

臺灣區域豪雨觀測與預報實驗(TAHOPE)

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, 張偉裕³, 鍾高陞³, 侯昭平⁶, 呂國臣²,
張保亮², 馮欽賜², 劉清煌⁵, 簡芳菁⁴, 黃榕喜², 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國立臺灣師範大學 ⁵中國文化大學 ⁶國防大學

摘 要

「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗」(TAHOPE)為臺灣主導的大型國際觀測與預報實驗,預計執行三年(2019年8月到2022年7月),預定於2020年5-8月期間我方TAHOPE實驗團隊將與美國PRECIP實驗團隊、日本T-PARCI II實驗團隊、及韓國KPOP實驗團隊等四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(梅雨與颱風)的密集觀測實驗,所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。後來因為2020年2月後全球爆發的新冠肺炎(COVID-19)疫情影響,密集觀測延後至2021年5-8月間進行。

關鍵字: TAHOPE、颱風、梅雨、中尺度對流系統、午後對流

一、前言

為順利完成「臺灣區域豪雨觀測與預報實驗」(Taiwan-Area Heavy rainfall Observation and Prediction Experiment; TAHOPE)此國際聯合大型觀測與預報實驗,國內大氣學門研究劇烈天氣的學者專家們已整合國內產官學研的觀測儀器,邀請有興趣的同仁共同向科技部提出三年(2019/08-2022/07)之整合型研究計畫,研究主題包含大尺度的環境影響(Chen 1983; Sui et al. 2020)、中尺度的對流系統(Kuo and Chen 1990; Yang and Houze 1995a; Chien et al. 2002; Jou et al. 2011)、颱風(Wu and Kuo 1999; Wu et al. 2005; Houze et al. 2007; Liou et al. 2016; Yang et al. 2018; Tsujino and Kuo 2020)、乃至小尺度的午後對流(繆與楊 2018; Miao and Yang 2020)與雲物理過程(Yang and Houze 1995b; Tsai and Chen 2020)等。

目前美國NSF已同意美方PRECIP實驗使用雷達觀測儀器(NCAR S-PolKa雷達與CSU SEA-Pol雷達)需求,美國NOAA與ONR已同意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TAHOPE研究團隊與美國PRECIP(Prediction of Rainfall Extremes Campaign In the Pacific)實驗團隊、日本T-PARCI II(Tropical cyclone-Pacific Asian Research Campaign for

Improvement of Intensity estimations/forecasts)實驗團隊、及韓國KPOP(Korean Precipitation Observation Project)實驗團隊等四國共同進行國際聯合密集觀測實驗。密集觀測期間將特別對於我國自主衛星(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。美國PRECIP計畫主持人為CSU大學Michael Bell教授,加上其他知名氣象學者們(Prof. Yi-Leng Chen、Yuh-Lang Lin、Shu-Hua Chen、Kristen Rasmussen、Alison Nugent、Angela Rowe、Deanna Hence、Anthony Didlake、Dr. Rob Rogers等人)。我方已成立TAHOPE計畫辦公室,並已整合10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(2020/08-2022/07間改為6個子計畫),另外9個與模式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」(TAHPLEX)整合計畫(由臺師大王重傑教授擔任總計畫主持人),兩個整合計畫間由TAHOPE計畫辦公室進行協調分工,再邀請兩位資深科學家擔任顧問(臺大周仲島教授與美國NCAR郭英華資深科學家),協助統整以強化管控,並由成立的科學指導委員會對規劃進行的實驗設計與科學目標,提出寶貴建議及修正意見。

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的S-PolKa雷達密集觀測與加放探空將延後至2021年5-8月期間進行觀測,NCAR MPAS模式預報實驗仍依原定計畫於2020年梅雨與颱風季進行,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) 部份則因為疫情因素取消。

二、計畫進展

(一) 2019/09/05 工作會議

TAHOPE 總計畫主持人楊明仁教授首先報告總計畫的經費核准情況(兩年期),接著由各子計畫說明個別計畫的經費核准情況(圖一)。總計畫說明美方 PRECIP 團隊通知 Water Vapor DIAL 儀器可支援明年計劃,但計畫經費額度不變。TAHOPE 總計畫希望能於實驗時應用 COSMIC-II 衛星探空資料,並鼓勵實驗小組利用實驗期間收集資料對衛星觀測資料作校驗或進行衛星資料同化預報。海科中心剖風儀 (Wind Profiler) 實驗期間可以參與觀測,此儀器目前存放於中大校園。氣象局二組說明將於彭佳嶼站放一組 Auto Sonde 釋放 00Z 探空,但於實驗期間仍需要學生、助理人力參與探空施放其他時間(06Z、12Z、18Z) 的探空。

總計畫說明本實驗將於實驗期間與水利署進行合作,水利署方將提供雨量、水位、流量監測儀器及資料。TAHOPE 總計畫辦公室將於 2019/10/14-10/15 於台大思亮館國際會議中心舉行 Severe Weather and TAHOPE Planning Workshop,並於 10/16 於台大大氣系進行台美日三方實驗工作會議。報名與短摘要截止日期為 9/17。報名費 3000 元。總計畫可提供收據, Severe Weather and TAHOPE Planning Workshop 研討會網站如下:
<https://tahopecnf2019.weebly.com/>。

林博雄教授表示台大正進行 XPOL 雷達資料校正,預定實驗期間參與 TAHOPE 觀測。台大 XPOL 雷達放置地點可有兩個方案,會在下半年與 NCDR 討論屆時雷達移地事項並做 Site Survey: 蘭陽平原河口或台北盆地周邊附近。TAHOPE 觀測期間的東沙島 00Z&12Z 探空人力由海軍大氣海洋局可支援,器材經費由南海實驗計畫提供。

氣象局四組說明在新北市及桃園市交界樹林將有新 C-Band 雷達,將於今(2019)年底完成安裝。中大廖宇慶教授表示美國 NCAR S-PolKa 雷達的使用許可執照正在與 NCC 申請中,已發公文及補充資料(附近居民反對之因應策略,必要時需開說明會)。

TAHOPE 總計畫說明 S-PolKa 雷達的 TR Tube 有微量輻射,需要向原委會申請入境許可。目前總計畫已向原委會溝通申請中,依輻射量劑進行相關行政流程。計畫辦公室已準備之 S-PolKa 雷達站在新竹海邊(港南風景區)臨時電力拉線的相關申請文件,申請費用由總計畫負責。S-PolKa 雷達站整地工程之廠商招標聘用的相關經費與工作,亦由總計畫負責。

氣象局四組補充說明將測試港南風景區到新竹站之通訊路徑,其中需經新竹消防局做為中繼站。屆時需於三位置(S-PolKa 雷達位置、新竹縣政府消防局、新竹氣象站)間建立通訊路由。氣象局可提供局內既有備用微波設備供本通訊路由使用及委托廠商安裝微波通訊設備。TAHOPE 總計畫表示應盡快與美、日進行討論,決定實驗期間資料存儲、傳遞展示工作流程(Workflow)及 Operational Plan 文件。



圖一: 2019/09/05 工作會議之照片。

(二) 2019/10/14-15 劇烈天氣與臺灣豪雨觀測實驗規劃研討會

本研討會的會議目的及預期效益為:1) 邀請美、日資深科學家對於過去大型劇烈天氣觀測實驗做重點回顧; 2) 邀請臺灣資深科學家對於過去臺灣地區重大觀測實驗做重點回顧; 3) 討論臺灣地區劇烈天氣觀測的目前瓶頸及尚待加強之處; 4) TAHOPE 實驗科學目標的建議與討論。研討會的主辦單位為國立臺灣大學大氣科學系,協辦單位為科技部自然與永續發展司、中央氣象局、Colorado State University (USA)、及 Nagoya University (Japan)。會議地點在國立臺灣大學理學院思亮館國際會議廳(圖二)。

本研討會分兩天來進行,共分五個大主題來進行,分別是「中尺度對流系統 (Mesoscale Convective Systems)」、「熱帶氣旋 (Tropical Cyclones)」、「觀測實驗 (Field Campaigns)」、「地形降水 (Orographic Rainfall)」與「資料同化 (Data Assimilation)」,主要是以我們臺灣 TAHOPE 計畫、美國 PRECIP 計畫以及日本 TPARC-II 計畫三國共同進行的大型聯合觀測實驗來做事前的實驗準備為前提做討論,所以在會議的主題上,兩天分別安排了三位學者來做當天會議的專題演講,而其他子計畫的計畫主持人則擔任其計畫規劃內容的專題演講。

此會議除了對於過去大型劇烈天氣觀測實驗做重點回顧之外,研討會主要目的是檢討目前臺灣地區劇烈天氣觀測的瓶頸及尚待加強之處,及確定明年度聯合觀測實驗的目標與設計,希望透過這項大型的聯合觀測,以提升對於梅雨及颱風的預報精

準度，減少極端降水與颱風所造成的災害。除此之外，這個研討會的舉辦，讓臺、美、日、韓四國科學家學者們藉此密集的討論明年度實驗需配合的措施，也讓學者們瞭解到可能會預期到的困難技術與解決方案。除此之外，因為研討會的緣由聚集了大氣相關領域許多年輕的科學研究學者們，年輕學者與資深科學家密集討論，於經驗傳承及學術交流上多有助益。



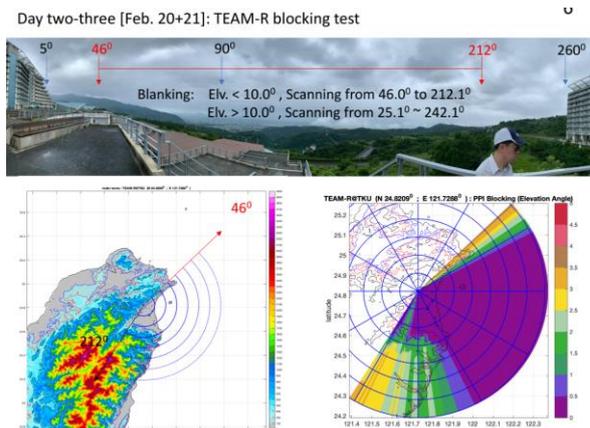
圖二： 2019/10/14 劇烈天氣與臺灣豪雨觀測實驗規劃研討會會議開幕式之照片。

(三) 2020/02/19-21 TEAM-R 雷達到淡江大學蘭陽校區進行測試觀測

中央大學雷達實驗室(廖宇慶教授團隊)與邊界層實驗室(林沛練教授頹對)利用寒假期間的空檔時間(2/19-2/21)，淡江大學蘭陽校區進行測試觀測 以檢驗各種雷達掃描策略(scanning strategy) 觀測障礙(blockage)、及後勤支援(logistics)等事宜(圖三與圖四)。



圖三： 2020/02/19 中央大學團隊到淡江大學蘭陽校區進行測試觀測。



圖四： 2020/02/20-21 中央大學團隊到淡江大學蘭陽校區進行雷達掃描觀測障礙測試。

(三) 2020/02/26-03/06 S-PolKa 雷達站在新竹港南風景區海堤旁之整地工程

TAHOPE 總計畫利用寒假期間最後一周與開學第一周的時間(2020/02/26-03/06)，在新竹港南風景區海堤旁之 NCAR S-PolKa 雷達站之預定場地進行整地工程，進行除草、鋪石、架臨時電線桿等工程(圖五)。由於新竹港南風景區為觀光景點，平時遊客甚多，故新竹市政府設有路障，禁止車輛進入。TAHOPE 總計畫在整地施工期間，申請改用臨時路障，而且只能在周間(weekday)施工，周末(weekend)因遊客太多，新竹市政府禁止施工。

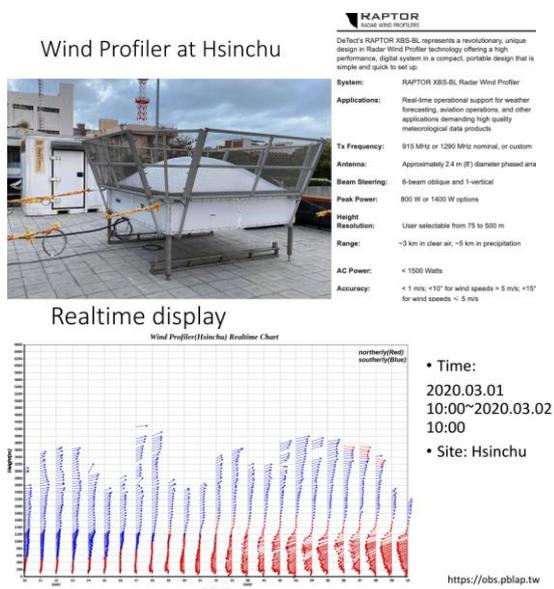




圖五: 2020/02/26-03/06 總計畫在新竹港南風景區之 S-PolKa 雷達站之預定場地進行整地工程之照片(上圖為整地前、下圖為整地後)。

(四) 2020/02/28 國研院海科中心剖風儀至新竹氣象站進行測試觀測

中央大學邊界層實驗室(林沛練教授團隊)利用開學前的空檔時間(2/28),將國研院海科中心剖風儀(Wind Profiler)移至氣象局新竹氣象站的教育訓練大樓屋頂,進行測試觀測,並將觀測資料做即時傳送、與網頁展示(圖六)。



圖六: 2020/02/28 海科中心剖風儀移至新竹氣象站的教育訓練大樓屋頂照片(上圖)與觀測資料的網頁即時展示(下圖)。

(五) 2020/03/02-03 總計畫到美國 CSU 參加 PRECIP 規劃研討會

TAHOPE 總計畫主持人楊明仁教授此次出國開會的目的,主要是應邀赴美國科羅拉多州立大學(Colorado State University) 參加 PRECIP/TAHOPE/T-PARCII 實驗設計研討會(PRECIP Planning Workshop)做邀請專題報告(Yang 2020),並討論實驗聯合觀測的細節;同時商討因應新冠病毒(COVID-19)疫情,觀測實驗是否延期的可能性與相對的配套措施(圖七)。

由於美國現在新冠肺炎的感染與死亡人數日漸增加,如果全球 COVID-19 新冠病毒感染情況持續惡化下去,很有可能影響到美、台、日共同合作 PRECIP/TAHOPE/T-PARCII 觀測實驗的進行。目前美國 PRECIP 團隊預定於 3 月 6 日將 S-PolKa 雷達由 NCAR 運出,透過海運約 1 個月可到台灣,4 月 16 日 NCAR 雷達技術人員預定離美赴台組裝雷達。可能性之一是將整個實驗延後至 2021 年 5-8 月,以避免新冠病毒的影響,但是 NOAA P3 飛機觀測可能無法延後至 2021 年。由於情況非常複雜,各位計畫主持人們(Principal Investigators; PIs)需要考慮各種利害得失,大家先仔細思考如果延期的影響與照常進行實驗需承擔的風險,等第二天綜合討論時再做最後商議。

第二天(03/03)中午 PRECIP 實驗計畫的所有 PI (計劃主持人)與 TAHOPE 總計畫主持人楊明仁教授共同吃午餐並討論如何因應 COVID-19 新冠病毒疫情。經過密集討論,得到的共同結論是: NCAR S-PolKa 雷達觀測與加密探空釋放延後至明(2021)年 5 月底至 8 月上旬進行,NOAA P3 飛機觀測目前還是照原定計畫於今(2020)年 7 月實行。下午時 Prof. Michael Bell 就代表 PRECIP/TAHOPE/T-PARCII 團隊向與會成員做正式宣佈此重大決定,與會成員們也都支持此項決定。

會議中 NCAR/ERL 的 Dr. Brigitte Bauerle 說「No data is more important than safety and human life!」。因應美國新冠病毒(COVID-19)個案日漸增加(特別在西岸華盛頓州與加州地區),加上台灣、日本、韓國也是新冠病毒的疫區,情況更為複雜。如果 NCAR 於本週末就將 S-PolKa 雷達送出,陸運再經海運一個月後雷達即可抵達台灣基隆海關,4 月中旬 NCAR 就需派遣技術人員搭機來台做組裝。目前已有若干 NCAR 工程師表達基於個人健康因素考慮,不願意搭飛機來日本或台灣,承擔新冠病毒感染風險。同時美國計劃主持人們(PIs)以及台灣 TAHOPE 計劃主持人們也需考慮到台灣科學家、助理、及學生們於實驗期間人員接觸而感染病毒的風險。基於各種因素的考量,最後美國 PRECIP 團隊決定將 S-PolKa 雷達觀測與加密探空延後至明(2021)年 5 月進行,NOAA P3 於今年 7 月的飛機觀測颱風觀測任務目前還是按照原定計劃進行,待 5 月或 6

月時再做最後確定 P3 觀測是否如期實施。



圖七: 2020/03/02 美國 CSU 舉行之 PRECIP 規劃研討會照片。

(六) 2020/03/16 工作會議

總計畫主持人楊明仁教授於會議中向 TAHOPE 所有團隊成員報告於 2020/03/02-03 赴美國 CSU 大學參加 PRECIP 規劃研討會的會議結論，並討論台灣 TAHOPE 團隊的因應措施(圖八)。

TAHOPE 總計畫先說明美方 PRECIP 計畫團隊已採購 650 顆探空，預計在新竹氣象站和嶼那國島不分 IOP，一天 4 次(新竹站的探空 100% 由美方提供)，氮氣則向當地廠商採購。NCAR 透過與 ECMWF 的正式合作協議，NCAR-MPAS 模式將使用 IFS 全球分析場和預報場(6 小時延遲)進行預報。NCAR S-PolKa 雷達原先預定於 03/06 進行海運，但受 COVID-19(新冠肺炎)疫情影響，雷達密集觀測與加放探空延後至 2021 年進行觀測。因應美方 PRECIP 計畫團隊的決議，我國 TAHOPE 團隊決定將探空加放和 TEAM-R 雷達觀測延後至 2021 年，NCAR MPAS 模式和 NOAA P3 飛機觀測目前仍依計畫於今年梅雨與颱風季進行(P3 飛機觀測於 4-5 月再確定是否進行)，計畫辦公室原定於今(2020)年施放的 150 顆探空(去年採購)加上預計今年採購的 150 顆探空，留到明(2021)年一起施放。

因為疫情考量，TAHOPE 總計畫擬向科技部申請延後至 2021 年底結案，總計畫亦將行文至水利署二河局與新竹縣政府延長借用 S-PolKa 雷達站場地(新竹港南景觀風景區海堤)使用許可至 2021 年 9 月。新竹氣象站、彭佳嶼測站、板橋探空站、及花蓮探空站於 2020 年之加放探空因疫情考量取消，延後至 2021 年進行。已經放置在新竹測站的地面觀測儀器，TAHOPE 計畫辦公室建議於今年梅雨季 Dry Run 期

間(06/01-06/12)照常觀測，目的是測試資料頻寬、資料即時傳輸到文大資料中心、及資料網頁 Field Catalog 顯示情況。

總計畫將建議中大雷達團隊於 2020 年梅雨 Dry Run 期間(06/04)將移動式 TEAM-R 雷達移至新竹 S-PolKa 雷達站場地進行雷達資料傳輸測試，同時請氣象局四組協助架好 Microwave Link，測試雷達資料即時傳輸到新竹氣象站和台北指揮中心的情況，確定可即時傳回資料或者有資料延遲情況。2020 年預實驗期間(Dry Run)於氣象局 501 會議室將成立 TAHOPE 實驗作業中心(Operation Center)成立時間：(1)梅雨季日期為 06/01-06/12；(2)颱風季日期(配合 NOAA P3 觀測)為 07/04-07/28。美方 PRECIP 團隊希望事後可以拿到預實驗期間(Dry Run)的氣象局觀測資料做為 NCAR MPAS 模式校驗使用。TAHOPE 計畫辦公室建議相關觀測資料可放置在大氣學門之大氣水文資料庫。



圖八: 2020/03/16 TAHOPE 工作會議照片。

(七) 2020/04/25 美方通知 NOAA P3 飛機觀測任務取消

美方 PRECIP 團隊主持人 Prof. Michael Bell 正式通知我方 TAHOPE 團隊與日本 T-PARCII 團隊，應為新冠病毒(COVID-19)疫情影響，NOAA P3 飛機今年 7 月的觀測任務(IFEX-West)取消。

三、預實驗(Dry Run)

TAHOPE 研究團隊根據 03/16 工作會議的決議，

於梅雨季期間(2020/06/01-06/12)進行預實驗(Dry Run)，在氣象局 501 會議室成立 TAHOPE 實驗作業中心(Operation Center)，目的是測試密集觀測期間(Intensive Operational Period; IOP)的決策過程、資料頻寬、資料即時傳輸到文大資料中心、及資料網頁的顯示情況等(圖九)。



圖九: 2020/06/01 TAHOPE 實驗作業中心(Operation Center)成立的開會照片。

氣象局預報中心在預實驗期間(Dry Run)會將 Field Catalog 和 Website 的部分準備就緒。所有參與 TAHOPE 實驗合作單位的 Logo 都會放上實驗網頁 (https://tsafe.cwb.gov.tw/TAHOPE_2020/)，TAHOPE 實驗網頁的資料也會提供給美方 PRECIP 團隊使用(圖十)。



圖十: TAHOPE 2020 預實驗的 Field Catalog 首頁。

中大雷達實驗室團隊於 06/04 將移動式 TEAM-R 雷達移至新竹 S-PolKa 雷達站場地，進行雷達資料傳輸測試(圖十一)；中大邊界層氣象實驗室團隊也到新竹 S-PolKa 雷達站場地做近地面氣象觀測。氣象局四組也於前一天(06/03)架好 Microwave

Link，以準備將 TEAM-R 雷達資料即時傳輸到新竹氣象站和台北指揮中心的情況，確定可以即時傳回資料與測試觀測資料之延遲情況(圖十二與圖十三)。



圖十一: 2020/06/04 中大雷達實驗室團隊將 TEAM-R 雷達移至新竹 S-PolKa 雷達站場地進行雷達資料傳輸測試照片。



圖十二: 2020/06/04 氣象局四組於雷達站場地架設 Microwave Link 照片。



圖十三: 2020/06/04 於新竹 S-PolKa 雷達站場地進行雷達資料傳輸測試之工作人員大合照。

四、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達反演資料，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颱風作業預報之參考。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) 氣象局人員透由預報人員組成的研究助理參與研究，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、韓之四國聯合觀測實驗 (TAHOPE/PRECIP/T-PARCII/KPOP) 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。

五、致謝

本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，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。

六、參考文獻

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, doi: 10.2151/jmsj.2020-008.

- 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.
- 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.