

應用大氣擴散模式於核子事故緊急  
應變系統之研究  
期中報告

計畫編號：NSC89-TPC-7-032-002

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：江旭程 淡江大學水資源及環境工程學系

行政院國家科學委員會

89 年度電力科技產業學術合作研究計畫

應用大氣擴散模式於核子事故緊急  
應變系統之研究

中華民國八十九年三月十日

## 摘要

大氣擴散模式為核能電廠緊急應變系統中重要的模組，此一計畫主要目的為發展一適合台灣地區使用之作業化系統，以便放射線物質外釋時能作即時的評估。此一系統採用 RAMS 模式，求出三維的氣象變數分佈，作為 HYPACT 擴散模式的輸入資料。在此一研究中將選擇一個電廠，完成整個系統的整合，收集所須輸入資料，建立資料庫，配合實際氣象資料進行模擬操作，進行模式的調整和驗證以供作業化使用。

關鍵字：作業化、即時系統

## **ABSTRACT**

Atmospheric dispersion model is an important component of the emergency response system for a nuclear power plant. In this project, we will develop a system that can provide real-time assessments of the dispersion caused by accidental releases of radioactive materials in Taiwan area. A mesoscale meteorological model, RAMS, will be used to calculate the three dimensional meteorological data that is needed by the diffusion model, which is HYPACT in this study. This system will be applied to a pre-selected nuclear power plant. The required input data will be collected and this system will be tested and tuned for future operational applications.

Key Words : Operational, Real-time system

# 目 錄

摘要	I
目錄	III
圖目錄	IV
表目錄	VI
第一章 前言	1-1
1.1 計畫緣起	1-1
1.2 前人研究	1-3
1.3 氣象模式之選用	1-4
1.4 擴散模式之選用	1-6
1.5 研究目的	1-7
第二章 研究方法	2-1
2.1 RAMS 模式	2-1
2.1.1 簡介	2-1
2.1.2 RAMS 之制御方程式	2-2
2.1.3 網格結構	2-4
2.1.4 數值方法	2-4
2.1.5 亂流參數化	2-5
2.1.6 邊界條件	2-7
2.1.7 地面層參數化	2-8
2.1.8 對流參數化	2-10
2.1.9 輻射參數化	2-10
2.1.10 雲微物理	2-10
2.1.11 RAMS 模式輸入資料來源	2-11
2.2 HYPACT 模式	2-13
第三章 結果與討論	3-1
3.1 模擬區域	3-1
3.2 氣象模擬結果分析討論	3-6
3.3 擴散模擬結果分析	3-30
第四章 結論	4-1
參考文獻	5-1

## 圖目錄

圖 1.1 台灣地區核能電廠緊急應變評估體系中所使用的擴散模式	1-2
圖 2.1 RAMS 之計算流程	2-12
圖 3.1 四層巢狀網格之範圍	3-2
圖 3.2 第三層和第四層巢狀網格之地形	3-3
圖 3.3 模擬範圍內之地面氣象測站之位置及代碼	3-4
圖 3.4 模擬範圍內之探空站之位置及代碼	3-5
圖 3.5 1996 年 10 月 6 日和 7 日的地面天氣圖	3-7
圖 3.6 每隔六小時一次，第三層網格之最下層風場(1996 年 10 月 6 日)	3-8
圖 3.7 每隔六小時一次，第三層網格之最下層風場(1996 年 10 月 7 日)	3-9
圖 3.8 每隔六小時一次，第四層網格之最下層風場(1996 年 10 月 6 日)	3-10
圖 3.9 每隔六小時一次，第四層網格之最下層風場(1996 年 10 月 7 日)	3-11
圖 3.10 每隔六小時一次，第三層網格之最下層溫度分佈(1996 年 10 月 6 日)	3-13
圖 3.11 每隔六小時一次，第三層網格之最下層溫度分佈(1996 年 10 月 7 日)	3-14
圖 3.12 每隔六小時一次，第四層網格之最下層溫度分佈(1996 年 10 月 6 日)	3-15
圖 3.13 每隔六小時一次，第四層網格之最下層溫度分佈(1996 年 10 月 7 日)	3-16
圖 3.14 每隔六小時一次，第三層網格之最下層比濕分佈(1996 年 10 月 6 日)	3-17
圖 3.15 每隔六小時一次，第三層網格之最下層比濕分佈(1996 年 10 月 7 日)	3-18
圖 3.16 每隔六小時一次，第四層網格之最下層比濕分佈(1996 年 10 月 6 日)	3-19
圖 3.17 每隔六小時一次，第四層網格之最下層比濕分佈(1996 年 10 月 7 日)	3-20
圖 3.18 通過台北盆地東西向縱剖面之風場及位溫分佈圖(1996 年 10 月 7 日 00Z)	3-22
圖 3.19 通過台北盆地東西向縱剖面之風場及位溫分佈圖(1996 年 10 月 7 日 06Z)	3-23

- 圖 3.20 通過台北盆地東西向縱剖面之風場及位溫分佈圖(1996 年 10 月 7 日 12Z)----- 3-24
- 圖 3.21 通過台北盆地東西向縱剖面之風場及位溫分佈圖(1996 年 10 月 7 日 18Z)----- 3-25
- 圖 3.22 通過大屯山，東西向縱剖面之風場及位溫分佈圖(1996 年 10 月 7 日 00Z)----- 3-26
- 圖 3.23 通過大屯山，東西向縱剖面之風場及位溫分佈圖(1996 年 10 月 7 日 06Z)----- 3-27
- 圖 3.24 通過大屯山，東西向縱剖面之風場及位溫分佈圖(1996 年 10 月 6 日 12Z)----- 3-28
- 圖 3.25 通過大屯山，東西向縱剖面之風場及位溫分佈圖(1996 年 10 月 7 日 18Z)----- 3-29
- 圖 3.26 1996 年 10 月 6、7 日模擬期間淡水、台北、竹子湖和鞍部氣象局地面測站所測出之地面溫度和模式模擬底層的溫度的比較  
----- 3-31
- 圖 3.27 假設在 10 月 6 日 12Z 有 20 分鐘的污染物排放，其排放高度距海平面為 200m，經過一個小時的擴散所形成的地面濃度分佈圖  
----- 3-32

## 表目錄

表 1.1	中尺度模式及其在空氣品質模擬應用-----	1-5
表 2.1	此一研究中所用的 RAMS 選項-----	2-1
表 2.2	RAMS 的輸入資料和來源-----	2-13
表 3.1	巢狀網格之範圍、格點數和格點間距。-----	3-1



# 第一章 前言

## 1.1 計畫緣起

1986年4月26日蘇聯發生車諾比爾核電廠意外事件，輻射塵擴散到歐洲各國，此一事件讓科學家了解，當意外事件發生時，如能利用較準確的模式，預測污染物的影響範圍，可以做較好的緊急應變處理。其後許多即時(real time)擴散預測系統逐漸建立，例如日本氣象研究所所發展之數值預報系統(Yoshikawa et al., 1990)，此一系統期望在最短時間、利用有限的氣象觀測資料做準確的三度空間風場預測模擬，其內容包含現場利用迷你電腦配合診斷式風場模式作初步評估，然後再用超級電腦對未來十二小時的擴散作動力的預測模擬。

美國 Lawrence Livermore National Laboratory 也發展 ARAC(Lee et al., 1998)作業系統，早期其風場採用診斷式的 MATHEW 風場模式，目前新版已改用美國海軍所發展的 NORAPS 預測模式。

美國 NOAA 所屬之 Air Resources Laboratory (ARL)也與 NRC 合作，利用 RAMS 中尺度模式和 HYSPLIT 擴散模式，預測外釋時之劑量分佈。此一模式曾用於核電廠意外事故模擬演練，也曾假設 Cs-137 的排放率為 1ci/s，計算美國各核電廠之擴散情形，此一預測可配合氣象資料每六小時更新一次。

目前台灣地區核能電廠緊急應變評估體系如圖 1.1 所示，此一系統可結合輻射評估及大氣擴散模式，計算核能電廠發生事故時，輻射外釋民眾所可能受到的輻射劑量，以作為緊急應變決策者下達掩蔽或疏散等應變措施之參考。此一緊急應變評估系統中使用兩套大氣擴散模式，即：

- PADES 快速劑量評估系統：這是一套建置在工作站的高斯煙流擴散模式，具有中文介面和地圖，配合電廠氣象塔風速、風向及排放源資料，經由簡單的計算，即可求出劑量分佈圖。其缺點為假設煙流的軌跡為一直線，用於複雜地形地區的擴散模擬可能產生較大誤差。
- RAPTAD 高階三維地形氣象劑量擴散系統：這是一套較進步且精確的劑量評估模式，可以利用動力風場模式，考慮核電廠附近複雜地形所產生的複雜風場及溫差效應所造成的局部環流，作較長時間的模擬；此一系統利用氣象局之分析風場作為輸入資料，須要複雜的計算因此須要快速的電腦。



# 緊急應變評估體系硬體架構

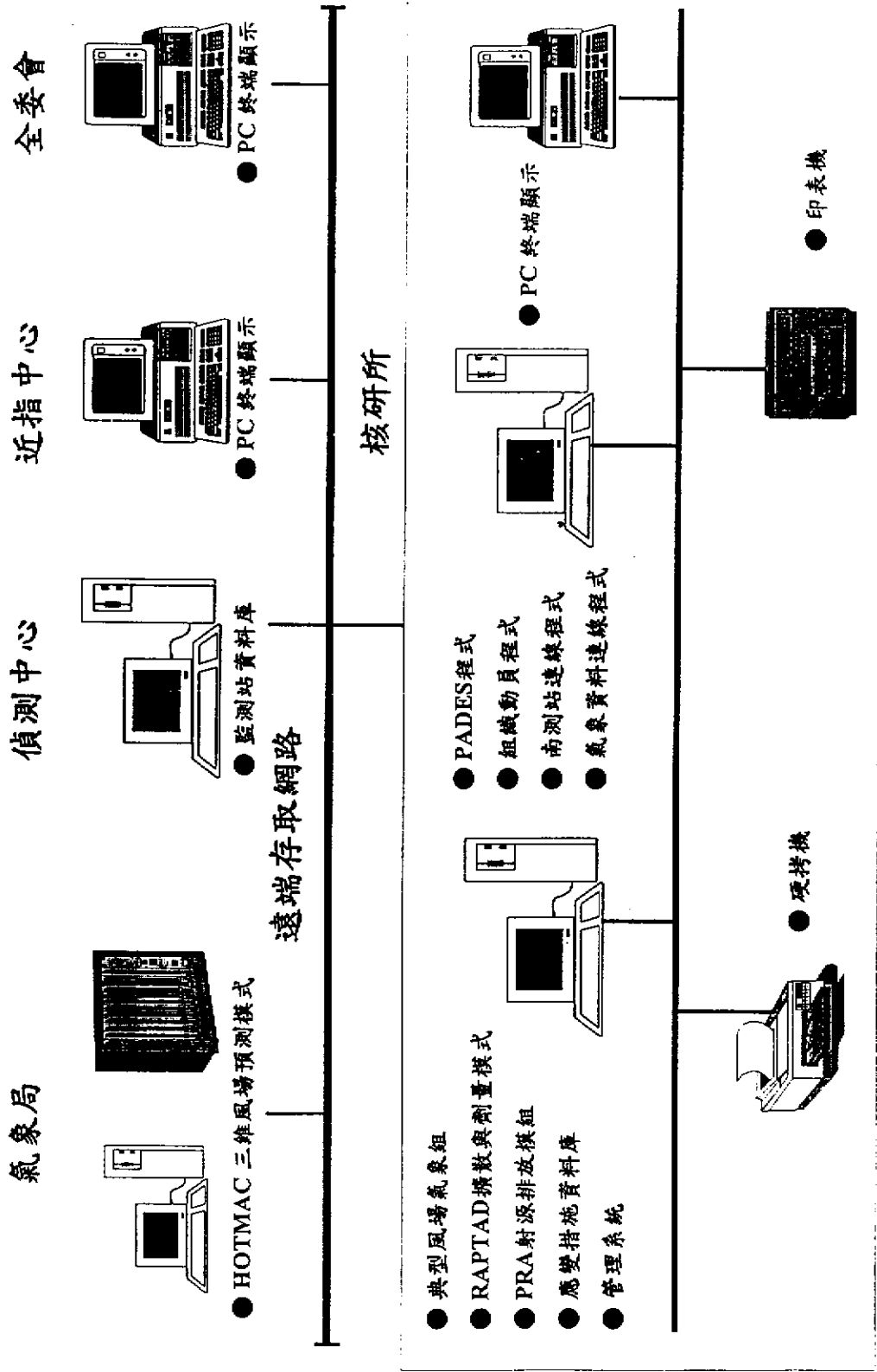


圖 1.1 台灣地區核能電廠緊急應變評估體系中所使用的擴散模式

現有台灣地區緊急應變系統中擴散模擬所用的方法雖然符合美國 NRC Regulatory Guide 1.145, "Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assessments at Nuclear Power Plants"之建議，但因數值計算和電腦科技快速的發展，不斷發展出許多新的方法，如果能配合最新的技術，將可獲得較正確的結果，此為此一研究之主要動機。

## 1.2 前人研究

因為過去台灣曾有許多計畫針對電場意外事件擴散進行研究，不過本研究與過去的研究有有還是許多不同之處，本節中我們將就此一問題做一說明。

早期許多研究與複雜地形地區的風場與擴散有關，如：祁(1993)利用二維中尺度模式再加入高階擴散模式模擬海陸風環流下污染物的通量；黃和莊(1993)，探討盛行東北季風下近地污染面源於複雜地形的擴散現象，利用高階亂流閉合的中尺度數值模式來進行核一、核二廠個案模擬；王(1996)利用 HOTMAC 模式模擬台灣北部環流，以醉步模式和追蹤劑實驗比較核二廠煙流軌跡之差異；陳(1985)以診斷式風場為基礎，利用軌跡割段模式(Trajectory Segment Model)模擬高雄大林火力電場煙流軌跡。在淡江大學，蔡(1998)也曾用 SAIMM 中尺度模式，配合自行發展的醉步法進行擴散模擬，探討台灣北部地區污染擴散情形，此一研究並利用 OpenMP 指令將程式平行化，以節省計算延時，但所使用氣象模式較為老舊為一靜力(hydrostatic)模式，且無法使用 nested grid 技術，嚴格地說，並不是一個最佳選擇。

最近則有張乃彬教授將擴散模式與地理資訊系統整合的研究(徐等，1989；翁等，1989)，不過此一研究較偏重整個應變系統架構之建立，由論文中看出並未對中尺度氣象模式和擴散模式的使用建立一套準確可行的制度。

在我們看來，上述研究都沒有進一步發展成作業化(Operational)的模式，在作業化的模式中希望能利用日常觀測資料很快地得到準確的預測。但僅依靠簡單的輸入資料，要獲得準確的風場並不是簡單的工作。如果模式過於簡化，則不易準確；如果模式較為複雜，則計算耗時。還好目前電腦科技快速發展，利用個人電腦，也可進行十分複雜的計算，同時因為網路的普及，要

取得即時的氣象資料也不是困難的工作，因此，我們希望能利用最新的技術，建立核電事故中擴散模擬系統，以供台灣應用。

在本計畫中我們將利用 RAMS 模式來模擬台灣地區複雜地形風場。當意外災害發生時，可迅速預測短期(一至二小時)或中長期(十二小時或二十四小時)放射線物質移動和擴散的過程，以供擬定緊急應變措施之用。

### 1.3 氣象模式之選用

在緊急意外事件擴散模擬時，必須利用準確的風場和亂流場來推動污染物的傳輸與擴散計算，通常產生風場的方式可分為診斷式風場模式(Diagnostic Wind Model)和動力中尺度氣象模式(Mesoscale meteorological model)。

診斷式模式只簡單地滿足質量守恆，對於動量守恆方程式則無法完全滿足。診斷式模式必須輸入觀測資料；如果觀測資料較為密集，可將所得的測站資料值先客觀分析後，再使其符合質量守恆(如Sherman和Mathew屬於此類)；如果觀測資料較為稀疏或缺乏，則須配合一些經驗公式，建立風場之猜值，再修正風場使其符合質量守恆(如SAI所發展的DWM)。

一般而言診斷式模式計算較為簡單，但無法預知未來氣象的發展，只可以簡單地提供穩定狀態(steady state)或近似穩定狀態(quasi steady state)狀況下較好的風場估計，此模式已廣泛使用來估算複雜地形的風場，也曾用於許多緊急外釋擴散模擬模式中，基本上此類模式可快速求出風場以進行短期的推估。

預測式模式(Pielk, 1984))建立在基本的物理守恆定律上，包括質量、動量、能量及其它成份的守恆定律。將模式依特定的情況予以簡化，使其有效率的處理問題，並使模擬的結果較容易理解及分析。預測式模式具有預測的能力，可用於各種地形條件，求出因地形造成的渦流及熱擾動之間的非線性交互作用，進而推算三維風場分佈。雖然計算複雜，但近年來計算機更新迅速，計算時間已大幅度的縮減。本研究選擇預測式模式進行動力模擬，以求出未來六小時或12小時後。

目前有許多中尺度氣象模式，各種模式均有其優缺點，表1.1列出一些中尺度氣象模式、其發展單位及過去在空氣品質應用的例子。

表 1.1 中尺度模式及其在空氣品質模擬應用

模式	發展單位	網格間距	空氣品質模式應用
MM5	NCAR/PSU	1-100 km	第一條件至季進程的空氣品質評估。為 MODELS3 中之主要氣象模式
RAMS: The Regional Atmospheric Modeling System	CSU/Mission Research Corp.	100 m-110 km	LES、塔西根湖和 OTAG 奧西根湖、Chesapeake 灣沉澱區域意外事件模擬
HOTMAC	Yamada Science and Art Co.	1-20 km	模擬地形污染物擴散、點源排放
ARPS: Advanced Regional Prediction System	U. Oklahoma	1-10 km	主要用於暴雨的模擬
Ela	NWS/NOBP	0-92 km	區域 regional 模式
LAAPS: Local Analysis and Prediction System	NOAA/PSU	10 km	非線性的氣象分析的高分辨率分析，以用於緊急事件報告
MAPS/RUC: Mesoscale Analysis and Prediction System	NOAA/PSU	40 km	區域分析及預測，能見度分析

經比較後，本研究中所使用的氣象模式為美國科羅拉多大學(Colorado State University)所發展出的區域大氣模式系統(The Regional Atmospheric Modeling System, RAMS)。RAMS 是根據原始方程式為基礎所發展出的中尺度氣象模式，可依據模擬的需求選擇各種不同的物理過程及數值方法，加上具有多重巢狀網格功能(Clark and Farley, 1984)，故模擬範圍十分具有彈性(範圍涵蓋大渦流至中尺度對流系統)，廣泛適用於中尺度氣象之研究如：模擬或預報氣象之相關研究或作為空氣品質模式之風場前處理。並可利用四維資料同化(four-dimensional data assimilation)將氣象觀測資料併入 RAMS 以修正風場。模式產生的三維風場經處理後可供空氣品質模式如 HYPACT 利用。本計劃中

水平網格解析度希望能達到 1km，此一模式能符合本計畫之須求。

三維的動力風場模擬須要複雜且耗時的計算，不能等到有意外事件發生才開始進行氣象模擬；可行的方法是利用全球分析場作為初始資料，每日一次(或數次)日常性的模擬未來 24 或 48 小時的氣象變化，如果真有意外事件發生，只要輸入排放資料，就可很快地進行模擬。然而此種方法因沒有“混入”當地的觀測資料，其準確性如何頗值探討，因此在本計畫中首先將針對此一問題進行分析。如果可行再一依此法建立一完整的作業化系統。

#### 1.4 擴散模式之選擇

過去台灣地區點污染源擴散常用高斯煙流模式(Gaussian plume model)模擬，此類模式計算十分簡單，可以很快地求出污染物濃度分佈，但也有很多缺點。首先，複雜地形產生的非均勻流場，造成污染物的傳送並非直線，而且意外事件的排放大都不是連續排放，因此採用靜定(steady)假設的高斯煙流(Gaussian plume model)模式並不合適，所以此一計畫並不考慮使用此一模式。

我們評估數個其他形式的模式，包括尤拉(Eulerian)模式、高斯陣噴模式(Gaussian puff model)、醉步法(Random walk model)等，這些模式各有其優缺點，分析如下。

尤拉模式(Csanady., 1973)假設在每個網格中污染物均勻混合於其中，網格內的濃度為定值，因此會造成不正常的初始稀釋現象(initial dilution)，對於點源的擴散造成不正常的扭曲；本研究主要模擬單一來源的意外事件，如以尤拉模式模擬，將無法真正看出高濃度地區污染物移動的狀況。不過當污染雲的尺度擴張到與數值模擬網格相近以後，尤拉模式比其他形式的模式能更有效率的求出擴散濃度。

高斯陣噴模式計算簡單，過去常用於長程傳輸或意外事件模擬。由於此一模式對於濃度分佈仍須作簡化的假設，因此無法反應出垂直風切、氣流輻合分散、環流等各種現象。

醉步法藉由大量質點的隨機運動，以統計求出濃度分佈。此法雖然可考慮各種複雜的擴散情況，然而所須之計算時間最長；而且在遠處因為質點分散在廣大

的空間，要準確的求出濃度分佈將非常困難。我們將採用醉步法加以模擬，醉步法的演算乃自行發展，並與中尺度氣象模式加以結合。

我們在評估數種模式，包括 CALPUFF， HYSPLIT， HYPACT 等之後，決定採用 HYPACT 進形擴散模擬。HYPACT 模式的特點就是在進近場可以採用 Lagrangian 型式之醉步模式(random walk model)計算濃度，等到質點逐漸散開，再改用 Eulerian 模式計算污染物擴散濃度。此一模式可同時可考慮傳送、擴散及沉降，適合此一計畫使用。

## 1.5 研究目的

大氣擴散模式為核能電廠緊急應變系統中重要的模組，此一計畫主要目地為發展一適合台灣地區使用之作業化系統，以便放射線物質外釋時能作即時的評估。此一系統將採用中尺度氣象模式 RAMS，對未來氣象條件作動力模擬，求出三度空間、時變的風場和其他各項氣象變數，至於擴散模擬則採用 HYPACT 模式進行推估，以求出煙流軌跡和擴散濃度及沉降量，計算結果將可配合地圖直接顯示於螢幕上。本年將選擇一個電廠，完成整個系統的整合，收集所須輸入資料，建立資料庫，配合實際氣象資料進行模擬操作。

## 第二章 研究方法

### 2.1 RAMS 模式

#### 2.1.1 簡介

此一研究所用的 RAMS 模式之版本為 3b，此一模式對各個過程提供多種選項(options)，因此使用者可以針對所要解決的問題，選擇合適的方法，以得到最佳的結果。表 2.1 列出主要功能和其選項，用粗體字標示者，為此一研究所用的方法。

表 2.1 此一研究中所用的 RAMS 選項

項目	使用方法
制衡方程式	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可壓縮、非淨力</li> <li>● 靜力(可壓縮或不可壓縮)</li> </ul>
維度	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 三維</li> <li>● 二維</li> </ul>
垂直座標	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Terrain following <math>Z^*</math></li> <li>● 標準直角座標</li> </ul>
水平投影	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Rotated polar-stereographic transformation</li> <li>● 標準直角座標</li> </ul>
網格結構	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Arakawa-C grid stagger</li> <li>● 不限的巢狀網格</li> <li>● 使用者指定的空間和時間巢狀縮比</li> <li>● 可以增加或刪除巢狀網格</li> <li>● 移動的巢狀網格</li> </ul>
時間差分	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Leapfrog</li> <li>● 前向插分</li> <li>● 混合</li> </ul>
亂流閉合	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Deformation/stability-based(Smagorinsky-Lilly)</li> <li>● Turbulent kinetic energy(Mellor-Yamada Type)</li> <li>● Turbulent kinetic energy(Deardorff type)</li> </ul>
冷凝	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 網格點完全飽和或未飽和</li> <li>● 沒有冷凝</li> </ul>



輻射	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Chen-Cotton(1988) long/shortwave model</li> <li>● Mahrer and Pielke(1977) long/shortwave model</li> </ul>
雲微物理	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 暖雨程序(warm rain process)</li> <li>● 五種冰冷凝物種</li> </ul>
下方邊界條件	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地面層相似率(Louis, 1979)</li> <li>● Tremback/Kessler(1985)土壤、溫度、濕度模式</li> <li>● 植物溫度、濕度模式</li> </ul>
上方邊界條件	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 剛性頂蓋</li> <li>● Raleigh 磨擦層</li> <li>● 預測地面壓力</li> <li>● 重力波輻射條件</li> </ul>
側向邊界條件	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Klemp and Wilhelmson(1978) 輻射條件</li> <li>● Orlanski(1976) 輻射條件</li> <li>● Klemp and Lilly(1978) 輻射條件</li> <li>● Davis(1976) 逼近條件(nudging condition)</li> <li>● 周期條件(Cyclic conditions)</li> </ul>
初始化	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水平均勻</li> <li>● 等位溫層結合網格及觀測資料之分析場</li> <li>● 將網格資料插值到氣象模式的網格</li> </ul>

## 2.1.2 RAMS 之制御方程式

此一研究所用之制御方程式為可壓縮、非靜力(non-hydrostatic)，包括下列方程式：

### 1. 運動(motion)方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + fv + \frac{\partial}{\partial x} (K_m \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_m \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial u}{\partial z})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial y} - fu + \frac{\partial}{\partial x} (K_m \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_m \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial v}{\partial z})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial z} - g \frac{\theta_v}{\theta_0} + \frac{\partial}{\partial x} (K_m \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_m \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial w}{\partial z})$$

2. 質量連續方程式：

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = - \frac{R \pi_0}{c_v \rho_0 \theta_0} \left( \frac{\partial \rho_0 \theta_0 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 w}{\partial z} \right)$$

3. 熱力方程式

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} + u \frac{\partial \theta_w}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_w}{\partial y} + w \frac{\partial \theta_w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_m \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_m \frac{\partial \theta_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial \theta_w}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \right)_{rad}$$

4. 水氣質量守恆方程式

$$\frac{\partial r_n}{\partial t} + u \frac{\partial r_n}{\partial x} + v \frac{\partial r_n}{\partial y} + w \frac{\partial r_n}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_m \frac{\partial r_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_m \frac{\partial r_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial r_n}{\partial z} \right)$$

各變數所代表的含義為：

$u, v, w$  : 三個方向的速度分量

$f$  : 柯氏力參數

$K_m$  : 動量之渦流黏滯係數

$K_h$  : 熱量和水氣之渦流黏滯係數

$\theta_w$  : 冰-液態水之位溫

$r_n$  : 總水(total water)、雨(rain)、(pristine)、冰晶(crystal)、aggregates、雪(snow)

之混合比

$\rho$  : 密度

$g$  : 重力加速度

$r_t$  : 總水混合比

$r_v$  : 水蒸氣混合比

$\pi$  : 總 Exner 函數

$\pi'$  : Exner 函數擾動量

$\theta_v$  : 虛位溫

$p$  : 壓力

$con$  : 對流參數化之驅勢

$rad$  : 輻射參數化之驅勢

$res$  : 微物理參數化之驅勢

氣壓預報以 exner function( $\pi$ )來表示， $\pi$  定義成：

$$\pi = C_p \left( \frac{P}{P_{00}} \right)^{\frac{R}{C_p}}$$

其中  $C_p$  為乾空氣之定壓比熱， $P_{00}$  為 1000Pa， $R$  為乾空氣氣體常數。

### 2.1.3 網格結構

RAMS 所用的網格為標準的 Arakawa C 網格(Mesinger and Arakawa, 1976)。所有的熱力、水氣變數均定義於網格中心，而速度分量則定義於其垂直向 1/2 網格處。這樣的安排有許多好處，包括速度分量的位置相對於熱動力變數的位置為等熵(isotropy)，此點對質量和通量的守恆相當重要。

在水平方向採用 polar stereographic 投影法，投影中心位於最粗網格的中心位置，使用此種方法可以減少模式網格間距和實際距離間的扭曲，如果模擬範圍較小，水平的網格結構將與直角座標系統或 UTM 系統接近。

在垂直向採用 sigma-z 的座標系統，此種方法與 sigma-p 座標系統比較，其優點為在整個模擬期間模式的格點至地面的高度皆保持固定，理論上可用於非常細的水平網格。

RAMS 使用的網格巢狀化技術是由 Clark and Farley(1984)、Clark and Hall(1991)所發展的雙向影響(two-way interaction)技術，此一技術首先更新粗網格的解答，然後利用三次多項式進行空間插值，求出較細網格邊界上的值，並將其設定為邊界條件；利用此一邊界條件，求解更新後的細網格的值，當細網格計算到與粗網格相同時間時，再用細網格的平均值把粗網格內的值加以覆蓋掉；在計算過程中，均仔細檢查以確保在網格介面上的質量和動量守恆。RAMS 可使用無限多層網格，具有平行及垂直兩種巢狀網格。

### 2.1.4 數值方法

RAMS 有數種基本時間差分操作方式，對非靜力模式採用前向後向一階演算法(forward-backward first order scheme)、跳蛙法(leapfrog scheme) 或混合法(hybrid scheme)，而靜力模式採用前向後向法。所有上述演算法均採用時間分割(time-split)法，以處理較快速傳遞的聲波項；此一演算法降低真正的

聲波傳遞速度，並以較小的時間步階計算快速傳播的聲波項。(Tripoli and Cotton, 1982 ; Tremback et al., 1985)。此一研究採用混合法，即速度和壓力項採用跳蛙法，其他變數則使用前向差分法。

對流項差分有兩種選擇，即 leapfrog 和 forward-upstream。對流項的演算採用通量守恆型式(flux conservative mode)，以便質量動量和能量能維持守恆。

### 2.1.5 亂流參數化

在大氣邊界層內，氣流通常為亂流。如果採用 Reynold 分解法，將瞬時速度或純量分為平均值和擾動值，則制御方程式中將產生二次相關項如  $\overline{u_i u_j}$  或  $\overline{u_i \phi}$  等。如此一來未知數將比方程式的數目還多，必須利用適當的假設加以閉合才能求解，這就是所謂的亂流閉合問題(turbulent closure)。

在 RAMS 3b 中亂流閉合採用 K 理論(K-theory)，對純量採用下列公式：

$$\overline{u_i \phi} = -K_{hi} \frac{\partial \phi}{\partial x_i}$$

其中  $K_{hi}$  為  $i$  方向的渦流混合係數(eddy mixing coefficient)。

對速度分量，則視網格之大小可以有兩種選擇，當水平網格間格與垂直網格間格相近時，對流運動可獲得解析(resolvable)，雷諾應力可以用下式計算：

$$\overline{u_i u_j} = -K_{mi} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

上式中  $K_{mi}$  為渦流黏滯係數，此時假設  $K_{mi} = K_{mj}$ ，即  $\overline{u_i u_j} = \overline{u_j u_i}$ 。當水平網格間格比垂直網格大很多時，對流運動無法顯現出來，雷諾應力在垂直和水平方向並不對稱，因此垂直擴散係數可以下式計算

$$\overline{u_i u_j} = -K_{mi} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

在 RAMS 中提供四種方法以計算  $K_{mi}$  和  $K_{hi}$ ，此處我們介紹如何以 TKE 法求出其值。

TKE 是用來估算渦流混合係數(eddy mixing coefficients)，當水平網格尺度很大時，可使用 Mellor and Yamada(1974)法來計算垂直混合係數(vertical