

以 WRF 及 CALPUFF 之全年模擬探討南部沿海地區之風場及煙流傳輸特性

梁佳修²、葉富豪¹、陳昱均¹、劉遵賢²、陳錦煌³

景丰科技股份有限公司,工程師¹,經理²,總經理³

摘要

本研究以 WRF 氣象模式及 CALPUFF 空氣品質模式對高雄臨海工業區內之煙囪擴散進行全年之模擬，此為國內首次將這兩個模式之結合進行全年之模擬。模擬的氣象場顯示高屏地區受到中央山脈背風尾流效應及當地海陸風之影響均能合理之呈現，污染物擴散出海後有一部份將會藉海風迴流至陸地，淨流入量最大的時期發生在冬夏季風交接的月份。當 CALPUFF 啟動內邊界層之模擬機制時，高煙囪的最大著地濃度位置將會顯著地靠近排放源，且其年最大小時濃度及日平均值均低於 ISC3 之模擬結果，此結果與一般認為 ISC3 高估的看法一致。

關鍵詞：空氣污染；網格模式；擴散模式；海陸風；污染物迴流；內邊界層

A study of coastal wind field and pollutant dispersion in south Taiwan using one-year simulation of WRF and CALPUFF.

Chia-Hsiu Liang², Fu-Hao Yeh¹, Yu-Chun Chen¹, Tsun-Hsien Liu²,
Jim-Huang Chen³

Environmental Simulation Co. Ltd. ,Engineer¹,Manager²,General Manager³

Abstract

This study uses WRF and CALPUFF to simulate pollutant dispersion from stacks located in a coastal industrial complex in Kaohsiung. This is the first time in Taiwan to do the whole year simulation combining these two models. The simulated wind field shows reasonable tail flow caused by the blocking effect of Central Mountain and the land-sea circulation. The pollutant dispersed toward sea will be partially driven back by sea wind. The maximum net inflow occurs in the months during the transition of winter-spring and summer-autumn. With TIBL setting enabled, the CALPUFF simulated location of the maximum ground concentration are much more close to the source for high stack emission. The annual maximum hourly and daily average concentrations simulated by CALPUFF are lower than those by ISC3. This result complies with the general thought of overestimation of ISC3.

Key words : air pollution, CALPUFF, CALMET, WRF, land-sea breeze, thermal internal boundary layer

1.前言

台灣四周環海、人口稠密，因許多大型的空氣污染源，如電廠、工業區等都設置在臨海地區，圖 1 是台灣地區硫氧化物及氮氧化物合計量 500 噸/年以上的大型固定污染源的分佈，其中 1000 噸/年以上的排放源多在沿海地帶。由於海陸交界地區表面特性的巨大差異，造成沿海地區風場的複雜變化，包括海陸環流、內邊界層等特性均對海岸地區的污染擴散有顯著的影響。我國在空氣污染擴散模式的選擇上，長期以來都是以 ISC3 為主，這個模式的法制位階在美國已經為 AERMOD 所取代，但無論是 ISC3 或是 AERMOD 在本質上都是一種「直線式」的煙流模式，並且假設在整個模擬範圍內都是單一風向，這樣的假設在美國內部的大平原地形是適用的，但是在台灣的海岸地區則是不合適，氣流由海進入內陸後，由於地表阻力及熱通量的影響，風向會有顯著的改變，因此必須使用區域性的風場資料，並且搭配可以運用此種風場的空氣品質模式，才能正確地模擬出沿海地區的空气污染物傳輸特性，而 CALPUFF 是此類模式中最適合用於個別污染源之空氣品質模式，也是美國環保署的推薦模式 (Exponent, 2011)。雖然網格模式也可以模擬這種複雜的傳輸現象，但是網格解析度低，不適於近距離濃度場之解析。

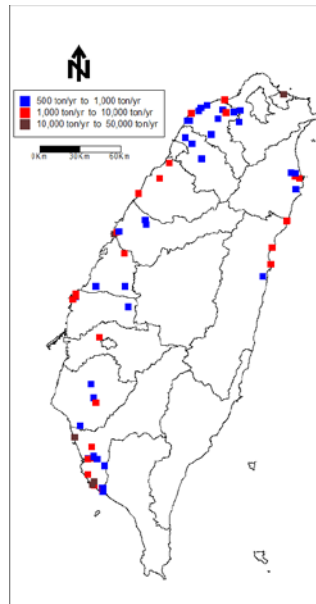


圖 1 台灣地區 SO_x+NO_x 排放量 500 噸/年以上之固定污染源分佈 (排放量資料來源: TEDS 8.1)

CALPUFF 所需的氣象場，經常以氣象觀測資料的客觀分析獲得，但是受限於海面上及高空的氣象資料不足，難以建全區域性三維風場的合理性 (李, 2008)，而網格模式通常更能在沿海及山區呈現較合理之風場變化 (環保署, 2012、2013)。目前大多數的 CALPUFF 應用都是以短期的案例模擬為主 (陳, 2007; 謝, 2010)，主要是受限於氣象資料，然而就法規應用的層面而言，例如空氣品質標準、容許增量限值等，必須有全年的模擬結果才能有法律上的效力。曠等 (2006) 曾經以 CALPUFF 進行 $\text{PM}_{2.5}$ 之全年模擬，然而氣象場是以觀測資料經 CALMET 處理而得。本研究是國內首次以 WRF 氣象模式加 CALPUFF 進行全年之擴散模擬，用以探討高雄市臨海工業區煙囪在該區之擴散及濃度增量。

2.氣象場之模擬

2.1 氣象模擬之方法

氣象場之原始資料來自觀測站或低解析度之網格模式，再以 CALMET 內插成高解析度之氣象場，作為 CALPUFF 擴散模擬之用，其流程如圖 2 所示。網格模式

可以提供大環境的複雜現象，此非有限的觀測資料可以解析出來。例如林等(2005、2007)即以模擬結果指出東北季風受中央山脈阻擋，在台灣西南沿海形成之弱風尾流帶為空氣污染的主因。賴信志教授在環保署模式中心計畫的研究也指出同樣的現象(環保署，2007、2009)。雖然如此，在很小的範圍內網格模式的結果常會偏離觀測值，對於污染源近距離內的擴散模擬有顯著的影響，此時須再以觀測值植入的方式改善局部的準確性。

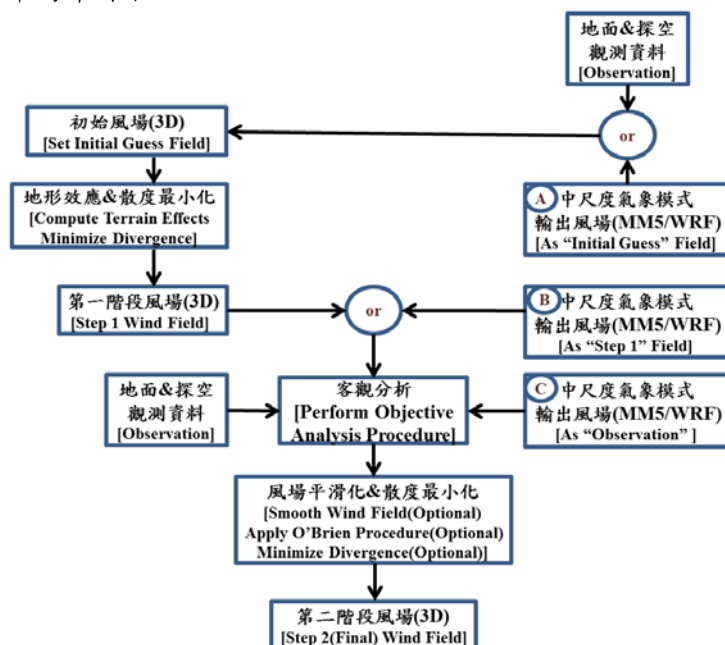


圖 2 CALMET 風場產生流程

2.1.1 網格模式之模擬方法

本研究所使用之氣象網格模式為WRF (Weather Research and Forecasting Model) 3.2.1 版，模擬時採用四層巢狀網格之設定，各層網格位置如圖 3 所示，此四層網格之水平網格解析度由外而內依序為 81、27、9 及 3 公里，各層之網格點數分別為 60×60 (南北×東西)、66×66、81×72 及 156×108，在垂直方向上由地面至 100 hPa設定為 24 層，模式所使用之初始及邊界條件則是來自於NCAR/NCEP 2.5°×2.5°再分析資料，資料時間間隔為 6 小時。模式模擬時間範圍始自 2011 年 1 月 1 日 00UTC，結束於 2011 年 12 月 31 日 23UTC。模擬時所使用之邊界層參數化為YSU scheme、地面模式(Land Surface Model)為Noah LSM，並開啟Urban Canopy Model，輻射參數化則採用RRTMG scheme。

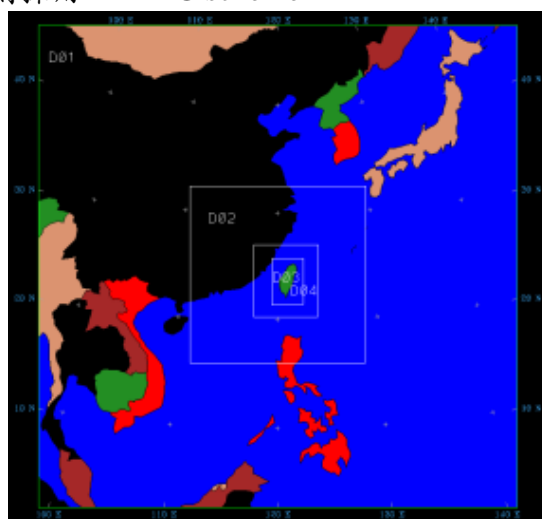


圖 3 本研究氣象網格模式之四層巢狀網格配置示意圖

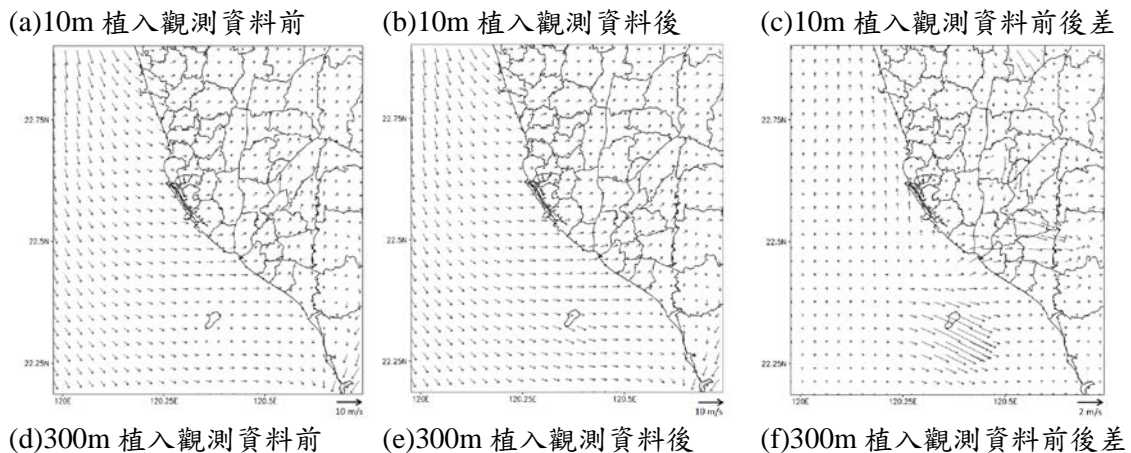
2.1.2 CALMET之模擬方法

CALMET 為 CALPUFF 的氣象前處理模組，產生風場的方法包含診斷模式及客觀分析，首先由 WRF 網格模式之輸出風場作為初始風場，後續進行地形效應修正及質量守恆處理得到第一階段風場，接著可選擇是否植入觀測資料進行客觀分析，最後進行風場平滑化及質量守恆處理得到第二階段風場。模式模擬時間為 2011 年全年，模擬範圍為高屏地區，座標 TWD97 E: 144-244 km; TWD97 N 2454-2534 km，面積 80 km×80 km，網格間距 1 km，垂直方向模擬範圍為地面至 4000 公尺高，各層依序為 20、60、100、200、400、800、1600、2400、3200、4000 m，共 10 層。地形與土地使用分類資料來自內政部國土測繪中心，客觀分析使用之氣象觀測資料包含陸上地面資料、探空資料、海上資料三類，陸上地面資料來自高雄氣象站與高屏地區空氣品質測站，探空資料來自屏東探空站，海上資料來自小琉球浮標站。

2.2 觀測資料之植入對於 CALMET 模擬結果之影響

在植入觀測資料後，本研究針對植入前後三維風場進行差異分析，以了解植入觀測資料對於 CALMET 模擬結果之影響。

圖 4 為利用 CALMET 模擬 2011 年 10 月 26 日 12:00，高屏地區沿海 10m、300m 及 1200m 水平風場，其中包括植入觀測資料前後以及兩者之差異。圖中顯示未植入觀測資料時，高屏地區沿海在 10m 及 300m 高度皆以海風為主(圖 4(a)及(d))，此現象發生於中午時段，與一般常見海風發生時間一致，故初步看來 CALMET 在未植入觀測資料時，仍可模擬出合理之風場。在植入觀測資料後，由 10m 及 300m 高度風場顯示(圖 4(b)及(e))，整體看來與未植入時並無顯著差異，但將植入前後風場相減後，顯示 10m 及 300m 高度層風場於測站所在位置附近皆有較大之風場差(圖 4(c)及(f))，可見植入觀測資料後，模式能夠解析海陸交界處較細微之風場變化。此外於 1200m 高度層可看到測站所在位置附近之風場差異已相當微小(圖 4(g)~(i))，但於探空觀測所在位置附近則仍有較大之風場差異，代表植入探空觀測資料後，可使模式高層探空位置附近之風場較接近實際情形。綜合以上結果顯示，植入觀測資料後，可使 CALMET 模擬結果較接近真實，並解析更細微之風場變化，後續本研究在進行 CALMET 模擬時，將採用植入觀測資料之方式執行。



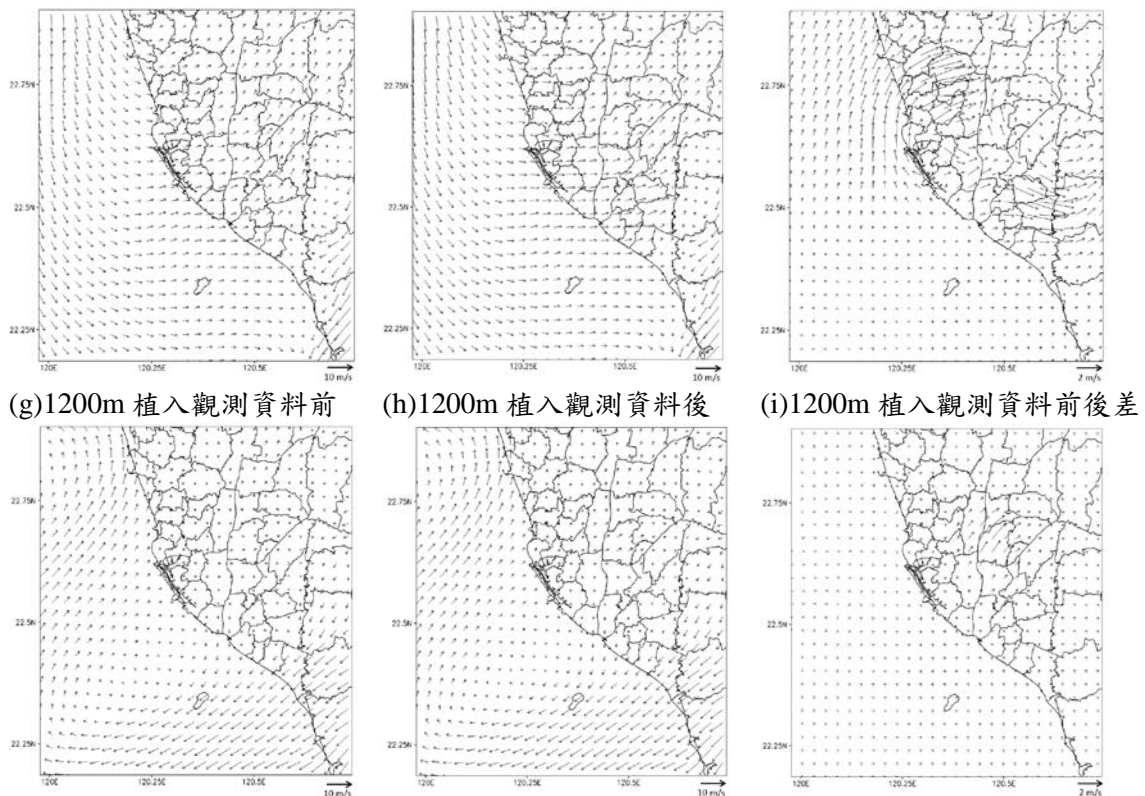


圖 4 CALMET 植入觀測資料前後風場圖及差異，2011 年 10 月 26 日 12:00

2.3 氣象模式所呈現之海岸風場複雜特性

圖 5 為 CALMET 模擬 2011 年 10 月 26 日 10m 水平風場隨時間之變化，圖中顯示當天高屏地區外海皆以北風為主，且由中央氣象局當天地面天氣圖可見(圖 6)，當時綜觀天氣主要受大陸高壓所主導，故綜觀風場以偏北風為主。

在 10 月 26 日 4:00 時，高雄市沿海應以陸風為主，且由當時高雄市沿海垂直風速剖面圖(圖 7(a))顯示，高雄市外海有上升氣流，陸地則有下沉氣流，但由圖 5(a)可見當時僅有微弱之陸風，此時陸風不明顯之原因推測應是當時綜觀風場以北風為主，而在 Lin et al. (2005; 2007)之研究中曾提到，高屏地區在東北季風時，屬於受背風尾流影響之區域。故北風到達高雄市沿海時可能已轉為西北風或西風，與當地陸風合成後將造成當時之微弱陸風。至於在 10 月 26 日 12:00 時(圖 5(b))，由於當時陸地溫度已逐漸升高，海陸溫度差異明顯，由圖 7(b)顯示陸地有上升運動，外海則有下沉運動，海風已逐漸增強，加上原有背風尾流之影響，造成高雄市沿海之海風現象較為明顯。在 10 月 26 日 20:00 時，陸地溫度已開始降低，高雄市外海垂直風速已開始逐漸由負轉正，陸地之垂直風速則開始由正轉負(圖 7(c))，再加上原有背風尾流影響，使當時 10m 水平風場仍有微弱海風(圖 5(c))。根據上述之 CALMET 模擬結果顯示，高雄市沿海之風場在綜觀風場以東北風為主時，因受背風尾流之影響，以及當地海陸風現象，使得該區域海岸風場較為複雜，而此現象亦與以往相關研究(Lin et al., 2005; 2007)一致。

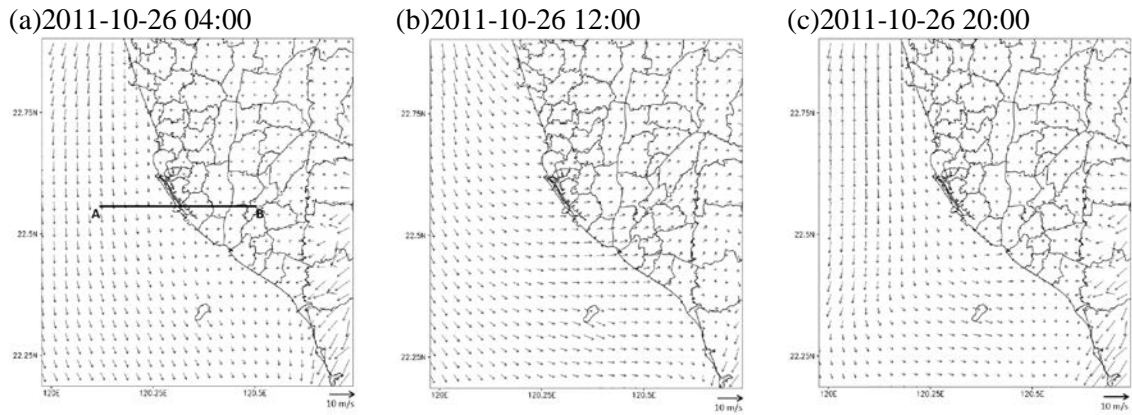


圖 5 CALMET模擬 10m風場

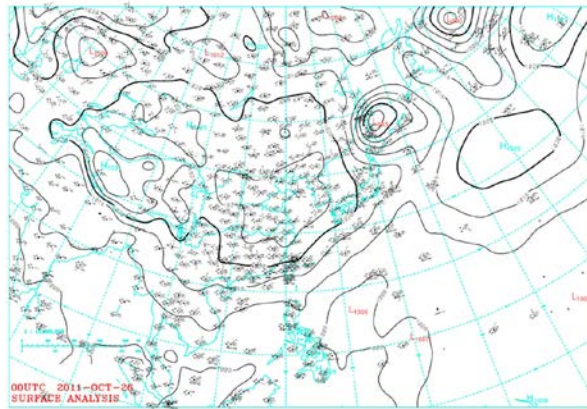


圖 6 中央氣象局 2011 年 10 月 26 日 00UTC地面天氣圖

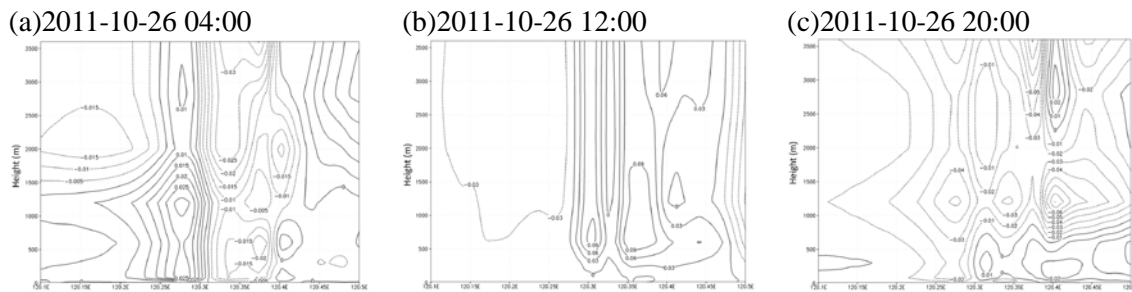


圖 7 CALMET模擬垂直風速(m/s)-圖 3(a) AB兩點連線處之垂直剖面

3. 污染物之擴散模擬

3.1 CALPUFF模擬之方法及程序

CALPUFF除了是非穩態的擴散模式，它的其中一個特別功能是對於海陸交界的內邊界層提供了模擬的選擇機制。所謂的內邊界層是指穩定的海洋氣流由水面進入陸地時，因海陸表面熱力性質的差異，底層空氣被地面加熱產生垂直紊流，此時上層空氣仍保持穩定狀態，形成一個隨內陸距離延伸而加厚的熱力內邊界層(TIBL)。有內邊界層的大氣環境下，當海岸地區污染物隨氣流向內陸傳輸，氣流接觸到內邊界層時，污染物進入內部受垂直紊流的影響，污染物會快速被帶至地面，造成局部地區的高濃度(Hanna et al. 1985)。雖然高雄沿海地區是否存在內邊界層及使其煙流產生燻煙效應，並無實際的觀測資料來證實，但是本研究將以此機制的啟動與否來測試模擬濃度增量的改變。本研究以 TEDS 8.1 版資料，選定高雄臨海工業區高、低煙囪點源 2 個案例，探討 CALPUFF 在有無開啟 TIBL 功能時污染物分布的差異，並以上述結果作為後續設定，探討海陸環流對污染物傳輸擴散的影

響，並與傳統 ISC3 的模擬結果做比較。模擬時間為 2011 年全年，污染物物種為 SO₂，排放源資料如表 1 所示。

表 1 點源基本資料

點源資料	X(km)	Y(km)	煙囪高度 (m)	地表高程 (m)	煙囪等效內徑 (m)	煙囪排氣速度 (m/s)	煙囪排氣溫度 (K)	SO ₂ 排放量 (ton/year)
高煙囪	181.8	2492.8	130	1.9	5.03	24.1	428.15	2906.26
低煙囪	183.0	2494.9	55	6.3	6.00	16.7	412.15	1257.41

3.2 啟動 TIBL 對濃度模擬分佈之差異分析

圖 8 為 2011 年 10 月 26 日上午 CALPUFF 內邊界層模組對高、低煙囪污染物模擬結果比較，圖中顯示在上午 7 時、11 時污染物擴散方向為沿岸往內陸擴散，高煙囪案例於上午 7 時未開啟模組時，在排放源東方約 5 公里處開始有著地濃度，開啟模組時，開始出現著地濃度的區域在排放源東方不到 1 公里處。到了 11 時，無論是否開啟模組，污染物的分布與濃度皆無明顯差異。低煙囪案例顯示上午 7 時無論是否開啟模組，開始出現著地濃度的區域皆在排放源東方不到 1 公里處，但開啟模組時有較高的著地濃度。到了 11 時，無論是否開啟模組，污染物的分布與濃度皆無明顯差異。綜合上述結果顯示，模擬之兩案例在 10 月 26 日上午 7 時大氣環境符合內邊界層的發展條件，開啟模組將提升污染物的著地濃度，且對高煙囪而言，開始出現著地濃度的距離從 5 公里縮短至 1 公里，到了 11 時，內邊界層的效應消失，無論是否開啟模組，對於污染物的分布與濃度皆無明顯差異。因此，CALPUFF 對於氣團在內邊界層效應下的模擬具有相當的合理性，後續 CALPUFF 模擬的案例皆在開啟內邊界層模組下進行。

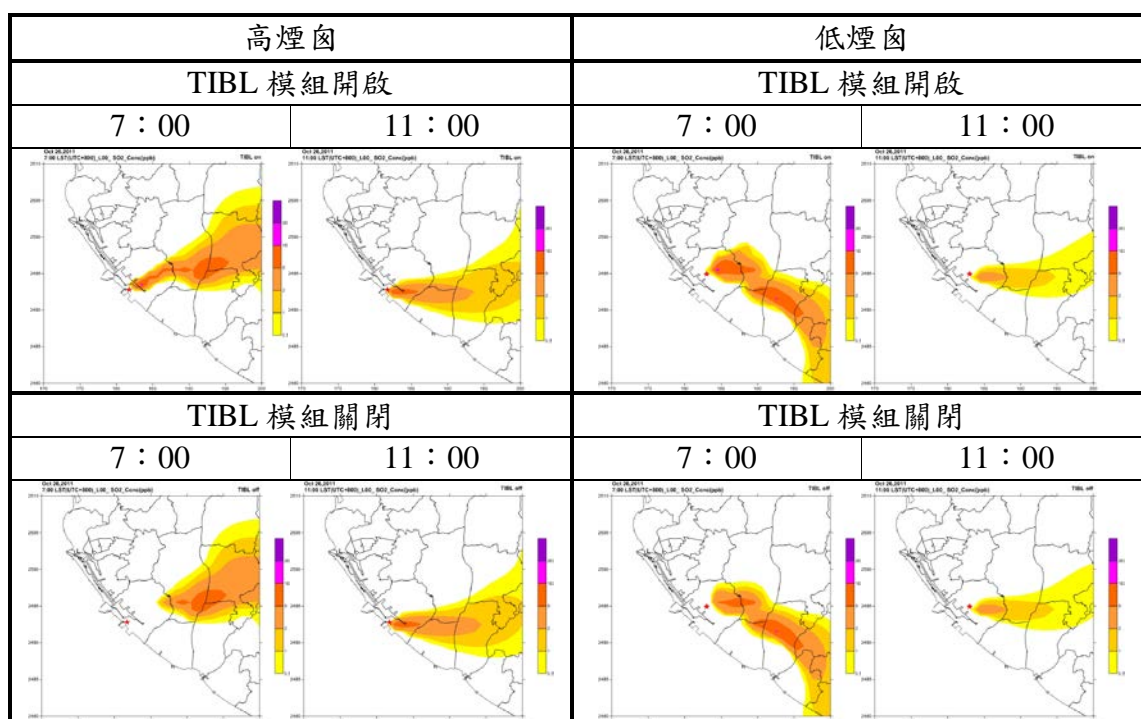


圖 8 CALPUFF 內邊界層模組對污染物擴散之影響-2011 年 10 月 26 日 07、11 時

3.3 海陸風案例日濃度場之演變分析

3.3.1 不同時段之SO₂地面煙流

由於模擬區域位於台灣西南沿海地區，海陸風的每日循環相當明顯，尤其是東北季風時期，台灣西南沿海地區由於中央山脈阻隔，位於東北季風的下風尾流區，盛行的東北風反而不明顯，所以海陸風的現象相對就比較明顯，大致上白天的時段會吹海風，夜間的時候吹陸風，因此SO₂煙流在每天不同時段其分佈位置也不同，此處我們以2011年2月21日的模擬結果來展示海陸風對污染物煙流分布與位置的影響，如圖9所示，圖中每條等值線皆為地面層0.5 ppb SO₂濃度的等值線，不同線條分別代表不同時間，由0時至21時每隔3小時繪製一條，等值線上的數字標示即為此等值線於此日的時序，如00代表凌晨零時，15則代表15時，也就是下午3時，由圖中可以看出早晨九點以前，陸風非常明顯，在本案例中呈現的是北風，因此SO₂煙流多向南往海上擴散；9點以後就開始海風開始主導，但是風向並非與陸風完全相反直接朝向內陸，呈現的反而是有點沿著海岸線的西北風，但隨著時間推移，朝向內陸的向量的比重就增加，例如15時的煙流就比12時與9時的煙流更彎向內陸，不過18時太陽下山後，陸風又開始主導，風向開始偏北，一直到第二天早晨以前，風向皆偏北。

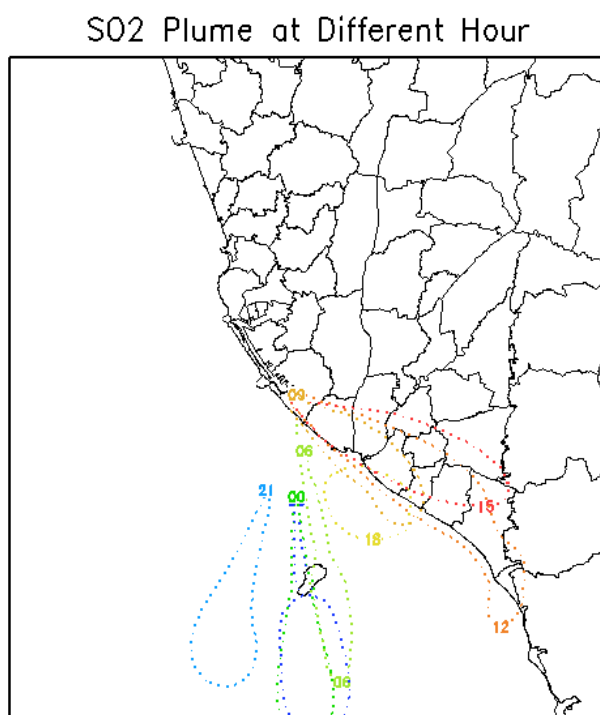


圖9 每日不同時段SO₂地面煙流分布狀況（圖中等值線上的數字標示為每日時序）

3.3.2 地面層污染物迴流量

由於海陸風的關係，本研究所模擬污染源排放在夜間陸風盛行的時候，會傾向於將污染物（SO₂）向海面輸送，然而白天時，這些原本擴散到外海的污染物，有可能在日間海風盛行時，再度被吹回陸地，本研究將計算這些可能的污染物迴流量。計算方法是將海岸線視為不同線段的連接，每條線段皆可分別計算垂直通過此線段的污染物通量，將這些通量對通過面積積分即可得污染物通過海岸線的質量，我們定義朝向台灣陸地的流量為污染物的迴流量，離開台灣陸地的流量為外輸量，兩者相減若為正值即為污染物的淨流入量，負值則為淨流出量，由於模式的輸出限制，本研究僅能計算地面層的污染物通量，所以以下的計算結果皆為模擬區域內地面層的統計結果。

圖 10 是SO₂於模擬區域內每月的淨流入或淨流出量日變化月平均圖，當中每條線代表不同月份的平均結果，橫坐標代表的是一日的0到23時，我們將某月每日同一小時的通過海岸線的淨污染物流入量平均後做成如圖之日變化圖，由圖中可以看出大體上早晨至下午傍晚間有較高的污染物淨流入量，之後到隔天早晨之前會有較多的淨流出量，這樣的統計結果與前面分析海陸風的時段相符合，也因此印證吹海風的時候，污染物會傾向於流入台灣。由圖中亦可看出除了日出時間愈晚的月份（1月與12月），愈傾向於下午會有較大的污染物淨流入量，2月與11月則次之，約在9時以後開始有明顯的污染物淨流入量，其他的月份則多在早上8點以前開始會有的污染物淨流入。

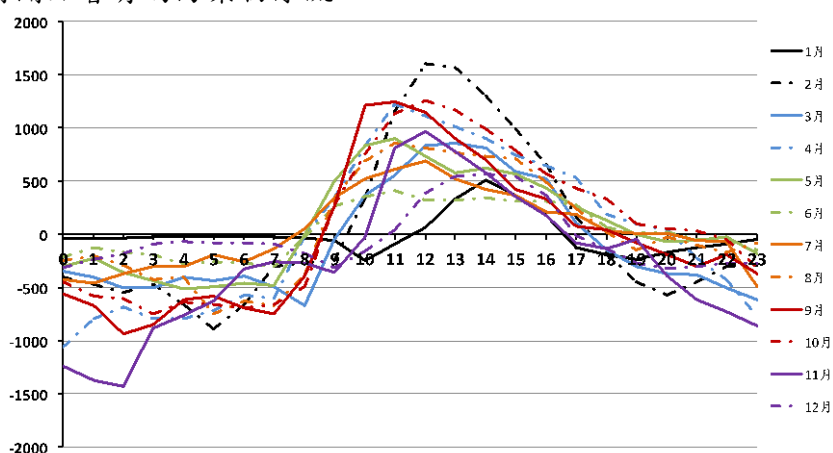


圖 10 模擬區域內地層每月SO₂淨流入或流出量日變化的月平均 (ug/sec)

圖 11 為各月份SO₂淨流入量（正值）或流出量（負值），整體來看，5、6、7、8、10 幾個月份會有較多的污染物淨流入量，其中5月與10月的淨流入量最大，由於這兩個月份也是冬夏東北與西南季風交接的時期，污染物可能會滯留在台灣附近，並隨著海陸風迴流至台灣。此外，環保署的一般空品監測資料也顯示出這兩個月份也是台灣一般污染較為嚴重的月份，顯示污染物的迴流也許是因素之一。

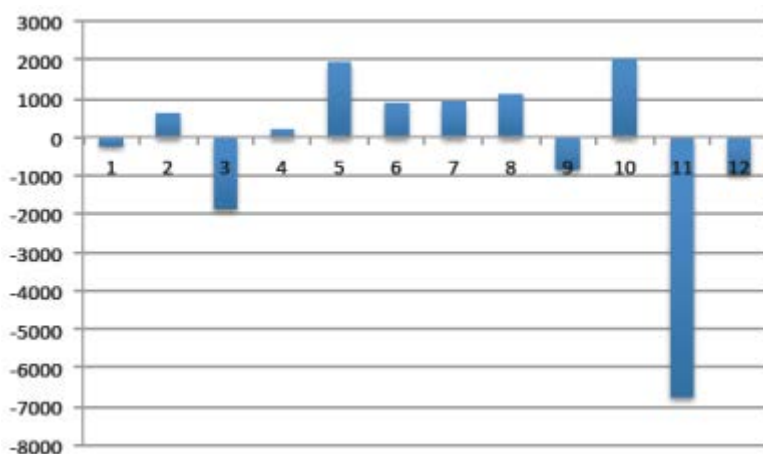


圖 11 各月份SO₂淨流入或流出量 (ug/sec)

3.4 長期模擬結果之統計分析

3.4.1 海陸風現象與日夜間污染物分布關係

由於海陸風現象與季節盛行風場及太陽輻射的強弱有關，故以4季為區分，並挑選濃度分布特徵較有代表性的月份，包括1月(冬)、4月(春)、7月(夏)、10(秋)，並以夜間(21:00-08:00)，日間(9:00-20:00)之分類，計算SO₂平均濃度，另外以高雄

氣象站的風花圖來表示這個月高屏地區日夜間大致的風向變化，來探討高屏地區有無海陸風現象時的濃度分布。由於計算結果為長時間之平均值，高、低煙囪案例之濃度分布無明顯差異，故僅以高煙囪案例說明。圖12為高煙囪案例模擬結果，圖中顯示1月日夜間的風向大多為北風，7月日夜間風向大多為南風、西南風，無明顯海陸風的轉換，1月污染物的分布從沿海往南向高屏外海傳輸，7月污染物的分布從沿海往北、東北向高屏內陸傳輸。4月、10月夜間風向大致上為陸地吹向海洋的北風，日間的風向大致上為海洋吹向陸地的西風到西北風，有明顯的海陸風轉換。濃度圖顯示日間吹海風時，污染物由沿岸往東傳輸。到了夜間吹陸風時，除了內陸有濃度值外，污染物受北風影響被帶至高屏外海一帶。過去研究指出高雄地區夜間排放之空氣污染物在夜間因東北陸風作用，煙流可傳輸到高雄外海；午後因西南海風吹起，可將煙流再帶回內陸地區，造成污染物之累積(楊，2010)。與同樣為北風之1月夜間濃度相比，海陸風盛行月份夜間的濃度分布因日夜間風向轉換，呈現大範圍之扇形狀，1月夜間濃度則因日夜間皆為單一風向，呈現狹長形狀，表示海陸風盛行月份污染物可能有迴流、累積的現象。

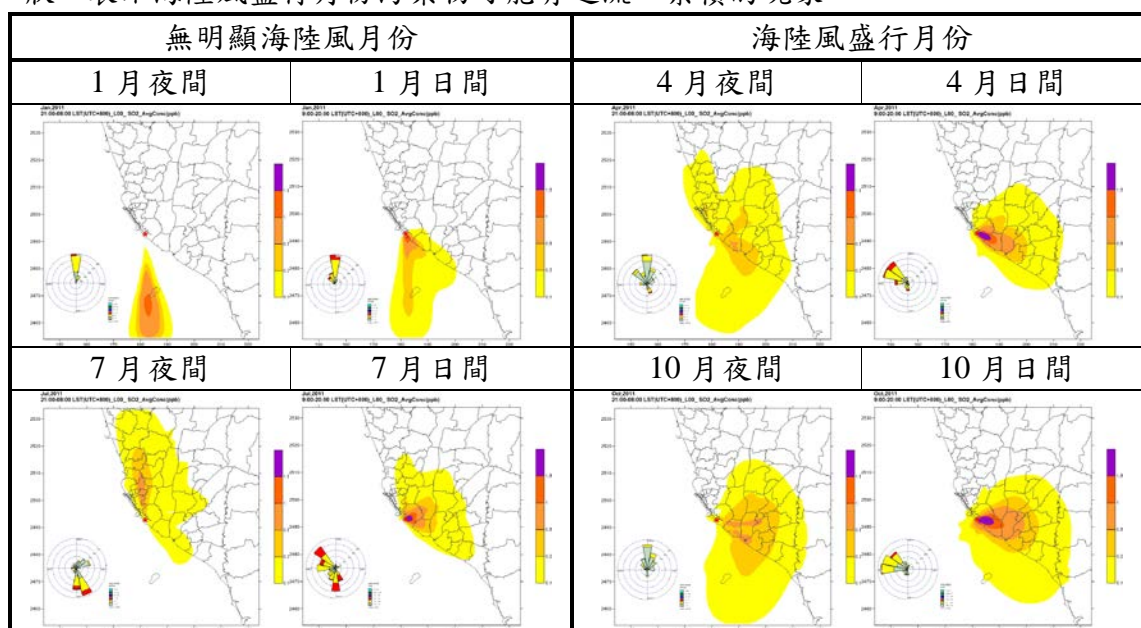


圖 12 高煙囪各月日夜間SO₂平均濃度(1月、4月、7月、10月)

3.4.2 CALPUFF與ISC3 之比較

表 2 為 CALPUFF、ISC3 模擬結果之比較，為了與 ISC3 之 200m 解析度模擬結果做比較，故另外進行 CALPUFF 200 m 解析度之全年模擬，模擬時採雙層巢狀網格，外層範圍與解析度與 CALMET 相同，內層範圍座標 TWD97 E: 169-199 km；TWD97 N 2479-2509 km，面積 30 km×30 km，網格間距 200 m，ISC3 設定之網格解析度為 200 m，範圍為 30 km×30 km，表中顯示 ISC3 模擬高煙囪與低煙囪的最大小時濃度、最大日平均濃度皆高於 CALPUFF 的模擬結果。CALPUFF 的模擬濃度與 ISC3 之比例約在 0.82-0.83 之間，由於 ISC3 一般被認為是一個較為高估的模式，且 ISC3 之假設條件不適用於海岸地區，因此對排放源之模擬評估而言，無論是環評或許可申請，CALPUFF 是一個可考慮的選擇。

表 2 CALPUFF 與 ISC3 之比較(SO₂)

模式	最大小時		最大日平均		年平均	
	高煙囪	低煙囪	高煙囪	低煙囪	高煙囪	低煙囪
CALPUFF	49.4	53.6	6.2	6.9	1.6	1.2
ISC3	60.0	64.2	11.1	16.7	1.3	1.7
CALPUFF/ISC3	0.82	0.83	0.56	0.41	1.23	0.71

(單位：ppb)

4. 結論

- (1) 高屏地區海岸風場在東北季風時，因同時受背風尾流及當地海陸風現象影響，使該區域在夜間呈現微弱陸風，日間則有明顯海風。此現象可藉由本研究所使用之CALMET模式植入觀測資料之模擬方式合理呈現。
- (2) 當CALPUFF計算內邊界層效應時，會提高排放源下風處之著地濃度，高煙囪的最大著地濃度位置將會顯著地靠近排放源。
- (3) 本研究的模擬區域位於台灣西南沿海地區，於東北季風時期，台灣西南沿海地區位於東北季風的下風區，由於中央山脈的阻隔，西南沿海位處尾流區，盛行的東北風不明顯，使得海陸風的現象相對明顯，大致上白天會吹海風，晚上是吹陸風，比較特別的是太陽下山後，幾乎是立即由海風轉為陸風，但是早晨由陸風轉為海風的時間會落後於日出時間，這可能是因為陸地在日落後冷卻相當快，但是日出時要加熱陸地則需要較強的太陽輻射，所以必須等到太陽高升時，才會明顯加熱陸地。
- (4) 污染物的迴流量基本上與海風有正向的關係，淨流入量最大的時期發生在冬夏季風交接的月份，其他季節淨流入或流出量比較不定。總的來說，本模擬案例污染物的年淨流入量為負，也就是污染物全年來看是淨流出的，但是個別月份的淨流入也許會有局部惡化的影響。
- (5) 4月(春)、10月(秋)日夜間有明顯的海陸風轉換，濃度分布的範圍從高屏內陸至外海小琉球一帶，污染物有迴流、累積的可能。
- (6) 以本研究測試的排放源而言，ISC3 模擬之最大小時濃度、最大日平均濃度皆高於 CALPUFF 之模擬結果，此結果與一般認為 ISC3 高估的看法一致。

參考文獻

- [1] Exponent, CALPUFF Modeling System Version 6, User Instructions, 2011
- [2] 環保署, 空氣品質模式技術支援與空氣品質維護評估計畫 (第二年), 2012
- [3] 環保署, 空氣品質模式技術支援與空氣品質維護評估計畫 (第三年), 2013
- [4] 李岳謙, 近地風場分析方法對氣團軌跡計算結果之影響—CALMET 方法、變分分析方法以及 MM5 輸出方法比對, 碩士論文, 2008
- [5] 謝怡君, 應用 CALPUFF 模式模擬砷空氣污染物在新竹科學園區的分佈及趨勢, 碩士論文, 2010
- [6] 陳韋名, 應用 CALPUFF 模式於複雜地形與建築物效應之研究, 碩士論文, 2007
- [7] 曠永銓、周武雄、習良孝, CALPUFF 模式在臺灣地區的模擬驗證與應用, 中興工程季刊, 第九十四期, pp. 85-96, 2007
- [8] 環保署, 空氣品質模式模擬增量管制策略效益檢討及未來新增污染物對空氣品

質長期衝擊評估計畫，2007

- [9] 環保署，空氣品質模式技術及對策支援計畫，2009
- [10] Lin, C.-Y., S.C. Liu, C.C.-K. Chou, S.-J. Huang, C.-M. Liu, C.-H. Kuo, and C.-Y. Young, “Long-Range Transport of Aerosols and Their Impact on the Air Quality of Taiwan,” *Atmospheric Environment*, 39, pp.6066-6076 (2005).
- [11] Lin, C.-Y., Z. Wang, C.C.-K. Chou, C.-C. Chang, and S.C. Liu, “A Numerical Study of an Autumn High Ozone Episode over Southwestern Taiwan,” *Atmospheric Environment*, 41, pp.3684-3701 (2007).
- [12] Hanna, S. R., L. L. Schulman, R. J. Paine, J. E. Pleim, and M. Bear, “Development and Evaluation of the Offshore and Coastal Dispersion Model,” *JAPCA*, vol. 35, no. 10, pp. 1039-1047, Oct 1985.
- [13] 楊亦德，應用 CALMET/CALPUFF 模式解析南部地區氣流場及煙流傳輸特性之研究，碩士論文，2010