臺灣北部放射性污染物擴散之數值模擬：冬季個案研究

Numerical Simulation of Radioactive Pollutant Dispersion over Northern Taiwan: A Winter Case Study

黃 清 勇
Ching-Yuang Huang

國立中央大學大氣物理研究所
National Central University, Institute of Atmospheric Physics

摘 要

本文探討盛行東北季風以及台灣北部複雜地形條件下近地污染面源的擴散過程。文中使用一中尺度數值模式來作數值模擬。此模式包含邊界層高階參數化、雲物理以及污染物濃度預報方程。模式模擬結果顯示，若污染源爲大屯山脈迎風面核一、二廠走之面源，中尺度局部地形環流的平流及擴散過程不可避免地將輻射性污染物帶入大台北盆地。核一廠的污染物可經由淡水河谷及基隆河谷，而核二廠污染物主要是由基隆河谷，進入了大台北盆地。在强盛行風下，兩廠之污染物均越過林口台地並於三、四小時內影響桃園及新竹地區，平均地面濃度值則降爲約原污染源濃度的十分之一。若考慮白日地面加溫作用，則因大氣邊界層迅速發展，盆地濃度可再被稀釋成百分之一。但在弱風且近地熱力穩定情況下，大台北盆地的最大濃度值可爲污染源濃度一半以上。在東北季風情況下，核四廠對宜蘭地區則有較大的影響。本文個案模擬結果顯示，福祿數(Froude number)不失爲了解北台灣山嶽氣流特徵(過山、繞山及偏射)之有用參數，水平平流作用亦大致決定污染物移動與幾何分佈情況，然而近地大氣亂流的垂直擴散作用實爲決定地面濃度大小更重要的因子。

關鍵詞：中尺度數值模式，污染物，大氣亂流

ABSTRACT

This study investigated diffusion processes of near-surface area pollutant sources over complex terrain of northern Taiwan under prevailing northeast monsoon. Numerical simulations were performed by a mesoscale numerical model which includes a high-order closure scheme of planetary boundary layer parameterization, cloud microphysics and the prognostic equation for pollutant concentration. Model simulation results showed that for area sources over the upstream side of Da-Tun Mountain Range, radioactive pollutants were inevitably taken into the metropolitan Taipei Basin thru advection and diffusion processes of local topographically-induced mesoscale circulations. Pollutants from Station 1 of nuclear energy plants can be brought into Taipei Basin thru Tan-Shui River and Kee-Long River, while pollutants from Station 2 entered mainly thru Kee-Long River. For stronger prevailing winds, pollutants from both stations can be flowed over Lin-Kou Table land and contaminate Tao-Yuan and Hsin-Chu by 3-4 hours with the ground-level pollutant concentration about one-tenth of the original source concentration. With the diurnal surface heating included, the concentration can be further reduced to about one-hundredth. The maximum concentration over Taipei Basin could retain more than one-half of the source intensity for weaker winds under stable conditions. For the prevailing northeast monsoon, I-Lan area was more affected by Station 4. The winter case results indicated that Froude number appears to be an effective parmeter for an understanding of the mountain flow behaviors (passing over, surrounding or deflecting) in northern Taiwan. Horizontal advection processes mostly controlled the pathways and geometric distributions of the pollutants, while vertical diffusion processes of the atmospheric turbulence near the surface was a more dominant factor for the determination of concentration magnitude.

Key words: Mesoscale numerical model, pollutants, atmospheric turbulence

前　　言

自從蘇聯車諾堡核能電廠爐心溶毀以致大量輻射性污染物外洩之意外事件發生後，吾人對核污染的憂患意識乃大爲提高。目前台灣已有三座運轉中的核能電廠(核四廠的興建正在進行中)，其中核一、二廠位於人口高達六百多萬的大台北都會區。由於此區地域狹小，地形複雜，加以人口非常稠密，對於任何可能外洩的輻射污染物擴散之預先研究與了解乃至爲重要。

台灣上部地區冬季盛行東北季風，局部地形對此盛行氣流具有顯著的修正作用。蔡

(1987)曾對台灣北部地區局部環流作過觀測與分析。文中指出，由於局部地形的阻擋作用及渠道作用，盛行風可沿基隆河谷(大屯山脈與雪山山脈之間)或淡水河谷(大屯山脈與觀音山巒之間)吹入台北盆地，或直接翻越大屯山脈至盆地南側與上述繞山氣流會合，並與雪山山脈北側的下坡風形成合流而轉往林口、桃園一帶。

由於空氣污染物的移動與分佈爲平流及擴散作用所控制，局部地形引發的中尺度環流與大氣邊界層亂流乃爲吾人所必須確實掌握與了解。利用中尺度數值模式來模擬台灣北部複雜地形下污染物擴散過程及不失爲一有效的研究方法(Segal *et al.* 1982; Huang 1993)。本文將以數值方法來探討北部核能電廠外洩的輻射污染物之擴散過程；文中第二節介紹中尺度模式內容及其數值方法，第三節描述研究個案及討論其數值模擬結果，最後一節則對個案的模擬結果作個結論。

數值模式及方法

本文所使用的數值模式爲Huang (1993) 的中尺度數值模式，此模式包括雲雨水及污染物濃度的預報方程式。模式中使用了靜力、非彈性及boussinesq流體假設。另外，爲了模擬複雜地形氣流，模式垂直座標採取追隨地勢坐標。對於次網格亂流作用，在表面層使用 Businger *et al.* (1971) 的似理論 (similarity theory)，表面層以上則利用亂流動能 (turbulence kinetic energy) 的預報方程式。在 z 坐標的亂流動能的預報方程式可寫爲

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\vec{V}\cdot\vec{\nabla}E + [-\overline{u'w'}\frac{\partial u}{\partial z} - \overline{v'w'}\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g}{\theta_o}\overline{w'\theta_v'}] - \frac{\overline{\partial w'(E' + p'/\rho_o)}}{\partial z} - \varepsilon \qquad (1)$$

上述方程式中，亂流動能消耗率(ε)亦可採用預報方程式

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\vec{V}\cdot\vec{\nabla}\varepsilon + c_3\frac{\varepsilon}{E}[-\overline{u'w'}\frac{\partial u}{\partial z} - \overline{v'w'}\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g}{\theta_o}\overline{w'\theta_v'}] - c_4\frac{\varepsilon^2}{E} + c_5\frac{\partial}{\partial z}(K_M\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}) \qquad (2)$$

其中c_3，c_4，及c_5爲常數。在(1)式及(2)式中，primed 變數爲次網格值，其物理意義爲氣象學上例用定義。由已知的亂流動能，我們使用 Mellor and Yamada (1982)的 level 2.5 方法來參數化K_M以及K_Θ。文中K_M用於動量場變數，K_Θ用於熱力變數及濃度變數。另外，本文亦考慮陸面溫度的日變化，並由地面能量收支平衡方程式來決定，模式預報方程式中水平平流項之計算是採用四階的Crowley 平流式(見Huang and Raman 1991)，而垂直方向則用其二階的格式。本文假設地面污染濃度爲全反射之邊界條件。所有預報方程式中的垂直擴散項皆以非條件性穩定的隱式法(time-implicit scheme)計算 (Huang and Raman 1989)。

模擬個案與結果

本文個案模擬範圍爲800 km × 800 km，採單一水平網格間距爲△x＝△y＝10km，而垂直方向則使用非等間距網格。本文一共模擬四個個案 (NE1-4)，分別針對三個核能電廠(核一、核二及核四)位置上的面源予以探討。在核廠周圍，我們設定外洩的輻射性污染物的初始濃度值爲100單位(作爲參考值)，且此污染源的體積爲10公里×10公里×50公尺(爲最高的模擬解析度)。本文假設此污染物爲一般空氣污染物，具中性浮力，亦即其路徑完全由大氣運動所控制。除個案NE4加入水汽及日變化的條件外，其他個案皆將地面溫度(海面及陸面) 固定爲20℃且假設爲乾大氣。個案NE4亦假設初始相對比濕從地面至10km皆爲50％，在其積分過程中，海面溫度固定爲20℃，陸面溫度則由表面能量收支平衡方程式決定之。

對所有個案而言，約在積分 3小時之後盛行氣流場已大致受局部地形作用所調整，因此個案NE1-3在第 3小時釋放污染物(但個案NE4在第 4小時，即0800 LST)。此污染物爲瞬間釋放的陣煙(puff)，其濃度爲定值。亦即在釋放的初始時間，小尺度的擴散作用已迅速將設定的面源均勻地混合，此一過程無法爲中尺度模式所描述。另外，個案NE4中亦採用拉格朗日法(Lagrangian method)來了解單點污染粒的運動路徑。

(一)個案NE1、NE2及NE3

個案NE1具有較大的盛行東北風(地面地轉風速爲Ug＝Vg＝-5 m/s)及熱力穩定參數($N=(\frac{g}{\theta_0}\frac{\partial\theta}{\partial z})^{1/2}$～0.01)。以大屯山高(h～800公尺)而言，其迎風面氣流的理想Fr值約爲0.88($Fr=\frac{U}{Nh}$)可視爲上游風場之動能與其可用位能的比值)。但由於邊界層的黏滯作用，實際上此值應受修正而較小。Smolarkiewicz and Rotunno (1989)發現，Fr＝0.66時，氣流具有明顯的爬山的分量，且在背風區沒有背風渦旋(lee vortex)產生。圖1爲個案NE1在第4小時以後污染物的擴散情形。可以看出污染源中有一部份已爬越大屯山脈，另外部份則沿基隆河谷及淡水河谷進入台北盆地。值得注意的是在大屯山脈的背風區有一停滯點，這和許多實驗與數值模擬的結果相同(Hunt and Snyder 1980; Smolarkiewicz *et al.* 1988; Smolarkiewicz and Rotunno 1989)。因爲此停滯點的存在，使得台北盆地內的污染物不易迅速擴散至外面。Smolarkiewicz and Rotunno (1989)亦發現，僅在Fr值小於0.5時，通過三維鐘狀山的黏滯性成層氣流於山前迎風區及山後背風區方出現停滯點。由於本文個案具有邊界層摩擦作用，加以局部地形頗爲複雜，個案結果並無法予與對照比較。待至第 8小時，部份污染物仍然留滯在大台北盆地，部份則向西爬越觀音山巒與其他繞流性污染物匯合。由於外圍偏射激流與雪山山脈向西之下坡氣流的合流作用造成風速於桃園及新竹平地大爲增強，越過林口台地的污染物得以迅速往西南輻散，其擴散面積之前緣此時已沿伸至新竹以南。

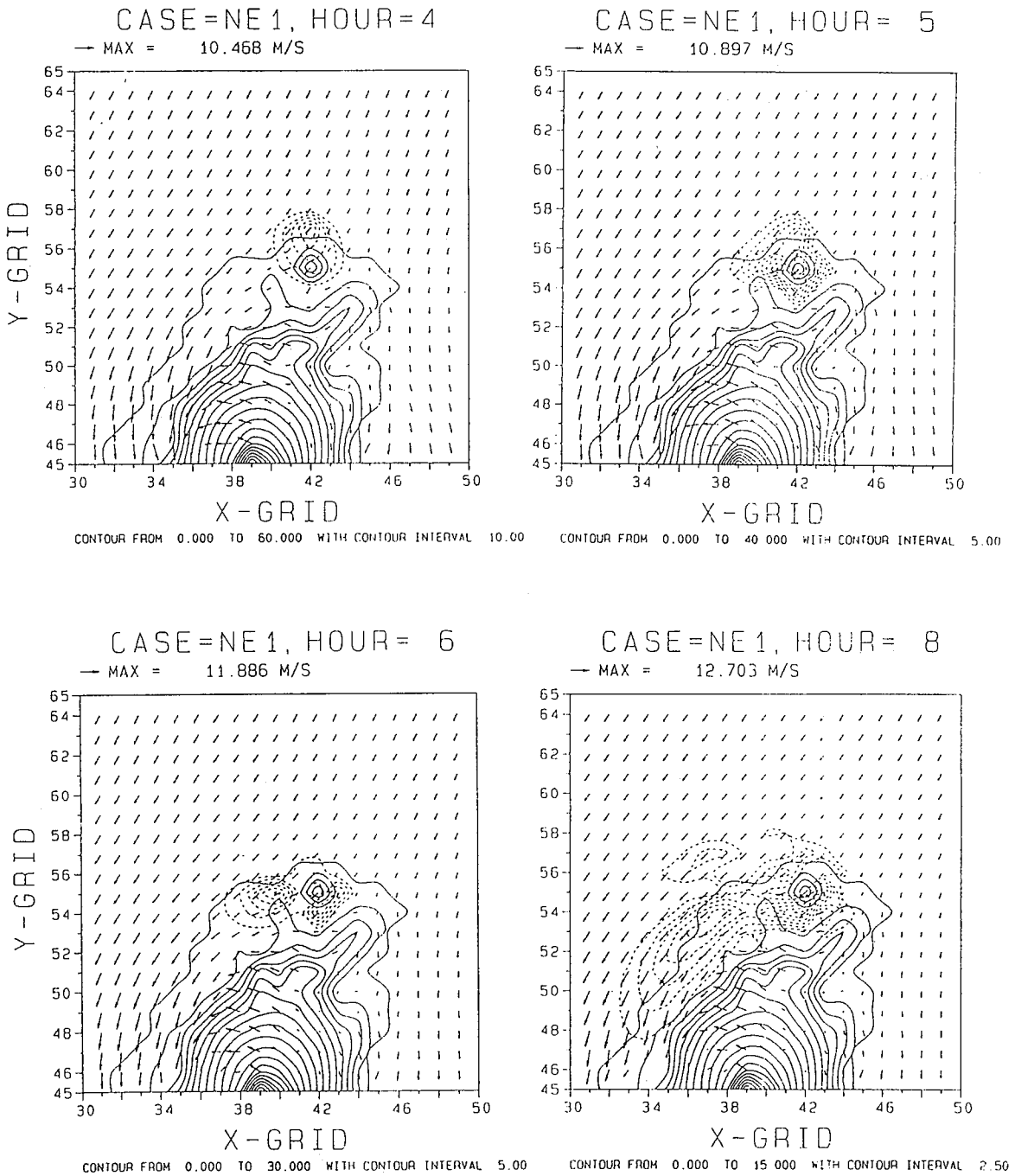


Figure 1. Numerical results for Case NE1 ($U_g = V_g = -5$m/s, N$\sim$0.01). The area pollutant source is from Station 1 of nuclear energy plants.

個案NE2與NE1的差異在於NE2的盛行風速及穩定度N值皆爲NE1的一半(但兩個個案Fr值則爲相同)。圖2爲個案NE2在第4小時以後的模擬結果。與圖1比較，吾人可以發現在NE2中污染物受山脈阻擋的效應較NE1明顯很多，因此污染物緩慢地往下游移動。部份污染物直接越過大屯山脈或繞過並由基隆河谷進入台北盆地，此和NE1結果有相當的一致性。在第8小時，初始污染源已分成三個主要濃度中心，一爲仍停留在大屯山脈迎風面海岸(但濃度已稀釋很多)，一在淡水河口，另一在盆地北側。到了第10小時，停滯在台北盆地內的污染物，部份向西流過觀音山巒外，大部份仍停留在原地。個案NE2結果除顯示污染物因較小風速而移動緩慢外，其較小變形的濃度分佈形狀亦意涵其擴散過程較不受山嶽存在的影響，此與其較小的N值相符合，氣流的特性亦較接近勢流(potential flow)。

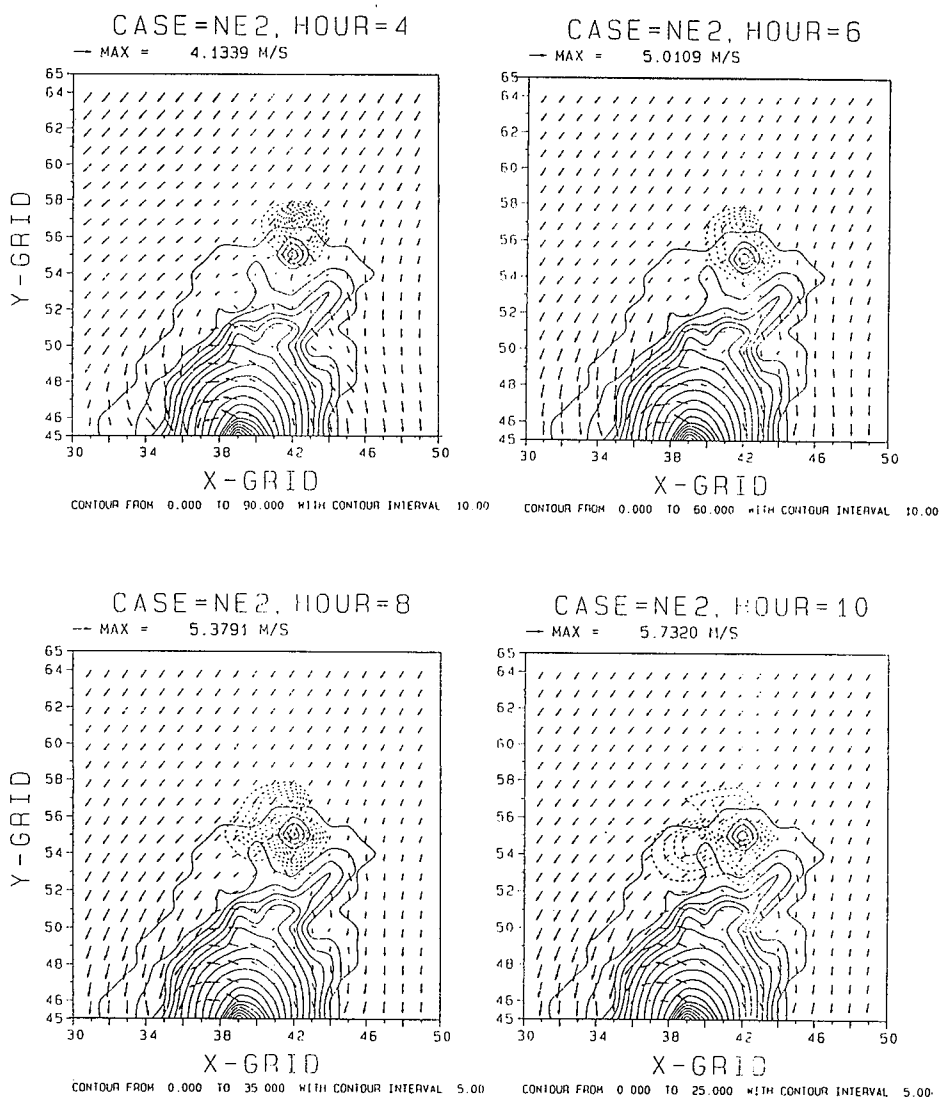


Figure 2. Numerical results for Case NE2 ($U_g = V_g$ = -2.5m/s, N ~ 0.005). The area pollutant source is from Station 1 of nuclear energy plants.

個案NE3與NE1有相同的N值，但風速爲後者的一半。其在第4小時(圖3a)人污染物擴散的情形與NE2相似，但受大屯山脈的阻擋作用之影響更爲明顯。個案NE3因垂直穩定度較大，故污染物爬山的分量較NE2小。污染物除在山前有顯著堆積外，部份主要沿基隆河谷進入台北盆地。由理想個案之數值模擬(Smolarkiewicz and Rotunno 1989)及實驗室結果可知(Hunt *et al.* 1980)，在成層穩定的大氣中，Fr值較小的氣流傾向於作水平運動，亦即有利山前繞流現象之發生。等到第6小時，污染物類似NE1形成兩個濃度中心，一在大屯山脈的迎風面，一則受雪山山脈的阻擋停留在基隆河谷。值得注意的是在大屯山脈迎風面的濃度最大值超過90單位。在第8小時，基隆河谷的污染物已因擴散作用而延伸至台北盆地。到第10小時，大台北盆地仍充斥原有污染物，而迎風面之部份污染物已南移並擴散至桃園、新竹地區。此時台北盆地最大濃度值大於45單位，亦即約原污染源濃度的一半。此個案結果已明示，在風速較小且熱力穩定度較大情況下，地面污染物除不易作水平傳送及垂直擴散外，亦較易受局部地形環流(如雪山山脈西北側之下坡氣流)之影響。此由台北盆地污染物之長久滯留現象可以得到佐証。

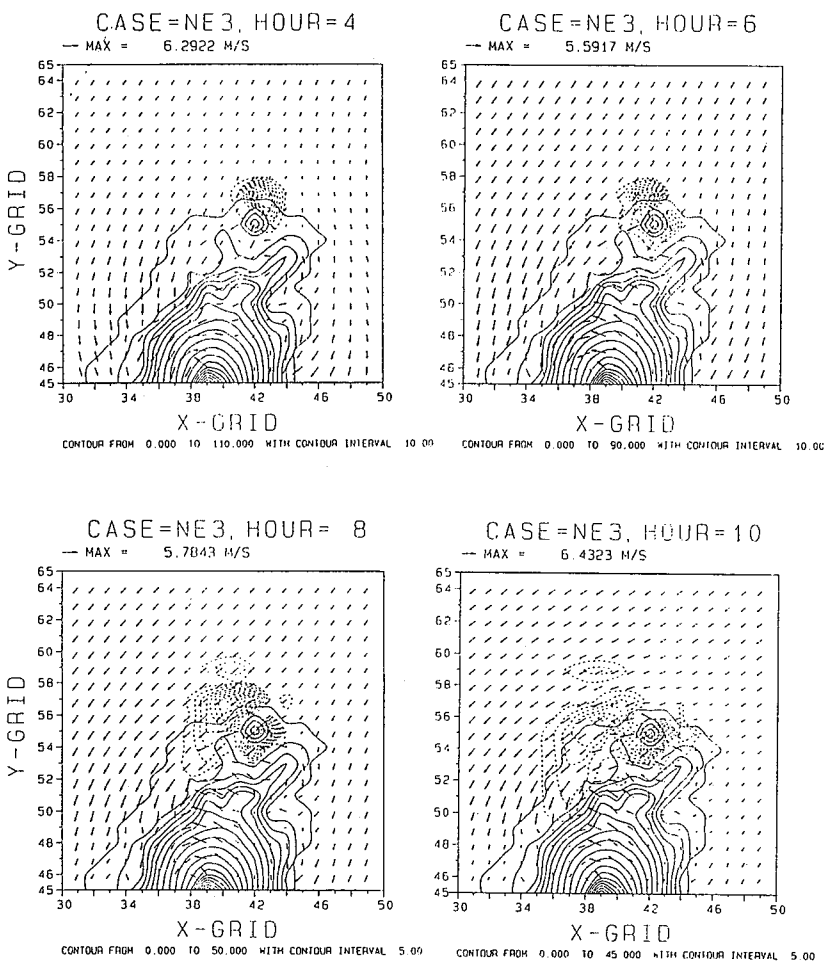


Figure 3. Numerical results for Case NE3 ($U_g = V_g$ =-2.5m/s, N～0.01). The area pollutant source is from Station 1 of nuclear energy plants.

在此我們亦討論在本同的個案NE1條件之下，核二廠的污染面源其擴散散的情形。圖4爲NE1在第4小時以後污染物的分佈。再次强調個案NE1具有較大的盛行風速。因此個案Fr值較大，部份污染物可以越過大屯山脈，但仍以繞行大屯山脈東側的分量最爲明顯可見。此個案結果顯示，在一般東北季風下，核二廠污染物乃主要經由基隆河谷流進入大台北盆地，然後才向西南傳送及擴散至下游的桃園、新竹一帶。

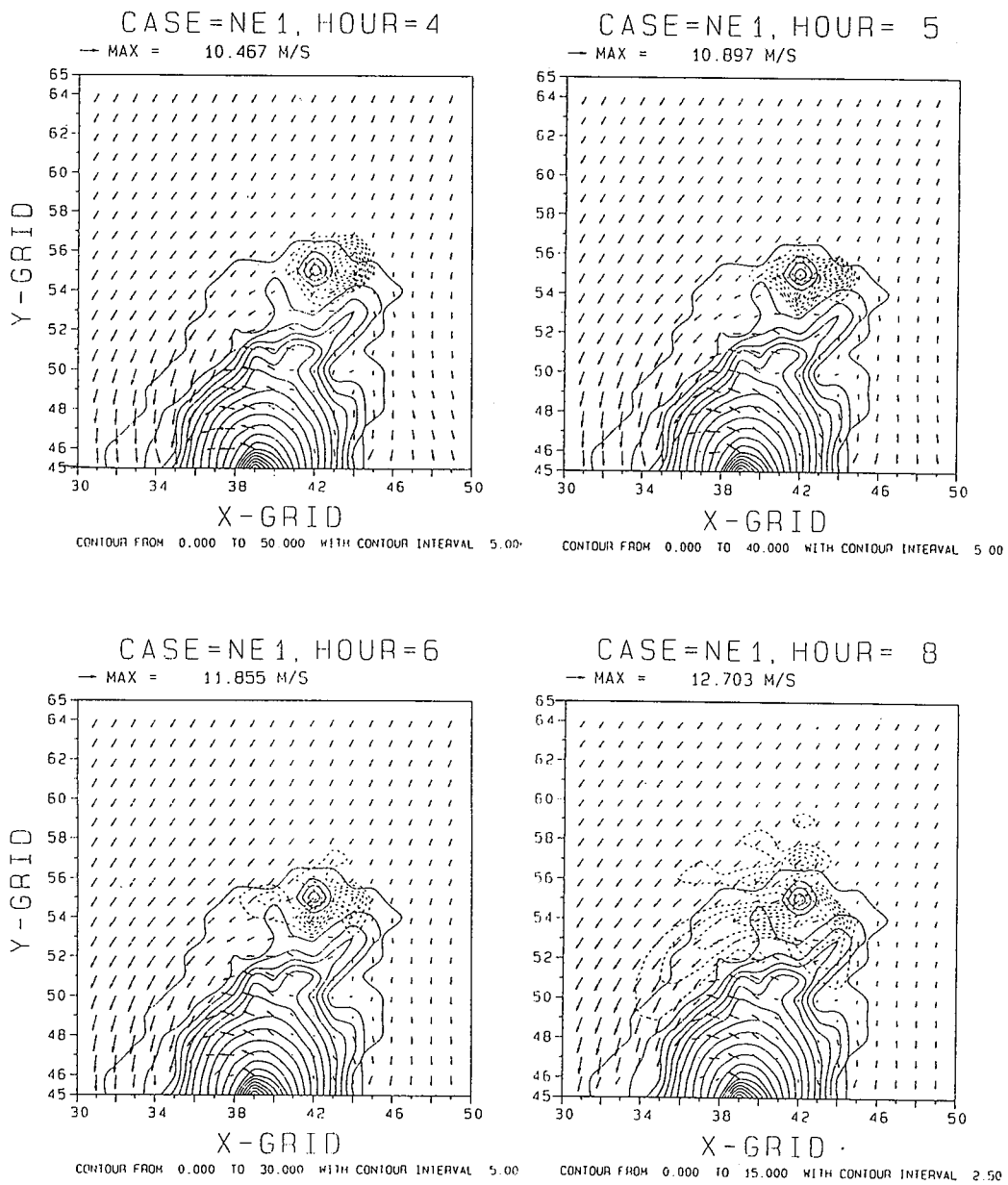


Figure 4. Numerical results for Case NE1 ($U_g = V_g = -5m/s, N \sim 0.01$). The area pollutant source is from Station 2 of nuclear energy plants.

(二)個案NE4

本個案模擬自0040 LST(設爲第0模擬小時)開始，日出時間約在第2.5小時(0630 LST)，在此時刻前其風場的型態與個案NE1很相似。但到第5小時(0900 LST)以後，由於日照加溫作用已引發海風，使局部環流逐漸加强。此西部沿海的向岸海風將因爲科氏力作用而增强盛行風向南分量。我們可預期污染物一旦流出台北盆地，其南移速度將加快。

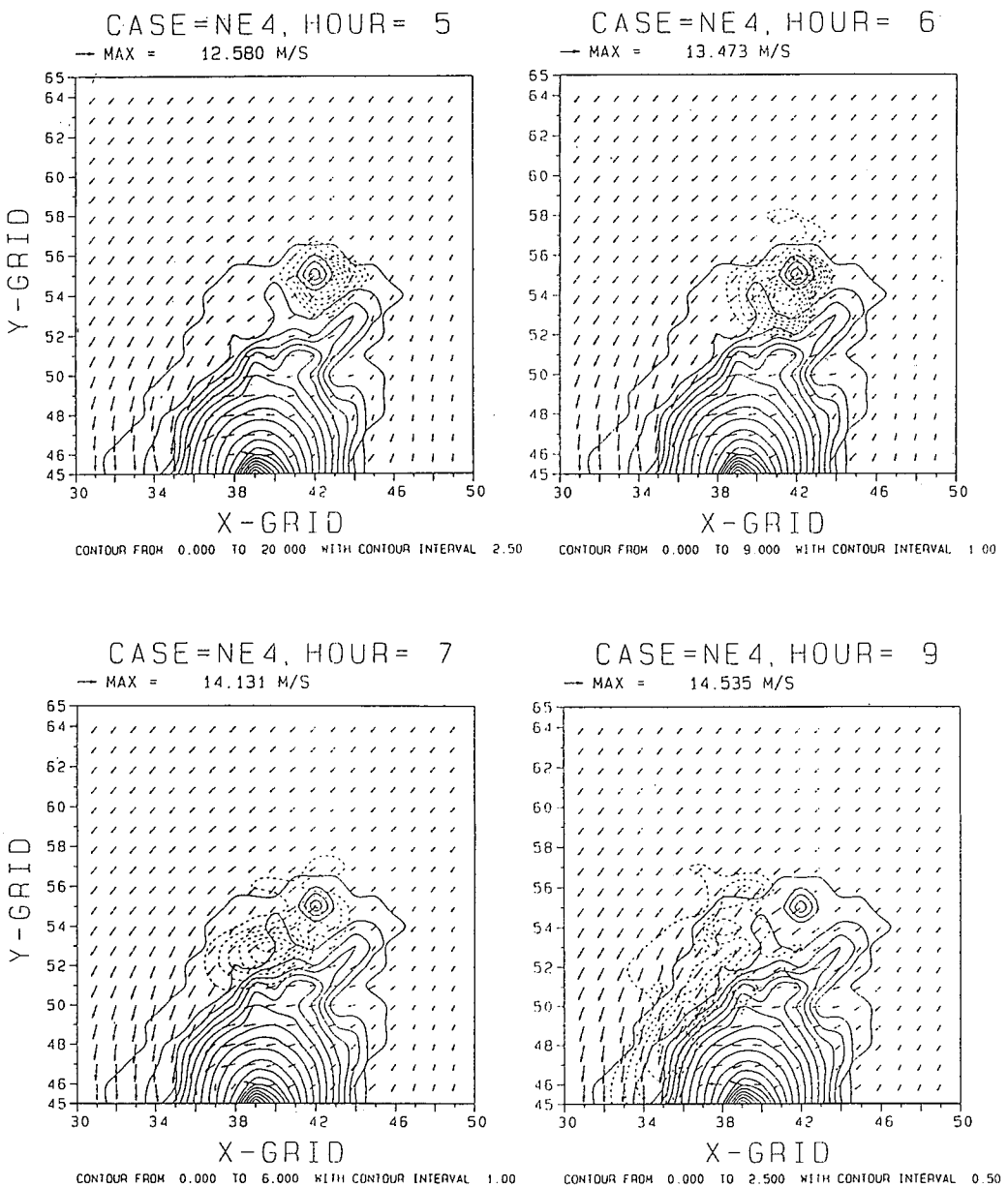


Figure 5. Numerical results for Case NE4 ($U_g = V_g = -5$ m/s, N$\sim$0.01). In this case, diurnal ground heating has been included, which starts from 2.5 simulation hour . The area pollutant source is from Stations 2 of nulclear energy plants.

我們分別在核一廠及核二廠的位置附近，於第4小時(0800 LST)釋放污染源。先就核一廠面源而言(圖未示)，在第5小時(0900 LST)時，因大氣表面層已呈現相當不穩定，亂流强度大爲增强，近地面污染物因亂流垂直擴散作用而迅速減少(盆地峰值驟降至20單位左右)，但其地面濃度分佈仍與NE1 (圖1)類似。對核二廠附近的面源而言，在0900 LST時，其污染物分佈的情形也與NE1類似，但範圍更大，而且也沒有滯留的現象(圖5)。在1000 LST時，峰值已移至台北盆地中央，此時台北盆地內吹東北風而非東風，顯示此時NE4中地形對氣流的阻擋效應並不明顯。另外，發展的海面環流也開始將被傳送至較高層的污染物帶至外海。在1100 LST以後，所有污染物已迅速利出台北盆地，並向西南擴散至台灣西部較平坦的地區，此時邊界層高度已發展至一公里以上，污染物之近地面平均濃度則降爲約原始濃度的百分之一。個案NE4的結果强調了熱力不穩定的機制在決定近地面濃度大小上扮演一個比平流作用更爲重要的角色。

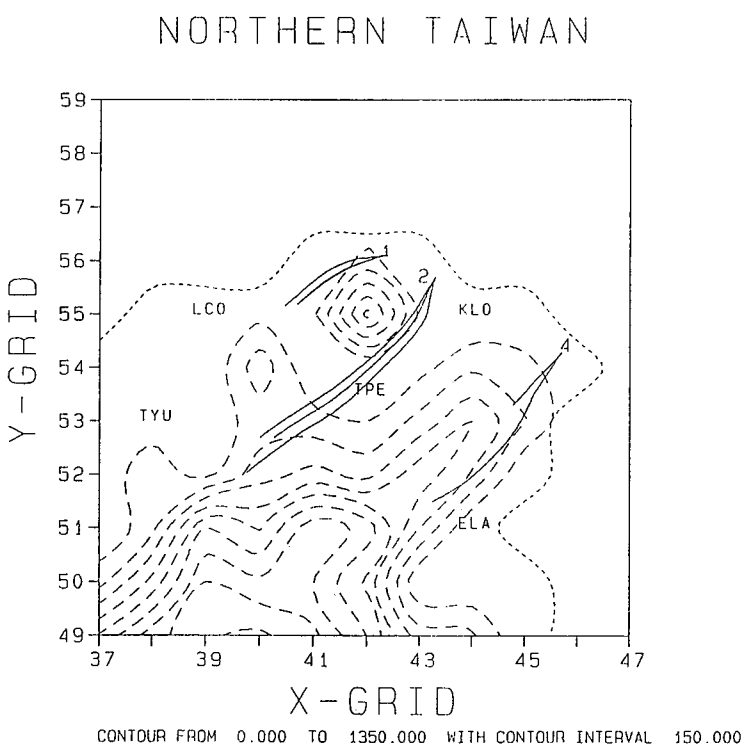


Figure 6. Horizontal pathways of the released particles from Stations 1, 2 and 4 for Case NE4 ($U_g = V_g = -5$ m/s, N～0.01). Pollutant particles are released near the surface at 0800, 0900 and 1000 LST, respectively.

最後，我們在NE4中探討單點污染粒受平均飄流吹移的軌跡。我在核一、二及四第三個廠走分別於0800，0900及1000 LST釋放近地面污染粒。圖6顯示釋放的粒子受局部環流吹送的水平路徑。由圖6，吾人可以看到不同時間釋放的核二廠污染粒均一致地繞過大屯山脈並由基隆河谷進入台北盆地；而核一廠污染粒則向西南緩慢繞行，其軌跡並不沿伸入台北盆地

，此與圖5之結果相吻合。另外，在核四廠預定地釋放的污染粒則爬向雪山山脈，較後時間釋放的粒子並可越過較高之等高線而逐漸接近宜蘭地區。此單點粒子路徑的分析結果充分佐証了上述污染面源之擴散形式，亦即污染物的濃度幾何中心之移動顯係受水平平流作用所主宰。

結　　論

本文利用一中尺度數值模式來模擬盛行東北季風下台灣北部局部環流如何影響假設性的核電廠外洩污染物之擴散過程。本中已將核污染源的釋放過程予與高度理想化，因此本文任何模擬結果僅供學術研究之參考。個案模擬結果與蔡(1987)分析的台灣北部環流特徵相當吻合。吾人由不同綜觀條件的個案模擬結果發現，盛行氣流易於繞行大屯山脈，然後經由淡水河谷與基隆河谷將污染物帶進大台北盆地。大屯山脈雖具有功能性的阻切作用，但亦因此減緩污染物的移動速率，並於迎風面造成嚴重污染。由於大台北盆地之圍阻地形，且因雪山山脈之下坡迴流與繞行氣流於盆地形成輻合，聚集的污染物不易擴散至盆地外。

由於中尺度模式之數值模擬需要大量計算機時間，本文個案的水平解析度僅爲10公里，所模擬出的污染物濃度分佈爲網格平均值。日後研究將使用更高的水平解析度，並將中尺度風場揷分於1公里的水平網格點上並以擴散模式作濃度預報。模式1公里的水平解析度對污染物初始時間的擴散現象雖仍不足以描述，但對地形局部環流的解析已充分許多，對更細節節的污染物分佈及更小尺度的地形特性的影響亦將有更明確的描述。

誌　　謝

本文在國科會計畫編號NSC 81-0202-M008-528的資助下，得以順利完成。同時也感謝國立中央大學電算中心提供的VAX 9320超級電腦。

參考文獻

蔡清彥. 1987. 台灣北部地區局部環流之研究。大氣科學15:179-197。

Businger, J. A., C. Wyngaard, Y. Izumi and E. F. Bradley. 1971. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. J. Atmos. Sci. 28:181-189.

Huang, C. Y. and S. Raman. 1989. Application of the E- ε closure model to simulations of mesoscale topographic effects. Boundary Layer Meteorol. 49:169-195.

Huang, C. Y. and S. Raman. 1991. A comparative study of numerical advection schemes featuring a one-step modified WKL algorithm. Mon. Wea. Rev. 119:2900-2918.

Huang, C. Y. 1993. A. numerical study of coastal air pollution during frontal formation induced by boundary layer effects. Submitted to Boundary Layer Meteorol.

Hunt, J. C. R. and W. H. Snyder. 1980. Experiments on stably8 and neutrally stratified flow over a model three-dimensional hill. J. Fluid Mech. 96:671-704.

Mellor, G. L.and T. Yamada. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem. Rev. Geophys. Space Phys. 20:851-875.

Segal, M., R. T. McNider, R. A. Pielke and D. S. McDougal. 1982. A numerical model study of the regional air pollution meteorology of the Greater Chesapeake bay area - Summer day case study. Atmos. Environ. 16: 1381- 1397.

Smolarkiewicz, P. K., R. Rasmussen and T. L. Clark. 1988. On the dynamics of Hawaiian cloud bands. J. Atmos. Sci. 45:1872-1905.

Smolarkiewicz, P. K. and R. Rotunno. 1989. Low Froude number flow past three-dimensional obstacles. Part 1: baroclinically generated lee vortices. J. Atmos. Sc. 46:1154-1164.