

# 第二十一屆旺宏科學獎

## 成果報告書

參賽編號：SA21-075

作品名稱：以自製減壓雲室瓶探討凝結核  
與成雲之關係

姓名：林瑋庭

關鍵字：雲室、氣溶膠、液態水含量

## 摘要

在暖雲的形成過程中，吸濕性凝結核佔有舉足輕重的位置，且在大氣層中常會有不同種類的凝結核。本研究以自製的減壓雲室瓶模擬絕熱膨脹情況，並探討不同凝結核之成雲效果。減壓使凝結成長的效果在消光量的測量上符合比爾定律。而且利用絕熱膨脹估計出本系統在 0.85 atm 環境下每立方公尺的液態水含量 LWC 大約落在 1.9~2.1 公克，0.93 atm 環境下每立方公尺的液態水含量 LWC 大約落在 0.3 公克，表示本實驗方法能擬合絕熱膨脹過程。且 0.85 大氣壓下，NaCl 與線香粒子的成長可以達到 1.68 至 1.94  $\mu\text{m}$ ；硫酸銨粒子成長則達到 1.01~1.12  $\mu\text{m}$ 。而 0.93 大氣壓下，硫酸銨粒子成長則是 0.77~1.04  $\mu\text{m}$ 。另外，比較水溶性粒子與固態微粒化學性質，發現水溶性粒子如 NaCl 和硫酸銨的確較適合做為水氣之凝結核。

過去雲室瓶相關研究中，多以先加壓後瞬間減壓使雲滴快速凝結。本研究有別於以往，以直接減壓的方式使雲滴快速凝結，能更適切的模擬大氣中的氣塊舉升與雲滴成長。本研究對自製減壓雲室瓶的設計並非一蹴可幾，進行多次嘗試與改良，才有第一代雲室到第二代雲室的更正。最終，我們以第二代雲室計算雲滴成長大小、驗證比爾定律並發現水溶性粒子更適合做為水氣之凝結核之結論。這些結論代表本研究自製的減壓雲室瓶是一種準確的，充滿前景的新型研究方法。

## 壹、研究動機

水資源是台灣各種產業不可或缺的一部份。然而，台灣的降雨時間、空間皆不平均。夏秋是主要降水季節，一旦夏秋降雨少，春季就會面臨缺水問題。2020年未有颱風經過台灣，導致台灣面臨56年來最嚴重旱災。再者，台灣河流短小流急，地狹人稠。使台灣的年降水量雖為2500mm，為世界平均降水量的三倍左右，人均量卻是名列缺水國家的第十八位。

經由文獻探討，我們發現空氣中有許多次微米之懸浮微粒，這些懸浮微粒若是吸濕性粒子，就可以成為凝結中心，凝結空氣中之水蒸氣成為雲滴。而這些雲滴就可以彼此碰撞，增大並降雨，紓解台灣的旱災。所以我們希望可以對這些吸濕性微粒進行研究，探討其在大氣中之凝結與消光效果。

## 貳、研究目標

- 一、探討有效粒子數與壓力大小對凝結效果的影響
- 二、找出減壓過程中雲滴大小的變化
- 三、了解不同粒子凝結效果的差異

## 參、研究設備與器材

### 一、研究器材

- (一) 個人電腦與數據處理軟體 Microsoft Excel
- (二) 光度計(LM-81LX)
- (三) 550 奈米綠光雷射發射器
- (四) 可填充式打火機
- (五) Tes-5110 粒子計數器
- (六) 矽膠、橡膠塞、球針
- (七) 抽氣針筒(70 ml\*2+350 ml\*2)
- (八) NaCl、線香、硫酸銨
- (九) 負壓計、正壓計
- (十) 銅管與單向閥

### 二、實驗裝置：



圖 1 第一代雲室瓶

資料來源：作者自行設計與拍攝

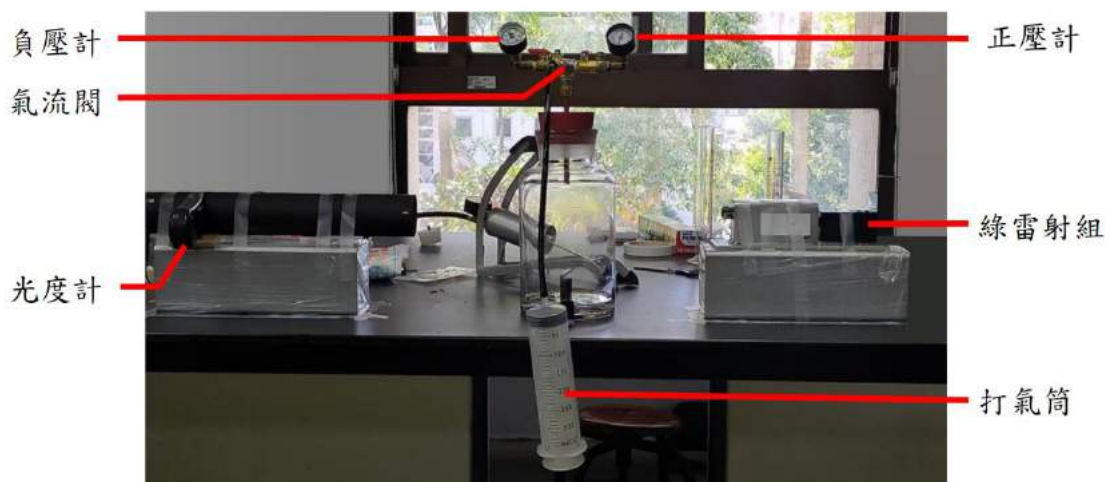


圖 2 第二代雲室瓶

資料來源：作者自行設計與拍攝

## 肆、研究過程與方法

### 一、文獻探討

#### (一) 凝結核與凝結成雲之關係

大氣中的小水滴其形成受到活化障礙的限制，所以不會在達到飽和水氣壓後就立刻形成。事實上，在純水蒸氣中，相對濕度需達 400% 才有可能有水滴形成。雖然在純水蒸氣中難以形成水滴，但在我們的大氣中充斥著大量吸濕性，次  $\mu\text{m}$  的小粒子。這些小粒子會成為凝結中心，故被稱為凝結核(condensation nuclei)。水氣在凝結核上凝結之過程被稱為異質成核(heterogeneous nucleation)，相對的，純水氣在極度過飽和環境下形成的水滴稱為均相成核(homogeneous nucleation)。均相成核在大氣中極難發生，因此較不重要。

當濕空氣在絕熱狀態被冷卻時，相對溼度會逐漸靠近 100%。此時，吸濕性凝結核就開始擔任凝結中心。如果空氣繼續冷卻——也可說是氣塊繼續上升，則空氣會達過飽和，並迅速被凝結核凝結水氣直到相對溼度回到 100%。通常大氣都具有足夠的凝結核，讓相對溼度不超過 101%。

一朵雲是由半徑  $10\mu\text{m}$  的小雲滴組成，密度約是每立方公分數百個小雲滴。雲在平時是極為穩定的，且不會隨意改變大小，除非所有雲滴一起改變。但有兩種狀況會使雲變得不穩定：雲滴受可能因素影響而彼此碰撞，或雲頂溫度過低結冰。當雲不穩定時，雲滴會開始彼此結合形成增長。

雲滴下降的過程中，太小的雲滴，將無法掉落至地面形成雨。如果雲朵發生了碰撞引起的不穩定而使雲滴成長到  $18\mu\text{m}$  左右或更大，雲滴才有可能掉到地面產生降雨。

而在雲頂溫度過低導致粒子結冰時，因為冰晶表面的水氣壓較低，導致如果冰晶與水滴共存，冰晶會吸收水滴周圍水氣而成長，水滴持續蒸發而消失。這種因蒸氣壓差氣而導致冰晶成長的最佳條件是  $-15^\circ\text{C}$ 。

在雲物理學中，粒子的濃度、大小可能會有很大的差異。圖 3 中顯示，雲滴與雨滴、雲滴與凝結核，即便各項前者均是由後者形成，他們的濃度、墜落終端速度也有極大差異。

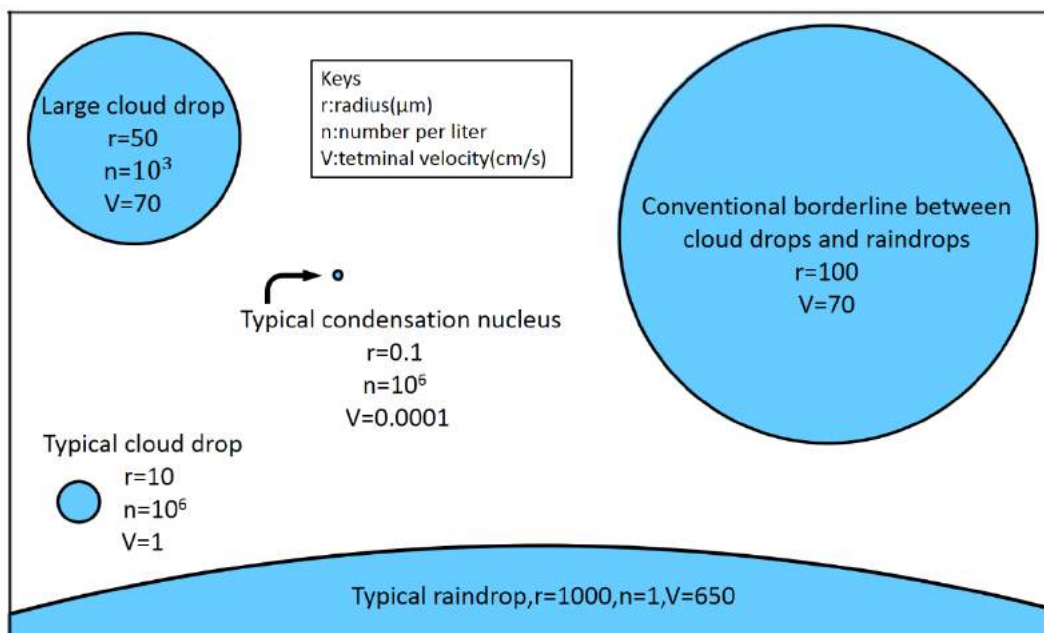


圖 3 凝結核、雲滴、雨滴大小示意圖  
(資料來源：參考資料 六)

在異質成核的過程中，雲由氣膠中的凝結核形成。異質成核的雲形成效率與形成量是由空氣中凝結核數量決定的，而不包含上述提到的碰撞不穩定。整體而言，氣膠還可以再依對水的親和力分成兩種：親水性與疏水性。要讓疏水性凝結核凝結需要的過飽和水氣量，與純水蒸氣差不多。親水性凝結核則不然，它們常是可溶性鹽類，且比均相成核需要更少的水氣量，故常在大氣中發生。

根據拉午爾定律，非揮發性、可溶的溶質會降低溶液的飽和水氣壓。這個現象可粗略的用以下方法思考：當溶質融入液體時，在液體表面的一些粒子會被溶質粒子所取代。而如果溶質的飽和蒸氣壓比溶劑還要低，那麼蒸氣壓的下降量就會與含有溶質粒子數成正比。這個現象對於水氣而言，當環境水氣量相同時，具有溶質的水氣飽和水氣壓降低，相對濕度於是提高，更容易凝結成雲。因此溶有溶質之液體比起純水更容易凝結。

在大氣中，主要能形成雲的粒子在 0.1 到 4 $\mu\text{m}$  間。0.1 $\mu\text{m}$  以下之粒子因太小，需要更多水氣方可凝結成大雲滴。

## (二) 粒子大小、數量與消光量之關係

在大氣中，存在許多數  $\mu\text{m}$  的懸浮微粒。這些懸浮微粒會使光反射、繞射，減少接受器收到的光度。我們稱「光度受懸浮微粒下降」的效果為「消光效果」。

粒子之消光效果與符合比爾定律：

$$Z = \frac{I}{I_0} = e^{(-\epsilon_{\text{ext}} \times x)} \dots\dots\text{式 1}$$

其中  $I$  與  $I_0$  分別為末光度與初光度， $\epsilon_{\text{ext}}$  稱為消光係數(extinction coefficient)， $x$  為光線之行經路徑長。在式 1 中，我們將  $I$  除以  $I_0$  定義為消光量  $Z$ ，以利後續數據處理與討論。

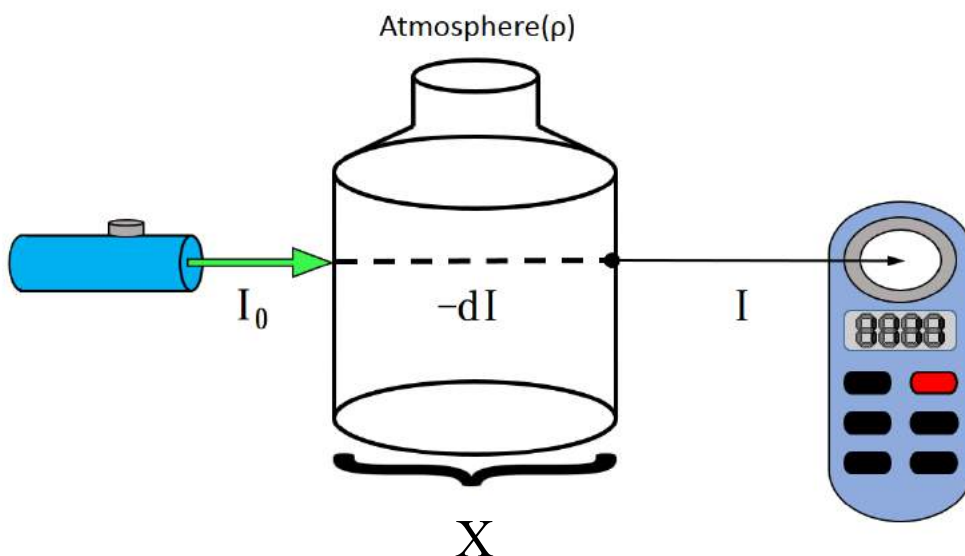


圖 4 大氣消光示意圖 (資料來源：參考資料十)

(三) 消光係數 $\epsilon_{ext}$  (extinction coefficient)與消光效率 $Q_{ext}$ (extinction efficiency)

對於空氣中的雲滴與霧滴，消光能藉由兩種方式進行：散射與吸收。吸收會使雲滴溫度增加，但對整體消光貢獻較少。散射又可區分為折射、反射與繞射。

而對於一個已知粒徑與折射率的粒子而言，我們可以求出他的複數折射率形式。

$$m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda) \dots\dots\text{式 2}$$

式 2 中 $n(\lambda) + ik(\lambda)$ 均為受波長影響的常數，其中  $n$  為光折射率，而虛數部分  $k$  則與吸收係數 $4\pi k/\lambda$ 有關。比起折射率只與散射有關，複數形式多考慮了光的吸收。故消光係數、消光效率均用複數折射率進行計算。

在得到前文所述之複數折射率  $m$  後，搭配粒子大小  $D$  與波長  $\lambda$ ，我們可利用 Mie theory 經複雜計算得出散射效率 $Q_{scat}$ 、吸收效率 $Q_{abs}$ 與消光效率 $Q_{ext}$ 。且 $Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{scat}$ 。消光效率為粒子半徑與波長之函數，對於粒徑相同之粒子而言，消光效率僅與粒子本身化學性質有關。

求出消光效率後，再考慮各粒子大小與數量，可得消光係數 $\epsilon_{ext}$ 與消光效率 $Q_{ext}$ 之關係，即：

$$\epsilon_{ext} = Q_{ext} \times N \times \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \dots\dots\text{式 3}$$

式 3 中， $N$  為該粒徑之總粒子數， $\frac{\pi D^2}{4}$ 就是粒徑平面表面積之計算式。因此，在粒子相同，即 $Q_{ext}$ 為定值時， $\epsilon_{ext}$ 與所有粒子平面表面積成正比。同理， $Q_{abs}$ 和 $\epsilon_{abs}$ 、 $Q_{scat}$ 和 $\epsilon_{scat}$ 均有類似關係。

然而，以 Mie Theory 計算複數折射率的方式，僅在光波長 $\approx$ 粒子大小時可用。

當波長 $\gg$ 粒子大小時，使用雷利散射，即 $Q_{scat} \approx \lambda^{-4}$ ， $Q_{abs} = \lambda^{-1}$ 。

當波長 $\ll$ 粒子大小時，用幾何光學求出散射量。此時之 $Q_{ext}$ 趨近 2。

(四) 絕熱膨脹下，凝結量與雲滴之成長大小與溫壓之關係

當我們減少雲室瓶中之壓力時，隨著壓力降低，會有更多水氣得以凝結，促使雲滴擴大。而當在絕熱膨脹情況降低壓力時，大小不同之粒子會成長至相近大小。雲中環境數值遵守式 4：

$$\frac{T}{pR(C_p+C_wQ)} \times \exp\left(\frac{W_sL}{T(C_p+C_wQ)}\right) = \text{constant}\dots\dots\text{式 4}$$

以下定義式 4 所使用之代號：

T：環境之溫度，K

P：壓力，Pa

R：理想氣體常數，8.314 J/K\*mole

C<sub>p</sub>：定壓莫爾熱容，在 S.T.P = 1.005 J/g\*K，在本計算中視為定值

C<sub>w</sub>：水蒸氣之定壓莫爾熱容，在 S.T.P  $\approx$  1.86 J/g\*K

W<sub>s</sub>：氣塊之水蒸氣混合比

L：水之潛熱，常數

Q：氣塊之水混合比

在式 4 中，W<sub>s</sub>、Q 均是 T 之函數。C<sub>p</sub>、C<sub>w</sub> 也是 T 之函數，不過因在我們考慮的溫度範圍內，兩者變化量很小，故可視為定值。經化減後，可得到一個只有 T 的一元非線性方程，利用勘根定理求解。這個方法雖然極為準確，然而實際計算極為複雜，難以執行。為此，我們找到了另一個多估計、分段但較易操作的方法。內容如下：

以下定義 P1、T1 為初壓力、溫度，P2、T2 為恰凝結時之壓力、溫度，P3、T3 為舉升到所求壓力之壓力、溫度。Ha 為氣塊自地面舉升到恰凝結，需要上升的高度。Hb 為氣塊自恰凝結高度舉升到所求壓力對應之高度，需要上升的高度，如圖 5 所示。

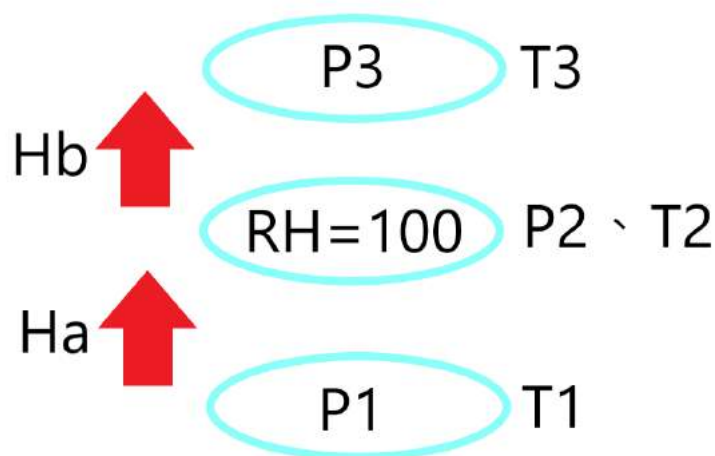


圖 5 氣塊舉升高度與溫壓代號圖

資料來源：作者自行繪製

以下介紹以較簡易方法，計算雲滴成長大小之步驟。

以下計算方法，參考參考資料四進行。

1. 求出舉升到氣塊恰飽和，氣塊應舉升之高度：  
利用式 5、式 6：

$$\Delta RH = Q_1 \times H_a \dots \text{式 5}$$

$$Q_1 = \frac{g}{T_1 R} \left( \frac{\varepsilon L}{c_p T_1} - 1 \right) \dots \text{式 6}$$

以下定義式 6 使用的代號：

$g$ ：地表重力加速度， $9.8 \text{ m/s}^2$

$R'$ ：乾空氣理想氣體常數  $287 \text{ J/K} \cdot \text{kg}$

$\varepsilon$ ： $R'$ (乾空氣氣體常數)/ $R_v$ (水氣之氣體常數)=0.622

$C_p$ ：定壓莫爾熱容，在 S.T.P =  $1.005 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ ，在本計算中視為定值

$L$ ：水氣之潛熱 =  $2260 \text{ KJ/kg}$

就可用 RH、 $T_0$  等初始環境條件，根據式 6 求出  $Q_1$  後，根據 RH 與 100 之差，求出舉升高度  $H_a$ 。

2. 以此高度，求出氣塊恰飽和之溫度與壓力：  
利用壓高公式：

$$\Delta P = \rho g \Delta h \dots \text{式 7}$$

式 7 中， $\rho$  代表大氣之密度， $g$  代表地表重力加速度。在式 7 代入  $H_a$  後，可求出  $P_1$ 。再將  $P_1$  代入乾絕熱膨脹公式：

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^k \dots \text{式 8}$$

式 8 中， $k$  = 定值 = 0.286。在式 7 代入  $P_2$  後，就可求出  $T_2$ 。只要是絕熱的乾氣塊都可以利用本公式，進行壓力與溫度的換算。

3. 求出常數  $C_q$ ：  
我們定義：

$$C_q = \frac{c_p}{L} (\Gamma_d - \Gamma_s) \dots \text{式 9}$$

以下定義式 9 使用的代號：

$C_p$ ：定壓莫爾熱容，在 S.T.P = 1.005 J/g\*K，在本計算中視為定值

$L$ ：水氣之潛熱 = 2260 KJ/kg

$\Gamma_d$ 、 $\Gamma_s$ ：分別代表空氣之乾絕熱遞減律與濕絕熱遞減率。雖然均為溫度之函數，不過在本計算中因溫度變化不大，可視為 10 K/km 與 6 K/km

求出  $C_q$  後，對於淺雲而言(雲之厚度小於 500m)，整朵雲之  $C_q$  可視為和雲底相同。

#### 4. 解出凝結量 LWC 與雲滴大小：

先由式 7，由 P3-P2 求出 Hb 後，可再由式 10 求出 LWC：

$$LWC = \rho C_q Hb \dots \dots \text{式 10}$$

LWC 之因次為  $[M]^{-1} * [L]^3$ ，算出來為一體積濃度單位。

求出 LWC 後，再利用式 11：

$$\frac{\Delta LWC}{\rho} = \frac{\pi}{6} (D_{p0}^3 - D_{p1}^3) \times N_p \dots \dots \text{式 11}$$

在式 11 中，我們定義：

$D_{p0}$ 、 $D_{p1}$ ：分別代表粒子膨脹前與膨脹後之粒子直徑。

$N_p$ ：一公升空氣內的粒子數，也就是粒子濃度

透過式 11，本研究得以會對粒子的成長進行分段計算，求出壓力降低後粒子之成長大小，概念如圖 6 所示。

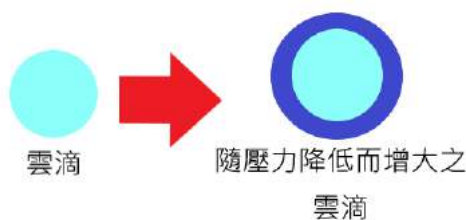


圖 6 粒子成長示意圖(作者自行繪製)

資料來源：Chapter 6.5 in Judith A. Curry & Peter J. Webster, Thermodynamics of Atmospheres & Oceans. Academic Press International Geophysics Series, Volume 65

#### (五) 粒子計數器(aerosol particle counter)原理

粒子計數器主要功能，是對特定環境之空氣粒子濃度與大小，進行快速且準確的測量。氣膠中的粒子只有幾  $\mu\text{m}$  大小，難以直接拍攝或用肉眼觀察測量，因此粒子計數器利用粒子對雷射光之散射測量粒子數量與大小。

粒子計數器有幾樣重要組成原件，以下分別介紹其功能：

1. 雷射二極體(laser diode)：輸出同波長，同強度之光線在空氣樣本上。
2. 穩定流量控制器：控制空氣中粒子在計數器中被測量的時間，確保每粒子散射光之時間相同。
3. 光感測器：為一感光元件，測量收到的光度，依據光強度發出不同電壓之電流。
4. 脈衝高度分析器：根據電流之波高，將電流分流到不同的電路
5. 暗箱：除了隔絕外界光線外，暗箱也裝有數據處理電腦，除了能對已分流之電路進行脈衝數計算外，也可進行濃度換算、粒子數算算濃度等數據初步處理。



當我們了解這些原件之功能後，就可開始了解粒子計數器之運作原理：

1. 粒子計數器吸入空氣，將空氣壓縮後，以管路將其導至雷射光所在處。
2. 當粒子通過雷射光時，會產生散射而使光線偏折至兩側蚌形匯聚面鏡區。
3. 兩側之匯聚面鏡聚焦光線在光感測器上，感測器發出電流。
4. 脈衝高度感測器與暗箱將觀測數據進行處理，傳換成粒子數與濃度

由此可知，粒子計數器其實並非在「算」粒子。而是利用粒子散射之光轉換成電流訊號，並以此推算成大氣中之粒子數。因此，粒子之形狀與光學性質可能會影響計數器之計算結果。粒子計數器預設計算的是空氣中之球形粒子，如果樣品是不規則形，可能會導致測量錯誤。而對於粒子本身光學性質而言，以矽粒子與從熱源產生之微粒舉例：矽粒子具有較高反光特性，所以在測量時可能誤測為較大粒子；熱源產生之粒子則反之，較會吸收光線，就可能誤測為較小粒子。

因為用光學測量，粒子計數器也有飽和濃度的問題。當空氣中粒子濃度太高時，光感測器將無法正確分辨不同粒子散射之光線，使得數個小粒子被誤認成一個大粒子。

本研究使用粒子計數器，可測量出 0.3、0.5、1、2、5、10 六個大小區段的粒子數。我們會將粒子數換算成粒子濃度後，進行雲滴成長大小的估計。

## 二、實驗設計與方法

本研究採用自製雲室瓶(cloud chamber bottle)的方式，在瓶中輸入水氣與凝結核後，瞬間減壓，並以消光量  $Z = -\ln(\text{接收器光度}/\text{發射器光度})$  作為間接測量凝結量的依據。雲室瓶除了容易輸入凝結微粒外，也能以減壓加速凝結，且環境密閉空間也較易觀察凝結量、測量罐內凝結核數量。是不能在實際大氣進行實驗時，兼具經濟性與便利性的良好實驗裝置。

### (一) 第一代雲室瓶之設計

第一代雲室瓶之實驗步驟如下：

1. 把雲室瓶倒立，並在瓶口以打火機加熱物質。先在罐中燒入水氣後，將 NaCl 燒入雲室瓶中作為凝結核。
2. 以 TES 粒子計數器測量燒入的凝結核量。重複取樣，直到相對濕度(RH 值)維持在 88~92 間。
3. 將玻璃罐放於桌上與十字準心對齊，避免玻璃罐折射導致初始光度差異。(見問題討論(二))
4. 開啟綠雷射發射器，經過玻璃罐中水氣消光進入右側光度計。測量消光量(發射光度減去接收光度)作為間接測量水氣凝結情況的依據。
5. 蓋上裝有單向閥之瓶蓋後，以抽氣筒搭配單向閥，進行減壓並持續測量消光量  $Z$  的變化。

第一代雲室瓶的討論與改良：

1. 抽氣筒主要抽的對象是液體，對於氣體無法完全密封，減少之壓力可能隨時間回復至 1 atm。
2. 罐內之凝結核數量難以控制，只能採取粒子計數器之測量結果做為參考，而無法以實驗方法控制罐內粒子數。
3. 粒子計數器之採樣體積為 1 公升，相較於雲室瓶之體積 2.9 公升太大，可能導致室外空氣流入改變罐內原有空氣性質。
4. 雲室瓶中，雲的形成在第一次抽氣時就已被決定。進行分段抽氣僅會擴大雲室瓶中雲滴之大小，而不會增加雲滴之數量。

為了改善以上提及之問題，我們對實驗裝置進行改良，而有了第二代雲室瓶。

## (二) 第二代雲室瓶

在第二代雲室瓶中，我們針對第一代雲室瓶之缺點逐一改良，改良內容如下(對應一代)：

1. **加裝氣流閥**，在抽氣後關閉，避免抽氣筒材質導致氣體回流。並加裝負壓計與正壓計，確切得知抽氣後之罐內壓力。
  2. 改在另一玻璃罐中燒入凝結核後，再以打氣筒將罐中含有凝結核之空氣打入雲室瓶中。以輸入至雲室瓶中之含凝結核空氣量，**控制雲室瓶中凝結核數**。
  3. **降低粒子計數器取樣量為 0.5 公升**。
- 進行以上幾點改動後之實驗步驟如圖 7 所示

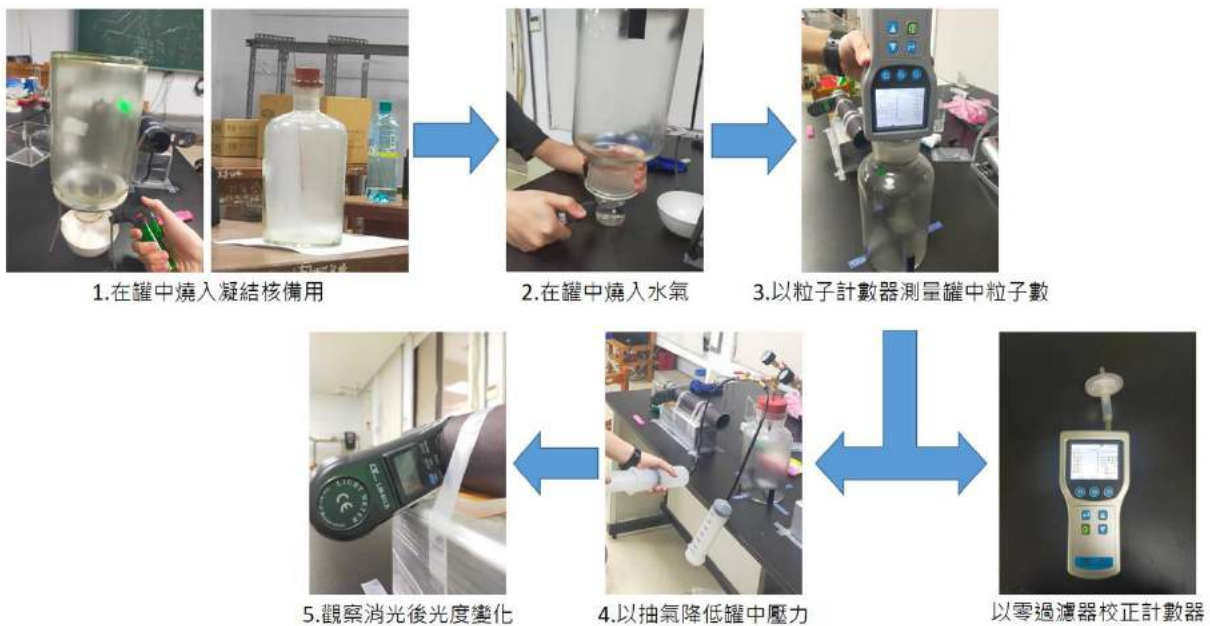


圖 7 第二代雲室瓶操作流程圖

資料來源：作者自行製作

## 三、問題討論

### (一) 光度計歸零

為了要準確量測雷射光源於實驗空間中的變化，使用光度計來接收雷射光源，但光度計會受到環境光源的影響，使光度計無法於每次實驗前都出現相同的環境光源大小，因此設計了足夠長度的黑管，以確保環境光源無法藉由反射或散射等方式，影響光度計的數據，這樣一來，每次實驗前，只需要將光度計置入黑管後，光度計就會歸零，不受環境光源的影響，安放於特定接收位置後，只會接收雷射光源，因此當實驗空間內，雲霧產生變化後，即能測得雷射光通過雲室瓶後的光度變化。

### (二) 雲室瓶折射問題

經多次實驗測試，我們發現圓形玻璃材質在雷射光穿透時，會出現內壁折射問題。因此在固定綠雷射組位置後，必須對雲室瓶穿透位置進行測試，並完成標定。方可確認雷射光在固定位置穿透雲室瓶後，能夠準確將光源集中於光度計的中心位置，且雲室瓶基座也必須完成記號，以確保移動後能夠快速且正確的放回原有標定位置，減少實驗誤差。

## 伍、研究結果與討論

本報告為了排版整潔，將一些用於繪圖之實驗數據與雲滴大小計算過程移至附錄，請評審教授搭配觀看。

### 一、 實驗成果

#### (一) 第一代雲室瓶

實驗	組別	加入凝結核	燃燒凝結核時間	加熱水時間
1-1	A	NaCl	1'30"	2'00"
	B	NaCl	2'00"	2'00"
	C	NaCl	2'30"	2'00"
	D	NaCl	3'00"	2'00"

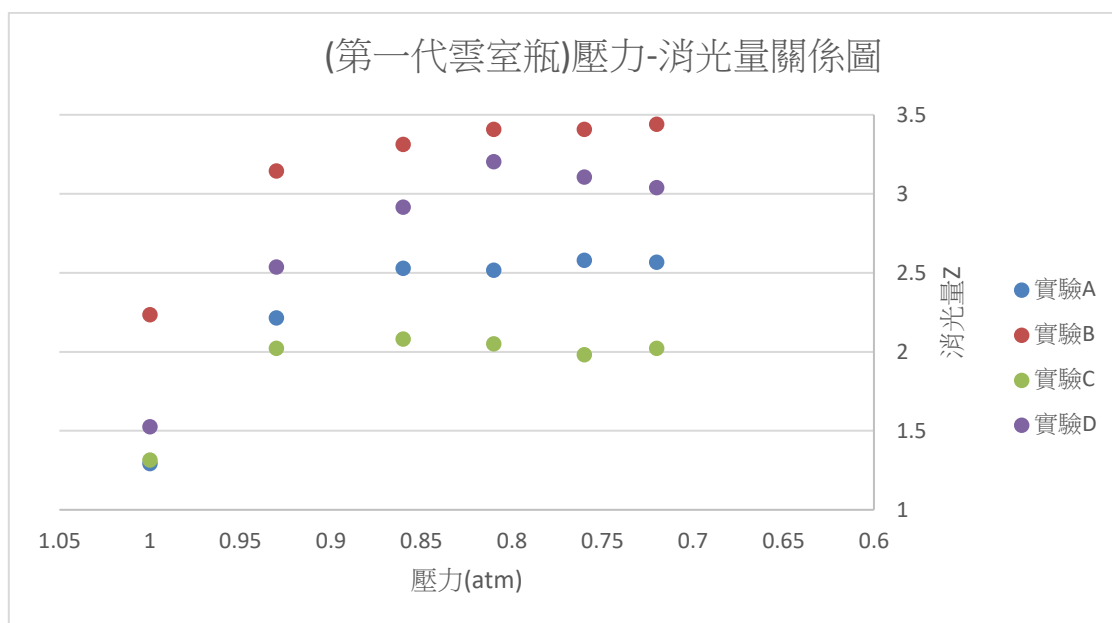


圖 8 壓力-消光量關係圖

資料來源：作者自行繪製

#### **搭配** 附表 1 粒子總截面積-消光量-壓力關係表

在 A~D 組實驗中，本研究以粒子計數器測量雲室瓶中的粒子數，取樣 0.94 公升。

藉由表 1，我們可以發現，燃燒粒子時間與環境中粒子數、粒子總截面積基本無關。因為隨著加熱粒子時間增長，原本已加入之雲室瓶之粒子可能溢散或附著在瓶壁，導致罐內粒子數降低。**搭配** 附表 2 取樣一分鐘(0.94 L)，凝結核數量與燃燒粒子時間關係表)

觀察圖 8，可知隨著壓力逐漸降低，消光量並非如我們所預期的逐漸增加，而是在第二次抽氣時趨於定值。這是因為當我們抽氣時間拉的過長或分次抽氣，在第一次抽氣形成大量雲滴後，後續的雲滴形成會受到先前已形成之雲滴的阻礙而無法順利形成。反之，已形成之雲滴隨著壓力降低而逐漸增大，使消光量增加。但持續減壓抽氣的過程也相當於從環境移除粒子，使消光量降低。在上述之兩項效果同時作用下，消光量才會趨於定值。

了解「雲滴增大消光量增加」與「移除粒子消光量降低」兩者效果相同後，便可以計算雲滴隨壓力降低而成長的大小，計算內容如下：

在第二次抽氣(0.86 atm)後，消光量維持相等。此時，可以假設雲滴皆成長為  $2\mu\text{m}$  大小。且粒子大小遠大於光波長(文獻探討(二))，可假設  $Q_{ext} = 2$ 。

則藉由消光量為定值，也就是消光係數  $\epsilon_{ext}$  為定值，我們可以列出以下等式：

$$D_p = D_{p0} \sqrt{\frac{n_o}{n_p}} \dots\dots\text{式 12}$$

其中  $D_p$ 、 $D_{p0}$  分別代表其他低壓之雲滴大小與初始雲滴大小。 $n_p$ 、 $n_o$  則代表其他粒子數與初始粒子數。又由理想氣體方程式可推知，雲室瓶中之粒子數與雲室瓶之壓力成正比。可化簡式 12 成：

$$D_p = D_{p0} \sqrt{\frac{P_o}{P_p}} \dots\dots\text{式 13}$$

此時，利用式 13 對我們的資料進行處理：

表 1 第一代雲室瓶，壓力與雲滴成長之關係

資料來源：作者自行彙整

組別	0.86 atm 雲滴大小( $\mu\text{m}^2$ )	0.81 atm 雲滴大小( $\mu\text{m}^2$ )	0.76 atm 雲滴大小( $\mu\text{m}^2$ )	0.71 atm 雲滴大小( $\mu\text{m}^2$ )
A	2.00	2.06	2.13	2.18
B	2.00	2.06	2.13	2.18
C	2.00	2.06	2.13	2.18
D	2.00	2.06	2.13	2.18

同時觀察式 13 與表 1 可以發現，減壓時粒子膨脹的大小與粒子密度無關，而是與減少的壓力有關。在本實驗中，雲滴隨著壓力降低而逐漸從  $2.00\mu\text{m}$  成長至  $2.18\mu\text{m}$ 。

(二) 以第二代雲室瓶討論不同凝結核之凝結效果

在 E~U 組實驗中，取樣的空氣量從 A~D 組中的 0.94 L 減少到 0.5 L。

雖然加入凝結核方法從直接燒入凝結核改為間接注入凝結核，仍無法透過實驗方法控制罐中凝結核數。不過間接加入凝結核能省去搬運實驗裝置的麻煩，讓水氣完成加入後就迅速加入凝結核，增加實驗效率與減少變因。

本研究利用文獻探討(四)之理論處理實驗數據。發現 0.85 大氣壓下，LWC 落在 1.9~2.1  $\text{g/m}^3$ ；0.93 大氣壓下，LWC 落在 1.3  $\text{g/m}^3$ 。藉由文獻探討我們得知，阿拉伯海上空積雲底在 600 公尺高時，LWC 約 1.7  $\text{g/m}^3$ ，如圖 9 所示。所以我認為 LWC = 1.9~2.1  $\text{g/m}^3$  之計算結果與大氣實際環境類似，計算結果是合理的。(搭配 附表 4 實驗初始環境數據與 LWC 之計算)

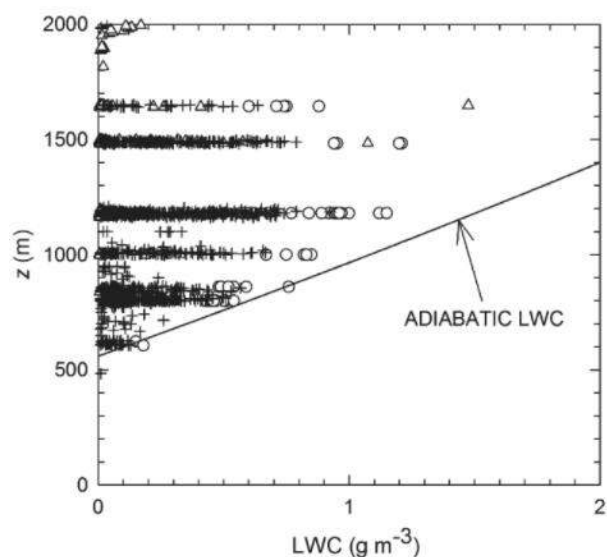


圖 9 阿拉伯海上空，雲底高度與 LWC 關係圖

資料來源：參考資料 三

在驗證計算得出之 LWC 可信後，本研究就可用文獻探討(五)之理論求出雲滴成長大小。

表 2 實驗 E~U，I~V 對應的雲滴成長大小

資料來源：作者自行彙整

搭配 附表 5 粒子濃度與雲滴成長大小、液態水含量關係

實驗	雲滴直徑( $\mu\text{m}$ )	實驗	雲滴直徑( $\mu\text{m}$ )	實驗	雲滴直徑( $\mu\text{m}$ )	實驗	雲滴直徑( $\mu\text{m}$ )
E	1.75	K	1.94	Q	1.12	I	0.79
F	1.67	L	1.78	R	1.08	II	0.88
G	1.68	M	1.81	S	1.01	III	0.77
H	1.73	N	1.80	T	1.05	IV	1.04
I	1.76	O	1.84	U	1.08	V	0.94
J	1.76	P	1.70				

經由本研究之計算發現，減壓至 0.85 大氣壓後，NaCl 與線香雲滴均成長至 1.67~1.94  $\mu\text{m}$  大小，硫酸銨雲滴成長至 1.08~1.12  $\mu\text{m}$  大小；減壓至 0.93 大氣壓後，硫酸銨雲滴成長至 0.77~1.04  $\mu\text{m}$  大小。且與粒子大小與環境粒子濃度密切相關。

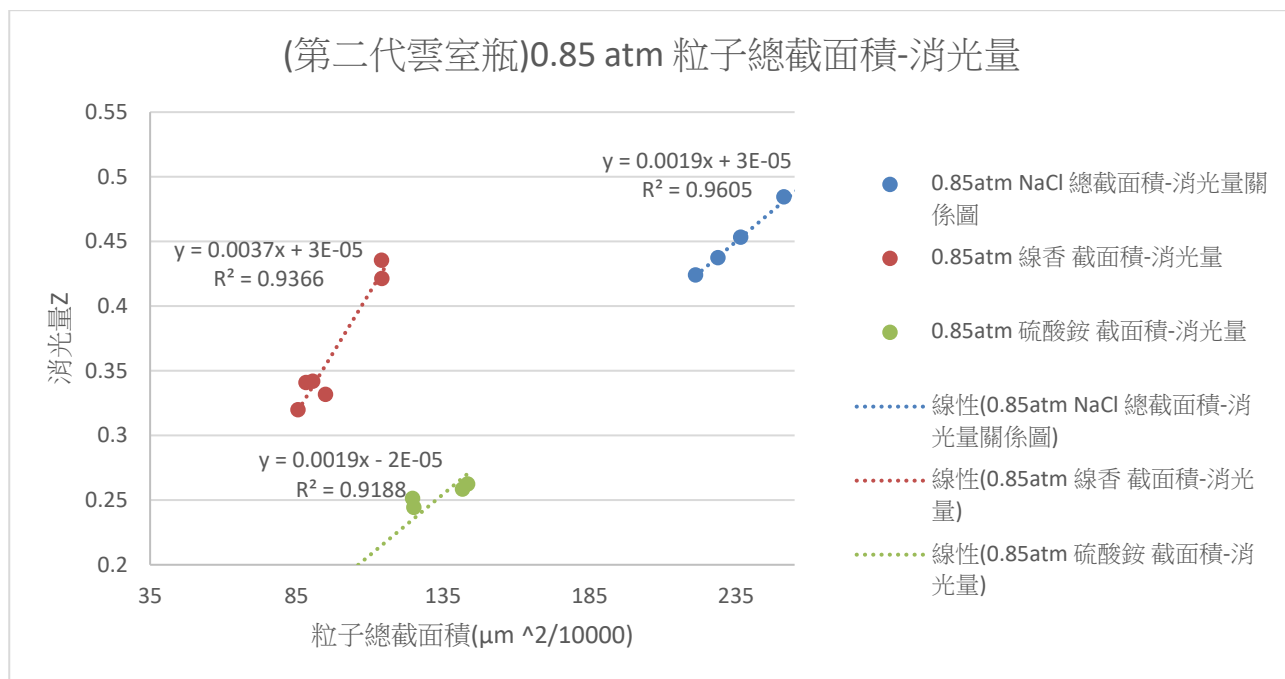


圖 10 總截面積-消光量關係圖

資料來源：作者自行繪製

**搭配** 附表 2 不同凝結核-消光量-相對溼度關係表(0.85 atm)

本研究定義消光量  $Z = -\ln(0.85 \text{ atm 之光度} / \text{初始光度})$ ，使消光量與粒子總截面積成正比。我們觀察原始數據發現，當總粒子截面積=0 時，消光量  $\neq 0$ 。我們認為當總粒子截面積=0 時，消光量之數值是一實驗裝置誤差，截距的值可能因當日環境有關。本研究為了方便討論，調整數據使趨勢線之 y 截距  $\approx 0$ 。

在第二代雲室瓶的實驗，我們先對第一代雲室瓶的實驗進行複製，測試舊實驗得出之結論。由圖 10 之趨勢線  $R^2$  值可發現，消光量與粒子總截面積成正比，符合比爾-朗伯定律，代表過去所得之結果是可信的。

觀察表 2 我們可以發現，NaCl 之雲滴成長大小較線香小，代表其雲滴數量較多，活化為雲滴的能力較佳。由 NaCl 組之粒子截面積較大也可知，NaCl 組之雲滴數較多，親水性佳。在 0.85 atm 環境下，NaCl 更適合做為雲凝結核。

觀察圖 10 中趨勢線斜率可以發現，線香之消光量-粒子總截面積趨勢線斜率較大。這代表線香粒子雖然總截面積較小，消光效果卻較強。我們認為這是因為線香粒子中含有黑炭成分，對光線的吸收效果較強，使消光量增加。

將硫酸銨粒子之趨勢線與其他粒子進行比較，發現硫酸銨與 NaCl 同為可溶性鹽類，兩者趨勢線斜率相同，消光特性相似。不過因硫酸銨之親水性較 NaCl 差，導致硫酸銨雖然輸入粒子較多，實際上能活化的粒子較少，造成其粒子總截面積較小，位於圖 10 之左下端。相對的，NaCl 組截面積較大，位於圖 10 之右上端。

### (三) 以第二代雲室瓶討論壓力與凝結之關係

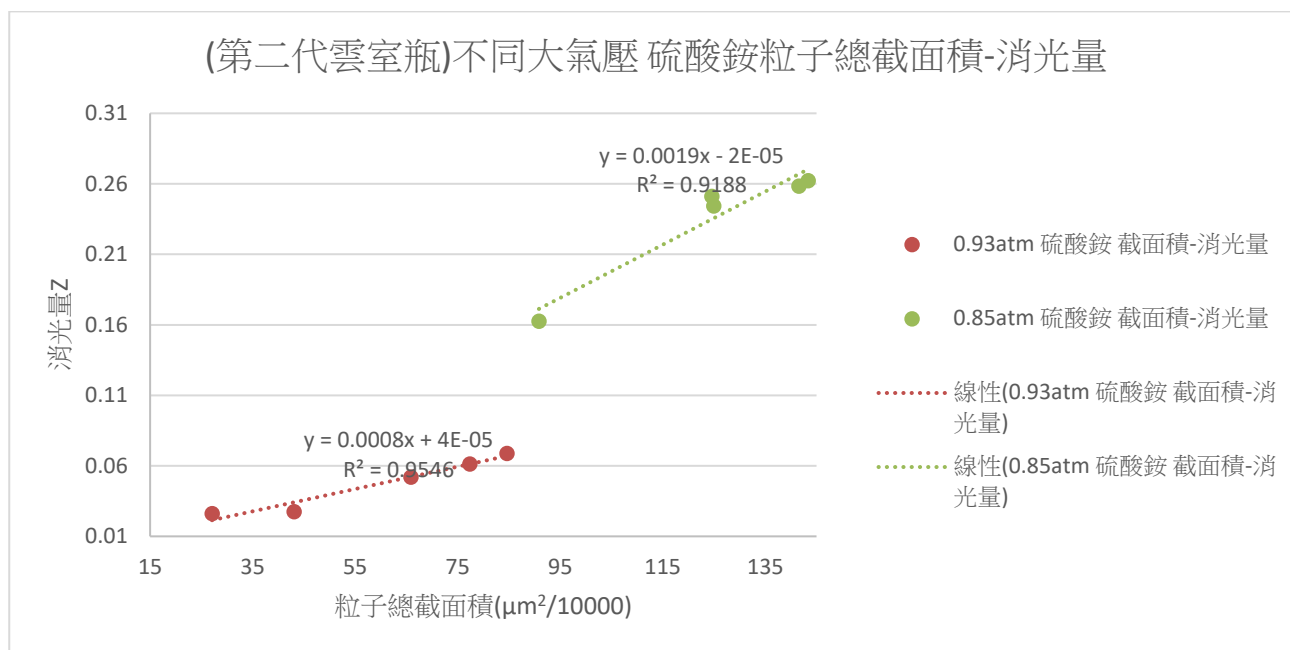


圖 11 不同大氣壓 硫酸銨粒子總截面積-消光量關係圖

資料來源：作者自行彙整

在實驗 3-1 中，我們重複實驗 2-3 之實驗條件步驟與條件。與實驗 2-3 不同點，在於我們只將壓力降低到 0.93 大氣壓，而非先前的 0.85 大氣壓。比較表 2 中不同壓力之硫酸銨粒徑可發現，在較高壓的環境下，過飽和釋出之水氣較少，導致雲滴成長大小較小。在 0.85 大氣壓下之硫酸銨雲滴可成長至 1.08~1.12  $\mu\text{m}$  大小，0.93 大氣壓下則只能成長到 0.77~1.04  $\mu\text{m}$ 。

而在高壓環境下，我們也發現環境中之粒子消光力較低，趨勢線斜率較小，走勢較平坦。我們推測原因是在文獻探討(三)中提到的，消光效率為粒徑之函數。因此 0.85 大氣壓之雲滴消光效率較低，消光係數也對應較低。

雖然由本研究計算結果對應圖 12，會發現 0.8  $\mu\text{m}$  粒子之消光效率較 1.2  $\mu\text{m}$  粒子之消光效率大，代表 0.93 大氣壓環境之趨勢線斜率應較大。但本研究在計算時假設雲滴皆均勻成長，這種假設方法會讓計算結果比起自然環境中雲滴的實際大小還要小。所以 0.93 大氣壓的實際雲滴直徑可能落在 1.2  $\mu\text{m}$  左右，0.85 大氣壓實際雲滴直徑可能落在 2  $\mu\text{m}$ ，才比較符合本實驗結果。

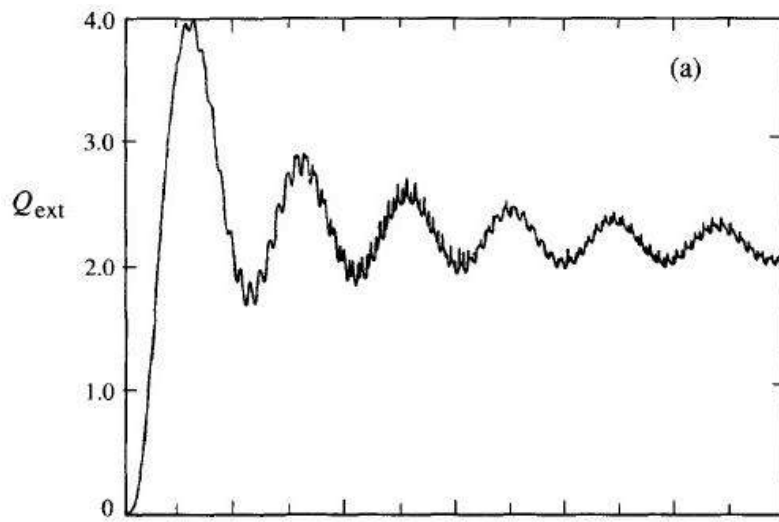


圖 12 光波長=0.5  $\mu\text{m}$ ，粒徑大小與消光效率圖(橫座標一單位 0.5  $\mu\text{m}$ )

資料來源：參考資料 五



## 陸、結論

在我們的實驗中，發現雲室瓶中的凝結效果確實會受瓶中凝結核濃度的影響。在越高的凝結核濃度下，凝結的水氣就越多，散射光的總截面積越大，致使消光量隨之變大。可以見到雲室瓶內從一開始十分清澈，到減壓後因凝結的水氣變得混濁。以下統整我們實驗的重要結果：

- (一) 第一代雲室瓶或第二代雲室瓶皆得出粒子總截面積越大則消光量越大的關係，符合比爾定律。而第二代雲室瓶更進一步得到不同粒子與環境壓力下，凝結成長導致消光量(y)與粒子總截面積(x)的關係式如下：

$$0.85 \text{ atm NaCl} : y = 0.0019x, R^2=0.9605$$

$$0.85 \text{ atm 線香} : y = 0.0037x, R^2=0.9366$$

$$0.85 \text{ atm 硫酸銨} : y = 0.0019x, R^2=0.9188$$

$$0.93 \text{ atm 硫酸銨} : y = 0.0008x, R^2=0.9546$$

$R^2$  值都在 0.9 以上，顯示本實驗設計的減壓雲室瓶的模擬效果佳。且比較第二代雲室瓶中各凝結核凝結粒子數，發現水溶性鹽類如 NaCl 和硫酸銨在大氣中比起空氣微粒（線香）是較佳的凝結核。

- (二) 以文獻探討(四)之理論，在絕熱膨脹的理想氣體之壓高變化所推算出凝結量與雲滴粒子成長大小。0.85 atm 環境下每立方公尺的液態水含量 LWC 大約落在 1.9~2.1 g/m<sup>3</sup>，其對應的雲滴成長大小，NaCl 與線香粒子成長至 1.68~1.90 μm；硫酸銨粒子成長至 1.01~1.12 μm。而 0.93 大氣壓下，每立方公尺的 LWC 大約落在 1.3 g/m<sup>3</sup>，硫酸銨粒子成長至 0.77~1.04 μm。

## 柒、未來展望

### 一、未來實驗方向

- (一) 以更多不同凝結核重複E~J組實驗，比較不同凝結核造成之凝結效果
- (二) 以第二代雲室瓶進行更多不同壓力之實驗，比較壓力與凝結量、消光量之關係
- (三) 在雲室瓶周圍外加電磁場，探討電場不同造成之效應
- (四) 以gfortran程式語言求出不同粒子粒徑與性質對應到的雲滴成長比例，求出雲滴於真實大氣中之成長大小

### 二、未來展望

世界面臨極端氣候，降雨強度、位置越來越不平均。在本實驗中，氣膠微粒促進雲凝結、降雨的狀況十分顯著。本研究結果不但可以舒緩旱災，更可以使雲系提前降雨，避免降雨強度過強。未來更希望能到水庫集水區進行實驗，檢測世界各地焰劑增雨之可行性。

## 捌、參考資料

- 一、W. Brune.(2020) *Fundamentals of Atmospheric Science*. John A. Dutton: e-Education Institute.
- 二、William C. Malm.(2016) *Visibility: The Seeing of Near and Distant Landscape*. Elsevier.
- 三、Hermann E. Gerber, Glendon M. Frick, Jorgen B. Jensen, James G. Hudson.(2008) *Entrainment, Mixing, and Microphysics in Trade-Wind Cumulus*. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II 86:87-106
- 四、Judith Curry, Peter Webster.(1998) *Thermodynamics of Atmospheres and Oceans*. Elsevier.
- 五、Bohren, C. F., and Huffman, D. R.(1983) *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley, New York.
- 六、M.K. Yau, R R Roger.(1996) *A Short Course in Cloud Physics*. Butterworth-Heinemann.
- 七、Daniel A. Vallero.(2007) *Fundamentals of Air Pollution*. Elsevier.
- 八、Gerald R. North, John Pyle and Fuqing Zhang.(2014) *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Elsevier.
- 九、Daniel Attinger.(2006) *A Remediation Scheme to Global Warming: Engineering Biodegradable Aerosols With Maximum Scattering Potential*. IMECE2006-14930, 361-365.
- 十、Lecture 3. Optical properties, from  
[https://www.gfdl.noaa.gov/wp-content/uploads/files/user\\_files/pag/lecture2008/lecture3.pdf](https://www.gfdl.noaa.gov/wp-content/uploads/files/user_files/pag/lecture2008/lecture3.pdf)

附表 1 粒子總截面積-消光量-壓力關係表

資料來源：作者自行彙整

搭配 圖 8 壓力-消光量關係圖(第一代雲室瓶)

組別	初始光度 (lux)	1 atm 消光量	0.93atm 消光量	0.86atm 消光量	0.81atm 消光量	0.76atm 消光量	0.72atm 消光量	粒子總截面積 ( $\mu m^2$ )	RH
A	1015	1.29	2.21	2.53	2.52	2.58	2.57	249153.7	99
B	905	2.23	3.14	3.31	3.41	3.41	3.44	225601.0	91
C	1088	1.32	2.02	2.08	2.05	1.98	2.02	125722.7	87
D	960	1.52	2.54	2.54	3.20	3.11	3.04	158570.5	91

附表 2 取樣一分鐘(0.94 L)，凝結核數量與燃燒粒子時間關係表

資料來源：作者自行整理

搭配 P10 罐中粒子數與燃燒粒子時間關係

組別	燃燒凝結核時間	0.3 $\mu m$ 粒子數	0.5 $\mu m$ 粒子數	1 $\mu m$ 粒子數	2 $\mu m$ 粒子數	5 $\mu m$ 粒子數	10 $\mu m$ 粒子數	粒子總截面積 ( $\mu m^2$ )
環境數據		67721	6382	1673	574	51	9	9157.3
A	1'30"	358548	283220	122654	22876	340	11	251553.68
B	2'00"	424754	343373	121873	10325	79	12	226394.74
C	2'30"	371171	250387	54657	2354	108	12	126697.72
D	3'00"	394456	286417	78425	4092	66	13	159308.05

附表 3 取樣 0.5 L，加入含凝結核空氣量與粒子數關係表

資料來源：作者自行彙整

實驗	加入凝結核	組別	加入含凝結核空氣量	0.3 $\mu$ m 粒子數	0.5 $\mu$ m 粒子數	1 $\mu$ m 粒子數	2 $\mu$ m 粒子數	5 $\mu$ m 粒子數	10 $\mu$ m 粒子數
環境數據				17080	1734	440	146	15	7
2-1	NaCl	E	300ml	208225	129666	42111	6109	33	3
	NaCl	F	450ml	206101	160731	53901	4587	17	4
	NaCl	G	600ml	207203	156788	49408	3857	53	7
	NaCl	H	900ml	197879	125463	37801	10661	165	3
	NaCl	I	1200ml	191937	108832	38239	18001	1272	2
	NaCl	J	1500ml	193287	141344	57339	15330	104	2
2-2	線香	K	150ml	211984	211984	138981	54473	476	1
	線香	L	300ml	238111	238111	179284	99120	14972	1
	線香	M	450ml	248135	248135	179309	92082	1749	1
	線香	N	600ml	234239	234239	154299	63250	562	0
	線香	O	750ml	230479	230479	151799	58336	224	2
	線香	P	900ml	254135	254135	214237	142577	35664	4
2-3	硫酸銨	Q	150ml	245665	245665	178692	95092	4742	4
	硫酸銨	R	300ml	29564	29564	27116	20076	8347	1
	硫酸銨	S	450ml	243587	243587	178161	95092	7720	8
	硫酸銨	T	600ml	180829	180829	144785	86830	15418	9
	硫酸銨	U	750ml	249936	249936	197485	120841	16944	6

附表 4 實驗 E~J 之初始環境數據與 LWC 之計算

資料來源：作者自行彙整

搭配 P12 LWC 之計算

組別	E		Q1(mole/kg*m)	0.01481
T1	294		Ha(m)	337.563
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4052.446
RH (相對溼度)	91		P1(hpa)	97307.554
空氣密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.225		T1(K)	290.589
			Hb(m)	928.909
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m <sup>3</sup> )	0.0021

組別	H		Q1(mole/kg*m)	0.01470
T1	295		Ha(m)	415.771
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4991.337
RH (相對溼度)	89		P1(hpa)	96368.663
空氣密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.225		T1(K)	290.770
			Hb(m)	850.701
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m <sup>3</sup> )	0.0019

組別	F		Q1(mole/kg*m)	0.01493
T1	293		Ha(m)	372.180
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4468.026
RH (相對溼度)	90		P1(hpa)	96891.974
空氣密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.225		T1(K)	289.246
			Hb(m)	894.292
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m <sup>3</sup> )	0.0020

組別	I		Q1(mole/kg*m)	0.01481
T1	294		Ha(m)	412.577
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4952.990
RH (相對溼度)	89		P1(hpa)	96407.010
空氣密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.225		T1(K)	289.817
			Hb(m)	853.895
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m <sup>3</sup> )	0.0019

組別	G		Q1(mole/kg*m)	0.01504
T1	292		Ha(m)	369.305
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4433.502
RH (相對溼度)	90		P1(hpa)	96926.498
空氣密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.225		T1(K)	288.289
			Hb(m)	897.168
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m <sup>3</sup> )	0.0020

組別	J		Q1(mole/kg*m)	0.01493
T1	293		Ha(m)	297.744
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	3574.421
RH (相對溼度)	92		P1(hpa)	97785.579
空氣密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.23		T1(K)	290.007
			Hb(m)	968.728
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m <sup>3</sup> )	0.0021

附表 5 NaCl 粒子濃度與雲滴成長大小、液態水含量關係(0.85 大氣壓)

資料來源：作者自行彙整

搭配 表 2 實驗 E~U，I~V 對應的雲滴成長大小

0.3 μm 粒子濃度	0.5 μm 粒子濃度	1 μm 粒子濃度	LWC 1 0.3→0.5	LWC 2 0.5→1	LWC 餘 (扣除 1、2)	雲滴成長 大小
粒子數/公升	粒子數/公升	粒子數/公升	g/L	g/L	g/L	(μm)
416450	259332	84222	0.000021	0.00031	0.0017	1.75
412202	321462	107802	0.000021	0.00034	0.0016	1.67
414406	313576	98816	0.000021	0.00033	0.0016	1.68
395758	250926	75602	0.000020	0.00030	0.0016	1.73
383874	217664	76478	0.000019	0.00028	0.0016	1.76
386574	282688	114678	0.000020	0.00031	0.0018	1.76

附表 6 取樣 0.5 L，加入含凝結核空氣量與粒子數關係表(硫酸銨)

資料來源：作者自行彙整

實驗	組別	加入凝結核	加入含凝結核空氣量	0.3 $\mu$ m 粒子數	0.5 $\mu$ m 粒子數	1 $\mu$ m 粒子數	2 $\mu$ m 粒子數	5 $\mu$ m 粒子數	10 $\mu$ m 粒子數
3-1	I	硫酸銨	150ml	238821	238820	193963	126369	27182	7
	II	硫酸銨	300ml	206408	206408	117450	28820	63	8
	III	硫酸銨	450ml	246892	246892	185700	108053	9206	10
	IV	硫酸銨	600ml	169692	109789	27988	2000	44	4
	V	硫酸銨	750ml	147237	147237	129277	91513	29436	0