

2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	160015
參展科別	物理與天文學
作品名稱	別在房子裡跳舞－研究結構體開口大小與數量 對火焰燃燒及煙霧流動之影響
得獎獎項	二等獎 巴西科學博覽會正選代表 耶魯科學與工程學會獎
就讀學校	桃園市政府教育局高級中等教育科
指導教師	潘國隆
作者姓名	張又懿

關鍵詞 熱力學、流體力學、結構學

作者簡介



我是張又懿，從小自學，十歲開始喜歡科學，從未想過自己能前來這裡比賽和學習，非常感謝家人的支持與清華大學戴明鳳教授的指導，還有高嘉鄖、林家賢老師以及其他清華跨領域科學教育中心團隊的所有老師，帶我進入科技世界的啟蒙老師曹齊平，讓我體會科學的樂趣與挑戰。同時也感謝未來之星營隊、聯發科技基金會、桃園市自主學習 3.0 實驗室的協助，還有臺灣大學潘國隆教授的建議，我還有非常多需要進步的地方，謝謝所有幫助我的人。

中文摘要

台灣火災地點以建築物占最大比例，在火災現場時常為了逃生及救火而打破門窗，造成建築物內部濃煙流動面積擴大，而釀成更大的災害，故本作品目的為研究「方形結構四周開口大小與數量對火焰與煙霧燃燒狀況的影響」，本研究從熱力學、流體力學、結構學三個角度探究此議題，並以煙囪效應與煙層逆流效應為理論基礎，使用壓克力搭建方形盒子來模擬建築物，並以四面壓克力上的開口大小及數量進行實驗，使用火焰及煙霧作為實驗介質，火焰方面以高度與溫度作為應變變因，煙霧方面則以 MQ-2 煙霧氣體感測器於結構內部進行濃度測量，同時也使用 CFS-MODEL 的 FDS 進行結構內部模擬，綜合實體實驗及各結果可發現，與一般想像不同，並不是開啟門窗就能撲滅火勢，甚至可能因為湧進過多氧氣而導致火勢更加嚴重，開口面積與火焰強度關係成二次函數曲線，本研究可供建築物搭建時的火災防範參考以及防災的宣導，並有進階研究的可能性。

Abstract

Buildings account for the largest proportion of fire sites in Taiwan. At the fire site, doors and windows are often broken for escape and fire fighting, which causes the area of dense smoke to flow inside the building to expand and cause greater disasters. Therefore, the purpose of this work is to study the size of the openings around the square structure. The influence of quantity and quantity on the combustion status of flames and smoke. This research explores this topic from three perspectives of thermodynamics, fluid mechanics, and structure. Based on the theoretical basis of the chimney effect and the countercurrent effect of the smoke layer, acrylic is used to build a square box to simulate Buildings and experiment with the size and number of openings on the four sides of the acrylic. Two media are used for the experiment, smoke, and flame. For smoke, the MQ-2 smoke gas sensor is used to measure the concentration inside the building, and for the flame. Experiment with height and temperature. At the same time, CFS-MODEL's FDS is used to simulate the interior of the building. The comprehensive physical experiment and the results show that, unlike general imagination, it is not possible to extinguish the fire by opening the doors and windows, or even because of influx Excessive oxygen will cause the fire to become more serious, the relationship between the opening area and the flame intensity is a quadratic function curve. This study can be used as a reference for fire prevention and disaster prevention during building construction, and there is the possibility of advanced research.

壹、 前言

一、 研究動機

在 2019 年末，在我家附近發生了一場火災，釀成了 3 死 1 傷，經過調查，發現是因為建築結構、門窗位置等問題使得火焰從一樓快速蔓延至三樓，於是我決定以此議題進行研究，希望能避免更多憾事。

(一) 火災防治

台灣發生火災地點 109 年統計如下：

1. 建築物
2. 森林田野
3. 車輛
4. 其他

占比情況請見圖 1。

由此可知，發生在建築物中的火災比例高，且在建築物中，不易逃生，造成更多憾事。

建築的結構會影響火焰與煙霧的流動與擴散，任意地開窗也可能會引起烽火爆或使得更多濃煙竄入現場，導致傷亡更加嚴重，為了救援與安全，故決定研究結構體開口大小與數量對火焰燃燒及煙霧流動之影響。

火災發生地點統計

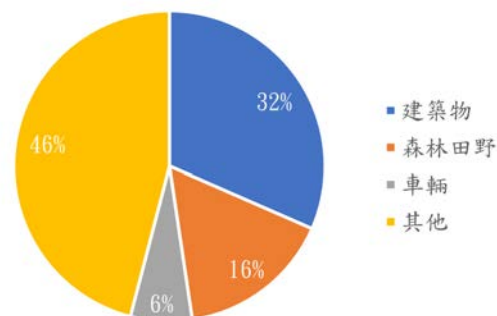


圖 1 火災發生地點統計 資料來源：國家安全局(研究者繪製)

(二) 現有火焰流動理論擴充

在研究的過程中，也可以發現關於火焰流動方式的資料在台灣較為稀少，通常會以燃燒、隔熱材料或熱能的角度來看，往往容易忽略火焰流動的探討，希望能藉此機會加以研究火焰的流動。

二、 研究目的

1. 研究方形結構四周開口數量對火焰燃燒狀況影響
2. 研究方形結構四周開口大小對火焰燃燒狀況影響
3. 研究方形結構四周開口數量對煙霧發煙量影響
4. 研究方形結構四周開口大小對煙霧發煙量影響
5. 研究方形結構四周開口數量對煙霧擴散程度影響
6. 研究方形結構四周開口大小對煙霧擴散程度影響

三、 研究狀況與歷程概述

本實驗研究起始於 2020 年 2 月，一開始以重現烽火爆為目標，使用兩片弧形玻璃進行實驗，並且成功重現了旋轉的火焰，並且使用「康達效應」進行了該現象的解釋，但我對此並不滿意，因為一般的建築物並不會設計成為圓形，反而都是方形的，卻也會形成旋轉的火焰（烽火爆），於是我詢問了當時的老師，他認為方型的結構無法形成烽火爆或旋轉火焰，但是我想實驗看看，於是我找來了清玻璃進行實驗，而研究證實，其實只要在接近封閉，但有少許縫隙的情況下都能使得火焰跟著氣流旋轉。

但對於該結果，卻只能得到定性的結論，不能真正達到實質的對於建築結構或火災的建議或解方，於是升上高中之後繼續進行了研究。同時也發現，煙霧在火災現場也有很關鍵的影響，於是在 2021 四月開啟了本階段的研究，這階段我以火焰的燃燒狀況以及煙霧的發煙量及擴散為目標，使用方形壓克力搭建進行實驗（如圖 3、圖 4、圖 5），並以 MQ-2 感測器偵測了煙霧的濃度，達到更精確的實驗結果；希望能藉此提出具有幫助的解方，發揮物理在建築與消防上的功效。



圖 2 弧形玻璃實驗結果
(來源：研究者)



圖 3 方形結構實驗結果
(來源研究者)

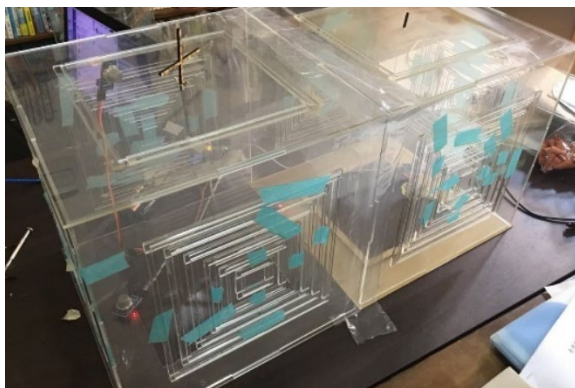


圖 4 本次實驗中一部分 (來源研究者)



圖 6 實驗器材一隅 (來源研究者)

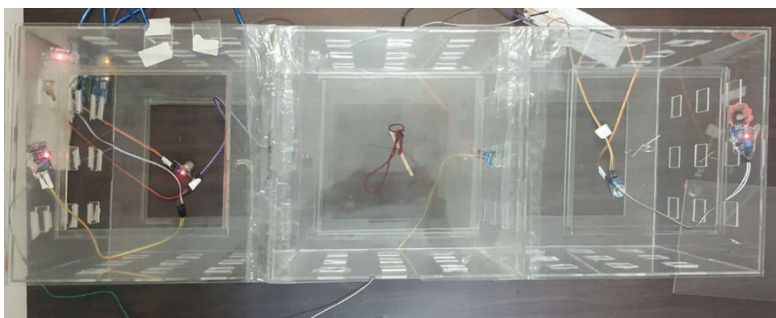


圖 5 三個連通管實驗 (來源研究者)

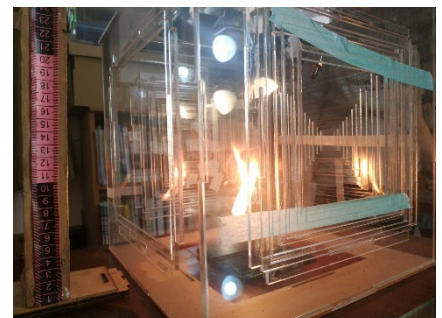


圖 7 攝於本階段實驗之火焰實驗
(來源研究者)

貳、 研究方法或過程

一、 研究流程概述

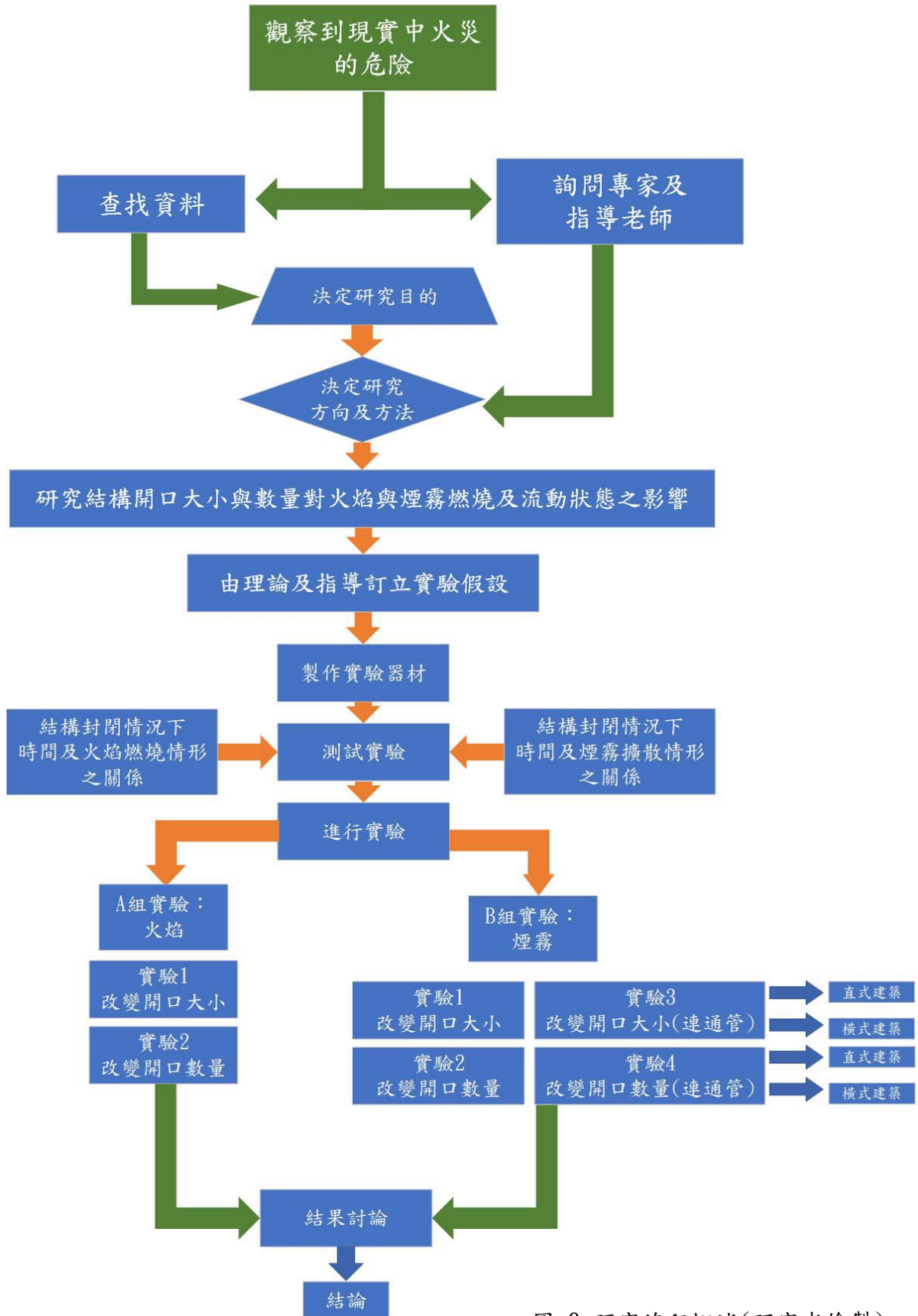


圖 8 研究流程概述(研究者繪製)

二、相關理論與科學原理

(一) 火焰

火焰向上竄是由於空氣的流動引起的。由於熱空氣的密度比冷空氣小一些，因此熱空氣就會上升，這樣一來使得周圍的冷空氣就流過來補充。隨著空氣的流動上升，火焰就被空氣引向上方，火苗就向上竄。

在目前的理論中，我們對火焰之流動方式的了解甚少，僅能從燃燒面來進行理論的介紹。

1. 燃燒四面體：氧氣、熱力、燃料和連鎖反應

當可燃性的物質（燃料）和足量的氧化劑（如氧氣、高含氧量的物質或是其他不含氧的氧化劑）混合，暴露在一熱源或是高於燃料及氧化劑混合物閃點的溫度時，就會起火燃燒，而且可以維持快速的氧化反應，形成連鎖反應，一般會稱燃料、氧化劑、熱及連鎖反應為燃燒四面體。若沒有上述元素，或是比例不對，就無法起火燃燒，例如可燃液體只有在液體和氧氣在一定比例內才會燃燒，有些燃料及氧化劑的混合物需要催化劑才能燃燒，催化劑是在反應前後質量維持不變的物質，但有催化劑時，燃料及氧化劑比較可以穩定的燃燒。在火點燃之後，燃料只要可以藉由熱能的釋放來維持本身的溫度，就會出現連鎖反應，若是持續的供應燃料及氧化劑，火可能會擴散。

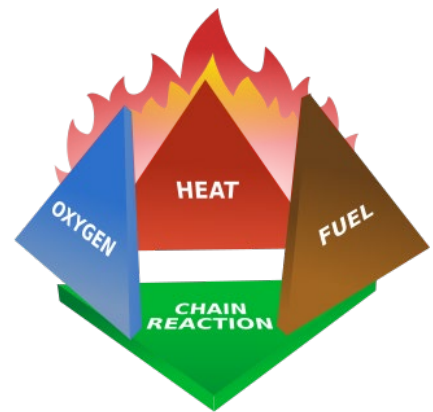


圖 9 燃燒四面體解釋(圖片來源網路，作者：Gustavb)

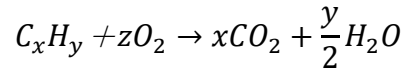
若燃燒的氧化劑是來自周圍的空氣，重力或是其他加速度來產生對流，將燃燒的產物帶走，並且補充氧氣，有助於繼續燃燒。若沒有對流，燃料起火後會立刻被周圍的燃燒產物及空氣中不可燃的氣體包圍，火會因沒有足夠氧氣而熄滅。

只要去除了燃燒四面體中的任何一項，火就會熄滅。以一個天然氣為燃料的火焰為例，以下方式中的任何一個都可以滅火。

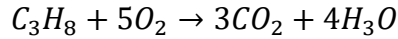
- (1) 將天然氣關閉，移除燃料。
- (2) 將火焰整個蓋住，使火焰悶燒，消耗氧氣，產生二氧化碳。
- (3) 沖水，快速的將熱量移除，用力的吹火焰，使正在燃燒的氣體離開燃料源。
- (4) 將阻燃劑（如海龍）加到火焰中，阻燃劑可以減緩化學反應，讓燃燒速率慢到無法持續連鎖反應。

2. 鏈式反應
3. 煙囪效應
4. 碳氫化合物在氧氣中的化學計量燃燒 (Stoichiometric combustion of a hydrocarbon in oxygen) (用於模擬實驗)

碳氫化合物在氧氣中化學計量燃燒的化學方程式為：



例如，丙烷在氧氣中的化學計量燃燒為：



其中

C_3H_8 為丙烷

$5O_2$ 為氧

$3CO_2$ 為二氧化碳

$4H_2O$ 為水

5. 碳氫化合物在空氣中的化學計量燃燒 (Stoichiometric combustion of a hydrocarbon in air)
6. 擴散火焰方程式¹

質量守恆方程式

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0$$

動量守恆方程式

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0$$

物種守恆方程式

$$\rho u \frac{\partial Y_k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_k}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_k V_{ky}) - \dot{\omega} = 0$$

能量守恆方程式

$$\rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_{ky} c_{pk} \frac{\partial T}{\partial y} + \sum_{k=1}^K \dot{\omega} h_k = 0$$

¹ 來源自：〈中山大學機械與機電工程學系碩士論文 火焰在漸張微流道內的傳播行為 The behavior flame propagation in diverging microchannels〉林義晨

理想氣體方程式

$$P = \rho RT$$

以上式子其中：

ρ 為密度

x 為徑向座標位置

y 為軸向座標位置

u 為徑向速度

v 為軸向速度

P 為壓力

Y_k 為 k 物種的質量分率(mass fraction)

$\dot{\omega}$ 為淨生成率(net production rate)

h_k 為焓(enthalpy)

C_{pk} 為等壓比熱

V_{ky} 為 k 物種在 y 方向的擴散速度(diffusion velocity)

λ 為熱傳導係數(thermal conductivity)

R 為氣體常數(gas constant)

(二) 煙霧

建築物火災時所產生的煙，其成分為固體微粒及氣體微粒居多，故易受空氣擾動而流動。火災時雖然火本身可被侷限於採用耐火建材的居室內，但煙卻會穿過很小的開口，流到建築物各處，例如建築物裂縫、**貫穿管路間隙**、空調風管、窗戶縫及門縫等，擴散到鄰接的居室。煙從一居室流到另一居室，主要驅動力(Driving Force)依其性質可分為兩大類：自然式(Passive)與強制式(Active)，如表1。

表1：煙的主要趨使力	
自然式驅使力(Passive Driving Force)	1. 煙囪效應(Stack Effect) 2. 浮力(Buoyancy) 3. 熱膨脹(Expansion) 4. 自然風(Wind Effect)
強制式驅使力(Active Driving Force)	5. 空調系統(HVAC System) 6. 電梯活塞(Elevator Piston Effect)

本研究主要以自然式(Passive)進行探討，理論基礎以在自然式驅使力中的四項驅使力為主，浮力與熱膨脹為煙的高溫度索引起。煙囪效應及自然風則受當時氣象條件中

的外氣溫度與風的大小、方向影響。

上述四種驅使力會在隔離物、牆、樓地板等任意煙霧周遭的構造之間產生壓力差，而影響煙的流動。以下介紹四種驅使力。

1. 煙囪效應(Stack Effect)

當建築物外部的氣溫比內部氣體溫度低時，則在建築物內部空間，如樓梯間、電梯豎井及管路間等，有向上的氣流產生。會形成此種現象，乃是建築物室內空氣溫度較高，導致其密度較外氣為低。故形成向建築物內部的壓力差，氣流就沿著建築物豎井部分向上竄升。這種現象稱為正煙囪效應(Normal Stack Effect)，如圖1所示。

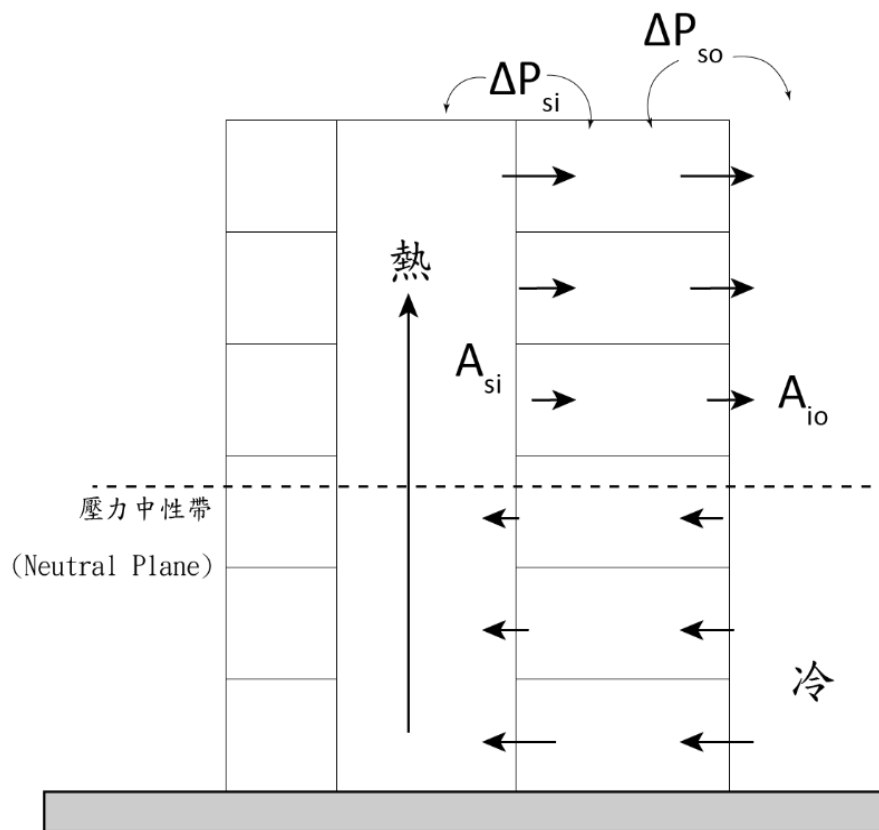


圖 10 正煙囪效應，寒帶國家之建築使用暖氣時、內部產生熱或發生火災時。(研究者繪製)

相反地，當外氣溫度較建築物內部為高時(大樓中常用的中央空調即為典型案例)，室內空氣密度較外氣為高，形成向建築物外部的壓力差，則建築物內部豎井空間有向下的氣流產生，稱此現象為逆煙囪效應(Reverse Stack Effect)，如圖2。

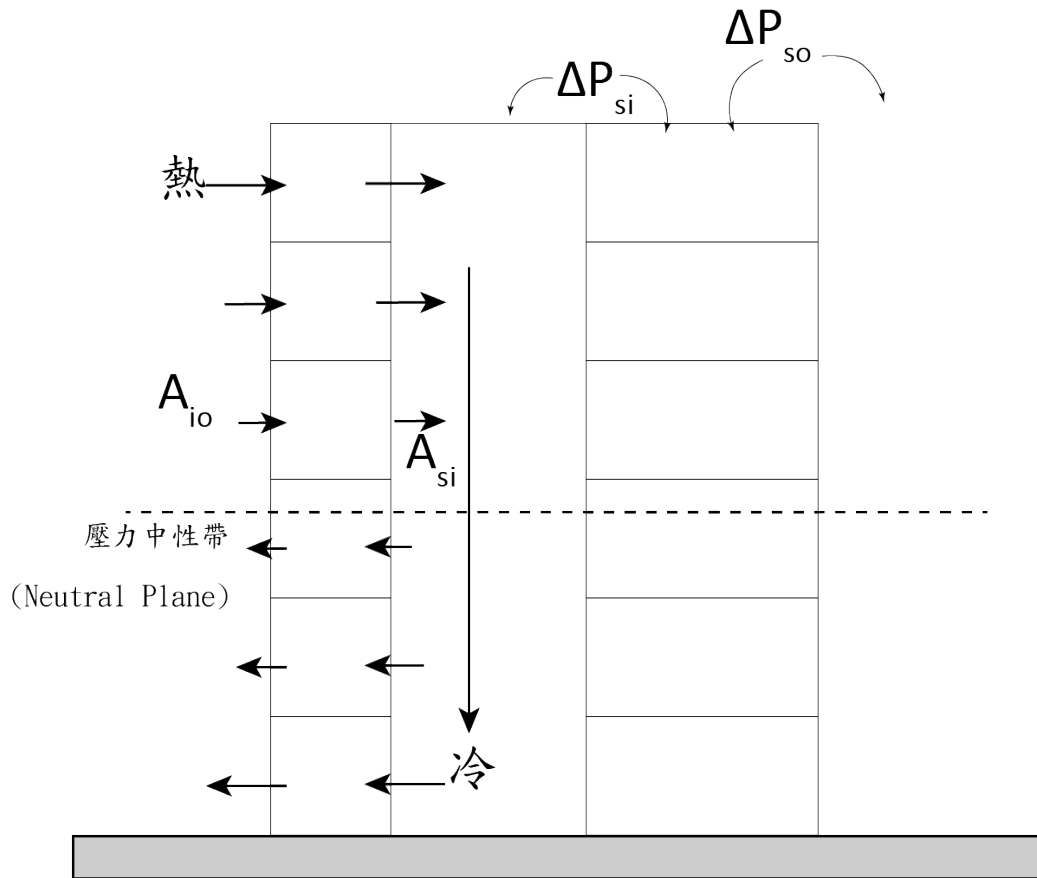


圖 11 逆煙囪效應(Reverse Stack Effect)，例如熱帶國家之建築使用冷氣時，意為內部比外部溫度低時。
(研究者繪製)

建築物內部豎井與外界壓力差可寫成：

$$\Delta P_{so} = (\rho_o - \rho_s)gh$$

其中

ΔP_{so} 為建築物內部豎井與外界壓力差

ρ_o 為外氣密度

ρ_s 為建築物豎井空氣密度

g 為重力加速度

h 為至壓力中性帶(Neutral Plane)的距離

所謂壓力中性帶(Neutral Plane)指的是建築物內外壓力為零時之高度，通常在普通建築物中約為樓高的一半。若使用理想氣體方程式 $P = \rho RT$ ，則可將式子寫成：

$$\Delta P_{so} = \frac{gP}{R} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) h$$

其中

P 為大氣壓力

R 為理想氣體常數

T_o 為外氣的絕對溫度

T_s 為建築物豎井空氣的絕對溫度

以下舉例說明煙囪效應於實際案例中之運作。

例如有一棟60公尺高的建築物，其壓力中性面的高度為樓高一半，即30公尺時。若外部氣溫度為-18 °C(寒帶國家)，而當大樓內使用暖氣將空氣提升為21 °C時，因煙囪效應而產生最大壓力差為55 Pa。

故亦可從式子

$$\Delta P_{so} = \frac{gP}{R} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) h$$

推知，當室內外溫差越大時，或樓房越高時，煙囪效應越大。煙在有火災的建築物中受到煙囪效應的影響，其移動方向如圖1與圖2中箭頭方向所指，而兩箭頭的長度則為壓差大小。若火災發生在壓力中性帶以上，則煙會直接往上升，而排出屋外，則火場以下樓層就不會有煙霧瀰漫。

而以上所討論壓力差的式子為假設建築物樓板之間沒有洩漏的情況產生。若已知建築物豎井與居室間煙的流動面積，以及居室與建築物外部煙的流動面積。則根據前面所述，煙從豎井流至戶外的有效面積可用下列式子表示：

$$A_e = \left(\frac{1}{A_{si}^2} + \frac{1}{A_{io}^2} \right)^{-1/2}$$

其中

A_e 為煙從豎井流至戶外的有效面積

A_{si} 為建築物豎井與居室間煙的流動面積

A_{io} 為居室與建築物外部煙的流動面積

從流動守恆推知，建築物豎井與居室間的壓力差可寫成：

$$\Delta P_{si} = \Delta P_{so} \left(\frac{A_e}{A_{si}} \right)^2 = \frac{\Delta P_{so}}{1 + \left(\frac{A_{sj}}{A_{io}} \right)^2}$$

其中

ΔP_{si} 為建築物豎井與居室間的壓力差

將下式：

$$A_e = \left(1/A_{si}^2 + 1/A_{io}^2 \right)^{-1/2}$$

代入本式可得：

$$\Delta P_{si} = \Delta P_{so} \left(A_e / A_{si} \right)^2 = \frac{\Delta P_{so}}{1 + \left(A_{si} / A_{io} \right)^2}$$

由本式即可得知，建築物豎井與居室間的壓力差，即煙流動驅使力的大小，與煙囪效應所產生的壓力差成正比。當 ΔP_{so} 越大，則 ΔP_{si} 越大。

而當居室與建築物外部煙的流動面積 A_{io} 越大時，建築物豎井與居室間煙流動的驅使力也越大。這說明了**當火場溫度足夠震破窗戶的玻璃，或者為了逃生及救火而打破玻璃，造成居室與建築物外部煙流動面積擴大，將會引入更多的煙進去居室**；這在每場火災皆曾發生，因此救火隊員進入的路徑必須嚴格加以控制與標示。(資料來源：楊冠雄《建築物防火之煙控設計分析》)

2. 浮力(Buoyancy)

煙乃是高溫空氣帶動灰燼微粒而形成，所以煙本身溫度就很高，與周圍空氣密度比較，煙的密度相對低，故有浮力產生。如同前述煙囪效應，由浮力所造成的火場與周圍環境的壓力差可表示成：

$$\Delta P_{fo} = \frac{gP}{R} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_f} \right) h$$

其中

ΔP_{fo} 為火場與周圍環境的壓力差

P 為大氣壓力

R 為理想氣體常數

T_o 為外氣絕對溫度

T_f 為火場絕對溫度

h 為至壓力中性帶(Neutral Plane)的距離

以下舉例說明於實際案例中之運作。若周圍環境為20℃，火場溫度假設為800℃時，則在壓力中性帶上1.5公尺處，其壓差13 Pa。

當煙從火場流出時，本身由於被周圍進冷卻而溫度降低，因此煙受浮力之影響會因距離火場越遠而越小，也會隨火場的成長而有所改變。

3. 熱膨脹(Expansion)

火場的高溫除了會產生浮力驅動煙之外，能量的釋放也會有煙膨脹的現象，而使煙流動。假設火場中只有一個開口，提供空氣流入火場以及煙流出火場，相較於空氣流量，燃燒物的質量可忽略不計。並且假設煙的熱性質(Thermal Properties)，與空氣一樣。則流入火場內空氣的體積與流出火場外煙的體積，有下列關係：

$$\frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{T_{out}}{T_{in}}$$

其中

Q_{out} 為流出火場外煙的體積流率

Q_{in} 為流入火場內空氣的體積流率

T_{out} 為流出火場煙的絕對溫度

T_{in} 為流入火場煙的絕對溫度

以下舉例說明於實際案例中之運作。

當火場溫度為700 °C，火場周圍溫度為20 °C時，則原1.5 m³/sec的空氣灌入火場內，流出火場的煙約變為5 m³/sec，大概是本來的3.3倍強。另外火場中若有開啟的門或窗戶時，由於這些開口的流動面積太大，則在開口兩側熱膨脹所產生的壓力差便可忽略不計。然而火場中沒有開啟的門或窗戶時，只要有足夠的氧提供燃燒之下，則膨脹所產生的壓力差，就顯得很重要了。這也是造成窗戶可能會被壓力差震破的主要原因。

4. 自然風(Wind Effect)

外界的風對煙的流動有顯著的效應。建築物窗戶、門被打開時，風可以影響到建築物內煙的流動。風對建築物所產生的壓力則可以表示如下：

$$P_w = 1/2 C_w \rho_o V^2$$

其中

P_w 為風對建築物表面所產生的壓力

C_w 為壓力係數

ρ_o 為外界空氣密度

V 為風速

式子中壓力係數 C_w 其值介於-0.8至0.8之間，負值用於逆風向(或稱下風向)的牆

(Leeward Wall)，正值則適用於順風向(或稱頂風向)的牆(Windward Wall)。壓力係數的值受建築物季和圖形即附近有無障礙物的影響，是故在建築物的每一面皆有個別的壓力係數。根據以上所述，則自然風效應對建築物兩側所產生的壓力差，可用下列式子表示：

$$\Delta P_w = 1/2 (C_{w1} - C_{w2}) \rho_o V^2$$

其中

ΔP_w 為風對建築物兩側所產生的壓力差

C_{w1} 為建築物順風向牆的壓力係數

C_{w2} 為建築物逆風向牆的壓力係數

在以上兩式子中提到了風速，通常風速是隨著海平面增加而增加。風速與高度的關係可用下列式子表示：

$$V = V_o (Z/Z_o)^n$$

其中

V 為欲求風速

V_o 為參考高度的風速

Z 為欲求風速的高度

Z_o 為參考高度

n 為風速係數

對氣密較好的建築而言，風的影響或許不顯著，但是這是火場中常發生的現象，當窗戶受到因膨脹或任何原因受到破壞時，如果如此外界的風可以輕易影響內部煙的流動。若加上前述的煙囪效應，外界氣象條件將會對內部煙的流動造成顯著影響。

(三) 物理模型

1. 火焰

以下針對室內火災內，不同通風口大小的燃燒速率進行說明（資料來源自：K. Kawagoe, 1967, “Estimation of Fire Temperature-Time Curve in Rooms”及張瀚展 民國一百零三年七月 居室火災閃燃後火焰竄出開口對外牆影響之研究）
Kawagoe 進行了一系列的室內火災研究，透過不同大小的通風管並量測木框架 (wood cribs) 的燃燒速率。作者發現燃燒速率會隨著開口的形狀及大小變化，並在木框架 (\dot{m}_T) 的燃燒速率及通風係數之中進行相關性分析：

$$\dot{m}_T = 0.1AH^{1/2} \text{ kg/s}$$

其中

A 為開口面積

H 為開口高度

$AH^{1/2}$ 為通風係數

Stekler 等人進行實驗，藉由改變開口形狀、火焰強度以及火源的位置來探討由開口進入的空氣質量流率變化。此研究主要把重點放在全盛時期之燃燒行為，使用甲烷氣體作為火源。

該實驗中發現固定火源位置情況下，空氣質量會隨著火焰強度變強而隨之增加。同時也發現，當固定開口形狀時，空氣經由開口流入之流率會因為室內火源位置的不同而產生變化，在此研究中也推導出最大質量流率(\dot{m}_a)公式：

$$\dot{m}_a = 0.52AH^{1/2} \text{ kg/s}$$

Delichatsios 與 Silcock 使用立方型的房間以及走廊型的房間進行實驗，並以獲取之數據做為基礎，研究其熱解速率²以及空氣進流率之間的相關性，此研究中發現空氣進流不僅僅與通風因子有關，與空氣幾何形狀也有很大關係，以下為熱解速率與空氣進流率之公式：

$$\dot{m}_T = 0.22\dot{m}_a \text{ kg/s}$$

綜合以上說明，並根據實驗目的1、2，可將火焰物理模型提煉為下：

$$\dot{m}_T = 0.22\dot{m}_a \text{ kg/s}$$

※物理量定義補充： \dot{m}_T 為燃燒速率， \dot{m}_a 為最大質量流率

² 熱解速率意為：熱解（英語：pyrolysis，或稱裂解、熱裂、熱裂解、高溫裂解）指有機物質於無氧氣存在下的高溫分解反應。它涉及的化學成分和物理相位的同時變化，並且是不可逆的反應。燃料（原物料）在熱裂解之後，會形成炭、裂解氣體與焦油。

2. 煙霧

發煙量計算方式如下

燃燒物火焰中所產生的煙量主要可由二大因素決定：

1. 燃燒物

若燃燒物的化學成分中，含有氧原子的話，將比不含有氧原子的燃燒物產生較少的煙。而燃燒物的分子結構中若含有苯環(Benzene Ring)的話，將會燃燒較多的煙。

2. 火場環境

主要是燃燒溫度、火焰大小及燃燒區域氧的濃度等火場環境的特徵，影響發煙量。其中燃燒的區域氧的濃度與火場通風程度有關。

從許多研究可證實，燃燒時所產生的煙量，絕大部分為火焰所引進的空氣量，而由燃燒物本身所產生的量可說是微乎其微，故在計算發煙量時，若估計火源所引進的空氣量，大約就是此火源的發煙量，可由下列式子表示：

$$\dot{m} = 0.096P\rho_0 y^{\frac{3}{2}} g^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{2}}$$

其中

T_0 為外氣的絕對溫度

T 為煙柱中浮起氣體的絕對溫度

y 為地板至煙層底部的距離

ρ_0 為外氣的密度

g 為重力加速度

P 為火源周圍長度

\dot{m} 為發煙量

若假設外氣溫度為27 °C，300 k，則其密度 ρ_0 為1.22 kg/m³。又假設煙柱中浮起的氣體溫度為1200 k時，則以上式子可簡化為：

$$\dot{m} = 0.18Py^{\frac{3}{2}}$$

上述兩式為求出每秒發煙的重量。若要求出每秒產生煙的體積，則可根據密度與溫度成反比的關係，得出下式：

$$V = \frac{\dot{m}T}{\rho_0 T_0}$$

其中

V 為每秒產生煙的體積

ρ_0 為外氣溫度 T_0 時之密度

假設外氣溫度為 27°C ，其 ρ_0 為 1.22 kg/m^3 ，則上式即可寫成：

$$V = \frac{\dot{m}T}{354}$$

歸納以上各點可得，影響發煙量的估計，從下列算式中可知為火源周圍長度(P)，及地板至煙層底部的距離(y)。這與發煙量的兩大因素：燃燒物的化學性質與火場環境，相吻合。

$$\dot{m} = 0.18Py^{\frac{3}{2}}$$

地板至煙層底部的距離式隨著建築物的不同而有所差異。但式子中的 P 值為火源周圍長度，通常可用 P 值的大小決定火場的發熱量。若假設其火源形狀為四方形時，可用表2來說明 P 值與發煙量與火場規模的關係。

表2：發煙量及火場規模關係

(資料來源：建築物防火之煙控設計分析 P53)

P 值	發熱量	火場規模
$4 \times 3.0 = 12\text{ m}$	5.0 MW	大火(large)
$4 \times 1.5 = 6\text{ m}$	1.25 MW	小火(small)
$4 \times 1.0 = 4\text{ m}$	0.5 MW	微小火(Very small)

總結以上描述，可將煙霧發煙量物理模型提煉如下：

$$\dot{m} = 0.096P\rho_0 y^{\frac{3}{2}} g^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{2}}$$

※物理量定義補充

T_0 為外氣的絕對溫度

T 為煙柱中浮起氣體的絕對溫度

y 為地板至煙層底部的距離

ρ_0 為外氣的密度

g 為重力加速度

P 為火源周圍長度

\dot{m} 為發煙量

三、實驗設計

一、實驗變因整理

實驗變因主要分為以下三類：

1. 燃燒物
2. 周圍結構
3. 環境

詳細請見圖表3：

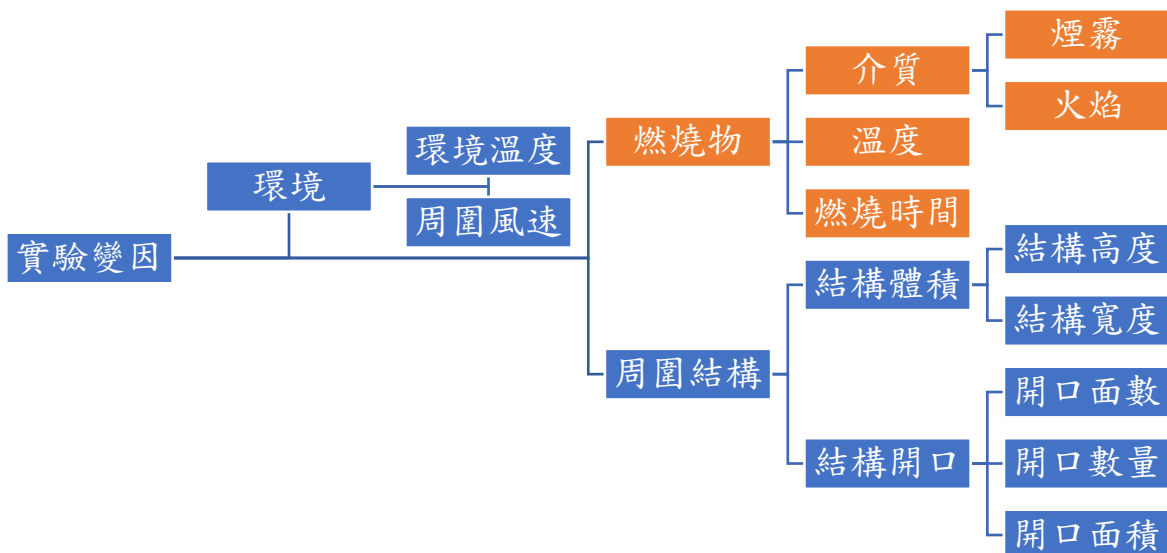


圖 12 實驗變因整理 (來源研究者)

二、實驗規劃

根據實驗目的，提取出實驗變因進行實驗：

1. 研究方形結構四周開口數量對火焰燃燒狀況影響

2. 研究方形結構四周開口大小對火焰燃燒狀況影響
3. 研究方形結構四周開口數量對煙霧發煙量影響
4. 研究方形結構四周開口大小對煙霧發煙量影響
5. 研究方形結構四周開口數量對煙霧擴散程度影響
6. 研究方形結構四周開口大小對煙霧擴散程度影響

將實驗分類如下，請見下圖：

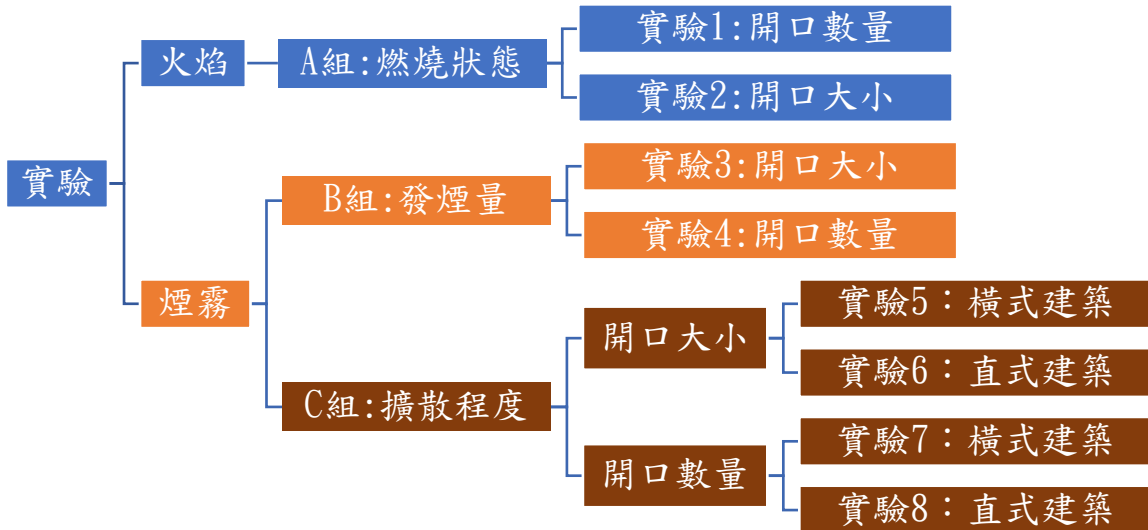


圖 13 實驗規劃(來源研究者)

三、實驗假設

1. A 組火焰燃燒狀態

根據本節(三)物理模型-1火焰之描述理論，實驗假設流程如下：

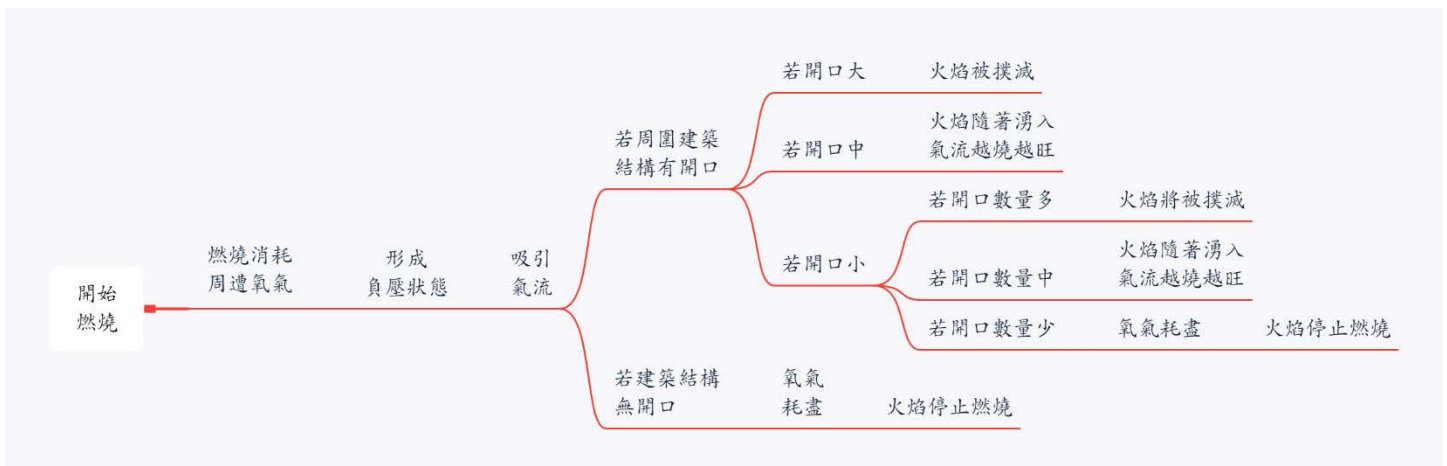


圖 14 火焰燃燒流程假設圖 (來源研究者)

實驗預測重點整理

- (1) 因火焰燃燒程度由燃燒四面體中-氧氣即湧入氣流量所影響，火焰在密閉結構下，應無法正常燃燒。
- (2) 因火焰燃燒程度由燃燒四面體中-氧氣即湧入氣流量所影響，則開口總面積低於

一定程度時，也就是開口過小或數量過少時，火焰將無法燃燒。

- (3) 因火焰燃燒程度由燃燒四面體中-熱力所影響，所以當氣流量大於一定程度，即開口總面積高於一定程度，也就是開口過大或數量過多時，氣流湧入建築內，則建築內部將不會形成負壓狀態，則火焰將不會形成煙囪效應向上攀升。
- (4) 因火焰燃燒程度由燃燒四面體中-氧氣即湧入氣流量所影響，則開口總面積高於一定程度，但低於一定程度時，也就是開口大小中等或數量也中等時，火焰將燃燒最為猛烈。
- (5) 根據2、3、4點假設，理想情況下，火焰高度之趨勢圖應近似二次函數曲線。

2. B組煙霧發煙量

根據(三)物理模型-2煙霧之描述理論，實驗假設流程如下：

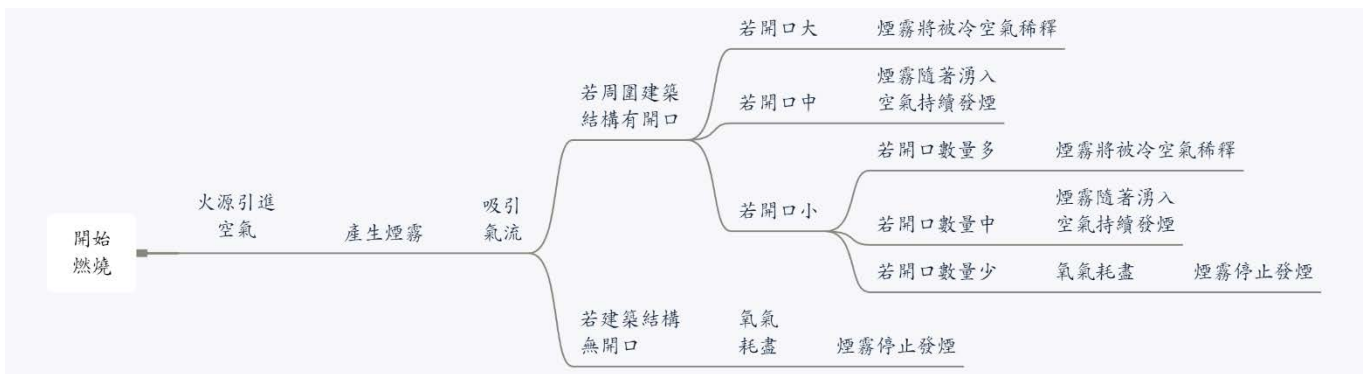


圖 15 煙霧發煙假設流程圖

實驗預測重點整理

- (1) 煙霧來自火源，而火源所需氧氣得以燃燒，可預測當建築密閉時，煙霧將停止發煙。
- (2) 燃燒時所產生的煙量，絕大部分為火焰所引進的空氣量，而由燃燒物本身所產生的量可說是微乎其微，故在計算發煙量時，若估計火源所引進的空氣量，大約就是此火源的發煙量，根據該理論敘述，可得知當開口總面積高於一定程度，但低於一定程度，也就是開口大小中等或數量也中等時，湧入的氣流將成為煙霧，該情況下，煙霧與氣流量呈正相關。
- (3) 當氣流量大於一定程度，即開口總面積高於一定程度，也就是開口過大或數量過多時，氣流湧入建築內，空氣流通過後，煙霧將會稀釋於空氣內，該情況下煙霧與氣流呈負相關。
- (4) 根據2、3點假設，理想情況下，**煙霧發煙量之趨勢圖應近似二次函數曲線。**

3. C 組煙霧擴散程度

根據(三)物理模型-2煙霧之描述理論，實驗假設流程如下：

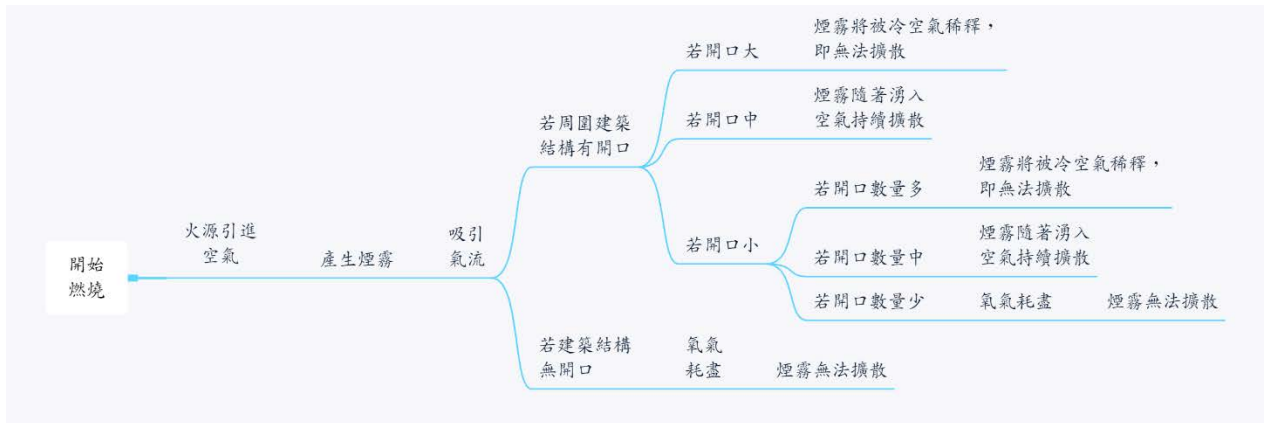


圖 16 煙霧擴散假設流程圖

實驗預測重點整理

- (1) 煙霧來自火源，而火源所需氧氣得以燃燒，可預測當建築密閉時，煙霧將停止發煙，即停止擴散。
- (2) 估計火源所引進的空氣量，大約就是此火源的發煙量，根據該理論敘述，可得知當開口總面積高於一定程度，但低於一定程度，也就是開口大小中等或數量也中等時，湧入的氣流將成為煙霧，該情況下，煙霧擴散程度與氣流量呈正相關。
- (3) 當氣流量大於一定程度，即開口總面積高於一定程度，也就是開口過大或數量過多時，氣流湧入建築內，空氣流通過後，煙霧將會稀釋於空氣內，該情況下煙霧擴散程度與氣流呈負相關。
- (4) 根據2、3點假設，理想情況下，煙霧擴散程度之趨勢圖應近似二次函數曲線。

4. A、B、C 組綜合實驗預測重點整理

- (1) 火焰燃燒程度（溫度及火焰高度）、煙霧發煙量、煙霧擴散程度在火場中皆取決於湧入的氣流，而氣流的多寡則取決於火源周遭的建築結構，所以產生由周圍結構影響火焰燃燒程度、煙霧發煙量、擴散程度的結果。
- (2) 在本研究中，除了考慮氣流與結構關係外，同時須考慮到燃燒的性質，故產生以上描述之結果。
- (3) 根據(1)、(2)、(3)假設，A、B、C 組理想情況下趨勢圖應近似二次函數曲線。

四、實驗器材

(一) 實體實驗模擬建築結構

1. 器材介紹

本實驗器材使用雷射切割機及壓克力板進行實驗。

使用六塊 $28\text{ cm} \times 28\text{ cm}$ 之四方形壓克力，拼接為各邊為 28 cm 的立方體，示意如下圖：

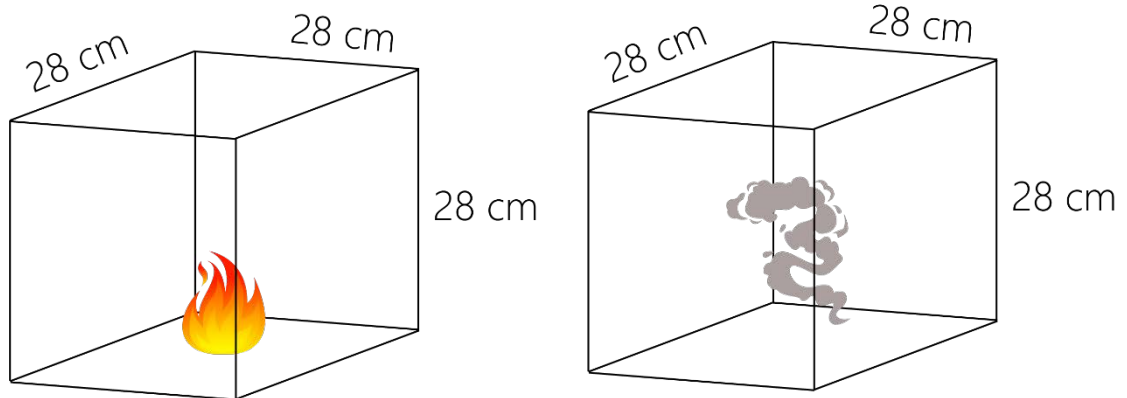


圖 17 實驗結構示意圖

實驗器材實際呈現如下圖：

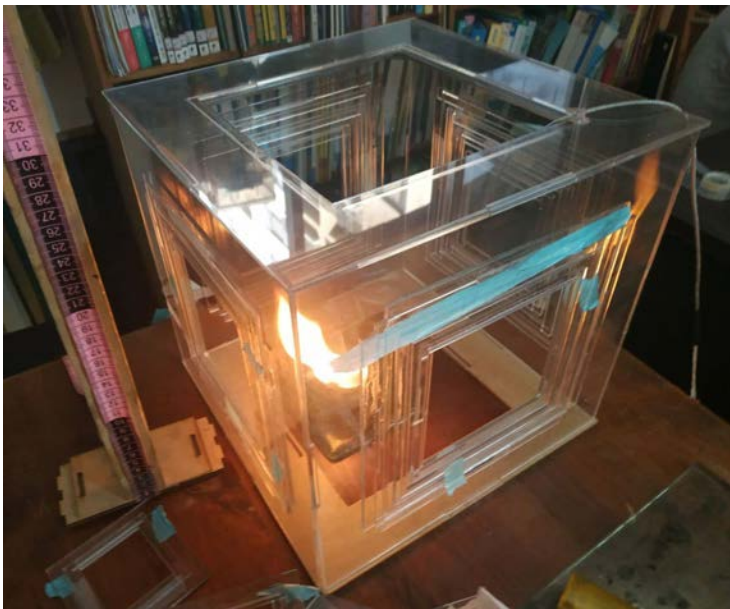


圖 19 火焰實驗實際呈現

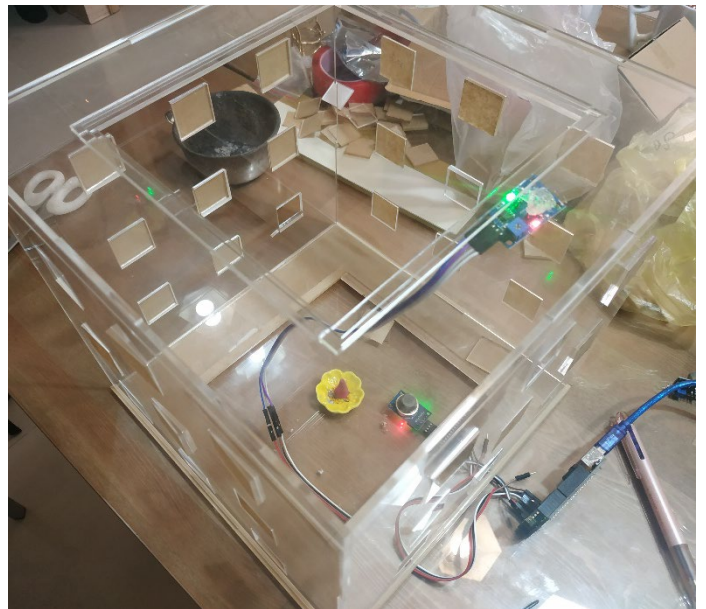


圖 18 煙霧實驗組實際呈現模樣

該實驗器材根據實驗目的，分為兩類

- 改變開口大小之壓克力板
- 改變開口數量之壓克力板

詳細設計如下節。

2. 器材製作方式

製作流程圖如下：



圖 21 實驗器材製作流程圖（研究者繪製）



圖 20 雷射切割機使用，攝於研究者操作時

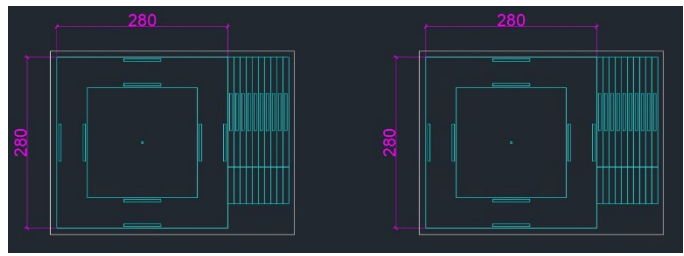


圖 22 Auto CAD 繪製上下蓋草圖

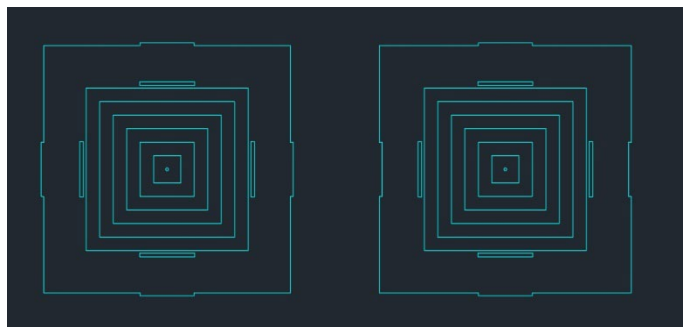


圖 23 Auto CAD 繪製改變開口大小草圖

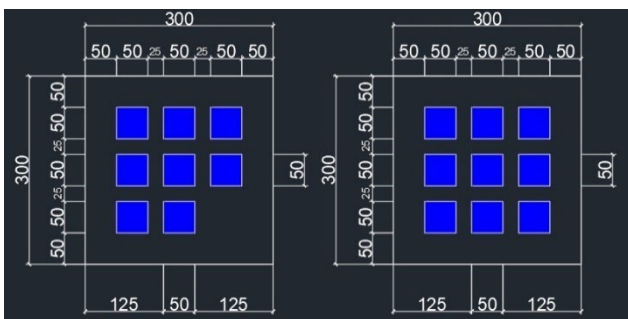


圖 24 Auto CAD 繪製改變開口數量草圖

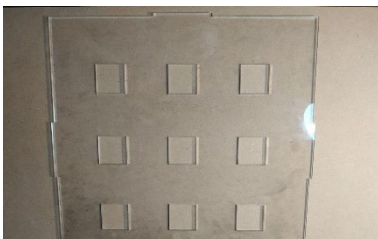


圖 25 改變開口數量實驗器材實際模樣

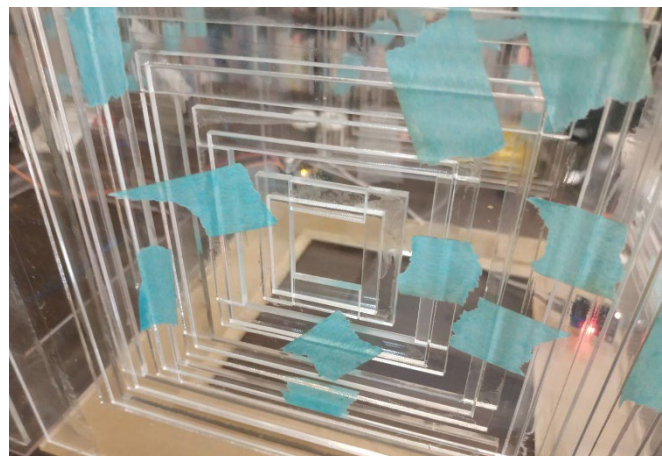


圖 26 改變開口大小實驗器材實際模樣

(二) 實驗介質

表3：實驗介質整理



圖 27 圖片來源中油



圖 28 香塔 (研究者攝)

A 組火焰實驗使用煤油進行實驗

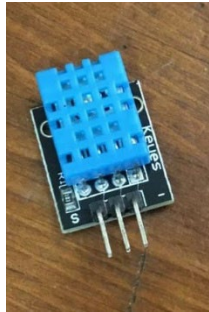
B、C 組煙霧使用香塔進行實驗

(三) 實驗測量儀器

表4：實驗器材整理



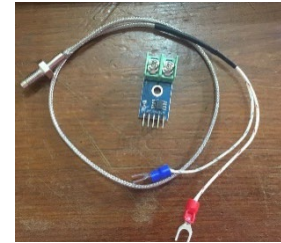
1. MQ-2煙霧氣體感測器



2. DHT11 溫濕度模組



3. 時鐘模組



4. MAX6675 K 型熱電偶模組

五、實驗流程

(一) 實體實驗方式



圖 29 實驗設計流程圖

(二) 模擬實驗方式

使用 CFD-MODEL 電腦模擬軟體-FDS(Fire Dynamics Simulator)試圖模擬本研究中幾項重要部分，該模擬軟體原理是將建築物空間劃分為若干個細小格點。

1. 火焰

火源附近最小長度尺度(Length Scale)利用火源特徵直徑(Characteristic Fire Diameter) D^* 公式如下：

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

其中

D^* 為火源特徵直徑(m)

\dot{Q} 為火源熱釋放率(kW)

ρ_{∞} 為空氣密度(kg/m³)

C_p 為空氣比熱(J/kg-K)

T_{∞} 為空氣溫度(K)

g 為重力加速度(m/s²)

使用 FDS 演算之隨時間變化的熱釋放率如圖30

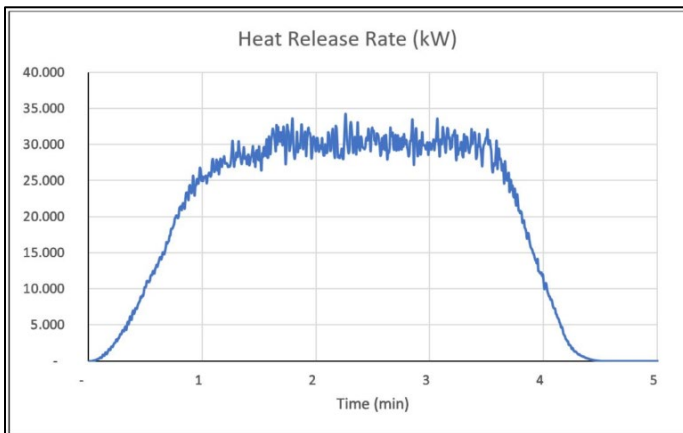


圖 31 隨時間變化之熱釋放率

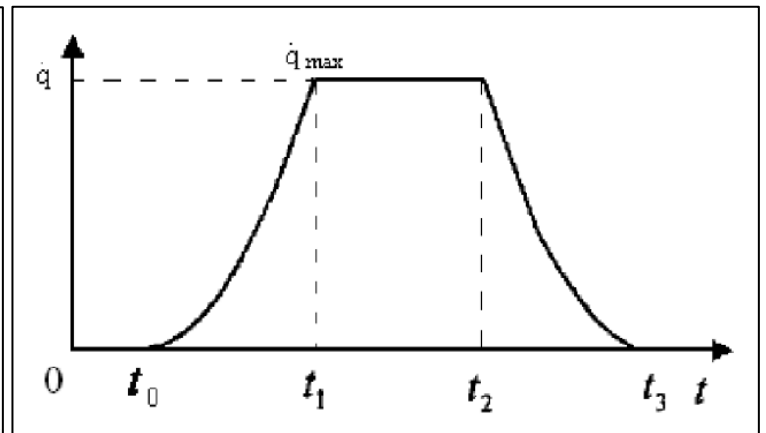


圖 30 t-squared fire growth rate

2. 煙霧

FD 附屬的 Smokeview 利用數值分析方法將火災現場之質量平衡(Mass Conservation)、動量平衡(Momentum Conservation)以及能量平衡(Energy Conservation)之方程式，以視窗方式帶入輸入條件，重複迭代計算模擬空間細小格點之物理特性，將火災中每一格點之溫度、壓力及濃度值呈現正確之描述。

(1) Conservation of Mass:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0$$

(2) Conservation of Species:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_1) + \nabla \cdot \rho Y_1 u = \nabla \cdot \rho D_1 \nabla Y_1 + \dot{m}_1'''$$

(3) Conservation of Momentum:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right] + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot t$$

(4) Conservation of Energy:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_l \nabla \cdot h_l \rho D_l \nabla Y_l$$

(三) 實驗變因定義說明及數據擷取

1. 面數

本實驗中所提面數示意如圖

19、20、21所示。

以下由顏色敘述

- 藍色為第一面
- 黃色為第二面
- 紅色為第三面
- 綠色為第四面

※橫式連通管，因第四面連接

其他連通管，故實驗時僅取三面作為控制變因。

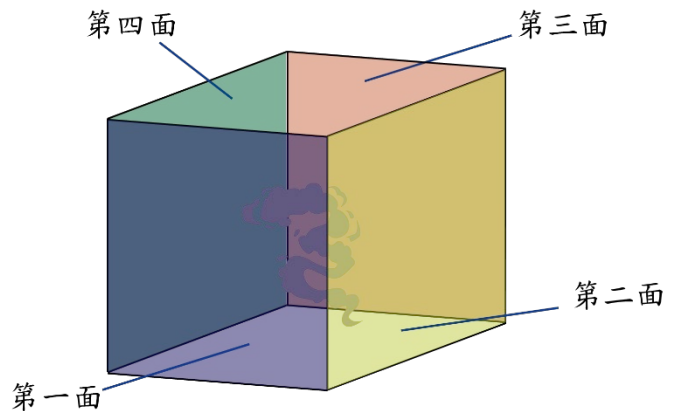


圖 32 面數標號示意

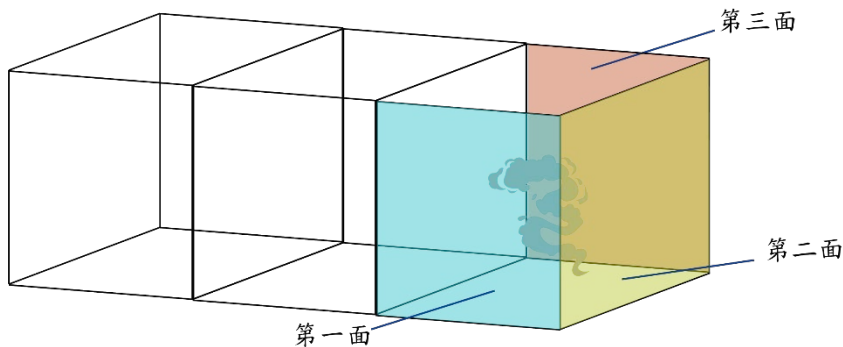


圖 34 橫式連通管面數標號示意

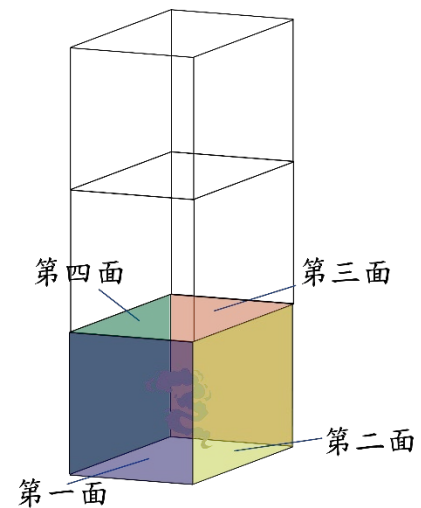


圖 33 直式連通管面數標號示意

2. 開口數量及開口大小

本研究中操作變因主要分為兩種，開口數量及開口大小，並由可調控開口數量或開口大小之自製器材進行實驗。

● 開口大小

如圖35，為保持開口形狀不變，故無論大小開口皆為長寬相同之正方形，若藍色區塊為開口，將標示其開口寬度為該開口之大小倍數。

器材詳細資料：

壓克力面大小為28 cm × 28 cm，開口大小倍數每次增加或減少3，故變化區間為3、6、9、12、15、18(cm)，若將開口大小面積乘出則為：9、36、81、114、225、324(cm²)。

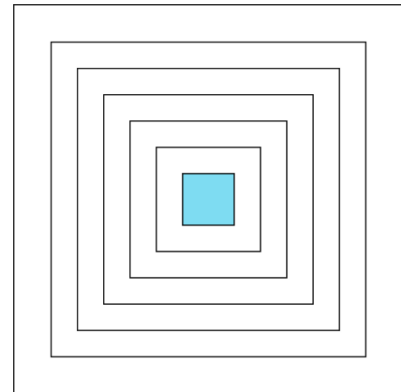


圖 35 開口大小示意圖

● 開口數量

如圖36。若藍色區塊為開口，則紀錄開口數量等於1。

器材詳細資料：

壓克力面大小為28 cm × 28 cm，該板塊上開口大小皆為3 cm × 3 cm，總數為9，故操作區間為1至9，若開口全開，單面淨開口面積則為 81 cm²。並由圖23箭頭標示順序進行開口。

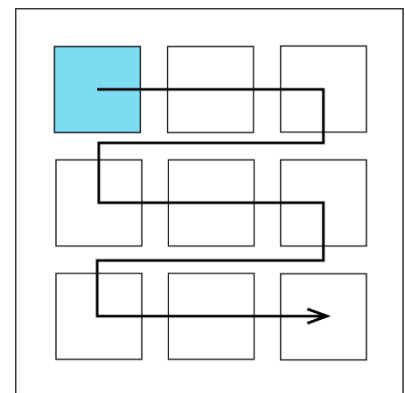


圖 36 開口順序示意圖

3. 實驗紀錄單位及擷取方式

(1) 火焰溫度

本研究之 A 組實驗採用 MAX6675 K 型熱電偶模組，區間為0°C ~ 1024°C的測溫範圍，轉換器溫度分辨率為0.25°C。

(2) 煙霧濃度

本實驗採用 MQ-2 氣體偵測感測器進行感測，並由電阻值據公式中常數 R_s 轉換為煙霧濃度 ppm(百萬分率)。

工作理論如下(來源 sandboxelectronics.com)

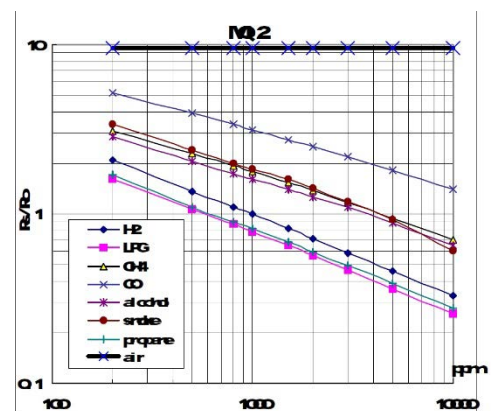


圖 37 MQ-2 對幾種氣體的典型靈敏度特性(來源:<https://www.hwsensor.com/>)

傳感器的電阻 R_S 和 R_L 形成一個分壓器。Arduino 或 MCU 可以通過 ADC 讀取信號引腳上的輸出電壓。給定 R_L 、電源電壓和輸出電壓的值，可以導出 R_S 。根據 MQ-2 數據表中提供的圖表(圖表 9)，在給定溫度和濕度下清潔空氣中的 R_S 是一個常數，即名為 R_0 的傳感器的“初始”電阻。電阻器的 R_0 可以從 R_S 導出。一旦得到 R_0 ，就可以使用 R_S 計算目標氣體的濃度。

4. 連通管數

連通管實驗器材由二至三個壓克力房子並聯，且將連接那一面的(第四面)隔板移除，讓結構進行連通，示意圖如圖 38。

5. 連通管實驗之煙霧感測器編號，如圖39及圖40。

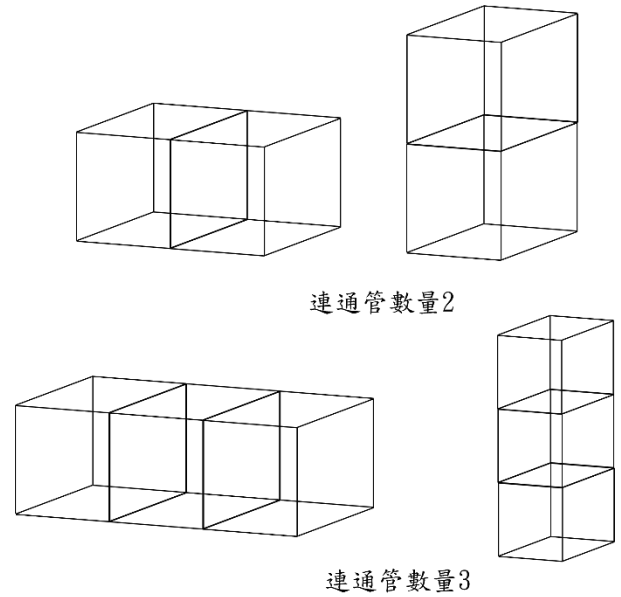


圖 38 連通管數量示意圖

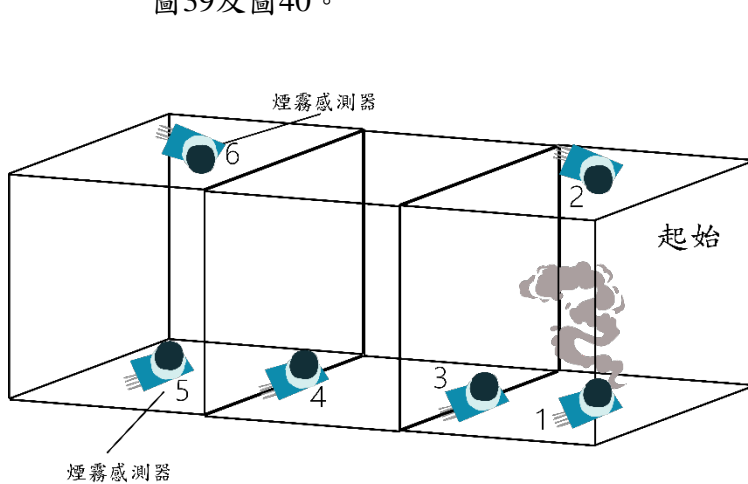


圖 39 橫式連通管實驗之煙霧感測器編號

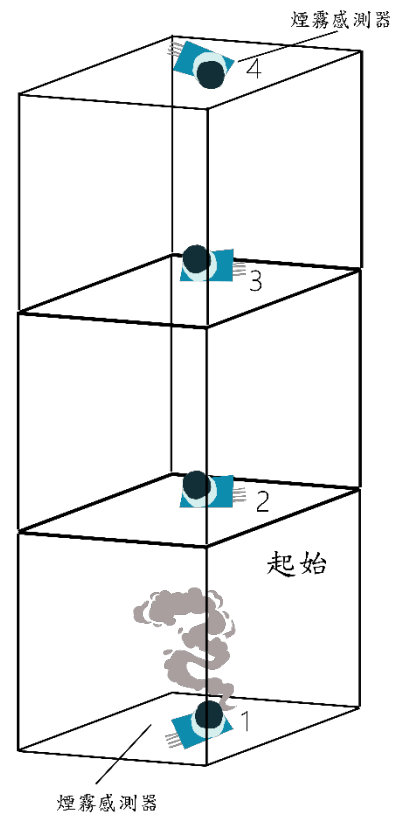


圖 40 直式連通管實驗之煙霧感測器編號

(四) 實驗進行

1. 火焰燃燒程度

實驗步驟：

- (1) 架設量尺與溫度感測器（如圖39）
- (2) 將燃料座安裝於壓克力結構中央。
- (3) 點燃火焰，開始計時。
- (4) 到達指定時間紀錄火焰高度及溫度。

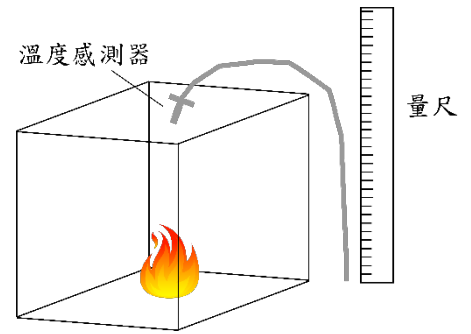


圖 41 火焰燃燒程度實驗環境示意圖

2. 煙霧發煙量

實驗步驟：

- (1) 安裝煙霧感測器（如圖40）
- (2) 將香塔安裝於壓克力結構中央。
- (3) 點燃香塔，開始計時。
- (4) 到達指定時間，紀錄頂端與底端煙霧濃度 (ppm)。

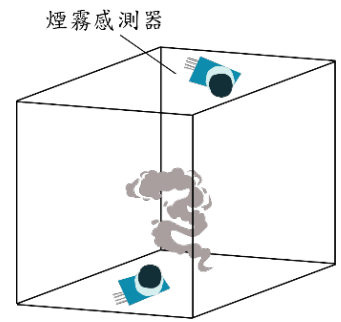


圖 42 煙霧發煙量實驗環境示意圖

3. 煙霧擴散程度

實驗步驟

- (1) 將煙霧感測器(MQ2)安裝於起始壓克力結構、壓克力結構連接處(示意圖如下)
- (2) 將香塔就定位於第一個壓克力結構中。

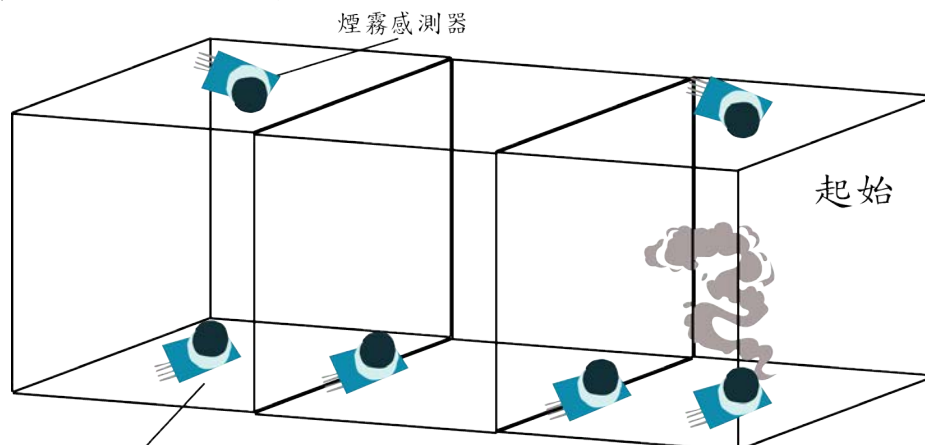


圖 43 連通管實驗前置安裝示意圖（來源研究者）

- (3) 確定該實驗組之開口大小或開口數量。
- (4) 點燃香塔，同時開始計時。
- (5) 到達指定時間，記錄下各 MQ2的煙霧濃度(ppm)。

參、研究結果與討論

本研究實驗列表如下

(1) A 組火焰燃燒狀況

實驗1：改變開口大小與火焰燃燒狀況之關係

實驗2：改變開口數量與火焰燃燒狀況之關係

(2) B 組煙霧發煙量

實驗3：改變開口大小與煙霧發煙量之關係

實驗4：改變開口數量與煙霧發煙量之關係

(3) C 組煙霧擴散程度

實驗5：橫式結構中改變開口大小與煙霧擴散程度之關係

實驗6：直式結構中改變開口大小與煙霧擴散程度之關係

實驗7：橫式結構中改變開口數量與煙霧擴散程度之關係

實驗8：直式結構中改變開口數量與煙霧擴散程度之關係

(4) 模擬實驗

※實驗說明中所表示之該面全開，於開口大小系列實驗中，意為該面開口面積為 $18\text{ cm} \times 18\text{ cm}$ ，即總面積為 324 cm^2 ；於開口數量系列實驗中，意為該面九個開口全開，淨面積即為 $[(3\text{ cm} \times 3\text{ cm}) \times 9] = 81\text{ cm}^2$ 。

一、 A 組火焰燃燒狀況實驗結果（實體實驗）

（一）實驗1:改變開口大小與火焰燃燒狀況之關係

本節實驗分為以下組數：

- ◆ 1-1僅改變一面開口大小
- ◆ 1-2開口兩面形成對流
- ◆ 1-3等比變化一面以上開口大小

1-1實驗條件(僅改變一面開口大小)：

- 室內溫度： $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為20秒。

實驗1-1-1說明：第二、三、四面皆為封閉，僅變化第一面。

實驗1-1-2說明：第一面全開，第三、四面封閉，變化第二面。

實驗1-1-3說明：第一、二面全開，第四面封閉，變化第三面。

實驗1-1-4說明：第一、二、三面全開，變化第四面。

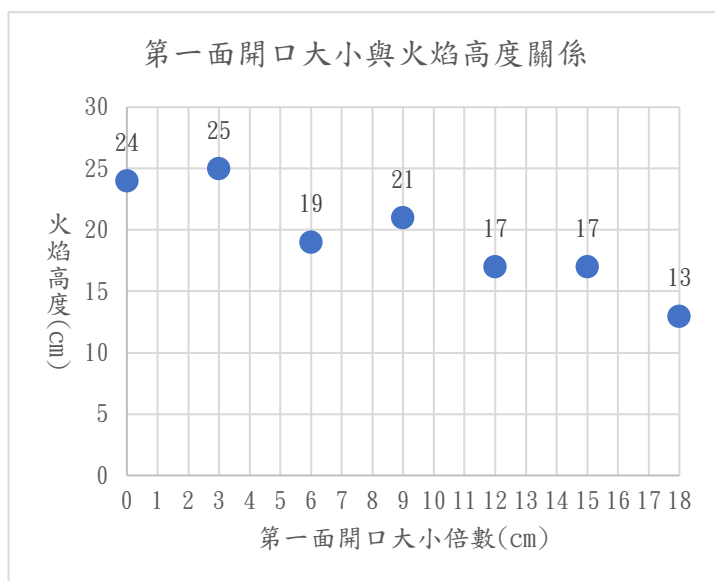


圖 44 實驗1-1-1實驗結果

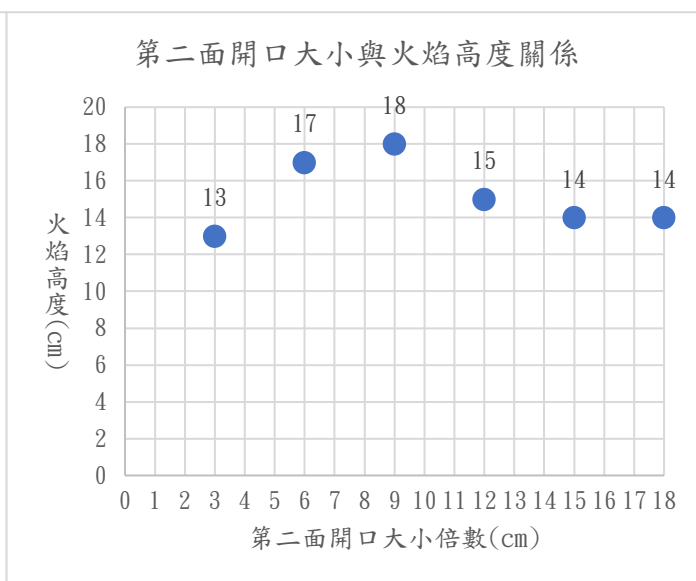


圖 45 實驗1-1-2實驗結果

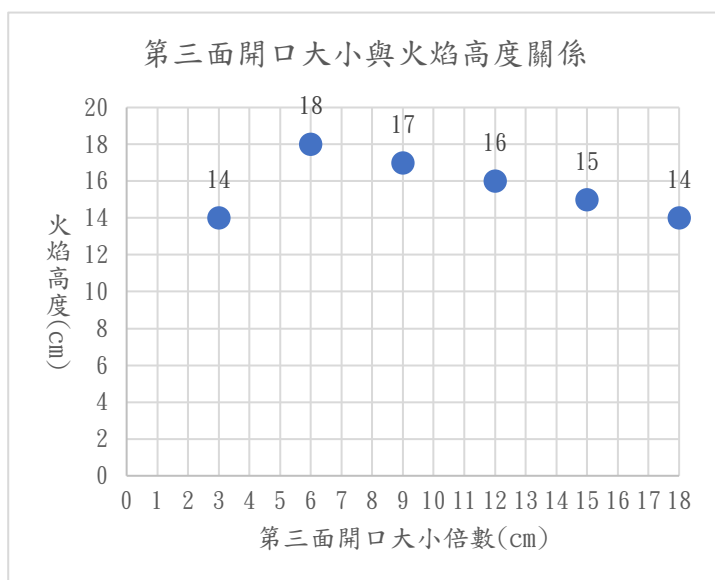


圖 46 實驗1-1-3實驗結果

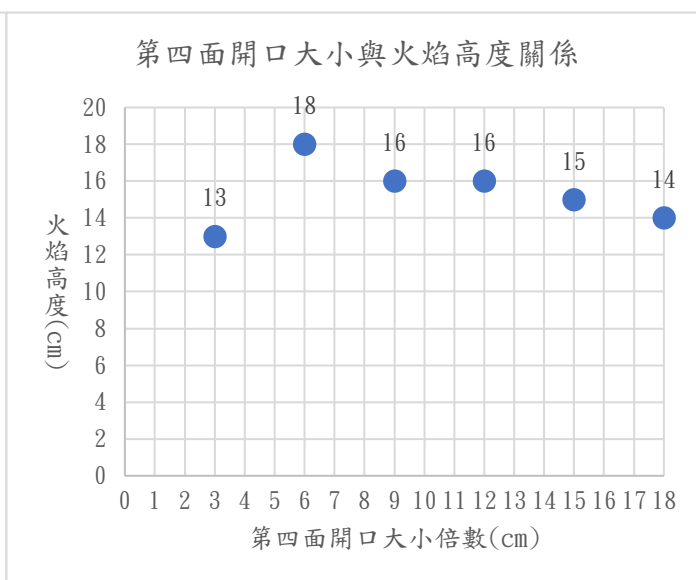


圖 47 實驗1-1-4實驗結果

實驗1-1結果討論

- 除實驗1-1-1，其他三組實驗數據皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。
- 實驗1-1-1狀態可能因開口倍數為6時的實驗誤差所導致，或有可能因無開口時為該實驗的煙霧濃度最高點。

實驗1-2條件(開口兩面形成對流)：

- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為20秒。

實驗1-2-1說明：第二、四面封閉，等比變化第一、三面。

實驗1-2-2說明：第二、四面全開，等比變化第一、三面。

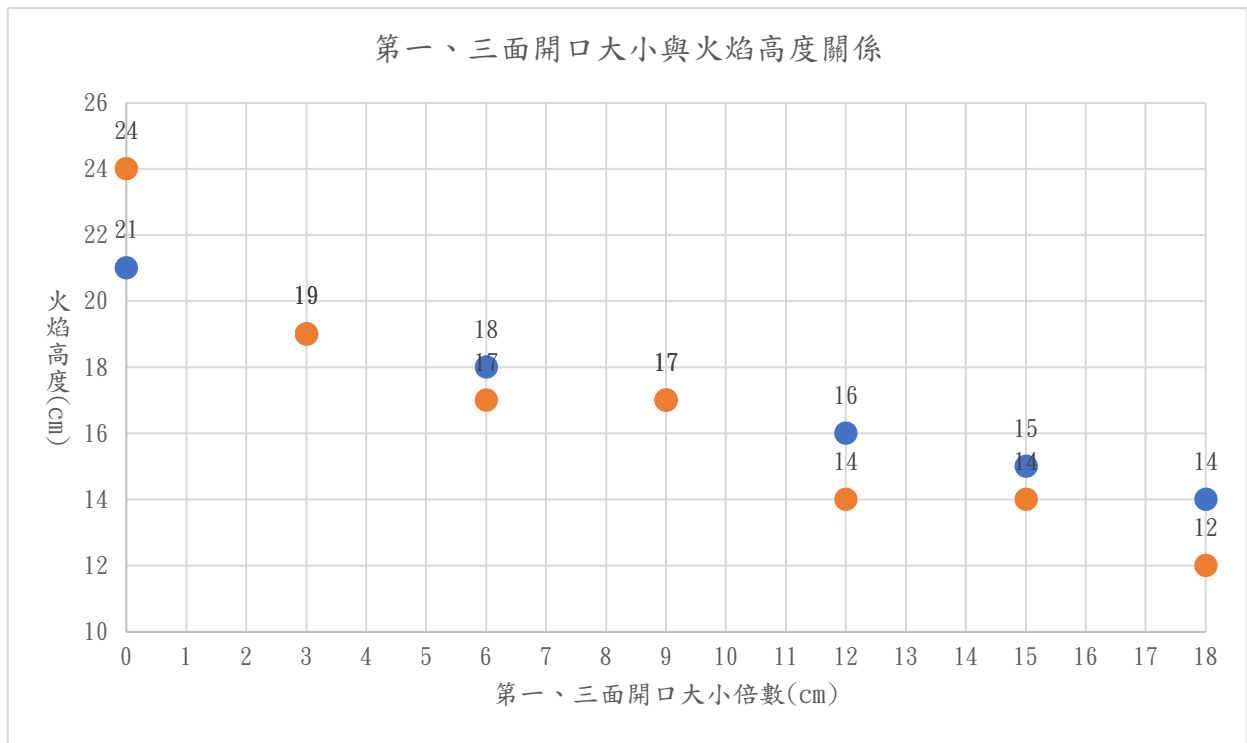


圖 48 實驗1-2-1及實驗1-2-2實驗結果

1-2結果討論

- 開口大小倍數與火焰高度呈現負相關。雖無近似二次函數曲線，但可能為實驗假設中所描述的後半段原因，因開口數變多，熱或空氣已無法集中，即引入氣流將直接稀釋煙霧。

實驗1-3條件(等比變化一面以上開口大小)：

- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為20秒。

實驗1-3-1說明：等比變化第一、二、三、四面。

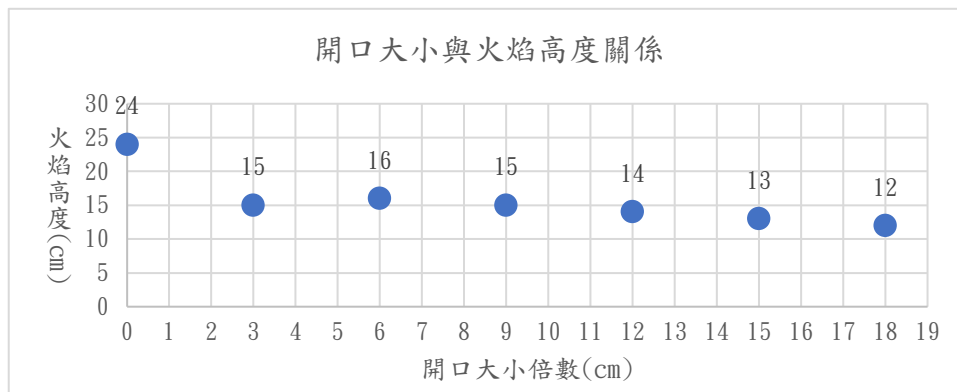


圖 49 實驗1-3-1實驗結果

實驗1-3結果討論

- 開口大小倍數與火焰高度呈現負相關。雖無近似二次函數曲線，但可能為實驗假設中所描述の後半段原因，因開口數變多，熱或空氣已無法集中，即引入氣流將直接稀釋煙霧。

實驗1綜合結果討論

- 當結構體開單面時，進氣量會造成火焰高度漸小。
- 當結構體一面全開，一面漸開時，火焰高度漸小。
- 當結構體二面全開，一面漸開時，火焰高度漸小。
- 當結構體三面全開，一面漸開時，火焰高度漸小。
- 當氣流穩定時，火焰亦維持高度，氣流增加時，火焰高度漸小。

(二) 實驗2: 改變開口數量與火焰燃燒狀況之關係

本節實驗分為以下組數：

- ◆ 2-1 僅改變一面開口大小
- ◆ 2-2 開口兩面形成對流
- ◆ 2-3 等比變化一面以上開口數量

2-1 實驗條件(僅改變一面開口大小)：

- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為20秒。

2-1-1 實驗說明：第二、三、四面皆為封閉，僅變化第一面。

2-1-2 實驗說明：第一面全開，第三、四面封閉，僅變化第二面。

2-1-3 實驗說明：第一、二面全開，第四面封閉，變化第三面。

2-1-4 實驗說明：第一、二、三面全開，僅變化第四面。

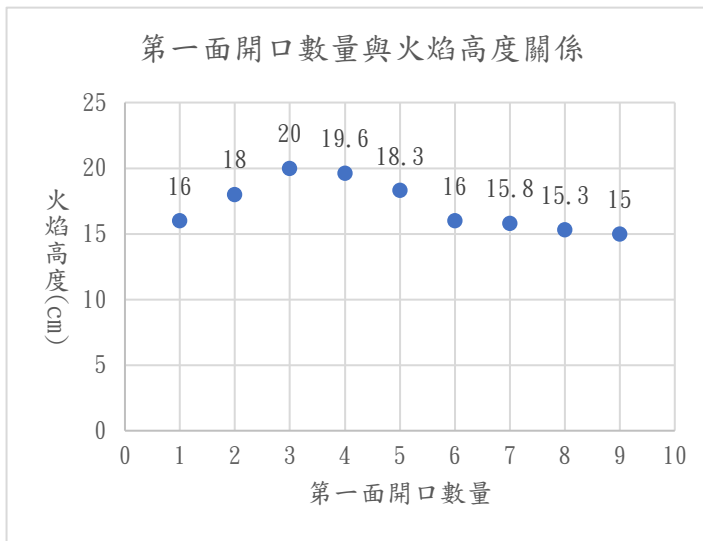


圖 50 實驗2-1-1實驗結果

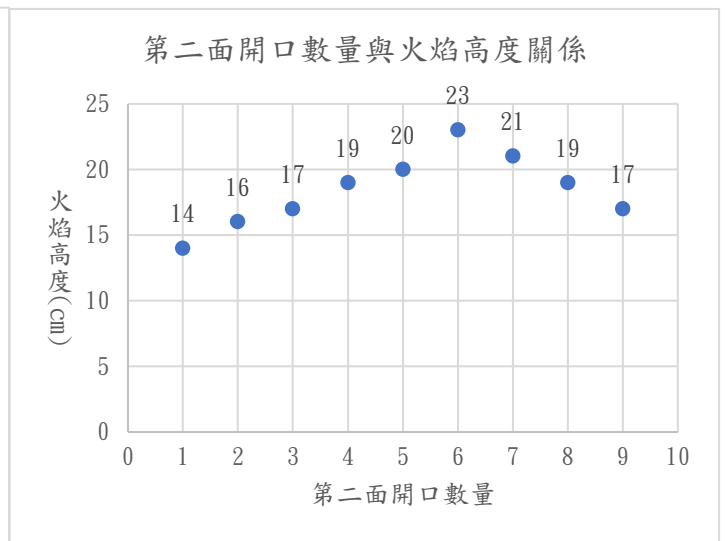


圖 51 實驗2-1-2實驗結果

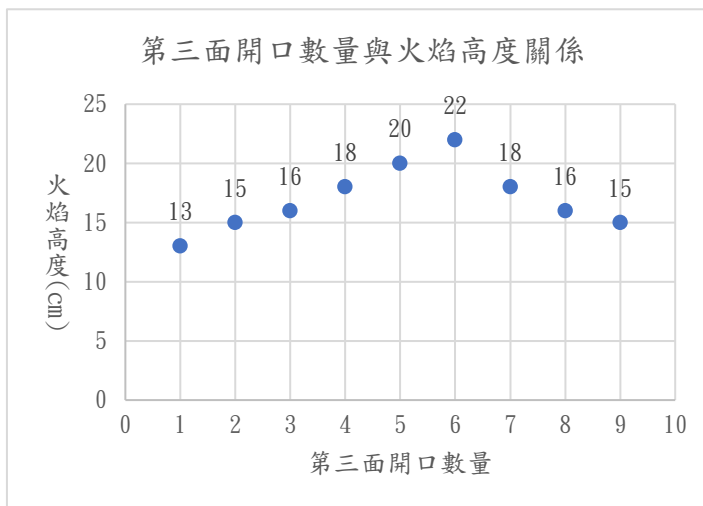


圖 53 實驗2-1-3實驗結果

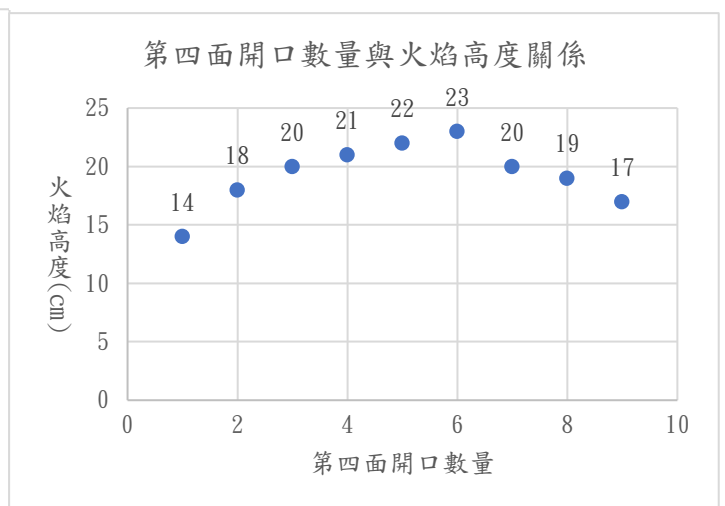


圖 52 實驗2-1-4實驗結果

2-1 結果討論

- 四組實驗數據皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。

2-2 實驗條件(開口兩面形成對流)：

- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為20秒。

2-2-1 實驗說明：第二、四面封閉，等比變化第一、三面。

2-2-2 實驗說明：第二、四面全開，等比變化第一、三面。

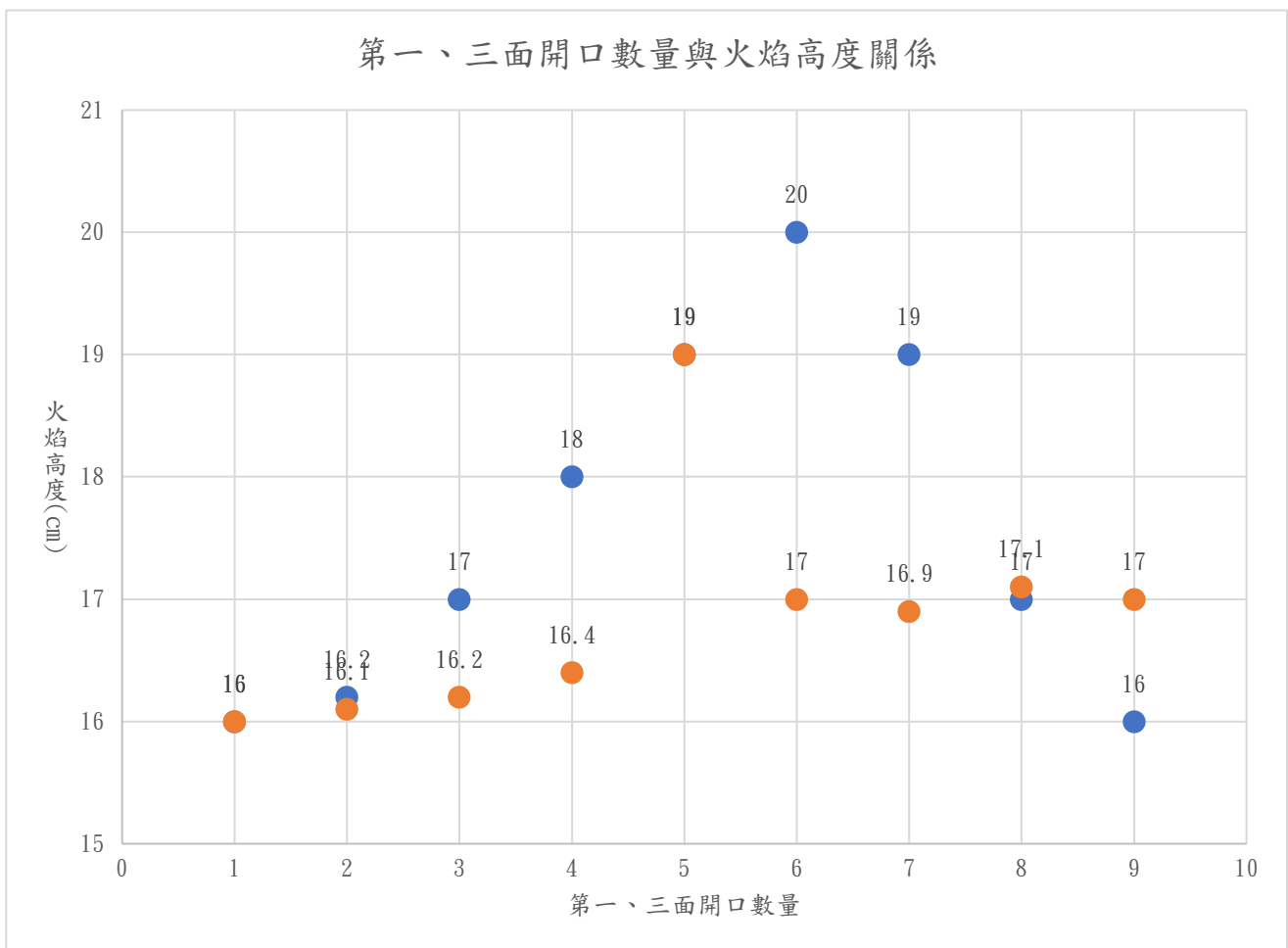


圖 54 實驗2-2-1及實驗2-2-2實驗結果

2-2 結果討論

- 實驗數據皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。

2-3 實驗條件(等比變化一面以上開口大小)：

- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。

- 測量時間固定為20秒。

2-3-1實驗說明：等比變化第一、二、三、四面。

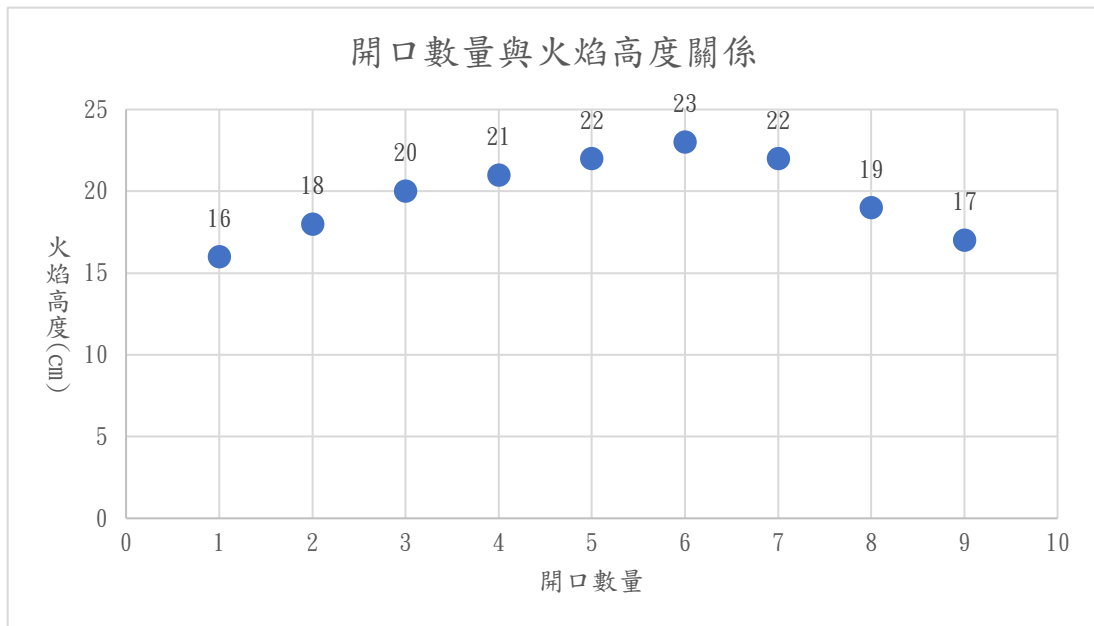


圖 55 實驗2-3-1實驗結果

2-3結果討論

- 實驗數據皆呈現趨緩山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。

實驗2綜合結果討論

- 本組實驗數據皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。
- 在山峰狀方面，大約分為陡峭的山峰狀以及趨緩山峰狀之差別。可發現趨緩山峰狀偏多，趨勢變化大的實驗只有實驗2-2-1與實驗2-2-2，其他實驗結果都較為緩和。
- 本組實驗結果相較實驗1更符合實驗假設。

二、 B 組煙霧發煙量實驗結果（實體實驗）

（一）實驗3:改變開口大小與煙霧濃度之關係

本節實驗分為以下組數：

- ◆ 3-1僅改變一面開口大小
- ◆ 3-2開口兩面形成對流
- ◆ 3-3等比變化一面以上開口大小

3-1實驗條件(僅改變一面開口大小)：

- 室內溫度：30 °C；室內溼度：61%。
- 測量時間固定為2分鐘。

3-1-1實驗說明：第二面、第三面、第四面為封閉，變化第一面。

3-1-2實驗說明：第一面全開，第三、四面封閉，變化第二面。

3-1-3實驗條件：第一、二面全開，第四面封閉，變化第三面。

3-1-4實驗條件：第一、二、三面全開，變化第四面。

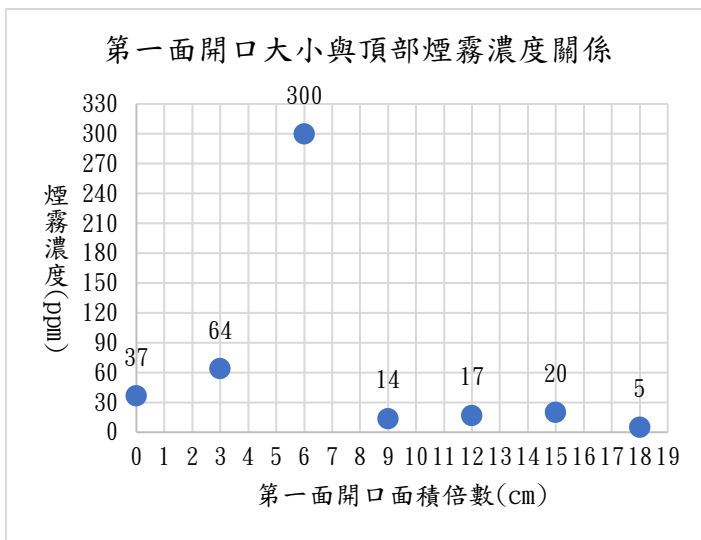


圖 59 實驗3-1-1實驗結果

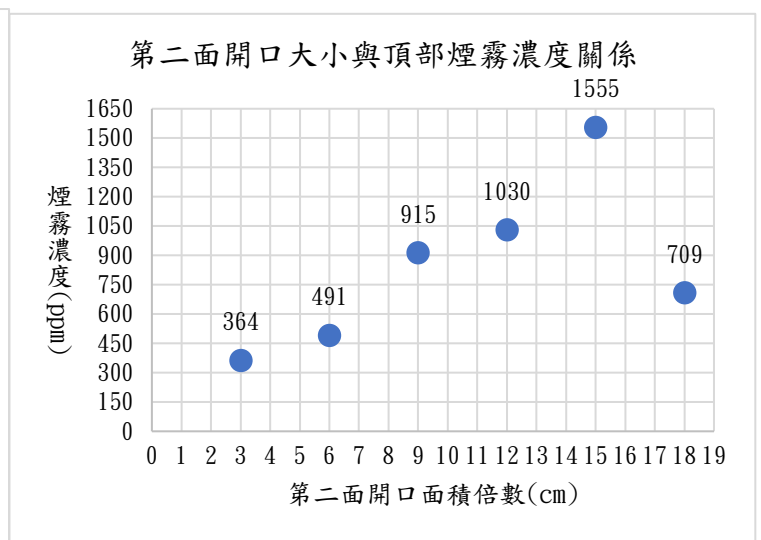


圖 58 實驗3-1-2實驗結果

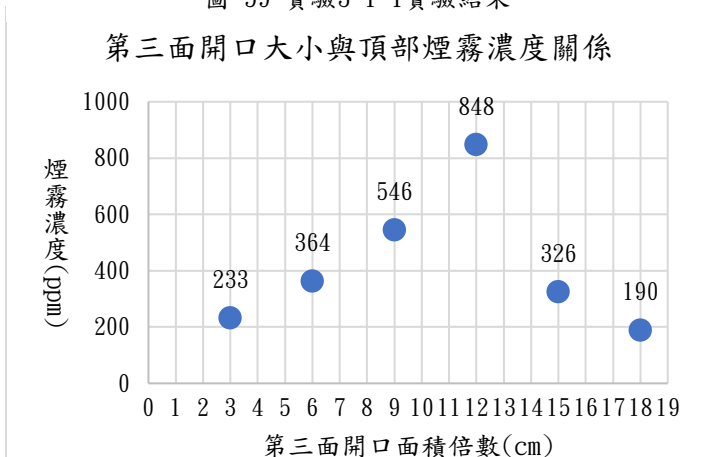


圖 56 實驗3-1-3實驗結果

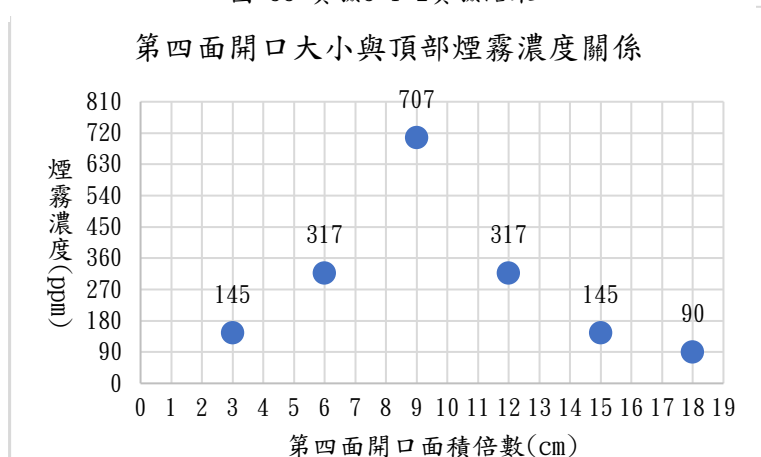


圖 57 實驗3-1-4實驗結果

實驗3-1結果討論

- 可從3-1實驗結果中發現：
 - 四組實驗數據皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。
 - 如排除3-1可發現，隨開口越多，煙霧濃度最高點出現越早。
- 綜合以上觀察及討論，實驗3-1結果如實驗假設所敘述，當開口達某程度時，氣流量將使得發煙量達到巔峰，隨開口漸漸增多，發煙量將下降，因氣流將煙霧稀釋。

3-2實驗條件(等比變化一面以上開口大小)

- 室內溫度：30 °C；室內溼度：61%。
- 測量時間固定為2分鐘。

3-2-1實驗說明：第二、四面開口全開，等比改變第一、三面

3-2-2實驗說明：第二、四面開口封閉，等比改變第一、三面。

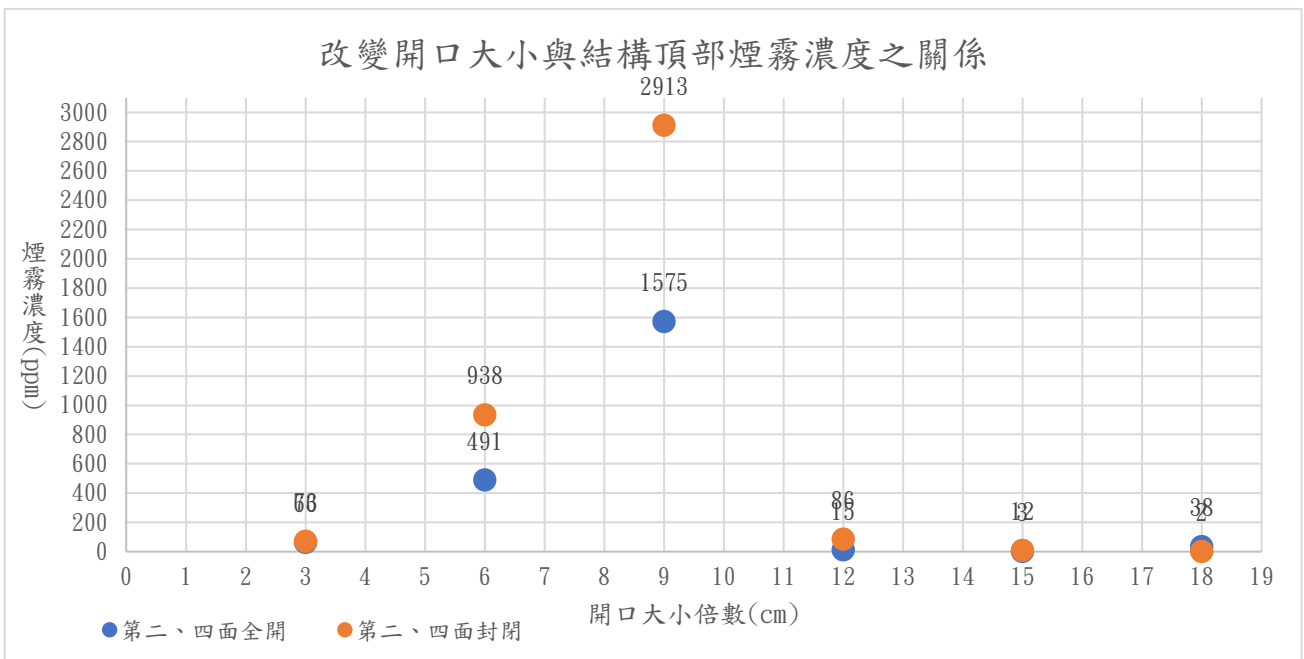


圖 60 實驗3-2-1及實驗3-2-2實驗結果

3-2實驗結果討論

- 可從該實驗結果中發現：
 - 兩實驗結果呈現十分類似之趨勢，當發煙量達最高點之後，隨開口再度變化，發煙量將急速下降。呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。
 - 3-2-2封閉時比3-2-1全開時的最高點更高。

3-3實驗條件(等比變化一面以上開口大小)

- 室內溫度：30 °C；室內溼度：61%。
- 測量時間固定為2分鐘。

3-3-1實驗說明：同時等比開啟第一、二、三、四面開口。

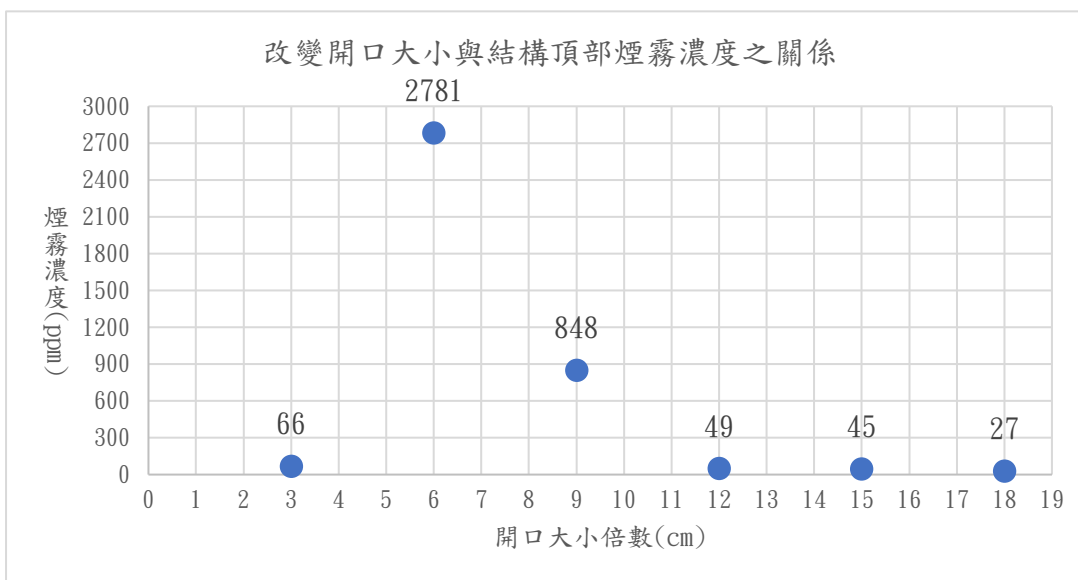


圖 61 實驗3-3-1實驗結果

3-3實驗結果討論

- 從本實驗結果中可發現，該實驗趨勢如其他實驗具有山峰狀之曲線。
- 在發煙量達到最高點後下降，但曲線不比上升時陡峭，下降時呈現趨緩狀態。

實驗3結果綜合討論

- 在本節實驗中在每一個實驗曲線圖中，都可以發現類似趨勢，當發煙量達最高點之後，隨開口再度變化，發煙量將下降。呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。
- 在特定實驗中，如實驗3-1-1及實驗3-2-2，發煙量將急速下降，但在其他實驗，如實驗3-3-1與實驗3-1-3中，曲線則顯得較為趨緩，可能因實驗3-3-1與實驗3-1-3中，結構上開口較多，雖再開口會引入氣流，但因本身環境較為和諧，故不會產生劇烈變化。

(二) 實驗4：改變開口數量與煙霧濃度之關係

本節實驗分為以下組數：

- ◆ 4-1僅改變一面開口大小
- ◆ 4-2開口兩面形成對流
- ◆ 4-3等比變化一面以上開口數量

實驗4-1條件(僅改變一面開口大小)

- 室內溫度：30℃；室內溼度：61%。
- 測量時間固定為2分鐘。

實驗4-1-1說明：第二、三、四面封閉，改變第一面開口。

實驗4-1-2說明：第一面全開，第三、四面封閉，改變第二面開口。

實驗4-1-3說明：第一、二面全開，第四面封閉，改變第三面開口。

實驗4-1-4說明：第一、二、三面全開，僅變化第四面開口。

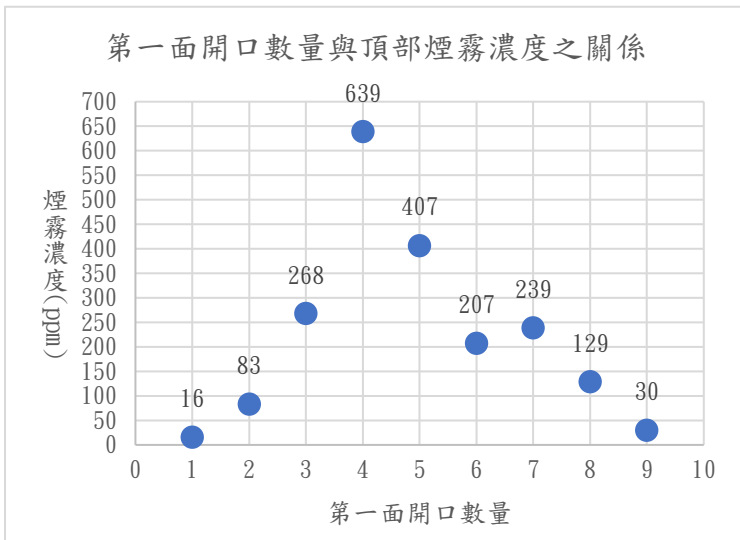


圖 65 實驗4-1-1實驗結果

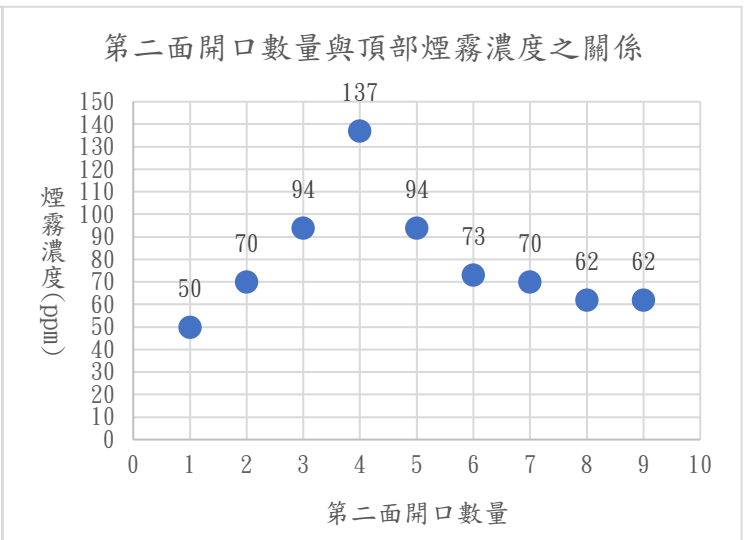


圖 62 實驗4-1-2實驗結果

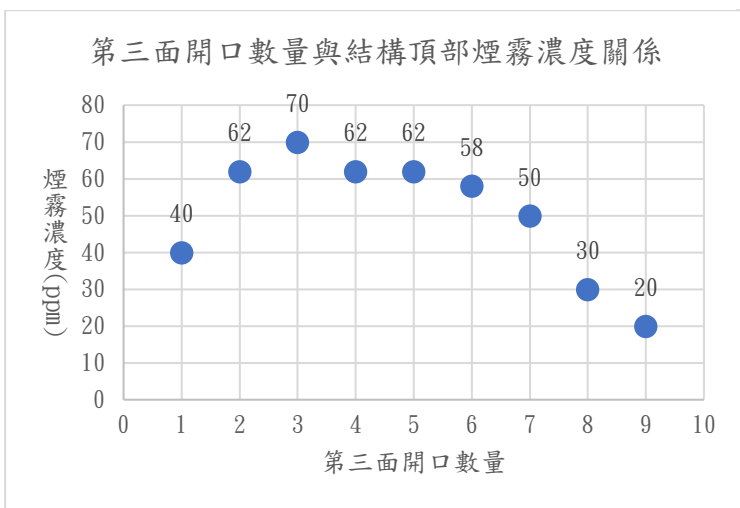


圖 64 實驗4-1-3實驗結果

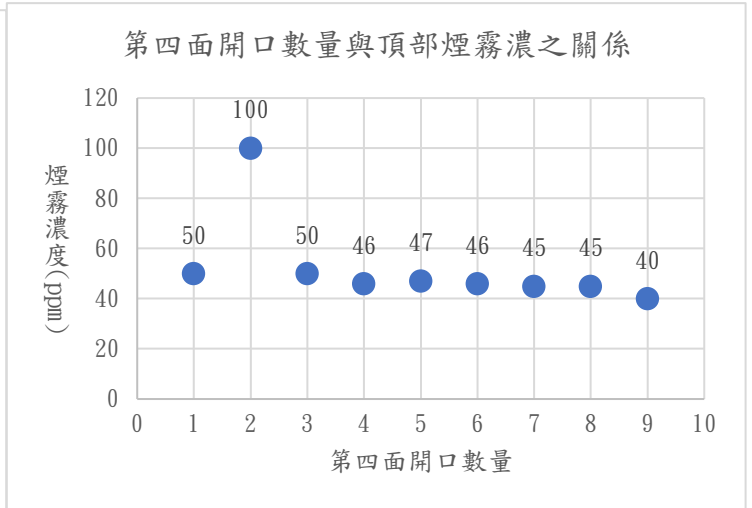


圖 63 實驗4-1-4實驗結果

實驗4-1結果討論

- 可從該實驗結果中發現：

- 四組實驗數據雖具有些許不同，但呈現類似曲線趨勢，經過煙霧濃度最高點後開始下降，但下降幅度不同。

4-2實驗條件(開口兩面形成對流)

- 室內溫度：30 °C；室內溼度：61%。
- 測量時間固定為2分鐘。

4-2-1實驗說明：第二、四面封閉，同時改變第一、三對面之開口。

4-2-2實驗說明：第二、四面全開，同時改變第一、三對面之開口。

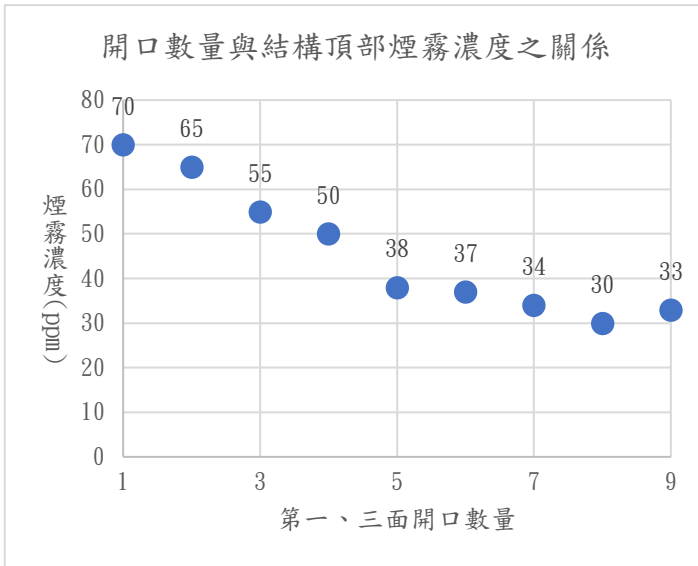


圖 66 實驗4-2-1實驗結果

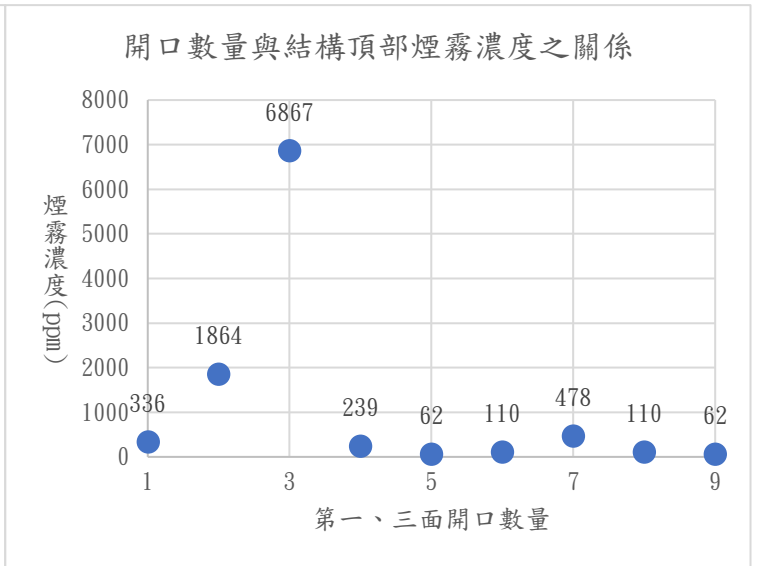


圖 67 實驗4-2-2實驗結果

4-2實驗結果討論

- 可從該實驗結果中發現：

- 在實驗4-2-1中開口數量與煙霧濃度呈現正相關趨勢，由此可見在該實驗情況下，可能因開口面積太多或過少之緣故使得最開始之實驗數據即為煙霧濃度最高點。
- 4-2-2符合實驗假設所描述之趨勢，在煙霧濃度達最高點後以極大幅度向下降。

4-3實驗條件(等比變化兩面以上開口數量)

- 室內溫度：30 °C；室內溼度：61%。
- 測量時間固定為2分鐘。

4-3-1 實驗說明：第一、二、三、四面等比變化。

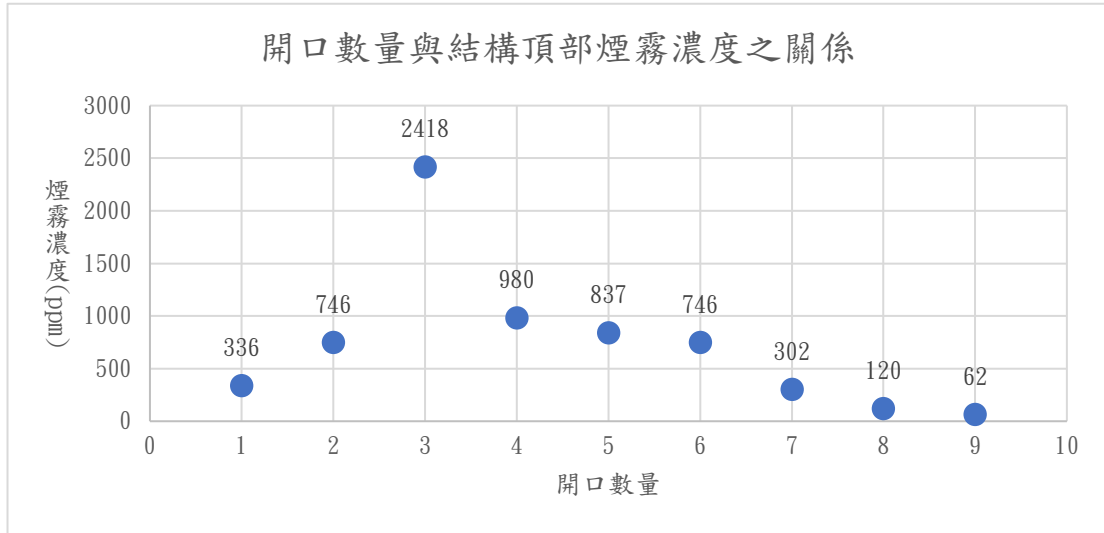


圖 68 實驗4-3-1實驗結果

實驗4-3結果討論

- 本實驗結果呈實驗假設所描述之趨勢。

實驗4結果綜合討論

- 將總開口數量作為操作變因歸納成以下圖表，可發現宏觀來看，結果如同微觀結果相同。

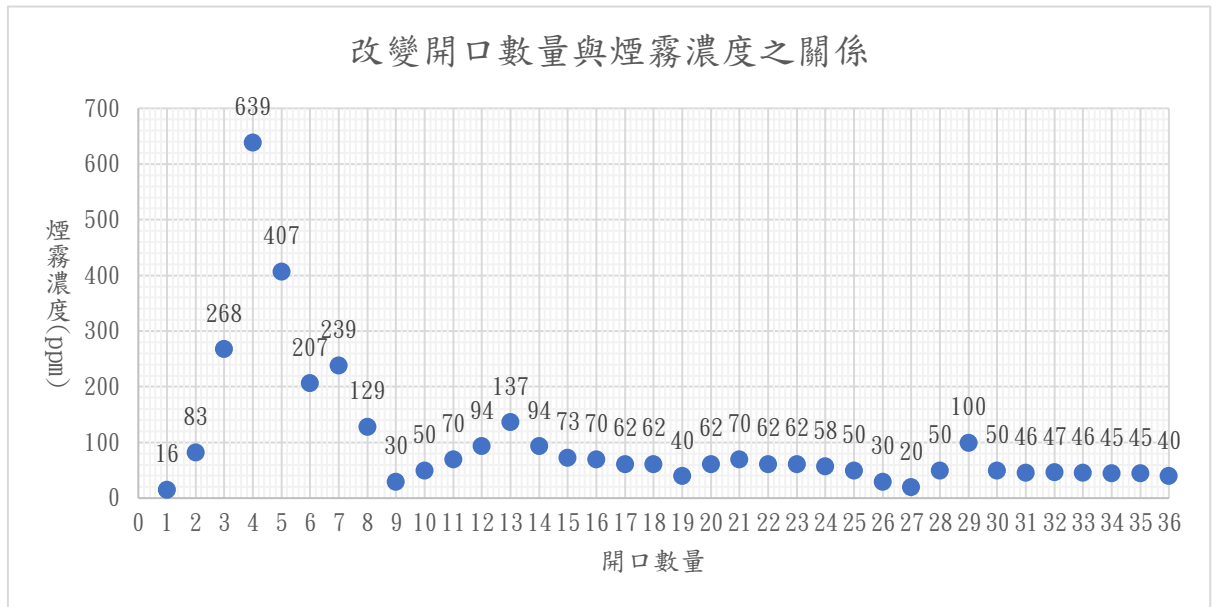


圖 69 實驗4-1-1、實驗4-1-2、實驗4-1-3、實驗4-1-4綜合結果

三、 C組兩個連通管煙霧擴散程度實驗結果（實體實驗）

（一）實驗5及6：改變開口大小與煙霧擴散程度之關係

1. 實驗5:橫式結構中改變開口大小與煙霧擴散程度之關係

本節實驗分為以下組數：

◆ 實驗5連通管數為2

- 實驗5-1僅改變一面開口大小
- 實驗5-2開口兩面形成對流
- 實驗5-3等比變化一面以上開口倍數

實驗5-1條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

實驗5-1-1說明：第二面、第三面皆為封閉，僅變化第一面。

實驗5-1-2說明：第一面全開，第三面封閉，僅變化第二面。

實驗5-1-3說明：第一、二面全開，僅變化第三面。

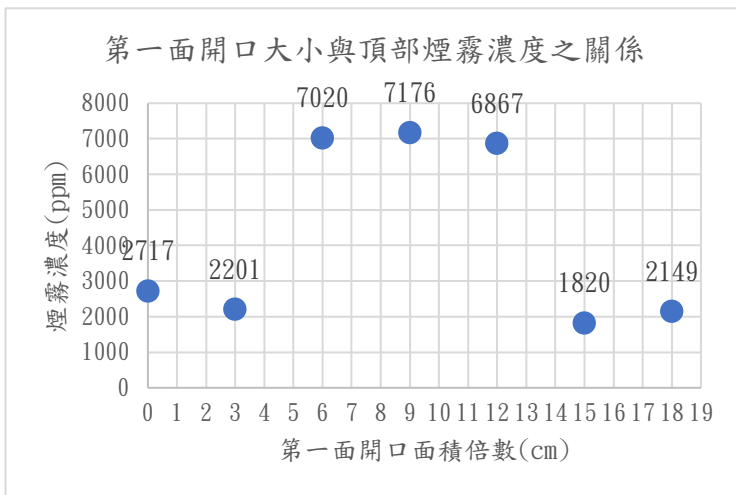


圖 71 實驗5-1-1實驗結果

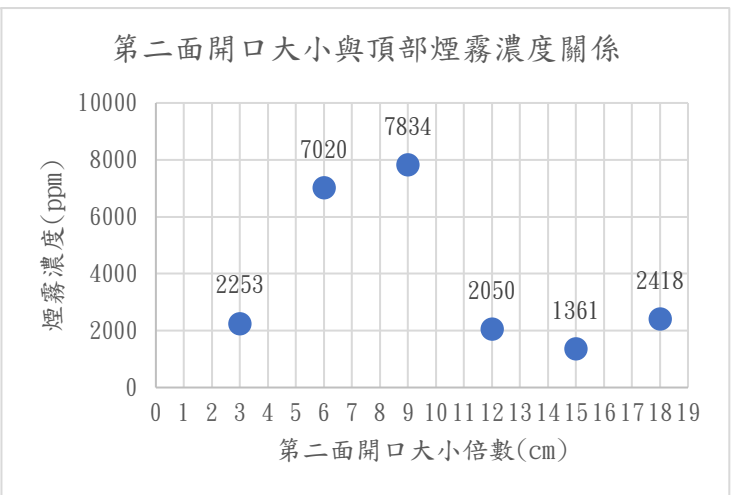


圖 72 實驗5-1-2實驗結果

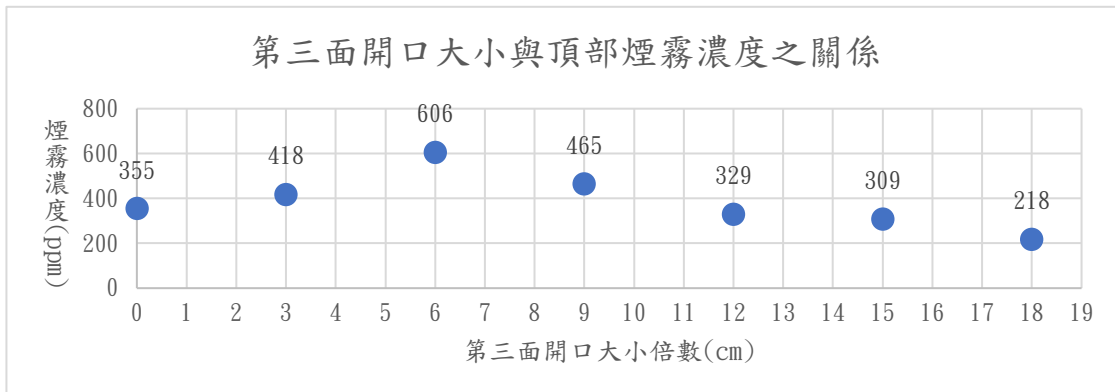


圖 70 實驗5-1-3實驗結果

實驗5-1結果討論

- 從實驗結果中可發現，該實驗趨勢具有山峰狀之曲線。

5-2實驗條件(開口兩面形成對流)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

5-2-1實驗說明：第二面封閉，等比變化第一、三面開口大小。

5-2-2實驗說明：第二面全開，等比變化第一、三面開口大小。

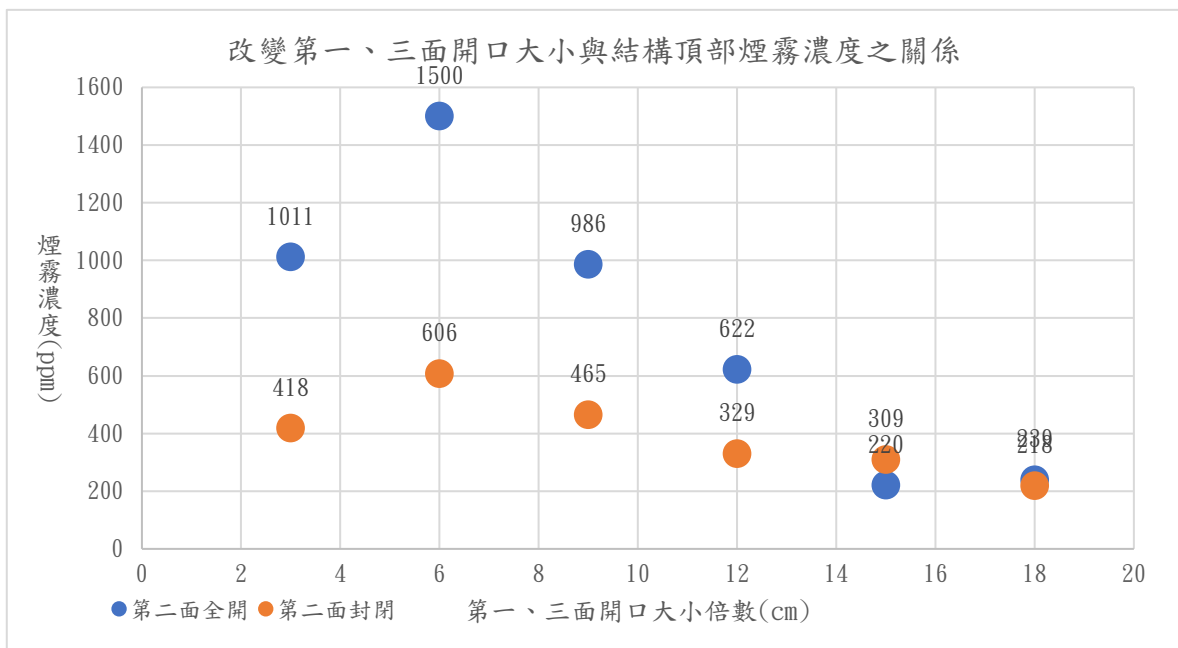


圖 73 實驗5-2-1及實驗5-2-2結果

實驗5-1-2結果討論

- 兩組實驗數據之趨勢十分類似，皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線。
- 兩實驗結果相比較之下可發現兩者皆在開口大小面積為36 cm²時達到該實驗發煙量最高點。

5-1-3實驗條件(等比變化一面以上開口倍數)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

實驗5-3-1說明：第三面為封閉，等比變化第一、二面。

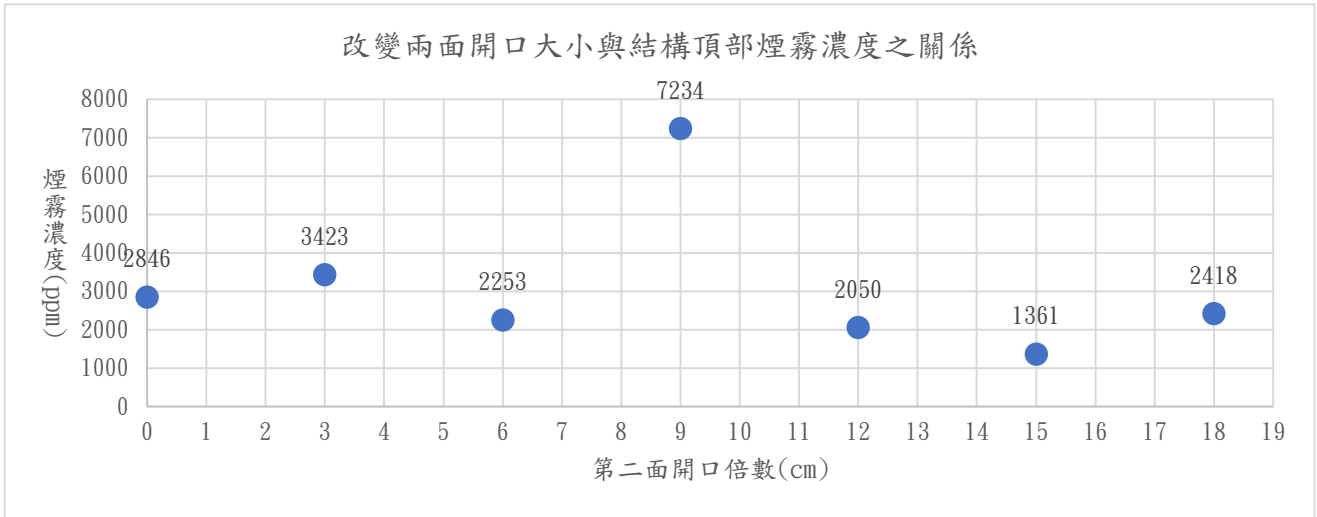


圖 74 實驗5-3-1實驗結果

實驗5-3-2說明：等比變化第一、二、三面開口大小。

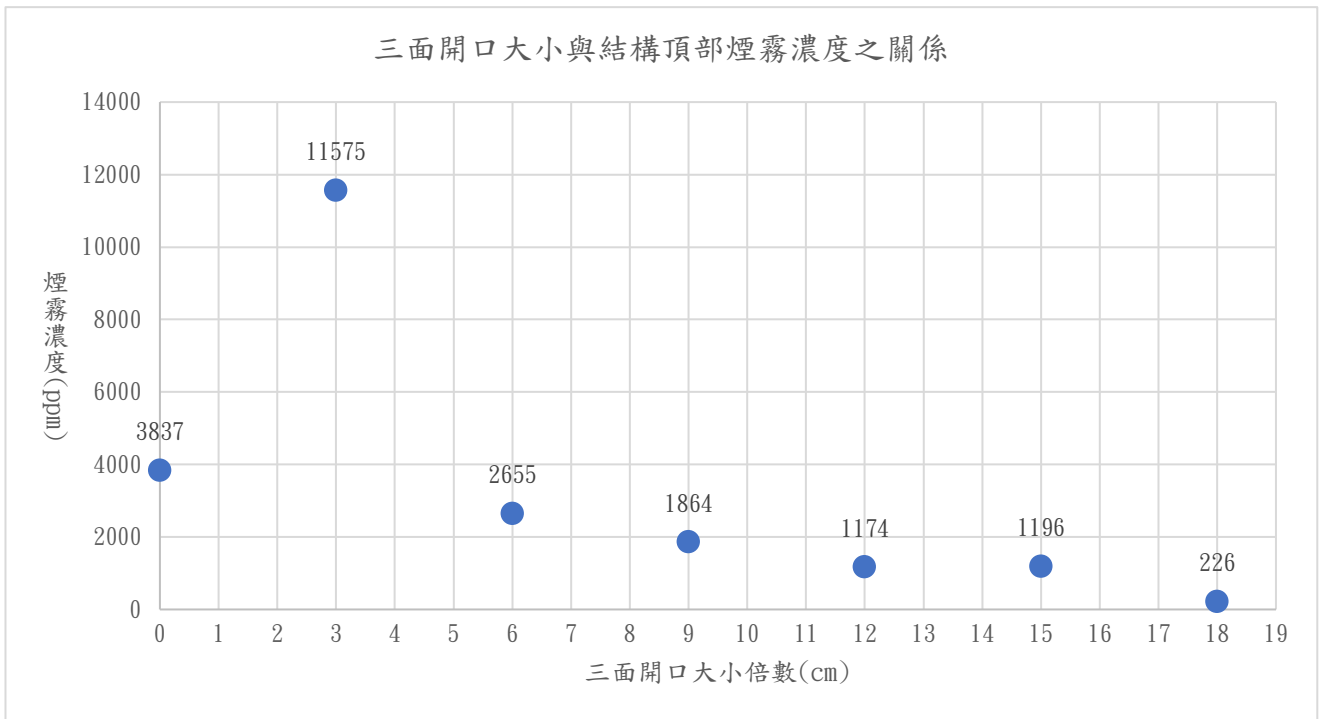


圖 75 實驗5-3-2實驗結果

5-3結果討論

- 實驗結果如假設所敘述，呈山峰狀，近似二次函數曲線。
- 在5-3的兩組實驗中可發現，僅改變一面就造成十分劇烈之變化。
- 在等比變化實驗中，可將一次變化一面，一次變化兩面，一次變化三面，歸納成下表

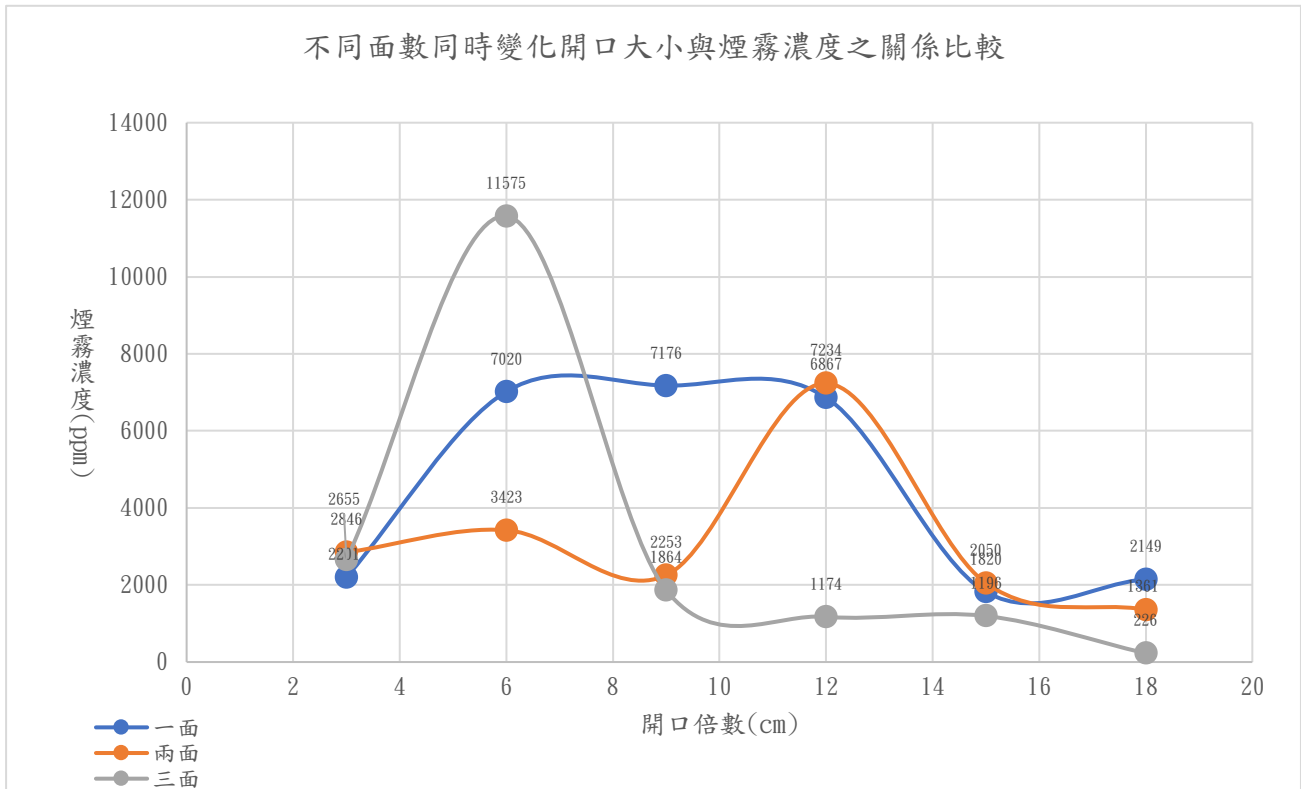


圖 76 實驗5-1-1、實驗5-3-1及實驗5-3-2實驗結果比較
 可發現面數越多情況下，變化趨勢越陡峭，因變化面數一次變化即越多，容易造成系統不平衡。

實驗5綜合結果討論

- 實驗結果曲線如實驗假設所敘述，呈近似二次函數曲線。
- 除實驗5-1-1及實驗5-1-2之外，其他實驗組曲線相近，在大小倍數為6(開口面積為 36 cm^2)或9(開口面積為 81 cm^2)時達到擴散程度的高峰，少數如5-3-2於開口倍數3時達到擴散程度高峰。
- 在實驗5-1中，三組實驗數據卻呈現完全不同的典型，形成此結果原因還有待釐清，初步假設，因實驗5-1-1時，結構十分封閉，擴散程度並不穩定，直到實驗5-1-3時，結構中氣流才逐漸穩定。

2. 實驗6:直式結構中改變開口大小與煙霧擴散程度之關係

本節實驗分為以下組數：

◆ 實驗6

- 實驗6-1僅改變一面開口大小
- 實驗6-2開口兩面形成對流
- 實驗6-3等比變化一面以上開口倍數

實驗6-1條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：23℃；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

實驗6-1-1說明：第二、三、四面皆為封閉，變化第一面。

實驗6-1-2說明：第一面全開，第三、四面封閉，變化第二面。

實驗6-1-3說明：第一、二面全開，第四面封閉，變化第三面。

實驗6-1-4說明：第一、二、三面全開，僅變化第四面。

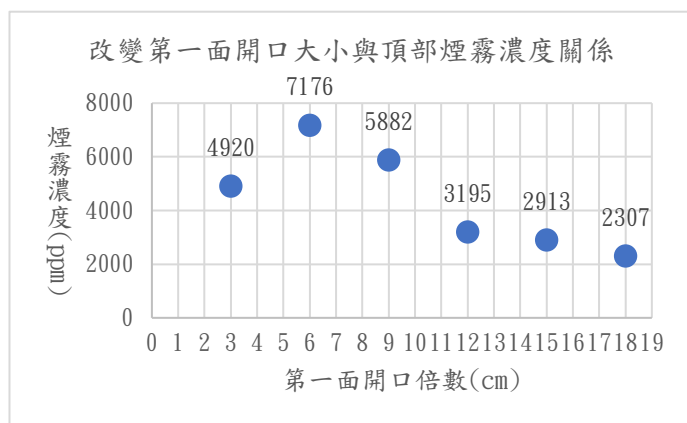


圖 79 實驗6-1-1實驗結果

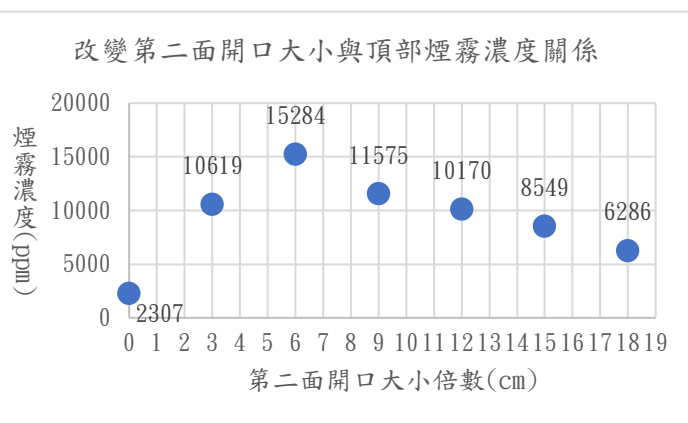


圖 80 實驗6-1-2實驗結果

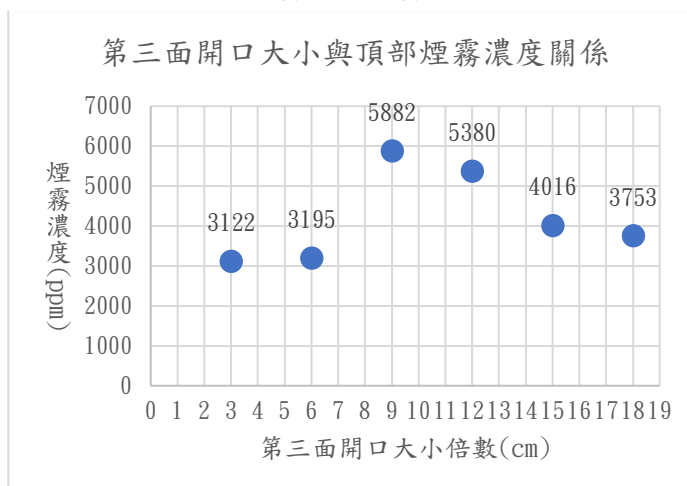


圖 78 實驗6-1-3實驗結果

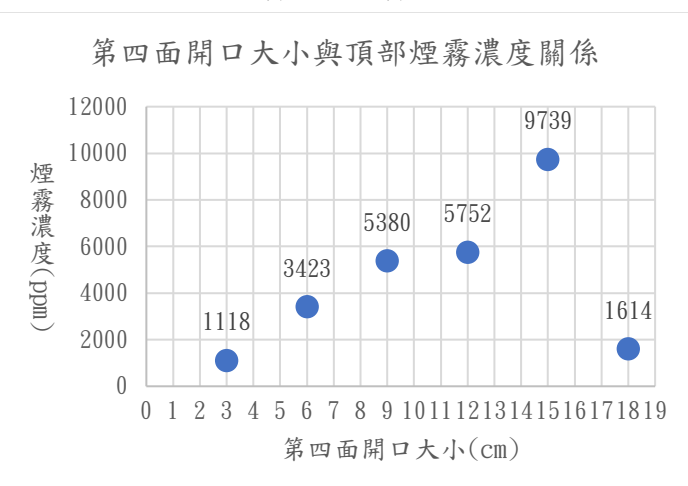


圖 77 實驗6-1-4實驗結果

實驗6-1結果討論

- 實驗6-1-1及實驗6-1-2結果曲線十分類似，皆在開口倍數為6(36 cm²)時達到煙霧濃度最高點。在實驗6-1-3及實驗6-1-4中則可發現煙霧濃度最高點向後退，變為倍數9及倍數15。

實驗6-2條件(開口兩面形成對流)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

6-2-1實驗說明：第二、四面封閉，等比變化第一、三面開口大小

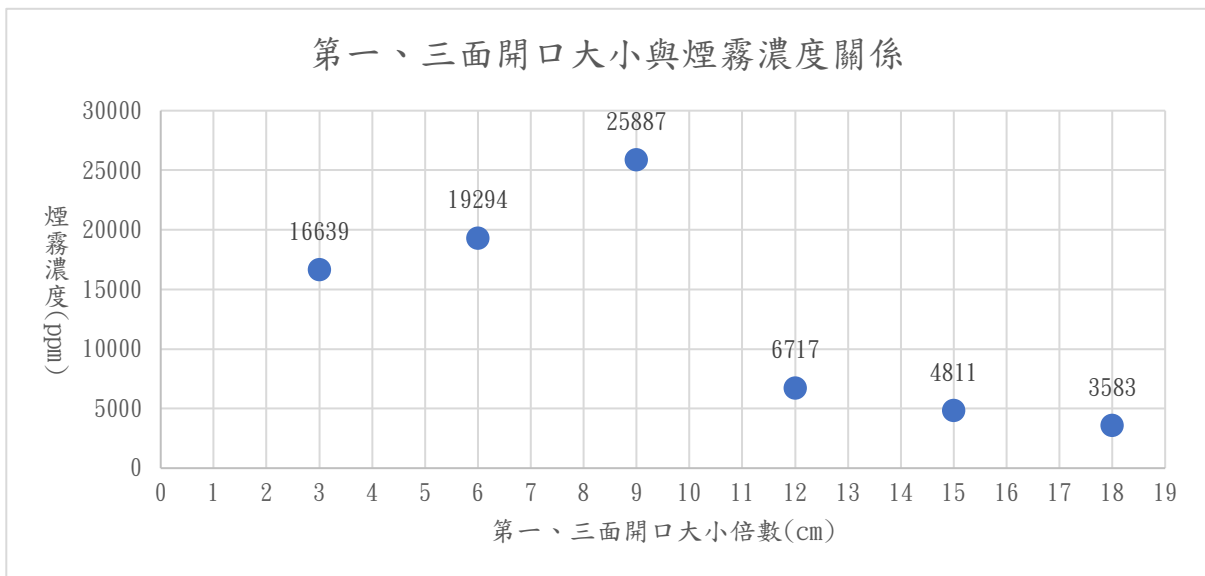


圖 81 實驗6-2-1結果

6-2-2實驗說明：第二、四面全開，等比變化第一、三面開口大小

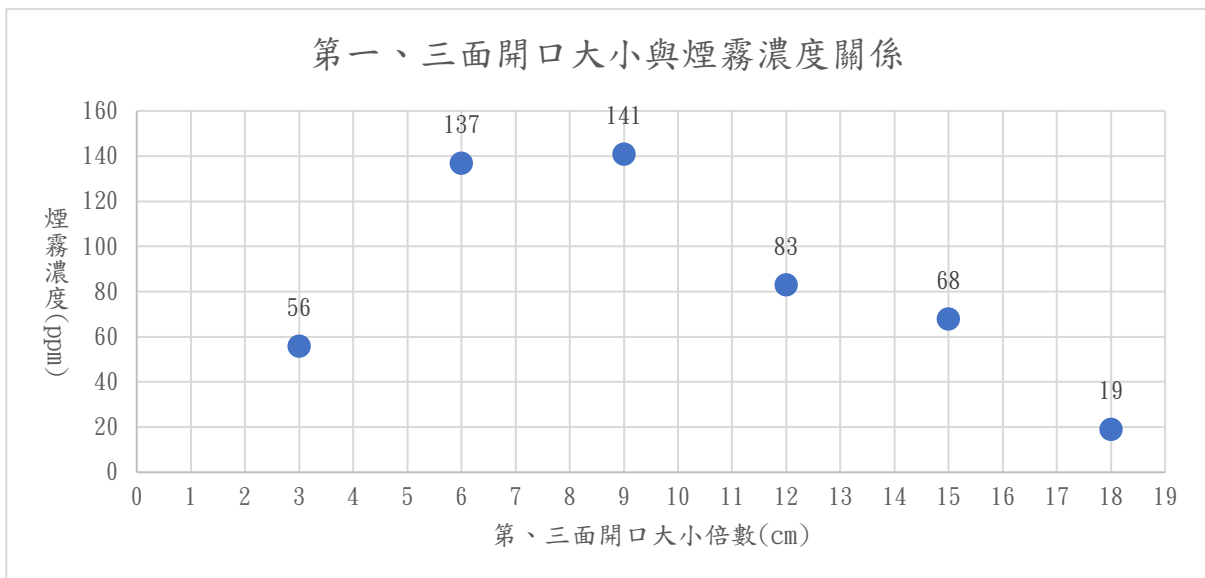
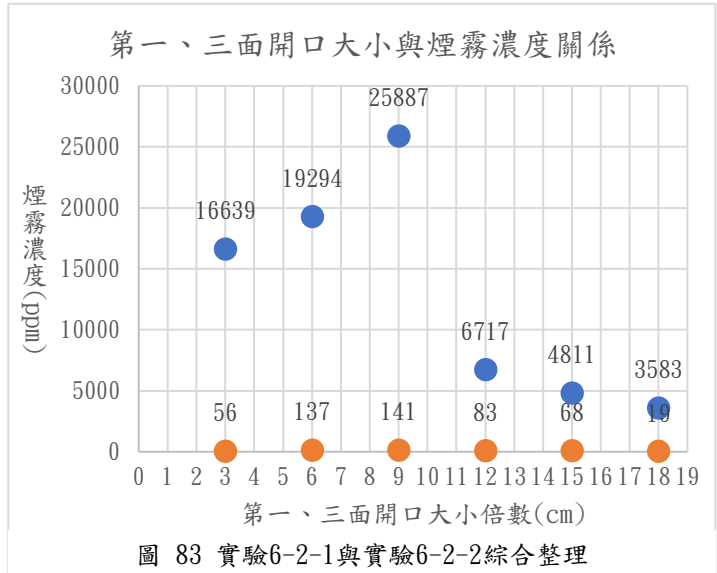


圖 82 實驗6-2-2實驗結果

6-2結果討論

- 實驗6-2-1及實驗6-2-2雖在曲線趨勢方面不完全相同，但可以發現，同時在開口倍數為9(面積81 cm²)時達到煙霧濃度最高點。
- 將兩實驗結果歸納成圖 71。可發現開口全開情況下煙霧濃度明顯較低。



6-3實驗條件(等比變化一

面以上開口倍數)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：25 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

6-3-1實驗說明：等比變化第一、二、三、四面開口大小。

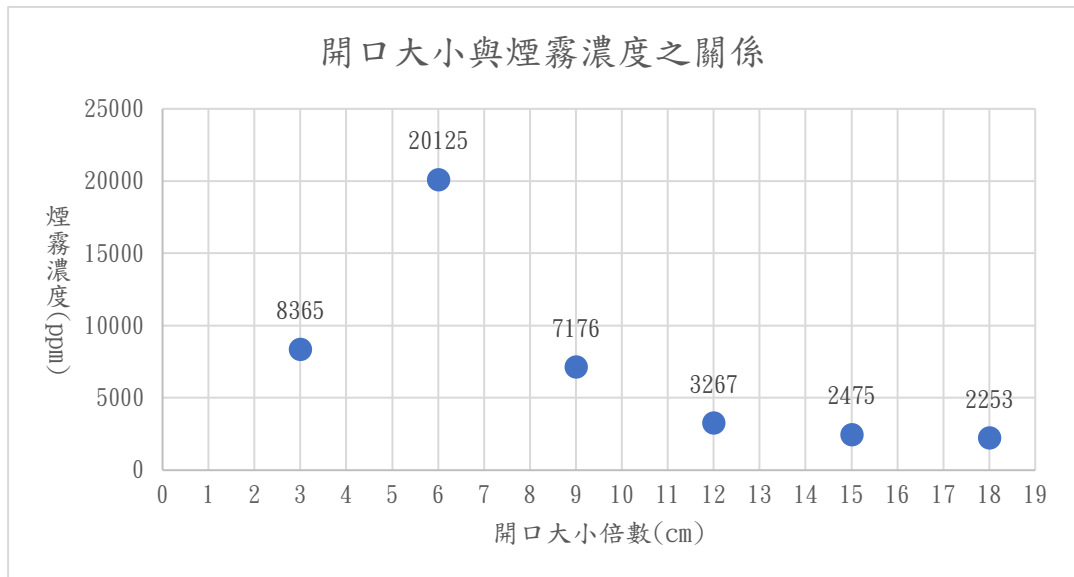


圖 84 實驗6-3-1結果

實驗6結果綜合討論

- 以上結果符合實驗假設，呈現近似二次函數曲線之趨勢。

(二) 實驗7&8：改變開口數量與煙霧擴散程度之關係

(一) 實驗7：橫式結構中改變開口數量與煙霧擴散程度之關係

本節實驗分為以下組數：

◆ 實驗7-連通管數為2

- 實驗7-1僅改變一面開口大小
- 實驗7-2開口兩面形成對流
- 實驗7-3等比變化一面以上開口倍數

實驗7-1條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：25 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

實驗7-1-1說明：第二面、第三面封閉，變化第一面開口。

實驗7-1-2說明：第一面全開，第三面封閉，變化第二面開口。

實驗7-1-3說明：第一、面全開，變化第三面開口大小。

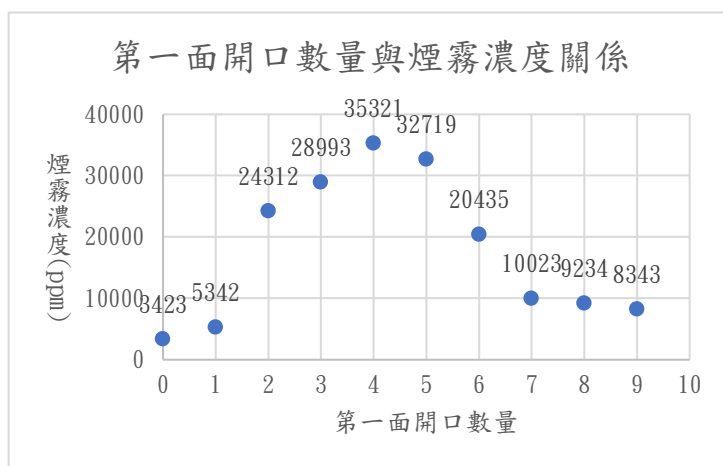


圖 86 實驗7-1-1實驗結果

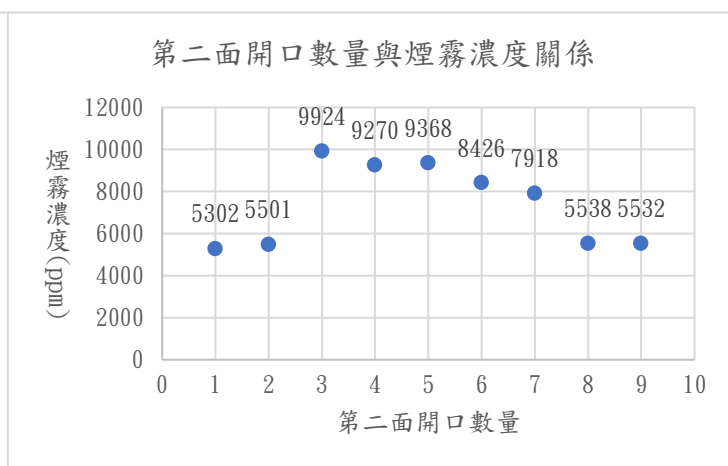


圖 85 實驗7-1-2實驗結果

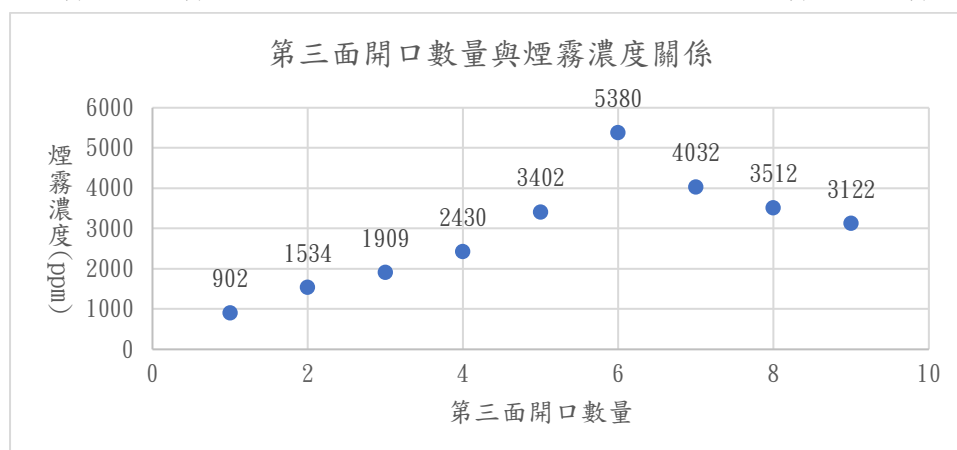


圖 87 實驗7-1-3實驗結果

實驗7-1結果討論

- 三組實驗數據皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。

7-2實驗條件(開口兩面形成對流)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：25 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

實驗7-2-1說明：第二面封閉，等比變化第一、三面開口大小。

實驗7-2-2說明：第二面全開，等比變化第一、三面開口大小。

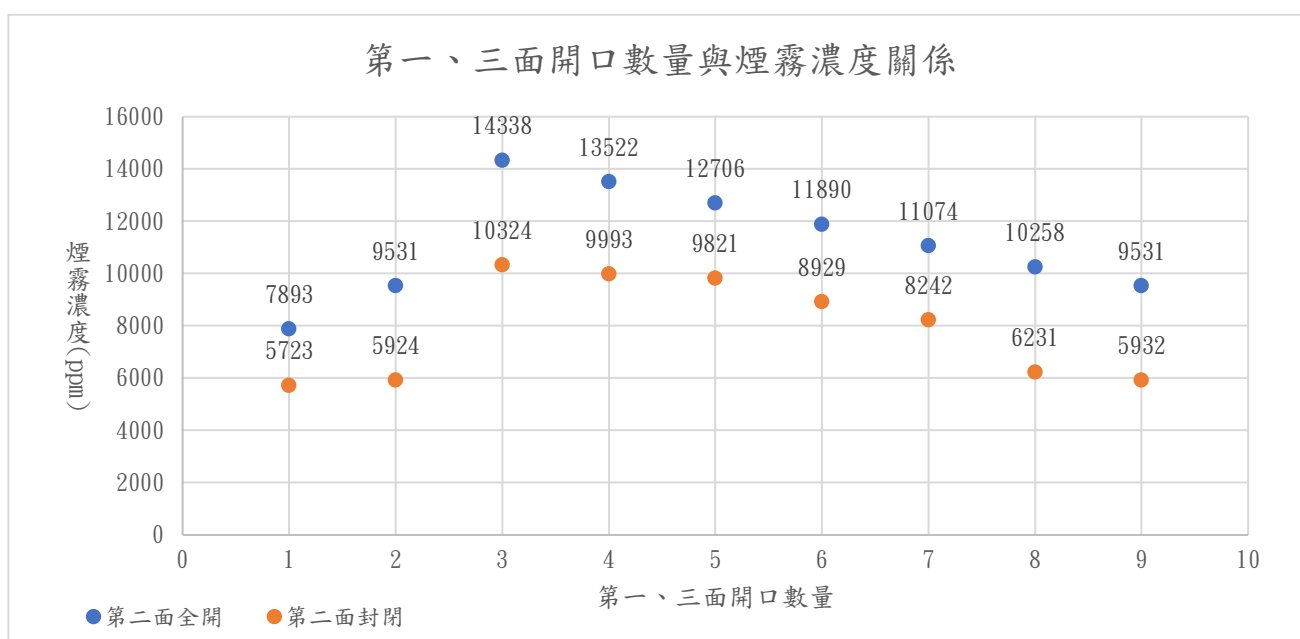


圖 88 實驗7-2-1與實驗7-2-2實驗結果

實驗7-2結果討論

- 實驗數據皆呈現趨緩山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。
- 且可發現，第二面開口封閉與全開的實驗結果兩者趨勢十分類似，區別在於開口封閉時，煙霧濃度較低，驗證實驗假設之發煙量來源自空氣量。

7-3實驗條件(等比變化一面以上開口倍數)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：25 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

實驗7-3-1說明：等比變化第一、二、三、四面開口大小。

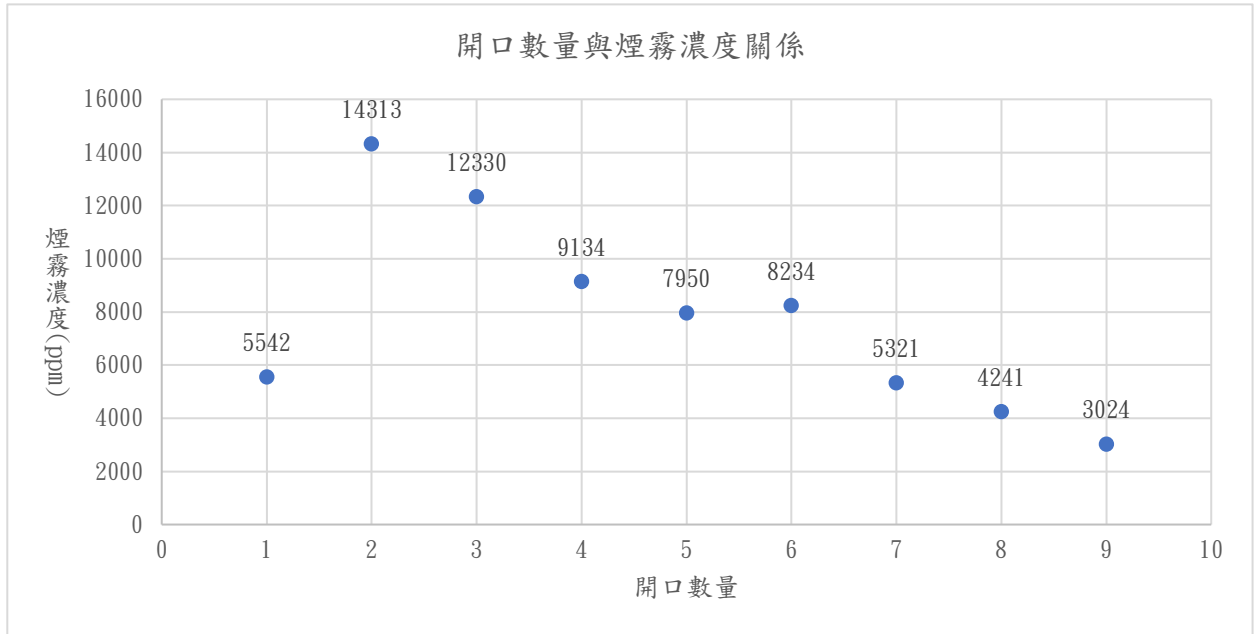


圖 89 實驗7-3-1實驗結果

實驗7-3結果討論

- 實驗數據皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。
- 並在由開口數1到開口數2階段，有著十分陡峭的趨勢，可能因四面同時開啟，一改變開口數即乘上四倍，後段趨緩原因則可能因開口數變多煙霧濃度已在內部達到平衡。

實驗7結果綜合討論

- 本組實驗可與實驗5進行比較可發現，可能因數量每次只增加9 cm²的面積，但開口大小則以指數方式成長，故開口數量實驗之實驗結果趨勢較為平緩。

(二) 實驗8：直式建築中改變開口數量與煙霧擴散程度之關係

本節實驗分為以下組數：

◆ 實驗8-1連通管數為2

- 實驗8-1改變一面開口
- 實驗8-2開口兩面形成對流
- 實驗8-3等比變化一面以上開口數量

實驗8-1條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：25 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

實驗8-1-1說明：第二、三、四面皆為封閉，變化第一面。

實驗8-1-2說明：第一面全開，第三、四面封閉，變化第二面。

實驗8-1-3說明：第一、二面全開，第四面封閉，變化第三面。

實驗8-1-4說明：第一、二、三面全開，變化第四面。

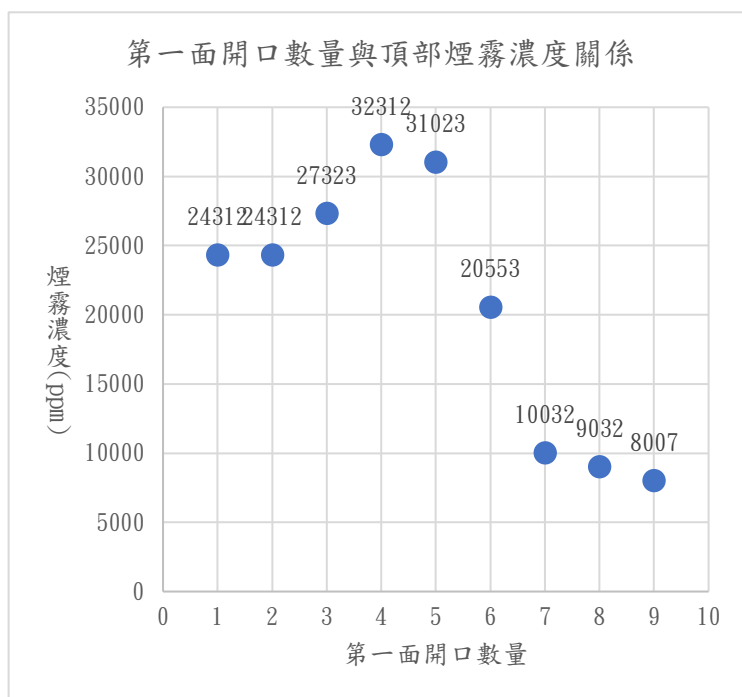


圖 90 實驗8-1-1實驗結果

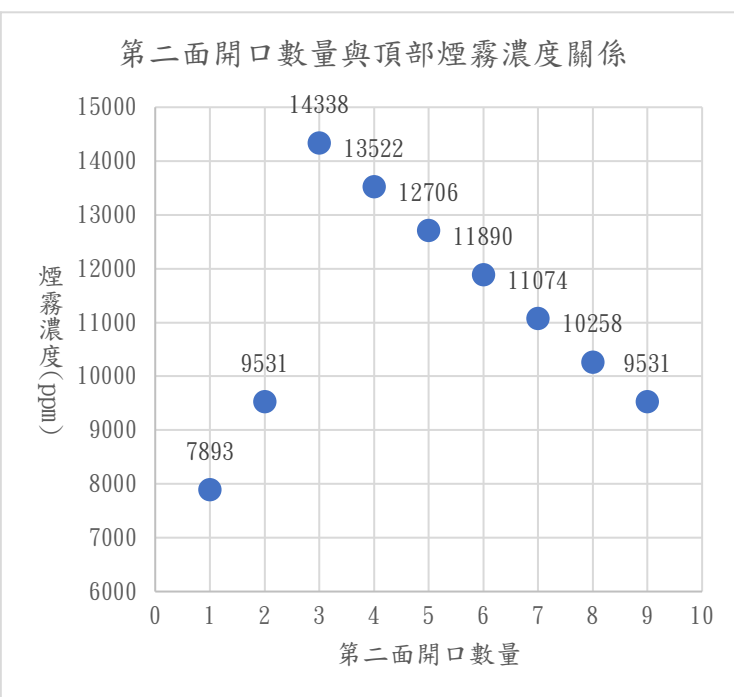


圖 91 實驗8-1-2實驗結果

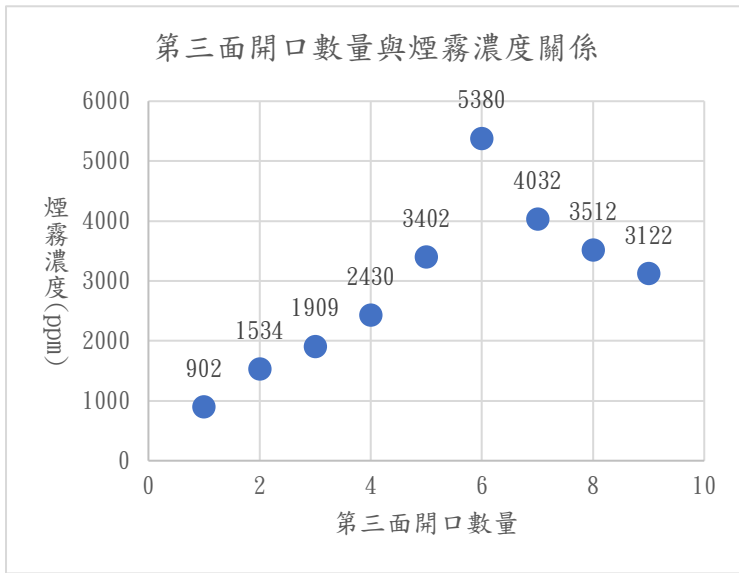


圖 93 實驗8-1-3實驗結果

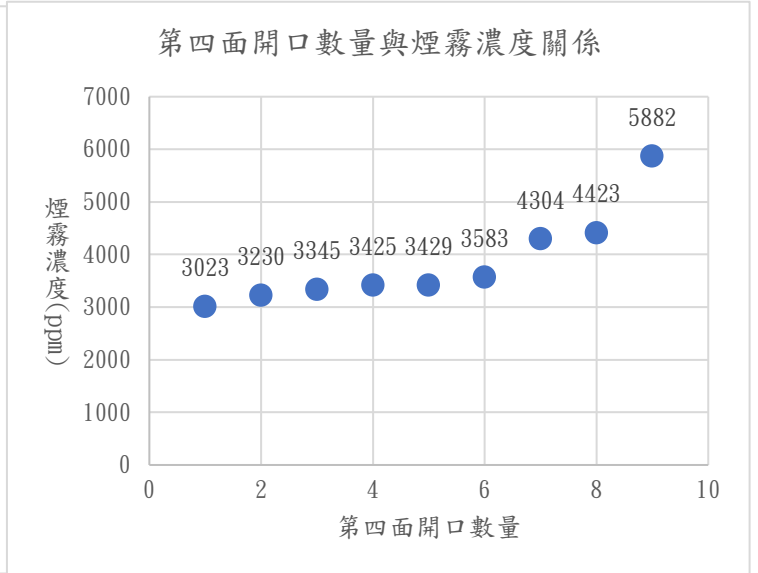


圖 92 實驗8-1-4實驗結果

實驗8-1結果討論

- 除實驗8-1-4實驗結果外，其他三組實驗數據皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。
- 產生實驗8-1-4實驗結果推測原因為該實驗中開口數過多，導致煙霧無法達到最高點。

實驗8-2條件(開口兩面形成對流)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

實驗8-2-1說明：第二、四面封閉，等比變化第一、三面開口。

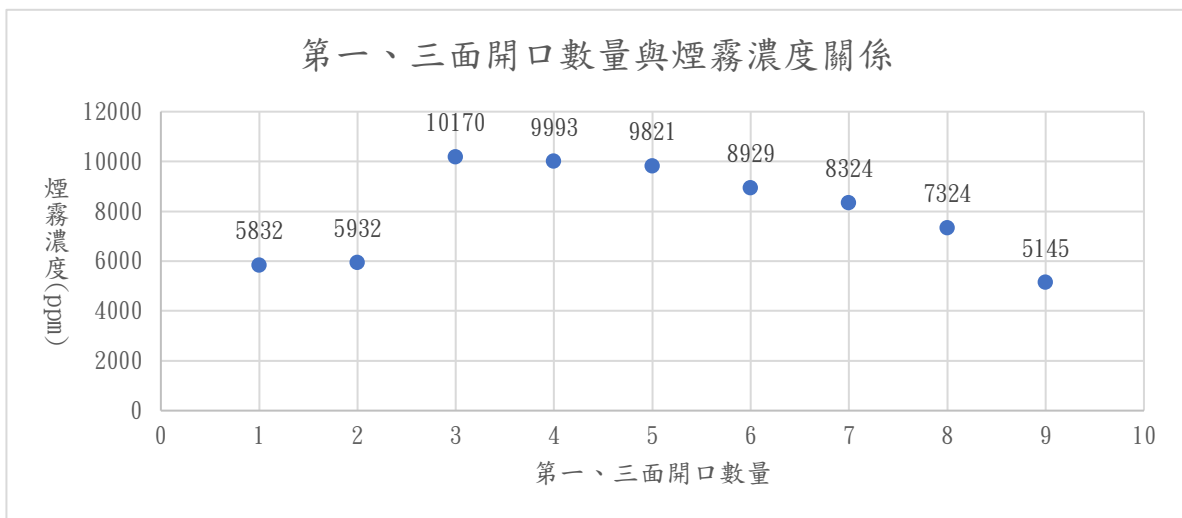


圖 94 實驗8-2-1實驗結果

實驗8-2-2說明：第二、四面全開，等比變化第一、三面開口。

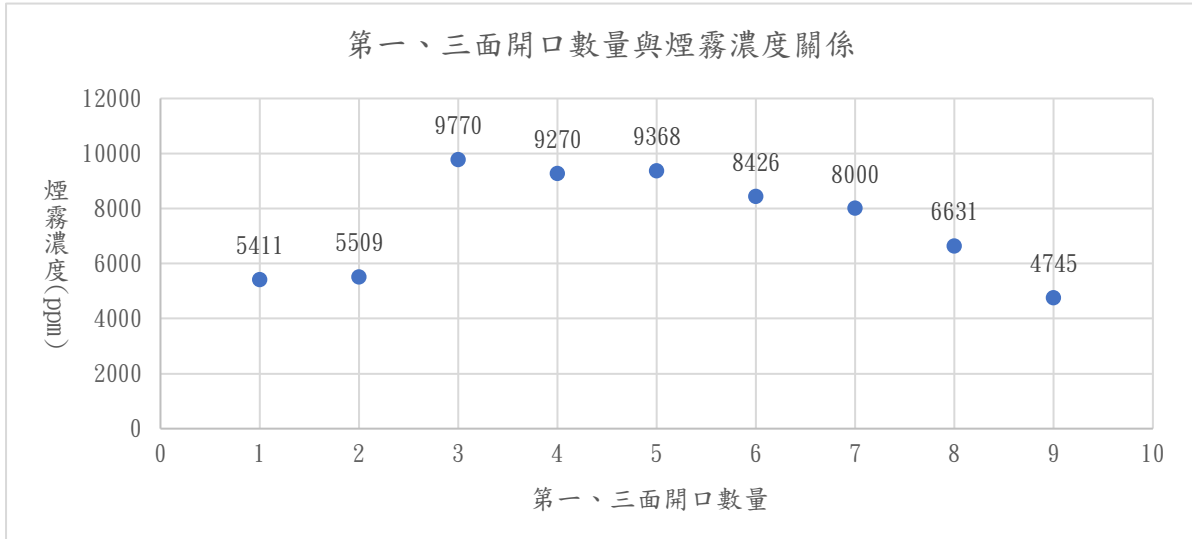


圖 95 實驗8-2-2實驗結果

實驗8-2結果討論

- 實驗數據皆呈現陡峭山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。
- 可將實驗8-2-1與實驗8-2-2曲線進行比較可發現趨勢十分類似。
- 並在由開口數2到開口數3階段，有著十分陡峭的趨勢，可能因同時開啟兩邊，而造成內部平衡突然改變，後段趨緩原因則可能因開口數變多煙霧濃度已在內部達到平衡。

實驗8-3條件(等比變化一面以上開口大小)：

- 連通管數量：2。
- 室內溫度：23 °C；室內溼度：89%。
- 測量時間固定為5分鐘。

實驗8-3-1說明：等比變化第一、二、三、四面開口數量。

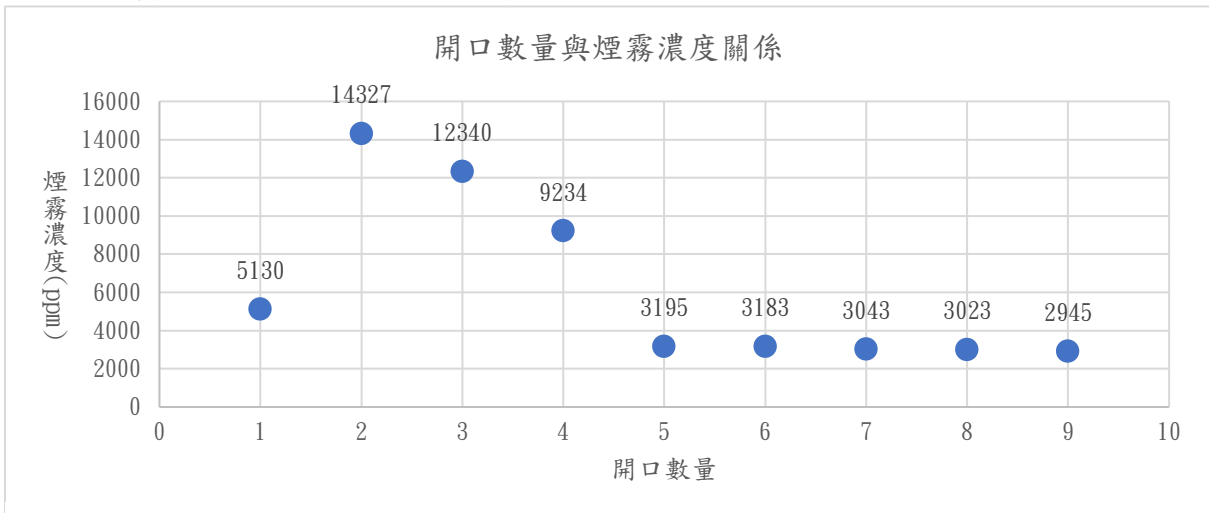


圖 96 實驗8-3-1實驗結果

實驗8-3結果討論

- 實驗數據皆呈現山峰狀，近似二次函數曲線之變化趨勢。符合實驗假設。
- 可發現在本實驗結果中出現過兩個轉捩點，一為開口數量1至數量2時，二維開口數量進入5時，當開口數量進入5時，煙霧濃度趨向平緩。

實驗8綜合結果討論

- 將本實驗與實驗6可進行比較，下圖列為各開啟一面趨勢之比較。可發現在面積相當時開口數量煙霧濃度較濃。

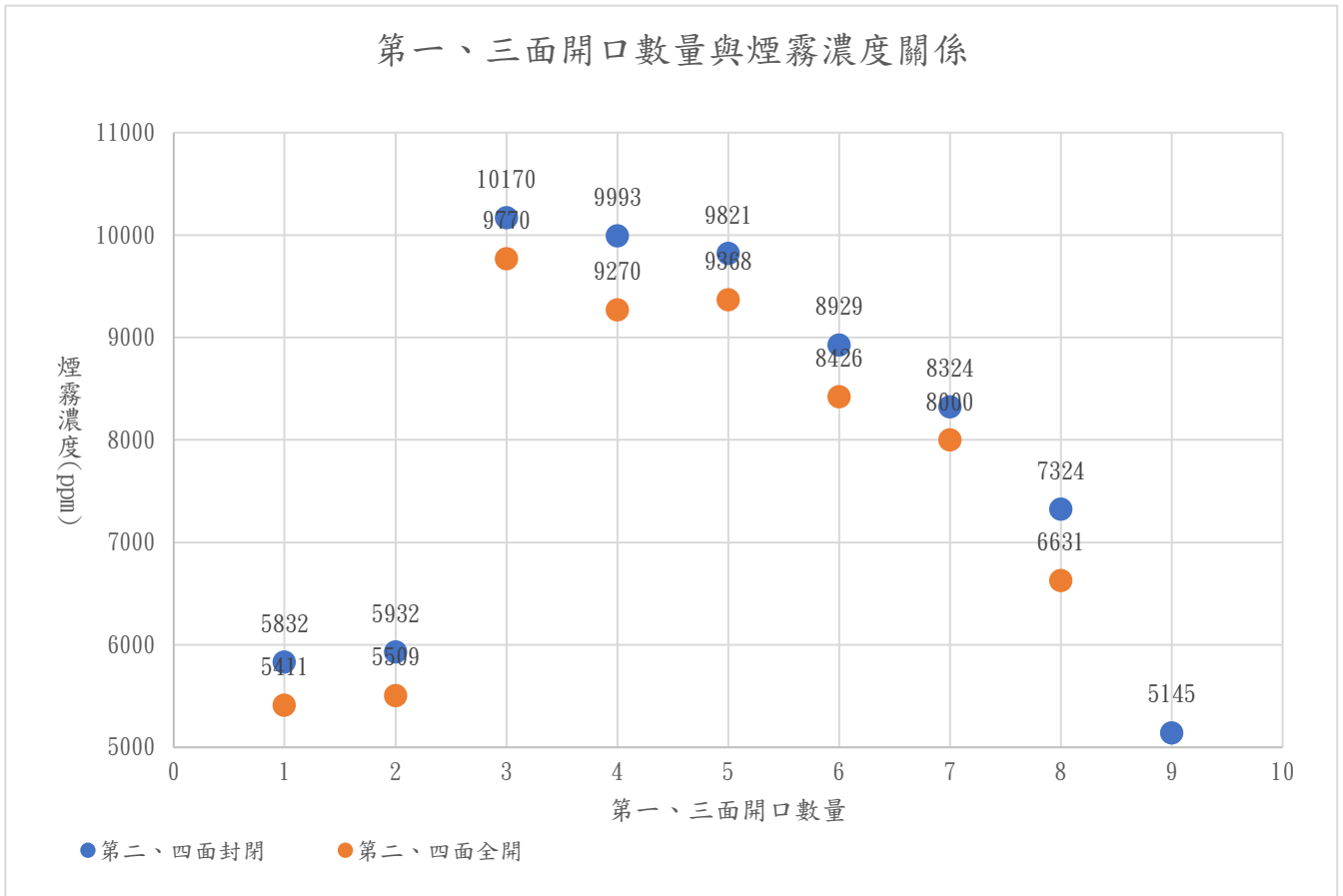


圖 97 實驗8-2-1及實驗8-2-2實驗結果

四、 C組三個連通管煙霧擴散程度實驗結果（實體實驗）

（一） 實驗9及10：改變開口大小與煙霧擴散程度之關係

1. 實驗9：橫式結構中改變開口大小與煙霧擴散程度之關係

本節實驗分為以下組數：

◆ 實驗9連通管數為3

■ 實驗9-0三面封閉(測試實驗)

■ 實驗9-1僅改變一面開口大小

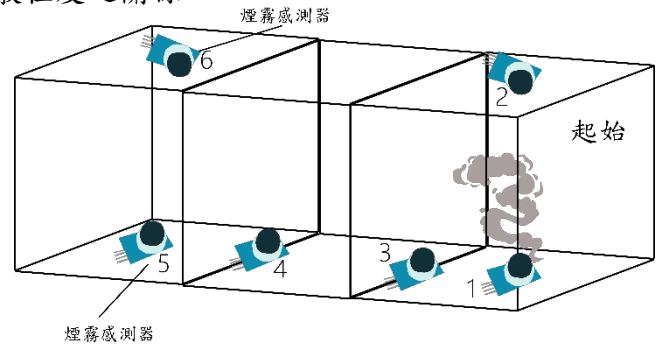


圖 98 實驗9編號說明

實驗9-0條件(測試實驗)

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗9-0實驗說明：三面封閉下，隨時間變化之煙霧濃度

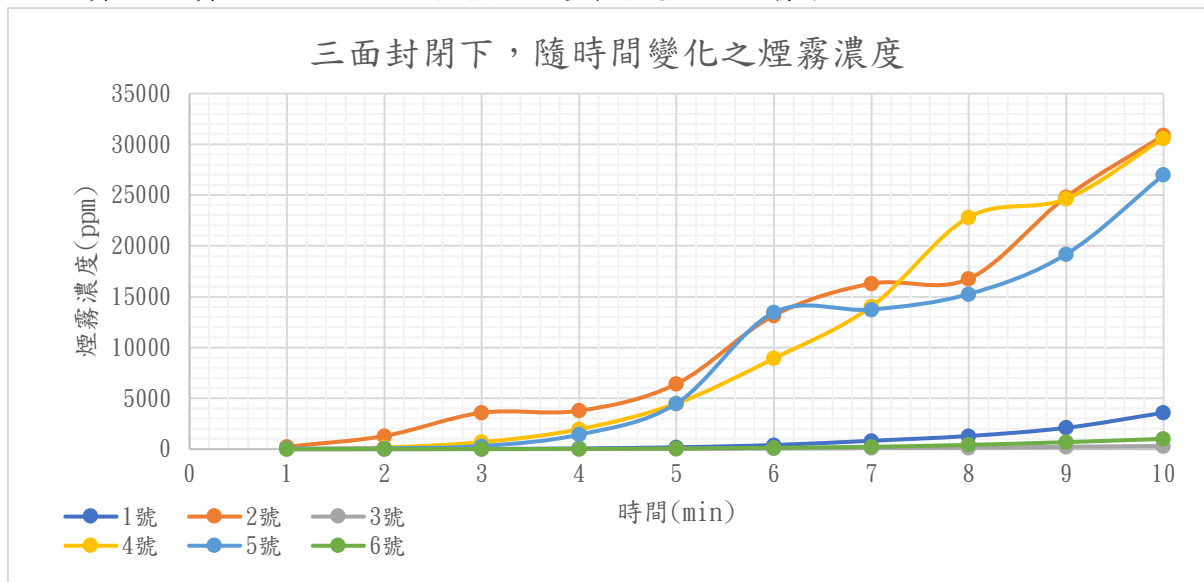


圖 99 實驗9-0實驗結果

討論：可發現隨時間煙霧濃度上升，並可發現其上升趨勢十分穩定。

實驗9-1-1條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗9-1-1說明：開啟第一面，第二、三面保持封閉。

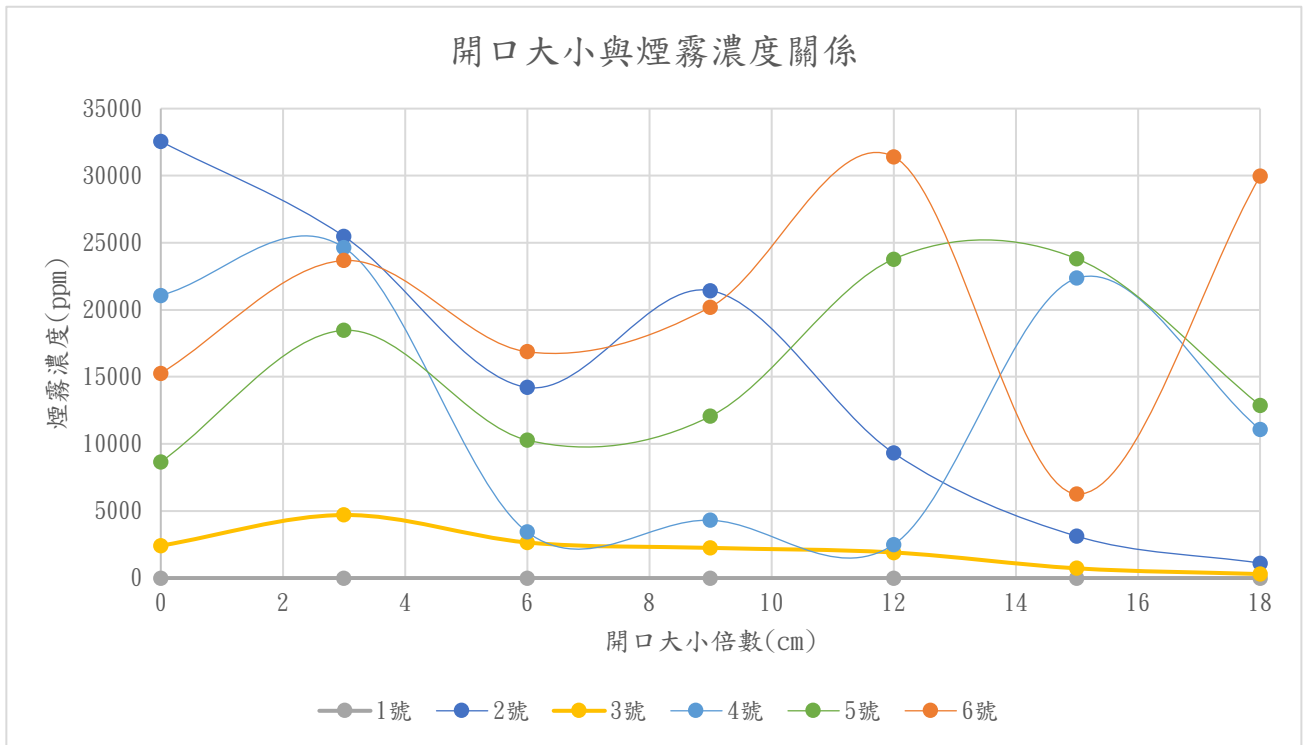


圖 102 實驗9-1-1實驗結果

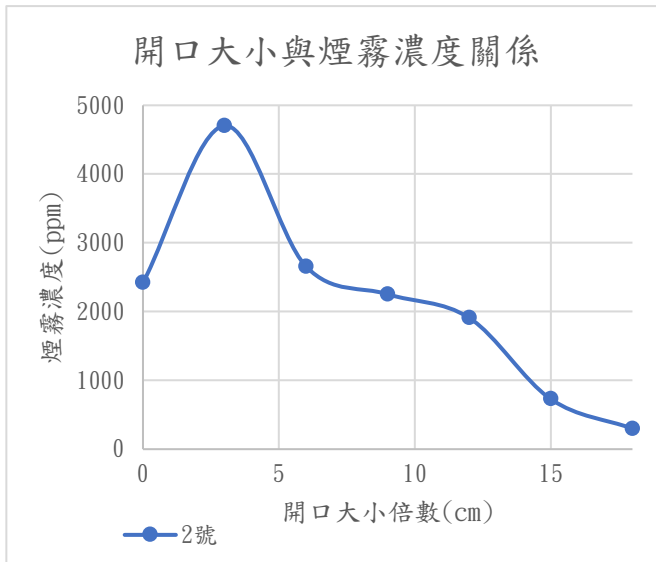


圖 100 實驗9-1-1實驗結果

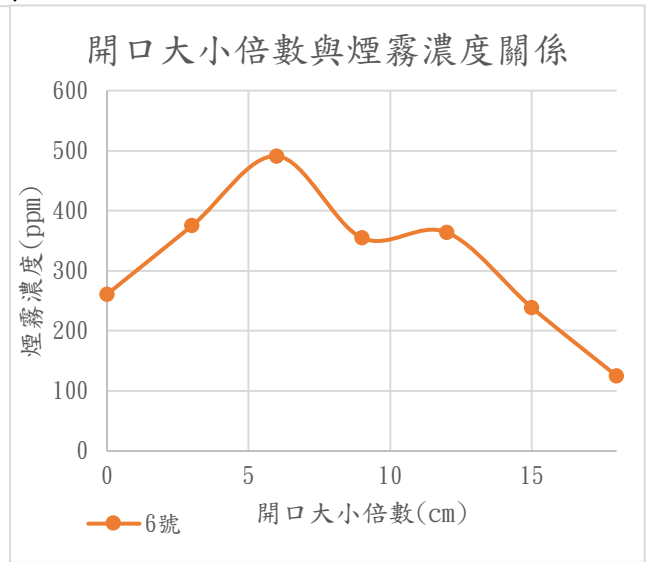


圖 101 實驗9-1-1實驗結果

實驗9-1-2條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗9-1-2說明：第一面抱持開啟，第二面開啟，第三面保持封閉

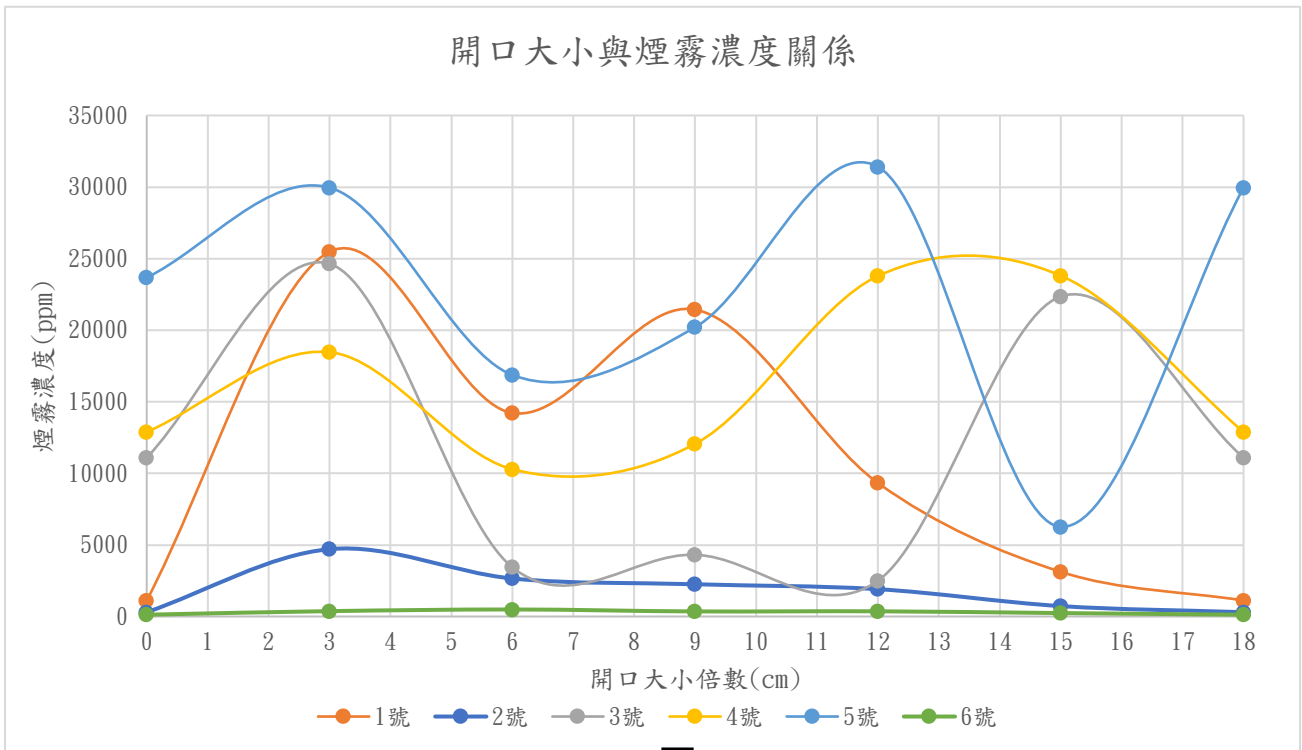


圖 105 實驗9-1-2實驗結果

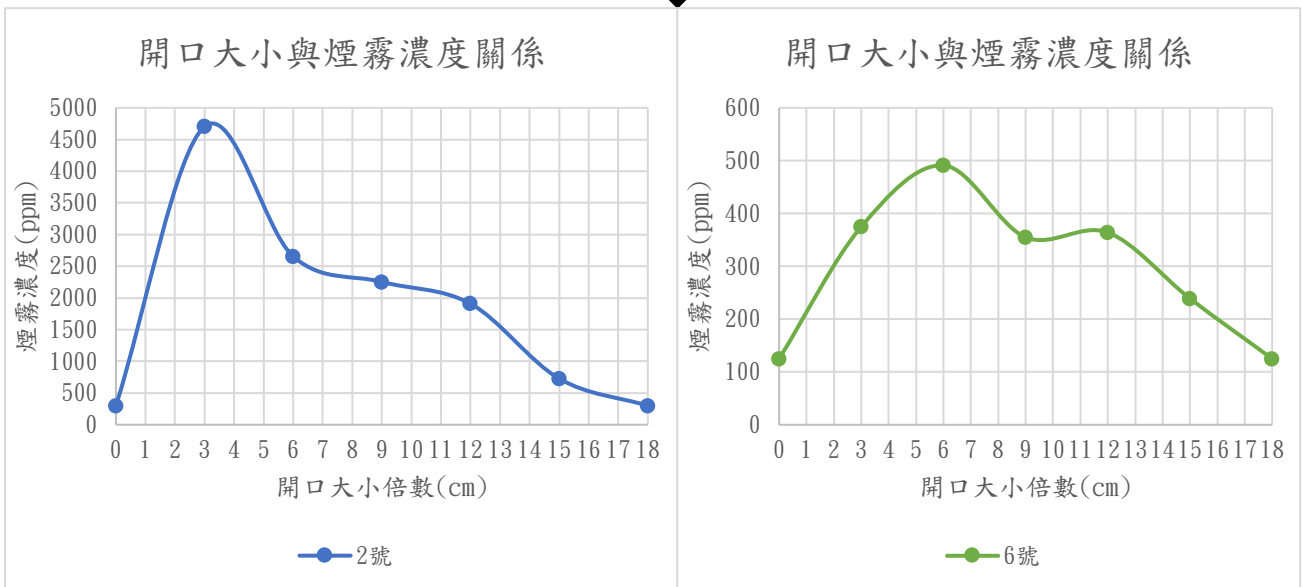


圖 104 實驗9-1-2實驗結果

圖 103 實驗9-1-2 實驗結果

實驗9-1-3條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗9-1-3說明：第一、二面抱持開啟，第三面開啟

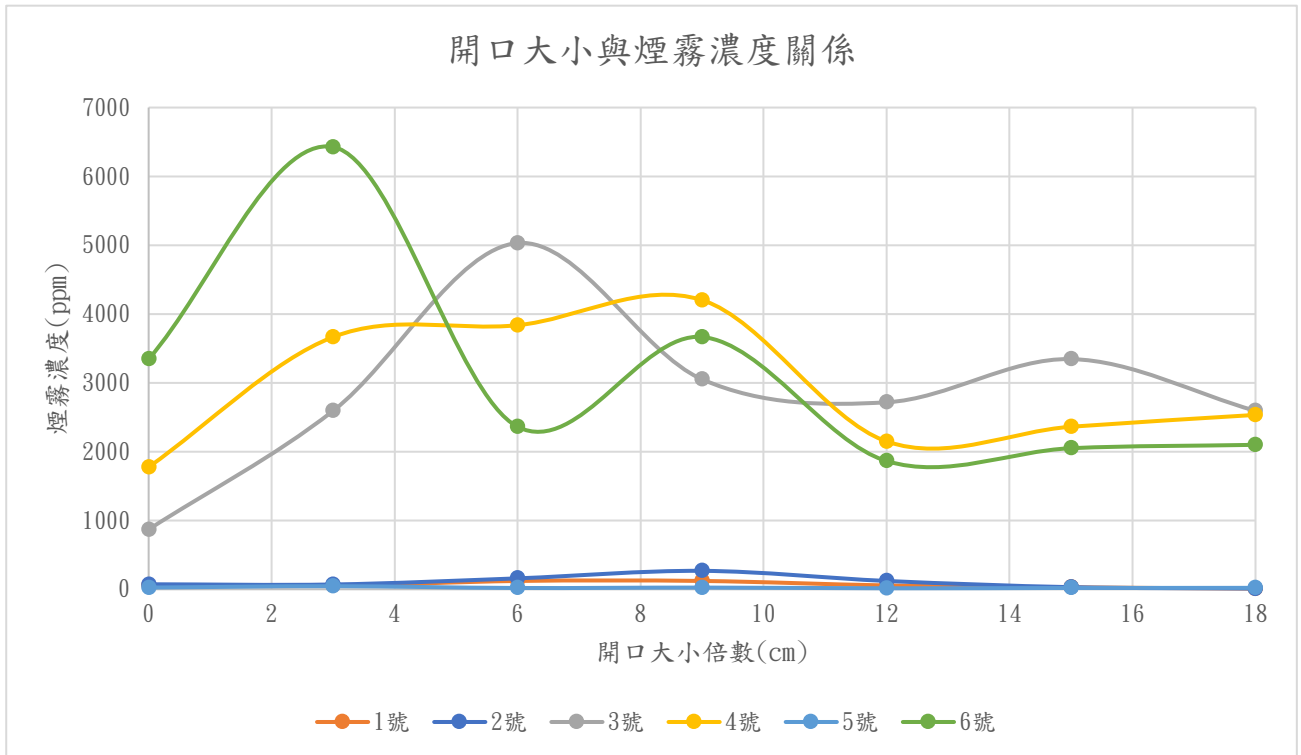


圖 108 實驗9-1-3 實驗結果

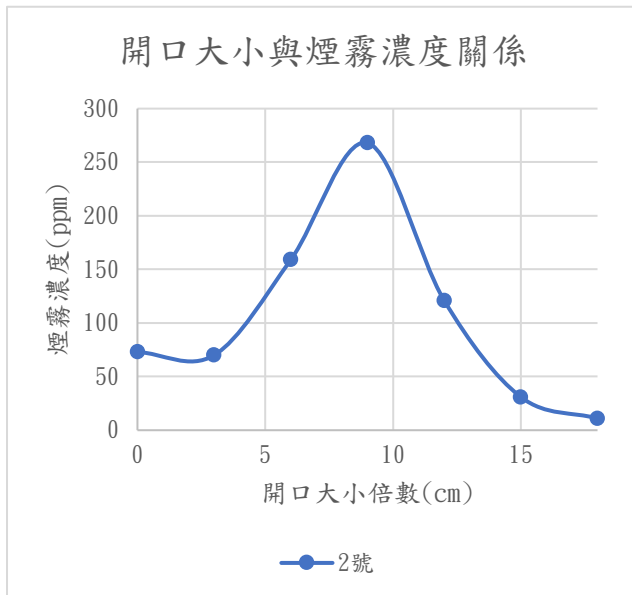


圖 106 實驗9-1-3實驗結果

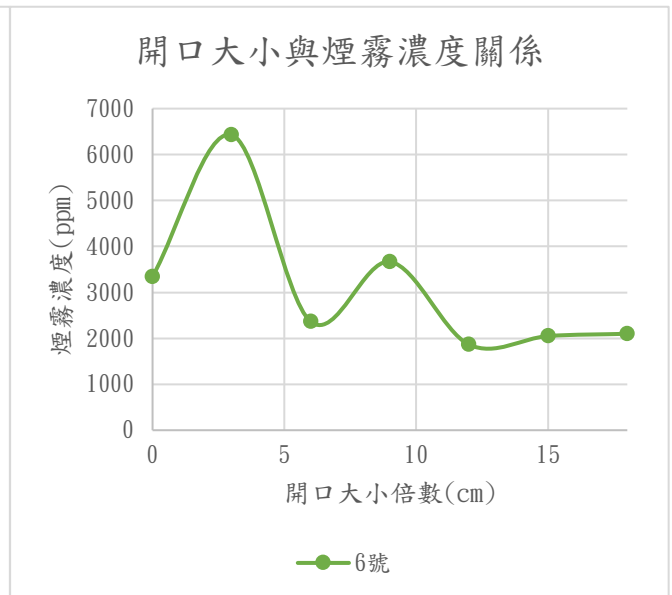


圖 107 實驗9-1-3實驗結果

實驗9討論：

- 可經由實驗結果發現討論，若將1、2、3、4、5、6，六個感應器曲線圖將無法看出規律，但若單獨挑出位於連通管頂部的2號及6號，即可發現，曲線十分符合假設，可推測原因為1、3、4、5位於實驗裝置底部，氣流不僅不穩定，還因空間過大，而直接產生對流，造成無法形成規律。
- 可經由實驗結果發現，除6號感應器出現兩次煙霧濃度高峰外之外，其他實驗結果皆符合實驗假設。

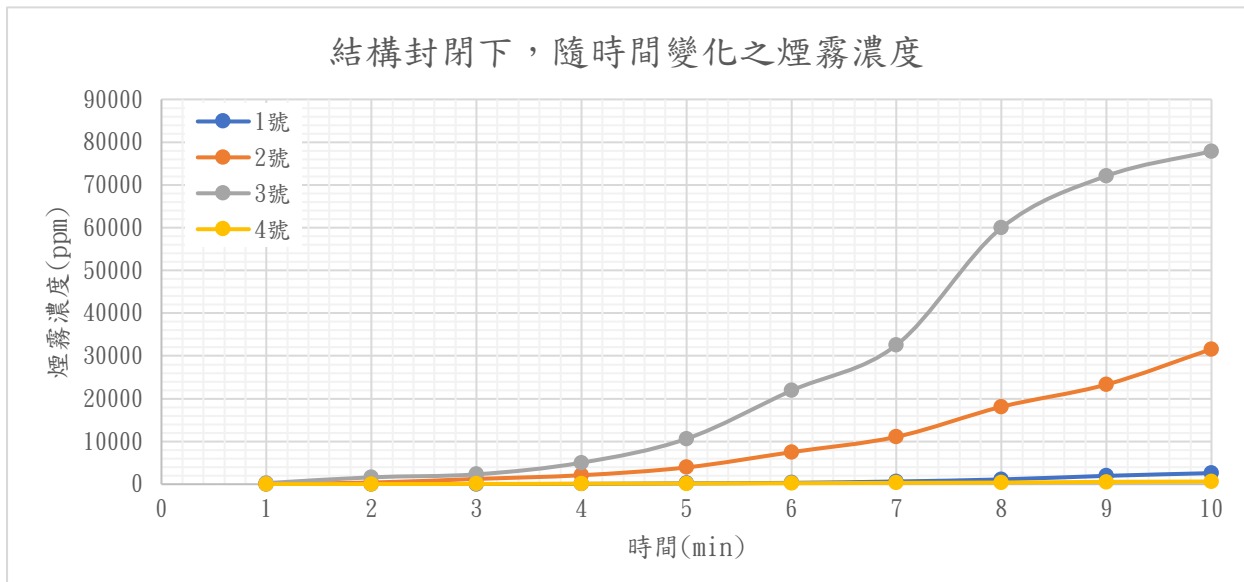
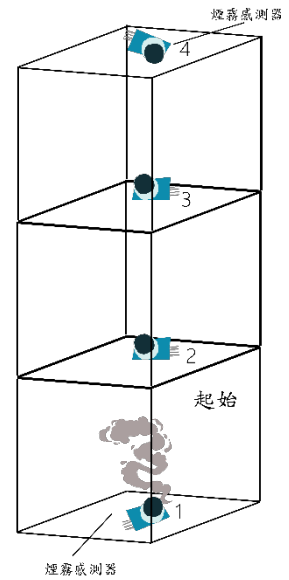
2. 實驗10：直式結構中改變開口大小與煙霧擴散程度之關係

本節實驗分為以下組數：

- ◆ 實驗10連通管數為3
 - 實驗10-0三面封閉(測試實驗)
 - 實驗10-1僅改變一面開口大小

實驗10-0條件

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。



實驗10-1-1條件(僅改變一面開口大小)

圖 109 實驗10-0實驗結果

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗10-1-1說明：開啟第一面，第二、三、四面保持封閉。

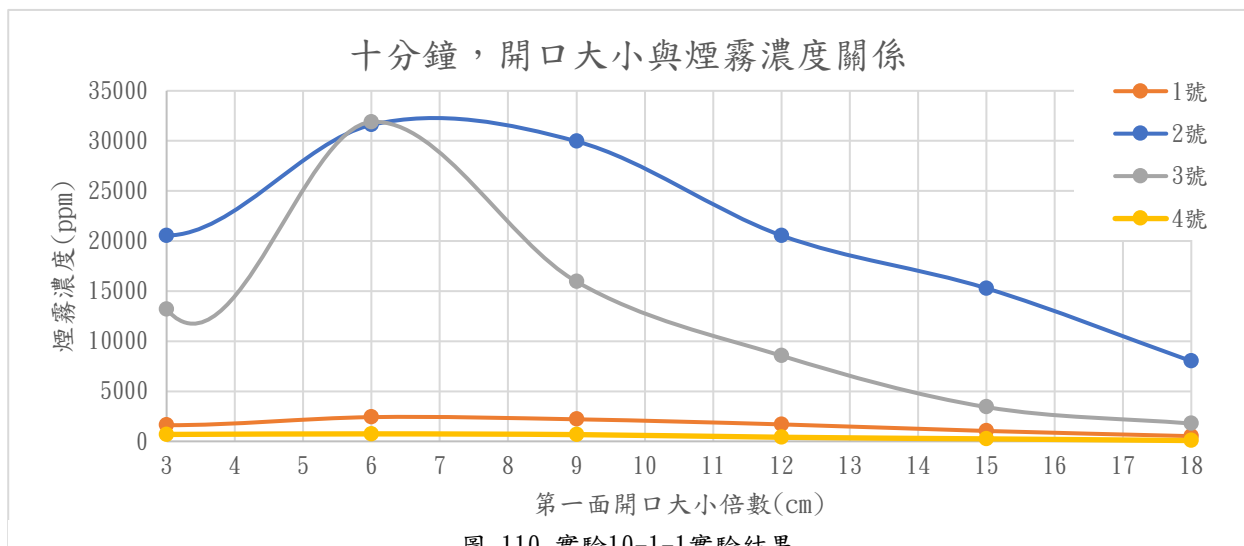


圖 110 實驗10-1-1實驗結果

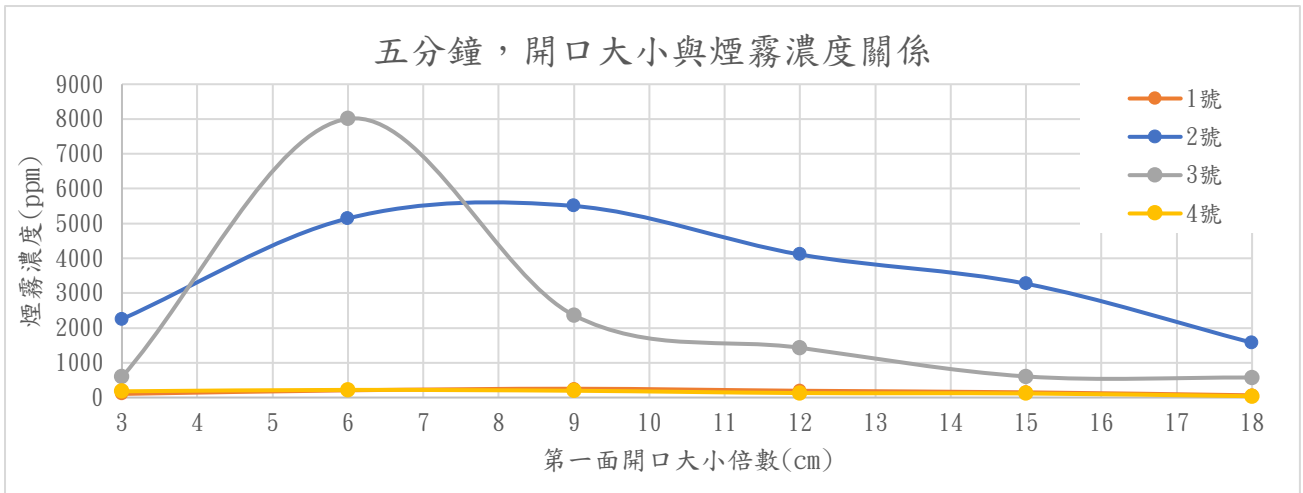


圖 111 實驗10-1-1實驗結果

實驗10-1-2條件(僅改變一面開口大小):

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗10-1-2說明：第一面抱持開啟，第二面開啟，第三、四面保持封閉

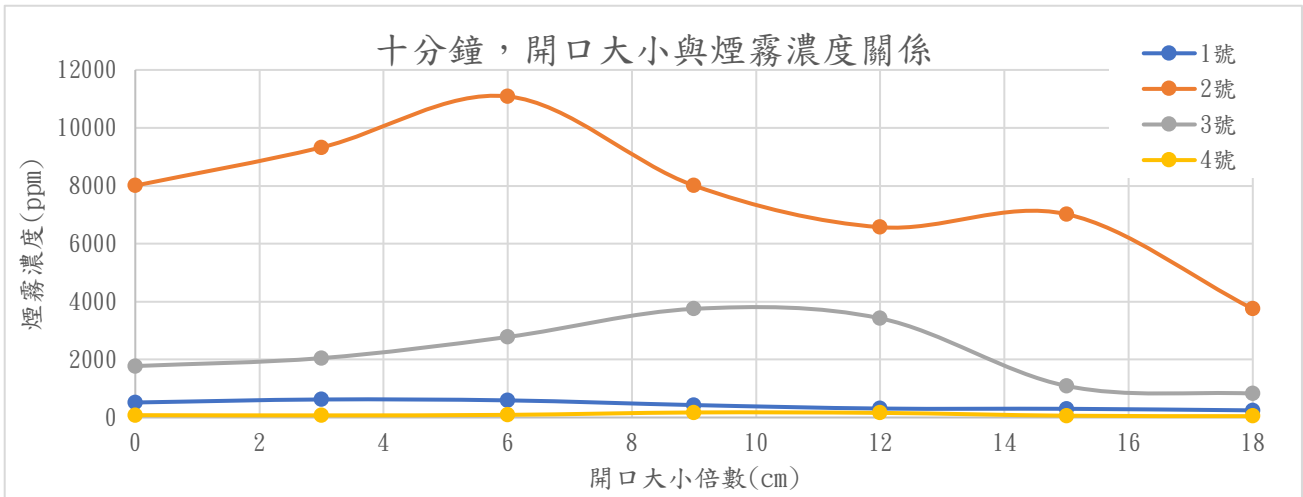


圖 113 實驗10-1-2實驗結果

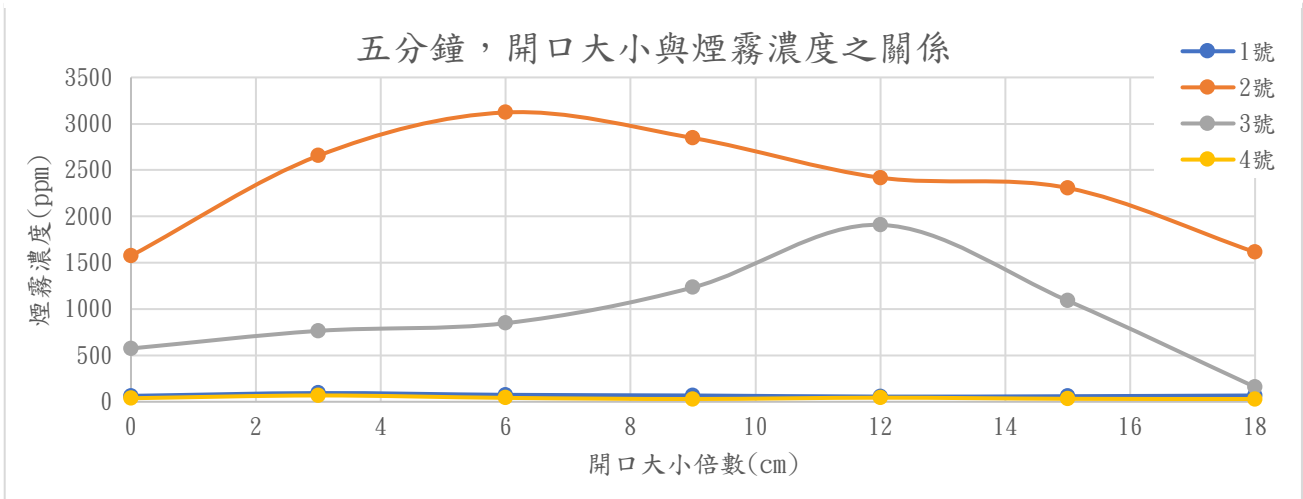


圖 112 實驗10-1-2實驗結果

實驗10-1-3條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗10-1-3說明：第一、二面抱持開啟，第三面開啟，第四面封閉

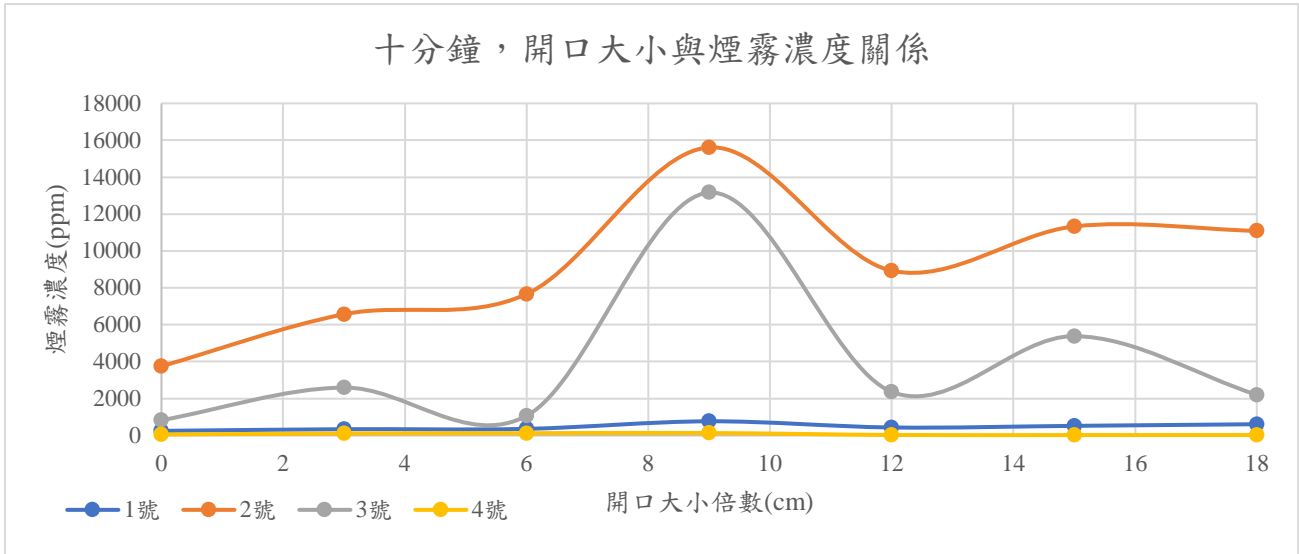


圖 115 實驗10-1-3實驗結果

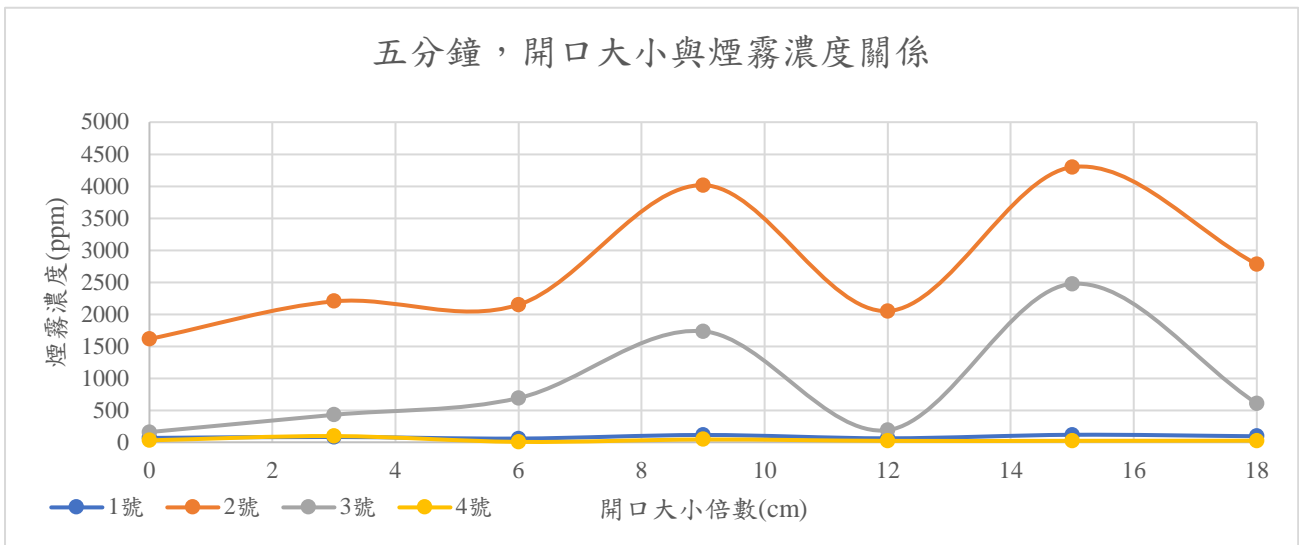


圖 114 實驗10-1-3實驗結果

實驗10-1-4條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗10-1-4說明：第一、二、三面抱持開啟，第四面開啟

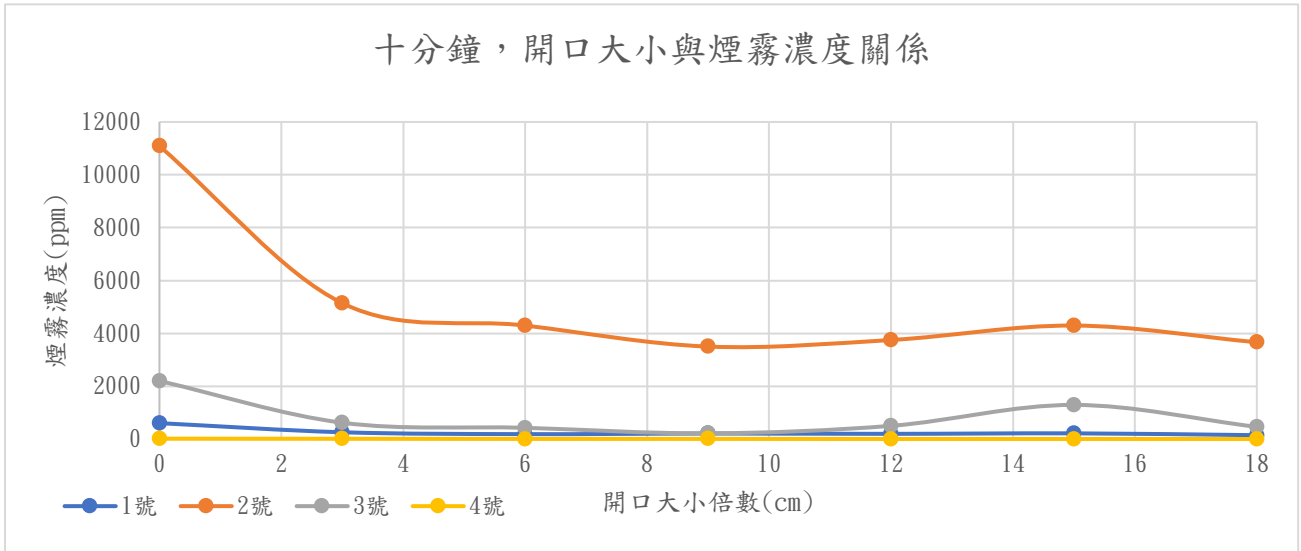


圖 118 實驗10-1-4實驗結果

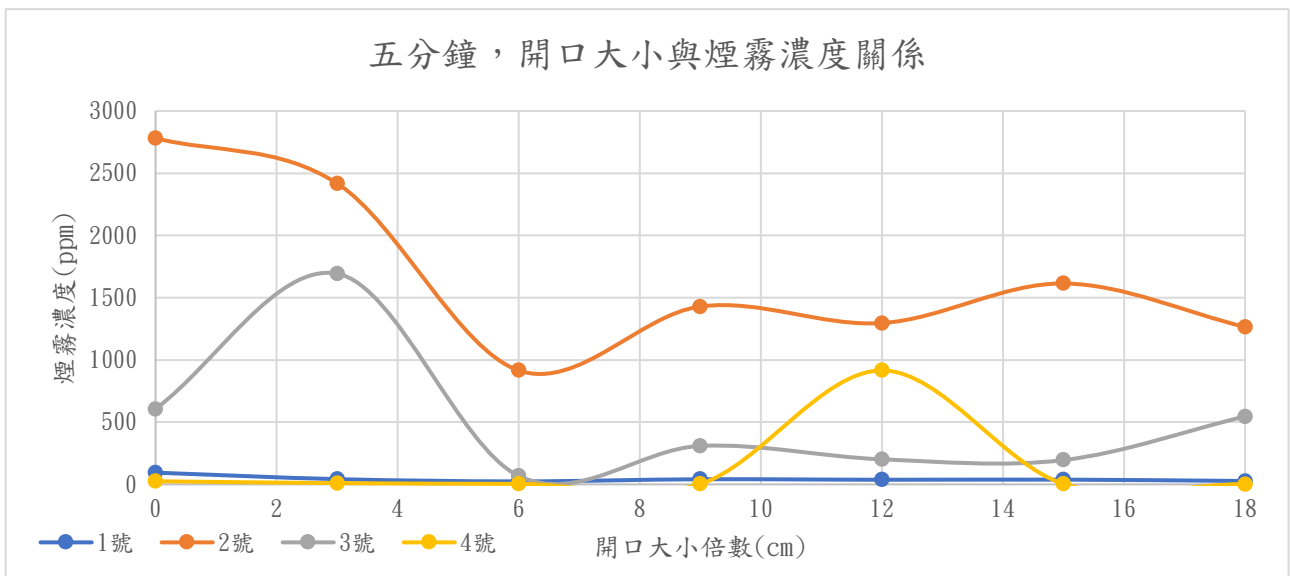


圖 117 實驗10-1-4實驗結果

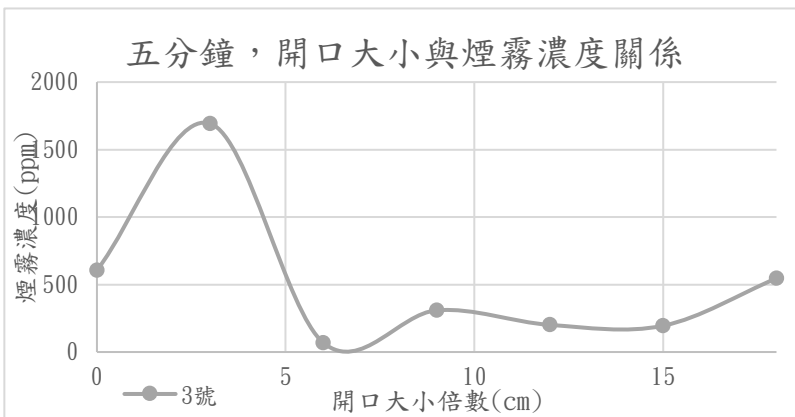


圖 116 實驗10-1-4實驗結果

實驗10討論：

●可發現若以3號感應器或4號感應器為例，結果皆符合實驗假設，但若以位於最上方的1號及2號來說，實驗不符合架設，那是因為倉體過大，距離發煙源距離太遠所導致之結果。

(二) 實驗11及12：改變開口數量與煙霧擴散程度之關係

1. 實驗11：橫式結構中改變開口數量與煙霧擴散程度之關係

本節實驗分為以下組數：

◆ 實驗11連通管數為3

■ 實驗11-1僅改變一面開口大小

實驗11-1-1條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18 °C；室內溼度：89%。

實驗11-1-1說明：開啟第一面，第二、三面保持封閉。

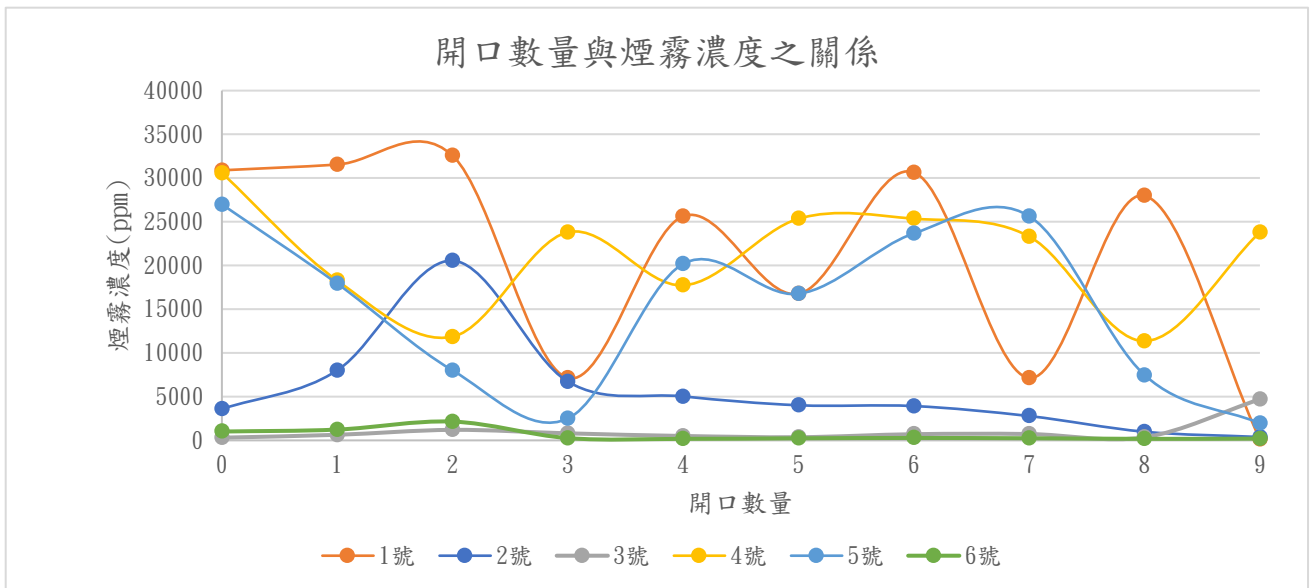


圖 119 實驗11-1-1實驗結果

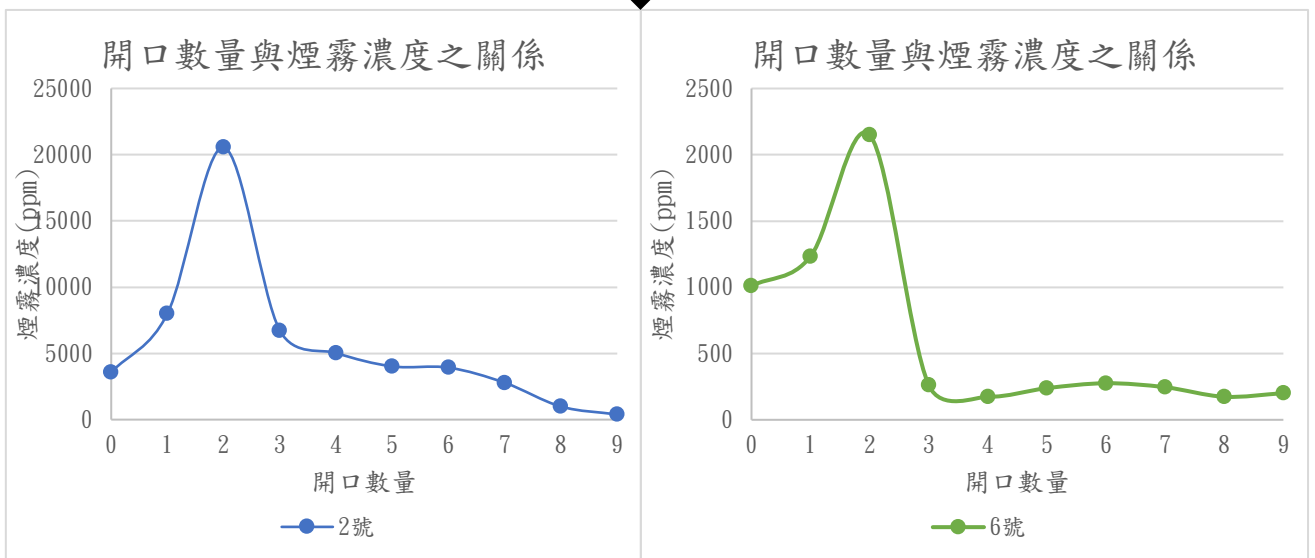


圖 120 實驗11-1-1實驗結果

圖 121 實驗11-1-1實驗結果

實驗11-1-2條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18 °C；室內溼度：89%。

實驗11-1-2說明：第一面抱持開啟，第二面開啟，第三面保持封閉。

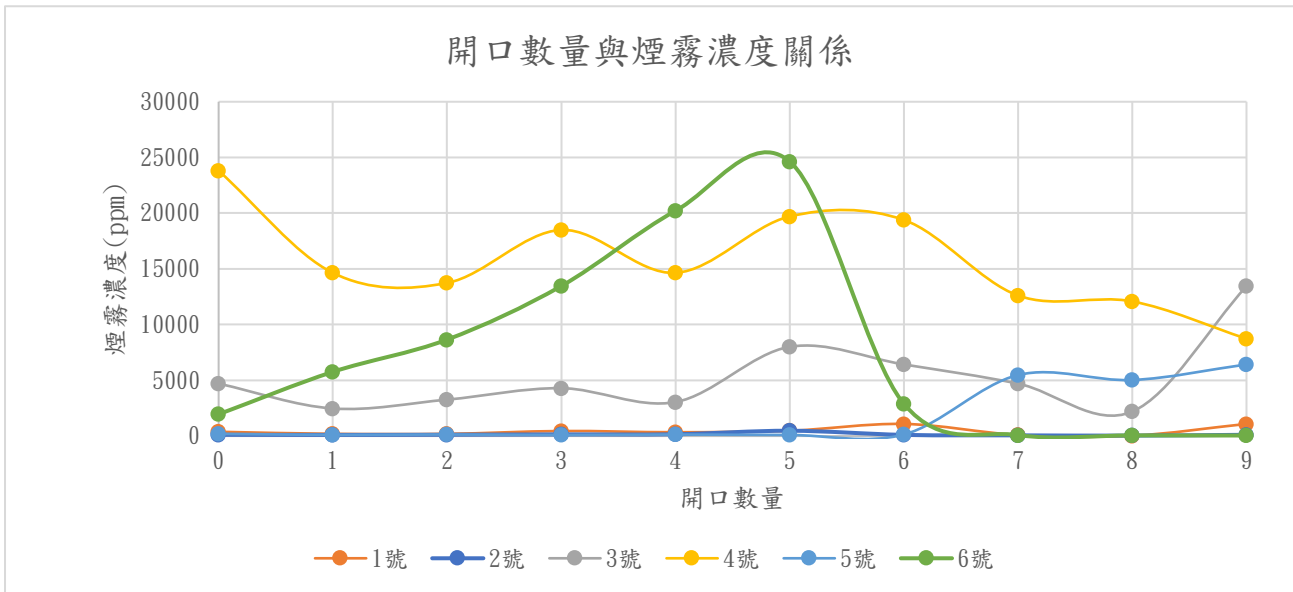


圖 124 實驗11-1-2實驗結果

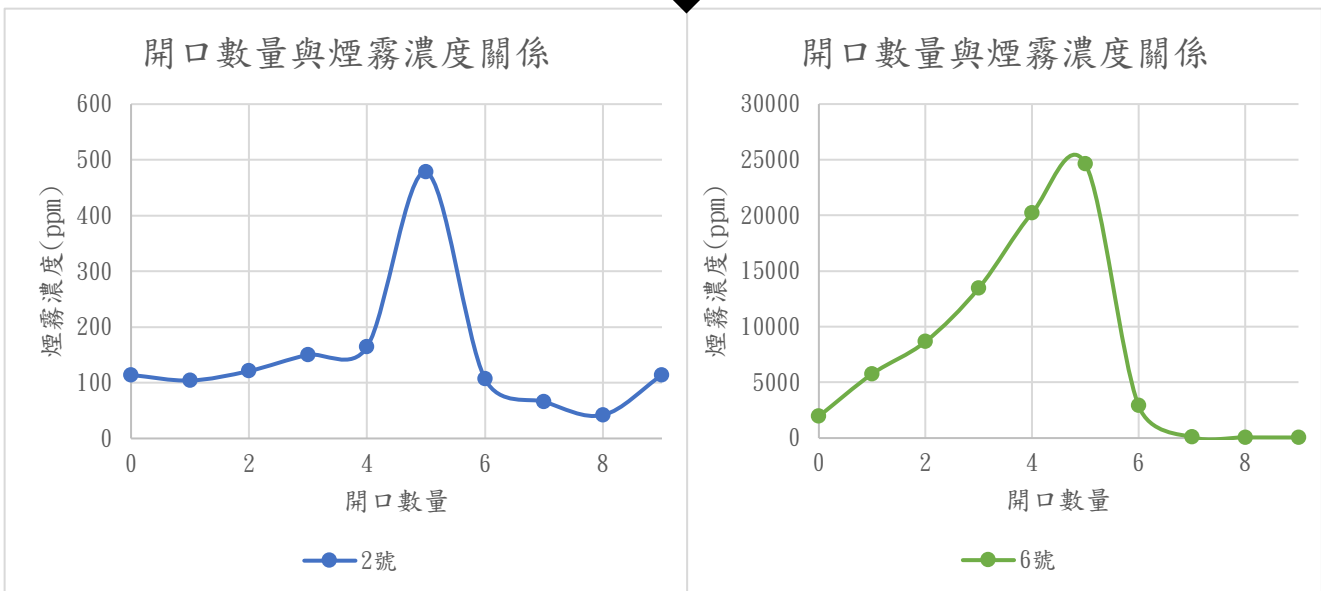


圖 123 實驗11-1-2實驗結果

圖 122 實驗11-1-2實驗結果

實驗11-1-3條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18 °C；室內溼度：89%。

實驗11-1-3說明：第一、二面抱持開啟，第三面開啟。

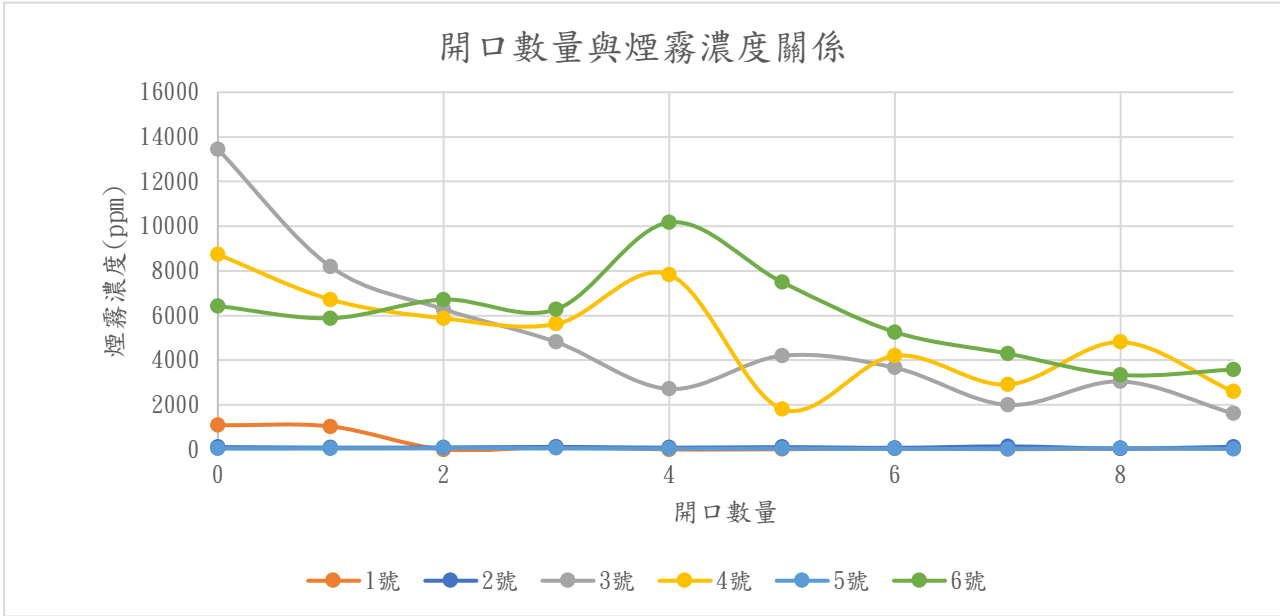


圖 126 實驗11-1-3實驗結果

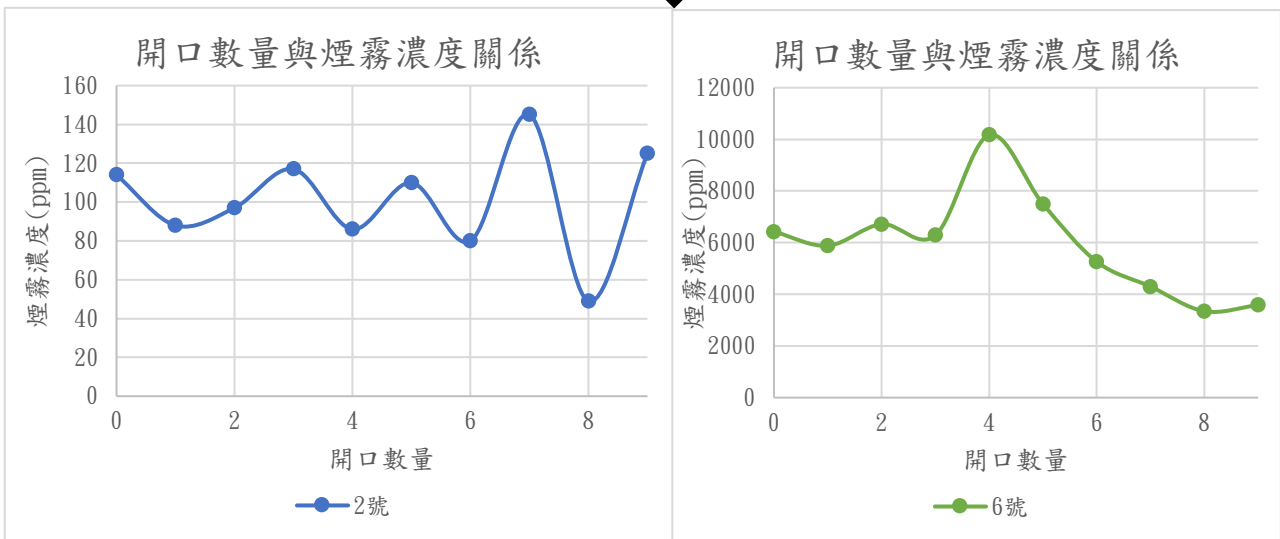


圖 127 實驗 11-1-3實驗結果

圖 125 實驗11-1-3實驗結果

實驗11討論：

- 可經由實驗結果發現討論，若將1、2、3、4、5、6，六個感應器曲線圖將無法看出規律，但若單獨挑出位於連通管頂部的2號及6號，即可發現，曲線十分符合假設，可推測原因為1、3、4、5位於實驗裝置底部，氣流不僅不穩定，還因空間過大，而直接產生對流，造成無法形成規律。
- 除實驗11-1-3的2號感應器以外，其他兩組實驗產生之結果皆符合實驗假設，並且可發現，2號感應器及6號感應器的曲線類似，但6號感應器所偵測之煙霧濃度較濃，可知，並非於火源處煙霧最濃，反倒因開口位置與建築結構所影響。

2. 實驗12：直式結構中改變開口數量與煙霧擴散程度之關係

本節實驗分為以下組數：

- ◆ 實驗12連通管數為3
- 實驗12-1僅改變一面開口大小

實驗12-1-1條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗12-1-1說明：開啟第一面，第二、三、四面保持封閉。

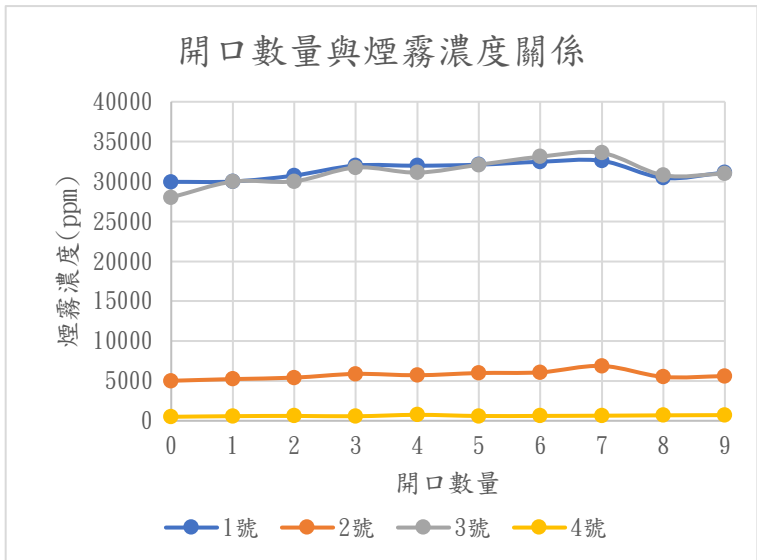


圖 128 實驗12-1-1實驗結果

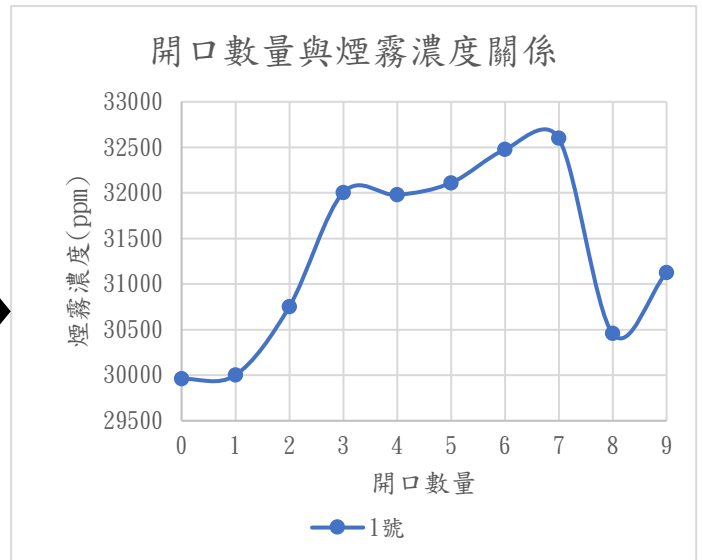


圖 129 實驗12-1-1實驗結果

實驗12-1-2條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗12-1-2說明：第一面保持開啟，第二面開啟，第三、四面保持封閉

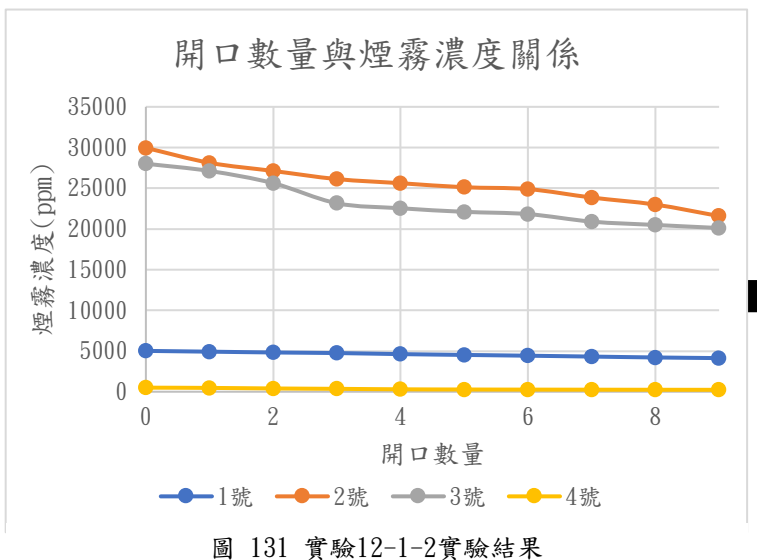


圖 131 實驗12-1-2實驗結果

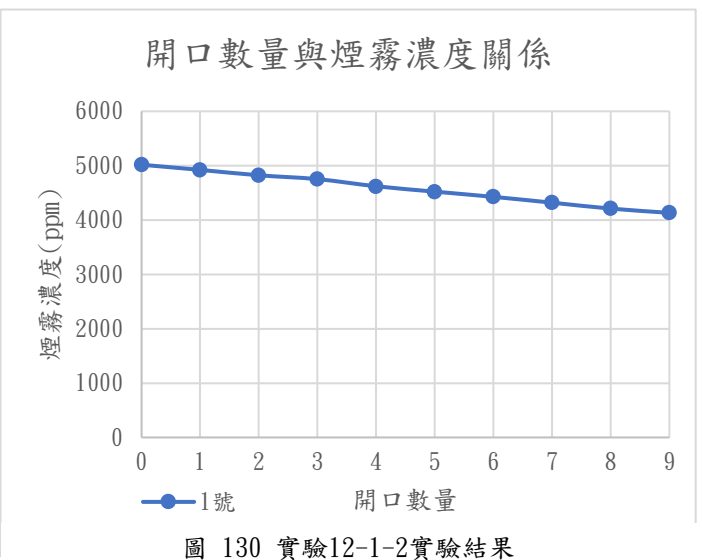


圖 130 實驗12-1-2實驗結果

實驗12-1-3條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗12-1-3說明：第一、二面抱持開啟，第三面開啟，第四面封閉

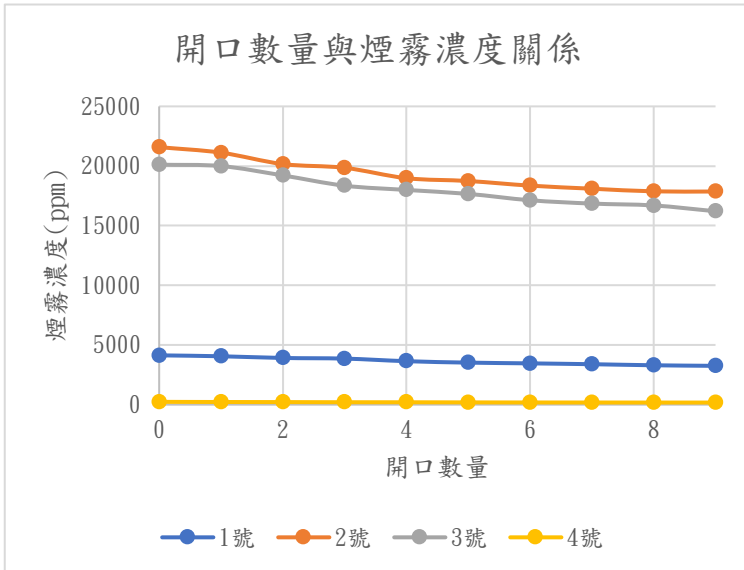


圖 133 實驗12-1-3實驗結果

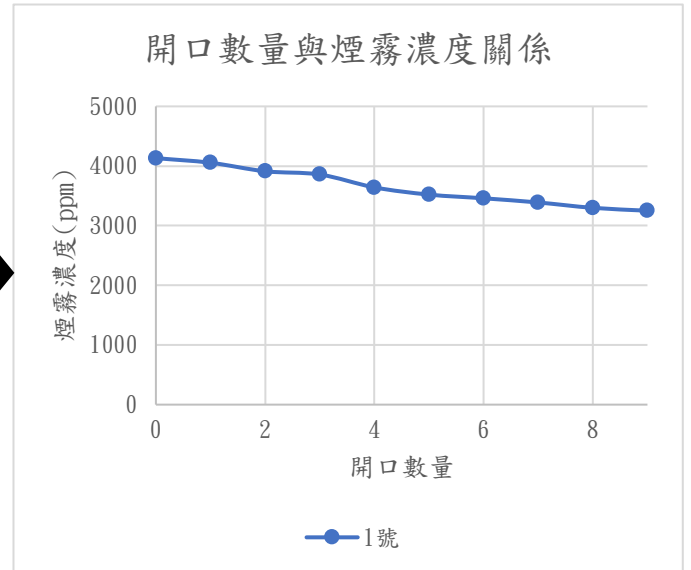


圖 132 實驗12-1-3實驗結果

實驗12-1-4條件(僅改變一面開口大小)：

- 連通管數量：3。
- 室內溫度：18℃；室內溼度：89%。

實驗12-1-4說明：第一、二、三面抱持開啟，第四面開啟

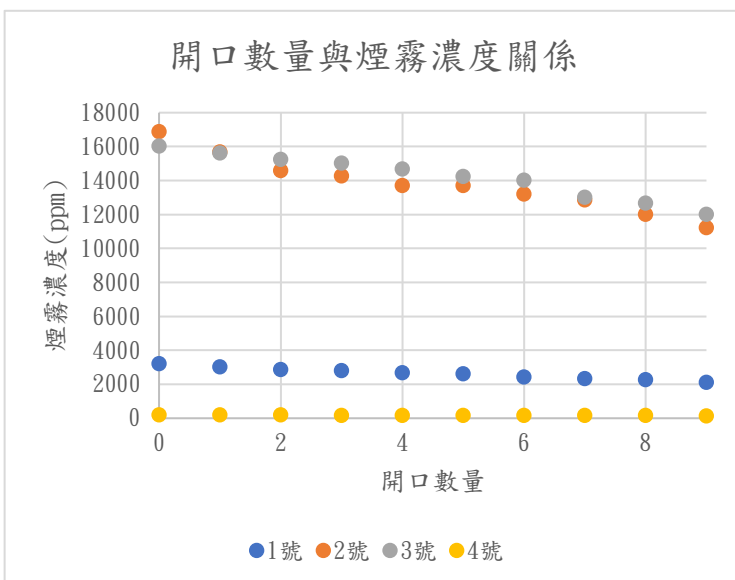


圖 135 實驗12-1-4 實驗結果

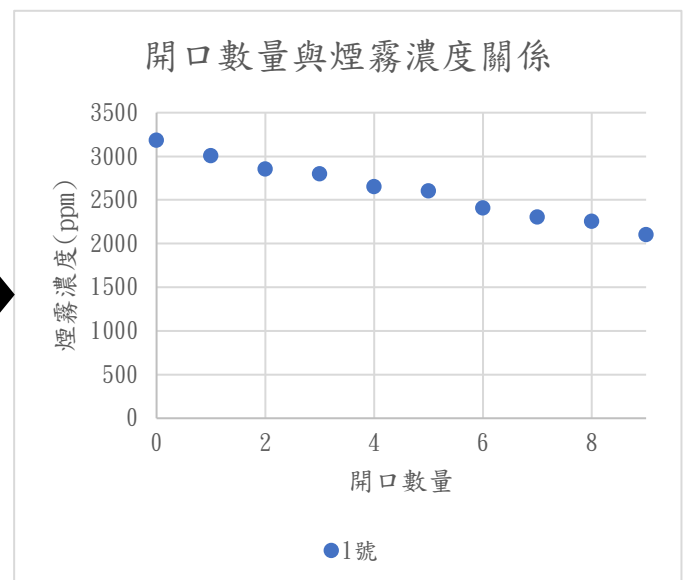


圖 134 實驗12-1-4 實驗結果

五、 A 組火焰燃燒狀況實驗結果（模擬實驗 Simulation Experiment）

模擬實驗由 FDS 進行模擬，模擬列表如下：

- 實驗1-S：模擬開口大小與火焰燃燒狀況之關係
- 實驗2-S：模擬開口數量與火焰燃燒狀況之關係

測試實驗：開口封閉。

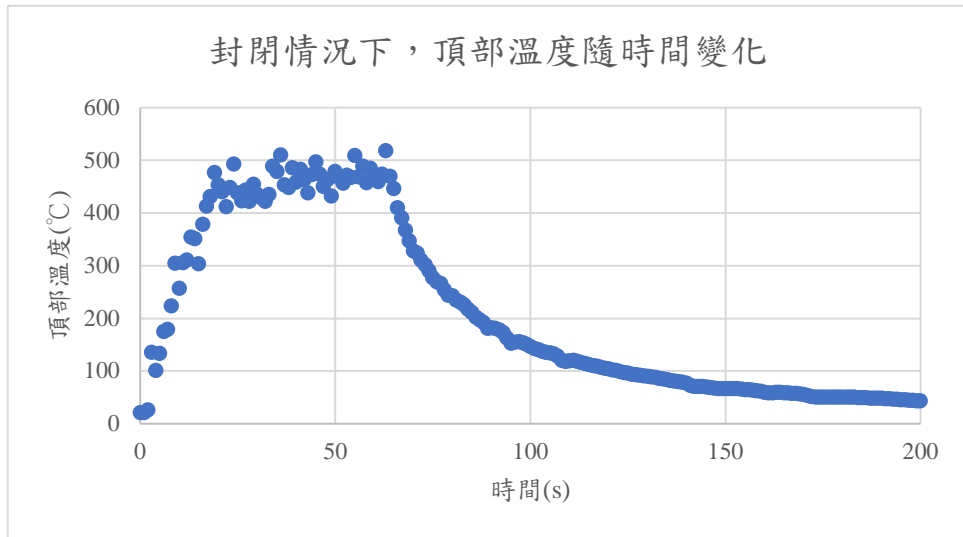


圖 136 實驗1-S-0實驗結果

討論：

- 可發現，頂部溫度並不隨著時間不斷上升，反倒如同實驗假設的開口面積對頂部溫度影響一般呈現二次函數曲線，推斷，可能因火焰於封閉環境下，隨時間將氧氣耗盡，同時因氧氣耗盡而使得火焰強度衰弱。
- 根據以上討論，執行開口大小為0.4 m之實驗，可發現依舊出現二次函數曲線，再次驗證實驗假設。

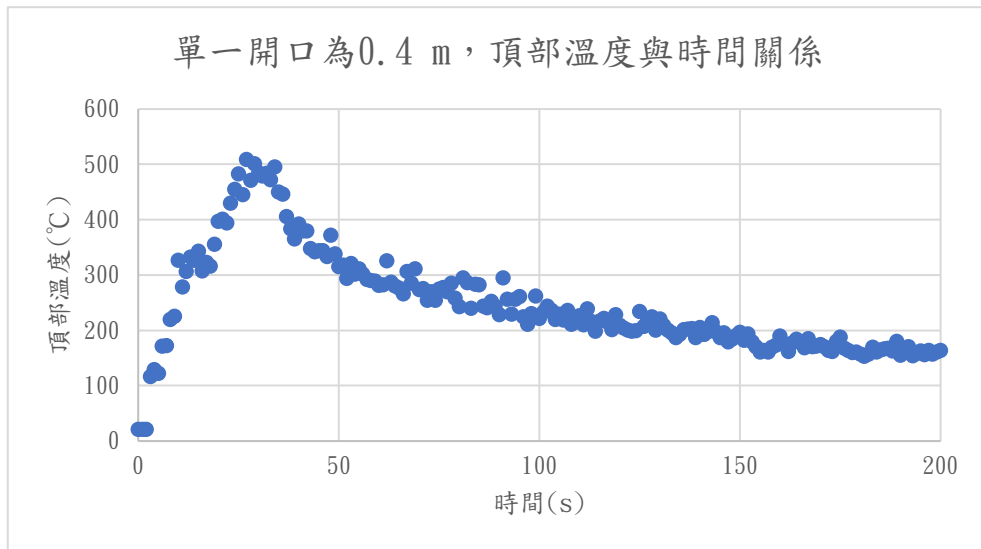


圖 137 實驗1-0-1實驗結果

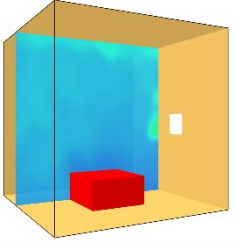
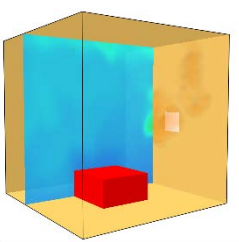
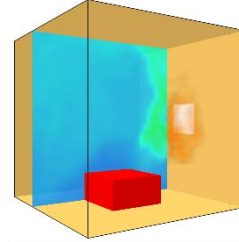
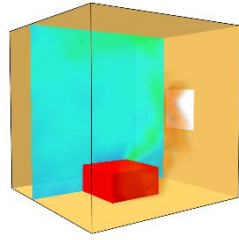
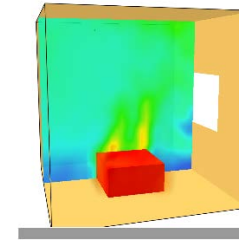
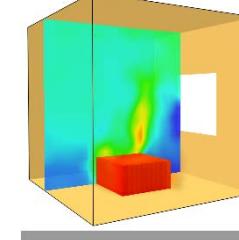
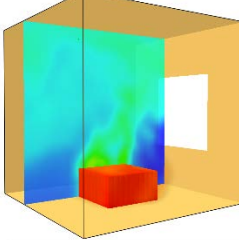
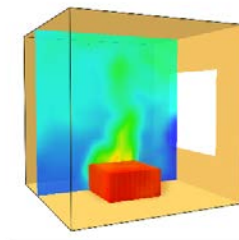
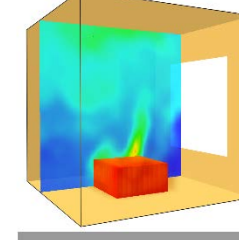
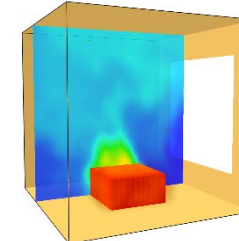
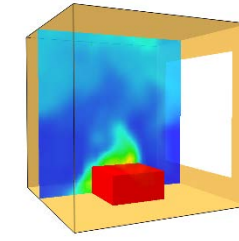
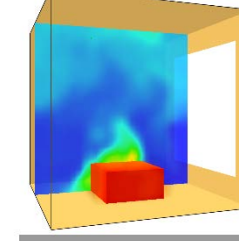
(一) 實驗1-S

實驗假設若火焰高度越高，頂部溫度將越高，故本次實驗應變變因為結構頂部溫度。開口大小變化區間0.2 m至2.8 m 每次變化0.2 m 單位長度。

實驗條件：

- 結構大小：3 m × 3 m × 3 m
- 開口面數：1
- 實驗時間：60秒
- 開口大小區間0.2 m至2.9 m

實驗說明1-S：第一面開啟，第二、三、四面封閉。

表5：各實驗於60秒狀態		
		
開口大小 0.2 m × 0.2 m	開口大小 0.4 m × 0.4 m	開口大小 0.6 m × 0.6 m
		
開口大小 0.8 m × 0.8 m	開口大小 1 m × 1 m	開口大小 1.2 m × 1.2 m
		
開口大小 1.4 m × 1.4 m	開口大小 1.6 m × 1.6 m	開口大小 1.8 m × 1.8 m
		
開口大小 2 m × 2 m	開口大小 2.2 m × 2.2 m	開口大小 2.4 m × 2.4 m

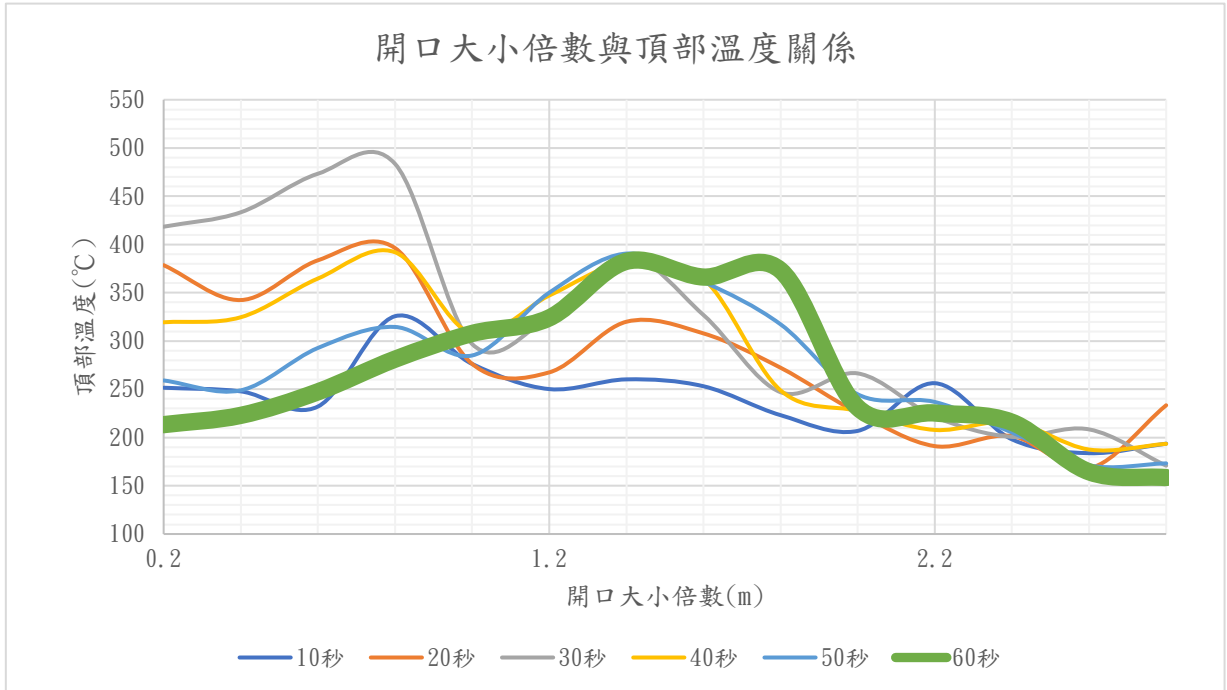
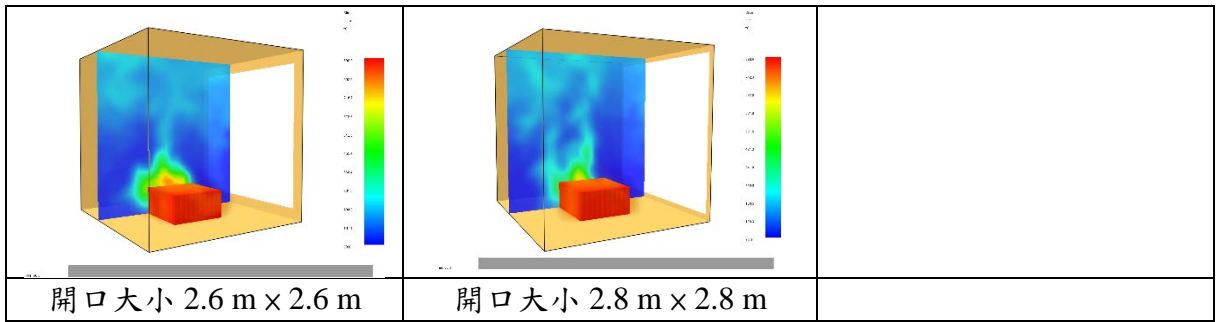


圖 138 1-S-1實驗結果

(二) 實驗2-S

實驗假設若火焰高度越高，頂部溫度將越高，故本次實驗應變變因為結構頂部溫度。開口數量變化區間1-9每次變化1。

實驗條件：

- 結構大小：3 m × 3 m × 3 m
- 開口面數：1
- 實驗時間：60秒
- 開口數量1-9。

實驗2-S 說明：第一面開啟，第二、三、四面封閉。

表6：各實驗於60秒狀態

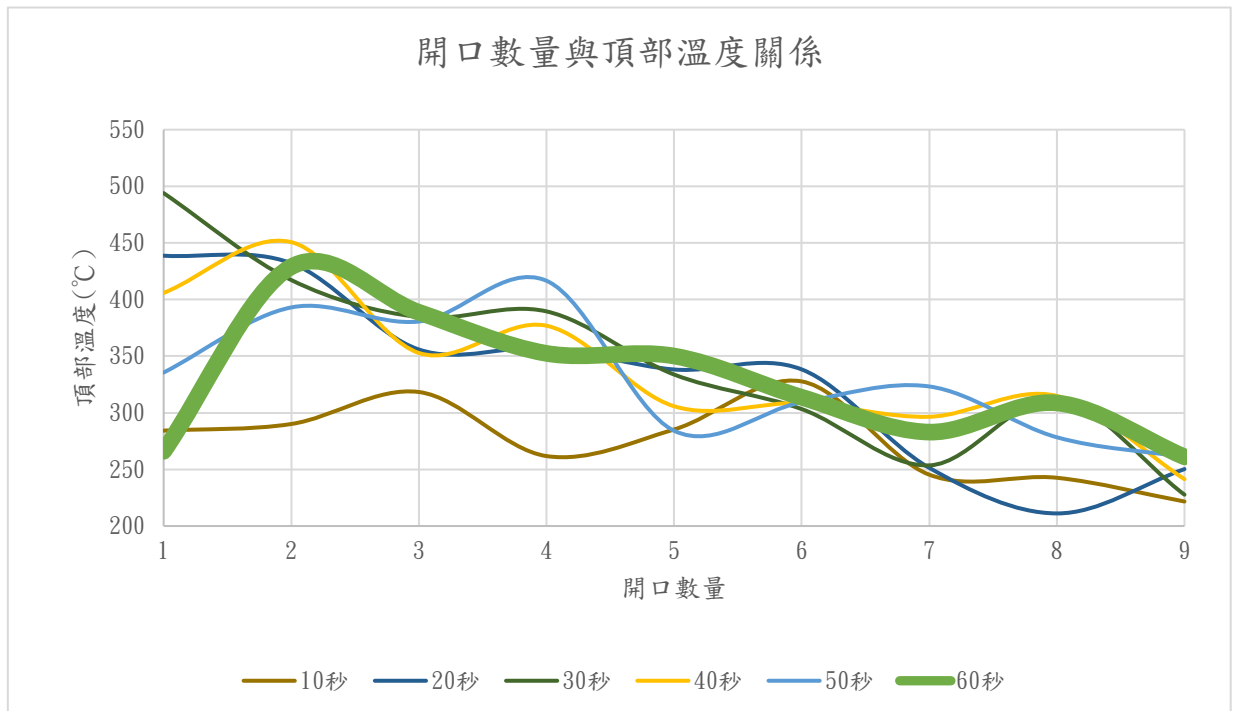
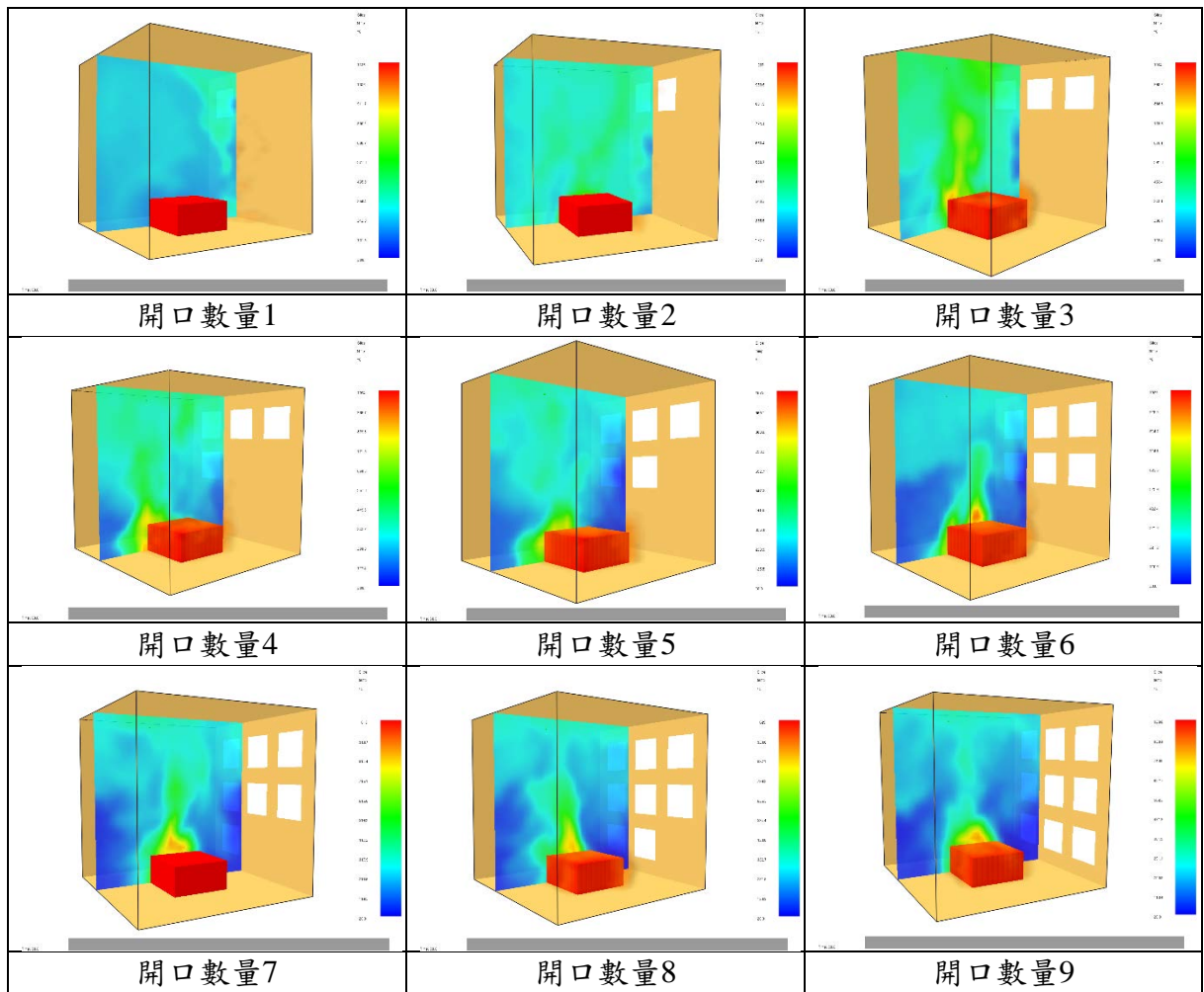


圖 139 2-S 實驗結果

討論：

- 經以上兩組實驗可發現，於模擬實驗產生之結果，依舊符合實驗假設之

六、 綜合討論

(一) 火焰燃燒狀況

實驗1與實驗2之實驗結果可驗證實驗假設，並且可以發現以下現象：

1. 在火焰高度數據趨勢方面符合假設，形成近似二次函數曲線之結果。
2. 雖當開口越大時，氣流與溫度容易散掉，火焰竄高的幅度將大幅減少，但火焰同時也需要氧氣，故當氣流引進建築物時火焰會大幅升高。
3. 火焰在半密閉結構下燃燒，容易產生負壓現象，從而產生煙囪效應，造成火勢蔓延。
4. 如果是在現實中，開放式的建築物不容易形成烽火爆，而有天井或四周多為封閉的建築物則容易形成烽火爆及煙囪效應。
5. 在火焰高度方面，可發現開口數量相較於開口大小有更大影響。
6. 熱解速率與空氣進流率之公式如下

$$\dot{m}_T = 0.22\dot{m}_a \text{ kg/s}$$

從本公式中可得知，空氣進流率與熱解速率為正相關(即氣流越大，火焰燃燒反應越快，更快燃燒完畢，火焰高度越低，從實驗1-2-1中可驗證本實驗假設)

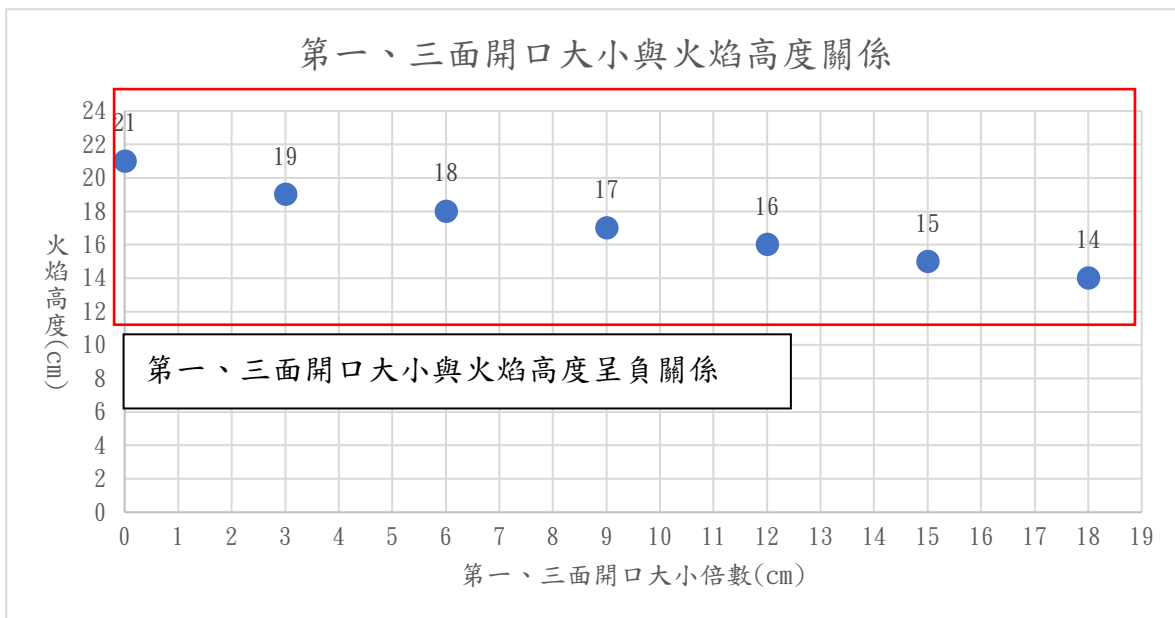


圖 140 實驗1-21結果

7. 經過模擬實驗驗證，可發現依實驗時間60秒，本實驗結果符合實驗假設，若10-50秒的時間，可發現因實驗時間太短，實驗結果不可用。

(二) 煙霧發煙量

實驗3及實驗4之實驗結果可驗證實驗假設，並且可以發現以下現象：

- (一) 在煙霧發煙量數據趨勢方面符合假設，形成近似二次函數曲線之結果。
- (二) 可發現在還未進入發煙量最高點時，同物理模型所敘述，氣流量等同於其發煙量，如實驗3-1-2所示：

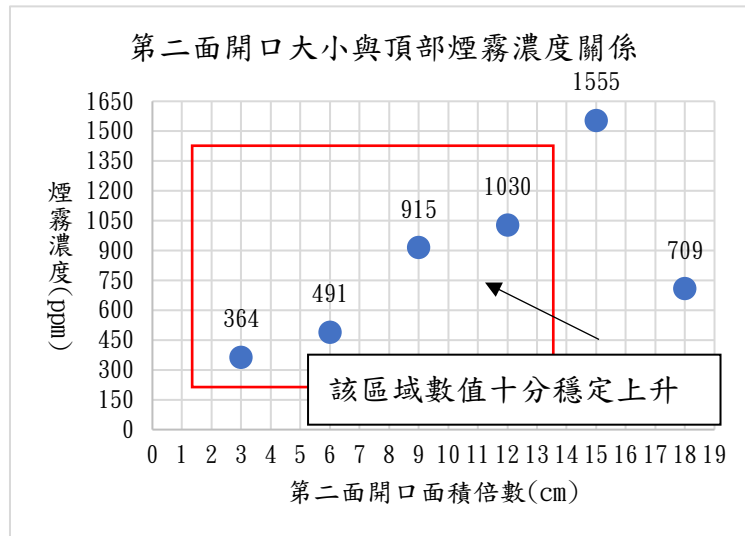


圖 141 實驗3-1-2結果

$$\dot{m} = 0.096 P \rho_0 y^2 g^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{2}}$$

發煙量如上述公式所描述，幾乎等同於該情況下氣流量。

(三) 煙霧擴散程度

實驗5、實驗6、實驗7與實驗8實驗結果可驗證實驗假設，並且可以發現以下現象：

1. 在煙霧擴散程度的數據趨勢方面符合假設，形成近似二次函數曲線之結果。
2. 煙霧擴散程度在居室(連通管)無開口情況下，末端的居室煙霧濃度比起點的煙霧濃度更高，可證明，雖煙霧發煙量大多數來自於氣流，但在氣流流進時也耗損了一部分。
3. 實驗過程中產生了許多新的結果，以實驗5-1-3-2為例，其狀況為三邊開口同時增加，可發現，因同時遞增，平衡十分容易打破，所以在最高點情況下，無論是上升還是下降，都產生十分陡峭之曲線。

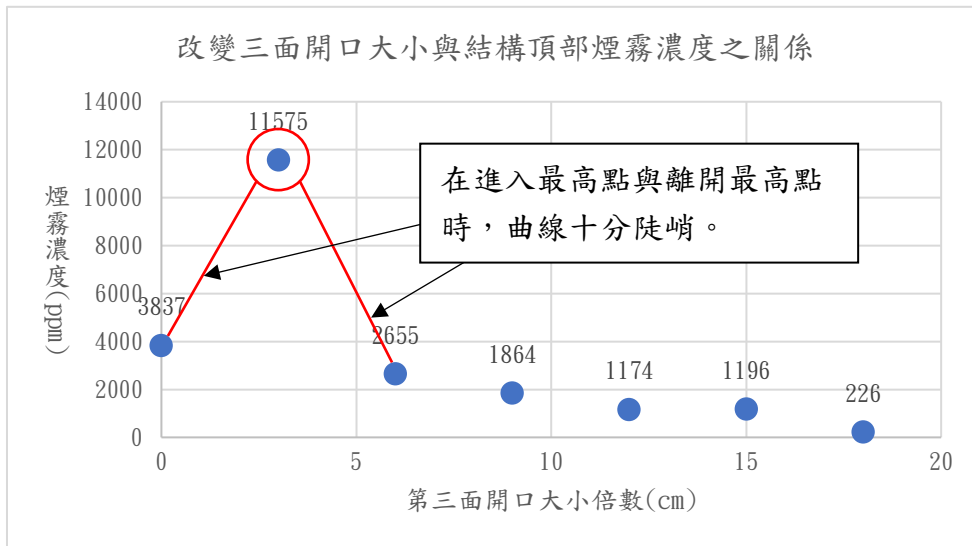


圖 143 實驗5-1-3-2結果之分析

4. 橫式與直式的建築結果的差異來源於重力加速度的作用、煙霧本身向上之特性以及該結構條件下所擁有面數，橫式建築與直式建築接開口一面比較：

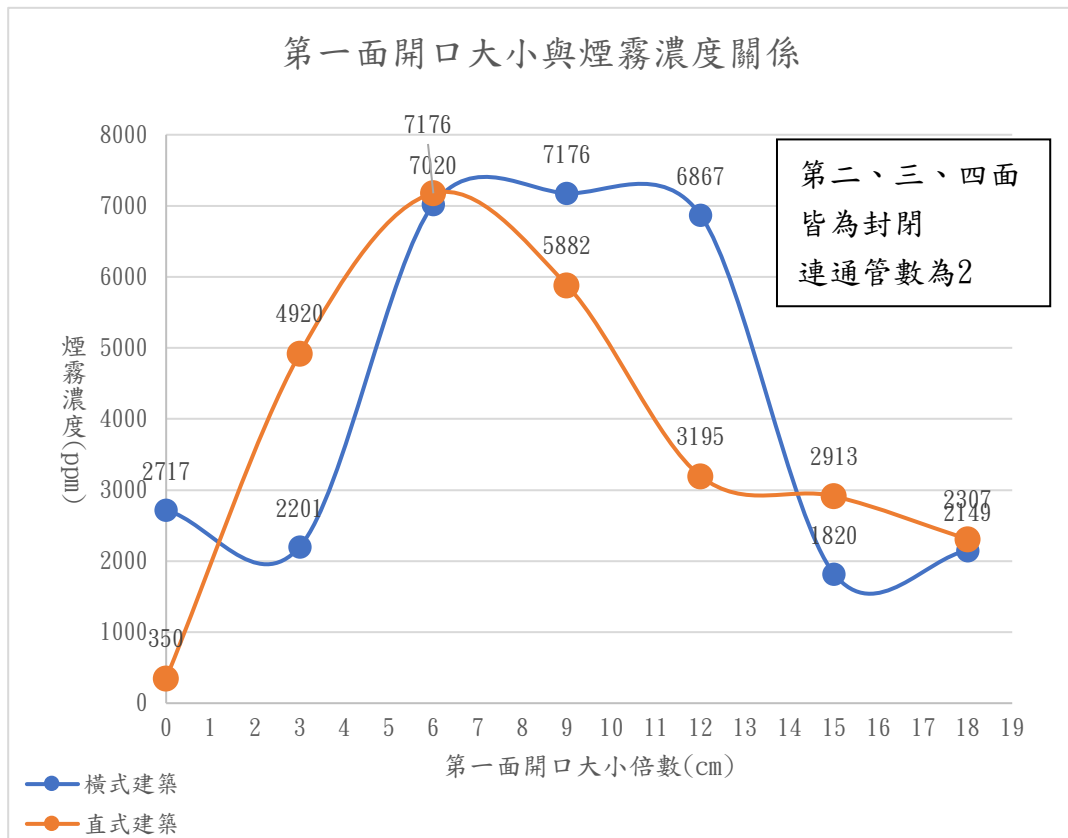


圖 142 連通管實驗中，僅開口一面橫式結構與直式結構之比較(實驗5-1-1及實驗6-1-1)

經比較可發現直式結構平均濃度較低，橫式結構煙霧濃度平均為4538.8，直式結構煙霧濃度平均為4398.8，且兩者最高濃度相等，可知直式結構的濃度主要因重力所耗損。

5. 但在往後開口更多實驗中，因目前連通管並不高，重力加速度影響將變小，兩者不同將受煙霧本身向上之特性以及該結構條件下所擁有面數影響。

以下為各條件皆相同橫式建築與直式建築之比較：

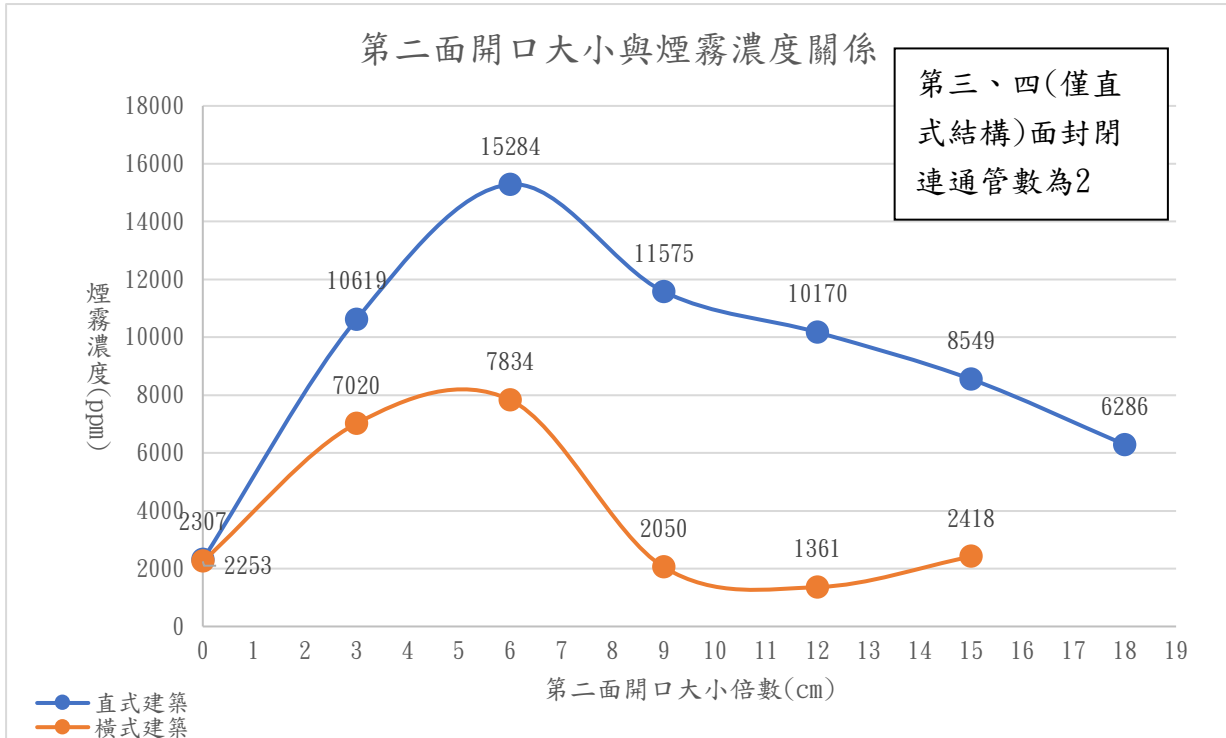


圖 144 直式結構及橫式結構開口面積相同之比較 (第二面變化)(實驗5-1-2及實驗6-1-2)

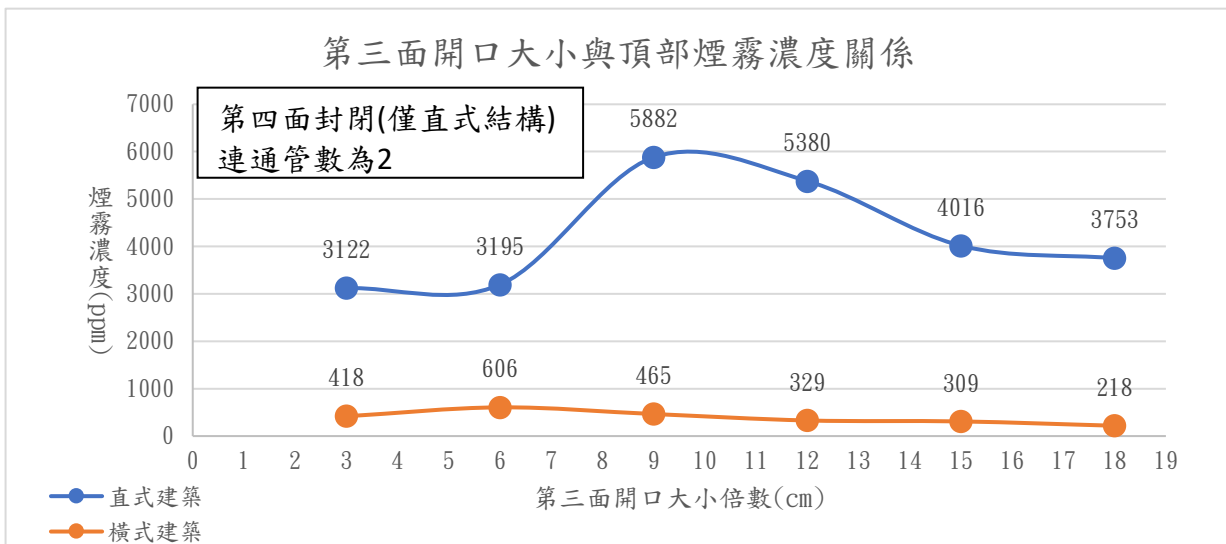


圖 145 直式結構及橫式結構開口面積相同之比較 (第三面變化)(實驗5-1-3及實驗6-1-3)

從本實驗結果可發現，在兩者開口面積皆相同情況下(因直式建築第四面封閉可忽略)，氣流量相同，起點煙霧濃度相同，但直式結構煙霧濃度比橫式結構更高，可見煙霧向上竄之特性，因此在逃生時，直式的結構是十分危險之結構。

肆、 結論與應用

一、 研究結論

1. 從現研究階段中可發現 A 組火焰狀況、B 組煙霧發煙量、C 組擴散情況實驗結果與由理論所得出之實驗假設相符。並可由物理模型代入進行演算。
2. 印證實驗假設所說，ABC 組的實驗結果在特定開口情況下將形成最嚴重災情。
3. 火焰高度、煙霧發煙量、煙霧擴散程度(以下簡稱火源狀態)與引進之空氣量有直接關係，而引進空氣量則與開口數量意為火源周圍結構有直接關係，三者循環關係如以下圖表：

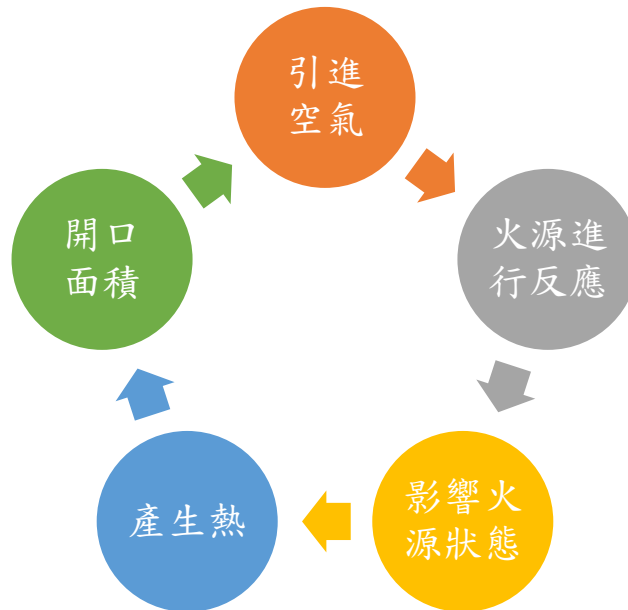


圖 146 火源狀態、空氣量、開口數量三者循環關係

在理論中有提到當火場內部過熱時，有可能震破玻璃，影響結構開口面積。

若不考慮火源有可能反過來影響開口面積，則三者關係如下：

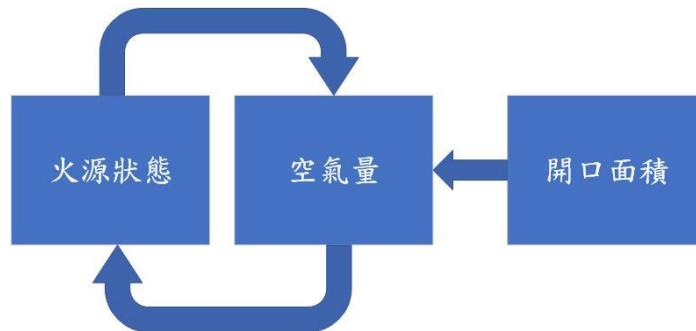


圖 147 三者相互影響關係

二、 應用

(一) 火災防治

如同本研究動機描述之初衷，希望此研究結果能應用於火災防治，避免更多傷亡。許多傷亡是火災時，因為逃生慌亂或救援緊急時，擊破玻璃造成火焰反撲，讓災情更加嚴重，希望能幫助消防人員救災時更有效地進行判斷。

(二) 建築

規劃出最適合的門窗開口大小與數量，減少火災時的損害與傷亡。

(三) 排煙系統

排出煙霧或引進氣體不一定需要現有的抽風系統，可不依靠風扇來引進氣體，在溫度不變情況下，找出其中線性關係，僅依靠結構變化即可導入氣體，應用於廚房或大樓排煙。

(四) 調氣節能

以實驗及模擬數據結合建築物結構計算，找出最適合的門窗開口大小與數量達到調節氣流甚至節能功效。

三、 未來展望

在這次實驗告一段落後發現，按照此結構能夠延伸的實驗非常多，希望未來能夠將延伸的實驗完成，並加以精進；雖然大樓結構變化多端，但按照目前方式，能抽象過後模擬出幾種常見的火場現場，大樓內部的居室、連成一線的大樓；但同時因為是煙與火，並不好控制，希望未來能夠帶入更多電腦內「理想狀態下」的模擬，藉此與實際情況的實驗進行比較與激盪，得出更加精確的結果。

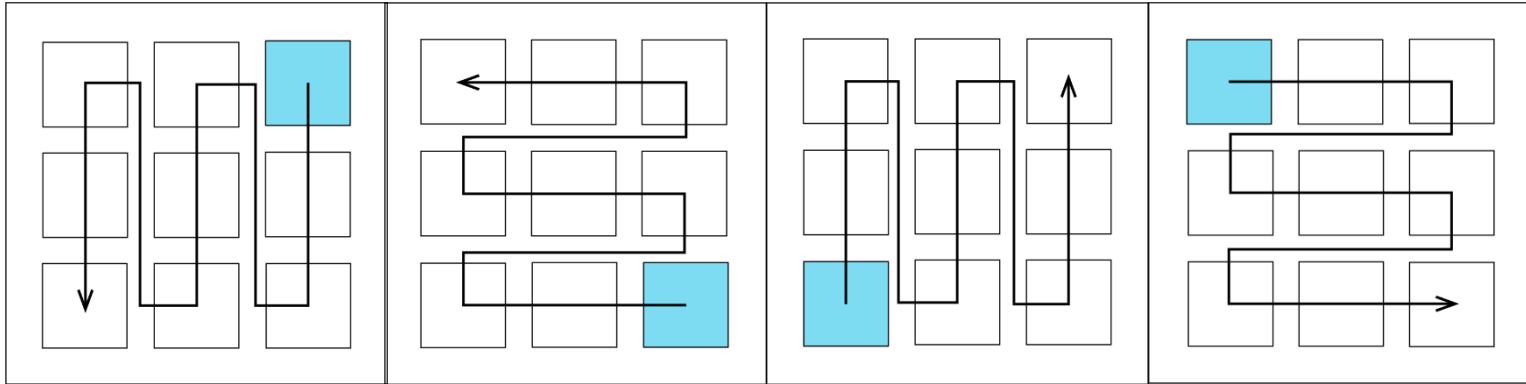
在本段落的研究中，因為時間緊迫問題及電腦運算配備之緣故，未能將電腦模擬的實驗做到完備，並在煙霧擴散程度的系列實驗中未能完成3個連通管的實驗，希望未來能以這個方向搭配現有數據，更精進目前研究。

未來希望能完成的實驗安排如下：

(一) 實體實驗部分

1. 火焰燃燒狀況

- (1) 使用直式連通管或高度更高之結構進行實驗。
- (2) 開拓更多種結構變化可能。
- (3) 在等比變化面數開口上進行更多變化，例如第二、四面開口全開，等比改變第一、三面等。
- (4) 在開口數量方面可變化開口順序，包含但不限於以下三種：



2. 煙霧發煙量

- (1) 開拓更多種結構變化可能性。
- (2) 除改變結構之外，也可同時進行結構外部氣流溫度對發煙量影響。
- (3) 因煙霧向上，本次實驗以結構頂部來判斷發煙量，未來可綜合底部測得煙霧濃度進行實驗與分析。

3. 煙霧擴散程度

- (1) 目前連通管以2個連通管為主，未來希望可以將3個連通管，甚至4個連通管納入實驗。
- (2) 目前開口皆位於煙霧起點，未來可嘗試進行開口位於末端，煙霧起點封閉，或在連通管數為3時，僅開啟中段開口，以達到更完善的實驗結果。

(二) 模擬實驗部分

1. 將現有實體實驗在電腦中模擬。
2. 將未來所規劃之實體實驗在電腦中模擬。

伍、 參考文獻

A·期刊論文（作者□出版年□論文篇名□期刊名稱□卷期□頁數，按姓氏筆畫排序）

沈子勝 民國九十五年一月 隧道火災緊急救援滅火設施研究 交通部台灣區國道新建工程局

林慶元 民國八十二年七月三十一日 鋼骨結構耐火被覆材檢驗基準研究 財團法人台灣營建研究中心

陳理鵬 2021 老人長照機構室內通風環境與煙霧擴散之競合分析」 碩士論文，國立高雄科技大學環境與安全衛生工程系

陳榮俊 民國 95 年 不同熱流場環境下圓錐量熱儀數據應用於火場模擬及材料火害反應評估之研究 國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程研究所碩士論文

張瀚展 民國一百零三年七月 居室火災閃燃後火焰竄出開口對外牆影響之研究

張名振 民國一百一十年七月 火場之溫度與濃煙流場探討-以學生宿舍為例 遠東科技大學機械工程系碩士在職專班碩士論文

葉世文 民國九十四年十二月 高科技廠房建築物防火安全評估法之建構與實例驗證 內政部建築研究所研究報告

葉世文 民國九十五年十二月 物流倉儲類建築物防火安全評估基準之研究 內政部建築研究所研究報告

楊靖威 民國九十一年六月 建築性能式防火設計程序之研究—以地下街為例 國立交通大學機械工程學系碩士論文

楊智欽 民國九十八年六月 鐵路地下隧道及車站之防火性能設計研究 國立交通大學機械工程學系碩士論文

鄭淑珺，“製程氣混燒分析與對沖流擴散火焰合成奈米碳管研究”，國立成功大學機械工

程學系碩士論文，民國96年。

蘇崇輝¹、郭定睿²、石國瑞³、李岱翰⁴、董安傑⁵、葉琮勤⁶ 2021年五月 以數值模擬與模型實驗探討 U 型隧道入口坡度對隧道火場影響 *The hazard analysis of U-shaped tunnel fires due to entrance slopes using numerical simulations and model experiments* 燃燒季刊

K. Kawagoe, 1967, “*Estimation of Fire Temperature-Time Curve in Rooms*”, Third Report BRI Research Paper No.29, Building Research Institute.

Ahmad T and Faeth GM, *Turbulent Wall Fire*, 17th Symposium (International) on Combustion, pp. 1149-1160, 1978

Kokkala M, Baroudi D and Parker WJ, *Upward Flame Spread on Wooden Surface Products : Experiments and Numerical Modelling*, Fire Safety Science- Proceedings of the Fifth International Symposium, pp. 309-320, 1997

Qian C and Saito K, *An Empirical Model for Upward Flame Spread Over Vertical Flat and Corner Walls*, Fire Safety Science- Proceedings of the Fifth International Symposium, pp. 285-296, 1997

Quintiere JG and Lee CH, *Ignitor and Thickness Effects on Upward Flame Spread*, Fire Technology, Vol.34, No.1, pp. 18-38, 1998

Tsai KC and Drysdale D, *Using Cone Calorimeter Data for The Prediction of Fire Hazard*, Fire Safety Journal, Vol.37, pp. 697-706, 2002

Tsai KC and Drysdale D, *Upward Flame Spread : Heat Transfer to Unburned Surface*, The 7th Symposium of IAFSS, 2001

Wang HY, Coutin M and Most JM, *Large-Eddy-Simulation of Buoyancy-Driven Fire Propagation Behind a Pyrolysis Zone Along a Vertical Wall*, Fire Safety Journal, Vol.37, pp. 259-285, 2002

Rangwala AS, Buckley SG and Torero J, *Upward Flame Spread on a Vertically Oriented Fuel*

Surface : The Effect of Finite Width, Proceedings of The Combustion Institute, Vol.31, pp.2607-2615, 2007

Pizzo Y, Conclave JL, Querre P, Coutin M and Porterie B, *Width Effects on Early Stage of Upward Flame Spread over PMMA Slabs : Experimental Observations*, Fire Safety Journal, Vol.44, pp. 407-414, 2009

Woods J, Fleck B and Kostiuk L, *Effects of Transverse Air Flow on Burning Rates of Rectangular Methanol Pool Fires*, Combustion and Flame Vol.146, pp. 379-390, 2006

Nmira F, Consalvi JL, Boule P and Porterie B, *Numerical Study of Wind Effects on the Characteristic of Flame From Non-Propagating Vegetation Fires*, Fire Safety Journal, Vol.45, pp. 129-141, 2010

Huang H, Ooka R, Liu N, Zhang L, Deng Z and Kato S, *Experimental Study of Fire Growth in a Reduced-Scale Compartment Under Different Approaching External Wind Conditions*, Fire Safety Journal, Vol.44, pp. 311-321, 2009

Sugawa O, Momita D and Takahashi W, *Flow Behavior of Ejected Fire Flame/Plume From an Opening Effected by External Side Wind*, Fire Safety Science-Proceedings of the Fifth International Symposium, pp. 249-260, 1997

Yokoi S, *Study on the Prevention of Fire-Spread Caused by Hot Upward Current*, The Building Research Institute, pp. 78-89, 1960

B · 圖書單行本

王曉剛 流體力學究竟在說什麼?: 簡單讀懂流體力學的奧妙 初版 樂果文化 民國一零九年

方中 基礎流體力學 初版 滄海 民國一一零年

楊冠雄□建築物防火之煙控設計分析□初版□台灣□高雄復文圖書出版社□40頁-53頁□民國八十五年四月

許宗熙 □ 建築防災計劃準則及防火避難安全設計規範之研究 初版 台灣 內政部建築研究所 民國八十八年六月

陳弘毅 火災學 再版 台灣 鼎茂圖書出版公司 民國八十五年三月

張國平 熱力學導論 四版 高立圖書 民國一零九一月

李勝利 FDS 火災數值模擬 初版 化學工業出版社 2019/11/01

Editors: Hurley, M.J., Gottuk, D.T., Hall Jr., J.R., Harada, K., Kuligowski, E.D., Puchovsky, M., Torero, J.L., Watts Jr., J.M., Wieczorek, C.J. (Eds.) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* Springer-Verlag New York 2016

Nist *User's Guide for Smokeview Version 5: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data (NIST SP 1017-1)* CreateSpace Independent Publishing Platform January 15, 2014

陸、 附錄：FDS 數值

嘗試使用軟體 FDS 模擬現有 A 組部分實驗，但因該軟體依現有理論進行模擬，若有現今理論不可解釋或遺漏之現象，則將不可完全模擬完成。並因軟體限制，將結構設定為 3 m × 3 m，即等比將實體模型縮放約 10 倍。

測試實驗

實驗條件：

- 結構大小：3 m × 3 m × 3 m
- 封閉

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

一、 實驗 1-S：模擬開口大小與火焰燃燒狀況之關係

實驗條件：

- 結構大小：3 m × 3 m × 3 m
- 開口大小區間：0.2 m - 2.8 m，每次變化 0.2 m
- 開口面數：1
- 實驗時間：60 秒

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 1.4, 1.6, 1.6, 1.4, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-s-1：開口大小0.2 m × 0.2 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 1.4, 1.6, 1.6, 1.4, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-s-2：開口大小0.4 m × 0.4 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 1.3, 1.7, 1.7, 1.3, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-s-3：開口大小0.6 m × 0.6 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 1.2, 1.8, 1.8, 1.2, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-s-4：開口大小0.8 m × 0.8 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 1.1, 1.9, 1.9, 1.1, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-s-5：開口大小1 m × 1 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 1, 2, 2, 1, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-s-6：開口大小1.2 m × 1.2 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 0.9, 2.1, 2.1, 0.9, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```


實驗1-s-7：開口大小1.4 m × 1.4 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 0.8, 2.2, 2.2, 0.8, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-S-8：開口大小1.6 m × 1.6 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 0.7, 2.3, 2.3, 0.7, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-S-9：開口大小1.8 m × 1.8 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 0.6, 2.4, 2.4, 0.6, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-S-10：開口大小2 m × 2 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 0.5, 2.5, 2.5, 0.5, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-S-11：開口大小2.2 m × 2.2 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 0.4, 2.6, 2.6, 0.4, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-S-12：開口大小2.4 m × 2.4 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 2.7, 2.7, 0.3, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-S-13：開口大小2.6 m × 2.6 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 0.2, 2.8, 2.8, 0.2, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

實驗1-S-14：開口大小2.8 m × 2.8 m

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./  
&DUMP NFRAMES=60 /  
&VENT XB= 3, 3, 0.1, 2.9, 2.9, 0.1, SURF_ID='OPEN' / window  
&REAC FUEL = 'PROPANE'  
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /  
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /  
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/  
&TAIL /
```

二、 實驗2-S：模擬開口數量與火焰燃燒狀況之關係

實驗條件：

- 結構大小：3 m × 3 m × 3 m
- 開口大小：0.6 m × 6 m
- 開口面數：1
- 實驗時間：60秒

實驗2-S-1：開口數量1

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'  
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/  
&TIME T_END=60./
```

```
&DUMP NFRAMES=60 /
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&TAIL /
```

實驗2-S-2：開口數量2

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/
&TIME T_END=60./
&DUMP NFRAMES=60 /
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&TAIL /
```

實驗2-S-3：開口數量3

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/
&TIME T_END=60./
&DUMP NFRAMES=60 /
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /
```

```
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&TAIL /
```

實驗2-S-4：開口數量4

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/
&TIME T_END=60./
&DUMP NFRAMES=60 /
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&TAIL /
```

實驗2-S-5：開口數量5

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/
&TIME T_END=60./
&DUMP NFRAMES=60 /
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&REAC FUEL = 'PROPANE'
```

```
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&TAIL /
```

實驗2-S-6：開口數量6

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/
&TIME T_END=60./
&DUMP NFRAMES=60 /
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&TAIL /
```

實驗2-S-7：開口數量7

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/
&TIME T_END=60./
&DUMP NFRAMES=60 /
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 0.9, 0.3, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
```

```
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&TAIL /
```

實驗2-S-8：開口數量8

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/
&TIME T_END=60./
&DUMP NFRAMES=60 /
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 0.9, 0.3, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 0.9, 0.3, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&TAIL /
```

實驗2-S-9：開口數量9

```
&HEAD CHID='fire',TITLE='fire'
&MESH XB= 0, 3, 0, 3, 0, 3, IJK = 30, 30 ,30/
&TIME T_END=60./
&DUMP NFRAMES=60 /
```

&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 2.7, 2.1, 0.9, 0.3, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 1.8, 1.2, 0.9, 0.3, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 2.1, 2.7, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 1.2, 1.8, SURF_ID='OPEN' / window
&VENT XB= 3, 3, 0.3, 0.9, 0.9, 0.3, SURF_ID='OPEN' / window
&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1, 2, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /
&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&TAIL /

【評語】 160015

結構與燃燒及煙霧關係之研究，議題新穎，研究主題清楚且聚焦，有人文關懷且可用科學方法檢驗。研究計畫設計周全，研究方法有可取之處。自製變因可調控之模擬建物，以影像攝錄，數位化得火焰高度及煙霧濃度，實驗內容豐富，討論多項參數變因。實體實驗與數據模擬一併呈現，且備有實驗記錄簿與參考文獻，理論分析也能表現物理觀點，說明清晰，表達良好。火焰煙霧在外壁具開口的空間運動，可再改變探測器的位置，變換參數延伸實驗。

實驗的測量如火焰的高度或煙霧的濃度如能仔細校對誤差，考慮多作幾次實驗，了解數據波動的來源，會更好。