

UAV氣象監測資料應用於WRF模式之研究 The Study of the UAV Application on Monitoring Meteorological data

¹宋偉國、¹賈澤民

¹空軍航空技術學院一般學科部軍事氣象系

¹Soong Wei-Kuo、²Char, Jir-Ming

¹Department of Military Meteorology, Airforce Institute of Technology

²Fooyin University

摘要

本文運用UAV於2013年監測屏東里港地區溫度、溼度與風場等氣象資料，透過屏東探空資料加以比對UAV觀測結果，顯示UAV溫度與溼度隨高度分布趨勢與屏東探空站有一致結果，但UAV溫度比屏東站差距1.5℃左右，未來將持續校驗UAV溫度值，判斷是否為儀器系統性誤差或是UAV與屏東探空站二者地理位置差異。UAV風向與屏東站結果一致，顯示UAV推算風場定性上有不錯表現。UAV植入WRF模式結果而言，本研究分別以UAV監測溫溼度、屏東溫溼度及馬公溫溼度植入WRF二維理想個案模式，模擬海陸風環流演變，結果顯示UAV與馬公站植入WRF後的結果，於白天出現海風、夜間出現陸風情況的合理情形，但UAV於模擬6小時後，氣流仍相當不規則，對照屏東站模擬情形，屏東站植入WRF後，近地面於白天卻為離岸風，近地層以上則紊流現象顯著，此可能是陸地受地形影響，邊界層發展較為旺盛，白天局部風場受到紊流效應影響所致，唯大致而言，UAV植入WRF模擬局部環流現象，定性上有不錯的成果。透過本研究結果，顯示UAV資料應用於WRF模式已有初步不錯的結果，未來將驗證UAV溫度值的系統性誤差，並模擬非強對流天候下的局部環流效應，以評估UAV應用於WRF模式的效能。

關鍵字：無人飛行載具(UAV)，天氣研究預報模式(WRF)、海陸風

Abstract

In this paper, we used UAV monitoring temperature, humidity and wind to be compared with the observations of Pingtung radiosonde data. The results showed that UAV temperature and humidity with height distribution trends are similar with Pingtung radiosonde, but the temperature of UAV was less 1.5℃ than at Pingtung. We will continue to check UAV temperature value to determine whether the instrument systematic error by UAV or the error maybe caused by geographic differences between Pingtung and UAV. To compare the UAV wind with the Pingtung radiosonde, there is consistent of wind direction which indicated that a good performance on the wind by UAV. When we put UAV monitoring data to WRF model, the results showed that WRF initial data from UAV monitor temperature, humidity, temperature, will be good performance to simulate the evolution of the land-sea breeze, but in the beginning of UAV simulated after 6 hours, the flow is still quite irregular, this is similar with at Pingtung, this may be the boundary layer development is relatively strong, the day the local wind field caused by the impact of the turbulence effect. Through this study, the data from UAV used in the WRF model has a good results. In the future we will evaluate the systematic error UAV temperature values and simulate the effect of local circulation under weak convective weather, in order to assess the UAV used in WRF model.

Key word: Unmanned aerial vehicles、Weather Research Forecast、Land-sea breeze

一、前言

台灣位於亞洲季風區，冬季盛行東北風，夏季為西南風，季風南下至南部地區時，遇到中央山脈，氣流過山或繞山，將形成不同局部環流，兼之西臨台灣海峽，南濱巴士海峽，海陸風效應遇到地形，局部環流特徵值得進一步研究。

美國 NCAR(National Center for Atmospheric Research) 發展的 MM5(Mesoscale Model 5th)以及 WRF(Weather Research and Forecasting)模式，其動力過程與物理項相當完整，特別是 WRF 已經發展出作業模式，氣象局與空軍氣象聯隊均用 WRF 模式作為台灣局部天氣的預報，但模式模擬局部環流、豪大雨現象正確性，受到觀測資料影響顯著，如何獲得高解析度的觀測資料，是精進模式的關鍵。無人飛行載具(UAV)的發展，使得氣象資料朝向立體化、即時化，且氣象感測器可回收，於經費上可大幅縮減，此種觀測儀器的開發，對於局部環流的演變與預報，均有革命性的突破。

本研究團隊過去在精進UAV研製以及局部環流模擬分析方面均有顯著進展(宋等([1]、[2]、[3])、洪等[4])，20世紀60年代後期，遠端控制的無人飛行載具已經開始使用於大氣邊界層的觀測(Konrad et al. [5])，無人飛行載具的體積也越來越小，自動駕駛也越來越穩定(Holland[6]; Egger[7]; Ma[8]; Spiess et al. [9])，本研究目的即探討應用UAV置入氣象數值模式WRF可行性，延續之前開發UAV能量與局部環流研究(宋等[10]、宋等[11])，本文先以海陸風模式為基礎，透過2013年12月9日UAV於屏東里港的觀測資料，運用於WRF模式，模擬海陸風變化情形，作為評估未來建立一套符合南台灣之局部環流模擬系統之可行性。

二、資料收集與處理

本研究採用氣象無人飛行載具觀測環流結構，UAV必須有視距外飛行的功能，UAV量測經度、緯度、速度、高度，推算每層高度風速、風向。計算原理為透過飛機地速與空速向量差求出風速。飛機地速為飛機對地速度，

此部分可由飛機軌跡移動除以時間求出飛機地速。飛機空速加上風速即為飛機地速，順風時，地速大於空速，逆風時。地速小於空速，透過飛機維持同一高度繞圓圈飛行，飛機速度最小時，此時即為逆風，飛機飛行的方向即為風向，測量地速的速度差異即可推算出風速。



圖1 UAV地面操作系統

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	2013-12-09T09:11:38.761	海拔高度	170.02	空速m/s	25.93243	地速m/s	24.52	實際風速m/s	2.445	風向	345	氣壓	992.62
2	2013-12-09T09:13:28.398	海拔高度	264.01	空速m/s	25.44711	地速m/s	23.54	實際風速m/s	1.953	風向	353	氣壓	992.18
3	2013-12-09T09:15:50.436	海拔高度	301.61	空速m/s	25.29433	地速m/s	26.05	實際風速m/s	3.338	風向	14	氣壓	977.92
4	2013-12-09T09:16:28.516	海拔高度	342.48	空速m/s	25.13037	地速m/s	21.01	實際風速m/s	4.258	風向	26	氣壓	973.47
5	2013-12-09T09:18:48.105	海拔高度	386.39	空速m/s	24.60363	地速m/s	20.03	實際風速m/s	4.75	風向	19	氣壓	968.61
6	2013-12-09T09:19:21.957	海拔高度	443.96	空速m/s	25.29219	地速m/s	20.73	實際風速m/s	4.777	風向	19	氣壓	962.11
7	2013-12-09T09:22:05.211	海拔高度	547.98	空速m/s	27.12642	地速m/s	23.45	實際風速m/s	3.889	風向	16	氣壓	951.05
8	2013-12-09T09:24:09.185	海拔高度	645.28	空速m/s	26.54617	地速m/s	23.33	實際風速m/s	3.44	風向	19	氣壓	940.65
9	2013-12-09T09:25:57.587	海拔高度	751.11	空速m/s	24.62015	地速m/s	21.9	實際風速m/s	2.944	風向	359	氣壓	929.44
10	2013-12-09T09:26:36.317	海拔高度	845.99	空速m/s	25.42791	地速m/s	24	實際風速m/s	1.502	風向	354	氣壓	919.51
11	2013-12-09T09:31:56.16	海拔高度	946.74	空速m/s	25.64196	地速m/s	24.21	實際風速m/s	1.595	風向	355	氣壓	909.03
12	2013-12-09T09:33:37.26	海拔高度	1051	空速m/s	24.49629	地速m/s	22.73	實際風速m/s	1.982	風向	343	氣壓	898.25
13	2013-12-09T09:35:45.180	海拔高度	1050.8	空速m/s	24.44522	地速m/s	22.26	實際風速m/s	2.447	風向	332	氣壓	898.43
14	2013-12-09T09:37:02.57	海拔高度	1049.8	空速m/s	24.16051	地速m/s	22.05	實際風速m/s	2.364	風向	342	氣壓	898.1
15	2013-12-09T09:39:19.602	海拔高度	1046.4	空速m/s	24.94159	地速m/s	22.74	實際風速m/s	2.464	風向	335	氣壓	898.81
16													
17	氣象資料蒐集(資料都取自中央氣象局網頁)												
18	屏東九如地區12月9日無雨(下圖位置)												
19	2.今(9)日屏東通過及東北季風影響，氣溫下降，雲												
20	海北部，東中部地區及沿海有短暫雨，並有局部較大雷發生												
21	的機率；中南部地區及南部山區亦有局部短暫雨，金門及馬祖為												
22	多雲的天氣。												

圖2 飛機飛行數據

本研究採用 WRF 模式模擬海陸風環流演變情形，以二維模式處理，不考慮科氏力效應，水平與垂直網格點為 201*35，水平解析度 2km，中央為陸地，東西二側為海洋。模式物理項降水方面採用 KM 2D Smagor 模組，不考慮積雲變化。邊界層採用 YSU 模組，短波輻射採用 Dudhia，長波採用 RTIM，模擬 24 小時，初始資料以屏東探空為主，模擬結果與 UAV 探空相比較，另外，以馬公探空作為輔助，分析 UAV 植入 WRF 結果比較。

在海風模式模擬中，分為控制模擬 CNR、屏東模擬 PTR、馬公模擬 MGR、UAV 模擬 UAVR 四種方式，以 CNR 為例，輸入探空資料，包含第一層地面氣壓 ps-1000 hPa、地面溫度 ts-300.5 度 K，以及混合比 qvs-5g/kg，之後第二層開始共有高度 h(m)、溫度 th(K)、混合比 qv(g/kg)、風場 u(m/s)、v(m/s)，共 80

筆資料，從 125 公尺開始，每 250 公尺一筆資料，最高 19875 公尺，初始為 2007 年 6 月 1 日 0500LST，地面溫度均為等值 300 度 K，無風。PTR 與 MGR 則將觀測探空資料先行處理為 WRF 輸入格式，而後模擬海陸風情況。由於 WRF 二維海風模組是以美國山區時區為例，例如 CNR 於 6 月 7 日 0500UTC 為初始時間，此時為當地 6 月 6 日 23MST，即模式當地時間為夏令時間 UTC-6 小時=MST，冬令時間則 UTC-7 小時為當地時間。台灣時區則為格林威治時區加上 8 小時，模式輻射物理過程需以當地時區為啟動時區，故 PTR 與 MGR、UAVR 初始資料時間均為 12 月 9 日 0000UTC，即 0800LST。故換算至模式為 2013 年 12 月 1500UTC，即為 WRF 模式冬令時間 1500UTC-7 小時=0800MST，即為台灣當地時間上午 0800LST，模擬 24 小時，即為 12 月 10 日 0800LST。

三、UAV 監測資料驗證

圖 3 與圖 4 為 102 年 12 月 9 日 0000UTC 天氣圖與衛星雲圖，冷鋒已在台灣北側，高雄地區早上為北風，多雲有霾情況，上午八點溫度為 23°C，相對溼度約 73%，隨著日出溫度逐漸上升，中午達 28.6°C，風向在北風與北北西風之間，相對溼度約 60% 左右，顯示為比較偏乾燥天氣。

UAV 監測資料垂直方向約每 100 公尺一筆資料，地面至 100 公尺受限於 UAV 起飛需一段時間調整飛行路線，故 100 公尺以下並無穩定資料呈現。12 月 9 日 0800LST 結果顯示，UAV 每 100 公尺高度所監測的溫度中(圖 5)，UAV 溫度在高度 200-300 公尺有逆溫現象，UAV 溫度露點差結果顯示，低對流層屬於乾燥區，透過溫度與溼度結果，顯示可能是東北風至台灣中央山脈背風面產生的高壓下沉逆溫所致。屏東機場探空站比對 UAV 資料溫度與溼度，二者溫度與溼度隨高度分佈一致，屏東站在 150-300 公尺亦出現逆溫現象，且低層屬於較為乾燥地區，此驗證 UAV 觀測的逆溫與乾燥結果一致，顯示 UAV 觀測的溫度與溼度資料有不錯結果，唯 UAV 溫度比屏東站高 1-2°C，UAV 溫度感測器雖然經過調校，但當初主要用在地面上，並未與氣象觀測溫度於高空中校驗，另

一方面也可能是屏東機場與 UAV 飛行區域在屏東里港地理位置不同，造成溫度有 1-2°C 差異。露點的差異則主要是本文使用溫度與相對溼度得出露點值，溫度差異反映至露點差異所致。比較屏東探空與 UAV 風向值(圖 6)，UAV 250 公尺以下為西北風，300-650 公尺為東北風，650 公尺以上又轉為西北風，屏東除了 150-300 公尺為東北風，與 UAV 略有不同外，其餘高度之風向與 UAV 一致。透過 UAV 與屏東探空資料驗證，顯示 UAV 溫溼度與風向均有不錯表現。

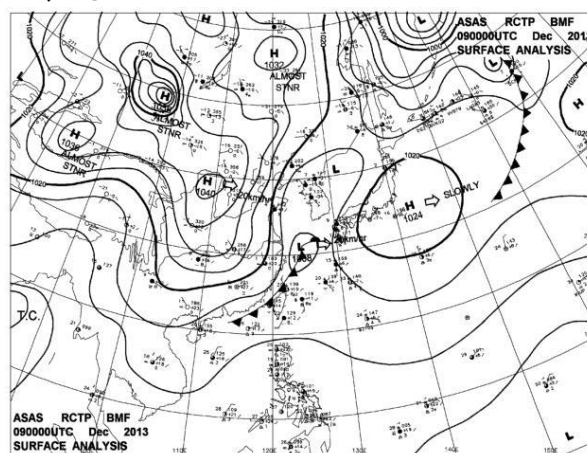


圖 3 102 年 12 月 9 日 0000UTC 天氣圖

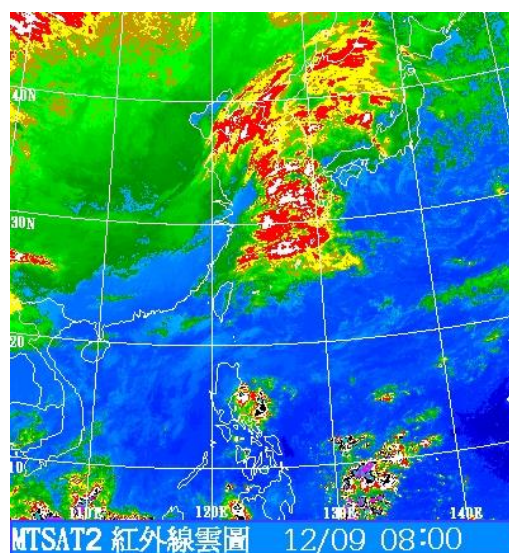


圖 4 102 年 12 月 9 日 0800LST 衛星雲圖

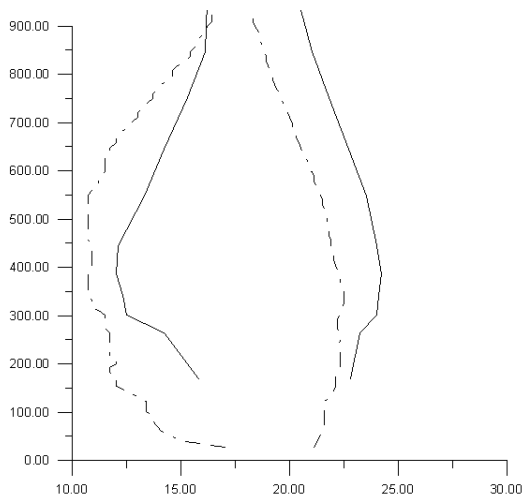


圖 5 UAV 溫溼度與屏東探空站比較。橫軸為溫度、縱軸為高度。實線為 UAV 觀測之溫度與露點，虛線為屏東探空站之溫度與露點。

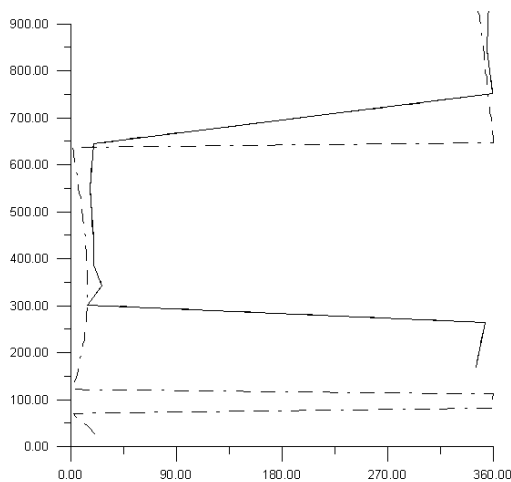


圖 6 UAV 風向與屏東探空站比較。橫軸為風向，縱軸為高度。實線為 UAV 觀測之風向，虛線為屏東站觀測之風向。

四、個案模擬

本研究分別以 WRF 內定的模擬 CNR 與屏東探空資料為初始場的 PTR、馬公探空站植入 WRF 模式的 MGR，以及 UAV 監測資料植入的 UAVR 做比較，探討 UAV 資料結合 WRF 模式的可行性分析。

CNR 模擬海風環流變化，初始為 0500UTC，即 2300LST，此時地面溫度均為等值 300 度 K，無風。3 小時後，凌晨 0200LST 陸地輻射冷卻約至 299 度 K，近地層有離岸之陸風(圖 7a)，其上 0.5-1.5 公里有迴流區。

上午 0800LST 近地層已經出現海風環流(圖 7b)，且高度到 700 公尺，迴流則發展至 2.5 公里，對照此時位溫分布，陸地位溫隨高度趨於中性大氣(圖 7c)，顯示熱對流效應顯著。中午 1100LST(圖 7d)以後海風環流持續發展，範圍已延伸到海上 100 多公里處，海風厚度也持續升高，對流產生的中性位溫從 0800LST 的 1.2 公里到 1100LST 的 1.7 公里高度(圖 7e) 1100LST 至 1400LST 陸地持續增溫，此時邊界層可達近 2000 公尺(圖略)。1700LST 則邊界層迅速下降(圖略)，此時仍為海風。透過 CNR 模擬結果，海風厚度發展比陸風深許多、水平範圍也擴大 100 多公里。

UAV 模擬初始時間為 WRF 模式 12 月 9 日 1500UTC(即台灣 0800LST)，風場假設為零，溫度與混合比則以 UAV 觀測結果植入模式初始值，UAV 近地層的逆溫(圖 5)，顯示上午八點大氣為穩定大氣，UAVR 模擬 6 小時後，UAV 模擬 12 月 9 日下午二點風場並無規則性(圖 8a)，此可能為陸上熱對流旺盛，大氣呈現紊流特性。UAVR 模擬 24 小時後(圖 8b)，12 月 10 日 0800LST 已經轉為海風，且風場有呈現隨高度往東傾斜的情況，此可能是風切亂流效應超過大氣穩定度浮力效應，導致凱文-荷姆荷茲(Kelvin-Helmholtz:K-H)不穩定度所產生的渦流現象。

屏東模擬 6 小時的 PTR 結果顯示(圖 9a)，12 月 9 日下午二點近地面 300 公尺以下仍為陸風，300-1000 公尺為迴流，1000 公尺以上呈現不規則之紊流效應，此時地面為何仍為離岸風，可能受邊界層紊流發展強，高層動量下傳至近地層結果所致，切確情形仍需進一步探討。PTR 模擬 9 小時，即 12 月 9 日下午五點時(圖 9b)，隨著日落使陸地溫度冷卻，近地面 300 公尺以下轉為陸風。PTR 模擬 24 小時後(圖 9c)，12 月 10 日早上八點近地面 300 公尺以下為海風。

屏東受地形影響，導致模擬海陸風效應不如 CNR 明顯，為單純考量海陸溫差效應所引發的海陸風效應，本研究另參考馬公探空站模擬海陸風現象，馬公 MGR 模擬 6 小時結果顯示(圖 10a)，12 月 9 日下午二點近地面 300 公尺以下為陸風，與 CNR 結果一致。馬公 MGR 模擬

12 小時後(圖 10b)，12 月 9 日晚上八點近地面 300m 以下為陸風，亦與 CNR 結果一致。馬公 MGR 模擬 24 小時(圖 10c)，12 月 10 日早上八點近地面至 500 公尺以下為海風，亦與 CNR 結果一致。

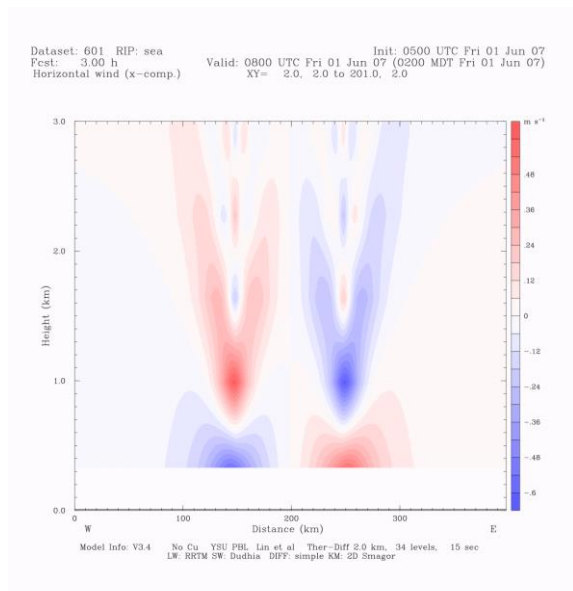


圖 7a CNR 模擬 3 小時之 0200LST 風場，紅色為正值，藍色為負值。

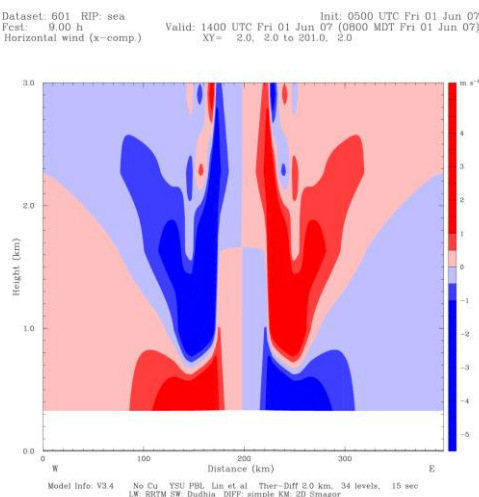


圖 7b CNR 模擬 9 小時之 0800LST 風場，紅色為正值，藍色為負值。

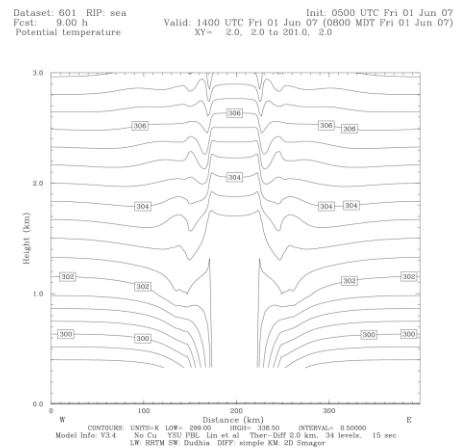


圖 7c CNR 模擬 9 小時之 0800LST 位溫。

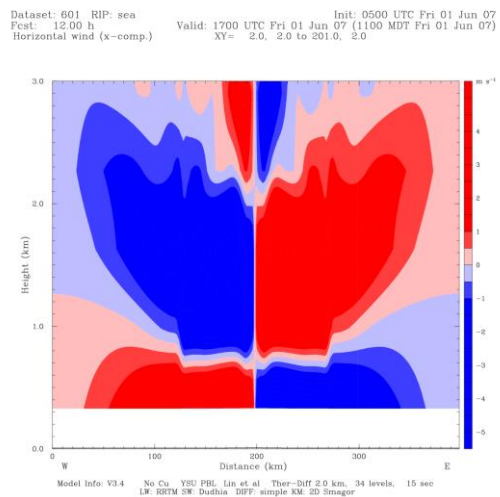


圖 7d CNR 模擬 12 小時之 1100LST 風場，紅色為正值，藍色為負值。

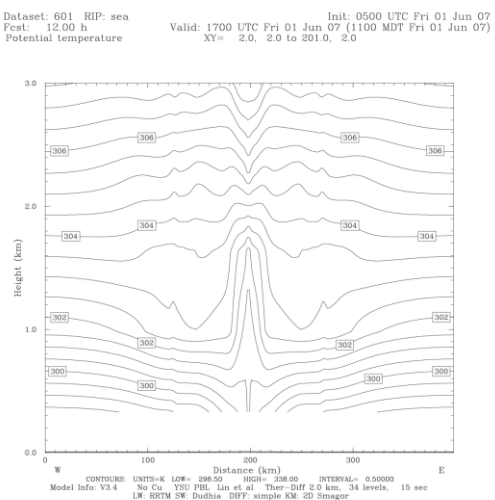


圖 7e CNR 模擬 12 小時之 1100LST 位溫。

Dataset: uav RIP: sea Init: 1500 UTC Mon 09 Dec 13
Fest: 6.00 h Valid: 2100 UTC Mon 09 Dec 13 (1400 MST Mon 09 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

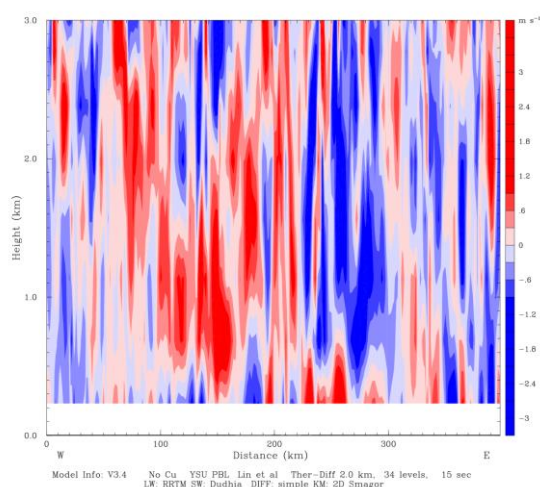


圖 8a UAV 模擬 6 小時之 12/9 14LST 風場，紅/藍為正/負值。

Dataset: uav RIP: sea Init: 1500 UTC Mon 09 Dec 13
Fest: 24.00 h Valid: 1500 UTC Tue 10 Dec 13 (0800 MST Tue 10 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

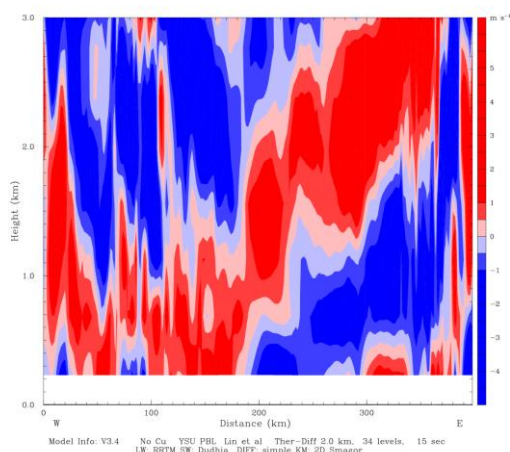


圖 8b UAV 模擬 24 小時之 12/10 08LST 風場，紅/藍為正/負值。

Dataset: 75005 RIP: sea Init: 1500 UTC Mon 09 Dec 13
Fest: 6.00 h Valid: 2100 UTC Mon 09 Dec 13 (1400 MST Mon 09 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

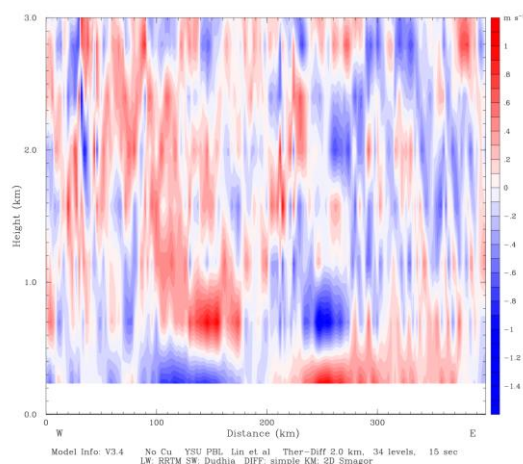


圖 9a 屏東模擬 6 小時之 12/9 14LST 風場，紅/藍為正/負值。

Dataset: 75005 RIP: sea Init: 1500 UTC Mon 09 Dec 13
Fest: 9.00 h Valid: 0000 UTC Tue 10 Dec 13 (1700 MST Mon 09 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

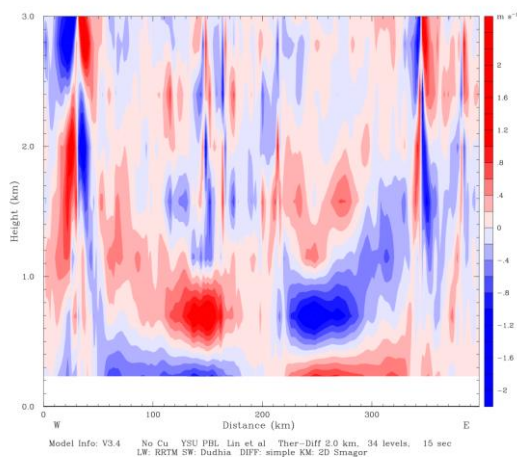


圖 9b 屏東模擬 9 小時之 12/9 17LST 風場，紅/藍為正/負值。

Dataset: 75005 RIP: sea Init: 1500 UTC Mon 09 Dec 13
Fcst: 24.00 h Valid: 1500 UTC Tue 10 Dec 13 (0800 MST Tue 10 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

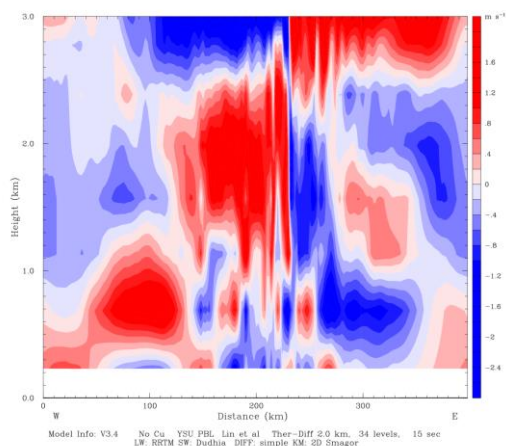


圖 9c 屏東模擬 24 小時之 12/10 08LST 風場，紅/藍為正/負值。

Dataset: 73405 RIP: sea Init: 1500 UTC Mon 09 Dec 13
Fcst: 6.00 h Valid: 2100 UTC Mon 09 Dec 13 (1400 MST Mon 09 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

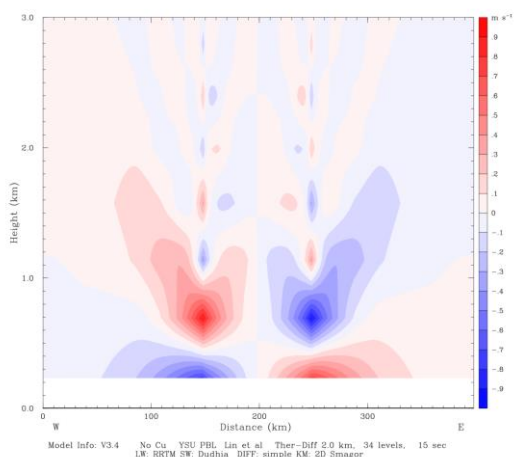


圖 10a 馬公模擬 6 小時之 12/9 02LST 風場，紅/藍為正/負值。

Dataset: 73405 RIP: sea Init: 1500 UTC Mon 09 Dec 13
Fcst: 12.00 h Valid: 0300 UTC Tue 10 Dec 13 (2000 MST Mon 09 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

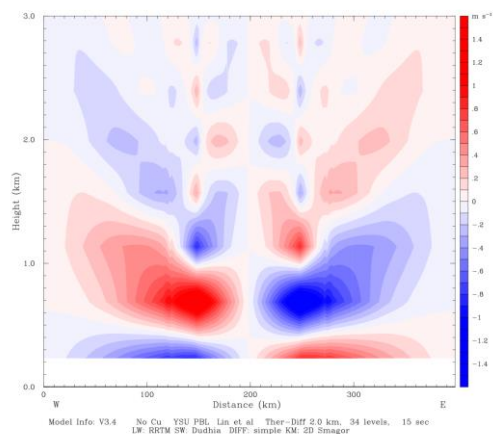


圖 10b 馬公模擬 12 小時之 12/9 20LST 風場，紅/藍為正/負值。

正/負值。

Dataset: 73405 RIP: sea Init: 1500 UTC Mon 09 Dec 13
Fcst: 24.00 h Valid: 1500 UTC Tue 10 Dec 13 (0800 MST Tue 10 Dec 13)
Horizontal wind (x-comp.) XY= 2.0, 2.0 to 201.0, 2.0

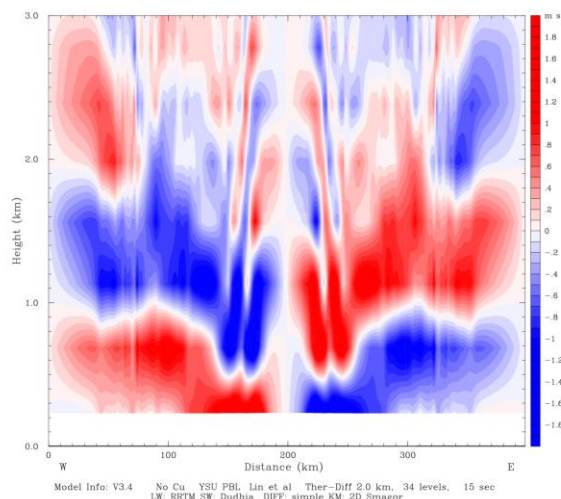


圖 10c 馬公模擬 24 小時之 12/10 08LST 風場，紅/藍為正/負值。

本文分別以UAV監測溫溼度、屏東溫溼度及馬公溫溼度植入WRF二維理想個案模式，分別稱為UARV、PTR、MGR模擬海陸風環流演變，並與WRF內定海風模式CNR做比較，結果顯示UARV與MGR均與CNR一致，於白天出現海風、夜間出現陸風情況，但UARV於模擬6小時時，氣流仍相當不規則，對照PTR情形，二者均有此種現象，而PTR甚至模擬6小時後，此時為下午二點，近地面卻為離岸風情形，此可能是陸地受地形影響，邊界層發展較為旺盛，白天局部風場受到紊流效應影響所致，唯大致而言，UAV植入WRF模擬局部環流現象，定性上有不錯的成果。

五、結論

本文運用UAV於2013年監測屏東里港地區溫度、溼度與風場等氣象資料，透過屏東探空資料加以比對UAV觀測結果，顯示UAV溫度與溼度隨高度分布趨勢與屏東探空站有一致結果，但UAV溫度比屏東站差距1.5℃左右，未來將持續校驗UAV溫度值，判斷是否為儀器系統性誤差或是UAV與屏東探空站二者地理位置差異。UAV風向與屏東站結果一致，顯示UAV推算風場定性上有不錯表現。UAV植入

WRF模式結果而言,本研究分別以UAV監測溫溼度、屏東溫溼度及馬公溫溼度植入WRF二維理想個案模式,模擬海陸風環流演變,結果顯示UAV與馬公站植入WRF後的結果,於白天出現海風、夜間出現陸風情況的合理情形,但UAV於模擬6小時後,氣流仍相當不規則,對照屏東站模擬情形,屏東站植入WRF後,近地面於白天卻為離岸風,近地層以上則紊流現象顯著,此可能是陸地受地形影響,邊界層發展較為旺盛,白天局部風場受到紊流效應影響所致,唯大致而言,UAV植入WRF模擬局部環流現象,定性上有不錯的成果。透過本研究結果,顯示UAV資料應用於WRF模式已有初步不錯的結果,未來將驗證UAV溫度值的系統性誤差,並模擬非強對流天候下的局部環流效應,以評估UAV應用於WRF模式的效能。

參考文獻

- [1]宋偉國、張凱軍、張鈺雪, 2001: 高屏地區局部環流之數值模擬研究, 第七屆全國大氣科學研討會論文彙編, 國立台灣大學, 92-97 頁。
- [2]宋偉國、巫美儀、李精進、陳益盛、陳建達, 2004: 南部地區地形與邊界層結構對局部環流結構之模擬, 第八屆全國大氣科學學術研討會論文彙編, 桃園, 57-64。
- [3]宋偉國、馬屏龍、羅國誠、周文信、顏富山、郭政泰、馮信瑋, 2005: 南部區域天候模擬分析, 空軍航空技術學院學報, 第四卷, 第一期, 157-165。
- [4]洪崇軒、袁中新、楊宏宇、宋偉國、張凱軍, 2001: "氣象條件對高雄地區空氣品質之預測與分析計劃", 高雄市環保局研究報告。
- [5] Konrad T, Hill M, Rowland J, Meyer J, 1970: A small, radiocontrolled aircraft as a platform for meteorological sensors. *Appl Phys Lab Tech Digest* 10:11-19.
- [6]Holland G, Webster P, Curry J, Tyrell G, Gauntlett D, Brett G, Becker J, Hoag R, Vaglianti W, 2001: The Aerosonde robotic aircraft: a new paradigm for environmental observations. *Bull Am Meteorol Soc* 82(5):889-901.
- [7]Egger J, Bajrachaya S, Heinrich R, Kolb P, Laemmlein S, Mech M, Reuder J, Schaper W, Shakya P, Schween J, Wendt H, 2002: Diurnal winds in the Himalayan Kali Gandaki Valley. Part III: remotely piloted aircraft soundings. *Mon Weather Rev* 130:2042-2058.
- [8]Ma S, Chen H, Wang G, Pan Y, Li Q, 2004: A miniature robotic plane meteorological sounding system. *Adv Atmos Sci* 21(6): 890-896.
- [9]Spiess T, Bange J, Buschmann M, Voersmann P, 2007: First application of the meteorological Mini-UAV M2AV. *Meteorol Z* 16(2):159-169.
- [10]宋偉國、黃士豪、朱光華、張智昇、賈澤民, 2013: 無人飛行載具進行風場分析, 2013 第三屆航空科技與飛航安全學術研討會。
- [11]宋偉國、呂冠毅、張而合, 2013: 高雄地區大氣邊界層特性研究, 2013 第三屆航空科技與飛航安全學術研討會。