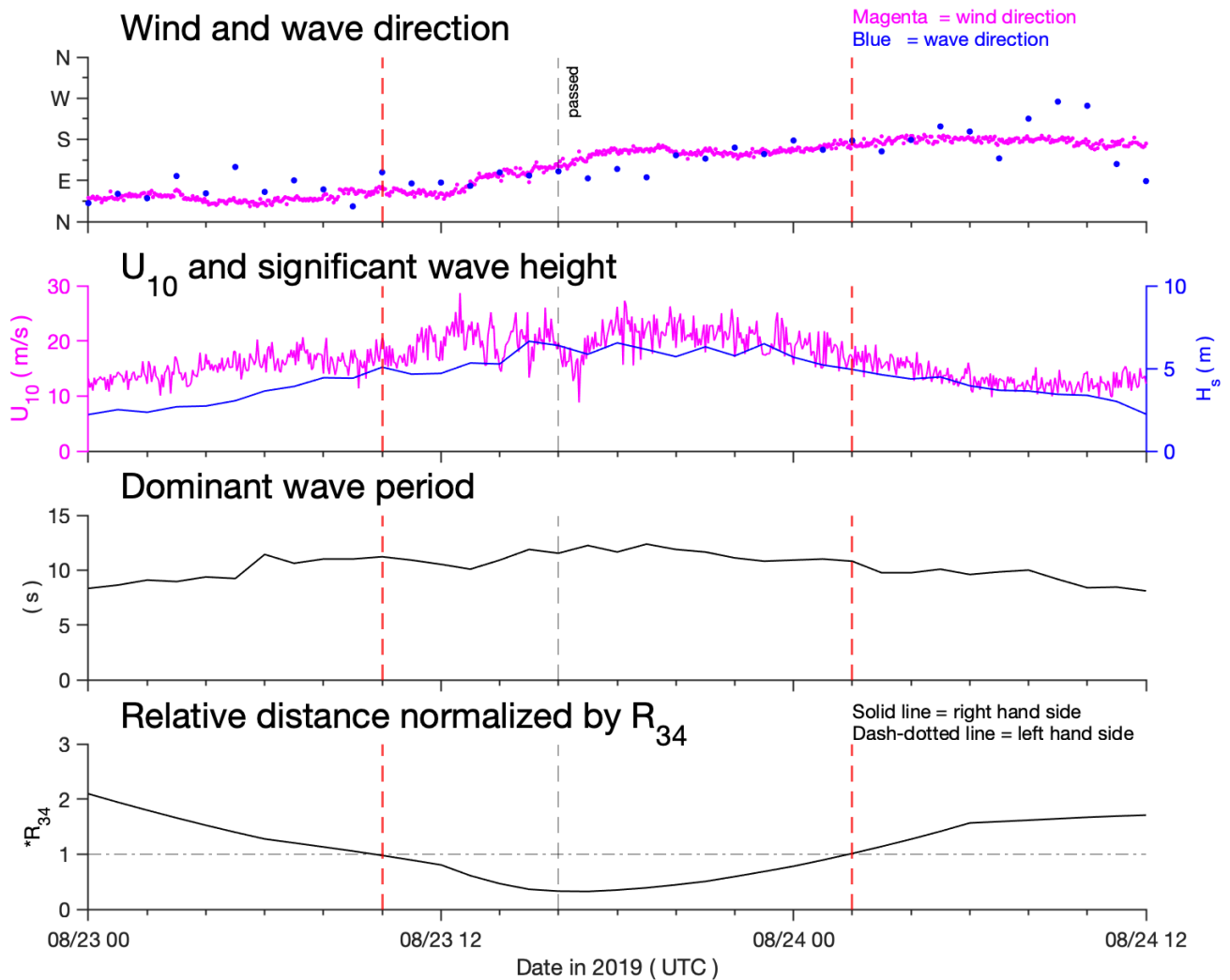


圖 4-1-14、由上而下分別為 2019 年白鹿颱風影響期間 NTU1 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。

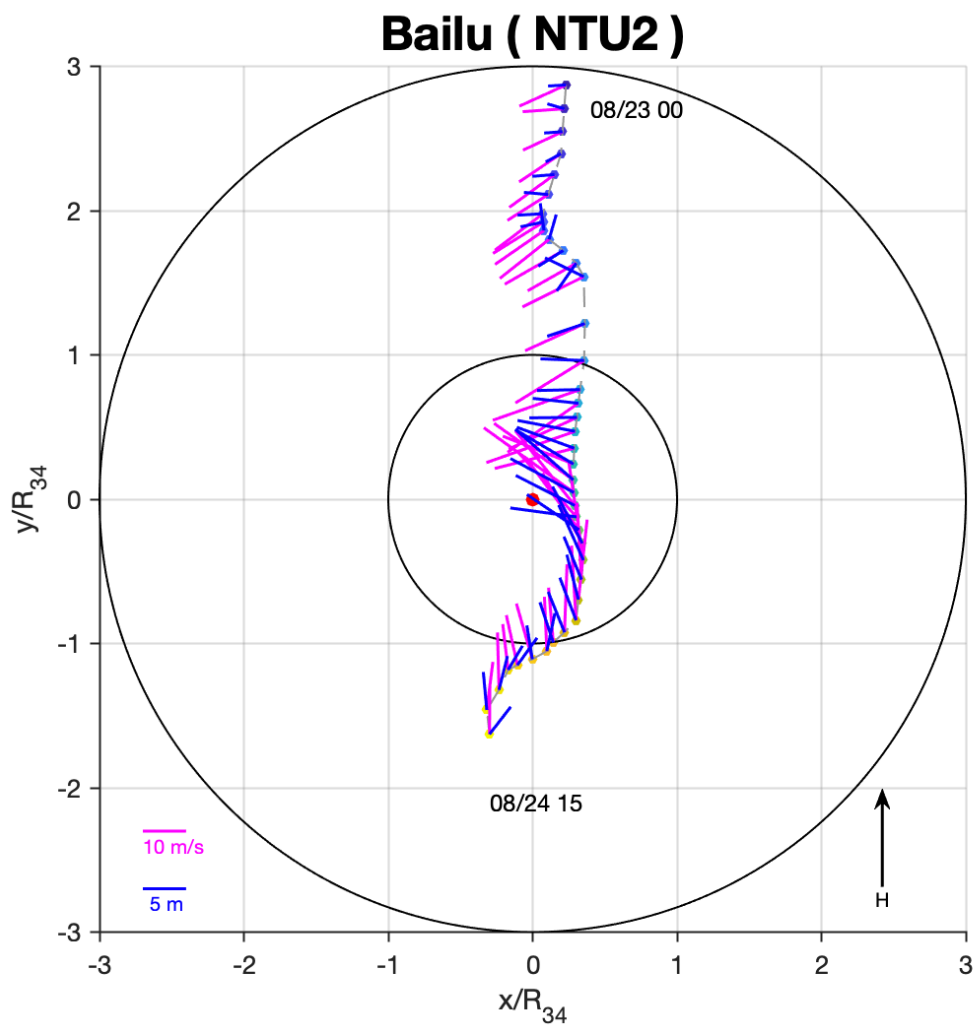


圖 4-1-15、為 2019 年白鹿颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU2 站相對於白鹿颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Bailu (NTU2)

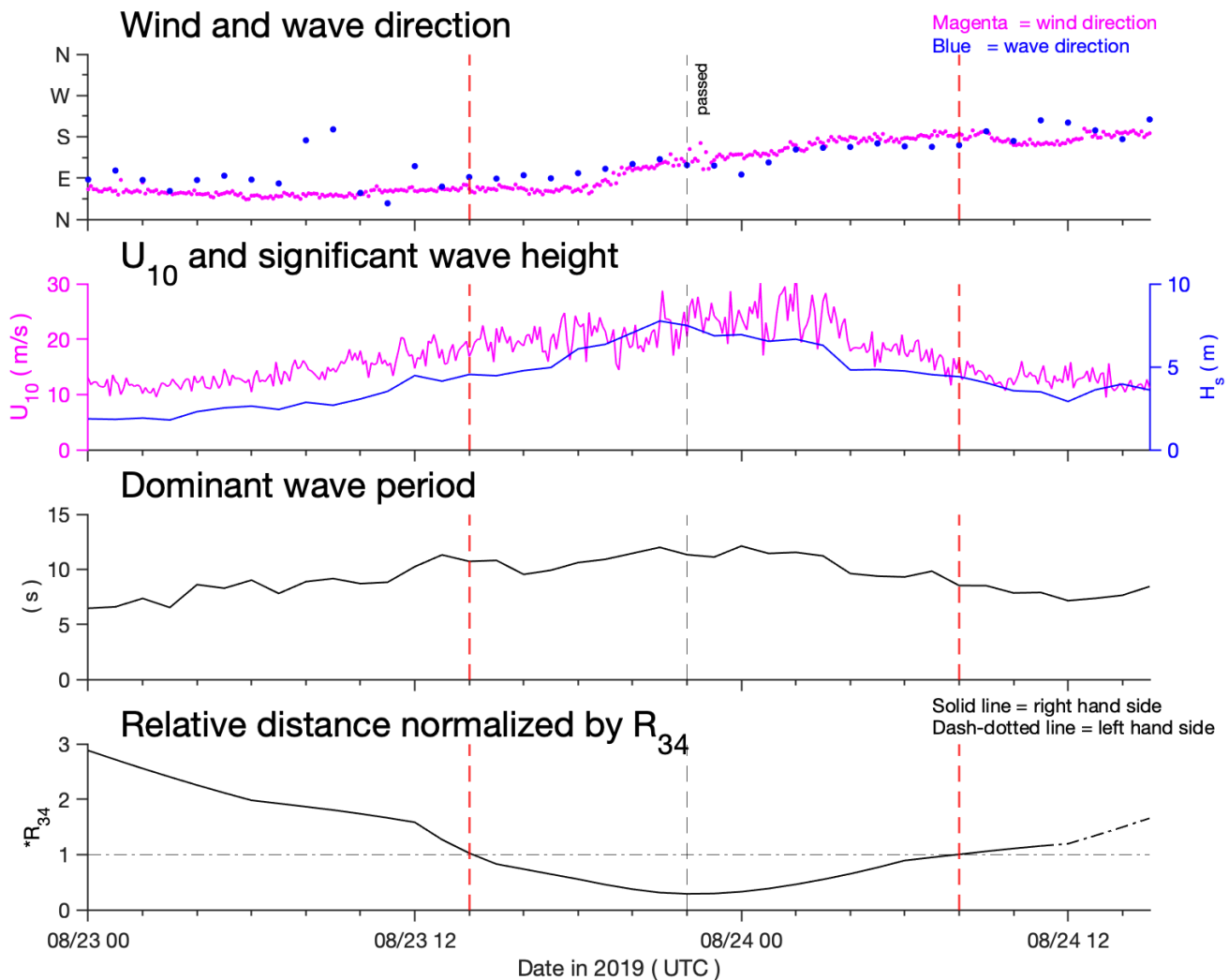


圖 4-1-16、由上而下分別為 2019 年白鹿颱風影響期間 NTU2 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。



4.1.2.4、玲玲颱風

因 NTU2 站在玲玲颱風影響期間並未進入其八級暴風圈半徑內，因此在此颱風個案中僅討論 NTU1 站的分析結果。

玲玲颱風於 9 月 3 日最接近 NTU1 站，最近距離為 20 公里，此時 NTU1 站位於颱風左側，颱風移動速度約為 10 km/hr，颱風強度為 C1，該方位的八級暴風圈半徑約為 150 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-17。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-18。

由於玲玲颱風本身移動速度較慢，並有轉彎的情形，因此 NTU1 站在八級暴風圈半徑內時已行經其第二、三、四象限，可從圖 4-1-17 中可看出；而 NTU1 站最初位於颱風右前方，並隨著颱風移動轉向後於其右後方離開暴風圈，最近距離為 $0.14R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 29 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的左側而呈現逆時針變化，其轉變角度為 180 度， U_{10max} 為 32 m/s。主波方向來源在進入暴風圈前呈東北向，與風向保持一銳角差，颱風影響期間受強風作用則呈順時針變化，轉變角度為 250 度，不過與風向變化方向不同。

從圖 4-1-18 的方向時序列圖可發現，風向在經過颱風前眼牆時呈快速逆時針轉變，並於離開颱風後眼牆時轉向完成；主波方向來源在暴風圈前半部皆維持東方，颱風經過浮標後在後颱風眼區呈快速順時針轉變，離開颱風眼區後就與風向保持一致，其原因有可能為波浪儀上方向能量波譜之判斷誤差，亦或是其他事件導致反方向的變化產生，需要其他更多資料來驗證。而波浪的週期在暴風圈內為 7 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-18 的風速與示性波高時序列圖可看出，颱風眼區可由風速較低的時間線看出，另外風速在暴風圈前半部時快速成長，並在該區域出現最大值，離開眼區後隨相對距離逐增而遞減；浪高方面則在尚未進入暴風圈時有顯著成長，於暴



風圈前半部達最高值，達到 5.8 m，不過在位於颱風眼區內時，因受低風速影響，浪高下降了約 3 m，離開眼區後上升至 2 m，並隨著颱風遠離後而緩慢遞減，兩者最大值的時間點有 2.5 個小時的時間差。

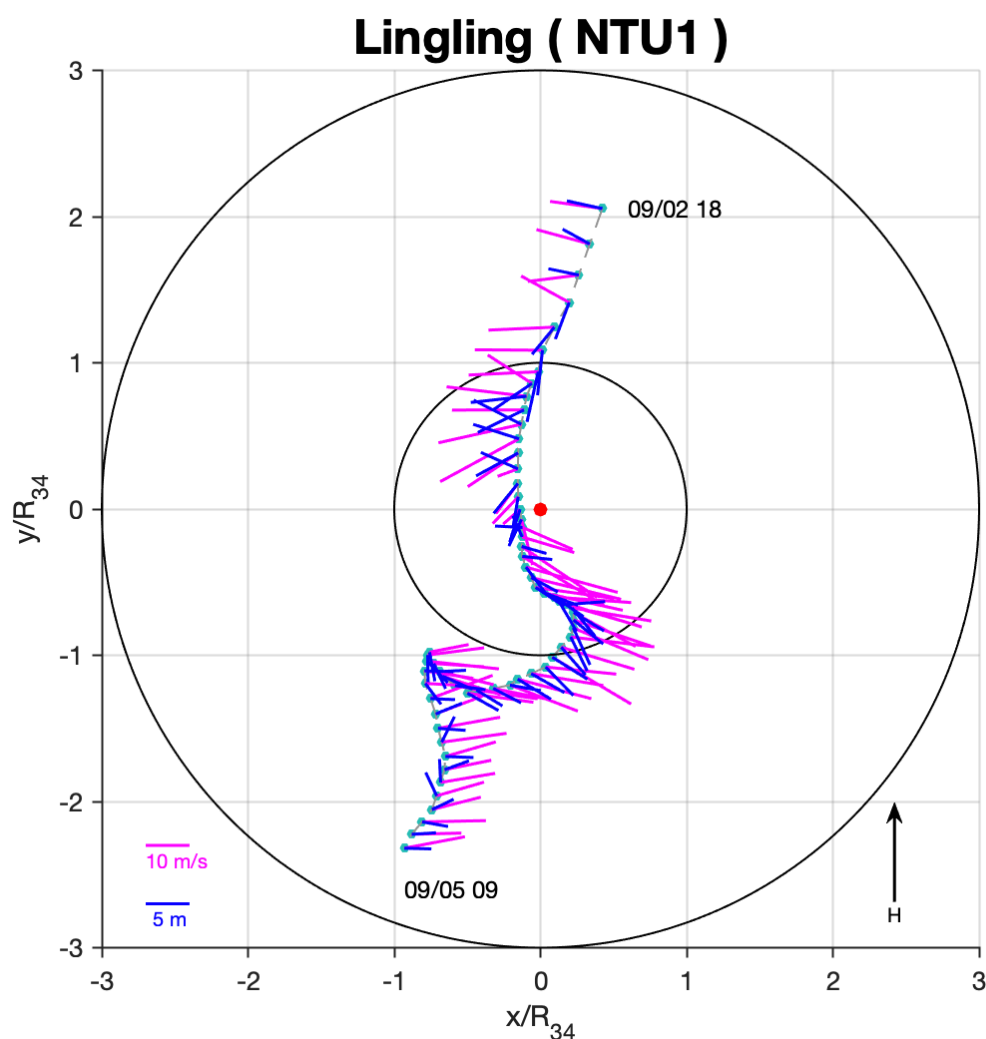


圖 4-1-17、為 2019 年玲玲颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU1 站相對於玲玲颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Lingling (NTU1)

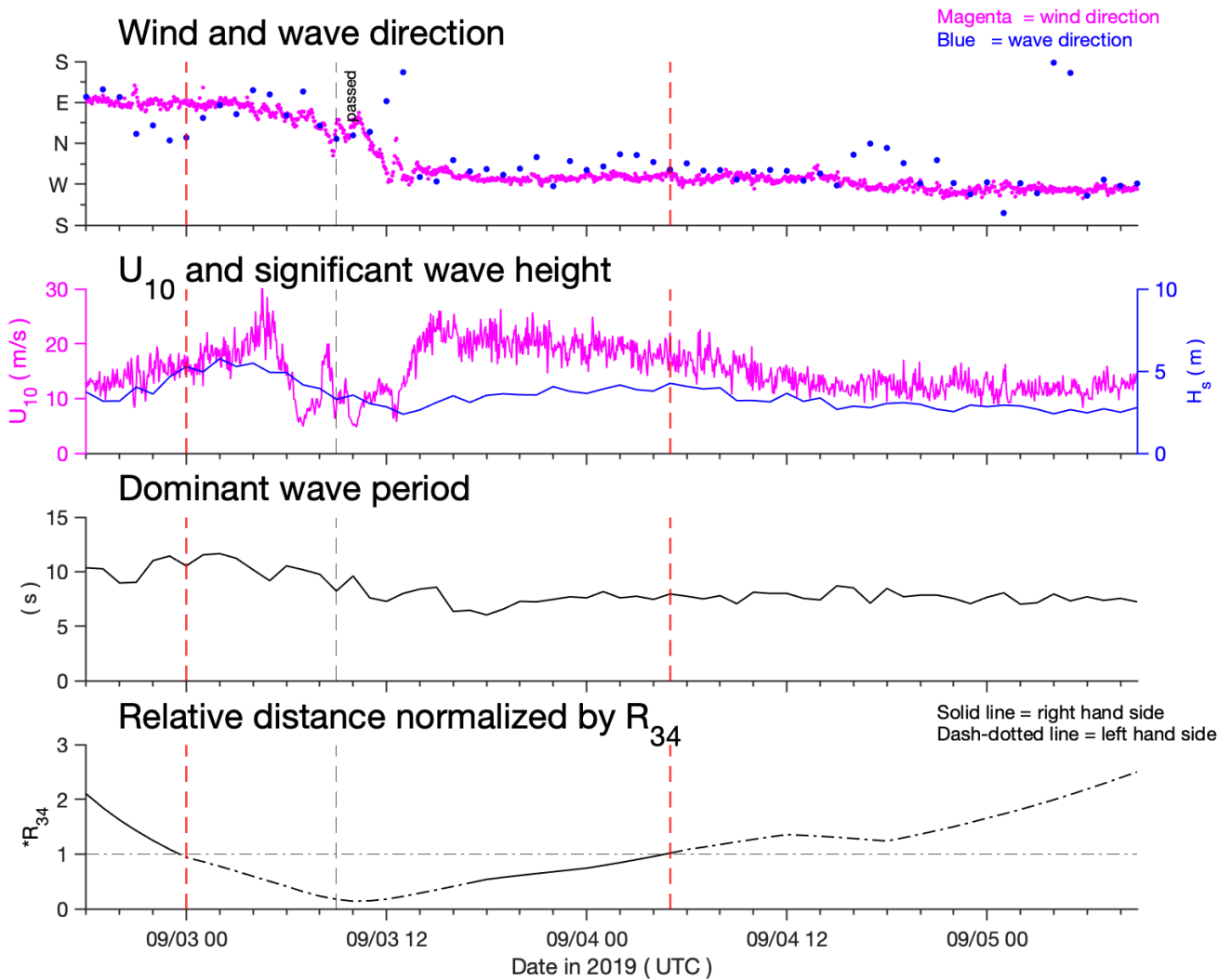


圖 4-1-18、由上而下分別為 2019 年玲玲颱風影響期間 NTU1 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。



4.1.2.5、米塔颱風

因米塔颱風影響期間時 NTU1 站已回收，因此在此颱風個案中僅討論 NTU2 站的分析結果。

米塔颱風於 9 月 3 日最接近 NTU2 站，最近距離為 60 公里，此時 NTU2 站位於颱風左側，颱風移動速度約為 20km/hr，颱風強度為 C1，該方位的八級暴風圈半徑約為 270 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-19。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-20。

米塔颱風的結構相對前面個案較扎實且對稱，從圖 4-1-19 可看出，NTU2 站最初位於颱風正前方偏左，並隨著颱風移動後於其左後方離開暴風圈，最近距離為 $0.17R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 21 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的左側而呈現逆時針變化，其轉變角度為 190 度， U_{10max} 為 32 m/s。波浪方面主波方向在 NTU2 站進入颱風八級暴風圈內前與風向已保持一致，呈東北方向；颱風影響期間受強風作用也呈逆時針變化，轉變角度為 170 度，與風向變化保持同向。

從米塔颱風的路徑圖可了解到，颱風為筆直朝著浮標前進，直到距離浮標 0.2 倍的八級暴風圈半徑後才右轉彎，從浮標的右側經過。而從圖 4-1-20 的方向時序列圖可發現，風向因上述原因呈穩定東北風，直到接近最近距離時才呈快速逆時針轉變，並於離開暴風圈後轉向完成；主波方向來源也與風向一致呈東北方，而在風向開始大幅轉向後 2 小時才開始呈逆時針變化，並於離開暴風圈後與風向保持同向。而波浪的週期在暴風圈內為 10 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-20 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在進入暴風圈前已緩慢增加，進入暴風圈後風速大幅增加，並在暴風圈後半部達到最大值，隨著颱風遠離後逐漸遞減；浪高方面在進入暴風圈前就受其影響而快速增高，並於暴風圈前半

部達最高值 7.7 m，不過颱風經過後降低約 3 m，此時風速才出現最大值，兩者最大值的時間點有 5.5 個小時的時間差。

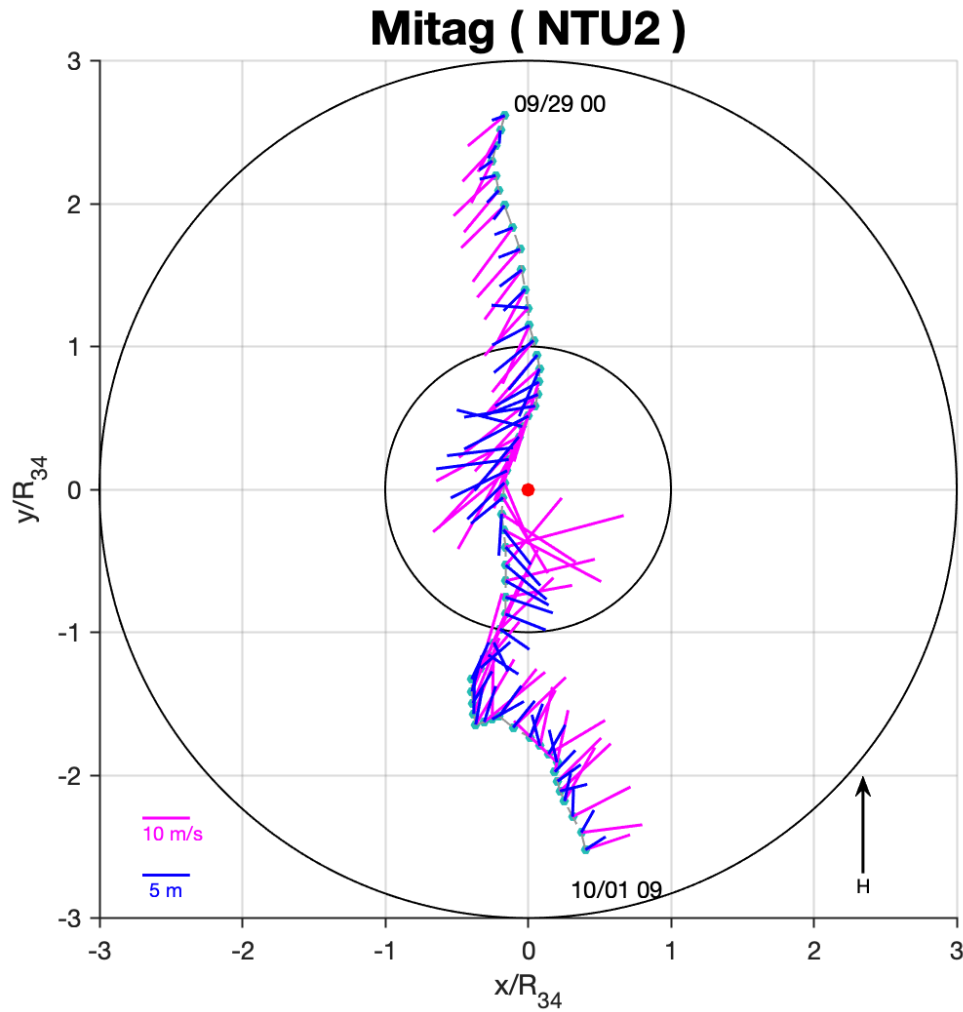


圖 4-1-19、為 2019 年米塔颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU2 站相對於米塔颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Mitag (NTU2)

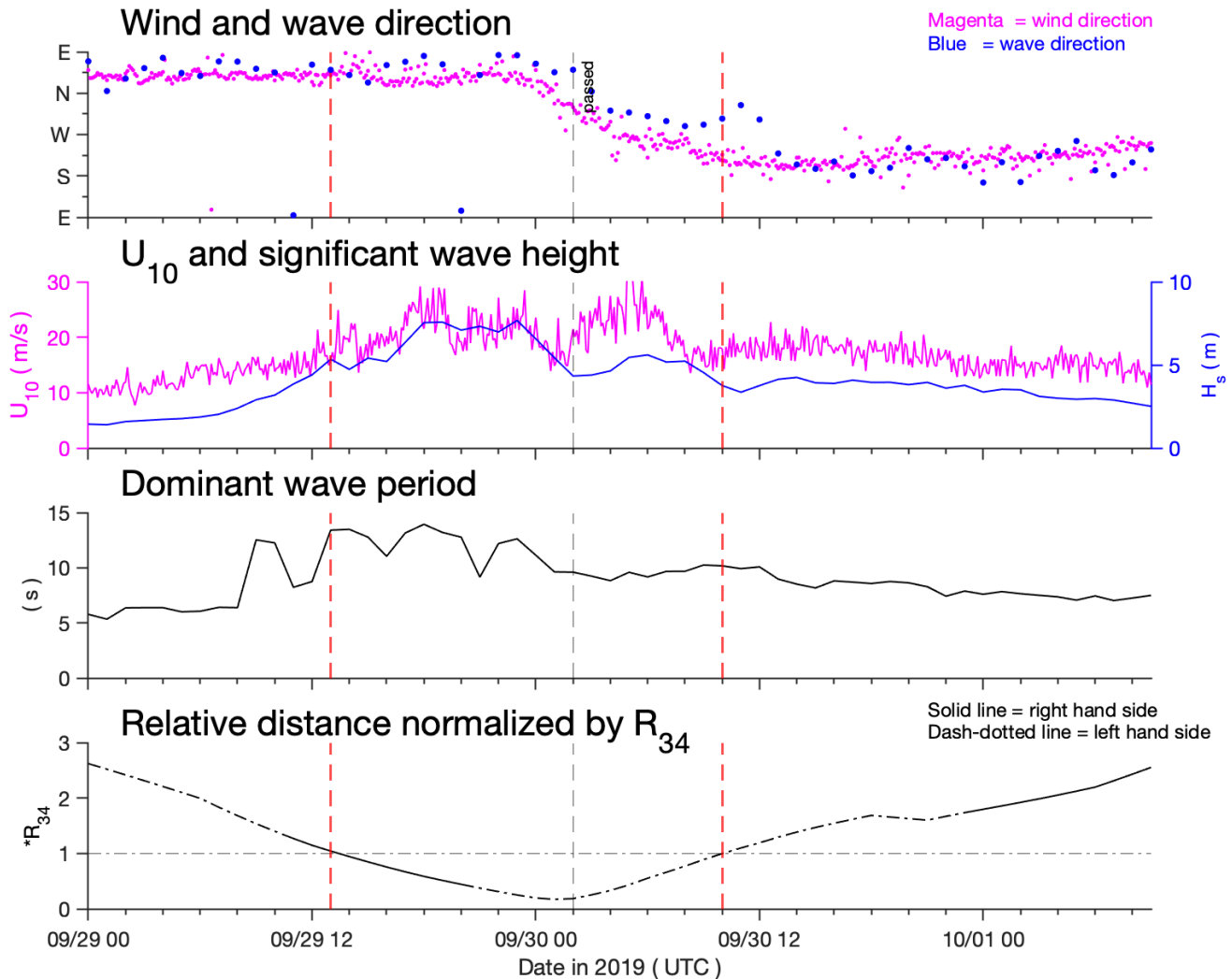


圖 4-1-20、由上而下分別為 2019 年米塔颱風影響期間 NTU2 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。



4.1.3、2020 年

4.1.3.1、閃電颱風

閃電颱風於 11 月 5 日最接近 NTU1 站，最近距離為 90 公里，此時 NTU1 站位於颱風右側，颱風移動速度約為 21 km/hr，颱風強度為 TS，該方位的八級暴風圈半徑約為 160 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-21。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-22。

閃電颱風整體結構雖不太對稱，不過浮標位於颱風的第一、二象限，而兩象限的半徑差距並不大，從圖 4-1-21 可看出，NTU1 站最初位於颱風右前方，並隨著颱風移動後於其右後方離開暴風圈，最近距離為 $0.42R_{34}$ ，位於八級暴風圈內時長為 21 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的右側而呈現順時針變化，其轉變角度為 130 度， U_{10max} 為 27 m/s；波浪方面主波方向在 NTU1 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持一致，颱風影響期間受強風作用也呈順時針變化，轉變角度為 100 度，與風向變化保持同向。

從圖 4-1-22 的方向時序列圖可發現，風向在靠近與進入暴風圈時皆保持東北方，並在暴風圈前後半部交界呈順時針轉變，最後於離開暴風圈時轉向完成；主波方向來源在尚未進入暴風圈時與風向皆為東北方，而在 11 月 5 日 1 時即開始緩慢呈順時針變化並於暴風圈後半部與風向保持同向。而波浪的週期在暴風圈內為 10 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-22 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在進入暴風圈前半部並無太大的成長變化，不過隨著相對距離減少而逐增，並在暴風圈前後半部交界達到最大值；浪高方面也在進入暴風圈前就受強風作用而緩慢增高，也在暴風圈前後半部交界達到最高值 6.6 m，兩者最大值的時間點有 0.5 個小時的時間差。

閃電颱風於 11 月 6 日最靠近 NTU2 站，最近距離為 120 公里，此時 NTU2 站位於颱風右側，颱風移動速度約為 24 km/hr，颱風強度為 TS，該方位的八級暴風圈半徑約為 160 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-23。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-24。

從圖 4-1-23 可看出，NTU2 站最初位於颱風右前方，並隨著颱風移動後於其右後方離開暴風圈，最近距離為 $0.86R_{34}$ ，位於八級暴風圈內時長為 9 個小時。風矢方面因浮標位於颱風的右側而呈現順時針變化，其轉變角度為 70 度， U_{10max} 為 20 m/s。波浪方面主波方向在 NTU2 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持一致，颱風影響期間受強風作用也呈順時針變化，轉變角度為 60 度，與風向變化保持同向。

從圖 4-1-24 的方向時序列圖可發現，風向在進入暴風圈前皆保持東北方，並暴風圈前半部時開始呈順時針轉變，離開暴風圈後才轉向完成；主波方向來源在進入暴風圈前皆保持一致，方向為東北方，不過在 11 月 5 日 10 時即開始呈順時針變化，並於離開暴風圈後與風向保持同向。而波浪的週期在暴風圈內為 10 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-24 的風速與示性波高時序列圖可看出，因浮標位於颱風暴風圈半徑的邊緣，導致風速在進入暴風圈後並無太大的成長，而在剛進入暴風圈前半部時達到最大值；浪高方面也在進入暴風圈前就受強風作用而緩慢增高，在暴風圈前半部達到最高值 5.1 m，兩者最大值的時間點有 3 個小時的時間差。

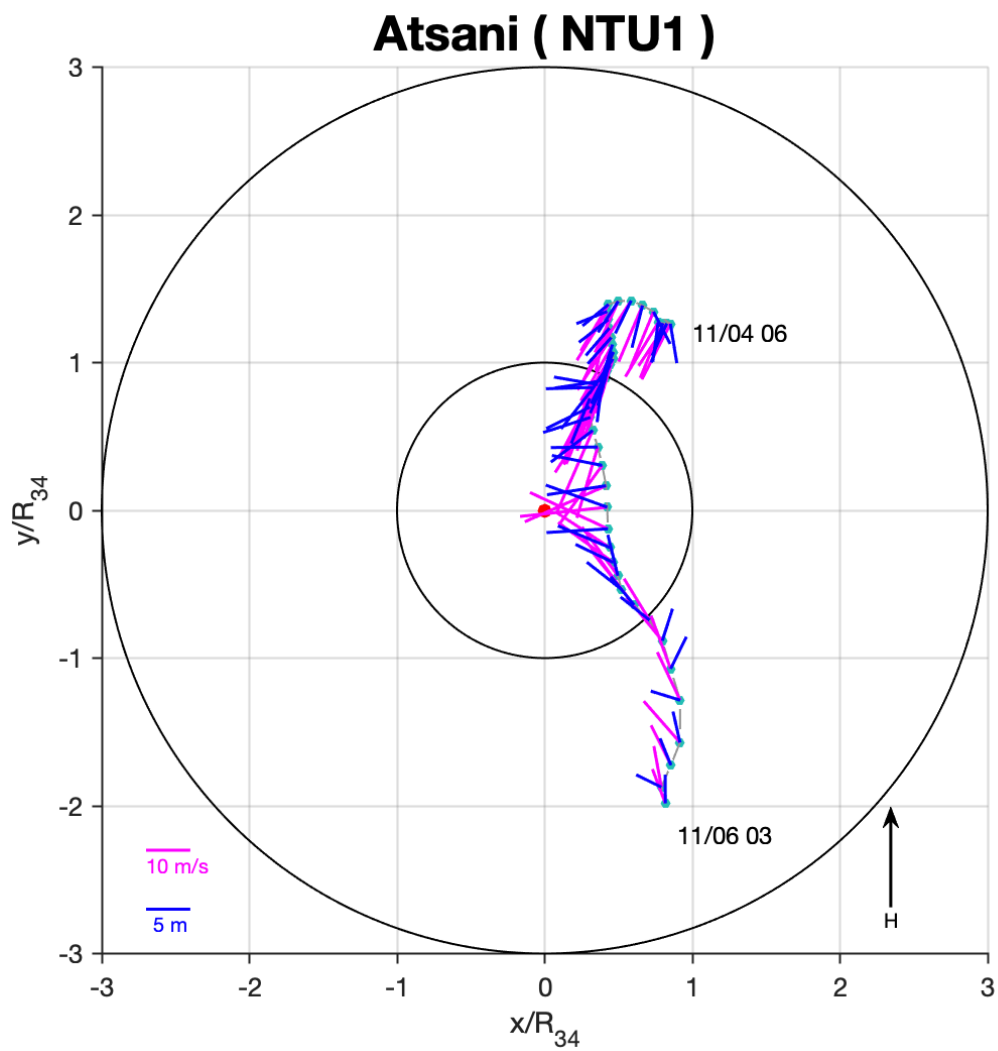


圖 4-1-21、為 2020 年閃電颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU1 站相對於閃電颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Atsani (NTU1)

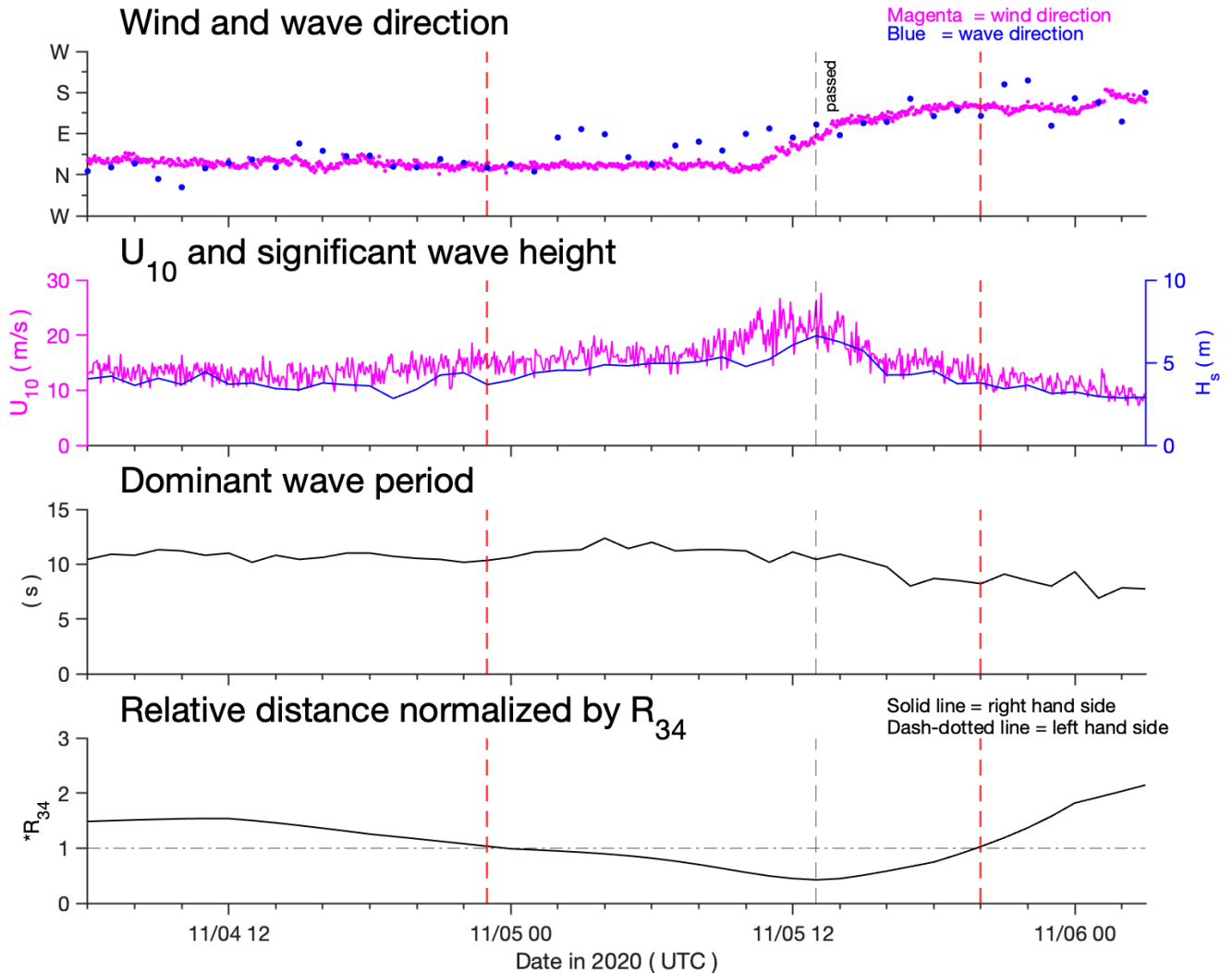


圖 4-1-22、由上而下分別為 2020 年閃電颱風影響期間 NTU1 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。

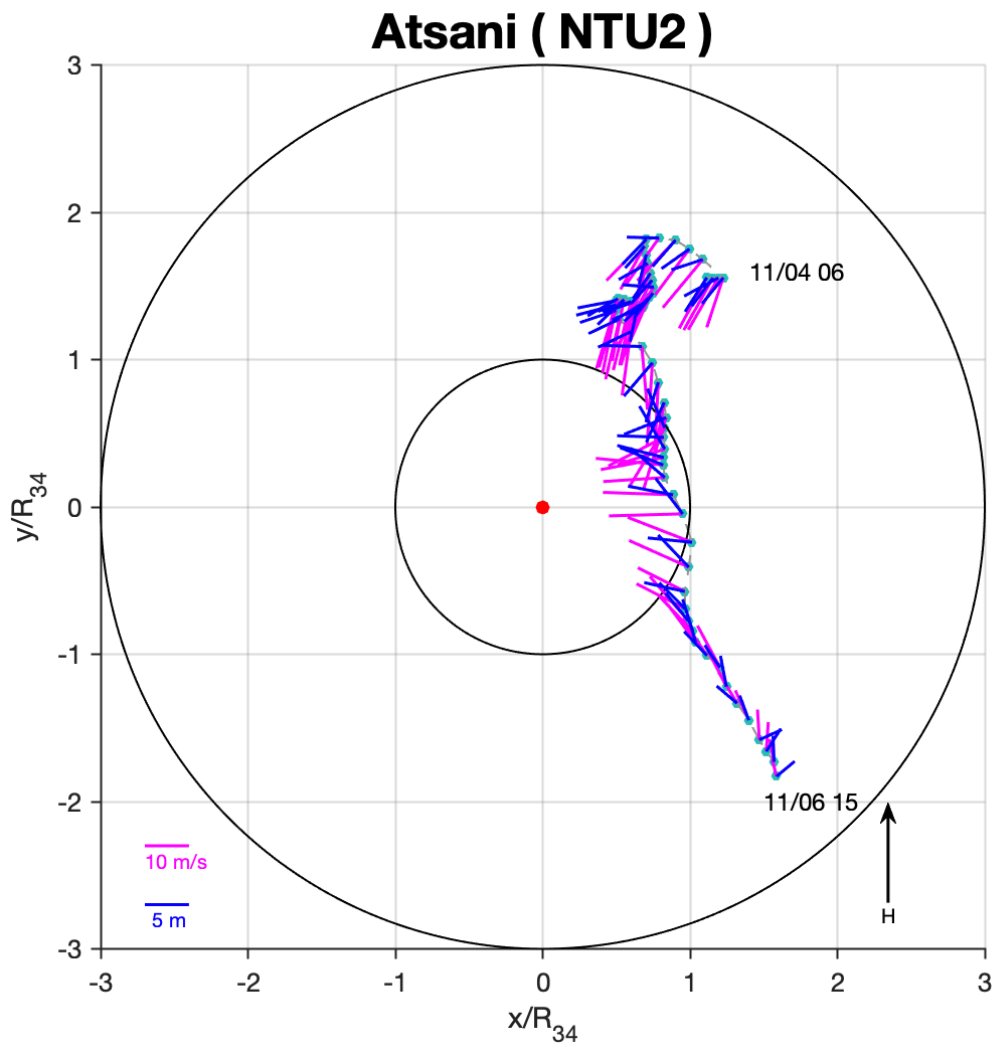


圖 4-1-23、為 2020 年閃電颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU2 站相對於閃電颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Atsani (NTU2)

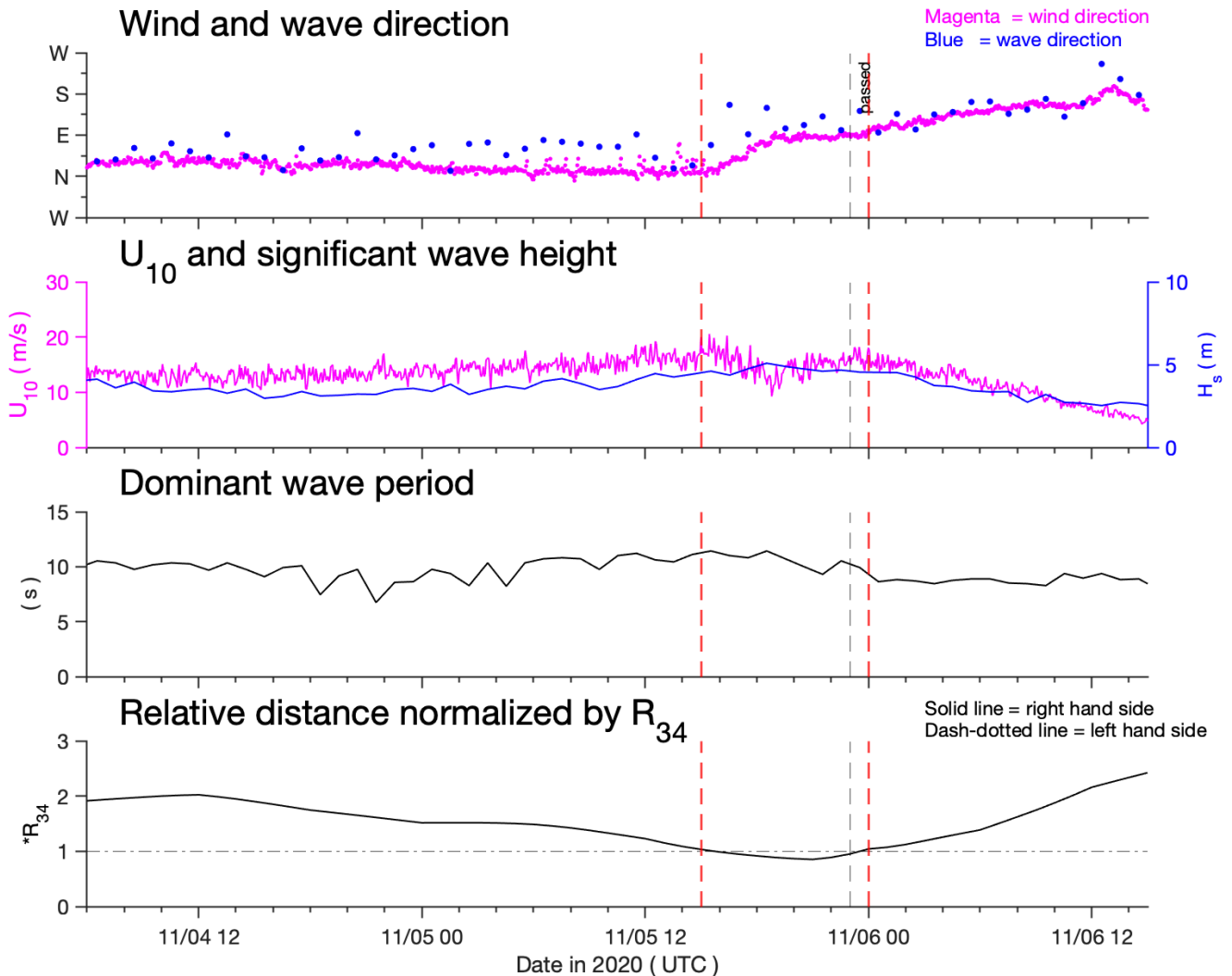


圖 4-1-24、由上而下分別為 2020 年閃電颱風影響期間 NTU2 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。



4.1.4、2021 年

4.1.4.1、璨樹颱風

璨樹颱風於 9 月 11 日最接近 NTU1 站，最近距離為 220 公里，此時 NTU1 站位於颱風右側，颱風移動速度約為 17 km/hr，颱風強度為 C4，該方位的八級暴風圈半徑約為 260 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-25。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-26。

璨樹颱風為高強度且結構較扎實對稱的個案，並有持續轉彎的情形，從圖 4-1-25 可看出，NTU1 站最初位於颱風右前方，並隨著颱風移動後於其右後方離開暴風圈，最近距離為 $0.87R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 20 個小時。風速與風向方面因浮標位於颱風的右側而呈現順時針變化，其轉變角度為 60 度， U_{10max} 為 25 m/s。波浪方面主波方向在 NTU1 站進入颱風八級暴風圈內前較不穩定，不過在颱風影響期間受強風作用也呈順時針變化，轉變角度為 90 度，與風向變化保持同向。

從圖 4-1-26 的方向時序列圖可發現，因為相對距離遠，方向的轉變角度並不大，風向在進入暴風圈前皆保持一致，方向為東南方，進入暴風圈後開始緩慢呈順時針轉變，並於離開暴風圈時轉向完成；主波方向在尚未進入暴風圈時並不一致；可能受到海表渦流的擾動影響，不過進入暴風圈後因受強風作用所影響，並於離開暴風圈後與風向保持一致。而波浪的週期在暴風圈內為 10 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-26 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在尚未進入暴風圈時已快速成長，而進入暴風圈後保持高風速狀態，並在暴風圈前半部達到最大值；浪高方面也在進入暴風圈前就受強風作用而增高，並在暴風圈前半部達到最高值 6 m，兩者最大值的時間點有 3.5 個小時的時間差。

璨樹颱風於 9 月 11 日最靠近 NTU2 站，最近距離為 80 公里，此時 NTU2 站位於颱風右側，颱風移動速度約為 17 km/hr，颱風強度為 C4，該方位的八級暴風圈半徑約為 250 公里。根據圖 4-1-1 方法將風與浪向量配合浮標之相對位置變化圖繪製於圖 4-1-27。另以時間序列圖搭配波浪儀的主導波浪週期繪製於圖 4-1-28。

從圖 4-1-27 可看出，NTU2 站最初位於颱風右前方，並隨著颱風移動後於其右後方離開暴風圈，最近距離為 $0.3R_{34}$ ，位於颱風八級暴風圈內時間為 31 個小時。風速與風向方面因浮標位於颱風的右側而呈現順時針變化，其轉變角度為 120 度， U_{10max} 為 34 m/s。波浪方面主波方向在 NTU2 站進入颱風八級暴風圈內前與風向保持一致，颱風影響期間受強風作用也呈順時針變化，轉變角度為 110 度，與風向變化保持同向。

從圖 4-1-28 的方向時序列圖可發現，因相對距離近，風向在進入暴風圈後開始緩慢轉向，並於暴風圈後半部轉向完成，轉變方向為順時針；主波方向在進入暴風圈後受強風影響也隨著風向同步轉向，並於暴風圈後半部與風向保持同向。而波浪的週期在暴風圈內為 10 秒，颱風期間為風浪所主導。

另從圖 4-1-28 的風速與示性波高時序列圖可看出，風速在進入暴風圈前保持一定速度，而進入暴風圈後呈現快速成長，並在前眼牆區達到風速最大值，離開眼牆區後風速稍減弱；浪高方面也在進入暴風圈後就受強風作用而增高，並在暴風圈前半部達到最高值，達到 8 m，離開後眼牆區隨風速減弱而下降，兩者最大值的時間點有 2 個小時的時間差。

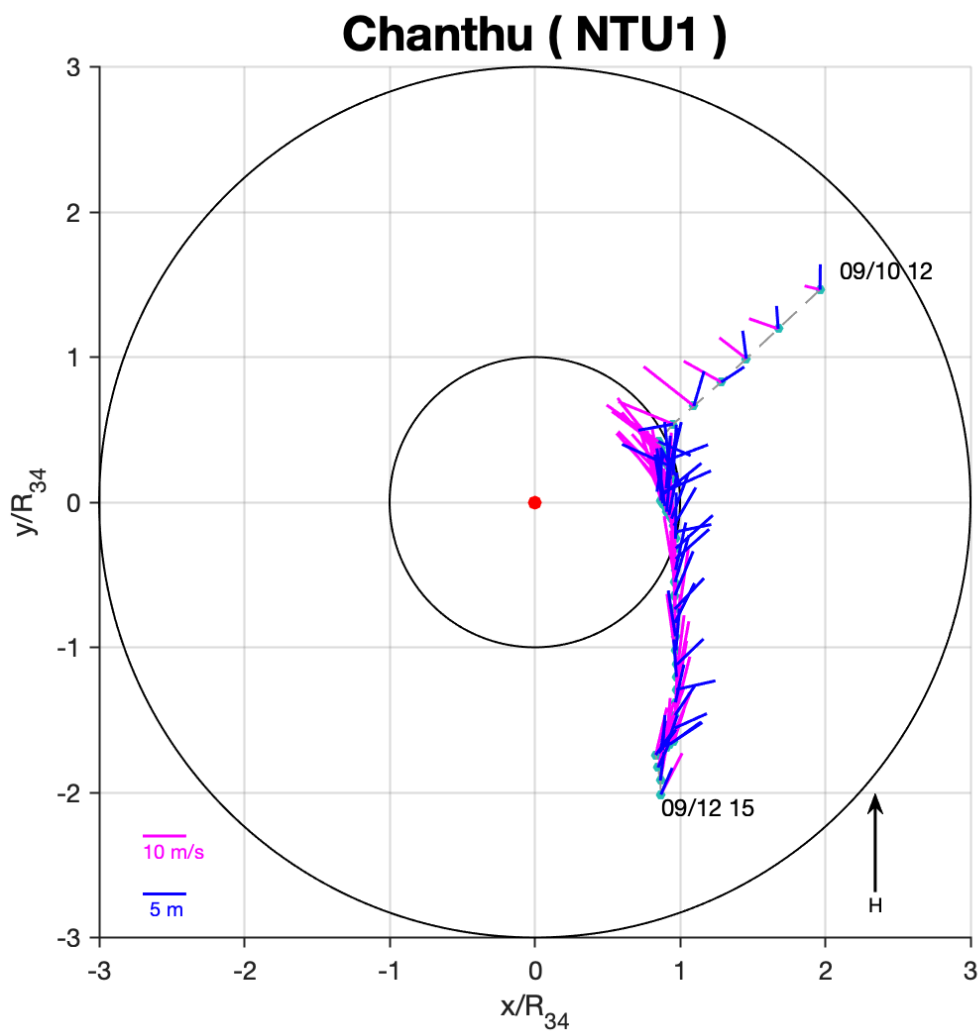


圖 4-1-25、為 2021 年璨樹颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU1 站相對於璨樹颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Chanthu (NTU1)

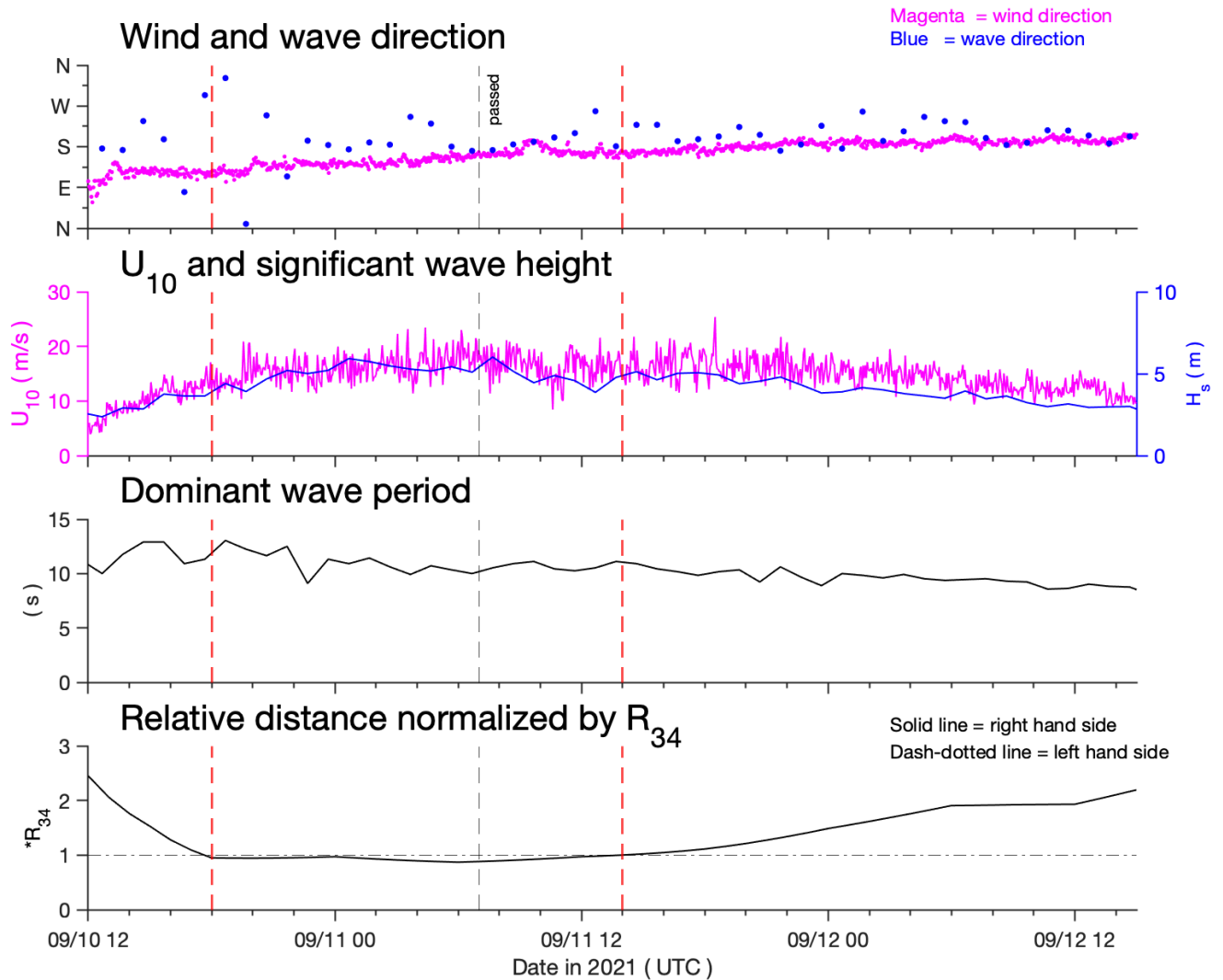


圖 4-1-26、由上而下分別為 2021 年璨樹颱風影響期間 NTU1 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。

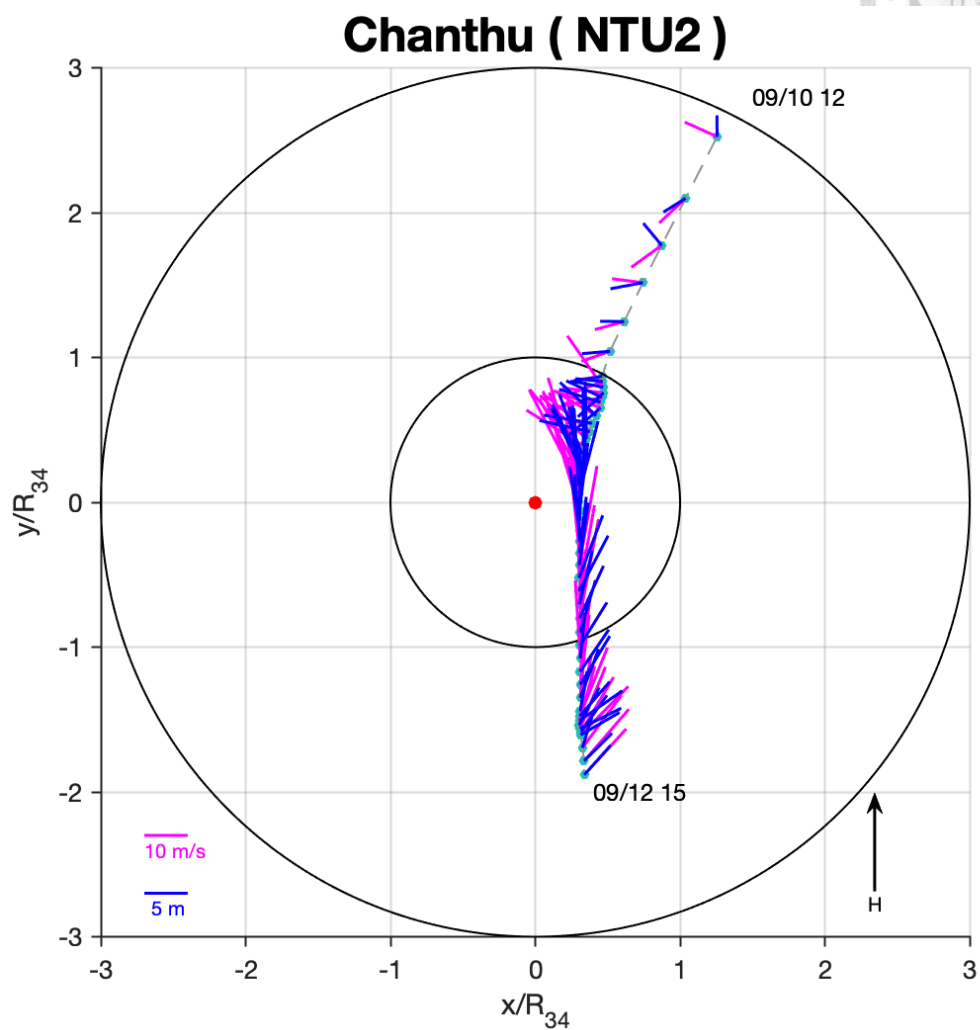


圖 4-1-27、為 2021 年璨樹颱風期間風浪變化圖；各點位代表 NTU2 站相對於璨樹颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；圖說同圖 4-1-1。



Chanthu (NTU2)

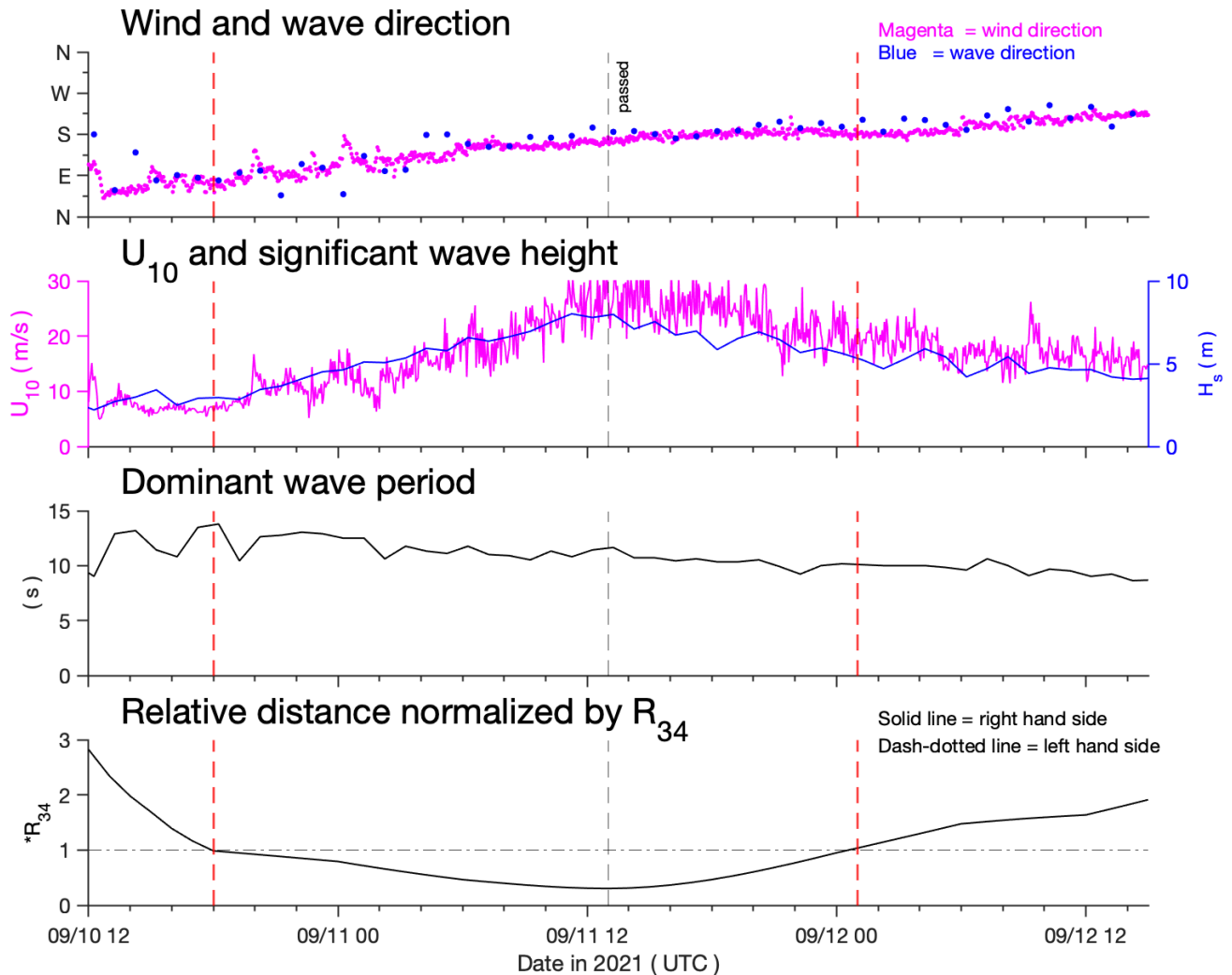


圖 4-1-28、由上而下分別為 2021 年璨樹颱風影響期間 NTU2 站的表面風向、主波方向、距海面 10 公尺風速、示性波高、主導波浪週期與以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-1-2。



4.2、颱風影響期間之海表熱通量變化

颱風經過造成的海表溫冷卻依照颱風影響前後各兩個慣性週期的溫度變化，其物理機制主要受到混合主導，混合搭配湧升流與下沉流、混合搭配水平流等因素影響(Yang, 2022)，而上述機制的時間尺度大多專注在 28 小時以上的頻段變化影響，另外，海表熱通量作用屬於短時間尺度的變化，其也對海表溫下降產生影響。

在海表熱通量的分析中，將 2018 至 2021 年間共 4 個年度的氣象、波浪與海表溫資料，利用 3.2 節中的方法求得各年度潛熱通量(LH)與可感熱通量(SH)，再取出該年度中各颱風的影響期間，暴風圈半徑正規化圖與時序列圖將會在後續子章節中討論。

而本研究中對於潛熱通量與可感熱通量的正負值定義為若大氣從海洋獲得能量為正值；若大氣失去能量則為負值。而從 3.2 節中的式 1 與式 2 可看出，影響可感熱通量的正負值變化主要為溫度差，換句話說可感熱通量為因大氣與海表之溫度差所存在的能量差異；另外，影響潛熱通量的正負值變化主要為比濕差，則潛熱通量為因大氣與海洋之比濕差所存在的能量差異，從式 4 至式 8 得知大氣比濕是受氣溫、氣壓與相對濕度影響；海洋比濕則受海表溫、氣壓與鹽度影響，可了解影響到潛熱通量正負值的因素並不是只有溫度差，相對濕度與氣壓的影響也不可忽視；另外，空氣密度與風速的變化則會影響海表熱通量推估的大小。

因此在本章節中潛熱通量與可感熱通量之探討將會專注探討在不同颱風特性下，海洋與大氣的溫度和比濕關係，再根據上述海表溫降溫的物理機制分類，探討海表溫的下降主要是否受到海表熱通量變化所影響，以下將依照年份依序介紹。



4.2.1、2018 年

4.2.1.1、山竹颱風 (NTU1)

山竹颱風於 2018 年 9 月 14 日最接近 NTU1 站，最近距離為 390 公里，而根據第三章的颱風參考座標軸正規化，並考慮颱風前進方向所畫出浮標相對與颱風的路徑，配合該時間點的潛熱通量與可感熱通量則繪製於圖 4-2-1；熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-2。

從圖 4-2-1 海表熱通量變化圖可看到，浮標位於颱風中心右側，可感熱通量在整個颱風事件皆保持負值，代表大氣一直在失去能量；潛熱通量在 9 月 14 日 18 時皆為正值，並於其之後開始逐漸下降為負值。另從圖 4-2-2 時序列圖看出，海表溫皆比氣溫來得低，溫差約為 1.5°C ，而相對濕度約為 85 至 90%，並從衛星雲圖上得知雲層並無覆蓋完全，高氣溫配上未飽和濕度為造成大氣比濕較低的原因，而潛熱通量於暴風圈後半部下降至負值，是受到氣溫回升與海表溫下降所致，使比濕差形成交叉。

海表溫下降中根據 4.2 節中的海表溫降溫機制屬於混合與上升流所影響(Yang, 2022)，在颱風影響期間因可感熱通量為負、潛熱通量為正，相抵後幾乎為 0，雖然海表溫在暴風圈內下降約 0.4°C ，不過其溫降可能與海表熱通量並無直接關係。



4.2.1.2、山竹颱風 (NTU2)

山竹颱風於 2018 年 9 月 15 日最靠近 NTU2 站，相對距離為 420 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-3；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-4。

可於圖 4-2-3 的海表熱通量變化圖看出，浮標的軌跡位於颱風的右側，不過最近距離時位於暴風圈的邊緣，在颱風影響期間潛熱通量與可感熱通量的趨勢皆為負值，代表大氣一直在失去能量；不過從圖 4-2-4 的時序列圖看到，在 9 月 14 日 18 時至 22 時潛熱通量與可感熱通量分別上升了約 100 W/m^2 與 50 W/m^2 ，另外看到比濕與溫度時序列圖，該時段中氣溫下降約 2°C ，使大氣比濕也隨其下降；風速在暴風圈內並無太大成長，使潛熱通量值無太大的振幅變化；相對濕度在暴風圈中則為未飽和狀態，僅在後半部短暫飽和，推估是短暫降雨事件。

海表溫下降中根據 4.2 節中的海表溫降溫機制屬於混合與下沉流所影響(Yang, 2022)，而從海表溫在颱風影響期間下降約 0.2°C ，不過海表熱通量的變化時長較短，可能對海表溫降溫影響偏小。



Mangkhut (NTU1)

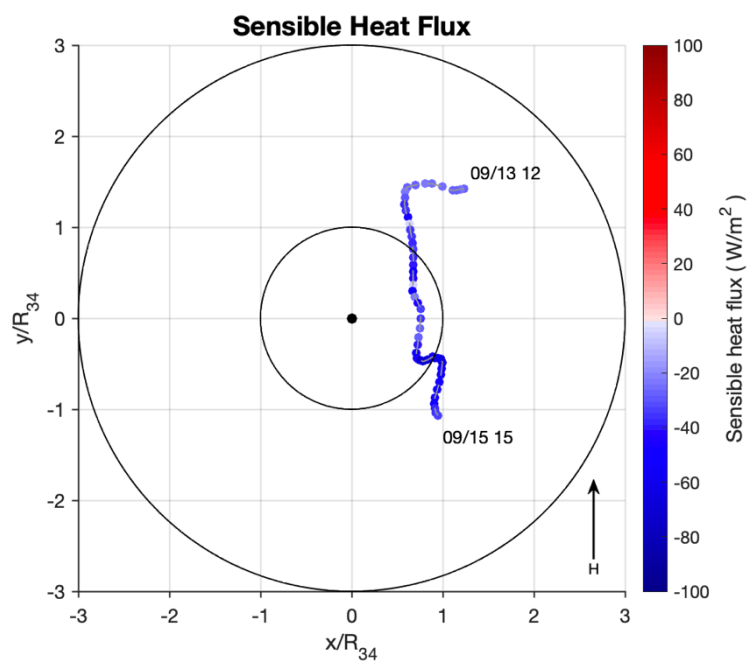
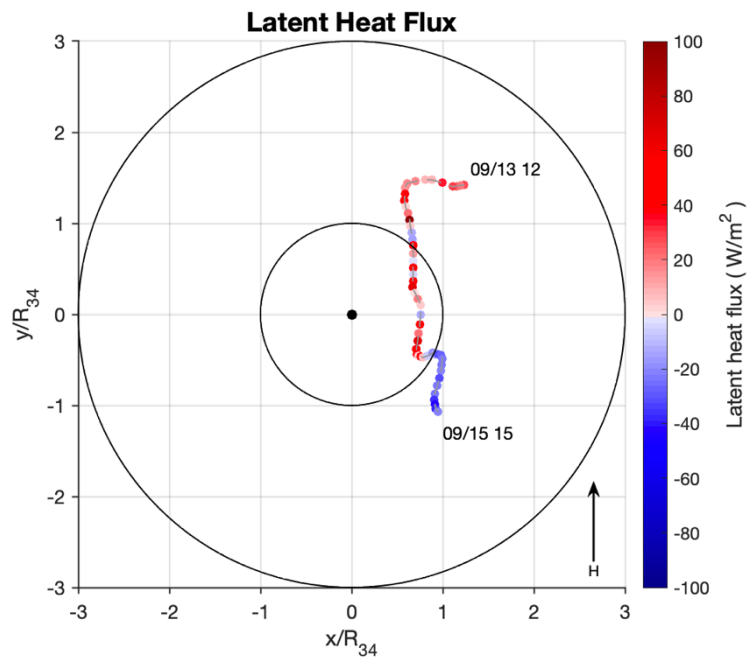


圖 4-2-1、為 2018 年山竹颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU1 站相對於山竹颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。

Mangkhut (NTU1)

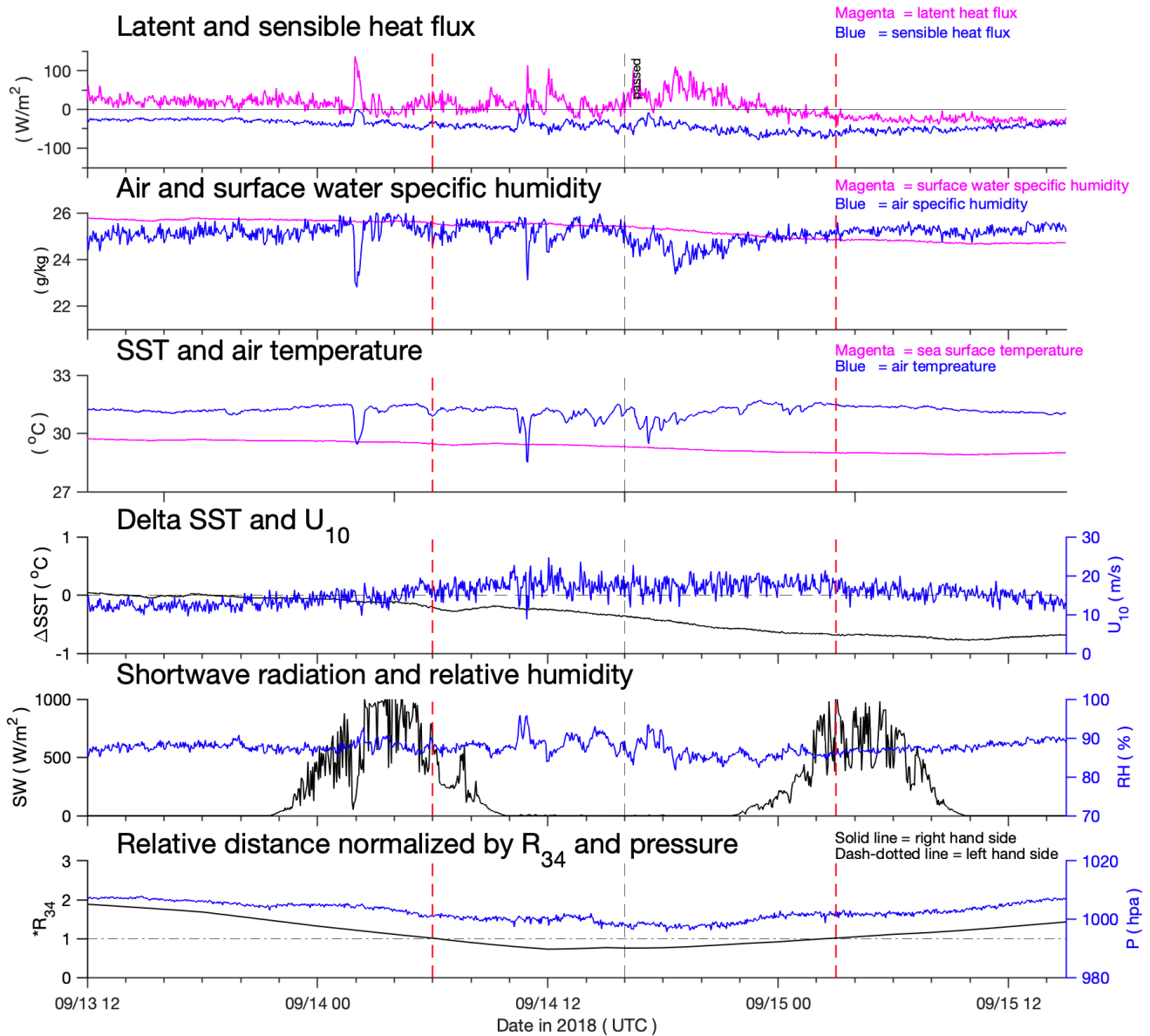


圖 4-2-2、由上而下分別為 2018 年山竹颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；其中各圖中垂直紅線為浮標進入與離開八級暴風圈的時間點；垂直黑線則為颱風暴風圈前後半部交界的時間點；熱通量圖中藍線為可感熱通量、洋紅線潛熱通量；比濕圖中藍線為大氣比濕、洋紅線為海洋比濕；溫度圖中藍線為氣溫、洋紅線為海表溫；海表溫變化量定義為觀測值減去颱風影響前一日之海表溫平均值。

Mangkhut (NTU2)

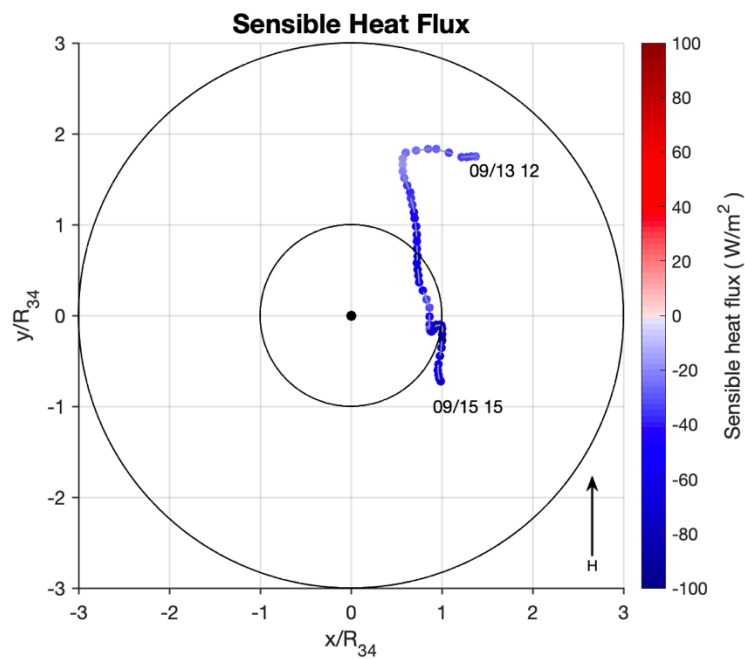
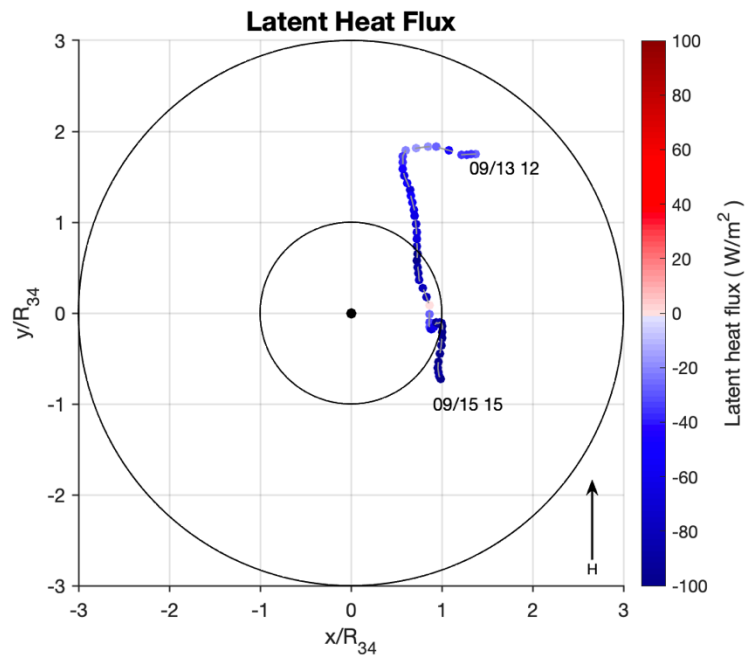


圖 4-2-3、為 2018 年山竹颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU2 站相對於山竹颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Mangkhut (NTU2)

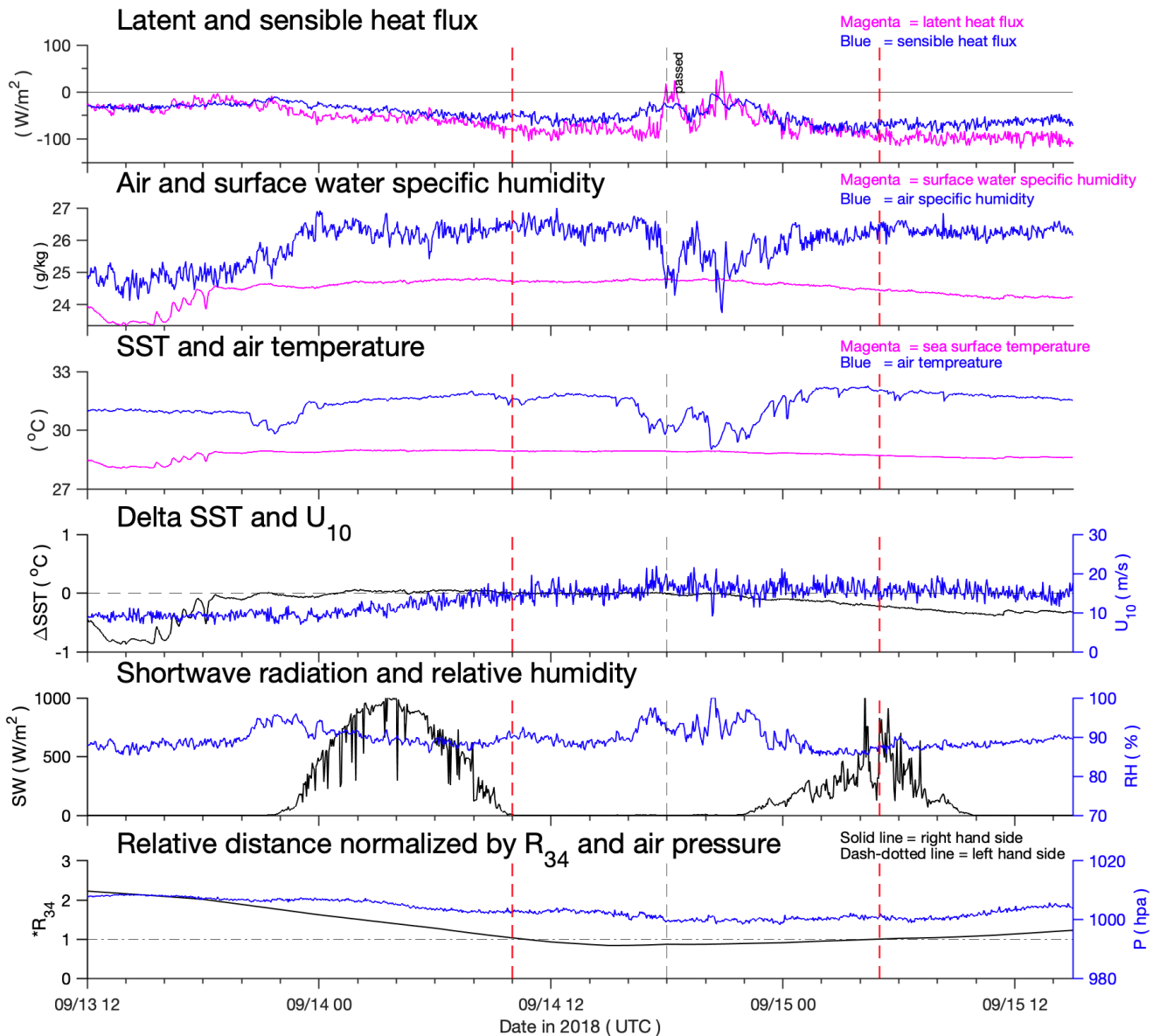


圖 4-2-4、由上而下分別為 2018 年山竹颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。



4.2.2、2019 年

4.2.2.1、丹娜絲颱風 (NTU1)

丹娜絲颱風於 2019 年 7 月 18 日最接近 NTU1 站，相對距離為 18 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-5；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-6。

可於圖 4-2-5 的海表熱通量變化圖看出，浮標的軌跡位於颱風的左側，不過颱風的結構並不對稱，且較晚形成輕度颱風，可感熱通量在 7 月 17 日 12 時至 17 時非常小，到該日 21 時出現最大值，並隨颱風遠離後下降至負值；潛熱通量在暴風圈前半部為正值，代表大氣正從海洋中獲取能量，而在 7 月 17 日 20 至 21 時有最大值，隨著颱風逐漸遠離後下降至負值；再從圖 4-2-6 的時序列圖可看到，上述提到在暴風圈後半部大幅變化期間，潛熱通量上升約 120 W/m^2 ，可感熱通量上升約 30 W/m^2 ；比濕方面大氣比濕變化較劇烈，海洋比濕則穩定下降，對應到溫度變化呈正比關係；而在此期間風速為緩慢成長，約 10 至 15 m/s，相對濕度則是有呈飽和狀態，推估為降雨事件，持續時間約 3 小時。

海表溫下降中根據 4.2 節中的海表溫降溫機制屬於混合與上升流所影響(Yang, 2022)，而海表溫在暴風圈內下降約 0.1°C ，溫降並不明顯，可能因風速並無成長快速，加上颱風本身結構較鬆散，烏雲密佈的情形或許不高，不過該時段約凌晨 3 時，無法從短波輻射量來判斷雲層是否覆蓋完全，因此對海表溫降溫影響較小。



4.2.2.2、丹娜絲颱風 (NTU2)

丹娜絲颱風於 2019 年 7 月 18 日最接近 NTU2 站，相對距離為 160 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-7；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-8。

可於圖 4-2-7 的海表熱通量變化圖看出，浮標的軌跡位於颱風的左側，不過颱風的結構並不對稱，浮標進入暴風圈的時間較短，在颱風影響期間潛熱通量與可感熱通量皆為負值，代表大氣正在失去能量；再從圖 4-2-8 的時序列圖看到，在暴風圈內比濕與溫度變化趨勢較不明顯，風速也無快速成長，約 10 至 15 m/s；相對濕度皆處於未飽和狀態，並從衛星雲圖上得知雲層覆蓋不完全，因此降雨事件發生機率較低。

海表溫下降根據 4.2 節中的降溫機制屬於混合與下沉流所影響(Yang, 2022)，而海表溫在颱風影響期間下降約 0.1°C ，溫降並不明顯，上述也得知海表熱通量的變化較小，可能對海表溫降溫影響較低。

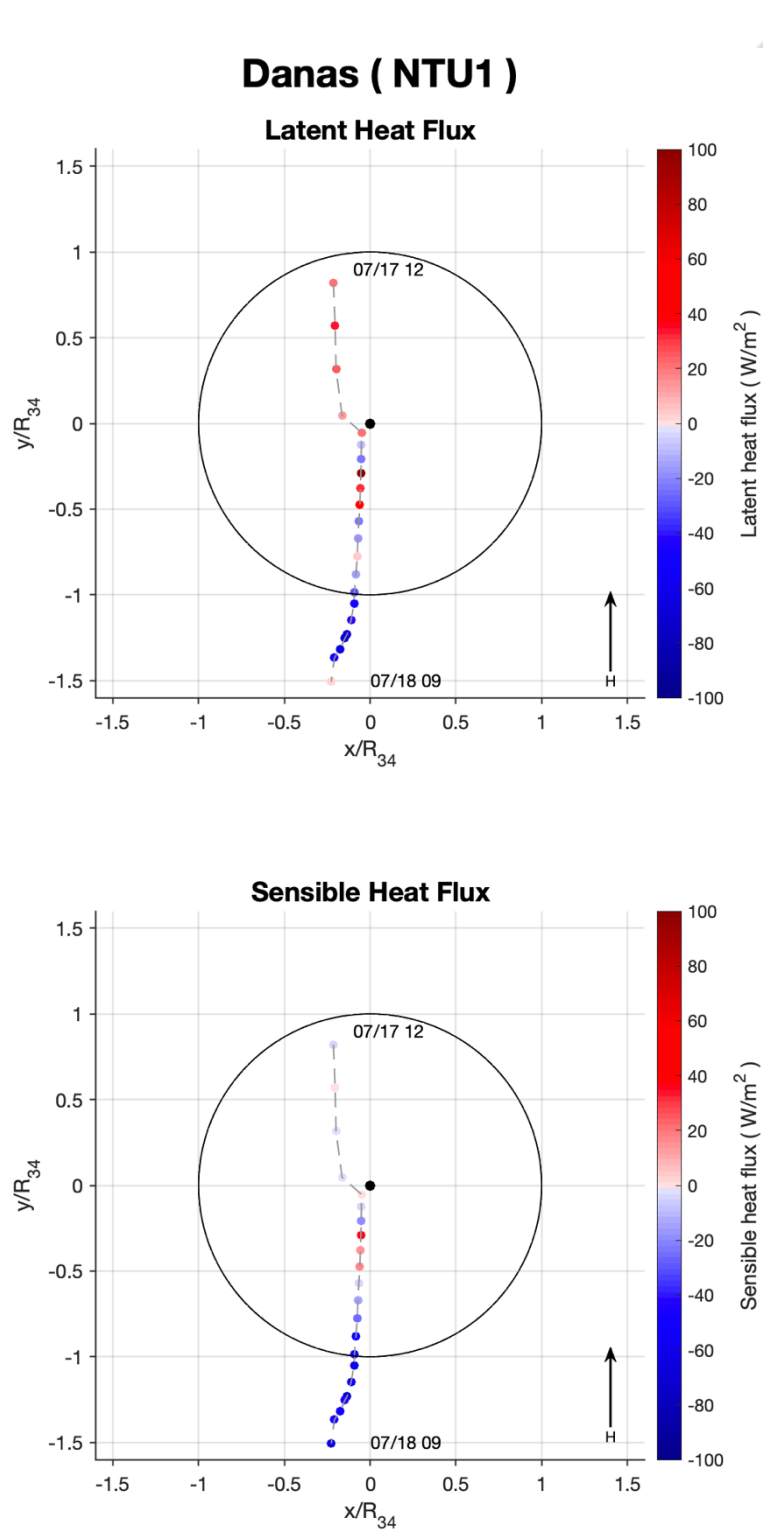


圖 4-2-5、為 2019 年丹娜絲颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU1 站相對於丹娜絲颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Danas (NTU1)

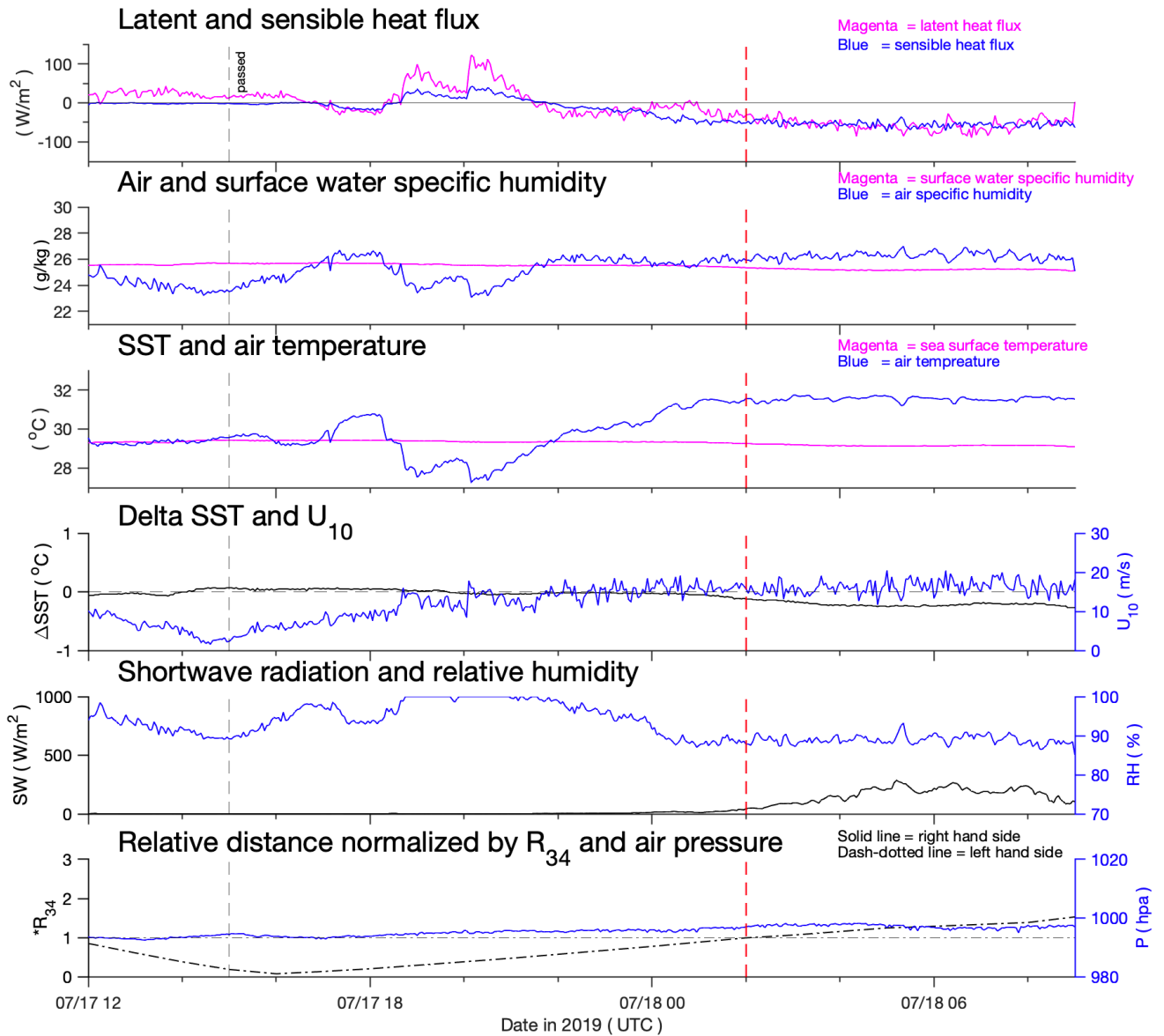


圖 4-2-6、由上而下分別為 2019 年丹娜絲颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。

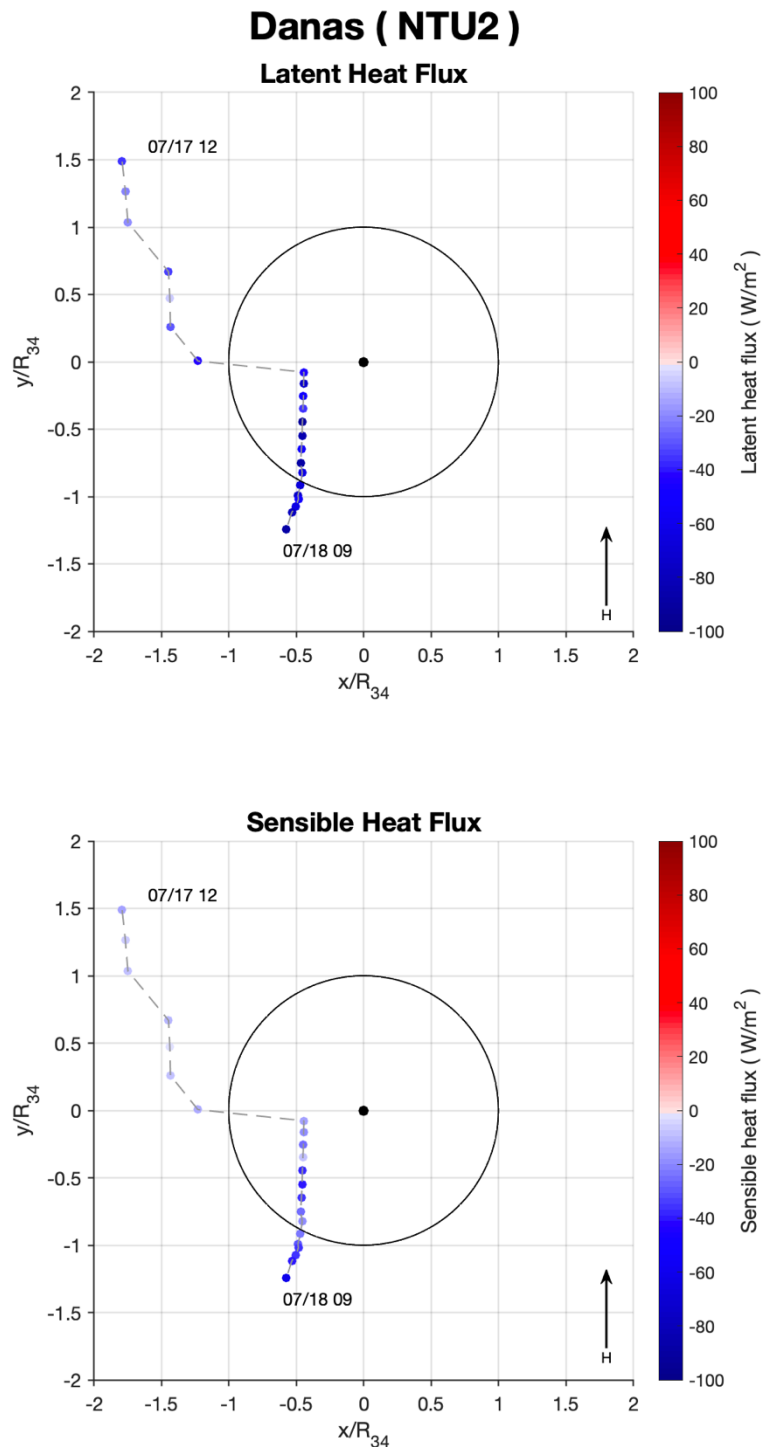


圖 4-2-7、為 2019 年丹娜絲颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU2 站相對於丹娜絲颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Danas (NTU2)

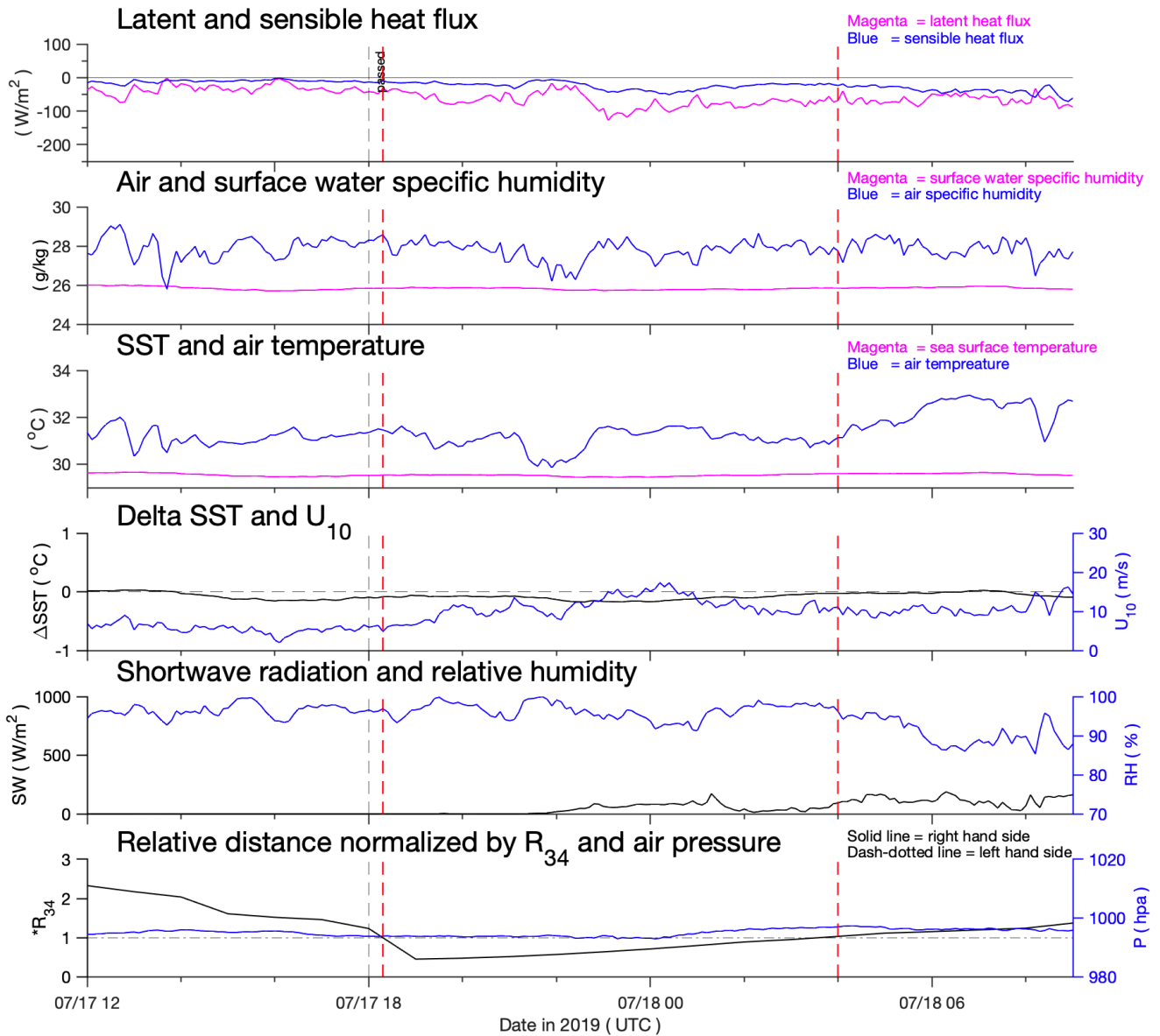


圖 4-2-8、由上而下分別為 2019 年丹娜絲颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。



4.2.2.3、利奇馬颱風 (NTU1)

利奇馬颱風於 2019 年 8 月 8 日最接近 NTU1 站，相對距離為 280 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-9；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-10。

可於圖 4-2-9 熱通量變化圖可看出，浮標在暴風圈外時潛熱通量與可感熱通量為負值，而在暴風圈後半部有由負變正的趨勢出現，代表該段時間大氣正從海洋獲得能量，並持續一段時間，這時浮標位於颱風中心的左後方；另從圖 4-3-10 的熱通量時序列圖來看，該時段在 8 月 8 日 0 時至 10 時期間，潛熱通量上升約 200 W/m^2 ，可感熱通量則上升約 80 W/m^2 ，上升趨勢非常明顯；再從溫度與比濕圖看到，氣溫下降約 4°C ，造成大氣比濕下降明顯，而根據風速、相對濕度與短波輻射值可發現，該時段處於高風速且相對濕度飽和狀態，白天觀測到的短波輻射值非常小，推估在海表熱通量明顯變化期間為雲層覆蓋完全、大風大雨時期。

海表溫下降中根據 4.2 節中的海表溫降溫機制屬於混合與下沉流所影響(Yang, 2022)，不過海表溫在上述大風大雨的時期中下降約 0.4°C ，該溫降可能是受到海表熱通量的影響而下降。

4.2.2.4、利奇馬颱風 (NTU2)

利奇馬颱風於 2019 年 8 月 8 日最接近 NTU2 站，最近距離為 360 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-11；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-12。

可於圖 4-2-11 海表熱通量變化圖可看出，NTU2 站的軌跡位於颱風暴風圈邊緣左側，位於暴風圈內的時間較短，而在颱風事件中潛熱通量與可感熱通量皆為負值，代表為大氣失去能量；另從圖 4-3-12 的海表熱通量時序列圖可看出，海表熱通量的變化主要受到溫度差的影響，在 8 月 8 日 6 時海表熱通量有短暫上升，從相對濕度可看出該時段為飽和狀態，風速有短暫提高至 18 m/s，推估可能是短暫的降雨事件，不過風速在此期間並無明顯增加。

海表溫下降中根據 4.2 節中的降溫機制屬於混合與下沉流所影響(Yang, 2022)，而海表溫在颱風影響期間下降約 0.1°C，上述也得知海表熱通量的變化趨勢較小，可能對海表溫降溫影響因素較有限。

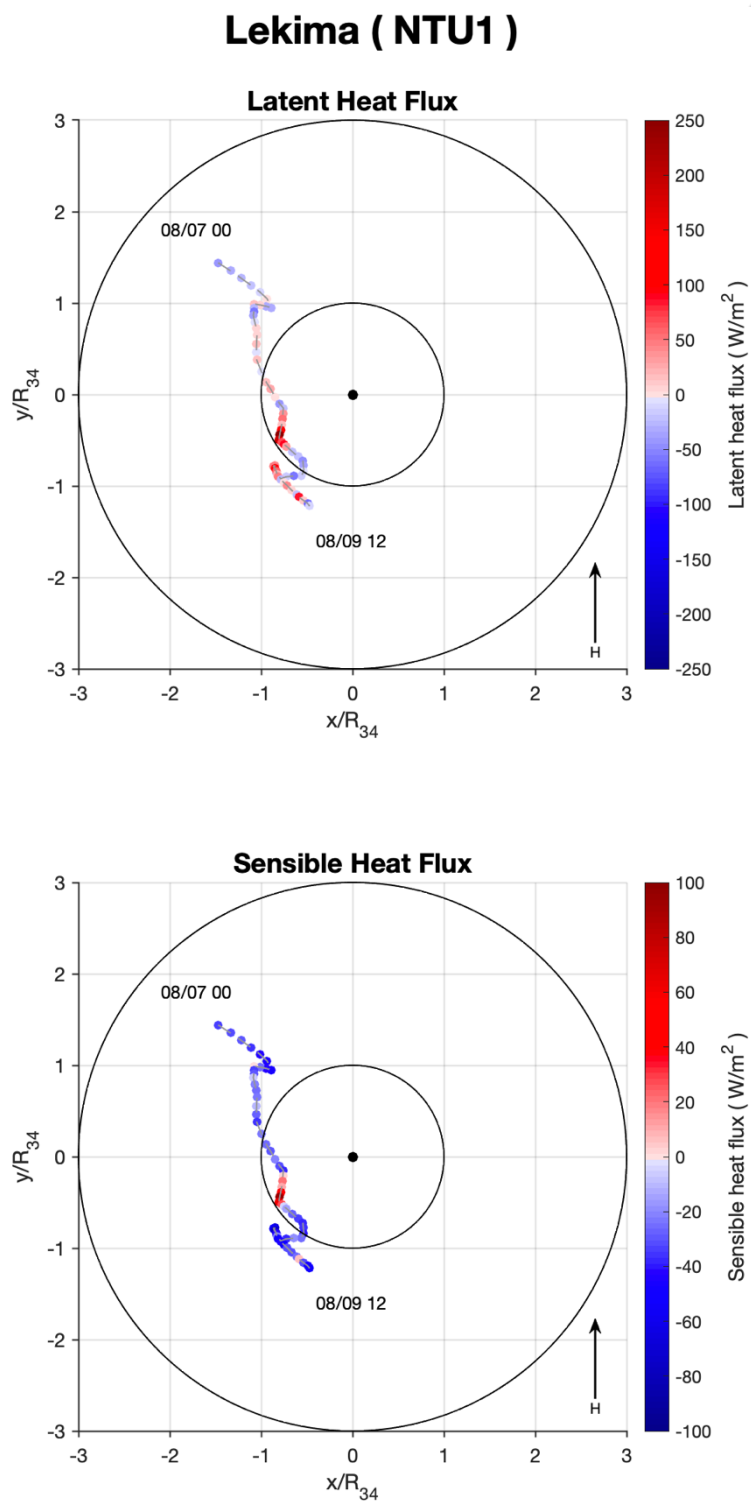


圖 4-2-9、為 2019 年利奇馬颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU1 站相對於利奇馬颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Lekima (NTU1)

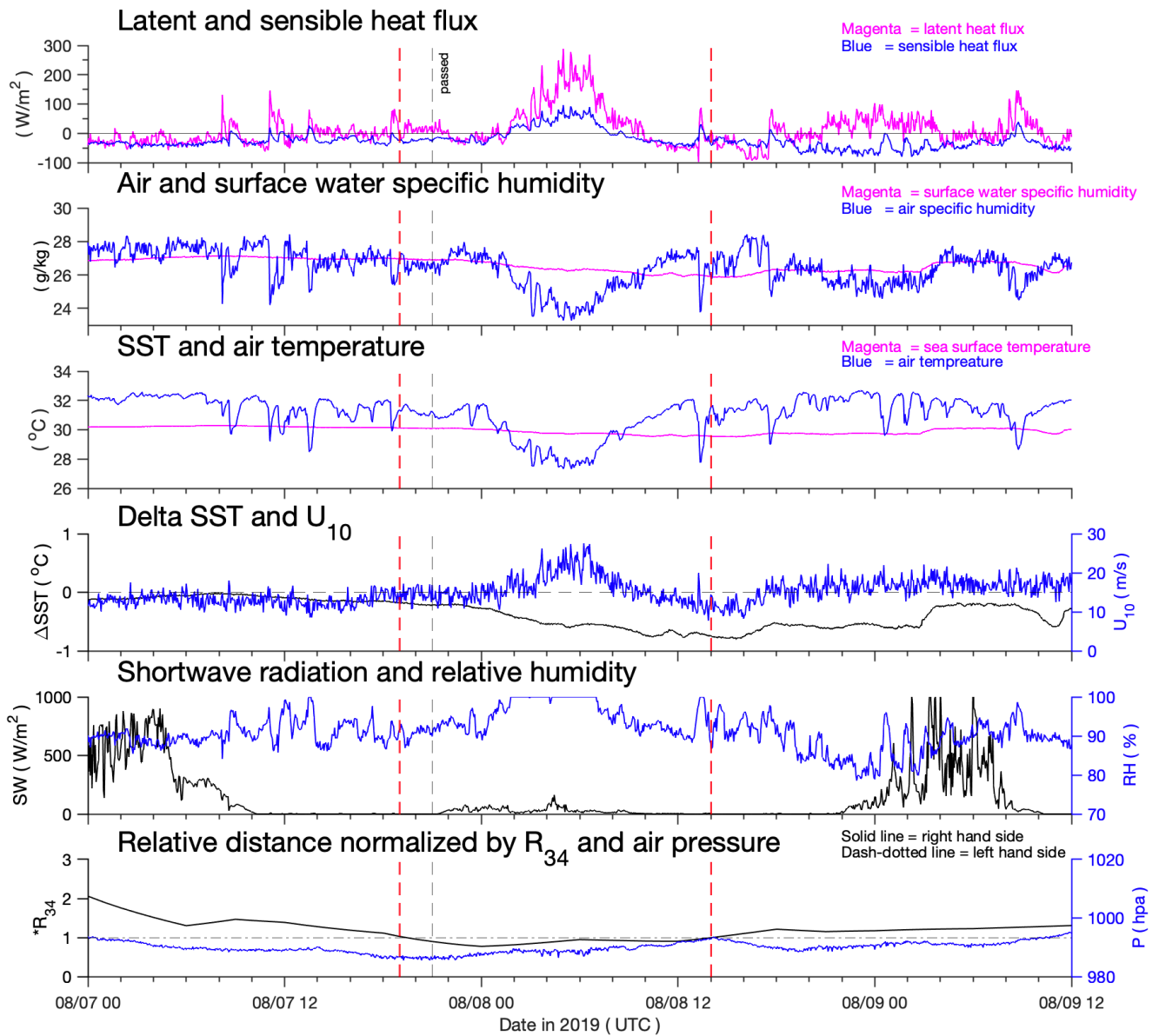


圖 4-2-10、由上而下分別為 2019 年利奇馬颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。



Lekima (NTU2)

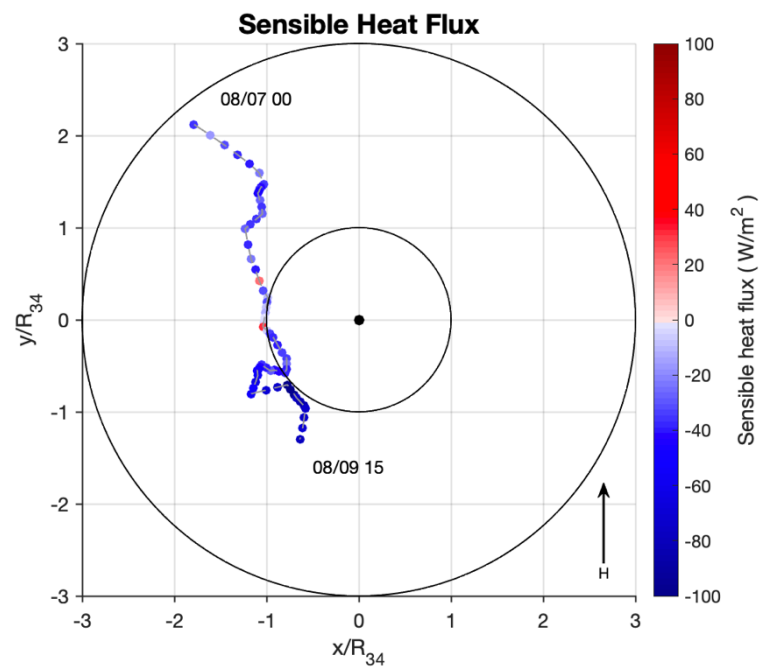
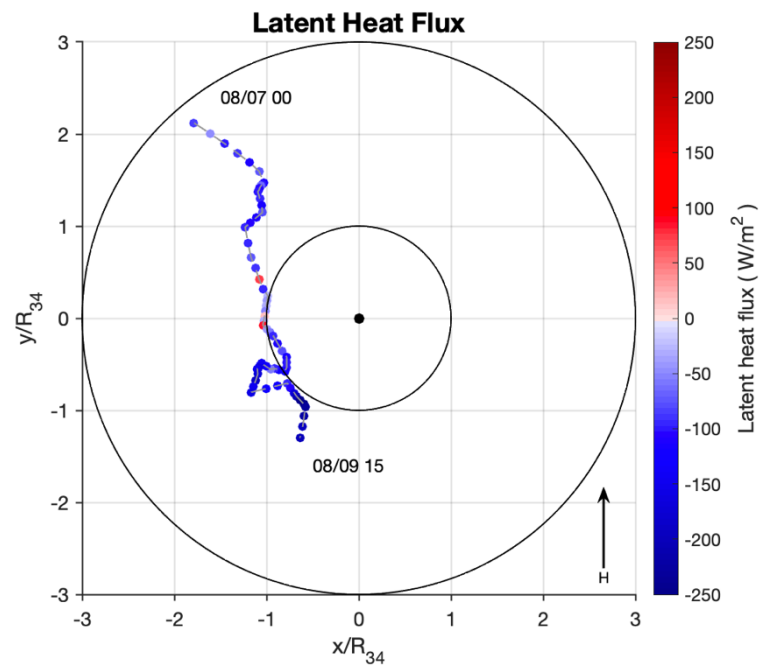


圖 4-2-11、為 2019 年利奇馬颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU2 站相對於利奇馬颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Lekima (NTU2)

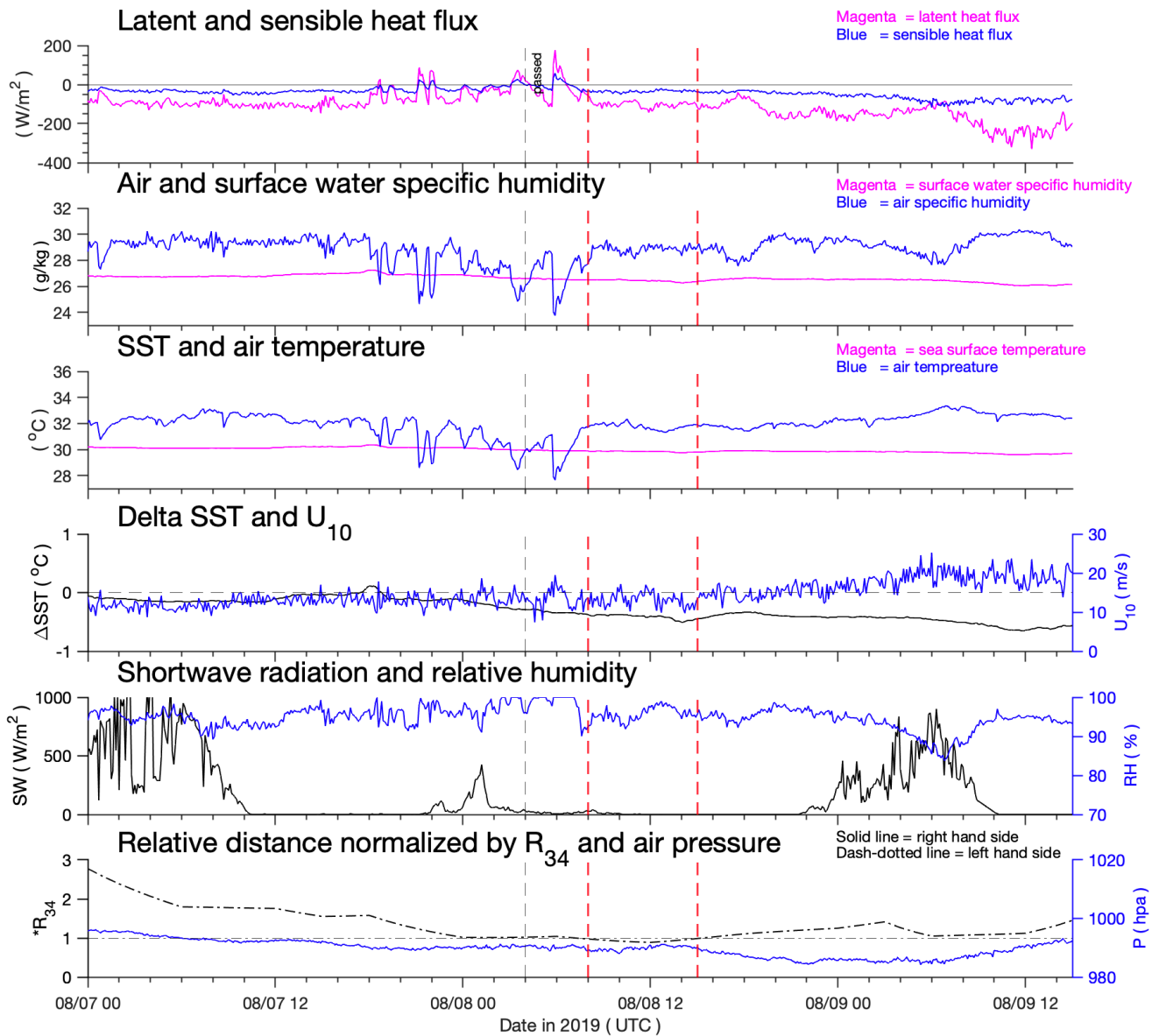


圖 4-2-12、由上而下分別為 2019 年利奇馬颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。



4.2.2.5、白鹿颱風 (NTU1)

白鹿颱風於 8 月 23 日最接近 NTU1 站，最近距離為 80 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-13；熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-14。

可於圖 4-2-13 海表熱通量變化圖看出，浮標位於颱風中心右側，可感熱通量在暴風圈外為負值，代表該時段大氣在散失能量，而在颱風影響期間有間歇正負變化，代表期間溫差正負變化頻繁，並於颱風遠離後下降為負值；潛熱通量方面在進入暴風圈後正負變化頻繁，離開暴風圈後下降為負值。再從圖 4-2-14 時序列圖看到於 8 月 23 日 10 時開始海表熱通量正負變化頻繁，可從比濕與溫度圖看出氣溫變化劇烈，造成比濕差之正負值持續變化，風速與相對濕度可看出該時段為高風速且水氣接近飽和狀態，估計是大風短暫強陣雨；暴風圈後半部潛熱通量上升約 170 W/m^2 ，可感熱通量並無變化，而潛熱通量上升的原因為相對濕度下降約 10%；颱風逐漸遠離後潛熱通量因溫度上升而下降至負值，可感熱通量依舊無變化。

海表溫下降根據 4.2 節中的降溫機制屬於混合與上升流所影響，但溫差變化較不明顯(Yang, 2022)，而海表溫在颱風影響期間下降約 0.1°C ，上述也得知海表熱通量的值與變化趨勢較小，可能對海表溫降溫影響因素較低。



4.2.2.6、白鹿颱風 (NTU2)

白鹿颱風於 2019 年 8 月 24 日最接近 NTU2 站，最近距離為 90 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-15；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-16。

可於圖 4-2-15 海表熱通量變化圖可看出，NTU2 站的軌跡位於颱風暴風圈右側，而位於颱風暴風圈前後熱通量皆為負值，能量傳輸方向為大氣輸入至海洋，在暴風圈後半部則有正極大值出現；圖 4-2-16 的時序列圖可看出，位於暴風圈內時，潛熱通量與可感熱通量變化幅度非常大，以暴風圈後半部的變化來說，在 8 月 24 日 2 時潛熱通量上升約 380 W/m^2 、可感熱通量上升約 60 W/m^2 ，而看到比濕與溫度圖中主要受氣溫快速降低所致，加上風速高且相對濕度趨近於飽和，推估可能為大風短暫陣雨時期，颱風逐漸遠離後海表熱通量因氣溫回暖而下降至負值。

海表溫下降根據 4.2 節中的降溫機制屬於混合與上升流所影響(Yang, 2022)，海表溫在颱風影響期間呈現先降後升再降之情形，而颱風經過後短波輻射值觀測到約 200 W/m^2 ，或許是雲層不夠厚，進而造成海表溫的短暫上升，上述提到海表熱通量大幅變化時期與暴風圈前半部皆有大風大雨的情形，持續大約 1.5 小時，造成海表溫下降約 0.1°C 。

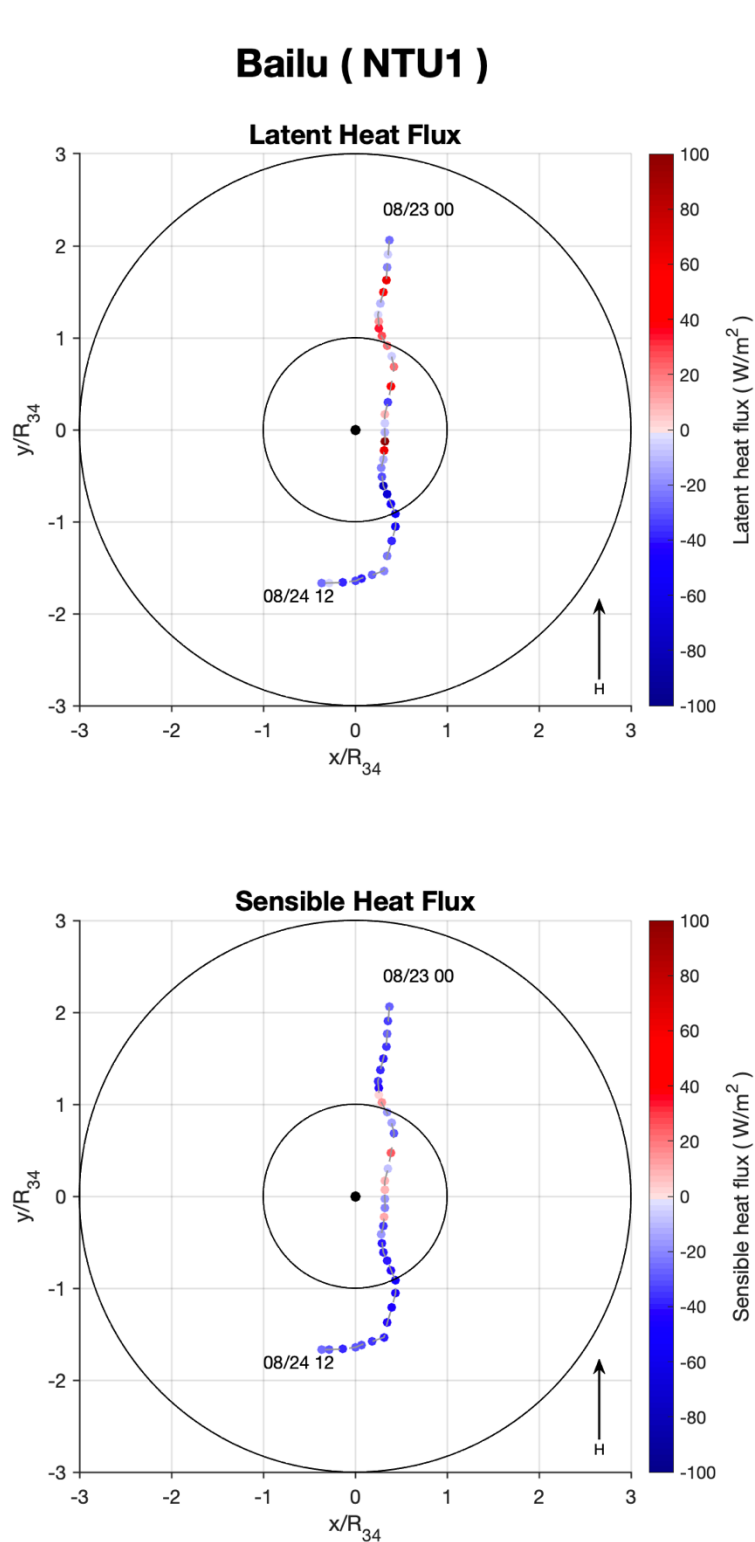


圖 4-2-13、為 2019 年白鹿颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU1 站相對於白鹿颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。

Bailu (NTU1)

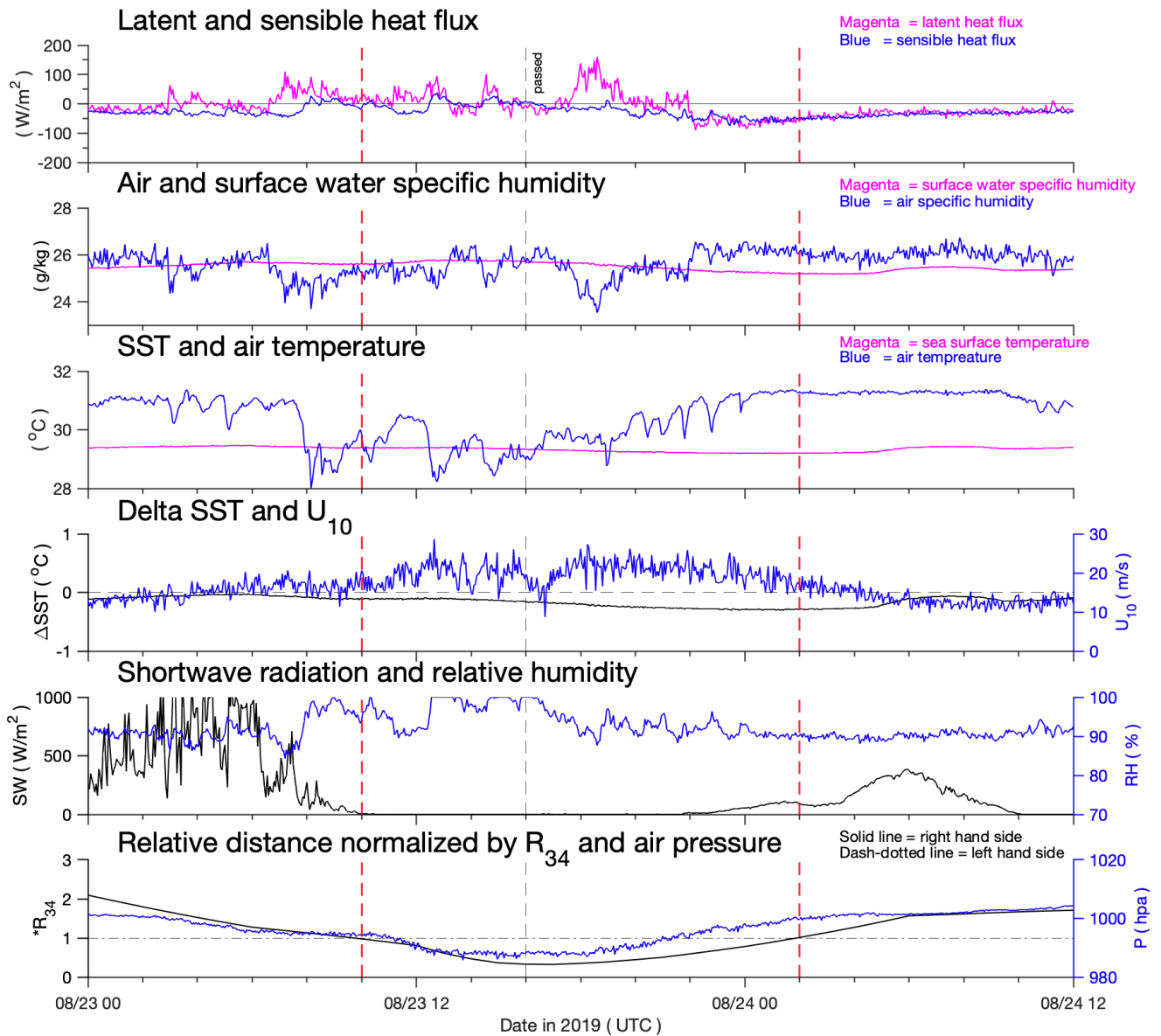


圖 4-2-14、由上而下分別為 2019 年白鹿颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。



Bailu (NTU2)

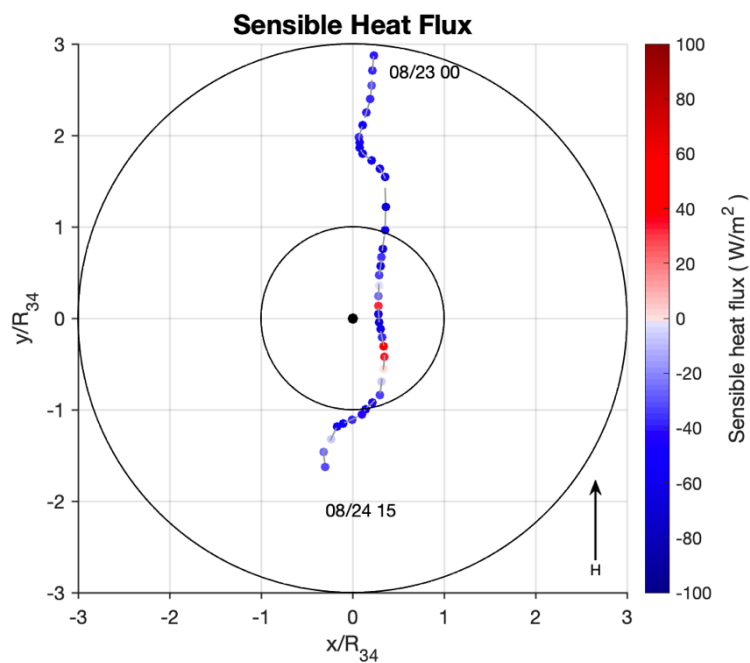
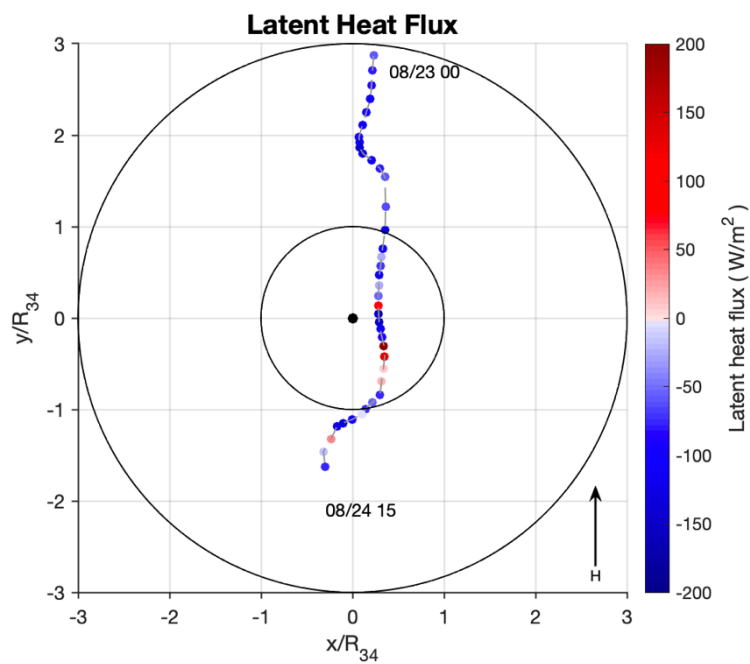


圖 4-2-15、為 2019 年白鹿颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU2 站相對於白鹿颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Bailu (NTU2)

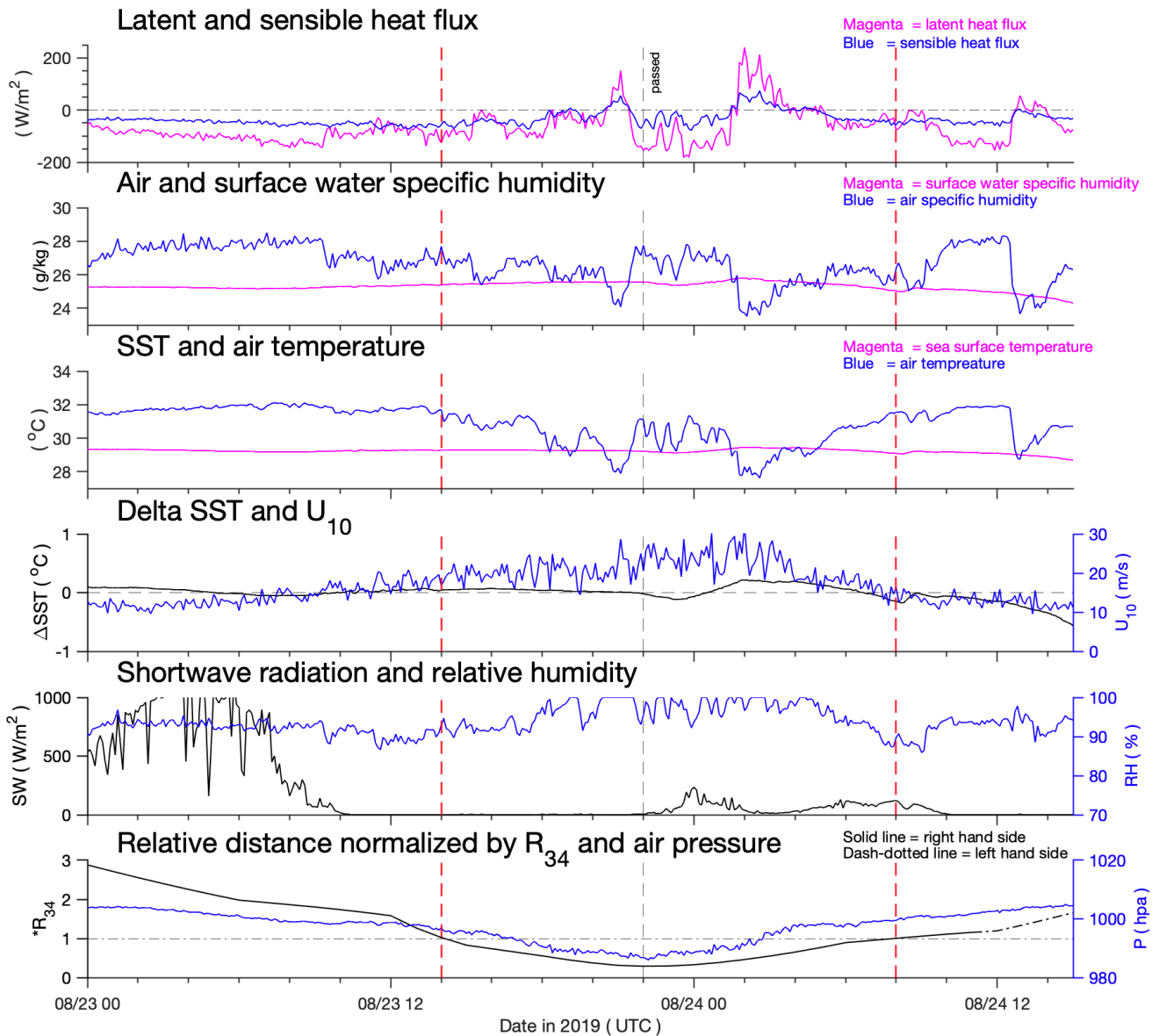


圖 4-2-16、由上而下分別為 2019 年白鹿颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。



4.2.2.7、玲玲颱風 (NTU1)

玲玲颱風於 2019 年 9 月 3 日最接近 NTU1 站，最近距離為 20 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-17；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-18。

從圖 4-2-17 海表熱通量變化圖可看到，最近距離時浮標位於颱風中心左側，可感熱通量在浮標進入暴風圈前為負值，代表該時段大氣在失去能量，而進入暴風圈後正負變化頻繁，推估該時段溫差正持續變化，並於颱風遠離後下降至負值；潛熱通量方面在進入暴風圈前為正值，進入暴風圈後於其前半部出現最大值，直到遠離後才下降至負值。另於圖 4-2-18 的時序列圖可看出，潛熱通量在 9 月 3 日 5 時下降約 150 W/m^2 ，下降後與可感熱通量值一致，另外其變化主要受到溫差與相對濕度的影響，在進入眼區前溫差並不大，受相對濕度未飽和的影響造成海表熱通量異號，在進入眼區後相對濕度趨近飽和，不過風速在眼區內非常低，海表熱通量的值非常小，離開眼區後則有多起短暫降雨事件，並於離開暴風圈後漸趨緩。

海表溫下降根據根據 4.2 節中的降溫機制屬於混合與上升流所影響(Yang, 2022)，海表溫在颱風影響期間下降約 0.4°C ，主要受多起短暫陣雨與高風速所影響。



Lingling (NTU1)

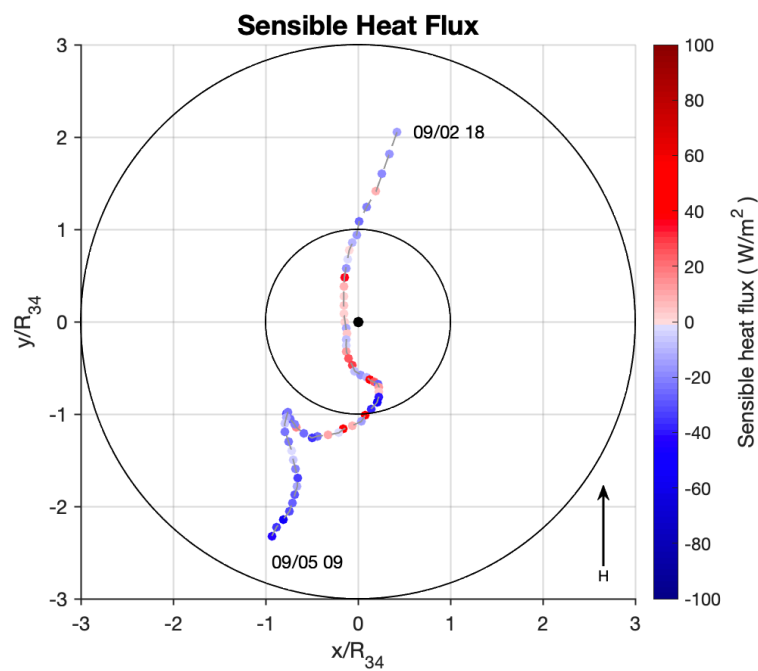
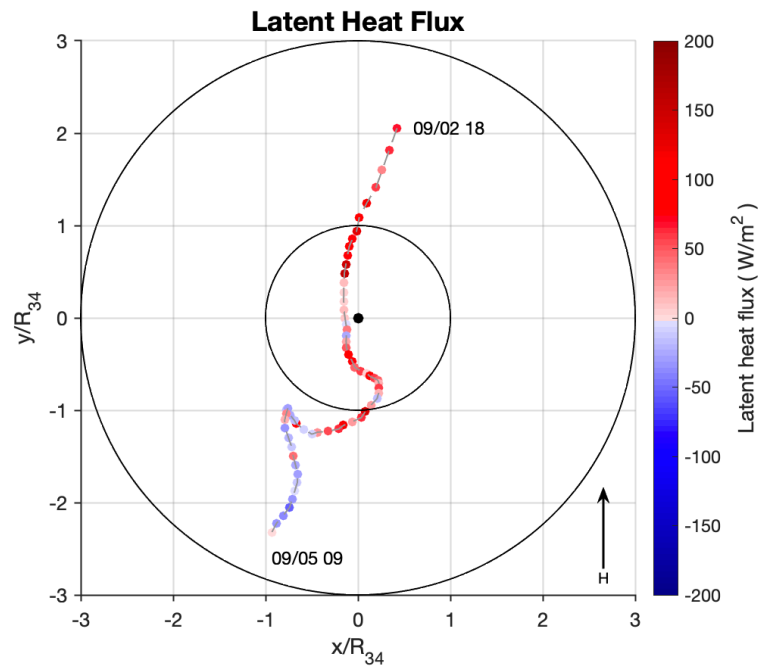


圖 4-2-17、為 2019 年玲玲颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU1 站相對於玲玲颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Lingling (NTU1)

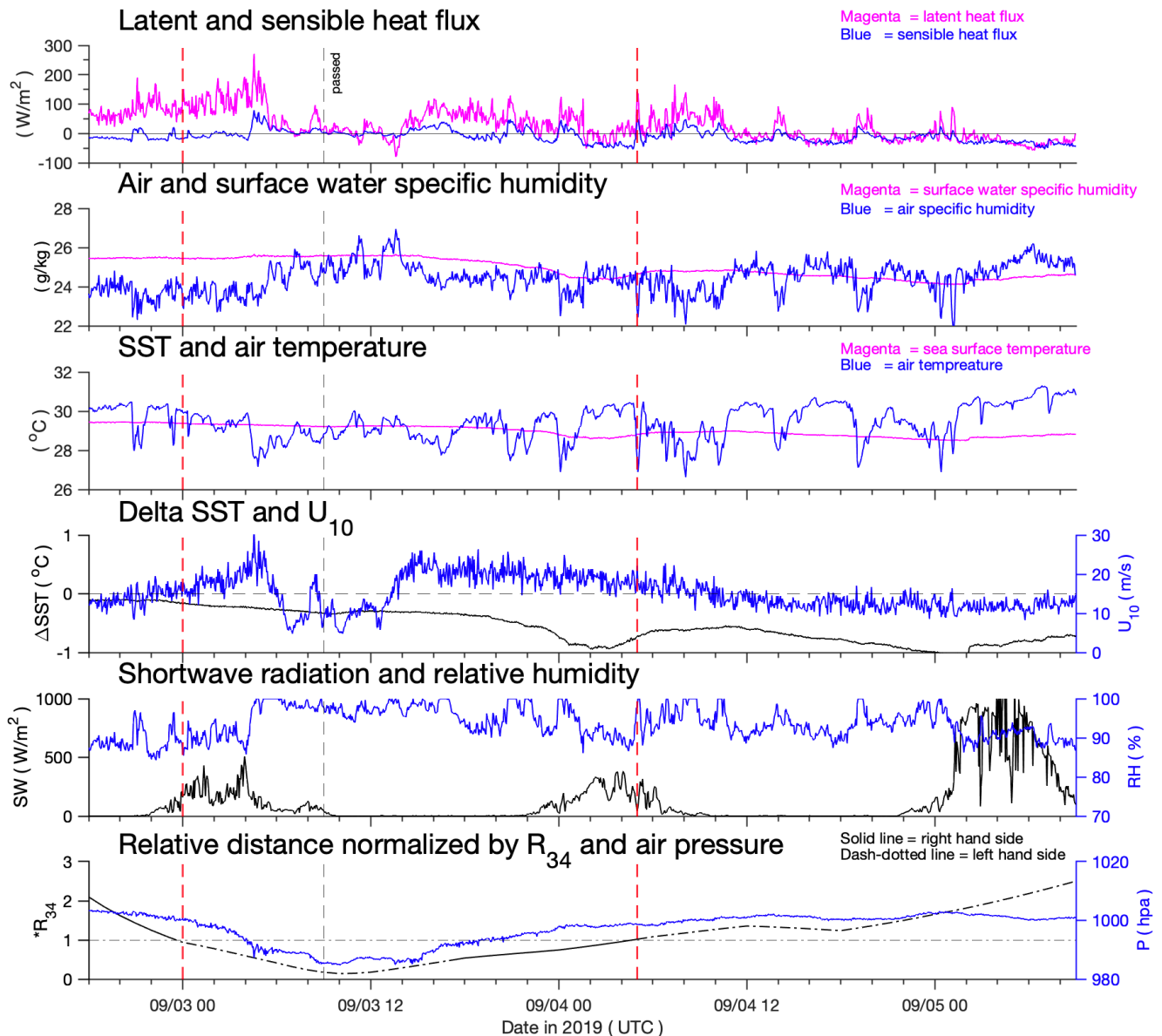


圖 4-2-18、由上而下分別為 2019 年玲玲颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。



4.2.2.8、米塔颱風 (NTU2)

米塔颱風於 2019 年 9 月 3 日最接近 NTU2 站，最近距離為 60 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-19；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-20。

可於圖 4-2-19 海表熱通量變化圖看出，在颱風影響前後，潛熱通量與可感熱通量皆為負值，代表該時段大氣在失去能量，不過在颱風影響期間有大氣從海洋獲得能量的情形；另從圖 4-2-20 時序列圖可得知，進入暴風圈後潛熱通量與可感熱通量變動頻繁，更以暴風圈後半部變化幅度最大，從實測資料可發現，該時段氣溫變化較劇烈，下降約 3.5°C ，也直接影響了比濕差的正負趨勢；另外風速與相對濕度可得知為高風速且水氣飽和狀態，短波輻射值也提供了雲量是足夠的，估計為風大雨大時期，並持續約 14 小時。

海表溫下降根據 4.2 節的降溫機制屬於混合與上升流所影響(Yang, 2022)，海表溫在颱風影響期間下降約 0.18°C ，不過在暴風圈前半部能量傳遞方向由大氣輸入至海洋，使海表溫無明顯降溫，而到暴風圈後半部隨著風速提高、氣溫下降與降雨使海表熱通量由負變正，為大氣從海洋獲取能量，海表溫有較明顯的溫降產生。



Mitag (NTU2)

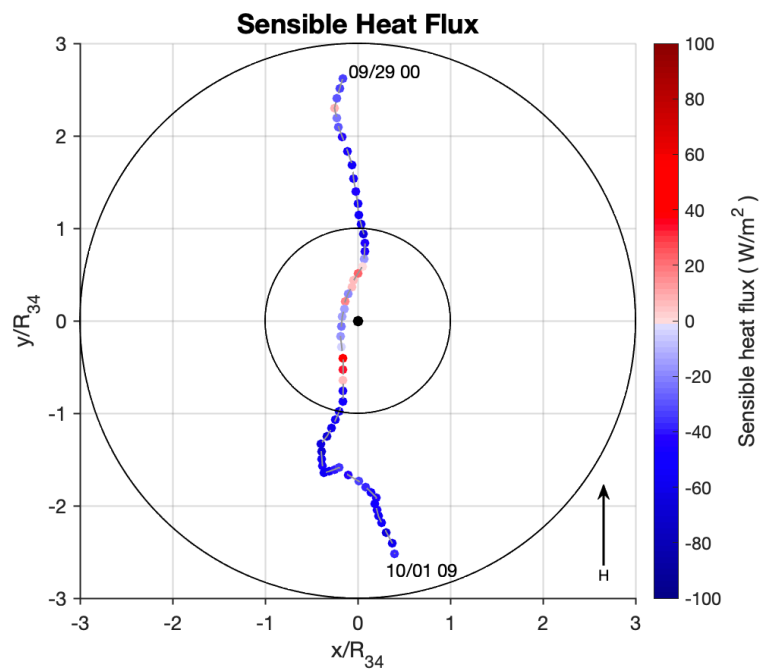
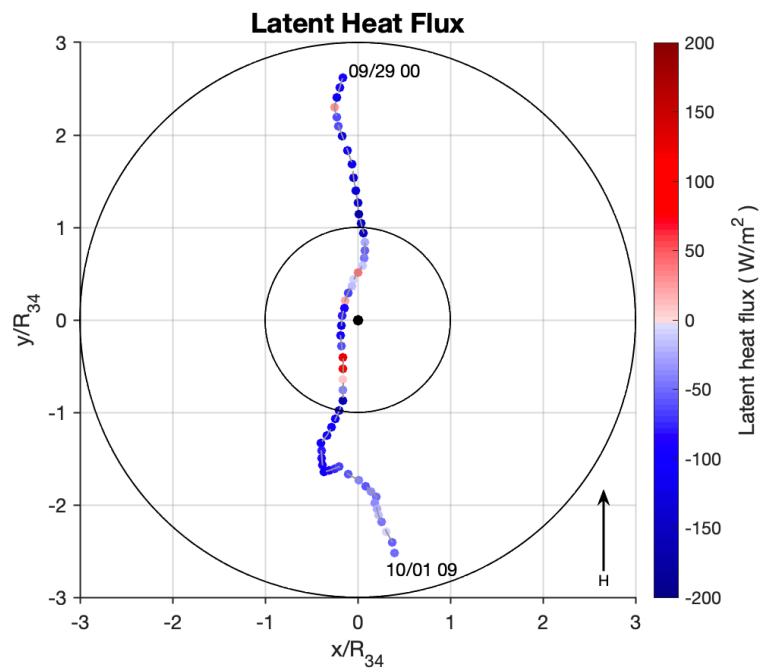


圖 4-2-19、為 2019 年米塔颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU2 站相對於米塔颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。

Mitag (NTU2)

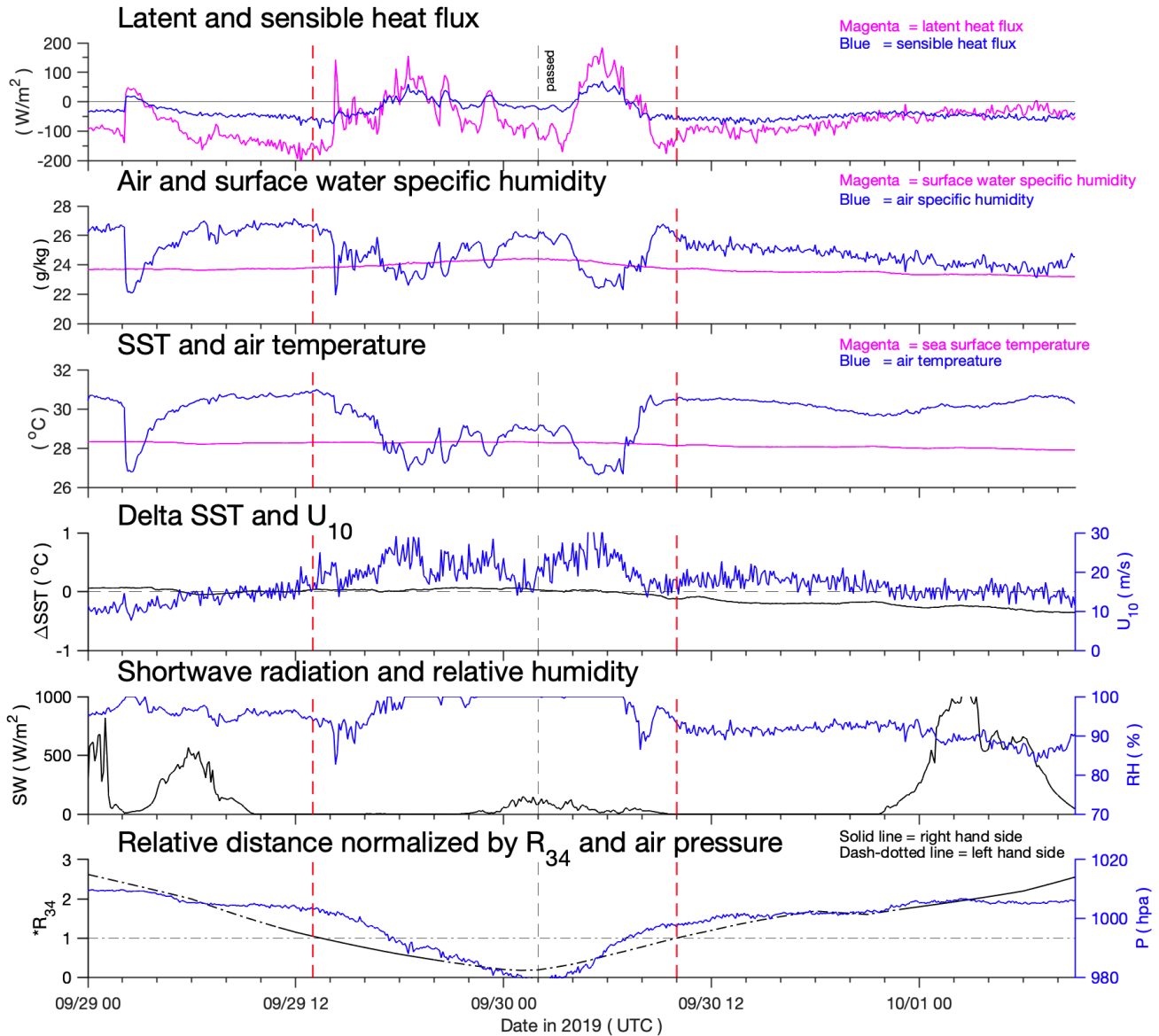


圖 4-2-20、由上而下分別為 2019 年米塔颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。



4.2.3、2020 年

4.2.3.1、閃電颱風 (NTU1)

閃電颱風於 2020 年 11 月 5 日最接近 NTU1 站，最近距離為 90 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-21；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-22。

可於圖 4-2-21 海表熱通量變化圖可看出，浮標一直位於颱風中心右側，在進入颱風暴風圈前，可感熱通量為正值，代表該段時間大氣從海洋獲取能量；而進入暴風圈後，可感熱通量逐漸由正轉負，代表溫差越來越小；潛熱通量方面，因在颱風事件中海洋比濕皆大於大氣比濕而一直保持正值，不過隨著颱風經過後逐漸降低，至於其值為何遠大於可感熱通量，可從實測資料中進行觀察。

圖 4-2-22 的海表熱通量時序列圖可看出，在 11 月 4 日颱風尚未影響前，海表溫比氣溫高約 2°C ，海洋比濕則比大氣比濕高約 8 g/kg ；進入暴風圈後，氣溫緩慢上升，到暴風圈後半部時氣溫與海表溫已幾乎無溫差，對應到上段可感熱通量於 11 月 5 日 0 時開始緩慢下降約 50 W/m^2 ；另外潛熱通量於 11 月 5 日 13 時開始穩定下降約 200 W/m^2 ，而大氣比濕在暴風圈內的上升趨勢比起氣溫上升較不明顯，其原因可能為相對濕度在颱風期間僅 82 % 所致，代表潛熱通量除了受溫度差影響外，相對濕度會使潛熱通量與可感熱通量相差甚遠。

海表溫下降則根據 4.2 節的降溫機制屬於混合與上升流所影響(Yang, 2022)，而海表溫在颱風影響期間海表溫下降約 0.2°C ，而相對濕度皆處於未飽和狀態，雖無降雨事件發生，不過大氣不斷從海洋中獲取能量，並持續近一天，推估大氣長時間的能量獲取會造成海表溫的降溫。



4.2.3.2、閃電颱風 (NTU2)

閃電颱風於 2020 年 11 月 6 日最靠近 NTU2 站，最近距離為 120 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-23；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-24。

可於圖 4-2-24 海表熱通量變化圖看到，此個案為浮標位於颱風暴風圈邊緣之案例，而潛熱通量在整個颱風事件為逐漸下降趨勢，皆為大氣從海洋中獲取能量，不過獲取值卻逐漸下降；可感熱通量雖然也是逐漸遞減趨勢，不過在暴風圈後半部呈正負值變化頻繁，溫差變化不斷改變；另從圖 4-2-23 熱通量時序列圖可得知，此個案與 NTU1 站的情形類似，潛熱通量在整個颱風事件皆為正值，在颱風影響期間並無大幅變化，從 11 月 5 日至 11 月 6 日 6 時共下降約 200 W/m^2 ；另外可感熱通量也呈緩慢下降約 50 W/m^2 ，而在暴風圈內海表熱通量並無明顯變化，溫差較小，另外風速保持在 15 至 20 m/s，相對濕度也呈未飽和狀態。

海表溫下降根據 4.2 節中的降溫機制屬於混合與上升流所影響，不過溫度變化上較不明顯(Yang, 2022)，在暴風圈期間，海表熱通量中海洋提供至大氣的時間雖然長，但上述在暴風圈內期間皆無明顯變化，其可能是導致海表溫沒有明顯下降的原因。



Atsani (NTU1)

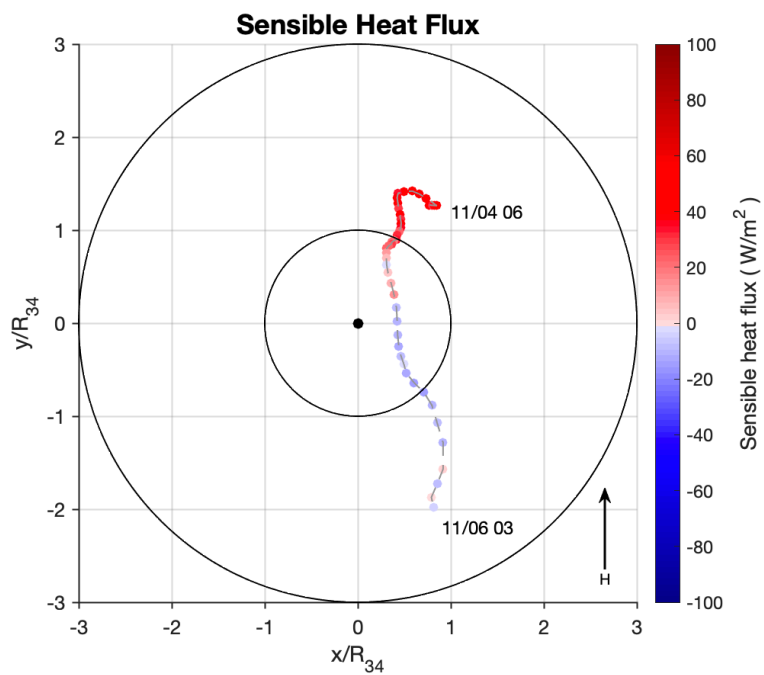
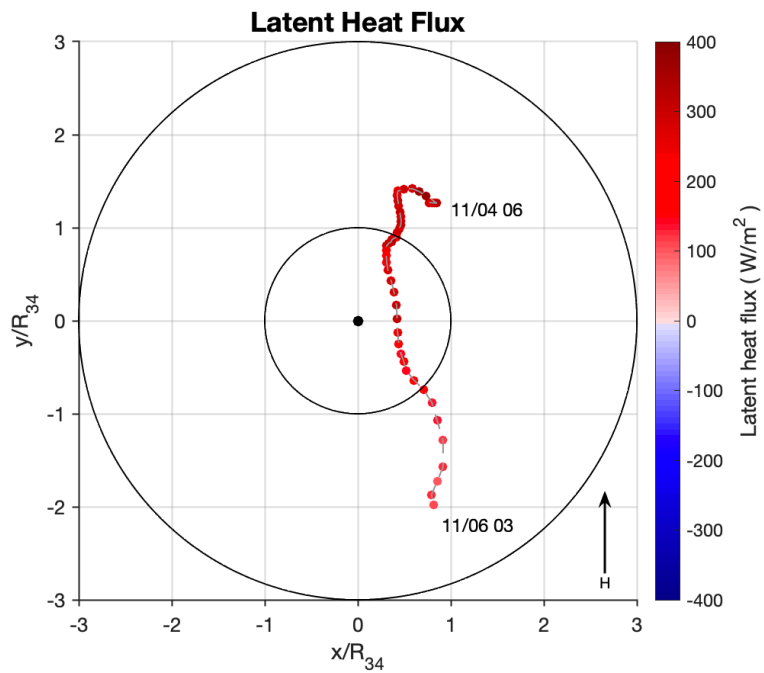


圖 4-2-21、為 2020 年閃電颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU1 站相對於閃電颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Atsani (NTU1)

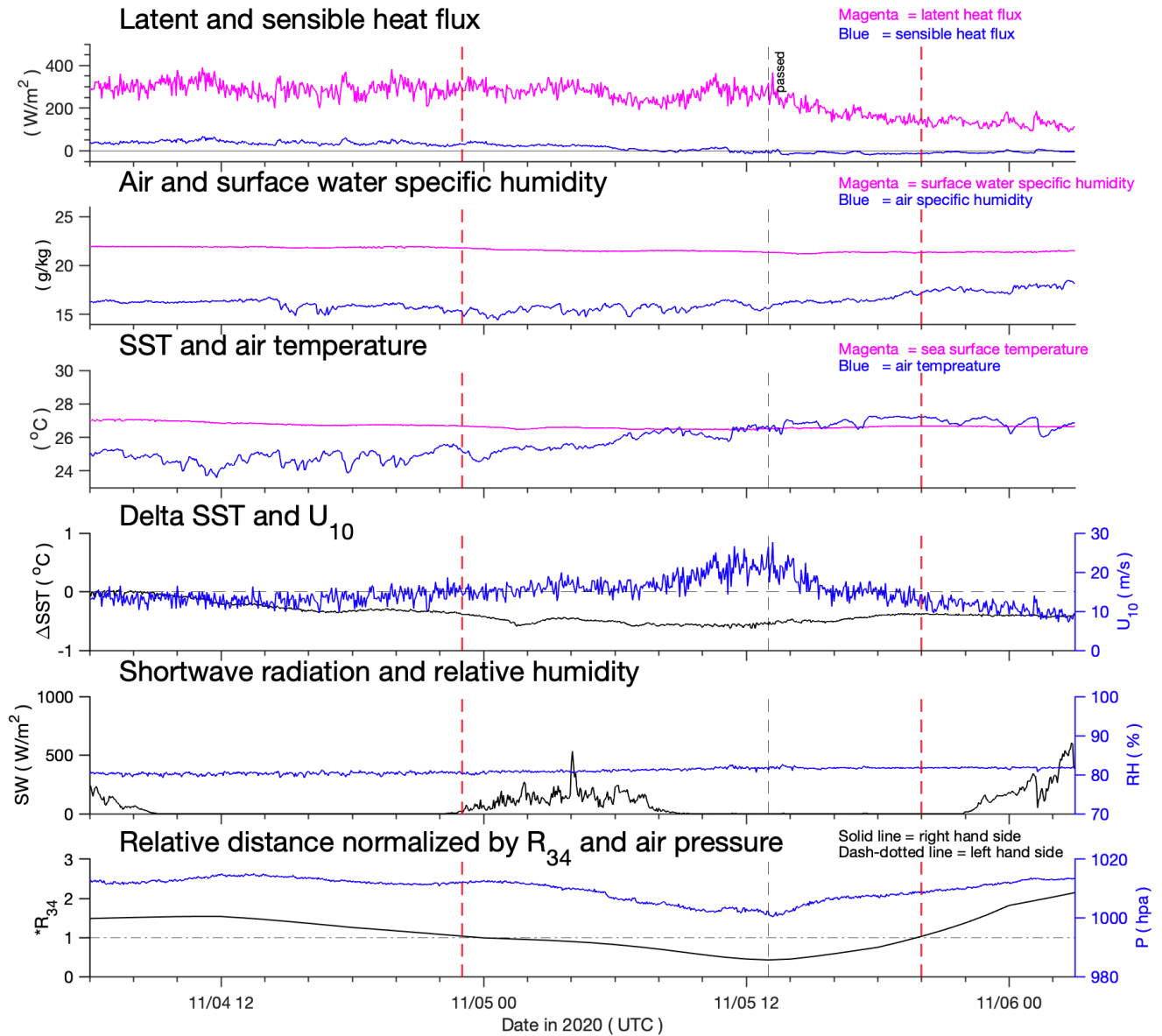


圖 4-2-22、由上而下分別為 2020 年閃電颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。

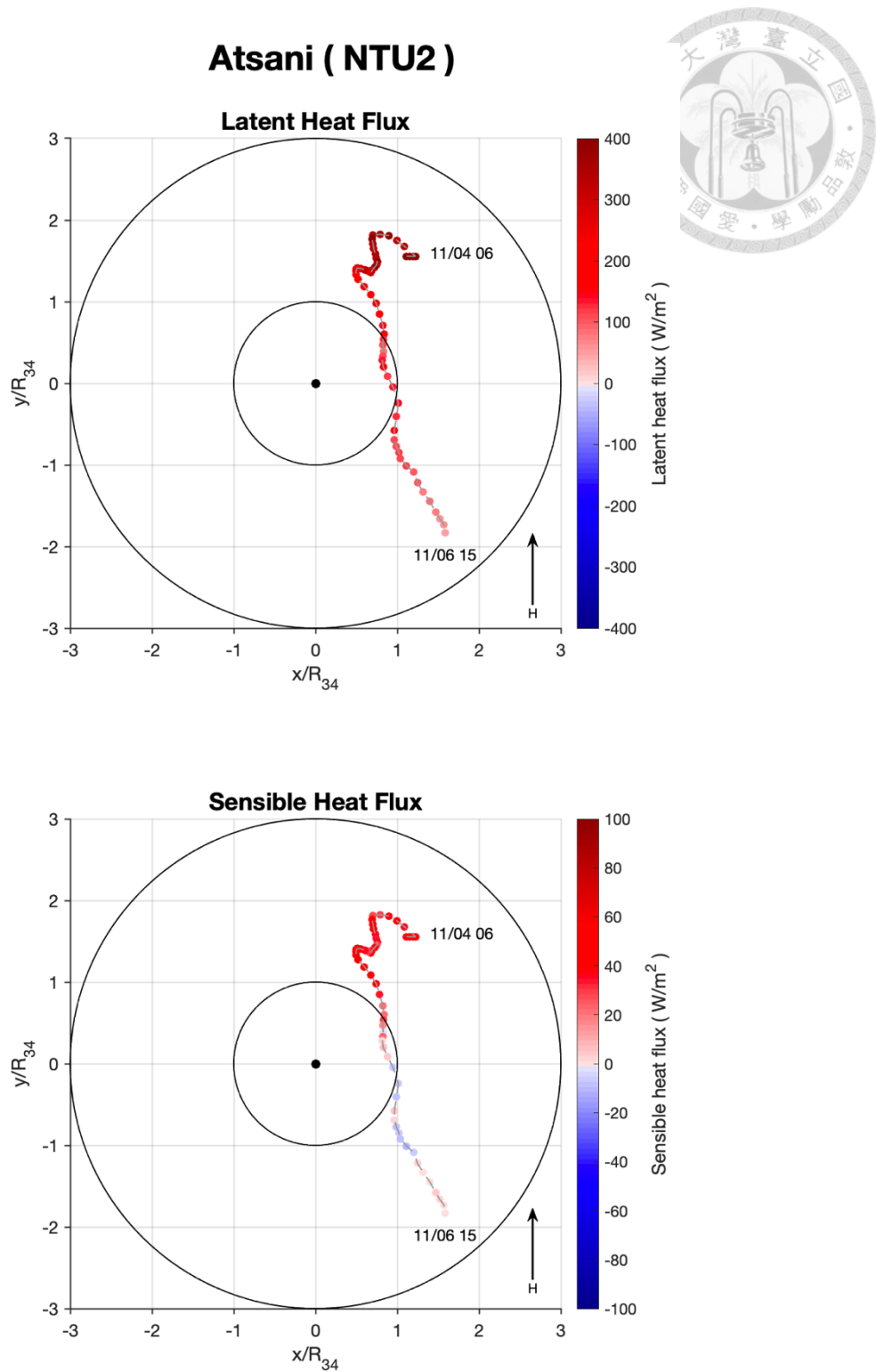


圖 4-2-23、為 2020 年閃電颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU2 站相對於閃電颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。

Atsani (NTU2)

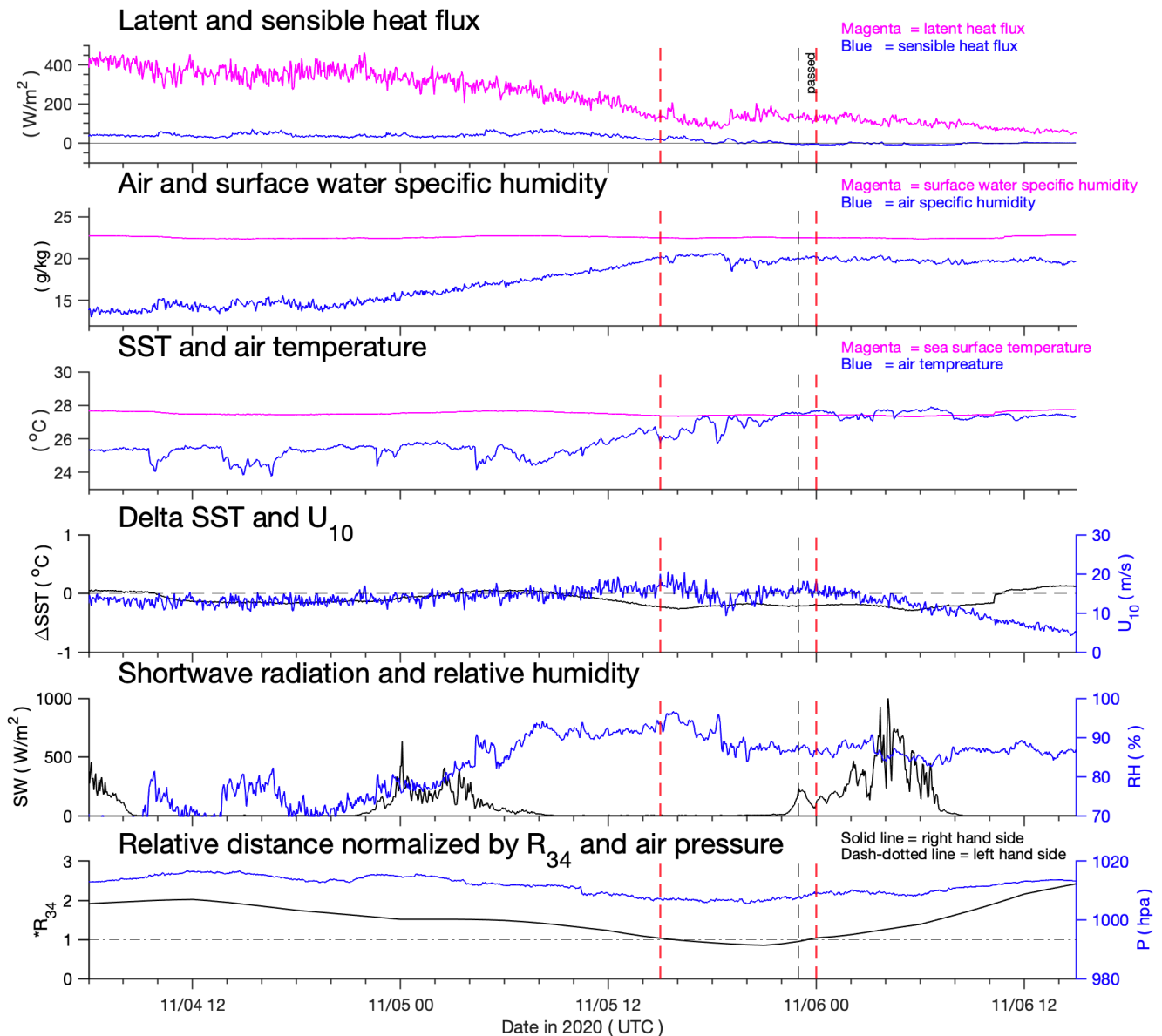


圖 4-2-24、由上而下分別為 2020 年閃電颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。



4.2.4、2021 年

4.2.4.1、璨樹颱風 (NTU1)

璨樹颱風於 2021 年 9 月 11 日最接近 NTU1 站，最近距離為 220 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-25；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-26。

根據圖 4-2-25 海表熱通量變化圖可看出，浮標位於颱風暴風圈右側邊緣，而在整個颱風事件熱通量皆為正值，為大氣從海洋中獲取能量，不過在暴風圈後半部有極大值產生。從圖 4-2-26 熱通量時序列圖可得知，在 9 月 10 日 19 時後潛熱通量上升約 200 W/m^2 ，可感熱通量則上升較潛熱通量不明顯；從溫度與比濕圖可發現，在暴風圈內比濕差並無變化太多，溫差方面則受氣溫升降溫較頻繁，此時段的潛熱通量上升主要受到風速增加的影響；另外於 9 月 11 日 9 時潛熱通量上升約 200 W/m^2 ，可感熱通量上升約 100 W/m^2 ，而從其他實測資料可發現，該段時間氣溫下降約 4°C ，相對濕度上升約 10%，接近於飽和狀態，風速則保持高值，推估是大風降雨事件所致，作用時間約 1 小時。

海表溫下降中根據 4.2 節的降溫機制屬於混合與下沉流所影響(Yang, 2022)，在颱風影響期間內氣溫變化較劇烈，降雨時段並不長，海表溫則在期間下降約 0.2°C 。



4.2.4.2、璨樹颱風 (NTU2)

璨樹颱風於 2021 年 9 月 11 日最靠近 NTU2 站，最近距離為 80 公里。根據圖 4-2-1 方法將潛熱通量與可感熱通量配合與浮標之相對位置變化圖則繪製於圖 4-2-27；海表熱通量之時間序列圖搭配浮標的實測資料繪製於圖 4-2-28。

從圖 4-2-27 海表熱通量變化圖可看出，浮標位於颱風中心右側，潛熱通量與可感熱通量皆為正值，為大氣從海洋中獲取能量。可看到在進入暴風圈內時，熱通量的值逐漸增加，並於暴風圈後半部達到最大值，並隨颱風遠離後下降；另可於圖 4-2-28 海表熱通量時序列圖看出，於 9 月 11 日 0 時至 14 時潛熱通量與可感熱通量各上升約 450 W/m^2 與 150 W/m^2 ，並從其他實測資料可發現，該時段溫度皆下降，風速成長了約 20 m/s ，相對濕度也提高約 20%，推估為大風大雨時期，且各值隨著颱風經過而緩慢下降。

海表溫下降中根據 4.2 節的降溫機制屬於混合與上升流所影響(Yang, 2022)，而在暴風圈內期間，上述提到海表熱通量上升明顯的時期，因受高風速與溫差的影響令海表溫下降約 0.7°C 。

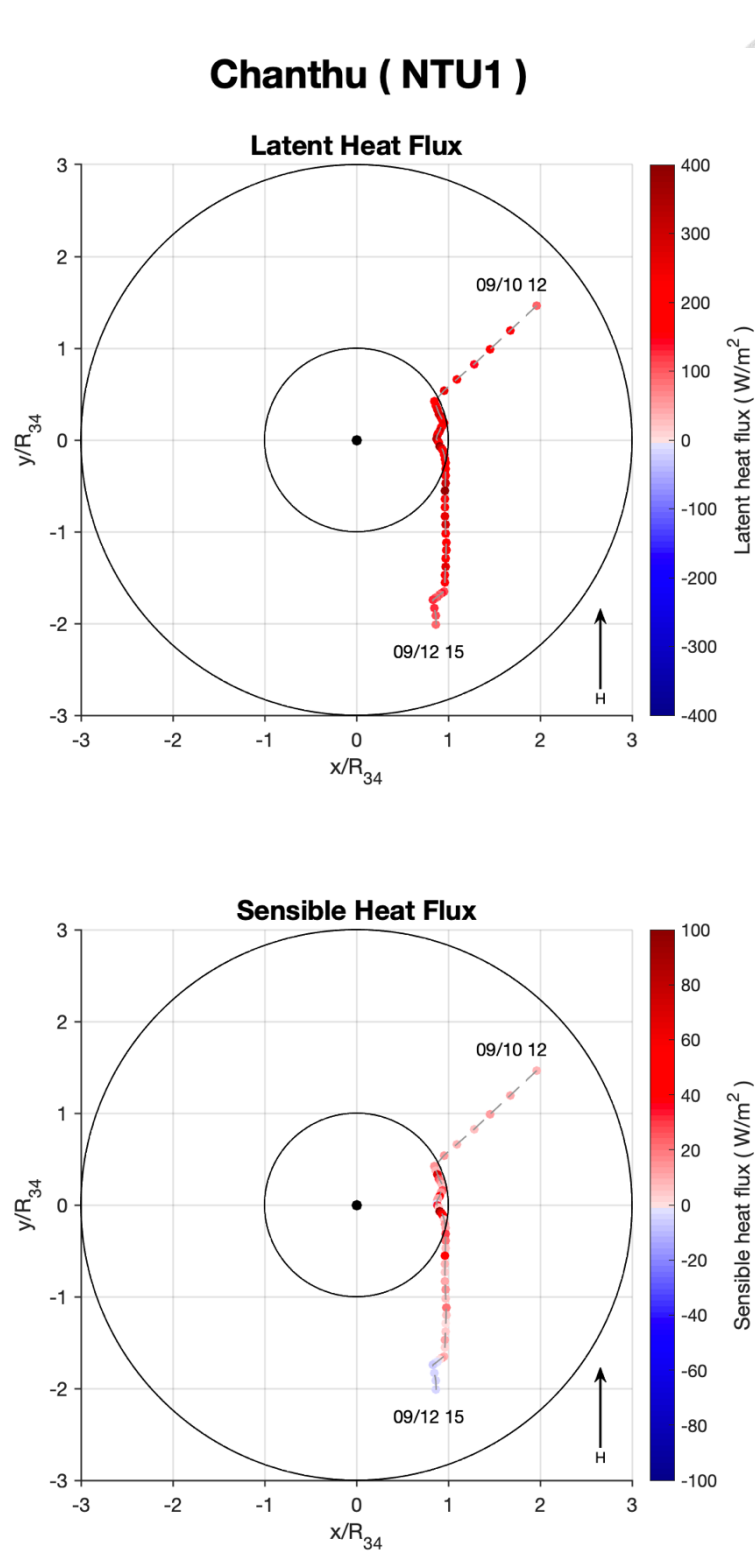


圖 4-2-25、為 2021 年璨樹颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU1 站相對於璨樹颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Chanthu (NTU1)

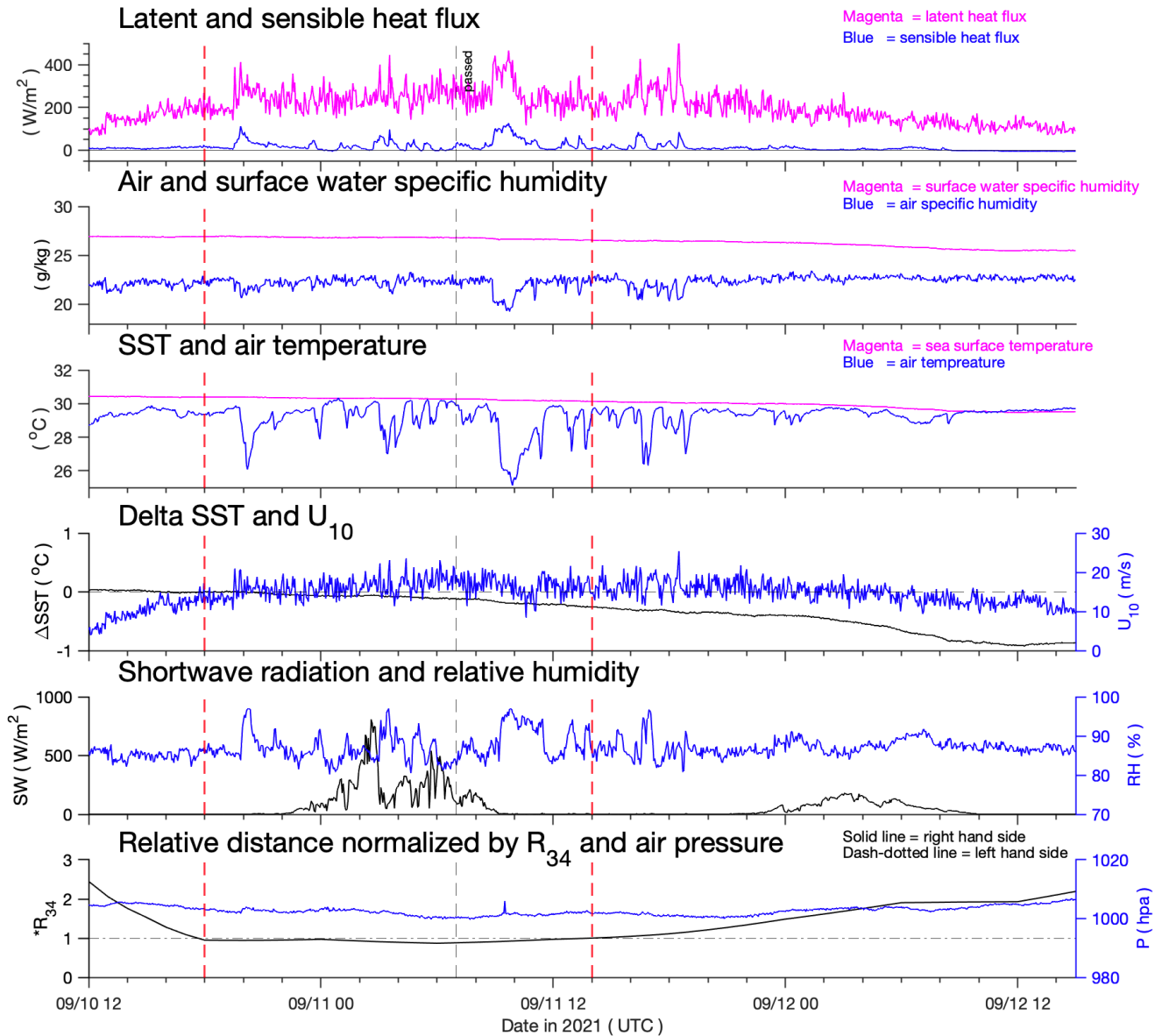


圖 4-2-26、由上而下分別為 2021 年璨樹颱風影響期間 NTU1 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。

Chanthu (NTU2)

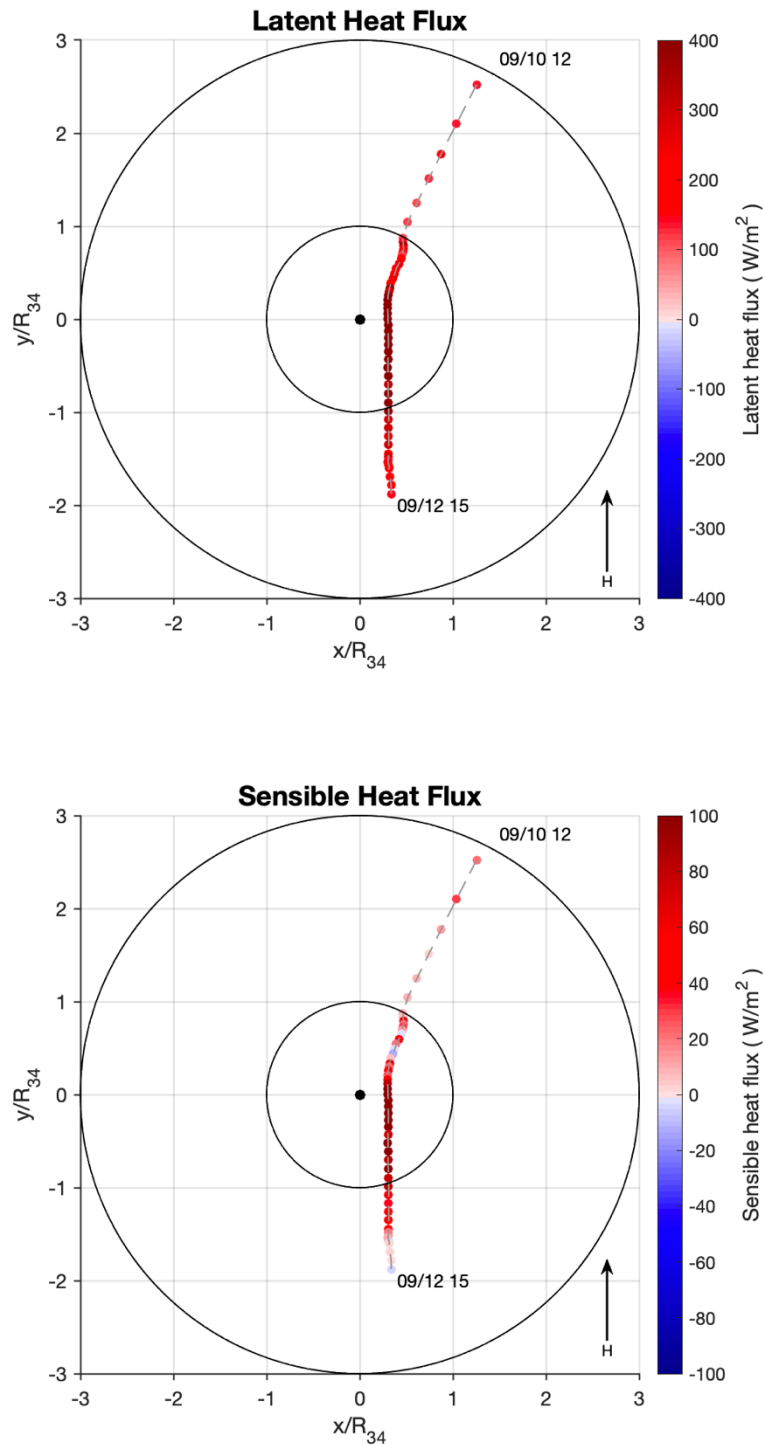


圖 4-2-27、為 2021 年璨樹颱風期間海表熱通量變化圖；上圖為潛熱通量、下圖為可感熱通量；各點位代表 NTU2 站相對於璨樹颱風中心的位置，相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；顏色代表該熱通量值。



Chanthu (NTU2)

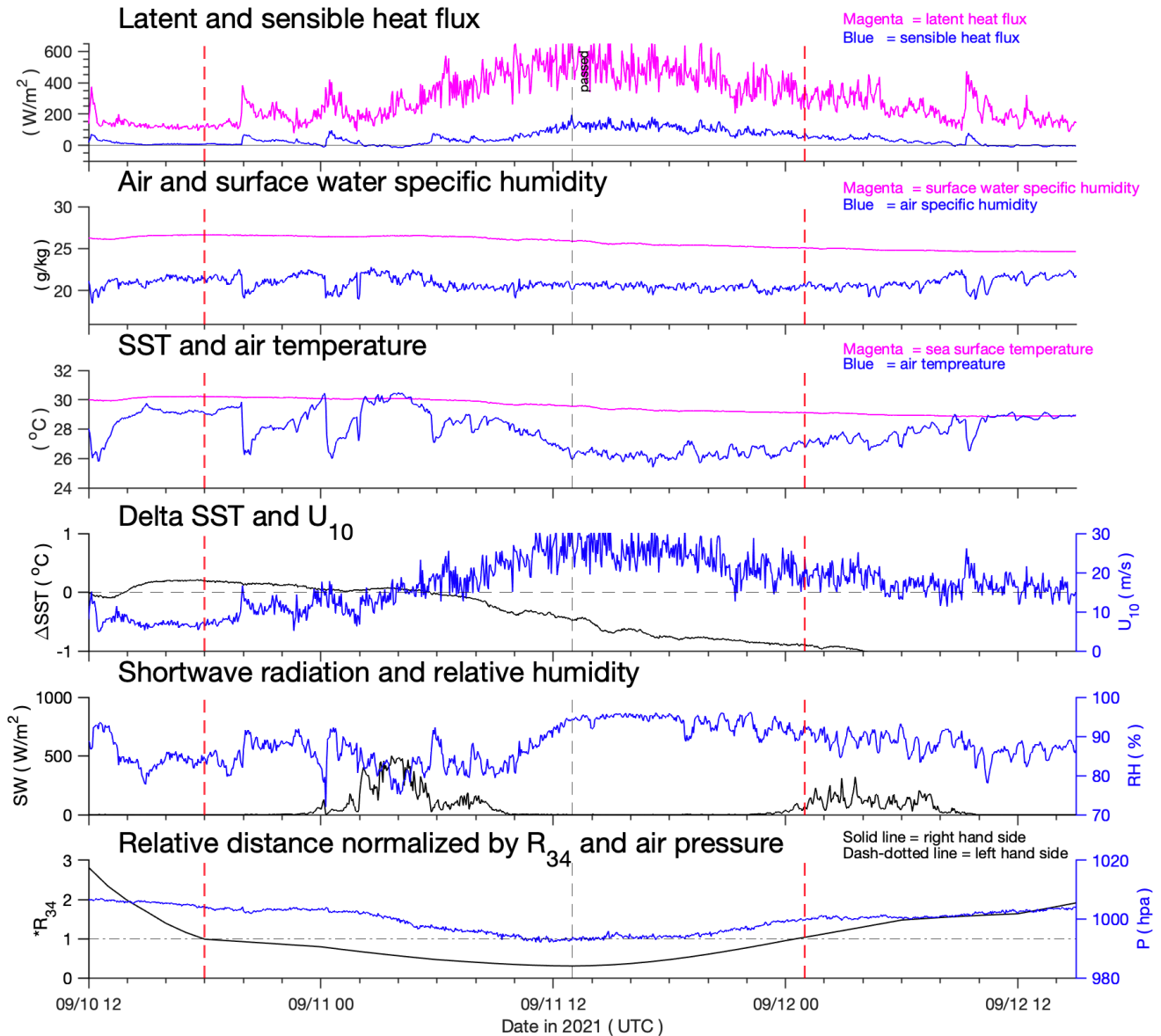


圖 4-2-28、由上而下分別為 2021 年璨樹颱風影響期間 NTU2 站的潛熱通量與可感熱通量、大氣與海洋比濕、氣溫與海表溫、海表溫變化與距地十米風速、觀測到的短波輻射量與相對濕度，以及以八級暴風圈半徑正規化的相對距離時序列圖；圖說同圖 4-2-2。




4.3、估算海表熱通量差異(實測資料與衛星產品)

為了瞭解運用實測資料與衛星產品估算潛熱通量與可感熱通量之差異，在 2.4 小節中有提到，將使用 OAFlux 的產品與利用實測資料求得的潛熱通量與可感熱通量做比較。此小節將於 2018 至 2020 年的浮標佈放期間使用每日一筆的 OAFlux 資料，用於比較實測資料與衛星遙測資料推估海表熱通量之差異，各年的海表熱通量時序列圖繪製於圖 4-3-1 至圖 4-3-6。

從整年度的海表熱通量圖可看到，2018 與 2019 年的 OAFlux 產品推估較觀測資料推估高了 1 至 2 倍，長期趨勢差距較大；2020 年的 OAFlux 產品則是比觀測資料推估低 0.5 至 1 倍，長期趨勢則較一致，至於為何會有此差異性存在，就要根據推估之方程式與兩邊資料來源中尋找可能的原因。

先從雙方的資料來源來看，實測資料已於第二章中介紹，可參照該章節；OAFlux 產品中的資料是來自多個模式或衛星的再分析資料，其中表面風速與大氣比濕資料是來自 Special Sensor Microwave Imager (SSM/I)、海表溫資料是來自 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)、其他氣象參數是來自 ECMFF 模式與 NCEP 再分析資料，再將上述資料帶入 COARE v2.6 估計潛熱通量與可感熱通量(Yu,L. *et. al*, 2004)。

因浮標佈放時段為颱風生成之旺盛季節，約在夏季至秋季，根據第二章的資料介紹與第三章的估計方法來看，在推估可感熱通量中，實測資料使用的海表溫資料為水下一公尺之溫度資料；AVHRR 的海表溫資料則是海表層溫度(Sea surface skin temperature)，在估計可感熱通量上會造成些許差距；在潛熱通量中，而 2018 與 2019 年度浮標於 6 月佈放，實測資料的夏季氣溫大多比海表溫高約 2 至 3°C，相對濕度約在 80%，使大氣比濕大於海洋比濕，進而造成潛熱通量有負值的情形出現；另外，2020 年度浮標則是於 9 月底才佈放，秋天的氣溫略低、甚至有低於海表溫的情形，使得大氣比濕小於海洋比濕，而造成整個佈放期間推估的潛熱通量皆為正值。



而在其他研究中也有做相關的比對，結果發現夏季 OAFlux 推估也高於觀測資料約 1.5 至 2 倍，而秋季也是高估約 0.5 倍，並提到海表熱通量的偏移量與季節性變化息息相關，其中潛熱通量在夏秋季的偏移量主要受到大氣比濕與風速的影響；可感熱通量的偏移量則不分四季，主要受到海表溫的影響(Zhou *et. al*, 2018)；敝人認為上述推論也跟本研究相似，2020 年潛熱通量與可感熱通量與 OAFlux 產品推估出的海表熱通量趨勢較一致是因為佈放期間為 9 月底至 11 月初，屬於秋季，大氣比濕並沒有比夏季來得高，因此在推估海表熱通量上鮮有負值的情形出現；而在 2018 與 2019 年中，因位於夏季，高氣溫與高水氣的情形會使大氣比濕較海洋比濕高，因此在推估海表熱通量上就常有負值出現，而衛星資料在推算水氣變化方面的掌握並不如觀測資料來的準確，產生的差異就比較明顯，因此水氣、大氣比濕與海表溫的資料差異皆可能造成在估算海表熱通量時的偏差。

另外，在極端天氣中，一個颱風事件的時長通常會受到颱風的移動速度所影響，而 OAFlux 為每日一筆資料，觀測資料則每 3 或 6 分鐘就有一筆資料，時間間隔差距明顯，若颱風移動速度越快，該區域受颱風影響的時間越短，若無現場高時間解析度的觀測資料，僅用每日一筆的資料則較難看出颱風影響期間的海表熱通量變化，以下將以颱風移動速度快與慢各舉一個案例，分別為 2019 年的白鹿颱風 NTU2 站與玲玲颱風 NTU1 站，而兩個案的海表熱通量時序列圖將繪製於圖 4-3-7 與圖 4-3-8。

可於圖中看到處於極端天氣的時常並不久，NTU2 站位於白鹿颱風暴風圈內僅 18 小時，而 NTU1 站位於玲玲颱風暴風圈內則是 29 個小時，每日一筆的 OAFlux 資料較難看出期間的變化性，而每 3 分鐘一筆的觀測資料則能看到短時間內的快速變化。另外，高風速與雲層覆蓋的因素使衛星在推估水氣與海表溫時不如觀測資料準確，因此實測資料在觀察並探討短時間尺度的物理現象中是不可或缺的。



2018 NTU1

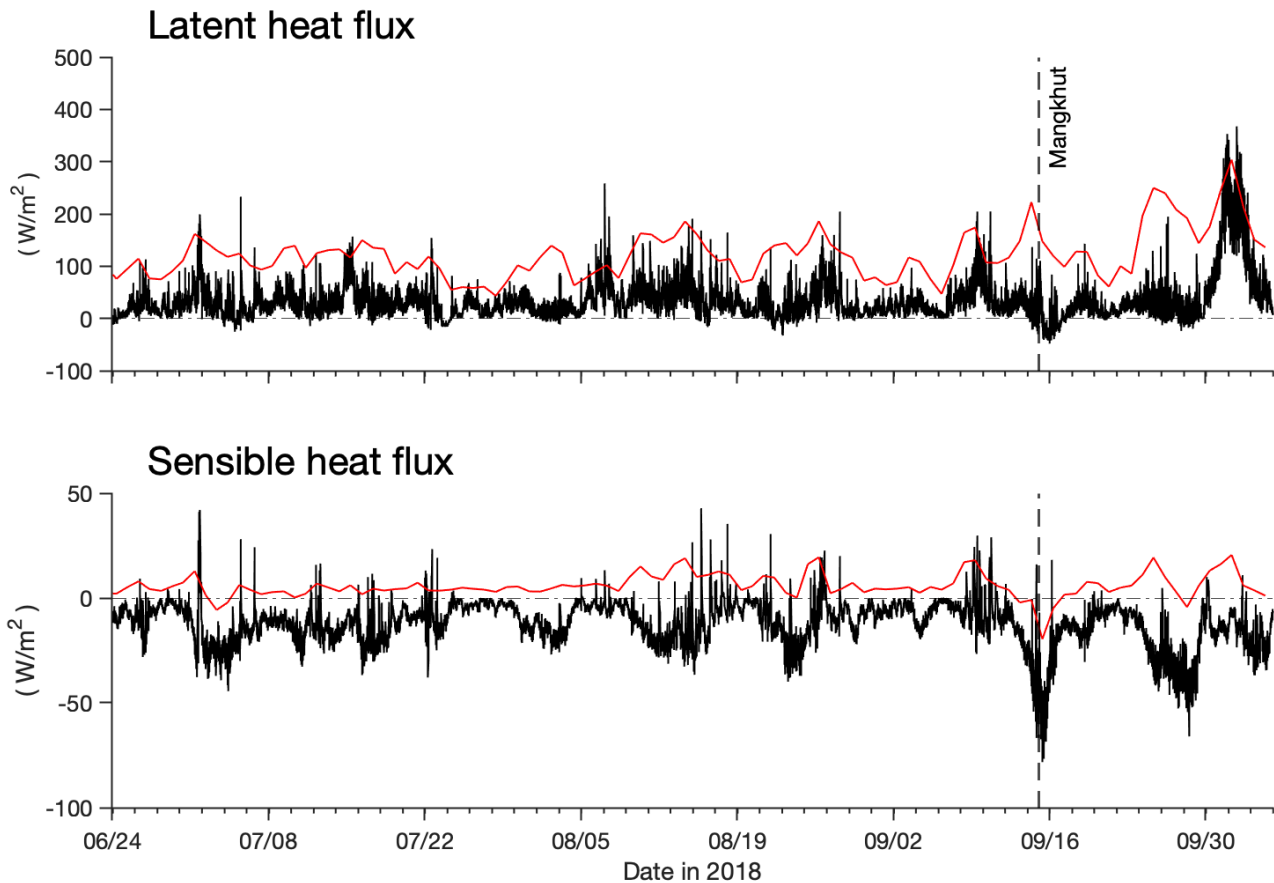


圖 4-3-1、為 2018 年 NTU1 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖；其中黑線為使用實測資料推估出；紅線為 OAF flux 產品；黑直虛線為該年觀測到颱風個案最靠近浮標的時間點；黑橫點虛線為該熱通量 0 值，以方便判斷正負值。



2018 NTU2

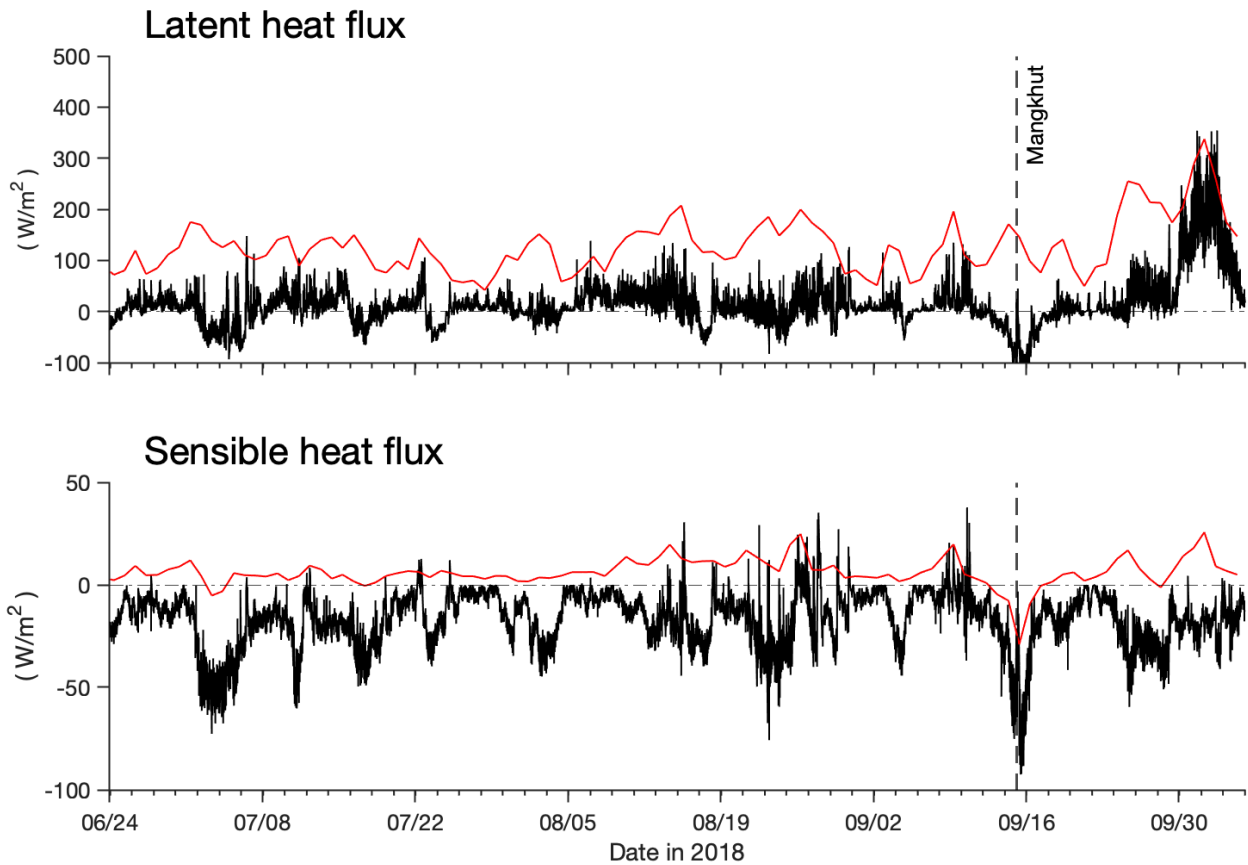


圖 4-3-2、為 2018 年 NTU2 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖；其中黑線為使用實測資料推估出；紅線為 OAF flux 產品；黑直虛線為該年觀測到颱風個案最靠近浮標的時間點；黑橫點虛線為該熱通量 0 值，以方便判斷正負值。

2019 NTU1

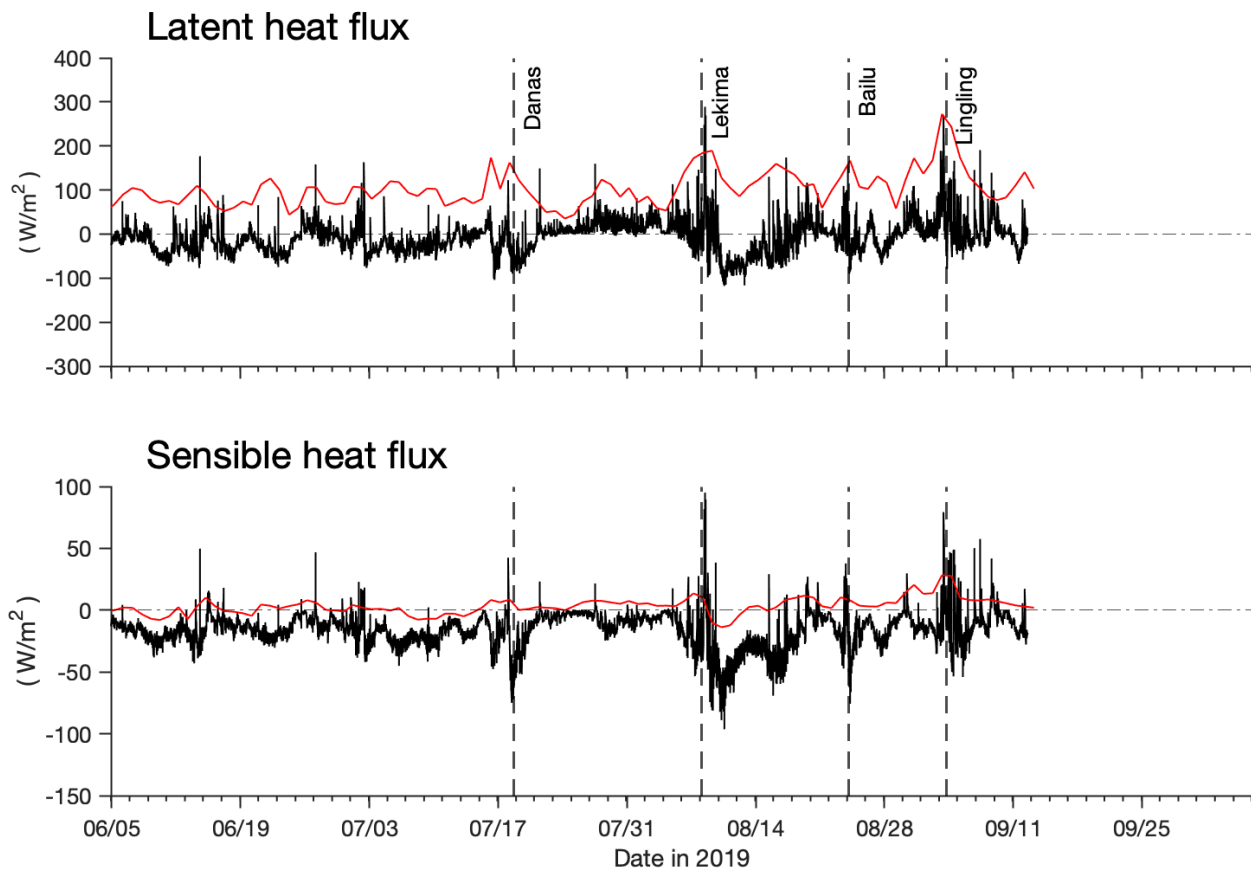


圖 4-3-3、為 2019 年 NTU1 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖；其中黑線為使用實測資料推估出；紅線為 OAFflux 產品；黑直虛線為該年觀測到颱風個案最靠近浮標的時間點；黑橫點虛線為該熱通量 0 值，以方便判斷正負值。

2019 NTU2

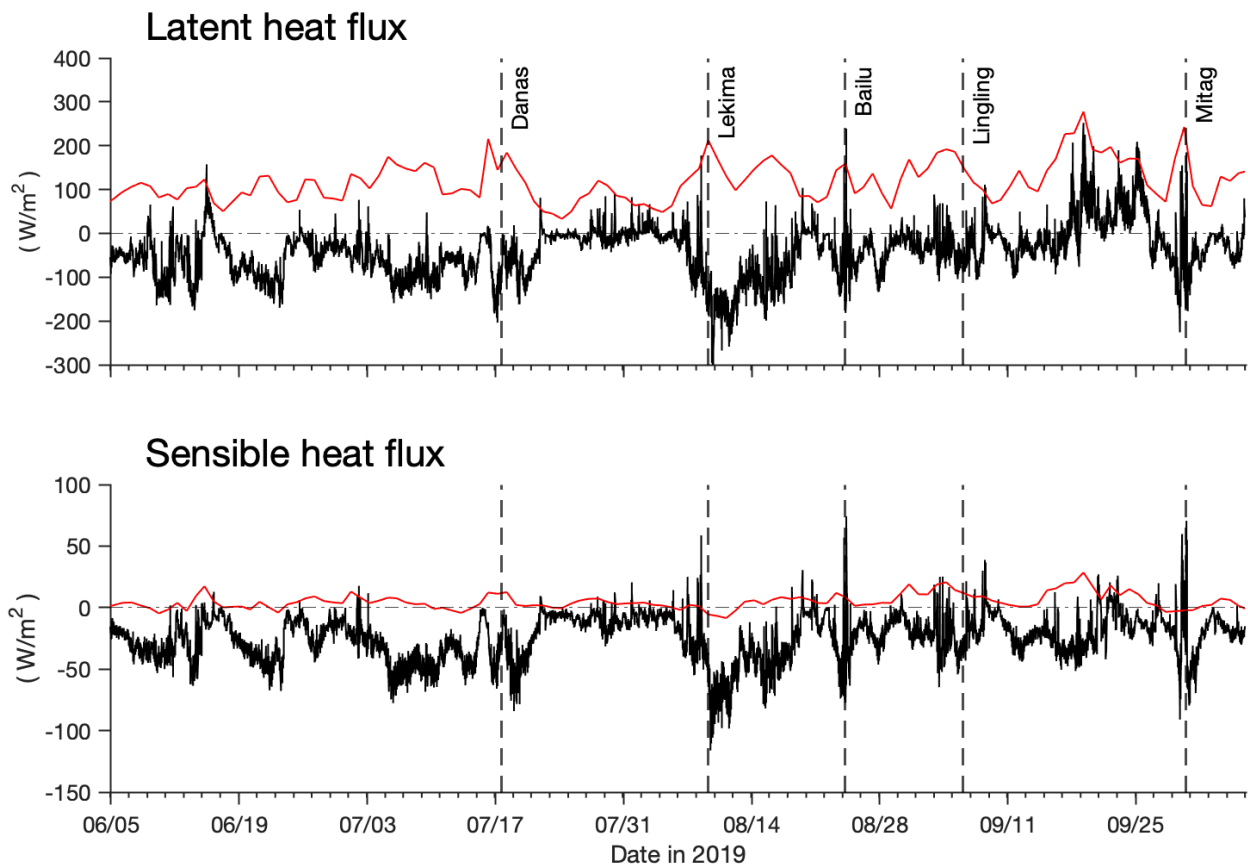


圖 4-3-4、為 2019 年 NTU2 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖；其中黑線為使用實測資料推估出；紅線為 OAF flux 產品；黑直虛線為該年觀測到颱風個案最靠近浮標的時間點；黑橫點虛線為該熱通量 0 值，以方便判斷正負值。



2020 NTU1

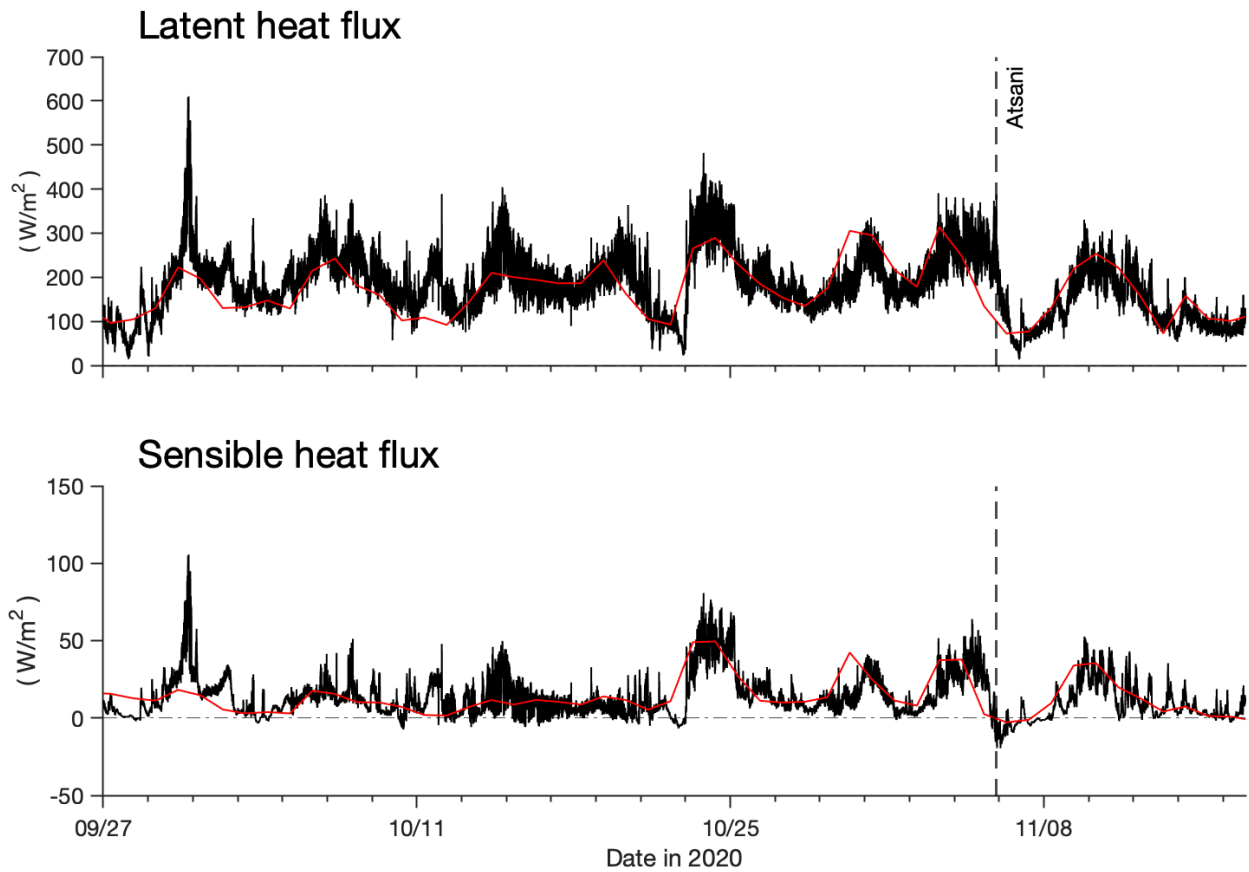


圖 4-3-5、為 2020 年 NTU1 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖；其中黑線為使用實測資料推估出；紅線為 OAF flux 產品；黑直虛線為該年觀測到颱風個案最靠近浮標的時間點；黑橫點虛線為該熱通量 0 值，以方便判斷正負值。

2020 NTU2

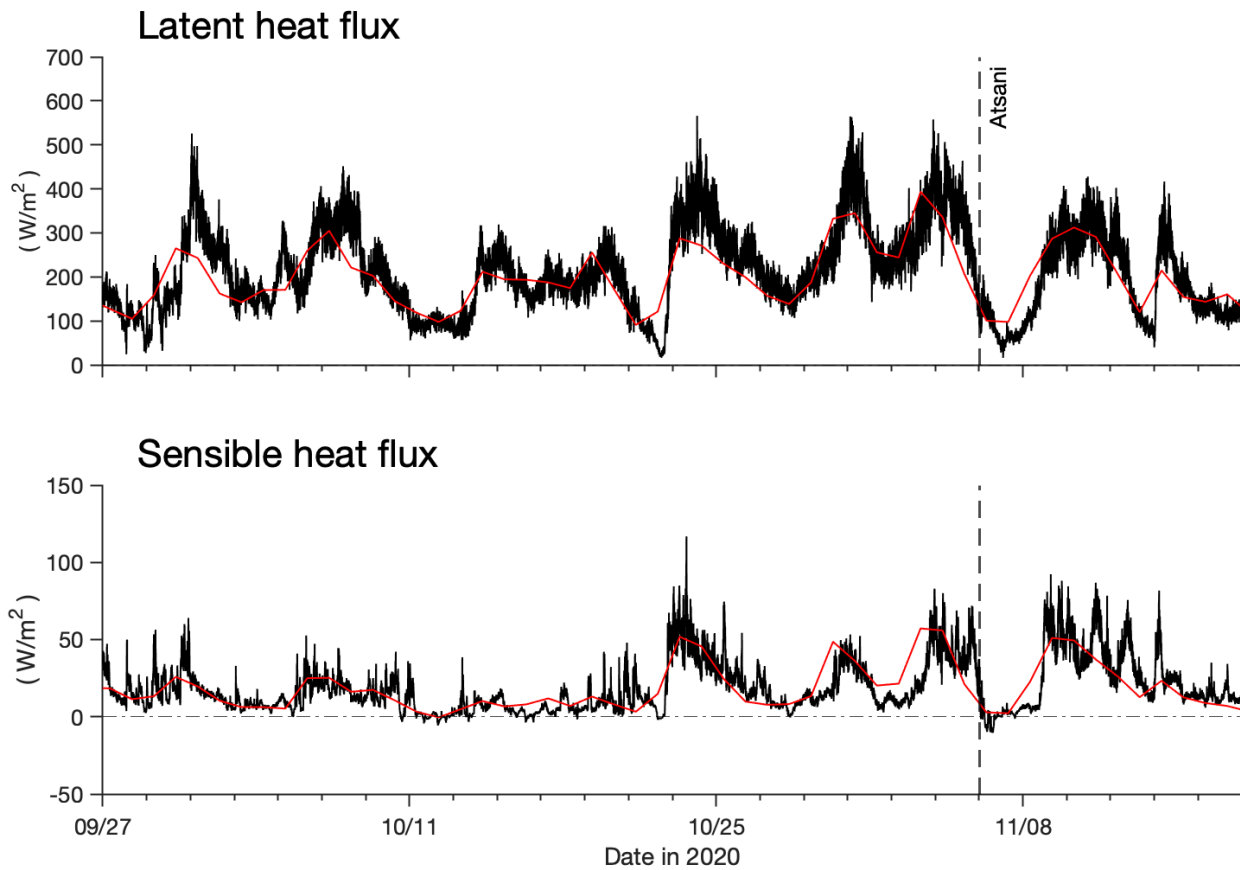


圖 4-3-6、為 2020 年 NTU2 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖；其中黑線為使用實測資料推估出；紅線為 OAF flux 產品；黑直虛線為該年觀測到颱風個案最靠近浮標的時間點；黑橫點虛線為該熱通量 0 值，以方便判斷正負值。



Bailu (NTU2)

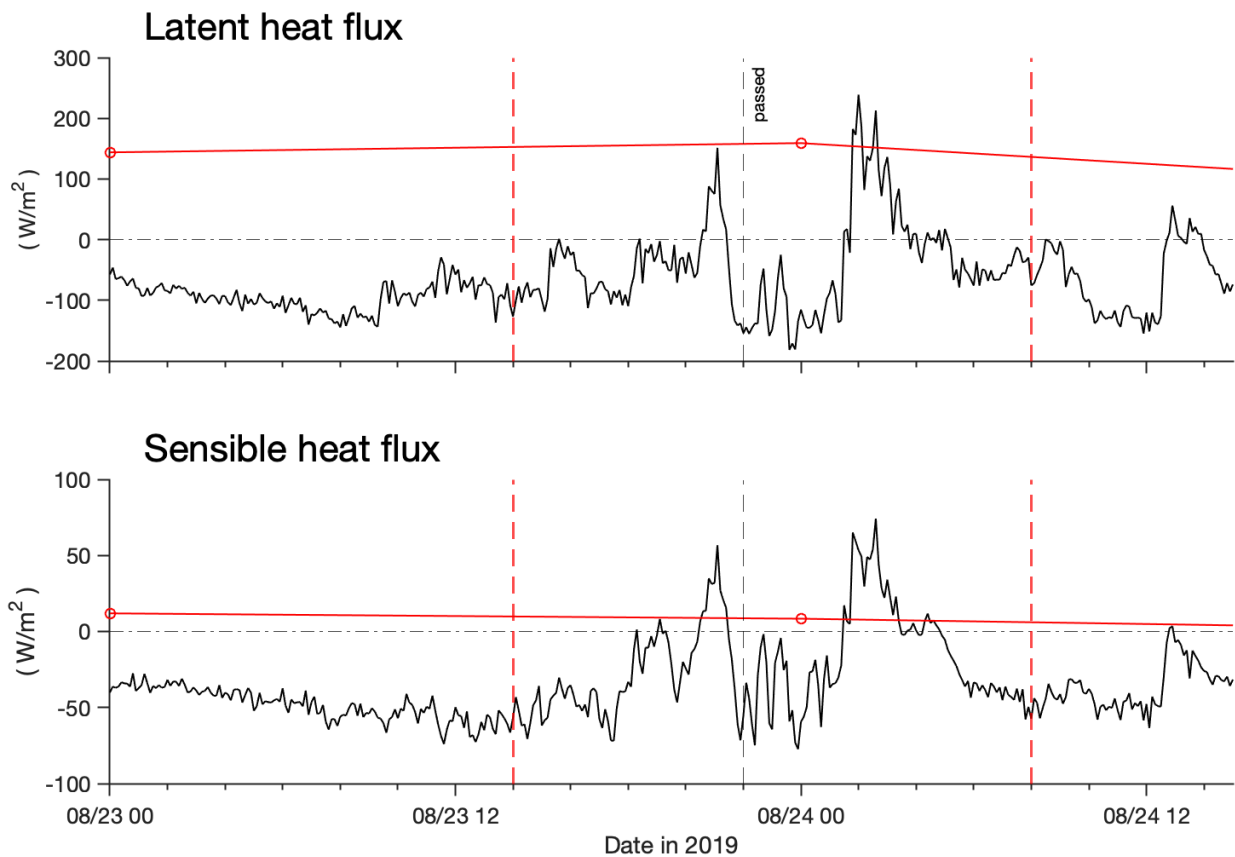


圖 4-3-7、為 2019 年白鹿颱風影響 NTU2 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖；其中黑線為使用實測資料推估出；紅線為 OAF flux 產品；垂直紅線為浮標進入與離開八級暴風圈的時間點；垂直黑線則為颱風暴風圈前後半部交界的時間點；黑橫點虛線為該熱通量 0 值，以方便判斷正負值。

Lingling (NTU1)

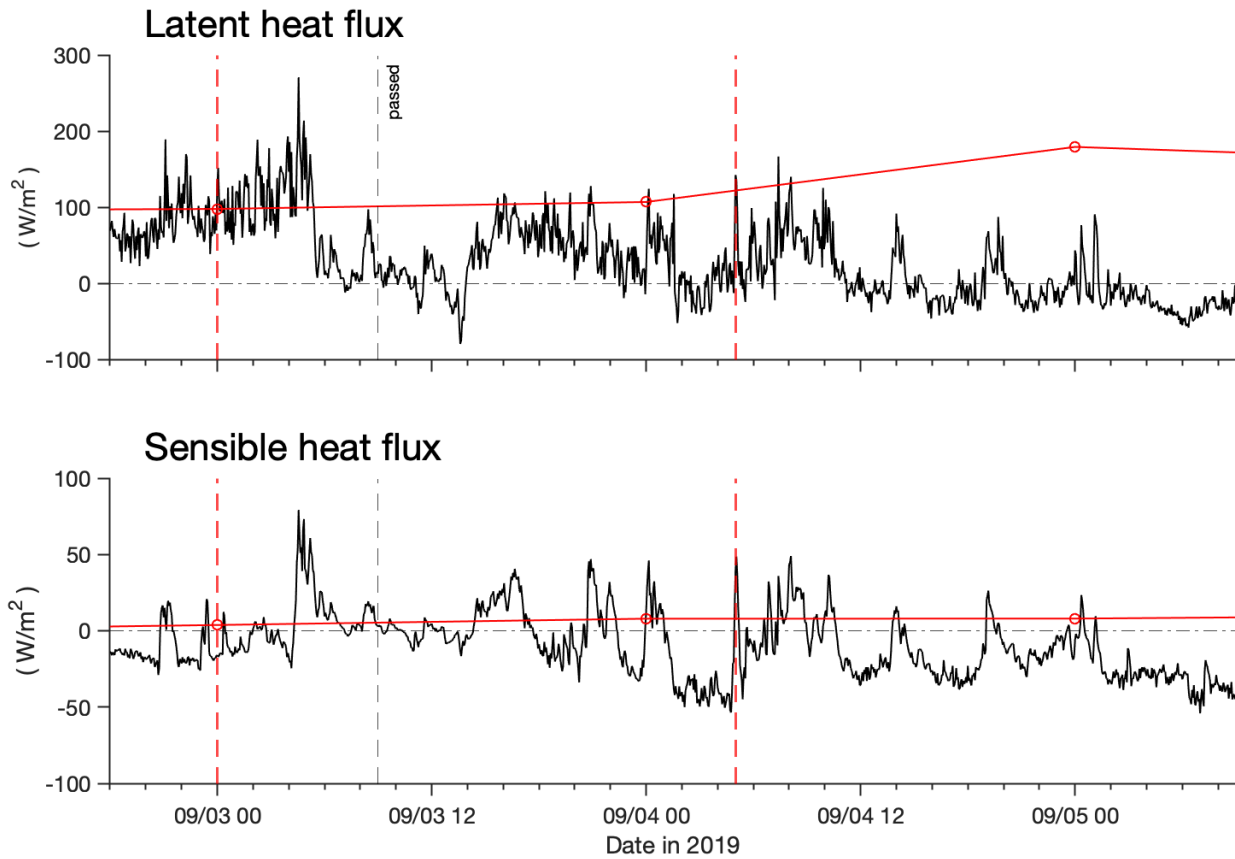


圖 4-3-8、為 2019 年玲玲颱風影響 NTU1 站之潛熱通量與可感熱通量時序列圖；其中黑線為使用實測資料推估出；紅線為 OAF flux 產品；垂直紅線為浮標進入與離開八級暴風圈的時間點；垂直黑線則為颱風暴風圈前後半部交界的時間點；黑橫點虛線為該熱通量 0 值，以方便判斷正負值。

第五章 討論與總結



本節將對上一章所提到風浪的方向與極大值之時間差特性與颱風期間的海表熱通量分析進行進一步討論。另因颱風個案眾多，為精簡版面，以下將颱風個案名稱簡化，例如 NTU1 站在山竹颱風影響期間，改以”山竹(1)”呈現，以此類推。

5.1、颱風期間風浪變化

根據前一章的探討結果，主要將眾多個案中利用彼此的最近相對距離與浮標位於颱風中心之左右側進行分類，試著尋找一些類似之處，其中將各颱風個案的風速變化圖繪製於圖 5-1-1、示性波高變化圖繪製於圖 5-1-2、風向與主波方向角度差值圖繪製於圖 5-1-3，最後也將上述相關資訊以表格方式整理於表 5-1-1。

從這三張統整圖中可得知 2018 至 2021 年 NTU1 站與 NTU2 站分別觀測到 7 個、總共 14 個進入到颱風八級暴風圈的個案事件，其中有 8 個颱風個案與浮標最近距離小於 0.5 倍八級暴風圈半徑，位於各圖中兩直行的位置；6 個則是介於 0.5 至 1 倍八級暴風圈半徑，並位於各圖中左右兩側的位置。因相對距離越近，風速、浪高受颱風影響較大，成長幅度較明顯，風向與主波方向的轉變角度也會越多，方向轉變的時間較短；若相對距離較遠，風速、浪高成長幅度有限，變化角度較少，方向轉變的時間則較長。而大部分的個案在進入暴風圈內時風向會先行轉向，隨後浪向才受其影響而跟著轉變，兩者在開始轉向時會存在著時間差，後續的時間差值表示將以風向開始轉向做為基準，來看主波方向隔多久才開始轉向，另外風向與主波方向開始轉向的時間差又會根據浮標位於颱風中心左右側而有不同情況。

從圖 5-1-1 與圖 5-1-2 中可看到，將相對距離與浮標位置來區分後，若浮標位於颱風中心左側，若相對距離較遠(圖中第一行)，風速成長幅度有限，最大風速值

主要出現在暴風圈後半部，而浪高最大值則是離開暴風圈後才達最大值，代表風速比浪高先到達最大值；在圖 5-1-3 中的方向角差值於暴風圈內有明顯較深紅色階的情形，代表在該段時間風向角已開始轉向、主波方向角尚未轉向所造成較大的角度差，該現象持續時間約為 6 至 9 小時，不過此類型個案僅利奇馬颱風一個，日後可能需要更多類似個案加以觀察。另外，在表 5-1-1 中也可看到表格右下角區域有上述提到該分類類型的基本數值資訊，其中風向與浪向開始轉向時間差以及最大風速與最大浪高產生時間差皆以風為基準，以判讀浪相對於風的差距。

位於颱風左側且相對距離較近的個案(圖中第二行)風速與浪高皆於暴風圈前半部快速成長，不過可注意到圖中顏色最深的位置，風速最大值大多出現在颱風中心附近，浪高最大值則是出現在暴風圈前半部的位置，也就是說風速比浪高較晚到達最大值(玲玲(1)；米塔(2))；圖 5-1-3 中除丹娜絲(2)外，方向角差值在暴風圈前後半部交界處有較明顯變深的色階變化，也是代表在該段時間風向角已開始轉向、主波方向角尚未轉向的過程，持續時間約為 3 小時，在表 5-1-1 中也可看到表格左下角區域有上述提到該分類類型的基本數值資訊。而丹娜絲颱風因其結構較鬆散且不對稱，位於暴風圈內的時間較短，而其結構之第三、第四象限暴風圈半徑與第一、第二象限暴風半徑相差約 3 倍，因此浪高在颱風經過後才緩慢成長，並無與玲玲(1)和米塔(2)在暴風圈前半部時浪高已成長明顯；另外，丹娜絲(2)的最近距離為 $0.45R_{34}$ ，在主波方向轉變的表現上比其他個案較不穩定，可從圖 5-1-3 中看出在整個颱風事件中的色階變化較大。

若浮標位於颱風中心右側，相對距離較近的個案們(圖中第三行)在暴風圈前半部裡風速與示性波高皆成長快速，而風速最大值通常會出現在颱風中心附近，浪高則會於暴風圈前半部達到最大值，風速通常比浪高較晚達最大值(白鹿(1&2)；閃電(1)；璨樹(2))；在圖 5-1-3 中方向角差值方面因相對距離近，主波方向變化主要受到強風影響，角度差值並不大，不過在颱風中心附近處可注意到色階有較明顯的變化，代表在該段時間風向角已開始轉向、主波方向角尚未轉向的過程，而持續時間

約為 0 至 3 小時，在表 5-1-1 中也可看到表格左上角區域有上述提到該分類類型的基本數值資訊。

若位於颱風中心右側且相對距離較遠(圖中第四行)，風速成長幅度有限，大多在暴風圈前半部達到最大值，而浪高則於暴風圈後半部達最高值，代表風速比浪高先到達最大值(山竹(1&2)；閃電(2)；璨樹(1))；圖 5-1-3 中方向角差值因相對距離遠，主波方向變化受強風作用較低，從圖中色階上的變化可得知兩者角度差的變動幅度較大，較無統一性，而色階較深的區域大多出現在暴風圈前半部，代表在該段時間風向角已開始轉向、主波方向角尚未轉向的過程，造成該時段的角度差較大，過了颱風中心後色階較淺一些，角度差較小，而上述提到色階較深的時段持續時間約為 1 至 3 小時，在表 5-1-1 中也可看到表格右上角區域有上述提到該分類類型的基本數值資訊。

The wind speed in typhoon cases observed by NTU buoys (2018 to 2021)

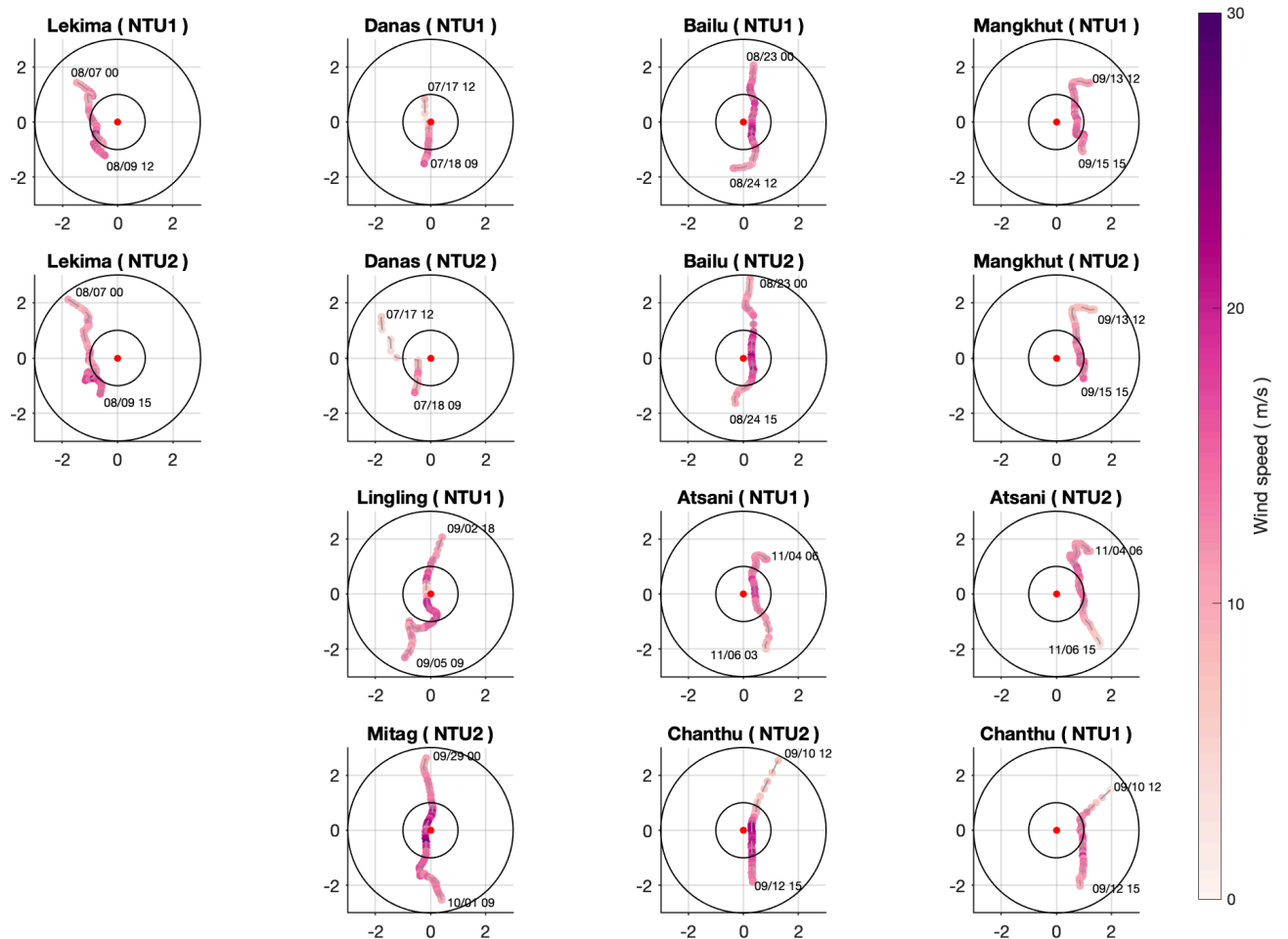


圖 5-1-1、為 2018 至 2021 年各颱風個案之風速變化圖；相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；其中最左行至最右行依序為位於颱風中心左側且最近相對距離大於 $0.5R_{34}$ 、位於颱風中心左側且最近距離小於 $0.5R_{34}$ 、位於颱風中心右側且最近距離小於 $0.5R_{34}$ 與位於颱風中心右側且最近距離大於 $0.5R_{34}$ ；顏色色階代表風速大小。



The significant wave height in typhoon cases observed by NTU buoys (2018 to 2021)

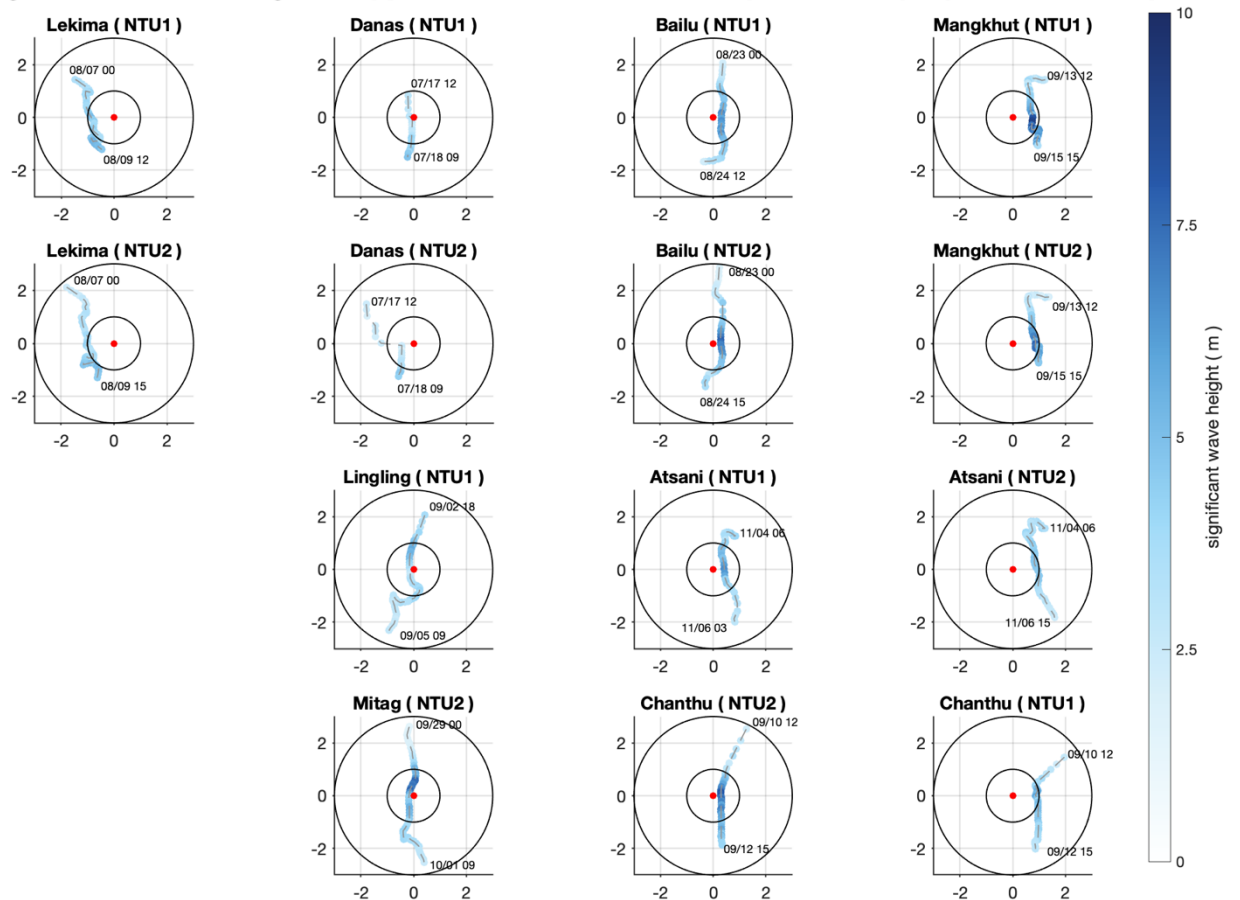


圖 5-1-2、為 2018 至 2021 年各颱風個案之示性波高變化圖；相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；其中最左行至最右行依序為位於颱風中心左側且最近相對距離大於 $0.5R_{34}$ 、位於颱風中心左側且最近距離小於 $0.5R_{34}$ 、位於颱風中心右側且最近距離小於 $0.5R_{34}$ 與位於颱風中心右側且最近距離大於 $0.5R_{34}$ ；顏色色階代表波高大小。



The direction difference between wind and wave in typhoon cases (2018 to 2021)

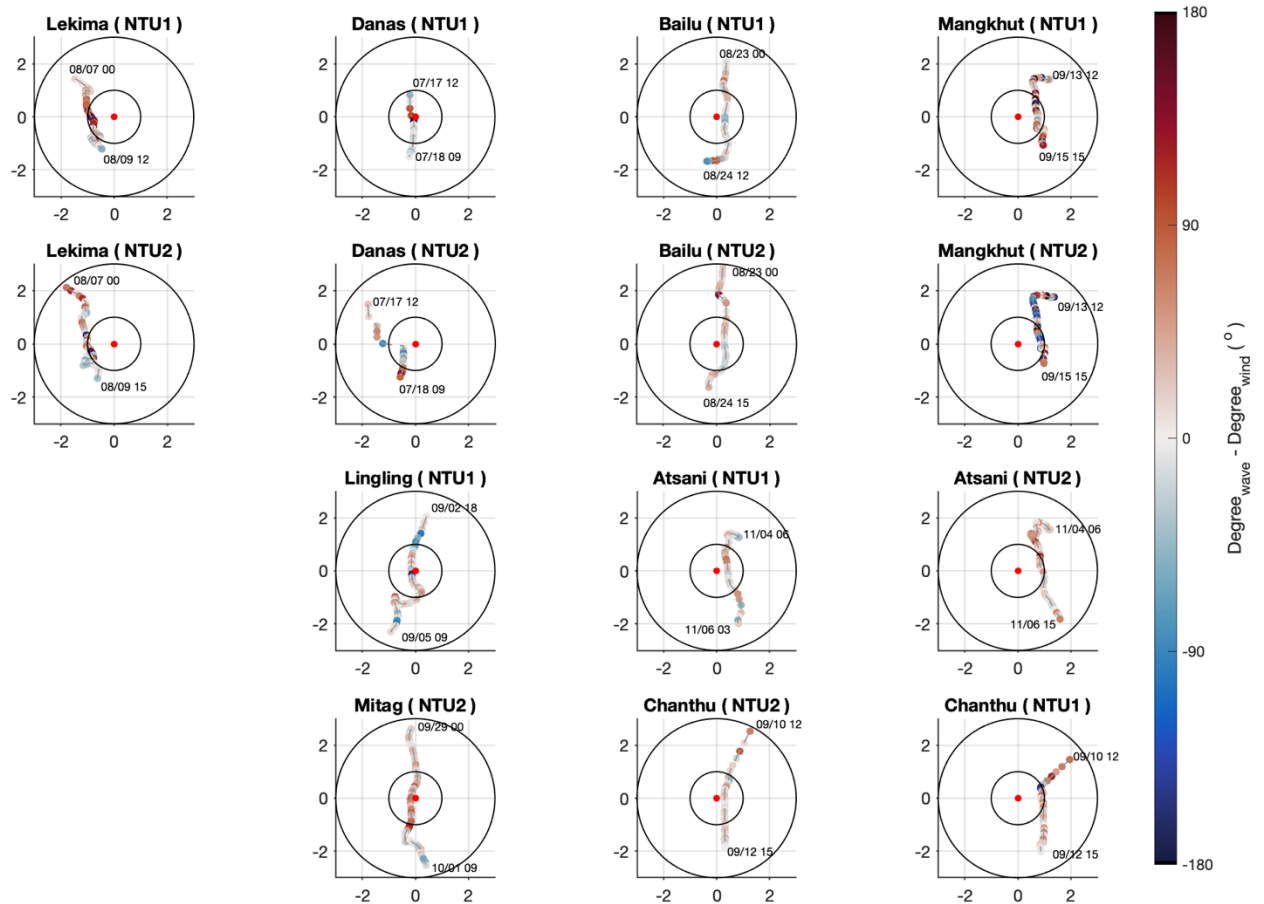


圖 5-1-3、為 2018 至 2021 年各颱風個案之主波方向與風向角度差值變化圖；相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；其中最左行至最右行依序為位於颱風中心左側且最近相對距離大於 $0.5R_{34}$ 、位於颱風中心左側且最近距離小於 $0.5R_{34}$ 、位於颱風中心右側且最近距離小於 $0.5R_{34}$ 與位於颱風中心右側且最近距離大於 $0.5R_{34}$ ；顏色中紅色代表主波方向角大於風向角、藍色則代表主波方向角小於風向角；色階深淺代表相差的角度多寡。

表 5-1-1、2018 至 2021 年間各颱風個案之風浪變化資訊彙整表

最近距離 浮標位置	$R_{min} < 0.5R_{34}$				$0.5R_{34} < R_{min} < 1R_{34}$			
位於颱風中心 右側	個案名	R_{min} ($\times R_{34}$)	$max(U_{10})$ (m/s)	$max(H_s)$ (m)	個案名	R_{min} ($\times R_{34}$)	$max(U_{10})$ (m/s)	$max(H_s)$ (m)
	白鹿(1)	0.32	28	6.6	山竹(1)	0.73	24	9.0
	白鹿(2)	0.29	30	7.7	山竹(2)	0.83	22	8.0
	閃電(1)	0.42	27	6.6	閃電(2)	0.86	20	5.1
	璨樹(2)	0.30	34	8.0	璨樹(1)	0.87	25	6.0
	風向轉變角度：120°~130° 浪向轉變角度：90°~110° 風向與浪向開始轉向時間差：約 0~3 hr $max(U_{10})$ 與 $max(H_s)$ 產生時間差：-3 ~ 5 hr				風向轉變角度：50°~70° 浪向轉變角度：60°~90° 風向與浪向開始轉向時間差：約 1~3 hr $max(U_{10})$ 與 $max(H_s)$ 產生時間差：2 ~ 6 hr			
位於颱風中心 左側	個案名	R_{min} ($\times R_{34}$)	$max(U_{10})$ (m/s)	$max(H_s)$ (m)	個案名	R_{min} ($\times R_{34}$)	$max(U_{10})$ (m/s)	$max(H_s)$ (m)
	丹娜絲(1)	0.07	20	5.0	利奇馬(1)	0.77	28	5.5
	丹娜絲(2)	0.45	17	4.5	利奇馬(2)	0.88	25	5.2
	玲玲(1)	0.14	32	5.8				
	米塔(2)	0.17	32	7.7				
	風向轉變角度：180°~250° 浪向轉變角度：170°~230° 風向與浪向開始轉向時間差：約 6 hr $max(U_{10})$ 與 $max(H_s)$ 產生時間差：-6 ~ 6 hr				風向轉變角度：120°~150° 浪向轉變角度：120°~150° 風向與浪向開始轉向時間差：約 6~9 hr $max(U_{10})$ 與 $max(H_s)$ 產生時間差：5 ~ 22 hr			




5.2、颱風期間海表熱通量變化

在 2018 至 2021 年間共 14 個颱風個案中，根據分析後發現在颱風期間的熱通量變化趨勢主要分四種情形，第一種為潛熱通量與可感熱通量同為正，代表大氣不斷從海洋中獲取能量；第二種為潛熱通量與可感熱通量同為負，代表大氣持續在失去能量；第三種為熱通量正負變化頻繁，代表大氣除了從海洋獲得能量外，也在釋放能量，而潛熱通量與可感熱通量的趨勢變化一致，最後一種則是潛熱通量與可感熱通量為異號，其中潛熱通量為正，可感熱通量則為負，代表在可感熱通量中為大氣在釋放能量，而潛熱通量則是大氣從海洋中獲取能量；並將上述提及的特性與颱風個案統整繪製於圖 5-2-1 與圖 5-2-2，另以表格方式整理於表 5-2-1。

在統整圖表中，試著與 5.1 節一樣的分類依據來歸納颱風期間海表熱通量的變化。在先前的研究中指出，颱風經過後在右側的區域通常會產生 cold wake，使海表溫明顯下降(Geisler, 1970)，不過經分析後於圖 5-2-1 與圖 5-2-2 中發現，相對距離較近的個案中，無論是位於颱風中心左或右側，海表熱通量的變化較無統一性；相對距離較遠的個案中，除了山竹(2)之外，位於颱風中心右側的海表熱通量大多為正值，而位於颱風中心左側的個案大多為負值，另外值得注意的是，大多個案在暴風圈內時會有海表熱通量正負變化的情形，其原因可能是颱風影響期間主要受大氣在短時間內的大幅變動所影響，也可從表 5-2-1 中可看出在四種分類裡，各熱通量的變化情形皆有，與相對位置的關係上並無太大相關性，以下將詳細介紹影響海表熱通量變化的主因。

可感熱通量的正負變化主要為受到氣溫與海表溫差所影響，振幅變化除了大幅度溫差影響外，風速與氣壓的大小也有其影響力存在；而潛熱通量的變化就較可感熱通量來得複雜，潛熱通量的正負變化主要受到大氣與海洋比濕差所影響，而大氣比濕與海洋比濕又分別受大氣與海表溫度、相對濕度與氣壓所影響，影響正負值變化的因素較多。另外，振幅變化除了受到大幅比濕差外，風速和氣壓大小的影響性也不可忽視。



而在眾多颱風個案中，潛熱通量與可感熱通量在颱風影響期間大多保持同號的變化趨勢，代表潛熱通量與可感熱通量主要受到大氣與海表溫差所影響，而在異號情況個案中，氣溫雖然比海表溫高，使可感熱通量小於 0，不過相對濕度較低的因素令大氣比濕較海洋比濕來得低，導致推估的潛熱通量大於 0，因此在高氣溫的條件下以及所含水氣量對於估計潛熱通量值會顯得更敏感些。

將實測資料與衛星產品 OAFlux 進行比較後發現，在長時間的趨勢中潛熱通量的偏移量主要受到大氣比濕與風速的影響，可感熱通量的偏移量則受到海表溫影響；另外，在極端天氣下，OAFlux 資料因時間解析度低而較難看出短時間內變化，而實測資料的密集度可幫助討論短時間尺度的物理變化。



Latent heat flux in typhoon cases calculated by COARE v3.6 (2018 to 2021)

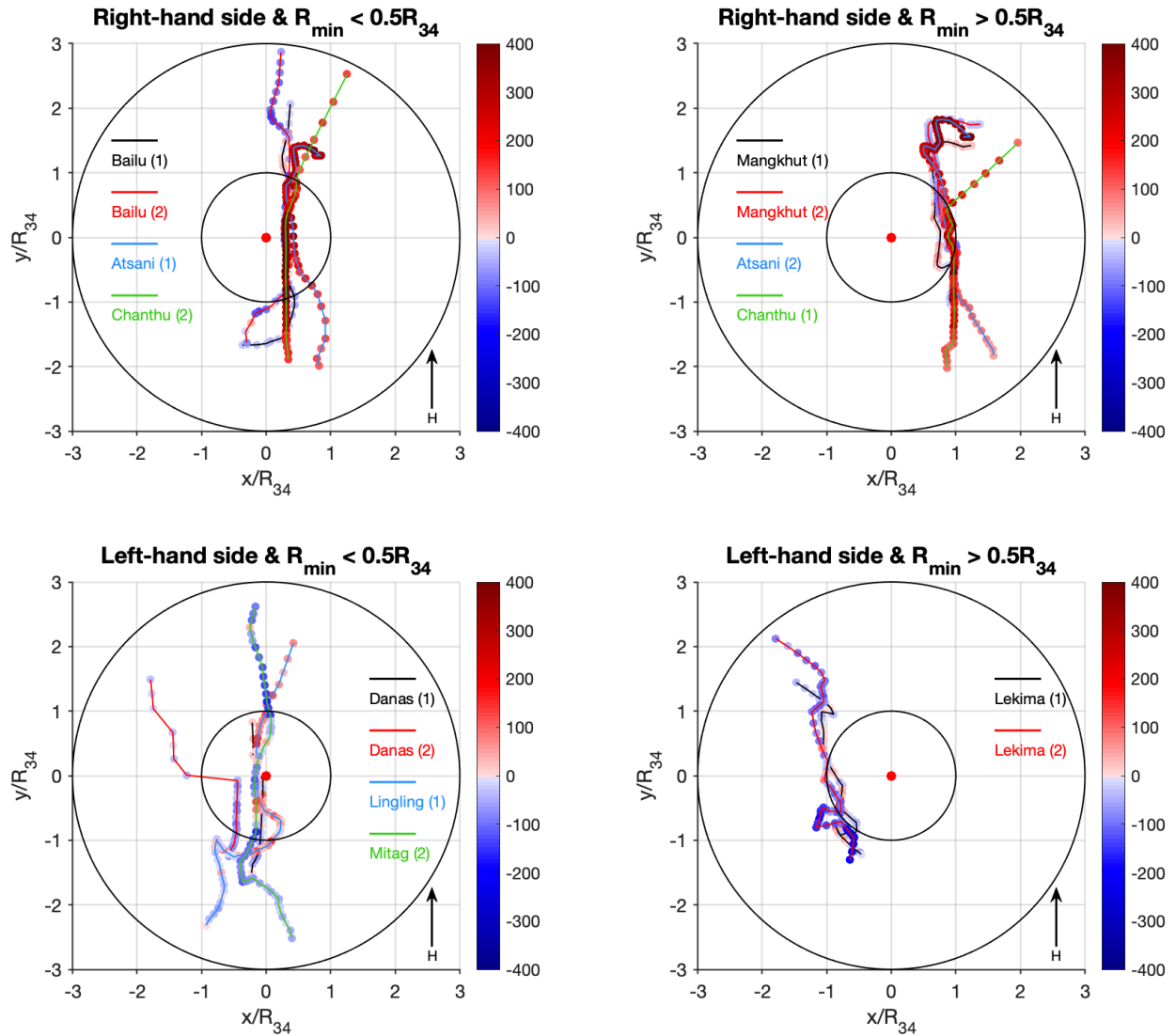


圖 5-2-1、為 2018 至 2021 年各颱風個案之潛熱通量變化圖；相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；以相對距離遠近以及位於颱風中心左右側分類成四個種類；其中色階代表潛熱通量值；各顏色線代表不同颱風個案。



Sensible heat flux in typhoon cases calculated by COARE v3.6 (2018 to 2021)

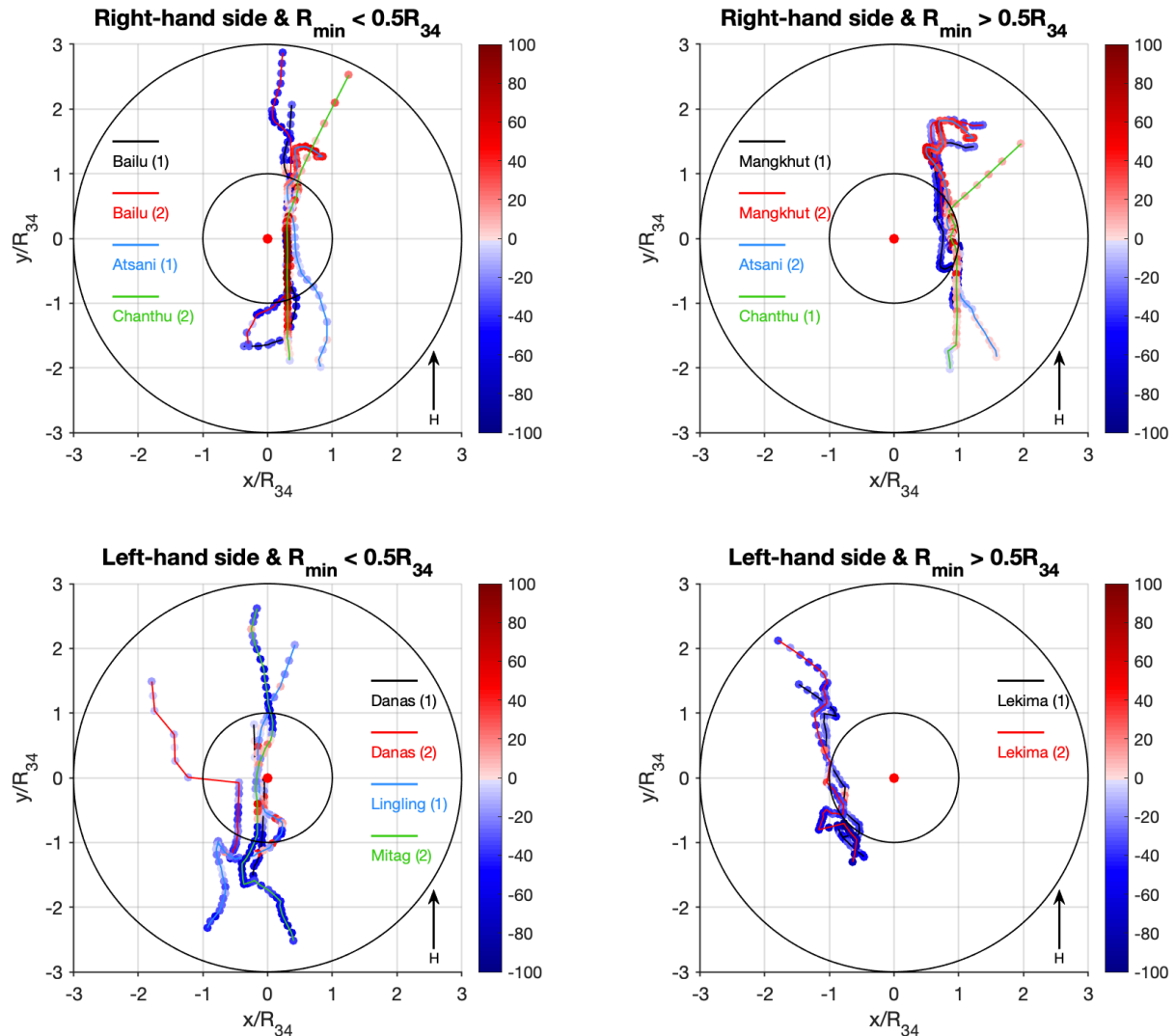


圖 5-2-2、為 2018 至 2021 年各颱風個案之可感熱通量變化圖；相對距離以八級暴風圈半徑進行正規化，並以颱風前進方向為正上方；以相對距離遠近以及位於颱風中心左右側分類成四個種類；其中色階代表可感熱通量值；各顏色線代表不同颱風個案。

表 5-2-1、2018 至 2021 年間個颱風個案的海表熱通量變化特性彙整表

最近距離 浮標位置	$R_{min} < 0.5R_{34}$		$0.5R_{34} < R_{min} < 1R_{34}$	
	個案名	熱通量變化趨勢	個案名	熱通量變化趨勢
位於颱風中心右側	白鹿(1)	LH, SH 正負變化	山竹(1)	LH>0, SH<0
	白鹿(2)	LH, SH 正負變化	山竹(2)	LH, SH 皆小於 0
	閃電(1)	LH, SH 皆大於 0	閃電(2)	LH, SH 皆大於 0
	璨樹(2)	LH, SH 皆大於 0	璨樹(1)	LH, SH 皆大於 0
位於颱風中心左側	個案名	熱通量變化趨勢	個案名	熱通量變化趨勢
	丹娜絲 (1)	LH, SH 正負變化	利奇馬 (1)	LH, SH 正負變化
	丹娜絲 (2)	LH, SH 皆小於 0	利奇馬 (2)	LH, SH 皆小於 0
	玲玲(1)	LH, SH 正負變化		
	米塔(2)	LH, SH 正負變化		



5.3、總結

臺大海氣象浮標自 2017 年開始加裝了波浪儀，對於極端天氣中的波浪資訊幫助甚大，因短時間間隔的連續觀測優勢，使浮標記錄的氣象、波浪與海表溫資料顯得更為珍貴。而為觀察颱風期間的風浪與海表熱通量變化，本研究將 2018 年至 2021 年度兩浮標觀測到共 14 個颱風個案的氣象、波浪與海表溫資料整合分析，並利用 COARE v3.6 推估潛熱通量與可感熱通量，也與衛星產品 OAFlux 進行比較。

在經過分析後了解，在颱風影響期間，浮標與颱風中心的相對距離與位於颱風中心的左右側是影響風浪變化的主因，根據 Price (1981)提到，位在颱風中心右側區域會因颱風移動造成當地風向轉變與當地的慣性流旋轉方向相似，會有互相加成的效果，這種情況可能會使示性波高成長更快更高，而相對距離遠近則會影響風速與浪高振幅大小，方向轉變角度也較多；若最近距離小於 $0.5 R_{34}$ ，風向與浪向開始轉向的時間差約為 0 至 3 小時，若介於 $0.5 R_{34}$ 與 $1 R_{34}$ 之間，風向與浪向開始轉向的時間差約為 1 至 3 小時。相對的，若位在颱風中心左側區域則會因檔地風向轉變與當地的慣性流旋轉方向相反，會有互相抵消的情形發生，則可能使示性波高成長較緩慢，而最近距離若小於 $0.5 R_{34}$ ，風向與浪向開始轉向的時間差約為 6 小時，若介於 $0.5 R_{34}$ 與 $1 R_{34}$ 之間，風向與浪向開始轉向的時間差約為 6 至 9 小時。

在海表熱通量的分析中，極端天氣下潛熱通量與可感熱通量的變化主要受到氣溫與海表溫差影響，而在一些個案中可看出海表溫降溫是受到大氣從海洋獲取能量所致，降溫幅度約 0.1 至 0.5°C 不等，海表熱通量變化對於海表溫的下降也受到颱風本身結構扎實與否以及浮標與颱風之間的相對位置所影響，通常為大風大雨時期，而使大氣從海洋中獲得潛熱通量與可感熱通量。另外，經過與衛星資料比對後，因衛星資料對於水氣與海表溫變化的掌握不如觀測資料準確，且時間間隔遠大於觀測資料，除了容易產生誤差外，也較難看出短時間的變化趨勢。

最後希望能搭配數值模式的幫助，將極端天氣中的風浪與海表熱通量變化做更進一步的分析與探討。

參考文獻



Charnock, H., 1955: Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **81**, 639–640. <https://doi.org/10.1002/qj.49708135027>

D'Asaro, E. A., T. B. Sanford, P. P. Niiler, and E. J. Terrill, 2007: Cold wake of hurricane Frances. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L15609. <https://doi.org/10.1029/2007GL030160>

Edson, J. B., Jampana, V., Weller, R. A., Bigorre, S. P., Plueddemann, A. J., Fairall, C. W., Miller, S. D., Mahrt, L., Vickers, D., & Hersbach, H. , 2013: On the Exchange of Momentum over the Open Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 1589-1610. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0173.1>

Elsberry, R., T. Fraim, and R. Trapnell Jr., 1976: A mixed layer model of the oceanic thermal response to hurricanes. *J. Geophys. Res.*, **81**, 1153–1162. <https://doi.org/10.1029/JC081i006p01153>

Fairall, C. W., E. F. Bradley, D. P. Rogers, J. B. Edson, and G. S. Young, 1996: Bulk parameterization of air–sea fluxes for TOGA COARE. *J. Geophys. Res.*, **101**, 3747–3764. <https://doi.org/10.1029/95JC03205>

Fairall, C., 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2)



Hu, K. and Qin Chen, 2011: Directional spectra of hurricane-generated waves in the Gulf of Mexico. *Geophys. Res.*, **38**, L19608. <https://doi.org/10.1029/2011GL049145>

Kashima, H., K. Hirayama, K. Haruo, T. Hiraishi and K. Nakai, 2008: Consideration of design wave for port construction according recent observation. *OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, pp. 1-6.

<http://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2008.4530966>

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.

[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1979\)036<1722:BPOASE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<1722:BPOASE>2.0.CO;2)

Mrvaljevic, R. K., et al., 2013: Observations of the cold wake of Typhoon Fanapi (2010). *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 316–321. <https://doi.org/10.1029/2012GL054282>

Oost, W. A., G. J. Komen, C. M. J. Jacobs and C. V. Oort , 2002: New evidence for a relation between wind stress and wave age from the measurement during ASGAMAGE. *Bound.-Layer Meteor.*, **103**, 409-438.

<https://doi.org/10.1023/A:1014913624535>

Potter, H., C. O. Collins III, W. M. Drennan, and H. C. Graber, 2015: Observations of wind stress direction during Typhoon Chaba (2010). *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 9898-9905. <https://doi.org/10.1002/2015GL065173>



Potter, H., W. M. Drennan, and H. C. Graber, 2017: Upper ocean cooling and air-sea fluxes under typhoons: A case Study. *J. Geophys. Res.: Ocean*, **122**, 7237-7252. <https://doi.org/10.1002/2017JC012954>

Price, J. F., 1981: Upper ocean response to a hurricane. *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 153-175. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0153:UORTAH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0153:UORTAH>2.0.CO;2)

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. <https://doi.org/10.1029/JC091iC07p08411>

Smith, S. D. ,1988: Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *J. Geophys. Res.*, **93**, 15467-15472. <https://doi.org/10.1029/JC093iC12p15467>

Sun, B., L.Yu, and R.A.Weller, 2003: Comparisons of surface meteorology and turbulent heat fluxes over the Atlantic: NWP model analyses versus moored buoy observations. *J. Climate*, **16**, 679–695. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0679:COSMAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0679:COSMAT>2.0.CO;2)

Taylor, P. K. and M. J. Yelland , 2001: The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 572-590. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0572:TDOSSR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0572:TDOSSR>2.0.CO;2)

Wright, C. W. E. J. Walsh, D. Vandemark, W. B. Krabill, A. W. Garcia, S. H. Houston, M. D. Powell, P. G. Black, and F. D. Marks, 2001: Hurricane directional wave spectrum spatial variation in the open ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 2472–2488. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<2472:HDWSSV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<2472:HDWSSV>2.0.CO;2)

Yang, Y. J., M. H. Chang, C. Y. Hsieh, H. I. Chang, S. Jan and C. L. Wei , 2019: The role of enhanced velocity shears in rapid ocean cooling during Super Typhoon Nepartak 2016. *Nature Communications*, **10**, 1627. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09574-3>

Yu, L., X.Jin, and R.A.Weller, 2008: Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables. *Woods Hole Oceanographic Institution, OAFlux Project Technical Report. OA-2008-01, 64pp.* Woods Hole. Massachusetts.
https://rda.ucar.edu/datasets/ds260.1/docs/OAFlux_TechReport_3rd_release.pdf

Yu, L., R. A. Weller, and B. Sun, 2004: Mean and variability of the WHOI daily latent and sensible heat fluxes at *in-situ* flux measurement sites in the Atlantic Ocean. *J. Climate*, **17**, 2096–2118.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2096:MAVOTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2096:MAVOTW>2.0.CO;2)

Zhou, F., Rongwang Zhang, Rui Shi, Yunkai He, Ju Chen, Qiang Xie, Dongxiao Wang, 2018: Evaluation of OAFlux datasets based on *in-situ* air-sea flux tower observations over Yongxing Island in 2016. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 6091-6106.
<https://doi.org/10.5194/amt-11-6091-2018>

臺大海氣象即時傳輸浮標網 (2016)。檢自 <https://po.oc.ntu.edu.tw> (Oct. 21, 2021)

謝佳穎(2017 年 8 月)。浮標觀測颱風中心附近海域的海氣象變化之研究。海洋研究所碩士論文，國立臺灣大學理學院。10.6342/NTU201703398

楊芊奕(2022 年 5 月)。熱帶氣旋所引起的上層海洋升溫。海洋研究所碩士論文，國立臺灣大學理學院。