

# 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高級中等學校組 地球與行星科學科

### 探究精神獎

051906

探究雲滴成長過程是否具潛在的規律

學校名稱：國立屏東高級中學

作者： 高二 宋曜勳 高二 邱柏鈞	指導老師： 高宗賢
-------------------------	--------------

關鍵詞：雲滴、機遇增長、規律

## 摘要

本研究以微觀與整體的視角忖度雲滴成長過程可能的性質，得出極為矛盾的臆測。而筆者閱覽相關文獻，發現此問題意識並無太多學者研討，決定參酌前人的方法，以水氣凝結於壓克力板的現象模擬大氣成雲滴過程，並以統計方法推論雲滴成長過程的性質。發現各個雲滴的成長機率雖不相同，可是整體的演變趨向穩定。希望本研究結果對於相關研究的學者有所助益。

## 壹、前言

### 一、研究動機：

機遇增長是雲滴成長過程所依循的模式，定量雲滴中只有少部分的雲滴具有增長的機會，而增長後的雲滴與未增長的雲滴中又只有部分的雲滴能夠接續增長。雲滴於此模式中並非都具有增長的機會。部分雲滴可能一直保持較小的半徑。僅少數的雲滴能成長為半徑足夠的兩滴而離開雲。

機遇增長過程中，部分雲滴成長的機會較小，部分雲滴成長的機會較大。如此雲滴成長過程是否混亂而無法預測？此為本研究的第一疑問。

雲滴成長過程中，間隔若干時間必有新的雲滴生成，而原先半徑較小的雲滴長成較大半徑的雲滴，較大半徑的雲滴再長成兩滴而離開雲。如此過程反覆進行，其中是否具周期性變化的可能？此為本研究的第二疑問。

揆諸上述，本研究以二種面向推測雲滴成長過程可能具有的性質，而兩者所得出的猜測極為矛盾。職是之故，本研究擊劃以實驗模擬大氣中雲滴成長的過程。觀察雲滴隨時間的成長是否混亂無序，抑或具有規律存在。

### 二、文獻回顧：

本文的問題意識是：「看似混亂無序的雲滴成長過程是否具有潛在的規律」。針對它，學界並無太多相關研究。僅《An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions》以 SCE（機遇收集方程式）做出參數式，呈現雲滴粒徑譜的演變。

然此論文的目的是解出 SCE 的參數式，並無探究雲滴成長過程的規律，而本研究追溯此論文的參考文獻，但其研究主旨皆未與本研究相關。

學界並無太多研討本文問題意識的研究，而全國中小學科學展覽會的歷屆作品中，相較其他作品，《類暖雲雲滴成長之探討》的主旨與本研究的目的頗為相關。

《類暖雲雲滴成長之探討》亦參酌《An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions》的研究成果，並以水滴凝結於壓克力板的實驗模擬大氣中的雲滴成長過程，揭櫫雲滴粒徑譜的演變如《An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions》的研究結果所呈現，具有 M 型化的特徵（但此名詞為《類暖雲雲滴成長過程之探討》的作者所創，並未出現於《An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions》中）。

但筆者詳閱《An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions》與《類暖雲雲滴成長之探討》的雲滴粒徑譜，發現《An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions》所用者，x 軸為雲滴半徑，單位為公分，且為對數刻度；y 軸為時間，單位為分鐘；z 軸為雲滴的水量。而《類暖雲雲滴成長之探討》所用者，x 軸為雲滴半徑，單位為「微米」，且「不為對數刻度」；y 軸為時間，單位為「秒」；z 軸為「雲滴數量」。

復次，《類暖雲雲滴成長之探討》聲稱雲滴粒徑譜的演變具雙峰分布的特徵（即 M 型化），有主峰波與次峰波。但細看各圖表中主峰波與次峰波高度的差距，小則數十個水滴，大則數百甚至一千個水滴。

再次，《類暖雲雲滴成長之探討》所研討的雲滴僅止於半徑 319 微米以下者，但事實上大氣中能夠落下而成為雨滴的雲滴，它的半徑至少為兩千微米。

繼而言之，《類暖雲雲滴成長之探討》雖如同本研究，探討雲滴成長過程的演變。但其所側重者，為溫度與凝結核造成的影響，並無探究雲滴成長過程是否具規律存在。

揆諸上述，學界僅有《An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions》以 SCE 做出參數式，呈現雲滴粒徑譜的演變。而《類暖雲雲滴成長之探討》參酌前者的研究結果，指出雲滴成長過程具「M 型化」的特徵。此研究結論頗為獨到且具啟發

性，然其細部論述因無前人經驗輔弼，有少許弊端。但是，所缺失之處提供本研究更高的基礎探究本文的問題意識。

### 三、研究目的

「雲滴成長過程究竟混亂無序，抑或具潛在規律」為本研究的問題意識，而閱覽前人文獻、釐清此問題的研究現況後，本研究的研究目的如下：「本研究將參酌《類暖雲雲滴成長之探討》的研究方法，以水蒸氣凝結於壓克力板上的現象模擬大氣中水蒸氣凝結為雲滴的流程。而後，以各時刻的水滴凝結照片做推論統計，分析各統計量隨時間的演變，研討雲滴成長的過程。最後，揆度所有分析結果，推論雲滴之成長過程是否具有規律。」

## 貳、研究設備及器材

### 一、研究器材

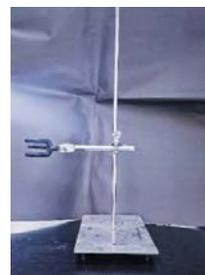
100ml 燒杯	加熱攪拌器	溫度計	拭鏡紙
壓克力板 (10.1cm×15.2cm)	顯微照相機	金屬支架	電腦
白紙 (8.3cm×18.7cm)	鐵尺	Image J	GIMP
HiView (顯微照相機的錄影軟體)	OpenCV		



加熱攪拌器



顯微照相機

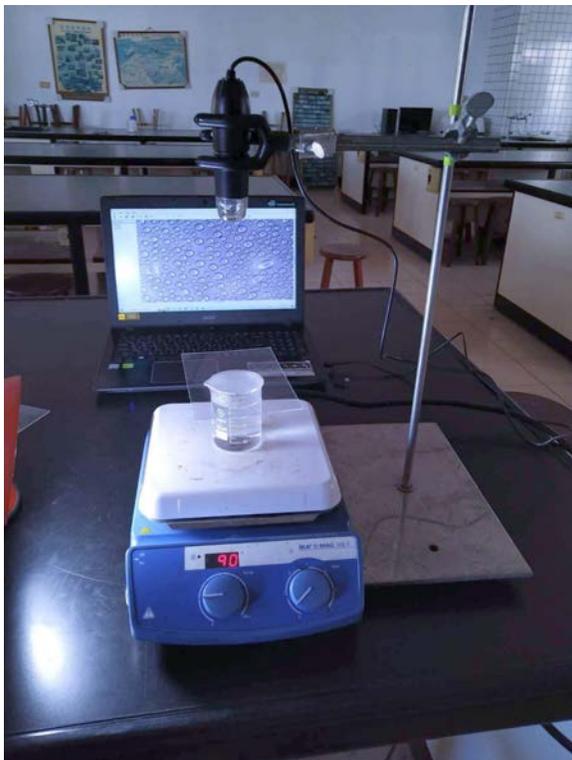


金屬支架

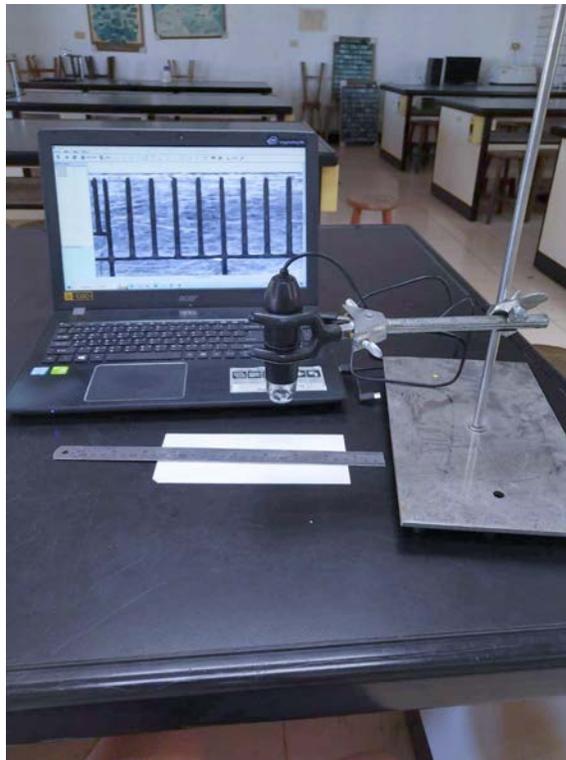
### 二、研究裝置

燒杯裝入攝氏 70 度的熱水 100ml。加熱攪拌器置於燒杯底下加熱，以控制水溫於攝氏 70 度（溫度變化幅度僅攝氏 1 度）。拭鏡紙擦拭壓克力板上的水珠。壓克力板緊貼在燒杯杯口，使水氣凝結於上。顯微照相機使用金屬支架固定，以 HiView 錄下水滴凝結的過程。

鐵尺置於白紙上。實驗後，顯微照相機的焦距不變，拍下鐵尺刻度，作為比例尺。GIMP 將水滴照片（實驗照片）與刻度照片進行疊圖，以計算水滴的半徑。OpenCV 圈選照片中的水滴輪廓，Image J 計算水滴數量與水滴半徑。



圖一 實驗裝置圖



圖二 鐵尺上的刻度

## 參、研究過程或方法

### 一、研究方法

本研究的目的為：「探求看似混亂無序的雲滴成長過程是否具潛在的規律」。《An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions》對 SCE 作出新參數式，以它探討雲滴粒徑譜隨時間的演變。然筆者並不具備足夠的數學能力。大氣觀測方法（諸如探空氣球、氣象衛星、遙測）亦非本研究所能使用。

本研究參照《類暖雲雲滴成長之探討》的研究方法，以水蒸氣凝結於壓克力板的現象模擬雲滴機遇增長的過程，並以顯微照相機拍下各時刻的水滴照片。而後以 Image J 計算水滴的數量與半徑，再求各統計量。最後以統計量的分析結果歸納雲之成長過程的性質，並研討是否具有規律存在。

## 二、研究過程

### (一) 實驗流程

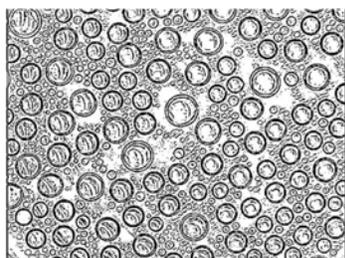
首先，將燒杯裝入一百毫升、攝氏七十度的熱水。復次，將燒杯至於一加熱攪拌器，控制溫度的變化。再次，將壓克力板置於燒杯杯口。第四，以金屬支架固定顯微照相機，距離壓克力板一定距離。第五，以顯微照相機錄下水滴凝結過程，時間為二十分鐘。第六，實驗結束後將鐵尺置於白紙上。第七，調整金屬支架，使顯微照相機能拍清楚鐵尺的刻度，以作為比例尺。

### (二) 分析水滴凝結圖的方法與流程

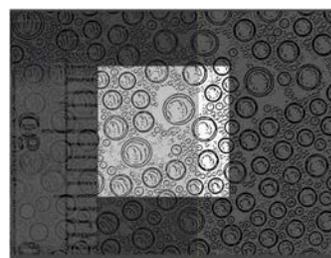
首先，由水滴輪廓清晰的時刻，間隔一分鐘，擷取水滴凝結的照片（如圖三）。復次，以 OpenCV 辨識水滴輪廓（如圖四）。再次，以 GIMP 將顯微照相機所拍攝的鐵尺刻度疊於各時刻的水滴凝結照片（如圖五），切割一平方公分的正方形研究區域。（各照片所切割的位置皆相同）。第四，以 GIMP 將水滴著色。第五，以 Image J 計算各半徑的水滴數量。第六，以計算結果作水滴半徑的次數分配表（水滴半徑單位：微米）。



圖三 水滴的凝結照片



圖四 以 OpenCV 圈選水滴輪廓



圖五 將鐵尺刻度的照片疊於圈選水滴輪廓後的水滴凝結照片，劃出一平方公分的正方形研究區域

茲補述為何使用攝氏七十度的熱水作為本研究實驗的水氣來源。《類暖雲雲滴成長之探討》揭櫫：「攝氏七十度的實驗組別，水滴總體積的時變率為  $0.032\text{mm}^3/\text{秒}$ ，為所有組別中最為明顯且穩定者。」職是之故，本研究判定以攝氏七十度的熱水作為本研究實驗的水氣來源最為適切。

復次，實驗時間之所以設計為二十分鐘，是因為經過測試，水滴的半徑需二十分鐘的時間才能成長到兩千微米。

再次，本研究為交件期限所迫，只研析一平方公分的水滴凝結過程。

## 肆、研究結果

### 一、各時刻的水滴凝結結果



圖六 第五分鐘



圖七 第六分鐘



圖八 第七分鐘



圖九 第八分鐘



圖十 第九分鐘



圖十一 第十分鐘



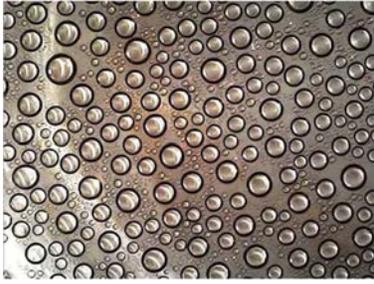
圖十二 第十一分鐘



圖十三 第十二分鐘



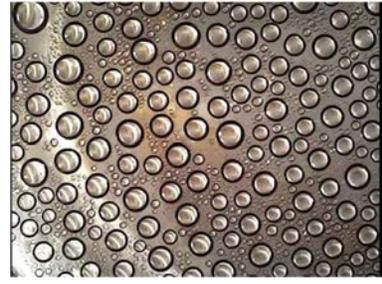
圖十四 第十三分鐘



圖十五 第十四分鐘



圖十六 第十五分鐘



圖十七 第十六分鐘



圖十八 第十七分鐘



圖十九 第十八分鐘



圖二十 第十九分鐘

## 二、各時刻的水滴半徑次數分配表與統計量

### (一) 第五分鐘

#### 1. 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	27	1100-1150	0	1550-1600	0
250-250	0	700-750	16	1150-1200	0	1600-1650	0
300-350	0	750-800	7	1200-1250	0	1650-1700	0
350-400	0	800-850	4	1250-1300	0	1700-1750	0
400-450	0	850-900	4	1300-1350	0	1750-1800	0
450-500	0	900-950	1	1350-1400	0	1800-1850	0
500-550	0	950-1000	1	1400-1450	0	1850-1900	0
550-600	0	1000-1050	2	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	30	1050-1100	1	1500-1550	0	1950-2000	0

表一

#### 2. 統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
93	700	100	14.34

表二

(二) 第六分鐘

1. 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	23	1100-1150	1	1550-1600	0
250-250	0	700-750	17	1150-1200	1	1600-1650	0
300-350	0	750-800	10	1200-1250	0	1650-1700	0
350-400	0	800-850	7	1250-1300	0	1700-1750	0
400-450	1	850-900	11	1300-1350	1	1750-1800	0
450-500	0	900-950	7	1350-1400	0	1800-1850	0
500-550	5	950-1000	2	1400-1450	0	1850-1900	0
550-600	10	1000-1050	3	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	17	1050-1100	0	1500-1550	0	1950-2000	0

表三

2. 統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
116	610	150	24.38

表四

(三) 第七分鐘

1. 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	14	1100-1150	0	1550-1600	0

250-250	0	700-750	14	1150-1200	0	1600-1650	0
300-350	0	750-800	13	1200-1250	1	1650-1700	0
350-400	1	800-850	7	1250-1300	0	1700-1750	0
400-450	1	850-900	9	1300-1350	0	1750-1800	0
450-500	1	900-950	12	1350-1400	0	1800-1850	0
500-550	1	950-1000	2	1400-1450	0	1850-1900	0
550-600	3	1000-1050	2	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	8	1050-1100	4	1500-1550	0	1950-2000	0

表五

## 2. 統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
93	770	150	19.32

表六

### (四) 第八分鐘

#### 1. 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	4	1100-1150	2	1550-1600	0
250-250	0	700-750	10	1150-1200	2	1600-1650	0
300-350	0	750-800	10	1200-1250	2	1650-1700	0
350-400	3	800-850	9	1250-1300	1	1700-1750	0
400-450	5	850-900	4	1300-1350	0	1750-1800	0
450-500	2	900-950	13	1350-1400	0	1800-1850	0
500-550	1	950-1000	6	1400-1450	0	1850-1900	0
550-600	2	1000-1050	1	1450-1500	0	1900-1950	0

600-650	1	1050-1100	6	1500-1550	0	1950-2000	0
---------	---	-----------	---	-----------	---	-----------	---

表七

2.統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
84	810	210	25.73

表八

(五) 第九分鐘

1.水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	2	1100-1150	5	1550-1600	0
250-250	0	700-750	6	1150-1200	2	1600-1650	0
300-350	1	750-800	6	1200-1250	3	1650-1700	0
350-400	1	800-850	8	1250-1300	2	1700-1750	0
400-450	6	850-900	3	1300-1350	0	1750-1800	0
450-500	4	900-950	4	1350-1400	1	1800-1850	0
500-550	1	950-1000	13	1400-1450	0	1850-1900	0
550-600	0	1000-1050	2	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	3	1050-1100	3	1500-1550	0	1950-2000	0

表九

2.統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
76	840	250	29.61

表十

(六) 第十分鐘

1.水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	0	1100-1150	2	1550-1600	0
250-250	0	700-750	2	1150-1200	4	1600-1650	0
300-350	0	750-800	1	1200-1250	3	1650-1700	0
350-400	0	800-850	3	1250-1300	3	1700-1750	1
400-450	2	850-900	1	1300-1350	4	1750-1800	0
450-500	8	900-950	3	1350-1400	1	1800-1850	0
500-550	3	950-1000	6	1400-1450	0	1850-1900	0
550-600	1	1000-1050	7	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	0	1050-1100	2	1500-1550	0	1950-2000	0

表十一

2.統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
57	930	310	33.53

表十二

(七) 第十一分鐘

1 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	0	1100-1150	2	1550-1600	1
250-250	1	700-750	0	1150-1200	3	1600-1650	0
300-350	3	750-800	0	1200-1250	4	1650-1700	0
350-400	10	800-850	2	1250-1300	2	1700-1750	1
400-450	6	850-900	1	1300-1350	4	1750-1800	0

450-500	7	900-950	4	1350-1400	2	1800-1850	0
500-550	6	950-1000	3	1400-1450	1	1850-1900	0
550-600	3	1000-1050	5	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	0	1050-1100	2	1500-1550	1	1950-2000	0

表十三

2.統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
74	800	390	49.19

表十四

(八) 第十二分鐘

1.水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	0	1100-1150	1	1550-1600	2
250-250	0	700-750	0	1150-1200	1	1600-1650	0
300-350	0	750-800	0	1200-1250	2	1650-1700	0
350-400	0	800-850	1	1250-1300	3	1700-1750	1
400-450	5	850-900	2	1300-1350	6	1750-1800	0
450-500	4	900-950	1	1350-1400	2	1800-1850	1
500-550	4	950-1000	2	1400-1450	0	1850-1900	0
550-600	8	1000-1050	4	1450-1500	1	1900-1950	0
600-650	0	1050-1100	1	1500-1550	2	1950-2000	0

表十五

2.統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)

54	940	400	42.18
----	-----	-----	-------

表十六

(九) 第十三分鐘

1. 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	0	1100-1150	0	1550-1600	2
250-250	0	700-750	0	1150-1200	2	1600-1650	0
300-350	1	750-800	0	1200-1250	1	1650-1700	1
350-400	3	800-850	0	1250-1300	2	1700-1750	1
400-450	3	850-900	1	1300-1350	5	1750-1800	0
450-500	6	900-950	0	1350-1400	3	1800-1850	1
500-550	5	950-1000	1	1400-1450	1	1850-1900	0
550-600	7	1000-1050	1	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	3	1050-1100	4	1500-1550	2	1950-2000	0

表十七

2. 統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
56	910	450	49.47

表十八

(十) 第十四分鐘

1. 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	1	1100-1150	1	1550-1600	1
250-250	0	700-750	0	1150-1200	1	1600-1650	2
300-350	0	750-800	0	1200-1250	2	1650-1700	2

350-400	5	800-850	0	1250-1300	1	1700-1750	0
400-450	8	850-900	0	1300-1350	1	1750-1800	2
450-500	11	900-950	1	1350-1400	3	1800-1850	0
500-550	9	950-1000	0	1400-1450	2	1850-1900	0
550-600	3	1000-1050	1	1450-1500	3	1900-1950	0
600-650	4	1050-1100	2	1500-1550	1	1950-2000	0

表十九

2.統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
67	830	470	56.15

表二十

(十一) 第十五分鐘

1.水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	2	1100-1150	0	1550-1600	2
250-250	0	700-750	0	1150-1200	1	1600-1650	1
300-350	1	750-800	0	1200-1250	2	1650-1700	3
350-400	4	800-850	1	1250-1300	0	1700-1750	0
400-450	10	850-900	0	1300-1350	0	1750-1800	1
450-500	11	900-950	1	1350-1400	3	1800-1850	1
500-550	2	950-1000	1	1400-1450	2	1850-1900	0
550-600	5	1000-1050	0	1450-1500	2	1900-1950	0
600-650	2	1050-1100	0	1500-1550	1	1950-2000	0

表二十一

2.統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
59	830	490	59.45

表二十二

(十二) 第十六分鐘

1. 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	1	1100-1150	0	1550-1600	2
250-250	0	700-750	1	1150-1200	0	1600-1650	2
300-350	1	750-800	0	1200-1250	0	1650-1700	2
350-400	3	800-850	1	1250-1300	2	1700-1750	2
400-450	10	850-900	0	1300-1350	0	1750-1800	1
450-500	8	900-950	0	1350-1400	0	1800-1850	1
500-550	6	950-1000	0	1400-1450	2	1850-1900	0
550-600	4	1000-1050	0	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	3	1050-1100	0	1500-1550	3	1950-2000	1

表二十三

2. 統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
56	850	530	62.93

表二十四

(十三) 十七分鐘

1. 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	0	1100-1150	0	1550-1600	2

250-250	0	700-750	2	1150-1200	0	1600-1650	1
300-350	0	750-800	0	1200-1250	0	1650-1700	4
350-400	1	800-850	1	1250-1300	1	1700-1750	3
400-450	7	850-900	0	1300-1350	0	1750-1800	1
450-500	6	900-950	0	1350-1400	1	1800-1850	1
500-550	2	950-1000	0	1400-1450	2	1850-1900	0
550-600	6	1000-1050	0	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	4	1050-1100	0	1500-1550	1	1950-2000	2

表二十五

## 2. 統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
48	970	570	58.66

表二十六

### (十四) 第十八分鐘

#### 1. 水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	2	1100-1150	0	1550-1600	2
250-250	0	700-750	2	1150-1200	0	1600-1650	0
300-350	0	750-800	0	1200-1250	0	1650-1700	2
350-400	8	800-850	1	1250-1300	1	1700-1750	5
400-450	4	850-900	1	1300-1350	0	1750-1800	1
450-500	9	900-950	0	1350-1400	1	1800-1850	0
500-550	11	950-1000	0	1400-1450	1	1850-1900	1
550-600	5	1000-1050	0	1450-1500	0	1900-1950	0

600-650	1	1050-1100	0	1500-1550	0	1950-2000	0
---------	---	-----------	---	-----------	---	-----------	---

表二十七

2.統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
58	780	500	64.22

表二十八

(十五) 第十九分鐘

1.水滴半徑的次數分配表

組別	數量	組別	數量	組別	數量	組別	數量
200-250	0	650-700	2	1100-1150	0	1550-1600	0
250-250	0	700-750	1	1150-1200	0	1600-1650	2
300-350	1	750-800	2	1200-1250	0	1650-1700	2
350-400	7	800-850	0	1250-1300	0	1700-1750	2
400-450	8	850-900	0	1300-1350	1	1750-1800	1
450-500	5	900-950	1	1350-1400	1	1800-1850	0
500-550	4	950-1000	0	1400-1450	1	1850-1900	1
550-600	3	1000-1050	0	1450-1500	0	1900-1950	0
600-650	3	1050-1100	0	1500-1550	0	1950-2000	0

表二十九

2.統計量

樣本數	平均數 (微米)	標準差 (微米)	變異係數(%)
48	760	490	64.56

表三十

三、母體統計量的 95%信賴區間

(一) 平均數 (單位：微米)

時刻 (分鐘)	五	六	七	八	九	十	十一	十二
區間下限 (微米)	680	580	740	760	780	850	710	830
區間上限 (微米)	720	640	800	860	900	1010	890	1050
時刻 (分鐘)	十三	十四	十五	十六	十七	十八	十九	
區間下限 (微米)	790	720	700	710	800	650	620	
區間上限 (微米)	1030	940	960	990	1140	910	900	

表三十一 (信心水準  $1-\alpha$  : 95%)

(二) 標準差 (單位：微米)

時刻 (分鐘)	五	六	七	八	九	十	十一	十二
區間下限 (微米)	90	130	130	190	220	270	350	380
區間上限 (微米)	120	170	170	250	300	380	470	550
時刻 (分鐘)	十三	十四	十五	十六	十七	十八	十九	
區間下限 (微米)	390	410	430	460	490	440	420	
區間上限 (微米)	550	560	600	660	710	610	620	

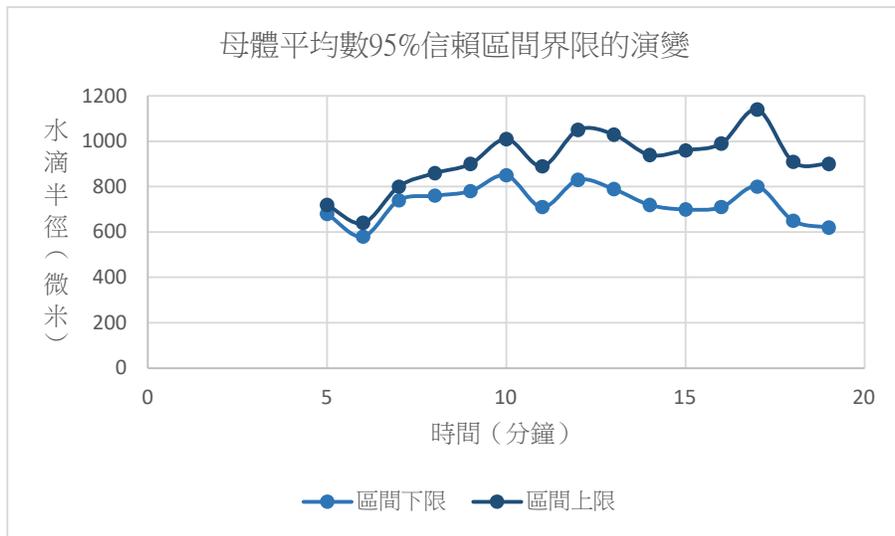
表三十二 (信心水準  $1-\alpha$  : 95%)

四、母體統計量 95%信賴區間的演變

(一) 平均數

時刻 (分鐘)	五	六	七	八	九	十	十一	十二
區間下限 (微米)	680	580	740	760	780	850	710	830
區間上限 (微米)	720	640	800	860	900	1010	890	1050
時刻 (分鐘)	十三	十四	十五	十六	十七	十八	十九	
區間下限 (微米)	790	720	700	710	800	650	620	
區間上限 (微米)	1030	940	960	990	1140	910	900	

表三十三 (信心水準  $1-\alpha$  : 95%)

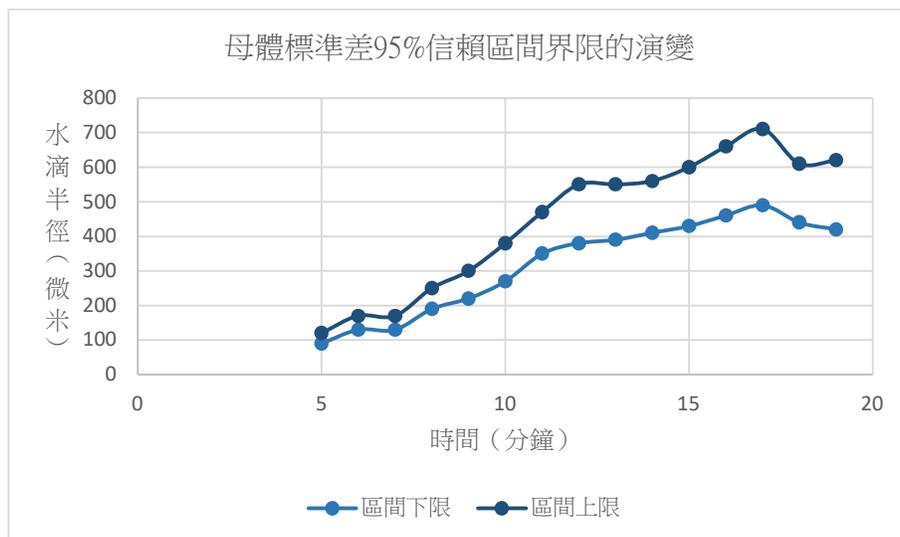


圖二十一

(二) 標準差

時刻 (分鐘)	五	六	七	八	九	十	十一	十二
區間下限 (微米)	90	130	130	190	220	270	350	380
區間上限 (微米)	120	170	170	250	300	380	470	550
時刻 (分鐘)	十三	十四	十五	十六	十七	十八	十九	
區間下限 (微米)	390	410	430	460	490	440	420	
區間上限 (微米)	550	560	600	660	710	610	620	

表三十四 (信心水準  $1-\alpha : 95\%$ )



圖二十二

## 伍、討論

### 一、母體平均數

縱觀圖二十一，可將母體平均數的演變分為二時期討論，其一是七分鐘前，其二是七分鐘後。因為七分鐘前，母體平均數 95%信賴區間的下限與上限的差較小，最大僅 60 微米，還可判斷母體平均數大致的走向。但七分鐘後母體平均數 95%信賴區間下限與上限的差，最小 100 微米，最大 380 微米，母體平均數的趨勢因而難以研判。職是之故，本研究以母體平均數 95%信賴區間界限的動向，設立統計假設，用假設檢定推論各時刻間母體平均數的相對大小，分析母體平均數的演變，歸納它具有的性質。

首先，討論第五分鐘到第七分鐘，區間上下振動，表示這段時間，母體平均數並不穩定。第五分鐘到第六分鐘，區間下限由初值 680 微米減少到最小值 580 微米；區間上限由初值 720 微米減少到最小值 640 微米。而一分鐘後，區間下限與上限分別回到 740 微米與 800 微米。

復次，第七分鐘後，區間上下限的差較大，母體平均數因此具有多種可能的演變，所以需以假設檢定推究不同時刻母體平均數的相對大小，才能判斷它的動向，然設立假設不可毫無根據。本研究先觀察區間界限的變化，揣測母體平均數可能的趨勢，再以假設檢定檢驗假設是否合理。

第七分鐘後，母體平均數的演變可分四個時期：「第七分鐘到第十分鐘、第十分鐘到第十二分鐘、第十二鐘到第十七分鐘、第十七分鐘到第十九分鐘。」

第一，第七分鐘到第十分鐘，區間的下限逐漸上升到最大值 850 微米；區間的上限逐漸上升到 1010 微米。表示這段時間，母體平均數持續增加。揆度上述觀察，本研究假設：

「 $\mu_7 < \mu_8 < \mu_9 < \mu_{10}$  ( $\mu_i$  表示第  $i$  分鐘的母體平均數)。」

第二，第十分鐘到第十二分鐘，兩分鐘內，區間的界限上下振動。第十分鐘到第十一分鐘，區間的下限由 850 微米減少到 710 微米；區間的上限由 1010 微米減少到 890 微米。而後，區間的下限與上限又分別立即回復到 830 微米與 1050 微米。揆度上述觀察，本研究假設：「 $\mu_{10} > \mu_{11}$ ， $\mu_{11} < \mu_{12}$ 。」

第三，第十二分鐘到第十七分鐘，區間先是逐漸下降，於一個數值附近緩慢移動，再快速上升。第十二分鐘到第十四分鐘，兩分鐘內，區間下限由 830 微米下降到 720 微米；區間上限由 1050 微米下降到 960 微米。第十四分鐘到第十六分鐘，區間下限只在 700 與 710 微米之間上升；區間上限只在 960 微米與 990 微米之間上升。第十六分鐘到第十七分鐘，區間下限由 710 微米增長，一分鐘後達到 800 微米；區間上限由 990 微米增長，一分鐘後達到最大值 1140 微米。揆度上述觀察。本研究假設：「 $\mu_{12} > \mu_{13} > \mu_{14}$ ， $\mu_{14} < \mu_{15} < \mu_{16} < \mu_{17}$ 。」

繼而言之，第十七分鐘到第十九分鐘，區間持續向下移動，代表母體平均數持續下降。十八分鐘之後，區間下限與上限分別由 800 微米與最大值 1140 微米減少到 620 微米與 900 微米。揆度上述觀察，本研究假設：「 $\mu_{17} > \mu_{18} > \mu_{19}$ 。」

(一) 第一次假設檢定的結果

虛無假設 ( $H_0$ )	$\mu_7 \geq \mu_8$	$\mu_8 \geq \mu_9$	$\mu_9 \geq \mu_{10}$	$\mu_{10} \leq \mu_{11}$	$\mu_{11} \geq \mu_{12}$	$\mu_{12} \leq \mu_{13}$
對立假設 ( $H_1$ )	$\mu_7 < \mu_8$	$\mu_8 < \mu_9$	$\mu_9 < \mu_{10}$	$\mu_{10} > \mu_{11}$	$\mu_{11} < \mu_{12}$	$\mu_{12} > \mu_{13}$
檢定統計量	-1.44877	-0.82201	-1.8	2.111053	-1.84762	0.352907
p-value	0.073701	0.205536	0.03593	0.017384	0.032329	0.362079
檢定結果	接受 $H_0$	接受 $H_0$	拒絕 $H_0$	拒絕 $H_0$	拒絕 $H_0$	接受 $H_0$
虛無假設 ( $H_0$ )	$\mu_{13} \leq \mu_{14}$	$\mu_{14} \geq \mu_{15}$	$\mu_{15} \geq \mu_{16}$	$\mu_{16} \geq \mu_{17}$	$\mu_{17} \leq \mu_{18}$	$\mu_{18} \leq \mu_{19}$
對立假設 ( $H_1$ )	$\mu_{13} > \mu_{14}$	$\mu_{14} < \mu_{15}$	$\mu_{15} < \mu_{16}$	$\mu_{16} < \mu_{17}$	$\mu_{17} > \mu_{18}$	$\mu_{18} > \mu_{19}$
檢定統計量	0.965531	0	-0.20865	-1.102897	1.805031	0.206367
p-value	0.167139	1	0.83472	0.135036	0.035535	0.418252
檢定結果	接受 $H_0$	接受 $H_0$	接受 $H_0$	接受 $H_0$	拒絕 $H_0$	接受 $H_0$

表三十五 (顯著水準  $\alpha : 0.05$ )

揆度第一次的檢定結果，可以確定：「第一，第九分鐘到第十分鐘，母體平均數上升；第二，第十到第十一分鐘，母體平均數下降；第三，第十一到第十二分鐘，母體平均數上升；第四，第十七到第十八分鐘，母體平均數下降。」而以上無法拒絕的虛無假設，母體平均數之間的關係可能相等，可能相異。所以本研究繼續第二次的假設檢定。

(二) 第二次假設檢定的結果

虛無假設 (H <sub>0</sub> )	$\mu_7 = \mu_8$	$\mu_8 = \mu_9$	$\mu_{12} = \mu_{13}$	$\mu_{13} = \mu_{14}$	$\mu_{14} = \mu_{15}$	$\mu_{15} = \mu_{16}$
對立假設 (H <sub>1</sub> )	$\mu_7 \neq \mu_8$	$\mu_8 \neq \mu_9$	$\mu_{12} \neq \mu_{13}$	$\mu_{13} \neq \mu_{14}$	$\mu_{14} \neq \mu_{15}$	$\mu_{15} \neq \mu_{16}$
檢定統計量	-1.44877	-0.82201	0.352907	0.965531	0	-0.20865
p-value	0.147401	0.411072	1.275842	1.665721	1	0.83472
檢定結果	接受 H <sub>0</sub>					
虛無假設 (H <sub>0</sub> )	$\mu_{16} = \mu_{17}$	$\mu_{18} = \mu_{19}$				
對立假設 (H <sub>1</sub> )	$\mu_{16} \neq \mu_{17}$	$\mu_{18} \neq \mu_{19}$				
檢定統計量	-1.1029	0.206367				
p-value	0.270072	1.163496				
檢定結果	接受 H <sub>0</sub>	接受 H <sub>0</sub>				

表三十六 (顯著水準  $\alpha : 0.05$ )

揆度第二次的檢定結果，可以確定：「第一，第七分鐘到第八分鐘，母體平均數約略相等；第二，第八分鐘到第九分鐘，母體平均數約略相等；第三，第十二分鐘到第十七分鐘，母體平均數約略相等；第十八分鐘到第十九分鐘，母體平均數約略相等。」

盱衡上述，茲歸納母體平均數的演變：「第五分鐘到第六分鐘，母體平均數由初值下降到最小值，而一分鐘後又回復，數值較初值略高；第七分鐘到第九分鐘，母體平均數的變化很小；第九分鐘到第十分鐘，母體平均數上升。而後的兩分鐘，母體平均數先是隨即下降，又立即回復；第十二分鐘到第十六分鐘，母體平均數的變化很小；之後的一分鐘，母體平均數下降；最後，母體平均數約略不變。」

## 二、母體標準差

縱觀圖二十二，可將母體標準差的演變分為二時期討論，其一是第八分鐘前，其二是第八分鐘後。第八分鐘前，母體 95%信賴區間上下限的差較小，最大僅 60 微米，還可判斷母體標準差的動向。而第八分鐘後，區間上下限的差較大。最小 80 微米，最大 220 微米。母體標準差的趨勢難以研判。職是之故，本研究以假設檢定分析各時刻母體標準差的相對大小，推測母體標準差可能的走向。

首先，研討第八分鐘前，母體標準差的演變。第五分鐘到第八分鐘，區間的界限皆持續上升，代表母體標準差是增加的。區間下限由初值 90 微米增加到 190 微米，其中第七分鐘到第八分鐘，下限保持在 130 微米；區間上限由初值 120 微米增加到 250 微米，其中第七分鐘到第八分鐘，上限保持在 250 微米。

復次，第八分鐘後，母體標準差 95%信賴區間上下限的差較大，母體標準差因而具多種可能的動向，所以需用假設檢定判斷不同時刻母體標準差的相對大小，才能分析它的趨勢，但設立假設不可毫無根據。本研究先觀察區間界限的變動，推敲母體標準差可能的走向，再以假設檢定檢驗假設是否合理。

#### (一) 第三次假設檢定的結果

虛無假設 ( $H_0$ )	$\sigma^2_8 \geq \sigma^2_9$	$\sigma^2_9 \geq \sigma^2_{10}$	$\sigma^2_{10} \geq \sigma^2_{11}$	$\sigma^2_{11} \geq \sigma^2_{12}$	$\sigma^2_{12} \geq \sigma^2_{13}$	$\sigma^2_{13} \geq \sigma^2_{14}$
對立假設 ( $H_1$ )	$\sigma^2_8 < \sigma^2_9$	$\sigma^2_9 < \sigma^2_{10}$	$\sigma^2_{10} < \sigma^2_{11}$	$\sigma^2_{11} < \sigma^2_{12}$	$\sigma^2_{12} < \sigma^2_{13}$	$\sigma^2_{13} < \sigma^2_{14}$
檢定統計量	0.711039	0.639668	0.618895	0.791858	0.978099	0.914845
p-value	0.065097	0.035449	0.031219	0.176463	0.468403	0.368846
檢定結果	接受 $H_0$	拒絕 $H_0$	拒絕 $H_0$	接受 $H_0$	接受 $H_0$	接受 $H_0$
虛無假設 ( $H_0$ )	$\sigma^2_{14} \geq \sigma^2_{15}$	$\sigma^2_{15} \geq \sigma^2_{16}$	$\sigma^2_{16} \geq \sigma^2_{17}$	$\sigma^2_{17} \leq \sigma^2_{18}$	$\sigma^2_{18} \leq \sigma^2_{19}$	
對立假設 ( $H_1$ )	$\sigma^2_{14} < \sigma^2_{15}$	$\sigma^2_{15} < \sigma^2_{16}$	$\sigma^2_{16} < \sigma^2_{17}$	$\sigma^2_{17} > \sigma^2_{18}$	$\sigma^2_{18} > \sigma^2_{19}$	
檢定統計量	0.909317	0.846477	0.881372	1.287078	1.036259	
p-value	0.352801	0.265696	0.324462	0.180678	0.452964	
檢定結果	接受 $H_0$					

表三十七 (顯著水準  $\alpha : 0.05$ )

揆度第三次的檢定結果，可以確定：「第九分鐘到第十一分鐘，母體標準差持續增加。」而以上無法拒絕的虛無假設，母體標準差之間的關係，可能相等，可能相異。所以本研究繼續第四次的假設檢定。

#### (二) 第四次假設檢定的結果

虛無假設 ( $H_0$ )	$\sigma^2_8 = \sigma^2_9$	$\sigma^2_{11} = \sigma^2_{12}$	$\sigma^2_{12} = \sigma^2_{13}$	$\sigma^2_{13} = \sigma^2_{14}$	$\sigma^2_{14} = \sigma^2_{15}$	$\sigma^2_{15} = \sigma^2_{16}$
對立假設 ( $H_1$ )	$\sigma^2_8 \neq \sigma^2_9$	$\sigma^2_{11} \neq \sigma^2_{12}$	$\sigma^2_{12} \neq \sigma^2_{13}$	$\sigma^2_{13} \neq \sigma^2_{14}$	$\sigma^2_{14} \neq \sigma^2_{15}$	$\sigma^2_{15} \neq \sigma^2_{16}$

檢定統計量	0.711039	0.791858	0.978099	0.914845	0.909317	0.846477
p-value	0.130194	0.352926	0.936806	0.737693	0.705601	0.531392
檢定結果	接受 H <sub>0</sub>	接受 H <sub>0</sub>	接受 H <sub>0</sub>	接受 H <sub>0</sub>	接受 H <sub>0</sub>	接受 H <sub>0</sub>
虛無假設 (H <sub>0</sub> )	$\sigma^2_{16} = \sigma^2_{17}$	$\sigma^2_{17} = \sigma^2_{18}$	$\sigma^2_{18} = \sigma^2_{19}$			
對立假設 (H <sub>1</sub> )	$\sigma^2_{16} \neq \sigma^2_{17}$	$\sigma^2_{17} \neq \sigma^2_{18}$	$\sigma^2_{18} \neq \sigma^2_{19}$			
檢定統計量	0.881372	1.287078	1.036259			
p-value	0.648924	1.638645	1.094072			
檢定結果	接受 H <sub>0</sub>	接受 H <sub>0</sub>	接受 H <sub>0</sub>			

表三十八 (顯著水準  $\alpha : 0.05$ )

揆度第四次檢定結果，可以確定：「第一，第八分鐘到第九分鐘，母體標準差的變化很小；第二，第十一分鐘到第十九分鐘，母體標準差的變化很小。」

盱衡上述，茲歸納母體標準差的演變：「第五分鐘到第八分鐘，母體標準差持續上升；第八分鐘到第九分鐘，母體標準差的變化很小；第九分鐘到第十一分鐘，母體標準差上升；第十一分鐘到第十九分鐘，母體標準差的變化很小。」

### 三、解釋數據結果

本研究發現母體平均數與母體標準差經過一段時間皆趨向穩定，而此結果內在的機制為何？茲將配合水滴凝結照片（圖六到圖二十）進行討論。

本研究以為雲滴可分為三種類型：「第五分鐘前形成的雲滴；由前者合併增長所形成的雲滴；前者合併增長後留下空隙，水氣在其間凝結而成的雲滴。」並且，本研究以  $X_0$  表示第一類型雲滴的半徑（筆者知曉事實上各雲滴的半徑各異，但為求討論，將狀況簡化）， $N_0$  表示第一類型雲滴的數量； $X_a$  表示第二類型雲滴的半徑， $N_a$  表示第二類型雲滴的數量； $X_n$  表示第三類型雲滴的半徑， $N_n$  表示第三類型雲滴的數量。第二類型的雲滴由第一類型的雲滴合併增長而來，半徑較大，所以  $X_a$  可寫成  $(X_0 + A)$ ， $A$  為  $X_a$  與  $X_0$  的差。第三類型的雲滴半徑較小，可寫成  $(X_0 - N)$ ， $N$  為  $X_0$  與  $X_n$  的差。

簡化狀況中，母體平均數  $\mu = (X_0 N_0 + X_a N_a + X_n N_n) / (N_0 + N_a + N_n)$

$= [X_0 N_0 + (X_0 + A) N_a + (X_0 - N) N_n] / (N_0 + N_a + N_n)$

$$= [(X_o N_o + X_o N_a + X_o N_n) + A N_a - N N_n] / (N_o + N_a + N_n)$$

$$= X_o + (A N_a - N N_n) / (N_o + N_a + N_n)$$

所以， $\mu$  的增減主要取決於  $(A N_a - N N_n)$ （下文以  $K$  代替  $(A N_a - N N_n)$ ）的正負， $(N_o + N_a + N_n)$  決定增減的幅度，但本研究只能判斷不同時刻，各母體的相對大小，所以並不太側重幅度的變化，而探討數值的升降與否。 $X_o$  持續上升， $N_o$  持續減少，但速率不快。

第五分鐘到第六分鐘，雲滴合併增長，為第二類型的雲滴。但在合併初期，半徑只比第一類型的雲滴略大，所以  $A$  增加但較小。並且合併的數量不多，所以  $N_a$  較小。合併之後有新雲滴生成，為第三類型的雲滴，但此時半徑仍然較小，所以  $X_n$  較小—— $N$  較大（ $X_n = X_o - N$ ），且半徑較小的雲滴只需較小的空間，數量因而較多—— $N_n$  較大。因此  $K < 0$ ， $\mu$  下降。

第六分鐘到第七分鐘，第二類型雲滴藉由併吞其他雲滴的方式增長，所以  $A$  增加， $N_a$  增加。而第三類型的雲滴增長，且部分被第一類型或第二類型的雲滴併吞，所以  $N$  減少， $N_n$  減少，因此  $K > 0$ ， $\mu$  上升。

第七分鐘前的雲滴皆有所增長。而增長後的雲滴要再次增長，需更多的水量，因而需更多時間。所以  $A$ 、 $N_a$ 、 $N$ 、 $N_n$  的變化較不明顯。第七分鐘到第九分鐘， $\mu$  因此不太變動。

第九分鐘到第十分鐘，雲滴吸收足夠的水量，再次呈現明顯的增長，因此  $A$  增加， $N$  減少（第三類型雲滴的半徑變大， $X_n = (X_o - N)$  上升， $N$  因而下降）。所以  $K > 0$ ， $\mu$  上升。

第十分鐘到第十一分鐘，部分第二類型的雲滴合併，而新的第三類型雲滴生成，所以  $N_a$  減少， $N$ 、 $N_n$  增加。因此  $K < 0$ ， $\mu$  下降。

第十一到第十二分鐘，第三類型的雲滴增長， $N$ 、 $N_n$  因而減少，所以  $K > 0$ ， $\mu$  上升。

第十二到十七分鐘，所有雲滴的半徑皆較先前更大，要再度增長需更多的水氣——需更多的時間，所以  $A$ 、 $N_a$  變化較小。第三類型的雲滴也已有一定大小，並且第一類型雲滴與第二類型雲滴合併增長後留下些許空間，所以  $N$ 、 $N_n$  變化很小。因此  $K$  沒有明顯變動， $\mu$  約略不變。

第十七分鐘到第十八分鐘，部分雲滴合併，A 增加，但合併的數量不多，所以 Na 變化不大。合併後的空隙再次生成新的雲滴，且較大雲滴合併後，留下的空隙較大，所以 Nn 較大。且新雲滴的半徑較小——N 較大。因此  $K < 0$ ， $\mu$  下降。

最後，多數雲滴半徑較大，增長速率較慢，所以  $\mu$  較無變動。

另外，起初，雲滴合併增長，雲滴半徑的分散程度增加，所以母體標準差持續上升。後期，雲滴半徑增加，增長速率減緩，母體標準差因而較無變動。

綜上所述，雲滴成長過程趨向穩定，而緣由是：雲滴增長的時間隨半徑的增加而延長。

## 陸、結論

本研究以二種面向推測雲滴成長過程可能的性質。既然雲滴成長依循機遇增長模式，各個雲滴的成長機率並不相同，或許雲滴成長過程是混亂無序的。但雲滴成長到一定大小，會形成雨滴，再離開雲。留下的空隙又讓水氣凝結，生成新的雲滴。或許其中具有潛在的規律。而本研究閱覽相關文獻，知曉此問題意識的研究現況，並無太多學者研析後，決定參酌前人的研究方法，以水滴凝結於壓克力板的現象模擬大氣成雲的過程，並且，本研究嘗試以統計方法，由單一區域的水滴凝結結果推測全體水滴的凝結狀況。筆者所閱覽的文獻中，並未見到其他學者使用相似的分析方法。而本研究的結果發現，雖然各個雲滴並不具有相等的成長機率，可是整體的演變會趨向穩定。這是筆者所閱的文獻皆未提及的結論。再者，本研究嘗試解釋雲滴成長過程趨向穩定的內在原因。是因為雲滴成長為半徑愈大的雲滴，要再次增長會需要更多的水量——需要更多的時間。復次，雲滴藉由合併周圍的雲滴以快速增長，但留下的空隙也使新的雲滴生成，而抵銷前者對平均半徑的增加效果。然而，筆者終究僅是學生，所設計的研究方法與歸納的研究結論僅是竭盡自身能力所取得的成果，其中背景知識、論述依據不足之處，在專家學者前恐怕只是班門弄斧、貽笑大方，筆者尚祈指教。另外本研究模擬大氣雲滴成長過程的方法，為求探討，仍忽略眾多實際狀況與因素，如壓力、凝結核，也期望後人能補苴罅漏、深入研究。揆諸上述，本研究針對學界較少探討的問題，嘗試以統計方法研析，發現雲滴成長過程趨向穩定，希望結果能給予後人參考價值，而研究所不足之處，還悉聽方家賜教。

## 柒、參考文獻及其他

- 一、王寶貴。雲物理學。臺北市：渤海堂文化
- 二、鄭承佑、謝函叡（2017）。類暖雲雲滴成長之探討。全國中小學科展。第 57 屆。取自  
<https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=13696>
- 三、Edwin X. B. & Richard L. R. (1974) An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 ( 7),1814-1824, from[https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/31/7/1520-0469\\_1974\\_031\\_1814\\_aaocdg\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/31/7/1520-0469_1974_031_1814_aaocdg_2_0_co_2.xml)
- 四、Edwin X. B. & Richard L. R. (1974) An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part II. Single Initial Distributions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 ( 7),1825-1831, from[https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/31/7/1520-0469\\_1974\\_031\\_1825\\_aaocdg\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/31/7/1520-0469_1974_031_1825_aaocdg_2_0_co_2.xml)
- 五、Edwin X. B. & Richard L. R. (1974) An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part III. Accretion and Self-Collection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 ( 7),2118-2126, from[https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/31/8/1520-0469\\_1974\\_031\\_2118\\_aaocdg\\_2\\_0\\_co\\_2.xml?rskey=9N6FeV&result=1](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/31/8/1520-0469_1974_031_2118_aaocdg_2_0_co_2.xml?rskey=9N6FeV&result=1)
- 六、Edwin X. B. & Richard L. R. (1974) An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part IV. A New Parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 ( 7),2127-2135,from [https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/31/8/1520-0469\\_1974\\_031\\_2127\\_aaocdg\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/31/8/1520-0469_1974_031_2127_aaocdg_2_0_co_2.xml)
- 七、Edwin X. B. (1967) Cloud Droplet Growth by Collection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24 ( 6),668-701,from[https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/24/6/1520-0469\\_1967\\_024\\_0688\\_cdgbc\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/24/6/1520-0469_1967_024_0688_cdgbc_2_0_co_2.xml)

## 【評語】 051906

本研究作者對於雨滴的成長過程，有很大的好奇及興趣。本計畫先參酌過去雨滴的研究，獲得初步的認知，然後設計了一個水蒸氣凝結壓克力板的簡單實驗，來紀錄探討水滴的成長過程，並以統計方法推論雲滴成長過程的性質，實驗相當有趣，極富科學探究精神，建議加強對自然界雲滴形成，成長相關物理過程之了解並探討實驗設計與發現和自然界雲滴雨滴形成發展過程之差異，討論實驗可以解釋之物理過程與限制。文獻的閱讀，如果可以再擴大範圍，搜尋國外各類相關科學期刊的文章，常常會有驚喜的發現。

## 作品簡報

高中組  
地球與行星科學科

探究雲滴成長過程  
是否具潛在的規律

# 前言

雲滴成長模式為機遇增長，每個雲滴成長的機率皆不同。

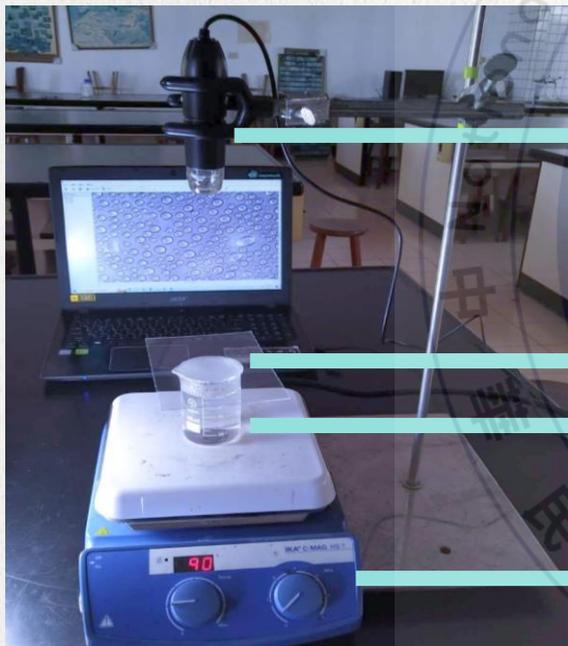
新雲滴生成，小水滴成長，大水滴離開，如此不斷循環。

## 雲滴成長過程是否具有潛在的規律

《An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions》

《類暖雲雲滴成長之探討》

# 研究方法



顯微照相機

壓克力板

100ml燒杯

加熱攪拌器



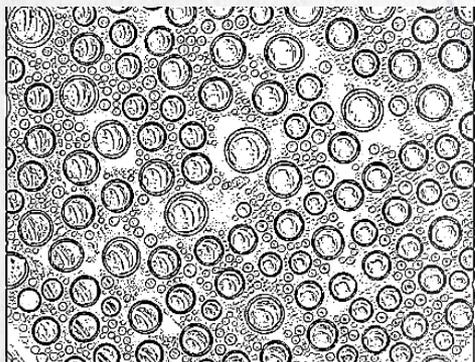
顯微照相機

鐵尺

# 研究方法

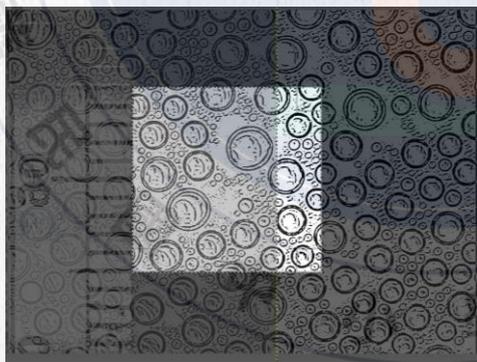
Step 1

圈選水滴輪廓



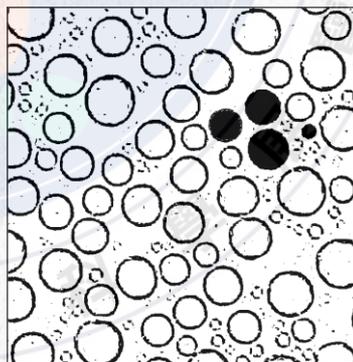
Step 2

疊圖、畫出區域



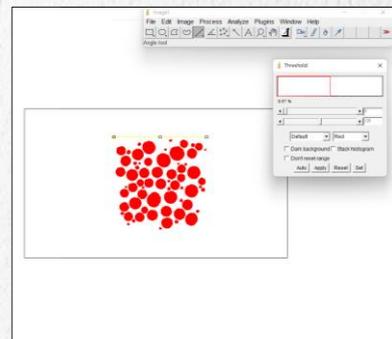
Step 3

區域內水滴塗色



Step 4

分析水滴粒徑

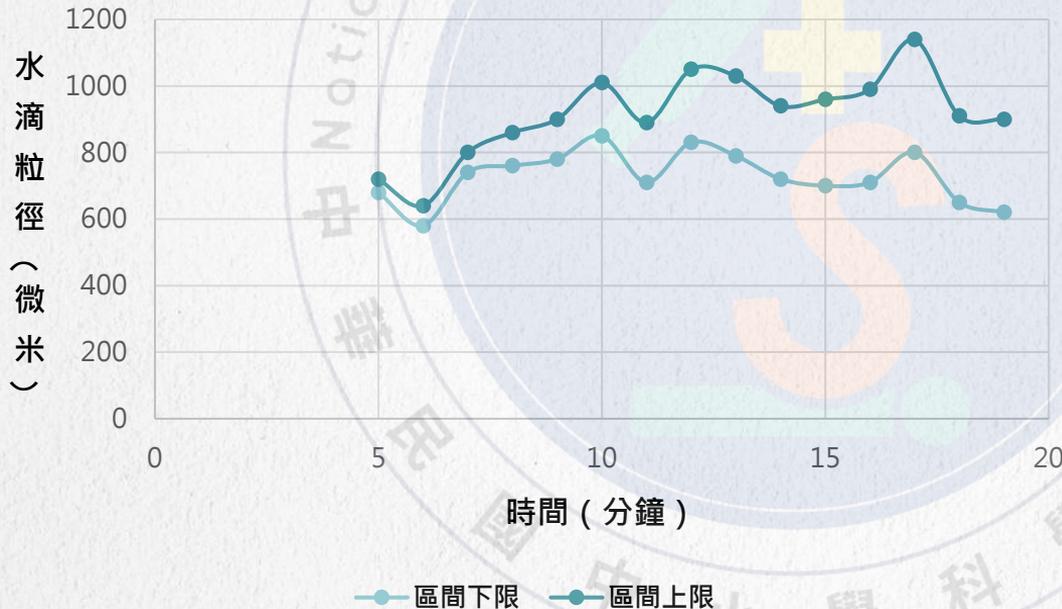


# 研究方法

1. 於每個時刻，將水滴粒徑從200微米開始，2000微米為止，每增加50微米分為一組，計算每一組水滴的數量。
2. 統計每個時刻的樣本數、平均數、標準差和變異係數。
3. 計算每個時刻母體平均數和母體標準差的95%信賴區間。
4. 將分析結果製作成圖表。

# 實驗結果

## 母體平均數95%信賴區間界限的演變



時間

5~7分鐘

7~9分鐘

9~10分鐘

10~12分鐘

12~17分鐘

17~18分鐘

18~19分鐘

狀態

較不安定

趨向穩定

增加

較不安定

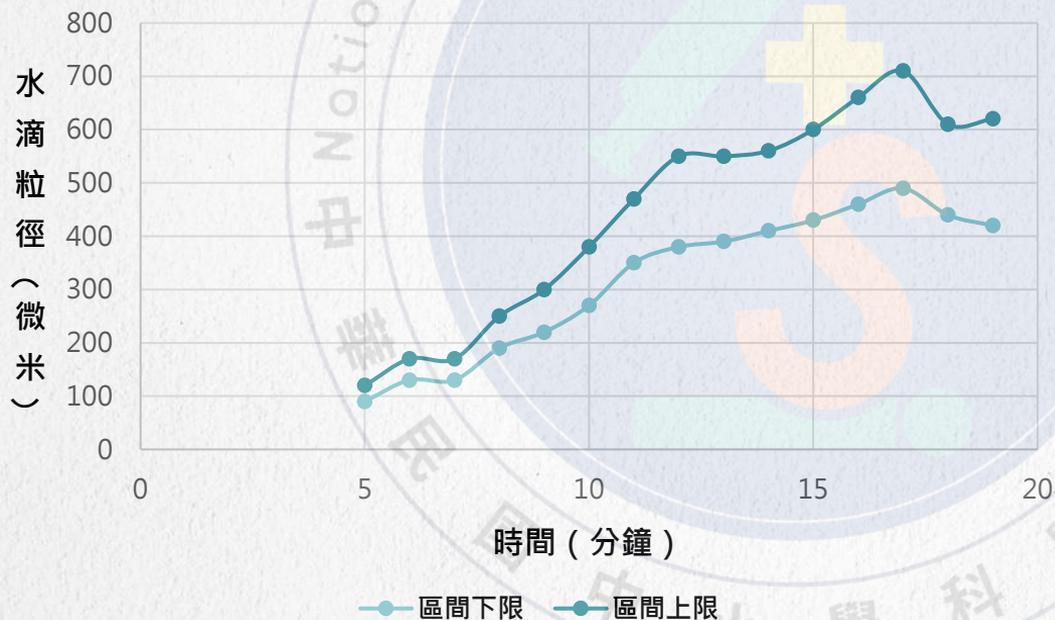
趨向穩定

下降

趨向穩定

# 實驗結果

## 母體標準差95%信賴區間界限的演變



時間	狀態
5~8分鐘	增加
8~9分鐘	趨向穩定
9~11分鐘	增加
11~19分鐘	趨向穩定

# 討論

$$\mu = (X_o \times N_o + X_a \times N_a + X_n \times N_n) / (N_o + N_a + N_n)$$
$$= X_o + (A \times N_a - N \times N_n) / (N_o + N_a + N_n)$$

雲滴

第一類：五分鐘前形成的雲滴

第二類：合併增長所形成的雲滴

第三類：於空隙中凝結而成的雲滴

半徑

數量

$X_o$

$N_o$

$X_a$

$N_a$

$X_n$

$N_n$

+A

-N

# 討論

$$\mu = X_o + (A \times N_a - N \times N_n) / (N_o + N_a + N_n)$$

1. 5~6分鐘，雲滴合併增長，A增加，Na減少。空隙生成新雲滴，Xn較小，N較大，No較大。μ下降。
2. 6~7分鐘，第二類雲滴併吞增長，A增加，Na增加。第三類水滴增長，部分被併吞，N減少，Nn減少。μ上升。
3. 7~9分鐘，雲滴要再次增長，需更多的水量、時間。μ不太變動。
4. 9~10分鐘，雲滴吸收足夠的水量，再次明顯增長，A增加，N減少。μ上升。

## 討論

$$\mu = X_o + (A \times Na - N \times Nn) / (No + Na + Nn)$$

5. 10~11分鐘，第二類雲滴合併，Na減少。新的第三類型雲滴生成，所以N、Nn增加。μ下降。
6. 11~12分鐘，第三類雲滴增長，N、Nn減少。μ上升。
7. 12~17分鐘，雲滴半徑較先前更大，需更多的水氣、時間才能有明顯增長，A、Na變化較小。第三類雲滴已有一定大小，並且第一類與第二類雲滴合併增長後留下些許空間，N、Nn變化很小。μ約略不變。
8. 17~18分鐘，少數雲滴合併，A增加，Na變化不大。大雲滴合併所留下的空隙較大，新雲滴的半徑較小，N、Nn較大。μ下降。

# 結論

- \* 各個雲滴雖然並不具有相等的成長機率，但是整體的演變會趨向穩定。
- \* 雲滴的半徑愈大，再次增長需要的時間、水量愈多，造成整體的演變趨向穩定。
- \* 雲滴藉由合併周圍的雲滴以快速增長，但留下的空隙也使新的雲滴生成，而抵銷前者對平均半徑的增加效果。

# 參考資料

- \* 鄭承佑、謝函叡 (2017)。類暖雲雲滴成長之探討。全國中小學科展。第57屆。
- \* Edwin X. B. & Richard L. R. (1974) An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part I. Double Distributions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 ( 7),1814-1824.
- \* Edwin X. B. & Richard L. R. (1974) An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part II. Single Initial Distributions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 ( 7),1825-1831.
- \* Edwin X. B. & Richard L. R. (1974) An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part III. Accretion and Self-Collection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 ( 7),2118-2126.
- \* Edwin X. B. & Richard L. R. (1974) An Analysis of Cloud Drop Growth by Collection: Part IV. A New Parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 ( 7),2127-2135.