

臺灣區域豪雨觀測與預報實驗(TAHOPE)簡介

楊明仁¹ 鄭明典² 黃清勇³ 林沛練³ 林博雄¹ 李清勝¹ 王重傑⁴ 劉清煌⁵

呂國臣² 張保亮² 黃椿喜² 侯昭平⁶ 鍾高陞³ 張偉裕³ 林品芳²

¹ 國立臺灣大學 ² 中央氣象局 ³ 國立中央大學 ⁴ 國立臺灣大學

⁵ 中國文化大學 ⁶ 國防大學

中文摘要

「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗」(TAHOPE)為臺灣主導的大型聯合觀測與預報實驗，執行三年(2019年8月到2022年7月)，原本規劃於2020年5-8月期間我方TAHOPE團隊將與美國PRECIP團隊、及日本T-PARCII團隊等三國共同推動國際聯合觀測實驗，進行以臺灣區域為主體進行之國際聯合劇烈天氣(梅雨、颱風、中尺度對流系統)的密集觀測實驗。TAHOPE實驗探討研究主題包含大尺度的環境影響、中尺度的對流系統與登陸颱風、乃至小尺度的雲微物理過程等，在臺灣海島與高山陡坡特殊地形下，透過大氣密集觀測導入先進大氣預報模式，同時進行即時或準即時之資料同化與數值預報。美國PRECIP團隊將使用NCAR S-Pol雷達與CSU SEA-Pol雷達雷達，美國NOAA同意P3飛機參與聯合觀測(IFEX-West)，再搭配國內中央氣象局現有的作業觀測設備(雷達、探空、及DOTSTAR飛機投落送)與國研院觀測能量(剖風儀)等，將於2020年5月至8月我國與美國、及日本等三國共同進行國際聯合觀測實驗，期間將特別對我國自主衛星(福衛7號)GPS掩星及海面反射儀觀測進行同化及預報的效益評估。美國PRECIP團隊主持人為CSU教授Michael Bell，加上其他知名氣象學者們(Prof. Yi-Leng Chen、Yuh-Lang Lin、Shu-Hua Chen、Kristen Rasmussen、Angela Rowe、Anthony Didlake、Dr. Rob Rogers等人)。我方成立TAHOPE計畫辦公室(即總計畫)，整合觀測實驗與觀測資料即時同化相關的子計畫納入TAHOPE整合計畫。另外臺師大王重傑教授主持與模式即時預報與分析相關的子計畫，成立「臺灣地區豪大雨預報實驗計畫」(TAHPLEX)整合計畫，支援TAHOPE計畫。TAHOPE計畫辦公室並邀請臺大周仲島教授與美國NCAR郭英華博士擔任顧問，針對規劃進行的觀測實驗設計與科學目標，提出寶貴意見。然而因為2020年2月後全球爆發的新冠肺炎(COVID-19)疫情影響，美國NCAR S-Pol雷達密集觀測與加放探空延後至2022年5月25日至8月10日期進行觀測，但是NOAA P3飛機觀測原本預定於2022年7月的參與聯合實驗(IFEX-West)部份則因疫情與機械故障因素取消。

關鍵詞：臺灣區域豪雨觀測與預報實驗、颱風、梅雨、中尺度對流系統

Abstract

“Taiwan-Area Heavy rain Observation and Prediction Experiment” (TAHOPE) was originally planned to be conducted from August 2019 to July 2022 to study Mei-Yu fronts, mesoscale convective systems (MCSs), and landfalling typhoons near Taiwan. During May to August 2020, the PRECIP experiment in USA and the T-PARCII team in Japan will join our TAHOPE team to conduct an international field experiment for severe weather (Mei-Yu fronts, typhoons, and severe thunderstorms) over the western Pacific. Main themes of TAHOPE project range from large-scale environmental influence, mesoscale convective systems as well as microscale cloud physics processes, under the special topography of Taiwan Island with steep terrain. Through the intense observations, real-time or near real-time data assimilation and prediction will be conducted using advanced atmospheric models.

In order to accomplish this international observation and prediction experiments, TAHOPE project office was established to integrate the available domestic observation instruments in Taiwan under the support from the Ministry of Science and Technology (MOST). The National Science Foundation (NSF) and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in the U.S. have approved the funding for several instruments (P3-aircraft, S-Pol radar, and CSU SEA-Pol radar) from the U.S. to combine with CWB’s operational observation facilities (radars, radiosondes, and DOSTAR dropsonde), and the atmospheric measurements (wind profiler) of National Applied Research Laboratory (NARL) to perform intense field observations from late May to early August 2020. The evaluation of data impact on the assimilation and prediction from Taiwan’s satellite (FORMOSAT-7) measurements will also be carried out during the field experiment. The PRECIP project, led by Prof. Michael Bell at CSU, have principal investigators including Profs. Yi-Leng Chen, Yuh-Lang Lin, Shu-Hua Chen, Kristen Rasmussen, Angela Rowe, Anthony Didlake, Rob Rogers, and others. The TAHOPE Project Office integrated subprojects related to the observation and data assimilation; other subprojects related to the modeling and real-time forecast/analysis work are integrated into the TAHPEX (Taiwan-Area Heavy-rainfall Prediction Experiment) project led by Prof. Chung-Chieh Wang at NTNU; two TAHOPE and TAHPEX integrated projects are supporting each other. TAHOPE Project Office also invites Prof. Ben J.-D. Jou at NTU and Dr. Bill Y.-H. Kuo at NCAR as project consultants for scientific advice. However, due to the outbreak of COVID-19 pandemic after February 2020, the NCAR S-Pol radar observation and intense sounding release are delayed for two years, i.e., field observations are conducted in Taiwan from 25 May to 10 August of 2022, but the NOAA P3 aircraft observations in July 2022 is cancelled because of the COVID-19 pandemic situation and aircraft mechanic problem.

Keywords: TAHOPE, typhoon, Mei-Yu front, mesoscale convective system (MCS)

一、計畫研究背景

臺灣地區的豪雨多數來自於梅雨鋒面伴隨的中尺度對流系統與侵臺颱風、以及午後對流系統，由於中央山脈的陡峭地形存在，這些豪大雨下在山區後往往會引發土石流或洪水，造成嚴重的人員傷亡與財產損失。由於模式計算能力的提升、物理參數法的改進、及資料同化系統的更新，數值模式對於定量降水預報的能力於近年來的確有所提升。然而，模式對於降水預報依然存在誤差，主要是因為觀測資料的不足與對於產生豪大雨之劇烈天氣系統的物理過程的瞭解有限所致。為了提升吾人對於臺灣區域豪大雨天氣的觀測與預報能力，國內大氣學門研究劇烈天氣的學者專家們已經形成研究團隊，整合國內官學研的觀測儀器，向科技部提出三年(2019/08 – 2022/07)之「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗」(Taiwan-Area Heavy rainfall Observation and Prediction Experiment; TAHOPE)整合型研究計畫，進行國際聯合大型觀測與預報實驗。

「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗」(TAHOPE)的研究主題涵蓋很廣，包含大尺度與綜觀尺度的環境影響(Chen 1983; Sui et al. 2020)、中尺度對流系統(Kuo and Chen 1990; Yang and Houze 1995a; Chien et al. 2002; Jou et al. 2011)、颱風環流(Wu and Kuo 1999; Wu et al. 2005; Houze et al. 2007; Liou et al. 2016; Yang et al. 2018; Tsujino and Kuo 2020; Wu et al. 2022)、乃至小尺度的午後對流(繆與楊 2018; Miao and Yang 2020; Miao and Yang 2022)與雲物理過程(Yang and Houze 1995b; Tsai and Chen 2020)等，都是 TAHOPE 實驗的研究範圍。

與國內 TAHOPE 團隊合作的國外科研團隊包含美國 PRECIP (Prediction of Rainfall Extremes Campaign In the Pacific)團隊與日本 T-PARCII (Tropical cyclone-Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity estimations/forecasts)團隊。美國 PRECIP 團隊主持人為科羅拉多州立大學(CSU)大學的 Michael Bell 教授，加上其他學者如 Profs. Yi-Leng Chen、Yuh-Lang Lin、Shu-Hua Chen、Kristen Rasmussen、Alison Nugent、Angela Rowe、Anthony Didlake、Dr. Rob Rogers 等人。日本 T-PARCII 團隊主持人為名古屋大學(Nagoya University)大學的 Kazuhisa Tsuboki 教授，加上其他學者如 Profs. Taro Shinoda、Hiroyuki Yamada、Kosuke Ito 等人。美國 PRECIP 團隊將使用 NCAR S-Pol 雷達(放置於新竹海邊)與 CSU SEA-Pol 雷達(放置於日本嶼那國島)，美國 NOAA 同意 P3 飛機參與聯合觀測(IFEX-West; P3 飛機於琉球美軍基地起降)，再搭配國內中央氣象局現有的作業觀測設備(雷達、探空、及 DOTSTAR 飛機投落送)與國研院觀測能量(剖風儀)等，將於 2020 年 5 月下旬至 8 月上旬在北台灣及日本嶼那國島共同進行國際(臺、美、日)聯合聯合密集觀測實驗。密集觀測期間如果資料許可，將對於我國自主衛星(福衛 7 號 COSMIC-II) GPS 掩星及海面反射儀觀測進行同化及預報的效益評估。

TAHOPE 計畫辦公室已整合 6 個與觀測實驗與觀測資料即時同化相關的子計畫納入 TAHOPE 整合計畫，另外與模式即時預報與分析相關的子計畫則納入「臺灣地區豪大雨預報實驗計畫」(TAHPEX)整合計畫(由臺師大王重傑教授擔任總計畫主持人)，兩個整合計畫(TAHOPE 與 TAHPEX)間將相互支援。TAHOPE 計畫辦公室邀請臺大周仲島榮譽教授與美國 NCAR 資深科學家郭英華博士擔任顧問，針對規劃進行的觀測實驗設計與科學目標，提出寶貴意見。然而，因為 2020 年 2 月後全球爆發的新冠肺炎(COVID-19)疫情影響，聯合觀測實驗的 S-Pol 雷達

密集觀測與加放探空延後至 2022 年 5 月 25 日至 8 月 10 日期間進行觀測，但是 NOAA P3 飛機觀測原本預定於 2020 年 7 月的參與聯合實驗(IFEX-West)部份則因為疫情與機械故障因素取消。

二、目標

「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗」(TAHOPE)的科學目標如下：

1. 透過聯合觀測實驗瞭解梅雨鋒面伴隨的中尺度對流系統與颱風環流的動力與熱力強迫條件。
2. 掌握形成中尺度對流系統與颱風環流之多重尺度交互作用(涵蓋大尺度環境場、中尺度機制與雲微物理過程)。
3. 瞭解中尺度對流系統與颱風環流於中央山脈上劇烈降雨之關鍵雲物理過程。
4. 探討中央山脈造成颱風環流結構改變之物理機制。
5. 探討數值模式對於中尺度對流系統伴隨豪雨之可預報度與颱風環流伴隨強陣風之預報能力。

三、觀測儀器

為了讓 TAHOPE 觀測能量可以達到最大化利用，臺、美、日三方經過多次討論，觀測站點的位置與各項儀器配置(見圖 1)如下：

1. 日本嶼那國島(Yonaguni)：CSU SEA-POLC 波段雙偏極化雷達、地面與高空觀測站以及日本名古屋大學 Ka 波段雷達與剖風儀。
2. 彭佳嶼氣象站(Penjayu)：地面觀測與高空探空、Storm Tracker 探空。
3. 板橋探空站(Benqiao)：高空探空、Storm Tracker 探空。
4. 宜蘭科學園區：臺灣大學 NTU X-Pol 雙偏極化雷達。
5. 宜蘭氣象站：地面觀測與高空探空、MPD 光達、Storm Tracker 探空。
6. 新竹港南景觀風景區：NCAR S-Pol 雷達、國防大學輻射儀。
7. 新竹氣象站：地面觀測與高空探空、MPD 光達、自動探空釋放系統(Auto Sound)。
8. 桃園(永安漁港)：NCU X 波段雙偏極化車載式雷達(Team-R)、MRR 雷達、雨滴譜儀。
9. 桃園(中大校園)：地面觀測、剖風儀、MPD 光達。
10. 花蓮氣象站：地面觀測與高空探空。
11. 屏東(空軍機場)：地面觀測與高空探空。
12. 澎湖(空軍機場)：地面觀測與高空探空。
13. 東沙島(海巡署)：地面觀測與高空探空。
14. 漢翔航空 ASTRA 飛機於颱風季執行 DOTSTAR 投落送觀測(總飛行時數約 15 小時)。

TAHOPE 2022 observations

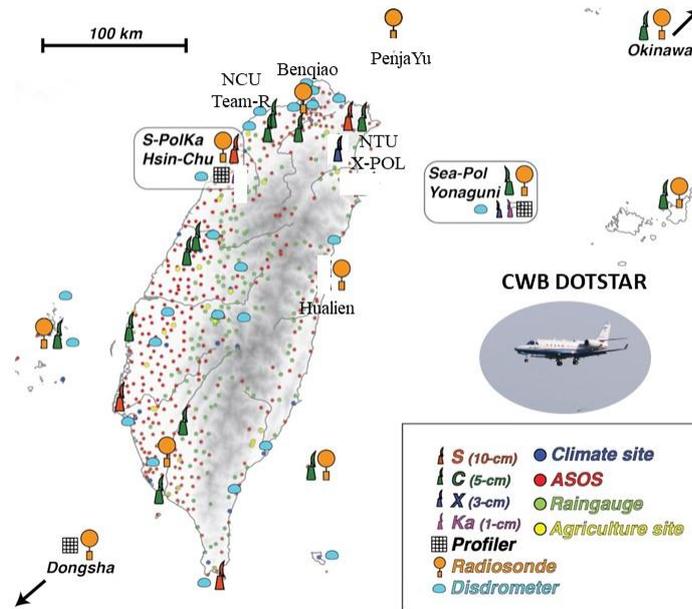


圖 1: TAHOPE 觀測實驗的觀測儀器配置圖。

四、密集觀測期間

TAHOPE 觀測實驗的聯合觀測期間為 2022 年 5 月 25 日至 8 月 10 日，其中密集觀測期間 (Intensive Operation Period; IOP) 與特殊觀測期間 (Special Observation Period SOP) 時程如表 1 所示；密集觀測期間 (IOP) 為有劇烈降水天氣且有額外密集探空釋放之觀測個案，特殊觀測期間 (SOP) 為有劇烈降水天氣但沒有額外密集探空釋放之個案。於聯合觀測期間，TAHOPE 計畫辦公室在氣象局 311 室成立作業中心 (Operation Center)，TAHOPE 團隊在每天上午 9:50 會與美國 PRECIP 團隊及日本 T-PARCI 團隊進行線上會議 (見圖 2)，針對當日天氣診斷與未來幾天的天氣預報做天氣簡報 (Weather Briefing)，做為是否執行 IOP 觀測的參考。當 TAHOPE 團隊決定啟動 IOP 密集觀測後，彭佳嶼站、板橋站、新竹站、宜蘭站、或花蓮站會做每 3 小時或每 6 小時的密集探空釋放，NCAR S-Pol 雷達與中大 Team-R 雷達則會針對天氣系統執行特定的掃描策略。



圖 2: TAHOPE 實驗期間作業中心的天氣簡報會議。

中央氣象局鄭明典局長於 6 月 21 日，帶領氣象局人員視察新竹氣象站、新竹 S-Pol 雷達站、及中大 Team-R 雷達站的各項儀器設備，並向工作人員加油打氣(圖 3)。科技部林敏聰次長與自然司羅夢凡司長於 7 月 5 日帶領科技部官員與媒體同仁，視察新竹 S-Pol 雷達站與中大 Team-R 雷達站的儀器設備，並對大氣學門觀測儀器的未來走向做規劃建議(圖 4)。



圖 3: 氣象局鄭明典局長視察新竹氣象站。



圖 4: 科技部林敏聰次長視察新竹 S-Pol 雷達站。

表 1 的 TAHOPE IOP 與 SOP 清單顯示，實驗期間發生的劇烈天氣類型(regime)具有多樣性，包含梅雨鋒面、中尺度對流系統、午後對流雷暴、颱風、及熱帶低壓等各類型。在這些 IOP 個案中，颱風與熱帶低壓於 2022 年夏天都過門不入，直接繞過台灣轉往日本或菲律賓。比較特別的是 2022 年實驗期間的午後對流個案較往年為多，甚至於在台北市區下起冰雹(SOP3)!

表 1: TAHOPE 2022 實驗期間 IOP 與 SOP 清單，其中 IOP 為有劇烈降水天氣且有額外密集觀測之個案，SOP 為有劇烈降水天氣但沒有額外密集觀測之個案(無探空加放)。

個案	期間	說明
SOP1	5/25 00Z – 5/26 00Z	梅雨鋒面及中尺度對流系
IOP1	5/26 00Z – 5/28 00Z	梅雨鋒面及中尺度對流系(5/26 後制型中尺度對流系統)
IOP2	5/31 00Z – 5/31 12Z	午後對流(宜蘭地區雷達回波頂達 16 公里高度)
IOP3	6/06 06Z – 6/12 12Z	滯留型梅雨鋒面於台灣 (苗栗有後制型中尺度對流系統; 6/10 颱風線接近台灣)
IOP4	6/15 00Z – 6/16 00Z	減弱梅雨鋒面前之西南氣流(北台灣低層乾空氣入侵)
SOP2	6/23 00Z – 6/24 00Z	午後對流
SOP3	6/24 00Z – 6/25 00Z	午後對流(臺北盆地下冰雹)
IOP5	6/25 00Z – 6/25 15Z	午後對流(強烈雷雨胞於台北、桃園、及

		苗栗)
SOP4	6/29 00Z – 6/30 00Z	午後對流
IOP6	7/01 00Z – 7/04 00Z	Chaba 與 Aere 颱風帶來降雨 (強降雨於台灣東部及南部)
IOP7	7/05 00Z – 7/05 04Z	Aere 颱風接近日本九州 (日本九州與本州豪雨)
SOP5	7/05 00Z – 7/06 00Z	臺北盆地午後對流
SOP6	7/06 00Z – 7/07 00Z	臺北盆地午後對流
IOP8	7/13 06Z – 7/16 06Z	TD 90W 帶來降雨 (強降雨於台灣東部及南部)
SOP7	7/19 00Z – 7/20 00Z	臺北盆地午後對流
SOP8	7/20 00Z – 7/21 00Z	臺北盆地午後對流
IOP9	7/29 00Z – 7/29 12Z	熱帶低壓水氣傳輸與午後對流 (傍晚有豪雨; 北台灣有雷雨與閃電)
IOP10	8/01 00Z – 8/03 18Z	熱帶低壓水氣傳輸 (豪雨發生於臺北盆地、台灣中部及南部)
IOP11	8/04 00Z – 8/04 12Z	臺北盆地午後對流

接著我們簡單介紹 TAHOPE 實驗期間觀測到較為特別的天氣現象。圖 5 為 SOP2 個案結果(6 月 23 日午後對流), S-Pol 雷達觀測到發生於北台灣雪山山脈的午後雷暴系統的雷達回波與徑向速度 RHI 剖面圖。圖 5 左圖顯示此雷暴系統的 20 dBZ 回波頂層高達 18 公里, 衝破對流層頂(over-shooting), 兩側有明顯的雲砧 (cloud anvil); 圖 5 右圖則顯示此雷暴系統的下層有明顯輻合氣流, 上層有明顯輻散氣流。類似的回波頂衝破對流層頂(over-shooting)之強烈午後雷暴現象, 在其他的 SOP 個案與 IOP 個案也有發生, 例如 IOP2、SOP3、IOP5、SOP5、SOP7、IOP10、IOP11 等個案。

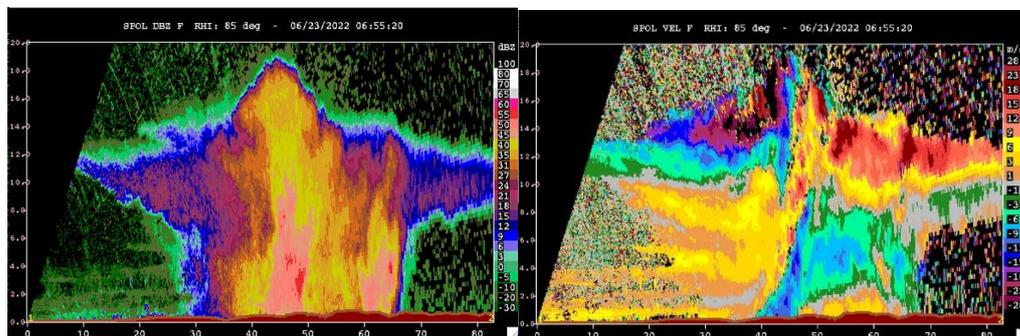


圖 5: S-Pol 雷達觀測到 SOP2 個案(6 月 23 日 0655 UTC)北台灣午後對流系統的雷達回波 RHI 剖面圖(左圖)與徑向速度 RHI 剖面圖(右圖)。

圖 6 為 MPD 光達觀測到 IOP3 個案梅雨鋒面系統到達台灣時(6 月 6 日)低

層大氣之水氣含量時序圖，圖中資料中斷部分代表因下雨造成的資料缺失。圖 6 上圖顯示宜蘭站於 06 UTC 底層(2 公里以下)大氣的水氣含量明顯增加，表示梅雨鋒面即將到達宜蘭站; 08 UTC 後桃園中大站開始下雨(圖 6 下圖)，09 UTC 後新竹站開始下雨(圖 6 中圖)。如此「底層大氣水氣含量增加現象領先降雨現象約 2 小時」的訊號，為 MPD 光達之水氣觀測時間序列分析所得結果。由於 TAHOPE 觀測實驗首次引進 MPD 光達到台灣做水氣觀測，我們還需要更多降雨個案觀測驗證此分析結果。但是如果「底層大氣水氣含量增加現象領先降雨現象約 2 小時」的結果確實有其普遍性，這對於豪大雨的即時預報，將有莫大助益!

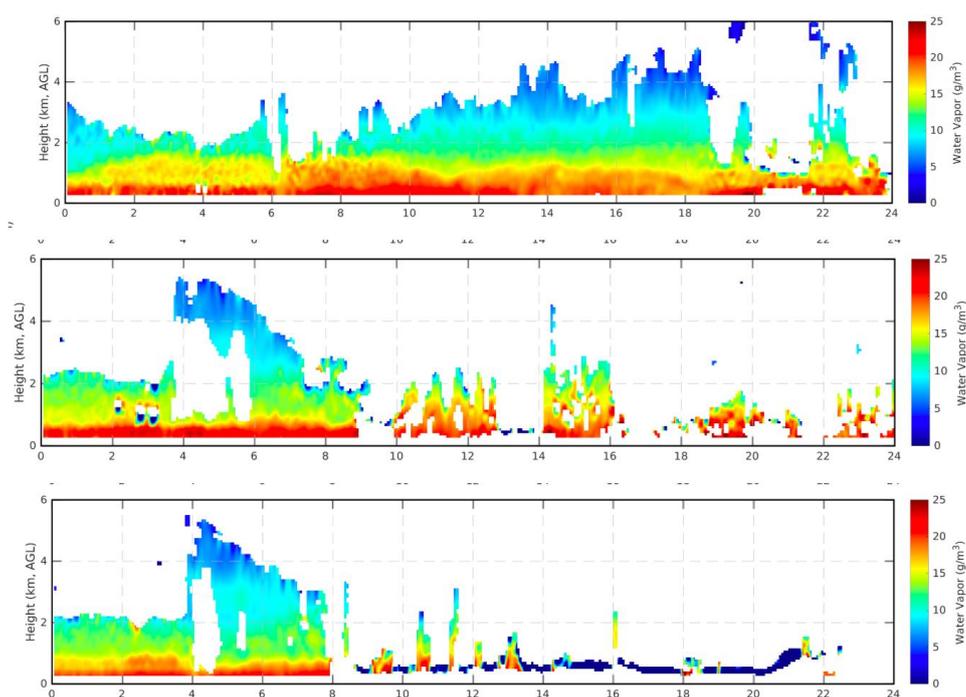


圖 6: IOP 3 個案 MPD 光達觀測之 6 月 6 日 24 小時低層大氣(6 公里以下)水氣含量時序圖; 上圖為宜蘭站觀測結果，中圖為新竹站觀測結果，下圖為桃園中大站觀測結果。

圖 7 為 IOP6 個案中 7 月 3 日 00 UTC 與 12 UTC 的新竹探空圖。此時艾利(Aere)颱風在台灣附近，大氣環境熱力條件極為不穩定; 00 UTC 新竹探空計算所得的對流可用位能(CAPE)為 3100 J/kg，12 UTC 新竹探空的對流可用位能(CAPE)將近 4000 J/kg，熱力不穩定度極高。然而實際當日新竹只有零星小雨(scatter showers)，甚至未達氣象局的大雨標準! 雖然環境熱力條件極為不穩定，但是北台灣位於艾利颱風外圍的下降氣流區域，對流發展缺乏強迫機制，所以有組織性的深對流並不會發生，這也指出對流激發機制的重要性。

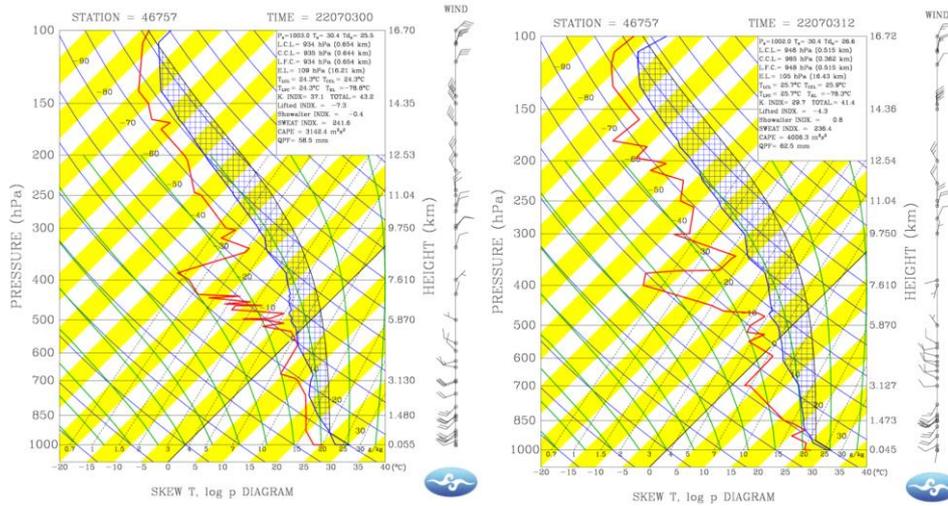


圖 7: IOP 6 個案中 7 月 3 日 00 UTC (左圖)與 12 UTC (右圖)的新竹探空圖。

TAHOPE 聯合觀測實驗於 8 月 10 日上午 10 點在氣象局舉行閉幕式(見圖 8)，頒獎表揚在天氣簡報(Weather Briefing)表現優異的預報員(皆為各校的大學生志願者)，TAHOPE 計畫總主持人楊明仁教授做實驗期間 IOP 個案的綜整回顧，以及各位參與的專家學者們的心得分享，最後 TAHOPE 觀測實驗期於 8 月 10 日順利圓滿結束。



圖 8: 8 月 10 日 TAHOPE 實驗閉幕式合照 (左圖)與 TAHOPE 團隊成員與線上的美方及日本科學家合照 (右圖)。

五、預期成果

本「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗」(TAHOPE)整合研究計畫為期 3 年，計畫完成後預期在學術研究、氣象作業應用改進、技術發展、成果移轉、國際合作各方面之成果與效益詳述如後。

在學術著作論文發表方面:三年預計發表學術研討會論文約 30 篇、中文期刊論文約 20 篇、SCI 期刊論文約 20 篇。

在氣象作業應用改進方面如下: 1)可經由都卜勒速度、單雷達及雙雷達風場違反演資料，評估其應用不同雷達資料同化方法的預報表現，歸納出最佳的雷達

風場資料同化策略，提升極短期侵臺颱風的風雨監測與預報能力。2)可提出高解析度下最佳模式模擬策略與物理組合方案，提供氣象局用於改善豪大雨作業預報之參考。3)可瞭解系集預報資料之特性，提升劇烈天氣之預報準確度，減少災害損失。

在技術發展方面如下: 1)增進對於臺灣地區強降雨系統登陸前後結構與演化的了解; 2)改進低層噴流、邊界層與降雨雲物理之觀測分析; 3)增進對於臺灣降雨雲物理過程的了解; 4)提升臺灣地區中尺度對流系統與颱風降水效率的了解; 5)了解熱動力與地形作用影響下臺灣多重尺度線狀對流系統與颱風環流引發劇烈降水之物理機制。

在成果移轉方面，下列成果可轉移至中央氣象局與水利署如下: 1)發展強對流天氣系統之雷達之應用觀測技術; 2)發展鋒前及颱風外圍雨帶內劇烈對流系統之觀測技術; 3)發展先進資料同化技術; 及 4)發展大氣濕度參數之資料同化技術。

在國際合作方面如下: 1)透過研究進行與成果發表，參與國際氣象學術研討會或亞太地區氣象相關活動，增進國際交流。2)氣象局預報人員參與實驗，培養掌握核心預報技術，亦可將預報技術回饋至學術研究。3)國內氣象人員透過臺、美、日之三國聯合觀測實驗(TAHOPE、PRECIP、T-PARCII)的外場密集觀測，提高台灣的國際能見度與氣象科技之研發能力。4) 三年內培養大氣科學碩博士生 40 名，參與關鍵技術的研發，提昇其颱風預報相關核心技術展與動力分析之能力，培養氣象與防災科技人力。

六、致謝

TAHOPE 實驗計畫是在科技部專題計畫(MOST 108-2111- M-002-011-MY2)的支助下進行，在 COVID-19 疫情期間進行密集觀測實驗非常不容易! TAHOPE 研究團隊感謝中央氣象局、水利署、國研院、國防部及新竹市政府的協助，以及感謝國內各校大氣科學相關系所的大學部學生及研究生參與天氣簡報、密集探空釋放、及雷達觀測，方能獲得寶貴的觀測資料。

Reference:

繆炯恩、楊明仁，2018：2015 年 6 月 14 日台北盆地劇烈午後雷暴個案研究：對流胞合併機制與強降雨過程探討，*大氣科學*，**46**，427–453。

Chen, G. T.-J., 1983: Observational aspects of the Mei-Yu phenomena in subtropical China. *J. Meteor. Soc. Japan*, **61**, 306–312.

Chien, F.-C., Y.-H. Kuo, and M.-J. Yang, 2002: Precipitation forecast of the MM5 in Taiwan area during the 1998 Mei-Yu season. *Wea. Forecasting*, **17**, 739–754.

Houze, R. A., Jr., S. S. Chen, B. F. Smull, W.-C. Lee, and M. M. Bell, 2007: Hurricane intensity and eyewall replacement. *Science*, **315**, 1235-1239.

- Jou, B.-J. D., W.-C. Lee, and R. H. Johnson, 2011: An overview of SoWMEX/TiMREX and its operation. *The Global Monsoon System: Research and Forecast*, C.-P. Chang, Ed., 2nd ed., World Scientific, 303-318.
- Kuo, Y.-H., and G. T. J. Chen, 1990: Taiwan Area Mesoscale Experiment. An overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 488–503
- Liou, Y. -C., T.-C. C. Wang, and P.-Y. Huang, 2016: The inland eyewall reintensification of Typhoon Fanapi (2010) documented from an observational perspective using multiple-Doppler radar and surface measurements. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 241–261.
- Miao, J.-E., and M.-J. Yang, 2020: A modeling study of the severe afternoon thunderstorm event at Taipei on 14 June 2015: The roles of sea breeze, microphysics, and terrain. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 129–152.
- Miao, J.-E., and M.-J. Yang, 2022: The impacts of mid-level moisture on the structure, evolution and precipitation of afternoon thunderstorms: A real-case modeling study at Taipei on 14 June 2015. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 1837–1857.
- Sui, C.-H., P.-H. Lin, W.-T. Chen, S. Jan, C.-Y. Liu, Y.-J. Yang, C.-H. Liu, J.-M. Chen, M.-J. Yang, J.-S. Hong, L.-H. Hsu, and L.-S. Tseng, 2020: The South China Sea Two Islands Monsoon Experiment (SCSTIMX) for studying convection and subseasonal to seasonal variability. *Terr., Atmos., and Oceanic Sci.*, **31**, 103–129, doi: 10.3319/TAO.2019.11.29.02.
- Tsai, T.-C., and J.-P. Chen, 2020: Multimoment ice bulk microphysics scheme with consideration for particle shape and apparent density. Part I: Methodology and idealized simulations. *J. Atmos. Soc.*, **77**, 1821–1850.
- Tsujino, S., and H.-C. Kuo, 2020: Potential vorticity mixing and rapid intensification in the numerically simulated Supertyphoon Haiyan (2013). *J. Atmos. Sci.*, **77**, 2067–2090.
- Wu, C.-C., and Y.-H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67–80.
- Wu, C.-C., P.-H. Lin, S. Aberson, T.-C. Yeh, W.-P. Huang, K.-H. Chou, J.-S. Hong, G.-C. Lu, C.-T. Fong, K.-C. Hsu, I-I Lin, P.-L. Lin, and C.-H. Liu, 2005: Dropwindsonde observations for typhoon surveillance near the TAIwan Region (DOTSTAR): An overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 787-790.

- Wu, Y.-C., M.-J. Yang, and R. F. Rogers, 2022: Examining terrain effects on the evolution of precipitation and vorticity of Typhoon Fanapi (2010) after departing the Central Mountain Range on Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 1517–1540.
- Yang, M.-J., 2020: Overall Science Plans for TAHOPE. *Preprints, 2020 International Workshop on Extreme Rainfall and PRECIP Planning Workshop*, For Collins, Colorado, USA, 2–3 March 2020, Colorado State University.
- Yang, M.-J., and R. A. Houze, Jr., 1995a: Multicell squall line structure as a manifestation of vertically trapped gravity waves. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 641–661.
- Yang, M.-J., and R. A. Houze, Jr., 1995b: Sensitivity of squall-line rear inflow to ice microphysics and environmental humidity. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3175–3193
- Yang, M.-J., Y.-C. Wu, and Y.-C. Liou, 2018: The study of inland eyewall reconstruction of Typhoon Fanapi (2010) using numerical experiments and vorticity budget analyses. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 9604–9623, doi: 10.1029/2018JD028281.