

2025 仰望盃全國科學 HomeRun 實作大賽

決賽成果報告書

隊伍名稱：Cloud Maker

作品名稱：探討瓶內氣壓、溫度影響瓶中造雲之光學厚度變化

科學概念 1：飽和凝結

天空中的雲霧來自空氣中水氣飽和凝結。水氣達飽和的途徑有二：空氣冷卻達露點或增加大氣中的水氣，而大氣中常以降溫達到飽和為主。成雲的外在條件為大氣的水氣含量及溫度，大氣中水氣含量越多，越容易達到飽和；溫度越高、則越不容易達到飽和，因此在不同環境中，空氣中水氣飽和凝結的難度也不一。

科學概念 2：光的穿透性

太陽光穿過雲層時，會受到大氣散射和吸收的影響。常見的影響因素為雲的厚度與氣膠的數量。雲層越厚，被吸收或散射的光就越多，通過的光就越少，亮度會降低，可能導致陰天或低照度條件，反之，當雲的厚度越薄。氣膠可分為自然與人為產生，我們通常會聯想氣膠為人為排放的污染物。氣膠越多，透光性亦越差。

決賽成果報告書內文

1. 發想動機：

我們曾在一篇《case報科學》的科普文章：千變萬化的流體（三）：哥吉拉雲一流體的不穩定性（2021年11月03日）中發現，於2020年在日本青森縣近海的雲層上，發現一朵朵平凡無奇的雲竟然可以變成「哥吉拉遊行」的樣貌。為了了解雲形成的條件與因素，我們利用改變環境因素來探討雲的形成原因和形成方式，來控制雲的狀態以進行實驗。我們嘗試透過簡單的科學實驗瓶中造雲，以溫度、氣壓為操縱變因，控制模擬雲氣的產量，以光感應器收集鹵素燈光穿透雲後之光照度，探討雲氣對光照度的影響，進而了解模擬雲氣的狀態。

2. 作品創意性：

我們在固定且可控的環境中模擬產生雲氣，並觀察其對光通過雲氣候照度下降，與光學厚度的關係。這種實驗方法突破了傳統只能在室外觀察雲的方式，我們藉由改變瓶內的氣溫和氣壓，觀察不同條件下雲有何種變化，進而推測雲對光的反射或吸收是否會隨著環境改變而有所變動，也幫助我們更理解雲的物理性質，探討壓力及溫度對雲的厚度的影響。

3. 硬體及電路架構圖：

1、 實驗裝置

- (1) 橡膠塞：防止加壓後的雲氣跑出。
- (2) 打氣機：供給指定的額外氣壓。
- (3) 桶裝水瓶：裝水後當作固定體積模型，以測量雲氣對光照度的影響。
- (4) 鹵素燈：加熱與提供光源。
- (5) 黑箱：防止光線跑進影響光感測器，從而導致實驗誤差。
- (6) Arduino：連接電腦和溫溼度感測器與壓力感測器，測量瓶內溫度與氣壓。

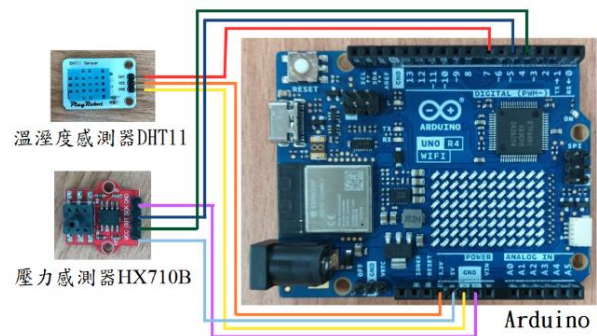


圖一、實驗裝置圖。

2、 Arduino電路架構圖

我們利用Arduino R4 Wifi撰寫程式，並連接壓力感測器及溫溼度感測器來偵測瓶內氣壓及溫度。其中，溫度感測器接在第7腳位；壓力感測器輸出腳位接在第4腳位，時鐘腳位接在第5腳位。

以即時監控瓶內達到設定之氣壓和溫度後，即可製造模擬雲氣。



圖二、電路架構圖。

3、 Arduino程式碼

```
1  #include <HX711.h> // 引入HX710B的程式庫
2  #include <DHT.h> // 引入DHT11溫溼度感測器的程式庫
3
4  // HX710B 接腳設定
5  #define HX_DOUT 4 // HX710B 數據輸出腳位
6  #define HX_CLK 5 // HX710B 時鐘腳位
7
8  // DHT11 接腳設定
9  #define DHT_PIN 6 // DHT11 感測器連接到的腳位
10 #define DHT_TYPE DHT11 // 定義 DHT11 型號
11
12 HX711 scale; // 宣告 HX710B 壓力感測器
13 DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE); // 宣告 DHT11 感測器
14
15 // 校正因子與轉換比例
16 const float PRESSURE_SCALE_FACTOR = 0.000389; // 大氣壓力換算因子
17
18 void setup() {
19     Serial.begin(115200); // 開啟序列監視器
20
21     // 初始化 HX710B
22     scale.begin(HX_DOUT, HX_CLK);
23     scale.set_scale(PRESSURE_SCALE_FACTOR); // 使用校正因子
24     scale.tare(); // 清零
25
26     Serial.println("感測器初始化中，請稍候...");
27     delay(5000); // 等待感測器穩定
28
29     // 初始化 DHT11 感測器
30     dht.begin();
31     Serial.println("大氣壓力與溫度感測器已啟動！");
32 }
33
34 void loop() {
35     // 讀取 HX710B 原始數據
36     if (scale.is_ready()) {
37         long rawData = scale.read_average(10); // 取10個數據的平均值
38         float pressure = rawData * PRESSURE_SCALE_FACTOR; // 計算大氣壓力
39
40         // 顯示原始數據與校正後的數據
41         Serial.print("HX710B 原始數據: ");
42         Serial.println(rawData);
43         Serial.print("校正後的大氣壓力: ");
44         Serial.println(pressure);
45         Serial.println(" hPa");
46     } else {
47         Serial.println("HX710B 未準備好，請檢查硬體連線。");
48     }
49
50     // 讀取溫度數據
51     float temperature = dht.readTemperature(); // 讀取溫度 (單位: 攝氏)
52     if (isnan(temperature)) {
53         Serial.println("無法讀取溫度數據，請檢查 DHT11 感測器。");
54     } else {
55         Serial.print("當前溫度: ");
56         Serial.print(temperature);
57         Serial.println(" °C");
58     }
59
60     // 延遲 1 秒後更新數據
61     delay(500);
62 }
```

圖三、Arduino程式

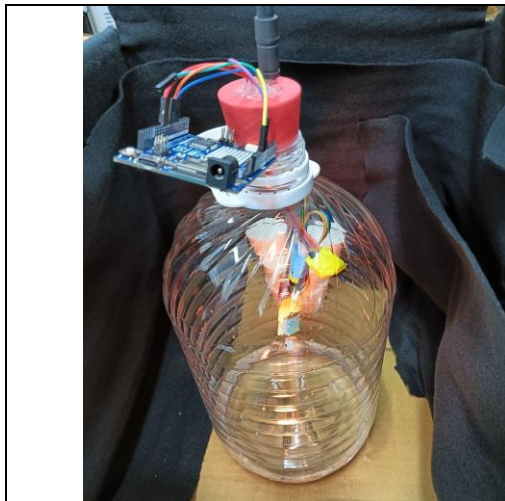
4. 作品成果說明：

1、 實驗流程

- (1) 將桶裝水瓶裝滿500 mL的水並放入箱子裡，打開鹵素燈、光感應器。
- (2) 利用溫溼度感測器偵測瓶內溫度，將鹵素燈溫度升到實驗所需的溫度(圖四)。
- (3) 將桶裝水瓶的口用橡膠塞塞住、用黑布蓋住紙箱不讓光透進去影響光感應器。
- (4) 利用打氣機加壓，依據實驗所需的氣壓改變加壓值，利用壓力感測器量測瓶內氣壓。
- (5) 打氣至目標氣壓值後，瞬間將塞子拔出，讓桶內產生模擬雲氣(圖四)。
- (6) 利用光感應器感測光照度。

表一、實驗的操縱變因及控制變因。

項目	測量氣壓對光學厚度之影響	測量溫度對光學厚度之影響
控制變因	溫度：維持22 °C	氣壓：維持11 psi
操縱變因	氣壓：每次上升2 psi 3、5、7、9、11、13、15、17、19 psi	溫度：每次上升2 °C 23、25、27、29、31、33、35、37、39 °C



圖四、加壓前的桶裝水瓶。

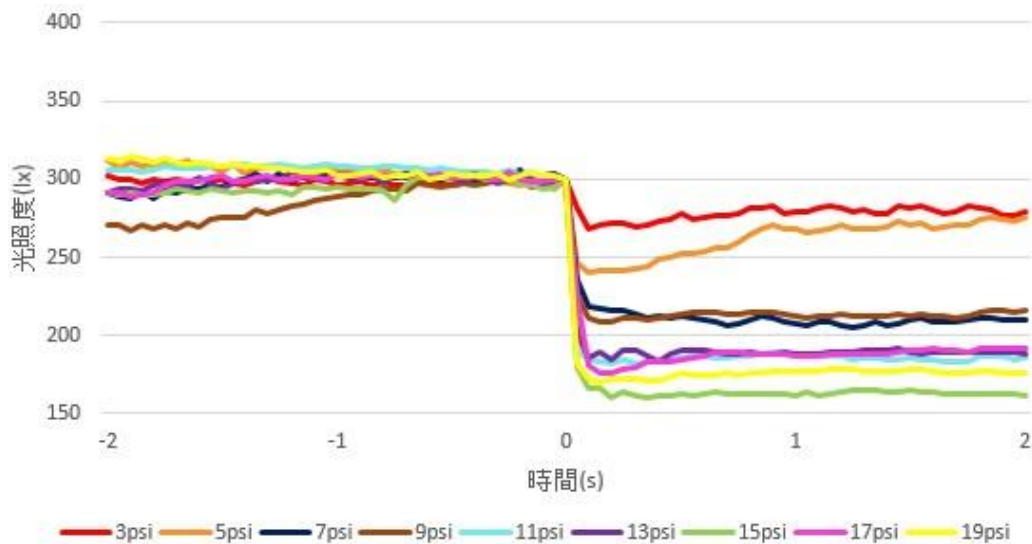


圖五、加壓後拔開塞子並產生模擬雲氣。

2、 各氣壓與光照度下降量的比較：

在氣壓對光學厚度之影響的實驗，紀錄如圖六，將各組實驗拔開橡皮塞、記錄光照度瞬間下降時間為0秒。在加壓3~15 psi時，氣壓加壓值與光照度變化呈正相關。當氣壓達到 15 psi，光照度下降量最大，其次是加壓19 psi。

本研究推測在氣壓加壓值3~15 psi範圍內，氣壓愈高，模擬雲氣形成愈濃，光的散射加強，光照度下降。因此，本研究認為氣壓與光照度變化呈正相關。當氣壓達15 psi時，模擬雲氣厚度達最高，光的散射最強，光照度最低。然而，當氣壓進一步提升至17~19 psi時，水滴可能因聚合或變大，改變了雲氣結構，較大水滴減少散射效果，部分光線得以穿透雲層，光照度下降幅度變小。這表明模擬雲氣的形成方式可能發生變化，並非單純氣壓愈高，雲愈濃。隨著水滴變大，它們反而可能形成較透明的水珠，讓光線穿透更多，導致光照度下降幅度較小。

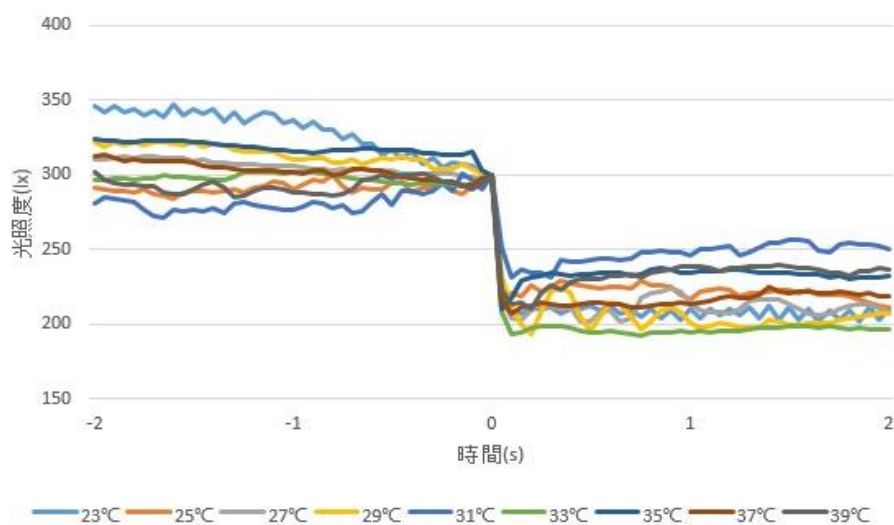


圖六、各氣壓與光照度間的比較圖。

3、各溫度與光照度下降量的比較：

在溫度對光學厚度的影響之實驗結果如圖七，將各組實驗拔開橡皮塞、記錄光照度瞬間下降時間為0秒。在溫度23~29 °C時會呈現正相關，且在29 °C時光照度下降量最大，其次是33 °C。

本研究推測在溫度23~29 °C 時，水分蒸發速度隨著溫度增加而加快，使更多細小水滴形成，導致光的散射變強，造成光照度下降程度愈多，當溫度上升到 33 °C，水滴可能開始蒸發或變大，使得散射減弱，讓部分光線能穿透，所以光照度下降程度減弱。



圖七、各溫度與光照度間的比較圖。

4、實驗數據誤差來源分析

- (1) 光源的穩定性：鹵素燈連接插座為交流電，所以使光照度有等頻率變化，導致光照度不穩定，未來可採用較穩定的光源或嘗試改用直流電以穩定光源。
- (2) 環境因素：目前光感測器和鹵素燈放在水桶外，若能將器材放進瓶內進行實驗，可減少因水桶折射而形成的誤差。
- (3) 測量設備的精度：我們可以採用多個設備儀器測量數據，以觀察是否有單一個測量設備誤差值較大的問題。
- (4) 模擬雲氣的流動性：多用光感應器佈局，平均測值，像是使用3個光感應器分布於不同位置，取平均值來代表整體光照度，有助於減少單點數據誤差。
- (5) 桶裝水瓶的表面不平整：嘗試尋找或訂做表面平整的容器，以減少水桶表面的不平整導致的光的散射和折射影響實驗數據。

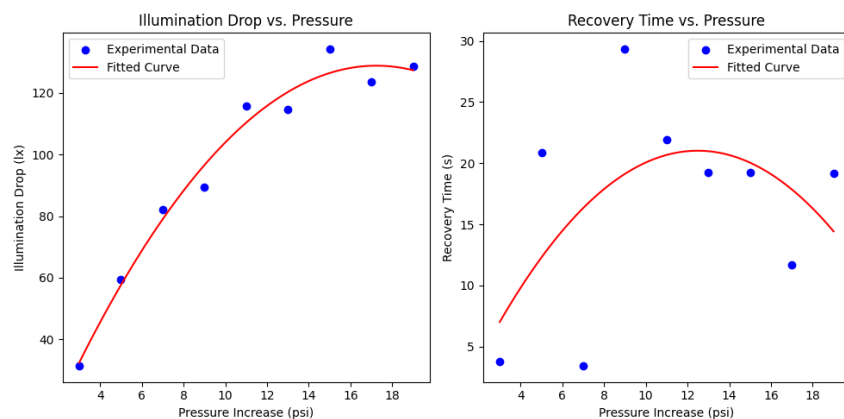
5、光照度變化的影響因素

- (1) 雲氣影響光的傳播，使得部分光被吸收或散射。
- (2) 空氣流動改變光線的折射、散射狀態，導致光反應器接收到的光強度降低。

6、氣壓與溫度影響形成模擬雲氣之經驗式

- (1) 改變氣壓之光照度變化趨勢與光照度恢復至背景值之經驗式

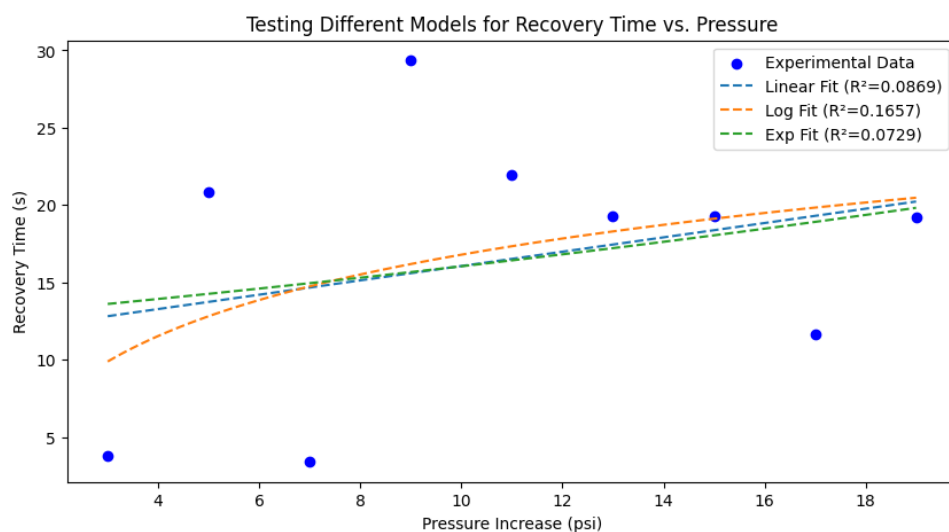
利用Python內建的工具庫Scipy尋找最佳擬合解，得到改變氣壓影響光照度下降關係式： $y = -0.4750x^2 + 16.3795x - 12.3799$ ；改變氣壓影響光照度下降後恢復至背景值所需時間關係式： $y = -0.1555x^2 + 3.8854x - 3.2477$ ，實驗結果與二次函數如圖八。



圖八、左圖為改變氣壓對光照度下降、右圖為恢復至背景值所需時間之擬合圖。

藍點為實驗結果數據、紅色曲線為最佳二次函數。

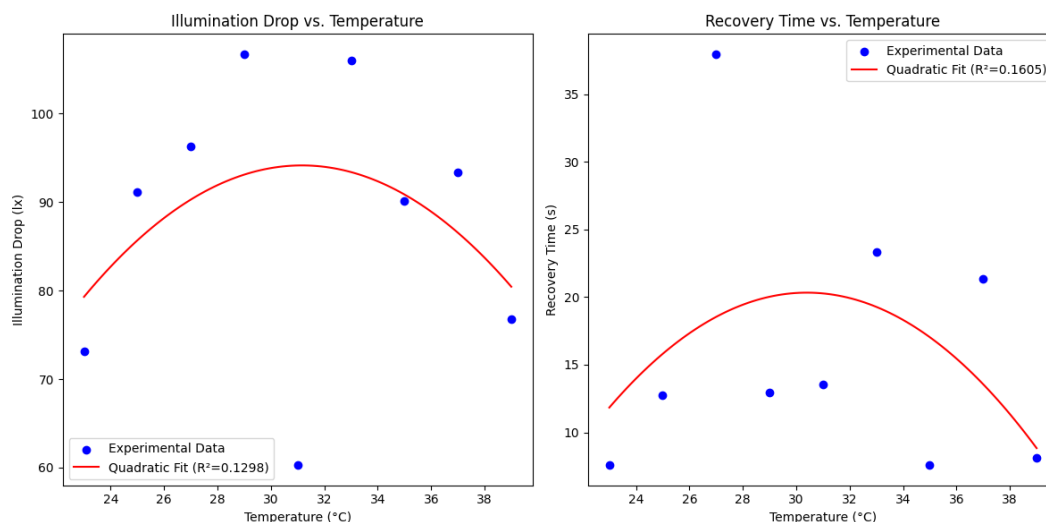
發現改變氣壓對光照度下降相關性高， R^2 值達0.98，而光照度下降後恢復至背景值所需時間沒有明顯關係， R^2 值僅0.29。為確認二次函數是否非最佳擬合解(圖九)，另外嘗試線性擬合 $y = ax + b$ 、對數擬合 $y = a \log x + b$ 與指數擬合 $y = ae^{bx}$ ，但結果依舊不佳。



圖九、改變氣壓對光照度下降、恢復至背景值所需時間擬合結果。藍點為實驗結果數據、藍色虛線為線性擬合、橘色虛線為對數擬合、綠色虛線為指數擬合。 R^2 值標示於圖例旁。

(2) 改變溫度之光照度變化趨勢與光照度恢復至背景值之經驗式

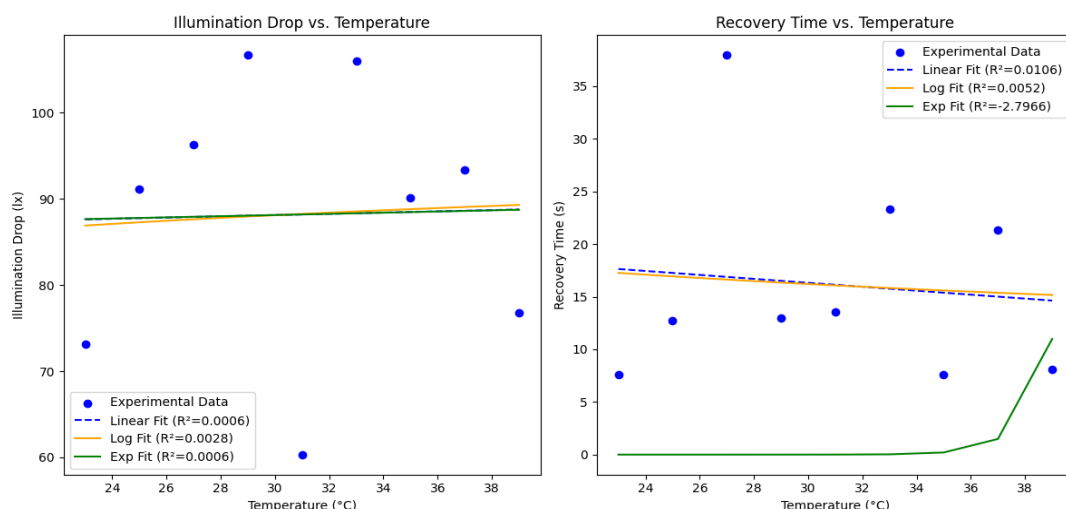
欲探討改變溫度影響光照度下降與恢復至背景值之時間的關係。用相同運算方法得到二次函數如圖十。



圖十、改變溫度對光照度下降、恢復至背景值所需時間二次函數經驗式圖。左圖為改變溫度對光照度下降、右圖為恢復至背景值所需時間之擬合圖。藍點為實驗結果數據、紅色曲線為最佳二次函數。

二次函數擬合效果較差，改變溫度對光照度下降（圖十左）之 R^2 值為0.1

3、光照度恢復至背景值所需時間（圖十右）之 R^2 值為0.16，代表二次函數沒辦法有效擬合。接著繼續嘗試使用線性擬合 $y = ax + b$ 、對數擬合 $y = a \log x + b$ 與指數擬合 $y = ae^{bx}$ ，結果如圖十一。



圖十一、改變溫度對光照度下降、恢復至背景值所需時間擬合結果。藍點為實驗結果數據、藍色虛線為線性擬合、橘色線為對數擬合、綠色線為指數擬合。 R^2 值標示於圖例旁。

結果顯示此三種擬合程度依舊不佳，推測溫度可能不是單一影響光照度下降與照度恢復時間的因素。

7、綜合比較

本研究嘗試將兩組實驗結果共同處理，欲了解是否能由指定氣壓與溫度，推得光照度下降，與恢復至背景值所需時間的關係式。

參數給定如下：照度下降(Z)，與溫度(X)和氣壓(Y)之間的關係。與光照度恢復至背景值的時間(T)，與溫度(X)和氣壓(Y)之間的關係。

首先討論照度下降，由實驗數據可得模型：

$$Z = aX^2 + bY^2 + cXY + dX + eY + f$$

其中 $a = 0.07$ 、 $b = -0.33$ 、 $c = 159.07$ 、 $d = -1755.19$ 、 $e = -3486.33$ 、 $f = 38577.47$ 。

光照度恢復至背景值的時間，由實驗數據可得模型：

$$T = aX^2 + bY^2 + cXY + dX + eY + f$$

其中 $a = -0.05$ 、 $b = -0.12$ 、 $c = 159.28$ 、 $d = -1749.34$ 、 $e = -3501.05$ 、 $f = 38510.22$ 。

8、模型可推展性分析

為驗證建立的模型是否可以廣泛應用到任意溫度(X)、與任意氣壓(Y)影響照度下降(Z)，我們設計三組新的參數進行實驗，相對誤差為計算實驗值與模型的誤差比例，編號1設計溫度為極端值、編號3設計氣壓為極端值，編號2設計為實驗區間，為驗證本模型的應用程度。實驗結果如表二：

表二、任意氣壓與與溫度影響光照度下降紀錄表。

編號	氣壓加壓值 (psi)	溫度 (°C)	光照度下降(lx)			
			第一次	第二次	第三次	平均
1	5	39	41.83	30.64	13.58	28.68
2	11	31	82.42	75.43	86.73	81.53
3	19	29	79.17	98.41	87.78	88.45

以表二中各組實驗之光照度下降平均值，計算與影響照度下降(Z)模型的相對誤差(Relative Error)。相對誤差為計算實驗值與模型的誤差比例，計算方式如下：

$$\text{相對誤差} = \frac{|Z_{exp} - Z_{pred}|}{Z_{exp}} \times 100\%$$

得到相對誤差計算結果如表三所示：

表三、任意氣壓與與溫度影響光照度下降相對誤差分析結果。

編號	模型預測光照度下降(lx)	平均實驗光照度下降(lx)	相對誤差(%)
1	-16189	28.68	>100%
2	87.16	81.53	6.91%
3	9023	88.45	>100%

編號2實驗結果與模型有最佳擬合，相對誤差為6.91%，顯示在設定的增加氣壓與溫度中能以本模型預測實驗結果。

編號1與編號3模型預測光照度下降數值有較大誤差，推測因本模型之數據庫較小，無法提供模型預測溫度與氣壓範圍外的情形，使編號1過高的溫度與編號3極高的氣壓讓模型預測結果與實驗結果差距較大。

接著進行光照度下降後恢復至背景值所需時間，實驗紀錄結果如表四。

表四、任意氣壓與與溫度影響光照度下降後恢復至300 lx 所需時間紀錄表。

編號	氣壓加壓值 (psi)	溫度 (°C)	光照度恢復至300lx所需時間(s)			
			第一次	第二次	第三次	平均
1	5	39	無數據	20.3	0.85	10.58
2	11	31	17	15.95	16.75	16.57
3	19	29	無數據	22.2	無數據	22.2

得到相對誤差計算結果如表五所示：

表五、任意氣壓與溫度影響光照度下降後恢復致至300lx所需時間相對誤差分析結果。

編號	模型預測光照度下降(lx)	平均實驗光照度下降(lx)	相對誤差(%)
1	-16238	10.58	>100%
2	21.04	16.57	26.98%
3	8937	22.2	>100%

編號1、3的預測時間和實際時間相差大，使相對誤差超過100%，推測是因模型假設或參數設置有問題，或數據有異常。編號2的預測雖較接近實際時間，但相對誤差仍有26.98%，顯示模型在考慮氣壓、溫度等因素時，可能過於簡化，甚至是實驗中有誤差或環境變化所影響。

9、 結論

- (1) 從氣壓對光照度之影響的數據中，能看出氣壓較大時，光照度的下降量也會較大，代表此時所產生的模擬雲氣也較厚。
- (2) 從溫度對光照度之影響的數據中，能看出溫度較高時，光照度的下降量也會較大，代表此時所產生的模擬雲氣也較厚。
- (3) 無論是溫度的變化還是氣壓的改變，都會影響模擬雲氣的產生，從而改變光的傳播路徑、散射程度以及最終到達接收端的強度。
- (4) 在經驗式來看，只有改變氣壓對光照度下降之擬合圖有較佳擬合結果，改變氣壓後恢復至背景值所需時間之擬合圖、改變溫度對光照度下降、恢復至背景值所需時間擬合結果皆無明顯關係。

- (5) 從實驗數據驗證經驗式模型，發現在設計的實驗範圍內可以得到較佳的預測結果，誤差值為6.91%和26.98%，實驗範圍外的誤差值過大，代表模型建立需要更多數據做為推論基礎。若模型精準度提升，將可應用於其他研究與教學中。

10、未來展望

本研究初步建立了雲氣生成與光照度變化的關係模型，未來可朝向實驗設備優化、精密感測器升級與光源穩定化進行改良，使實驗數據更穩定。此外，我們也希望擴大我們的數據庫以廣泛運用到任意溫度和氣壓對應光照度下降。另一方面，瓶中造雲實驗具備高度的教育與展示潛力，期待未來可延伸應用至氣候模擬或天氣教育，拓展雲的光學厚度研究。

5. 參考文獻：

Christine Aebi, Julian Gröbner, Stelios Kazadzis, Laurent Vuilleumier, Antonis Gkikas, and Niklaus Kämpfer (2020). Estimation of cloud optical thickness, single scattering albedo and effective droplet radius using a shortwave radiative closure study in Payerne. EGU, the European Geosciences Union. From <https://reurl.cc/p9zG9e>

Peter Victor Hobbs (1995). Basic Physical Chemistry for the Atmospheric Sciences. Cambridge University Press.

劉詠鯤 (2021 年 11 月 03 日)。千變萬化的流體 (三)：哥吉拉雲—流體的不穩定性。CASE報科學。取自<https://reurl.cc/zpvdd7>