

以實驗法及數值模擬交叉探討 隧道火災逆煙層發展與其控制

On the Experimental and Simulation Cross Study of
Backlayer Development and Its Control in Tunnel Fire

碩士研究生：王冠懿

指導教授：張慧蓓 博士

CONTENTS

- 1 研究背景、動機與目的
- 2 文獻回顧
- 3 研究方法
- 4 結果與討論
- 5 結論與建議



PART 01

研究背景、動機與目的

研究背景

許多文獻對照模擬及實驗的數據皆有顯著差距

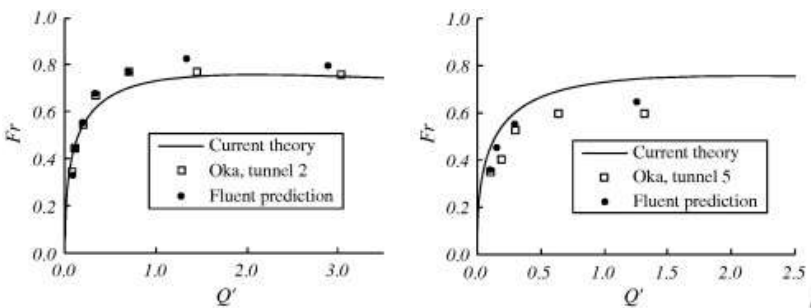
用FDS比對Oka等人的實驗
以及理論公式



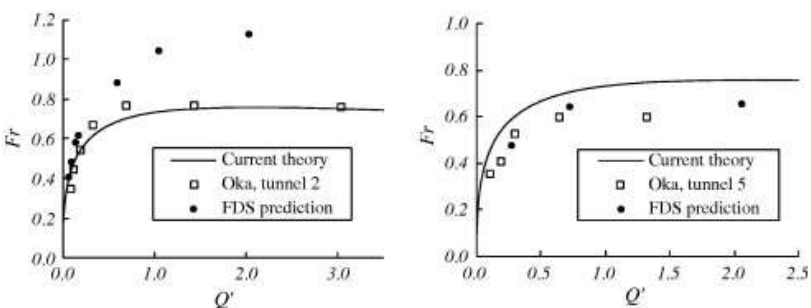
1:20 隧道模擬比對實驗



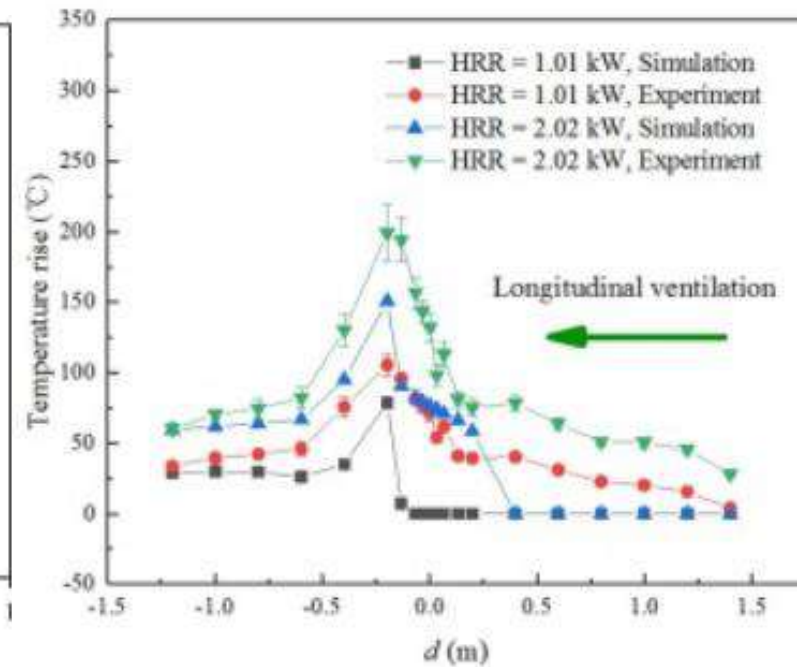
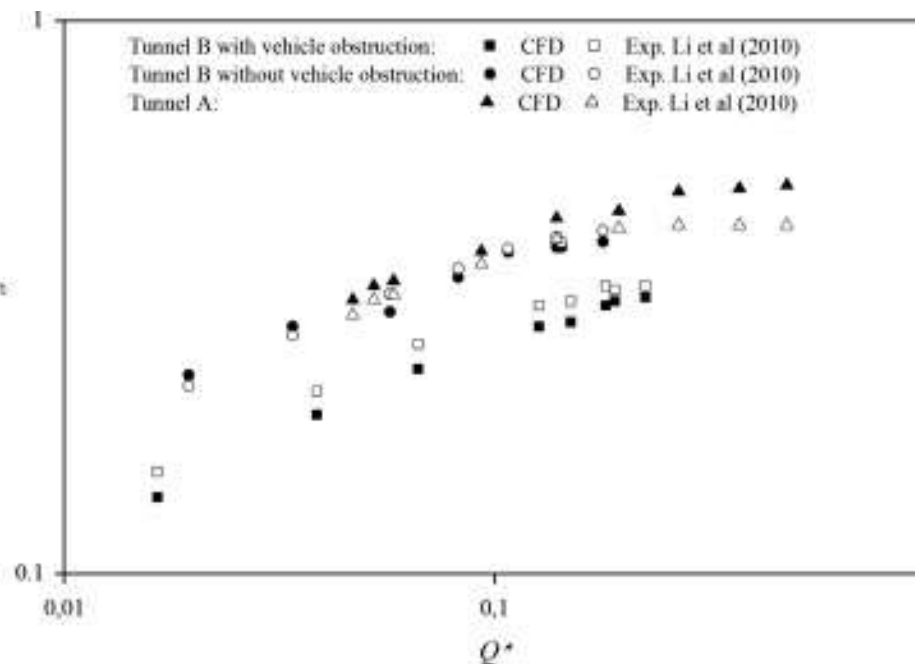
利用實驗比對模擬



(a) Numerical prediction by Fluent



(b) Numerical prediction by FDS



研究動機及目的

實驗對照模擬
數據皆存在差距



將存在的落差
透過前置參數的調整進而消除

模擬以及實驗的準確度
交叉對比的可靠度



將實驗及模擬的每一階段
產生的參數加以校正

實驗的穩定度及設置準則



使隧道實驗及模擬結果
更加精確的設置準則



使逆煙層的控制能夠更加完善



PART 02
文獻回顧



利用FDS模擬隧道

- 🔍 隧道相關建模相對有限，除了缺乏驗證案例，也較其他建築物來說應用沒那麼廣泛
- 🔍 因此Chin Ding Ang作者等人進行了FDS隧道模擬，此外還與隧道現場實際測量做比對
- 🔍 FDS模擬結果與實際測量值相關，但噴流式風機因其複雜性，故如引入任何更改都可能極大地改變速度分佈
- 🔍 因此可以考慮對模型進行進一步校準

FDS 電腦模擬軟體



FDS軟體為計算流體力學(CFD-model)之模擬軟體。



FDS常用於**模擬火災情境**之程式，可用於模擬三維空間之火災情境，將建築物**空間分割為多格細小之網格**(Mesh)。

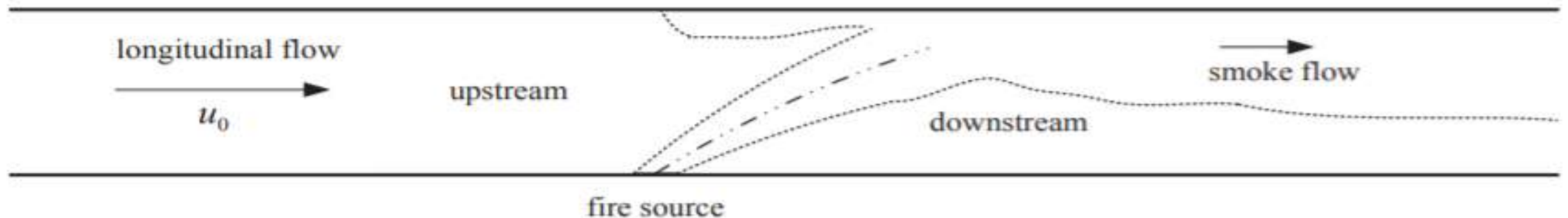


通常應該使用相對粗糙的網格來構建FDS，接著逐漸細化網格，直到交叉比對分析後看不到明顯的差異，即稱為**網格敏感性研究**。

臨界風速及逆煙層



防止逆煙層發展的最小通風即為“臨界風速”，為了能夠於隧道火災發生時順利地讓人員逃生，必須利用通風系統控制位於上游之逆煙層，使得能夠將逆煙層控制於火源下游。



關於全尺度與縮小尺度

縮小尺度公式

項目	關係式
幾何(m)	$x_m/x_f=L_m/L_f=\lambda_L$
溫度(K)	$T_m=T_f$
速度(m/s)	$v_m/v_f=(L_m/L_f)^{1/2}=\lambda_L^{1/2}$
總熱釋放率(kW)	$Q_M = Q_F (L_M/L_F)^{5/2}$

L是長度比例尺，m是模型比例尺

縮小隧道流場穩定



風機及擴張段間加設**穩定箱**



Haukur Ingason 隧道設置



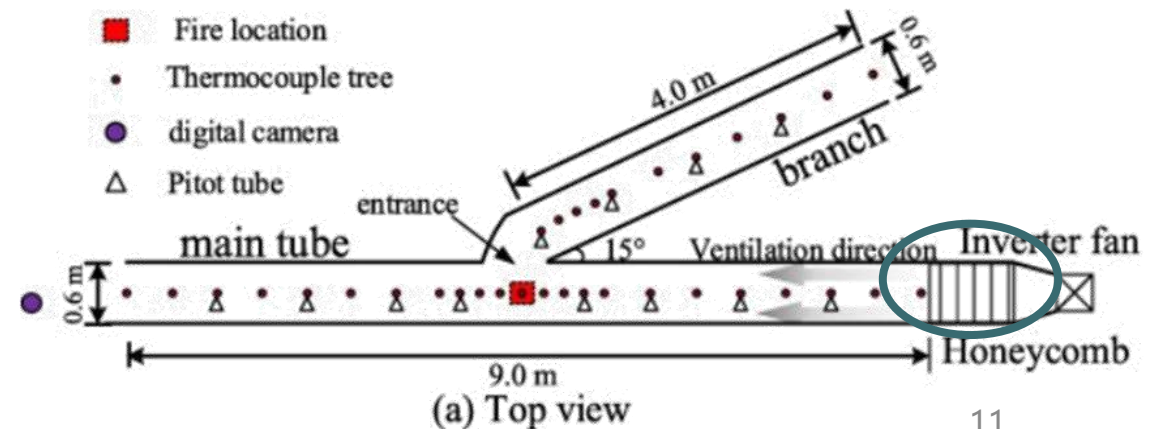
隧道與風機之間加裝**光滑管**



Ying Zhen Li 隧道設置



隧道與風機間加裝
內部構造似**蜂巢**之穩定氣流裝置



Dongyue Zhao 隧道示意圖



PART 03

研究方法

網格敏感性分析

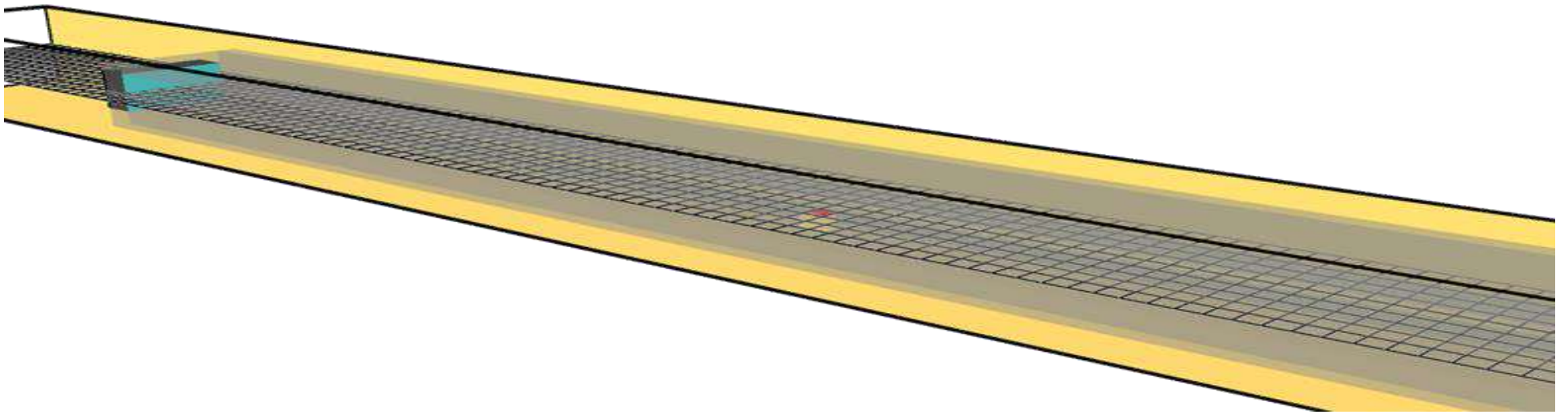
- ④ 計算網格劃分的大小和方式直接關係著計算結果的正確性和精度。
- ④ 本研究將會利用 $0.05 D^*$ 、 $0.1 D^*$ 、 $0.15 D^*$ 及 $0.2 D^*$ 進行網格敏感性分析

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



其最佳網格尺寸為

$0.05 D^* \sim 0.1 D^*$



穩定風速流場模擬試驗

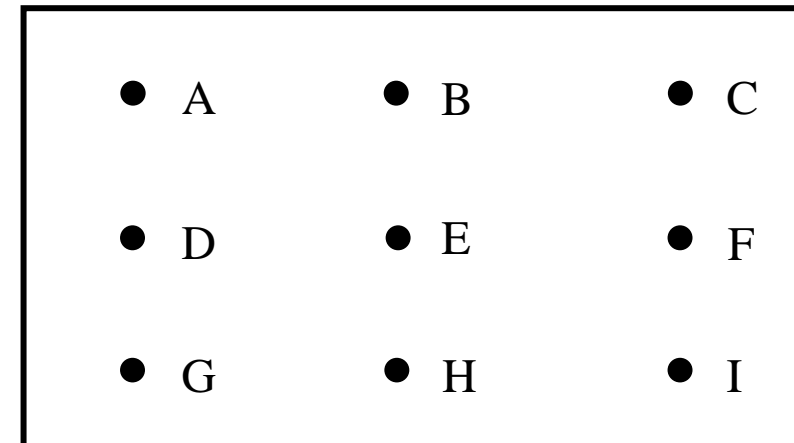
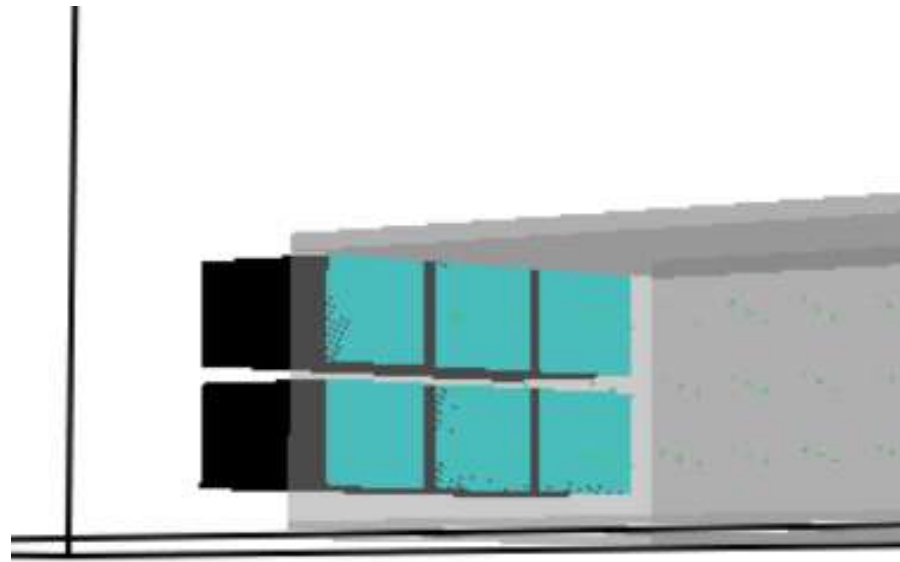
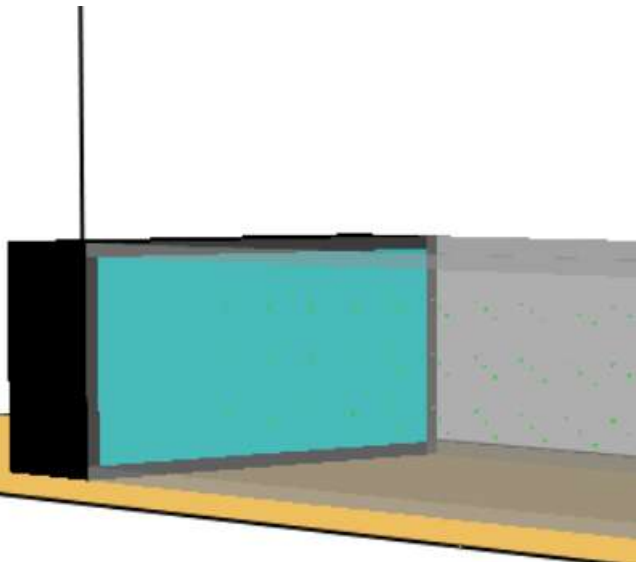
🔍 隧道通風是逆煙層控制之重要指標，風機的選用也是流場穩定的重要因素

🔍 於隧道截面設置9個測點於平均後代表截面風速，且每隔10公分設置

單風機

多風機

測點設置



隧道建置

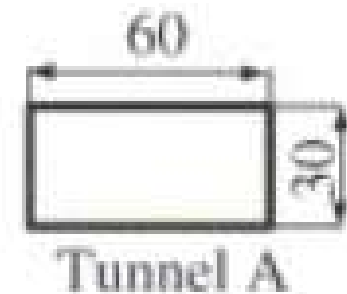
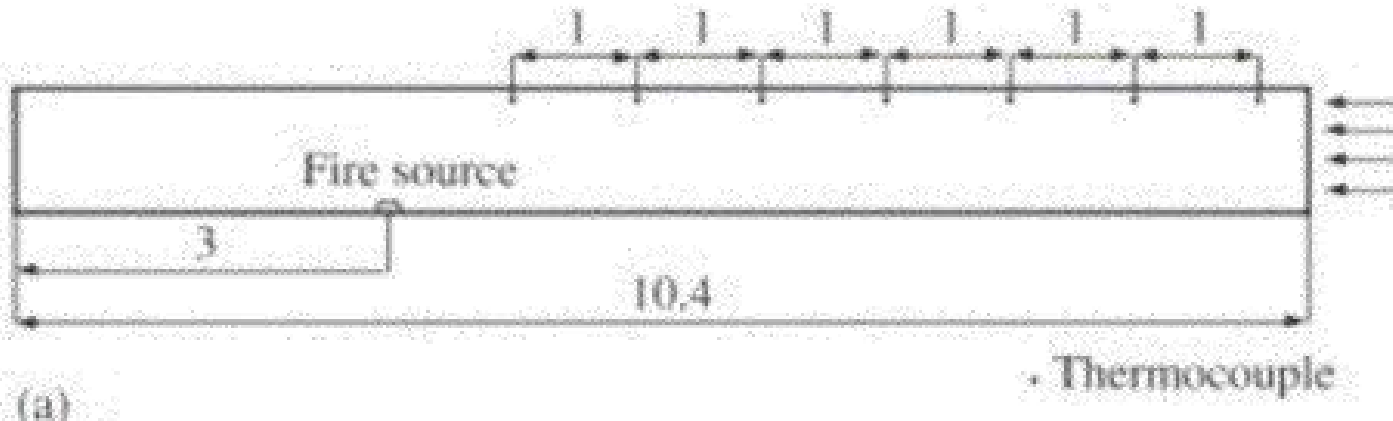
藉由NFPA92中的縮小尺度公式，建置**1:20縮小尺度隧道**。



根據Sung Ryong Lee等人利用FDS模擬隧道橫截面的縱橫比對隧道火災中煙霧運動的影響，其縱橫比越大溫度下降越慢與事實相符。



因此本研究將參考此一模型做設置



模擬建置

油盤大小則參考NFPA92所列出車輛熱釋放率中的**2-4輛小客車**換算得知。

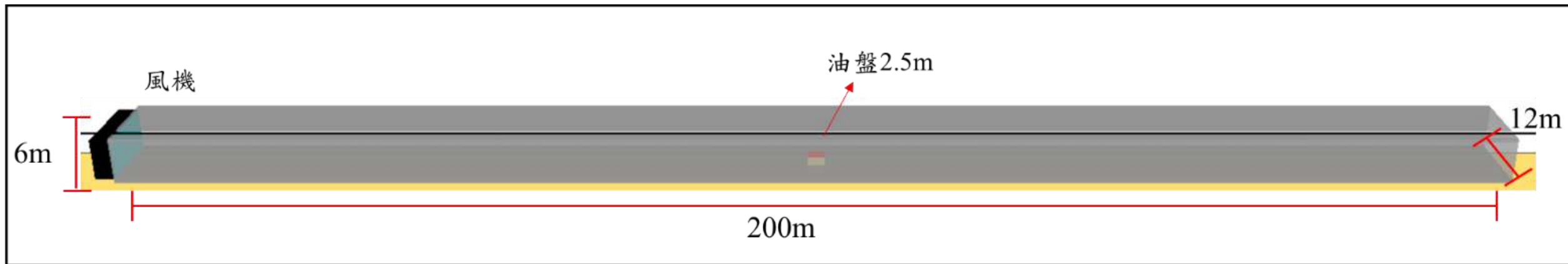
參考Zhong等人設置1 m/s、1.5 m/s、2 m/s、2.5 m/s、3 m/s、4 m/s等風速，得出的臨界風速為2.5 m/s，因此**本研究取1 m/s、2m/s、3m/s、4 m/s等風速進行模擬分析**。

參數 \ 情境	情境2-1	情境2-2
油盤尺寸 (cm)	250	6
熱釋放率 (kW)	14200	7.96
風速 (m/s)	0.22	
	0.44	
	0.67	
	0.89	

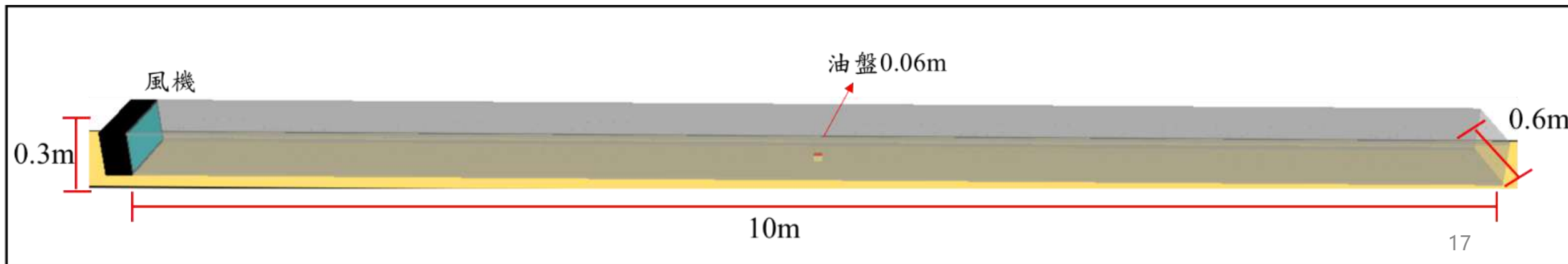
以上根據NFPA92縮小尺度法則公式得出：
幾何位置 $X_M = X_F (L_M/L_F)$
風速 $V_M = V_F (L_M/L_F)^{1/2}$
總熱釋放率 $Q_M = Q_F (L_M/L_F)^{5/2}$

模擬建置

全尺度模擬 200 m*1.2 m*6 m



縮小模擬 10 m*0.6 m*0.3 m

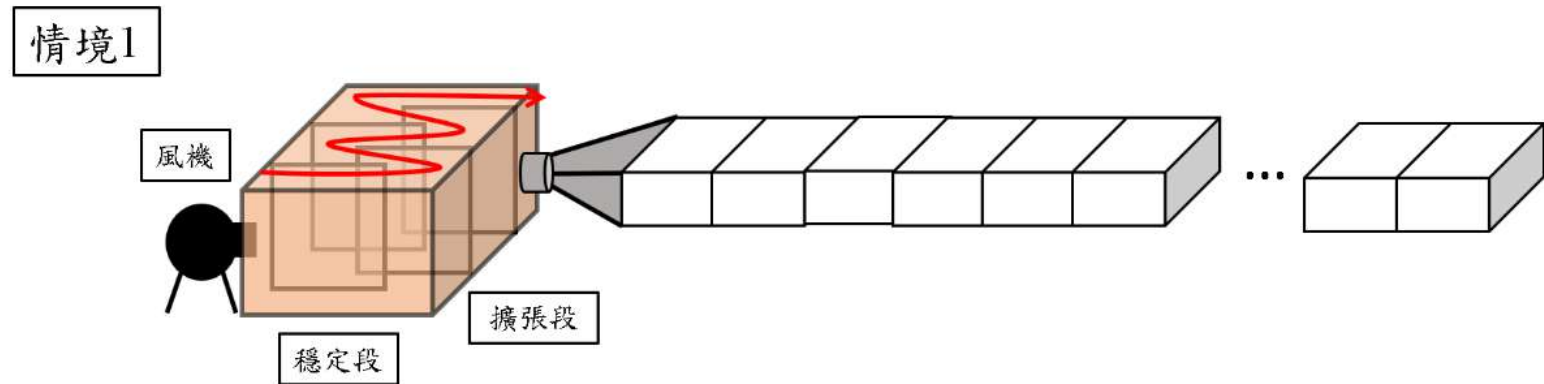


隧道實驗穩定風速流場設置

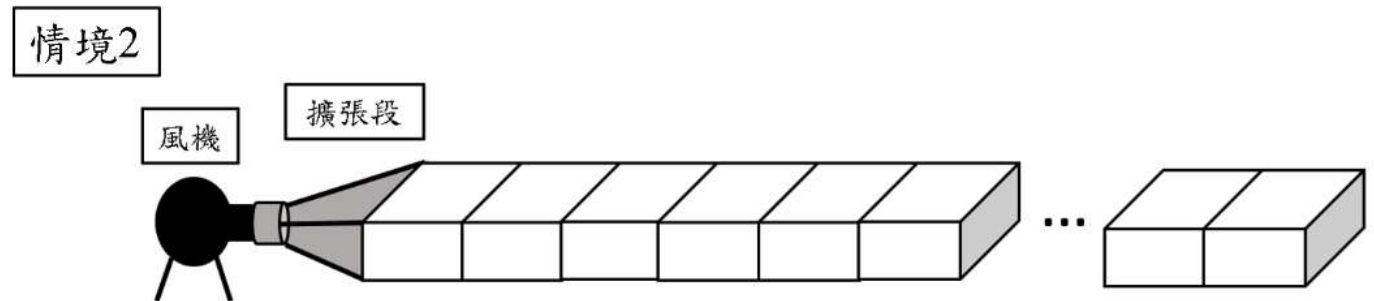
🔍 本研究實驗前將克服風機導入隧道切面風速不穩定之限制

🔍 隧道風洞實驗分為兩情境

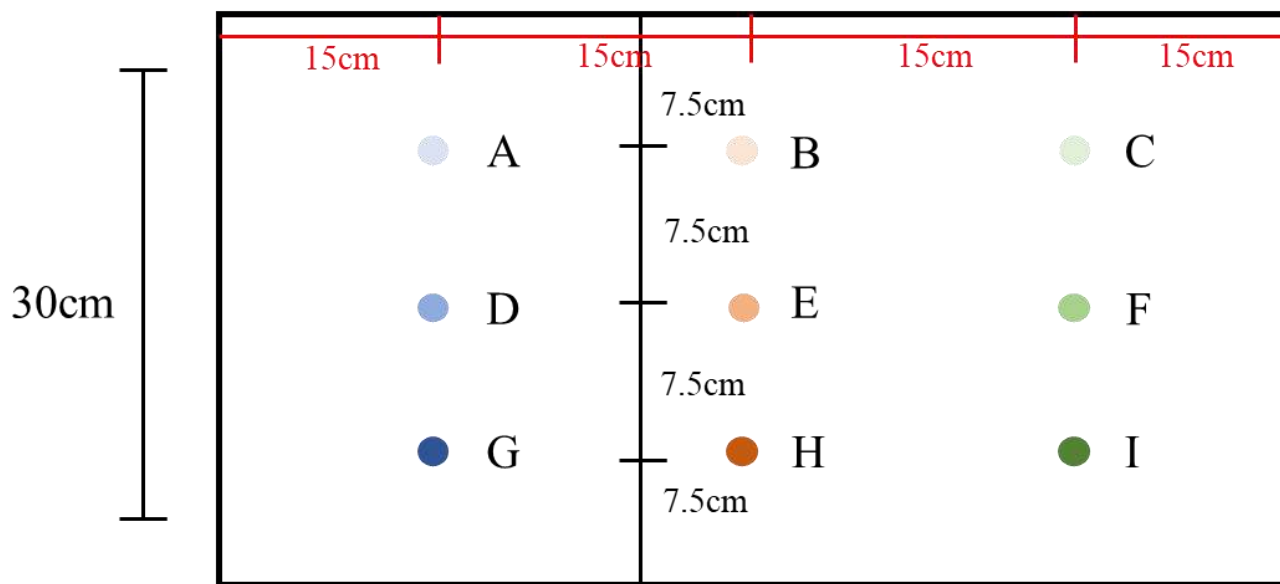
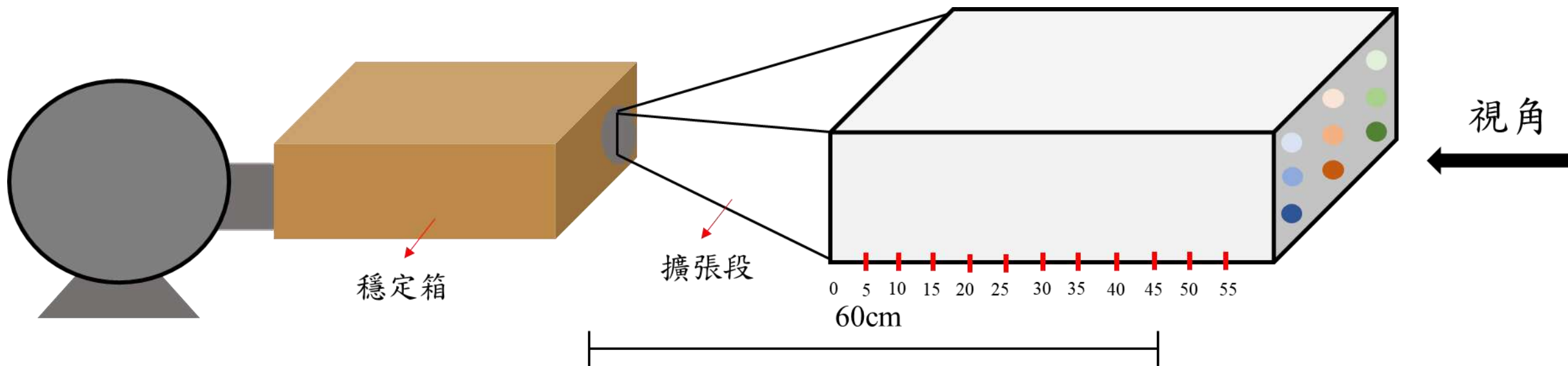
穩定箱加上擴張段



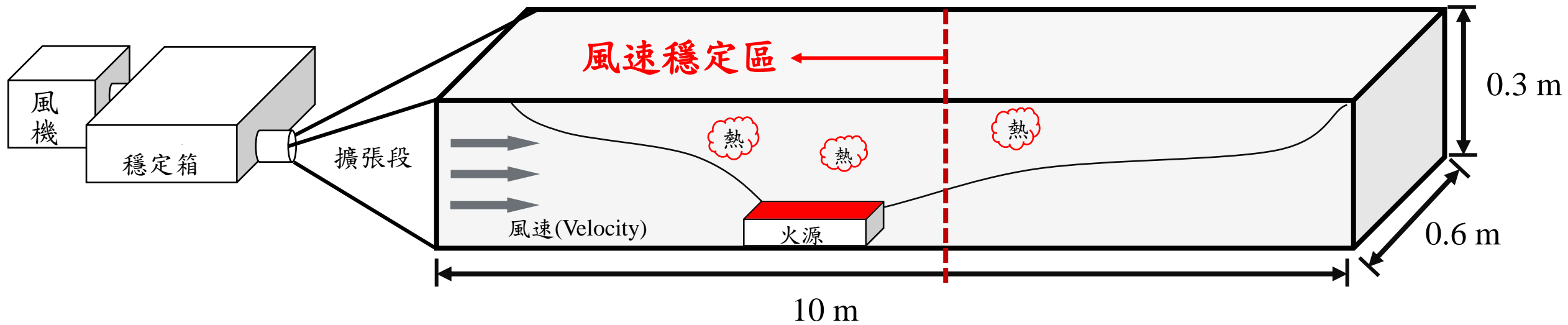
風機直接連接擴張段



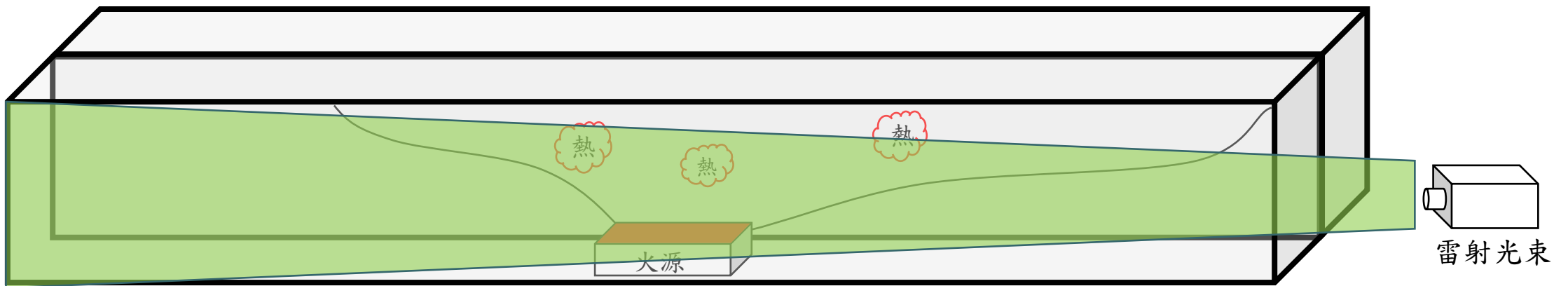
隧道實驗穩定風速流場測量



縮小隧道實驗建置



利用雷射頁觀測煙層變化

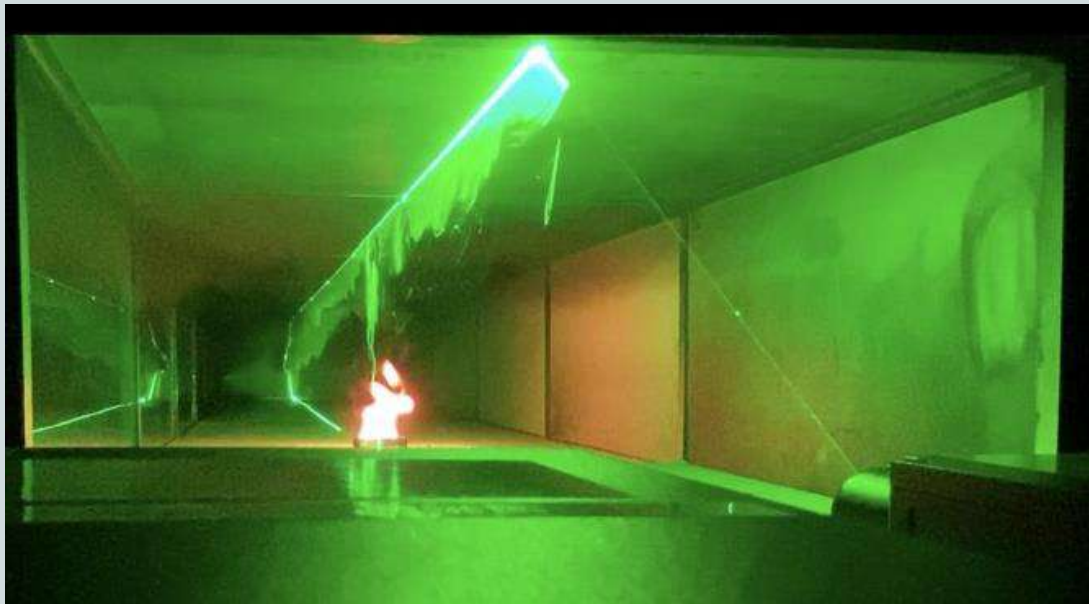


雷射頁觀測煙層測試

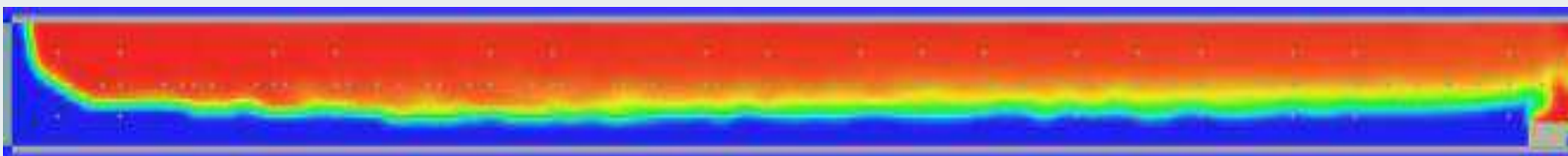


空燒測試

實火空燒



模擬空燒



Slice
VIS_CO.9H0.1
m

能見度

31.0
28.0
25.0
22.0
19.0
16.0
13.0
10.0
7.00
4.00

高
低



PART 04

結果與討論

縮小模擬網格分析

格點尺寸設置

0.05 D^* → 1cm

0.1 D^* → 2cm

0.15 D^* → 3cm

0.2 D^* → 4cm

測點設置



溫度測點

輻射熱測點



測點設置1~8，無風情況下火源兩旁分析數據相近，因此取1~4做分析。



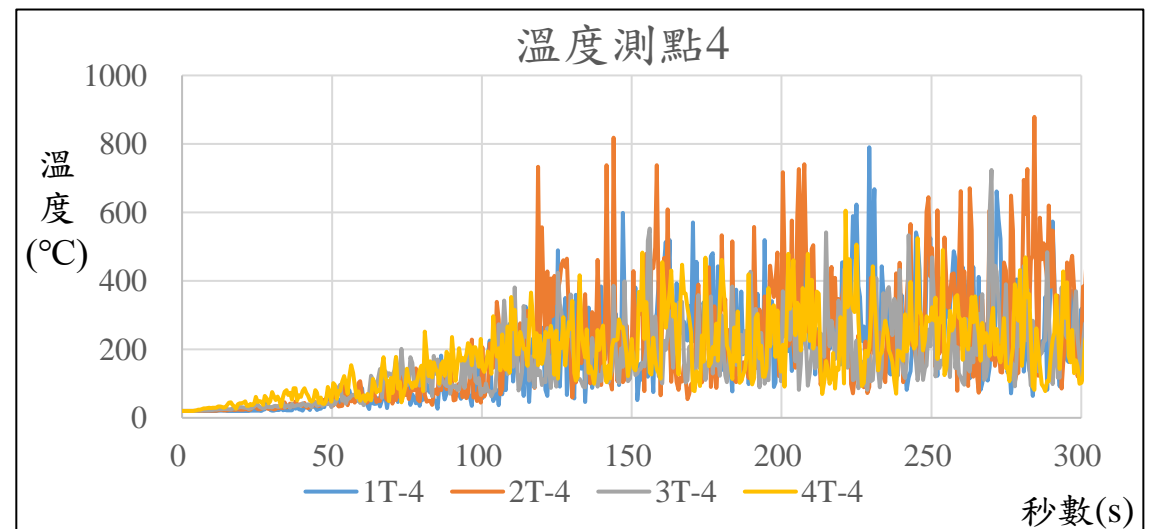
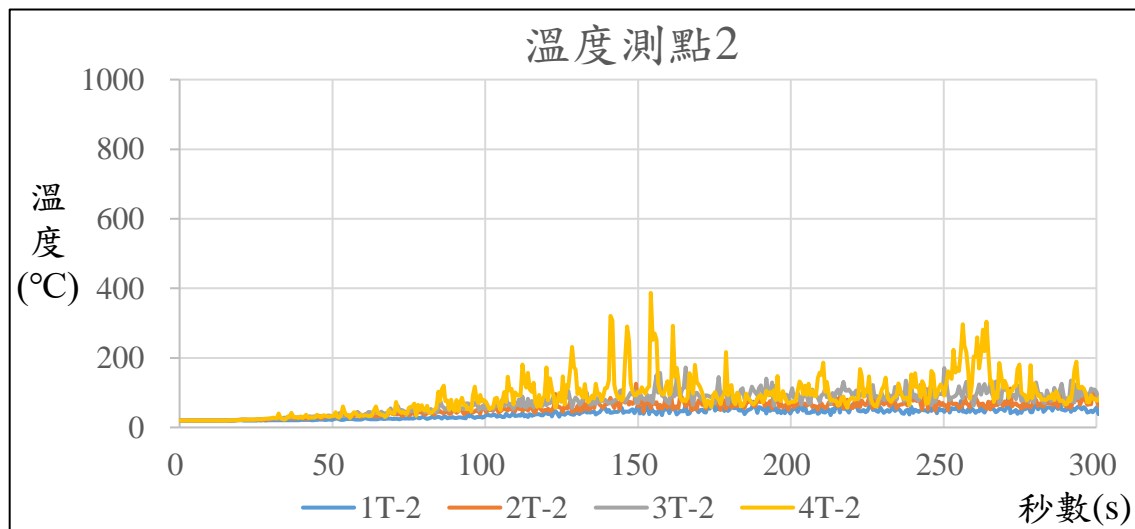
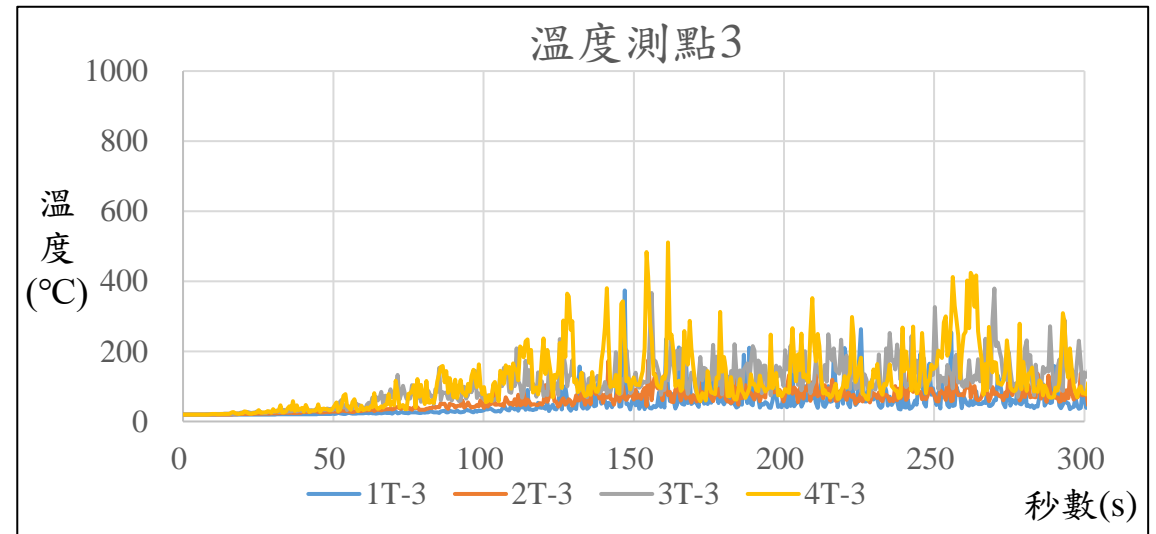
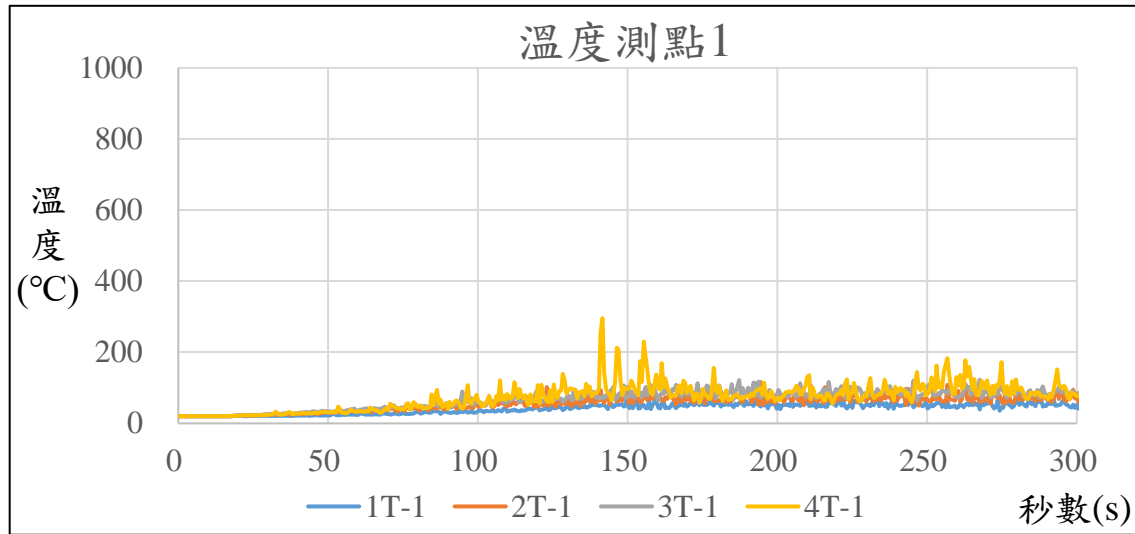
距離火源20cm，火源旁每隔10cm設置。

縮小模擬網格分析-溫度

1 2 3 4 5 6 7 8



比對模擬結果中測點1、2、3、4在300秒內的四種格點的溫度變化。

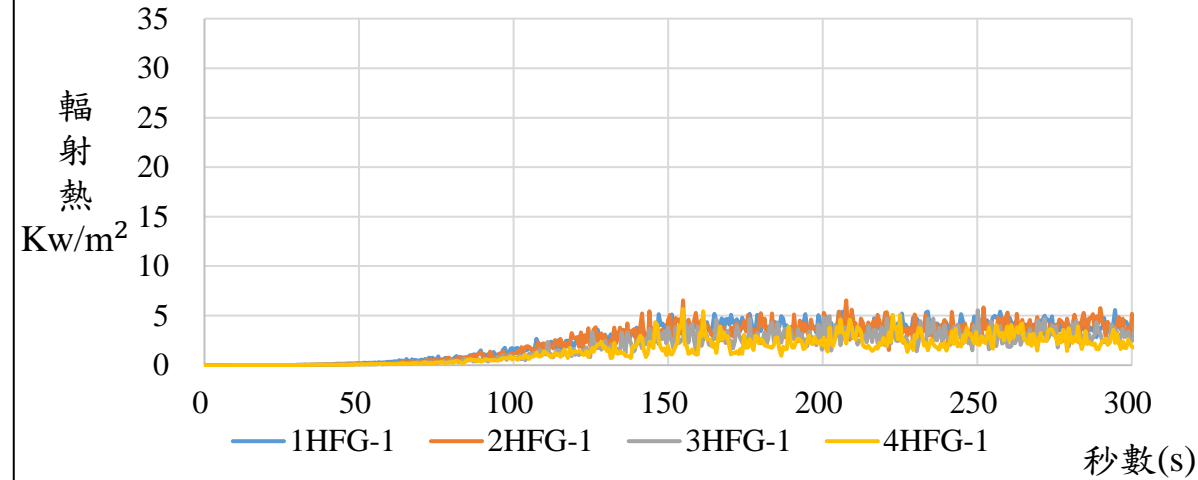


縮小模擬網格分析-輻射熱

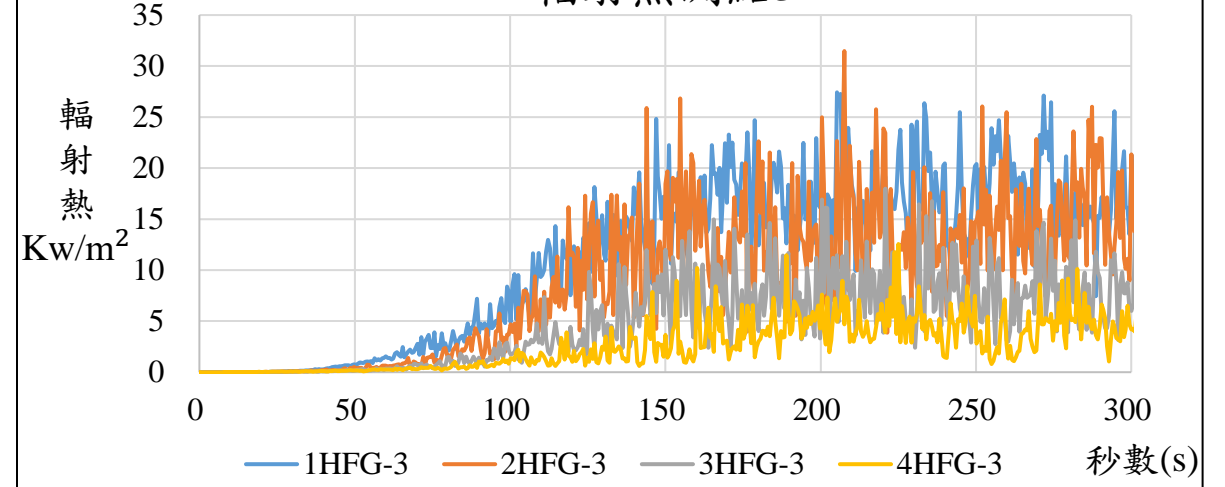
1 2 3 5 6 7

比對模擬結果中測點1、2、3、4在300秒內的四種格點的輻射熱變化。

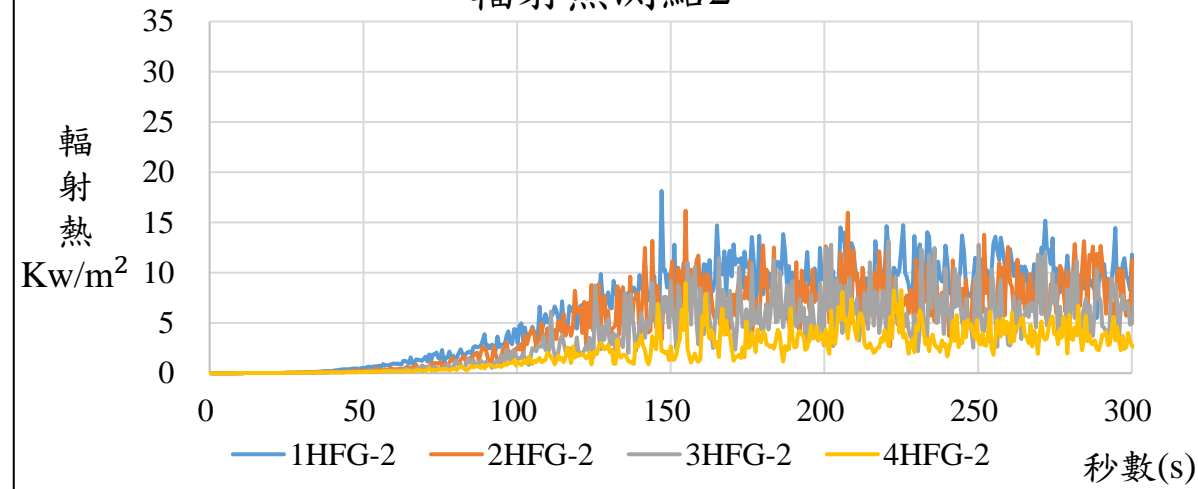
輻射熱測點1



輻射熱測點3



輻射熱測點2



2cm較適合本次模擬設置之網格大小

全尺度模擬網格分析

格點尺寸設置

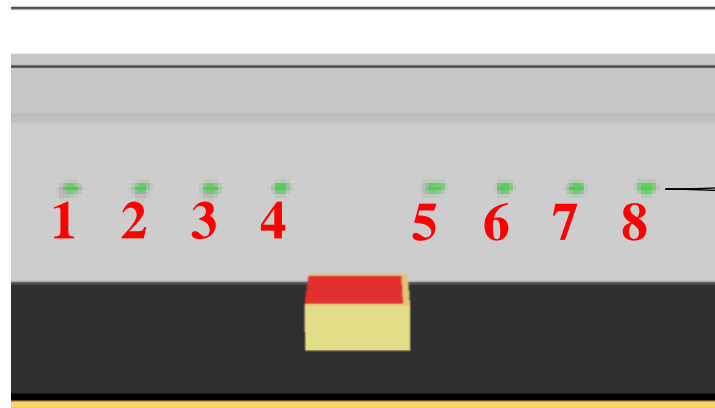
0.05 D* → 15cm

0.1 D* → 30cm

0.15 D* → 40cm

0.2 D* → 55cm

測點設置



溫度測點

輻射熱測點



測點設置1~8，無風情況下
火源兩旁分析數據相近，因
此取1~4做分析。

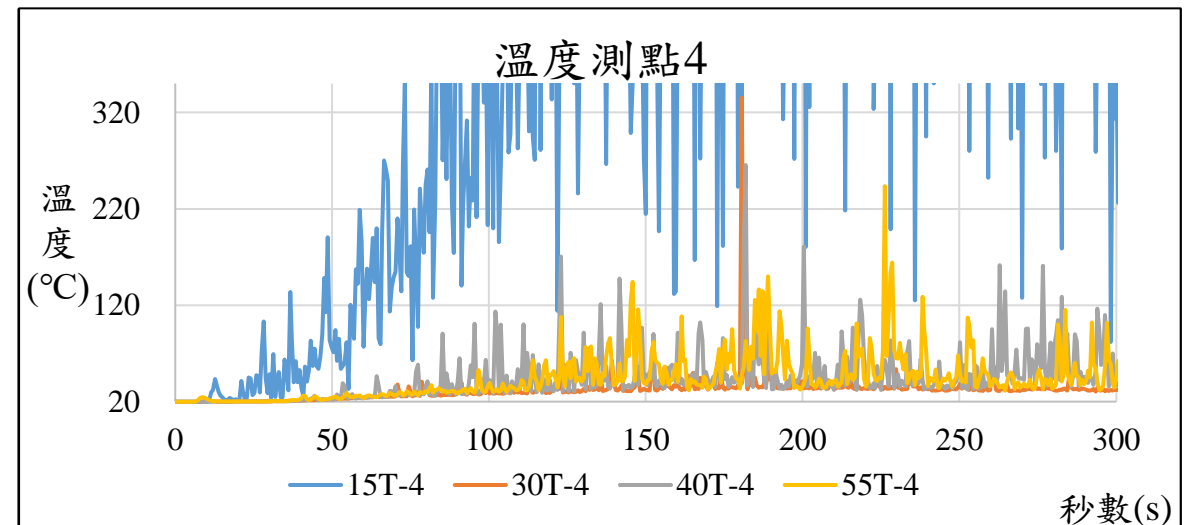
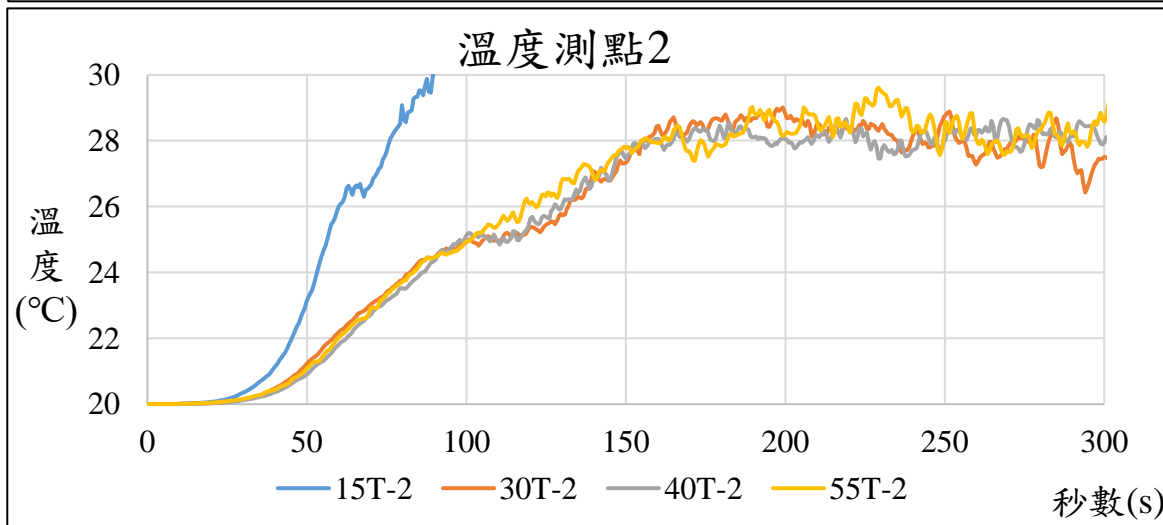
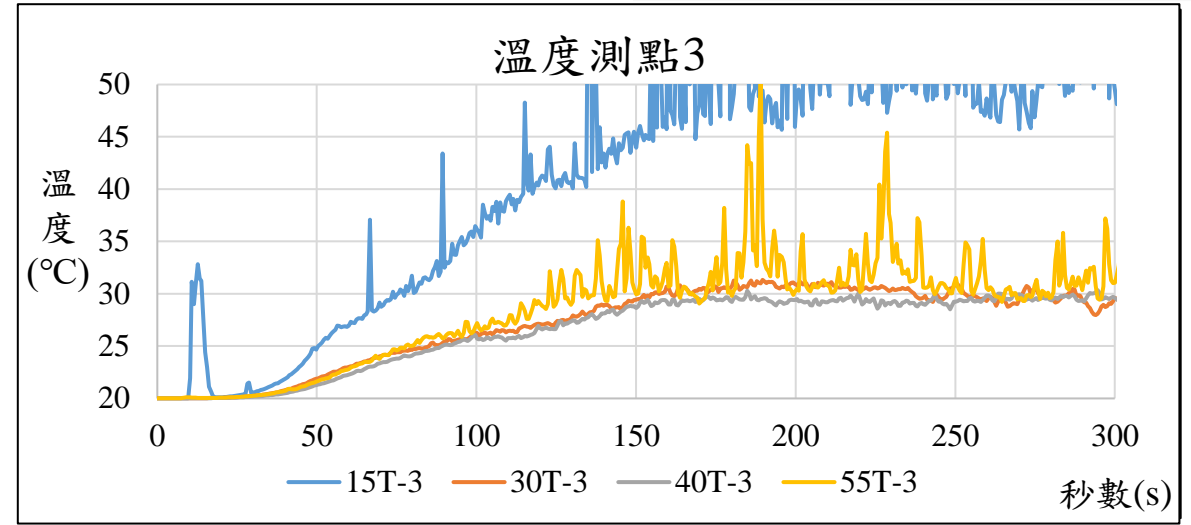
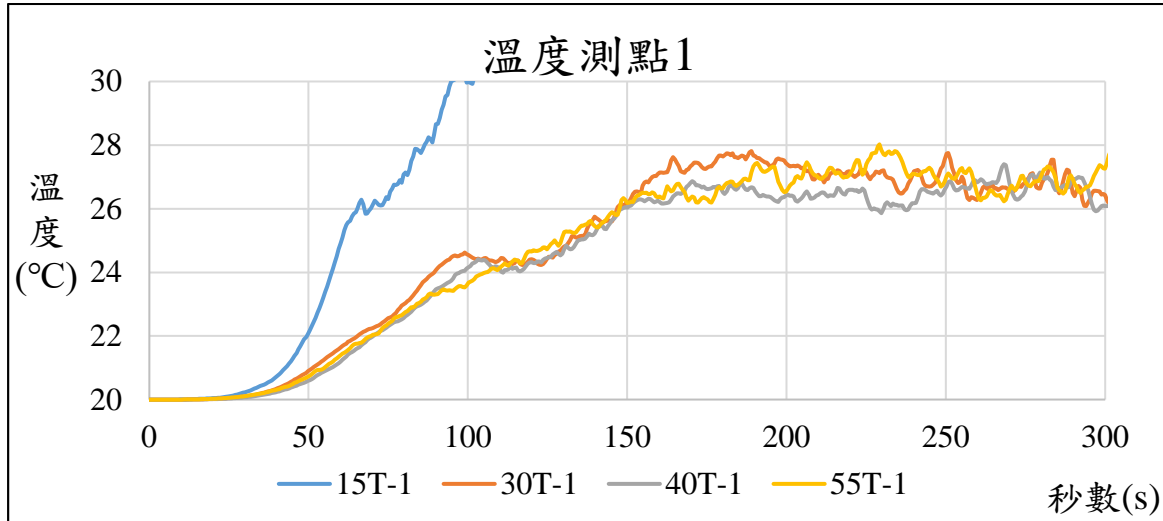
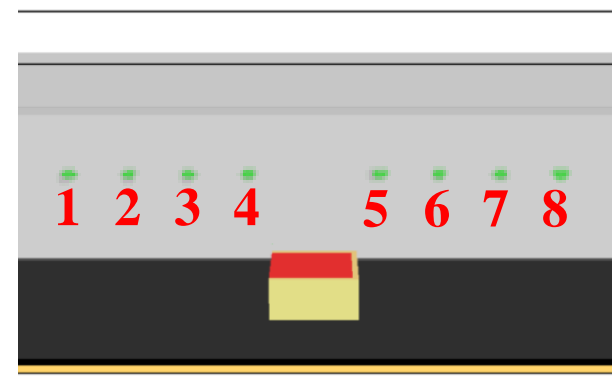


距離火源20cm，火
源旁每隔10cm設置。

全尺度模擬網格分析-溫度



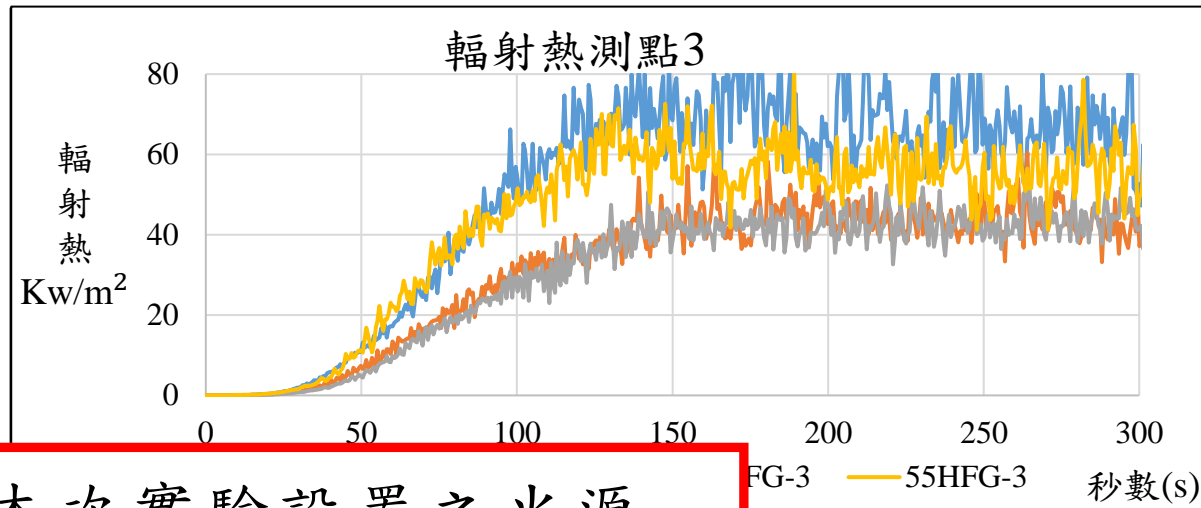
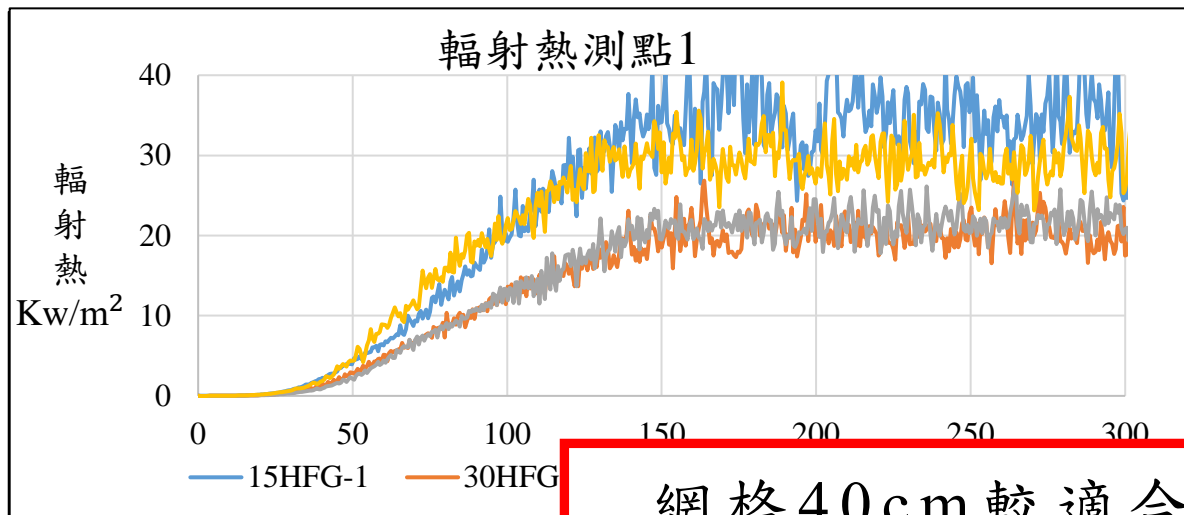
比對模擬結果中測點1、2、3、4在300秒內的四種格點的溫度變化。



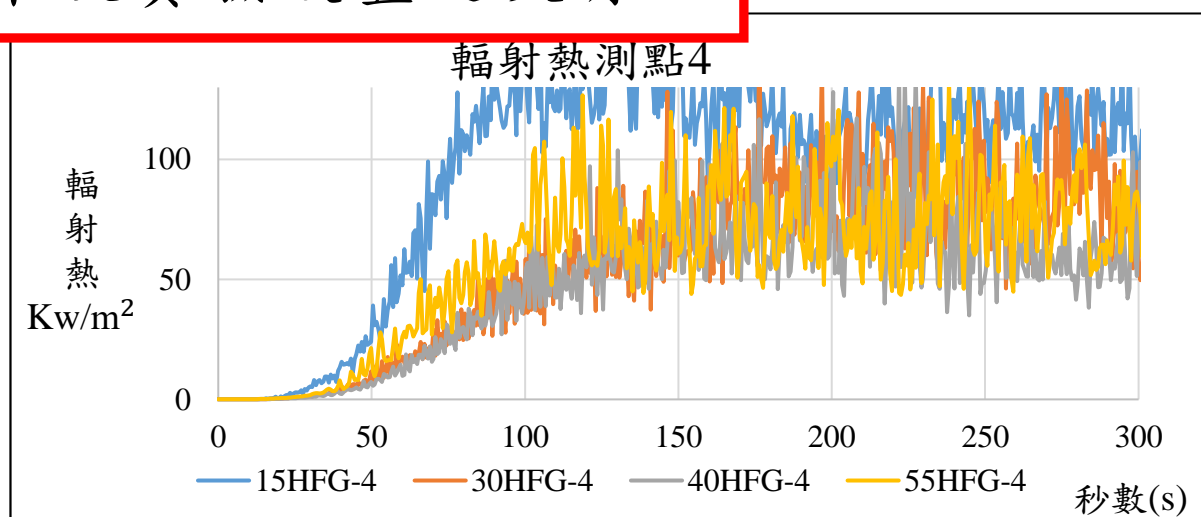
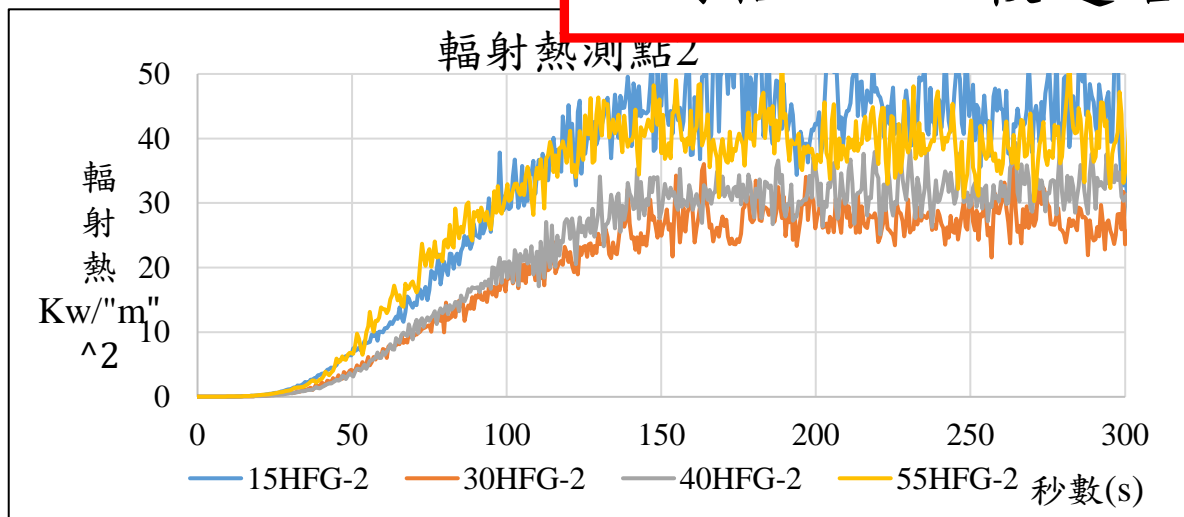
全尺度模擬網格分析-輻射熱



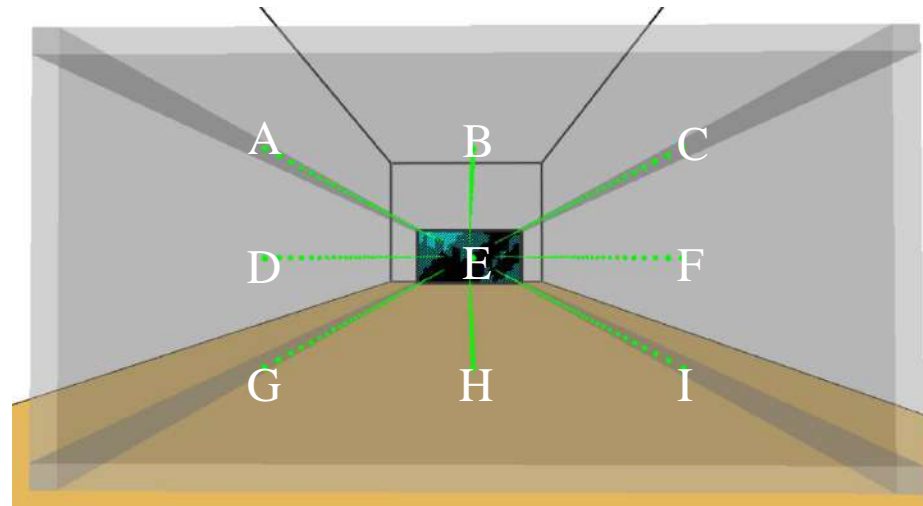
比對模擬結果中測點1、2、3、4在300秒內的四種格點的輻射熱變化。



網格40cm較適合本次實驗設置之火源



穩定風速流場實驗



🎯 隧道每隔10公分設置9個測點

🎯 設置時間300秒

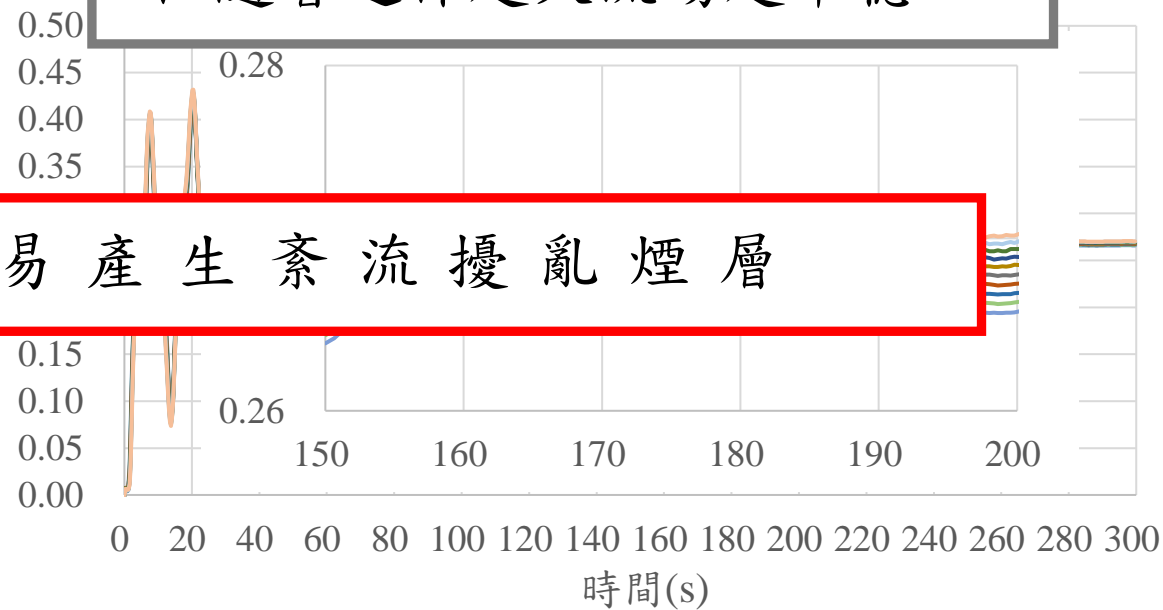
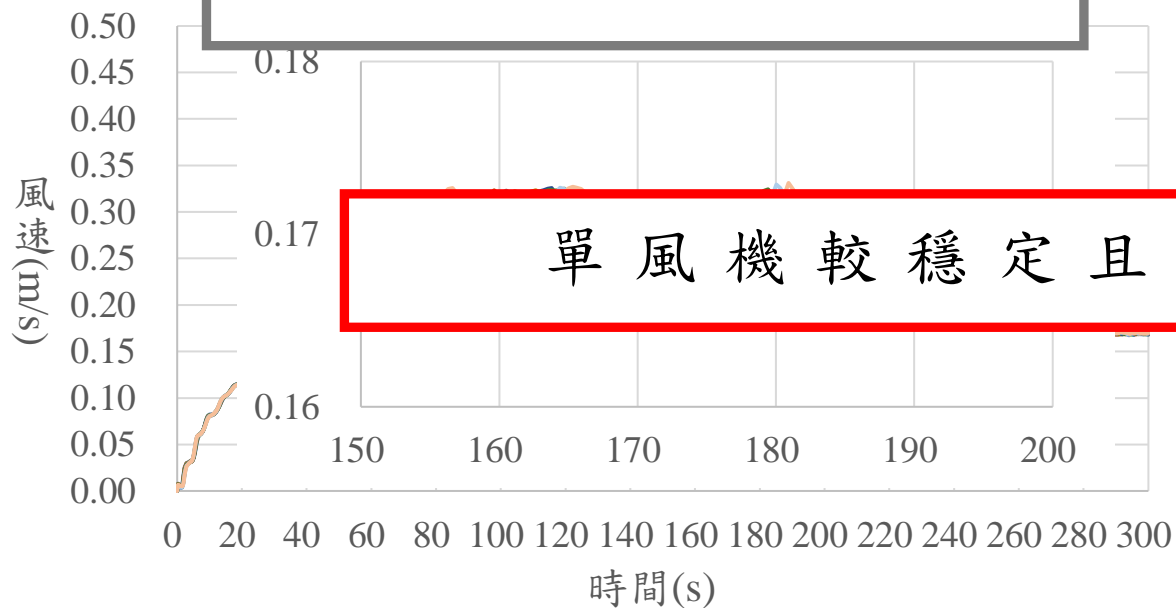
穩定風速流場實驗

距離擴張段410 – 500cm

多風機相互影響作用大，
導致測試區流場變化過大

單風機啟動時變化幅度較大，
但隨著運作越久流場越平穩

單風機較穩定且不易產生紊流擾亂煙層



— 410cm — 420cm — 430cm — 440cm — 450cm
— 460cm — 470cm — 480cm — 490cm — 500cm

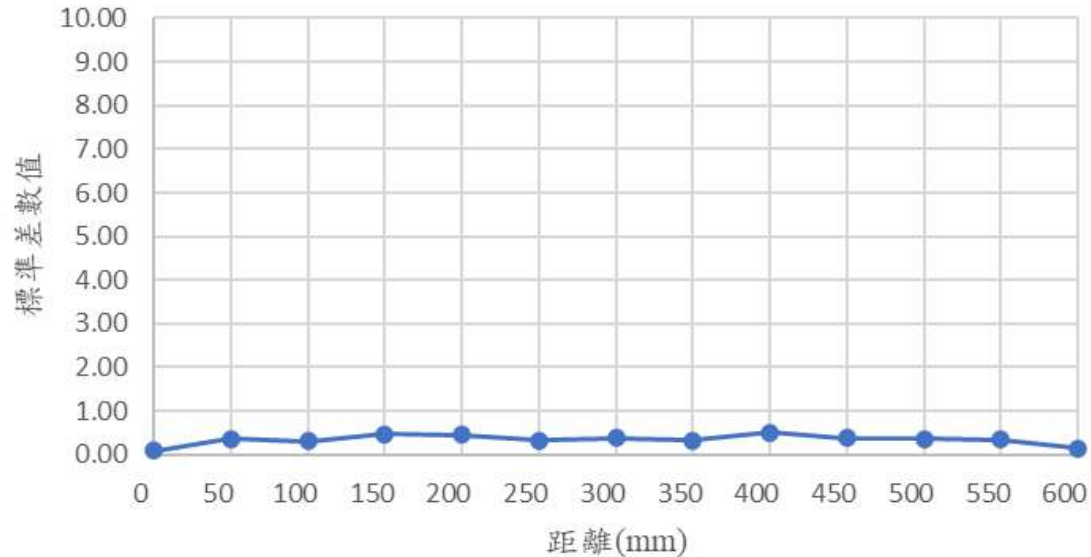
— 410cm — 420cm — 430cm — 440cm — 450cm
— 460cm — 470cm — 480cm — 490cm — 500cm

縮小實驗穩定風速流場試驗

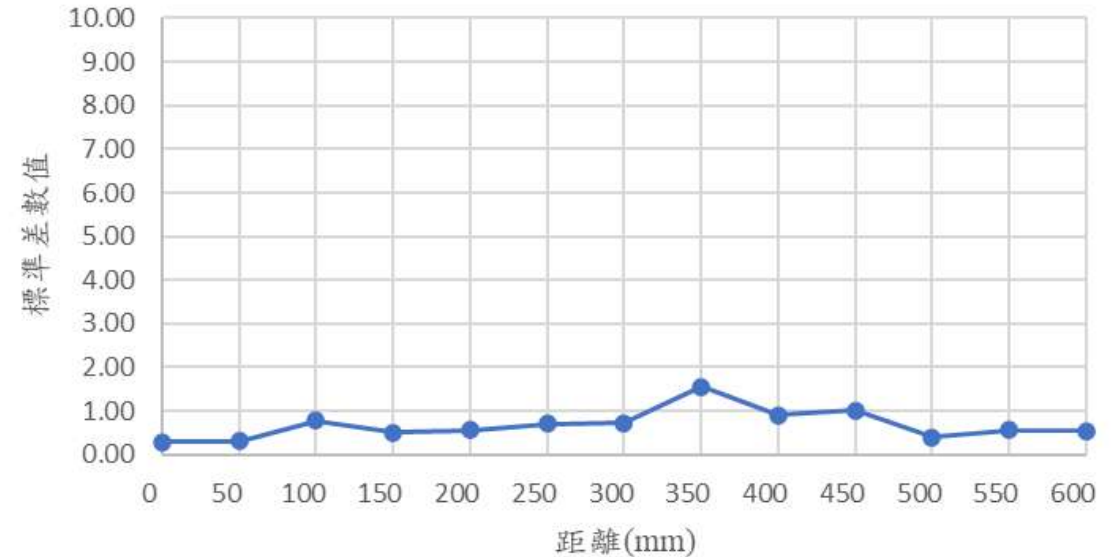


比較無添加穩定箱及添加穩定箱後的風速標準差

擴張段+穩定箱標準差



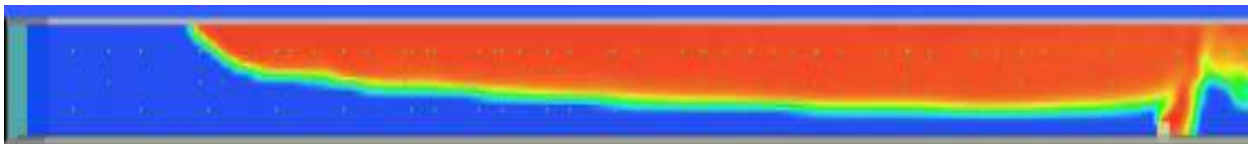
擴張段標準差



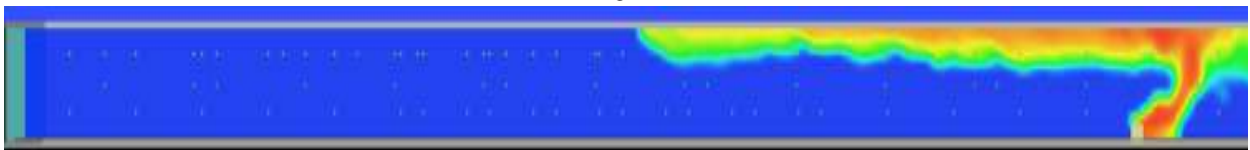
縮小實火實驗對照FDS模擬

FDS模擬

風速0.22 m/s



風速0.44 m/s



風速0.67 m/s



風速0.89 m/s



實火實驗





PART 05

結論與建議

結論

- ④ 在進行模擬前將網格以及風機選擇的差異性等參數的設置透過數據分析使其更加精確
- ④ 於訂定參數後，藉由模擬比對全尺度及縮小尺度的隧道火災所產生的逆煙層結果顯示，在全尺度及縮小尺度能夠控制逆煙層的最小臨界風速皆為 4 m/s (0.89 m/s)
- ④ 在縮小實驗風速的部分，本研究製作穩定箱使其風速穩定，並於實火實驗中不會使逆煙層產生紊流
- ④ 再添加穩定箱後的實火實驗對照模擬有很好的一致性



建議

- 🎯 本研究最主要的貢獻為**確立實驗前的各項參數**
- 🎯 在本研究較著重探討實驗前的各項參數設置，**較少比對參數確立後不同火源的差異**
- 🎯 於本研究之後續建議**添加不同火源及風速**比對文獻是否有更高的準確率
- 🎯 也將建議後續實驗**加入排煙及撒水**，使隧道實驗更加完善

Thanks for your listening





參考文獻

1. Soufien Gannouni , Rejeb BenMaad , Numerical study of the effect of blockage on critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires , Tunnelling and Underground Space Technology , 2015, Pages 147-155.
2. Zhisheng Xu, Dongmei Zhou, Haowen Tao, Xiaochun Zhang, Wenbo Hua , Investigation of critical velocity in curved tunnel under the effects of different fire locations and turning radiuses , Tunnelling and Underground Space Technology , 2022.
3. Cong, H., et al., Experimental studies on the smoke extraction performance by different types of ventilation shafts in extra-long road tunnel fires. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021. **115**.
4. Tian, X., et al., Full-scale tunnel fire experimental study of fire-induced smoke temperature profiles with methanol-gasoline blends. Applied Thermal Engineering, 2017. **116**: p. 233-243.
5. Ko, Y.J. and G.V. Hadjisophocleous, Study of smoke backlayering during suppression in tunnels. Fire Safety Journal, 2013. **58**: p. 240-247.
6. Meng, N., X. Hu, and M. Tian, Effect of blockage on critical ventilation velocity in longitudinally ventilated tunnel fires. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020. **106**.
7. Khattri, S.K., T. Log, and A. Kraaijeveld, A novel representation of the critical ventilation velocity for mitigating tunnel fires. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021. **112**.