

岡山能見度與空汙影響之分析

梁克強、陳建達、顏昱志
空軍第十一基地天氣中心

摘要

近年高雄地區空氣污染嚴重導致視線不佳的情況。在氣象學的嚴謹定義中，「霧」和「霾」是兩種不同的大氣現象，兩者有所區別，但亦有相關。岡山機場位於高雄市岡山區，為一提供軍方使用之機場，因政治與歷史因素，自日治時期到現今都是臺灣重要的空軍訓練基地，而空軍官校自國民政府撤退來臺後設立在此，形成岡山地區特有的空軍文化；岡山機場除了是培育優秀飛行員之搖籃，亦是配合各營區開放展現空中表演“雷虎小組”的訓練基地，可見其支援之性質多元且執行之任務繁重。因此，影響機場運作而言，天氣觀測與預報作業佔有極其重要之地位。其中能見度對於飛航安全佔有一席之地，且岡山機場助導航設施僅有太康台，又為飛行員之搖籃，是故能見度禁航標準比起其他機場高。

關鍵字：岡山機場、能見度、細懸浮微粒

一、前言

臺灣地區近年因人口都市化及工商業日漸發達，空氣汙染情形也日益嚴重，一般大氣懸浮微粒主要來自道路揚塵、汽機車廢氣、露天燃燒等因素，經人體呼吸系統吸入後，容易引起或增加呼吸道及心血管等疾病發生。特別是臺灣南部地區因工廠產生之廢氣、汽機車廢氣等因素，加上其氣候地理條件，易形成不利空氣汙染物擴散之環境，導致空氣品質較差，進而危害該地區居民之身體健康。

大氣中原本就存在多種懸浮微粒，有的是原生粒子（如地面揚塵），有的是人為的汙染物，另外高壓迴流伴隨流經寬廣洋面的氣流，還會透過氣泡爆裂（Bubble burst）過程提供大氣海鹽成分，將更增加大氣中的懸浮微粒數量，如果其中雲凝結核（cloud condensation nuclei，簡稱CCN）數量足夠，就有機會成為前述柯勒公式發揮作用的有利環境，不過這裡面仍有一些值得注意的細節。

但就算有懸浮微粒或CCN，它們靠什麼機制聚集在臺灣中南部呢？雖然到目前為止，還未見有完整對臺灣在冬季季風影響下的局部環流相關報告，但從眾多文獻中，我們都

已熟知氣流遇地形阻擋，有機會在背風面形成尾流區（wake zone），甚至是低壓或渦旋等（Smolakiewicz et al., 1989; Lin et al., 1993; Olafsson and Bougeault, 1996）。

針對冬季臺灣附近流場與大氣傳送個案所作的數值研究亦指出，在東北風的吹襲下，東北部沿海的汙染物，從排放後會順著低層風場沿山脈兩側向南傳送，絕大部份的汙染物集中於800 hPa以下的低層大氣，且受背風面合流效應及西南部外海的局部低壓作用，汙染物易於南臺灣外海堆積。

二、文獻探討

（一）空氣汙染物之說明與分類

根據行政院環保署2015年統計資料顯示，臺灣地區大氣細懸浮微粒（PM_{2.5}）年平均濃度為22.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其約為世界衛生組織（World Health Organization, WHO）標準的2.2倍（標準值10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。若再考量中、南臺灣地區，在秋、冬季等特定季節大氣PM_{2.5}濃度長期偏高的現象，更突顯相關汙染的現象，不容忽視。國際癌症研究署（International Agency for Research on Cancer, IARC）已在2013年，將懸浮微粒列為人類致癌物。

漂浮在空氣中類似灰塵的粒狀物稱為懸浮微粒（Particulate Matter, PM）。懸浮微

粒有大小不同的粒子直徑(簡稱粒徑)，而且通常使用微米(1/106公尺即萬分之一公分，單位:μm)作為粒徑大小單位，其粒徑介於0.002~100 μm，一般將粒徑小於2.5 μm者(PM2.5)稱之細微粒(Fine particle)、粒徑介於2.5~10 μm(PM2.5-10)稱之粗微粒(Coarse particle)。

(二)大氣懸浮微粒之來源

根據Ogunjobi et al.(2004)、Qu et al.(2006)等研究團體指出，東亞地區沙塵暴，可藉由強風及高壓系統傳遞至鄰近臺灣、日本及韓國等國家，甚至可以穿越太平洋傳播到美國西部，故在臺灣常見的沙塵暴係由大陸高壓系統將沙塵經氣流長程傳送至臺灣。大氣中懸浮微粒之來源(如圖1)可區分為自然產生及人為排放，自然產生例如：裸露地表揚塵、海洋飛沫、森林大火；人為排放則包括火力發電廠、焚化爐、冶煉工廠、交通運輸及工廠煙道。



圖1 PM 2.5之來源(資料來源：健康危害與防制對策醫護版)。

雖然大陸地區大氣中之污染物也是臺灣地區懸浮微粒來源之一，但70%污染物來源仍是來自本地的汽、機車及工業工程的排放造成，當冬季來臨時，大陸冷高壓勢力南壓，大量懸浮微粒因受大氣邊界層效應影響，懸浮微粒被侷限在地面的時間增長，加上在不利擴散或傳輸的氣象條件下，使得空氣中懸浮微粒之濃度增加，造成臺灣南部於冬季期間之空氣品質較差也是影響主因。

(三)細懸浮微粒對人體之影響

大氣細懸浮微粒的濃度情況對人類戶外活動具有相當之影響性，尤其是PM2.5以下的微粒對人體健康的影響最甚，故我國行

政院環保署制定細懸浮微粒指標對照表與活動建議表(如表1)。

表1 細懸浮微粒(PM2.5)指標對照表與活動建議(資料來源：行政院環保署)。

(a)低量級			
指標等級	1	2	3
分類	低	低	低
PM2.5濃度 (μg/m3)	0~11	12~23	24~35
一般民眾建議	正常戶外活動。		
敏感性族群活動建議	正常戶外活動。		

(b)中量級			
指標等級	3	4	5
分類	中	中	中
PM2.5濃度 (μg/m3)	36~41	42~47	48~53
一般民眾建議	正常戶外活動。		
敏感性族群活動建議	有心臟、呼吸道及心血管疾病的成人與孩童感受到癢狀時，應考慮減少體力消耗，特別是減少戶外活動。		

(c)高量級				
指標等級	7	8	9	10
分類	高	高	高	非常高
PM2.5濃度 (μg/m3)	54~58	59~64	65~70	□71
一般民眾建議	如果有不適，如眼痛、咳嗽或喉嚨痛等，應該考慮減少戶外活動。			
敏感性族群活動建議	(1)有心臟、呼吸道及心血管疾病的成人與孩童，應減少體力消耗，特別是減少戶外活動。 (2)老年人應減少體力消耗。 (3)具有氣喘的人可能需增加使用吸入劑的頻率。			

目前許多心肺功能疾病的調查也是針對懸浮微粒濃度與粒徑大小來做探討，所以懸浮微粒的物化特性、成份及其粒徑分布情況，已成為目前相當重視的研究。大氣懸浮微粒經由人體呼吸系統進入人體而沈澱累積，且不同之粒徑會造成微粒沈澱位置不同，造成傷害性也截然不同。微粒主要是造成肺部發炎反應，影響肺部對外來異物之清除能力，降低肺部換氣功能，造成肺部及呼吸道功能損傷。

專家學者把PM2.5 的健康影響分成短期與長期二個部份來探討。短期影響是指在24小時到1週內的健康損害情況，長期影響就是數個月或數年間的時間範圍。世界衛生組織指出，細懸浮微粒的健康影響中，包括人體呼吸道與心血管疾病的發生和死亡情況，例如使得氣喘惡化、肺功能降低、出現呼吸道疾病症狀、增加生病住院的機會、心肺疾病死亡率提高、肺癌死亡率升高，歐洲的大型研究也證實會造成人類壽命減少和早產。

(四) 冬季逆溫層成因

從大氣的運動下可分為三種不同的尺度(如圖2)：(1)主環流(Primary circulation)：主環流係指全球性的風系，環繞地球表面形成大尺度的對流帶。(2)次環流(Secondary circulation)：次環流的規模較主環流小，譬如：季風、鋒面、氣旋和反氣旋等。(3)局部環流(Local circulation)：局部環流係指小區域的氣流運動，譬如海陸風、山谷風及龍捲風等。

另外，在大氣的垂直結構上又可分為(如圖3)：(1)熱氣層(2)中氣層(3)平流層(4)對流層；對流層的厚度會隨緯度和季節而變，主要的天氣變化大多發生在此層。對流層內的溫度會隨高度增加而遞減，對流層頂的氣溫約為-55°C。對流層(Troposphere)對流層中最接近地表500公尺~ 1000公尺範圍的氣流運動會受到地表的影響，屬於邊界層流(Boundary layer flow)，稱為大氣邊界層(Atmospheric boundary layer, ABL)或星球邊界層(Planetary boundary layer, PBL)，因為人類的活動大多侷限於此範圍之內，故主要以該層做為主要探討，在此範圍內的

PM2.5與邊界層在不同天氣形態下的濃度反應。

依據卜桑(Poisson)方程式可以定義位溫(Potential temperature)。依據位溫的垂直向梯度 $d\theta/dz$ 可將大氣穩定度(Atmospheric stability)分為以下三種狀態(如圖4)：(一)不穩定狀態(Unstable condition)：位溫的梯度 $d\theta/dz < 0$ ，在此大氣狀態下，垂向擴散快速。(二)穩定狀態(Stable condition)：當位溫的梯度 $d\theta/dz > 0$ ，在此大氣狀態下，擴散十分緩慢。(三)中性狀態(Neutral condition)：當位溫的梯度 $d\theta/dz = 0$ ，表示空氣密度的垂向分佈十分均勻，空氣的流動和擴散皆不受穩定程度的影響。

由上可得知位溫梯度與擴散效應的速度呈反比曲線，另外再分析逆溫情況下的比較。以季節區分，冬季主要受大陸冷高壓影響，近地面層形成逆溫的機率最大，可說明南部地區在冬季空氣品質較為嚴重之主因；而相對地，夏季型態其發生的機率較低，從此可看出空氣品質(擴散效果)與逆溫效果呈正比關係。

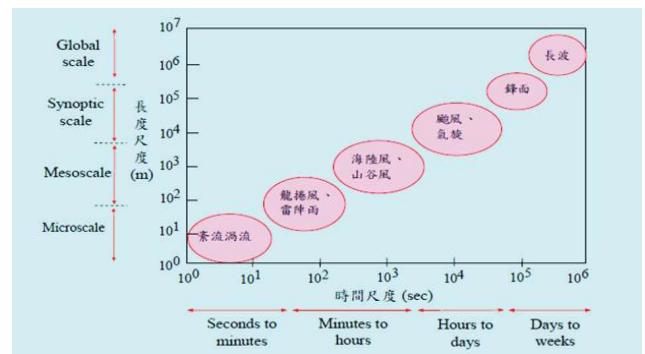


圖 2 大氣之空間、時間尺度示意圖。

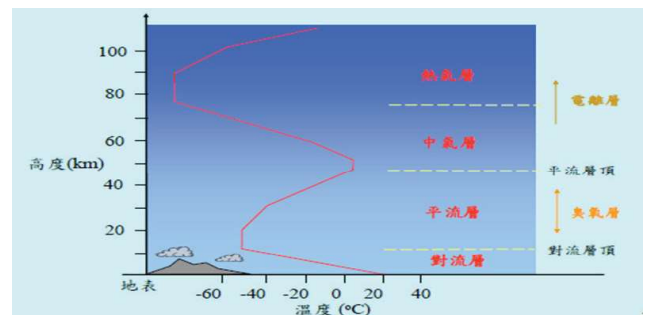


圖 3 大氣之垂直結構示意圖。

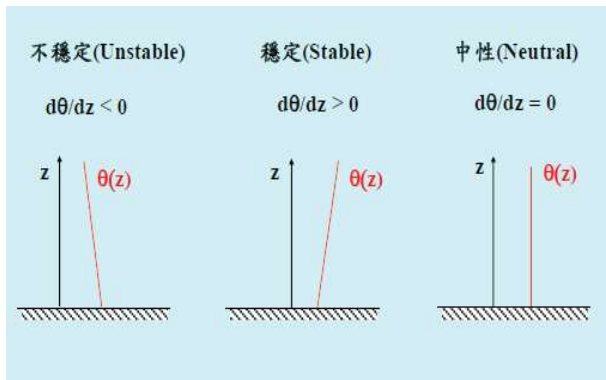


圖 4 大氣穩定度示意圖。



圖 6 高雄地區橋頭、楠梓、鳳山測站與各重工業位置示意圖(資料來源: google map)

三、岡山地區細懸浮微粒分析

(一) 岡山機場地理位置

岡山基地位於北緯22.4度，東經120.1度，其東北方10公里為大崗山，東北東方8公里為小崗山，正東方16至25公里即為中央山脈山區，東面為丘陵地形，南方16公里為高雄壽山，西南方2.4公里有漂底山，且其位置距海岸線最近距離約7公里(如圖5)，位海陸交界之處，又因地理環境較為平坦，夜間至清晨輻射冷卻亦為明顯，天氣變化深受地形效應影響。



圖 5 岡山機場(為 RCAY 標示之位置)週遭地形圖，摘自 Google map 網站 (<http://maps.google.com.tw/>)。

南部地區為歷年細懸浮微粒PM2.5濃度分布較高地區，而本文初步先以高雄地區為分析區域，主要原因是因周遭鄰近多處石化業林立，屬高污染工業區，均容易導致空氣中細懸浮微粒濃度增高之特性。本研究樣本為行政院環保署設立之大氣空氣品質監測站資料，並針對高雄地區鄰近測站選定橋頭、楠梓及鳳山作為資料來源分析，相關地理位置(如圖6)。

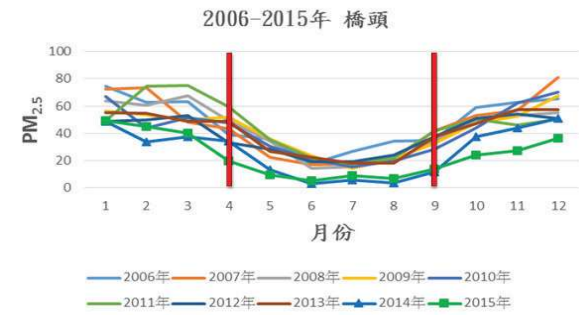
(二) 統計分析

步驟(1)：利用行政院環保署資料，分別蒐整橋頭、楠梓及鳳山測站PM2.5相關資料，採用逐時監測之數據，統計過去2006年1月1日至2015年12月31日，共計10年之PM2.5濃度數據進行分析。分別以月分為基準，計算每月PM2.5濃度平均值，藉以探討PM2.5濃度年度分布情況與季節變換相關性。

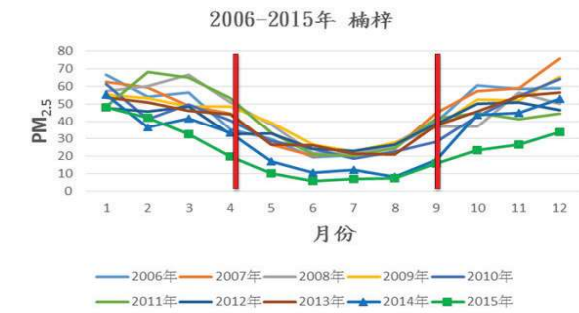
步驟(2)：針對PM2.5濃度含量較高之時期，選用10年(2006-2015年)相關數據進行分析，以冷季(1至3月、10至12月)、暖季(4月至9月)作為基準。另選定多數人員戶外體能訓練時段(05-20時)，先分別求出前述每小時大氣中PM2.5濃度平均值，以此方法可求出2006至2015年共計每日逐時之相關濃度數據，並加以比較各時段之PM2.5濃度變化情況。

1. 月平均濃度

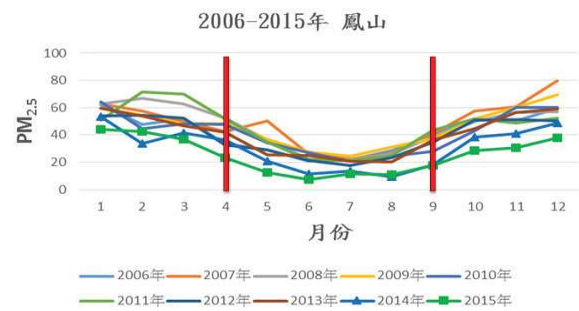
統計行政院環保署高雄地區橋頭、楠梓及鳳山測站逐時之PM2.5濃度實際觀測資料，並計算每年、月平均含量，其2006至2015年PM2.5月平均濃度趨勢圖與月平均含量結果(如圖7、表2)，趨勢圖結果發現每年10月至翌年3月之月平均濃度高於4月到9月期間。



(a)橋頭測站



(b)橋梓測站



(c)鳳山測站

圖 7 (a)、(b)及(c)分別為2006-2015年橋頭、橋梓及鳳山測站PM_{2.5}月平均濃度趨勢變化圖(單位:μg/m³)。

表 2 2006-2015年橋頭、橋梓及鳳山測站PM_{2.5}之月平均濃度值(單位:μg/m³)。

西元	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	平均
1	74.4	72.5	63.6	56.2	67.0	49.1	48.9	55.1	48.6	49.3	55.8
2	62.7	73.4	60.5	53.8	44.1	74.7	50.0	54.9	33.5	44.8	
3	63.4	48.4	67.4	49.7	51.5	75.2	53.2	49.0	37.5	40.4	
4	39.0	43.3	49.5	51.8	47.5	59.7	33.1	48.8	34.4	19.9	25.5
5	35.8	22.5	34.1	35.9	30.5	35.1	28.7	26.8	13.3	9.8	
6	17.6	17.0	14.2	23.4	20.7	21.8	19.1	22.7	3.1	5.4	
7	27.0	17.9	15.3	14.5	15.6	17.9	19.5	18.1	5.6	9.1	
8	34.4	21.4	20.3	21.3	19.8	22.0	24.3	18.2	3.9	6.9	
9	34.7	41.7	34.7	32.6	28.2	42.0	37.3	37.7	11.8	14.1	
10	58.9	53.1	48.6	47.7	43.8	50.6	50.8	47.0	37.5	24.0	52.1
11	62.7	57.0	53.3	52.5	46.2	54.0	57.5	44.0	27.3		
12	65.5	81.3	35.3	47.3	70.0	50.2	50.8	67.3	50.8	36.6	

西元	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	平均
1	66.8	62.7	57.4	55.4	61.4	48.7	47.9	54.0	55.2	48.0	52.5
2	51.3	59.4	60.4	53.3	41.6	68.4	45.9	51.1	36.6	42.4	
3	56.7	49.2	66.6	48.8	49.9	65.0	48.8	46.2	41.7	32.4	
4	35.4	44.5	51.1	48.7	40.6	53.4	32.5	44.2	33.4	19.9	25.8
5	29.7	26.7	38.2	39.5	28.4	33.4	33.0	26.6	17.1	10.0	
6	19.4	20.1	21.9	26.5	24.4	20.8	24.2	26.3	10.4	5.7	
7	20.6	22.4	21.5	22.7	18.7	20.4	23.0	21.4	12.1	6.9	
8	27.4	24.3	26.1	28.0	22.5	24.7	26.6	20.8	8.0	7.2	
9	39.8	43.1	37.2	37.1	28.3	41.6	38.6	37.8	17.7	15.9	
10	60.8	57.3	36.9	52.8	43.0	45.1	50.3	45.7	43.8	23.5	50.3
11	58.8	59.1	56.7	52.4	54.7	41.3	50.8	54.5	45.1	26.7	
12	59.0	75.8	50.2	65.6	64.2	44.8	46.7	56.8	53.0	33.8	

西元	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	平均
1	62.4	62.9	62.5	59.6	64.2	50.8	54.0	59.5	53.6	44.3	53.6
2	47.5	57.5	67.1	54.6	44.7	71.7	54.3	53.7	33.9	42.6	
3	51.9	49.6	62.9	48.2	48.0	69.8	52.2	46.8	41.6	36.7	
4	33.6	42.3	52.3	48.0	47.5	52.0	32.8	42.1	36.2	23.4	28.1
5	29.2	50.3	36.4	37.0	34.3	34.6	28.8	25.6	20.7	12.5	
6	20.6	26.0	22.3	27.7	26.7	22.0	21.2	24.9	11.6	7.0	
7	22.0	22.4	21.8	24.3	20.9	21.5	17.8	20.6	13.2	11.2	
8	28.7	26.2	25.8	31.2	24.3	24.8	23.2	20.5	9.3	11.1	
9	39.9	41.2	38.7	37.5	28.2	43.3	34.9	36.1	18.3	17.8	
10	52.0	57.7	49.7	52.0	42.9	51.6	50.6	44.6	38.4	28.4	51.9
11	50.1	60.6	56.7	60.2	60.0	48.5	51.4	56.5	40.8	30.8	
12	59.5	80.0	56.9	69.3	60.1	52.4	50.1	59.0	48.7	38.0	

由表2結果得知，2006至2015年1至3月之PM_{2.5}月平均濃度橋頭、橋梓及鳳山測站分別為55.8μg/m³、52.5μg/m³及53.6μg/m³；自4月份開始數值即顯著下降，並持續至9月，其中4至9月之PM_{2.5}月平均濃度橋頭、橋梓及鳳山測站分別為25.5μg/m³、25.8μg/m³及28.1μg/m³；高峯值自10月至12月開始數值即顯著上升，持續上升至12月份達到最高，其中10至12月之PM_{2.5}月平均濃度橋頭、橋梓及鳳山測站分別為52.1μg/m³、50.3μg/m³及51.9μg/m³。綜上所述，本研究所得之結果與前述參考文獻之結論大致相符，PM_{2.5}濃度與季節有其關聯性，濃度較高時期主要發生在冷季(10月至翌年3月)，而較低濃度則出現於夏季(4月9月)，平均約26.5μg/m³。此外，依據行政院環保署PM_{2.5}指標對照表建議，當PM_{2.5}濃度超過34μg/m³時，對於呼吸道與心血管疾病較為敏感族群是有危害性的，對照行政院環保署所制定細懸浮微粒指標對照表與活動建議表，顯示在每年10月至翌年3月期間內，PM_{2.5}月平均濃度值均超過此標準，對於從事戶外活動具有較高之風險性。

2. 每日各時段濃度

由前述結果得知PM_{2.5}濃度較高時期主要發生在10月至翌年3月之間，因而進一步針對2006至2015年，分析冷季(1-3月、10至12

月)及暖季(4至9月)期間，針對影響能見度分為以下時段，上午05至08時、09至12時與下午13至16時17至20時等四個時段期間，進行PM2.5濃度進行分析比較。另依據行政院環保署系懸浮微粒指標對照表之顏色，來顯示該時段PM2.5濃度之低、中及高量級。

表3結果顯示，於2006至2015年冷季期間內(1至3月、10至12月)，橋頭、楠梓及鳳山測站PM2.5平均濃度值於05至08時約49-53µg/m³，屬於中量級；09至12時達到55-59µg/m³，屬於高量級；13至16時達到49-51µg/m³，屬於中量級；17至20時達到47-50µg/m³，亦屬於中量級。

表3 2006-2015年冷季(1至3月、10至12月)橋頭、楠梓及鳳山測站PM2.5之逐時平均濃度(單位:µg/m³)。

時間	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	24時
2006年	67	66	65	64	63	61	62	66	69	71	73	74	67	60	57	56	55	62	66	67	68	69	69	69
2007年	67	65	63	61	59	58	59	64	69	74	75	74	68	62	58	56	57	59	62	64	65	67	68	67
2008年	59	60	58	58	58	57	57	58	61	63	65	66	63	58	53	51	50	51	54	56	58	60	61	60
2009年	56	55	54	54	54	54	57	62	63	62	60	57	51	48	48	47	47	50	53	55	56	57	56	56
2010年	59	59	58	57	56	55	55	58	61	62	63	61	58	55	51	49	48	49	51	54	57	59	60	60
2011年	58	58	57	56	56	55	56	58	62	63	62	61	60	57	55	53	55	56	57	59	59	59	58	58
2012年	55	54	53	52	51	51	51	52	54	54	54	53	51	48	45	44	44	46	48	51	53	55	56	55
2013年	56	55	54	53	53	54	55	58	58	57	57	58	50	48	46	45	47	50	53	55	56	57	56	56
2014年	44	45	45	44	43	44	46	48	47	45	44	41	37	34	32	32	35	38	40	44	45	46	46	44
2015年	39	38	37	37	37	40	42	43	42	41	39	34	31	29	29	31	34	35	37	40	40	40	39	39
平均	56	56	54	54	53	53	54	56	59	59	60	58	54	50	48	46	47	48	51	54	55	57	57	56

時間	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	24時
2006年	61	60	59	58	55	55	55	57	61	64	64	64	62	60	57	56	56	58	59	60	63	64	63	63
2007年	61	60	59	57	56	54	54	57	60	65	68	70	68	64	60	57	57	60	61	62	63	62	62	62
2008年	55	54	53	53	52	52	51	53	55	57	58	59	58	56	53	50	48	50	53	55	57	57	57	58
2009年	55	53	52	52	51	50	51	53	57	60	63	63	62	57	53	51	50	50	52	53	55	56	58	58
2010年	65	53	52	51	49	50	49	52	54	56	57	58	57	53	51	48	47	47	49	50	53	55	55	56
2011年	53	52	51	50	49	49	49	51	53	56	54	57	55	55	52	50	50	50	51	53	53	53	53	53
2012年	51	50	49	48	47	46	47	48	49	51	52	51	51	49	48	45	44	44	46	48	49	50	51	51
2013年	53	52	50	49	49	49	51	52	54	55	56	54	51	49	47	47	47	49	51	53	54	54	54	53
2014年	49	47	46	46	46	47	49	51	51	50	48	45	41	38	37	38	41	44	47	48	49	49	50	50
2015年	35	34	33	33	32	32	34	36	39	41	40	39	37	33	29	28	29	31	33	35	36	36	37	36
平均	53	52	50	50	49	48	49	51	53	55	56	56	55	52	49	47	47	48	49	51	53	54	54	54

時間	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	24時
2006年	56	56	55	54	52	51	51	53	56	58	60	60	58	56	51	48	47	47	49	51	53	55	56	57
2007年	65	65	64	62	61	60	60	62	65	68	68	68	67	63	58	54	53	53	56	59	60	61	61	63
2008年	62	61	60	60	59	58	59	61	63	64	65	64	61	57	52	52	53	54	57	59	60	62	63	63
2009年	59	59	59	59	58	58	58	61	65	66	66	63	62	59	54	50	49	48	50	51	53	55	57	58
2010年	56	56	56	55	54	54	54	55	56	59	58	58	57	54	49	47	46	46	47	49	51	53	54	56
2011年	59	59	58	58	58	59	60	61	62	60	58	57	54	53	52	53	54	56	57	58	58	58	58	58
2012年	55	55	55	54	53	52	52	53	55	56	55	54	53	51	49	47	47	46	48	49	50	52	53	54
2013年	56	56	55	55	54	53	54	56	58	57	55	54	52	50	48	47	47	48	50	52	53	56	57	57
2014年	46	46	46	45	45	45	46	47	48	48	45	45	42	39	36	35	35	36	37	39	42	44	45	46
2015年	40	40	39	39	39	39	39	41	42	42	40	39	36	33	30	28	28	29	32	34	36	38	39	40
平均	55	55	55	54	53	53	53	55	57	58	57	57	55	52	49	46	45	46	48	50	51	53	54	55

結果顯示，在2006至2015年暖季期間內(4至9月)，橋頭、楠梓及鳳山測站PM2.5平均濃度值於05至08時約26-28µg/m³，09至12時約為31-33µg/m³，13至16時約為24-30µg/m³，17至20時達到23-27µg/m³，均屬低量級。

表4 2006-2015年暖季(4月至9月)橋頭、楠梓及鳳山測站PM2.5之逐時平均濃度(單位:µg/m³)。

時間	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	24時
2006年	35	32	32	33	30	28	31	36	37	37	37	35	32	26	25	26	26	28	26	30	32	32	34	36
2007年	39	36	36	35	35	36	41	46	46	47	49	49	43	32	37	40	42	42	44	46	46	46	45	45
2008年	33	32	31	29	28	27	26	29	31	32	31	33	32	28	24	24	23	21	21	23	26	28	29	32
2009年	28	30	31	31	32	35	36	35	35	34	32	29	26	25	24	24	25	29	29	29	29	30	30	28
2010年	30	30	30	29	28	28	30	30	29	30	30	28	26	24	23	23	21	20	22	25	25	27	29	29
2011年	35	35	35	35	36	36	38	38	37	37	36	34	32	29	28	28	28	29	29	30	31	32	33	33
2012年	28	28	28	27	27	28	30	31	32	31	30	29	29	26	24	23	23	23	24	25	26	27	28	28
2013年	31	31	30	30	31	32	32	31	30	29	29	27	25	24	23	25	25	26	28	29	29	29	29	30
2014年	12	12	13	13	12	13	14	15	15	15	15	12	11	10	10	10	10	10	10	11	11	12	13	11
2015年	11	12	11	11	12	12	14	14	13	13	13	11	9	9	9	9	9	9	9	10	11	11	11	11
平均	28	28	28	27	27	27	29	31	31	31	30	29	27	23	23	23	23	24	24	25	27	27	28	28

時間	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	24時
2006年	28	27	27	27	26	26	26	29	31	33	34	33	32	31	30	29	29	28	27	26	27	28	28	28
2007年	30	30	29	29	28	27	28	30	32	35	35	35	33	33	31	31	30	29	28	28	29	30	31	31
2008年	32	32	32	31	30	30	31	34	36	38	38	37	37	35	33	31	30	30	30	30	31	32	32	32
2009年	35	34	34	33	33	33	33	35	37	38	39	39	37	35	32	31	30	30	30	30	32	32	34	35
2010年	27	26	27	25	26	26	28	29	31	32	32	30	26	26	24	26	25	25	24	27	25	27	26	26
2011年	32	32	32	32	32	32	34	36	37	37	36	35	33	31	31	30	29	29	29	30	31	31	31	31
2012年	30	29	29	28	28	28	31	32	34	34	33	32	31	29	28	27	27	27	28	28	29	30	30	
2013年	29	29	29	28	28	29	31	32	33	33	32	32	31	29	28	27	27	28	28	29	29	29	29	29
2014年	15	14	14	14	15	15	18	20	22	21	20	20	18	17	16	15	15	14	14	15	16	16	16	16
2015年	10	9	9	9	9	11	12	14	15	16	15	14	12	10	10	10	9	9	9	9	10	11	11	11
平均	27	26	26	26	26	27	29	31	32	32	31	30	28	27	26	25	25	25	25	26	26	27	27	27

: (1)09至12時段、(2)13至16時段、(3)05至08時段、(4)17至20時段。因此，就本研究地區而言，空氣汙染於冷季(1至3月及10至12月)期間05至08時段，有50%或以上為具有影響能見度之日數、09至12時段，約有25%具有具有影響能見度之日數、13至16時段，約有五成以上為具有影響能見度之日數、17至20時段，約有70%具有影響能見度之日數。

4至9月間(暖季)內之05至08時段，約不到一成具有影響能見度之日數、09至12時段，約有30%為具有影響能見度之日數、13至16時段，有四成為具有影響能見度之日數、17至20時段，低於10%有影響能見度之日數。

四、研究內容推論

根據飛航安全統計顯示，低能見度是威脅飛航安全的重要原因之一；經驗也告訴我們，冬、春兩季每當清晨出現濃霧時，預報員都曾面臨難以下決策的困擾。霧的成因及型態很多，舉例而言，海洋性層積雲會過渡成霧，海水溫差會形成海霧，冷氣團變性更是我們最熟悉的原因，有關於霧的原理、診斷及預報，本軍先進亦著墨不少。然而霧是雲物理與邊界層交互作用的問題，會受綜觀天氣系統、殘留與夜間邊界層的發展、凝結核的分布、低層垂直風切、局部地形、輻射收支、以及土壤過程或下墊面特性等直接影響，所以單靠分析天氣圖是不能完全滿足的。

霧對本軍任務的執行影響極大，其出現時間、地點，以及發展、消散過程的掌握，就成為軍事氣象預報重點所在。本文透過地面觀測資料，結合MODIS感測儀器反演資料、環保署空氣品質監測資料、以及我們對綜觀天氣、地形作用、局部環流發展與雲物理的知識來進行探討。我們將個案中所經歷到的特徵，從雲物理的角度加以詮釋，企圖歸納出一個未來在作業上可以參考的概念模式，雖然這個主觀的概念還沒有經過量化的驗證，但為合理的推論演繹；我們企待藉此個案的討論，能夠具體化某些濃霧出現的過程，並獲得一些意見與建議，共同集思廣益以提高在能見度預報上的能力。

至於該如何把個案所經驗到的各項特徵，包括大至綜觀天氣、小到局部氣流場與天氣現象演變、甚至微小到懸浮微粒的分布與濃度等，組織成為完整的概念模式呢？這恐怕得花上很大一番口舌才能說清楚。在下列第一點中，我們先把「有關霧的成因」的各種成見，像是平流霧、輻射霧等想法暫時保留，單純從細小雲滴的成長過程來討論霧的發生；第二點針對個案中一些看似無關、但卻可能互為因果的現象，逐一的分析陳述並加以關聯；最後一點則將說明一些尚待評估、或是在現行預報作業流程中，暫時無法解析或收集的資訊，對霧預報成敗所可能造成的影響。

(一)雲(霧)的成長

如果我們要探討的低能見度，是指一般狀況下由雲霧所造成的低能見度，那麼我們應該要先了解一下細小雲滴的長大過程，也就是藉由柯勒(Köhler)方程所描述的過程；其實探討細小雲滴的成長，應該要先看純水雲滴與濕空氣間平衡的凱爾文(Kelvin)方程，凱爾文方程指的是「在相同的溫度下，一個球面水面的飽和蒸氣壓，應大於平面水面的飽和蒸氣壓」；先不管雲滴表面是球面或平面的，總是要在環境的蒸氣壓大於水表面蒸氣壓的情形下，細小雲滴才能夠繼續長大，但是我們都知道，即使相對濕度達到100%，也只不過代表環境的蒸氣壓剛好和平面水面的飽和蒸氣壓相等而已，因此對於表面是球面的雲滴而言，100%的相對濕度其實並沒有達到飽和，所以純水雲滴在一般的大氣環境中，應該是要蒸發掉的。

但由於大氣中富含化學物質，這裡的細小雲滴其實並不會是純水雲滴，而是在純水中溶解了溶質的溶液液滴，由於雲滴是溶液，而溶液具有活性，活性會修正凱爾文方程，再加上溶質分子往往會解離成多個離子，所以溶液液滴表面飽和蒸氣壓(如圖8曲線2、3為不同溶液液滴飽和比隨液滴半徑之變化)不再像純水雲滴那樣大(如圖8曲線1為純水雲滴飽和比隨雲滴半徑之變化)，柯勒方程所描述的，正是溶液液滴和濕空氣間的平衡結果。

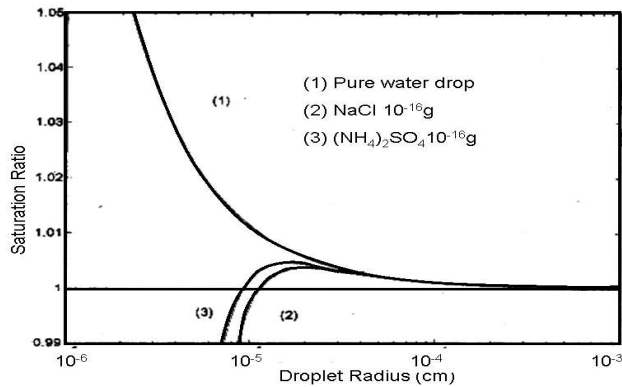


圖8 柯勒方程概述圖。

穩定平衡區內的另一個重要性質，就在於即使飽和比小於1，也就是環境相對溼度降至100%以下時，液滴仍有機會處於平衡狀態，這些溶液液滴只會變小卻不會蒸發消失，同樣的，即使處於偏低相對溼度環境中的極小液滴，也會因相對溼度的提高而成長，這個性質，正是稍後我們要用來說明濃霧之所以發生的重要依據。

(二) 案例分析

2004年12月17日1200UTC地面天氣圖顯示，臺灣地區正處於高壓迴流偏東氣流影響之下，而臺灣附近雲系的分布情況，正是偏東風繞過中央山脈的結果。(如圖9 a、b)

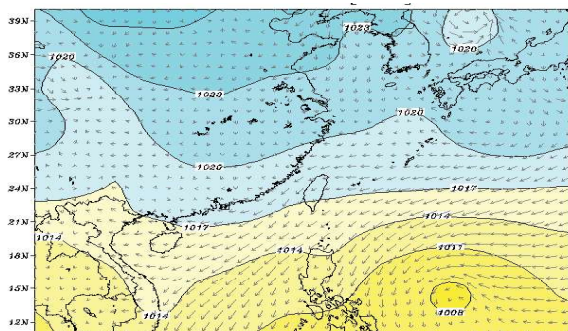


圖9 (a) 2004年12月17日地面天氣圖



圖9 (b) 2004年12月17日可見光雲圖

大氣中原本就存在多種懸浮微粒，有的是原生粒子（如地面揚塵），有的是人為的污染物，另外高壓迴流伴隨流經寬廣洋面的氣流，還會透過氣泡爆裂（Bubble burst）過程提供大氣海鹽成分，將更增加大氣中的懸浮微粒數量，如果其中CCN數量足夠，就有機會成為前述柯勒公式發揮作用的有利環境，不過這裡面仍有一些值得注意的細節，最後再加以討論。

但就算有懸浮微粒或CCN，它們靠什麼機制聚集在臺灣中南部呢？雖然到目前為止，還未見有完整對臺灣在冬季季風影響下的局部環流相關報告，但從眾多文獻中，我們都已熟知氣流遇地形阻擋，有機會在背風面形成尾流區（wake zone），甚至是低壓或渦旋等（Smolakiewicz et al., 1989; Lin et al., 1993; Olafsson and Bougeault, 1996）。

針對冬季臺灣附近流場與大氣傳送個案所作的數值研究亦指出，在東北風的吹襲下，東北部沿海的污染物，從排放後會順著低層風場沿山脈兩側向南傳送，絕大部份的污染物集中於800 hPa以下的低層大氣，且受背風面合流效應及西南部外海的局部低壓作用，污染物易於南臺灣外海堆積(如圖10至11)，藉由Terra及Aqua衛星雲圖(如圖12)也可看到低層懸浮物質由海峽移入臺灣中南部地區。自下午過渡到夜間，中部地區已轉為陸風，但西南部合流特徵仍在，顯示在綜觀流場變動不大的情況下，除了日夜變化之外，地

形與局部環流之間的相互關係得以維持(如圖13)。

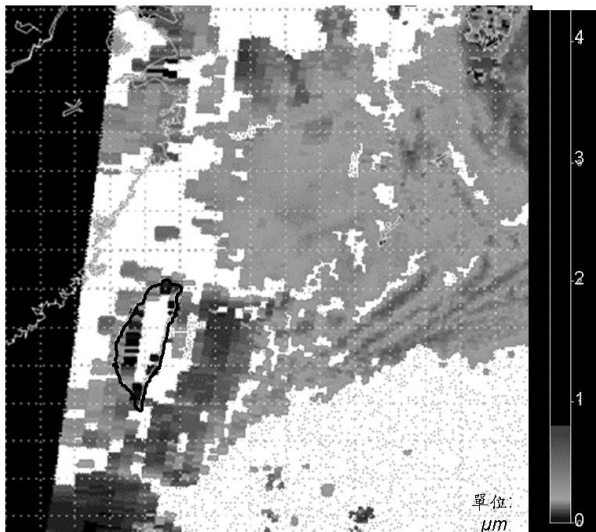


圖10 12月17日0641 UTC時MODIS資料反演結果，臺灣附近懸浮微粒的分布狀況，正具有這樣的特徵，此外，高壓迴流所涵蓋的廣大洋面上，亦可見到懸浮微粒的分布。

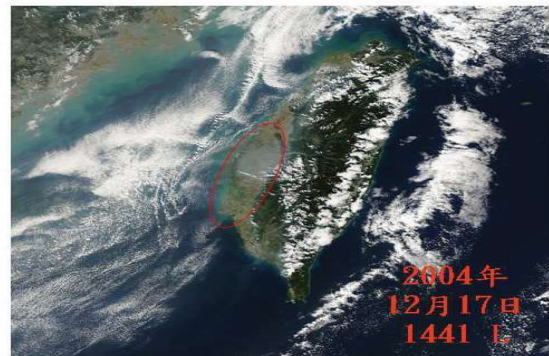
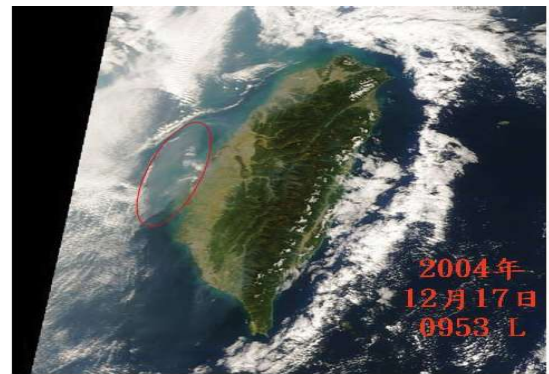


圖12 12月17日(a)0153 UTC Terra衛星雲圖及(b)0641 UTC Aqua衛星雲圖。

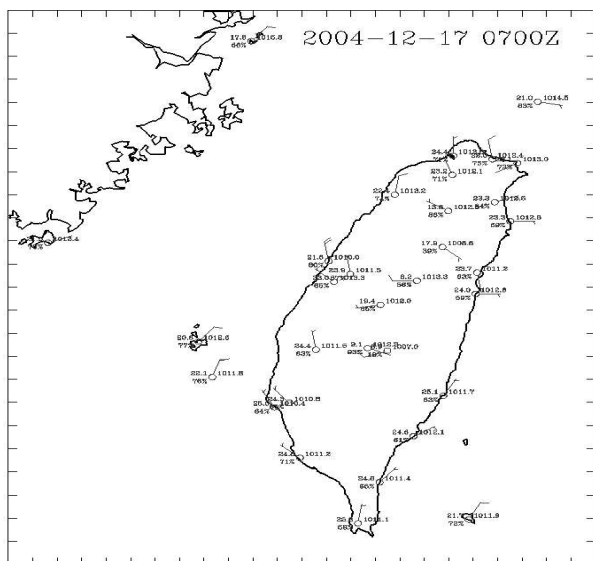


圖11 另由當日下午中尺度觀測資料，我們可以看出西南部有偏北風與東部海域繞流東北風的合流現象，同時可能因海陸效應，西南部沿海風向均為西北風，有利於海面上的懸浮微粒平流進陸地。

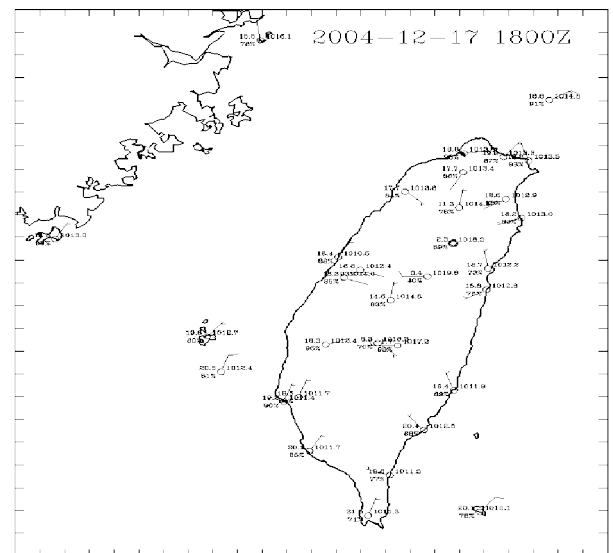


圖13 12月17日1800 UTC中尺度觀測資料。

我們比較同一時間RSM的模擬結果，在近地層的動力場上，儘管水平風輻散十分微弱，但氣流繞流及過山下沉後再分流的現象十分明顯(如圖14至圖16)。

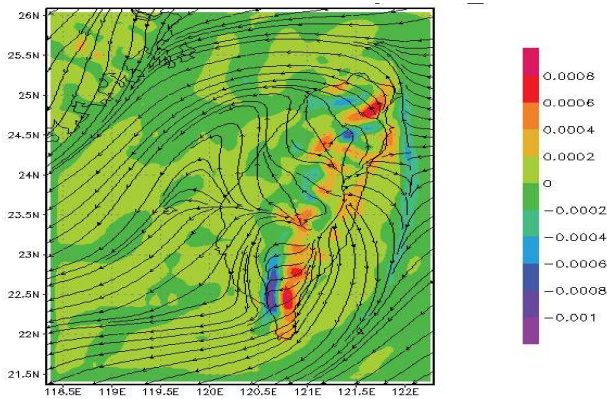


圖14 模擬也看到山脈以東的迎風面是個高壓脊、山脈以西包括臺灣海峽是個低壓槽

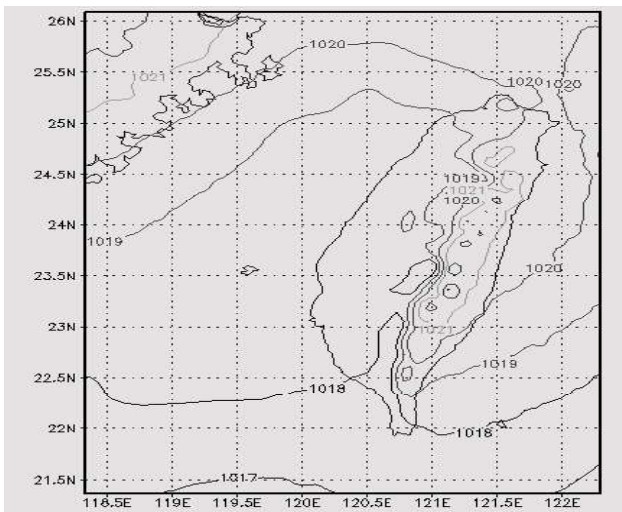


圖15 模擬也看到山脈以東的迎風面是個高壓脊、山脈以西包括臺灣海峽是個低壓槽

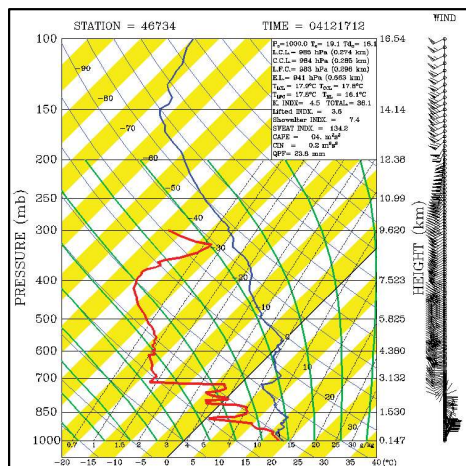


圖16 850HPA以下逆溫定性上說明低層大氣為穩定，有利於懸浮微粒集中於近地層。

根據前述資料，我們有理由相信在個案

的綜觀流場下，因中央山脈地形作用，西南部至臺灣海峽南部一帶有局部環流存在，且此局部環流將造成懸浮微粒或CCN聚集（如圖17）。

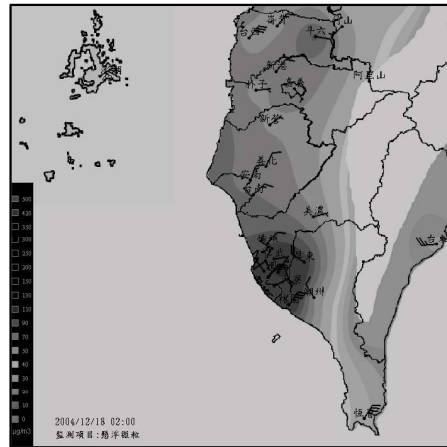


圖17 環保署近地面的環境品質監測資料，顯示西南部懸浮微粒指數相當高。

如果其中也包含足量的CCN，如第一點所述，則這些CCN會製造出許多細小雲滴，在白天因為相對溼度低，雲滴半徑小，但大量小雲滴散射作用明顯，自然能見度不可能太好，在夜間輻射冷卻作用顯著，提高了環境的相對溼度，因此小雲滴半徑漸漸成長加大，終於形成濃霧，而在日出以後到中午之前，相對溼度逐漸下降，雲滴半徑再度減小，能見度又回升至約3000公尺(如圖18)。

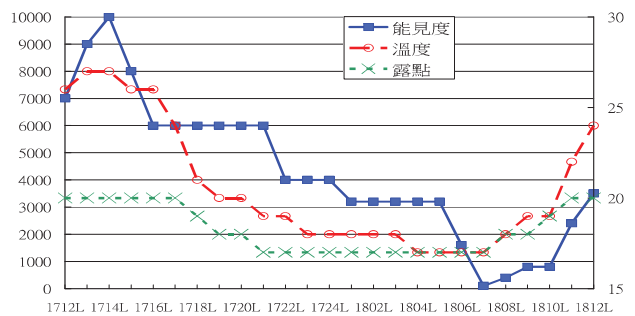


圖18 2004年12月17日0400 UTC至18日0400 UTC，岡山機場能見度及溫度、露點圖。左縱座標為能見度(單位：公尺)；右縱座標為溫度(單位°C)。

2004年12月17日，天氣型態為高壓迴流，氣流經過洋面挾帶大量懸浮微粒，偏東風在臺灣地形影響下繞流，配合山脈西側下沉氣流形成局部低壓，有利於懸浮微粒聚集；

12月17日午後，相對溼度雖不高，但西南部能見度已開始緩慢下降，推論為大量細小雲滴散射光線所致；夜間相對溼度增大，致雲滴半徑增大，能見度明顯降低，並於18日清晨出現濃霧；日出至午前相對溼度逐漸下降，雲滴半徑縮小，能見度又緩慢回升。文中尚有許多需要進一步說明之處，例如：1. 本文引用環保署資料中的懸浮微粒係特指PM10(單位為而非濃度)，也就是粒徑在 $10\mu\text{m}$ (微米)以下的粒子，主要來源有地面揚塵、車輛廢氣、露天燃燒、營建施工及農地耕作等，但其中並非全都適合成長為雲滴，較適合的主要成分為PM2.5甚至是PM1。2. 本聯隊接收MODIS資料，並運用NASA所提供之反演式，可概略將氣溶膠(aerosol)成分區分為五大類，亦可估算出光學厚度(optical depth)，但距離可用以直接判定粒子的化學成分，以及粒子分布的高度，中間的關聯性還沒有定論，在技術上尚有相當大的發展空間。此外，aerosol直接或間接均影響地表短波輻射收支，左右天氣或氣候變化，近來已越來越受到重視，值得注意。3. 霧和雲的物理過程其實都一樣，只是降溫的原因及位置不同，從這個角度來看，如果雲的發生與消散是我們所不易掌握的，那麼想要成功的預報霧的過程又何其容易！就「雲」而言，CCN的粒徑分布及空氣上升速度是主宰雲滴成長的主要機制，對「霧」而言，上升速度的重要性則應由冷卻率所取代。

五、結論

由於懸浮微粒的多變與複雜，目前大氣科學界還無法完整掌握氣膠粒子的時空分布、成分、光學、微物理特性，推估未來氣候時，氣膠與雲之間的交互作用甚至成為一個主要的不確定性來源。無論在環境、社會或氣候領域，都還有許多與「霧」、「霾」相關的陰霾與迷霧，需要共同努力面對與揭露。且霧的演化，決定於可感熱與水氣的分布，與邊界層內穩定度、風切、輻射等息息相關，要掌握這些因素，不但模式的解析度要高，尤其是近地表的垂直解析度要高，這不只是單純地將預報模式網格點縮小就可以了，還得搭配高階的次網格計算格式、更完

整的輻射及地表過程，並結合雲物理的基本知識才有意義。在本個案的回顧中，我們並未詳細討論海陸環流、地表秉性差異，更沒有評估對流或穩定邊界層的發展、轉換與消散對霧演化的影響等等，這些資訊是無法僅靠時間解析度不夠的探空，或空間解析度不足的地面觀測就足夠評估的，似乎透露著我們得結合其他工具才能增進霧的預報能力。並且有關邊界層模式的概念，以及與一般預報模式的差異，目前國內的邊界層模式正在發展中，但仍停留在研究模式階段，近期內我們暫將朝運用一般模式(如MM5或RSM等)，對低層大氣所解析到的相對溼度、風場(也就是邊界層大致環境)變化趨勢，定性的與霧作一些相關性研究。目的是想為類似的濃霧個案找出可能原因，也可以說是想把許多不同尺度的特徵，組織成一個濃霧演化過程的概念模式，但嚴格來說只能算是想法，還沒有經過量化驗證，我們摘要前兩節所述作為本文結論。

六、參考文獻

- 陳維婷，2015，霧霾迷濛中的大氣物理與化學，科學月刊。
- 黃堯聖、陳世裕、江鴻龍，「大氣懸浮微粒化學組成及來源推估」，輔英科技大學環境工程與科學系碩士論文，民國95年。
- 環保署，中華民國空氣品質監測報告:105年報，第37頁，臺北(2015)
- 鐘椀亭、徐禾杰、張順欽，「全國近15年懸浮微粒質量濃度變化趨勢」，行政院環境保護署資料。
- 吳啟文，「臺灣中部都會區氣懸浮微粒粒徑分佈之污染物特性分析」，國立中央大學，民國85年。
- 蔡子衿、劉志堅、張順欽，「臺灣近地面逆溫現象之探討」，行政院環境保護署環境監測及資訊處技術期刊。
- 李鴻斌、宋偉國，「探討高雄地區氣象因子及空氣污染物對能見度之相關性」，氣象分析與預報，第227期，民國105年，第9至21頁。
- 翁叔平、郭乃文、呂珮雯，「高高屏地區細懸浮微粒(PM2.5)污染事件的綜觀環境分

- 析」，大氣科學，第 41 期，民國 102 年，第 43 至 63 頁。
- 陳玉芬，飛航服務總台，「高雄國際機場冬季低能見度(視障)天氣成因探究」。
- 吳清吉、吳志宏，「大氣邊界層污染物擴散之日夜變化」，民國 87 年 6 月。
- 廖杞昌、邱振源、崔怡楓、羅明福，「臺灣西部及外島地區低能見度環境特徵分析及模擬」。
- Bao, Z., C. Zhu, R. Hulugalla, J. Gub and G. Dia, "Spatial and temporal characteristics of aerosol optical depth over East Asia and their association with wind fields," *Meteorol Appl.*, 15, pp. 455 - 463(2008).
- Ogunjobi, K.O., Z. He, K.W. Kim, and Y.J. Kim, "Aerosol optical depth during episodes of Asian dust storms and biomass burning at Kwangju, South Korea," *Atmospheric Environment*, 38, pp. 1313-1323(2004).
- Qu, J.J., X.J. Hao, M. Kafatos, and L.L. Wang, "Asian Dust Storm Monitoring Combining Terra and Aqua MODIS SRB Measurements," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(4), pp. 484-486(2006).
- Zheng, J., W. Che, Z. Zheng, L. Chen and L. Zhong, "Analysis of Spatial and Temporal Variability of PM Concentrations Using MODIS Aerosol Optical Thickness in the Pearl River Delta Region, China," *Aerosol Air Qual. Res.*, 13, pp. 862 - 876(2013).
- Smolakiewicz et al., 1989 ; Lin et al., 1993 ; Olafsson and Bougeault, 1996