

行政院及所屬各機關出國報告
(出國類別: 實習)

中美氣象預報發展技術合作— 中尺度模式預報系統建置(Hot-Start MM5)

服務機關：交通部中央氣象局
出國人 職 稱：薦任技士
姓 名：簡國基
出國地區：美國
出國期間：民國 91 年 1 月 22 日至民國 91 年 12 月 15 日
報告日期：民國 92 年 1 月 14 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

系統識別號：C09105952

出國報告名稱：中美氣象預報發展技術合作—中尺度模式預報系統建置(Hot-Start MM5)

頁數 44 含附件： 是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

交通部中央氣象局/趙如倩/2349-1012

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

簡國基/交通部中央氣象局/氣象預報中心/技士/2349-1211

出國類別： 1 考察 2 進修 3 研究4 實習 5 其他

出國期間：民國 91 年 1 月 22 日 至民國 91 年 12 月 15 日 出國地區：美國

報告日期：民國 92 年 1 月 14 日

分類號/目：H8/氣象 H8/氣象

關鍵詞：Hot-Start MM5、LAPS、QPF、非絕熱初始化、極短時預報

內容摘要：(二百至三百字)

中尺度模式之 Hot-Start 天氣預報，預期將可有效提升極短時劇烈天氣之預報能力，因此，中央氣象局與美國海洋暨大氣總署之預報系統實驗室(NOAA/FSL)技術合作，發展台灣地區中尺度模式短時預報系統 Taiwan Hot-Start MM5。

此系統之運作過程可區分為三大部分，第一步驟為整合台灣地區的雷達、衛星、探空及地面、海洋觀測網等天氣資料，利用 LAPS 進行即時且快速的中尺度分析；第二部分則將分析結果輸入非絕熱初始化模組，進行包含雲、雨等資訊之模式非絕熱初始化；所得的模式初始場，即提供第三步驟進行中尺度模式(MM5)數值預報。本預報系統的特色為，大氣分析與初始化過程已有效納入雲、雨等非絕熱作用，故可有效解決傳統模式積分初期的調整問題(spinup problem)，這對於劇烈天氣之極短時預報相當有幫助。目前台灣地區 Hot-Start MM5 雛型系統已建置成功，初步測試結果則優於傳統模式預報，預計未來亦可作為台灣地區定量降水預報(QPF)的參考。

本文電子檔已上傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

摘要

中尺度模式之 Hot-Start 天氣預報，預期將可有效提升極短時劇烈天氣之預報能力，因此，中央氣象局與美國海洋暨大氣總署之預報系統實驗室(NOAA/FSL)技術合作，發展台灣地區中尺度模式短時預報系統 Taiwan Hot-Start MM5。

此系統之運作過程可區分為三大部分，第一步驟為整合台灣地區的雷達、衛星、探空及地面、海洋觀測網等天氣資料，利用 LAPS 進行即時且快速的中尺度分析；第二部分則將分析結果輸入非絕熱初始化模組，進行包含雲、雨等資訊之模式非絕熱初始化；所得的模式初始場，即提供第三步驟進行中尺度模式(MM5)數值預報。本預報系統的特色為，大氣分析與初始化過程已有效納入雲、雨等非絕熱作用，故可有效解決傳統模式積分初期的調整問題(spinup problem)，這對於劇烈天氣之極短時預報相當有幫助。目前台灣地區 Hot-Start MM5 雛型系統已建置成功，初步測試結果則優於傳統模式預報，預計未來亦可作為台灣地區定量降水預報(QPF)的參考。

關鍵詞： Hot-Start MM5、LAPS、QPF、非絕熱初始化、極短時預報

目次

一 目的.....	1
二 過程.....	2
三 心得.....	5
(一) LAPS 使用資料.....	5
(二) LAPS 之都卜勒雷達資料處理.....	6
(三) LAPS 風場分析.....	7
(四) LAPS 地面場分析.....	9
(五) LAPS 溫度場分析.....	12
(六) LAPS 雲分析.....	14
(七) LAPS 水氣場分析.....	17
(八) 中尺度模式之非絕熱初始化.....	20
(九) “Hot-Start”中尺度模式(MM5)	23
(十) 颱風渦旋植入.....	25
四 建議.....	27
參考文獻.....	29
附圖.....	32

一 目的

近幾年來，劇烈天氣在台灣地區所導致的氣象災害頻傳，對人們的生命財產威脅日益嚴重；而現行一至七日逐日之數值天氣預報，已無法充分滿足國家防災之需求，因此，有必要進一步發展劇烈天氣監測與預報系統，透過即時掌握劇烈天氣系統之演變，進行即時天氣預報，並提供極短時定量天氣預測，以落實氣象防災、減災的目標。

所謂劇烈天氣，常見的為豪雨、大雨、大雷雨、強風、濃霧、寒潮低溫、霜害、龍捲風及焚風等災害性天氣；其中，由颱風及梅雨鋒面之豪雨、大雨、雷雨或強風所引發的災害，幾乎年年位居台灣地區氣象災害之首位，故建立劇烈天氣即時預警系統，以有效降低氣象災害為當務之急，希望透過即時資料收集、自動化分析與研判，快速將劇烈天氣預警資訊傳送至社會大眾。然而，劇烈天氣多半發生於局部區域，系統之空間與時間尺度都遠小於綜觀天氣，故爭取時效為此預警作業之第一要務。根據歐美先進國家氣象技術發展的經驗顯示，中尺度數值模式，是突破劇烈天氣預報瓶頸的最可能有利工具；其中，美國在極短時天氣監測、分析與預報發展上，皆居於領先地位；故職奉派前往美國海洋暨大氣總署所屬的預報系統實驗室(FSL, Forecast Systems Laboratory)，合作發展台灣地區中尺度模式短時預報系統 Taiwan Hot-Start MM5。此系統在即時、快速分析台灣地區之雷達、衛星、探空及地面觀測網等資料後，將立即進行非絕熱初始化及中尺度數值預報，有效改善傳統數值模式存在之模式調整問題(spinup problem)，增進極短時預報的成效。目標則期望發展台灣地區高效能的天氣預報技術，提升劇烈災變天氣的極短時預報能力。

二 過程

(一) 前往美國海洋暨大氣總署所屬之預報系統實驗室

(NOAA/FSL): 職是於台北時間 2002 年 1 月 22 日 18 時 30 分, 搭乘長榮航空 BR012 班機, 由中正國際機場飛往美國洛杉磯, 再由洛杉磯機場轉搭美國航空 AA1490 班機, 於丹佛時間 22 日 21 時 30 分, 抵達科羅拉多州之丹佛機場, FSL 特地安排孟繁村博士(Dr. Fanthune Moeng)到機場接機, 並帶領職前往所在地 Boulder。

(二) 在 FSL 工作過程概述: 職於抵達次日(1 月 23 日), 隨即加入「局地分析與預報系統發展」(Local Analysis and Prediction Branch)部門工作, 且於每週四 13 時 30 分參加部門會議; 會議中職固定就中央氣象局預報系統建置進度、所遭遇問題等提出報告, 積極與 FSL 同仁協調、交換意見, 促使合作計畫之執行過程順利且迅速。有關本計劃各項目的工作過程, 以下即逐月進行說明。

一月: 1 月 23 日至 31 日期間, 職首先詳細了解 LAPS 在中央氣象局及 FSL 的運作狀況, 並閱讀 LAPS 及 Hot-Start MM5 的相關論文。

二月: 在與 John Smart 及 Steve Albers 商討台灣地區 LAPS 的未來方向後, 確立除原有之 HP 平台系統外, 亦應將之建置於 Linux 平台上, 以提高系統可攜度; 職因此著手建置, 並在 FSL 進行作業測試。

三月: 在 Linux 平台作業測試台灣 LAPS 的同時, 職與 Brent Shaw 及 Paul Schultz, 於會議中就台灣 Hot-Start 系統交換意見後, 職即著手在 Linux 平台上, 建置台灣 Hot-Start MM5; 三月底完成基本建置, 並進行初步模擬測試。

四月: 完成台灣 LAPS 作業測試及修改工作, 並在 FSL 開始進行即時分析, 此外, 除持續進行 Hot-Start MM5 系統更新與模擬測試外, 職並於 4 月 22 日至 23 日參加由 USWRP(U.S. Weather Research Program)所主辦之第四屆科學研討會(4th USWRP Science Symposium), 職於會中觀摩到許多定量降水

預報(QPF)的新做法與概念。

五月：開始進行較高解析度之 Hot-Start MM5 模擬測試，實驗設計為二層巢狀網格，水平解析度分別為 9 公里與 3 公里；測試過程中發現，當台灣附近存在強對流時，非絕熱初始化的結果會有嚴重瑕疵，故職與 John McGinley、Brent Shaw 及 Paul Schultz 商討對策，並順利於六月中旬解決此問題。

六月：職於本月完成將 CWB NFS 模式資料，納入 Hot-Start MM5 軟體中的 pregrid 模組，此將有助於系統在台灣建置與運作。此外，有鑒於 WRF 模式將是下一代中尺度模式的主流，因此，職於 27 日至 28 日前往 NCAR 參加 WRF 模式訓練課程，學習並了解 WRF 目前的最新發展。

七月：本月 3 日及 9 日，台灣地區分別受雷馬遜(Rammasun)颱風及娜克莉(Nakri)颱風侵襲，所幸災情輕微，並因而紓解台灣地區旱象。職在 FSL 則同時進行此二颱風之 LAPS 分析與 Hot-Start MM5 預報測試；過程中發現，由於 LAPS 是使用另一區域模式的預報場當作分析背景場，故颱風的位置、強度與觀測值很可能不一致，為解決此一問題，職與 John McGinley 及 John Smart 討論後，決定由職進行平衡颱風植入工作。

八月：職開始著手進行颱風植入程序，並於九月間完成，納入 LAPS 軟體中，也使 LAPS 增加了颱風植入的新功能，但由於颱風植入問題複雜，故至今仍持續進行加強與修改。此外，中央氣象局氣象資訊中心人員已將七股、墾丁及花蓮都卜勒雷達資料準備就緒，FSL 也於本月份起，開始進行台灣地區多雷達分析的評估與測試。

九月：職使用颱風植入功能，重新針對雷馬遜及娜克莉兩颱風，及於本月 6 日至 7 日通過台灣北部海面之辛樂克颱風個案，進行 LAPS 分析及 Hot-Start MM5 模擬，測試此預報系統對颱風路徑及降水之極短時預報能力。

十月：有鑒於 Hot-Start MM5 之極短時降水預報，必須透過有系統的校驗，才能了解預報結果的特性與好壞，故職以全台灣地區的自動雨量站資料為基礎，試著建立定量降水預報的校驗工具，希望日後經由確實之校驗機制，加強、改進模式預報能力。此外，並與 FSL 人員針對十二月份前往本局進行極短時預報訓練問題，進行討論並整合訓練內容。

十一月：職挑選了本年度降水明顯的幾個個案，重新進行極短時預報測試，其中定量降水預報部分，則利用校驗系統，加以校驗，除了測試校驗系統運作狀況外，並了解 Hot-Start MM5 系統對台灣強對流個案的預報能力。此外，就颱風近中心結構仍無法正確解析的困難，持續與 FSL 人員討論尋求解決中，並討論未來儘可能再加入使用的資料，如：QuikSCAT、TRMM、SSM/I 等，以提升預報能力。

十二月：職將所有工作成果、LAPS、Hot-Start MM5 及 QPF 校驗等預報系統軟體，進行整理，預備回台灣後建置於中央氣象局。回程即按原計畫於 14 日 10 時 00 分，搭乘美國航空 AA1469 班機，由丹佛出發飛抵洛杉磯，然後在當地時間 15 時 30 分轉搭長榮航空 BR011 班機，於台北時間 15 日 21 時 30 分返抵中正機場，順利達成本年度計畫所交付之任務。

三 心得

近年來，中央氣象局(以下簡稱為本局)所擁有之氣象觀測資料量愈來愈多，種類更加多元化，資料之空間與時間解析度也持續提高；因此，有必要發展一套能即時吸收、融合各類資料之同化系統，幫助天氣預報員在有限的時間內，分析完所有氣象資料。此外，若將融合同化後之分析結果，作為中尺度模式的初始條件，進行數值天氣預報，預期將可有效提升短時與劇烈天氣之預報準確度。所以，本局秉持此概念，積極與美國 FSL 合作，發展 LAPS(Local Analysis and Prediction System) 非絕熱模式初始化技術(Diabatic Initialization)及後續之中尺度 MM5 模式數值天氣預報(Hot-Start MM5)。本章以下即逐步說明，此中尺度預報系統的理論架構與建置流程。

(一) LAPS 使用資料

LAPS 流程之第一部分，為引進各類型儀器的觀測資料，進行處理與整合。就本局目前已作業化、且持續建置中之 LAPS 為例，所使用的各類氣象資料如下。

1. 本局之 NFS 及 RE 區域預報模式，為 LAPS 的模式背景場。
2. 有關各種地面、洋面及高空觀測資料，都已進入 LAPS 分析過程。例如：台灣地區密集地面觀測網(surface mesonet) METAR 資料、浮標(BUOY)、船舶報告(SHIP)、綜觀觀測(SYNOP)及探空(sounding)等資料。
3. 衛星(GMS 5)資料部分，目前已使用 11 *mm* 之紅外線頻道及可見光頻道，進行三維雲分析。
4. 雷達觀測方面，現行分析已使用五分山雷達 Level II (wideband)、Level III(narrowband) 之回波場與徑向風場資料；同時亦開始著手測試，將墾丁、花蓮及台南七股雷達的觀測資料，也加入 LAPS 進行分析。
5. 目前亦接收、使用 ACARS(Aeronautical Radio Incorporated, Communications, Addressing and Retrieval System) 的飛機觀測資

料，可加強風場、溫度場及濕度場之分析。

這些觀測資料引進 LAPS 的過程，可參見圖 1 中以粗箭號標示之部分。此外，有關引進五分山雷達資料，可再參見圖 2，圖中方框區即說明 Level II 與 Level III 的資料處理流程。所有各類資料進入 LAPS 後，將分別先投影至分析區域網格點上，並產生預備資料檔，供後續之分析過程使用。此外，綜合圖 1 與圖 2 可知，LAPS 所能採用之資料種類繁多；以美國 NOAA/FSL 為例，他們另外還使用剖風儀(profiler)風場資料、RASS(Radio Acoustic Sounding System)溫度觀測、WSI/NOWRAD 雷達、雷達 VAD 風場、SODAR 資料、衛星 Sounder 及雲導出風場等。而台灣地區新建置之墾丁、花蓮及台南七股都卜勒雷達網，觀測資料也正逐步引進 LAPS 中，加強中尺度天氣分析與預報。

觀測資料進入系統後，LAPS 隨即進行各氣象場之中尺度分析，現行台灣地區分析之水平解析度為 5 公里，涵蓋範圍(圖 3)於東西向為 990 公里，南北向為 1230 公里(共 199 247 個水平網格點)；垂直由地面向上延伸至 100hPa，解析度為 50hPa，共有 21 層。LAPS 之大氣分析可歸納為五大部分，分別是風場、地面場、溫度場、雲及水氣場分析；而由於都卜勒雷達資料為 LAPS 分析之重要要素，因此，在介紹 LAPS 大氣分析之前，下節將先說明雷達資料的處理方法。

(二) LAPS 之都卜勒雷達資料處理

台灣地區 LAPS 分析，目前設定每六分鐘就引進一筆五分山雷達(NEXRAD radar)觀測資料，以便分析逐時之累積降水量；而每小時進行大氣分析計算時，所引進的資料，則與其他觀測結合，進行各類分析程序(雷達資料使用於風場、雲及水氣場分析)。以下即分別就回波場與徑向風場，敘述雷達資料如何進到 LAPS 的網格點。

1. 雷達回波：首先，以 LAPS 網格點為中心，取一立體箱形，大小為 $dx \cdot dy \cdot dp$ (台灣地區分析是 5km 5km 50hPa)；然後，將進到箱形內之所有仰角觀測回波值進行平均，定義為該網格點的雷達回波值，逐點計算後，即可得整個分析區域之回波場。下一步驟為移除雜波，方法是將計算所得之回波場與地形雜波場(ground clutter map，得自於晴空大氣條件)比較，並將分析回波強度大於地

形雜波 10dBz 以上的部分，認定為真正的天氣回波場。

2. 徑向風場：取出與回波場相同之立體箱形後，接著進行資料檢定，假若進入該立體箱形的資料量，少於總觀測仰角數的 40%(例如：共有 10 個仰角觀測，而進入該箱形之資料量少於 4 個仰角)，即認定此網格點的徑向風場資料漏失，檢定程序完成後，其他計算的方法、準則皆與回波場相同。

(三) LAPS 風場分析

LAPS 採用多次迴圈方式進行風場分析，以下即配合流程圖(圖 4； Albers, 1995)加以說明。第一迴圈首先讀進地面觀測(METAR、BUOP、mesonet、SHIP、SYNOP)、探空、飛機觀測、剖風儀等風場資料，透過背景高度場(來自背景模式，background model) 之輔助，將觀測的風向、風速資料置於分析網格點上，可得觀測內插風場；接著將模式背景風場也內插至 LAPS 區域網格點，稱之為第一猜測場(first guess)。再來是將觀測內插風場減去第一猜測場，結果定義為差量場，然後進行資料檢定(quality control)，使用的方法是，若差量值大於數值 T，則該筆觀測資料將被剔除，由此可知，T 值愈大，觀測值也愈易通過檢定，表示觀測資料愈可信；而 T 值的大小，隨不同觀測儀器有不同標準，其中，都卜勒雷達徑向風場之 T 值為 12m/sec、剖風儀為 22m/sec、飛機觀測與雲導出風場是 10m/sec、其他如 METAR、地面測站、探空、浮標與船舶報告則為 30m/sec。

檢定完成後，接著將差量場進行垂直上、下各一層之資料延展，所採用之垂直權重函數如(1)式；繼而利用 Barnes (1964)權重函數

$$v = e^{-\left(\frac{z}{r_v}\right)} \quad (1)$$

$$\left(z : \text{距觀測點垂直距離} \quad r_v = \frac{dp}{2} \quad dp = 50hPa \right)$$

(見(2)式)進行逐次修正法(Successive Correction)客觀分析；其中，使

影響半徑(r_h)於逐次計算中隨之減小，且每次分析之結果都當作為下一次分析之背景場，如此循環分析，將可逐步顯現出大氣之中、小尺度風場特徵。

$$w = vte^{-\left(\frac{s}{r_h}\right)^2} \quad (2)$$

(v ：垂直權重函數 s ：觀測點與網格間距離)

(r_h ：影響半徑 t ：資料型態參數(通常=1))

下一步驟則是將經客觀分析之差量場，加回第一猜測場(first guess)，可得初步三維風場。接下來為第一迴圈的最後步驟，但只在雙或多都卜勒雷達觀測時才會執行，方法為先篩選出同時具有 2 個或多個雷達徑向風觀測的網格點，將這些網格點之都卜勒風場資料，先與初步三維風場進行合併(作法同於第二迴圈，見下段說明)，再配合非雷達資料進行 Barnes 分析，所得結果即為第一迴圈風場。

繼續進入第二迴圈，此迴圈之主要目的為引進完整的都卜勒雷達三維徑向風資料。首先讀進雷達徑向風場，接著由第一迴圈風場推算出相對於雷達的切向風分量(見圖 5)，與徑向風進行合併；然後將合併風場再如同第一迴圈程序分析一次，即可得第二迴圈風場。上述合併風場的作法，同時也使用於第一迴圈的最後步驟；然而，假若 LAPS 分析區域中只有單都卜勒雷達觀測，則第一迴圈之最後步驟將被略過，而執行一次第二迴圈所得之風場，就是最終的風場分析結果。但若有雙或多雷達同時觀測時，則將藉第二迴圈風場，推導出第二個雷達的切向風分量，並與徑向風場結合，再進入第三迴圈分析。如此循環，直到所有雷達都計算完畢，才可得最終之三維水平風場。

LAPS 的功能除了大氣分析外，其亦計算許多實用的物理場，可作為天氣診斷與預報之參考。以下即使用圖 6，介紹由三維水平風場進一步推導所得的導出場。

1. 運動學垂直速度場：利用運動學原理，由水平風場計算輻散(合)

場，然後逐層垂直向上積分，在設定上、下邊界垂直運動為 0 之約束條件下，推算出垂直運動場。

2. 氣層平均風場(layer mean wind)：利用質量權重平均，計算地表至 300hPa 之氣層平均風，可大致代表對流層的平均駛流風場。
3. 風暴駛流風場：根據 Jackson and Albers (1992)的研究結果顯示，風暴的駛流風場可依對流回波強度，分為二種情形，其中，當對流的回波強度大於 30dBz 時，即使用風暴之質量中心運動軌跡，代表駛流風場；否則，就用氣層平均風場當作風暴之駛流風場。
4. Supercell 發展潛勢指數(Helicity)：用以判斷風暴對流胞(Supercell convection)的發展潛勢，一般而言，在風向隨高度順轉，且垂直風切大時，表示環境的 Helicity 較大，有利於風暴對流發展；Helicity 的計算方法如下；

$$H = \frac{\int_{z_1}^{z_2} v \cdot w_H}{(z_2 - z_1)} \quad (3)$$

(w_H ：水平渦度 v ：相對於風暴運動之風場)

5. 對流潛勢指數：利用地面層之 Lifted Index，乘上 600hPa 垂直運動，可用來表示對流潛勢指標(Doswell, 1982)；計算過程中，若遭遇大氣地面層為穩定($LI_{surface} > 0$)或中層為下沉運動($w_{600hPa} > 0$)，則皆令結果為 0，亦即，此產品強調顯現出不穩定區域的分布。

$$LI_{surface} \cdot w_{600hPa} = 0 \quad (4)$$

when ($LI_{surface} > 0$) or ($w_{600hPa} > 0$)

(四) LAPS 地面場分析

人們大部分時間都在地球近地表的範圍活動，所以，地面場之大氣資訊，直接與生活息息相關；LAPS 採用所有地面觀測站資料(包括 mesonet、METAR、BUOY、SHIP 等)，衛星 IR 頻道亮度溫度資訊，

並結合模式背景場，進行地面場分析。就觀測而言，地面與近地表的資料量一般皆多於中、高層大氣，且觀測之時間與空間解析度也較密集。換言之，每隔數分鐘，即可能有新資料加入分析系統，因此，資料同化、整合與檢定於地面場分析過程中相當重要。

LAPS 使用 Kalman Filter (Kalman, 1960 ; Kalman and Bucy, 1961) 方法，進行地面場之資料處理與檢定；此方法已廣泛應用於太空船訊

號之處理與控制，且亦逐漸為氣象界所引用，詳細的理論推導與計算方程式可參閱 Homlied (1995)、McGinley and Stamus (1996)及 McGinley (2001)。

經過資料整合與檢定之後，讀進背景模式地面資訊，當作第一猜測場，接著應用類似於風場分析之第一迴圈(見(三)節)與逐次修正客觀分析法，進行地面風場、溫度場、氣壓場及能見度分析。而能見度的分析結果，還必須與 LAPS 上一時間點計算之雲與水氣場進行比較，將觀測資料未能解析之高濕度區，與接近雲底區域的能見度降低。至於風場與氣壓場間之平衡，則採用變分法(見(5)式)，利用最小化下式 I 值的約束條件，促使風與氣壓滿足運動方程式。

$$\begin{aligned}
 I = \int_s [(u - \tilde{u})^2 + (v - \tilde{v})^2 + g(p - \tilde{p})^2 \\
 + \mathbf{d} \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{V}} \cdot \nabla \tilde{u} + \frac{1}{\mathbf{r}_0} p_x - fv + \tilde{F}_x \right) \\
 + \mathbf{d} \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{V}} \cdot \nabla \tilde{v} + \frac{1}{\mathbf{r}_0} p_y + fu + \tilde{F}_y \right)] ds \quad (5)
 \end{aligned}$$

(u, v : 風分量 $\tilde{\mathbf{V}}$: 水平風向量 p : 氣壓 \mathbf{r}_0 : 密度)

(f : 科氏參數 \mathbf{g}, \mathbf{d} : 變分調整參數 F : 摩擦力)

(s : 分析區域 $(\tilde{\quad})$: 代表該項來自第一猜測場)

上述 LAPS 地面場的分析程序，可歸納如圖 7。至於分析完成後之產品與其代號，則整理於表 1；而其中有二個較為特殊的產品，分別是體感溫度指數(heatidx)與火災潛勢指數(firewx)，以下即說明此二指數的定義及計算方法。

1. 體感溫度指數：夏季裡，當大氣同時也較為潮濕時，人們所感覺的溫度，往往高於實際氣溫，此即所謂之悶熱感；因此，當 LAPS 之地面氣溫分析值高於 23.9 (75)時，模式即會應用 Lans Rothfusz (NOAA/NWS)之經驗公式，計算體感溫度如下。

$$T=1.8*(T_k-273.15)+32 \quad (6)$$

(將絕對溫度(T_k)換算為華氏溫度(T))

$$\begin{aligned} H=&-42.379+(2.04901523*T)+(10.1433312*RH) \\ &-(0.22475541*T*RH)-(0.683783*10^{-3}*T^2) \\ &-(5.481717*10^{-2}*RH^2)+(1.22874*10^{-3}*T^2*RH) \\ &+(8.52*10^{-4}*RH^2*T)-(1.99*10^{-6}*T^2*RH^2) \end{aligned} \quad (7)$$

(T：華氏溫度 RH：相對濕度)

$$\text{heatidx}=273.15+(H-32)/1.8 \quad (8)$$

(再將單位由華氏溫度換算回絕對溫度)

表 1：LAPS 地面場分析產品

產品	說明	產品	說明
Ht	地形分布	vort_adv	渦度平流場
T	地面氣溫	omega	垂直速度場
Sfct	地表溫度	mssl_p	海平面氣壓
Td	露點溫度	stn_p	地面氣壓

Rh	相對濕度	red_p	參考高度氣壓
Wind	風向量	theta	位溫場
windspd	風速分布	thetae	相當位溫場
U	東西向風分量	wtblbo	濕球溫度場
V	南北向風分量	vsblty	能見度
Div	輻合(散)場	heatidx	體感溫度指數
Vort	渦度場	firewx	火災潛勢指數

2. 火災潛勢指數(firewx)：在天乾物燥的大氣環境下，森林區或空曠草原區有時容易發生火災；LAPS 同時考慮溫度、濕度、風速與土壤濕度等四個氣象變數，以條件式表列(見表 2)方法，計算火災潛勢指數，所得結果為介於 0 與 20 之間的整數，數值愈高即代表火災發生之潛勢較高。

表 2：森林火災潛勢指數計算表

得分	濕度 RH : %	風速 W : m/s	氣溫 T :	土壤濕度 S:%
1	50 RH<60	1.75<W 3.58	25<T 30	35 S<50
2	41 RH<50	3.58<W 5.36	30<T 35	20 S<35
3	33 RH<41	5.36<W 6.71	T>35	S<20
4	25 RH<33	6.71<W 8.05		
5	17 RH<25	8.05<W 9.39		
6	9 RH<17	9.39<W 10.73		
7	RH<9	W>10.73		

$$\text{firewx}=\text{濕度得分}+\text{風速得分}+\text{氣溫得分}+\text{土壤濕度得分} \quad (9)$$

若無土壤濕度資料，則

$$\text{firewx}=(\text{濕度得分}+\text{風速得分}+\text{氣溫得分})\times 1.075 \quad (10)$$

(五) LAPS 溫度場分析

溫度場為雲分析(見(六)節)的必要資訊，因此，在進行雲分析之前，必須先計算溫度場。完整的 LAPS 溫度場分析，是由模式背景溫度場、溫度觀測資料與 LAPS 地面溫度場，三大部分結合而成。其中，

就觀測而言，LAPS 所能整合之溫度資料繁多，例如：探空(sounding、RAOB)、地面測站(METAR、mesonet、BUOY、SHIP、SYNOP)、衛星(SSMT、SSMI、TOVS)、飛機(ACARS)及 RASS 等觀測，現行台灣地區溫度分析所採用的資料，以探空、地面測站與飛機觀測為主。

LAPS 溫度分析的流程，相當類似於風場分析之第一迴圈，以下即利用圖 8 加以說明。首先，讀進所有觀測溫度，並分別置於適當網格點，接著將模式背景溫度場(亦即第一猜測場)內插至分析網格上，且與觀測值相減，可得到差量場；然後進行簡單之資料檢定，以探空為例，若其中有一垂直層之溫度差量達 10 度以上，則該筆探空資料將整個被剔除。

檢定的程序完成後，就採用與風場分析相似的逐次修正(Successive Correction)法進行計算；過程中仍將每次分析結果當作下一次計算之背景場，且亦逐次縮小影響半徑，以凸顯大氣之中、小尺度溫度特徵。

在逐次修正法計算結束後，隨即將此差量分析場加回第一猜測場(模式背景溫度場)，即可得初步的分析結果。下一步驟是引進 LAPS 地面溫度分析場資料，進行邊界層溫度結構調整。LAPS 定義地表以上 50hPa 的範圍為邊界層，然後利用初步溫度分析場，經由內插可分別計算邊界層頂、邊界中間層(地表以上 25hPa 的位置)及地表之內插

溫度(此內插地面氣溫與地面場分析氣溫並不相同)；繼而以 LAPS 地面場分析之溫度(見(四)節)，減去內插地表氣溫，可得地表偏差場(以 bias 表示)，最後使用下述條件，重新定義 計算邊界層區之溫度值，即完成三維溫度場分析。至於 LAPS 之高度場，則是由溫度場透過靜力平衡關係式，進一步推算所得的產品。

1. 邊界層頂($T_{\text{sfc-50hPa}}$)：使用初步溫度分析場進行內插
2. 邊界中間層($T_{\text{sfc-25hPa}}$)：初步溫度內插結果+0.5*bias
3. 地表氣溫(T_{sfc})：使用地面場之溫度分析結果

(六) LAPS 雲分析

氣象衛星是目前觀測大氣雲分布之最佳工具，但是，只透過紅外線及可見光雲圖，我們仍不易獲知雲在大氣中立體分布的完整資訊。有鑑於此，LAPS 結合 METAR、飛機、衛星紅外線頻道(11 μm)、可見光頻道及都卜勒雷達之雲層觀測資料，配合 LAPS 溫度場與高度場分析結果(見(五)節)，進行三維雲分析(Albers et al., 1996)。以下即依分析程序，並搭配概念流程圖(圖 9)，逐步加以說明。

步驟一：將 METAR 及飛機之雲觀測報告(觀測示意圖可參見圖 10)，內插至 LAPS 網格點，組成初步分析，提供雲層之垂直與水平大致分布。

步驟二：引進模式背景場的雲液態水、雲冰、混合比等雲分布資訊，並使用一次迴圈之 Barnes 分析法，結合步驟一的觀測資料，進行逐層水平分析，可得初步三維雲結構；然後藉由 LAPS 之溫度及高度分析場((五)節)，推導出此初步雲結構的三維亮度溫度分布。

步驟三：利用衛星觀測之雲頂溫度值，調整步驟二所推導的初步雲結構。但由於衛星紅外線頻道，對於低雲的探測較不靈敏，因此，調整法則為，若飛機觀測或 METAR 報告的雲頂高度低於 800 公尺，則使用步驟二結果為雲頂溫度，亦即該區域不進行修正；反之，雲頂高於 800 公尺的區域，即利用衛星觀

測之雲頂溫度加以修正；換言之，步驟二中雲頂高於 800 公尺之雲厚度將因而改變，此調整程序完成後的結果，將之稱為「步驟三雲結構」。

步驟四：同樣使用衛星紅外線頻道觀測之雲頂溫度場，並配合 LAPS 之溫度場與高度場分析結果，推算出雲頂高度場，接著再去調整「步驟三雲結構」。此處之調整屬於雲系追加過程，可分為二種情況，一是原本步驟三就已分析出該處有雲，但雲頂低於衛星推算之雲頂高度值，此時，就在步驟三結果上方追加雲系；另一是衛星觀測有雲，但在步驟三中並未分析出來，則以衛星資料為主，在該處追加上雲系，此情況通常發

生於高雲族，追加時則假定雲厚度為 1500 公尺。本步驟計算完成後，亦先將結果稱為「步驟四雲結構」。

步驟五：引進雷達回波場資料，當雷達觀測到回波時(圖 10)，先以地形雜波場及其他天氣資料(衛星、地面觀測等)，進行假波與雜波濾除，然後，將回波高度高於雲底之部份，加入「步驟四雲結構」，加強雲分析。

步驟六：最後是引進衛星可見光頻道資料，修正雲覆蓋率。步驟一至五之三維雲分析，產品是以雲覆蓋(cloud cover，數值為 0~1)來表示，概念上則可解釋為「雲系在網格立體箱形內所占的比率」。當 LAPS 引進可見光資料後，先將其投影、內插至分析網格點上，繼而利用 Albers (1992)之訂正法，進行雲圖亮度修正，並推算出反照率與雲覆蓋率(產品為二維)。由於可見光資料的解析度高，且具有較佳之低雲顯示能力，因此，若步驟一至五分析之雲覆蓋值，高於可見光所推導的結果，即以可見光資料進行修正，完成後即可得最終之三維雲分析產品。

上述即為台灣地區現行之雲分析流程，然而，分析方法及引用資料，目前仍持續加強與改進。例如：美國 FSL 已逐漸發展引進 GOES 衛星 14.23 μm 、13.99 μm 及 13.31 μm 頻道資料，利用 CO₂ 片段計算

法(CO₂ Slicing method; Wylie and Menzel, 1989), 分析雲頂氣壓分布、雲頂溫度場及雲量。此外, 也研發利用 3.9 mm 頻道資料, 計算水氣、雲水或雲冰分布, 這些技術未來亦將陸續應用於台灣地區之雲分析。

LAPS 之雲分析產品, 除了雲覆蓋(cloud cover)以外, 尚有許多是得自於進一步之推導或計算(見圖 11), 本節以下即針對雲導出場產品進行綜合歸納。

1. 三維雲種(cloud type)研判: LAPS 之雲種分類, 是由雲的環境溫度, 以及相當位溫垂直梯度(亦即穩定度; $\frac{\partial q_e}{\partial z}$)等二要素來判斷。

其中, 相當位溫(q_e)是透過 LAPS 溫度分析場, 並假定雲區內為飽和的條件所計算而來; 雲種之判斷法則見表 3 所示, 以環境溫度高於 -10 , 且穩定度介於 -0.005 與 -0.001 之間為例, 此條件依表 3 所定義的雲種為積雲(CU), 對應的雲滴大小則為 18 mm。

表 3: LAPS 雲種分類與雲滴尺度定義表(以 S 代表 $\frac{\partial q_e}{\partial z}$)

T()	S > 0.001	-0.001 < S < 0.001	-0.005 < S < -0.001	S < -0.005
> -10	ST(12 mm)	SC(10 mm)	CU(18 mm)	CU/CB(25 mm)
T()	S > 0		S < 0	
-10 ~ -20	AS(10 mm)	AC(18 mm)		
T()	S > 0.0005	-0.0005 < S < 0.0005	S < -0.0005	
< -20	CS(10 mm)	CI(10 mm)	CC(10 mm)	

ST: 層雲 SC: 層積雲 CU: 積雲 CB: 積雨雲 AS: 高層雲 AC: 高積雲
CS: 卷層雲 CI: 卷雲 CC: 卷積雲(表三摘自 Albers, 1996)

2. 雲區垂直運動(cloud omega): 雲的所在位置、厚度及所屬雲種, 為定義雲區垂直運動之重要依據。若雲種分類屬於層雲族, 則雲內垂直運動採用定值(0.05m/sec); 若為積雲族, 則以拋物線形垂直分布來定義垂直速度, 而拋物線之振幅(亦即垂直運動值大小)與積雲

厚度成正比。此外，積雲內最大上升運動的位置，則設定在雲底向上加三分之一雲厚之高度，至於積雲之上升運動垂直範圍，向上可達雲頂，向下則延伸至雲底以下三分之一雲厚的位置。

3. 雲水(cloud liquid water)與雲冰(cloud ice)分析：此產品依雲覆蓋值，共可分為二種計算模式，一是當雲覆蓋高於 0.65 時，即把網格點垂直之熱力結構(可視為 LAPS 之分析探空)，輸入 Smith-Feddes 模式(Haines 修改版，Haines et al., 1989)，進行雲水與雲冰之計算；另一為雲覆蓋低於 0.65 時，則由雲之光厚度(optical depth, t)與雲滴大小(drop size)來計算。首先，由雲之光厚度定義散射係數(scattering coefficient, s)如下：

$$s = \frac{t}{ds} \quad (11)$$

(ds ：雲的幾何厚度)

然後，將雲水或雲冰粒子的直徑(D)，代入(12)式計算雲滴粒子之數量密度(number density, N)，即可計算出雲水及雲冰的混合比。

$$N = \frac{s}{p(0.5D)^2} \quad (12)$$

(s ：散射係數 D ：雲粒子直徑)

4. 降水型態與累積雨量分析：LAPS 使用雷達回波觀測及濕球溫度(由溫度場與濕度場進一步推導所得)，進行降水型態之診斷分析；首先，計算出雷達觀測之最高回波高度(echo top)，假若該高度之濕球溫度低於 -6 ，則該高度的降水型態為雪，反之即為雨。但當降水粒子從高空飄下，若沿途經過濕球溫度高於 1.3 之環境(使用 1.3 是考慮溶化過程的時間延遲)，則雪就溶化成雨；若雨滴又進入低於 0 之環境，則形成凍雨。此外，若 LAPS 分析之雷達回波強度高於 45dBz (LAPS 分析值為經內插結果，故實際應高於

45dBz), 即診斷降水型態為冰雹(hail)。而至於累積降雨量之計算, LAPS 僅單純使用雷達回波, 透過 Marshall Palmer 關係式(Z-R relationship, 見(13)式)進行估計。

$$Z=200 R^{1.6} \quad (13)$$

(Z: 回波值 dBz R: 降雨強度 mm/hr)

(七) LAPS 水氣場分析

當 LAPS 之風場、地面場、溫度(高度)場及雲分析都完成後, 才可進行下一步驟之水氣場分析, 因為, 計算過程中將需引用地面場、溫度場與雲分析的產品。基本上, 水氣分析採用的是變分法(variational method), 以下即配合圖 12 之分析示意圖加以說明。

首先, 相似於 LAPS 的其他分析, 使用模式背景場之水氣分布, 當作第一猜測場(first guess); 接著, 以類似 Barnes 之客觀分析法, 引進探空及 RAOB 資料, 然後利用 LAPS 地面場之水氣分析結果, 調整邊界層水氣結構, 所得之初步結果以「BACK」表示。

水氣分析之另一主要資料來源為衛星觀測, 因此, 美國 FSL 將 GOES-8 衛星的第三頻道(6.7 μm) 觀測結果, 透過一 forward model (Hayden, 1988), 以及變分法計算程序(Birkenheuer, 2000; 即(14)式的第一項), 引進 LAPS 之水氣場分析, 校驗結果顯示, 其對於高對流層(500hPa 以上)的水氣分析有很大幫助(Birkenheuer, 1999)。除此之外, LAPS 還可引用 GOES 衛星之可降水量導出資料(GVAP, GOES-derived layer precipitable water data)、全球定位系統之水氣資料(GPS data, Global Positioning System vapor delay data)及 LAPS 之雲分析結果, 利用(14)式進行變分法演算, 以最小化 J 值之約束條件, 去調整「BACK」場(詳請參閱 Birkenheuer, 2001), 以求得最佳之水氣分析場。在(14)式中, 除「BACK」場之外, 每項都有一係數 S , 此為代表有無該項資料的開關(有資料為 1, 無為 0), 以台灣地區而言, 由於缺乏 GOES 衛星資料, 故 S_{sat} 、 S_{GPS} 及 S_{GVAP} 皆為 0, 因此, 目前僅使用「BACK」場及 LAPS 雲分析結果, 進行台灣地區水氣場分析。

$$\begin{aligned}
J = & S_{sat} \sum_{k=3}^5 \frac{GT(g_k)[R(t, cq, o_3)_k - R_k^0]^2}{E_{sat}^2 L_{sat}} + \sum_{i=1}^N \frac{(1-c_i)^2}{E_{BACK}^2} \\
& + S_{GPS} \frac{(\sum_{i=1}^N c_i q_i - Q^{GPS})^2}{E_{GPS}^2 L_{GPS}} \\
& + S_{GVAP} \sum_{j=1}^3 \frac{G(g)(\sum_{i=1}^N P_{ji}(c_i q_i - Q_j^{GVAP})^2)}{E_{GVAPj}^2 L_{GVAP}} \\
& + S_{CLD} \sum_{i=1}^N \frac{g_i [c_i q_i - q_s(t_i)]^2}{E_{CLD}^2 L_{CLD}} \tag{14}
\end{aligned}$$

(14)式中之各符號、係數說明如下：

c_i ：水氣場之向量係數(coefficient vector)

q ：LAPS 網格點之比濕(specific humidity)

R^0 ：GOES-8 衛星 6.7 mm 頻道觀測之輻射量

R ：利用 forward model 計算之輻射量

i ：代表 LAPS 網格垂直層之係數

k ：代表衛星頻道；3 為 6.7 mm 水氣頻道，4、5 為 11 mm、12 mm 之 IR 頻道，此二 IR 頻道將於 forward model 計算過程中，用於雲區校驗(Birkenheuer, 1999)

Q^{GPS} ：由 GPS 所量測推導之可降水量

E ：誤差函數(error function)

L ：為權重項(weighting term)

- P : 將氣壓座標轉為 s 座標的函數
- Q^{GVAP} : 由 GOES 衛星資料推導之可降水量
- j : 代表那一層之 GVAP, 目前分為 3 層(3 為最高層)
- CLD : 定義雲區之函數, 來自 LAPS 雲分析
- t : LAPS 之溫度分析場資料
- S : 資料有無, 或是否進行該項計算的開關係數
- q_s : 飽合比濕
- g : 雲量指標參數
- G : 雲量指標函數, 由於衛星 GVAP 觀測會受雲量干擾, 故用 G 函數考慮雲量因素; 然而, GPS 觀測並不受雲量影響, 所以不須使用 G 函數
- GT : 同於 G , 但為 GOES-8 衛星 3~5 頻道之雲量指標函數

(八) 中尺度模式之非絕熱初始化(Diabatic Initialization)

目前的數值天氣預報模式, 模擬初始場一般都沒有大氣垂直運動與雲的資訊。因此, 模式開始積分後, 常需花費數小時的時間, 讓模式之物理過程自行調整、產生雲雨與垂直運動場(即 spinup process), 此對短時天氣預報(尤其是劇烈天氣)確實造成極大阻礙。然而, 世界各國絕大多數之數值天氣預報中心, 普遍都為此問題所困擾, 故如何將雲、雨與大氣垂直運動, 引進模式初始場, 一直是大氣科學家們努力的目標。

自然界的雲, 代表著大氣運動與環境條件之綜合產物, 故理想的雲雨初始化過程, 必須同時考慮風場、溫度、氣壓、水氣及雲物理等多項因素; 而 LAPS 之三維雲分析產品((六)節, Albers et al., 1996; Birkenheuer et al., 2001), 正可提供完整的大氣雲資訊, 有效增進短時天氣預報之準確度。以美國 NOAA/FSL 為例, 目前已建置完成 MM5 與 RAMS 模式之非絕熱初始化過程(MM5 已進入作業化), 未來則將持續引用於 ARPS 及 WRF 模式; 而本局也正積極建置「MM5 非絕熱數值預報」, 以加強劇烈天氣預警與短時天氣預測, 本節以下即配

合流程圖(圖 13)，闡釋 LAPS 之非絕熱初始化過程。

1. 引用 LAPS 三維雲分析產品：非絕熱初始化所需之雲水、雲冰、降水型態與雲區垂直運動場，都來自 LAPS 雲分析，故三維雲分析是首要且不可或缺的前置步驟。在此，僅就雲區垂直運動場再進行說明，其餘如雲水、雲冰混合比之計算，可參閱本文(六)節。LAPS 以雲的環境溫度即穩定度判別雲種，然後再由雲種定義雲區垂直運動，其中，積雲族的垂直運動隨高度呈拋物線形分布，積雲愈厚，則上升運動愈強，圖 14(摘自 Schultz and Albers, 2001)即為 1000 公尺、3000 公尺與 5000 公尺厚之積雲上升運動垂直分布示意圖，顯示上升運動區可延伸至雲底以下三分之一雲厚的高度；而若為層雲族，即設定具有 0.05m/sec 之微弱上升運動；降雨區則考慮可能有降水粒子所引發之下降氣流，故未設定垂直運動。當由雲分析獲取三維雲區垂直運動場後，接著就進入下一程序「質量場與動量場之平衡調整過程」，促使模式初始場滿足動力平衡。
2. 質量場與動量場平衡調整：此步驟是將 LAPS 風場分析、地面場分析與雲分析所得之三維動量場，與 LAPS 溫度(高度)場分析之三維質量場(換算為重力位高度，)，利用變分法進行客觀分析 (Variational Objective Analysis Scheme; McGinley and Smart, 2001; McGinley, 1987; McGinley, 1982)，使其同時滿足運動定律及質量保守，所採用之計算公式推導如下：

$$\begin{aligned}
 I = & \sum \sum \sum (u - \tilde{u})^2 + (v - \tilde{v})^2 + t(\mathbf{w} - \tilde{\mathbf{w}})^2 + \mathbf{g}(\Phi - \tilde{\Phi})^2 \\
 & + \mathbf{a}(N\tilde{u} - f\tilde{v} + \Phi_x)^2 + \mathbf{a}(N\tilde{v} + f\tilde{u} + \Phi_y)^2 \\
 & + \mathbf{I}(u_x + v_y + \mathbf{w}_p)
 \end{aligned} \tag{15}$$

其中，

下標 x 、 y 、 p 分別代表在東西向、南北向及垂直方向上之微分
 N 為運算子 $\frac{\partial}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial}{\partial x} + \tilde{v} \frac{\partial}{\partial y} + \tilde{\mathbf{w}} \frac{\partial}{\partial p}$

與 \mathbf{I} 為誤差係數，取決於資料來源之特性(Bloom, 1983)

為動力權重係數，使用於計算動量剩餘項(McGinley, 1987)

為 Lagrange 係數，用於滿足質量連續定律(McGinley, 1987)

對(15)式取微分，即

$$\begin{aligned}
dI = & \sum \sum \sum 2(u - \tilde{u})du + 2(v - \tilde{v})dv \\
& + 2t(\mathbf{w} - \tilde{\mathbf{w}})d\mathbf{w} + 2g(\Phi - \tilde{\Phi})d\Phi \\
& + 2\mathbf{a}(N\tilde{u} - fv + \Phi_x)(-fdv + \frac{d\Phi_{i+1}}{\Delta x} - \frac{d\Phi}{\Delta x}) \\
& + 2\mathbf{a}(N\tilde{v} + fu + \Phi_y)(fdu + \frac{d\Phi_{j+1}}{\Delta y} - \frac{d\Phi}{\Delta y}) \\
& + \mathbf{l}(\frac{du - du_{i-1}}{\Delta x} + \frac{dv - dv_{j-1}}{\Delta y} + \frac{d\mathbf{w} - d\mathbf{w}_{k+1}}{\Delta p}) \\
& + d\mathbf{l}(u_x + v_y + \mathbf{w}_p) \tag{16}
\end{aligned}$$

重新整理(16)式，且令 $dI = 0$ ，則可得下列方程組 (詳見 McGinley, 1987 之附錄)

$$\begin{aligned}
\nabla^2 \Phi - \frac{2f\mathbf{b}\mathbf{a}}{A}\Phi_y - \frac{g}{\mathbf{a}}A\Phi = & -\frac{g}{\mathbf{a}}A\tilde{\Phi} - (N\tilde{v})_y - (N\tilde{u})_x \\
& + f\tilde{z} - \frac{\mathbf{l}_x \mathbf{b}}{2A} - \mathbf{b}\tilde{u} + \frac{2f\mathbf{b}\mathbf{a}}{A}N\tilde{v} \tag{17}
\end{aligned}$$

$$\nabla^2 \mathbf{l} + \frac{A}{t}\mathbf{l}_{pp} = -2(\tilde{u}_x + \tilde{v}_y + A\tilde{\mathbf{w}}_p) + 2f\mathbf{a}((N\tilde{v})_x - (N\tilde{u})_y) \tag{18}$$

$$u = (\tilde{u} - f\mathbf{a}(N\tilde{v} + \Phi_y) + \frac{\mathbf{l}_x}{2})/A \tag{19}$$

$$v = (\tilde{v} + f\mathbf{a}(N\tilde{u} + \Phi_x) + \frac{\mathbf{l}_y}{2}) / A \quad (20)$$

$$\mathbf{w} = \tilde{\mathbf{w}} + \frac{t\mathbf{l}_p}{2} \quad (21)$$

其中 $A=1+f^2$ $=f_y$ 為相對渦度

此方程組共包含 5 個方程式，5 個未知數 (Φ 、 u 、 v 、 \mathbf{w} 、 \mathbf{l})，可藉以進行質量場與動量場之平衡計算。而值得特別說明的是，FSL 的非絕熱初始化過程，除使用 LAPS 分析場結果外，也同時考慮了模式背景場資訊，因此，首先代入方程組之變數為差量場(LAPS 分析場扣除模式背景場)，以下即按步驟闡釋平衡場的計算方法。

步驟一：先不考慮(17)式中的 \mathbf{l} ，將 \tilde{u} 、 \tilde{v} 、 $\tilde{\Phi}$ 、 $\tilde{\mathbf{z}}$ 等各差量場代入(17)式，利用 relaxation method 解出新的差量場 Φ_D 。

步驟二：同樣先不考慮 \mathbf{l} ，將步驟一所得之 Φ_D 分別代入(19)式與(20)式，可解出另一組差量場 u_D 與 v_D 。

步驟三：將 Φ_D 、 u_D 、 v_D 分別加回模式背景場(以下標 B 表示)，即可得 $\tilde{\Phi}(\Phi_D + \Phi_B)$ $\tilde{u}(u_D + u_B)$ $\tilde{v}(v_D + v_B)$ 。

步驟四：將步驟三之 $\tilde{\Phi}$ 、 \tilde{u} 、 \tilde{v} ，配合 LAPS 雲分析的 $\tilde{\mathbf{w}}$ ，代入(18)式後，使用 relaxation method 算出 \mathbf{l} 。

步驟五：將上一步驟之 \mathbf{l} ，與 $\tilde{\Phi}$ 、 \tilde{u} 、 \tilde{v} 及 $\tilde{\mathbf{w}}$ 場，同時代入(17)、(19)、(20)、(21)式計算，即可得平衡之動量場 (u, v, \mathbf{w}) 與質量場 (Φ)。

進行完上述平衡計算後，接著必須再檢查一次雲區之相對濕度值；由於此平衡過程有時會暖化部分雲區，導致該雲區的濕度降低而呈現未飽和(Schultz and Albers, 2001)，故最後將該部分雲區之相對濕度設回 100%，就完成中尺度模式之非絕熱初始化過程。

(九) “Hot-Start”中尺度模式(MM5) 極短時數值天氣預報

現行數值天氣預報，於剛開始積分數小時期間，普遍均存在著模式調整問題(spinup problem；Girard and Jarraud,1982；Heckley,1985；Miyakoda et al.,1978；Donner,1988)，嚴重影響且降低了中尺度模式的極短時數值預報能力。Mohanty et al.(1986)即闡釋，絕大多數天氣預報模式的調整問題，皆是由於模式積分初期，無法正確掌握大氣凝結及潛熱釋放過程。歸咎其原因主要有二，一為大氣之觀測網，不足以解析大氣濕度及輻合(散)場分布；另一則為大部分模式初始化模組，皆使用絕熱初始化過程，導致雲、雨等重要非絕熱資訊，無法引進模式初始場。然而，根據 Tarbell et al.(1981)的估計，大氣中只要發生約 1cm/hr 之降水率，非絕熱項在 W 方程中即扮演著主要角色，顯見非絕熱效應在模式初始化過程的重要性。

有鑒於雲、雨等非絕熱過程，對數值模式積分初期的準確度有很大影響；故過去曾有多位學者投入非絕熱初始化研究，試圖解決模式的調整問題。如 Krishnamurti et al.(1991)即使用實際觀測的降水率，以積雲對流參數化進行倒退計算，藉以反推求取大氣中水氣及潛熱之垂直分布，然後將之引進模式初始場進行預報，結果顯示，此法可有效加強模式積分初期的降水率，並縮短模式調整時間。Harms et al.(1993)則使用類似於 Krishnamurti et al.(1991)的方法，先求出初始時間之潛熱垂直分布後，引進垂直正模初始化系統(Vertical normal-mode initialization)進行分析，以加強初始場的非絕熱資訊。此外，除利用降水率反推潛熱分布外，過去亦有多位學者透過觀測進行非絕熱分析；如 Puri and Miller(1990)即使用衛星 OLR(Outgoing Longwave Radiation)資料推算潛熱垂直分布；Raymond et al.(1995)利用 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)資料計算雲水、雲冰之垂直分布；Ruggiero et al.(1996)則以觀測降水量、估計之雲頂高度，配合大氣熱力場、運動場推算層狀降水區的潛熱垂直分布。他們的研究結果亦顯示，若將非絕熱資訊引進模式初始場，將可提升模式積分初期之降水預報能力。

綜合上述研究可知，建立愈接近真實大氣的模式初始場，將是突破極短時數值天氣預報的重要關鍵；因此，本局與美國海洋暨大氣總署之預報系統實驗室合作，發展先進之中尺度資料整合系統(LAPS)，

運用台灣地區雷達觀測網、衛星、及其他觀測資料，建立三維大氣分析場(詳見本文(一)至(七)節)；並利用一非絕熱初始化模組，快速地進行模式初始化(見本文(八)節)，以提供中尺度模式實施極短時數值天氣預報，我們稱此流程為”Hot-Start”。相較於傳統之數值預報(稱為 Cold-Start)，Hot-Start 已將雲水、雲冰、雲內垂直運動等微物理資訊，納入模式初始場，故預期可有效解決傳統數值預報的調整問題。

職此次奉派出國的主要任務，即是與 FSL 合作建置、發展台灣 Hot-Start MM5 預報系統；目前從最上游的天氣觀測資料整合分析(LAPS)、模式非絕熱初始化，至 MM5 極短時預報之完整 Hot-Start 流程(見圖 15)，都已在 Linux 平台上完成雛型預報系統建置。有關數值模式之參數設計，以下即分項說明之。

1. 模式架構：採用水平解析度分別為 9 公里與 3 公里之二層巢狀網格，垂直為 30 層沿地形起伏之 S 坐標層(圖 16)，外、內層的網格點配置為 153 141 30 及 151 151 30，積分時間步長各為 27 秒與 9 秒。二巢狀層間應用 Two way nesting 功能，使積分結果相互回饋。邊界條件方面，側邊界使用 relaxation/inflow-outflow 計算法，資料則來自 CWB/NFS 模式(見圖 16 中之 pregrid_cwb)；下邊界海溫部分使用 NCEP 日海溫資料；上邊界則應用輻射邊界條件，以減少、阻止波動的能量反射回模式內部。
2. 模式物理過程：Hot-Start MM5 使用的模式初始場，為經非絕熱初始化之 LAPS 分析結果，預報則以中尺度天氣系統的演變為主(最外層網格水平解析度為 9 公里)，故積分過程不採用積雲參數化，直接使用 Schultz 微物理過程 (Schultz,1995)；積分過程並利用淺積雲對流參數化，模擬不降雨之淺對流系統，行星邊界層參數化採用 MRF 法，其為改良自 NCEP MRF 模式中之邊界層參數化(Hong and Pan,1996)，適合進行高解析之 PBL 模擬；地面層使用五層土壤模式(5-layer soil model)，輻

射參數化則使用較高效率之 RRTM(Rapid Radiative Transfer Model, Mlawer et al.,1997)計算。

初步測試結果顯示，上述模式設計與物理過程參數，有能力掌握台灣地區之強對流天氣系統，但有許多個案預報的對流降水有過強現象，目前仍持續與美方進行討論，以進一步提高預報能力。

(十) 颱風渦旋植入(Tropical Cyclone Bogussing)

颱風是台灣地區劇烈天氣預報的重點項目，而現行的 Hot-Start 流程中，LAPS 是使用另一數值模式的預報場(台灣 LAPS 使用 CWB/NFS 模式)，當作中尺度分析的背景場。因此，當有颱風存在分析區域內時，颱風的位置、強度很可能與觀測值不同(不論背景模式是否進行颱風渦旋植入)，影響颱風風雨之預報準確度。為促使 LAPS 分析結果，及 Hot-Start MM5 初始場中的颱風位置、強度更接近實際，故於進行 LAPS 大氣分析前，新增一颱風渦旋植入功能，先在背景模式資料中，調整颱風的位置與強度，做法說明如下：

步驟一：以颱風觀測位置為中心點，設定一分析區域(目前以颱風的七級風暴風半徑為分析區域半徑)。

步驟二：將該分析區域中之原模式資料移除。

步驟三：依下述程序植入三維平衡颱風渦旋：

1. 以三維 Rankine 渦旋結構決定風場。
2. 由 1 之風場，利用非線性平衡方程計算質量場。
3. 使用 2 之質量場及靜力平衡關係式，決定溫度場。
4. 再由溫度場及露點溫度場計算出相對溼度場。

5. 計算完成後，將平衡之風場、質量場、溫度場及溼度場，置入分析區域。

此颱風植入功能，對於颱風侵襲台灣地區時之風力與雨量預報，可能相當重要，職目前已完成初步建置，並以本年度之雷馬遜颱風(Rammasun)及娜克莉颱風(Nakri)進行測試成功(圖 17)；未來將再進一步研究應用於颱風預報的效果，並持續修改、加強。

四 建議

劇烈天氣之極短時天氣預報，為落實氣象防災、減災的重要工作；就台灣地區地理特性而言，劇烈降水所引發之土石流、山崩與淹水等，正是當前造成人民生命財產損失的主要天然災害。因此，做好定量降水預報，為氣象界所共同面臨的挑戰與任務。職本年度奉派與NOAA/FSL合作發展台灣地區中尺度模式短時預報系統(Hot-Start MM5)，已就台灣地區天氣特性與需求，完成初步建置；然而，極短時天氣預報與定量降水預報的問題極為困難且複雜，惟有不斷研究、改進，才能持續提升預報準確度，職就研究之心得有以下幾點淺見提

供參考。

1. 建立定量降水預報(QPF)即時校驗系統：中尺度模式之 Hot-Start 雨量預報結果，必須透過真實、確實的校驗，才能掌握模式預報特性與誤差，並加以改進；因此，建議應以全台灣地區自動雨量站觀測資料為基礎，建立模式 QPF 預報之即時校驗系統，作為預報系統改進之依據。
2. Hot-Start WRF 模式：WRF(Weather Research and Forecast)模式，為下一代中尺度模式的主流，美國 NCAR、NOAA/FSL 等機構目前正積極發展；WRF 未來的目標，將建構為大氣、海洋及化學偶合之全方位中尺度模式，預期對颱風、空氣品質的預報有很大助益，故建議未來積極發展台灣地區 Hot-Start WRF 預報系統。
3. 加強颱風 QPF 研究：颱風降雨為台灣地區重要的水資源，但劇烈降水亦可能造成重大災害，故惟有精確掌握颱風侵台時之降雨時空分布，才能把颱風災害降至最低。就台灣地理環境來說，颱風侵台之路徑、強度、結構、地形因素、環境大氣條件(垂直風切、中緯度天氣系統)等，都是影響颱風降水預報準確度的重要因子，這些複雜的問題，應可利用高解析度中尺度模式，及統計模式加強研究，以提升颱風 QPF 能力。
4. 建立中尺度模式系集預報(Ensemble Forecast)：利用 Hot-Start MM5、WRF 等中尺度模式預報結果，進行系集預報，為提升極短時預報準確度的有效途徑。因此，建議可朝兩個方向建置系集預報系統，一為利用同一中尺度模式，數種不同模式初始場之預報結果，進行系集預報；另一則是以經非絕熱初始化之初始場為基礎，同時 Hot-Start 多種中尺度模式，並將結果進行系集預報，相信亦可加強劇烈天氣之極短時預報能力。

參考文獻：

- Albers, S., 1992 : Photometric correction of GOES visible satellite images. *6th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography*, Atlanta, GA. Amer. Meteor. Soc., 223-225.
- - - - ,1995 : The LAPS wind analysis. *Wea. Forecasting*, **10**, 342-352.
- - - - , J. McGinley, D. Birkenheuer, and J. Smart, 1996 : The Local Analysis and Prediction System(LAPS) : Analyses of clouds, precipitation, and temperature. *Wea. Forecasting*, **11**, 273-287.

- Barnes, S. L., 1964 : A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *J. Appl. Meteor.*, **3**, 396-409.
- Bloom, S. C., 1983 : The use of dynamical constraints in the analysis of mesoscale rawinsonde data. *Tellus*, **35A**, 363-378.
- Birkenheuer, D., 1999 : The effect of using digital satellite imagery in the LAPS moisture analysis. *Wea. Forecasting*, **14**, 782-788.
- - - - - , 2000 : Progress in applying GOES-derived data in local data assimilation. *10th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography*, Long Beach, CA, Amer. Meteor. Soc., 70-73.
- - - - - , 2001 : Utilizing variational methods to incorporate a variety of satellite data in LAPS moisture analysis. *11th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography*, Madison, WI, Amer. Meteor. Soc., 273-276.
- - - - - , B. Shaw, S. Albers, and E. Szoke, 2001 : Evaluation of local-scale forecasts for severe weather on July, 20, 2000. *14th Conf. on Numerical Weather Prediction*, Ft. Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., 81-84.
- Donner, L. J., 1988 : An initialization for cumulus convection in numerical weather prediction models. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 377-385.
- Doswell, C., 1982 : The operational meteorology of convective weather. Volume 1: operational mesoanalysis. NOAA Tech. Memo. NWS NSSFC-5, 172pp.
- Girard, C., and M. Jarraud, 1982 : Short and medium range forecast differences between a spectral and grid point model : An extensive quasi-operational comparison. Tech. Rep. 32, 176pp.
- Haines, P. A., J. K. Luers, and C. A. Cerbus, 1989 : The role of the Smith-Feddes model in improving the forecasting of aircraft icing. *3rd Conf. on Aviation Weather System*, Anaheim, Cal, Amer. Meteor. Soc., 258-263.
- Harms, D. E., R. V. Madala, S. Raman, and K. D. Sashegyi, 1993 : Diabatic initialization tests using the Naval Research Laboratory limited-area numerical weather prediction model. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3184-3190.
- Hayden, C. M., 1988 : GOES-VAS simultaneous temperature-moisture retrieval algorithm. *J. Appl. Meteor.*, **27**, 705-733.
- Heckley, W. A., 1985 : Systematic errors of the ECMWF operational forecasting model in tropical regions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 709-738.

- Homlied, M., 1995 : Diurnal corrections of short-term temperature forecasts using the Kalman filter. *Wea. Forecasting*, **10**, 689-707.
- Hong, S. -Y., and H. -L. Pan, 1996 : Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- Jackson, M., and S. Albers, 1992 : Application of a local data analysis and product system to short-term convective forecasting. *Fourth AES/CMOS Workshop: Forecasting in the Nineties*, Whistler, B. C., Canada, Canadian Air Weather Service, 235-244.
- Kalman, R., 1960 : A new approach to linear filtering and prediction problems. *Trans. ASM, Ser., D, J, Basic Eng.*, **82**, 35-45.
- - - - , and R. Bucy, 1961 : New results in linear filtering and prediction theory. *Trans. ASM, Ser., D, J, Basic Eng.*, **83**, 95-108.
- Krishnamurti, T. N., J. Xue, H. S. Bedi, K. Ingles, and D. Oosterhof, 1991 : Physical initialization for numerical weather prediction over the tropics. *Tellus*, **43AB**, 53-81.
- McGinley, J. A., 1982 : A diagnosis of Alpine lee cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1271-1287.
- - - - - , 1987 : A variational objective analysis system for analysis of the AIPEX data set. *Meteor. Atmos. Phys.*, **36**, 5-23.
- - - - - , and P. Stamus, 1996 : A quality control scheme for local mesonet observations based on the Kalman Filter. *15th Conf. on Weather Analysis and Forecasting*, Norfolk VA, Amer. Meteor. Soc., 223-226.
- - - - - , 2001 : Toward a surface data continuum: Use of the Kalman filter to create a continuous, quality controlled surface dataset. *18th Conf. on Weather Analysis and Forecasting*, Ft. Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., 127-131.
- - - - - , and J. R. Smart, 2001 : On providing a cloud-balanced initial condition for diabatic initialization. *14th Conf. on Numerical Weather Prediction*, Ft. Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., 40-44.
- Miyakoda, K., R. F., Stricker, and J. Chludinsky, 1978 : Initialization with the data assimilation method. *Tellus*, **30**, 32-54.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997 : Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere : RRTM, a validated

correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102(D14)**, 16663-16682.

Mohanty, U. C., A. Kasahara, and R. Errico, 1986 : The impact of diabatic heating on the initialization of a global forecast model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 805-817.

Puri, K., and M. J. Miller, 1990 : The use of satellite data in the specification of convective heating for diabatic initialization and moisture adjustment in numerical weather prediction models. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 67-93.

Raymond, W. H., W. S. Olson, and G. Callen, 1995 : Diabatic forcing and initialization with assimilation of cloud water and rain water in a forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 366-382.

Ruggiero, F. H., K. D. Sashegyi, R. V. Madala, and S. Raman, 1996 : Diabatic initialization of stratiform precipitation for a mesoscale model. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 1111-1128.

Schultz, P., 1995 : An explicit cloud physics parameterization for operational numerical weather prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3331-3343.

---, and S. Albers, 2001 : The use of three-dimensional analyses of cloud attributes for diabatic initialization of mesoscale models. *14th Conf. on Numerical Weather Prediction*, Ft. Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., J122-J124.

Tarbell, T. C., T. T. Warner, and R. A. Anthes, 1981 : An example of the initialization of the divergent wind component in a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 77-95.

Wylie, D., and P. Menzel, 1989 : Two years of cloud cover statistics using VAS. *J. Climate Appl. Meteor.*, **2**, 380-392.

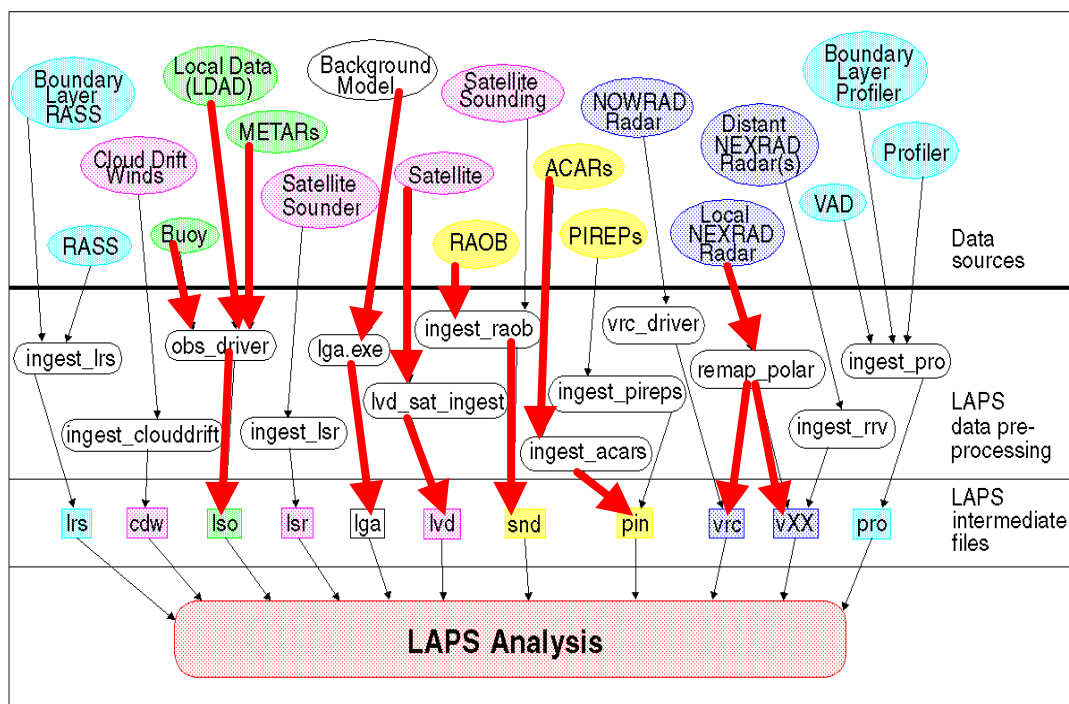


圖 1. LAPS 引進各類資料之流程圖，由中氣象局所傳回之資料以紅箭頭表示

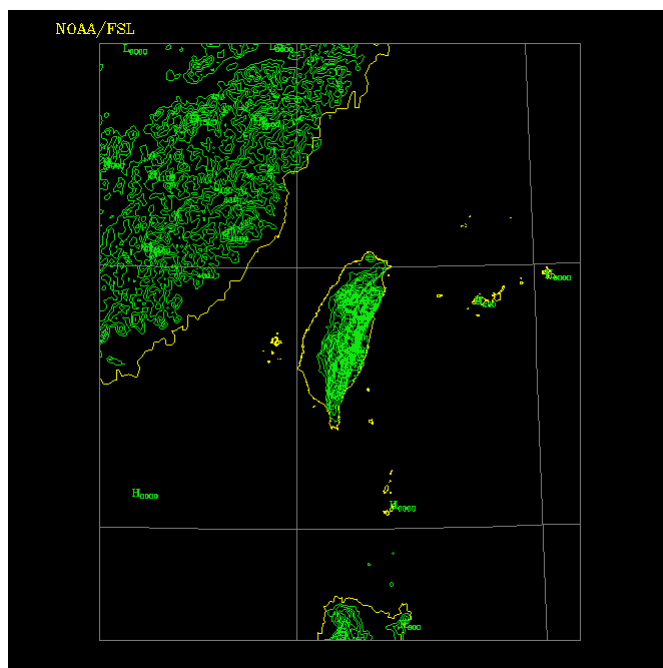
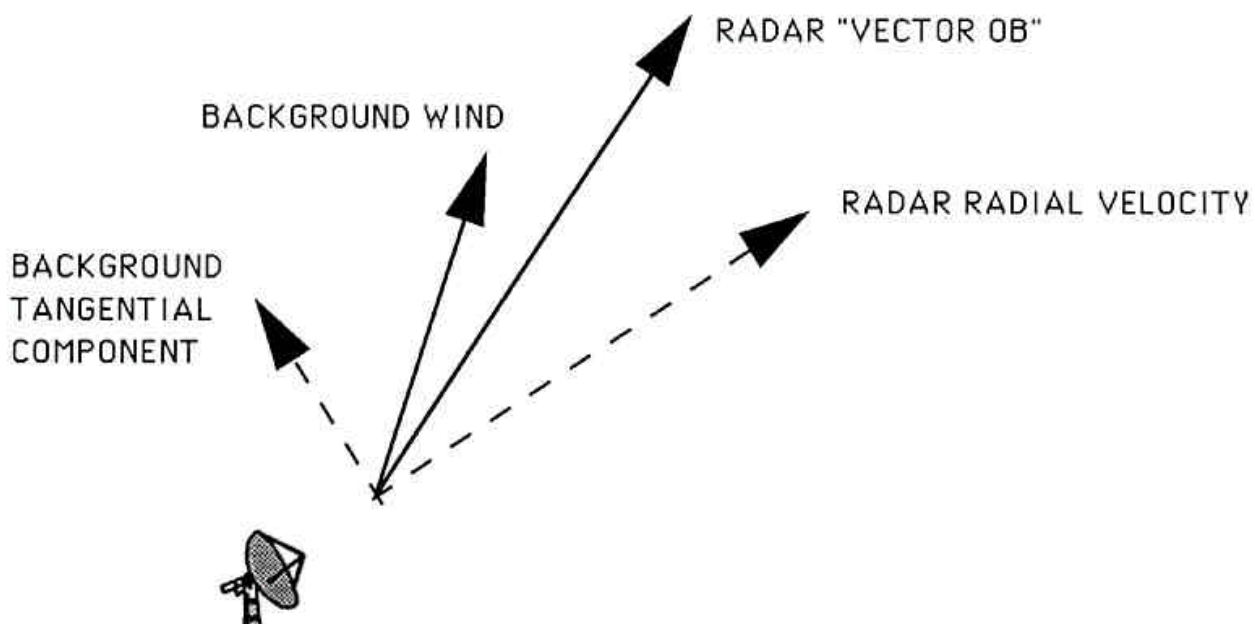
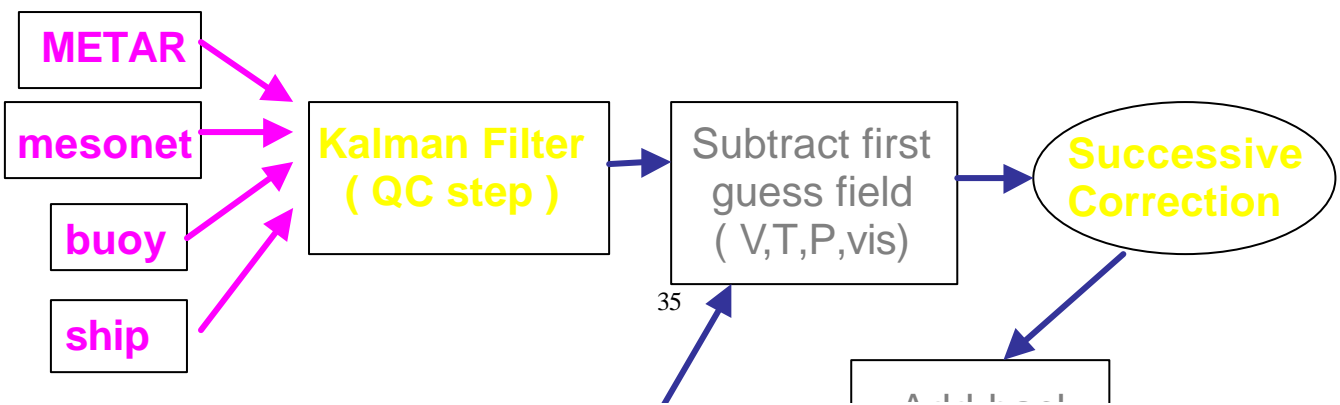
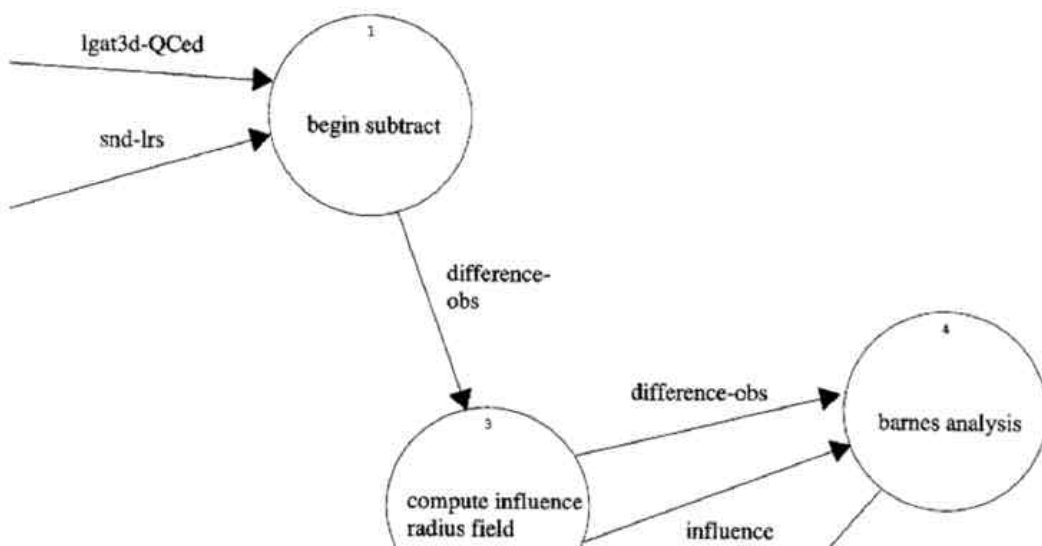


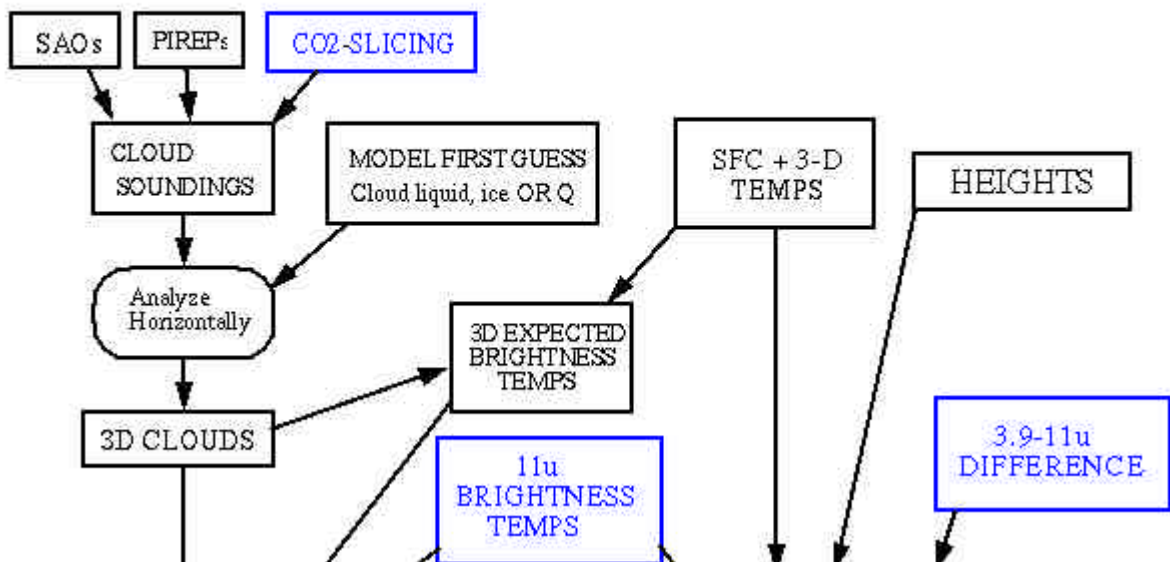
圖3：台灣地區LAPS之分析區域範圍，圖中之等值線為模式地形分布。

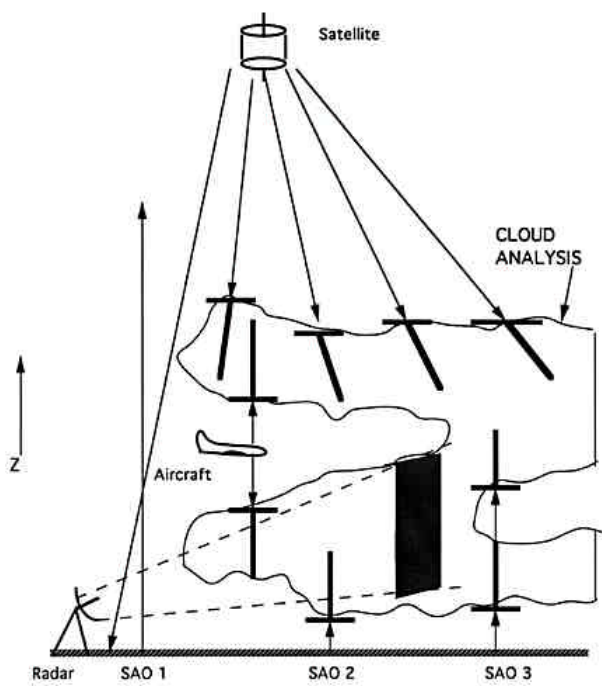


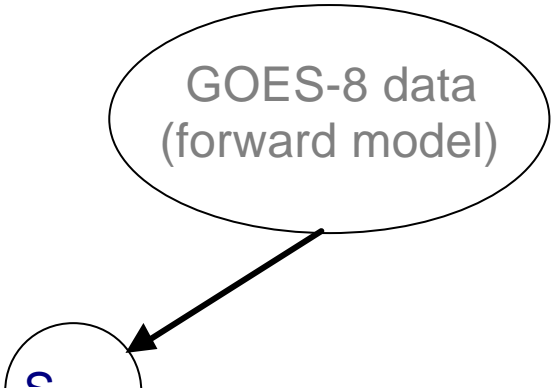
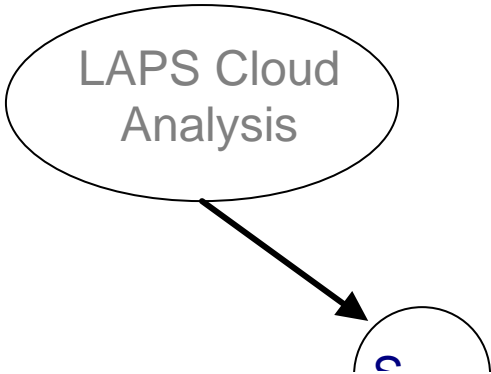


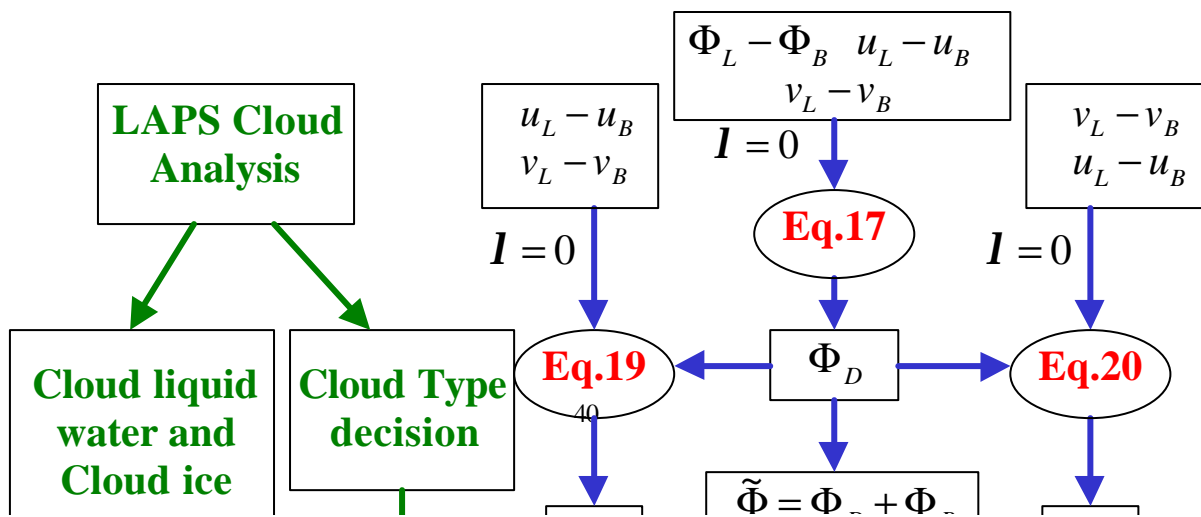


LAPS CLOUD ANALYSIS

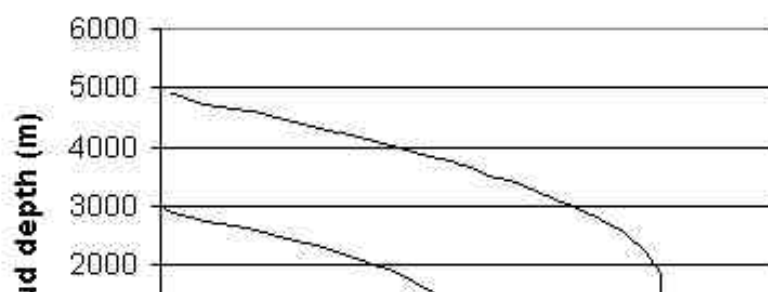








Assumed cloud vertical velocity profiles



Taiwan Short Term Forecast System

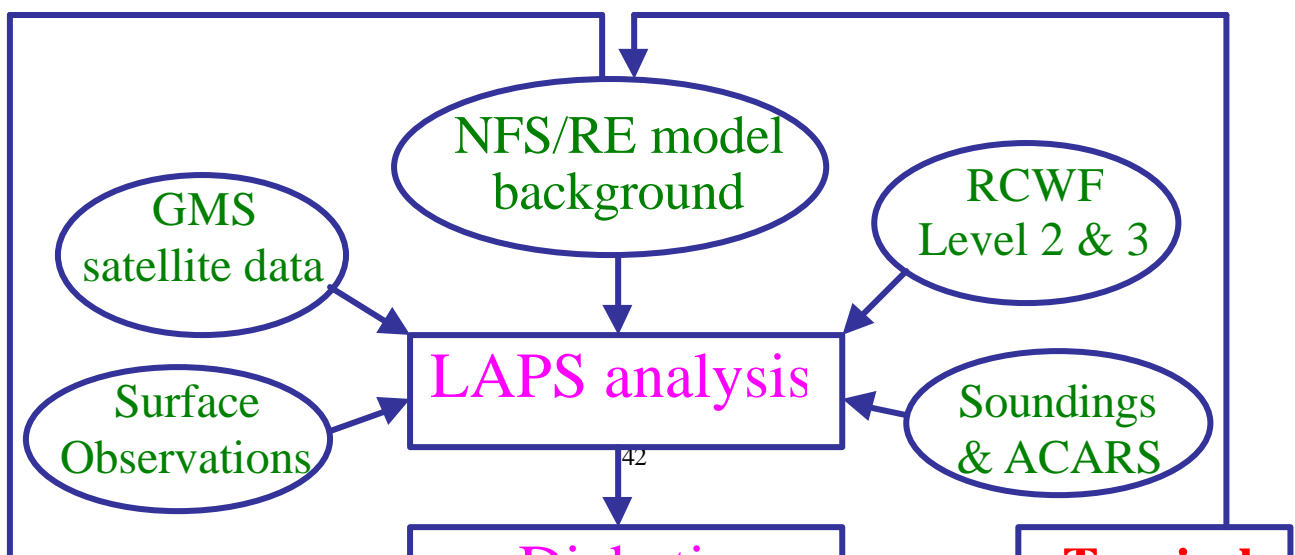
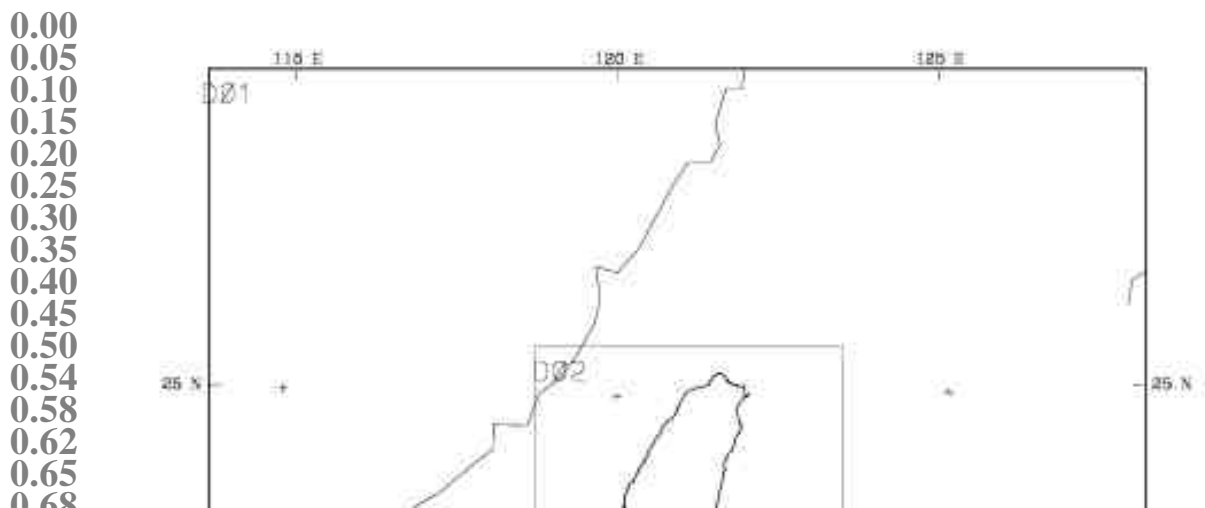
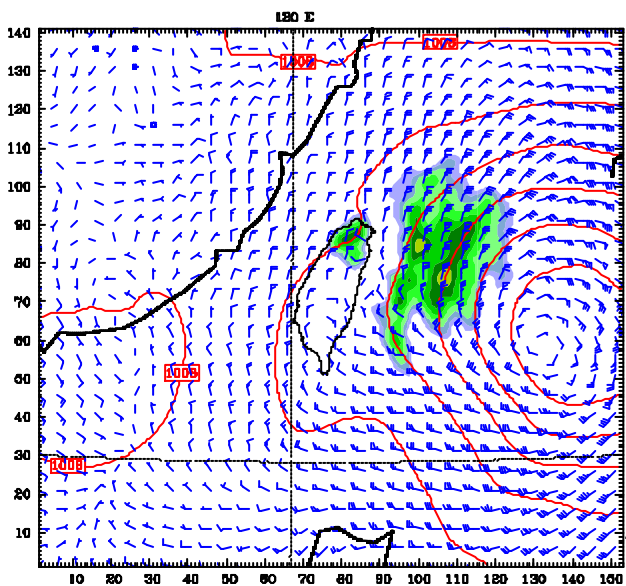


圖15：台灣地區短時預報系統流程圖；圖中涵蓋最上游之LAPS分析、颱風渦旋植入、非絕熱初始化至Hot-Start MM5 預報的所有完整流程。



(a)



(b)

