

冰相粒子對於梅雨期間的長生命期線狀回波 影響的數值研究

林忠仁¹

陳景森²

1. 國立中央大學大氣物理所研究生

2. 國立中央大學大氣物理所

摘要

1985年5月28日在台灣地區發現有個長生命期的線狀回波存在，這裏便利用一個含有冰相粒子的二維數值模式來模擬這個個案，比較沒有冰相粒子及有冰相粒子存在時，其動力結構、運動情形以及降水的分佈有何差異。因為當降水系統發展到0℃高度以上時，在大氣中若有適當的冰凝結核(ice nuclei)，則在對冰而言為過飽和時，會有冰相粒子如雲冰(cloud ice)、冰雹(hail, precipitating ice)等出現，而影響整個系統的結構。

從這個二維的模擬結果顯示，當有冰相粒子存在時，因為冰相粒子的生成，而有更多的潛熱釋放，造成了更大的溫度增加，所以上升速度也較大。另外水汽的凝結亦會產生冰相粒子，但是只有冰雹具有下降速度，因此初期的降水量，較沒有冰相粒子存在時為小；但當冰雹下降到0℃高度以下時，則有融解(melting)發生，而開始有較多的降水。故冰相粒子的存在，只是將降水的過程中考慮了溫度低於0℃時，有冰相粒子的產生，能更符合實際的情況，而對於整個的對流系統發展及動力結構，並沒有多大的差異。

一、前言

1985年5月28日高雄雷達觀測到一個雨帶在台灣海峽南端，整個系統以大約 18ms^{-1} 的速度向東移動，而且維持了好幾小時，由圖1上的雷達回波圖得知，最初在19時(中原時間)到21時，整個雨帶是呈南北向分佈，到21時後，在前面區域有一較強的線狀回波，伴隨著大量降雨產生，另外有一較弱回波區及較少量降雨，存在於線狀回波之後，但在北方因為有地形及海面回波影響，高雄附近的回波，無法確定其真正大小。系統約在23時通過了恒春，使得在22時到23時之間，降雨量達到20mm。這裏便是想利用二維的雲模式來對梅雨期間的一個長生命期線狀回波做一探討研究。

Chen(1986)曾利用二維模式來研究這個問

題，但在他的模式中並沒有包括冰相粒子，這裏將考慮雲冰及冰雹二種冰相粒子的存在，以便了解冰相粒子的影響。因為有冰相粒子的存在，使得對流系統中因相位的變化產生潛熱作用，而影響對流的發展情形。在這篇報告中，便藉由一個含有冰相粒子的二維雲模式，研究在梅雨期間的長生命期線狀回波中，冰相粒子的影響作用。

二、數值模式

本文的模式採用可壓縮性方程組，因為是可壓縮性系統，所以聲波與重力波，可共同存在此模式內。在可壓縮模式中，利用時間分割法(Klemp and Wilhelmson, 1978)，對於有關聲波部份用比較小的時間間隔來處理，而有關對流問題部份用大的時間間隔處理，如此就可以不必由波桑方程

式來求壓力。在模式中利用數值方法來求出水平速度、垂直速度、位溫、無因次壓力、動量混合係數以及水汽、雲滴、雨滴、雲冰、冰雹的混合比。關於整個的雲物理過程，是由陳與林(1983)原先只有水相粒子的模式修改，再加上Orville and Kopp(1977), Lin et al.(1983)有關冰相粒子的處理方法，使得整個的雲微物理較原先沒有冰相粒子時更複雜。在模式中雨滴及冰雹二者都具有終端速度，可以下降到地面，整個雲微物理過程可以簡單地用圖2來表示。

至於模式中所用的定差法，為考慮計算所需的時間及儲存資料所佔的空間，在水平及垂直方向採用交錯網格點，把有關熱動力的變數及有關水汽的變數放在網格點上，而u、w的位置各向左右及上下移半個網格點距離(Wilhelmsen, 1974)。在時間的微分上採用二階跳蛙法，再加上平滑項的處理，如Robert(1966)所提出的，至於空間的微分，為了守恒起見，除了位溫之外，寫成通量形式，在水平平流項採用4階，垂直平流項採用二階。詳細的數值定差方法，可以參考Chen(1980)。

三、探空資料與初始條件

我們拿1985年5月28日12Z東港的探空資料做為模式的初始值，那時已經有雨帶發生了，而將其修正使得在4km以上的穩定性減少，在低層有較高的風切值，如圖3，整個模擬的範圍以15ms的速度移動，以確使雲的活動維持在模式範圍的中心附近。最初雲是由熱力作用所引起的，而其地區性的熱源形式如下：

$$\Delta\theta = 7.5\text{ }^{\circ}\text{C} \times \cos^2\left(\frac{\pi\beta}{2}\right) \quad \text{當}\beta < 1$$

$$\text{其中}\beta = \left[\left(\frac{x - x_c}{x_r} \right)^2 + \left(\frac{z - z_c}{z_r} \right)^2 \right]^{1/2}$$

熱胞的中心在 $(x_c, z_c) = (30\text{ km}, 1.7\text{ km})$ ，其半寬長和半高長分別為 $x_r = 7.5\text{ km}$ 和 $z_r = 2.2\text{ km}$ 。

四、模擬結果分析與比較

我們所要探討的是冰相粒子存在時，對整個系統的影響，因此利用陳與林(1983)所用的不含冰相粒子的模式，來與前述含有冰相粒子的模式模擬結果做一比較。圖4是最大上升速度及雨水冰雹最大值隨時間變化的情形，圖(a)為不含冰相粒子的模擬結果，最初由於水汽凝結的潛熱釋放，而有一個對流胞(M0)開始成長，在20分鐘時，上升速度達到最大強度。此時相對地雨水也增加到最大值，而於雲區的低層部份有一個新生胞(M1)形成，約在降雨產生的冷空氣外流區前緣低層入流(inflow)區，與原先對流胞的上升氣流相鄰，M1生成後，起初在M0雲區低層的前方，而後漸漸成長，且產生降雨，最後合併到M0中，使得整個對流系統不致因為M0的減弱而消散。如此，對流胞成長產生降雨達到最大後，逐漸減弱而消散，同時在低層有一個新生胞生成，此新胞成長後合併到原有對流系統中，使得整個系統能維持一長生命期。在所模擬的3個小時中，就有如此類似的8個對流胞生成發展，而其週期大約15~20分鐘左右。(b)圖中則是含有冰相粒子所得的模擬結果，同樣在3小時中，亦有8個對流胞生成，由於冰相粒子的存在，影響了整個系統的雲物理，使得新生胞生成的時間有提早現象，而且上升速度的強度也較大，所以在170分鐘後有第9個對流胞生成。

圖5表示上升速度最大值(實線)的高度位置與時間的相關圖，可以視為一個個對流胞由下層生成成長到上層中。另外點線部份雖非當時的最大上升速度位置，但是代表一個新生胞在低層生成地區中最大上升速度的高度，因此圖5亦可明顯看出在(b)圖中新生胞的生成時間都較(a)圖中來的早。

為了更清楚了解整個對流胞的生成及成長結構，就不含冰相粒子及含有冰相粒子二部份，從5700秒到6900秒，每隔5分鐘有關壓力擾動場、垂直速度及雲雨區和冰雹的分佈場，這時間正好是從M4的生成到消散，可以藉由此，來研究整個系統的結構。

圖 6 為不含冰相粒子的模擬結果，5700 秒時 (I) 圖中，最大上升速度位在 5.25 公里高處，此時 M3 已成長上升到高層，逐漸進入消散期，同時在低層約 2.5 公里靠近原上升氣流區的右邊附近，有一個較小的上升氣流存在，這正好是新生胞 M4 成長的開始。到了 6000 秒時，就更能清楚的看到圖 (I) 中上層的上升速度已漸小，而新生的對流胞 M4 逐漸成長，與 (II) 圖中的雲區做比較，在 2~3 公里高度有一新生雲在成長。從 6000 秒到 6900 秒中，M4 對流胞開始成長，而且合併到原先系統中，至於降水也隨著 M4 的發展而增加，到 6900 秒時達到最大的強度，而後另一個新生胞再生成。

圖 7 為含有冰相粒子的模擬結果，對於垂直速度及風場的結構與前面討論沒有冰相粒子時有相同的機制。圖 4 中可以明顯看出，由於冰雹具有的下落速度較雨滴為大，所以當冰雹產生後，下降到融解層 (0 °C) 以下時，會融解轉變為雨滴，使得雨水的量增加，另外，雨水下降到雲底下時，會有蒸發現象，因而周圍環境溫度變冷，促使新生胞的生成，由圖 6 與圖 7 中比較，對於整個對流系統的發展，沒有很大的差異，但由於冰相粒子的存在，使得液相的雲滴及雨滴有部份轉變為冰相粒子，造成相位變化的潛熱釋放，因此圖 7 中上升速度較強，另外在冰雹量增大到某一程度下降後，產生融解，使得在 6000 秒時低層有個雨水的極大值存在。

圖 8 為二個模式中地面雨水最大量的比較，起初地面的雨水量相差不大，但在 90 分鐘後，含有冰相粒子的模式中，地面雨水有明顯的增加，與圖 4 中冰雹量比較，正好是在冰雹達到最大值後，地面雨水便增加到最大值，這正是冰雹融解產生的。

前面提到冰相模式中，新生胞生成時間有提早情形，我們利用氣壓場的診斷分析，來研究其原因，在模式中的動量方程式為

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -C_p \bar{\theta}_v \nabla \pi + B \cdot \vec{K} + \vec{F}$$

\vec{V} 代表速度， $\bar{\theta}_v$ 是平均位溫， π 是壓力偏差量

，B 項代表全部的浮力項，包括位溫的作用以及相位變化的潛熱作用，F 是亂流混合項，將上式取輻散量，並利用非彈性連續方程式， $\nabla \cdot \bar{\rho} \vec{V} = 0$ ，可求得氣壓場的波桑方程式

$$C_p \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\theta}_v \nabla \pi) = \frac{\partial}{\partial Z} (\bar{\rho} B) - \nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{F})$$

依照 Wilhelmson and Ogura (1972), Schlesinger (1980) 和 Rotunno and Klemp (1982) 的方法，將壓力項分成兩部份， $\pi = \pi_{dn} + \pi_b$ ，其中 π_{dn} 與 π_b 分別代表由動力項與浮力項造成的氣壓場，在計算 π_{dn} 時，混合項的輻散量 $\nabla \cdot \bar{\rho} \vec{F}$ 不予考慮。所以在討論一個新生胞生成的壓力梯度力上，將垂直的動量方程式改寫成：

$$\frac{dW}{dt} = -C_p \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi_{dn}}{\partial Z} - C_p \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi_b}{\partial Z} + B$$

$$\frac{dW}{dt} = PZDN + \underbrace{PZB + BYC}_{PZBY}$$

PZDN, PZB, BYC 分別為動力項相關的壓力梯度力，從浮力項所貢獻而來的壓力梯度力及純浮力項，而 PZBY 是 PZB 與 BYC 二項的相加，相當於與浮力有關在垂直加速度上的淨效果。圖 9 是 5400 秒時的分析，對動力項的壓力梯度力 (I) 而言，兩者都是正值，而且值相差不大，但在與浮力有關的壓力梯度力 (II) 上，明顯看出含有冰相粒子時，其壓力梯度力較大，故能使得新生胞生成的時間提早。

五、結論

1985 年 5 月 28 日在台灣海峽南端有一個長生命期的線狀回波存在，利用一個含有冰相粒子的二維雲模式模擬整個系統的發展，發現有 15-20 分鐘的週期性新生對流胞生成，而有冰相粒子存在時，其低層新生胞生成處的壓力梯度力較大，使得新胞

生成的時間提早。另外在相位的轉換中潛熱釋放，增加了上升速度，還有冰雹生成下降後融解造成在地面降水量較大。由這些結果可以了解有冰相粒子存在時，對於整個梅雨期間的降水系統其結構大體相同，但在上升速度及地面雨水量都有加強現象。

參考文獻

陳景森與林熺閔，1983：風暴的二維數值模式之研究。 大氣科學，10，55-66。

Chen, C. S., 1980: The effect of the gust front on the generation of new convection. Ph.D. thesis, University of Illinois.

Chen, C. S., 1986: A Numerical study of a rain band in baiu front. 第四屆全國大氣科學學術研討會，中壢，110 - 120 .

Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson, 1978: The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. J. Atmos. Sci., 35, 1070-1096.

Lin, Y. L., R. D. Farley and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J. Appl. Meteor., 22, 1065-1092.

Orville, H. D., and F. J. Kopp, 1977: Numerical simulation of the history of a hailstorm. J. Atmos. Sci., 34, 1596-1618.

Robert, A. J., 1966: The integration of a low order spectral form of the primitive meteorological equations. J. Meteor. Soc. Japan, 44, 237-245.

Rotunno, R., and J. B. Klemp, 1982: The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. Mon. Wea. Rev., 110, 136-151.

Schlesinger, R. E., 1980: A three-dimensional numerical model of an isolated thunderstorm. Part II: Dynamics of updraft splitting and mesovortex couplet evolution. J. Atmos. Sci., 37, 395-420.

Wilhelmson, R. B., 1974: The life cycle of a thunderstorm in three dimensions. J. Atmos. Sci., 31, 1629-1651.

———, and Y. Ogura, 1972: The pressure perturbation and the numerical modeling of a cloud. J. Atmos. Sci., 29, 1295-1307.

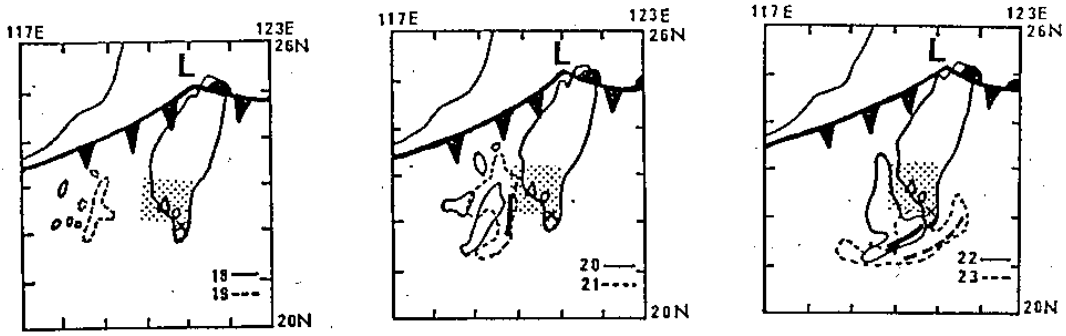


圖 1 1985 年 5 月 28 日高雄雷達回波圖，回波強度在 Level 2 (4 mm/h)，粗線部份代表 Level 3 (16 mm/h)。18 代表中原時間 18 時。

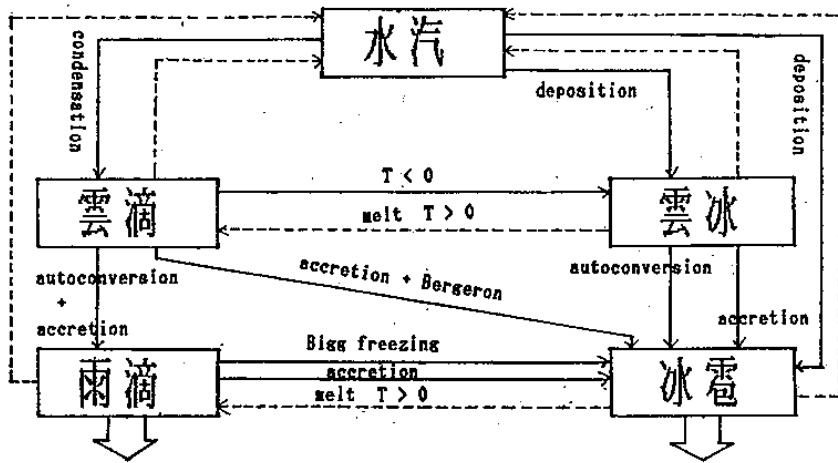


圖 2 雲微物理過程

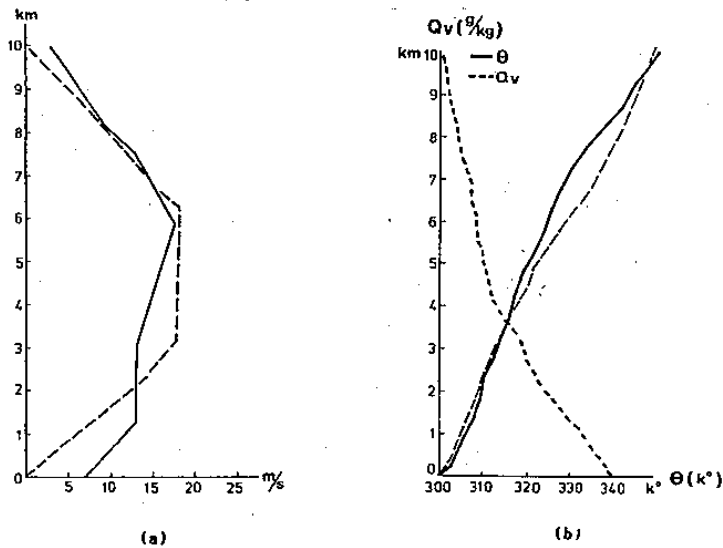
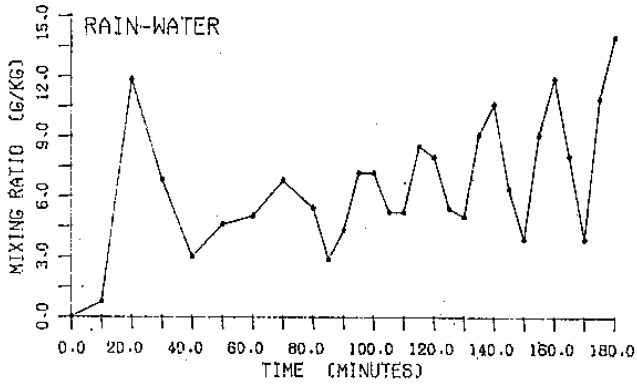
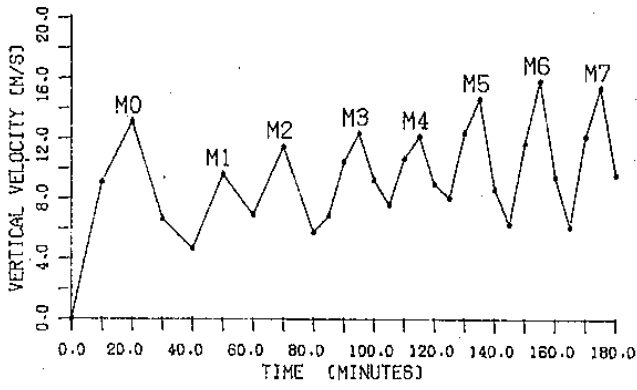
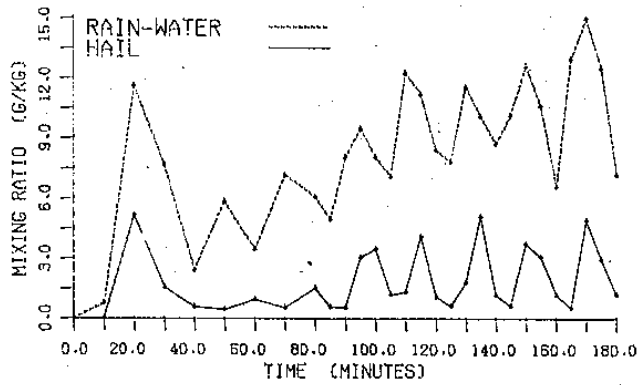
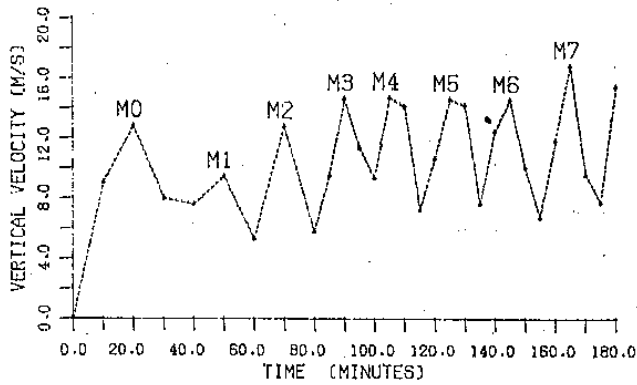


圖 3 (a)實線是觀測風場，點線是模式採用的初始風場。
(b)虛線是觀測的位溫，實線是模式採用的值，另外點線是在模式中使用的觀測水汽場。



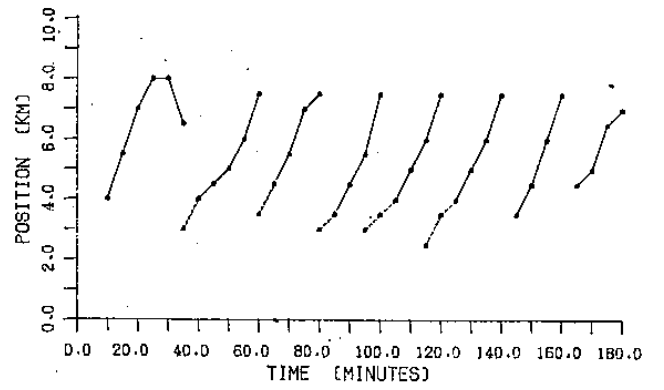
(a)



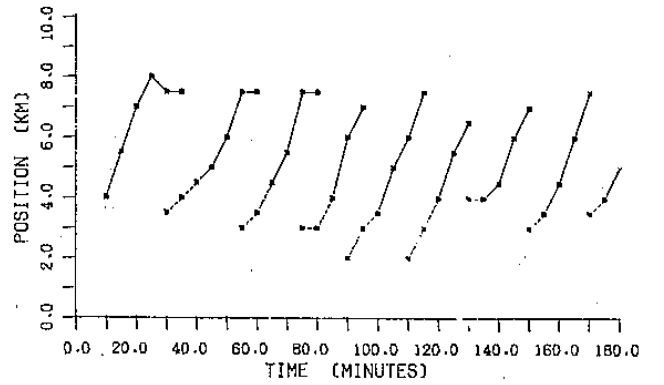
(b)

圖 4 (a)不含冰相粒子中，最大上升速度及最大雨量隨時間變化圖。

(b)含有冰相粒子，最大上升速度及最大雨水和最大冰雹量隨時間變化圖。



(a)



(b)

圖 5 (a)不含冰相粒子 (b)含有冰相粒子
實線是最大上升速度所在位置，點線是低層區域中最大上升速度的位置。

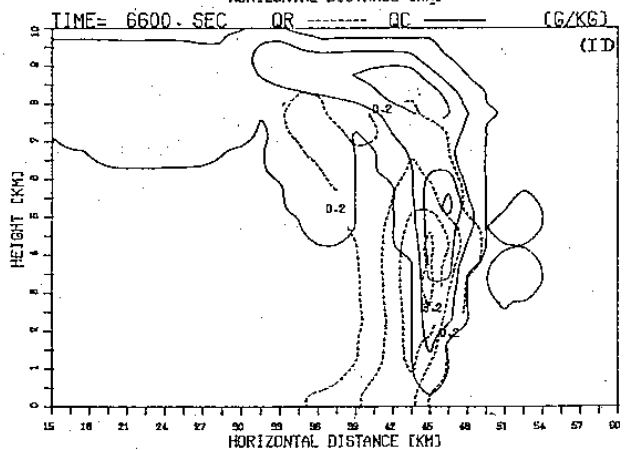
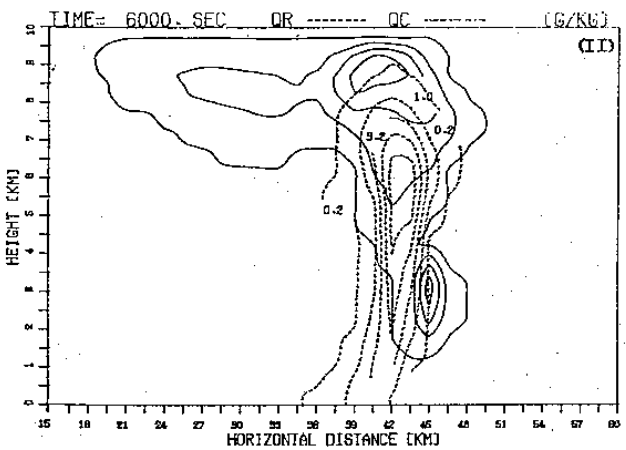
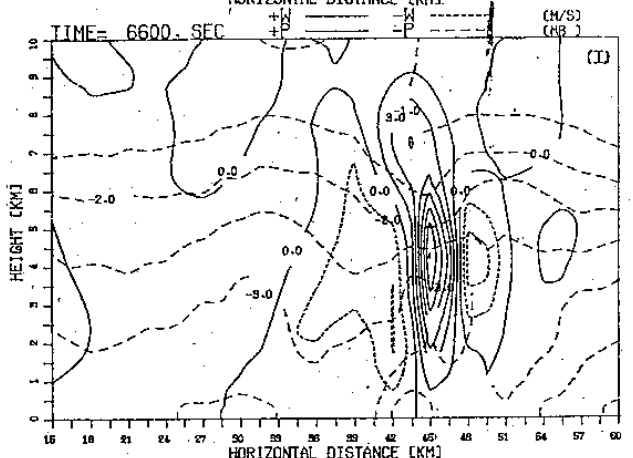
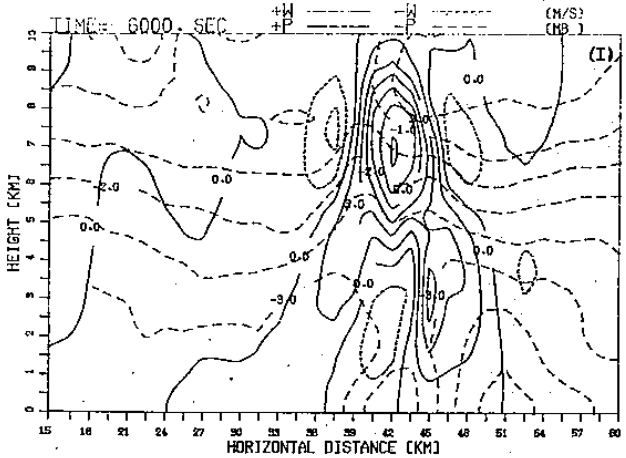
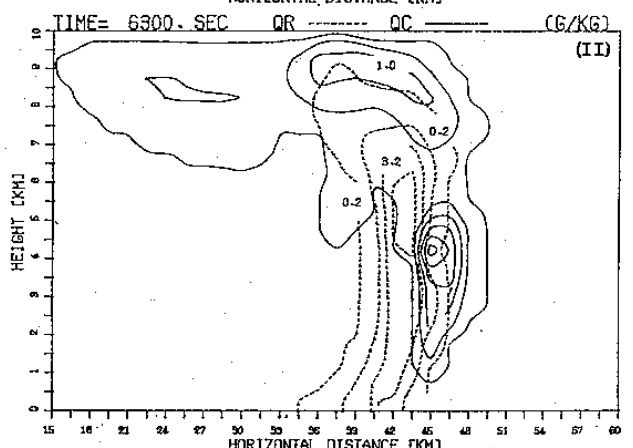
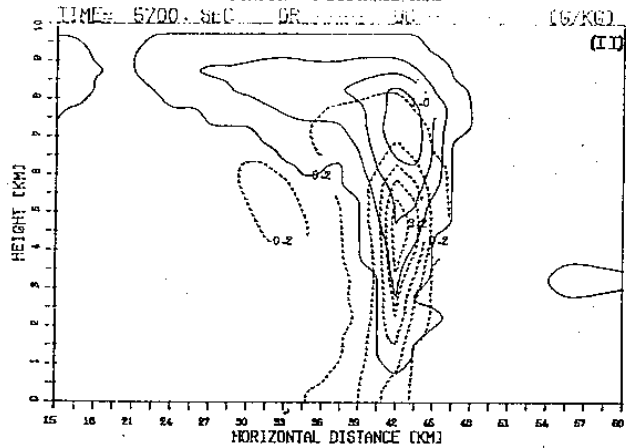
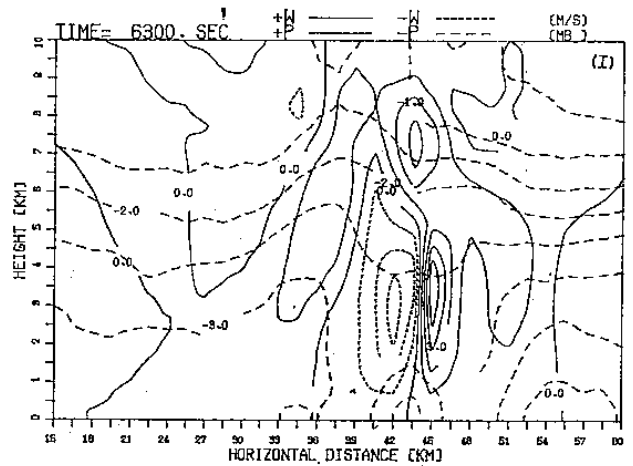
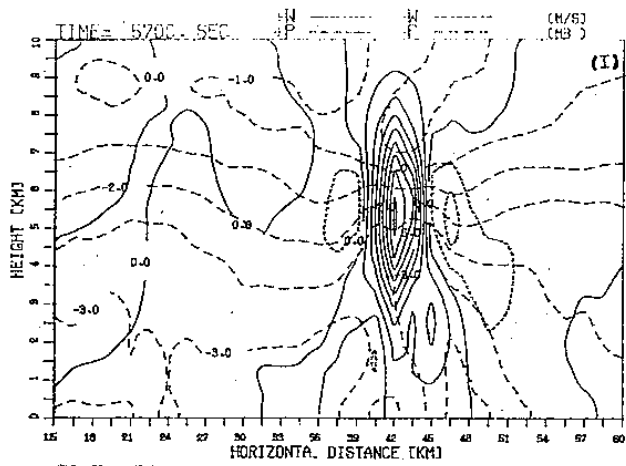


圖6 說明見後面。

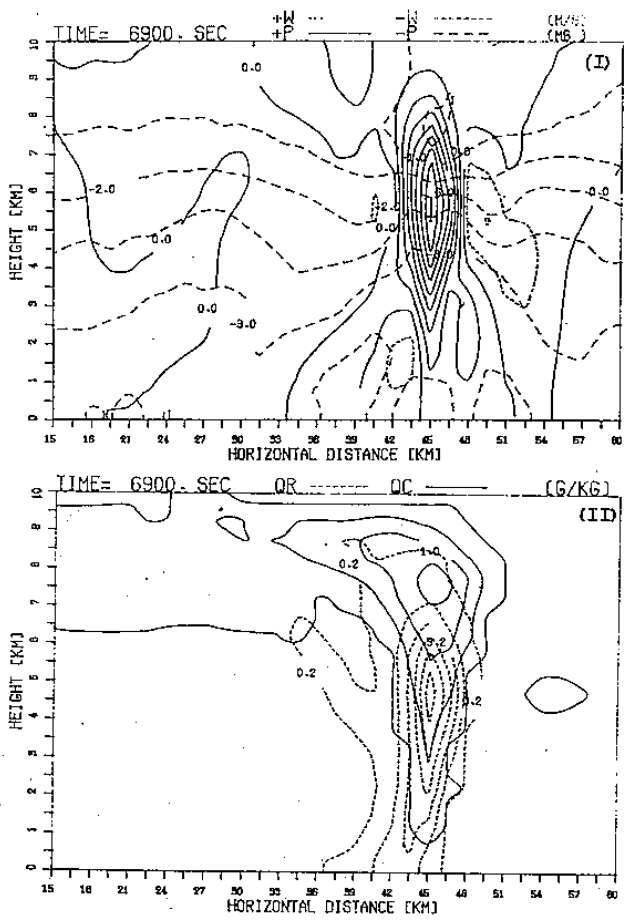


圖 6 不含冰相粒子，從 5700 秒到 6900 秒的模擬結果，(I) 圖是垂直速度與壓力擾動場，其間距分別為 1.5 m/s 及 0.5 mb。(II) 圖是雲雨區，雲區最小值是 0.01g/kg，間距為 0.5 g/kg，雨區最小值是 0.2 g/kg，間距是 1.5 g/kg。

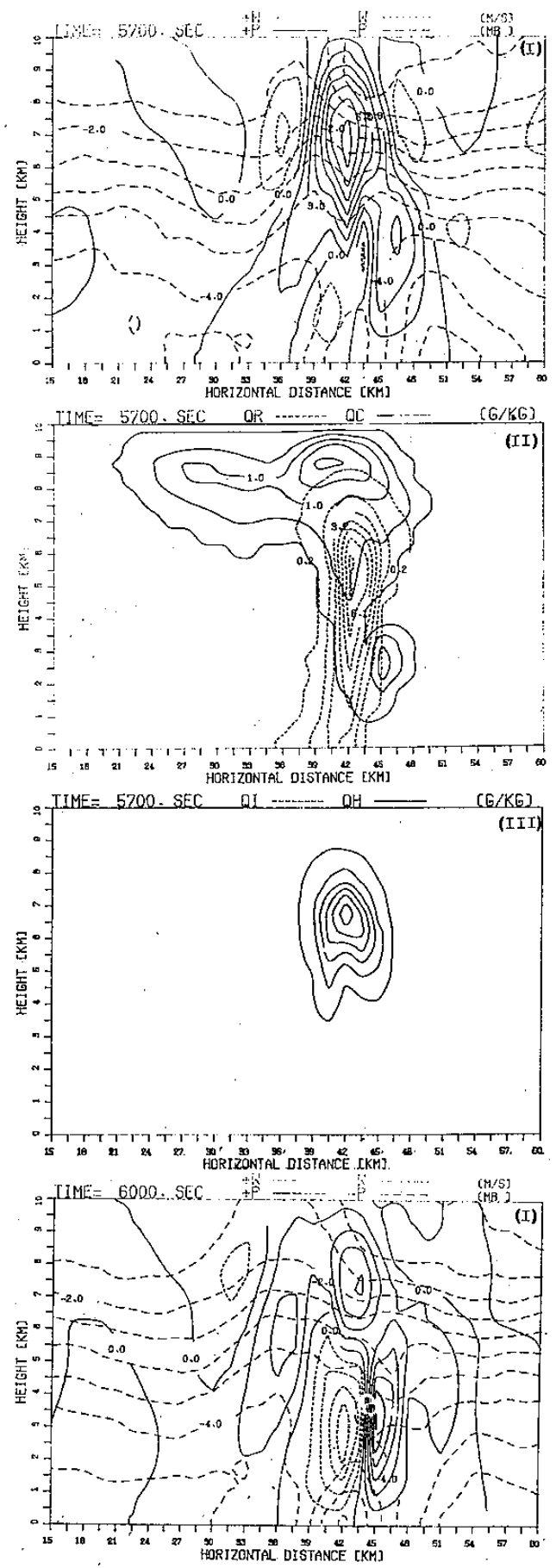


圖 7 說明見後面。

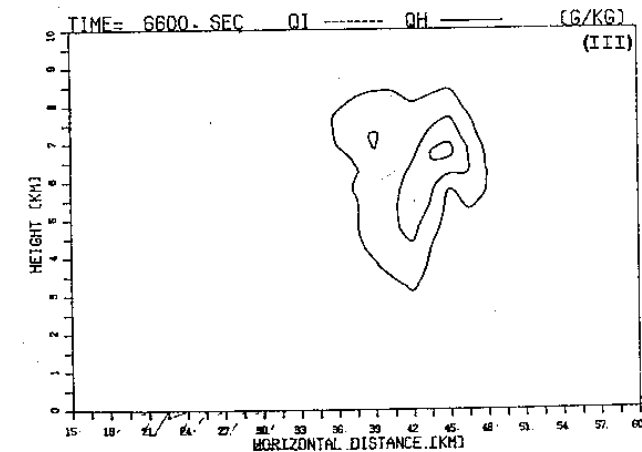
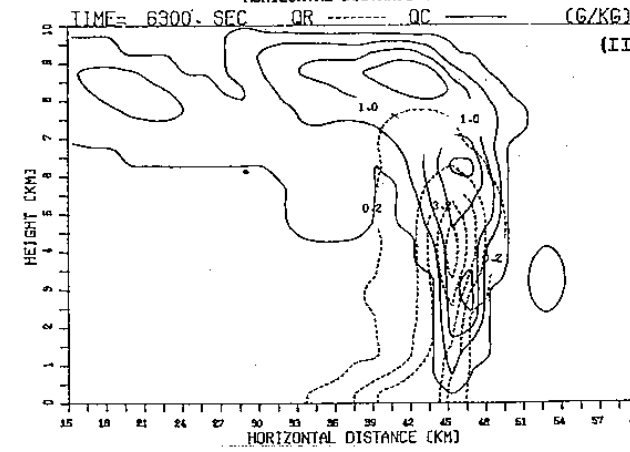
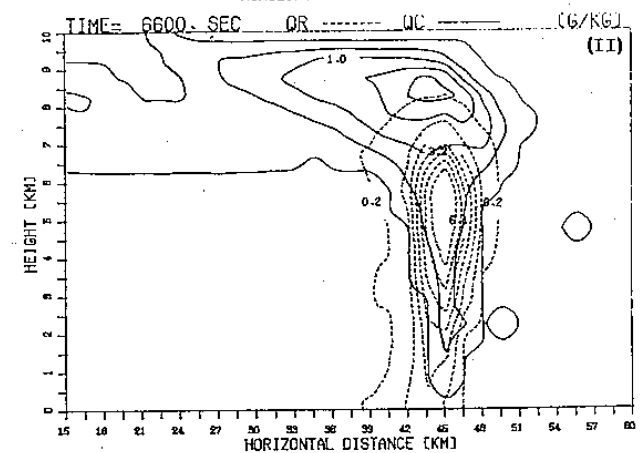
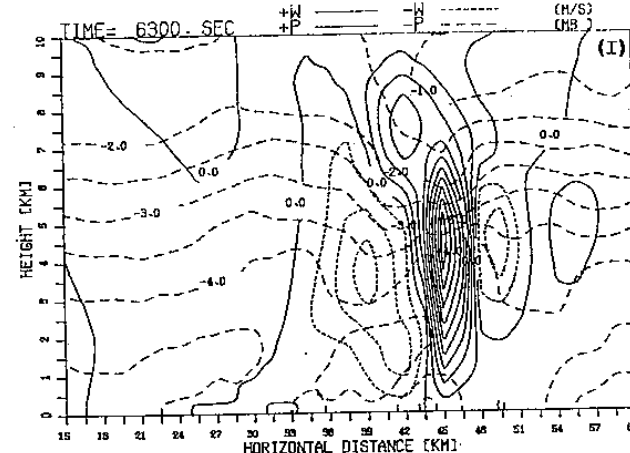
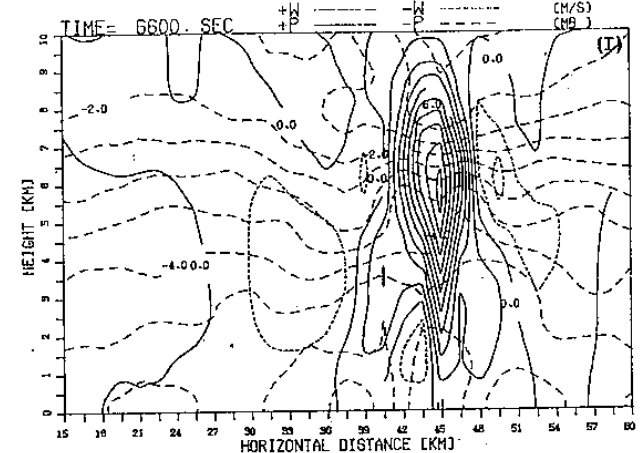
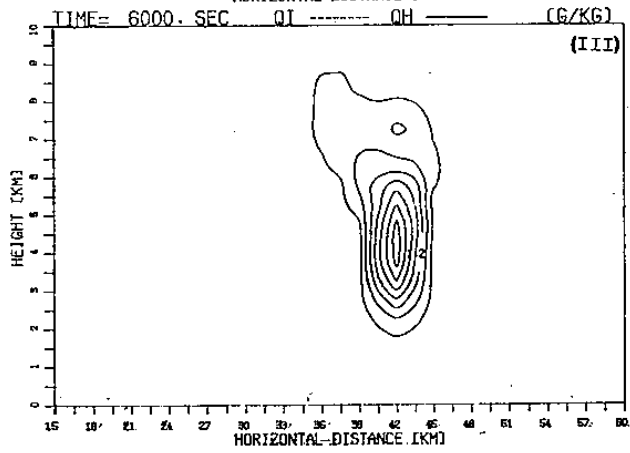
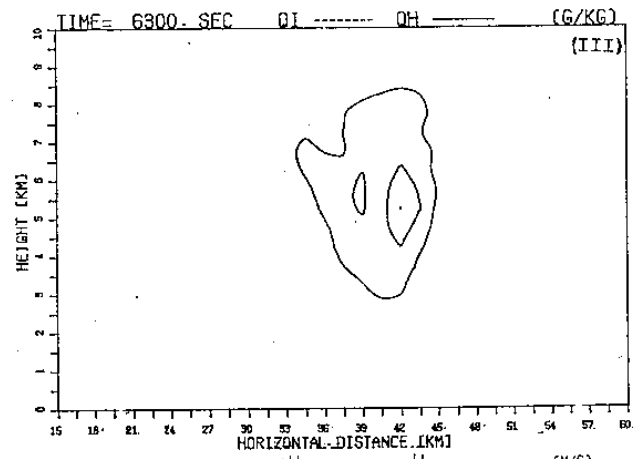
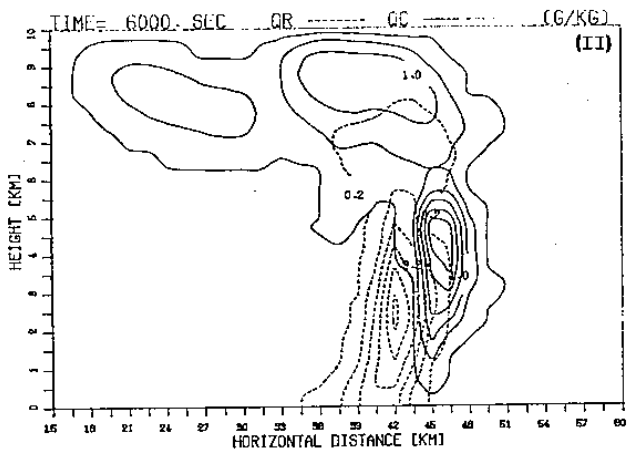


圖7 說明見後面。

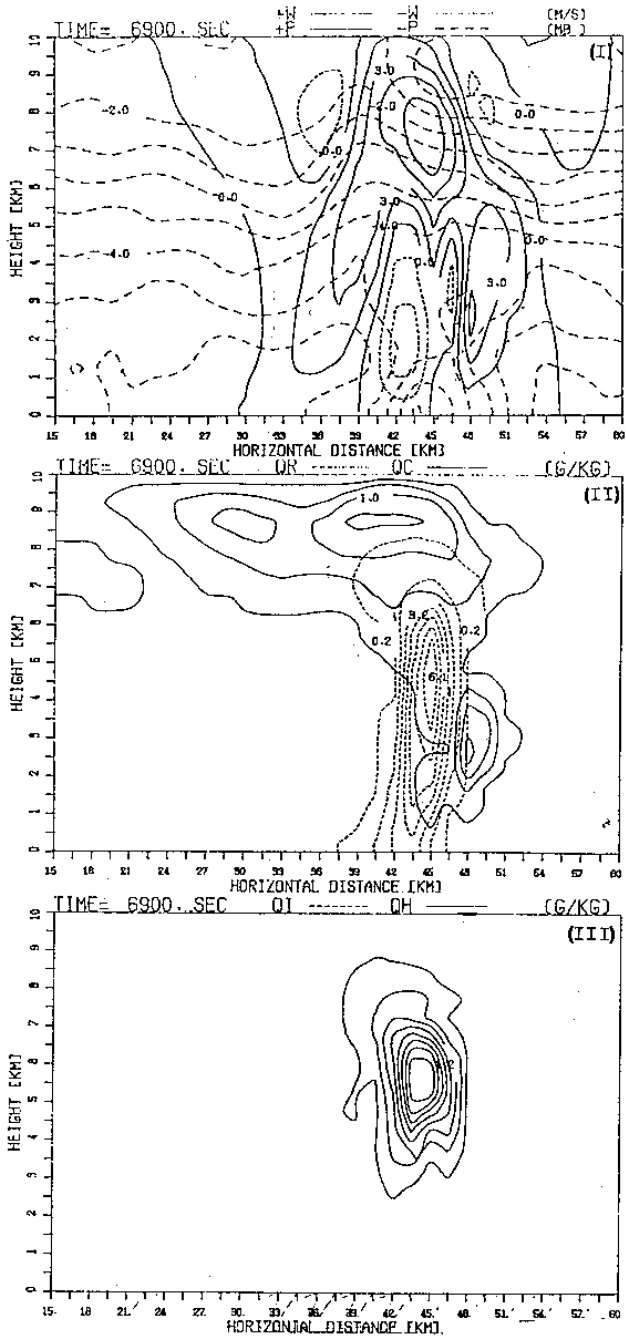


圖 7 含有冰相粒子，從 5700 秒到 6900 秒的模擬結果，(I) (II) 部份同圖 6，(III) 是冰雪的分布，最小值是 0.2 g/kg，間距大小為 0.5 g/kg。

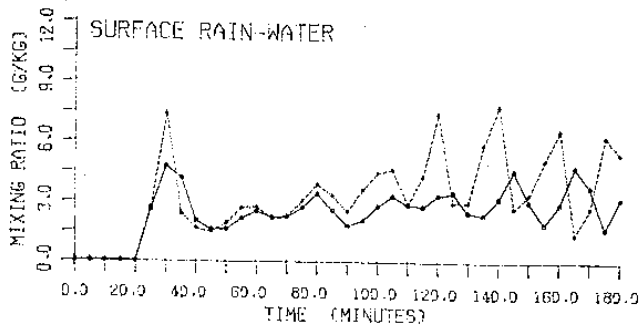


圖 8 地面雨水最大量值，實線是沒有冰相粒子結果，點線是含有冰相粒子結果。

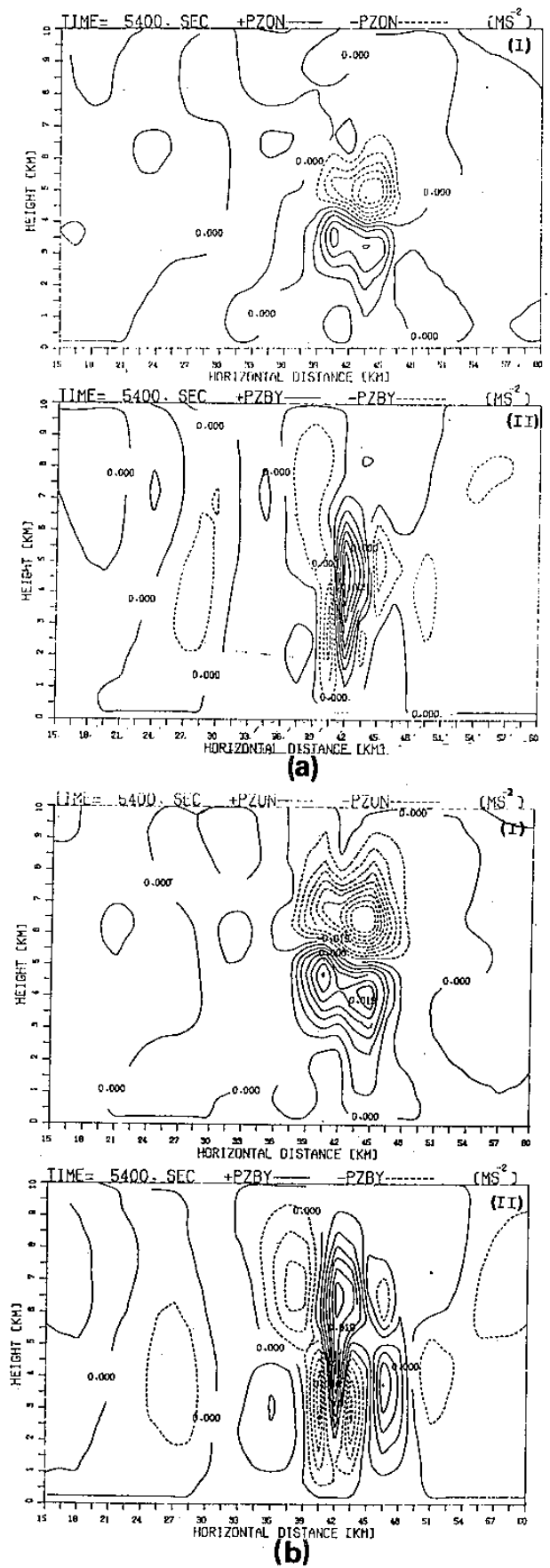


圖 9 壓力梯度力場，(I) 是與動力有關的，(II) 是與浮力有關的。

(a) 是不含冰相粒子 (b) 是含有冰相粒子

A Numerical Investigation on The Influence of Ice Particles on
a Long-lived Line Echo in Mei-Yu Season

Chung-Zen Lin

Ching-Sen Chen

Institute of Atmospheric Physics
National Central University

ABSTRACT

A long-lived line echo was observed on May 28, 1985 in Taiwan area. A two-dimensional numerical model which include ice particles was used to study this case. The parameterization of ice particles follows Orville and Kopp(1977) and Lin et al.(1983). We focus on the difference of the dynamic, kinematic structure and precipitation when ice particles included or excluded in the cloud model.

The result shows that more temperature excess if ice particles were included the freezing resulted in more latent heat release. Therefore the updraft was relative large. Precipitation was larger because of the melting of ice particles. Through the evaporation of precipitation low level became cooler. Larger low level cooling resulted in stronger convergence. Therefore new cells formed early. However the basic dynamic and kinematic structure found in the case without ice particles were not altered.