

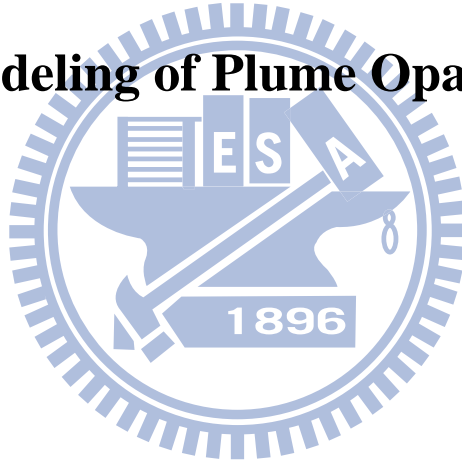
國立交通大學

環境工程研究所

碩士論文

煙流之不透光度模擬

Modeling of Plume Opacity



研究生：林芸伊

指導教授：蔡春進 博士

中華民國一百年六月

煙流之不透光度模擬

Modeling of Plume Opacity

研究生：林芸伊

Student：Yun-Yi Lin

指導教授：蔡春進

Advisor：Chuen-Jinn Tsai

國立交通大學



Submitted to Department of Environmental Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Environmental Engineering

August 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年六月

摘要

煙囪不透光度為工廠煙道可見排放物之判斷標準，而白煙產生一直是空氣污染待解決的課題。在本研究中，發展了 Plume opacity model 模擬光電廠與燃煤電廠煙囪排放之常溫煙流與高溫煙流分佈狀況，模式中考慮煙流擴散、質能平衡、微粒成長、潮解作用與米氏散射理論，模擬煙流各項特性、微粒消光特性與不透光度分佈狀況。

本模式模擬不同條件之煙流狀況，其中煙流的邊界、溫度、水蒸氣濃度、微粒粒徑與不透光度分佈皆可被預測出來。結果顯示，某光電廠排放管道多為次微米級微粒，成份主要為 SiO_2 與銨鹽，數目中間粒徑(NMAD)介於 88.6~332.5nm、幾何標準偏差 1.6~2.0，在冬季因煙流內濕度過高，導致煙囪出口處微粒即開始成長在此處可明顯看到白煙，不透光度最高可達 91%、不透光度大於 20%之煙流長度約 10 公尺(風速 0.5 m/s)，並隨風速增加而遞減，影響不透光度的主因為煙流內溼度過高導致水蒸氣附著於微粒上使得微粒成長。若降低煙囪出口相對溼度可使煙流無法到達過飽和狀態微粒無法成長，煙流不透光度約可降至 3%符合法規。某燃煤電廠排放管道多為微米級微粒，成份主要為硫酸鹽類，數目中間粒徑(NMAD)為 180nm、幾何標準偏差 2.51，微粒由煙囪排出後由於降溫速率快，在距離煙囪直徑 2.0~5.7 倍之處開始微粒成長，不透光度可達 100%，煙流長度約 13(風速 10m/s)-35(風速 1 m/s)公尺，影響不透光度的主因為煙流達過飽和狀態使得微粒成長與微粒濃度過高所致，若將煙囪排氣溫度降至 100°C，可使煙流無法到達過飽和狀態微粒無法成長。此外，減少煙囪之微粒濃度排放亦可降低白煙不透光度，而粒狀物消光係數最高的粒徑發生在 0.5-1 μm 範圍內，若能有效處理此粒徑範圍的微粒，預期將可大幅改善白煙的發生。

關鍵字：白煙；不透光度；微粒成長；散射

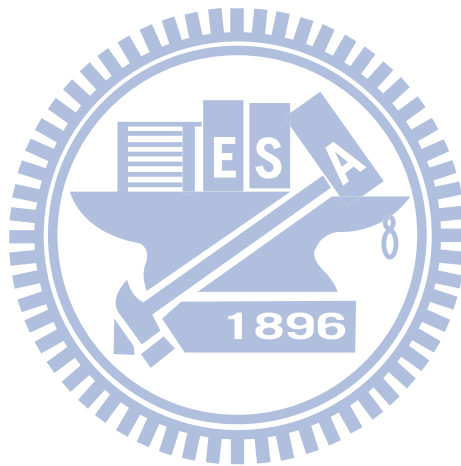
Abstract

Plume opacity is a criterion of visible discharge of a factory. The solutions of white smoke are important topics in air pollution. In this thesis, plume opacity model has been developed to simulate the dispersion of normal temperature and high temperature plumes emitted by a stack of an electro-optical factory or a coal-fired power plant. The plume dispersion, mass balance, energy balance, particle growth and deliquescence were considered in the model. Mie scattering theory was used to calculate the light extinction of white plumes. The properties of the plume and plume opacity will be simulated.

The plume boundaries, temperature, water vapor concentration, particle diameter and plume opacity can be predicted by the model under different conditions. The results indicate that the flue gases of an electro-optical factory are submicron particles, mainly composed of SiO_2 and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. The number median diameter of the particles is found between 88.6-332.5nm, and geometric standard deviation is between 1.6-2.0. In winter, particulate matter (PM) emitted by the stack mixed with the ambient air and induced particle growth due to supersaturated water vapor. White smoke is observed clearly near the exit of a stack. The plume opacity is about 91% and the length of 10 m(wind speed 0.5 m/s), decreasing while wind speed is faster. If the relative humidity of flue gases is lower, the opacity is about 3% without particle growth which fits in with the regulations. The flue gases of a coal-fired power plant are micron particles, mainly composed of sulfate. The number median diameter of the particles is found between 180 nm, and geometric standard deviation is between 2.51. The plume temperature decrease fast, and the particle growth occurs at 2-5.7 times length of source diameter. The plume opacity reaches 100% and the length of 13(wind speed 10 m/s)-35 m(wind speed 1 m/s). The influences on plume opacity are due to particle growth and high number concentration of particles. If the emission temperature is about 100°C , particle growth will not occur in the plume. Furthermore, the decrease of discharging particles is also

to reduce opacity of white smokes. The highest extinction coefficient of the particle was found to range between 0.5-1 μ m. As a result, removal of these particles should be able to reduce the plume opacity.

Keywords : white plume; opacity; particle growth; scattering



誌謝

本篇論文能夠順利完成，首先要感謝我的指導老師－蔡春進教授。無論是在日常的照顧或是學問上的傳授，都使我受益良多，非常感謝老師對於我的耐心指導跟適時幫助。

我的同學們在這段時間給予很多的協助，包含了生活瑣事、課業討論與研究切磋，真的都十分感謝。我要特別感同學們：俊男、紹銘、技恩、信佑，實驗室的學長姐：誌良、士軒、冠宇、Rorigo、宏達、育安，學弟妹：怡伶、柏森、毅弘、香菇、盈楨、能駿、盧緯，研究助理：偉恩、秉才，由於大家的協助和陪伴才得以順利完成三年的學業，也為我的研究所生涯增添許多樂趣。

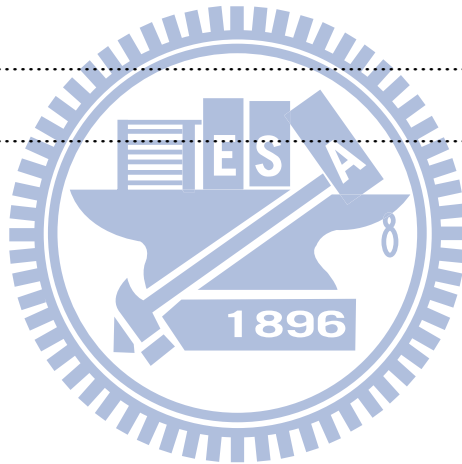
最後要感謝我的家人和曾經幫助過我的人，因為家人生活上和精神上的大力支持，才使我能夠完成學業。若是今天有一點小小成果，我都要感謝曾經幫助過我的人。



目錄

摘要	i
Abstract.....	ii
誌謝	iv
目錄	v
圖目錄	vii
表目錄	xi
符號說明	xii
英文字母	xii
第一章 前言	1
1.1 研究源起	1
1.2 研究目的	2
第二章 文獻回顧	3
2.1 燃煤電廠煙道氣採樣及不透光度相關研究	3
2.2 粒狀物之消光特性及計算	6
2.3 煙流上升模式與挾捲函數經驗式	10
2.4 粒狀物之潮解性	13
第三章 研究方法	16
3.1 採樣流程	16
3.1.1 微孔均勻沉降衝擊器儀器介紹	16
3.1.2 MOUDI 採樣前的準備及樣本分析	17
3.1.3 採樣地點及採樣流程	18
3.2 問題描述	19
3.3 統御方程式	21
3.3.1 微粒成長模式	23

3.3.2 環境參數	27
第四章 結果與討論	30
4.1 米氏散射模擬與模式正確性確認	30
4.2 煙道微粒粒徑分佈採樣結果	30
4.3 Plume opacity model 模擬結果	32
4.3.1 不同微粒粒徑之消光特性	32
4.3.2 煙流邊界	33
4.3.3 煙流內微粒成長過程	36
4.3.4 煙流不透光度模擬結果	38
第五章 結論與建議	50
參考文獻	51
附錄	56



圖目錄

圖 2-1 三種不同排放管道之煙道氣體，微粒經由靜電集塵器處理後之粒徑分佈和累積分佈比率圖。A, B：燃煤鍋爐煙道，C：燃重油鍋爐煙道[6].....	4
圖 2-2 考慮及不考慮 H_2SO_4 核化作用下，不透光度模擬值和 SO_3 排放率之關係[7].....	6
圖 2-3 質量濃度分佈圖，83/04/15，電廠 3 號機煙囪.....	6
圖 2-4 消光效率與圓球微粒粒徑之關係[1].....	7
圖 2-5 煙流上升與挾捲現象示意圖[17].....	11
圖 2-6 $(NH_4)_2SO_4$ 、 NH_4HSO_4 與 H_2SO_4 氣膠微粒粒徑與相對濕度之關係[10].....	13
圖 3-1 某光電廠屋頂煙囪出口採樣點.....	16
圖 3-2 MOUDI 內部構造的示意圖(左圖)與實際照片(右圖).....	17
圖 3-3 MOUDI 之噴嘴(左圖)及衝擊板(右圖).....	17
圖 3-4 MOUDI 現場採樣照.....	19
圖 3-5 程式模擬流程圖.....	29
圖 4-1 消光效率於不同 size parameter 之模擬結果.....	30
圖 4-2 質量濃度分佈圖，2009.09.11，竹南某光電廠 P020 煙囪.....	32
圖 4-3 折射率 $SiO_2(m=1.55)$ 、 $(NH_4)_2SO_4(m=1.521)$ 消光效率與微粒粒徑關係之模擬結果.....	33
圖 4-4 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ C$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = (a)0.5$ 、(b)1、(c)2、(d)5 與(e)10m/s，常溫煙流在大氣中的煙流邊界.....	34
圖 4-5 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ C$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = (a)0.5$ 、(b)1、(c)2、(d)5 與(e)10m/s，常溫煙流在大氣中的煙流邊界.....	35
圖 4-6 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ C$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = (a)1$ 、(b)2、(c)5 與(d)10m/s，高溫煙流在大氣中的煙流邊界.....	36
圖 4-7 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ C$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5$ 、1、2、5 與 10 m/s，常溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標).....	39

圖 4-8 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流內不透光度分佈	40
圖 4-9 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，不同相對溼度 $RH_a =$ (a)80%、(b)90%，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10 m/s ，常溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)	41
圖 4-10 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)	42
圖 4-11 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流內不透光度分佈	43
圖 4-12 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1、2、5$ 與 10m/s ，高溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)	44
圖 4-13 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)1、(b)2、(c)5 與 (d)10m/s，高溫煙流內不透光度分佈	45
圖 4-14 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5\text{m/s}$ ，煙囪排放質量濃度 $3679.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2943.4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1471.7\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 與 $735.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，常溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)	47
圖 4-15 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 1m/s ，煙流排放溫度 100°C 、 110°C 、 120°C 與 130°C ，高溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)	48
圖 4-16 煙流不透光度變化示意圖	49
附錄 1 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流中心溫度與流線座標(s 座標)距離關係	56
附錄 2 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流內溫度分佈	57
附錄 3 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流中心溫度與流線座標(s 座標)距離關係	58

附錄 4 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = (a)0.5$ 、(b)1、(c)2、(d)5 與(e)10m/s，常溫煙流內溫度分佈	59
附錄 5 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1$ 、2、5 與 10m/s，高溫煙流中心溫度與流線座標(s 座標)距離關係	60
附錄 6 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = (a)1$ 、(b)2、(c)5 與(d)10m/s，高溫煙流內溫度分佈	61
附錄 7 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = (a)0.5$ 、(b)1、(c)2、(d)5 與(e)10m/s，常溫煙流內水蒸氣分佈	62
附錄 8 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = (a)1$ 、(b)2、(c)5 與(d)10m/s，高溫煙流內水蒸氣分佈	63
附錄 9 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = (a)0.5$ 、(b)1、(c)2、(d)5 與(e)10m/s，常溫煙流內水蒸氣分佈	64
附錄 10 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5$ 、1、2、5 與 10m/s，常溫煙流中心飽和比與流線座標(s 座標)距離關係	65
附錄 11 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5$ 、1、2、5 與 10m/s，常溫煙流中心的微粒平均粒徑與流線座標(s 座標)距離關係	66
附錄 12 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5$ 、1、2、5 與 10m/s，常溫煙流中心飽和比與流線座標(s 座標)距離關係	67
附錄 13 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1$ 、2、5 與 10m/s，高溫煙流中心飽和比與流線座標(s 座標)距離關係	68
附錄 14 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1$ 、2、5 與 10m/s，高溫煙流中心的微粒平均粒徑與流線座標(s 座標)距離關係	69
附錄 15 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5$ 、1、2、5 與 10m/s，常溫煙流內之微粒總數目濃度與流線座標(s 座標)距離關係	70
附錄 16 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5$ 、1、2、5 與 10m/s，常溫煙流內之微粒總數目濃度與流線座標(s 座標)距離關係	71

附錄 17 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1、2、5$ 與 10m/s ，高溫煙流內之微粒總數目濃度與流線座標(s 座標)距離關係 72



表目錄

表 2-1 不透光度和現場採樣分析的結果。A, B：燃煤鍋爐煙道，C：燃重油鍋爐煙道， OP：不透光度， M_p ：微粒質量濃度， d_p ：微粒平均粒徑， K_p ：散光係數[6]..4	
表 2-2 在鈉黃光波長 $\lambda=589\text{nm}$ 下，常見物質之折射率[10].....9	9
表 2-3 可溶性鹽類之 A、B 與 C 值($n = A + BT + CT^2$ ， n 為溶質莫耳分率)[10]..... 14	14
表 2-4 微粒成長熱力學函數 $\frac{\langle i \rangle \langle \epsilon_0 \rangle}{\langle M_s \rangle}$ [27]..... 15	15
表 3-1 MODUI 採樣背景條件..... 19	19
表 3-2 研究對象之初始條件及環境模擬參數..... 20	20
表 4-1 某光電廠採集煙道氣體之 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{0.1}$ 及總質量濃度..... 31	31
表 4-2 煙流時間、煙囪距離、飽和比與微粒最大粒徑..... 37	37
表 4-3 煙流時間、煙囪距離、半徑、微粒總數目濃度、平均粒徑及總消光係數與最大 不透光度..... 45	45
表 4-4 常溫與高溫煙流比較..... 49	49

符號說明

英文字母

a	m	煙流半徑
a_0	m	煙囪半徑
a_n		米氏係數
A_c	m^2	煙流截面積
A_p	m^2	微粒與入射光行徑方向垂直橫截面積
b_n		米氏係數
c		純量
c_r		煙流內水蒸氣濃度
c_a		大氣中水蒸氣濃度
C_c		滑動校正因子
C_m	$kg\ m^{-3}$	微粒質量濃度
C_p	$kg\ m^{-3}$	微粒重量濃度
C_{pw}	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	水蒸氣定壓比熱
CRH	%	微粒之結晶點
d_p	m	微粒粒徑
d_{p0}	m	乾微粒粒徑
d_{pa}	m	微粒氣動直徑
D_0		煙囪直徑
D	$m^2\ s^{-1}$	空氣-水蒸氣擴散係數
DRH	%	微粒之潮解點
E	$m^2\ s^{-1}$	挾捲函數

E_0	$\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$	單位時間內投射於氣膠微粒之光能
E_e	$\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$	單位時間內被氣膠微粒減弱之光能
E_a	$\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$	單位時間內被氣膠微粒吸收之光能
E_s	$\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$	單位時間內被氣膠微粒散射之光能
E_p		乾微粒之水溶性成分含量比例
$f_p(d_p)$		微粒數目分佈函數
g	m s^{-2}	重力加速度
h_r	J kg^{-1}	煙流內水蒸氣熱含量
h_a	J kg^{-1}	大氣中水蒸氣熱含量
h_v	J kg^{-1}	水蒸氣潛熱
H	m	尺度高度
$\langle i \rangle$		水溶性成分所組成微粒相相對應之 van't Hoff factor
I	W m^{-2}	光強度
I_0	W m^{-2}	入射光強度
I_s	cd m^{-2}	散光量
k		微粒折射率虛部
k^2	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	煙流紊流動能
k_a^2	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	大氣紊流動能
Kn		紐森數
l	m	物體與觀察者之距離
L	m	光線通過微粒群總長度
L_v	m	視程
m		微粒折射率

M	kg s^{-1}	空氣被捲入之質量流率
M_a	kg mol^{-1}	乾空氣平均分子量
M_w	kg mol^{-1}	水分子量
$\langle M_s \rangle$	kg mol^{-1}	微粒水溶性成分之分子量
$MMAD$	m	質量中間粒徑
n		微粒折射率實部
N	$\# \text{ m}^{-3}$	煙流內微粒數目濃度
N_a	$\# \text{ m}^{-3}$	大氣中為微粒數目濃度
N_T	$\# \text{ m}^{-3}$	總微粒數目濃度
$NMAD$	m	數目中間粒徑
O_p	%	煙流不透光度
P	Pa	壓力
P_0	Pa	一大氣壓
P_∞	Pa	混合氣體中水蒸氣壓
P_d	Pa	微粒表面水蒸氣壓
P_s	Pa	煙流在該溫度下之飽和蒸氣壓
P_{s,H_2O}	Pa	水蒸氣飽和蒸氣壓
q		比溼度
Q_g	L min^{-1}	氣體採樣體積流率
Q_e		消光效率
Q_a		吸光效率
Q_s		散射效率
r	m	煙流中心之徑向距離
R	$\text{N m mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	理想氣體常數



R_d	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	乾空氣氣體常數
R_v	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	水蒸氣氣體常數
RH	%	煙流相對溼度
RH_a	%	大氣相對溼度
t	min	採樣時間
t_p	sec	微粒成長時間
T	K	煙流溫度
T_a	K	大氣溫度
T_0	K	地表溫度
T_v	K	煙流虛溫
T_{va}	K	大氣虛溫
T_d	K	微粒表面溫度
T_{mix}	K	混合氣體溫度
u	m s^{-1}	煙流速度
u_a	m s^{-1}	風速
u_r	m s^{-1}	已知風速
u_x	m s^{-1}	煙流之水平速度
u_z	m s^{-1}	煙流之垂直速度
u_{za}	m s^{-1}	風速之垂直速度
V_e	m s^{-1}	挾捲速度
V	m^3	煙流體積
V_p	m^3	微粒體積
V_0	m^3	乾微粒體積
w	m s^{-1}	風速與煙流之相對速度



w_{par}	$m s^{-1}$	風速與煙流相對速度之平行分量
w_{per}	$m s^{-1}$	風速與煙流相對速度之垂直分量
W	mg	採樣前後重量差
z	m	離地面垂直高度
z_r	m	已知風速之高度

希臘字母

α		經驗係數
α_0		微粒尺寸參數
ε	$kg m^{-1} s^{-1}$	挾捲係數
$\langle \varepsilon_0 \rangle$		微粒中水溶性成分所佔比例
ϕ	rad	煙流與水平面之夾角
β		經驗係數
β_0	$K m^{-1}$	大氣溫度遞減率
γ		經驗係數
γ_w	$N m^{-1}$	表面張力
δ		經驗係數
η		煙流中水蒸汽凝結比例
η_a		大氣中水蒸氣凝結比例
λ_0	m	入射光波長
λ	μm	空氣-水蒸氣平均自由路徑長
ρ	$kg m^{-3}$	煙流密度
ρ_a	$kg m^{-3}$	大氣密度
ρ_0	$kg m^{-3}$	微粒單位密度

ρ_p	kg m^{-3}	微粒密度
ρ_w	kg m^{-3}	水密度
σ_e	m^{-1}	微粒消光係數
σ_a	m^{-1}	微粒吸光係數
σ_s	m^{-1}	微粒散射係數
σ_g		標準幾何偏差
ζ		總含水量



第一章 前言

1.1 研究源起

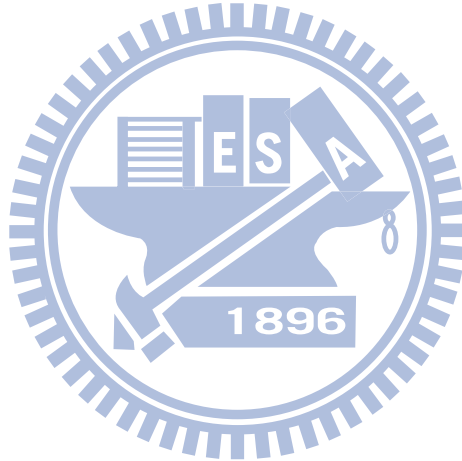
半導體及光電產業為國內目前重要高科技產業之一，在這些產業製程中，由於大量使用化學藥品如硫酸、硝酸、鹽酸、氫氟酸、磷酸及氨水，導致產生無機酸鹼氣體、揮發性有機物(VOCs)、毒性氣體與溫室效應氣體等氣狀污染物及二氧化矽次微米微粒、鉍鹽等粒狀污染物。燃煤電廠則是利用燃燒煤碳、石油、液化天然瓦斯等燃料所產生的熱能來產生蒸氣，推動汽輪機運轉帶動發電機而發電，在燃燒過程中，會產生大量飛灰，夾雜許多未燃燒完全物質或者燃料本身含有的伴隨物質。而煤碳中之硫份，經燃燒程序氧化成二氧化硫，一部分吸附在飛灰中，一部份轉化成三氧化硫(SO₃)，三氧化硫會吸收煙氣中水分形成硫酸氣體，這些廢氣進入污染控制設備後，由煙囪排放至大氣中造成空氣污染。

不透光度(opacity)常用於工廠煙道可見排放物之判斷標準，其中細微粒的散射、吸光及氣狀物的吸光等特性會影響煙流的光學性質，由氣膠微粒造成光行徑方向改變或光強度減弱之現象稱為消光(extinction)，煙道氣體內微粒的消光作用可使煙流(plume)不透光度增加，其中細微粒和液滴的散射為煙流不透光度增加之主要原因[1]。依據目前行政院環保署所公告的「電力設施空氣污染物排放標準」[2]與「固定污染源空氣污染物排放標準」，粒狀物排放濃度需小於限制值 32 mg/Nm³，不透光度管制標準為煙囪外目測判煙不超過不透光度 20%，粒狀污染物每日六分鐘不透光度連續監測值超過 20%，累積時間不得超過四小時才符合法規要求[3]。一般的空氣污染防制設備對於次微米微粒的去除效率偏低，廢氣經由洗滌塔處理後相對溼度會大幅提高且鹽類微粒吸水後會成長在煙囪出口產生明顯可見之煙柱，造成可視性煙柱不透光度超出法規標準影響環境甚鉅[4]，排出之白煙不僅對環境亦有著相當程度的危害，亦會腐蝕設備及管道。白煙中含有酸性氣體、氨氣、揮發性有機物(VOCs)具有刺激性異味，人體若長期暴露在此環境下會影響身體健康並使民眾對工廠的觀感不佳。因此改善白煙產生的問題為目前業界對空氣污染之重要課題。

1.2 研究目的

本研究將針對竹南科學區內某光電廠煙囪排放的空氣污染物進行檢測，並模擬煙囪排放之白煙在大氣中擴散與消長情形，計算煙流之不透光度，進而探討造成煙流不透光度增加的原因，並期望藉由現場採樣及理論計算提出解決白煙之方法，並對目前污染防治設備的操作條件及改善提出建議。研究內容包括：

1. 量測光電廠煙道內粒狀污染物之質量濃度分布與化學成分；
2. 模擬白煙在大氣中的形狀及計算煙流不透光度；
3. 建立 Plume opacity model 計算燃煤電廠煙流不透光度；
4. 藉由數值模擬提出改善白煙問題之方法。



第二章 文獻回顧

2.1 燃煤電廠煙道氣採樣及不透光度相關研究

Wolf and Seaba(1994)研究燃煤發電廠煙道排氣造成能見度下降的成因[5]，指出減少煙道氣體中的高濃度 SO_3 ，可改善酸霧所造成的不透光度增加問題。燃煤發電廠通常藉由安裝洗滌塔來控制 SO_2 的排放，但會增加煙流中水汽含量，影響具潮解性硫酸鹽微粒的粒徑。

Lou et al.(1997)針對裝有靜電集塵器的兩座燃煤工廠(煉鋼廠與造紙廠)和一座燃重油發電廠[6]，探討煙道氣中微粒與硫酸鹽濃度對不透光度之關係。採樣分析的項目包括微粒濃度、總含水硫酸鹽、微粒粒徑分佈及煙道氣體組成成分。微粒的採樣方法為國內環保署公佈之 ROC EPA Method 1(修改自 U. S. EPA Method 5)量測固定源的微粒總質量濃度，並使用分徑範圍為 $0.25\text{--}20\ \mu\text{m}$ 的九階多階衝擊器(cascade impactor)量測微粒粒徑分佈。亦利用 U. S. EPA's MM6 量測總水溶性硫酸鹽(SO_4^{2-})濃度，使用離子層析儀(Ion-Chromatograph, IC, Model DX-100 Dionex)分析採集到的樣本。表 2-1 為不透光度和現場採樣分析之結果，顯示不透光度會隨著微粒濃度或總水溶性硫酸鹽濃度增加而上升；在不同的操作條件下，微粒平均粒徑(mean diameter)幾乎維持不變，表示不透光度和微粒平均粒徑之間的關係並不顯著。圖 2-1 為三種不同排放管道之煙道氣體，微粒經由靜電集塵器處理後之粒徑分佈和累積分佈比率圖，顯示靜電集塵器已去除粒徑大於 $10\ \mu\text{m}$ 以上的微粒，燃煤鍋爐和燃重油鍋爐煙道氣中微粒的平均粒徑分別為 $6\text{--}8.8\ \mu\text{m}$ 和 $2.8\text{--}2.9\ \mu\text{m}$ 。

表 2-1 不透光度和現場採樣分析的結果。A, B：燃煤鍋爐煙道，C：燃重油鍋爐煙道，

OP：不透光度， M_p ：微粒質量濃度， d_p ：微粒平均粒徑， K_p ：散光係數[6]

Run number (1)	Stack ^b (2)	OP (%) (3)	OP _n (%) (4)	SO ₄ ²⁻ ppm (5)	M _p (mg/Nm ³) (6)	d _p (μm) (7)	K _p (mg/m ³ × 10 ⁻³) (8)
1	A	9.4 ± 1.5	10.5 ± 1.0	20.0 (0.08)	33 ± 3	8.0 ± 4.0	1.07
2	A	12.8 ± 1.8	14.0 ± 1.5	65.4 (0.26)	44 ± 4	7.5 ± 6.8	1.01
3	A	20.1 ± 2.0	18.5 ± 1.8	72.0 (0.289)	75 ± 5	7.6 ± 8.3	1.32
4	A	24.8 ± 2.6	26.0 ± 2.0	88.7 (0.356)	75 ± 4	7.4 ± 6.1	0.90
5	A	36.6 ± 3.2	30.0 ± 2.6	66.3 (0.266)	160 ± 18	6.1 ± 4.5	1.61
6	B	11.4 ± 1.4	12.0 ± 1.5	11.8 (0.05)	46 ± 2	6.0 ± 4.0	1.01
7	B	20.7 ± 2.0	18.0 ± 1.6	93.9 (0.376)	80 ± 6	6.4 ± 6.0	0.13
8	B	28.5 ± 2.6	27.5 ± 2.5	129.6 (0.519)	95 ± 5	3.2 ± 2.8	0.83
9	B	30.2 ± 3.0	29.0 ± 2.6	49.7 (0.199)	158 ± 1	6.2 ± 3.7	1.29
10	B	40.1 ± 2.8	36.5 ± 3.2	149.0 (0.597)	173 ± 16	6.4 ± 6.5	1.07
11	B	42.4 ± 2.0	40.0 ± 2.4	86.8 (0.348)	251 ± 26	8.8 ± 7.4	1.37
12	C	15.2 ± 1.3	15.0 ± 1.2	187.8 (0.753)	32 ± 2	2.9 ± 2.6	1.26
13	C	17.8 ± 1.6	16.0 ± 0.8	53.8 (0.216)	40 ± 3	2.9 ± 2.6	1.46
14	C	15.6 ± 1.4	14.0 ± 1.0	179.6 (0.72)	33 ± 3	2.8 ± 2.3	1.40
15	C	21.0 ± 2.5	18.0 ± 1.5	149.0 (0.60)	48 ± 3	2.8 ± 2.1	1.54

Note: Numbers in parentheses are in g/N m³.

^aAll values are the results of three tests; average ± standard deviation.

^bStack A and B are for coal-fired boilers, and stack C is for an oil-fired boiler.

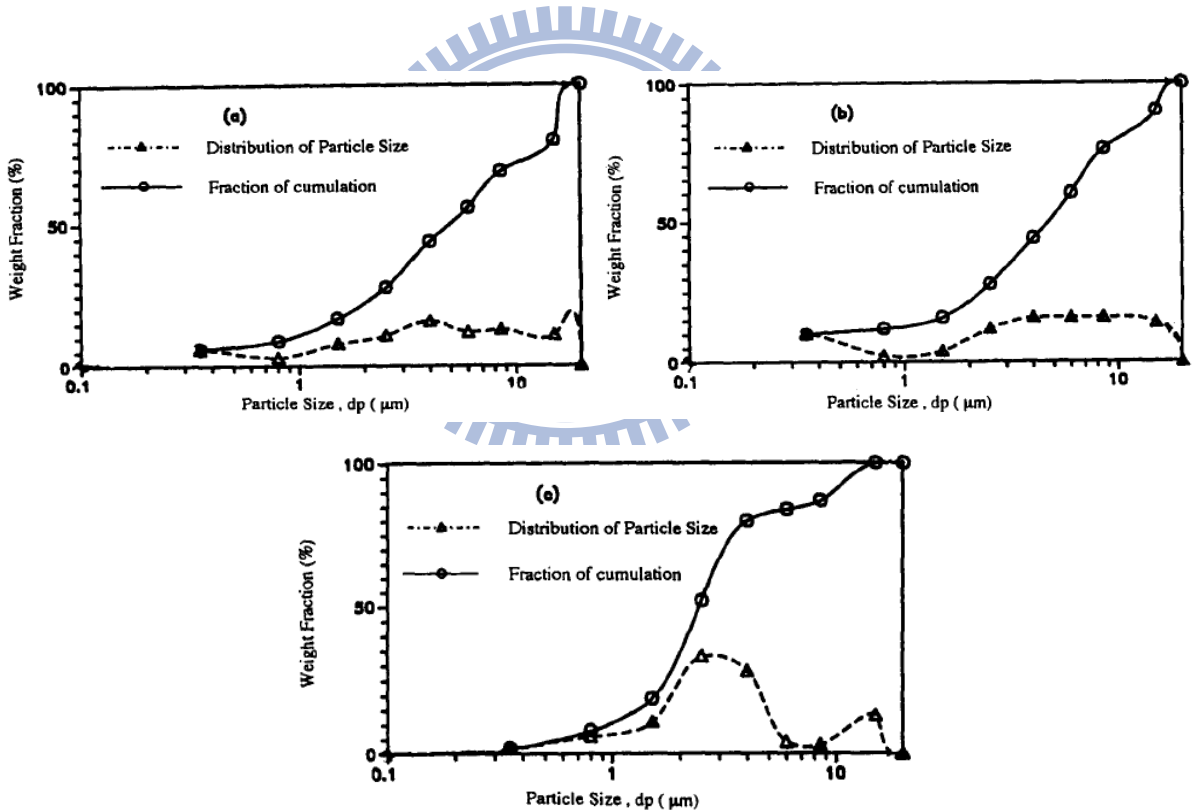


圖 2-1 三種不同排放管道之煙道氣體，微粒經由靜電集塵器處理後之粒徑分佈和累積

分佈比率圖。A, B：燃煤鍋爐煙道，C：燃重油鍋爐煙道[6]

Meng et al.(2000)使用計算模式模擬燃煤發電廠之煙囪排放一次微粒及排出氣體凝聚形成的二次微粒對不透光度的影響[7]，模式中考慮了浮力、動量、氣膠熱力學平衡及微粒核化、凝結等作用，粒狀物的化學組成模擬假設氣體/微粒平衡過程包含硫酸鹽、硝

酸鹽、氯化銨及水汽等物種。模式中模擬發電廠裝設靜電集塵器(electrostatic precipitators, ESP)與煙道氣脫硫設備(flue gas desulfurization, FGD)兩種不同的空氣污染防治設備，探討不同空氣污染防治設備組合對不透光度之影響，一種為發電廠有安裝 ESP 但無加裝 FGD，另一種為發電廠同時安裝 ESP 與 FGD 裝置。結果顯示，在僅安裝 ESP 的情形下，不含硫微粒的粒徑範圍為 0.1~1 μm ，排放率為 1.2 g/s；含硫微粒的粒徑範圍為 0.02~2.5 μm ，排放率為 0.2 g/s。在排放率低時，不透光度的模擬值幾乎和一次微粒的排放率呈線性關係。在安裝 ESP 與 FGD 的條件下，因 FGD 會增加煙煙中水汽的含量及降低溫度，Meng et al.[7]考慮 SO_3 氣體/微粒轉化的兩個極端例子，第一個例子假設所有的 SO_3 溶解在煙流的凝結水滴中， SO_3 的排放和一次微粒與水汽蒸發有關，故可忽略核化形成硫酸的作用；第二個例子假設 SO_3 在氣相中轉化成 H_2SO_4 ，並在凝結成一次微粒或液滴之前核化生成新的微粒，故核化和凝結作用皆須考慮在內。圖 2-2 為考慮及不考慮 H_2SO_4 核化作用下，不透光度模擬值和 SO_3 排放率之關係，當忽略硫酸核化作用時，因所有的硫酸蒸汽會凝結於已存在的微粒上，增加微粒的大小與質量，可更有效地散射光線，故不透光度會隨著 SO_3 排放率的增加而明顯上升。若考慮核化作用，而忽略膠結時，不透光率會保持定值；或者考慮膠結時不透光度會隨著 H_2SO_4 排放率的增加而輕微增加。當考慮核化作用，煙流中大部份的 H_2SO_4 會形成新的細微粒，這些新形成的硫酸微粒沒有足夠時間藉由膠結作用增長成大微粒來顯著地散射光線。研究更探討膠結作用對不透光率之影響，當 SO_3 排放率為 2 g/s，排放出的 SO_3 只有 5%會成長至粒徑大於 0.1 μm 的硫酸鹽微粒，不透光度亦只增加 10%；當 SO_3 排放率為 10 g/s，排放出的 SO_3 有 25%會成長至粒徑大於 0.1 μm 的硫酸鹽微粒，不透光度以 2 的倍數增加。若忽略膠結作用對不透光率之影響， H_2SO_4 微粒的粒徑會維持在對不透光率不會造成影響的範圍。

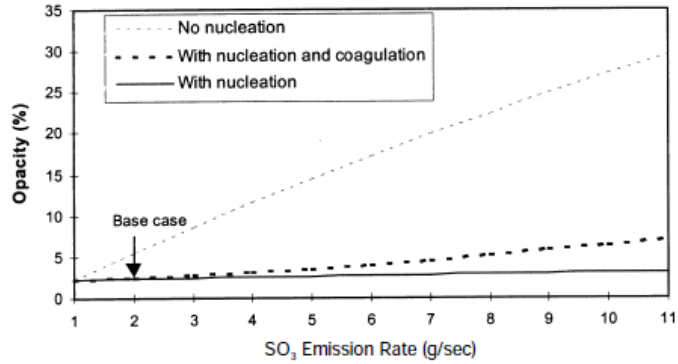


圖 2-2 考慮及不考慮 H_2SO_4 核化作用下，不透光度模擬值和 SO_3 排放率之關係[7]

葉(2008)的研究提供某燃煤電廠加裝靜電集塵器之煙囪的煙道檢測資料如圖 2-3 所示[8]，可知煙道氣體的微粒重量大部分集中在次微米範圍約 $0.6\sim 2\ \mu m$ 之間，質量中間粒徑(MMAD)為 2296 nm、數目中間粒徑(NMAD)為 180 nm、幾何標準偏差(σ_g)為 2.51。

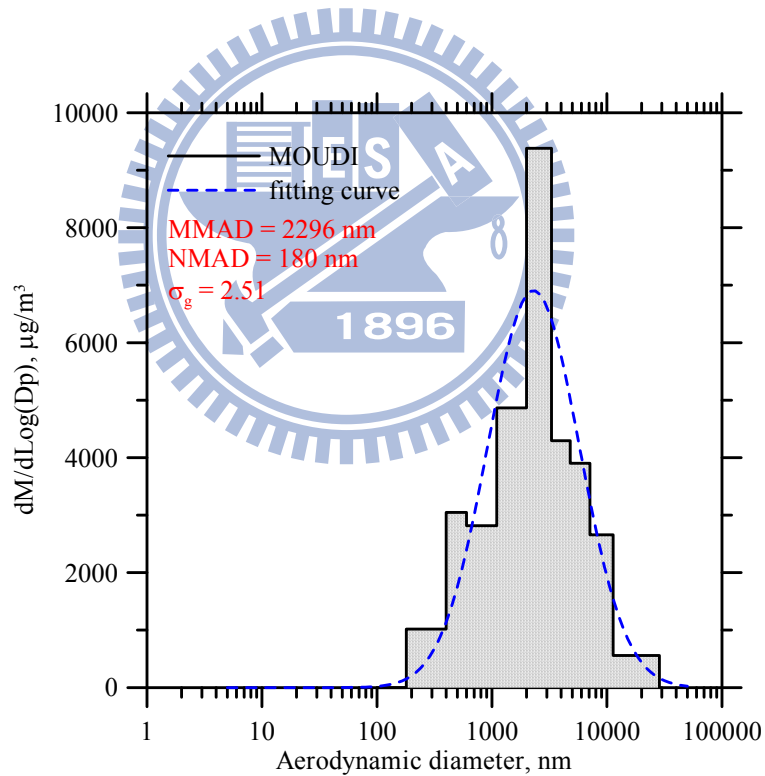


圖 2-3 質量濃度分佈圖，83/04/15，電廠 3 號機煙囪

2.2 粒狀物之消光特性及計算

當入射光線被氣膠微粒阻擋，使得光被散射而改變行徑方向或被吸收而損失能量，造成入射光方向光能減弱的現象稱為消光(extinction)。而光能在入射方向減弱的程度可

用消光效率(extinction efficiency)加以描述。消光效率(Q_e)的定義為：

$$Q_e = \frac{E_e}{E_0} \quad (2.1)$$

式中 E_e 為單位時間內被氣膠微粒減弱之光能， E_0 為單位時間內投射於氣膠微粒截面之光能。

消光包括散射與吸光兩種作用，故散射效率(scattering efficiency) Q_s 與吸光效率(absorption efficiency) Q_a 相加可得消光效率：

$$Q_e = Q_s + Q_a \quad (2.2)$$

而散射效率與吸光效率之定義分別為：

$$Q_s = \frac{E_s}{E_0} \quad (2.3)$$

$$Q_a = \frac{E_a}{E_0} \quad (2.4)$$

式中 E_s 與 E_a 分別為單位時間內氣膠微粒所散射與吸收之光能。 Q_e 可由米氏散光理論計算而得，如圖 2-4 所示。對於粒徑較大($d_p > 4\mu\text{m}$)的不透光氣膠微粒，光線完全被微粒橫截面阻斷，可視為單純的攔截，其消光效率等於 2。然而，對於粒徑較小的氣膠微粒，光與微粒間的互動作用相當複雜，消光效率往往大於 1，甚至高達 5 左右[1]。

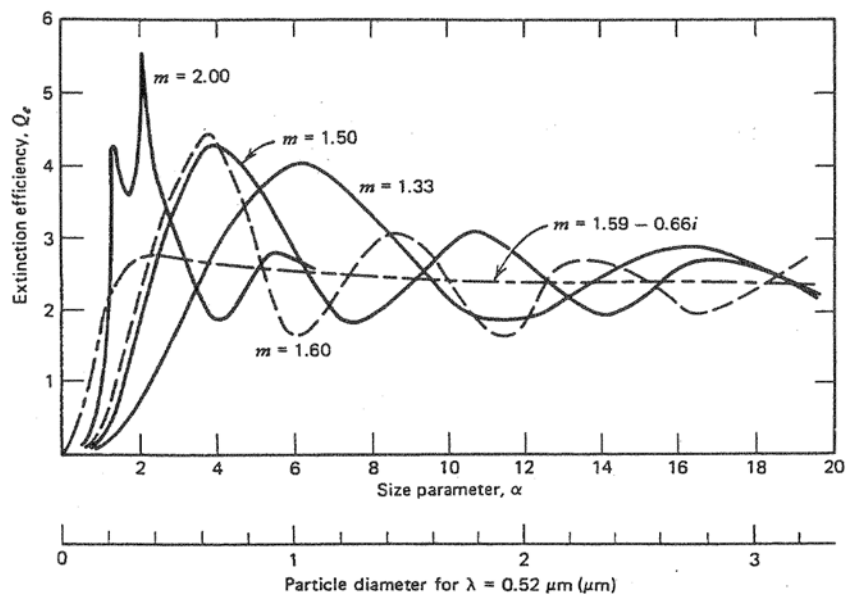


圖 2-4 消光效率與圓球微粒粒徑之關係[1]

Bohren and Huffman(1983)[9]推導出單位體積圓球形微粒散射效率與消光效率的解析解為[10]

$$Q_e(m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{k=1}^{\infty} (2k+1) \operatorname{Re}[a_k + b_k] \quad (2.5)$$

$$Q_s(m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{k=1}^{\infty} (2k+1) \left[|a_k|^2 + |b_k|^2 \right] \quad (2.6)$$

$$Q_a(m, \alpha) = Q_e(m, \alpha) - Q_s(m, \alpha) \quad (2.7)$$

式中 a_n 、 b_n 為米氏係數，分別表示為

$$a_k = \frac{\alpha \psi_k'(y) \psi_k(\alpha) - y \psi_k'(\alpha) \psi_k(y)}{\alpha \psi_k'(y) \zeta_k(\alpha) - y \zeta_k'(\alpha) \psi_k(y)} \quad (2.8)$$

$$b_k = \frac{y \psi_k'(y) \psi_k(\alpha) - \alpha \psi_k'(\alpha) \psi_k(y)}{y \psi_k'(y) \zeta_k(\alpha) - \alpha \zeta_k'(\alpha) \psi_k(y)} \quad (2.9)$$

其中 $y = \alpha m$ ， $\psi_k(z)$ 與 $\zeta_k(z)$ 為 Riccati-Bessel 函數，分別表示為

$$\psi_k(z) = \left(\frac{\pi z}{2} \right)^{\frac{1}{2}} J_{k+\frac{1}{2}}(z) \quad (2.10)$$

$$\zeta_k(z) = \left(\frac{\pi z}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[J_{k+\frac{1}{2}}(z) + i(-1)^k J_{-k-\frac{1}{2}}(z) \right] \quad (2.11)$$

入射光進入氣膠微粒後光的角分佈稱為氣膠的散射，氣膠微粒折射率為影響微粒散射光線之重要參數，可用複數型式表示為：

$$m = n - ik$$

式中 m 為微粒折射率， n 為折射率實部，代表微粒的散光性， k 為折射率虛部，代表微粒的吸光性。表 2-2 為常見物質之折射率。此外，入射光波長和氣膠微粒粒徑也會影響微粒的散光，兩者關係可以用無因次的尺寸參數(size parameter)表示，其定義為：

$$\alpha_0 = \frac{\pi d_p}{\lambda_0}$$

式中 α_0 為微粒尺寸參數， d_p 為微粒粒徑， λ_0 為入射光波長。

表 2-2 在鈉黃光波長 $\lambda=589\text{nm}$ 下，常見物質之折射率[10]

Substance	$m = n - ik$		
	n	k	
Water	1.333	0	
Water(ice)	1.309		
NaCl	1.544	0	
H ₂ SO ₄	1.426	0	
NH ₄ HSO ₄	1.473	0	
(NH ₄) ₂ SO ₄	1.521	0	
SiO ₂	1.55	0	($\lambda=550\text{nm}$)
Carbon	1.96	0.66	($\lambda=550\text{nm}$)
Mineral dust	1.56	0.66	($\lambda=550\text{nm}$)

當光強度為 I 的平行光線通過氣膠微粒群時，在此距離內光強度的減弱量(dI)與氣膠微粒群的長度(dL)及入射強度呈正比關係：

$$dI = -\sigma_e IdL \quad (2.12)$$

式中 σ_e 為微粒消光係數(extinction coefficient)。 (2.12) 式積分後可得 Bouguer 定律 (Bouguer's law)，或稱為 Lambert-Beer 定律(Lambert-Beer law)：

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma_e L} \quad (2.13)$$

式中 I_0 為入射光強度， L 為光線通過氣膠微粒群之總長度。此公式可用於計算煙囪排煙之不透光度[11]如(2.14)式

$$O_p(\%) = [1 - \exp(-2a\sigma_e)] \times 100 \quad (2.14)$$

式中 O_p 為煙流不透光度， a 為煙流半徑， σ_e 為微粒消光係數。

消光係數也可以表示為散射係數(scattering coefficient)與吸光係數(absorption coefficient)之和：

$$\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a \quad (2.15)$$

式中 σ_s 與 σ_a 分別為微粒散射係數與吸光係數。

對單位體積單徑圓球形微粒的氣膠微粒群的消光係數可表示為：

$$\sigma_e = NA_p Q_e = \frac{\pi N d_p^2 Q_e}{4} \quad (2.16)$$

式中 N 為微粒之數目濃度(單位體積微粒數量)， A_p 為微粒與入射光行徑方向垂直橫截面積， d_p 為微粒直徑。

當氣膠微粒粒徑大小不同時，(2.16)式則須改寫為：

$$\sigma_e = \sum_i n_i(d_{p,i}) Q_{e,i} A_{p,i} \quad (2.17)$$

式中 $n_i(d_{p,i})$ 、 $Q_{e,i}$ 與 $A_{p,i}$ 分別為粒徑為 $d_{p,i}$ 的微粒數目濃度，消光效率與垂直於入射光行徑方向之截面積。連續分佈多粒徑圓球形微粒的消光係數可以表示為：

$$\sigma_e = \int_0^{\infty} \frac{\pi}{4} d_p^2 f_p(d_p) N_T Q_e dd_p \quad (2.18)$$

式中 N_T 為總數目濃度， $f_p(d_p)$ 為微粒數目分佈函數。

另外，單徑微粒的質量濃度(C_m)可以表示為：

$$C_m = \frac{N \rho_p \pi d_p^3}{6} \quad (2.19)$$

式中 ρ_p 為微粒密度。將(2.16)式與(2.19)式代入(2.13)式，Bouguer 定律可以表示為：

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\sigma_e L) = \exp\left(-\frac{3C_m Q_e L}{2\rho_p d_p}\right) \quad (2.20)$$

2.3 煙流上升模式與挾捲函數經驗式

有關煙流上升(plume rise)的研究已被廣泛研究，研究初期 Stern(1976)和 Hanna(1972)提出污染源在下風處隨距離變化的半經驗公式[12; 13]，而後 Briggs(1975)加入浮力通量(buoyancy flux)的參數，並考慮了大氣紊流的影響並引進一些物理量(如摩擦速度、熱通量及垂直高度等)的概念[14; 15]。近期的煙流上升模式皆以下列兩種物理現象為基礎：(1)煙流的中心線會隨垂直高度增加；(2)捲入煙流中的環境大氣會造成水平和垂直方向的擴散[16]。Schatzmann(1979)提出的煙流上升積分模式包含質量守恆、動量守恆，濃度及能量守恆方程式[17]，圖 2-5 為煙流上升與挾捲現象示意圖。而後有許多學者針對冷

卻塔排放出的濕煙流提出相關模式[13; 18-22]，可應用於貯水槽、風洞、煙囪與冷卻塔等範圍。

Janicke and Janicke(2001)提出的煙流上升模式稱為 PLURIS[22]，為一考慮煙流截面積上的特性及沿著煙流軸向發展之積分模式，和其他模式不同的是，此模式不需要假設煙流的特性分佈為對稱，煙流與大氣有些微的密度差時也可使用，可用於模擬複雜的風速場、煙流排放溫度與環境溫度相差很大，乾煙流或濕煙流、飽和與不飽和煙流等情形。

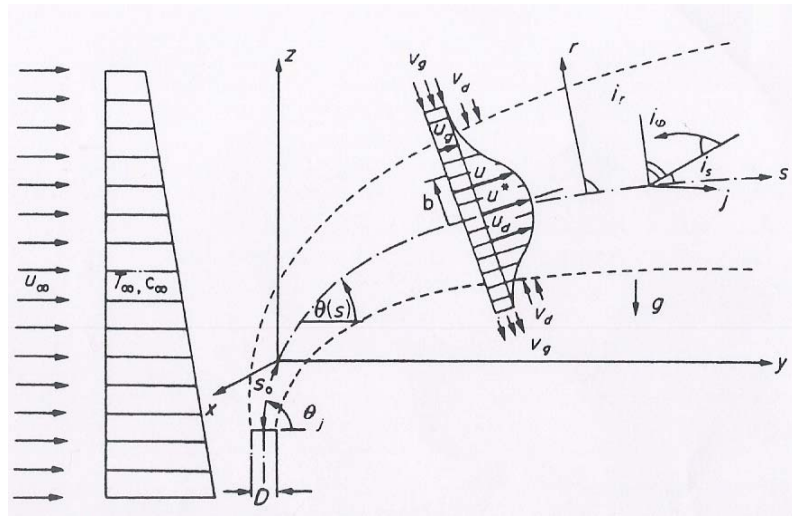


圖 2-5 煙流上升與挾捲現象示意圖[17]

挾捲過程(entrainment)是指環境中乾淨的空氣被捲入廢氣中成為廢氣一部分的過程。許多學者針對濕煙流提出挾捲函數(entrainment function)經驗公式，其中挾捲係數(entrainment coefficient)定義為單位時間單位長度內乾淨空氣進入廢氣的質量，單位為 kg/ms。針對挾捲係數已有許多研究先進提出之經驗式簡述如下：

Janicke and Janicke(2001)所提出的挾捲係數 ε 為[22]

$$\varepsilon = 2\pi\rho_a E \quad (2.21)$$

式中 ρ_a 為大氣密度， E 為挾捲函數，由(2.22)式計算

$$E = a \left(\frac{\alpha}{2} \frac{w_{par}^2}{w} + \beta \frac{w_{per}^2}{w} \right) + au \frac{\gamma}{F_r^2} \quad (2.22)$$

式中 a 為煙流平均半徑， α 、 β 與 γ 為經驗係數， w 為風速與煙流的相對速度， F_r 為福祿數，由(2.23)式計算

$$F_r^2 = \frac{\rho_a u^2}{|\rho_a - \rho| g a} \quad (2.23)$$

式中 ρ 與 ρ_a 分別為煙流密度與大氣密度。

Rezacova and Sokol(2000)所提出的挾捲係數 ε 為[23]

$$\varepsilon = \pi \alpha_e \rho u \frac{T_v}{T_{va}} a \quad (2.24)$$

式中 α_e 為經驗係數($\alpha_e = 0.3$)， T_v 為煙流虛溫， T_{va} 為大氣虛溫。

Carhart and Policastro(1991)所提出的挾捲係數 ε 為[24]

$$\varepsilon = \frac{2}{a} \frac{\rho_a V_e}{\rho u} M \quad (2.25)$$

V_e 為挾捲速度(entrainment velocity)，由(2.26)式計算

$$V_e = \alpha |u - u_a \cos \theta| + \beta u_a \sin \theta \quad (2.26)$$

式中 u_a 為風速， α 與 β 為經驗係數，分別為 0.125 與 0.575。若將煙流視為圓形截面

$A_c = \pi a^2$ ，質量流率為 $M = A_c \rho u$ 代入(2.25)式，可表示成

$$\varepsilon = 2\pi a \rho_a V_e \quad (2.27)$$

Orville 等人(1980)所提出的挾捲係數 ε 為[25]

$$\varepsilon = \frac{2\alpha}{a} M \quad (2.28)$$

若將煙流視為圓形截面 $A_c = \pi a^2$ ，質量流率為 $M = A_c \rho u$ 來取代，(2.28)式可表示成

$$\varepsilon = 2\alpha \pi \rho u a \quad (2.29)$$

Niewiadomski and Haman(1984)所提出的挾捲係數為[26]

$$\varepsilon = A_c \rho u \times \left[\frac{\alpha}{au} + \frac{(\beta + \gamma \cos \phi) |u_z - u_{za}|}{au} + \frac{u_x \delta}{au} \exp\left(-\frac{\beta s}{a_0}\right) \right] \quad (2.30)$$

式中 u_x 和 u_z 分別為煙流的水平與垂直速度， u_{za} 為風速的垂直分量， ϕ 為煙流與水平面

的角度($\cos \phi = \frac{u_x}{u}$)， s 為沿煙流軸向的距離， a_0 為煙囪半徑， α 、 β 、 γ 與 δ 為經驗係

數。將煙流視為圓形截面 $A_c = \pi a^2$ 代入(2.30)式，可表示成

$$\varepsilon = \pi \rho a \times \left[\alpha + (\beta + \gamma \cos \phi) |u_z - u_{za}| + u_x \delta \exp \left(-\frac{\beta s}{a_0} \right) \right] \quad (2.31)$$

2.4 粒狀物之潮解性

氣膠中的水分是影響物化特性的重要因子，在低濕度的環境下氣膠微粒的無機鹽類會形成結晶，隨著環境中濕度越高，微粒會維持在固態，直到超過一特定的溼度，吸濕性(hygroscopic)的鹽類微粒會瞬間吸收水分，氣膠由固相轉變為均相液滴，此臨界點稱為潮解點(deliquescence relative humidity, DRH)。潮解現象發生後，鹽類解離達過飽和狀態，使氣膠質量及體積皆因吸收大量水汽而瞬間成長，即使相對溼度低於潮解點，氣膠亦不會將所有水分釋放出來，而是以結晶水的方式產生，直到相對濕度低於氣膠微粒的結晶點(crystallization relative humidity, CRH)，才會由液相狀態轉變為固態，如圖 2-6 所示，一般而言，氣膠的結晶點均低於潮解點。微粒的潮解點除了與化學組成有關之外也隨溫度而變化，可以用(2.32)式計算：

$$DRH(T) = DRH(298) \exp \left\{ \frac{\Delta H_s}{R} \left[A \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) - B \ln \frac{T}{298} - C(T - 298) \right] \right\} \quad (2.32)$$

式中 $DRH(T)$ 為溫度 T 時微粒之潮解點， $DRH(298)$ 為溫度 298 K 時微粒之潮解點， ΔH_s 為鹽類之熱焓(kJ/mol)， A 、 B 與 C 為經驗係數，如表 2-3 所示。

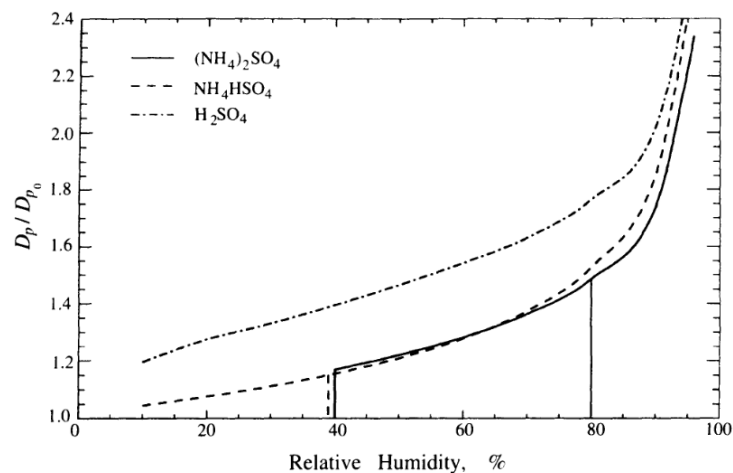


圖 2-6 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4HSO_4 與 H_2SO_4 氣膠微粒粒徑與相對濕度之關係[10]

表 2-3 可溶性鹽類之 A、B 與 C 值($n = A + BT + CT^2$ ， n 為溶質莫耳分率)[10]

Salt	n(at 298K)	A	B	C
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.104	0.1149	-4.49×10 ⁻⁴	1.39×10 ⁻⁶
Na ₂ SO ₄	0.065	0.3754	-1.76×10 ⁻³	2.42×10 ⁻⁶
NaNO ₃	0.194	0.1868	-1.68×10 ⁻³	2.71×10 ⁻⁶
NH ₄ NO ₃	0.475	4.298	-3.62×10 ⁻²	7.85×10 ⁻⁵
KCl	0.086	-0.2368	1.45×10 ⁻³	-1.24×10 ⁻⁶
NaCl	0.111	0.1805	-5.31×10 ⁻⁴	9.97×10 ⁻⁷

微粒粒徑隨濕度變化之微粒體積成長因子($\frac{V}{V_0}$)可由可溶性純物質微粒之體積成長

因子關係式推導出之半經驗式如(2.33)式

$$\frac{V_p}{V_0} = \left(\frac{d_p}{d_{p0}} \right)^3 = 1 + \frac{RH}{1-RH} \frac{\langle i \rangle \langle \varepsilon_0 \rangle}{\langle M_s \rangle} \frac{M_w E_p \rho_p}{M_w E_p \rho_p} \quad (2.33)$$

式中 V_p 為濕微粒體積， V_0 為乾微粒體積， d_p 為微粒粒徑， d_{p0} 為乾微粒粒徑， RH 為相對濕度， M_w 為水分子量， E_p 為乾微粒之鹽類成分含量比例， ρ_p 為微粒密度， $\langle i \rangle$ 為由水鹽類成分所組成微粒相相對應之 van't Hoff factor， $\langle \varepsilon_0 \rangle$ 為微粒中鹽類成分所佔比例， $\langle M_s \rangle$ 為微粒鹽類成分之分子量。微粒成長熱力學函數($\frac{\langle i \rangle \langle \varepsilon_0 \rangle}{\langle M_s \rangle}$)為相對溼度函數與微粒之鹽類成分有關，而非鹽類的微粒之成長因子則須在不同濕度下以實驗測定。

前人研究所得不同組成微粒在不同相對濕度下之($\frac{\langle i \rangle \langle \varepsilon_0 \rangle}{\langle M_s \rangle}$)如表 2-4 所示。

表 2-4 微粒成長熱力學函數 $\frac{\langle i \rangle \langle \epsilon_0 \rangle}{\langle M_s \rangle}$ [27]

微粒型態	相對溼度(%)							
	30	40	50	60	70	80	90	
純物質 ¹								
H ₂ SO ₄	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.66	0.52	
NH ₄ HSO ₄		0.61	0.48	0.45	0.46	0.4	0.35	
(NH ₄) ₂ SO ₄		1.1	0.71	0.53	0.39	0.32	0.27	
NH ₄ NO ₃		0.29	0.23	0.37	0.31	0.32	0.33	
內部混合鹽類微粒 ²								
(NH ₄) ₂ SO ₄ 與 NH ₄ NO ₃ 各半						0.32	0.33	0.35
(NH ₄) ₂ SO ₄ 與 H ₂ SO ₄ 各半		0.61	0.48	0.45	0.46	0.4	0.35	
混合微粒								
海鹽(E=0.89)	0.04	0.06	0.09	0.13	0.83	0.71	0.57	
大陸型都會微粒 ²								
(0.5NH ₄ NO ₃ + 0.1(NH ₄) ₂ SO ₄ + 0.4 海鹽; E=0.51)	0.24	0.24	0.3	0.54	0.67	0.58	0.46	
(0.6(NH ₄) ₂ SO ₄ + 0.2NH ₄ NO ₃ + 0.2H ₂ SO ₄ ; E=0.63)	0.18	0.18	0.2	0.34	0.31	0.29	0.24	
(0.9(NH ₄) ₂ SO ₄ + 0.1H ₂ SO ₄ ; E=0.63)	0.25	0.48	0.62	0.65	0.69	0.56	0.37	
都會型微粒								
(0.4NH ₄ HSO ₄ + 0.4carbonaceous + 0.2residual; E=0.63) ²	0.2	0.4	0.6	0.7	0.75	0.65	0.6	
Lowenthal 等(1995)實測 ³	0.09	0.12	0.13	0.13	0.17	0.27	0.23	

1. 取自 Tang(1980)和 Tang 及 Munkelwitz(1977)

2. 取自 Sloane(1986)

3. 取自 Lowenthal 等(1995)

第三章 研究方法

行政院環保署環境檢驗所針對排放管道廢氣中不同檢測項目訂有多種標準採樣檢測方法。本研究使用微孔均勻沉降衝擊器 Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI, Model 110, MSP Corporation, Minneapolis, MN)收集某光電廠煙囪出口廢氣的微粒，量測微粒質量粒徑分佈及微粒總質量濃度。除了在煙囪出口進行現場的採樣外，如圖 3-1 所示，本研究亦使用煙流上升模式來模擬從煙囪排放之煙流在空間中的消長情形，考慮在煙流內由水蒸氣造成的微粒成長，再由米氏散射理論計算微粒的消光效率，進而推估由白煙造成的不透光度變化的影響。



圖 3-1 某光電廠屋頂煙囪出口採樣點

3.1 採樣流程

3.1.1 微孔均勻沉降衝擊器儀器介紹

本研究使用十階 MOUDI 擷取微粒在 $0.1\sim 18\mu\text{m}$ 之微粒質量濃度分佈。圖 3-2 為 MOUDI 的實際照片及內部構造的示意圖。MOUDI 是一台串聯式的十階衝擊器，可將採集之微粒作分徑，進而求得各分徑區間的質量濃度。微粒分徑收集的原理是利用不同粒徑微粒有不同的慣性力來進行分徑，粒徑大的微粒因慣性力大，故會衝擊在上面的衝擊板(impactor)上，粒徑小的微粒則會隨著氣流轉向而到下一階衝擊器。利用不同噴嘴(nozzle)數目及大小來決定粒徑收集範圍，較上面階層的衝擊器噴嘴數目較少孔徑也較大。在設計流量 30 L/min 的操作條件下，可將懸浮微粒分徑為 18 、 10 、 5.6 、 3.2 、 1.8 、 1.0 、 0.56 、 0.32 、 0.18 、 0.10 及 $<0.1\mu\text{m}$ (after filter)。MOUDI 的噴嘴及衝擊板如圖 3-3 所示。

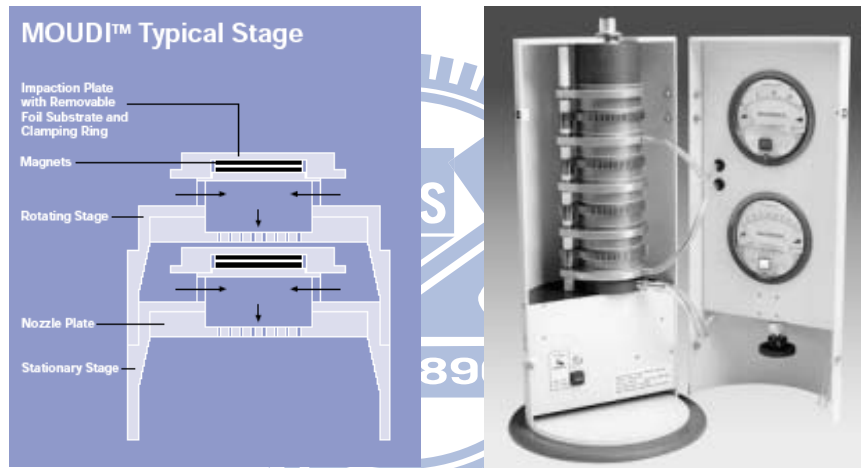


圖 3-2 MOUDI 內部構造的示意圖(左圖)與實際照片(右圖)



圖 3-3 MOUDI 之噴嘴(左圖)及衝擊板(右圖)

3.1.2 MOUDI 採樣前的準備及樣本分析

在 MOUDI 的第 0 個至第 9 個衝擊板上皆以不塗敷矽黃油的鐵氟龍濾紙當作衝擊基質收集微粒，最後終端以鐵氟龍濾紙(不塗敷矽黃油)收集直徑 100 nm 以下的微粒，測得微粒各粒徑區間之質量濃度。採樣結束後，將鐵氟龍濾紙先放置調理箱一天，溫度控制在 21 ± 1 °C，濕度維持在 40~45 %，調理後再進行秤重分析；在實驗室空白方面，鋁箔的重量差異需小於 1 微克，而鐵氟龍濾紙的重量差異也需小於 5 微克，達到以上條件後方能開始進行秤重。

3.1.3 採樣地點及採樣流程

本研究於竹南科學園區某光電廠的煙囪出口進行六次採樣，使用 MOUDI 採樣器收集煙道中量測粒徑分佈，此實驗的採樣日期及背景條件列於表 3-1，圖 3-4 為 MOUDI 現場採樣照。MOUDI 的 0~9 階及 after filter 皆使用鐵氟龍濾紙，採樣後的鐵氟龍濾紙利用微量天平量秤重得到各階層採集的微粒重量，再除以採樣氣體體積即可得到微粒重量濃度，由(3.1)式來計算：

$$C_p = \frac{W}{Q_g \times t} \times 10^6 \quad (3.1)$$

式中 C_p 為微粒的重量濃度， W 為採樣前後的重量差， Q_g 為氣體採樣體積流率， t 為採樣時間。最後依照 MOUDI 各階的截取氣動直徑(cutoff aerodynamic diameter)，可得到煙道氣體之 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{0.1}$ 及微粒總質量濃度。

為了將 MOUDI 採得之實驗結果作為模擬之初始條件，需將 MOUDI 之擷取氣動直徑轉換為微粒粒徑如(3.2)式所示，用於質量濃度轉換為數目濃度之用如(3.3)式所示

$$d_p = d_{pa} \left[\frac{C_c(d_{pa})\rho_0}{C_c(d_p)\rho_p} \right]^{0.5} \quad (3.2)$$

式中 d_p 為微粒粒徑， d_{pa} 為微粒氣動直徑， ρ_0 為微粒單位密度(1000kg/m^3)， ρ_p 為微粒密度， C_c 為滑動校正因子。

$$N = \frac{6C_m}{\pi d_p^3 \rho_p} \quad (3.3)$$

式中 N 為微粒數目濃度， C_m 為微粒質量濃度， ρ_p 為微粒密度， d_p 為微粒粒徑。



圖 3-4 MOUDI 現場採樣照

表 3-1 MODUI 採樣背景條件

採樣日期	採樣地點	採樣時間	煙囪出口溫度	煙囪出口壓力
			°C	Pa
2009.09.11	P020 煙囪	10	23	101350
2009.10.26	P001 煙囪	25	23	101375
2009.12.10	P020 煙囪	10	23	101350
2010.03.01	P018 煙囪	10	24	101350
2010.03.08	P018 煙囪	10	24	101350
2010.06.29	P020 煙囪	10	24	101350

3.2 問題描述

本研究以常溫與高溫煙流作為研究對象，其中某光電廠排放之常溫煙流溫度為 $T=23$ °C，煙囪出口直徑為 $D_0=1.15$ m、煙囪高度為 35.6m、煙流排放速度 $u=3.3$ m/s、相對濕度為 $RH=100\%$ 。高溫煙流為燃煤電廠排放之煙流，溫度為 $T=138$ °C、煙囪出口直徑為 $D_0=6.7$ m、煙囪高度為 250m、煙流排放速度 $u=14.18$ m/s、煙道含水率為 10%，模擬外界環境之風速為 u_a m/s、溫度為 T_a °C、相對溼度為 RH_a %，並考慮大氣中風速

受邊界層效應的影響，在不同環境條件下煙囪排出之煙流的消長情形與計算不透光度，研究對象之初始條件及環境模擬參數如表 3-2 所示。

表 3-2 研究對象之初始條件及環境模擬參數

案例	常溫煙流	高溫煙流
	光電廠	燃煤電廠
煙流初始條件		
煙囪直徑	1.15m	6.7m
煙囪高度	35.6m	250m
排放速度	3.3m/s	14.18m/s
排放溫度	23°C	138°C
相對濕度或煙道含水率	100%	10%
環境模擬條件		
環境溫度	10°C、30°C	20°C
環境相對濕度	70%	70%
風速	0.5, 1, 2, 5, 10m/s	1, 2, 5, 10m/s

問題基本假設

本研究問題之基本假設如下：

- (1) 環境大氣流場為紊流；
- (2) 煙流和環境大氣皆近似理想氣體；
- (3) 在相同高度下，煙流內壓力與大氣靜壓相等；
- (4) 煙流水蒸氣濃度與大氣水蒸氣濃度相等處為煙流邊界；
- (5) 煙流內溫度、水蒸氣濃度、微粒濃度皆為高斯分佈；
- (6) 微粒形狀為圓形；
- (7) 微粒成長考慮凝結、蒸發、潮解作用，忽略核凝與膠結作用，微粒沿煙流運動方向移動，當煙流飽和比大於 1，水蒸氣凝結於微粒表面粒徑增大，當飽和比介於 1 與 DRH 間，微粒粒徑為潮解最大粒徑，當飽和比小於 DRH，微粒表面水蒸氣蒸發粒徑變小。

3.3 統御方程式

本研究所使用之統御方程式及求解統御方程式如下：

卡氏座標與煙流 s 座標的關係

煙流由煙囪排出後，以 s 座標表示煙流的中心軌跡座標，卡氏座標與 s 軸之關係為

$$\frac{dx}{ds} = \frac{u_v}{u} \quad (3.4)$$

式中 $v = x, y, z$ 為直角座標 x 、 y 、 z 三個方向的分量。

質量守恆方程式

質量守恆方程式可表示為

$$\frac{d}{ds}(A_c \rho u) = 2\pi \rho_a E \quad (3.5)$$

式中 A_c 為煙流截面積， u 為煙流平均速度， ρ 為煙流密度， ρ_a 為大氣密度， E 為挾捲函數，為由環境大氣捲入的質量流率所造成的變化，由 Janicke and Janicke(2001)所提出的挾捲函數經驗式為[22]：

$$E = a \left(\frac{\alpha}{2} \frac{w_{par}^2}{w} + \beta \frac{w_{per}^2}{w} \right) + au \frac{\gamma}{F_r^2} \quad (3.6)$$

式中 a 為煙流的平均半徑， F_r^2 為福祿數的平方， w 為風速與煙流的相對速度， α 、 β 與

γ 為經驗係數。 α 為煙流成長速率(growth rate of plume)，定義為 $\alpha = \frac{da}{ds}$ 設定為 0.15[14; 22]。 $a = \beta z$ ， β 為常數設定為 0.6[14; 22; 28; 29]。 γ 設定為 0.38[22] (0.25[靜止環境]和 0.5[卷曲煙流]之平均值)。因 $M = A_c \rho u$ 、 $\varepsilon = 2\pi \rho_a E$ ，故(3.4)式可化簡為

$$\frac{d}{ds}(M) = \varepsilon \quad (3.7)$$

式中 ε 為挾捲係數。

動量守恆方程式

動量守恆方程式可表示為

$$\frac{d}{ds}(Mu_v) = \varepsilon u_{av} + \delta_{v,z} Ag(\rho_a - \rho) \quad (3.8)$$

式中 u_a 為大氣平均速度， g 為重力加速度， $v = x, y, z$ 為直角座標 x 、 y 、 z 三個方向的分量，Kronecker symbol $\delta_{v,\gamma}$ ($v, \gamma = x, y, z$)。

能量守恆方程式

能量守恆方程式可表示為

$$\frac{d}{ds} \left[M \left(T - \frac{h_v}{C_p} \eta \right) \right] = -M \frac{g}{C_p} \frac{u_z}{u} \frac{\rho_a}{\rho} + \varepsilon \left(T_a - \frac{h_v}{C_p} \eta_a \right) \quad (3.9)$$

式中 T 為煙流溫度， T_a 為大氣溫度， u_z 為煙流 z 方向速度， C_p 為定壓比熱， h_v 為水的潛熱， η_a 為大氣中水凝結的比例。

速度變化方程式

速度變化方程式可表示為

$$M \frac{d}{ds} k^2 = \varepsilon \left[(u - u_a)^2 + k_a^2 - k^2 \right] \quad (3.10)$$

式中 k^2 為煙流紊流動能(turbulent energy (m^2/s^2))，為 x 、 y 、 z 三個方向的均方根速度平方之和， k_a^2 為大氣紊流動能(turbulent energy (m^2/s^2))。

總含水量變化方程式

總含水量變化方程式可表示為

$$\frac{d}{ds}(M\zeta) = \varepsilon\zeta_a \quad (3.11)$$

式中 ζ 為煙流內總含水量， ζ_a 為大氣中總含水量。

純量守恆方程式

純量守恆方程式可表示為

$$\frac{d}{ds} \left(M \frac{N}{\rho} \right) = \varepsilon \frac{N_a}{\rho_a} \quad (3.12)$$

式中 N 為煙流內微粒的數目濃度， N_a 為大氣中微粒的數目濃度(假設大氣為乾淨空氣 $N_a = 0$)。

3.3.1 微粒成長模式

由煙囪排出的廢氣與大氣混合後，煙流只要在飽和比略大於 1 的情況下，微粒會發生核凝成長(nucleated condensation)，飽和比的定義如下：

$$S_R = \frac{P_v}{P_s} \quad (3.13)$$

式中 P_v 為煙流內水蒸氣壓力， P_s 為煙流內在該溫度下的飽和蒸氣壓力。

將煙囪出口端採樣所得之微粒質量粒徑分佈轉換為數目粒徑分佈，擬合後求出數目中間粒徑 CMD 與幾何標準偏差 σ_g ，因微粒呈多粒徑分佈，故將粒徑分佈範圍分割成多個粒徑分佈區間，每個粒徑區間皆可視為單粒徑分佈，以幾何平均粒徑代表其區間內平均粒徑大小。

對於粒徑介於 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 的微粒粒徑隨著時間成長之情形可以用 Fuchs and Sutugin(1971)提出的公式表示[30]：

$$\frac{dd_p}{dt_p} = \frac{4DM_w}{R\rho_w d_p} \left(\frac{P_\infty}{T_{mix}} - \frac{P_d}{T_d} \right) \left(\frac{1+Kn}{1+1.7104Kn+1.333Kn^2} \right) \quad (3.14)$$

式中 t_p 為微粒成長時間， d_p 為乾微粒粒徑， P_∞ 為混合氣體中水蒸氣壓(其中 $P_\infty = RH \times P_{s,H_2O}$)， P_d 為微粒表面之水蒸氣壓力， T_{mix} 為煙流與大氣混合溫度， T_d 為微粒表面溫度(假設 $T_{mix} = T_d$)， M_w 為水的分子量， R 為理想氣體常數， ρ_w 為水的密度， D 為溫度 T_{mix} 時空氣-水蒸氣的擴散係數， Kn 為紐森數，計算公式分別為(3.15)式與(3.16)式：

$$D = 0.22 \times 10^{-4} \left(\frac{T_{mix}}{273.15} \right)^{1.75} \quad (3.15)$$

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (3.16)$$

式中 λ 為溫度 T_{mix} 時空氣-水蒸氣的平均自由路徑長，由(3.15)式計算

$$\lambda = \frac{3D}{\bar{V}} \quad (3.17)$$

式中 \bar{V} 為分子平均速率，由(3.18)式計算

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{8RT_{mix}}{\pi M_w}} \quad (3.18)$$

微粒表面之水蒸氣壓力 (P_d)，須考慮凱爾文效應(Kelvin effect)的影響（忽略微粒溶質效應所造成的影響），可表示為：

$$P_d = P_s \exp\left(\frac{4\gamma_w M_w}{\rho_w R T_{mix} d_p}\right) \quad (3.19)$$

式中 P_s 為煙流內在該溫度下的飽和蒸氣壓力， γ_w 為水的表面張力，可由(3.20)式計算

$$\gamma_w = B \left[\frac{T_c - T}{T_c} \right]^\mu \left[1 + b \left(\frac{T_c - T}{T_c} \right) \right] \quad (3.20)$$

式中 $T_c = 647.15\text{K}$ ， $B = 235.8 \times 10^{-3}\text{N/m}$ ， $\mu = 1.256$ ， $b = -0.625$ [31]。

煙囪排出之廢氣與大氣混合後，經過一段時間 Δt 之後，微粒直徑會由 $d_{pi}(t)$ 成長至 $d_{pi}(t + \Delta t)$ 。在這段時間中單位氣體容積之水蒸氣質量會減少 W_{loss} ， W_{loss} 等於單位氣體容積中凝結在微粒表面的水質量， W_{loss} 可以用(3.21)式表示：

$$W_{loss} = \sum \frac{\pi}{6} (d_{p2,i}^3 - d_{p1,i}^3) \times \rho_w \times N \times V \quad (3.21)$$

式中 N 為微粒總數目濃度， ρ_w 為水的密度， V 為煙流體積。

本研究使用四階 Runge-Kutta 積分法(4th-order Runge-Kutta method)來求取(3.4)、(3.5)、(3.8)、(3.9)、(3.10)、(3.11)、(3.12)與(3.14)式，共 12 個常微分方程的數值解[32]，可得到卷曲煙流(bent-over plume)各項特性的分佈及微粒在煙流中成長的情形，且由(2.33)式計算在煙流飽和比小於 1 時，微粒因潮解成長的粒徑，最後以米氏散射求解不

透光度如(2.5)式與(2.6)式，可得煙流內各時間步(time step)之微粒濃度、粒徑分佈、粒徑消光係數、總消光係數及煙流不透光度。

煙流內水蒸氣飽和蒸氣壓

本研究使用世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)所建議之修改過後的 Goff-Gratch equation(1957)來計算煙流內水蒸氣的飽和蒸氣壓[33]。

$$\log_{10} P_{s,H_2O} = 10.79574\left(1 - \frac{273.16}{T}\right) - 5.02800 \log_{10}\left(\frac{T}{273.16}\right) + 1.50475 \times 10^{-4} \left[1 - 10^{(-8.2969(\frac{T}{273.16}-1))} \right] + 0.42873 \times 10^{-3} \left[10^{(+4.76995(1-\frac{273.16}{T}))} - 1 \right] + 0.78614$$

(3.22)

式中 P_{s,H_2O} 為水在溫度 T 下的飽和蒸汽壓， T 為絕對溫度。

煙流內水蒸氣濃度分佈

煙流中內的總含水量或濃度可以用 top-hat profile 來表示[34; 35]，假設分佈之形式為：

$$c_r(r) = c_a + c^* \exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right) \quad (3.23)$$

式中 c_r 為煙流內水蒸氣濃度， c_a 為大氣中水蒸氣濃度， r 為與煙流中心軸的距離位置，

c^* 、 b 為常數 $b = \frac{1}{\sqrt{3}}a$ ， $c^* = 3(c - c_a)$ 。

大氣中水蒸氣濃度為 $c_a = \frac{p_a M_w}{RT_a}$ ，由煙流中心位置的大氣溫度、大氣壓力計算出大氣相對濕度 RH_a % 所對應的水蒸氣濃度(煙流邊界的水蒸氣濃度)。代入(3.23)式即可得到煙流的水蒸氣濃度。

煙流內溫度分佈

煙流內的水蒸氣熱焓可以用 top-hat profile 來表示[34; 35]，假設分佈之形式為：

$$h_r(r) = h_a + h^* \exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right) \quad (3.24)$$

式中 h_r 為煙流內水蒸氣熱焓， h_a 為大氣中水蒸氣熱焓， r 為與煙流中心軸的距離位置，

h^* 、 b 為常數 $b = \frac{1}{\sqrt{3}}a$ ， $h^* = 3(h - h_a)$ 。

大氣中水蒸氣熱焓為 $h_a = C_{pw} \times T_a$ ，由煙流中心位置的大氣溫度與水蒸氣定壓比熱 ($C_{pw} = 1762 \text{ J/kg K}$) 來計算。代入(3.24)式可得到煙流內水蒸氣的熱焓，再除以 C_{pw} 即可得到煙流內的溫度分佈。

煙流內微粒的數目濃度分佈

煙流內的微粒濃度可以用 top-hat profile 來表示[34; 35]，假設分佈之形式為：

$$N_r(r) = N_a + N^* \exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right) \quad (3.25)$$

式中 N_r 為煙流內微粒數目濃度， N_a 為大氣中微粒數目濃度 ($N_a = 0$)， r 為與煙流中心軸

的距離位置， N^* 、 b 為常數 $b = \frac{1}{\sqrt{3}}a$ ， $N^* = 3(N - N_a)$ 。

煙流邊界與水汽

煙流內除了有乾空氣外，還包括水蒸氣和液態水，其所佔的比例稱為分別定義為：

$$q = \frac{m_v}{m} \quad (3.26)$$

$$\eta = \frac{m_c}{m} \quad (3.27)$$

式中 q 為比溼度(specific humidity)， η 為煙流中液態水佔的比例， m_v 為水蒸氣質量， m_c 為液態水質量， m 為煙流總質量。

煙流內水蒸氣質量與液態水質量相加為煙流內總含水量，可以寫成

$$\zeta = q + \eta \quad (3.28)$$

另外，煙流內濕空氣的密度近似於

$$\rho \approx \frac{P}{R_d T} \left[\frac{1}{1 - \zeta + \left(\frac{R_v}{R_d} \right) q} \right] \quad (3.29)$$

式中 ρ 為煙流密度， P 為大氣壓力， T 為煙流溫度， R_d 為乾空氣氣體常數(287.06J/kg K)， R_v 為水蒸氣氣體常數(461.53J/kg K)， ζ 為總含水量， q 為比溼度，水蒸氣占濕空氣的質量比例。

3.3.2 環境參數

大氣風速

當環境中有氣流運動時，在地表邊界層(surface boundary layer)會形成一層風速剖面(wind speed profile)，自然對數形式的風速方程式因考慮了地表粗糙度和摩擦速度，為最接近大氣的風速分佈，當地表粗糙度和摩擦速度無法得知時，可以用指數形式的風速方程式(Power law)來取代之。本研究使用 Power law 之形式作為大氣中的風速分佈。

$$u_a(z) = u_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^m \quad (3.30)$$

式中 $u_a(z)$ 為風速速度分佈， u_r 為在高度 z_r 的已知風速， z 為離地面垂直高度， z_r 為已知風速 u_r 的高度， m 為經驗係數，中性穩定的大氣 m 為 $\frac{1}{7}$ 。

大氣溫度

當環境中沒有風或氣流運動時，大氣溫度隨高度的變化對煙流的擴散也有重要的影響，故溫度分佈也可以決定大氣的穩定度。在絕熱狀態下，乾空氣溫度隨著高度的增加而降低溫度，下降的程度為每上升 100m 溫度會降低 0.98°C，此種降溫率定義為乾絕熱遞減率(dry adiabatic lapse rate)，故大氣溫度隨高度的變化可表示為

$$T_a(z) = T_0 + \beta_0 z \quad (3.31)$$

式中 $T_a(z)$ 為在高度 z 時的溫度， z 為離地面垂直高度， T_0 為大氣地表溫度， β_0 為大氣溫度遞減率。

比較大氣溫度遞減率(environmental lapse rate)和乾絕熱遞減率可決定大氣的穩定度。當大氣溫度遞減率接近或相當於乾絕熱溫度遞減率，則為中性穩定狀態或絕熱的大氣， β_0 為-0.0098K/m。

大氣壓力

本研究假設在相同高度下，煙流內壓力與外界大氣靜壓相等，故煙流內壓力隨高度的變化與大氣壓力隨高度的變化相等。

$$P(z) = P_0 \left(-\frac{M_a g z}{RT_a} \right) \quad (3.32)$$

式中 $P(z)$ 為在高度 z 時的大氣壓力， P_0 為一大氣壓(101325 Pa)， z 為離地面垂直高度， R 為理想氣體常數(8.314Nm/mol K)， T_a 為大氣溫度， M_a 為乾空氣平均分子量(2.89×10^{-3} kg/mol)， g 為重力加速度(9.8 m/s^2)。

研究對象光電廠煙囪出口高度為離地面 35.6 m，等溫大氣計算出之大氣壓力值為 100880 Pa，標準大氣計算出大氣壓力值為 100873 Pa，兩者相差 0.01%，當離地面高度為 500 m 時，等溫大氣計算出之大氣壓力值為 97205 Pa，標準大氣計算出大氣壓力值為 195466 Pa，兩者相差 1.8%，在離地面垂直高度不大時，兩種大氣壓力計算公式計算出的壓力值相差極小，故使用等溫大氣壓力計算公式作為本研究之大氣壓力計算。

本研究之模式考慮煙流擴散、質量能量平衡、微粒成長、蒸發與潮解作用並運用米氏散射理論計算出煙流之消光特性，程式流程如圖 3-5 所示。

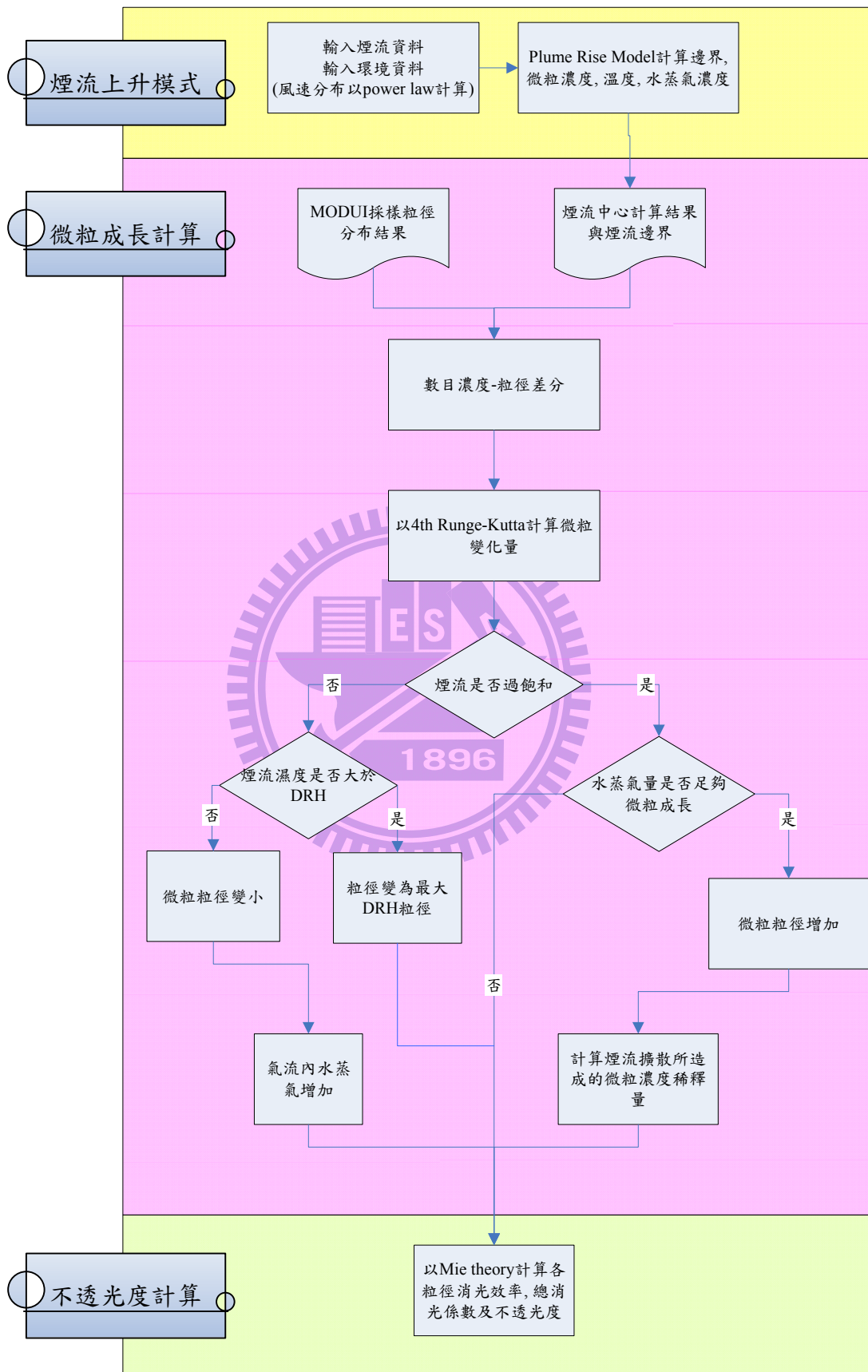


圖 3-5 程式模擬流程圖

第四章 結果與討論

4.1 米氏散射模擬與模式正確性確認

為了確認研究之正確性，本研究分別使用折射率 2.00、1.60、1.50、1.33、1.59-0.66i 在 size parameter 0-20 範圍中的圓形微粒，測試 Wiscombe(1980)米氏散射程式計算的消光效率結果[36]之正確性，模擬結果如圖 4-1 所示，Hodkinson(1966)之模擬結果如圖 2-4 所示[37]，比較此兩圖可發現模擬結果趨勢相似，但圖 4-1 的解有上下震盪的情形而圖 2-4 卻無此特徵，是因圖 2-4 之模擬結果為忽略波動後之擬合而得之平滑曲線故二結果吻合，證實此 Wiscombe 之米氏散射程式計算結果是可信任的。

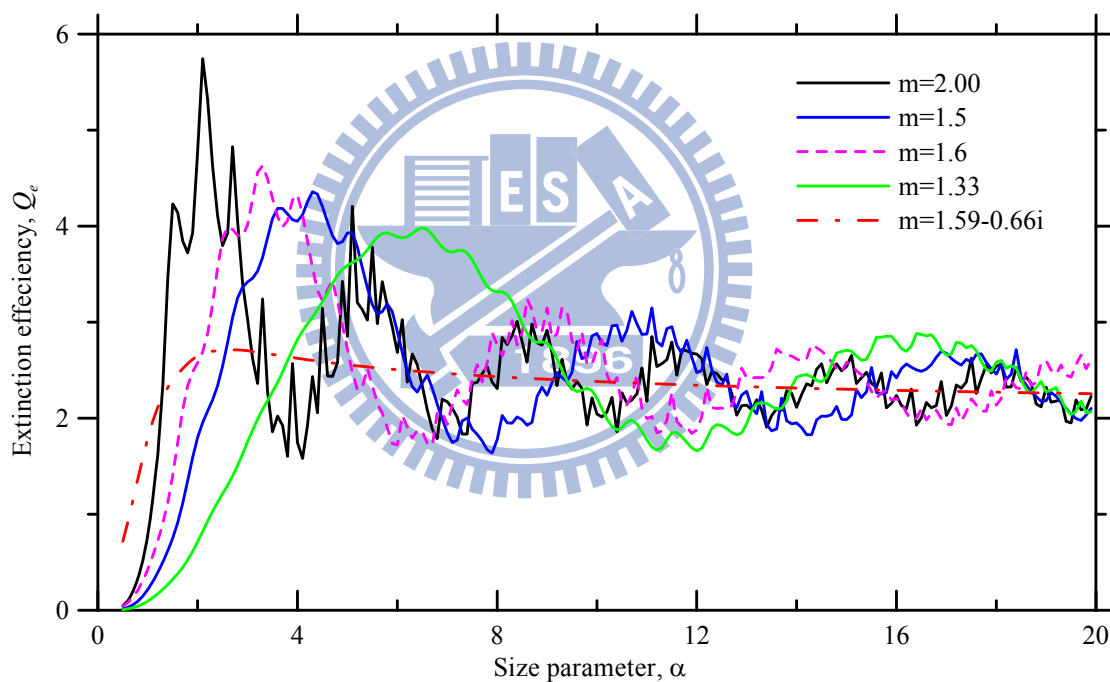


圖 4-1 消光效率於不同 size parameter 之模擬結果

4.2 煙道微粒粒徑分佈採樣結果

竹南科學園區某光電廠煙囪出口微粒採樣結果如表 4-1 所示，結果顯示微粒 MMAD 介於 341.3~758.3 nm、NMAD 介於 88.6~332.5 nm、幾何標準偏差 1.6~2.0，採集煙道氣的微粒重量大部分集中在 100~1000 nm 之間佔全體重量 90%以上，而奈米微粒重量濃度較少，其所佔比例不到總質量濃度的 1%，故可知此光電廠排放煙道氣之微粒粒

徑多為次微米級，奈米級微粒含量很少，而微米級以上微粒已被出口端之空氣污染防治設備所去除。

表 4-1 某光電廠採集煙道氣體之 PM₁₀、PM_{2.5}、PM_{1.0}、PM_{0.1} 及總質量濃度

採樣日期	採樣地點	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}	PM _{0.1}	Total	MMAD ¹	σ_g^2	NMAD ³
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	nm		nm
2009.09.11	P020 煙囪	7333.6	7248.0	6519.4	114.0	7358.6	486.5	1.7	220.9
2009.10.26	P001 煙囪	2363.2	2350.0	2180.7	22.4	2360.4	341.3	2.0	88.6
2009.12.10	P020 煙囪	10987.5	10910.5	10386.7	8.0	10989.0	431.4	1.8	167.0
2010.03.01	P018 煙囪	5026.7	4987.1	4738.1	15.3	5071.7	441.8	1.6	246.1
2010.03.08	P018 煙囪	7279.2	7247.8	7081.8	5.3	7313.2	361.2	1.6	186.5
2010.06.29	P020 煙囪	17705.6	17648.6	12795.5	92.7	17753.8	758.3	1.7	332.5

1. MMAD：質量中間粒徑

2. σ_g ：幾何標準偏差

3. NMAD：數目中間粒徑

4. 本表為 MOUDI 量測之質量數目濃度

5. $MMD = NMD \exp(3 \ln^2 \sigma_g)$

本研究使用表 4-1 之代表性煙道 2009.09.11 P020 的採樣結果作為常溫煙流模擬之煙道出口初始條件，質量濃度分佈如圖 4-2 所示，根據文獻指出大氣微粒密度介於 1.1~1.6 g/cm³[38]，故假設微粒微粒密度為 1600 kg/m³，由(3.2)式與(3.3)式換算數目濃度為 2.42×10¹¹ #/m³，並由文獻[4]指出光電廠所採集之微粒組成主要以 SiO₂ 與銨鹽為主，故假設此微粒成份為 SiO₂ 和(NH₄)₂SO₄。為了進一步比較煙流特性，使用文獻[39]之燃煤電廠煙道採樣結果以微粒密度 2500 kg/m³換算成數目濃度為 2.02×10¹⁰ #/m³，作為高溫煙流之初始條件，且燃煤電廠之微粒主要為硫酸鹽二次性粒狀物[39]，故假設微粒成分為(NH₄)₂SO₄，計算煙流不透光度模擬結果。

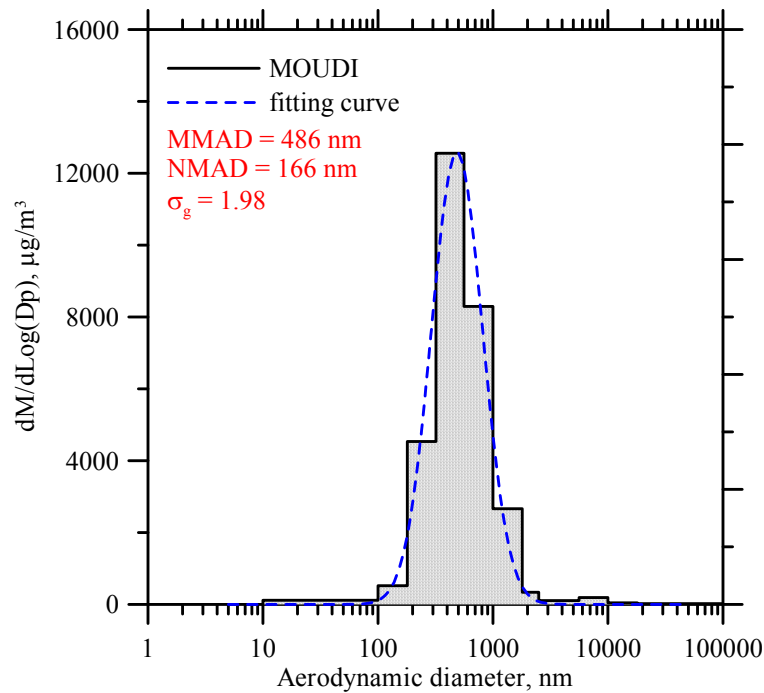


圖 4-2 質量濃度分佈圖，2009.09.11，竹南某光電廠 P020 煙窗

4.3 Plume opacity model 模擬結果

本研究針對常溫與高溫煙流進行煙流傳輸、微粒成長與不透光度模擬結果如下：

4.3.1 不同微粒粒徑之消光特性

針對本研究之微粒成份為 SiO_2 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 折射率分別為 $m=1.55$ 和 1.521 進行粒徑與消光效率分析如圖 4-3 所示，由此結果可得知因此兩種微粒成分折射率相近消光效率趨勢相似，最大消光效率在粒徑 $0.68 \mu\text{m}$ 處約為 4.38 ，隨著微粒粒徑增加消光效率上下震盪震幅遞減至 2 附近趨於穩定。

煙窗排出之煙流不透光度由(2.14)式計算，式中顯示煙流半徑與微粒的消光係數會影響煙流不透光度，其中影響消光係數的因子由(2.16)式可知主要為微粒粒徑，次要為微粒的消光效率與數目濃度，以上等因素為改變煙流之不透光度的主因。

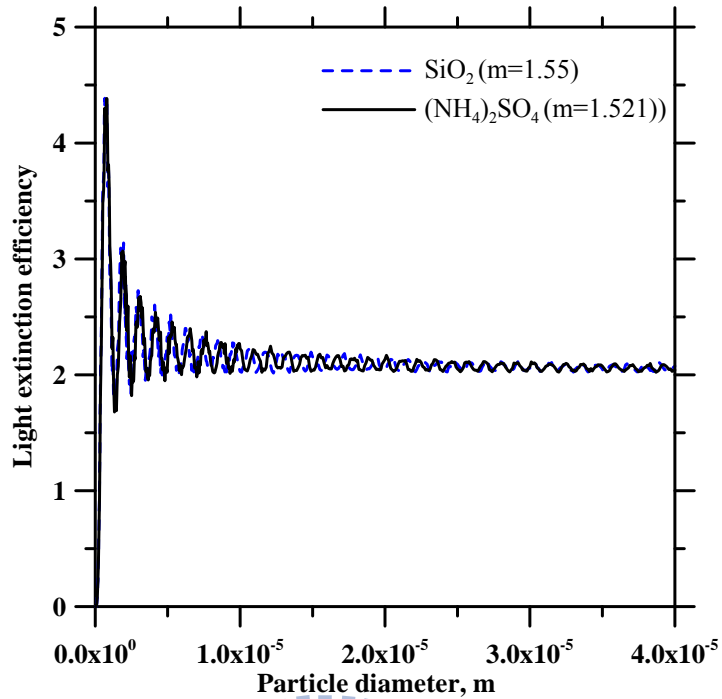


圖 4-3 折射率 SiO_2 ($m=1.55$)、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ($m=1.521$) 消光效率與微粒粒徑關係之模擬結

4.3.2 煙流邊界

本研究之 Plume opacity model 模擬煙流邊界結果如圖 4-4、圖 4-5、圖 4-6 所示，結果顯示煙流移動速度受煙流初始速度與風速的影響，當煙流初始速度越快煙流往上的動能越大，故煙流上升高度會越高；當風速越快時煙流因風作用力的影響，煙流軌跡會趨向於風的吹拂方向，煙流移動方向愈趨近於風向且移動速度也越快。當外界環境溫度高於煙流溫度時，煙流之密度比外界空氣大，故煙流會因重力的影響使煙流中心軌跡會逐漸偏向地表，反之，煙流密度小於外界空氣密度會因浮力影響使煙流上升，而影響煙流方向與無因次參數 Fr 有關。此外，煙流半徑受煙流擴散效應與風速影響，而在此模式中擴散現象使用動量方程式與挾捲函數加以描述，挾捲函數越大在相同擴散時間內煙流半徑越大，但在實際狀況下風速越大會使煙流半徑成長的現象遞延至後方，故在實際觀察煙流邊界時在同位置煙流半徑會較小。

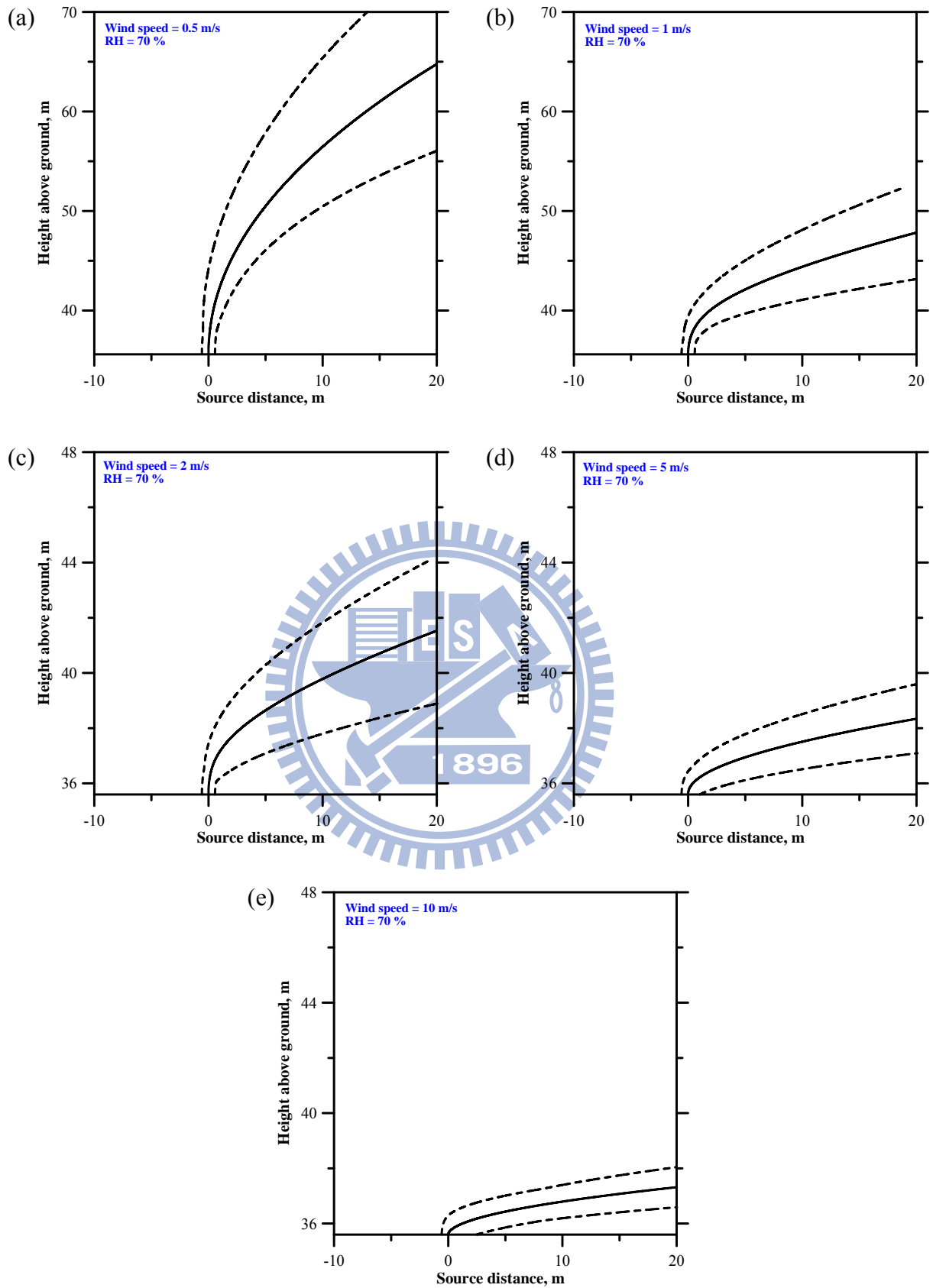


圖 4-4 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流在大氣中的煙流邊界

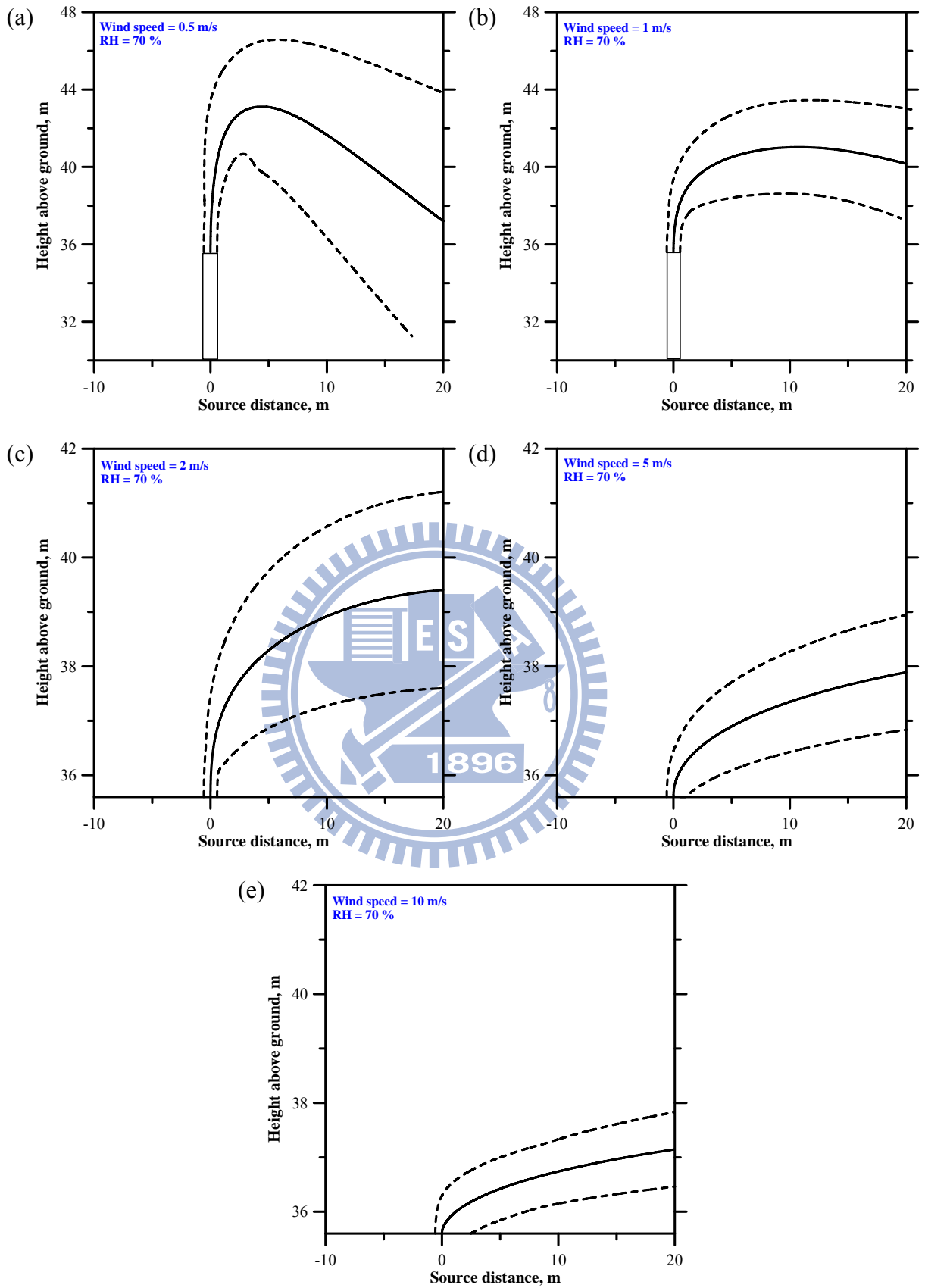


圖 4-5 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流在大氣中的煙流邊界

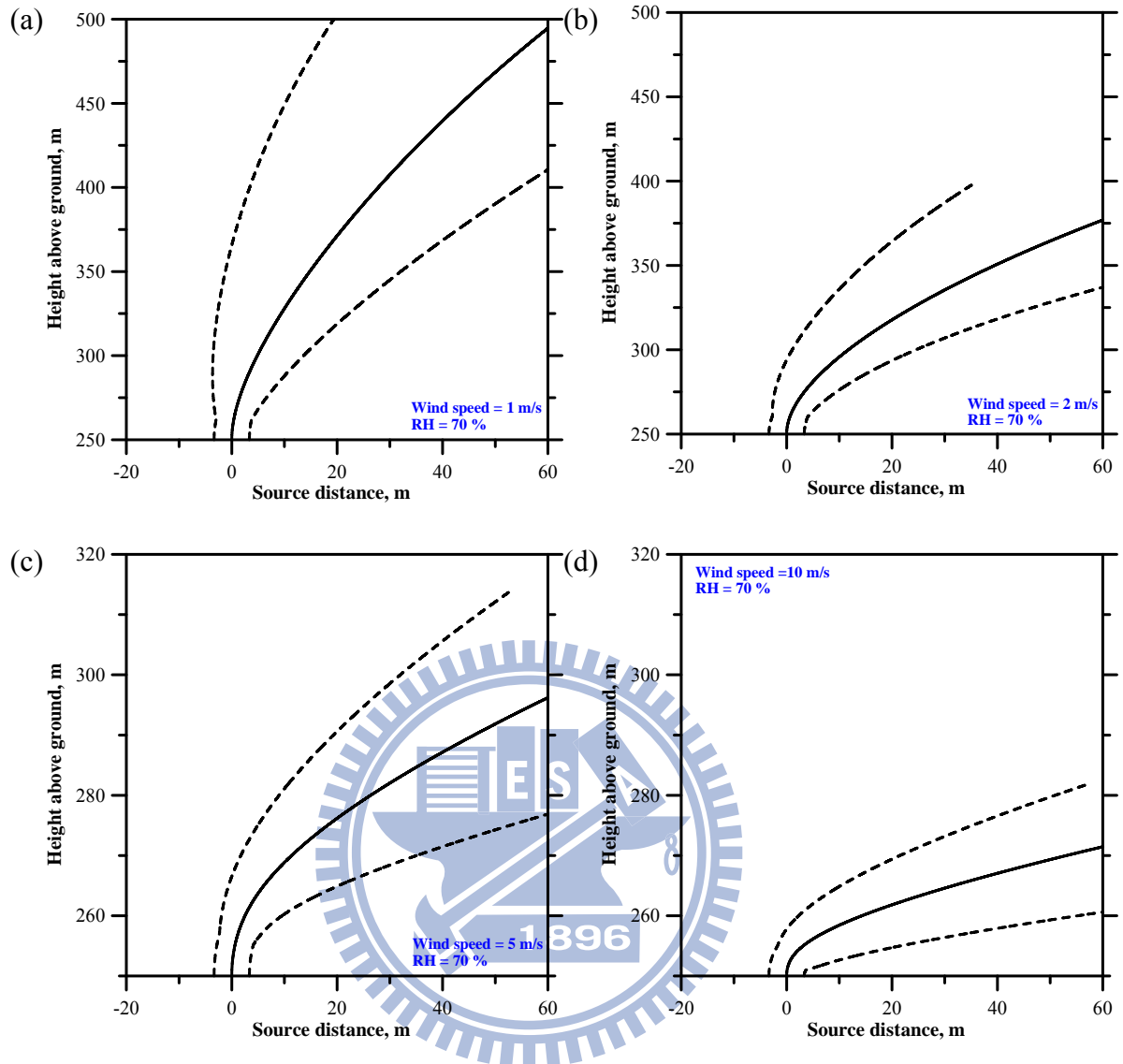


圖 4-6 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)1、(b)2、(c)5 與 (d)10m/s，高溫煙流在大氣中的煙流邊界

4.3.3 煙流內微粒成長過程

煙流排出煙囪後與環境大氣混合，煙流內的溫度、微粒濃度及水蒸氣含量皆會受外在環境條件的影響而改變，進而影響煙流內微粒成長現象。

在煙流溫度方面，如附錄 1、附錄 2、附錄 3、附錄 4、附錄 5、附錄 6 所示，煙流溫度會隨煙流越遠而愈趨近於環境溫度，並隨著環境風速的影響，在相同流線距離下，當風速越大因風牽引著煙流移動使得煙流快速地沿著風向移動，造成煙流與後方新鮮空氣混合，故相對於風速慢時的溫度會略接近環境溫度，而煙流溫度分佈隨煙流中心

呈高斯分佈。煙流中水蒸氣分佈亦為相同道理，如附錄 7、附錄 8、附錄 9 所示。溫度與水蒸氣分佈交互作用影響著煙流中的飽和比，微粒成長各重要參數結果如表 4-2 所示。

表 4-2 煙流時間、煙囪距離、飽和比與微粒最大粒徑

(a) 外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，光電廠

之常溫煙流

風速(m/s)	0.5	1	2	5	10
離煙囪出口距離(s 座標)(m)	1.70	1.14	0.55	0.20	0.13
時間(s)	0.645	0.434	0.210	0.069	0.040
煙流內最大飽和比	1.012	1.011	1.011	1.011	1.011
煙流內微粒最大粒徑(μm)	2.74	2.23	1.51	0.83	0.62

(b) 外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，光電廠

之常溫煙流

風速(m/s)	0.5	1	2	5	10
離煙囪出口距離(s 座標)(m)	0	0	0	0	0
時間(s)	0	0	0	0	0
煙流內最大飽和比	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
煙流內微粒最大粒徑(μm)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

(c) 外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1、2、5$ 與 10m/s ，燃煤電廠之

高溫煙流

風速(m/s)	1	2	5	10
微粒成長時間(s)	5.04~12.03	4.45~9.64	2.69~5.40	1.67~3.81
微粒成長區域(s 座標)(m)	38.3~72.7	32.9~56.8	18.7~31.6	13.5~31.1
離煙囪出口距離(s 座標)(m)	72.7	56.8	31.6	31.1
時間(s)	12.032	9.647	5.404	3.809
煙流內最大飽和比	1.034	1.031	1.024	1.022
煙流內微粒最大粒徑(μm)	21.5	17.8	11.5	9.65

在外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ 、相對溼度 $RH_a = 70\%$ 下，初始溫度 23°C 之常溫煙流中心飽和比如附錄 10 所示，煙流離開煙囪後立即呈過飽和狀態，微粒開始因水蒸氣凝結至微粒表面開始成長且逐漸消耗煙流內之水蒸氣，在不同風速下微粒可成長時間約介於 $0.04\sim 0.64$ 秒，微粒成長中最大飽和比為 $1.011\sim 1.012$ ，微粒成長區域距離煙囪 $0.13\sim 1.7$ m 處，成長後之最大微粒粒徑介於 0.62 至 $2.7\ \mu\text{m}$ 間，約成長至微粒初始平均粒徑 ($0.25\ \mu\text{m}$) 的 $2\sim 11$ 倍，而後當粒徑因飽和比小於 1 大於 DRH ，粒徑快速下降至最大潮解粒徑介於 0.54 至 $0.61\ \mu\text{m}$ ，微粒成長過程如附錄 11 所示。在外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ 、相對溼度 $RH_a = 70\%$ 下，初始溫度 23°C 之常溫煙流中心飽和比如附錄 12 所示，環境溫度高於煙流溫度，故煙流內水蒸氣無法達到過飽和微粒無法成長。

在外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ 、相對溼度 $RH_a = 70\%$ 下、初始溫度 138°C 之高溫煙流中心飽和比如附錄 13 所示，煙流起始之飽和比 0.2 並未達過飽和狀態，飽和比隨煙流內溫度下降開始上升，且煙流排放之上升初速大，煙流離開煙囪後快速往上爬升，故微粒開始成長約距煙囪 $13.5\sim 38.9$ m 後開始成長，成長時間 $2.14\sim 6.99$ 秒，微粒成長中最大飽和比為 $1.021\sim 1.033$ ，成長區域介於 $13.5\sim 72.7$ m 間，成長後最大微粒粒徑介於 9.65 至 $21.5\ \mu\text{m}$ ，約成長至微粒初始粒徑 ($0.27\ \mu\text{m}$) 的 $36\sim 80$ 倍，而後當粒徑因飽和比小於 1 大於 DRH ，粒徑快速下降至最大之潮解粒徑介於 0.85 至 $1.07\ \mu\text{m}$ ，微粒成長過程如附錄 14 所示。在微粒成長模擬中若不考慮微粒潮解現象，微粒在未飽和區粒徑即快速下降至乾微粒初始粒徑與實際觀察結果差異極大，故考慮微粒的潮解現象是必要地。

煙流內之微粒數目濃度會隨著煙流在大氣中擴散與捲入空氣而減少，在本模式中由 (3.9) 式來計算，煙流內微粒總數目濃度隨距離之變化如附錄 15、附錄 16、附錄 17 所示，結果顯示微粒濃度隨風速越快稀釋的程度越大，原因為風速越大微粒愈易與後方較乾淨之空氣混合，導致濃度易被稀釋。

4.3.4 煙流不透光度模擬結果

煙流之不透光度受微粒粒徑、數目濃度、消光效率與煙流直徑有關如 (2.14) 式與 (2.16) 式所示。竹南某光電廠在外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ 、相對溼度 $RH_a = 70\%$ 下，初始溫度 23°C 之

常溫煙流不透光度與不透光度分佈如圖 4-7、圖 4-8 所示，此條件為煙流在煙囪出口達過飽和狀態，故煙流在離開出口處時微粒開始成長，在 $RH_a = 70\%$ 之不同風速條件下，煙流最大不透光度達 14~91% 距離接近煙囪出口約於 0.12~1.7 m 處(約歷時 0.04~0.63 秒)，並可發現不透光度隨環境風速變小而增加，且會因微粒濃度稀釋與微粒消光效率的變化使不透光度有短暫的持平或上下波動的现象，由圖 4-7 不透光度履歷與附錄 11 微粒平均粒徑成長結果比較有相同趨勢，可知煙流不透光度快速下降的主要原因為微粒上水蒸氣蒸發導致粒徑減小所造成，整體煙流不透光度變化與微粒粒徑增長有關如 4.3.3 節所述。依固定污染源空氣污染物排放標準不透光度不可超過 20%，在此條件下當風速小於 5 m/s 皆超出法規標準，不透光度超過 20% 的煙流長度約在 1~10 m 接近煙囪出口處。比較圖 4-7 與圖 4-9 之結果顯示在相對濕度 80% 與 90% 時的不透光度與煙流長度之關係，環境相對濕度越高煙流內微粒處於過飽和的時間越長，不透光度在相同風速下會較高，在低風速 0.5 m/s 下，環境相對濕度為 70%、80% 與 90% 時，不透光度大於 20% 之煙流長度分別為 10 m、14 m 及 22 m，煙流長度隨環境濕度增加遞增。

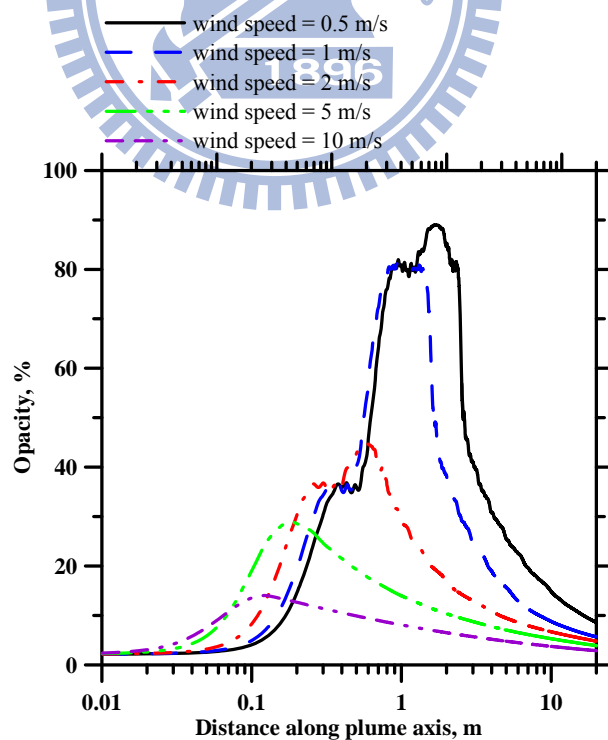


圖 4-7 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10 m/s，常溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)

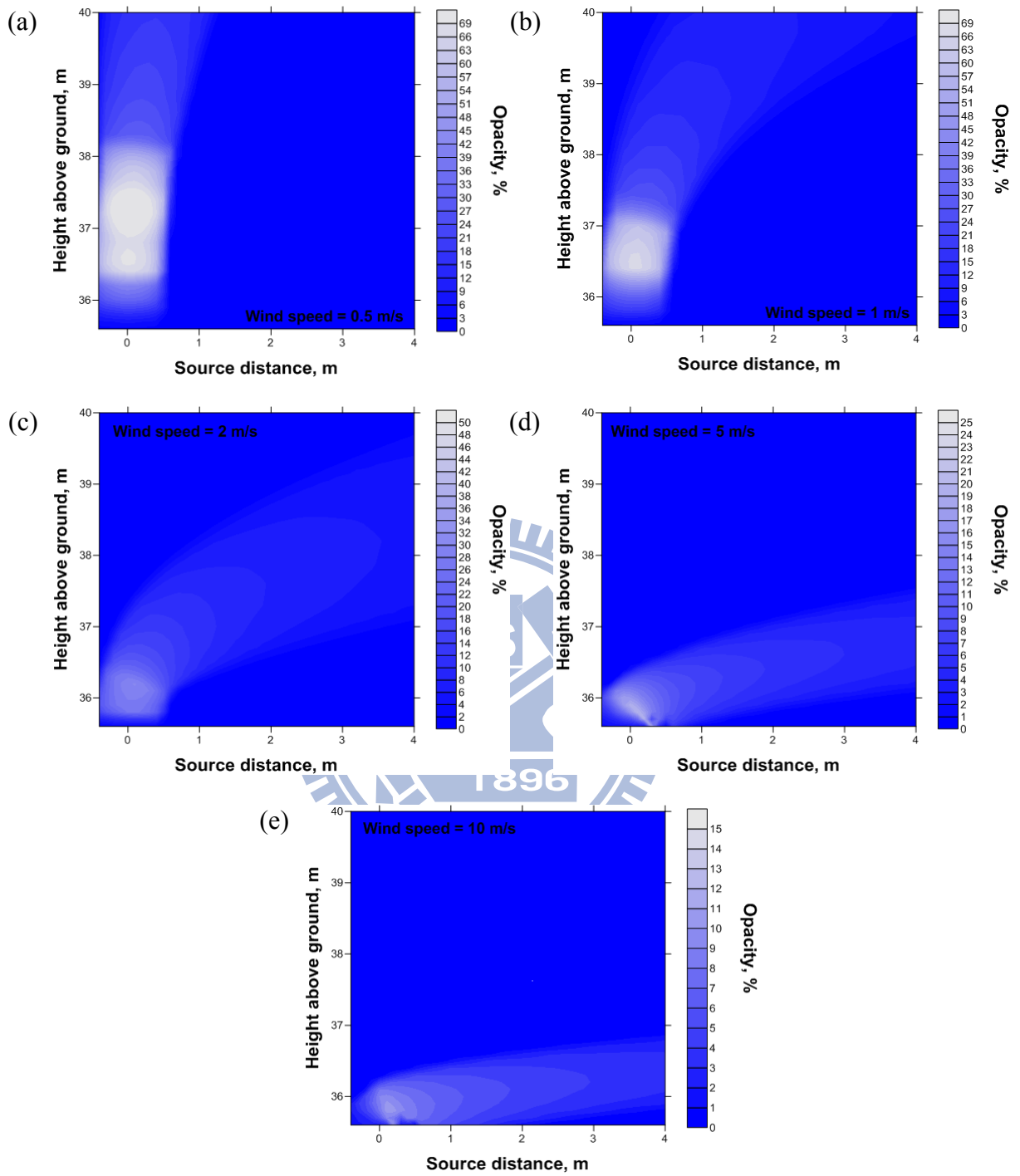


圖 4-8 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與(e)10m/s，常溫煙流內不透光度分佈

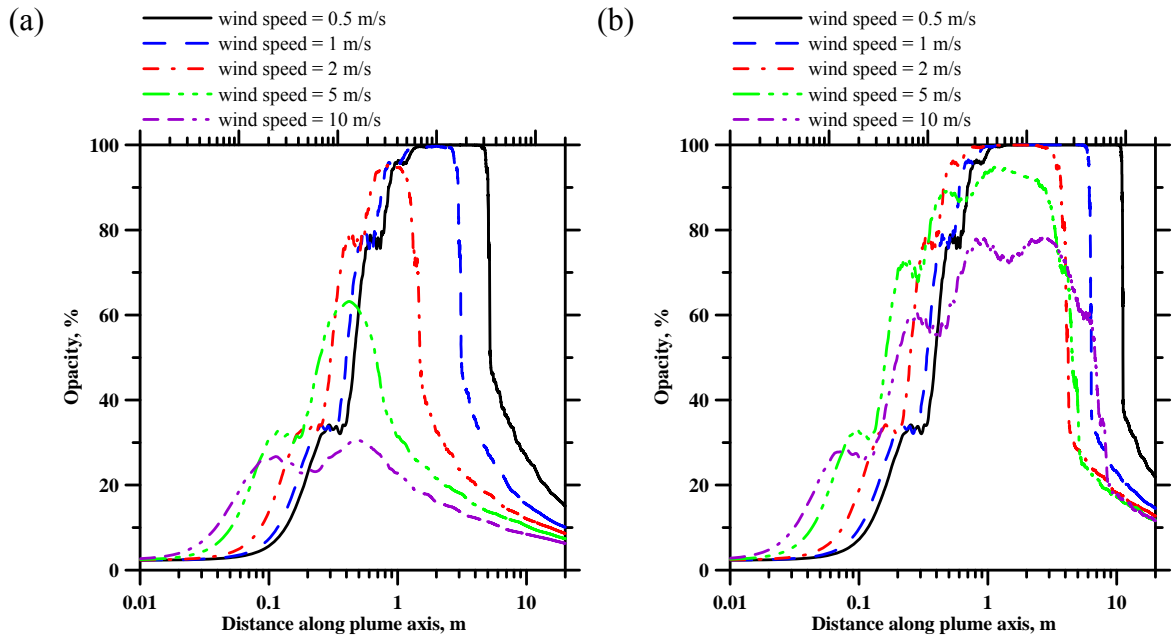


圖 4-9 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，不同相對溼度 $RH_a =$ (a)80%、(b)90%，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10 m/s ，常溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)

外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ 其他條件相同的狀態下，常溫煙流不透光度與不透光度分佈如圖 4-10、圖 4-11 所示，在此條件下煙流內的微粒並不會成長，初期不透光度接近 2.3%，但因煙流直徑增大使得不透光度微幅的上升，在風速越慢的條件下此效應越明顯，而後會因環境空氣的稀釋與微粒的擴散作用使不透光度降低。

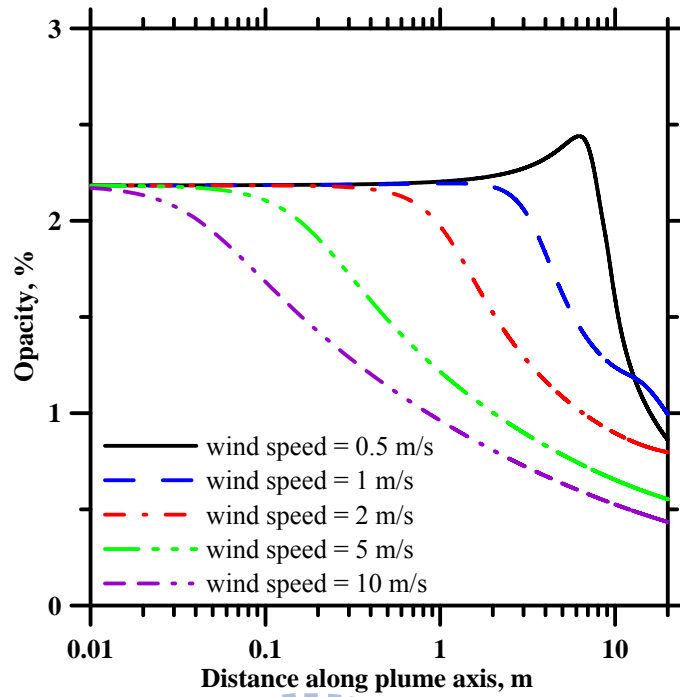


圖 4-10 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)



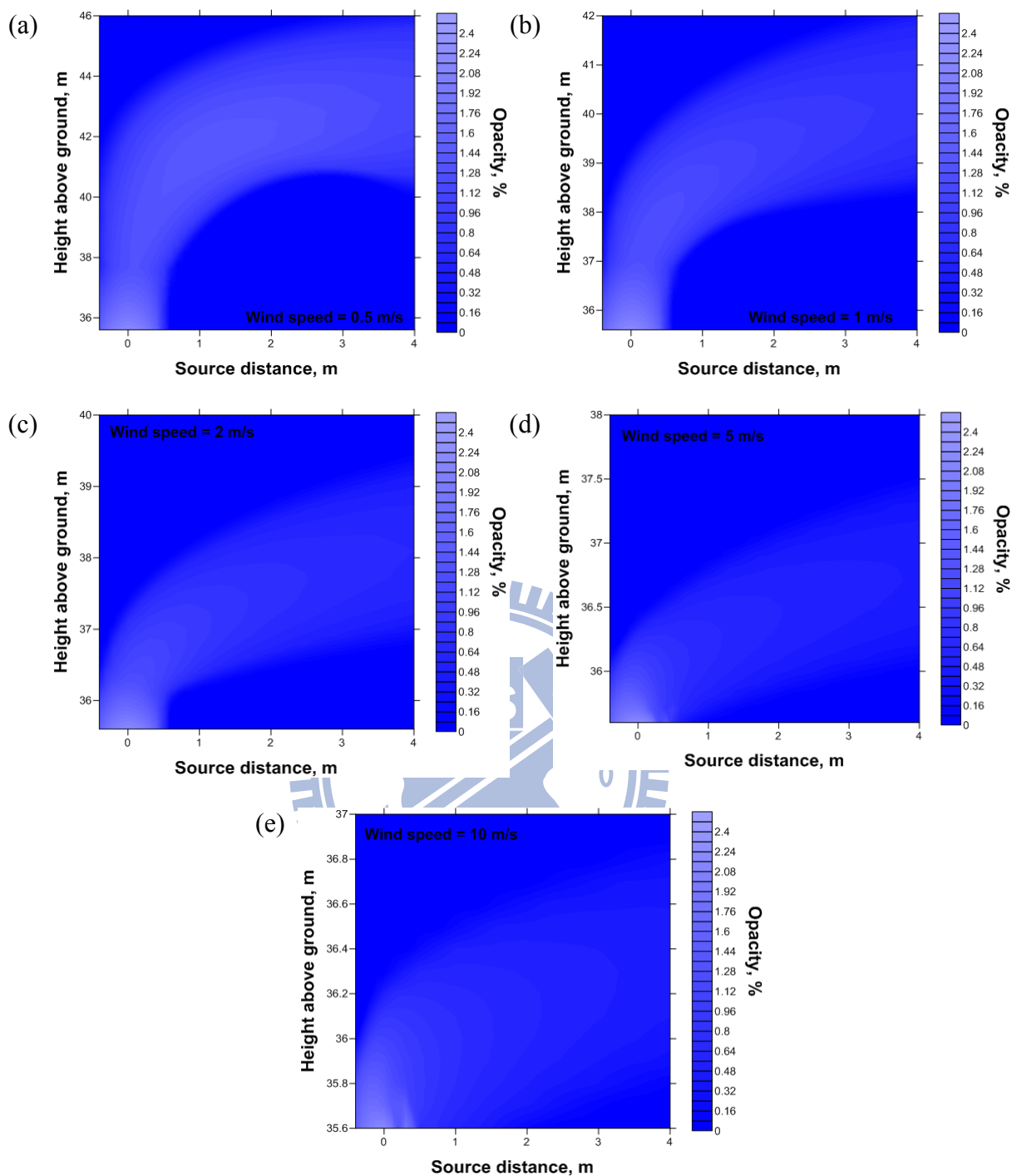


圖 4-11 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流內不透光度分佈

某燃煤電廠在外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ 、相對溼度 $RH_a = 70\%$ 下，初始溫度 138°C 之高溫煙流不透光度與不透光度分佈如圖 4-12、圖 4-13 所示，在此條件下煙囪出口處煙流未達飽和，不透光度因環境空氣稀釋微幅下降，但因此煙流為高溫煙流與環境空氣混合後

溫度快速降溫，飽和比在數秒內由 0.2 先略為下降後再快速上升至過飽和狀態，使微粒快速成長，因此煙流內微粒濃度較高，不透光度快速增加至 100% 至完全不透光的狀態，但仍可看出不透光度的趨勢與附錄 14 微粒平均粒徑成長結果相同，此高不透光度煙流隨風速長達 13~35 m 不等，嚴重超出法規標準。煙流不透光度各重要參數結果如表 4-3 所示，常溫與高溫煙流模擬結果之比較於表 4.4。

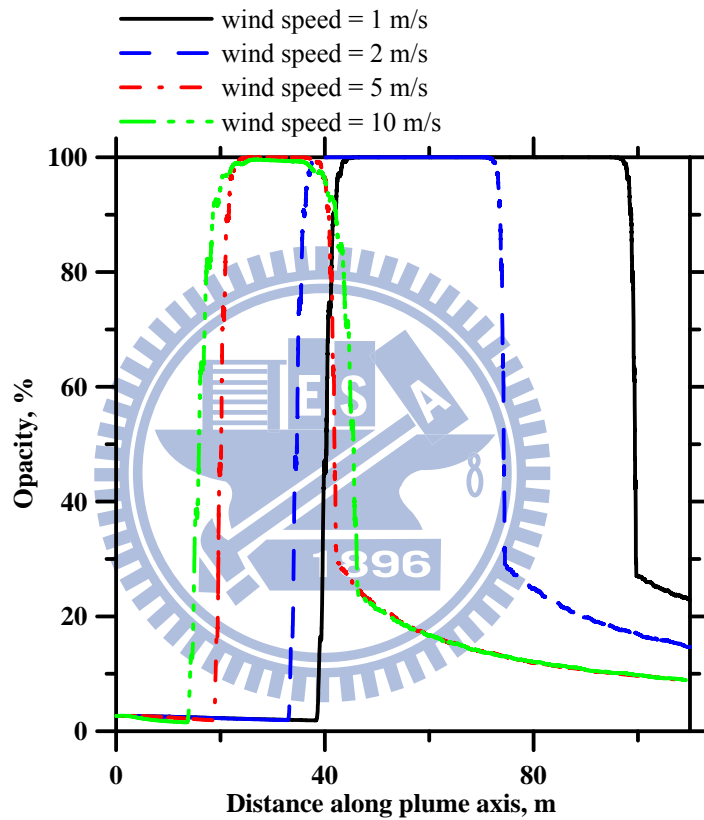


圖 4-12 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1、2、5$ 與 10m/s ，高溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)

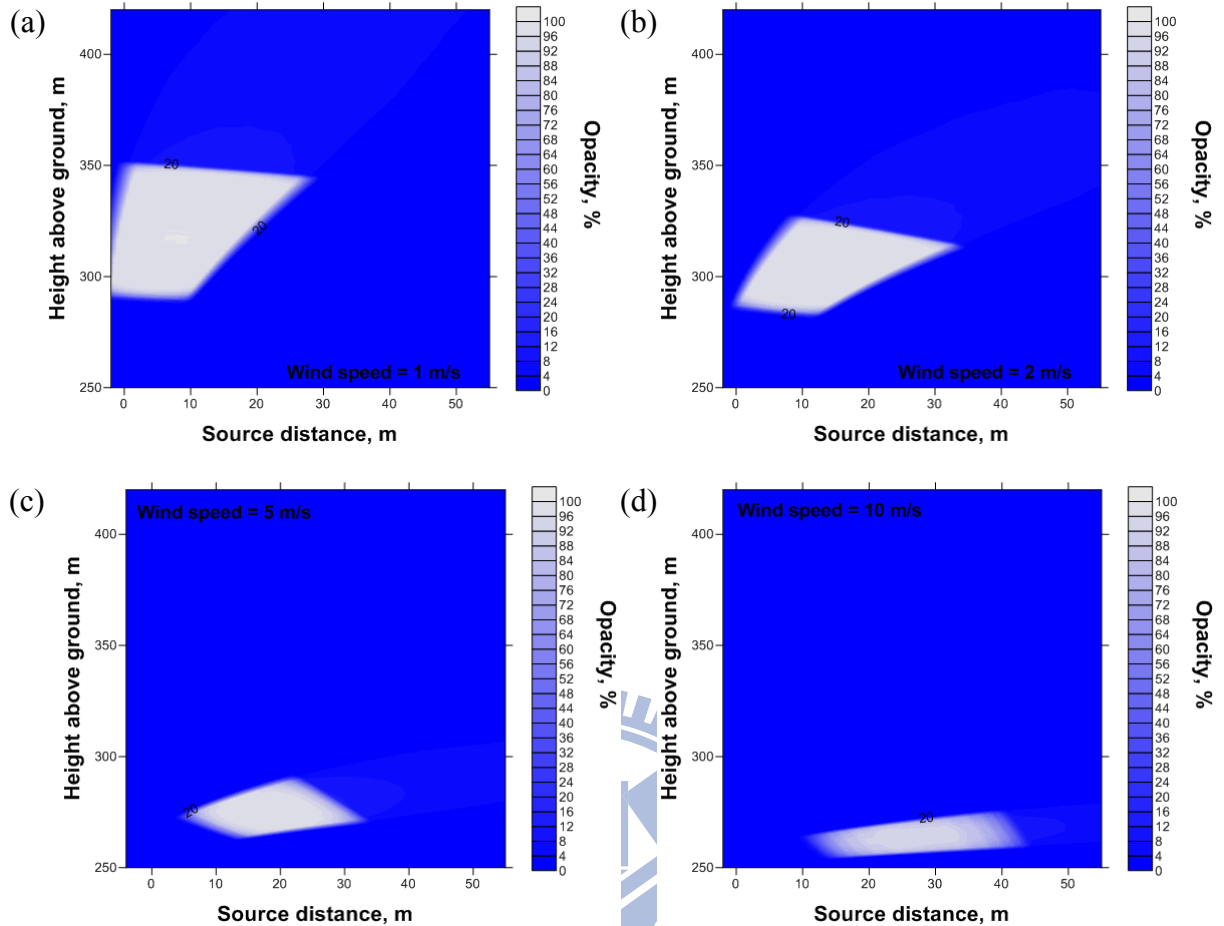


圖 4-13 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)1、(b)2、(c)5 與 (d)10m/s，高溫煙流內不透光度分佈

表 4-3 煙流時間、煙囪距離、半徑、微粒總數目濃度、平均粒徑及總消光係數與最大不透光度

(a) 外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，光電廠之常溫煙流

模擬環境風速(m/s)	0.5	1	2	5	10
離煙囪出口距離(s 座標)(m)	1.68	0.92	0.55	0.18	0.12
時間(s)	0.634	0.333	0.209	0.064	0.037
煙流半徑(cm)	89	83	89	80	66
微粒總數目濃度($\#/m^3$)	1.50×10^{11}	1.64×10^{11}	1.50×10^{11}	1.55×10^{11}	1.54×10^{11}
微粒平均粒徑(μm)	2.74	2.11	1.51	0.83	0.62
微粒總消光係數(m^{-1})	1.240	0.930	0.383	0.208	0.115
煙流最大不透光度(%)	91.0	78.6	49.6	28.3	14.0

(b) 外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，光電廠

之常溫煙流

模擬環境風速(m/s)	0.5	1	2	5	10
離煙囪出口距離(s 座標)(m)	6.22	1.14	0.02	0	0
時間(s)	5.229	0.441	0.005	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}
煙流最大不透光度(%)	2.6	2.3	2.3	2.3	2.2
煙流半徑(m)	3.26	0.91	0.58	0.58	0.58
微粒總數目濃度($\#/m^3$)	5.01×10^{10}	1.53×10^{11}	2.39×10^{11}	2.42×10^{11}	2.42×10^{11}
微粒平均粒徑(μm)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.250
微粒總消光係數(m^{-1})	4.21×10^{-3}	1.29×10^{-2}	2.01×10^{-2}	2.03×10^{-2}	1.92×10^{-2}

(c) 外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1、2、5$ 與 10m/s ，燃煤電廠之

高溫煙流

模擬環境風速(m/s)	1	2	5	10
離煙囪出口距離(s 座標)(m)	52.1~89.1	46.4~64.4	22.7~38.6	24.7~36.1
時間(s)	7.634~15.926	7.225~11.577	3.541~6.940	3.047~4.440
煙流最大不透光度(%)	100	100	100	100
煙流半徑(m)	15.1~24.7	16.9~23.5	14.4~21.0	12.5~14.6
微粒總數目濃度($\#/m^3$)	$2.80 \times 10^9 \sim 1.30 \times 10^9$	$2.51 \times 10^9 \sim 1.49 \times 10^9$	$3.02 \times 10^9 \sim 1.50 \times 10^9$	$2.42 \times 10^9 \sim 1.75 \times 10^9$
微粒平均粒徑(μm)	14.7~17.0	14.8~16.0	6.76~8.45	8.67~9.00
微粒總消光係數(m^{-1})	0.633~0.386	0.573~0.407	0.160~0.110	0.184~0.158

依照目前現行環境法規煙囪外不透光度需小於 20%之規範加以改善，以光電廠為例，當環境溫度 10°C 、相對濕度 70%，風速 0.5 m/s 的條件下，若將目前煙囪出口處排放之微粒質量濃度減少 10 倍降至 $735.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，煙流在距離煙囪約 1.4-2 m 處不透光度可降至 20%，模擬結果如圖 4-14 所示，由此可知需將此光電廠現有之污染防制設備效率 50% 提升至 99% 才可達成，但此方案需投資高額的汙染防治設備不建議執行，而可行之方法為將煙囪出口溼度降至 95% 以下，降低微粒成長時之過飽和度，可明顯改善

白煙至符合環境法規標準。在燃煤電廠的案例中，當環境溫度 20°C、相對濕度 70%，風速 1 m/s 的條件下，若可將煙流排放溫度由 138°C 降低至 100°C，模擬結果如圖 4-15 所示，在此條件下煙流無法達到過飽和，在煙囪出口煙流不透光度為 2.6% 符合環境法規標準。

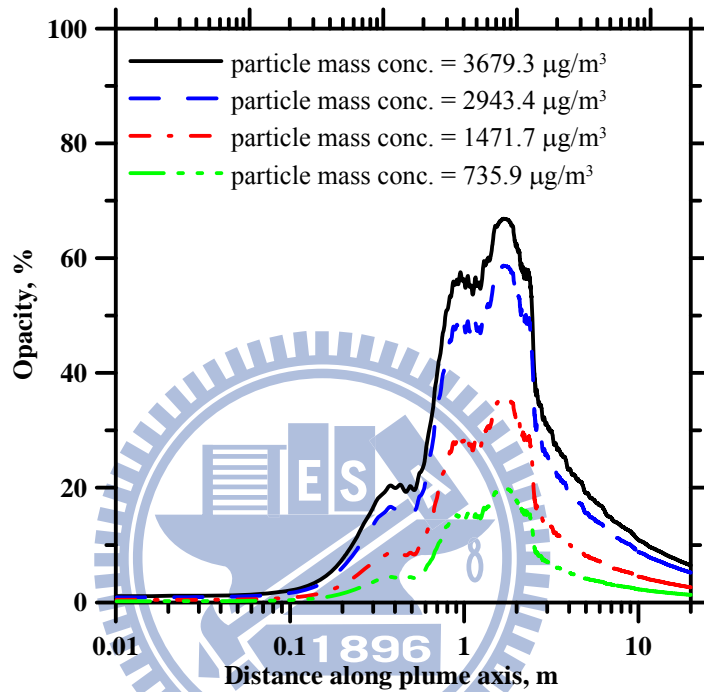


圖 4-14 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5\text{m/s}$ ，煙囪排放質量濃度 $3679.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2943.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1471.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 與 $735.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，常溫煙流的不透光度(流線座標,s 座標)

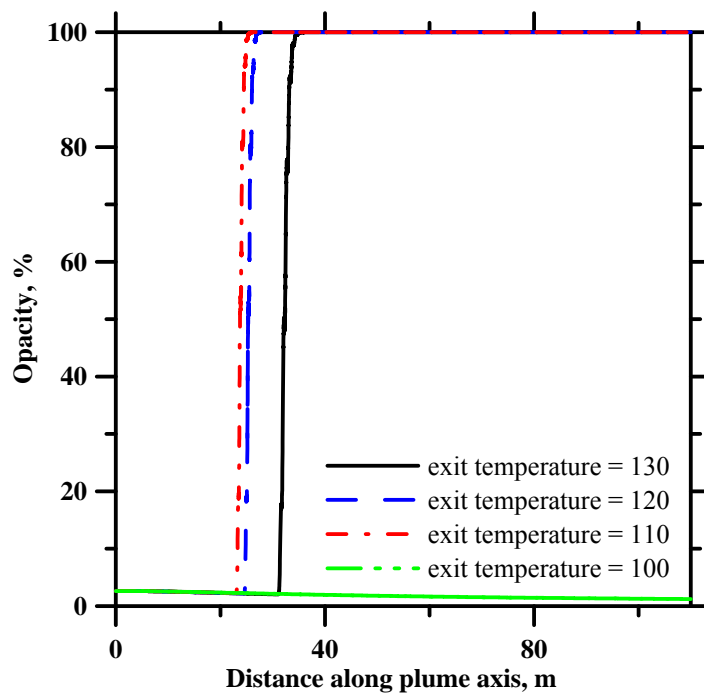


圖 4-15 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 1m/s ，煙流排放溫度 100°C 、 110°C 、 120°C 與 130°C ，高溫煙流的不透光度(流線座標, s 座標)

由上述結果可總結煙流特性如下，如圖 4-16 所示：

煙流由煙囪排出可依煙流是否高或低於環境溫度決定煙流垂直的移動方向，高溫因浮力往上移動、低溫因重力往下運動，其中煙流之垂直初速與風速亦是影響煙流上升高度的因素之一，而煙流半徑主要受外界風速的影響，風速越大煙流半徑越小。在不透光度方面，依微粒成長特性分為三大區域：第一區為未飽和區，在此區域因煙流內蒸氣未達過飽和微粒不會成長，故微粒幾乎為由煙囪排放出之初始微粒，而在此區中會有微粒互相碰撞導致微粒成長之膠結作用存在，且因煙流條件的不同此區域並不一定會存在；第二區為過飽和區，因煙流溫度受外界影響而下降，使此區域的蒸氣達過飽和狀態，微粒會快速的成長，是最大不透光度發生的區域，成長的機制主要為蒸氣附著於微粒上的凝結作用，但亦會有膠結作用存在，且有氣相轉液相之核凝現象發生，並由膠結作用開始形成小微粒，而不透光度會因風速越小而越大；第三區為粒徑縮減區，在此區中因蒸氣的消耗與稀釋，使煙流又恢復成未飽和狀態，蒸氣開始蒸發使粒徑減小，值得注意的是因微粒的成份不同，微粒上的成份溶解於水中時會發生潮解現象，使未飽和狀態延後

達小於 DRH 時蒸氣才會開始蒸發，故在此區域中不透光度會漸漸下降至不可見。

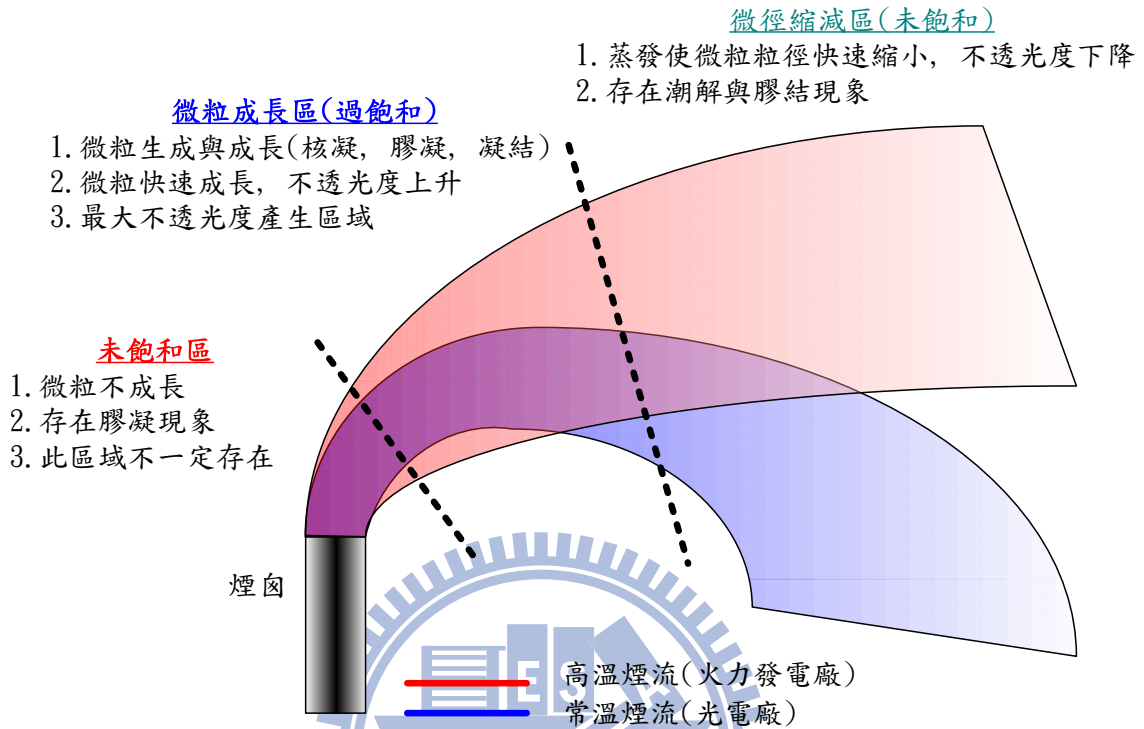


圖 4-16 煙流不透光度變化示意圖

表 4-4 常溫與高溫煙流比較

	常溫煙流		高溫煙流
模擬環境溫度	10°C	30°C	20°C
煙流初始不透光度	2.20%	2.20%	2.60%
煙流最大不透光度	14-91%	2.30%	100%
煙流上升或下降高度	上升 1-23m (距離煙囪 15m 處)	下降 5m-上升 1m (距離煙囪 15m 處)	上升 11-350m (距離煙囪 55m 處)
煙流長度(op>20%)	約 1m(風速 10 m/s)- 10 m(風速 0.5 m/s)	不明顯	約 28m(風速 10 m/s)- 80m(風速 1 m/s)
煙流降溫速率	慢	---	快
煙流過飽和位置	煙囪出口處	無	約距離煙囪直徑 2.0D-5.8D
煙流內微粒是否成長	是	否	是

第五章 結論與建議

本研究發展之 Plume opacity model 考慮微粒成長包含凝結、蒸發與潮解的影響及米氏散射理論加入 Plume rise model 並作微幅的修正，可用於預測煙流傳輸、微粒成長與不透光度的現象。由第四章模擬結果總結某光電廠與燃煤電廠煙流特性與改善建議如下：

某竹南光電廠之常溫煙流內微粒主要成分為 SiO_2 與銨鹽為主，從煙囪排出的未成長微粒是符合法規的，在冬季因煙流內濕度過高，導致煙囪出口處微粒即開始成長在此處可明顯看到白煙，不透光度最高可達 91%、不透光度大於 20% 之煙流長度約 10 公尺(風速 0.5 m/s)，並隨風速增加而遞減，主要影響不透光度的主因為煙流內溼度過高導致水蒸氣附著於微粒上使得微粒成長以及微粒濃度過高所致。在夏季因環境溫度較高故煙流內微粒無法成長，不透光度符合法規，但值得注意的是煙流不透光度仍會微幅的上升，原因主要為煙流於橫向擴散導致煙流半徑增加所致，此外，因煙流溫度低於環境溫度故煙流密度較大導致煙流往地面方向移動。此案例之白煙改善對策為將煙囪出口溼度降至 95% 以下，降低微粒成長時之過飽和度，可明顯改善白煙現象。

某燃煤發電廠之高溫煙流內微粒主要成分以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 為主，因煙流內溫度較高、煙流上升高度較大，且因煙流初始溼度較低，在煙流排出初期微粒並不會成長，約 13m(風速 10 m/s)-38 m(風速 1 m/s) 內無法觀察到白煙，但因煙流溫度快速降溫的原因，微粒經過一定距離之後快速成長，不透光度快速上升至 100% 長度約 13m(風速 10 m/s)~35 m(風速 1 m/s) 不等，嚴重超出環境法規標準。若可將排出之煙流溫度降低至 100°C 以下，使煙流內水氣無法達到過飽和，可避免微粒成長的發生並改善白煙的產生。

參考文獻

- [1] Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. Wiley-Interscience.
- [2] 行政院環境保護署 (2003). 電力設施空氣污染物排放標準, 台灣.
- [3] 行政院環境保護署 (2007). 固定污染源空氣污染物排放標準, 台灣.
- [4] 鄭明威, 周崇光, 李崇德 and 謝佩憶 (1998). 氣膠對半導體廠白煙問題之研究. 第 15 屆空氣污染控制技術研討論會論文集:791-797.
- [5] Wolf, D. E. and Seaba, J. P. (1994). Opacity Reduction Using Dry Hydrated Lime Injection. *Journal of the Air & Waste Management Association* 44:908-912.
- [6] Lou, J. C., Lee, M. and Chen, K. S. (1997). Correlation of Plume Opacity with Particles and Sulfates from Boiler. *Journal of Environmental Engineering* 123:698-703.
- [7] Meng, R. Z., Karamchandani, P. and Seigneur, C. (2000). Simulation of Stack Plume Opacity. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50:869-874.
- [8] 葉振偉 (2010). 某燃煤電廠煙氣不透光率成因研究, 國立交通大學, 台灣.
- [9] Bohren, C. F. and Huffman, D. R. (1983). *Absorption and Scattering of Light by Small Particle*. Wiley.

[10] Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change. Wiley.

[11] Pilat, M. J. and Wilder, J. M. (1983). Opacity of Monodisperse Sulfuric Acid Aerosols. Atmospheric Environment 17:1825-1835.

[12] Stern, A. C. (1976). Air Pollution. Academic Press, New York.

[13] Hanna, S. R. (1972). Rise and condensation of large cooling tower plumes. Journal of Applied Meteorology 11:793-799.

[14] Briggs, G. A. (1975). Plume Rise Predictions. Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses. American Meteorological Society.

[15] Turner, D. B. (1985). Proposed pragmatic methods for estimating plume rise and plume penetration through atmospheric layers. Atmospheric Environment 19:1215-1218.

[16] Zannetti, P. (1990). Air Pollution Modeling. Van Nostrand Reinhold.

[17] Schatzmann, M. (1979). An integral model of plume rise Atmospheric Environment 13:721-731.

[18] Wigley, T. M. and P.R., S. (1975). The effect of atmospheric conditions on the length of visible cooling tower plumes. Atmospheric Environment 9:437-445.

[19] Schatzmann, M. and Poliaastro, A. J. (1984). An advanced integral model for cooling

plume dispersion. *Atmospheric Environment* 18:663-674.

[20] Carhart, R. A., Policastro, A. J. and Dunn, W. E. (1992). An improved method for predicting seasonal and annual shadowing from cooling tower plumes. *Atmospheric Environment* 26A:2845-2852.

[21] Bornoff, R. B. and Mokhtarzadeh-Dehghan, M. R. (2001). A numerical study of interacting buoyant cooling-tower plumes. *Atmospheric Environment* 35:589-598.

[22] Janckie, U. and Janicke, L. (2001). A three-dimensional plume rise model for dry and wet plumes. *Atmospheric Environment* 35(5):877-890.

[23] Rezacova, D. and Sokol, S. (2000). On the influence of cooling towers on the weather and climate, Czech Hydrometeorological Institute.

[24] Carhart, R. A. and Policastro, A. J. (1991). A second generation model for cooling tower plume rise and dispersion-1. Single source. *Atmospheric Environment* 25A:1559-1576.

[25] Orville, H. D., Hirsch, J. H. and May, L. E. (1980). Application of a cloud model to cooling tower plumes and clouds. *Journal of Applied Meteorology* 19:1260-1272.

[26] Niewiadomski, M. and Haman, K. E. (1984). The rainfall enhancement by washout of cooling tower plumes: a numerical experiment. *Atmospheric Environment* 18:2483-2489.

[27] 陳律言 (2003). 相對溼度對氣膠微粒散光係數之影響, 國立台灣大學, 台灣.

[28] Overcamp, T. J. and Ku, T. (1986). Effect of a virtual origin correction on entrainment coefficients as determined from observations of plume rise. *Atmospheric Environment* 20:293-300.

[29] Davidson, G. A. (1989). Simultaneous trajectory and dilution predictions from a simple integral plume model. *Atmospheric Environment* 23:341-349.

[30] Fuchs, N. A. and Sutugin, A. G. (1971). High dispersed aerosols, topics in current aerosol research (part2) New York.

[31] Vargafik N. B., V. B. N., and Voljak L. D. (1983). International Tables of the Surface Tension of Water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 12:817-820.

[32] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P. (1995). *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, Cambridge.

[33] Goff, J. A. (1957). Saturation pressure of water on the new Kelvin temperature scale, in *Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*, Murray Bay, Que. Canada, 347-354.

[34] Davidson, G. A. (1986a). Gaussian versus top-hat profile assumptions in integral plume models. *Atmospheric Environment* 20:471-478.

[35] Mercer, G. N. and O., W. R. (1994). Plumes Above Line Fires In a Cross Wind. *Int. J. Wildland Fire* 4:201-207.

[36] Wiscombe, W. J. (1980). Improved Mie scattering algorithms. Appl. Opt. vol. 19:1505-1509.

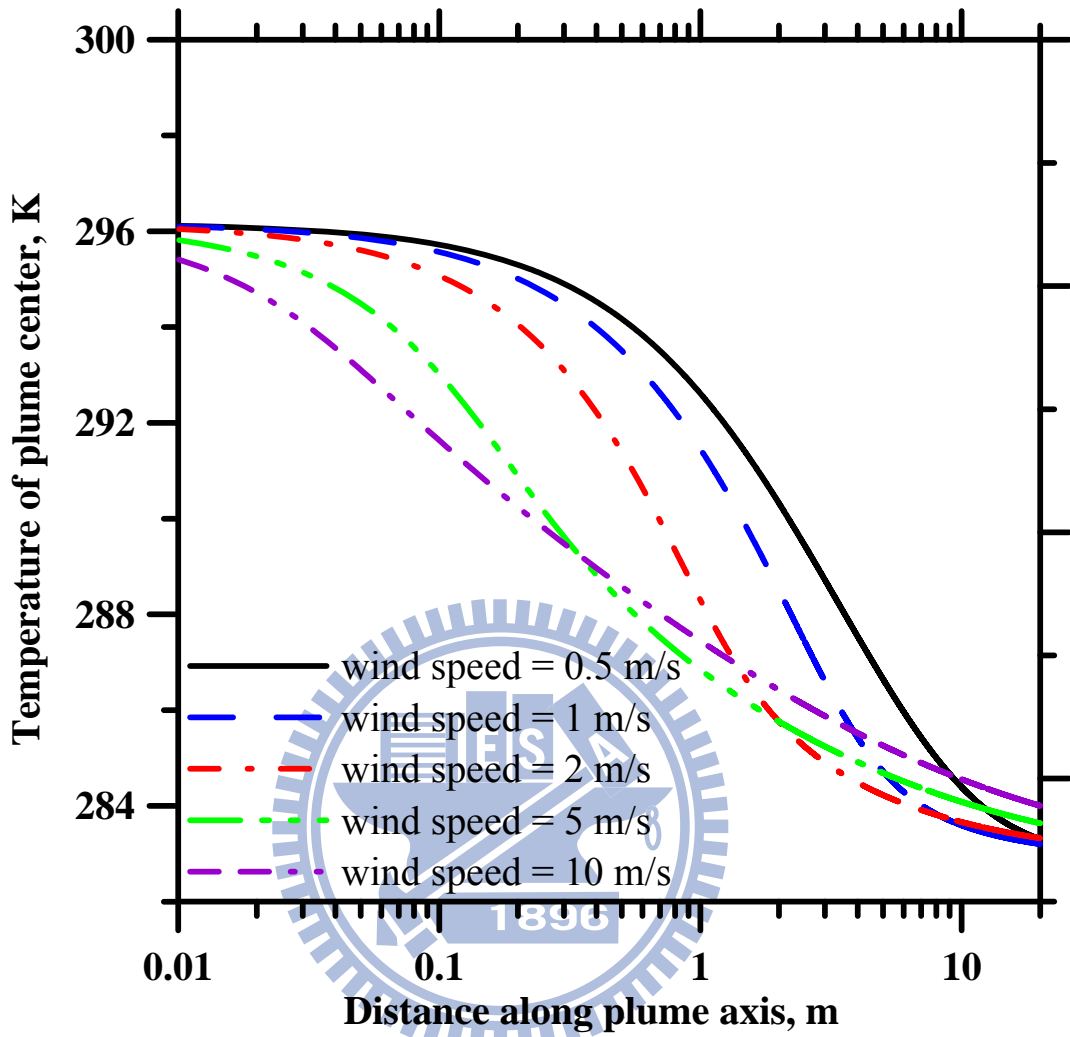
[37] Hodkinson, J. R. (1966). The Optical Measurement of Aerosols. Academic Press, New York.

[38] 行政院環保署 (2007). 開發環境中奈米物質質量測及特性分析技術:I-39.

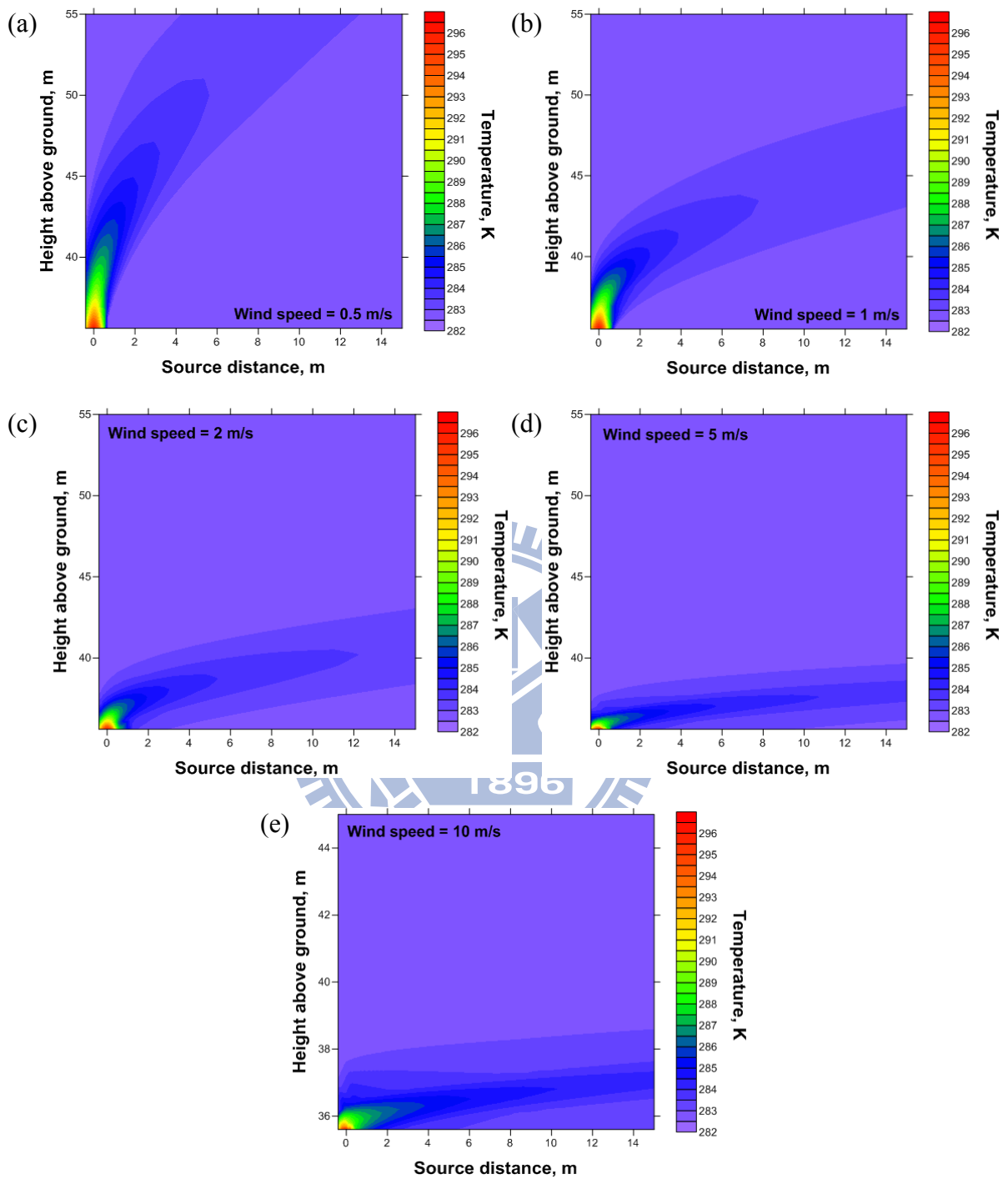
[39] EPRI (2004). Ammonium Chloride as a Component of Condensable Particulate Matter.



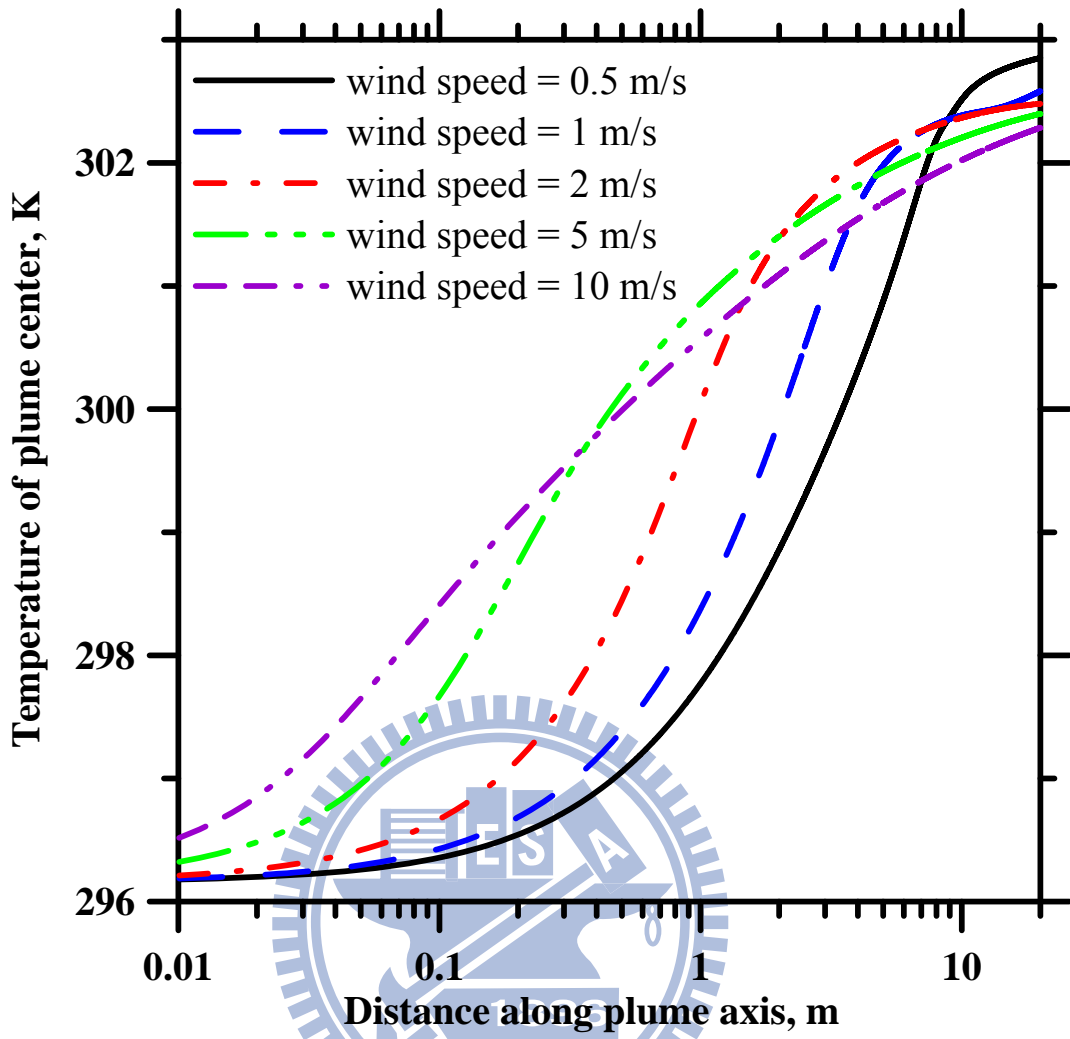
附錄



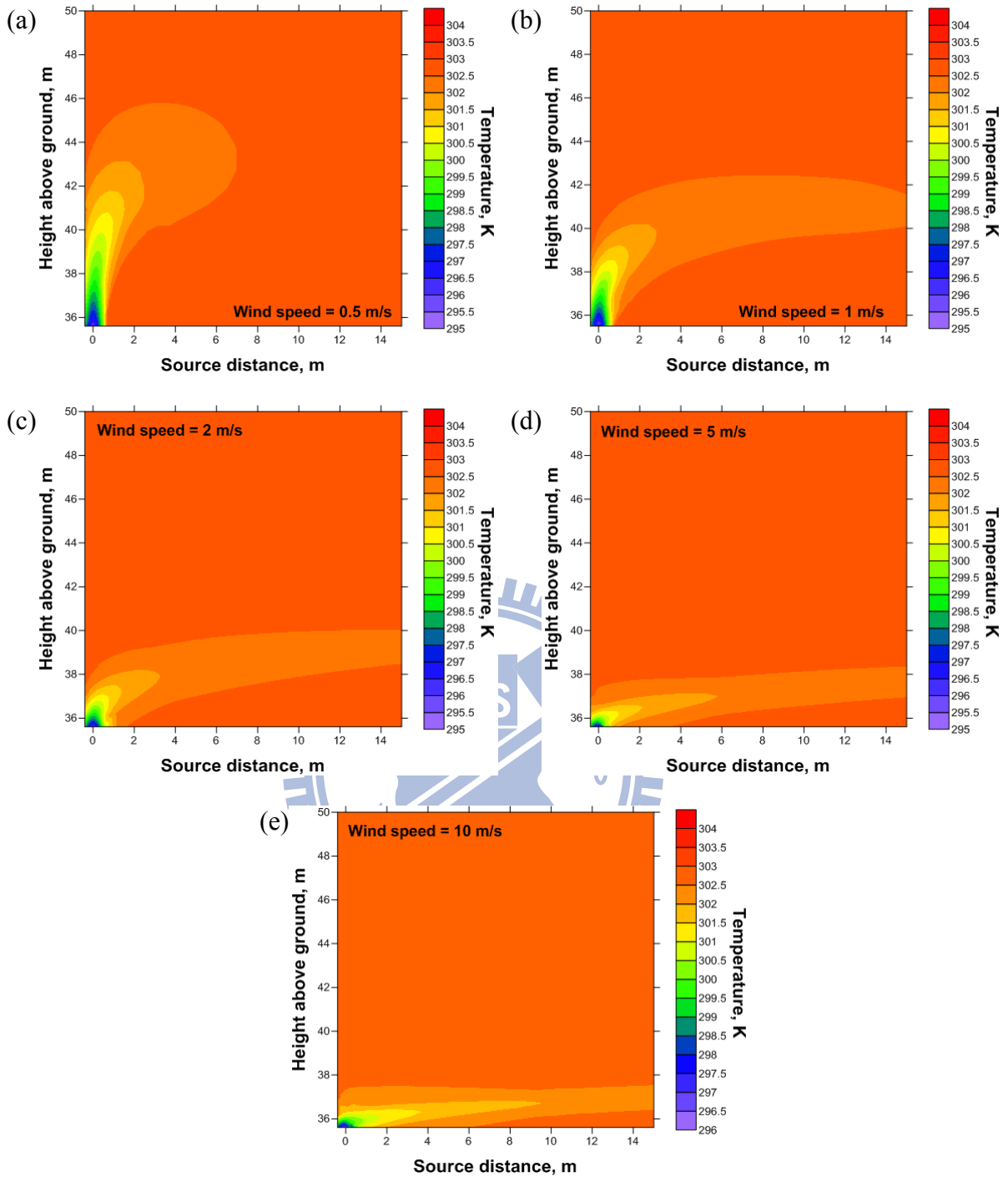
附錄 1 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流中心溫度與流線座標(s 座標)距離關係



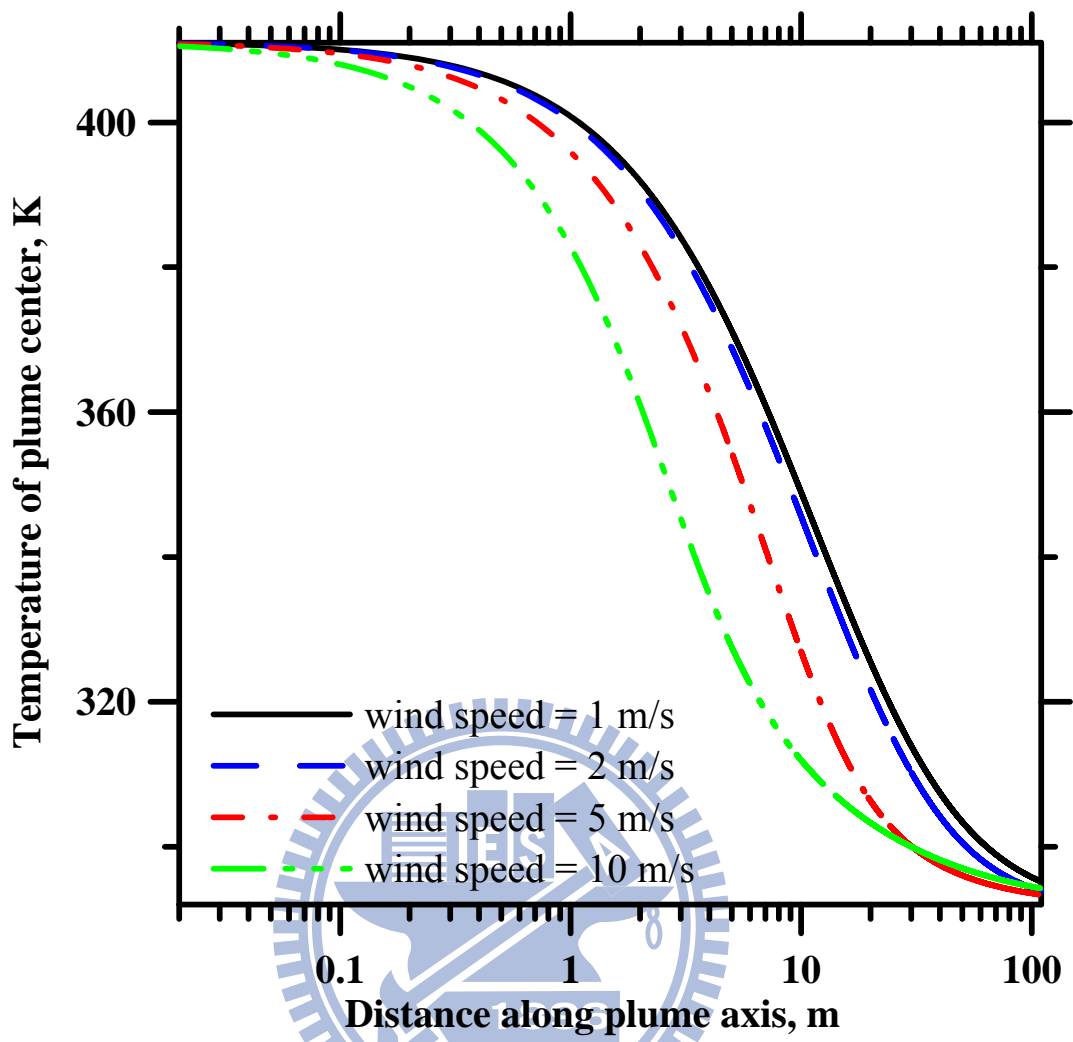
附錄 2 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流內溫度分佈



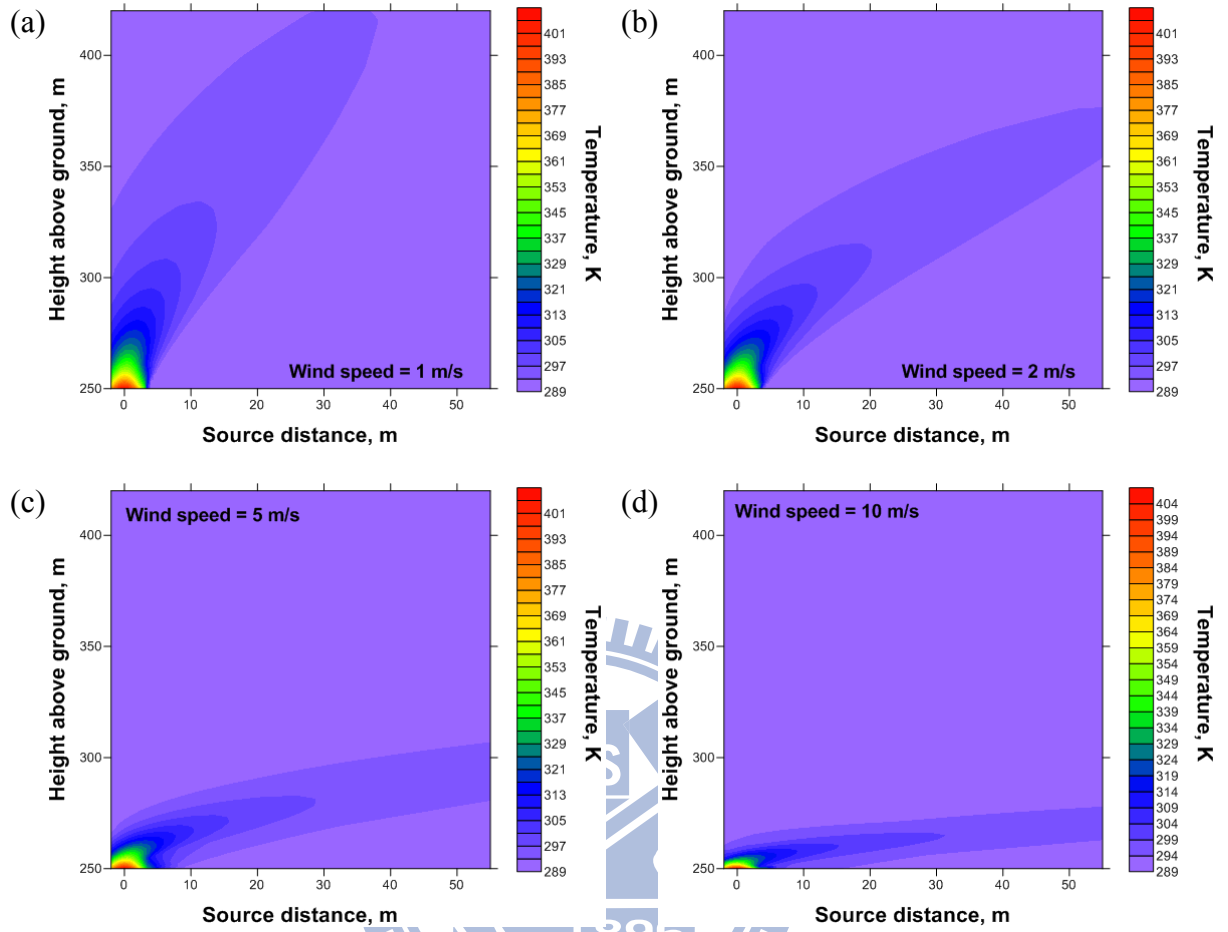
附錄 3 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流中心溫度與流線座標(s 座標)距離關係



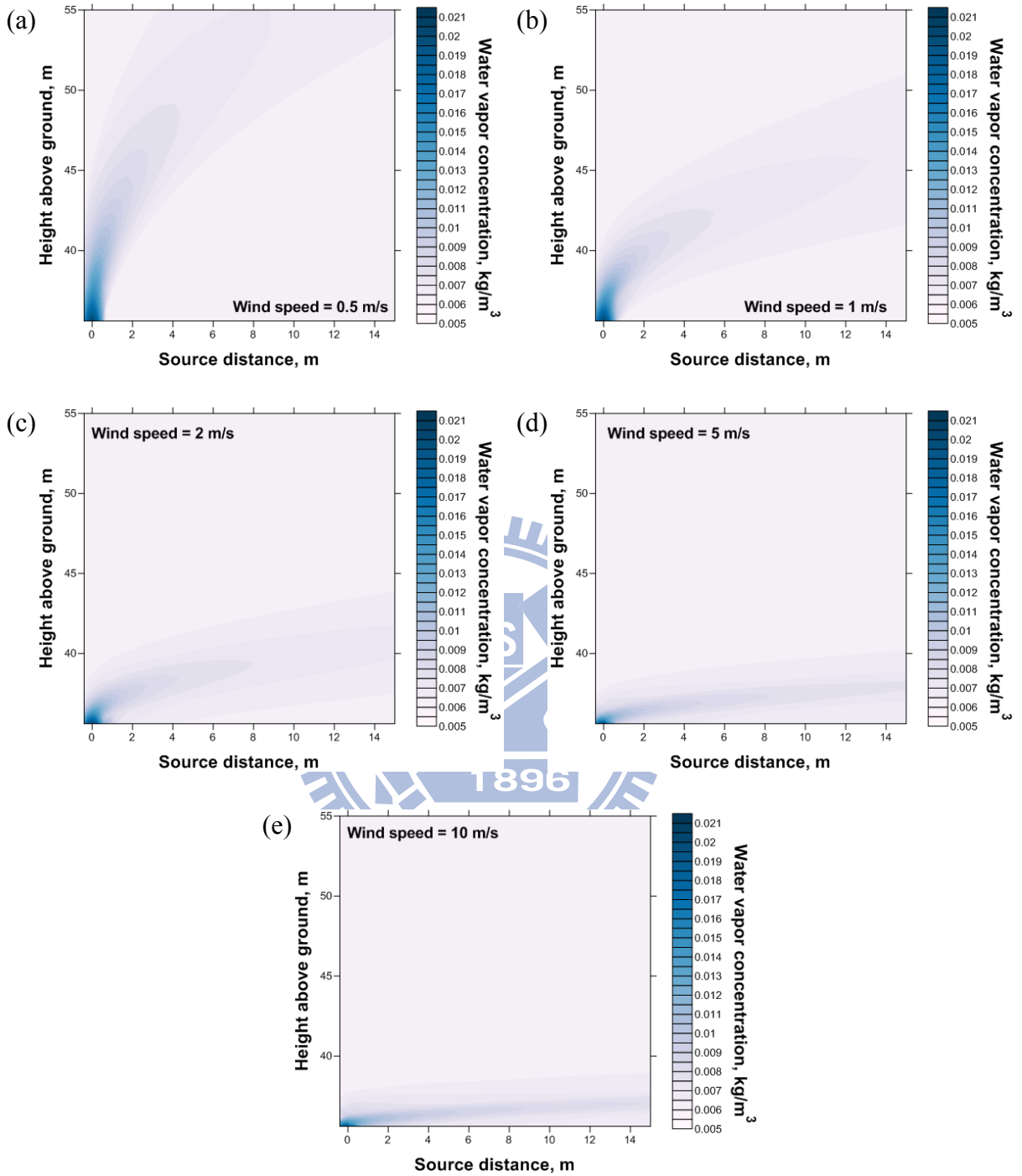
附錄 4 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流內溫度分佈



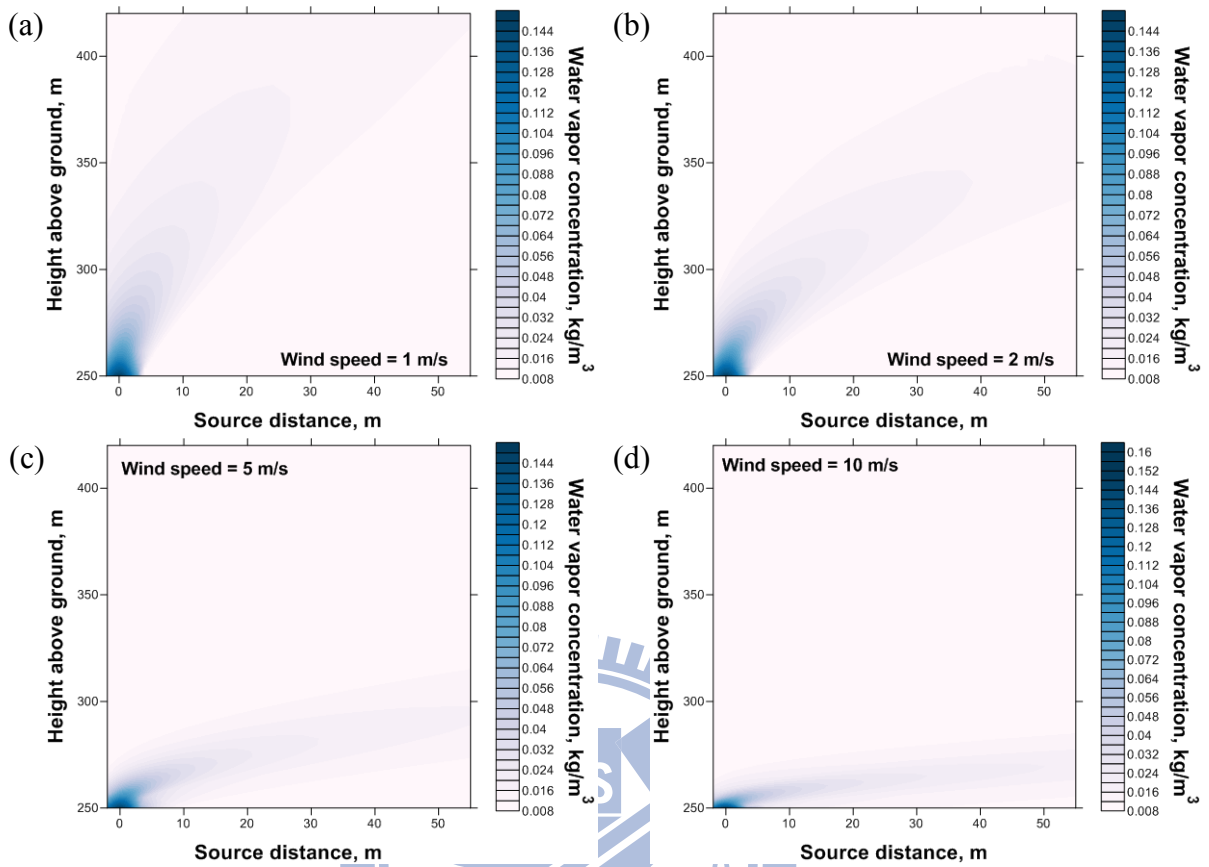
附錄 5 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1、2、5$ 與 10m/s ，高溫煙流中心溫度與流線座標(s 座標)距離關係



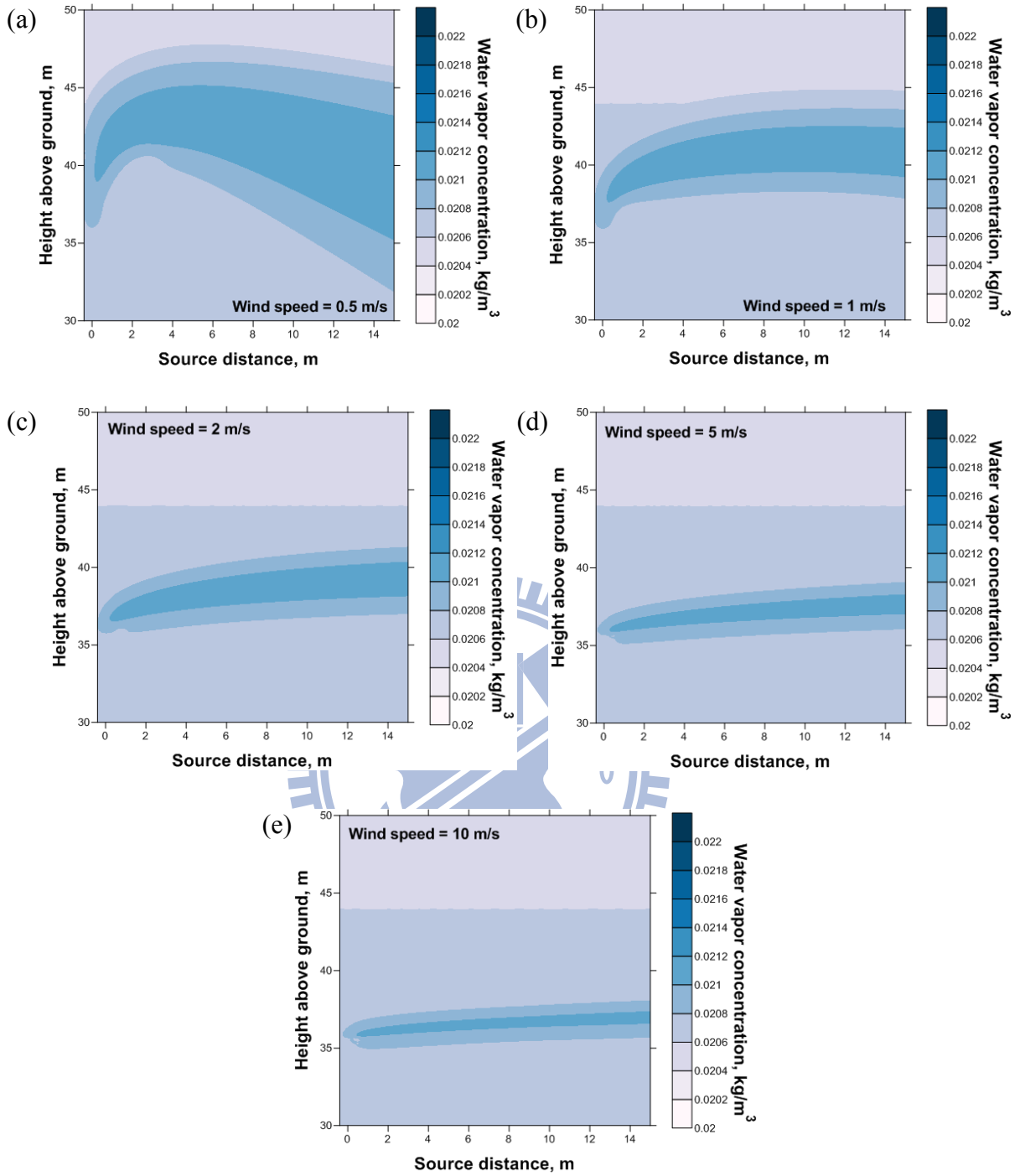
附錄 6 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)1、(b)2、(c)5 與 (d)10m/s，高溫煙流內溫度分佈



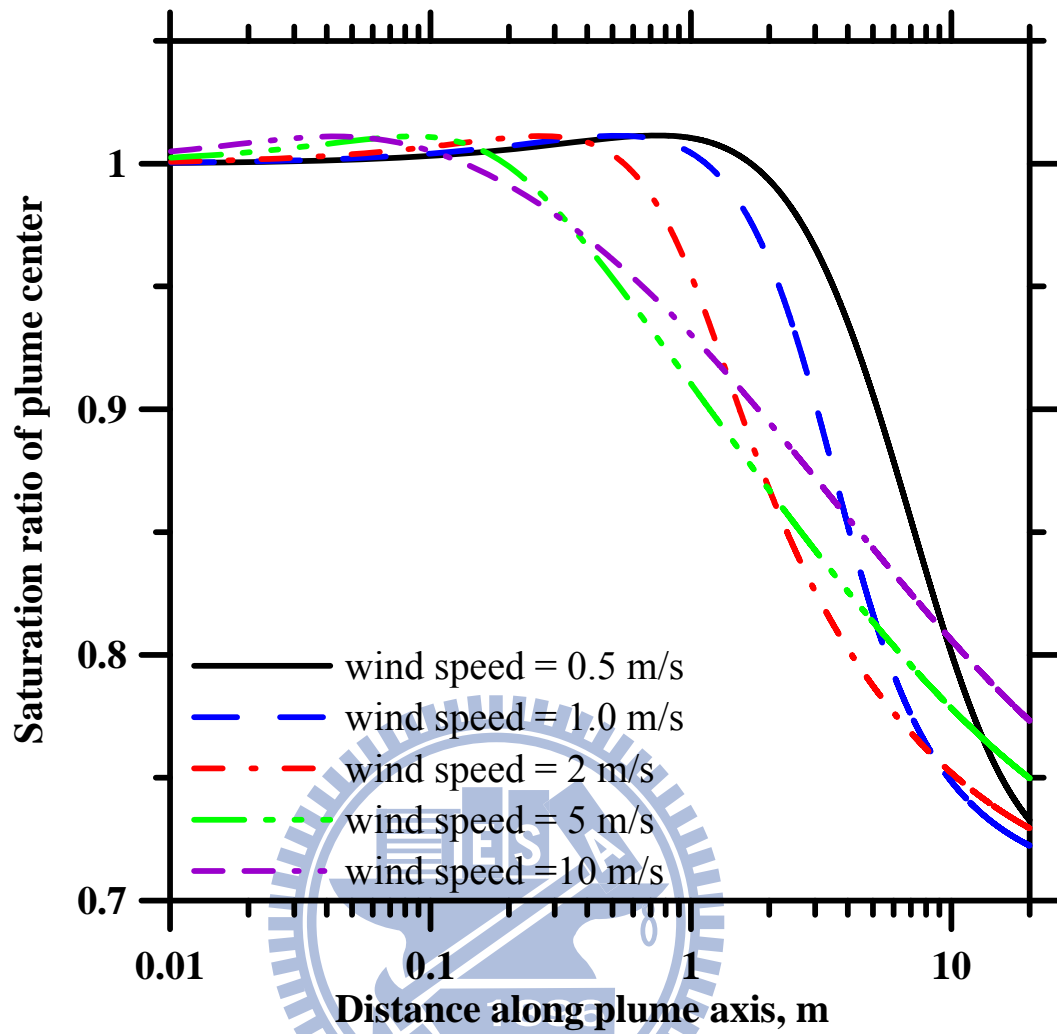
附錄 7 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流內水蒸氣分佈



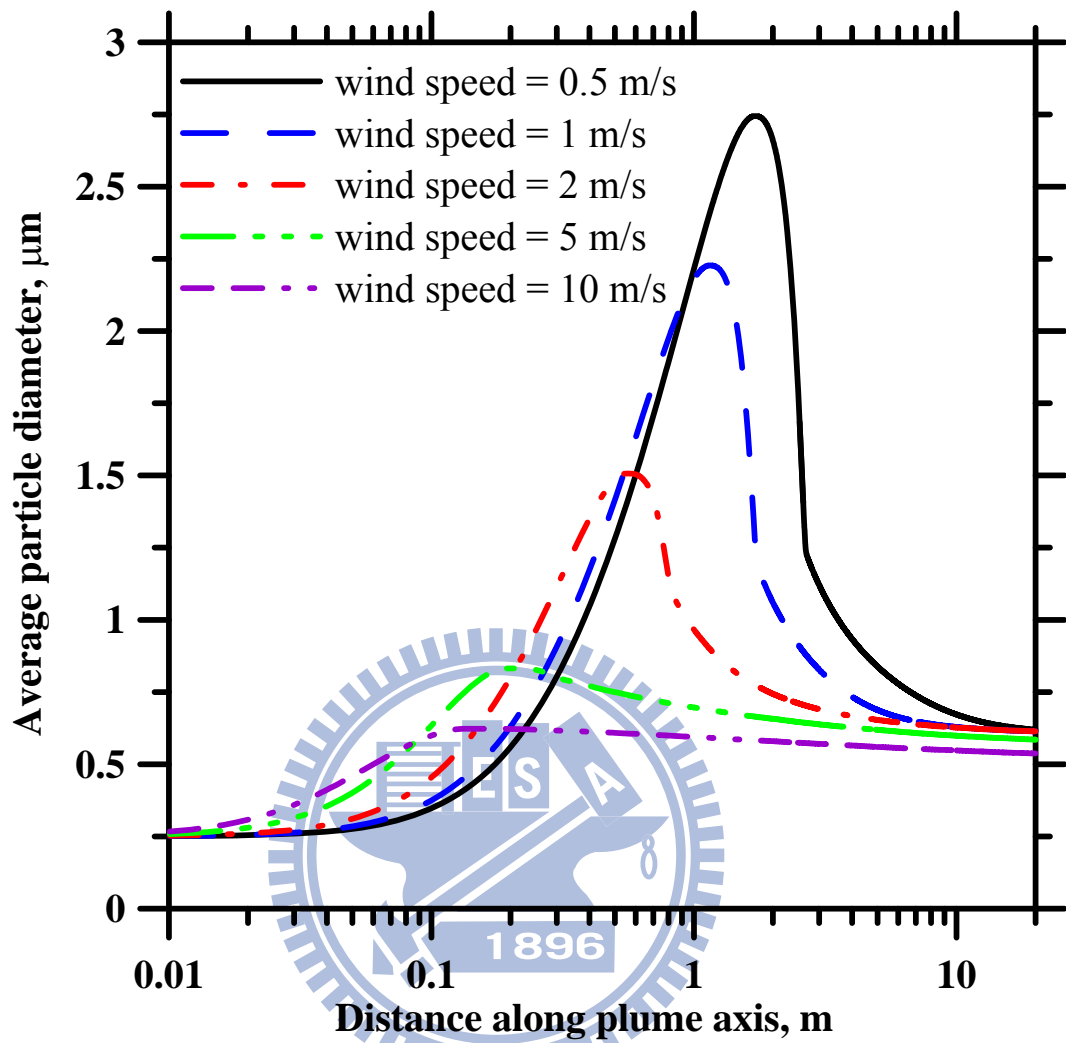
附錄 8 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)1、(b)2、(c)5 與 (d)10m/s，高溫煙流內水蒸氣分佈



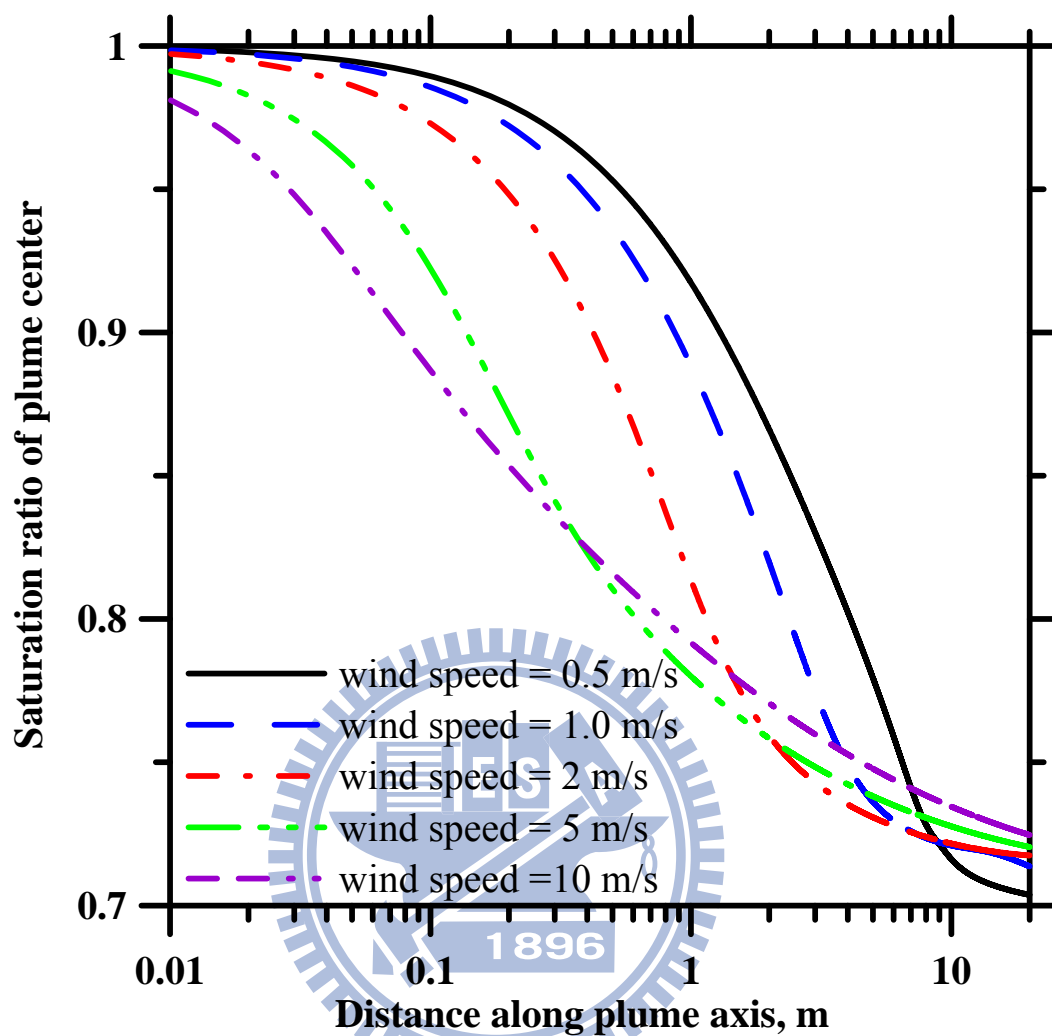
附錄 9 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a =$ (a)0.5、(b)1、(c)2、(d)5 與 (e)10m/s，常溫煙流內水蒸氣分佈



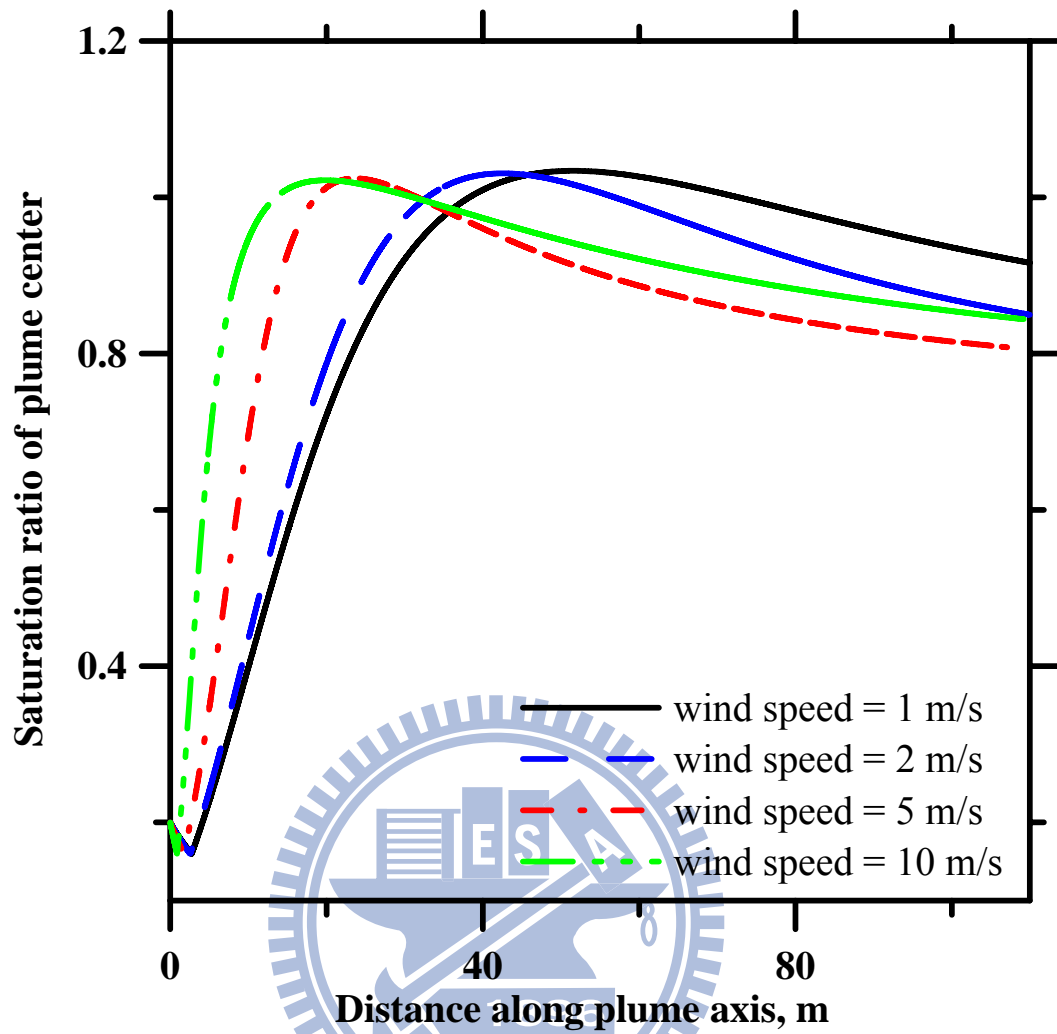
附錄 10 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流中心飽和比與流線座標(s 座標)距離關係



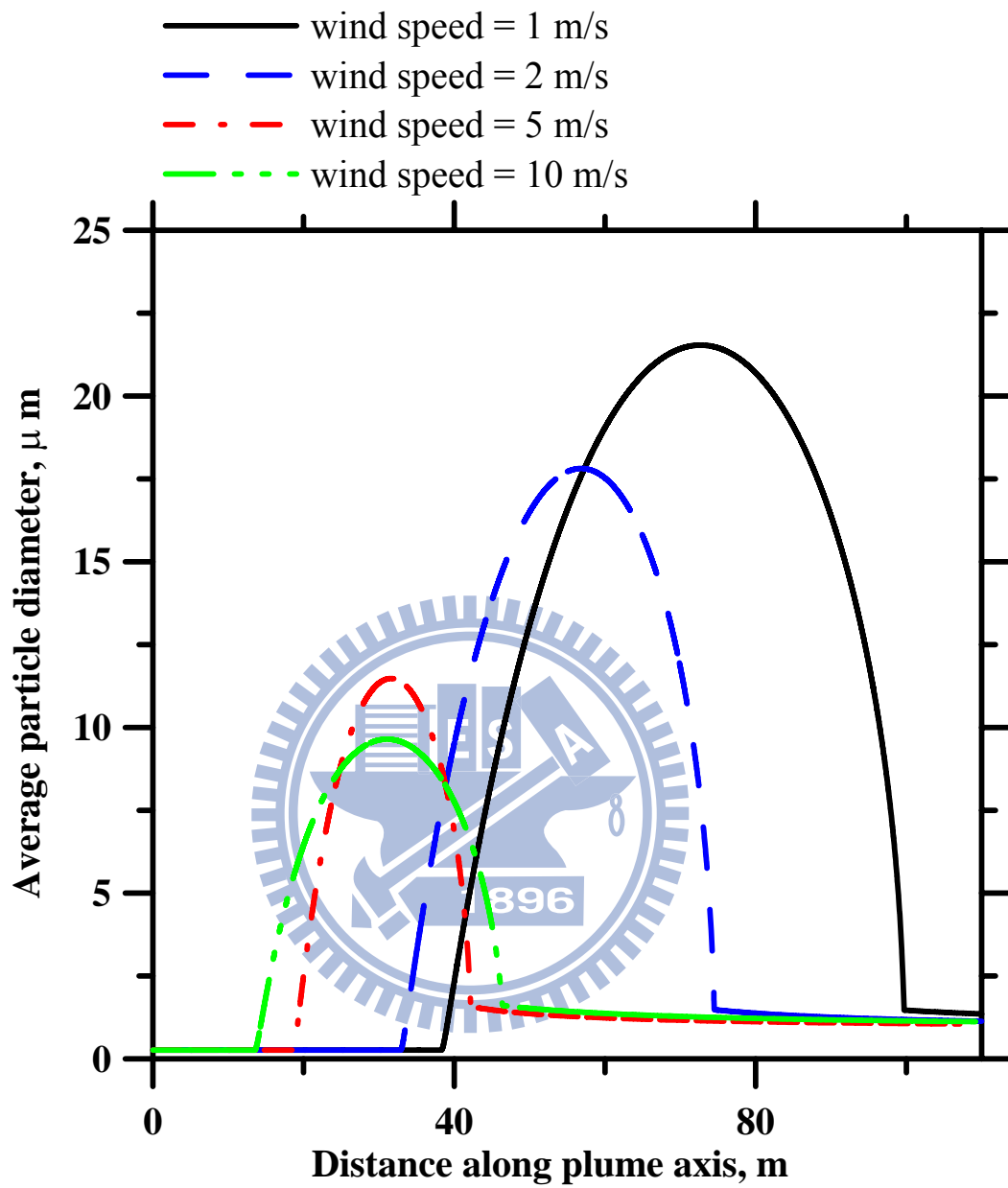
附錄 11 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流中心的微粒平均粒徑與流線座標(s 座標)距離關係



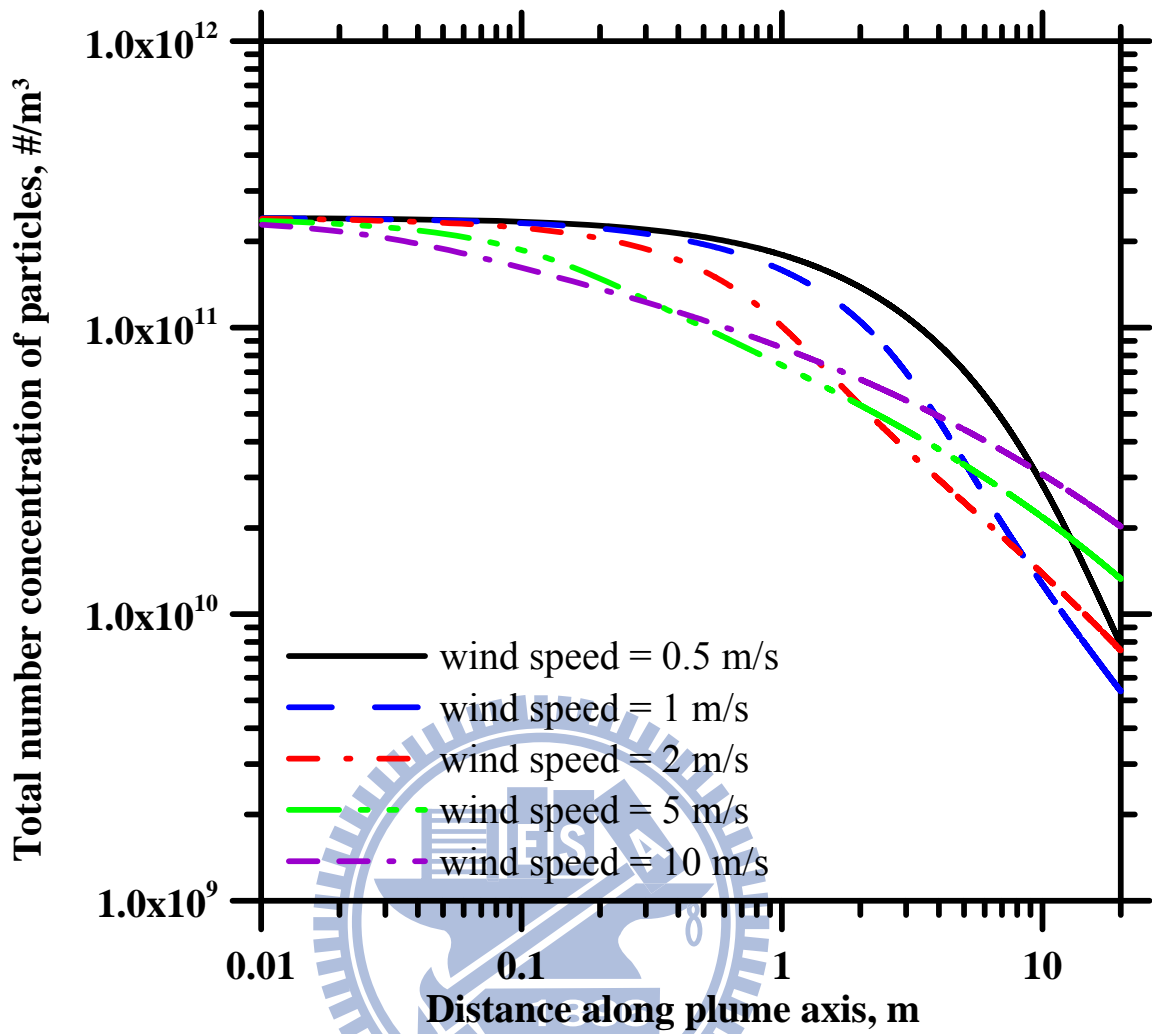
附錄 12 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流中心飽和比與流線座標(s 座標)距離關係



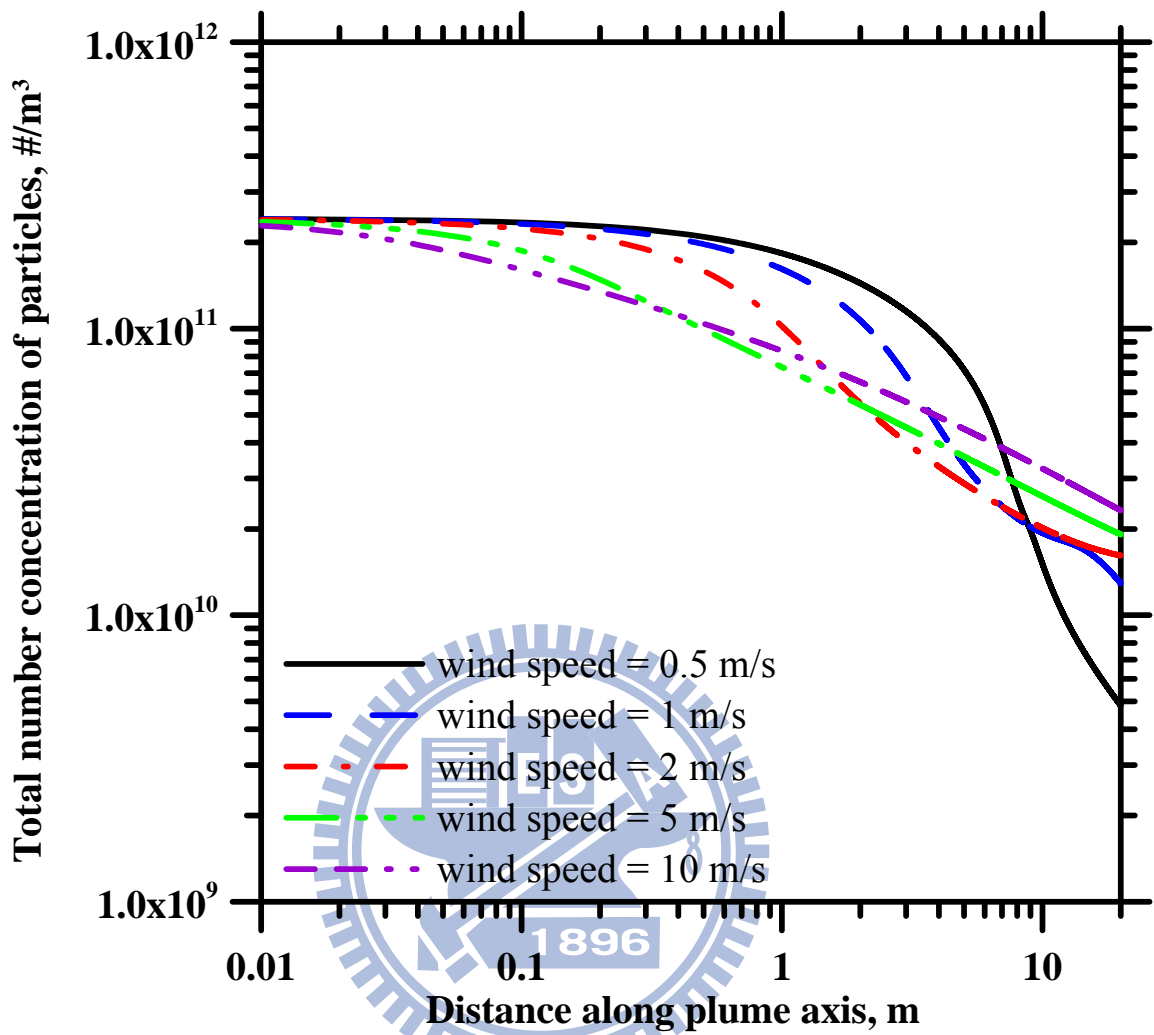
附錄 13 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1、2、5$ 與 10m/s ，高溫煙流中心飽和比與流線座標(s 座標)距離關係



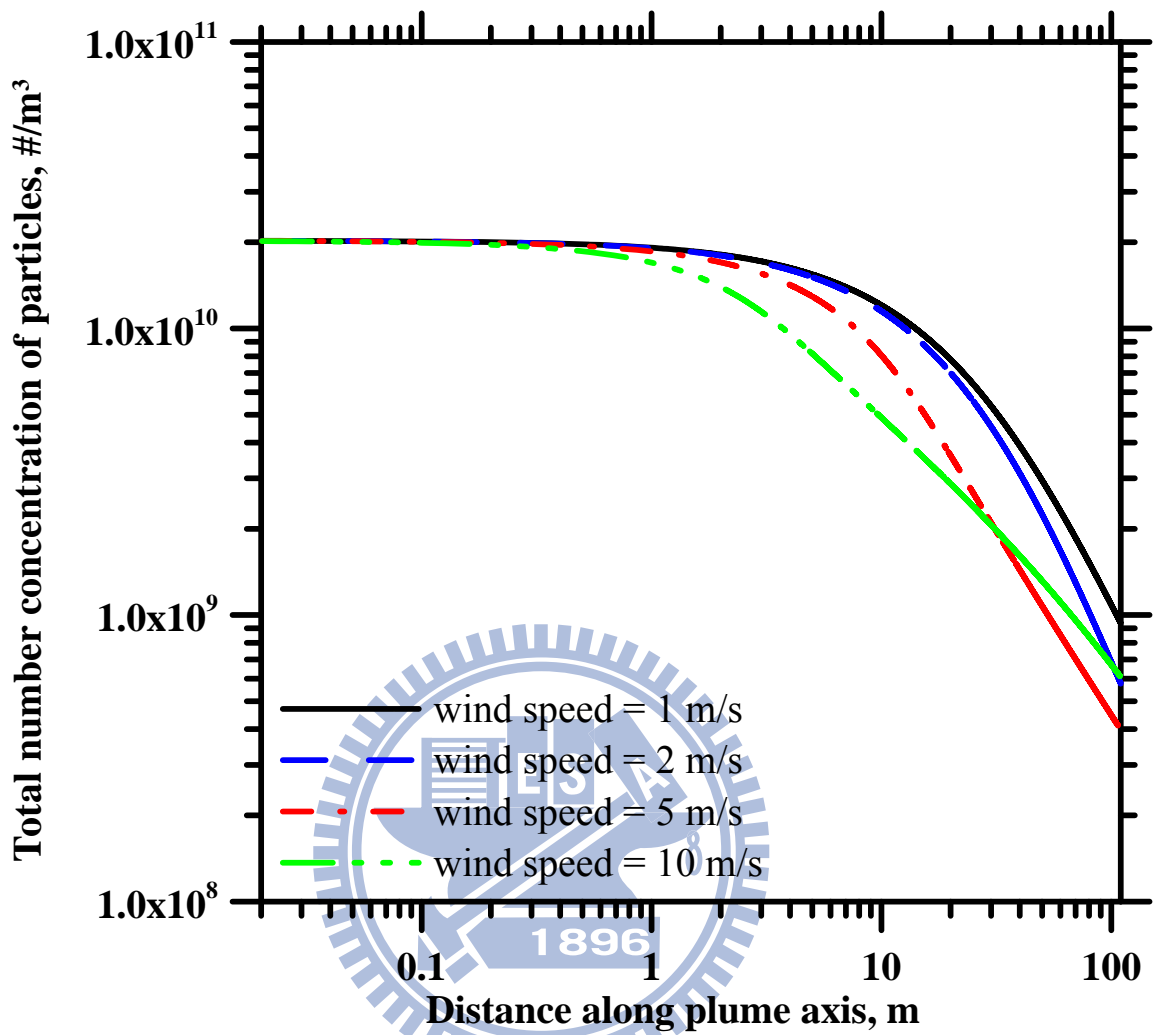
附錄 14 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1、2、5$ 與 10m/s ，高溫煙流中心的微粒平均粒徑與流線座標(s 座標)距離關係



附錄 15 某光電廠於外界溫度 $T_a = 10^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流內之微粒總數目濃度與流線座標(s 座標)距離關係



附錄 16 某光電廠於外界溫度 $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 0.5、1、2、5$ 與 10m/s ，常溫煙流內之微粒總數目濃度與流線座標(s 座標)距離關係



附錄 17 某燃煤電廠於外界溫度 $T_a = 20^\circ\text{C}$ ，相對溼度 $RH_a = 70\%$ ，風速 $U_a = 1、2、5$ 與 10m/s ，高溫煙流內之微粒總數目濃度與流線座標(s 座標)距離關係