

渦動對積雲形成之影響*

王業鈞 徐士哲 程為莉

On the Influence of Eddy Mixing on the Formation and Development of Cumulus Cloud

John Y.C. Wang
S.C. Hsü W.L. Chen

Abstract

The influence of eddy mixing on the formation and the development of cumulus clouds have been studied; using Wang's quasi-one-dimensional time-dependent, non-precipitation model which has a source of constant strength. The coefficients of the pre-existing atmospheric turbulence (ν_r) and the turbulence created by the clouds (β) themselves have been treated as variables.

According to the results, the two critical values of W_s concerning cloud formation are very sensitive to the variation of the pre-existing atmospheric turbulence, but not so sensitive to the turbulence created by the cloud. Other condition being fixed, the upper critical value will not be quite obvious when ν_r is greater than or equal to 1.3. If the value of ν_r exceed 9.1, the lower critical value will disappear, which means that no cloud can be developed. Furthermore, as β increases, the increment of lower critical value is found to increase. However, the increment of lower critical value is rather insignificant.

一、緒 論

本文為對積雨雲之生成與發展之一系列研究的第四份報告，在報告(一)中(WANG, 1973 a, 此後稱為文 A)，我們曾提出一半一次元、有時序、無降水、有一穩定氣源的積雲模式。由氣源強度變化，發現其具有兩個關鍵值：一低關鍵值及一高關鍵值。當氣源強度低於低關鍵值時，無雲生成；當氣源強度介於高低兩關鍵值之間時，則形成完全由其下穩定氣源供應的平淺的氣草雲；當氣源強度高於高關鍵值時，則可形成深厚的積雲，除由氣源供應外，並能吸取大氣中的潛熱，自行發展。由於此二關鍵值均甚小且甚為接近，故很明確的解釋了 Glass 和 Carlson (1963) 所觀測到的山頂上小型雲之形成及發展現象。

在文(A)的模式中，將逸入作用分為動力逸入和渦動逸入兩種。這種處理方式，於 1951 年 Houghton 和 Cramer 即曾提及；1959 年，

*本文之完成獲國家科學委員會之獎助

Haltiner 氏的數值模式實驗中，亦將渦動混合分為兩種型式討論：一為大氣中原有的渦動，與雲中上升速度無關；另一為雲內空氣運動所引起的渦動。但 Haltiner (1959) 的模式中，未能考慮這兩種渦動的並存。1959 年，Priestley 認為在提出一模式時應同時納入這兩種渦動，此一觀點已由 Turner (1963) 首先採納，文(A)次之。在文(A)的研究中，因有其特定的目的，故僅將渦動混合係數視為常數，事實上，渦動強度會因高度及雲內對流強度之不同而改變。本文中將令此二渦動係數為變數，以研究環境風對積雲之生成與發展的影響。

二、模 式

此一研究乃是文(A)的系列發展，其所採用的模式與文(A)中所用完全相同，故此處不再重述本文所採用的各方程式，僅將吾人所作對渦動混合係數的處理加以描述。

吾人採用 Prandtl 的混合長度理論，以處理邊界上的渦動混合。今以 A_1 、 A_2 分別表內、外區的某一變數， ν 為渦動混合係數， ℓ 為混合長度，且令 $\ell = \Delta r$ ，則可將渦動項寫為

$$-\nu \frac{\partial A}{\partial r}, \text{ 且 } -\nu \frac{\partial A}{\partial r} = -\nu_r^1 (A_2 - A_1) \dots (2-1)$$

此處 $\nu_r^1 = \frac{\nu}{\ell}$ 。假定 ℓ 為 100 公尺，並將 ν_r^1 分為兩部份，即

$$\nu_r^1 = \nu_r + \beta |W_2 - W_1| \dots (2-2)$$

(2-2) 式中，右側第一項代表大氣中原有的渦動混合強度，第二項則代表雲內對流所引起的渦動混合強度。在文(A)中，係令 ν_r 及 β 為定數，但實際大氣並非如此，故在本文中，將令 ν_r 及 β 為變數，以探討在不同的渦動混合強度下，不同的氣源強度所生成及發展的積雲，各受何種影響。

為與文(A)成一系列的研究，以資比較。本文中採用文(A)中第二組實驗雲為標準，其有關之參變數如下：

- Zs (氣源高度) = 540m
- Ps (氣源氣壓) = 950mb
- Rs (氣源半徑) = 1584m
- Ws (氣源垂直上升速度) = 2 m/sec
- Ts (氣源溫度) = 285.5°K ($\Delta T_s = T_s - T_F(Z_s) = 1^\circ C$)
- RHs (氣源相對濕度) = 90%
- $\nu_r = 0.1$ m/sec
- $\beta = 0.01$
- ν_z (垂直方向的渦動混合係數) = 0.1 m²/sec

而環境大氣仍採用 NACA 標準大氣，與氣源同高的環境區的溫度為 284.5°K，相對濕度為 75%。

此一研究將分為六組實驗，分別令氣源垂直上升速度 W_s 、氣源溫度 T_s 及氣源相對濕度 RH_s 對不同的渦動係數 ν_r 及 β 值變化，以研究大氣原有的渦動混合及雲中運動所引起的渦動混合，對於動量不同、浮力不同、濕度不同的氣源所產生之雲的生成及發展，各具何種影響。

三、結果與討論

下面將分為六組實驗，研究兩種不同的渦動混合，對模式雲最後高度的影響。第一、四組實驗中，氣源強度的變化，係以動量的改變表示，亦即氣

源垂直上升速度 W_s 的改變。第二、五組實驗中，則為氣源相對濕度 RH_s 的變化。第三、六組實驗中，則改變氣源的浮力，亦即改變氣源溫度超值 ΔT_s 。同時，第一、二、三組實驗中，令 ν_r 為變數，代表大氣原有渦動強度的變化。四、五、六組實驗中，則令 β 為變數，代表雲中運動所產生的渦動強度之變化。

(一)第一組實驗雲

第一組實驗中，令 ν_r 由 0.0 變化至 9.1 m/sec，對每一 ν_r 值，令氣源垂直上升速度 W_s 變化，其餘氣源參數均保持不變。圖 1(a) 中各曲線表示雲頂高度隨時間的變化情形，其中所示各實驗雲的氣源參變數與標準雲相同，僅令 W_s 分別為 0.4、0.6、0.8、1.2、2.0、3.0、4.2、5.6、7.2、9.0 m/sec，如圖中右側註標所示。當 $W_s = 0.4$ m/sec 時，始能成雲，表示在此處有一低關鍵值 W_{sL} 的存在，當 $W_s = 0.6$ m/sec 時，雲頂高度增加約 100m， W_s 再增至 0.8 m/sec，雲頂高度驟增 2800m，這表示在 0.6 至 0.8 m/sec 之間， W_s 有一關鍵值存在，文(A)中稱之為高關鍵值 W_{su} ；當 $W_s > W_{su}$ 時，即能形成高聳的積雲，雲內溫度較環境為高。當 W_s 介於高、低關鍵值之間，只能發展平淺的氣草雲，有的雲內溫度較環境為低，完全由氣源所支持。

隨後令 ν_r 變化，為免重複，本文僅取 $\nu_r = 0.3$ m/sec 一圖與之比較，其餘同類圖形均予以省略。圖 1(b) 所示為 $\nu_r = 0.3$ m/sec 時的一組雲頂時變曲線，此時 $W_{sL} = 0.6$ m/sec， $W_{su} = 2.0$ m/sec，顯示高、低關鍵值均隨 ν_r 之增而增，同時雲頂高度較圖 1(a) 的一組為降低；此種趨勢隨 ν_r 的增加更加明顯，當 $\nu_r \geq 9.1$ m/sec 時，則在本文研究的 W_s 最大值 9.0 m/sec，亦不能成雲。茲將此一實驗的結果，雲頂最後高度在各不同 ν_r 值時，隨 W_s 的變化以曲線表於圖 2，圖中縱座標為雲頂最後高度，橫座標為氣源的垂直速度，其中各實曲線為雲頂最後高度與 W_s 的關係，右方註腳表示不同的 ν_r 值，兩點線分別表示高、低關鍵值的可能位置，長虛線則表示高關鍵值並未確定，乃是在長虛線範圍之內，並非表示雲頂高度隨長虛線變化。

為進一步說明 ν_r 和 W_s 對積雲發展的影響，特將本組實驗所得，相對於每一 ν_r 值之 W_{su} 及 W_{sL} 表於圖 3，圖中縱座標為 W_s ，橫座標為 ν_r ，將 W_{su} 、 W_{sL} 畫入，即可得兩條曲線而將 W_s —

ν_r 平面分為三區：(1)積雲區：其特徵為 ν_r 較其他二區為小，故稀釋較小，可發展為高聳的積雲。(2)氣草雲區：此區內之特徵為若須在 ν_r 大的情況下成雲， Ws 即需增大。(3)無雲區： ν_r 太大，稀釋太強烈，或 Ws 太小，無法成雲。

(二)第二組實驗雲

令 ν_r 由 0.0 變化至 7.3m/sec，對每一 ν_r 值，令氣源相對濕度 RHs 變化，其餘氣源參數均不變。其處理方法與第一組實驗雲相同，仍由雲頂時變曲線找出雲頂最後高度，並將雲頂最後高度在各不同 ν_r 值時，隨 RHs 的變化曲線表於圖 4，圖中縱座標為雲頂高度，橫座標為氣源相對濕度 RHs ，與圖 2 相同，我們仍以長虛線表明高關鍵值的可能位置，並以兩點線分別表明高、低關鍵值的可能位置。

將此組實驗結果所得之高、低關鍵值 $RHsu$ 、 $RHsL$ 點入圖 5，連接可得兩曲線而將 RHs — ν_r 平面分為三區：(1)積雲區、(2)氣草雲區、(3)無雲區。其形狀與圖 3 相似，此一相似的性質，將於第三組實驗中一併解釋。

(三)第三組實驗雲

令 ν_r 由 0.0 變化至 9.1m/sec，對每一 ν_r 值，並令氣源的熱能 ΔTs 由 0.0 變化至 4.0°C，其餘氣源參數均保持不變。

由於雲頂時變曲線圖均與圖 1 形狀相似，此處不將此種圖片一再重覆，但知隨著 ν_r 的增加，發現兩個關鍵值 ΔTs_u 、 ΔTs_L 亦漸次增大，雲頂高度則漸減。茲對各 ν_r 值，將雲頂最後高度對 ΔTs 的關係曲線畫於圖 6，圖中實曲線為雲頂高度曲線，兩點線代表高、低關鍵值的可能位置，圖中可見，當 $\nu_r > 1.3$ 時，曲線漸趨平滑，已無法判斷高臨界值；當 $\nu_r \geq 9.1$ 時，本文中所取的最大溫度超值 4°C，亦無法成雲。將此組實驗所求出的高、低關鍵值點於圖 7，圖 7 中縱座標為 ν_r ，橫座標為 ΔTs ，將高、低關鍵值各點連為兩條曲線，分別代表高、低關鍵值對 ΔTs 、 ν_r 的關係，此二曲線可將 ν_r — ΔTs 平面分為三區：(1)積雲區、(2)氣草雲區、(3)無雲區。

今將圖 3、圖 5、圖 7 相比較，發現這三種氣源參數： Ws 、 RHs 、 ΔTs 的兩個關鍵值，當 ν_r 變化時，均具相似的變化；即當 ν_r 漸增時，氣源參數的高關鍵值 S_u (S 代表 RHs 、 ΔTs 、 Ws 中任一) 迅速增高， ν_r 繼續增大，即無法形成高聳的積雲，故 S_u 的值消失。低關鍵值 S_L 雖亦

有隨 ν_r 漸增的現象，但遠較高關鍵值 S_u 的變化和緩。為說明此一現象，我們考慮一氣源發射出濕而熱的空氣，若氣源強度 S 能供給足夠的能量，到達凝結高度，即能開始成雲，此一能量即以 S_L 表示；若再能上升至自動對流高度，即可自動上舉，發展為高聳的積雲，所需氣源強度即為 S_u 。由於上述兩高度不同，到達自動對流高度所受的渦動稀釋的總量當較到達凝結高度者為大；當 ν_r 增大時，大氣的稀釋效應更為強烈，故其對 S_u 值的影響當較 S_L 為大。

同時，圖 3、圖 5、圖 7 均具同一性質，即高、低關鍵值在 ν_r 小時均甚小，且甚為接近；文 A 中曾對 Glass 和 Carlson (1963) 的觀測資料加以解釋，說明由於渦動混合，可能使氣源強度波動於兩關鍵值左右，此時氣源的活動將呈間歇性而生成一系列的雲，這些雲的高度，則呈散亂的分佈。在此我們以數值實驗進一步的說明，當受環境風影響，使大氣渦動強度做微量的變化時，亦將使兩關鍵值改變，雖然當 ν_r 小時，其變化量甚小，但由於高、低關鍵值甚小而且接近的特性，縱使氣源強度未變，由於關鍵值的改變，亦可能使雲高有很大的不同。依本實驗的結果觀之，文 (A) 的結果有相當的可靠性。

(四)第四組實驗雲

在以下三組實驗中，我們將令 ν_r 值保持與標準雲相同，僅令 β 改變，以研究雲中運動所引起的渦動混合對積雲之生成與發展的影響；在本組實驗中，對每一 β 值，令 Ws 為變數。經過與前三組相似的處理，我們可將各不同 β 值時，雲頂最後高度與 Ws 的關係，以曲線表示於圖 9，圖中顯示，隨 β 的增加，雲頂下降，但 β 自 0.0、0.01 變化至 0.91 低關鍵值幾不改變，但高關鍵值則增加較明顯，今仍以點線代表兩關鍵值的可能位置，長虛線代表高關鍵值的可能位置。將兩關鍵值與 Ws 及 β 的關係點於圖 11 (a) 可連成兩曲線，亦將平面分為三區，可名之為積雲區、氣草雲區與無雲區，將與下二組結果合併討論。

(五)第五組實驗雲

本組實驗中，令 β 為變數，由 0.0、0.01 變化至 0.91，對每一 β 值，令 RHs 為變數。其處理方法同前，而得到圖 9 的結果，圖中實曲線表示雲頂高度隨 RHs 的變化情形，長虛線表示高關鍵值的可能位置，兩點線分別表示高、低關鍵值的可能位置，將找出的高、低關鍵值點於圖 11 (b)，可

連成兩曲線，亦將平面分為三區，即積雲區、氣草雲區與無雲區。

(六)第六組實驗雲

令 β 為變數，對每一 β 值，再令 ΔTs 為變數。其結果可由圖 10 中看出，圖中曲線表示在不同的 β 值時，雲頂高度與 ΔTs 的關係，其中點線與長虛線之意義與圖 9 中相同。將各關鍵值找出，表於圖 11 (c)。

比較圖 11 (a)、(b)、(c) 三圖，發現 β 的改變對氣源參數的低關鍵值幾無影響；唯隨著 β 的增大，高關鍵值將隨之而增大。這是因為雲中渦動強度為垂直速度的函數，在到達凝結高度時，垂直速度尚不甚大，故只須較低的氣源強度即能到達凝結高度，故 β 的改變對低關鍵值影響很小。但當氣流通過凝結高度，到達對流高度前，由於潛熱的釋放，垂直速度已增至相當大，使雲中渦動強度增強，亦即 β 值的加大，而導致高臨界值的較明顯增加。

若將圖 11 (a)、(b)、(c) 分別與圖 3、5、7 組合，可視為兩個垂直相交的平面，如圖 12 所示：令 β 、 ν_r 及氣源參數 S (圖 12 中為 RHs) 分別為三個互相垂直的座標軸，原點為 ($\beta=0.01$, $\nu_r=0.1$, So), So 為某一氣源參數值，圖 12 中令其為 $RHs=73\%$ ，可建立一座標系。由於圖 11 (a) 與圖 3、圖 11 (b) 與圖 5、圖 11 (c) 與圖 7 在相交的 $\nu_r=0.1$, $\beta=0.01$ 一線上，圖形均能符合，吾人可推測在垂直於 ν_r , β 軸的每一個平面，均應有與圖 11 (a)、圖 4 相似的圖線，這些圖線的聯集當可將 (ν_r , β , So) 空間分為三區，即無雲區、氣草雲區及積雲區。亦即對任一已知強度 S 的氣源，若知當時大氣及雲中渦動的強度，即可斷言其應屬何種雲類。

四、結 論

在此一研究中，發現氣源參數 S (代表 RHs 、 Ws 、 ΔTs 任一) 的高、低關鍵值 S_u 、 S_L 將因大氣渦動的增強而增大，且 S_u 的增大遠較 S_L 為快；當大氣渦動不強時， S_u 與 S_L 甚為接近，隨渦動的加強，兩關鍵值的差值亦加大。雲中對流所引起的渦動，對 S_L 值則幾無影響，但當雲中渦動強度增加時， S_u 值亦隨之做小幅度的增加。由於這兩種渦動強度的改變均能使高、低關鍵值發生變化，我們相信除文 (A) 中所指出，氣源強度的波

動能使雲高呈散亂分佈，同時，當渦動強度受環境風之影響而發生改變時，雖為同樣的氣源強度，由於關鍵值的改變，亦將使雲高發生散亂分佈的現象。上述兩種說法，均能成功的解釋 Glass 和 Carlson (1963) 的觀測資料。

將兩種渦動的影響合併討論，本文曾提出一 (β 、 ν_r 、 So) 空間，將空間分為三區，分別稱為積雲區、氣草雲區和無雲區，推論當已知氣源強度時，若知渦動強度，應可預測其發展所成雲的類型。

在此模式中，大氣渦動隨高度的變化已予忽略，雲中渦動亦僅受垂直速度的影響，與實際天氣情況相比，顯然太過簡化，但所得結果，仍能對若干現象加以解釋，故我們相信，此一研究仍具其重要性，即對以後進一步的模擬，提供一有力參考。再性，即對以後進一步的模擬，提供一有力參考。再性，我們希望能在將來找出 ν_r 、 β ，與實際觀測到的高空風資料的關係，則我們對渦動混合對積雲的影響，將有更進一步的了解。

參考文獻

- Glass, M., and N. T. Carlson, 1963: The growth characteristics of small cumulus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 20, 397-406.
- Haltiner, G. J., 1959: On the theory of convective currents. *Tellus*, 11, 4-15.
- Priestley, C. H. B., 1959: *Turbulence Transfer in the Lower Atmosphere*. The University of Chicago Press, Chicago, Ill, pp. 130.
- Turner, J. S., 1963. The motion of buoyant elements in turbulent surroundings. *J. Fluid Mech.*, 16, 1-16.
- Wang, J. Y. C., 1973: On the formation and development of orographic shallow cumulus clouds. Scientific Report #1, Dept. of Operation, Chinese Naval Academy, pp. 51.

附圖說明

圖 1、圖 1 (a)、(b) 分表大氣原有渦動混合係數 ν_r 為 0.1、0.3m/sec 時之雲頂時變曲線。曲線右方的註脚係指氣源垂直上升速度 Ws 。圖右上角說明其餘參數條件與標準雲相同。

。圖中 W_s 的最小值代表成雲的下限，小於此值即無雲。

圖 2、模式雲的雲頂高度與 W_s 之關係以實線表示，右方註脚指不同的 ν_r 值，左上方為氣源參數。兩點線分別表示高低關鍵值的位置，長虛線則表示高關鍵值的可能位置。 W_{su} 為分隔氣草雲區與積雲區的高關鍵值， W_{sl} 為分隔氣草雲區與無雲區的低關鍵值。當 $\nu_r \geq 9.1$ 時，無雲生成。

圖 3、雲的類型判別圖，考慮 ν_r 與 W_s 對積雲發展的關係；圖中二曲線分別表示二關鍵值隨 RH_s 的變化，高關鍵值的虛線部份表示 W_{su} 的可能位置，因此時 W_{su} 甚難分解。此二曲線將平面分為三區：①積雲區②氣草雲區③無雲區。

圖 4、雲頂高度在不同 ν_r 值時，對 RH_s 的變化曲線，與圖 3 意義相同， RH_{su} 及 RH_{sl} 分別表高、低關鍵值。

圖 5、雲的類型判別圖，與圖 4 意義相同，但所考慮者為 RH_s 的關鍵值之變化。

圖 6、雲頂高度在不同 ν_r 值時隨 ΔT_s 的變化曲線，與圖 3 意義相同，唯所考慮者為 ΔT_s

。圖 7、雲的類型判別圖，與圖 4 意義相同，唯所考慮者為 ΔT_s 。

圖 8、對各不同 β 值雲頂高度隨 W_s 的變化曲線，右方註脚指不同的 β 值，左上方說明各氣源參數。與圖 3 意義相同。

圖 9、對不同 β 值，雲頂高度隨 RH_s 的變化曲線。與圖 9 意義相同，唯所考慮者為 RH_s 。

圖 10、對不同 β 值，雲頂高度隨 ΔT_s 的變化曲線。與圖 9 意義相同，唯所考慮者為 ΔT_s 。

圖 11、雲的類型判別圖：圖 12 (a) 至 (c) 分別表 W_s 、 RH_s 、 ΔT_s 的兩個關鍵值與 β 的關係，均可畫出兩曲線，將平面分為三區：(1)積雲區(2)氣草雲區(3)無雲區。

圖 12、立體座標系：以 β 、 ν_r 、氣源參數 S 為互相垂直的三個軸，以 ($\beta=0.01$ ， $\nu_r=0.1$ ， S_0) (S_0 為任一參數值，此圖中令 $RH=73\%$) 為原點，所有類似 $\nu_r=0.1$ 及 $\beta=0.01$ 兩平面上的圖線所成的聯集，將空間分為三區，即：(1)積雲區(2)氣草雲區(3)無雲區。

氣象預報與分析稿約

1. 本刊以促進氣象學術研究為宗旨，園地絕對公開。凡有關氣象理論，工作驗證，預報方法等創作性稿件，均竭誠歡迎。譯述以特優者為限。凡屬譯稿，務請詳註原文出處，出版年月及地點。
2. 來稿數字以不超過10,000字，即連同圖、表、英文摘要以不超過 8 印刷頁為原則。(有印刷費支援之稿件可不受限制。並可代印單行本。)
3. 來稿請附英文篇名，創作稿並請自撰200字左右之英文提要。
4. 稿中引用文獻，請註明作者姓名、書名、頁數及出版日期。
5. 來稿請以稿紙自左至右橫書清楚，文字務求簡明，並請加標點。
6. 附圖請以墨筆描繪，以便製版。
7. 本刊對來稿有刪改權，不願刪改者，請預先聲明。
8. 來稿請註明作者真實姓名，服務單位及通訊處，俾便奉寄稿酬。
9. 來稿如需退還者，請預先聲明，並請附足額退件郵資。
10. 惠稿請寄交臺北市郵政 7096附1號信箱「氣象預報與分析」季刊社收。

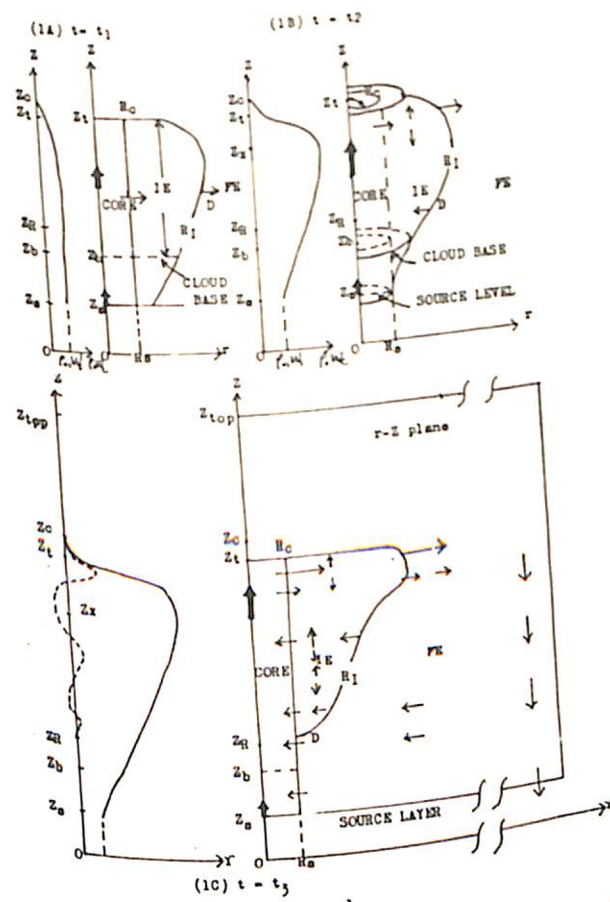


Fig. 1

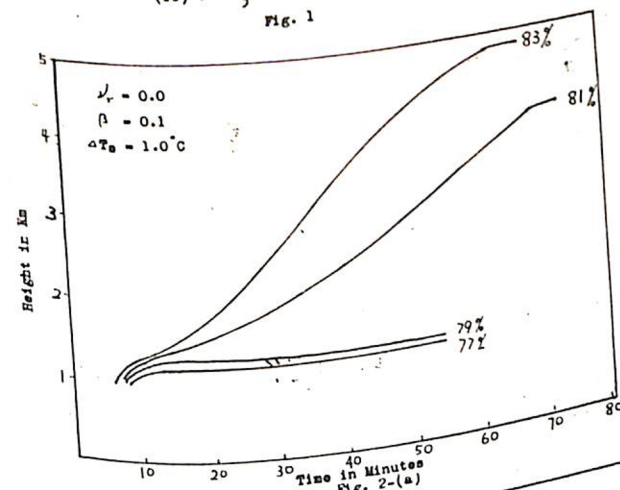


Fig. 2-(a)

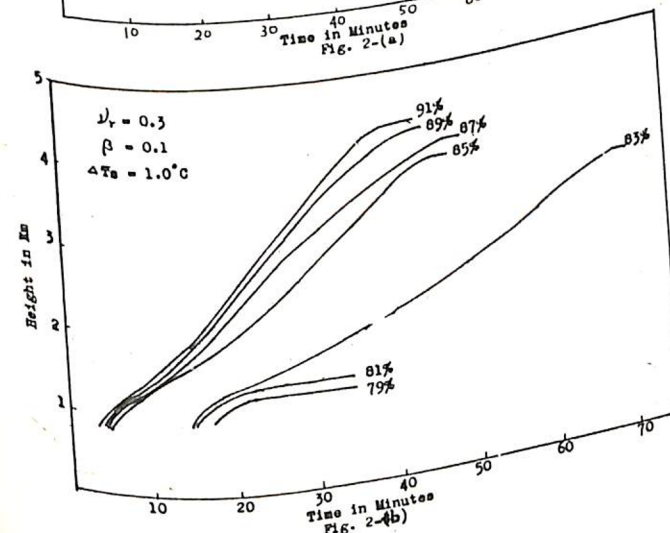


Fig. 2-(b)

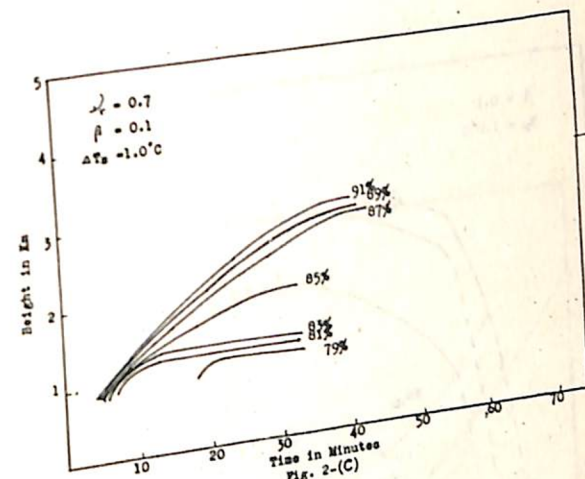


Fig. 2-(c)

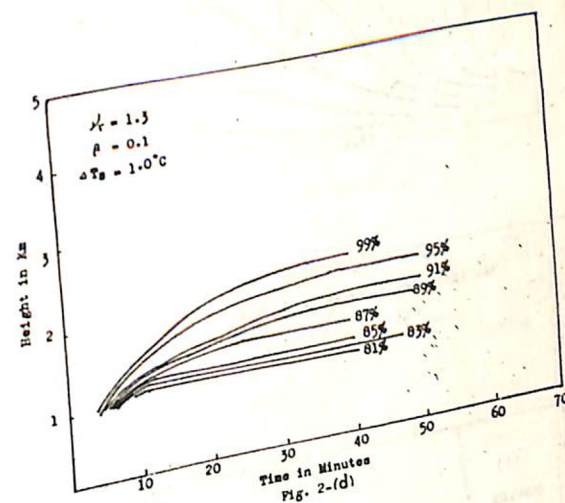


Fig. 2-(d)

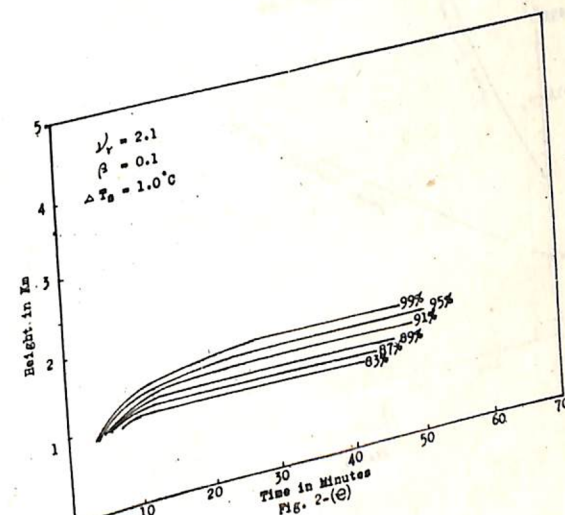
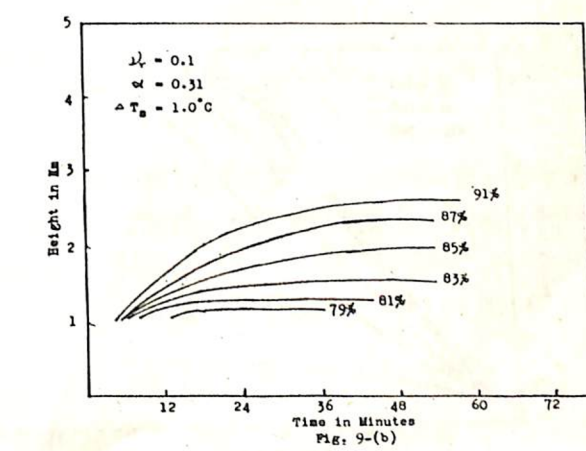
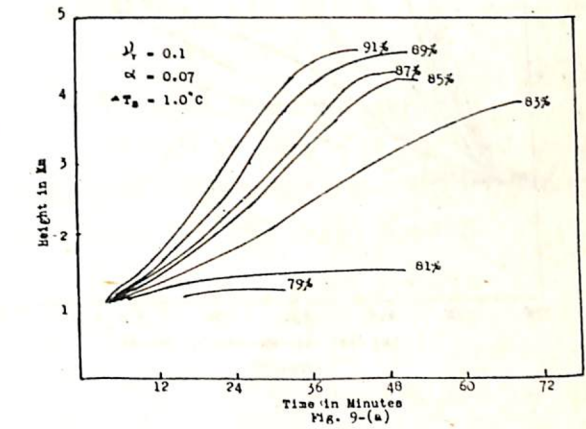
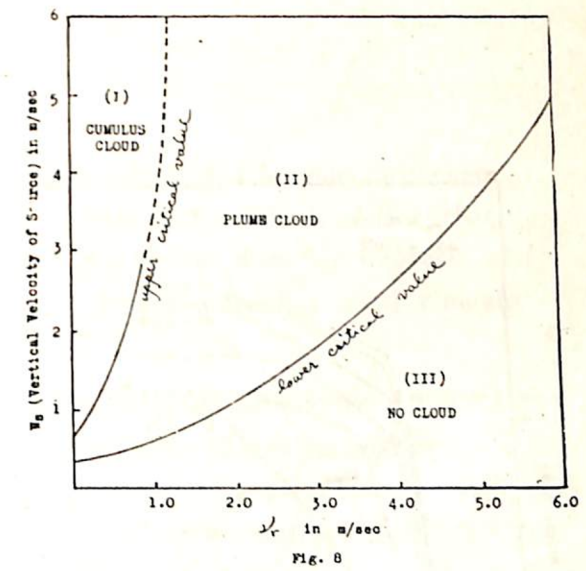
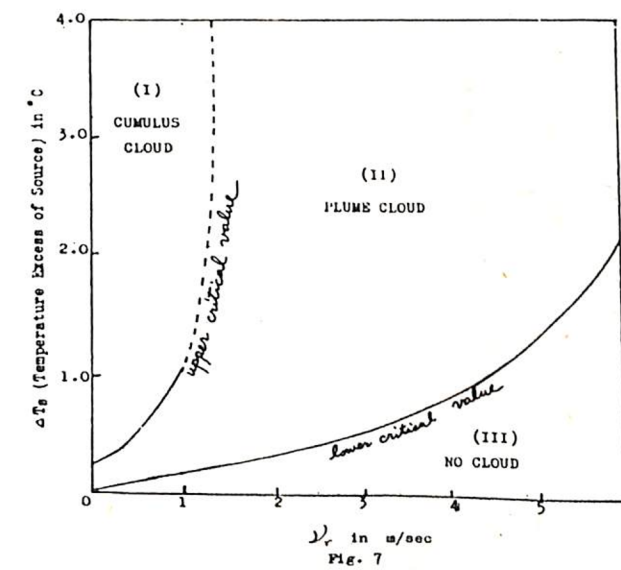
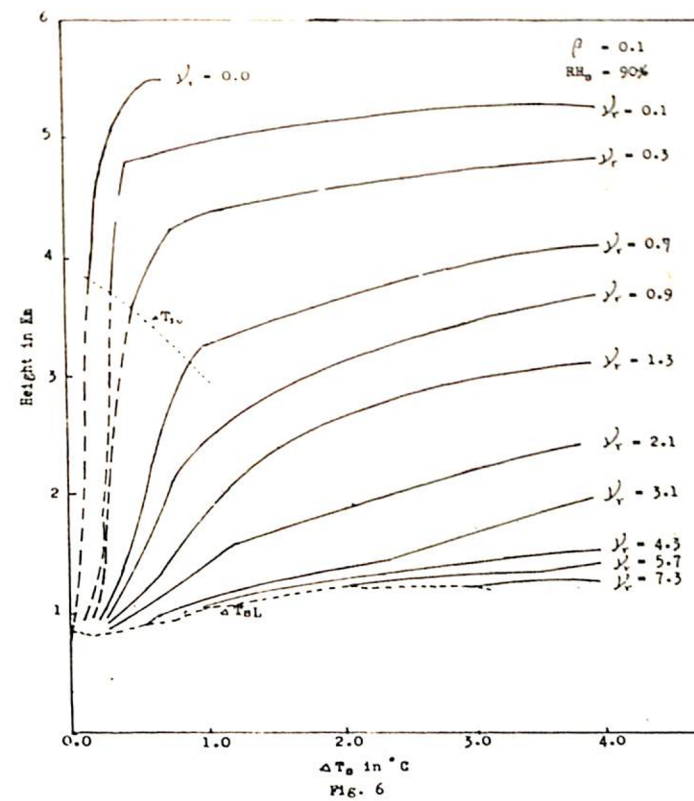
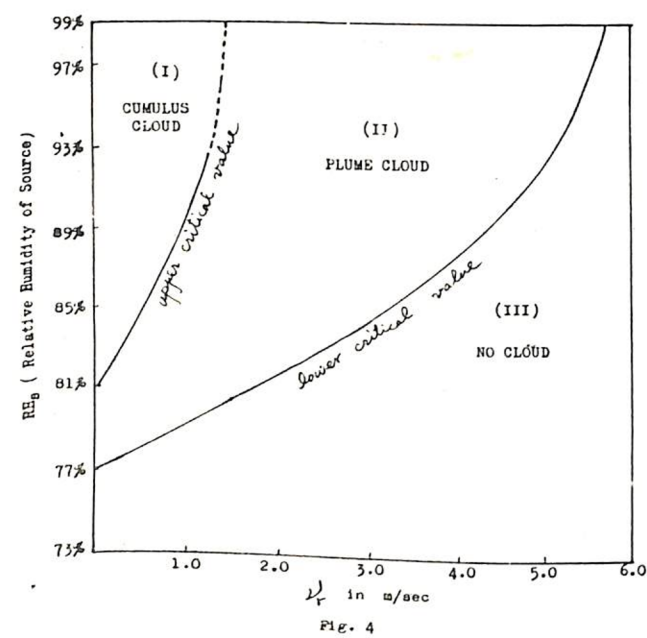
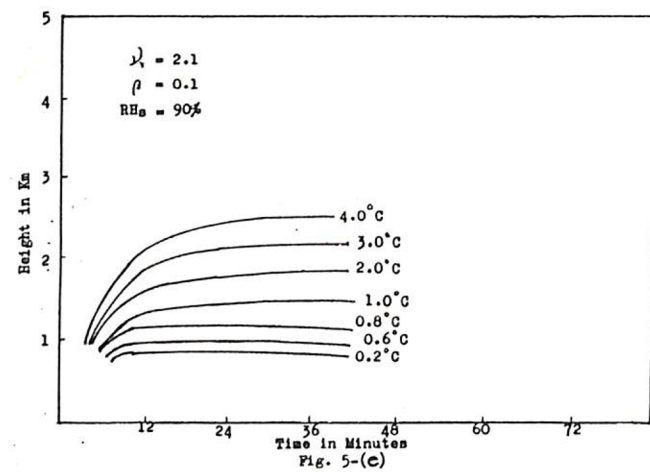
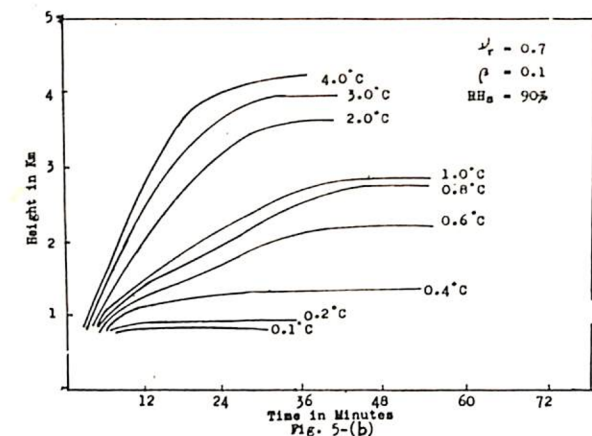
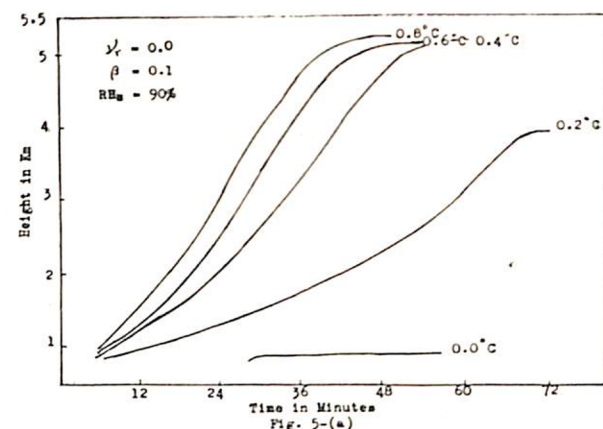
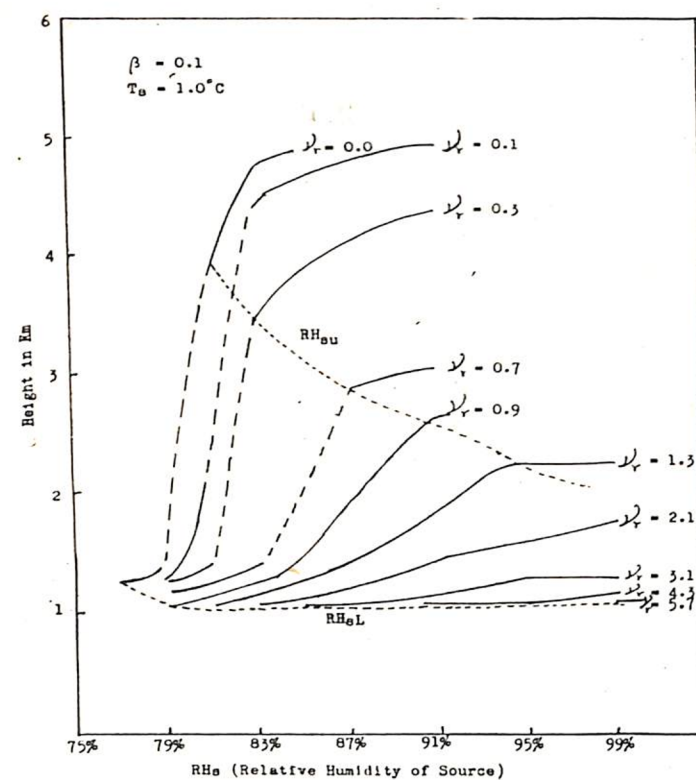


Fig. 2-(e)



Vs
16
19
17
2
18
24
14
7
6
2
3
0
0

於僅一時始，之大，

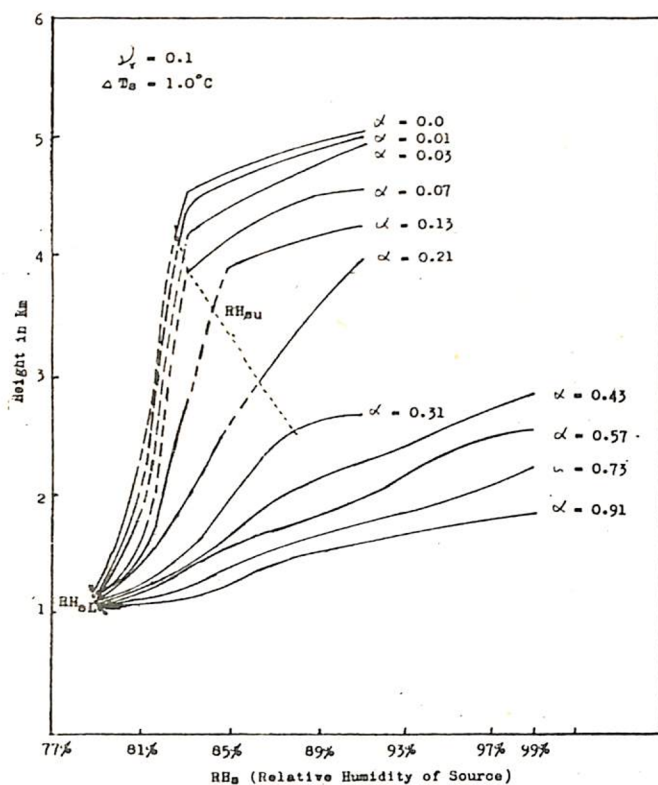


Fig. 10

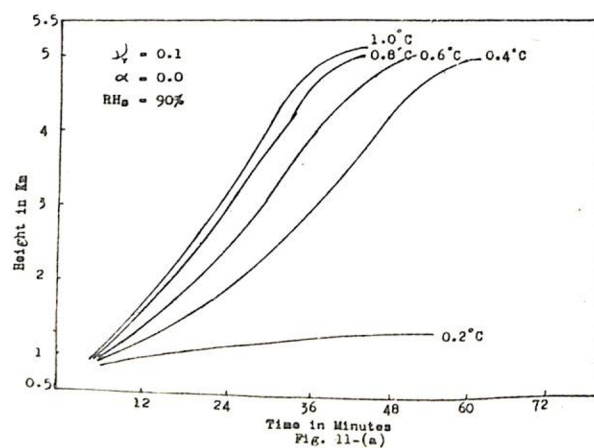


Fig. 11-(a)

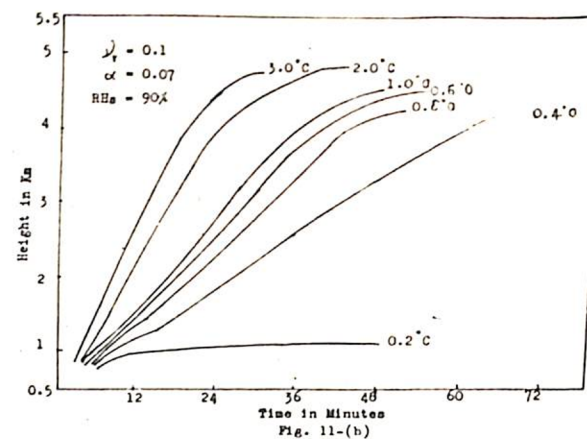


Fig. 11-(b)

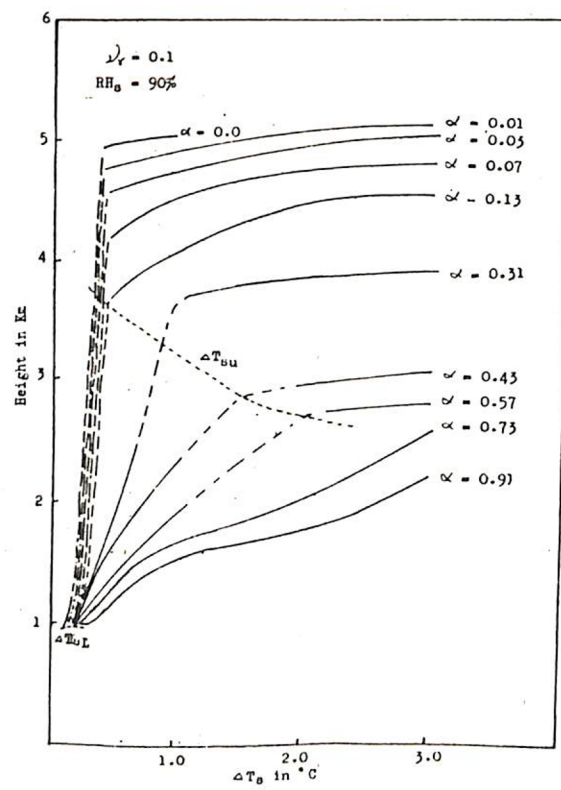


Fig. 12