

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

移動物體之可視化

Visualization of moving objects



研 究 生：鄭滄棋

指導教授：傅武雄 博士

中華民國九十四年六月

移動物體之可視化

Visualization of moving objects

研 究 生：鄭滄棋

Student: Tsang-Chi Cheng

指導教授：傅武雄

Advisor: Wu-Shung Fu

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文



Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

June 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

移動物體之可視化

研 究 生：鄭滄棋

指導教授：傅武雄 博士

國立交通大學機械工程學系

中文摘要

本文主要目的為利用數值計算與流場可視化結合的技術，經由這個技術可以簡單顯示流場的型態。本文使用此種方式模擬(一)移動物體在流場中之變化情形，利用穩態和暫態流場來討論物體在流場中的變化，並將製作出來的動畫合併同時播放，討論兩種不同條件下流場變化情形。(二)汽車排放廢氣污染情形，主要分為汽車在行進中排放廢氣污染情形、汽車在靜止情況下排放廢氣污染情形、汽車在陣列情況下排放廢氣污染情形、汽車在順風和逆風情況下排放廢氣污染的情形，將這些不同條件下的結果利用後處理軟體和影像編輯軟體製作成動畫，以清楚觀察流場中濃度的變化情形。(三)無塵室工作台車與粒子飛行軌跡的討論，主要是模擬在均勻流場和非均勻流場下之粒子飛行軌跡和工作台車之間的影響，並將粒子飛行軌跡和氣流場的動畫利用影像覆疊軟體製作成簡單易懂的動畫。

Visualization of moving objects

Student: Tsang-Chi Cheng

Advisor: Wu-Shung Fu

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The aim of the study is to couple computational fluid dynamics simulations with flow visualization techniques to animate real flow phenomena especially for moving boundary problem. In the study, flow phenomena including moving boundary problems are solved numerically first. Use the results of flow field and find out fluid particles trajectory, and visually vivid dynamic flow phenomena likes animation could be produced. Continuously adopt a code of Fieldview and use gray color technique to color the flow phenomena. Then colorful dynamic flow phenomena could be finished. In this study, three dynamic flow phenomena of a car moving in flowing fluid, pollutant concentration diffusing with a moving car and particles in laminar flow captured by a moving vehicle in clean room are mainly considered. The characteristic of this study is to make dynamic flow phenomena become visuable and easily understandable.

誌 謝

感謝我的父母雙親二十多年來的養育之恩與教養，使我長大成人完成學業，並順利地無憂無慮完成碩士學業。而歷經兩年的碩士生涯中，在此尤其感謝我的指導老師 傅教授武雄先生在研究上、生活上及課業上無微不至的照顧，以及在為人處事上的教誨，本人在此謹致上最高的敬意，同時感謝工研院環安中心同仁的協助。並謝謝學長和同學等人的協助，在此一併致謝。最後，僅以本文獻給我的家人與師長和朋友。



目 錄

	頁次
中文摘要	i
ABSTRACT	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	v
圖目錄	vi
符號說明	xv
第一章 緒論	1
第二章 物理模示	11
2-1 物理模示	11
2-2 流場速度之計算	23
2-3 粒子運動統馭方程式	30
第三章 數值方法	32
3-1 數值方法	32
3-2 PISO 數值計算	37
3-3 暫態滑移網格(sliding mesh)	40
3-4 流場動畫製作方法	42
第四章 結果與討論	66
4-1 移動物體周圍流場分布	66
4-2 汽車排氣污染情形	83
4-3 無塵室工作台車與粒子飛行軌跡的討論	111
第五章 結論	131
參考文獻	132



表目錄

	頁次
表 1-1 全球半導體市場規模預測	2
表 1-2 SIA 對半導體技術在最小線徑及記憶體的趋势預估	3
表 1-3 小汽車之 CO 基本排放量(PIARC)	5
表 1-4 布朗力與重力對粒子運動的影響	9
表 2-1 標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式係數值	25
表 2-2 CO 之相關性質設定	28
表 2-3 工作流體(空氣, Air) 相關性質表	29



圖目錄

	頁次
圖 2-1 移動物體於流場中移動之物理模式圖	12
圖 2-2 汽車排放廢氣之物理模式圖	13
圖 2-3 汽車陣列排放廢氣之物理模式圖	14
圖 2-4 汽車固定不動排放廢氣之物理模式圖	15
圖 2-5 汽車在順風情況下之物理模式圖	17
圖 2-6 汽車在逆風情況下之物理模式圖	18
圖 2-7 無塵室工作台車物理模式圖	19
圖 2-8 無塵室中均勻流物理模式圖	20
圖 2-9 無塵室中非均勻流物理模式圖	21
圖 2-10 無塵室中粒子位置分佈圖	22
圖 3-1 相鄰網格中心點及離散面相關位置示意圖	33
圖 3-2 計算流程圖	34
圖 3-3 對流通量示意圖	36
圖 3-4 PISO 示意圖	38
圖 3-5 滑移網格進行方式說明示意圖	41
圖 3-6 物理模式中的視覺化範圍	43
圖 3-7 空氣粒子所產生的連續軌跡	44
圖 3-8 空氣粒子隨流場位置速度的不同而改變其顏色	45
圖 3-9 流場中渦流產生處	46
圖 3-10 穩態流場中渦流產生處	47
圖 3-11 暫態流場之渦流運動情形 1	48
圖 3-11 暫態流場之渦流運動情形 2	48
圖 3-11 暫態流場之渦流運動情形 3	48

圖 3-11	暫態流場之渦流運動情形 4	49
圖 3-11	暫態流場之渦流運動情形 5	49
圖 3-11	暫態流場之渦流運動情形 6	49
圖 3-12	暫態流場之連續性渦流運動情形 1	50
圖 3-12	暫態流場之連續性渦流運動情形 2	50
圖 3-12	暫態流場之連續性渦流運動情形 3	50
圖 3-12	暫態流場之連續性渦流運動情形 4	51
圖 3-12	暫態流場之連續性渦流運動情形 5	51
圖 3-13	所有空氣粒子釋放之情形	52
圖 3-14	移動物體之 0.05 秒速度向量圖	54
圖 3-14	移動物體之 0.1 秒速度向量圖	54
圖 3-14	移動物體之 0.15 秒速度向量圖	54
圖 3-14	移動物體之 0.2 秒速度向量圖	54
圖 3-15	流場中 0.6 秒速度純量圖	55
圖 3-15	流場中 1 秒速度純量圖	55
圖 3-15	流場中 1.6 秒速度純量圖	55
圖 3-15	流場中 2 秒速度純量圖	55
圖 3-16	流場中 0.6 秒壓力變化圖	56
圖 3-16	流場中 1 秒壓力變化圖	56
圖 3-16	流場中 1.6 秒壓力變化圖	56
圖 3-16	流場中 2 秒壓力變化圖	56
圖 3-17	固體粒子運動軌跡	58
圖 3-18	流場中固體粒子與氣流之運動情形 1	59
圖 3-18	流場中固體粒子與氣流之運動情形 2	59
圖 3-18	流場中固體粒子與氣流之運動情形 3	59
圖 3-18	流場中固體粒子與氣流之運動情形 4	59

圖 3-18	流場中固體粒子與氣流之運動情形 5	60
圖 3-18	流場中固體粒子與氣流之運動情形 6	60
圖 3-18	流場中固體粒子與氣流之運動情形 7	60
圖 3-18	流場中固體粒子與氣流之運動情形 8	60
圖 3-18	流場中固體粒子與氣流之運動情形 9	61
圖 3-19	動畫製作過程	62
圖 3-20	時間 1 秒之濃度分布圖	63
圖 3-21	隨濃度改變顏色之空氣粒子	65
圖 4-1	移動物體之 0.05 秒速度向量圖	67
圖 4-1	移動物體之 1 秒速度向量圖	67
圖 4-1	移動物體之 2 秒速度向量圖	68
圖 4-1	移動物體之 3 秒速度向量圖	68
圖 4-2	移動物體之 0.05 秒壓力分佈圖	69
圖 4-2	移動物體之 1 秒壓力分佈圖	69
圖 4-2	移動物體之 2 秒壓力分佈圖	70
圖 4-2	移動物體之 3 秒壓力分佈圖	70
圖 4-3	穩態流場之速度向量圖	71
圖 4-4	穩態流場之壓力分佈圖	71
圖 4-5	視覺化範圍	72
圖 4-6	移動物體之 0.05 秒之速度純量圖	73
圖 4-6	移動物體之 1 秒之速度純量圖	73
圖 4-6	移動物體之 2 秒之速度純量圖	73
圖 4-6	移動物體之 3 秒之速度純量圖	73
圖 4-7	移動物體在流場中渦流產生處	75
圖 4-8	穩態流場渦流產生處	75
圖 4-9	暫態流場之渦流運動情形 1	76

圖 4-9 暫態流場之渦流運動情形 2	76
圖 4-9 暫態流場之渦流運動情形 3	76
圖 4-9 暫態流場之渦流運動情形 4	77
圖 4-9 暫態流場之渦流運動情形 5	77
圖 4-9 暫態流場之渦流運動情形 6	77
圖 4-10 暫態流場之連續性渦流運動情形 1	78
圖 4-10 暫態流場之連續性渦流運動情形 2	78
圖 4-10 暫態流場之連續性渦流運動情形 3	78
圖 4-10 暫態流場之連續性渦流運動情形 4	79
圖 4-10 暫態流場之連續性渦流運動情形 5	79
圖 4-11 穩態流場渦流產生處	80
圖 4-12 移動物體之所有空氣粒子釋情形	81
圖 4-13 穩態流場之所有空氣粒子釋情形	81
圖 4-14 車速為 15m/s 之 0.4 秒速度分佈圖	84
圖 4-14 車速為 15m/s 之 1 秒速度分佈圖	84
圖 4-14 車速為 15m/s 之 1.4 秒速度分佈圖	84
圖 4-14 車速為 15m/s 之 2 秒速度分佈圖	84
圖 4-15 車速為 30m/s 之 0.2 秒速度分佈圖	85
圖 4-15 車速為 30m/s 之 0.5 秒速度分佈圖	85
圖 4-15 車速為 30m/s 之 0.7 秒速度分佈圖	85
圖 4-15 車速為 30m/s 之 1 秒速度分佈圖	85
圖 4-16 車速為 15m/s 之 0.4 秒壓力分佈圖	86
圖 4-16 車速為 15m/s 之 1 秒壓力分佈圖	86
圖 4-16 車速為 15m/s 之 1.4 秒壓力分佈圖	86
圖 4-16 車速為 15m/s 之 2 秒壓力分佈圖	86
圖 4-17 車速為 30m/s 之 0.2 秒壓力分佈圖	87

圖 4-17	車速為 30m/s 之 0.5 秒壓力分佈圖	87
圖 4-17	車速為 30m/s 之 0.7 秒壓力分佈圖	87
圖 4-17	車速為 30m/s 之 1 秒壓力分佈圖	87
圖 4-18	車速為 15m/s 之 0.4 秒濃度分佈圖	88
圖 4-18	車速為 15m/s 之 1 秒濃度分佈圖	88
圖 4-18	車速為 15m/s 之 1.4 秒濃度分佈圖	88
圖 4-18	車速為 15m/s 之 2 秒濃度分佈圖	88
圖 4-19	車速為 30m/s 之 0.2 秒濃度分佈圖	90
圖 4-19	車速為 30m/s 之 0.5 秒濃度分佈圖	90
圖 4-19	車速為 30m/s 之 0.7 秒濃度分佈圖	90
圖 4-19	車速為 30m/s 之 1 秒濃度分佈圖	90
圖 4-20	車速為 15m/s 之空氣粒子於 0.4 秒時受濃度源污染之情形 1	91
圖 4-20	車速為 15m/s 之空氣粒子於 1 秒時受濃度源污染之情形 1	91
圖 4-20	車速為 15m/s 之空氣粒子於 1.4 秒時受濃度源污染之情形 1	91
圖 4-20	車速為 15m/s 之空氣粒子於 2 秒時受濃度源污染之情形 1	91
圖 4-21	車速為 30m/s 之空氣粒子於 0.2 秒時受濃度源污染之情形 1	92
圖 4-21	車速為 30m/s 之空氣粒子於 0.5 秒時受濃度源污染之情形 1	92
圖 4-21	車速為 30m/s 之空氣粒子於 0.7 秒時受濃度源污染之情形 1	92
圖 4-21	車速為 30m/s 之空氣粒子於 1 秒時受濃度源污染之情形 1	92
圖 4-22	2 秒之濃度分佈圖	95
圖 4-22	5 秒之濃度分佈圖	95
圖 4-22	8 秒之濃度分佈圖	95
圖 4-22	10 秒之濃度分佈圖	95
圖 4-23	流場中渦流產生處	96
圖 4-24	空氣粒子在流場中渦流產生處	96
圖 4-25	0.4 秒之速度純量圖	98

圖 4-25	1 秒之速度純量圖	98
圖 4-25	1.4 秒之速度純量圖	98
圖 4-25	2 秒之速度純量圖	98
圖 4-26	0.4 秒之壓力分佈圖	99
圖 4-26	1 秒之壓力分佈圖	99
圖 4-26	1.4 秒之壓力分佈圖	99
圖 4-26	2 秒之壓力分佈圖	99
圖 4-27	0.4 秒之濃度分佈圖	100
圖 4-27	1 秒之濃度分佈圖	100
圖 4-27	1.4 秒之濃度分佈圖	100
圖 4-27	2 秒之濃度分佈圖	100
圖 4-28	空氣粒子於流場中被濃度污染之情形 1	101
圖 4-28	空氣粒子於流場中被濃度污染之情形 2	101
圖 4-28	空氣粒子於流場中被濃度污染之情形 3	101
圖 4-28	空氣粒子於流場中被濃度污染之情形 4	101
圖 4-29	順風情況下在 0.2 秒時之速度純量圖	104
圖 4-29	順風情況下在 0.5 秒時之速度純量圖	104
圖 4-29	順風情況下在 0.7 秒時之速度純量圖	104
圖 4-29	順風情況下在 1 秒時之速度純量圖	104
圖 4-30	逆風情況下在 0.2 秒時之速度純量圖	105
圖 4-30	逆風情況下在 0.5 秒時之速度純量圖	105
圖 4-30	逆風情況下在 0.7 秒時之速度純量圖	105
圖 4-30	逆風情況下在 1 秒時之速度純量圖	105
圖 4-31	順風情況下在 0.2 秒時之濃度分佈圖	106
圖 4-31	順風情況下在 0.5 秒時之濃度分佈圖	106
圖 4-31	順風情況下在 0.7 秒時之濃度分佈圖	106

圖 4-31	順風情況下在 1 秒時之濃度分佈圖	106
圖 4-32	逆風情況下在 0.2 秒時之濃度分佈圖	107
圖 4-32	逆風情況下在 0.5 秒時之濃度分佈圖	107
圖 4-32	逆風情況下在 0.7 秒時之濃度分佈圖	107
圖 4-32	逆風情況下在 1 秒時之濃度分佈圖	107
圖 4-33	順風情況下之微小粒子受濃度污染情形 1	108
圖 4-33	順風情況下之微小粒子受濃度污染情形 2	108
圖 4-33	順風情況下之微小粒子受濃度污染情形 3	108
圖 4-33	順風情況下之微小粒子受濃度污染情形 4	108
圖 4-34	逆風情況下之微小粒子受濃度污染情形 1	109
圖 4-34	逆風情況下之微小粒子受濃度污染情形 2	109
圖 4-34	逆風情況下之微小粒子受濃度污染情形 3	109
圖 4-34	逆風情況下之微小粒子受濃度污染情形 4	109
圖 4-35	均勻流場中時間 1 秒之速度向量圖	112
圖 4-36	視覺化範圍	113
圖 4-37	視覺化範圍內空氣粒子的軌跡	114
圖 4-38	渦流發生地點	115
圖 4-39	以空氣粒子連續運動模擬氣流場	116
圖 4-40	密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子運動軌跡	117
圖 4-41	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子運動軌跡	117
圖 4-42	密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 1	119
圖 4-42	密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 2	119
圖 4-42	密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 3	119
圖 4-42	密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 4	119
圖 4-42	密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 5	120
圖 4-42	密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 6	120

圖 4-42	密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 7	120
圖 4-42	密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 8	120
圖 4-43	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 1	121
圖 4-43	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 2	121
圖 4-43	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 3	121
圖 4-43	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 4	121
圖 4-43	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 5	122
圖 4-43	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 6	122
圖 4-43	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 7	122
圖 4-43	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 8	122
圖 4-44	非均勻流場中時間 1 秒之速度向量圖	124
圖 4-45	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子在非均勻流場中的運動連續軌跡圖	125
圖 4-46	密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子在非均勻流場中的運動連續軌跡圖	125
圖 4-47	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 1	126
圖 4-47	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 2	126
圖 4-47	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 3	126
圖 4-47	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 4	126
圖 4-47	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 5	127
圖 4-47	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 6	127
圖 4-47	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 7	127
圖 4-47	密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 8	127
圖 4-48	密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 1	129
圖 4-48	密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 2	129
圖 4-48	密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 3	129
圖 4-48	密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 4	129
圖 4-48	密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 5	130

圖 4-48 密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 6	130
圖 4-48 密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 7	130
圖 4-48 密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形 8	130
圖 4-49 (一)均勻流場周圍速度分佈圖、(二)非均勻流場周圍速度分佈圖	131



符號表

A	排氣管面積	$[m^2]$
C_m	物質混合的質量分率濃度	
C'_m	紊流質量分率濃度濃度變化量	
$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$	紊流模式係數	
D_m	物質的濃度擴散係數	$[m^2/s]$
d_p	多孔性介質平均粒徑	$[m]$
$F_{m,j}$	物質於 x_j 方向的擴散通量	$[kg/m^2 \cdot s]$
k	紊流動能	
p	壓力	$[N/m^2]$
s_{ij}	動量來源(momentum source)	
t	時間	$[sec]$
u_i	x_i 方向的絕對速度	$[m/s]$
\tilde{u}_i	流體和座標系統的相對速度	$[m/s]$
u'	紊流正向應力	$[N/m^2]$
u	X 方向速度	$[m/s]$
v	Y 方向速度	$[m/s]$
x_i	卡式座標 ($i=1, 2, 3$)	
ρ	密度	$[kg/m^3]$
τ_{ij}	應力張量	
μ	黏滯係數	$[kg/ms]$
μ_t	紊流黏滯係數	$[kg/ms]$
ε	紊流消散率	

Γ_ϕ 擴散係數

s_ϕ 來源係數

上標說明

— 時均值

+

紊流無因次參數

n 新疊代之物理量選用

o 舊疊代之物理量選用

下標說明

i, j, k 張量使用之序號

ϕ 相關變數

其他符號

|| 絕對值、取向量純量值

∇ 求取各方向的梯度量，如同 grad

Σ 加總表示



第一章 緒論

自從美國的 AT&T 公司貝爾實驗室於 1947 年發明第一個半導體取代真空管至今，半導體產業幾乎已成為尖端科技的代名詞，同時也常被引用為國家經濟能力的指標，無論是國防、資訊、通信、消費性電子等工業，無不仰賴半導體製造技術的日新月異，故半導體列為重點發展科技項目，其製程設備市場及產值均以數量級的倍數成長，如表 1-1[1]所示。由於半導體的材料、尺寸及製程技術不斷的創新，競爭也愈來愈激烈，根據美國半導體協會(Semiconductor Industry Association, SIA)之最新規劃於未來 15 年半導體技術發展趨勢預估，至 2011 年時其最小線徑將由目前的 $0.25\mu\text{m}$ 降至 $0.05\mu\text{m}$ ，如表 1-2[2]所示。同時晶圓之直徑亦將由八吋擴大到十六吋，而每一代技術之生命週期約三年。因此，未來半導體將朝線寬縮小、晶圓尺寸增加、層數增加、速度加快、功能多樣化等方向發展，其競爭在製程技術以良率、週期時間為指標，在製程設備方面，則具備高技術、高複雜性、高可靠度、高潔淨度、產品生命週期短且變化快之特性。

西元 1965 年，在日本首先使用了高性能過濾器的無塵台，以增加製程環境的潔淨化，進而減少影響原件特性的障礙，從此，無塵室(clean room)的觀念就被積極的引入了半導體的製程之中 [3]。近年來，由於電子工業的快速發展，已使得原本依賴紡織與石化工等工業產品出國的我國，成為電子產品輸出的大宗，進而不斷地促成台灣經濟之發展，造就出傲人的成績，其中半導體工業即扮演非常重要的角色。但因為國際上所存在的競爭壓力，對我國的半導體工業而言，若要面對此些強力競爭對手，進一步的發展研究與改進就變得相當地急迫且需要了。在半導體中，由於涉及極為精密的製造過程，所以對作業環境品質的要求相當嚴苛，也因此高潔淨度的無塵室亦隨之孕育而生。對於無塵室的潔淨度，通常以每立方公尺所含的某種粒徑之粒子數(個/ ft^3)來區分等級，例如 $5.0\mu\text{m}$ class1、 $1.0\mu\text{m}$ class5 或 $0.5\mu\text{m}$ class10 等，而目前較高水準的超淨無塵室皆已達到了 $1.0\mu\text{m}$ class1 乃至於 $0.5\mu\text{m}$ class1 的地步 [3]。然而，因為進

表 1-1 全球半導體市場規模預測

研究機構 \ 年度	1998	1999	2000	2001	2002	2003
WSTS	126	134	163	211	276	290
IC Insights	126	140	173	226	251	264

單位：美金十億元



表 1-2 SIA 對半導體技術在最小線徑及記憶體的趋势預估

年度	1997	1999	2002	2005	2008	2011	2014
最小線徑 (μm)	0.25	0.18	0.13	0.1	0.07	0.05	0.035
記憶體儲 存量	256M	1G	4G	16G	64G	256G	1T



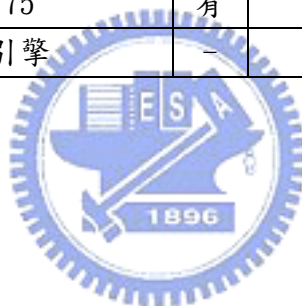
入無塵室內的氣體皆已經過濾網的過濾，所以無塵室中主要的塵粒來源並非從外界吸入的空氣而是在室內中所自行產生的。

空氣中的浮游粒子、粉塵等污染物對半導體製品之品質、可靠度及良率高低有極大的影響，因此，半導體製程對作業環境品質的要求極為嚴苛，為了避免污染物的傷害，必須控制產品所接觸之空氣的潔淨度及溫、溼度，使其在一個高潔淨度、穩定且控制良好的環境中生產、製造。在這樣的背景需求下，無塵潔淨室的理念被積極的引入半導體製程中，且隨著半導體 IC 線徑微細化與集積度增加的趨勢，潔淨室的潔淨度等級必須隨著提升。潔淨室的應用愈來愈普及，除了半導體廠、封裝測試廠、光電產業的使用外，在精密機械元件之製造加工、高級產品之噴漆電鍍、生物、食品、醫藥等科技的發展上，也扮演著不可或缺的角色。為了保持潔淨室的潔淨度，進入潔淨室的氣流均須經過高精密過濾裝置的除塵，致使機器運轉、工作人員的活動及製程本身之發塵成為潔淨室的主要粒子污染源。一般而言，大部分的污染物均能被潔淨室之氣流所排除，但因工作人員的移動誘起的擴散作用，使一些粒子可能懸浮在迴流區域或沈積在產品設備上，難以被氣流排除。因此，如何模擬工作人員在潔淨室內移動衍生氣流運動成為目前重要的課題。無塵室天車屬於移動物體，而移動物體的位置會隨著時間改變，在計算上採用紊流模式解暫態不可壓縮流之控制方程式組，較以往研究不同的是，為了能更接近實際物理現象，因此在數值計算上應用移動網格模式(Moving Meshes)以模擬實際現象。

此外，政府對於日常生活中汽車排放廢氣的污染也是相當重視，汽車排放之廢氣有 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 HC 、 NO 、 NO_2 、 Pb 、 SO_x 及游離碳(黑煙)等等，其中對路人影響對大者為 CO 、煙塵及 NO_x 。汽車排放之 CO 會與血液中之血紅素結合成 $[CoHb]$ ，以致降低血液溶氧能力，影響路人之健康，故汽車 CO 排放量之限制，各國配合其國情而有不同之規定。依據 PIARC-1911 年版之資料，各國小汽車限制之 CO 基本排量(在 60Km/hr 之平均車速)如表 1-3[4]所示，至於採用

表 1-3 小汽車之 CO 基本排放量(PIARC)

法規	控制	CO 基本排放量 $m^3/hr - pc$
無法規管制	無	1-1.5
EEC R 15/04	無	0.7
EEC R 15/04	有	0.5
EEC 89/458	有	0.16
FTP 75	有	0.12
柴油引擎	-	0.08



柴油之大卡車或大客車之廢氣因燃燒較為完全，故排出 CO 之量較小，一般以表 1-3[4]所列值估算即可。汽車排放廢氣之擴散情形是利用數值計算結果，藉由後處理軟體來製作成濃度擴散情形之動畫。

物體與流體間交互作用的流場，基本上可分為兩大類。第一類為流體經過固定不動的物體，或物體在靜止的流體中運動，如：風吹過停止不動的車輛、飛彈在風動中測試、圓柱在靜止流體中運動等。這一類的工程問題目前在數值模擬與實驗測量上所得到的結果相當吻合。第二類為物體在流動地流體中運動，如：人在逆風中行進、行進中的車輛受風吹襲、流體機械的運轉、無塵室中工作人員或機器的運動、引擎活塞的反覆運動等，物體在流動的流體中運動時，物體與流體交互作用所誘導的流場變化是屬於動態的移動邊界問題(moving boundary problem)，這類問題在工程與工業應用上極為廣泛，但運動機制較為複雜，解析不易。

在過去，研究上述第二類問題時，大部分均採用相對速度的概念，假設物體靜止不動，流體以某一相對速度流經物體，再以數值方法解析；或者是採用隨運動中的物體移動而移動的非慣性參考座標，再以數值方法模擬這類問題。然而，當物體在流動流體中運動時，會有物體擠壓流體和流體填補因物體移動所產生的空洞之物理現象。因此，在以數值方法模擬這類問題時，流場變化機制無法以上述方法詳實的表現出來。而採用實驗量測時，則因這類動態移動邊界問題運動機制複雜，實驗設計不易，設備費用高，且有安全的考量，實驗目的不易達成。

而為了使工作人員能夠充分明白物體移動時流場的變化情形，必須將模擬計算的結果，利用視覺化技術將資料動態地顯示出來，為了達到這個目的必須藉助於流場可視化技術。一般的流場可視化多採用實驗的方式。林[5]，以雷射光頁煙霧流場可視化技術探討吹吸式氣罩在開放式化學槽污染源於不同吹氣與吸氣範圍內的流場模態時的捕集效果。放煙法是 Raspet 與 Moore 於 1950 年代發展出來的，最早應用在觀測邊界層的速度分佈。之後歷經許多的改進與發展，目前放煙線的技術已非常成熟。王[6]、Igarashi[7]、Gau[8]皆利用放煙法觀測流場。

楊[9]使用 CPIV 法進行流場可視化之研究，係利用雷射光及多彩聲光調變器

(PCAOM) 將雷射光束區分為藍綠兩光束形成二維雷射光頁，再利用彩色數位相機 (Color CCD) 之技術所組合成。在流體中加入與水相近密度之顯影塑膠顆粒 (1.1 g/cm^3)，在藍綠相間隔之雷射光頁下顯影其流場變化，並擷取流場變化之數位影像。再將所擷取之數位影像訊號，進行數位相關法分析求得位移量，再除以曝光時間間距而得知速度值。

經由實驗來觀測流場，往往在購置儀器與架設儀器上需要耗費大量的時間與費用，而且經由實驗所獲得的流場其再現性也太低，於是將計算流體力學與流場可視化結合的技術漸漸的受到重視。此種技術是將經過數值計算所計算出來的流場數據，經過後處理軟體整合之後，以簡單易懂的圖形或影片呈現出來，經由這個技術可以直接並且有效的模擬流場，不需再藉由實驗，因此降低了流場可視化所需的成本，其所獲得的流場再現性也相當的高。Roth and Peikert[10]利用將 CFD 數據可視化的方法，應用於在設計渦輪機過程中，尋找渦流發生的地點，以有效提高渦輪機的效率。Hans 等人[11]利用 computational flow imaging (CFI) 技術對位於超音速流場的機翼做流場的可視化，並且將其結果與實驗做比較。但是以上的文獻多侷限於靜態的流場可視化，有關於動態流場可視化的極少有文獻提及。

王[12]利用後處理方法模擬靜態物體在流場中之可視化，包括二部份：(1) 粉塵粒子飛行軌跡的可視化，此部份是為了能清楚模擬局部排氣的風動情形和粉塵粒子於該流場之運動情形，(2) 流場中有毒氣體之擴散情形，於數值計算求出流場之速度、有毒氣體之濃度分佈後，將數值計算的結果藉由後處理軟體，建立有毒氣體於流場中擴散的動畫，主要為描述流場中有毒氣體濃度擴散的情形。

因為目前研究移動物體之可視化很少且大自然界中有很多屬於移動物體在流場中移動，本文目的以移動物體在流場中移動所造成的流場變化之可視化來做研究，把數值計算的結果，轉換成動態流場的方式表現。藉由此種方式，可使流場的流動型態充分表現，讓人以眼見為憑的方式，充分理解流場變化。

在數值計算方面，以數值的方式配合數值模擬軟體 STAR-CD，以 $k-\varepsilon$ 紊流模式分析以及有限體積法 (Finite-volume) 疊代，求解動量與能量方程式。

流場可視化方面，以數值計算的結果藉由後處理軟體建立於流場中，將所擷取到的影像以影像編輯軟體做更進一步的編輯並製作成動畫，從動畫中了解移動物體於流場之運動情形。動畫製作方法分為兩部份：

第一部分為粒子移動軌跡之可視化，常見的流動型態有兩大類，一種為微小粒子在流動流體中之流動型態，對於粒子在流場中的運動描述一般可分為兩種，一為粒子運動軌跡的描述，另一為粒子濃度場之描述。就粒子運動軌跡研究而言，Ermak 與 Buckholz[13]將粒子運動所受的重力、布朗力與流體之牽引力均加入運動方程式中，而在傅等[14]所做的研究當中，即結合了氣流與布朗力之影響，並發現粒子所受流體牽引力遠大於布朗力影響。至於布朗力與重力對粒子運動的影響可從表 1-4[15]看出，當粒子直徑介於 $0.1\ \mu\text{m}$ 與 $1.0\ \mu\text{m}$ 時，布朗力與重力的影響同樣重要，但是當粒子直徑大於 $1.0\ \mu\text{m}$ 時，重力的影響遠大於布朗力的影響，反之，當粒子直徑小於 $0.1\ \mu\text{m}$ 後，布朗立即為影響粒子運動的重要因素。本文中對於粒子 ($1.0\ \mu\text{m}$) 的分析，採用粒子運動軌跡的描述，並且僅考慮重力的影響。另一種流動型態則為單純流體流動型態，其中包含他種氣體隨流體流動時之擴散現象。

在數值計算求出粒子移動軌跡和流場之速度分佈後，於後處理軟體中各個格點上放置空氣粒子，使每個空氣粒子隨著速度不同而產生不同顏色的流線，在此過程中以影像擷取軟體，擷取每個空氣粒子的移動過程，並在同一時間擷取移動物體於流場之運動情形，將所擷取到的影像以影像編輯軟體做更進一步的編輯，此部份是為了能清楚模擬無塵室天車和粒子於無塵室中流場之運動情形。

第二部份為汽車排放有毒氣體之濃度擴散情形，於數值計算求出流場之速度、有毒氣體之濃度分佈後，將數值計算的結果藉由後處理軟體使每個空氣粒子隨著濃度不同而產生不同顏色的流線，並擷取每個時間汽車排放有毒氣體之濃度擴散情形製作成動畫，此部分可以從動畫中了解汽車在不同速度下有毒氣體的擴

表 1-4 布朗力與重力對粒子運動的影響

Particle Diameter (μm)	rms Brownian Motion in 1 sec, χ_{BM} (cm)	Settling in 1 sec, χ_{grav} (cm)	$\frac{\chi_{\text{BM}}}{\chi_{\text{grav}}}$
0.00037 ^a	6.0×10^{-1}	2.4×10^{-7}	2.5×10^6
0.01	2.6×10^{-2}	6.6×10^{-6}	3.9×10^3
0.1	3.0×10^{-3}	8.6×10^{-5}	3.5×10^1
1.0	5.9×10^{-4}	3.5×10^{-3}	1.7×10^{-1}
10.0	1.7×10^{-4}	3.0×10^{-1}	5.7×10^{-4}

^aDiameter of an "air molecule"



散情形。

由以上可知，使用計算流體力學與流場可視化結合的技術可以更有效、清楚地呈現流場的結構，因此本文使用此法做為流場可視化的方法，並且將流場的可視化製作成易懂的影片。



第二章 物理模式

2-1 物理模式

本文物理模式分為三部分，分別如圖 2-1、2-2、2-3、2-4、2-5、2-6、2-7、2-8、2-9、2-10、2-11、2-12 所示。

圖 2-1 主要分析移動物體在二維流場中的流場變化情形。圖 2-1 中流場之長度和寬度分別為 9m 和 2.5m，移動物體之長度和寬度分別為 2m 和 0.5m。本文計算物體移動之距離為 0.3m，此物理模式圖單位以公尺(m)表示。流場的四周為壓力邊界。此部分將模擬移動物體和物體固定不動時以相對速度來表示，並將動畫同時播放。

圖 2-2 是模擬汽車在 15m/s、30m/s 行進中排放廢氣所造成的污染情形，汽車的長寬分別為 4m 和 1.6m，汽車排氣速度分別為 6m/s、7.5m/s，排氣管離地面高度為 0.3m。

排氣管排氣速度之計算公式：

$$\text{排氣管排氣速度} = \text{車子排氣量} \times \text{行進時轉速} \div \text{排氣管面積} \div 2 \quad (2-1)$$

車子排氣量：3000cc

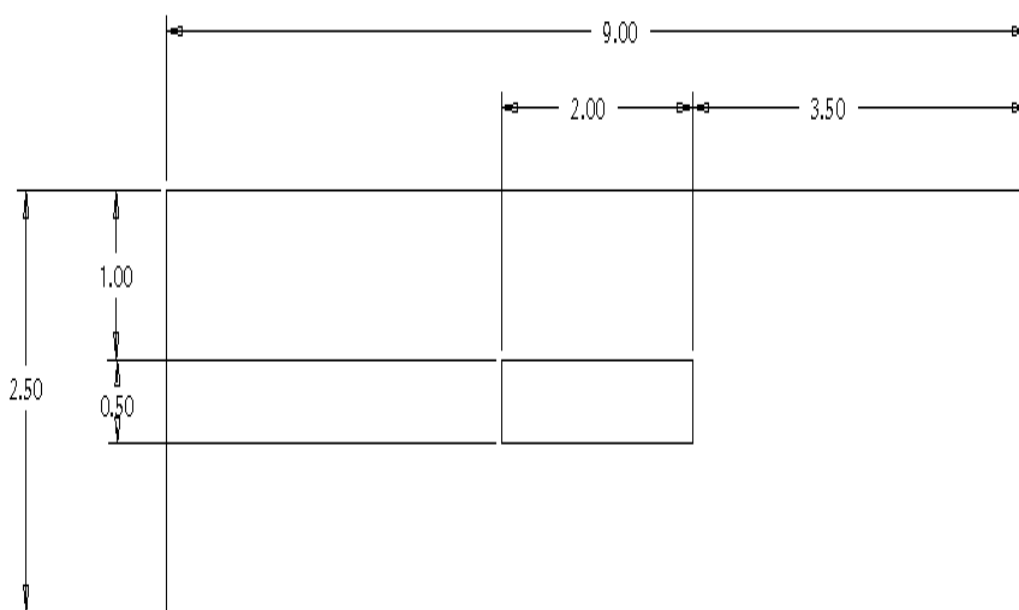
行進時轉速：15m/s 轉速為 2400rpm，30m/s 轉速為 3000rpm

排氣管面積：100cm²

排氣管離地面高度為 0.3m，流場的長寬分別為 70m 和 16m，移動時間分別為 1 秒和 2 秒。

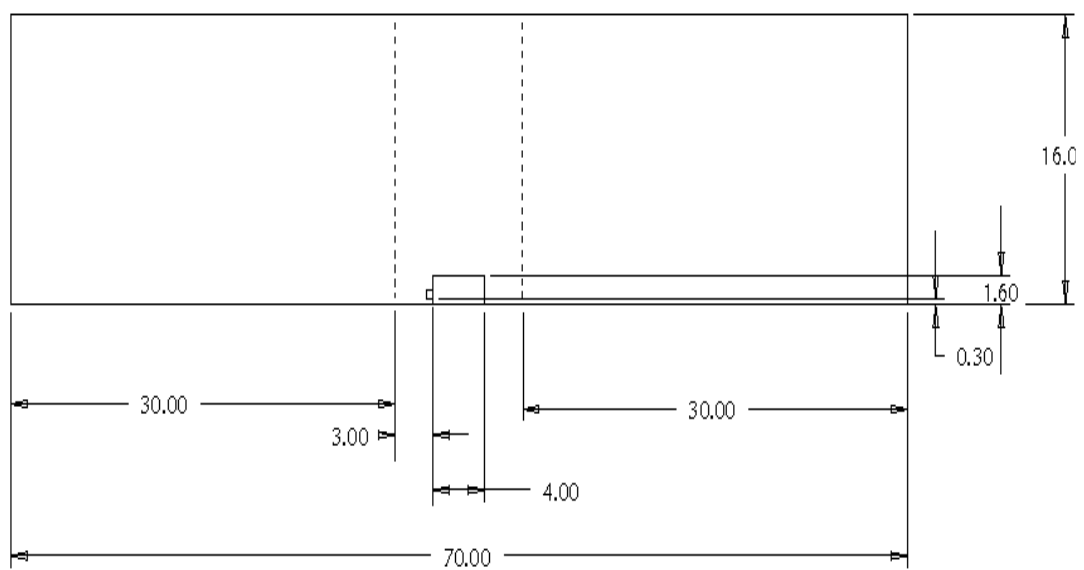
圖 2-3 是模擬汽車陣列於行進中排放廢氣所造成的污染情形，汽車速度以 15m/s 前進，排氣速度為 6m/s，流場的長寬分別為 79m 和 16m，兩台汽車的距離為 8m，移動時間為 2 秒，此部分汽車移動的距離為 30m。

圖 2-4 模擬汽車在靜止時排放廢氣所造成的污染程度，汽車排氣速度為 10m/s，排氣管離地面高度為 0.3m，流場的長寬分別為 70m 和 16m，物理模式圖單位以公尺(m)表示。流場的左方、右方、上方為壓力邊界。



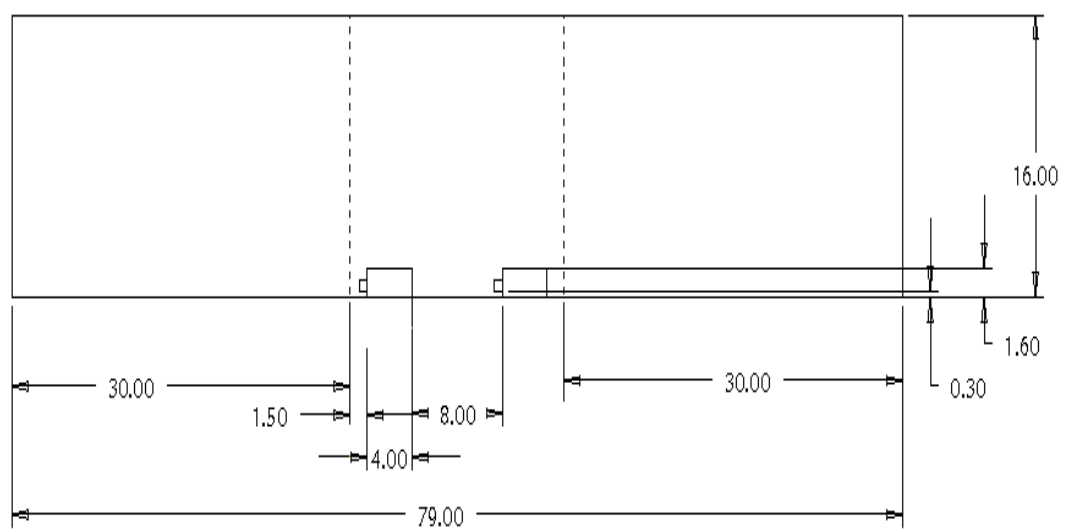
單位：m

圖 2-1 移動物體於流場中移動之物理模式圖



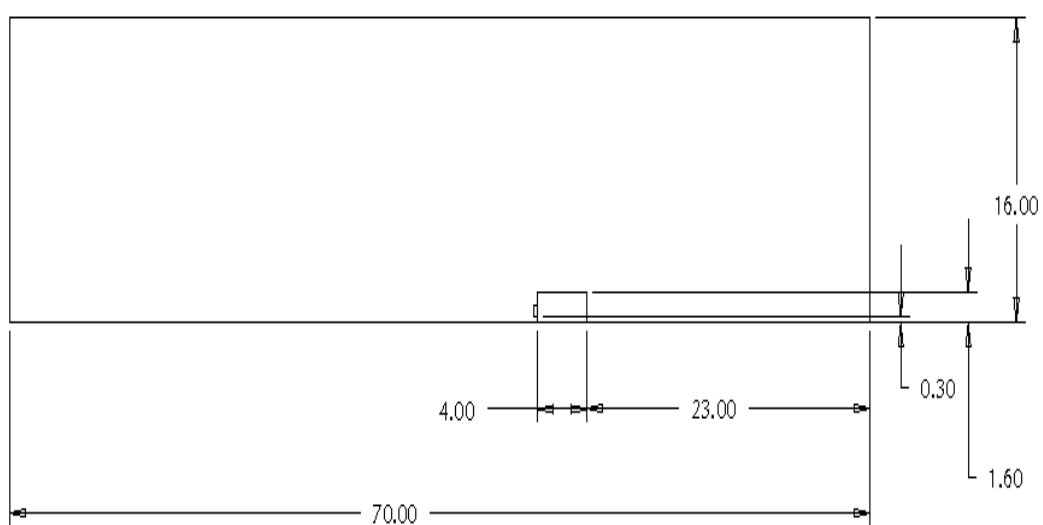
單位：m

圖 2-2 汽車排放廢氣之物理模式圖



單位：m

圖 2-3 汽車陣列排放廢氣之物理模式圖



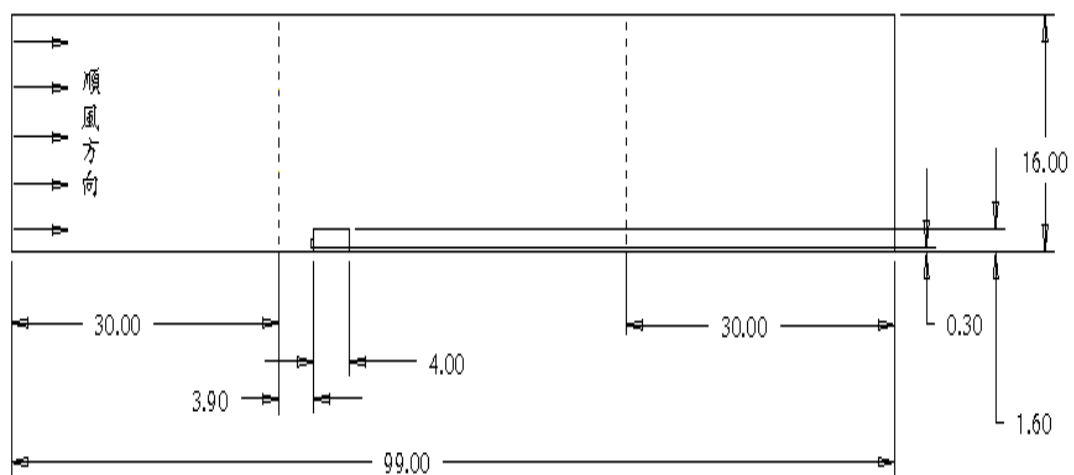
單位 m

圖 2-4 汽車固定不動排放廢氣之物理模式圖

圖 2-5、2-6 是模擬汽車在順風和逆風情況下，汽車排放廢氣的汙染情形，此物理模式中流場的長寬為 99m 和 16m，汽車車速為 30m/s，排氣管速度為 7.5m/s，排氣管離地面高度為 0.3m，移動時間為 1 秒，順、逆風速度為 10m/s。物理模式圖單位以公尺(m)表示，流場的上方、下方設為壁面。

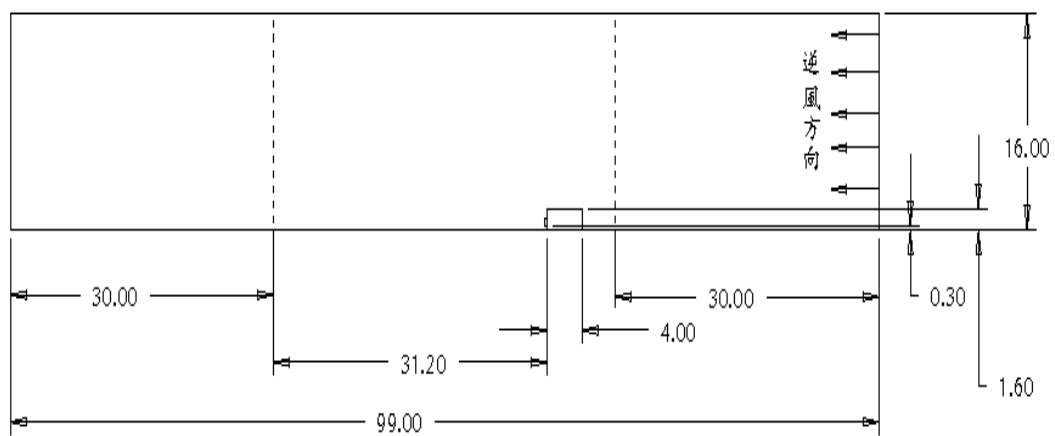
圖 2-7 是模擬無塵室工作台車在無塵室中移動的流場變化，並放置粒子來探討是否會停留在工作台車上，此部分模擬無塵室中以每秒 0.4m/s 之均勻流和非均勻流將風往下吹的方式進行模擬，分別為圖 2-8 和 2-9 所示，均勻流的部份模擬密度為 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，非均勻流的部份模擬密度為 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $10\text{kg}/\text{m}^3$ ，粒子直徑皆為 10^{-6}m ，工作台車移動速度為 3.5m/s，粒子放置的在工作台車上方 30cm、60cm、90cm 的高度上，如圖 2-10 所示。工作台車長寬尺寸分別為 0.3m 和 0.1m，流場長度和寬度分別為 14.9m 和 4.7m，物體移動距離為 7m，移動時間為 2 秒，此物理模式圖單位以公尺(m)表示。流場的左方、右方、下方為壓力邊界。





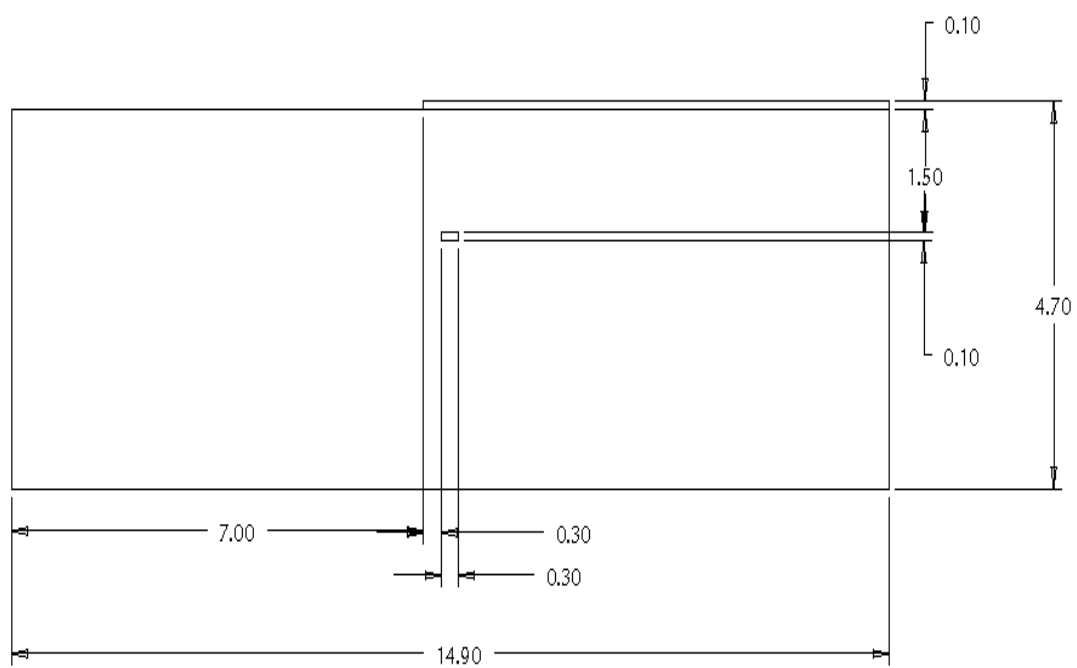
單位 m

圖 2-5 汽車在順風情況下之物理模式圖



單位 m

圖 2-6 汽車在逆風情況下之物理模式圖



單位：m

圖 2-7 無塵室工作台車物理模式圖

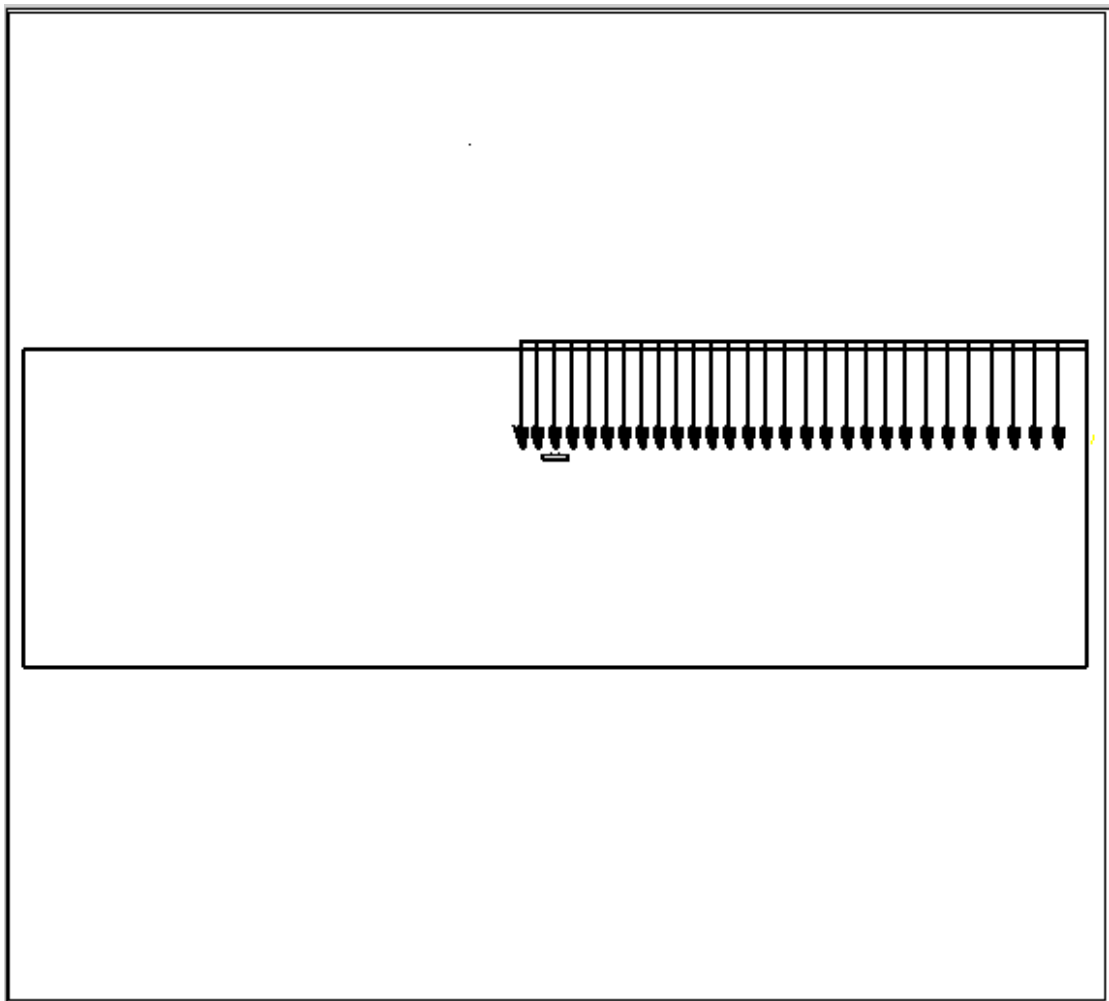


圖 2-8 無塵室中均勻流物理模式圖

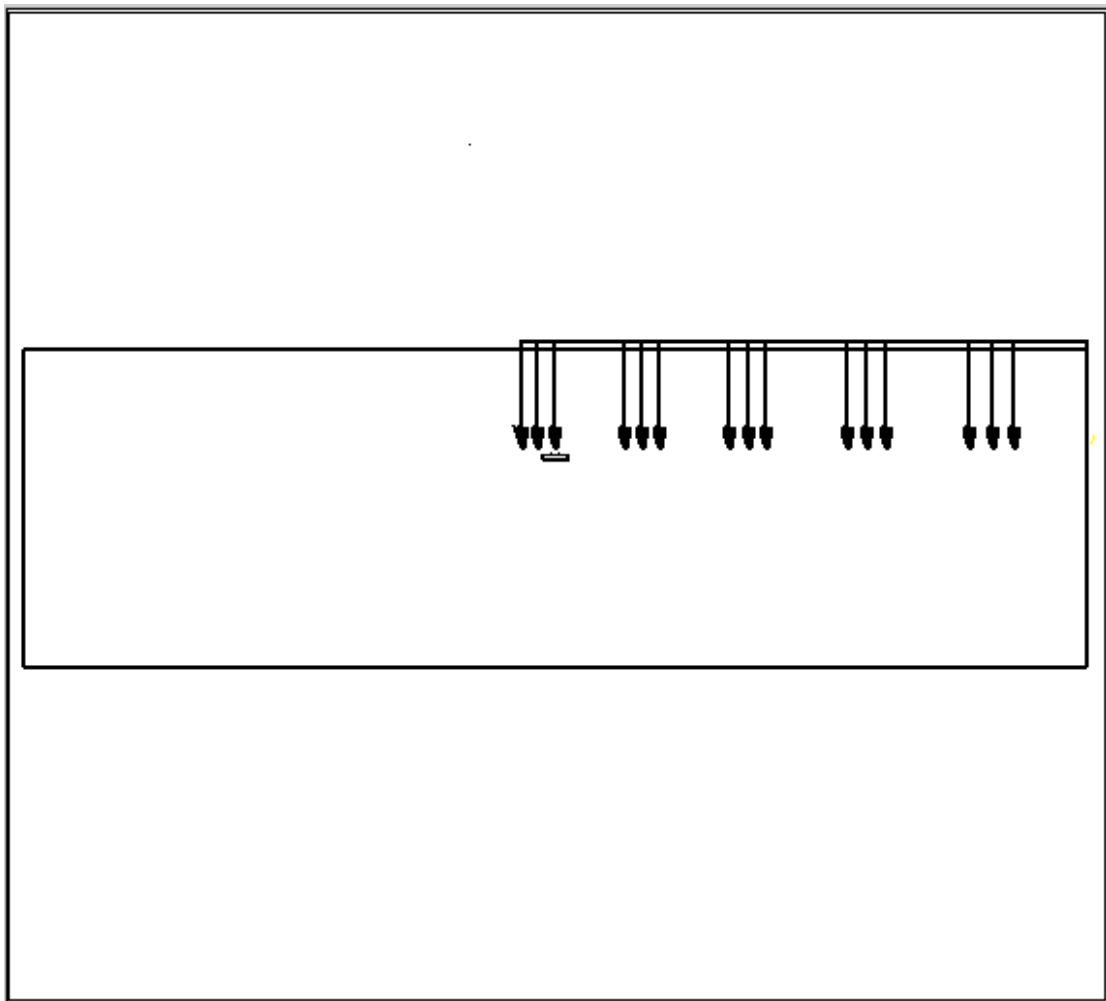


圖 2-9 無塵室中非均勻流物理模式圖

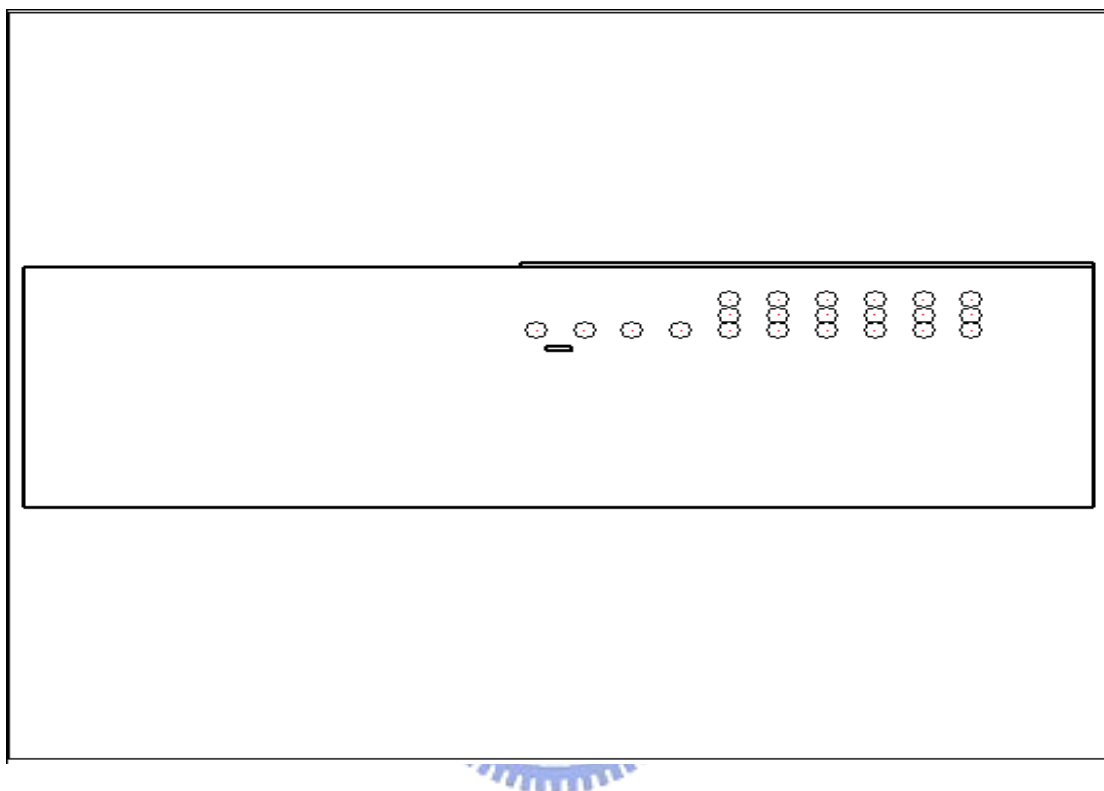


圖 2-10 無塵室中粒子位置分佈圖

2-2 流場速度之計算

本文選擇以 $k-\varepsilon$ 紊流模式來模擬流場。為簡化分析，流場作如下假設：

1. 流場為二維不可壓縮暫態流場。
2. 流體為牛頓流體，密度為定值。
3. 不考慮溫度變化，亦不考慮因黏滯性生成熱量問題。
4. 壁面為絕熱、不可滑移 (No slip) 條件。

流場的統御方程式：

連續方程式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j) = 0 \quad (2-2)$$

動量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (2-3)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j} \quad (2-4)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-5)$$

其中：

t ：時間

x_i ：卡式座標 ($i=1, 2, 3$)

u_i ：流體在 x_i 方向的絕對速度

\tilde{u}_i ：流體與座標系統的相對速度

p ：全壓力值，由 $p = p_s - \rho_0 g_m x_m$ 計算得到，其中 p_s 為靜壓力， ρ_0 為參考密度， g_m 為重力場， x_m 為座標值

ρ ：密度

τ_{ij} ：應力張量

s_i :動量來源(momentum source)

紊流動能方程式 (k-equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \tilde{u}_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \mu_t P - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2-6)$$

其中：

$$P \equiv 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2-7)$$

σ_k 為經驗值。

紊流動量消耗方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \tilde{u}_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2-8)$$

其中 σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 4}$ 為經驗值各係數值如表 2-1 所示。

濃度擴散方程式

$$\rho \frac{\partial C_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j C_m - F_{m,j}) = 0 \quad (2-9)$$

其中式(2-9)：

$$C_m = \frac{m_m}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \text{ 代表某物質於混合成分的質量分率}$$

$$F_{m,j} = \rho D_m \frac{\partial C_m}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' C_m'} \quad (2-10)$$

以及遵守 $\sum_m C_m = 1$, 而 C_m' 代表紊流濃度變化量(concentration fluctuation)

表 2-1 標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式係數值

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 4}$
0.09	1.0	1.22	1.44	1.92	-0.33

* $C_{\varepsilon 3}=1.44$ for $p_B > 0$ and is zero otherwise



邊界條件：

1. 入口

$$U=0, V=V_{in}, W=0$$

$$\text{紊流強度 } I=0.01$$

$$\text{mixing length } l=0.001m$$

2. 壁面

壁面設為無滑移邊界 (no slip condition)。

$$U=0, V=0, W=0$$

一般而言固體邊界適用於無法移動的邊界設定，如天花板、牆面、地板、阻礙物的接觸面，均可以使用此設定。

$$u=0, v=0, w=0 \quad [m/s]$$

k 與 ε 則採用 near-wall model 處理

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & , \quad y^+ \leq y_m^+ \\ \frac{1}{k} \ln(Ey^+) & , \quad y^+ \geq y_m^+ \end{cases} \quad (2-11)$$

其中式 (2-11) 中

$$u^+ : (u - u_w) / u_\tau$$

u : 流體切線速度

u_w : 壁面速度

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

τ_w : 壁面剪應力

$$y^+ = \frac{\rho c_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu}$$

k : 為經驗係數，0.42

E : 為經驗係數，9.0

而 y_m^+ 滿足右列方程式

$$y_m^+ - \frac{1}{k} \ln(Ey_m^+) = 0 \quad (2-12)$$

3. 壓力邊界：

壓力邊界的設定為大氣壓力。

$$P=0, \quad \frac{\partial k}{\partial n}=0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial n}=0$$

4. 濃度發生源：

$$C'_{CO}|_{wall}=1$$

本文於汽車排氣管之出口處設定為濃度的發散源、

設定之發生濃度污染物為 CO，選定的原因是在於一般實驗測試有害氣體時為了便於追蹤，往往會使用具有指標作用的氣體。而 CO 各項性質整理如表 2-2 所示。本數值計算的工作流體為空氣，而其性質如表 2-3 所示。



表 2-2 CO 之相關性質設定

係數	對應值	單位
分子量(molecular weight)	28.011	$Kg / Kmol$
密度(Density)	1.1453	Kg / m^3
比熱(Specific heat)	1041.26	$J / kg \cdot K$
分子黏滯係數(Molecular Viscosity)	$1.79 \cdot 10^{-5}$	$kg / m \cdot s$
熱傳導率(conductivity)	0.024975	$W / m \cdot K$
生成熱(Heat of Formation)	$-3.946 \cdot 10^6$	J / kg
生成溫度(Temp of Formation)	298.15	K
相對於空氣之擴散係數(Diffusivity)	$3.004 \cdot 10^{-5}$	m^2 / s
Schmidt number	0.9	

表 2-3 工作流體(空氣, Air) 相關性質表

係數	對應值	單位
密度(Density)	1.205	Kg/m ³
分子黏滯係數(Molecular Viscosity)	1.81*10 ⁻⁵	Kg/ms



2-3 粒子運動統御方程式

微小粒子的運動極為繁雜，為簡化起見，以下基本假設視為成立：

1. 工作流體為牛頓流體，流場不因粒子加入而改變。
2. 粒子為球型剛體，運動時相互間無碰撞及合併發生。
3. 不考慮溫度及濃度的影響。

基於上述假設，粒子的運動方程式可以下列描述：

動量方程式：

$$m_d \frac{d\vec{u}_d}{dt} = \vec{F}_{dr} + \vec{F}_p + \vec{F}_{am} + \vec{F}_b \quad (2-13)$$

其中 \vec{F}_{dr} 為 drag force

$$\vec{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho A_d \left| \vec{u} - \vec{u}_d \right| (\vec{u} - \vec{u}_d) \quad (2-14)$$

且 A_d 為粒子 cross-sectional area

$$C_d = \begin{cases} 24(1 + 0.15 \text{Re}_d^{0.687}) / \text{Re}_d, & \text{Re}_d \leq 10^3 \\ 0.04, & \text{Re}_d > 10^3 \end{cases} \quad (2-15)$$

$$\text{Re}_d \equiv \frac{\rho \left| \vec{u}_d - \vec{u} \right| D_d}{\mu} \quad (2-16)$$

\vec{F}_p 為壓力

$$\vec{F}_p = -V_d \nabla p \quad (2-17)$$

V_d 為粒子體積

∇p 為壓力梯度

\vec{F}_{am} 為吸收粒子動量所改變的力

$$\vec{F}_{am} = -C_{am} \rho V_d \frac{d(\vec{u}_d - \vec{u})}{dt} \quad (2-18)$$

$C_{am} = 0.5$ 稱為 virtual mass coefficient

\vec{F}_b 為 general body force

$$\vec{F}_b = m_d[\vec{g}]$$

(2-19)



第三章 數值方法

3-1 數值方法

本文利用數值方法，求解移動物體其周圍流場的變化，此數值方法乃是應用流體力學輔助軟體 STAR-CD 計算，紊流流場 $k-\varepsilon$ 模式及不可壓縮流模式，解二維暫態 Navier-Stokes equations，並利用有限容積法(finite-volume)以及 PISO 演算法來計算整個流場，物理變數定義於每個控制容積中心做積分而求得，如圖 3-1 所示，計算過程流程圖示於圖 3-2。

有限體積法的守恆方程式(conservation equations)可表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\vec{u}_r\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) = s_\phi \quad (3-1)$$

其中 $\vec{u}_r = \vec{u} - \vec{u}_c$ 為流體速度 \vec{u} 與局部速度 \vec{u}_c 之相對速度， ϕ 為任意相關變數， Γ_ϕ 和 s_ϕ 分別為擴散係數(diffusion)和來源係數(source)。

將(3-1)式積分後可得：

$$\frac{d}{dt} \int_{V_p} \rho\phi dV + \sum_j \int_{S_j} (\rho\vec{u}_r\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) \cdot d\vec{S} = \int_V s_\phi dV \quad (3-2)$$

T_1

T_2

T_3

根據 (3-2) 式，對各項作離散：

1. 擴散項(diffusion terms)

$$T_2 \approx \sum_j (\rho\vec{u}_r\phi \cdot \vec{S})_j - \sum_j (\Gamma_\phi \overline{\text{grad}\phi} \cdot \vec{S})_j \equiv \sum_j C_j - \sum_j D_j \quad (3-3)$$

擴散項用中點近似法可下列來表示：

$$D_j \approx \Gamma_{\phi,j} \left[f_j^l (\phi_N - \phi_P) + \left\{ \overline{\text{grad}\phi} \cdot \vec{S} - f_j^l \overline{\text{grad}\phi} \cdot \vec{d}_{PN} \right\}_j \right] \quad (3-4)$$

其中 f_j 為幾何因子， \vec{d}_{PN} 為 P 到 N 之向量， $\Gamma_{\phi,j}$ 為面擴散係數。

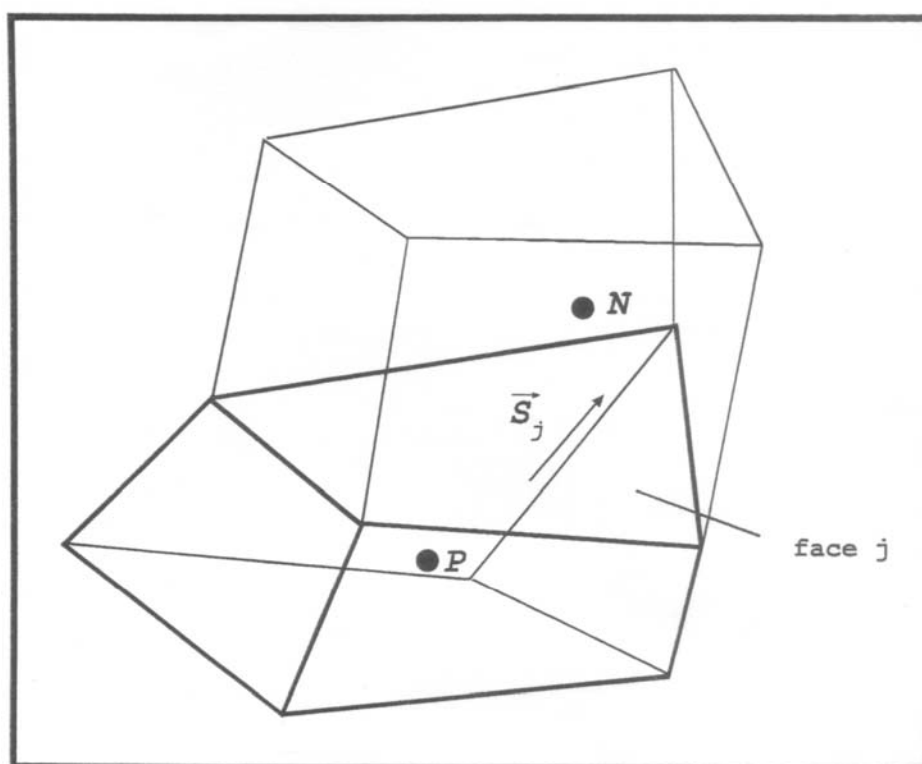


圖 3-1 相鄰網格中心點及離散面相關位置示意圖

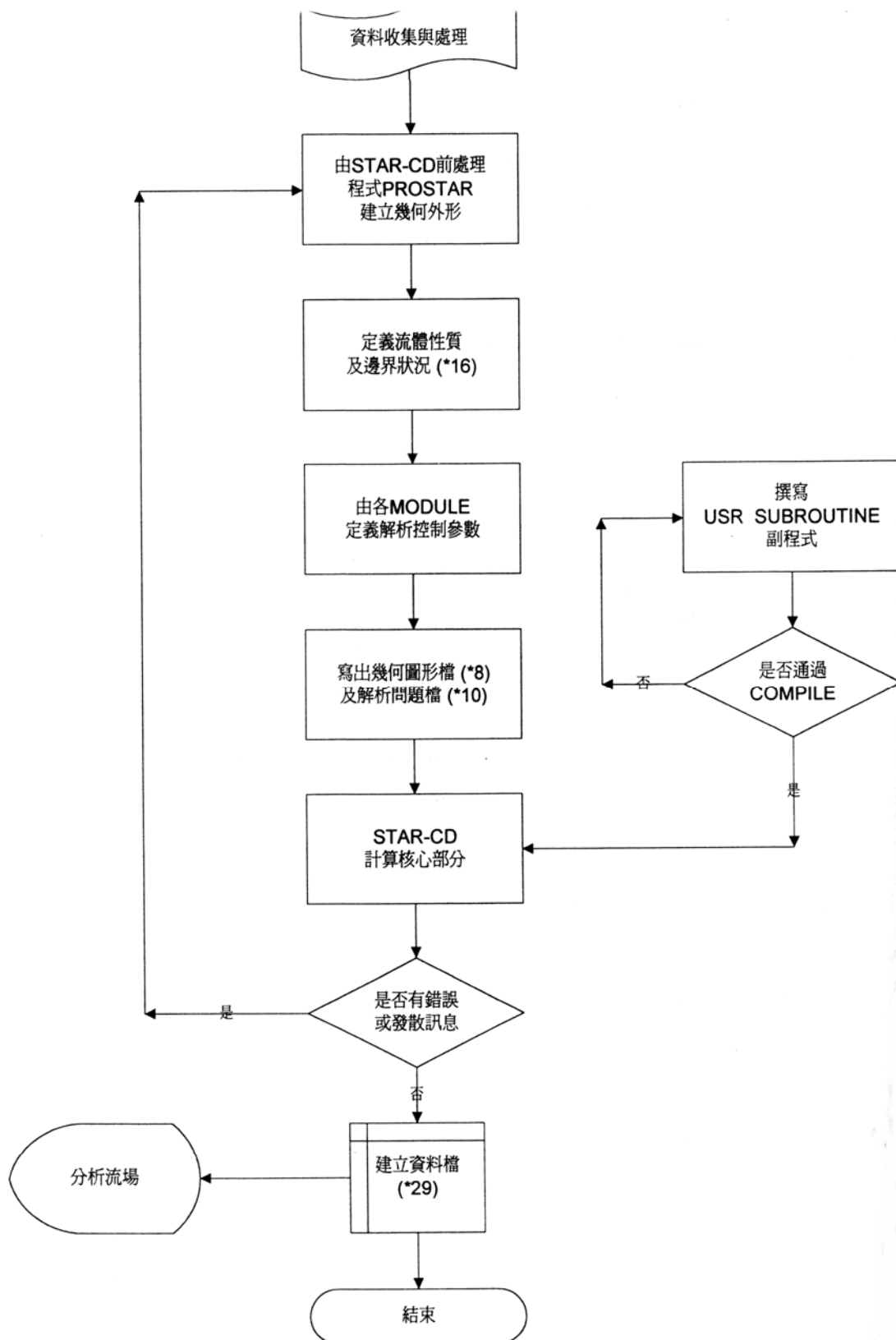


圖 3-2 計算流程圖

2. 來源項(source term)

$$T_3 \approx s_1 - s_2 \phi_p \quad (3-5)$$

3. 對流項

對流項以 Upwind Differencing Scheme 處理，根據(3-3)式的推導，對流項可由下列表示：

$$C_j^{UD} \equiv F_j \begin{cases} \phi_p & , F_j \geq 0 \\ \phi_{N+} & , F_j < 0 \end{cases} \quad (3-6)$$

其中

$$F_j \equiv (\rho \vec{u}_r \cdot \vec{S})_j \quad (3-7)$$

F_j 為通過面 j 和 ϕ_j 的質通量如圖 3-3 所示，輔助值 ρ 和 Γ 由線性內插得到。

綜合上述，(3-2)式可表示為：

$$\frac{(\rho V)^n - (\rho V)^0}{\delta t} + \sum F_j = 0 \quad (3-8)$$

或

$$A_p \phi_p^n = \sum_m A_m \phi_m^n + s_1 + B_p \phi_p^o \quad (3-9)$$

和

$$A_p \equiv \sum_m A_m + s_2 + B_p \quad (3-10)$$

其中

1. A_m 為對流或擴散的影響。

2. 計算通量為所有相鄰點的總和。

3. $B_p \equiv (\rho V)^o / \delta t$

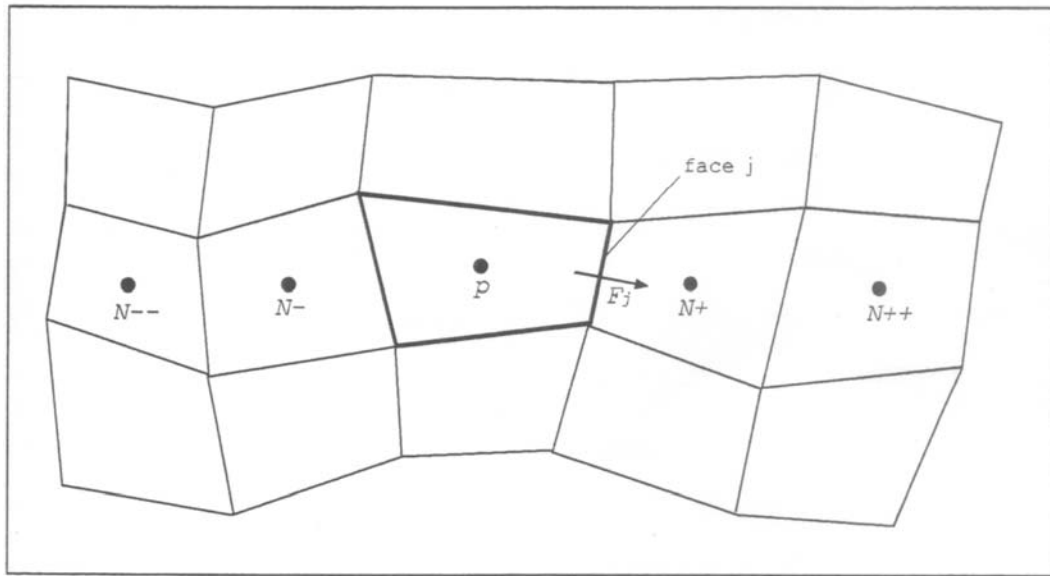


圖 3-3 對流通量示意圖

3-2 PISO 數值計算

1. 基本方程式：

(1) 有限容積動量方程式：

$$A_p u_{i,p}^n = H(u_{i,m}^n) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_1 + D_p (P_{N+}^n - P_{N-}^n) \quad (3-11)$$

其中

$$H(u_{i,m}) \equiv \sum_m A_m u_{i,m} \quad (3-12)$$

而 $D_p (P_{N+}^n - P_{N-}^n)$ 近似於有限容積法的壓力梯度 $\partial p / \partial x_i$ ， D_p 為幾何係數，如圖 3-4。

(2) 有限容積連續方程式：

$$B_p^n - B_p^0 + \sum_j (\rho^n u_j^n S_j) = 0 \quad (3-13)$$

u_j 為格點單位面積 S_j 的正向速度

為了計算質通量(mass flux)以及推導壓力方程式，方程式改用點表示法，由(3-11)式可推導出：

$$\overline{A_p u_j^n} = \overline{H(u_{i,m}^n)} + \overline{B_p^0 u_{i,p}^0} + \overline{s_1} + \overline{D_p} (P_{N+}^n - P_{N-}^n) \quad (3-14)$$

將(3-14)式代入(3-13)式可推導出壓力方程式：

$$A_p P_p^n = \sum_m A_m P_m^n + s_1 \quad (3-15)$$

其中 s_1 為來源項(source term)，為點速度 u_i^n 和 u_i^0 的函數。

2. 解析過程：

(1) 預測計算階段(predictor term)：

$$A_p u_{i,p}^{(1)} = H(u_{i,m}^{(1)}) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_1 + D_p (P_{N+}^{(0)} - P_{N-}^{(0)}) \quad (3-16)$$

其中 $P^{(0)}$ 為剛開始計算時的壓力值，初步暫時解 $u_j^{(1)}$ 可由方程式(3-14)得到。

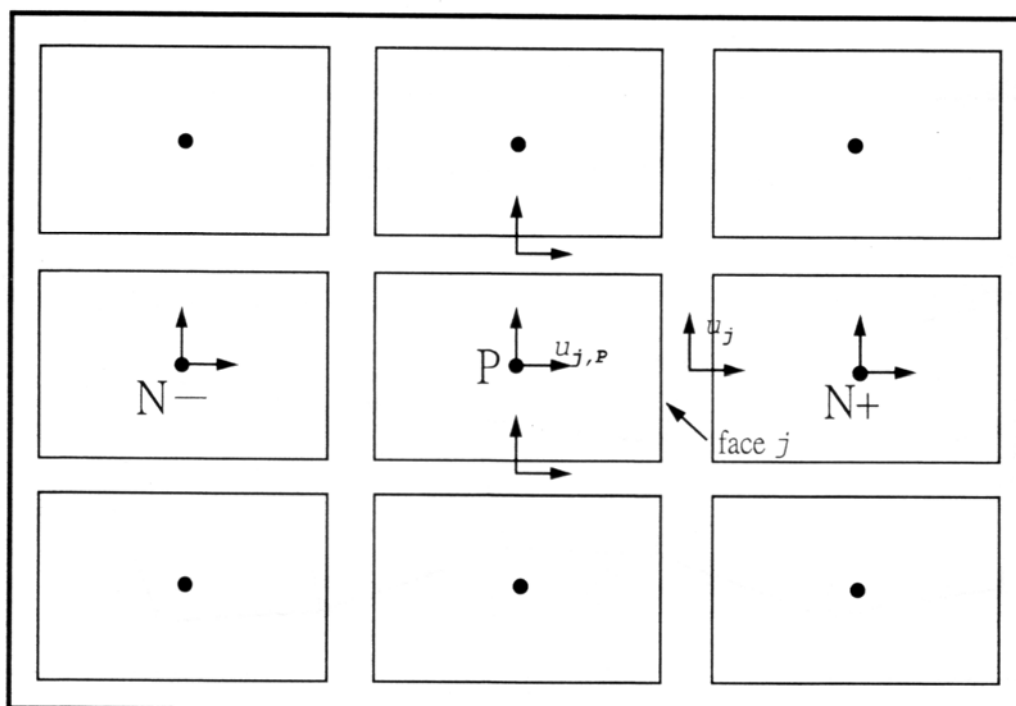


圖 3-4 PISO 示意圖

(2) 第一次修正計算階段(first corrector stage)：

動量方程式的運算可用以下表示：

$$A_p u_{i,p}^{(2)} = H(u_{i,m}^{(1)}) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_1 + D_p (P_{N+}^{(1)} - P_{N-}^{(1)}) \quad (3-17)$$

壓力方程式可表示為：

$$A_p P_p^{(1)} = \sum_m A_m P_m^{(1)} + s_1 \quad (3-18)$$

可解得壓力場 $P^{(1)}$ ，其中 s_1 為已知點速度 $u_i^{(1)}$ 和 $u_i^{(0)}$ 的函數，下次運算速度 $u_i^{(2)}$ 和 $u_j^{(2)}$ 可以(3-17)計算得到。

(3) 外加修正計算階段(additional corrector stage)

$$A_p u_{i,p}^{(q+1)} = H(u_{i,m}^{(q)}) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_1 + D_p (P_{N+}^{(q)} - P_{N-}^{(q)}) \quad (3-19)$$

$$A_p P_p^{(q)} = \sum_m A_m P_m^{(q)} + s_1 \quad (3-20)$$

$q=1, 2, 3, \dots$ 為修正計算等級，其中 A_p 為常數，只要增加 q 值即可完成數值解析得到的近似值。



STAR-CD 計算流場時是以下兩項作為收斂條件

1. 每一個時間步階(time step)的疊代次數。
2. 每一次疊代後所有控制容積內的殘值改變率小於給定值，即：

$$C_\phi^k = \sum (|B_p^n \phi_p^n| - |B_p^o \phi_p^o|) < (\text{給定值})$$

3-3 暫態滑移網格(sliding mesh)

本文主要分析空間中移動物體其周圍流場的情形，處理方式則使用滑移網格進行。如圖 3-5 所示。

由圖 3-5 可知，靠近交界面上的網點(vertex number)分別為 1-6 點及 11-16 點。而在網格中心的編號則為上下交界面定義的上下交界面編號(boundary number)，其分別為 1-5 及 6-10。在滑移過程中，則以 Δt 時間乘上對應的角速度或移動速度(視移動為等角速度移動或是平移移動)，則此值為位移距離。首先移動下面從屬網格之後改變各網點位置連接關係，之後再移動交界面位置，最後再次移動下面從屬網格以恢復原本因移動而扭曲的網格，並更新上下邊界的連接關係，如原本(1)部分 1 和 6 之邊界相接，之後至(4)則改為 2 和 6 相接臨。網點亦是如此。而在每一步進時均計算整個區域內流場關係，以達到暫態轉動的效果。

此暫態滑移網格計算方式於每一次時間步進時， Δt 不可過大，否則位移距離會過大(不可超過一個網格距離)，否則造成網格修正的困難度及扭曲過於嚴重，使得流場發散而無法收斂。

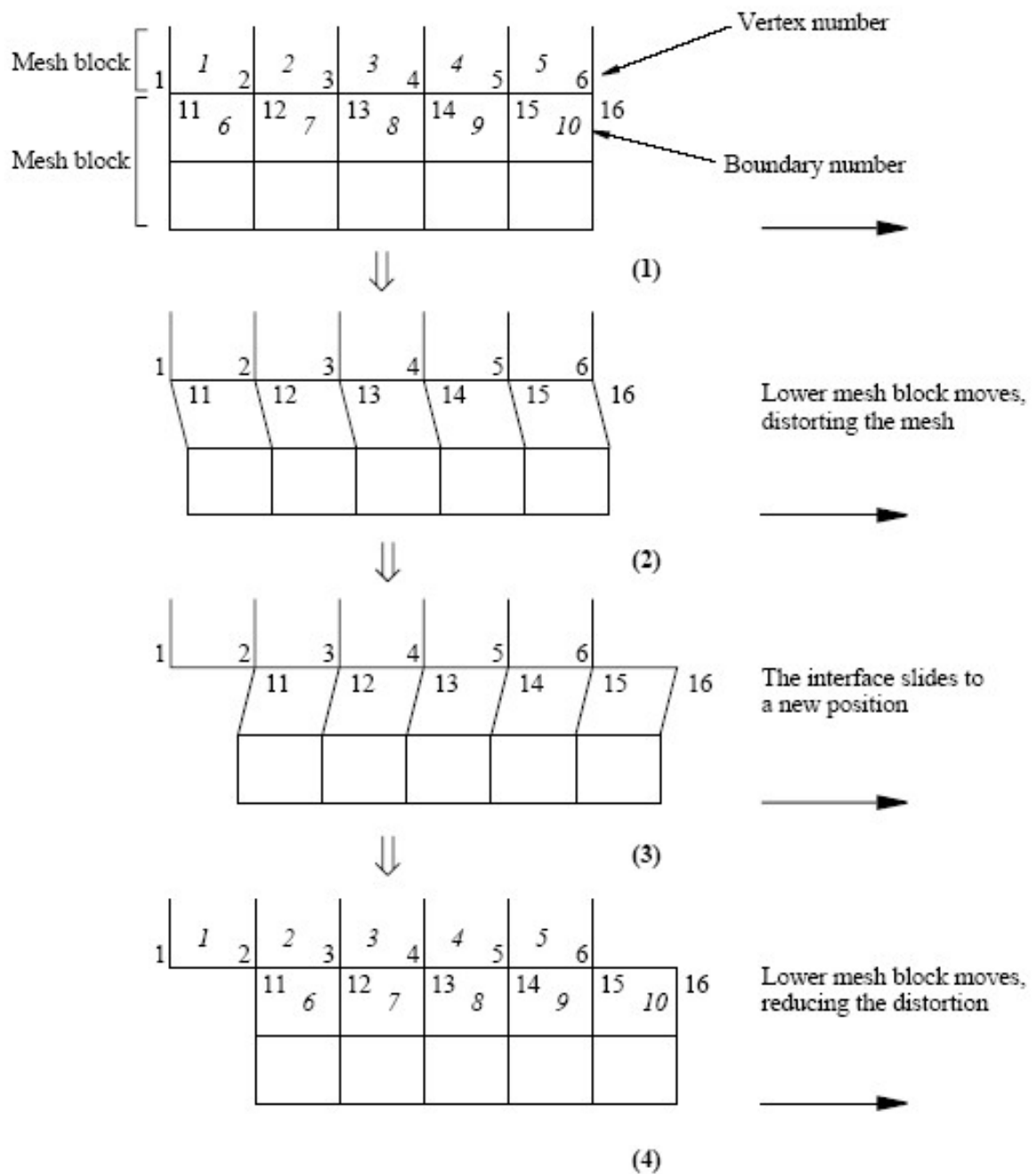


圖 3-5 滑移網格進行方式說明示意圖

3-4 流場動畫製作方法

移動物體於空間中流場變化的動畫製作將分為三部分：

一、氣流場動畫製作

1. 利用方程式 (2-2)、(2-3)、(2-6)、(2-8) 計算出流場的速度分佈後，首先於圖 2-1 的物理模式上選定一個區域當成視覺化範圍，此範圍即為影像擷取所擷取的範圍。如圖 3-6 所示。
2. 視覺化範圍確定後，於流場中視覺化範圍處放置和空氣密度相同之微小粒子，簡稱空氣粒子，釋放空氣粒子，於流場中放置的空氣粒子會由放置位置（圖中綠色圓點所示之位置）產生流線，紀錄各空氣粒子於每個時間之軌跡。如圖 3-7 為流場中放置空氣粒子時，空氣粒子所產生的軌跡。
3. 利用後處理軟體中的功能：指定空氣粒子隨所經流場位置速度的不同而改變其顏色，以此方式觀察空氣粒子運動時，顏色改變的情形，可以直接的觀察出流場各處速度的變化。如圖 3-8 所示。
4. 藉由圖 2-1 物理模式流場中暫態流場的速度向量判斷渦流發生處，如圖 3-9 所示，及估計渦流大小，再於渦流處放置空氣粒子以模擬氣流場中的渦流，製作渦流有三種方法，(一)首先於圖 2-1 的物理模式中之穩態流場，判斷出渦流發生處並放置空氣粒子使其產生渦流，最後利用後處理軟體編輯成窩流之動畫，如圖 3-10 所示。(二)圖 2-1 的物理模式中暫態流場擷取產生渦流之每一時間點，將每一時間點利用影像編輯軟體編輯成渦流的動畫，如圖 3-11 之(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)所示。(三)與第二種方法類似，不同的地方是在於第三種方法的渦流產生是屬於連續性，如圖 3-11 之(a)、(b)、(c)、(d)、(e)所示。利用此二種不同的方法應用在動畫過程中可以更清楚了解。
5. 使用影像編輯軟體，製作流場中空氣粒子運動之電影檔，圖 3-13 為流場中所有空氣粒子釋放時其運動之情形。



圖 3-6 物理模式中的視覺化範圍

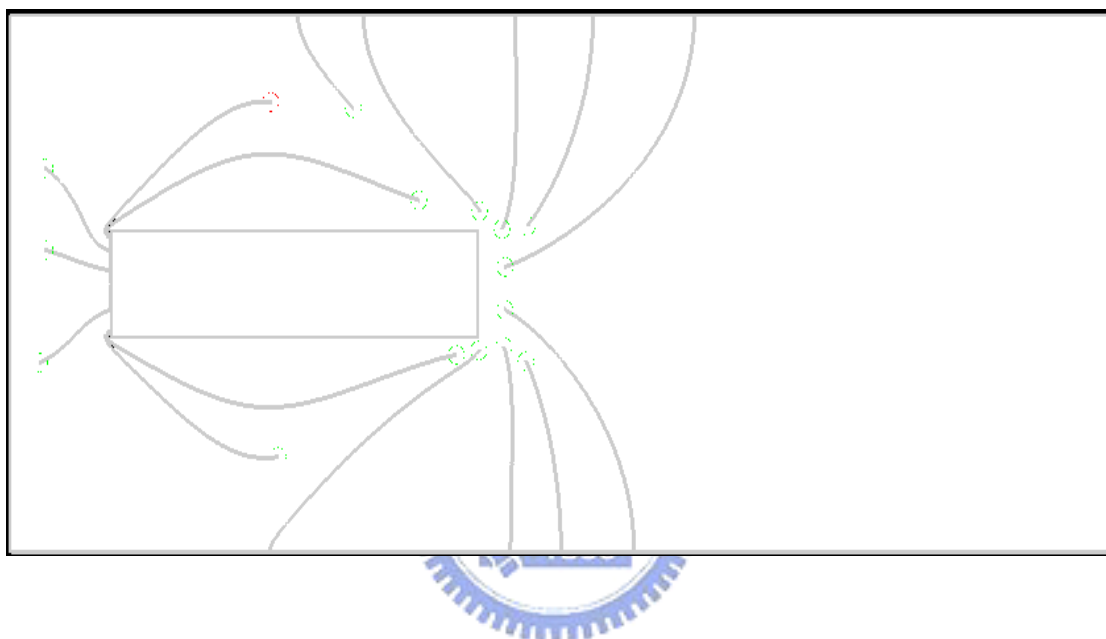


圖 3-7 空氣粒子所產生的連續軌跡

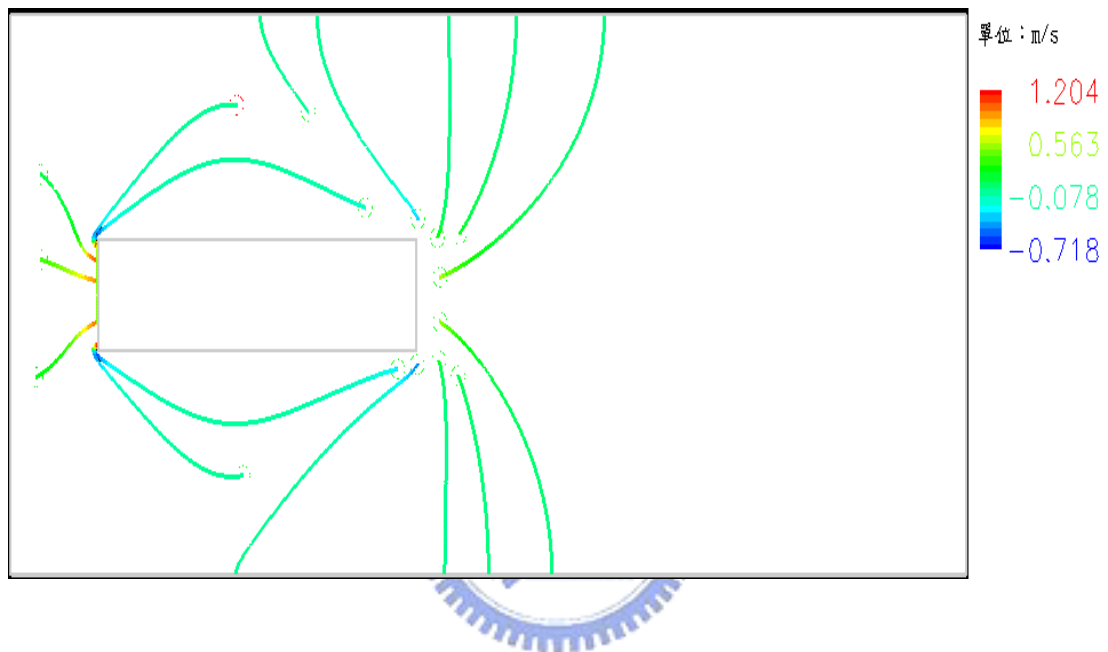


圖 3-8 空氣粒子隨流場位置速度的不同而改變其顏色

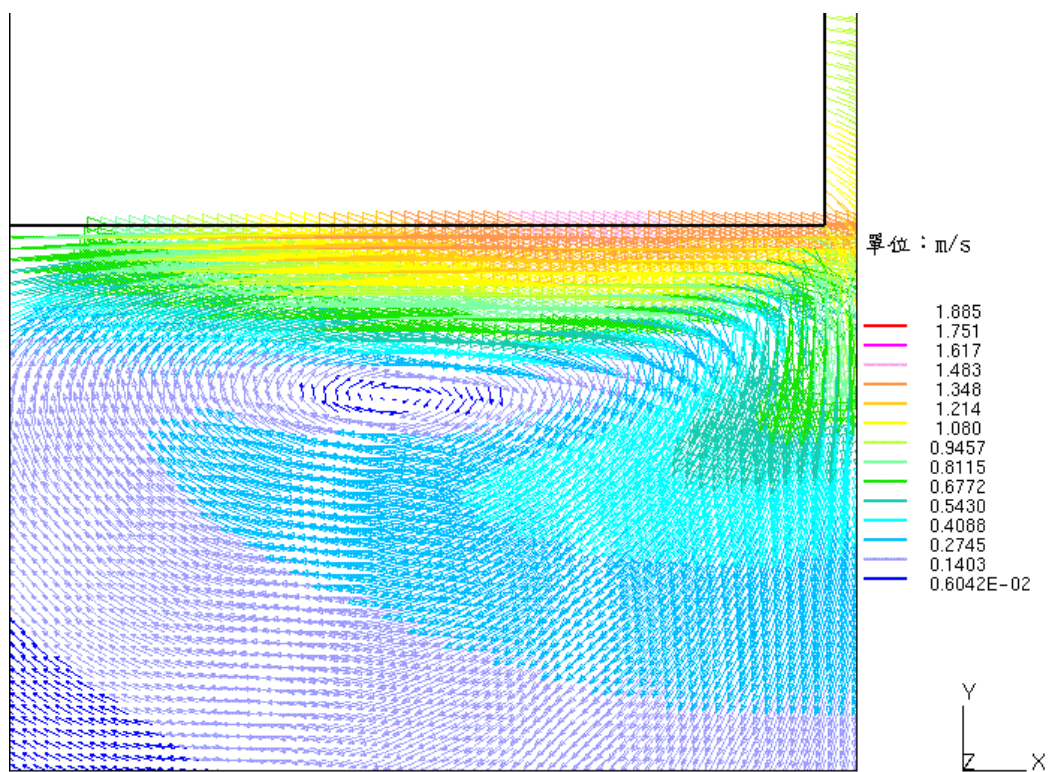


圖 3-9 流場中渦流產生處

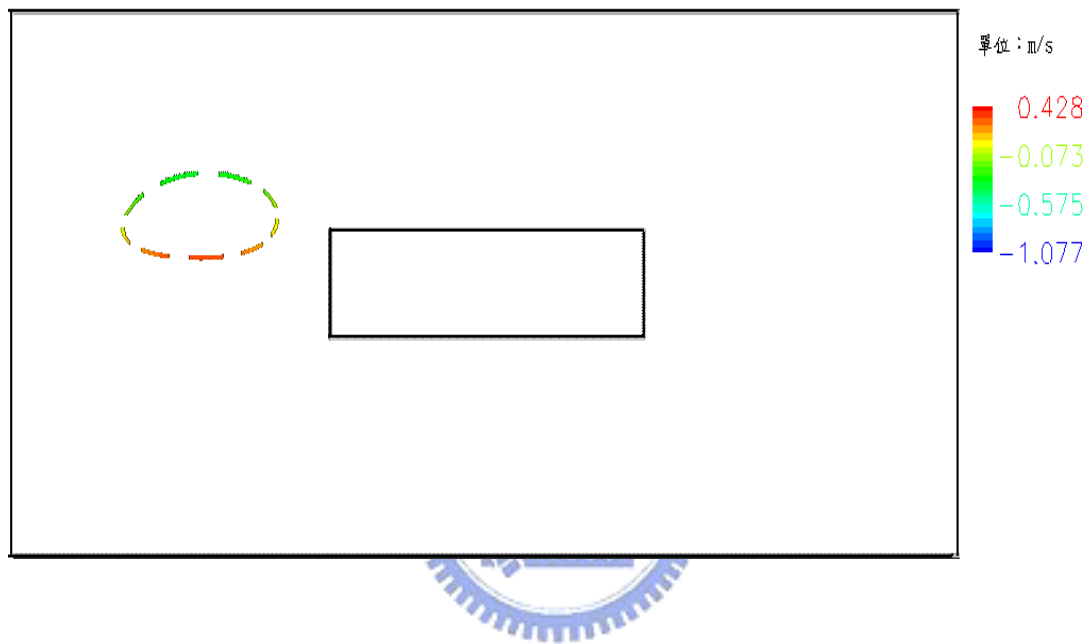
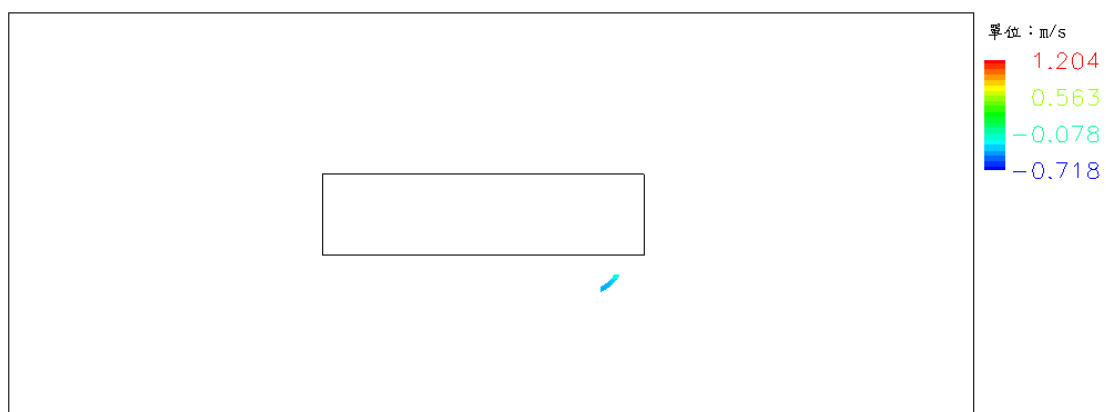
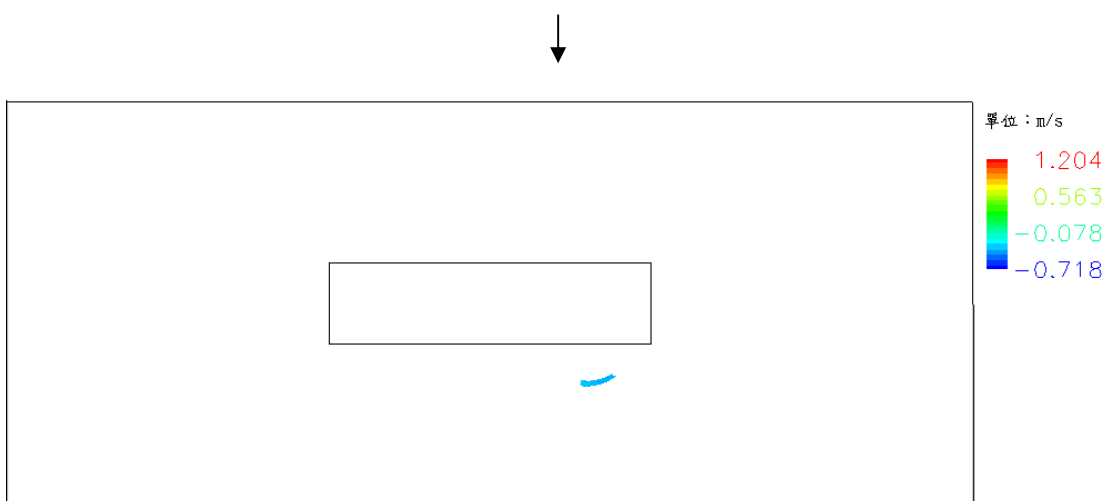


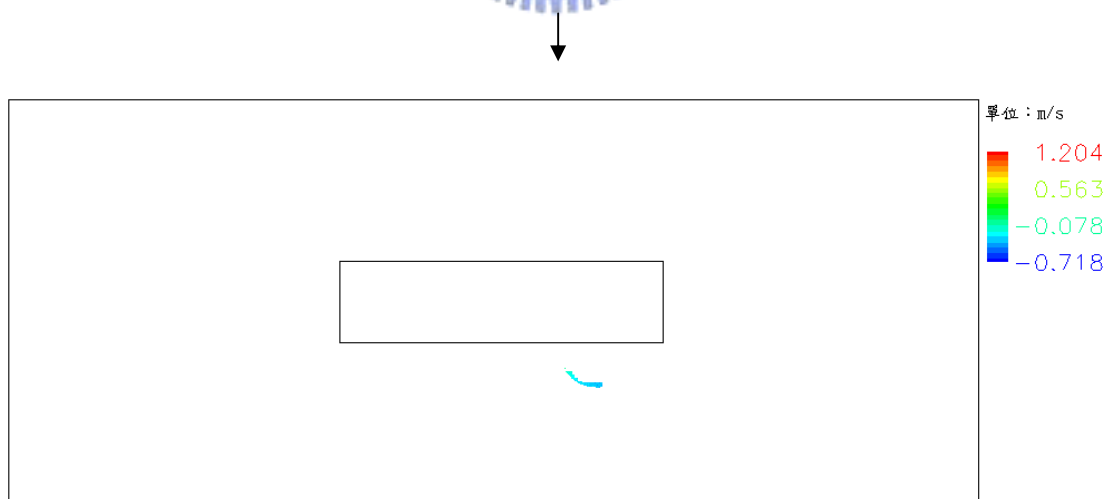
圖 3-10 穩態流場中渦流產生處



(a) 暫態流場之渦流運動情形 1

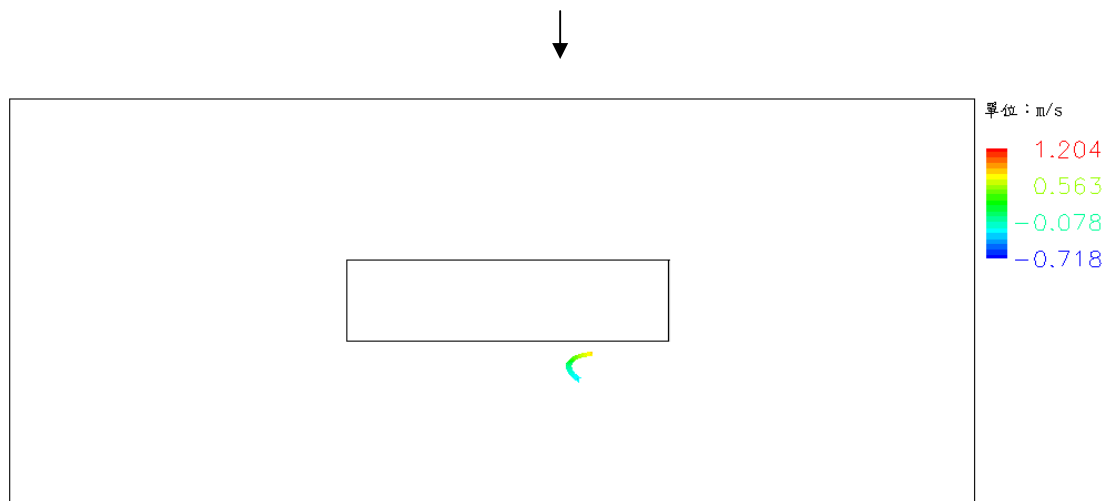


(b) 暫態流場之渦流運動情形 2

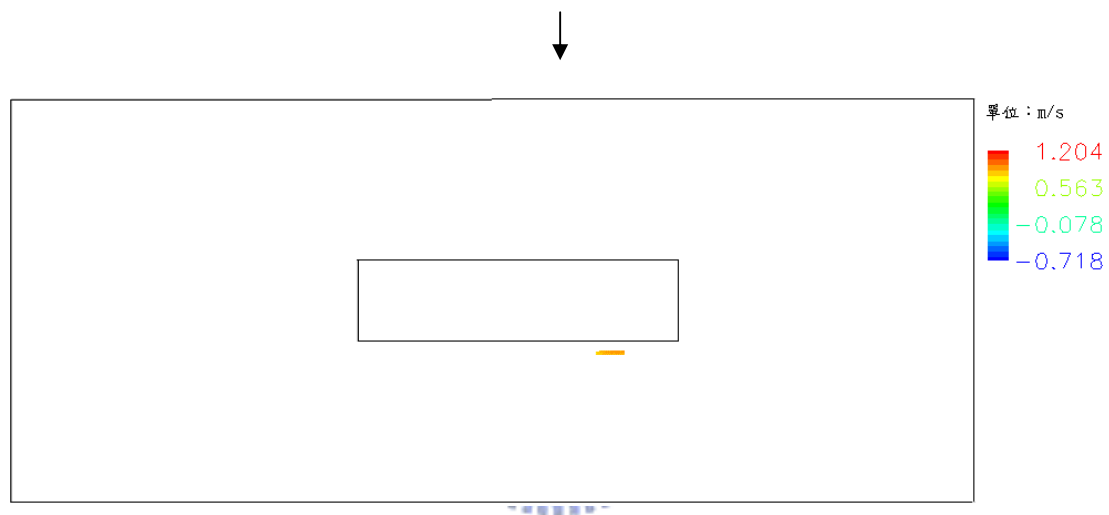


(c) 暫態流場之渦流運動情形 3

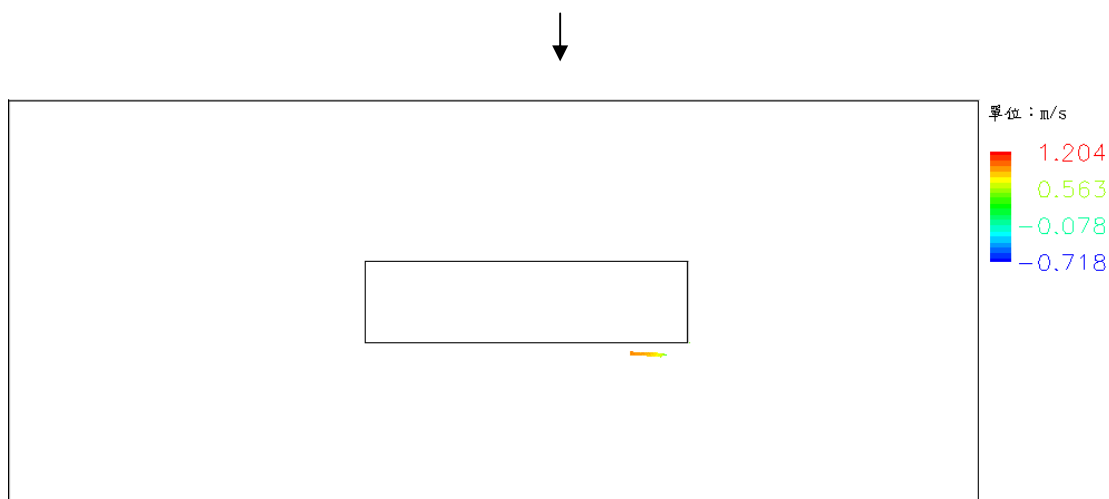
圖 3-11 暫態流場之渦流運動情形



(d) 暫態流場之渦流運動情形 4

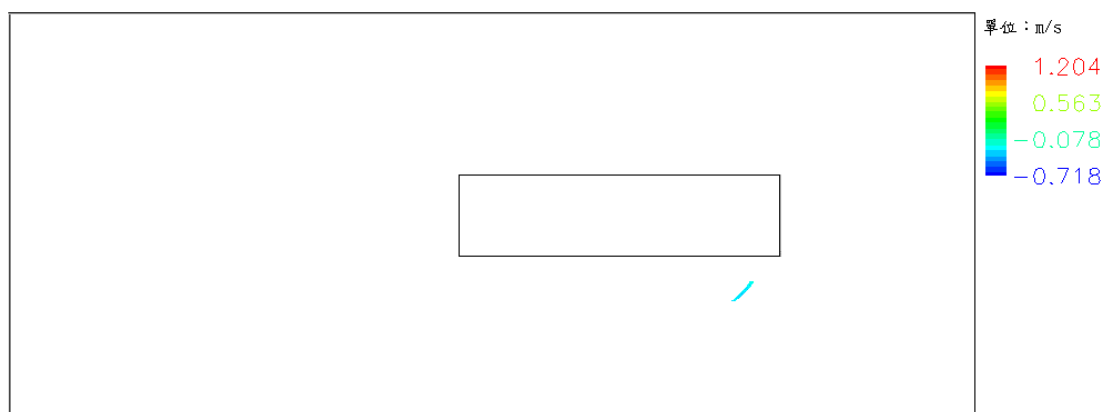


(e) 暫態流場之渦流運動情形 5

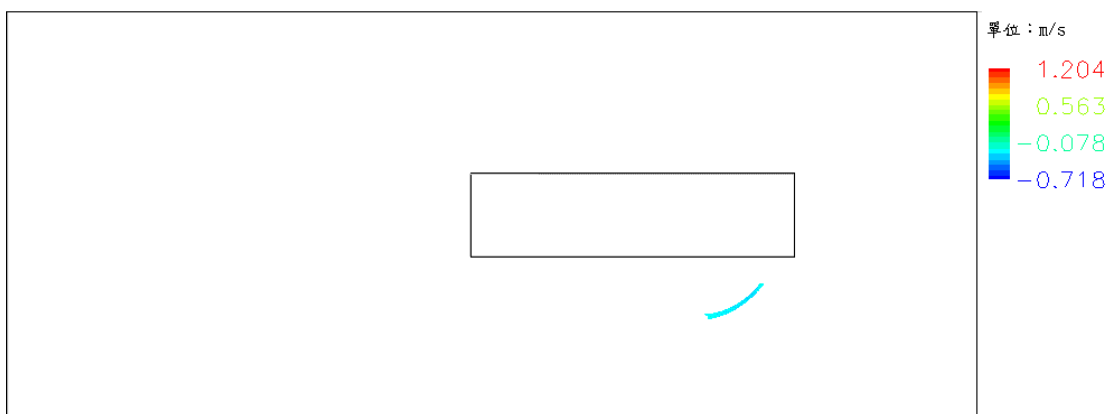


(f) 暫態流場之渦流運動情形 6

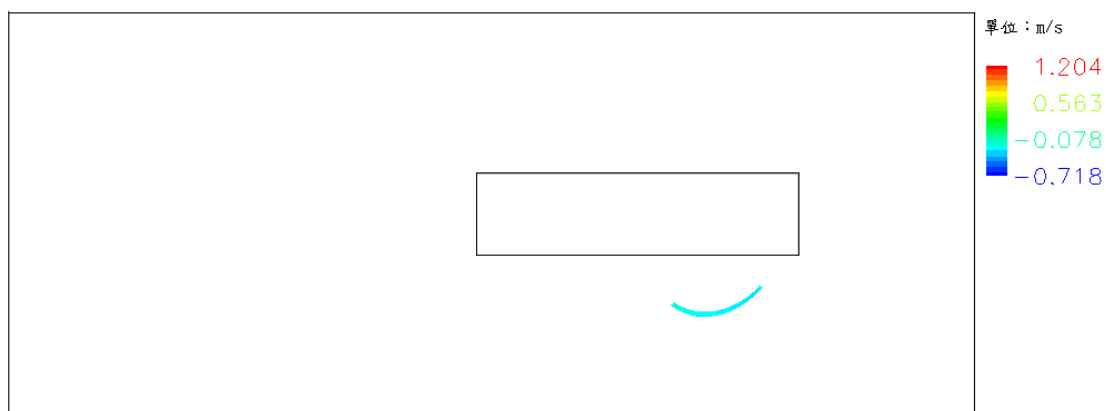
圖 3-11 暫態流場之渦流運動情形



(a) 暫態流場之連續性渦流運動情形 1

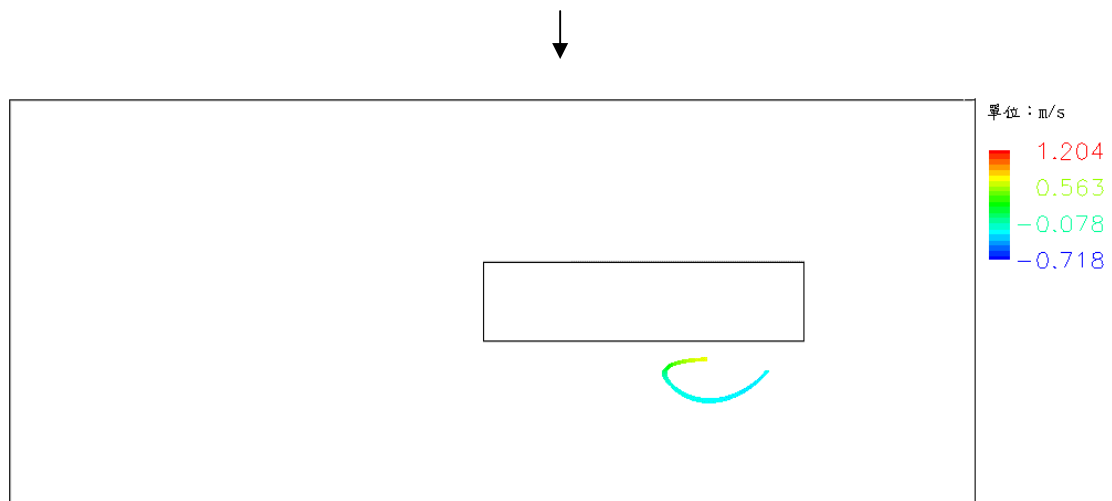


(b) 暫態流場之連續性渦流運動情形 2

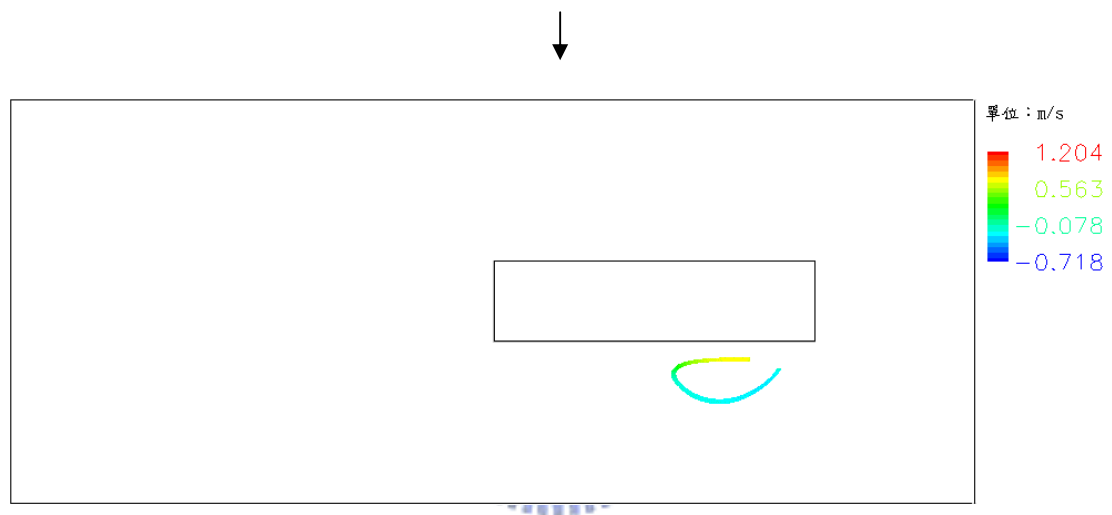


(c) 暫態流場之連續性渦流運動情形 3

圖 3-12 暫態流場之連續性渦流運動情形



(d) 暫態流場之連續性渦流運動情形 4



(e) 暫態流場之連續性渦流運動情形 5

圖 3-12 暫態流場之連續性渦流運動情形

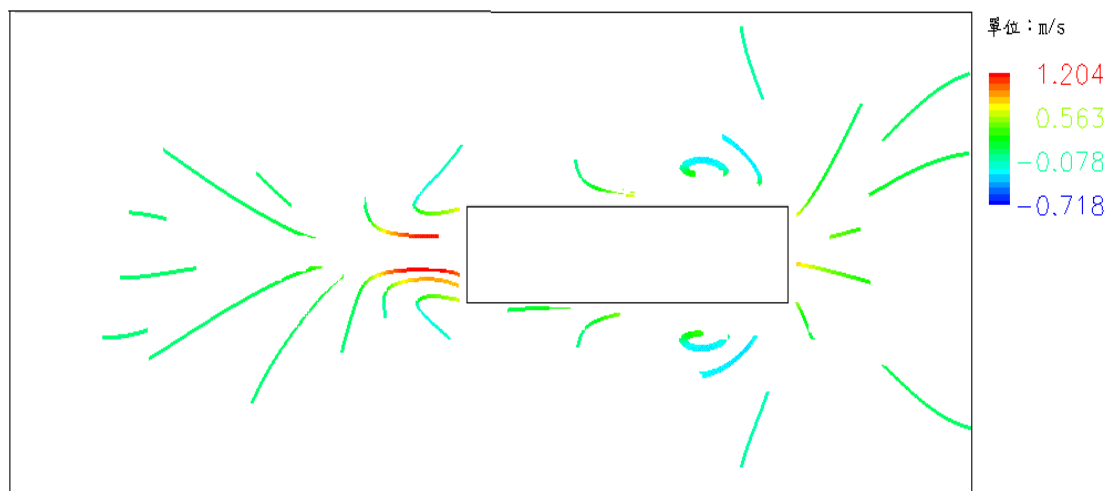


圖 3-13 所有空氣粒子釋放之情形

在流場中放置空氣粒子的功用，有如實驗中放置的煙線，可以有效地達到流場可視化的效果。

二、速度向量的動畫製作

由於流場變化的情形是隨時間改變，本文利用 STAR-CD 製作速度向量的動畫。將運算結果的速度輸出，再利用 STAR-CD 中的動畫製作方法輸出每一時間的速度向量圖，如圖 3-14 之(a)、(b)、(c)、(d)所示為中時 0.05 秒、0.1 秒、0.15 秒、0.2 秒之向量圖，此為圖 2-1 物理模式其中四張圖，將所有的速度向量圖利用影像編輯軟體製作成動畫。

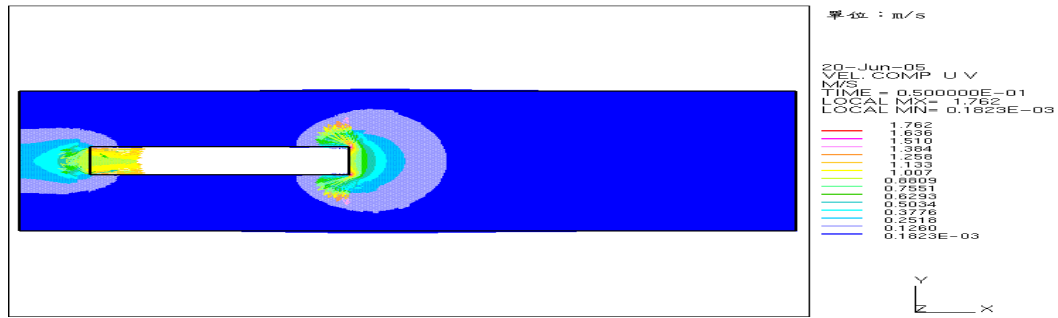
三、速度和壓力的動畫製作

由於流場變化的情形是隨著時間改變，使用後處理軟體來處理暫態流場中各暫態時間流場變化的情形，可獲得較佳的視覺效果，於是本文對於製作暫態流場變化的動畫，採用後處理軟體來製作。流場變化動畫的製作過程如下：

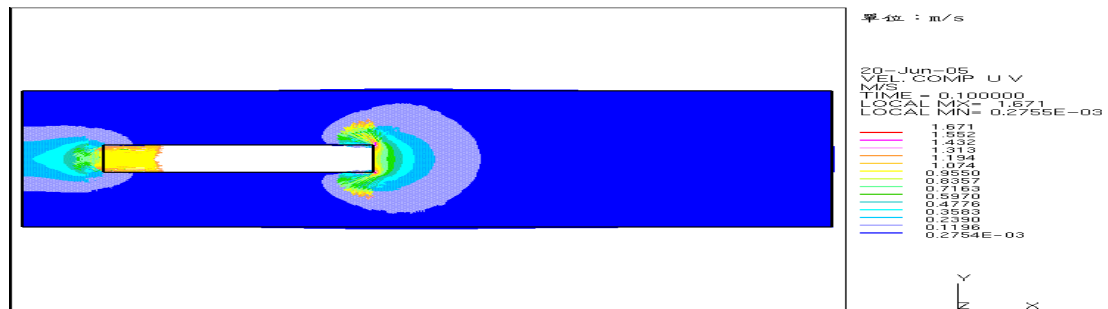
1. 利用方程式 (2-2)、(2-3)、(2-6)、(2-8) 式計算出暫態流場中的速度分佈後，首先於圖 2-6 的物理模式上選定一個區域當成視覺化範圍，此範圍即為影像擷取所擷取的範圍。
2. 對於二維流場本文利用後處理軟體中的 Coordinate-Surface 功能將流場中一截面上速度隨時間變化之情形顯示出來，並錄製流場中各暫態時間之速度的變化，最後製作成流場中速度擴散的動畫。如圖 3-15 之(a)、(b)、(c)、(d)所示為速度在時間 0.6 秒、1 秒、1.6 秒、2 秒之運動情形。
壓力動畫製作過程與上述過程中類似。如圖 3-16 之(a)、(b)、(c)、(d)所示為壓力在時間 0.6 秒、1 秒、1.6 秒、2 秒之運動情形。

四、粒子飛行軌跡的動畫製作：

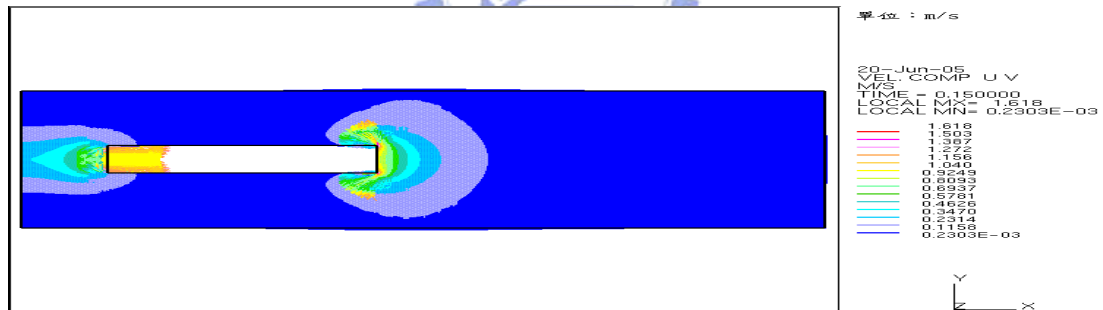
1. 利用方程式 (2-13) 計算出粒子的運動軌跡後，於流場中將固體粒子釋放。



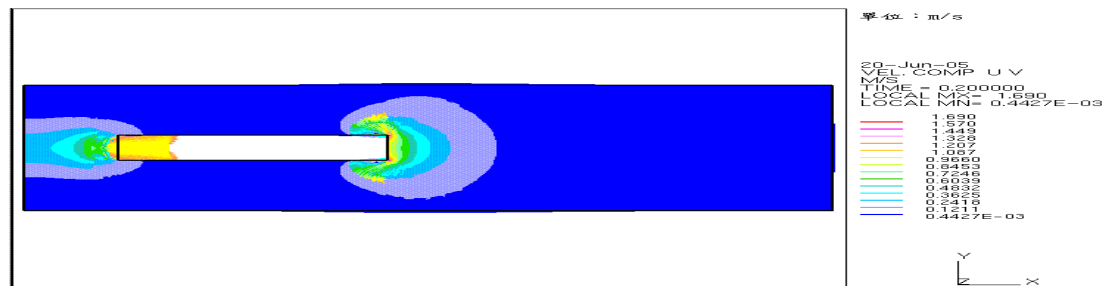
(a) 0.05 秒速度向量圖



(b) 0.1 秒速度向量圖

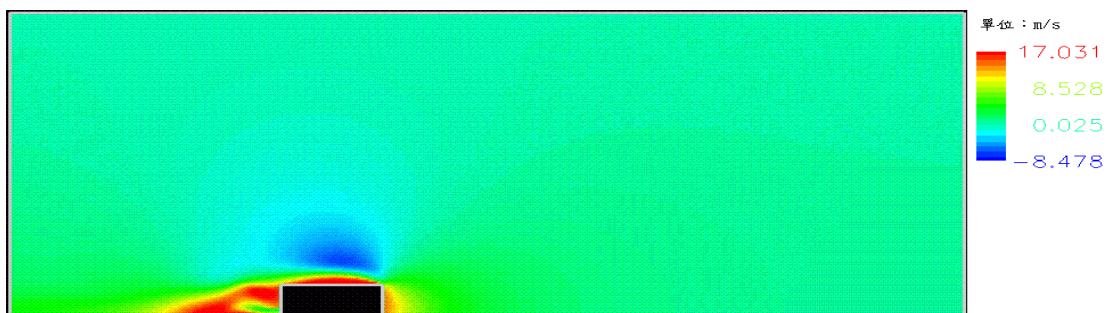


(c) 0.15 秒速度向量圖

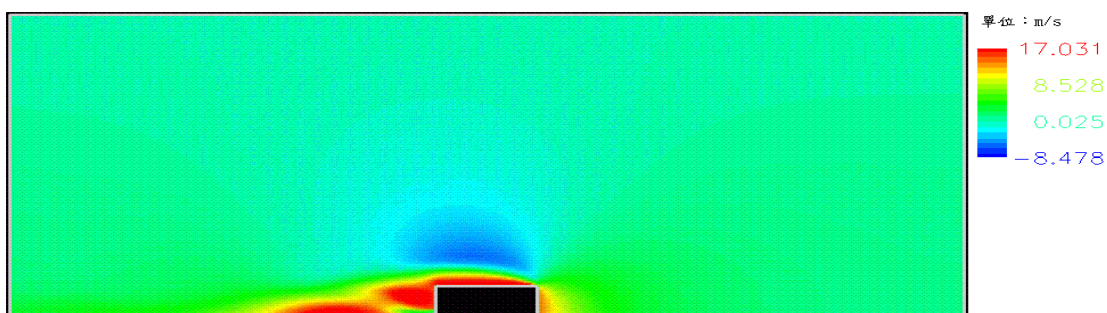


(d) 0.2 秒速度向量圖

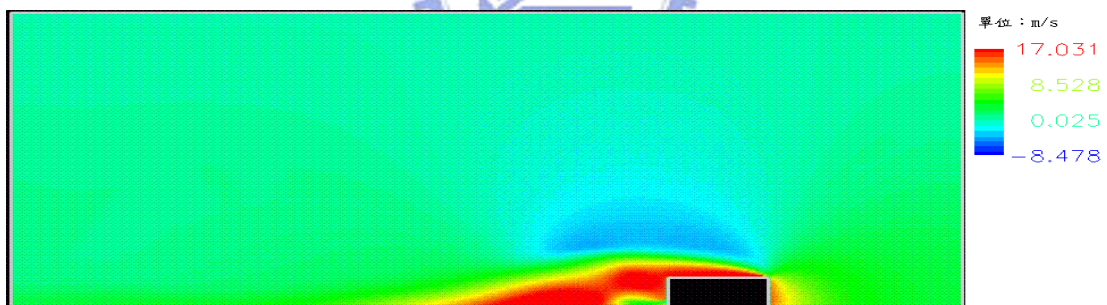
圖 3-14 移動物體之速度向量圖



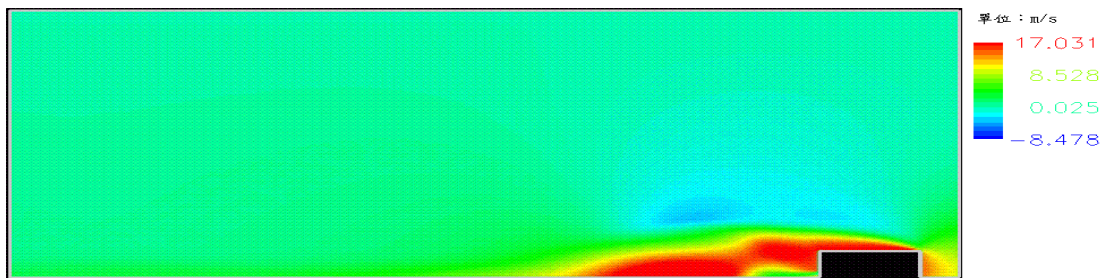
(a) 0.6 秒速度純量圖



(b) 1 秒速度純量圖

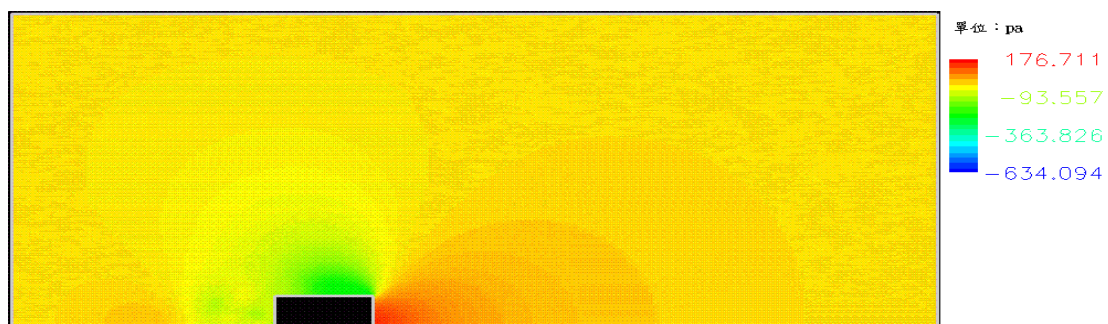


(c) 1.6 秒速度純量圖

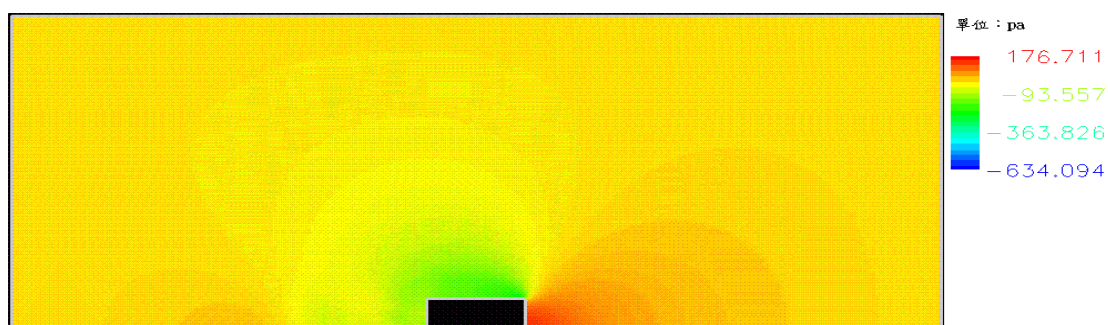


(d) 2 秒速度純量圖

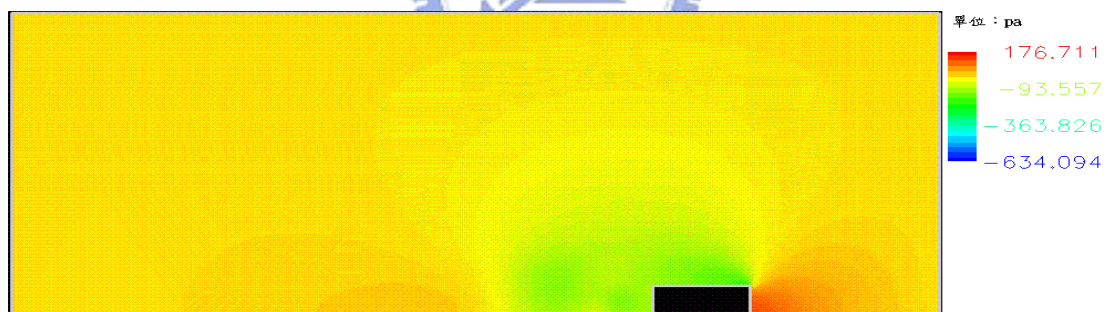
圖 3-15 流場中速度純量圖



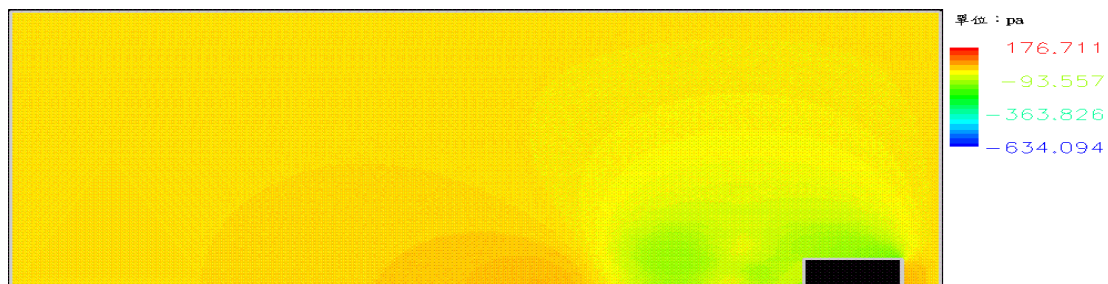
(a) 0.6 秒壓力變化圖



(b) 1 秒壓力變化圖



(c) 1.6 秒壓力變化圖



(d) 2 秒壓力變化圖

圖 3-16 流場中壓力變化圖

釋放後的固體粒子將會根據計算所得的運動軌跡移動，如圖 3-17 為固體粒子於流場中之運動軌跡。數值計算中，模擬物體移動和固體粒子運動軌跡的運算過程是分開計算的，兩者必須以相同時間的結果互相配合，在此過程中，運用影像編輯軟體錄製視覺化範圍內固體粒子運動之電影檔。

2. 將固體粒子之運動軌跡動畫與圖 2-2 物理模式圖中氣流場之動畫結合，則可顯示固體粒子在流場中的飛行軌跡。如圖 3-18 之(a)、(b)、(c)、d)、(e)、(f)、(g)、(h)、(i)為流場中固體粒子與氣流之運動情形。氣流場及固體粒子飛行軌跡的動畫製作流程圖如圖 3-19 所示。(為了更清楚觀察粒子飛行的軌跡，將動畫中的流場以白色表示，黑色點代表粒子每一時間點之運動軌跡。)

五、濃度擴散的動畫製作：

由於流場中濃度擴散的情形是隨著時間改變，使用後處理軟體來處理暫態流場中各暫態時間濃度擴散的情形，可獲得較佳的視覺效果，於是本文對於製作暫態流場中濃度擴散情形的動畫，採用後處理軟體來製作。濃度場擴散動畫的製作可分為兩部份：

(一)利用等濃度範圍來模擬流場中濃度擴散的情形：

利用方程式 (2-9)、(2-10) 計算出暫態流場中的濃度分佈後，將各暫態時間之數據輸入至後處理軟體中，對於二維流場本文利用後處理軟體中的 Coordinate-Surface 功能將流場中一截面上濃度隨時間變化之情形顯示出來，並錄製流場中各暫態時間之濃度變化，最後製作成流場中濃度擴散的動畫。如圖 3-20 所示為速度在時間 1 秒之運動情形。

本文採用此種方法模擬汽車於二維空間排放廢氣之濃度擴散動畫

(二)使用氣流來表示流場中濃度擴散之情形：

利用方程式 (2-9)、(2-10) 計算出暫態流場中的濃度分佈後，將所計算出之數據輸入至後處理軟體中，並於流場中之適當計算節點上放置空氣粒



圖 3-17 固體粒子運動軌跡



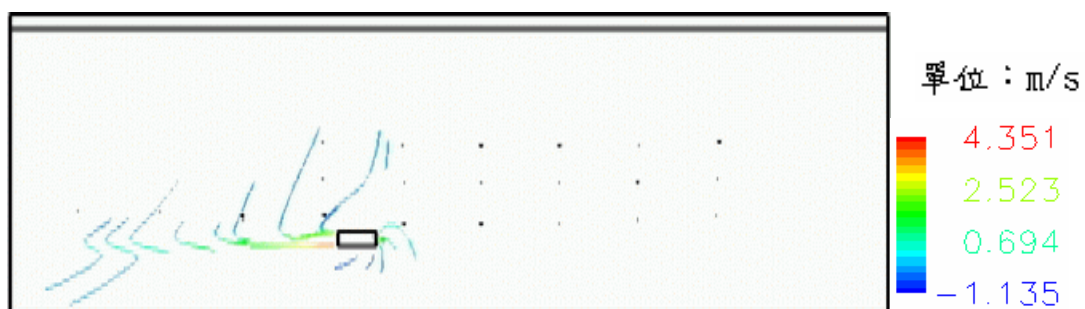
(a) 流場中固體粒子與氣流之運動情形 1



(b) 流場中固體粒子與氣流之運動情形 2

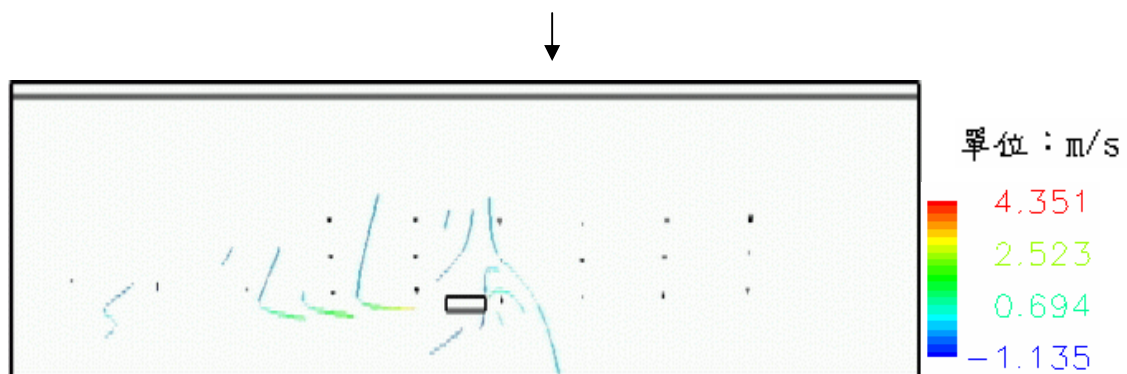


(c) 流場中固體粒子與氣流之運動情形 3

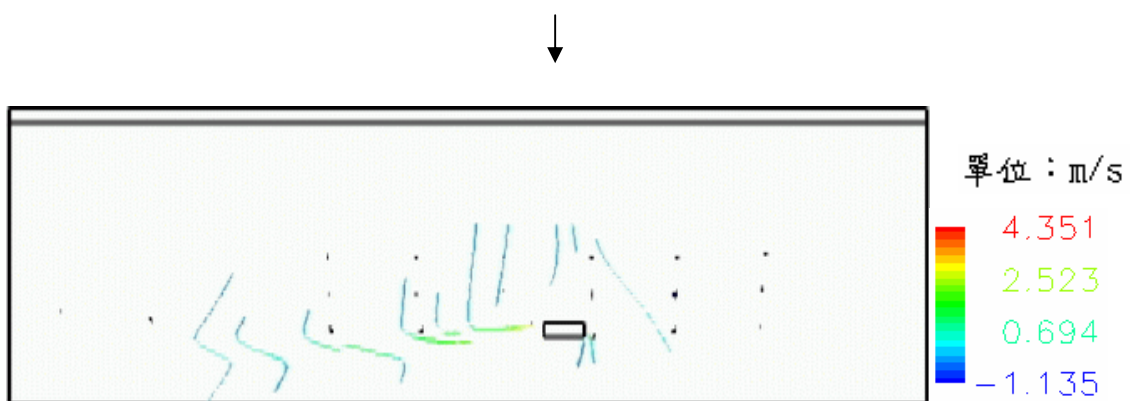


(d) 流場中固體粒子與氣流之運動情形 4

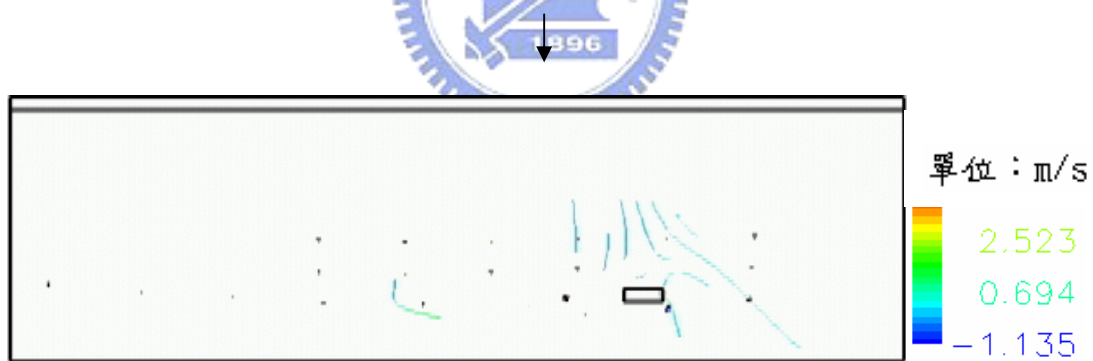
圖 3-18 固體粒子與氣流之運動情形



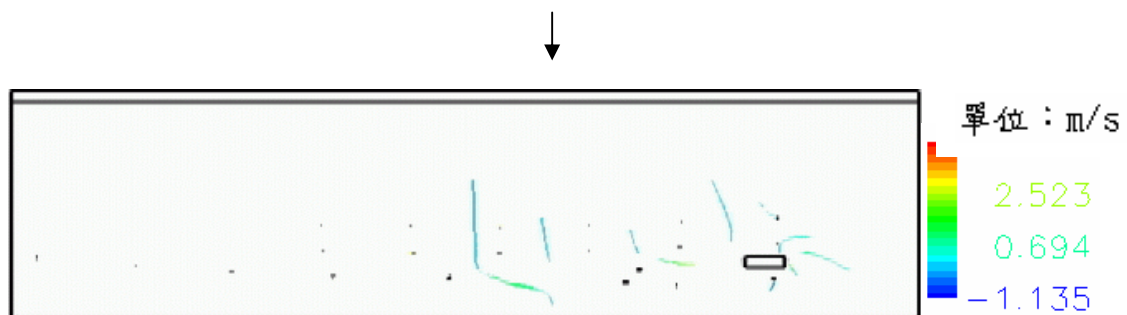
(e) 流場中固體粒子與氣流之運動情形 5



(f) 流場中固體粒子與氣流之運動情形 6

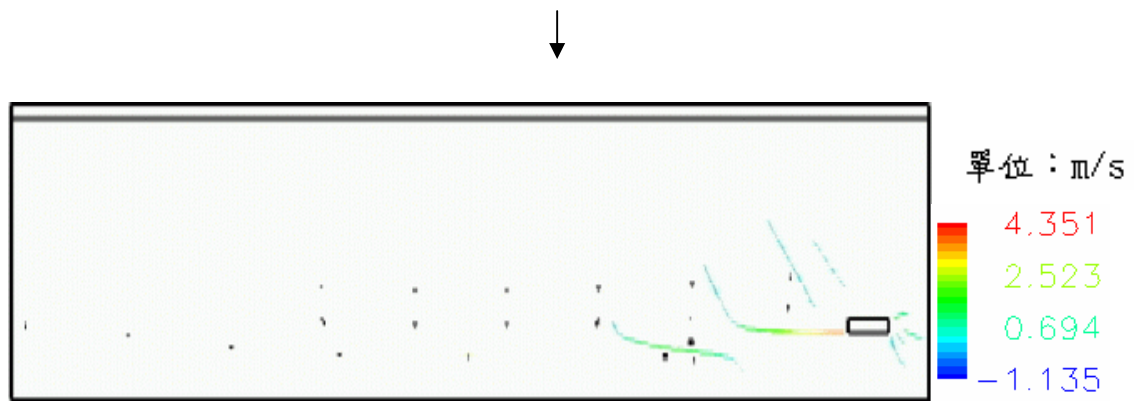


(g) 流場中固體粒子與氣流之運動情形 7



(h) 流場中固體粒子與氣流之運動情形 8

圖 3-18 固體粒子與氣流之運動情形

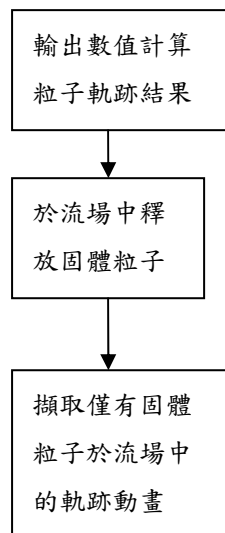


(i) 流場中固體粒子與氣流之運動情形 9

圖 3-18 固體粒子與氣流之運動情形



粒子飛行軌跡動畫製作過程



氣流場動畫製作過程

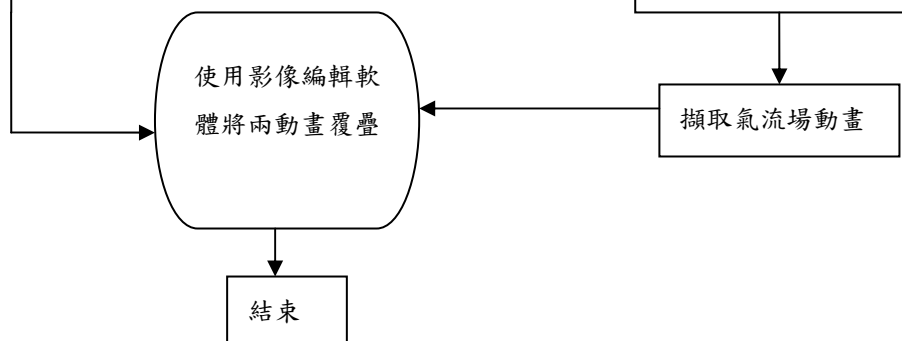
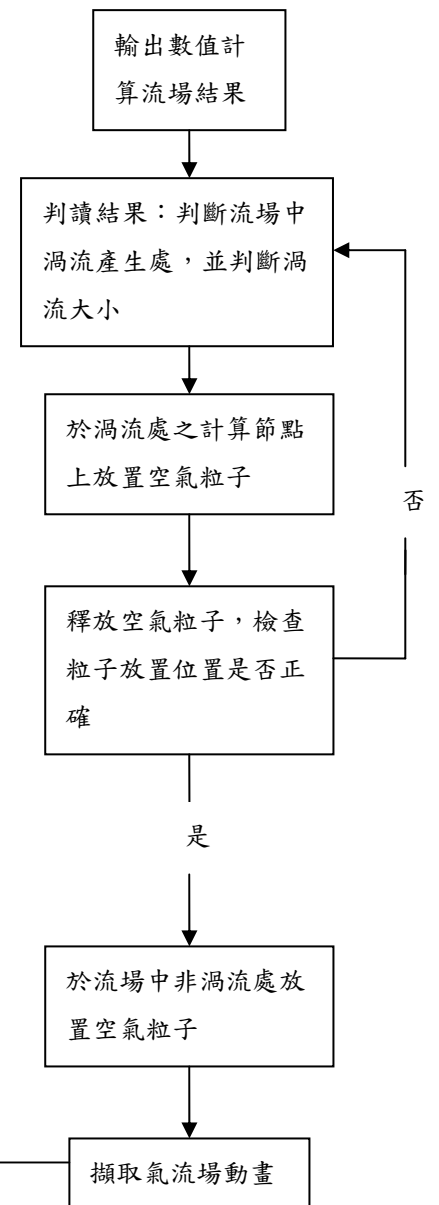


圖 3-19 動畫製作過程

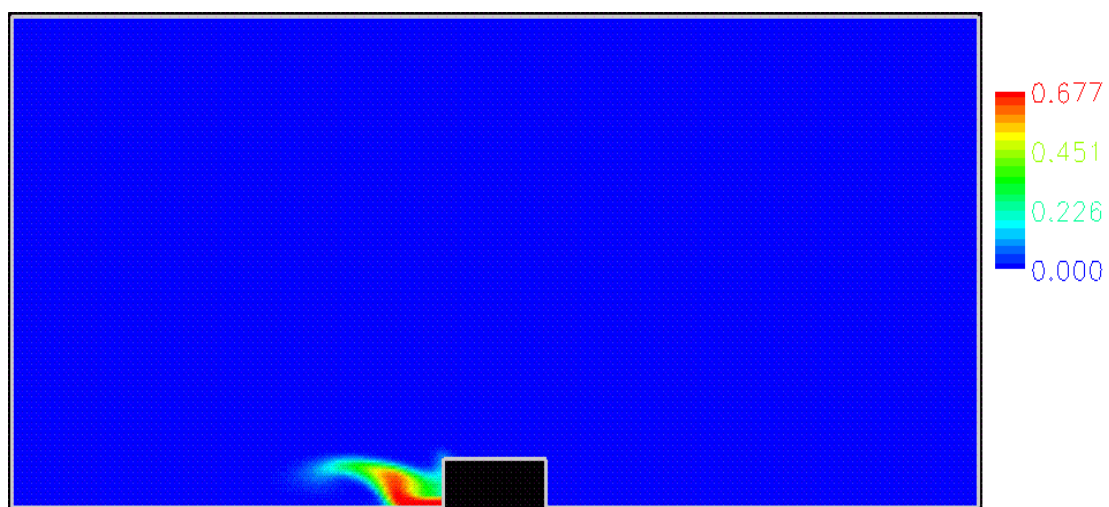


圖 3-20 時間 1 秒之濃度分布圖

子，指定空氣粒子之顏色將會隨著所經過位置之濃度而改變，藉此模擬空氣粒子於流場中流動時受濃度污染程度。如圖 3-21 所示為依上述方法，在流場中放置數顆空氣粒子，流動時顏色隨濃度改變之情形，氣流污染之程度可由其顏色的改變辨別，白色為氣流場。



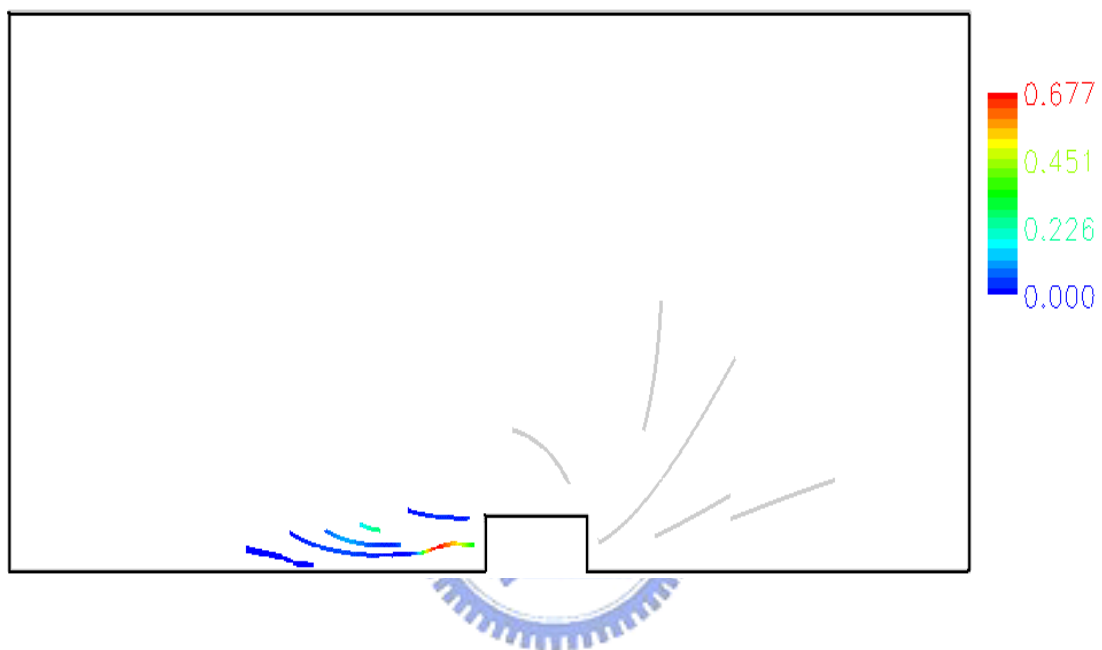


圖 3-21 隨濃度改變顏色之空氣粒子

第四章 結果與討論

本文將第二章的物理模式計算的結果分為三部分作為討論，分別為 4.1 移動物體周圍流場變化，4.2 汽車排氣污染情形，4.3 無塵室工作台車與粒子飛行軌跡的討論。

4.1 移動物體周圍流場分佈

根據圖 2-1 物理模式，模擬移動物體在流場中的變化情形，為了清楚了解物體在流場中的變化，並以相對速度的方式模擬固定不動物體在穩態流場中的變化情形加以討論。本文使用 25°C 的空氣為工作流體，密度： $1.205\text{kg}/\text{m}^3$ ，黏滯係數： $1.81\times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ，移動距離為 3m，以物體移動速度為 $1\text{m}/\text{s}$ 代入計算求得流場的速度分佈，固定不動物體則有側風 $1\text{m}/\text{s}$ 的速度往物體的方向流動。

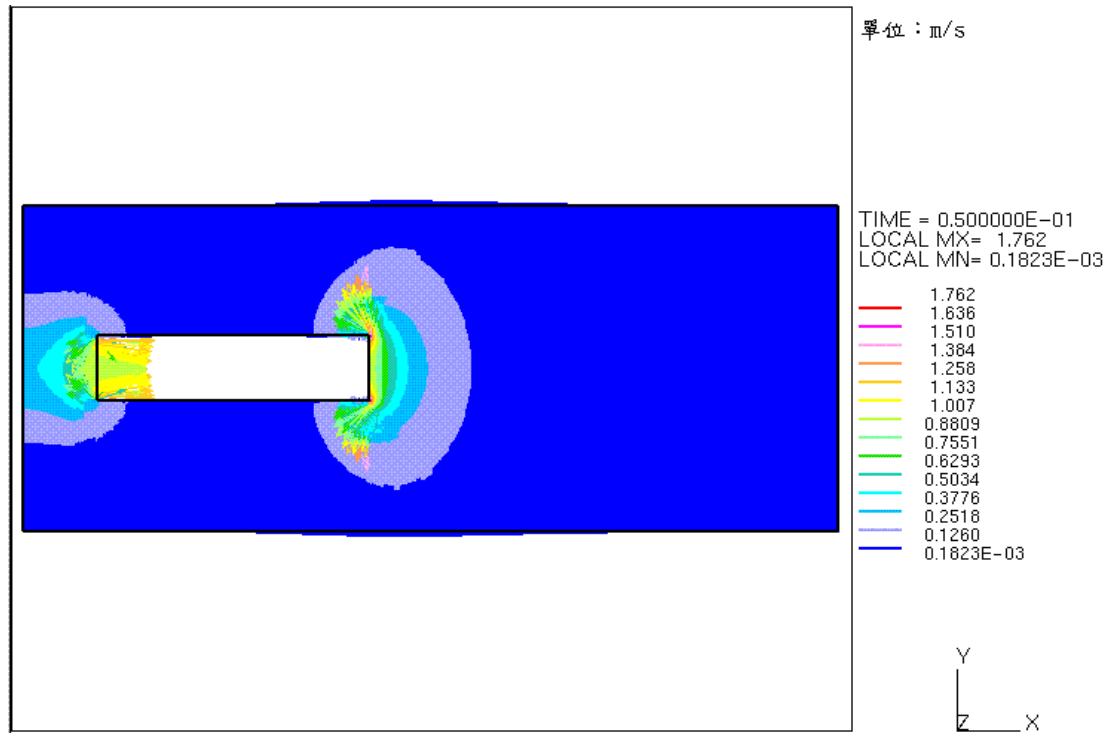
圖 4-1 之(a)、(b)、(c)、(d)分別為移動物體在時間 0.05 秒、1 秒、2 秒、3 秒之速度向量圖。

圖 4-2 之(a)、(b)、(c)、(d)分別為移動物體在時間 0.05 秒、1 秒、2 秒、3 秒之壓力分佈圖。

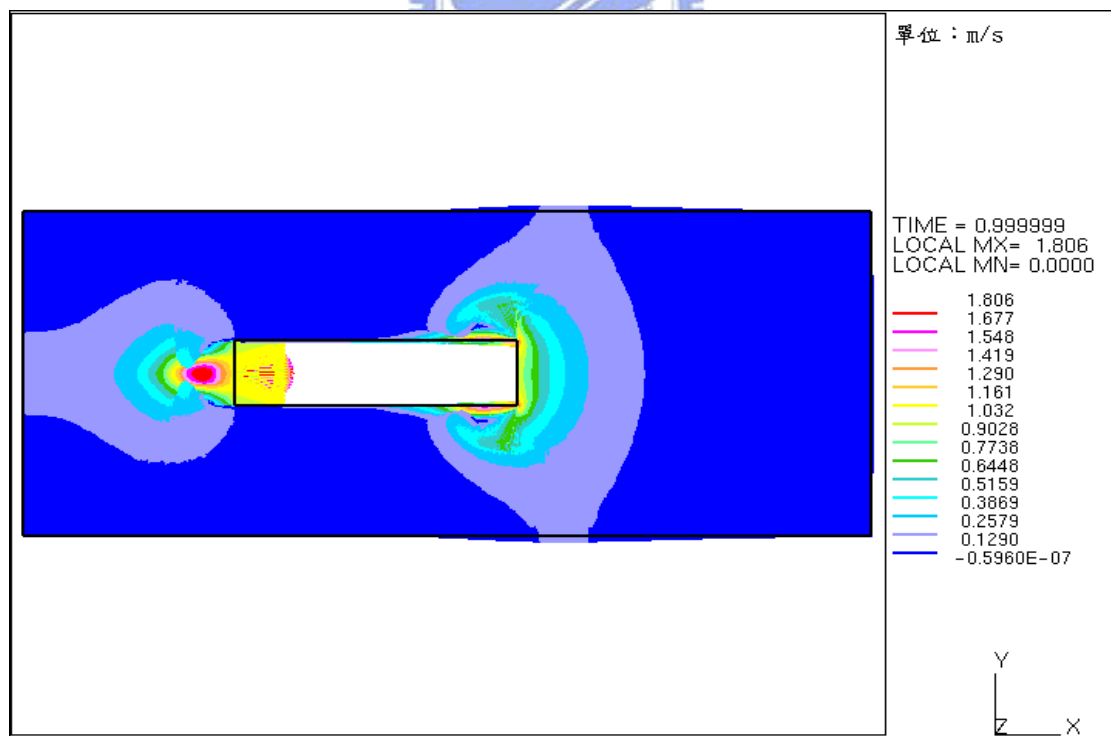
由圖 4-1、4-2 可觀察出當移動物體前進時，物體前方是高壓區而物體後方是低壓區，所以四周的氣體會跟隨物體前進，以填補後方的低壓區，由於物體前方的空氣也會填補後方低壓區，導致汽車前端兩側是低壓區，使得前方氣體在填補物體後方時，氣體會往物體兩側填補低壓區，而產生迴流。

圖 4-3 為固定不動物體之速度向量圖，圖 4-4 為固定不動物體之壓力分佈圖。由於移動物體在每一時間移動時皆會造成流場的變化，所以將其時間從 0 秒至 3 秒移動時的流場變化情形之速度向量圖利用影像編輯軟體製作成動畫，如動畫 4-1 所示。而速度純量和壓力的動畫則可藉由後處理軟體擷取視覺化範圍，如圖 4-5 所示，並直接錄製成速度純量和壓力之電影檔。如動畫 4-2、4-3 所示。

圖 4-6 之(a)、(b)、(c)、(d)分別為移動物體在時間 0.05 秒、1 秒、2 秒、3 秒之速度純量圖。

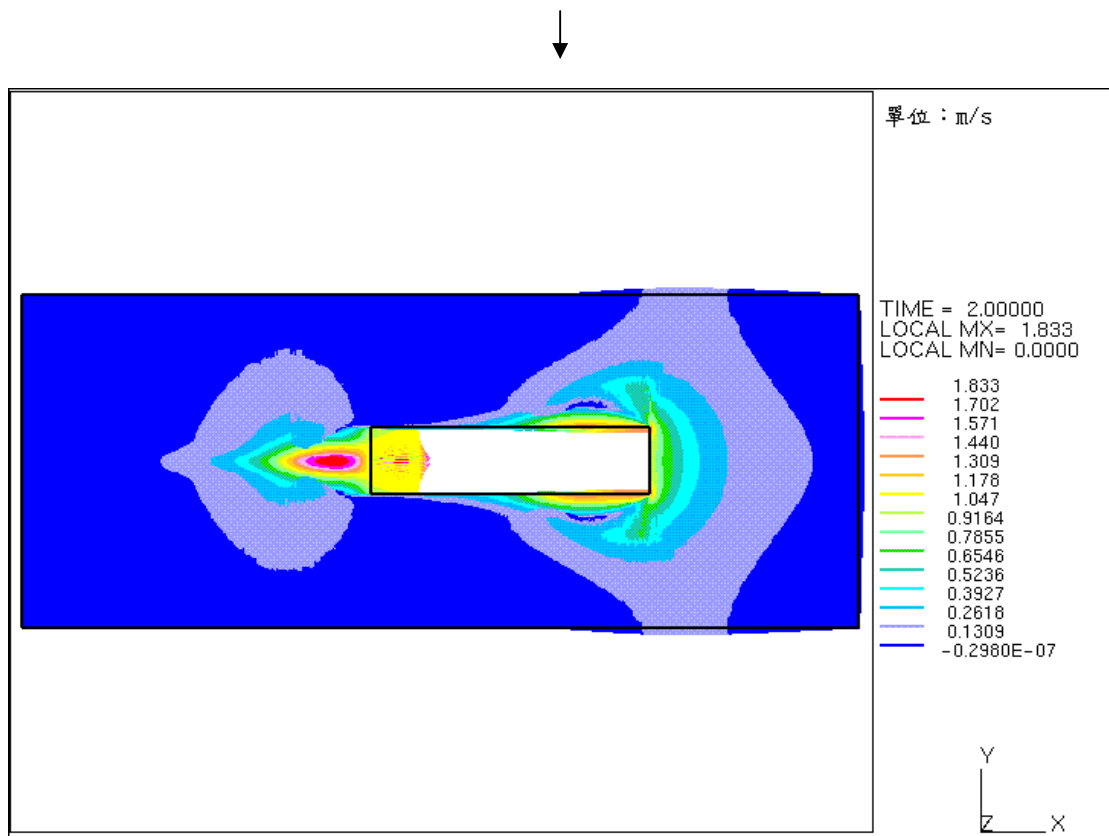


(a) 0.05 秒速度向量圖

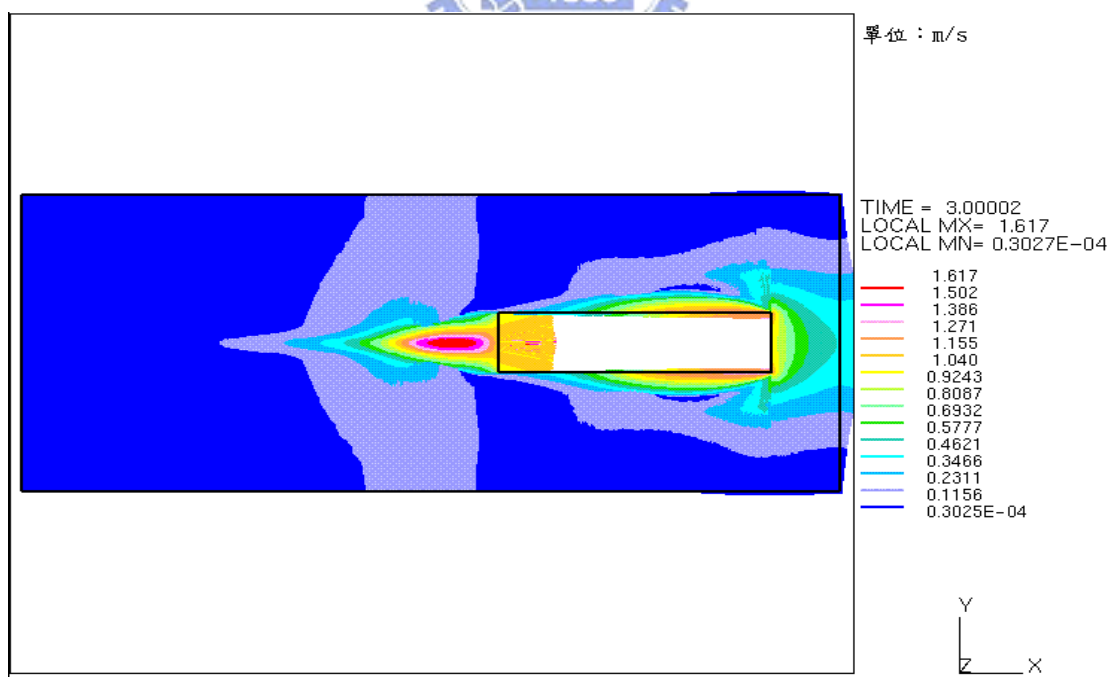


(b) 1 秒速度向量圖

圖 4-1 移動物體之速度向量變化圖

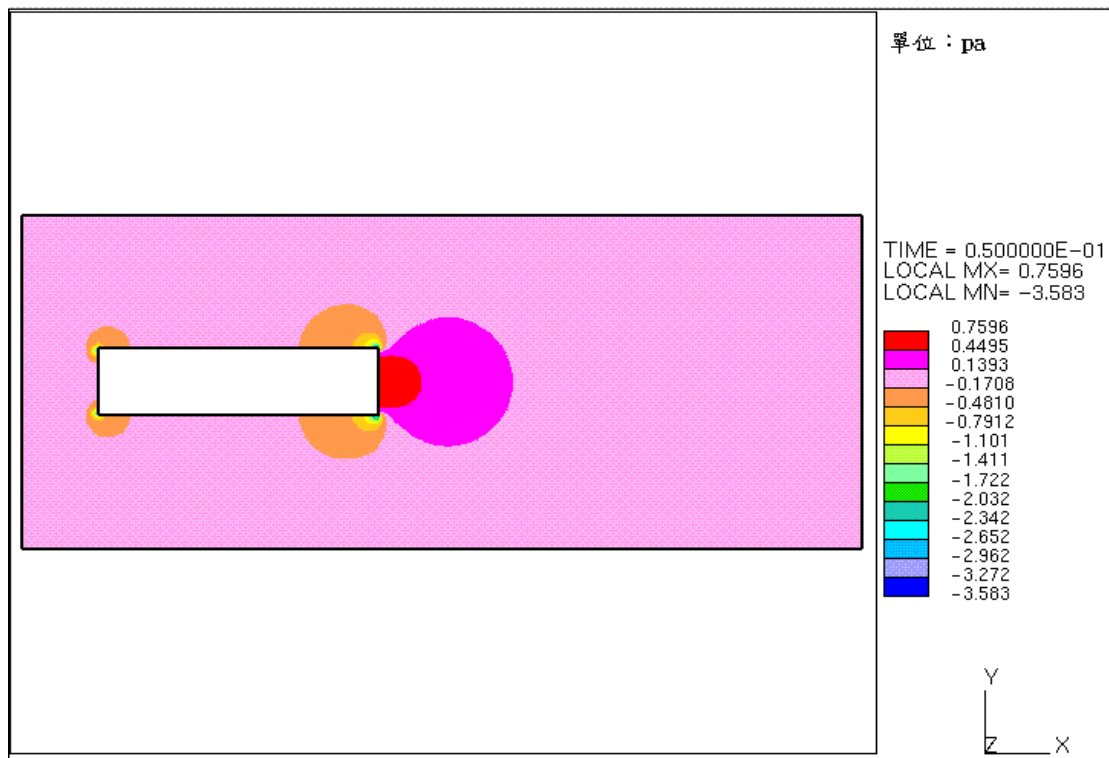


(c) 2 秒速度向量圖

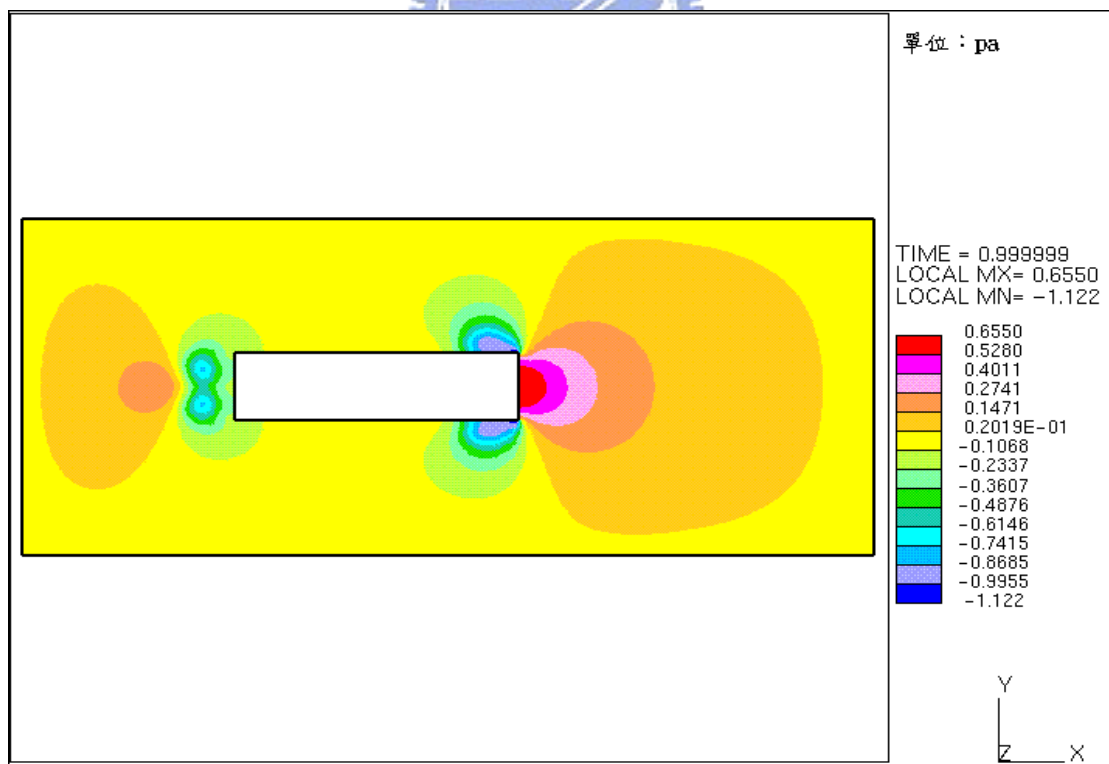


(d) 3 秒速度向量圖

圖 4-1 移動物體之速度向量變化圖

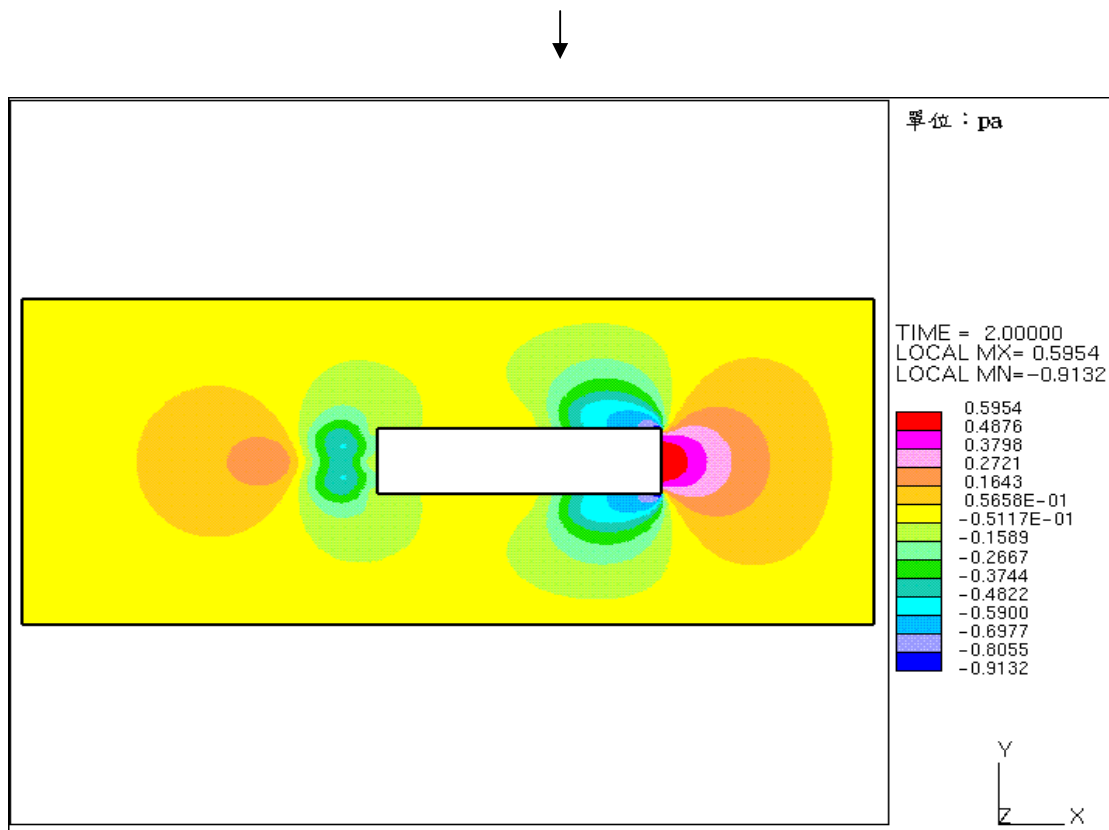


(a) 0.05 秒壓力分佈圖

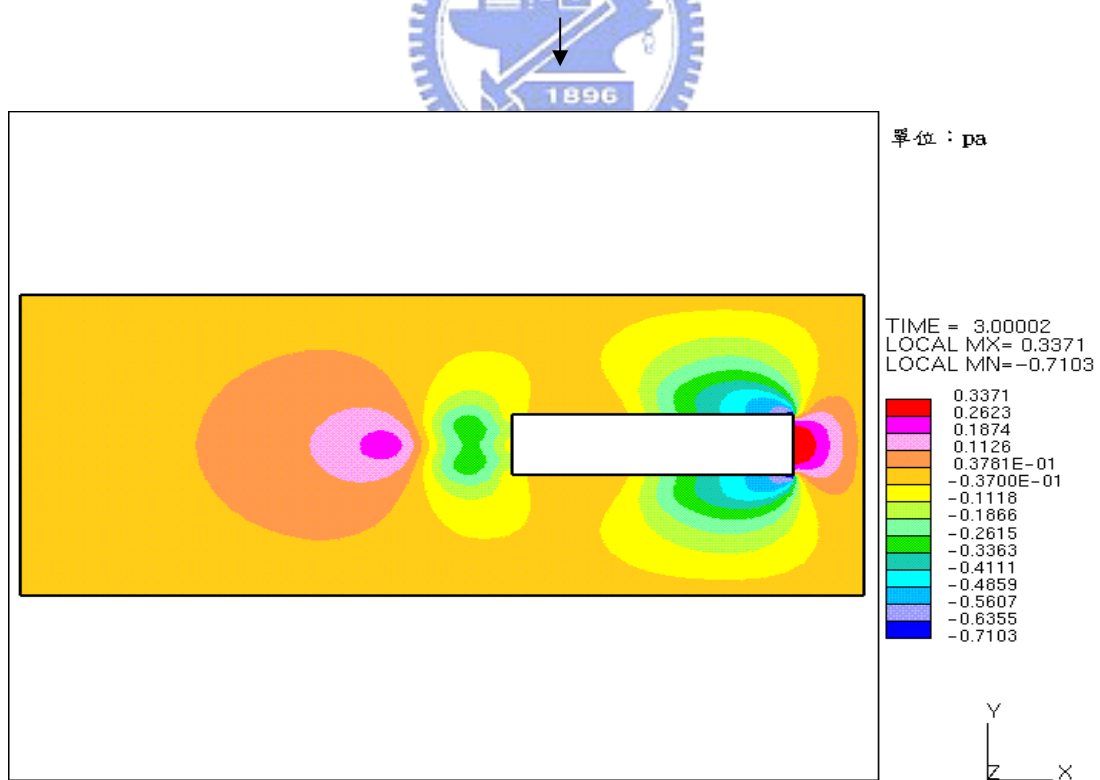


(b) 1 秒壓力分佈圖

圖 4-2 移動物體之壓力變化圖



(c) 2 秒壓力分佈圖



(d) 3 秒壓力分佈圖

圖 4-2 移動物體之壓力變化圖

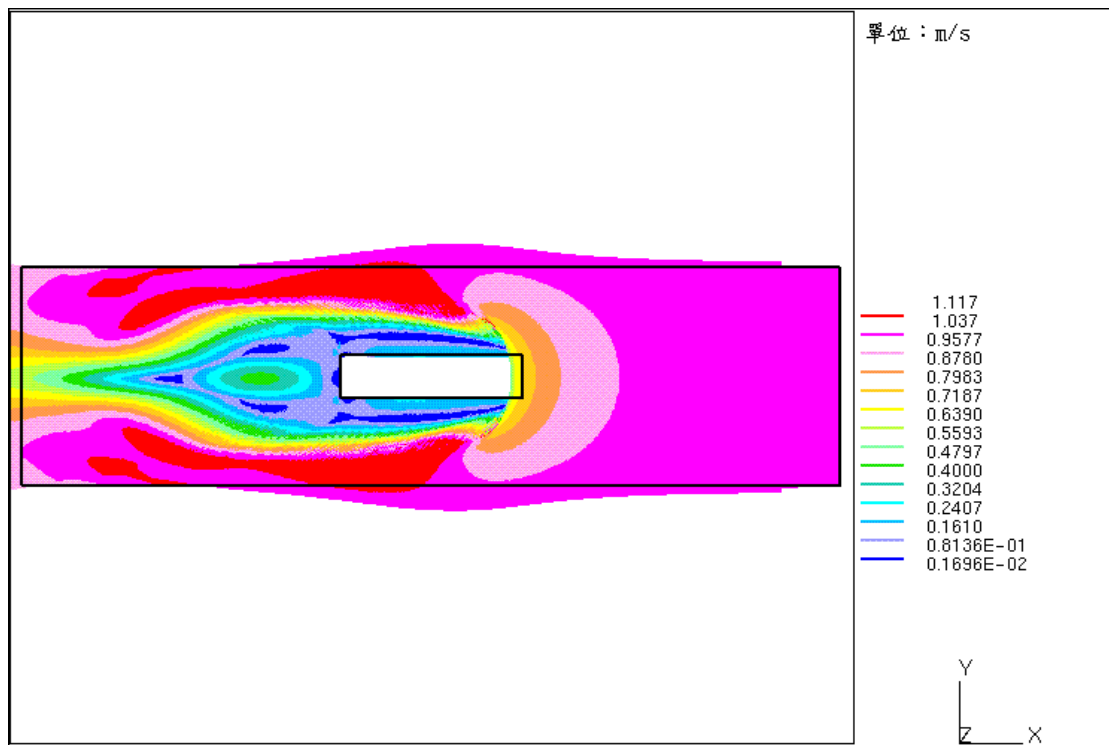


圖 4-3 穩態流場之速度向量圖

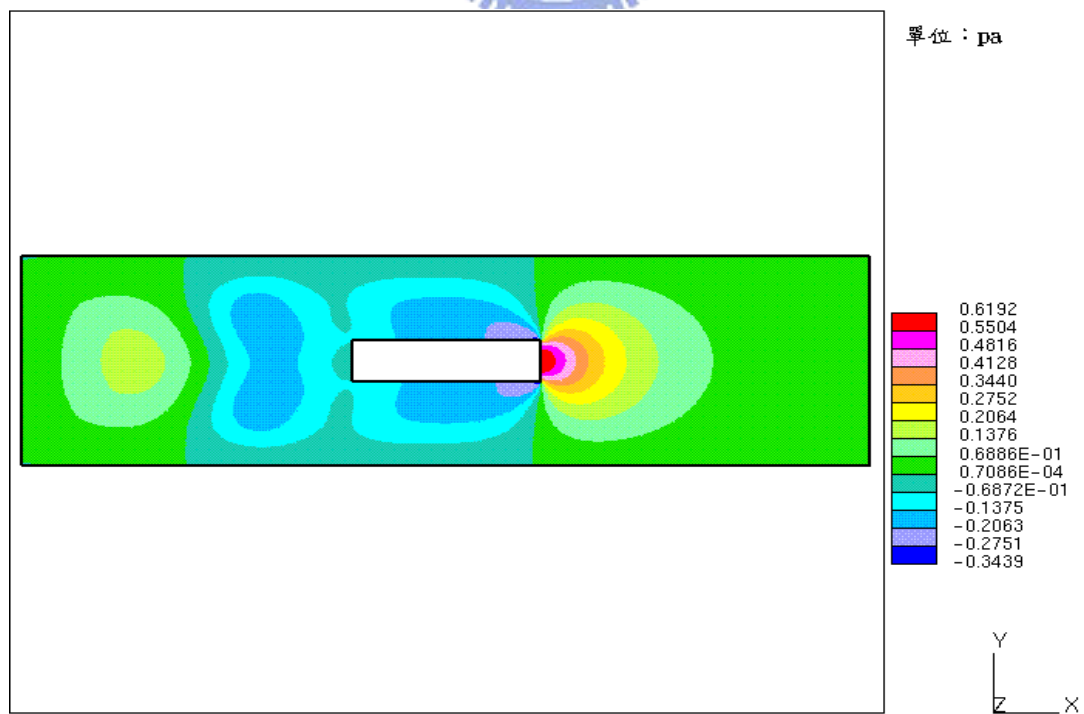


圖 4-4 穩態流場之壓力分佈圖

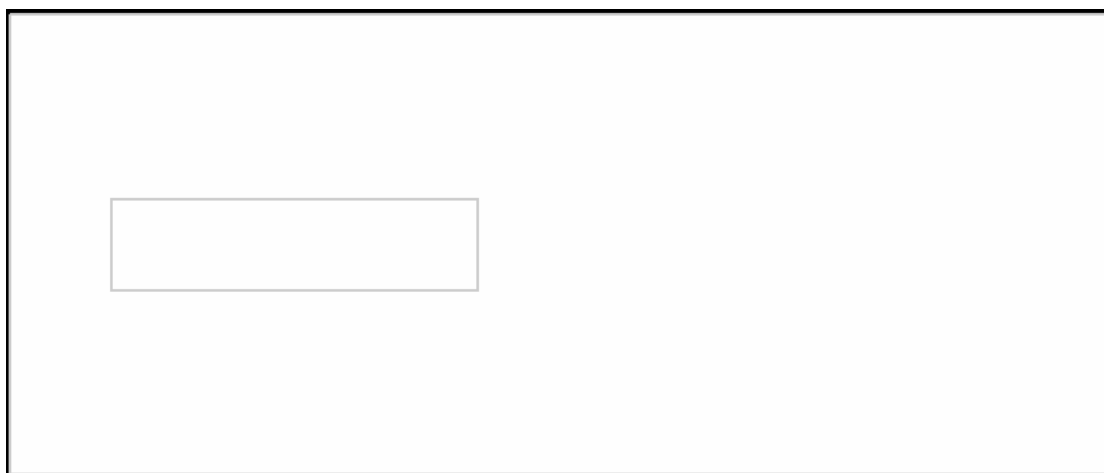
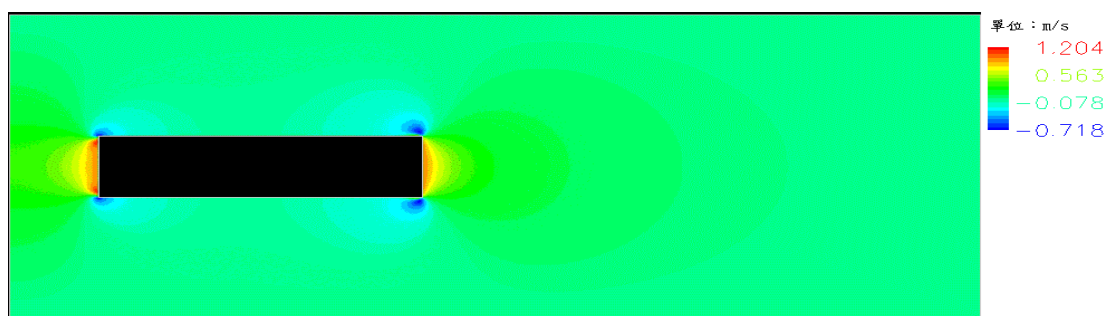
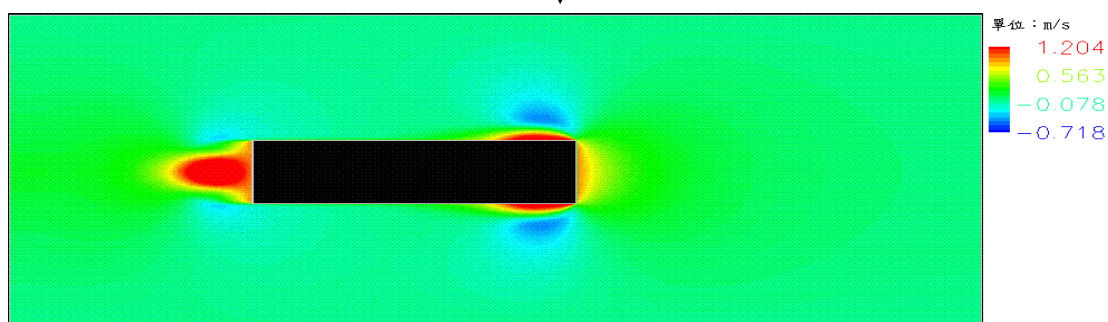


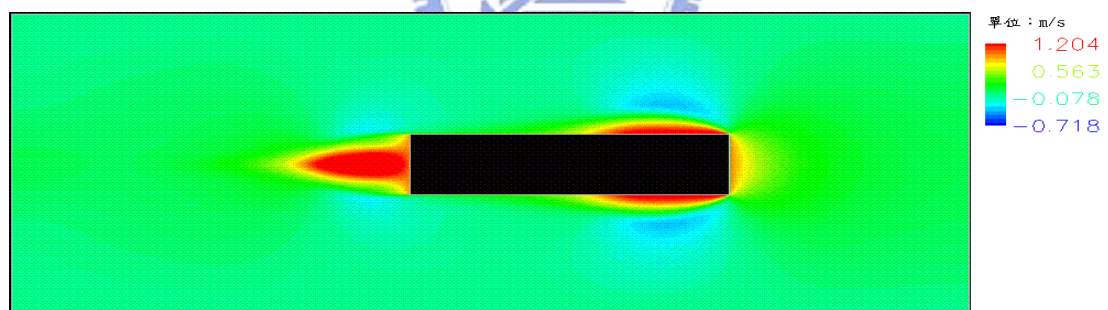
圖 4-5 視覺化範圍



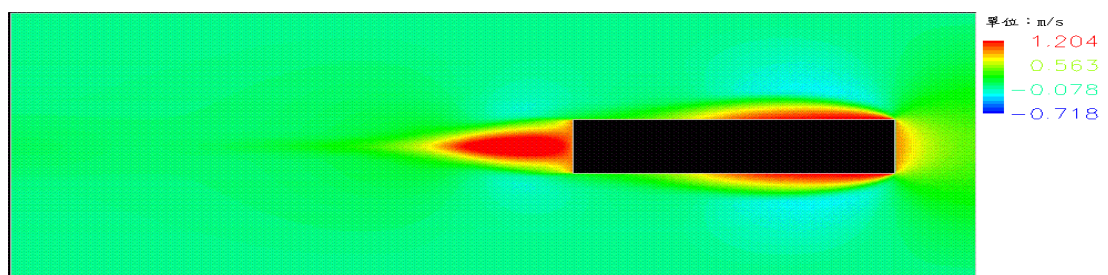
(a) 0.05 秒之速度純量圖



(b) 1 秒之速度純量圖



(c) 2 秒之速度純量圖



(d) 3 秒之速度純量圖

圖 4-6 移動物體之速度純量變化圖

由圖 4-6 顯示，由於物體前進，後方的低壓區會有四周的氣流和前方受到推擠的氣流來填補，物體兩側的速度會受到物體的前進時帶動而向右前進，並隨時間增加，而速度範圍(紅色區域)越來越大，當速度範圍不再增大時，便達到穩態。

計算出流場之速度分佈後，在視覺化範圍的節點處放置多顆空氣粒子，並且釋放空氣粒子，紀錄各空氣粒子之軌跡。為達到視覺化範圍內氣流連續之效果，在同時釋放所有空氣粒子時，在視覺化範圍內將會出現空氣粒子連續運動的現象。接著經由判斷流場的速度向量圖製作流場中的渦流動畫，如圖 4-7、4-8 所示，經由速度向量圖判斷出移動物體和穩態流場在流場中的渦流發生地點，移動物體的渦流發生在物體的兩側，而穩態流場則是位於物體的兩側和後方，如圖 4-7、4-8 中紅色區域所示。為了達到渦流可視化並使渦流具有動畫的效果的，本文在渦流發生處的計算節點上的適當位置，放置多顆空氣粒子，同時釋放這些空氣粒子時，空氣粒子將會根據渦流處的速度分佈運動，該處的渦流形狀將可經由空氣粒子的連續運動軌跡描述，在此過程的同時運用影像擷取軟體，擷取視覺化範圍內的粒子運動情況。本文移動物體之渦流可視化，可分為兩種，如圖 4-9 之(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)和圖 4-10 之(a)、(b)、(c)、(d)、(e)，穩態流場之渦流可視化如圖 4-11 所示，分別為將流場中不同的渦流產生處，運用上述方法所得到的結果。

完成渦流處的可視化後，同時釋放所有的空氣粒子，圖 4-12、4-13 為移動物體和固定不動物體之視覺化範圍內所有空氣粒子之運動軌跡，以影像編輯軟體錄製視覺化範圍內空氣粒子的運動情形的動畫即完成氣流場動畫的製作。如動畫 4-4、4-5 所示。為了更方便觀察流場中的變化情形，將動畫 4-4、4-5 合併製作成一個動畫，以便在同一畫面上觀察到兩動畫同時播放，如動畫 4-6 所示。

根據模擬結果可發現移動物體在流場中移動時，物體後方產生低壓區，所以會有物體擠壓流體而四周流體填補因物體移動所產生的空洞之物理現象，且物體前方兩側也產生低壓區，所以造成物體兩側會有迴流的產生，而物體後方會因物體移動牽引周圍流場填補物體後方空洞的現象，如動畫 4-4 所示。以相對速度模

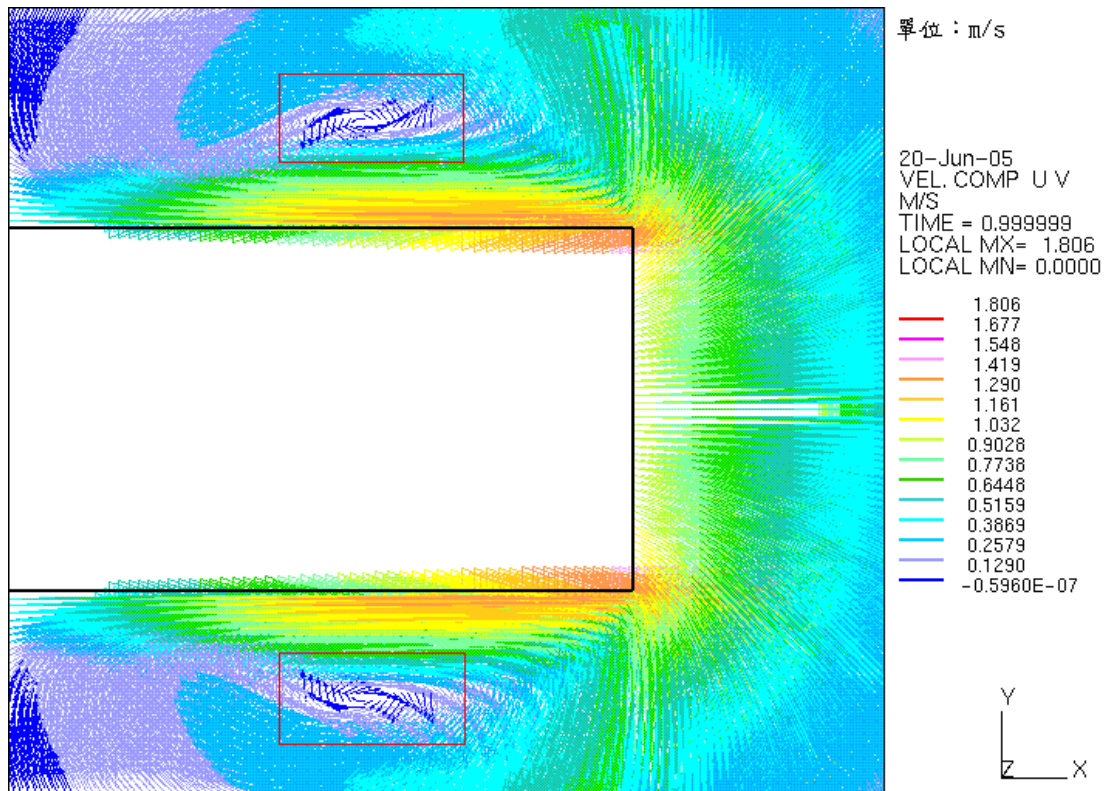


圖 4-7 移動物體在流場中渦流產生處

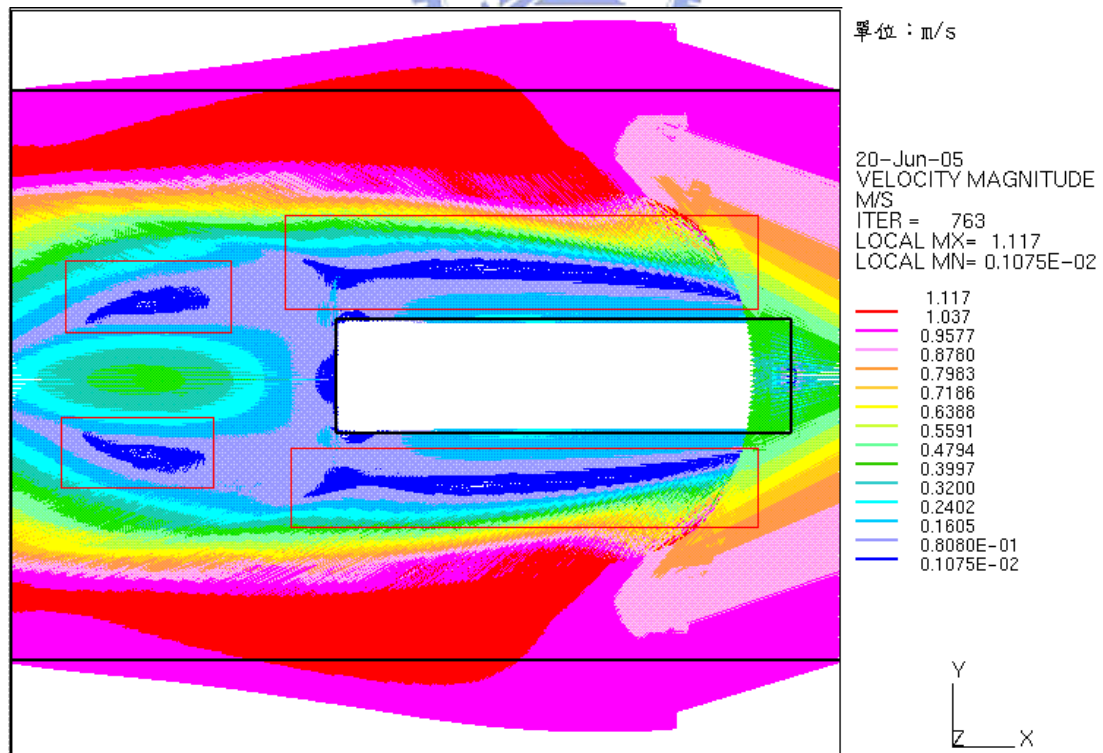
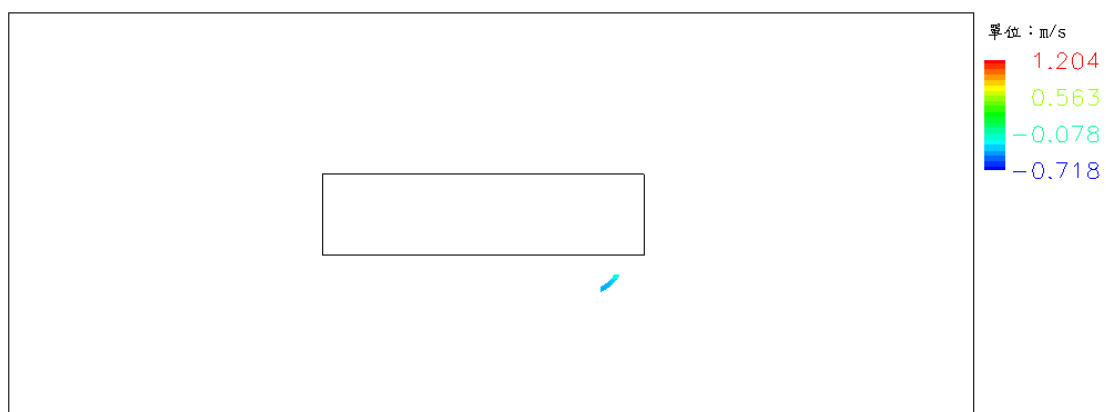
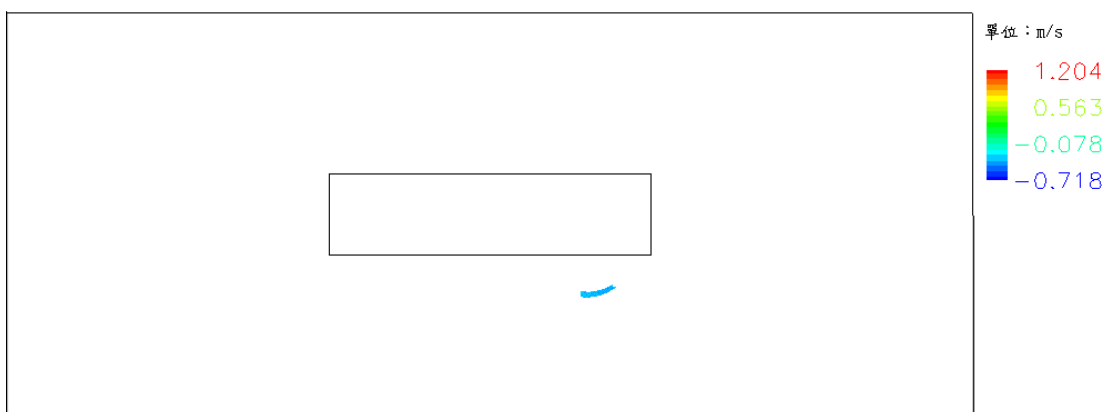


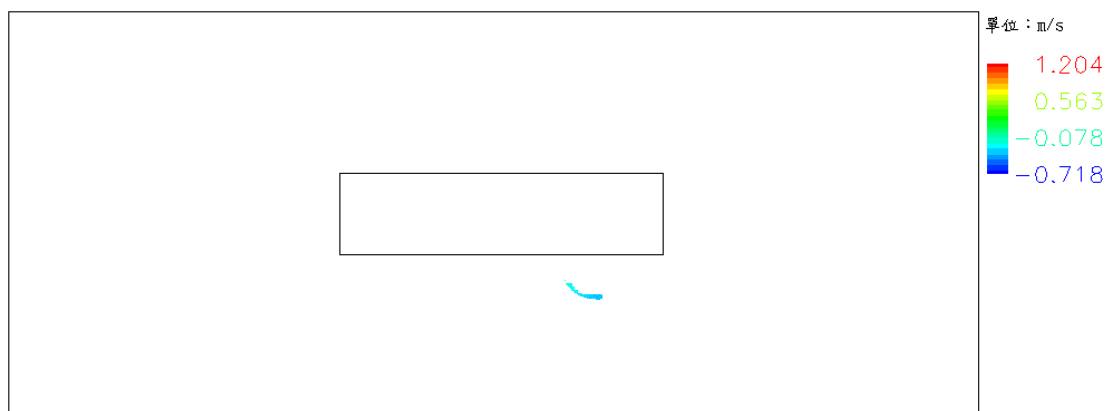
圖 4-8 穩態流場渦流產生處



(a) 暫態流場之渦流運動情形 1



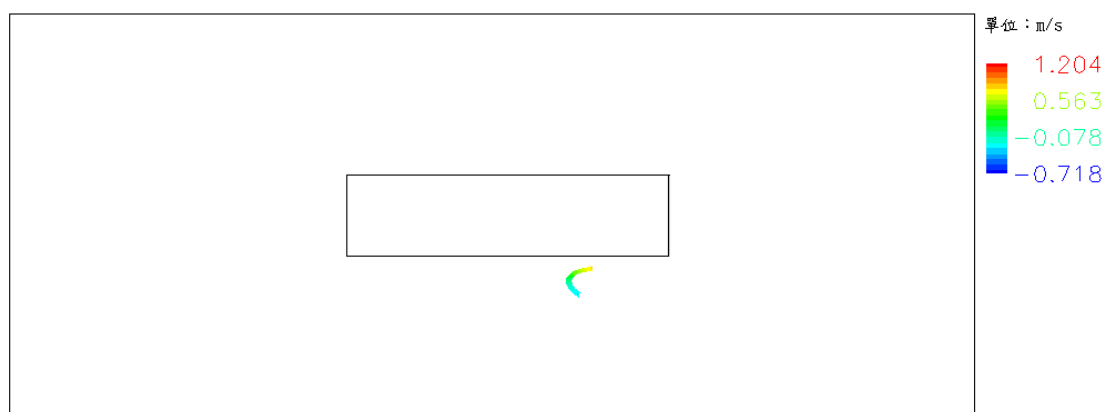
(b) 暫態流場之渦流運動情形 2



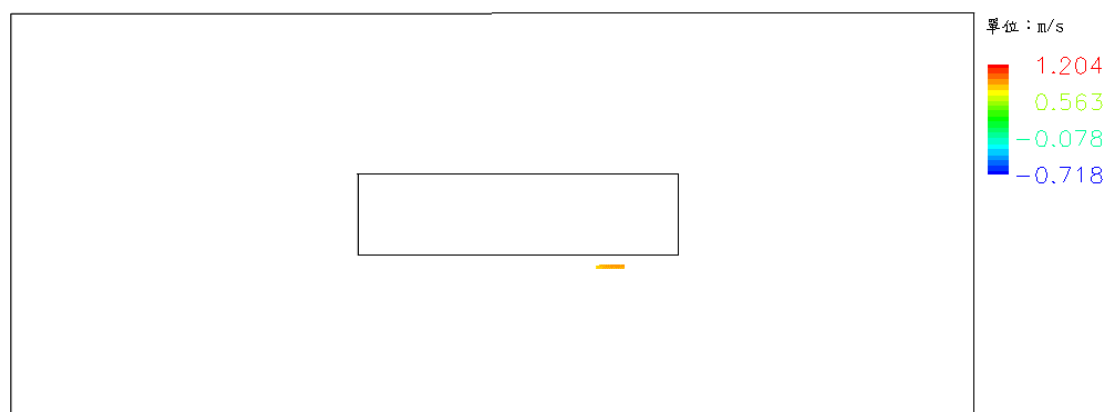
(c) 暫態流場之渦流運動情形 3

圖 4-9 暫態流場之渦流運動過程

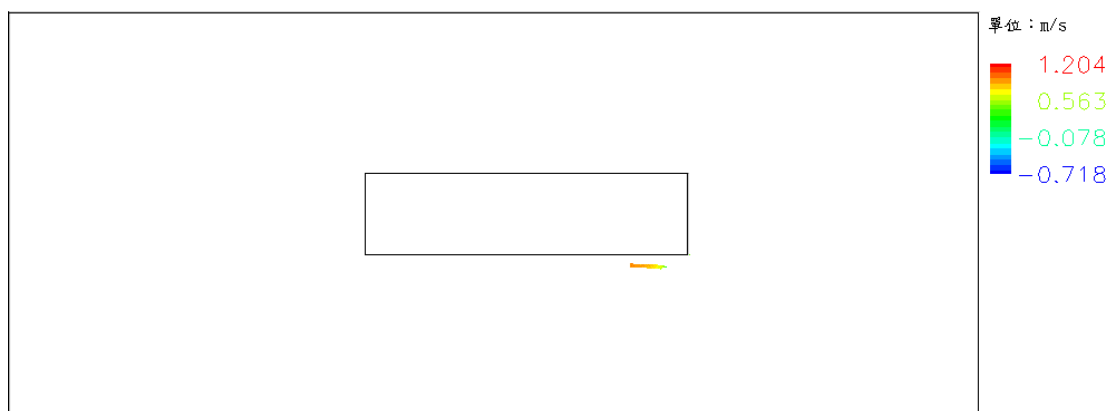




(d) 暫態流場之渦流運動情形 4

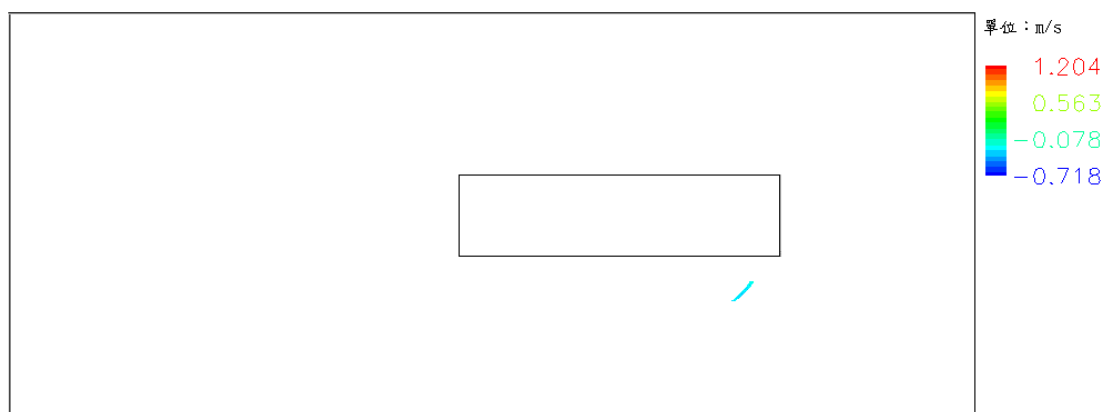


(e) 暫態流場之渦流運動情形 5

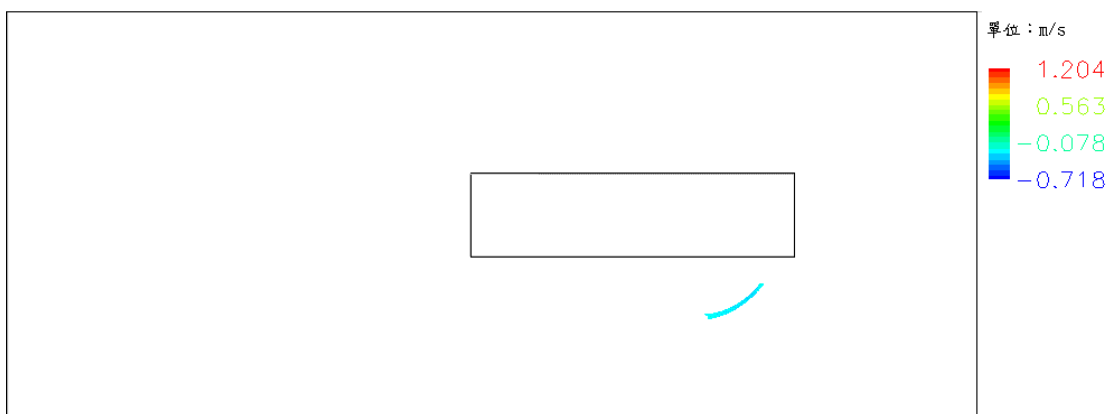


(f) 暫態流場之渦流運動情形 6

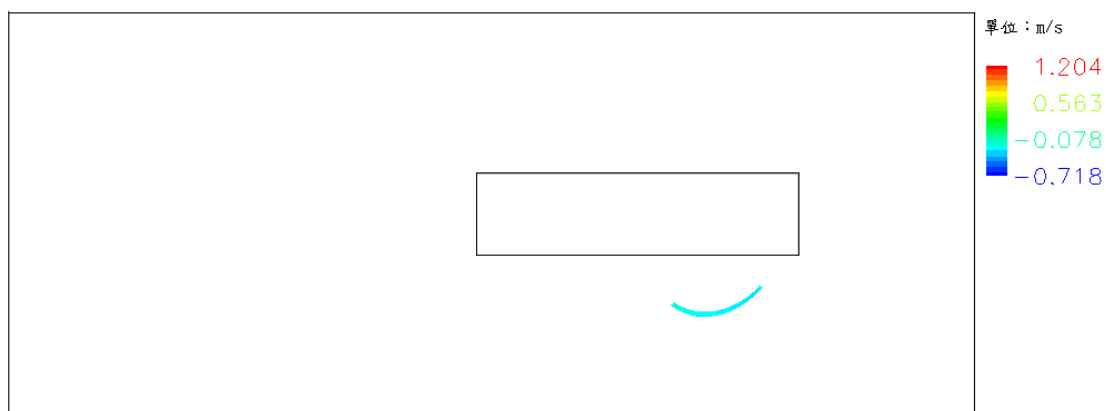
圖 4-9 暫態流場之渦流運動過程



(a) 暫態流場之連續性渦流運動情形 1



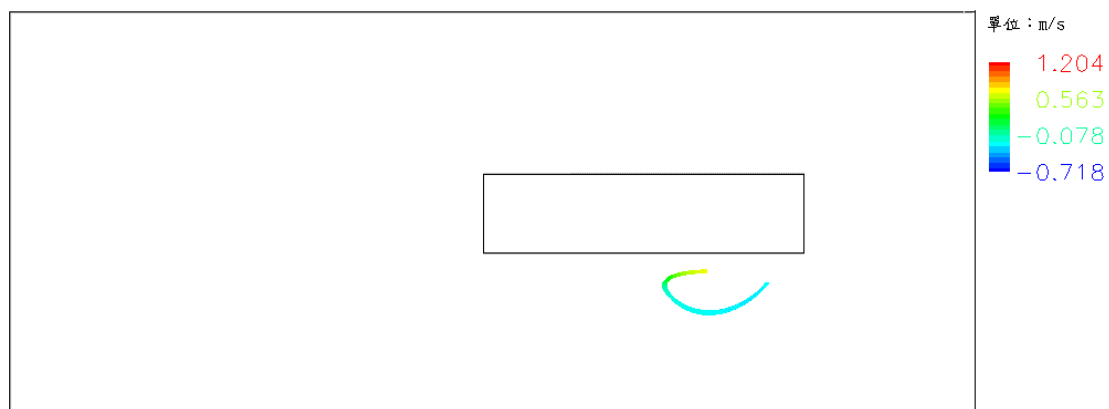
(b) 暫態流場之連續性渦流運動情形 2



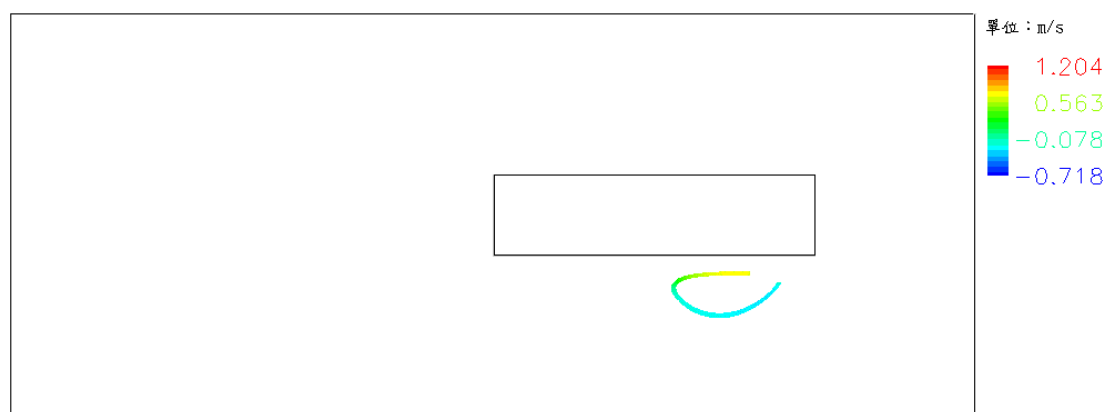
(c) 暫態流場之連續性渦流運動情形 3

圖 4-10 暫態流場之連續性渦流運動過程





(d) 暫態流場之連續性渦流運動情形 4



(e) 暫態流場之連續性渦流運動情形 5

圖 4-10 暫態流場之連續性渦流運動過程

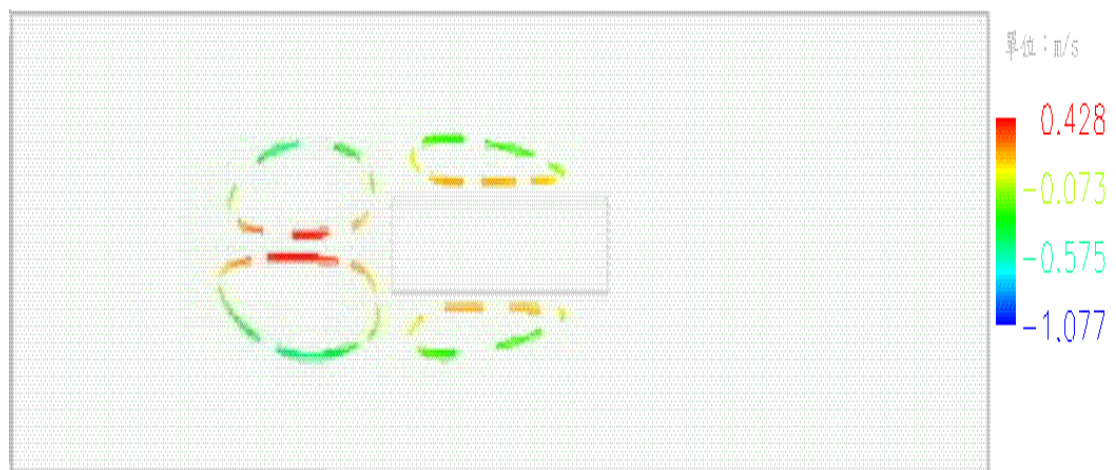


圖 4-11 穩態流場渦流產生處

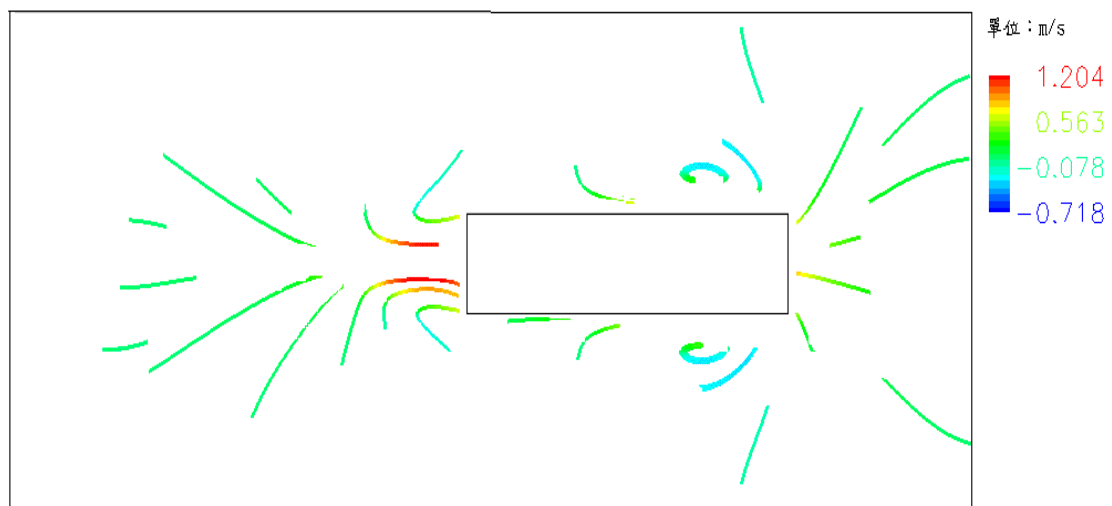


圖 4-12 移動物體之所有空氣粒子釋情形

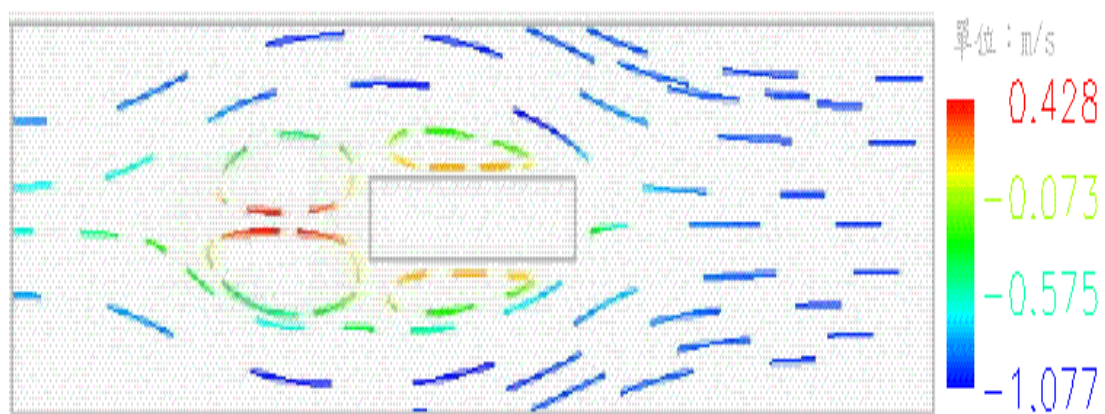


圖 4-13 穩態流場之所有空氣粒子釋情形

擬固定不動物體流場周圍的變化，如動畫 4-5 所示，因流體碰到物體時會向兩旁移動，造成物體周圍兩側產生低壓區域，而流體填補低壓區域產生迴流現象。在物體後方因為分開的流體匯集一起，所以物體後方和流體匯集之間的區域會有低壓區產生，而有迴流的現象。利用兩種不同的條件來模擬比較，當物體往前移動時，物體後方的流體不是往左方移動，反而是因低壓的影響，導致後方的流體會隨著物體的移動而往右方移動。



4.2 汽車排氣污染情形

此部分將汽車排氣污染的情形分為四部份，分別為(1)根據圖 2-2 之物理模式模擬汽車在 15m/s、30m/s 的情況下汽車排放廢氣的污染情形。(2)根據圖 2-4 之物理模式模擬汽車在固定不動的情況下汽車排放廢氣的污染情形。(3)根據圖 2-3 之物理模式模擬汽車於陣列情況下以 15m/s 的速度前進造成排放廢氣的污染情形。(4)根據圖 2-5、2-6 之物理模式模擬汽車以 30m/s 的速度在順風和逆風情況下前進，汽車排放廢氣的污染情形。

(1)根據圖 2-2 之物理模式所示，模擬汽車在不同車速的條件下，各暫態時間流場之濃度分佈，並製作濃度擴散、速度純量和壓力之動畫。本文使用 25°C 的空氣為工作流體，密度： $1.205\text{kg}/\text{m}^3$ 、黏性係數： $1.81\times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ 。濃度發散源之污染物為 CO，密度： $1.1453\text{kg}/\text{m}^3$ 、相對於空氣之擴散係數： $3.004\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 。

本文模擬的車速條件分別為汽車在 15m/s、30m/s 的情況下汽車排放廢氣的污染情形，排氣管的排氣速度分別為 6m/s、7.5m/s。

圖 4-14 之(a)、(b)、(c)、(d)為汽車以 15m/s 的速度情況下，在時間 0.4 秒、1 秒、1.4 秒、2 秒時的速度分佈圖。

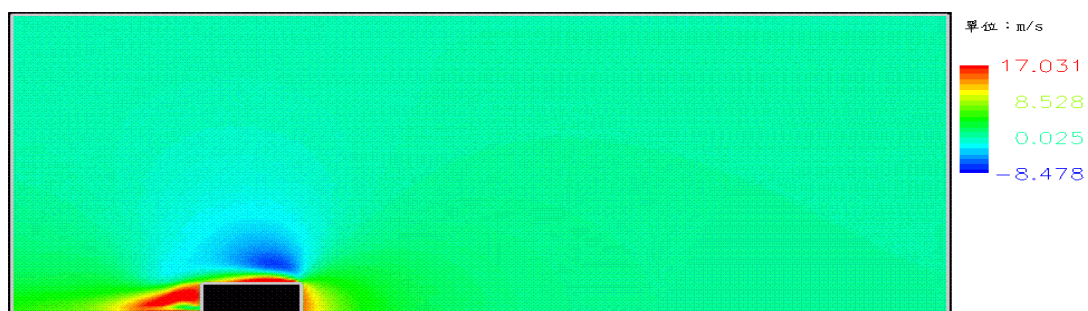
圖 4-15 之(a)、(b)、(c)、(d)為汽車以 30m/s 的速度情況下，在時間 0.2 秒、0.5 秒、0.7 秒、1 秒時的速度分佈圖。

圖 4-16 之(a)、(b)、(c)、(d)為汽車以 15m/s 的速度情況下，在時間 0.4 秒、1 秒、1.4 秒、2 秒時的壓力分佈圖。

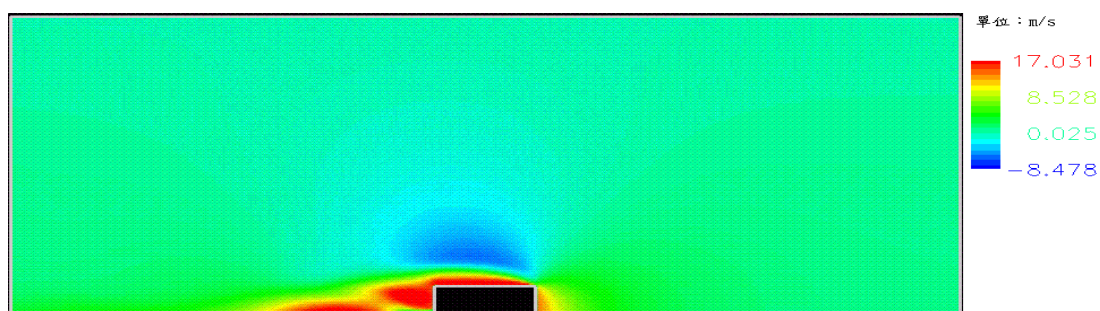
圖 4-17 之(a)、(b)、(c)、(d)為汽車以 30m/s 的速度情況下，在時間 0.2 秒、0.5 秒、0.7 秒、1 秒時的壓力分佈圖。

圖 4-18 之(a)、(b)、(c)、(d)為汽車以 15m/s 的速度情況下，在時間 0.4 秒、1 秒、1.4 秒、2 秒時的濃度分佈圖。

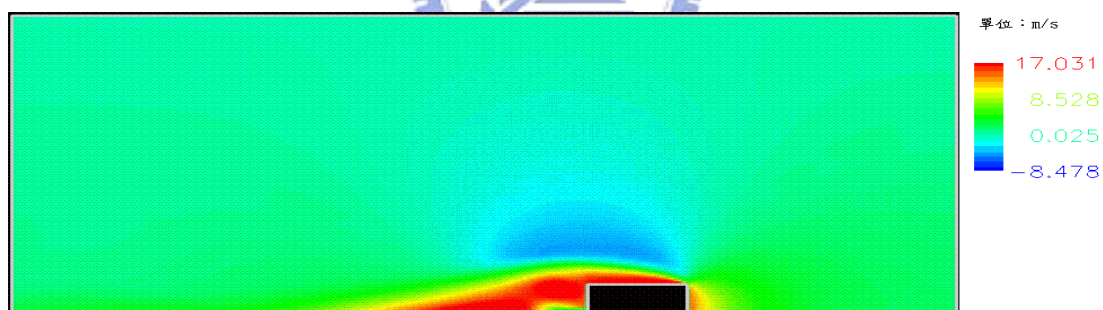
圖 4-19 之(a)、(b)、(c)、(d)為汽車以 30m/s 的速度情況下，在時間 0.2



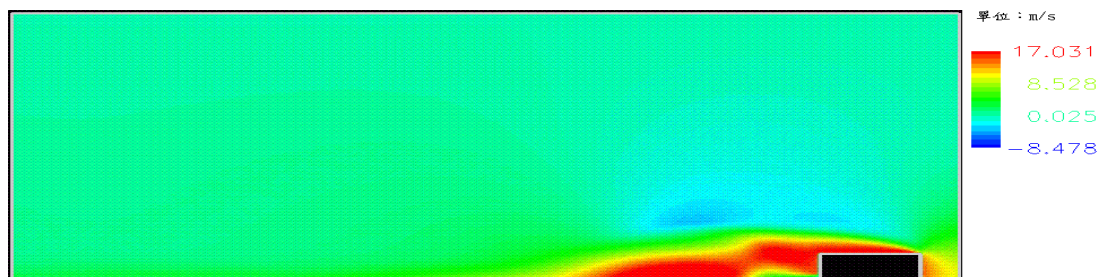
(a) 0.4 秒之速度分佈圖



(b) 1 秒之速度分佈圖

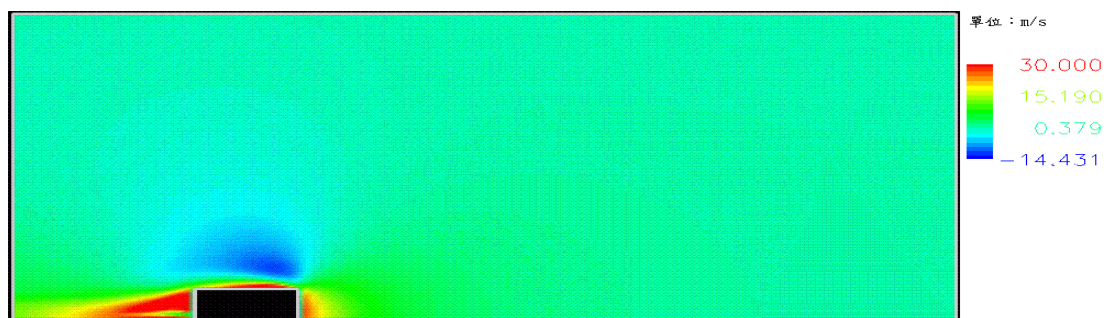


(c) 1.4 秒之速度分佈圖

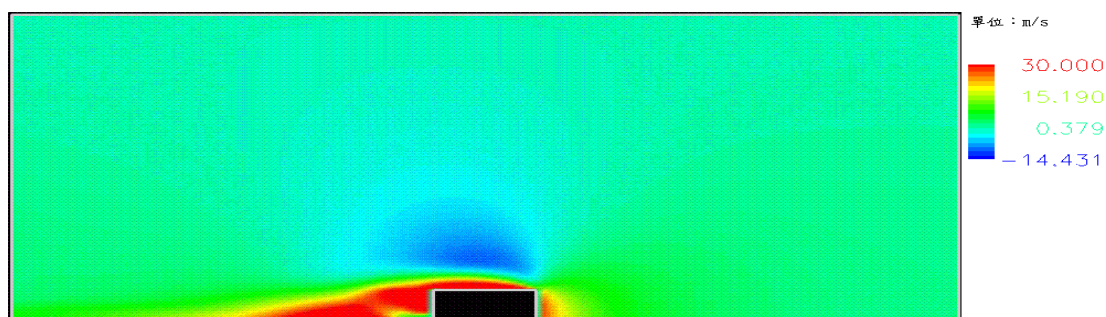


(d) 2 秒之速度分佈圖

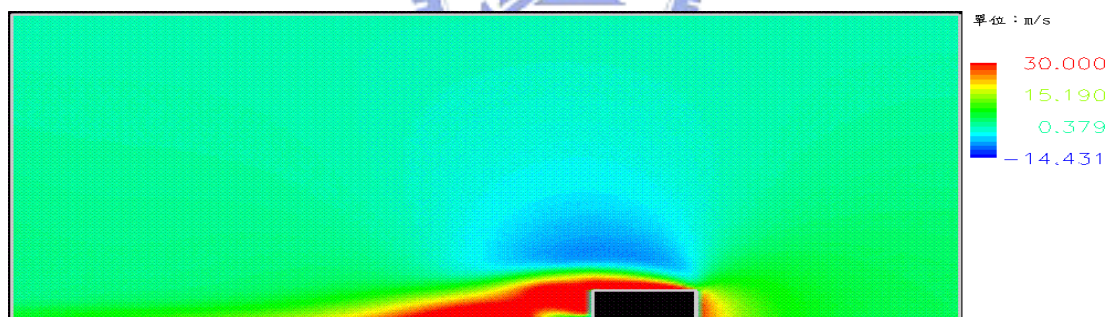
圖 4-14 車速為 15m/s 之速度分佈圖



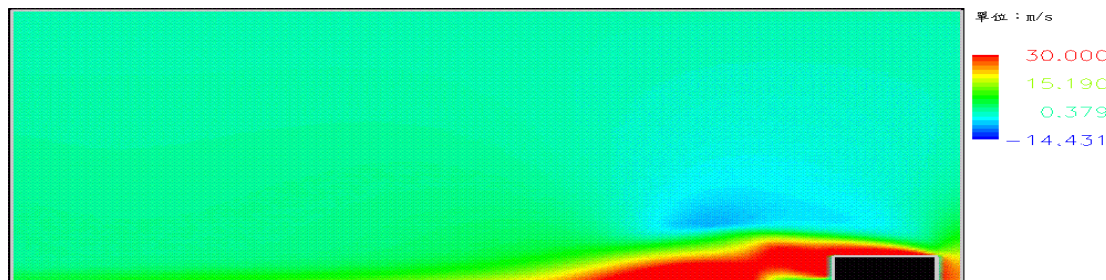
(a) 0.2 秒之速度分佈圖



(b) 0.5 秒之速度分佈圖

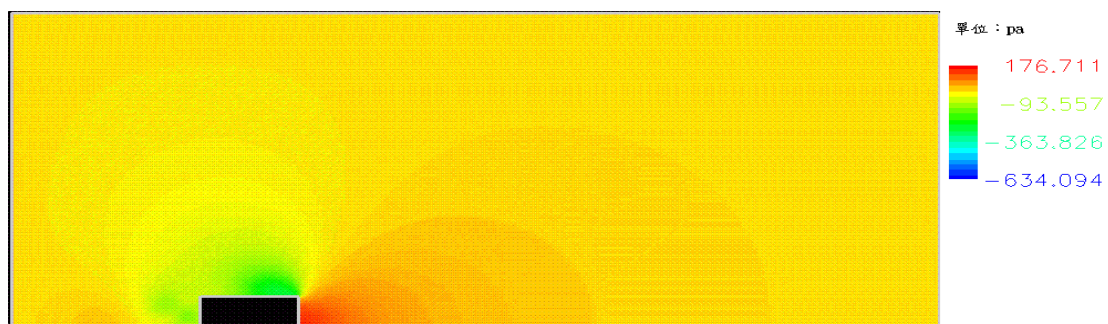


(c) 0.7 秒之速度分佈圖

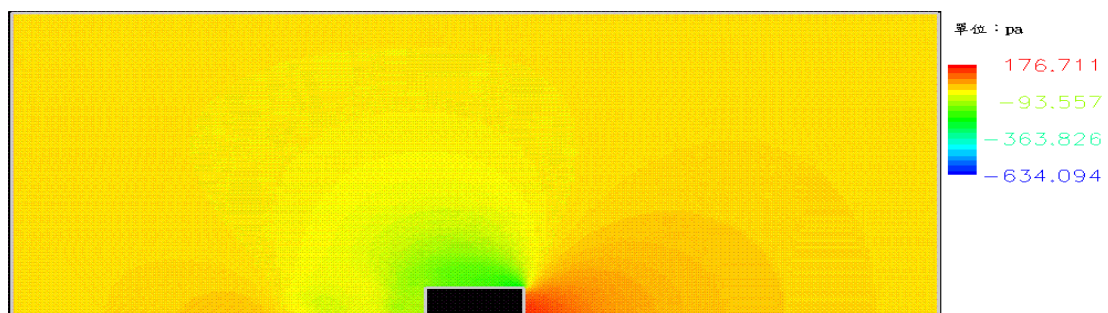


(d) 1 秒之速度分佈圖

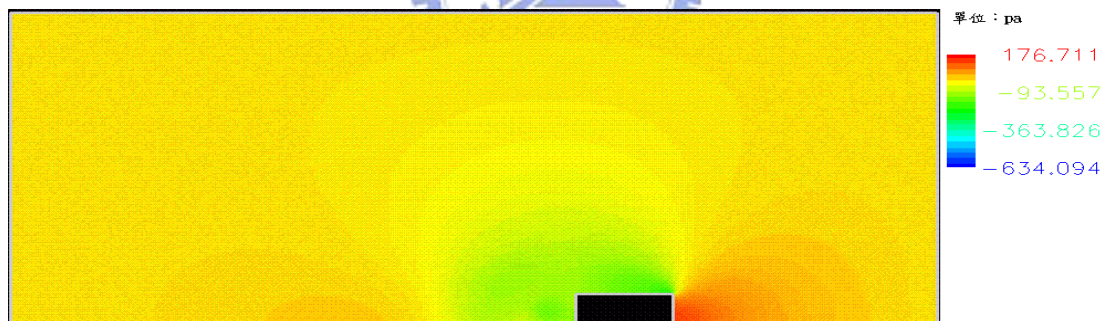
圖 4-15 車速為 30m/s 之速度分佈圖



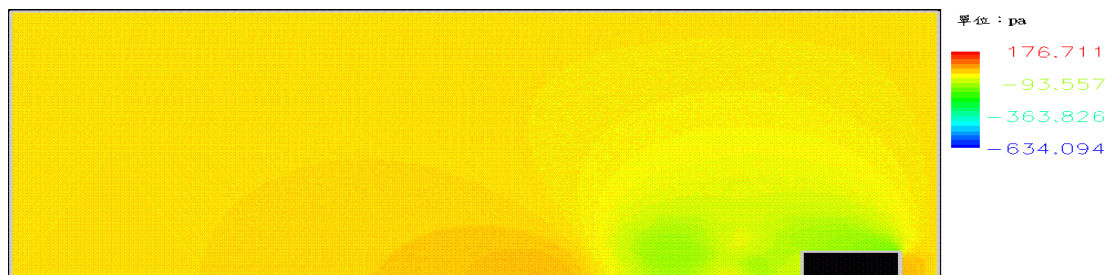
(a) 0.4 秒之壓力分佈圖



(b) 1 秒之壓力分佈圖

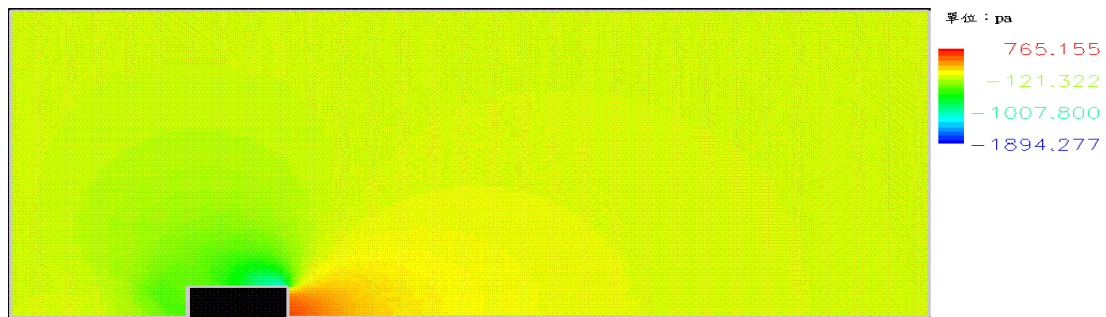


(c) 1.4 秒之壓力分佈圖

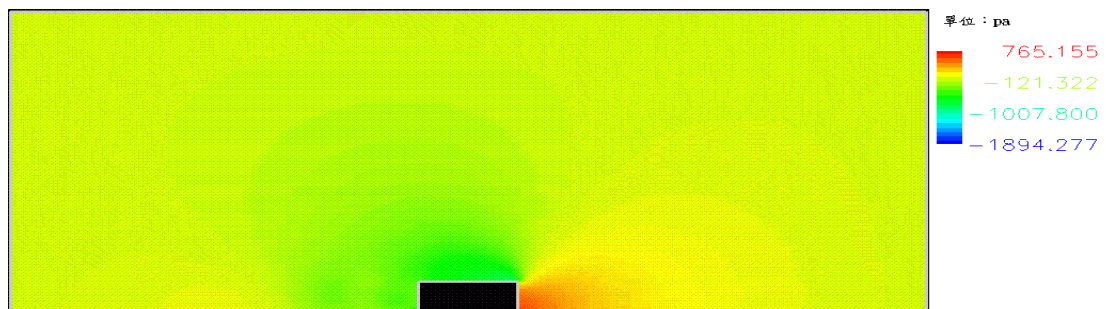


(d) 2 秒之壓力分佈圖

圖 4-16 車速為 15m/s 之壓力分佈圖



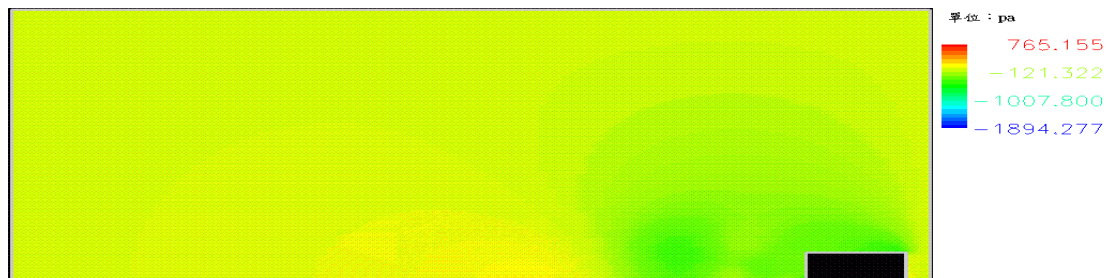
(a) 0.2 秒之壓力分佈圖



(b) 0.5 秒之壓力分佈圖

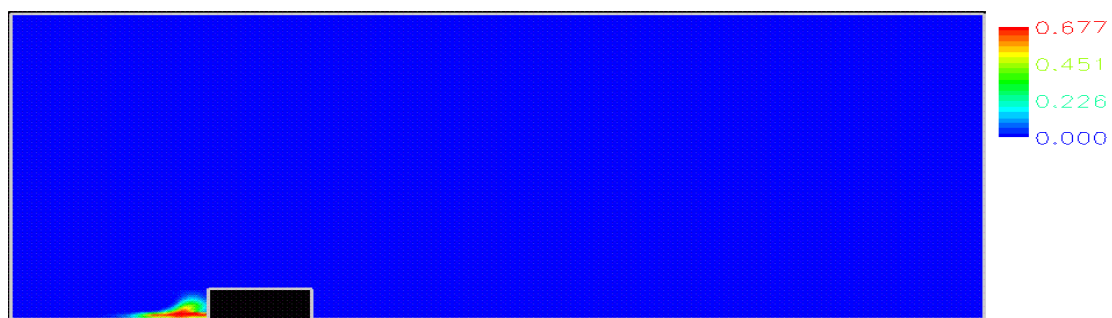


(c) 0.7 秒之壓力分佈圖

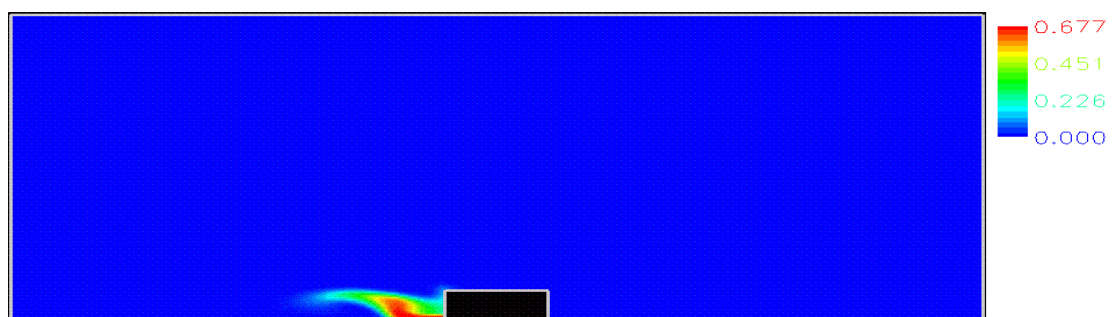


(d) 1 秒之壓力分佈圖

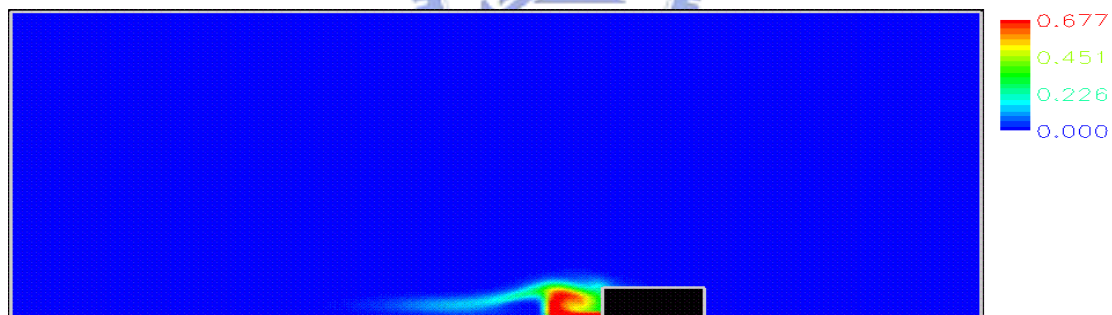
圖 4-17 車速為 30m/s 之壓力分佈圖



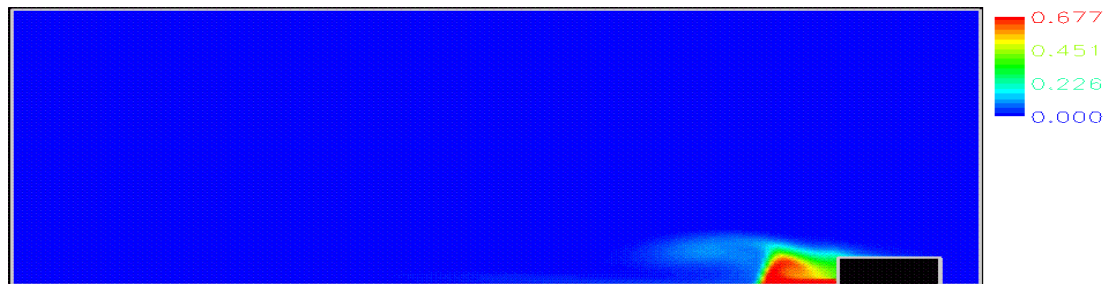
(a) 0.4 秒之濃度分佈圖



(b) 1 秒之濃度分佈圖



(c) 1.4 秒之濃度分佈圖



(d) 2 秒之濃度分佈圖

圖 4-18 車速為 15m/s 之濃度分佈圖

秒、0.5 秒、0.7 秒、1 秒時的濃度分佈圖。

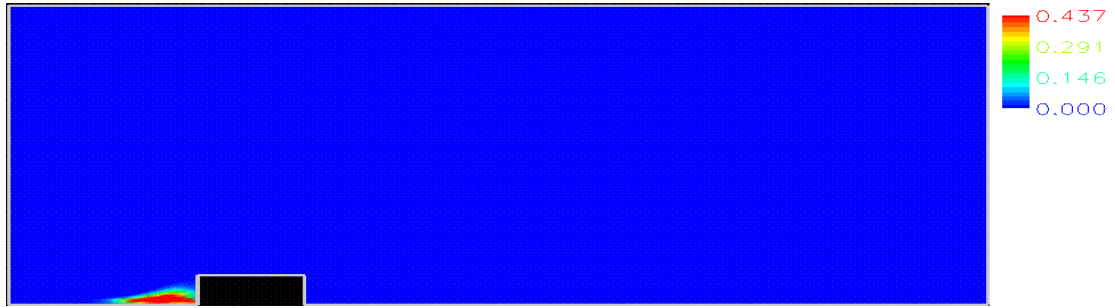
由於流場變化的情形是隨著時間改變，使用後處理軟體來處理暫態流場中各暫態時間流場變化的情形，可獲得較佳的視覺效果，於是本文對於製作暫態流場變化的動畫，採用後處理軟體來製作。如動畫 4-7、4-8 分別為汽車在 15m/s 時的速度純量、濃度之動畫。動畫 4-9、4-10 分別為汽車在 30m/s 時的速度純量、濃度之動畫。

計算出流場濃度分佈後，於流場中之適當計算節點上放置與空氣密度相同之微小粒子，並指定空氣粒子之顏色將會隨著所經過位置之濃度而改變，為了能夠更真實的呈現微小粒子於流場中移動時被濃度源污染之情形，本文撰寫濃度分佈之檔案，指定微小粒子未被污染前為藍色，並依照污染的程度不同而改變成綠色、黃色、紅色。流場中的氣流場以白色來表示。於流場中放置之微小粒子釋放後，將會沿著所屬流線移動，在其移動過程，微小粒子之顏色將會隨著流場中各位置之濃度而改變其顏色，藉由這種方法可以清楚的觀察空氣被濃度源污染的程度及污染的大致範圍。

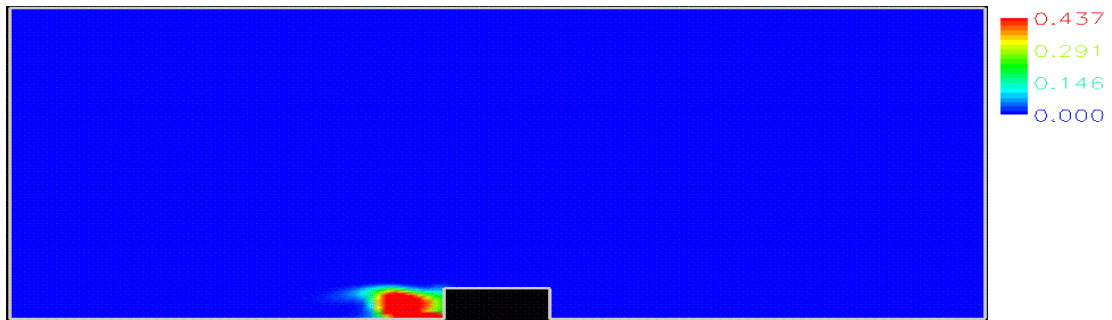
圖 4-20 之(a)、(b)、(c)、(d)為汽車在 15m/s 時，放置之微小粒子於流場中移動時被濃度污染之情形。

圖 4-21 之(a)、(b)、(c)、(d)為汽車在 30m/s 時，放置之微小粒子於流場中移動時被濃度污染之情形。微小粒子於流場中移動之動畫檔如動畫 4-11、4-12 所示，分別為汽車行進速度為 15m/s、30m/s 的情況下汽車排放廢氣的污染情形。

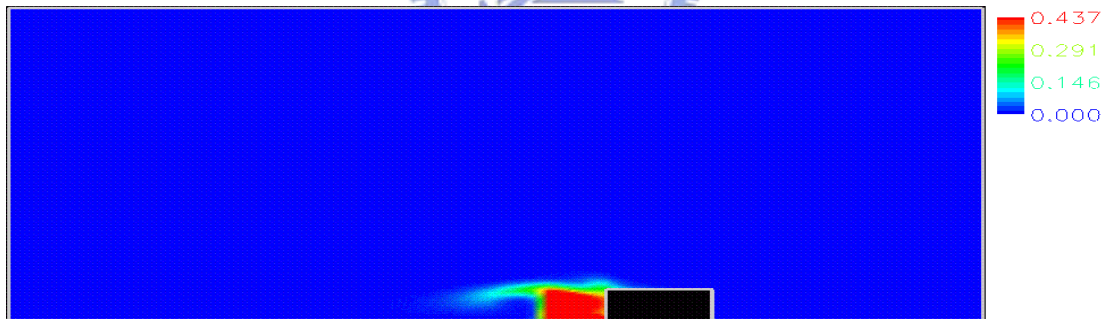
由速度純量圖中觀察可發現，由於移動物體往前移動時，推擠前方的流體造成流體需填補後方的低壓區，進而將物體後方的速度會有捲起的現象，由動畫 4-9、4-12 可發現，前方流體填補後方的結果將汽車排出的廢氣捲起，而停留在汽車後方，從汽車速度的不同可以比較出來，移動速度較快的車子所排放出的廢氣會緊跟在汽車的後方，不容易排出。從氣流場中的濃度可以看出，以 30m/s 速度移動的汽車，推擠前方流體的速度和填補汽車後方空洞現象的速度都比



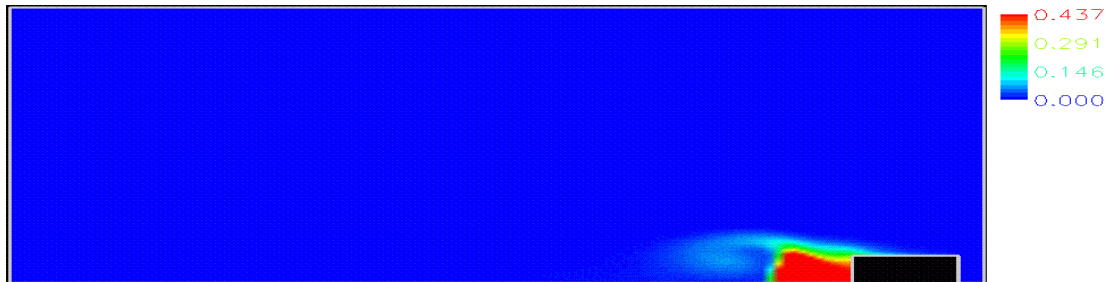
(a) 0.2 秒之濃度分佈圖



(b) 0.5 秒之濃度分佈圖

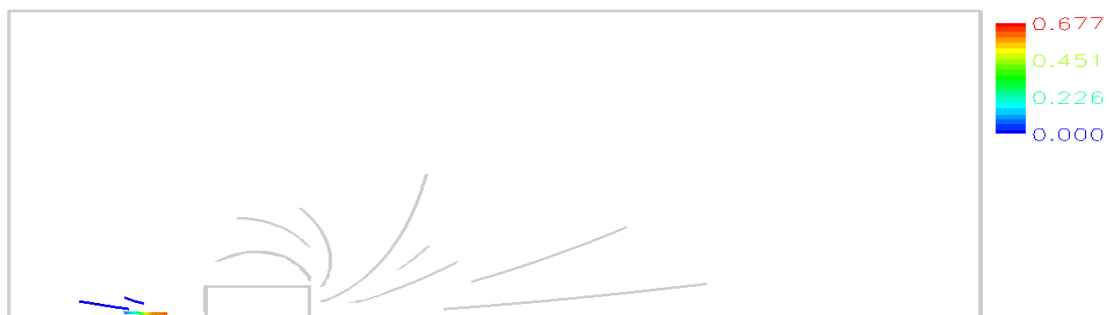


(c) 0.7 秒之濃度分佈圖

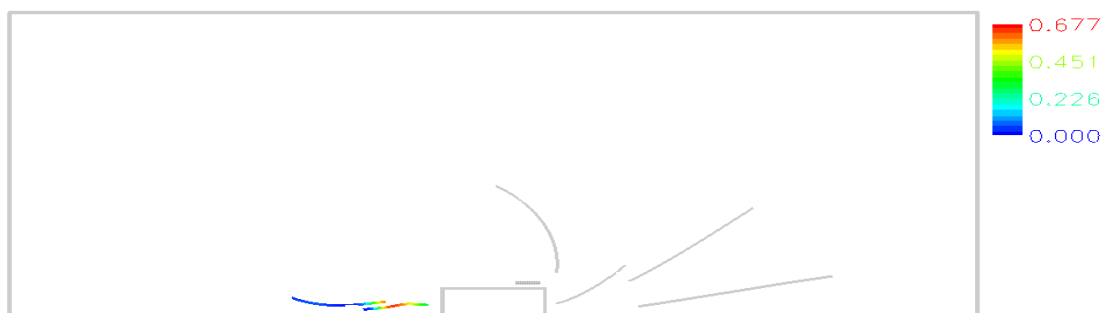


(d) 1 秒之濃度分佈圖

圖 4-19 車速為 30m/s 之濃度分佈圖



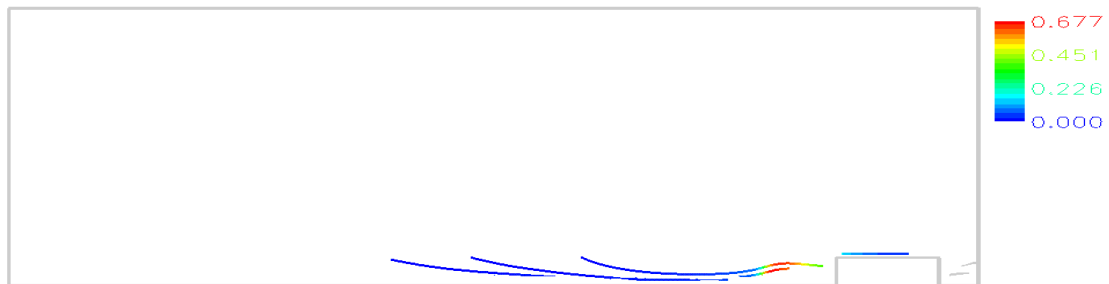
(a) 空氣粒子於 0.4 秒時受濃度源污染之情形 1



(b) 空氣粒子於 1 秒時受濃度源污染之情形 2



(c) 空氣粒子於 1.4 秒時受濃度源污染之情形 3



(d) 空氣粒子於 2 秒時受濃度源污染之情形 4

圖 4-20 車速為 15m/s 之微小粒子受濃度源污染之情形



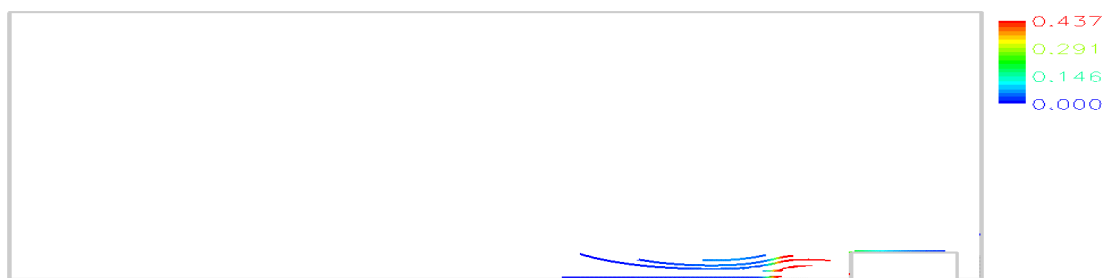
(a) 空氣粒子於 0.2 秒時受濃度源污染之情形 1



(b) 空氣粒子於 0.5 秒時受濃度源污染之情形 2



(c) 空氣粒子於 0.7 秒時受濃度源污染之情形 3



(d) 空氣粒子於 1 秒時受濃度源污染之情形 4

圖 4-21 車速為 30m/s 之微小粒子受濃度源污染之情形

15m/s 速度移動的汽車還快，所以，以 30m/s 速度移動的汽車所排出的廢氣比 15m/s 移動的汽車較不容易往外排出，反而會被後方的氣流往前推擠，造成廢氣停留在車子後方的情形更明顯。由濃度的動畫中可以比較出，車子行進越快時，前方高壓的氣流填補後方低壓區的速度也越快，更容易將汽車排放的濃度捲起而影響到車頂，反之，移動速度慢時，高壓填補低壓的速度也越慢，較不容易將汽車排放的濃度捲起而濃度不容易影響到車頂。



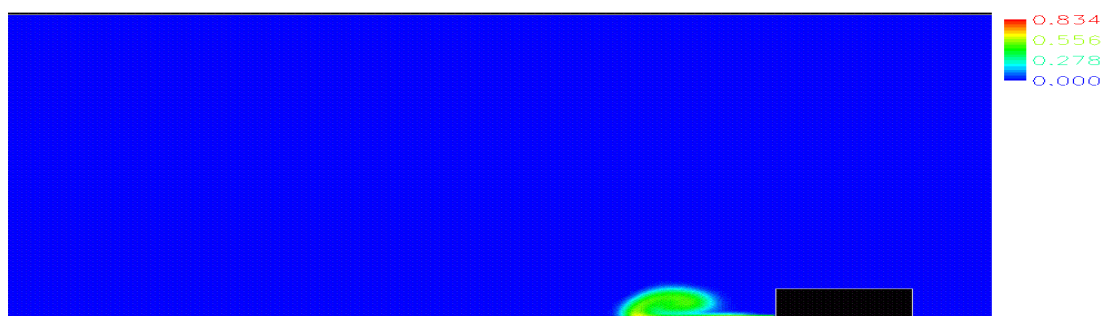
(2)根據圖 2-4 之物理模式所示，模擬汽車在固定不動的條件下，各暫態時間流場之濃度分佈，並製作濃度擴散之動畫。本文使用 25°C 的空氣為工作流體，密度： $1.205\text{kg}/\text{m}^3$ 、黏性係數： $1.81\times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ 。濃度發散源之污染物為 CO，密度： $1.1453\text{kg}/\text{m}^3$ 、相對於空氣之擴散係數： $3.004\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 。

本文模擬的車速條件是汽車固定不動，汽車排氣管的排氣速度為 10m/s，圖 4-22 之(a)、(b)、(c)、(d)為時間在 2 秒、5 秒、8 秒、10 秒的濃度分佈圖。流場中濃度擴散之動畫檔如動畫 4-13 所示。

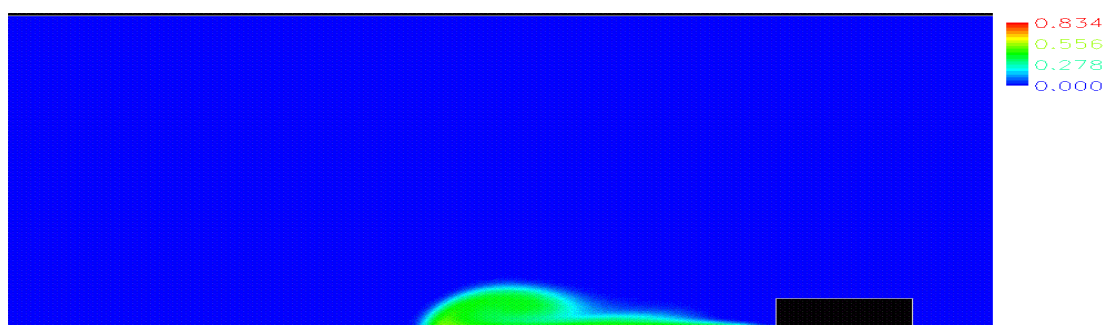
計算出流場之速度分佈後，在視覺化範圍的節點處放置多顆空氣粒子，並且釋放空氣粒子，並紀錄各空氣粒子之軌跡。為達到視覺化範圍內氣流連續之效果，在同時釋放所有空氣粒子時，在視覺化範圍內將會出現空氣粒子連續運動的現象。接著經由判斷流場的速度向量圖製作流場中的渦流動畫，經由速度向量圖判斷出移動物體和穩態流場在流場中的渦流發生地點，如圖 4-23 中紅色區域所示。為了達到渦流可視化並使渦流具有動畫的效果的，本文在渦流發生處的計算節點上的適當位置，放置多顆空氣粒子，同時釋放這些空氣粒子時，空氣粒子將會根據渦流處的速度分佈運動，該處的渦流形狀將可經由空氣粒子的連續運動軌跡描述，在此過程的同時運用影像擷取軟體，擷取視覺化範圍內的粒子運動情況，如圖 4-24 所示。

完成渦流處的可視化後，同時釋放所有的空氣粒子，以影像編輯軟體錄製視覺化範圍內空氣粒子的運動情形的動畫即完成氣流場動畫的製作，如動畫 4-14 所示。

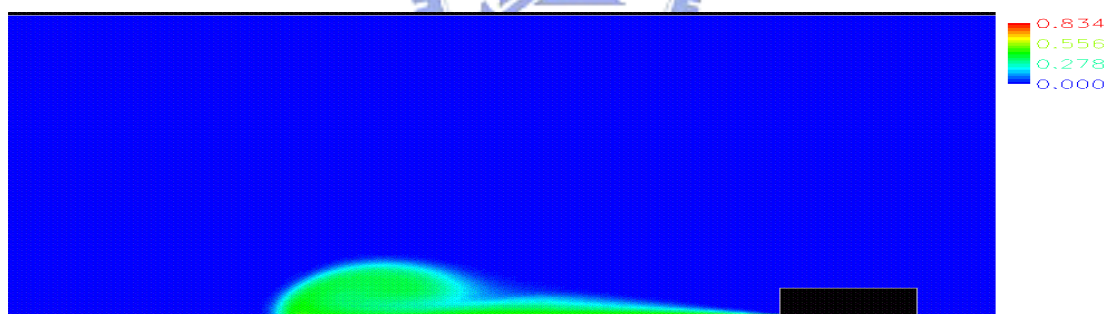
由動畫中可發現，靠近污染源的地方濃度污染最嚴重，隨著時間的增長，濃度擴散的範圍越遠，但污染的程度也降低許多，當汽車固定不動時，排出的廢氣不會受到周圍氣流的影響而聚集在車子後方，反而會擴散到遠處。圖 4-24 中因為周圍空氣的影響而產生渦流的現象。



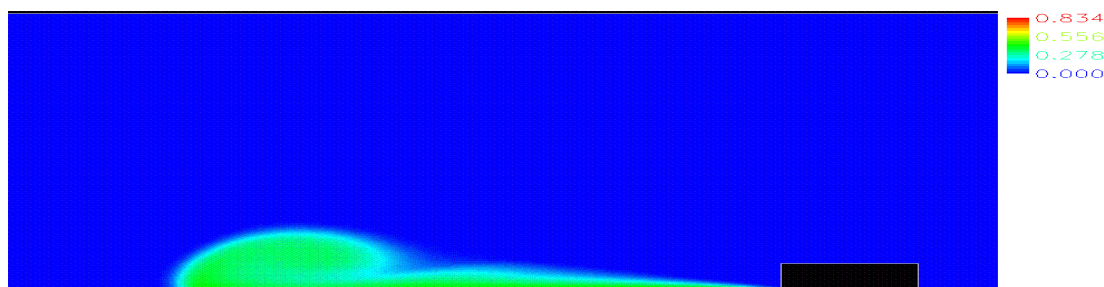
(a) 2 秒之濃度分佈圖



(b) 5 秒之濃度分佈圖



(c) 8 秒之濃度分佈圖



(d) 10 秒之濃度分佈圖

圖 4-22 濃度分佈圖

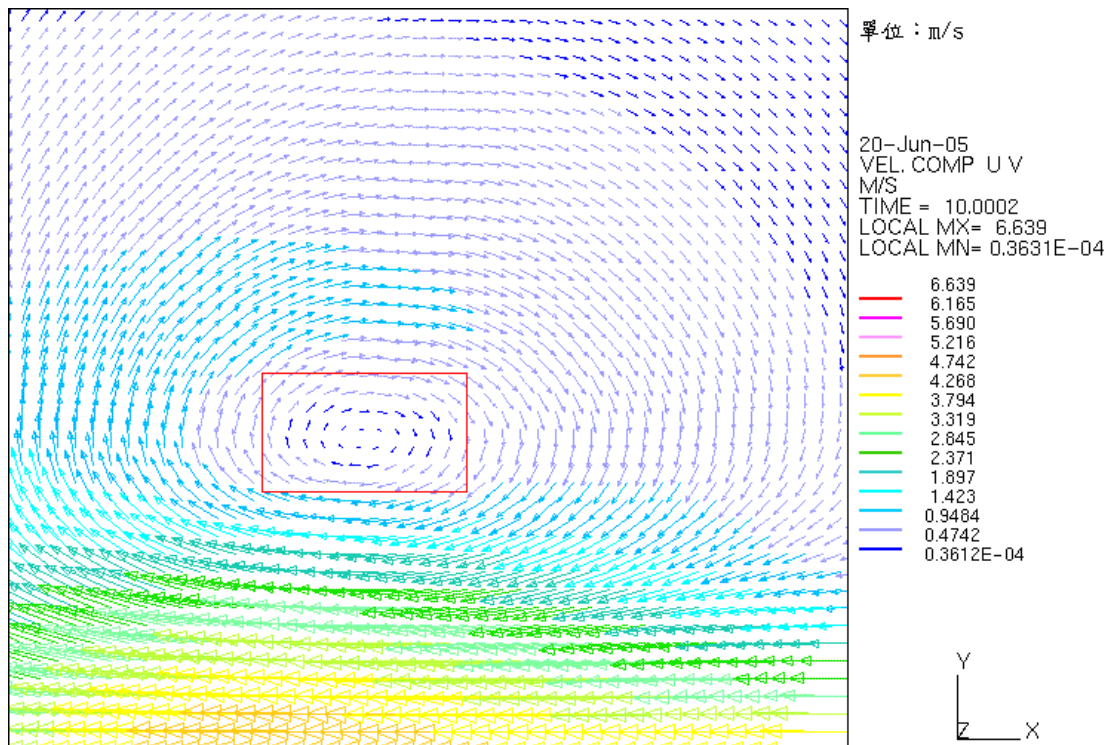


圖 4-23 流場中渦流產生處



圖 4-24 空氣粒子在流場中渦流產生處

(3) 根據圖 2-3 之物理模式模擬汽車於陣列情況下以 15m/s 的速度前進造成排放廢氣的污染情形。各暫態時間流場之濃度分佈，並製作濃度擴散、速度純量和壓力之動畫。本文使用 25°C 的空氣為工作流體，密度： $1.205\text{kg}/\text{m}^3$ 、黏性係數： $1.81\times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ 。濃度發散源之污染物為 CO，密度： $1.1453\text{kg}/\text{m}^3$ 、相對於空氣之擴散係數： $3.004\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 。

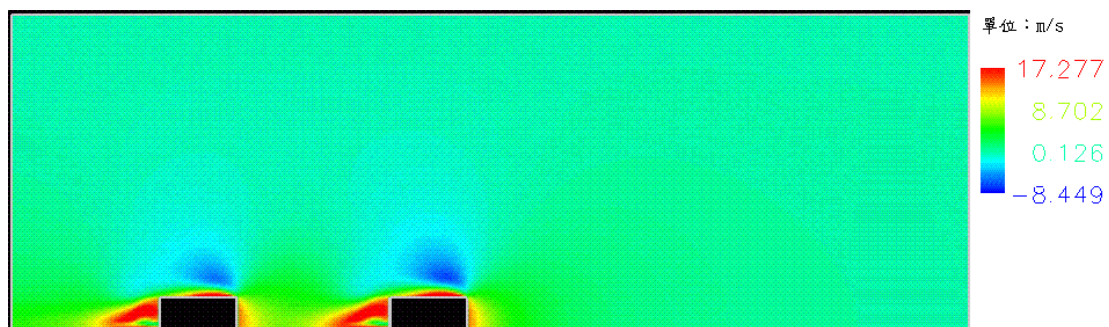
本文模擬的車速條件是 15m/s 的速度前進，汽車排氣管的排氣速度為 6m/s，二台車中間的距離為 8 公尺，圖 4-25 之(a)、(b)、(c)、(d)為時間在 0.4 秒、1 秒、1.4 秒、2 秒之速度純量圖。

圖 4-26 之(a)、(b)、(c)、(d)為時間在 0.4 秒、1 秒、1.4 秒、2 秒之壓力分佈圖。

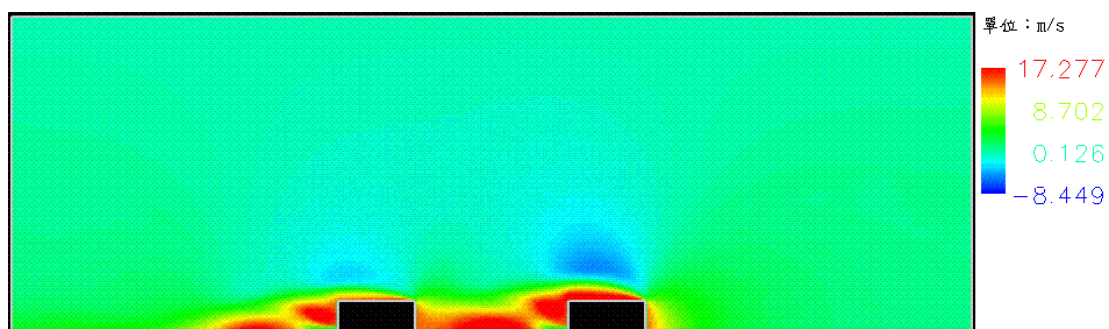
圖 4-27 之(a)、(b)、(c)、(d)為時間在 0.4 秒、1 秒、1.4 秒、2 秒之濃度分佈圖。流場中速度純量、壓力、濃度擴散之動畫檔如[動畫 4-15](#)、[4-16](#)、[4-17](#)所示。

計算出流場濃度分佈後，於流場中之適當計算節點上放置與空氣密度相同之微小粒子，並指定空氣粒子之顏色將會隨著所經過位置之濃度而改變，為了能夠更真實的呈現微小粒子於流場中移動時被濃度源污染之情形，本文撰寫濃度分佈之檔案，指定微小粒子未被污染前為藍色，並依照污染的程度不同而改變成綠色、黃色、紅色。於流場中放置之微小粒子釋放後，將會沿著所屬流線移動，在其移動過程，微小粒子之顏色將會隨著流場中各位置之濃度而改變其顏色，藉由這種方法可以清楚的觀察空氣被濃度源污染的程度及污染的大致範圍。圖 4-28 之(a)、(b)、(c)、(d)中放置之微小粒子於流場中移動時被濃度污染之情形。微小粒子於流場中移動之動畫檔如[動畫 4-18](#)所示。

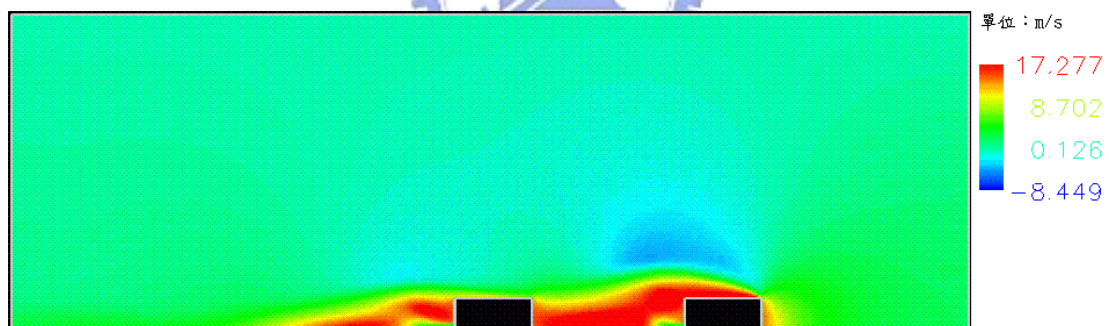
從速度純量圖中可以發現汽車前進時會推擠前方的流體而填補後方的空洞現象，當二台車同時前進時也會有此現象產生，由於後方車輛也同時推擠前方的流體，加上前方汽車會填補後方空洞的現象，造成二台車中間有一區域速度非常快，並將氣流往前推擠。從濃度分佈圖可以發現前方車輛排出的廢氣受到後方車



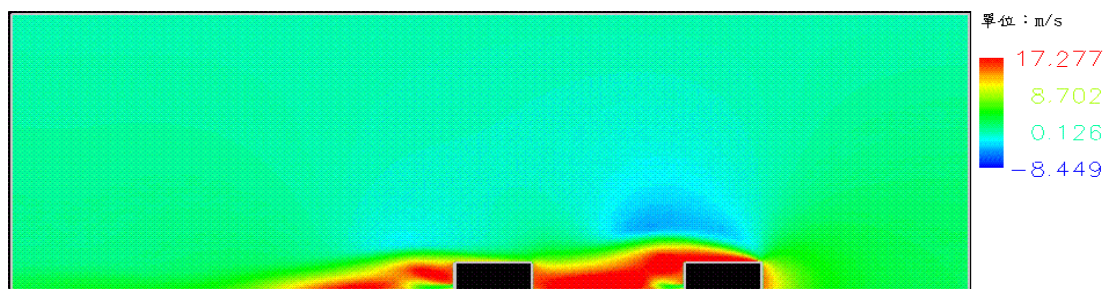
(a) 0.4 秒之速度純量圖



(b) 1 秒之速度純量圖

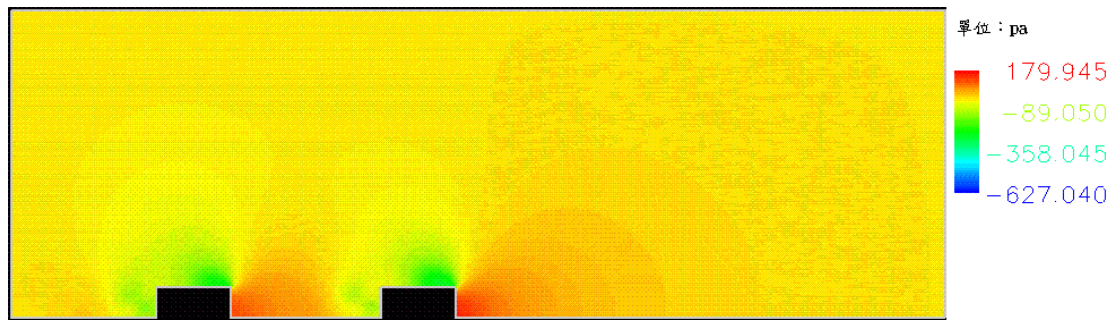


(c) 1.4 秒之速度純量圖

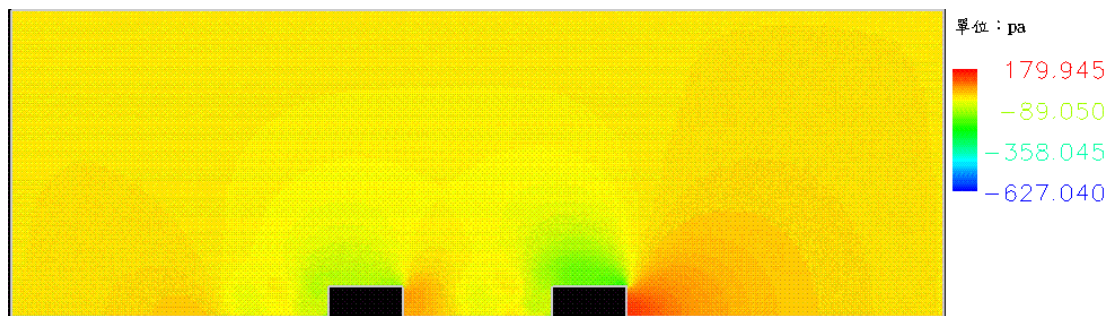


(d) 2 秒之速度純量圖

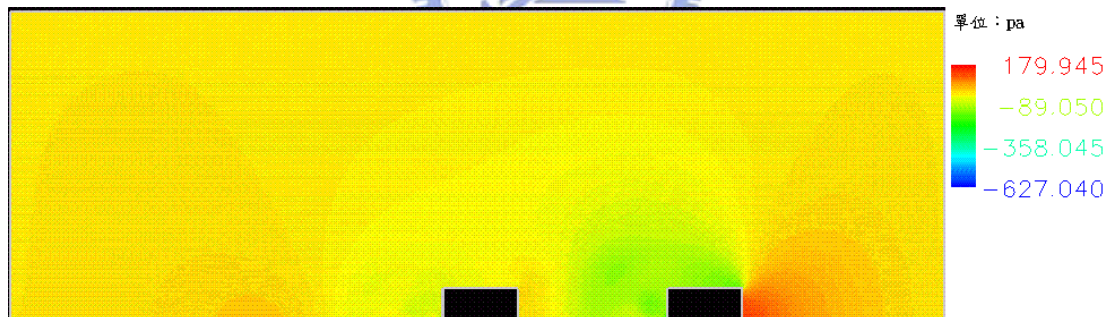
圖 4-25 速度分佈圖



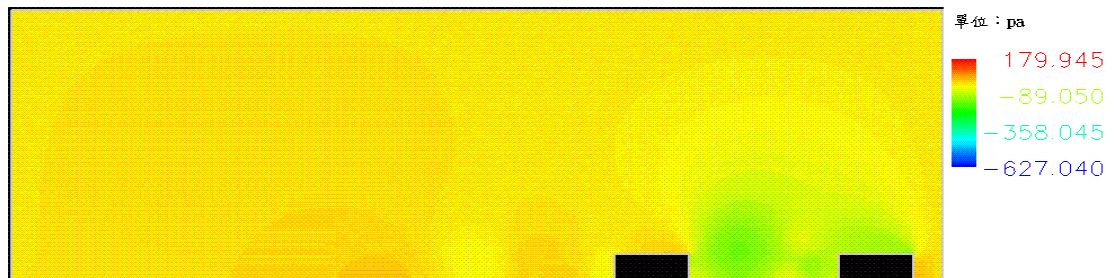
(a) 0.4 秒之壓力分佈圖



(b) 1 秒之壓力分佈圖

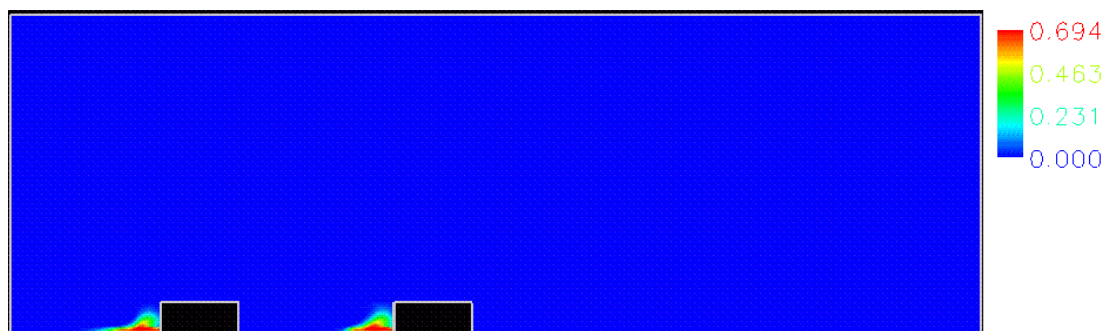


(c) 1.4 秒之壓力分佈圖

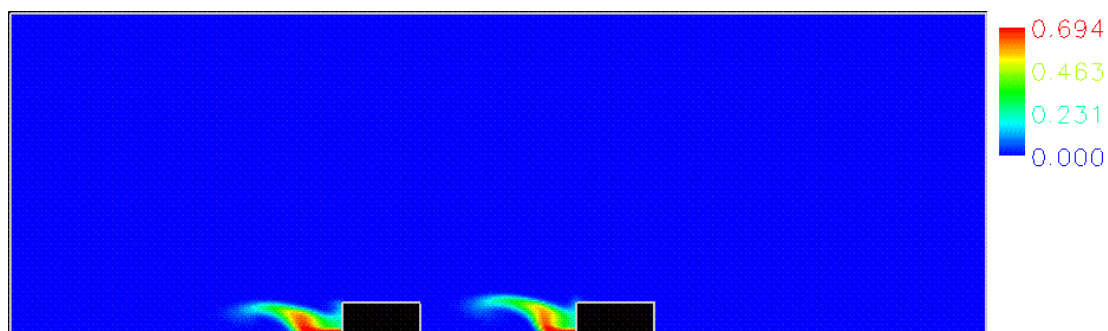


(d) 2 秒之壓力分佈圖

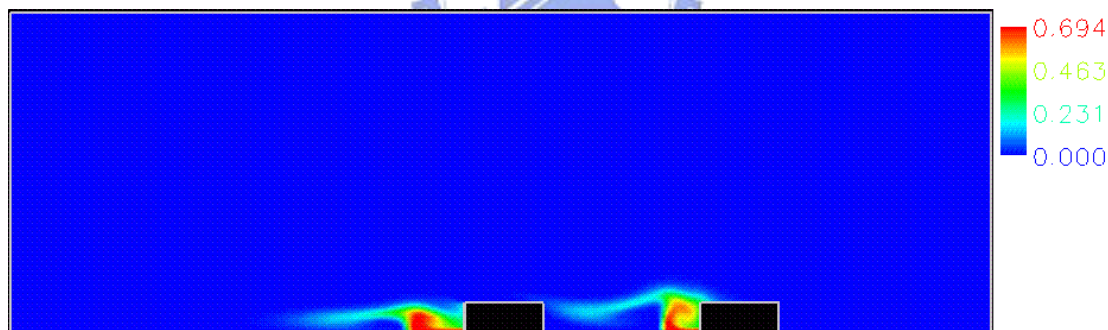
圖 4-26 壓力分佈圖



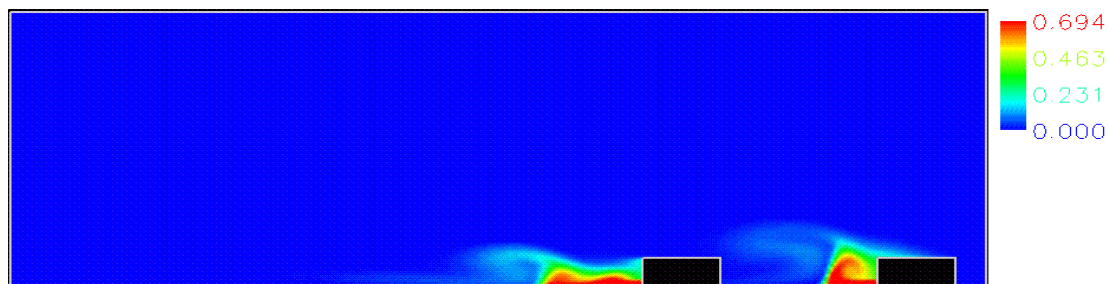
(a) 0.4 秒之濃度分佈圖



(b) 1 秒之濃度分佈圖

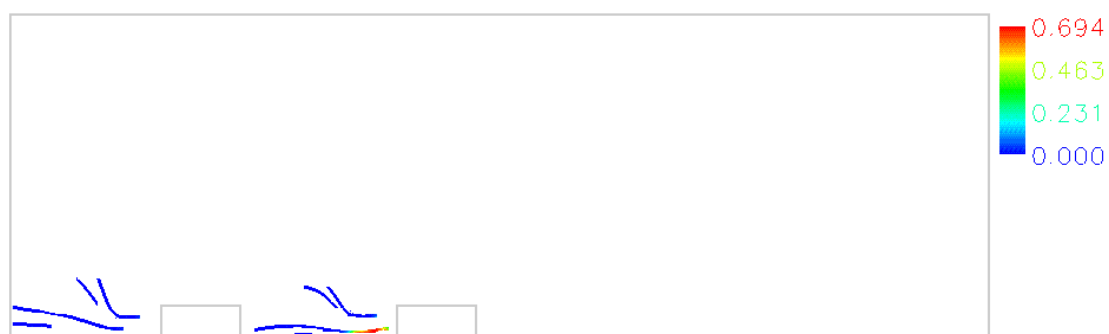


(c) 1.4 秒之濃度分佈圖

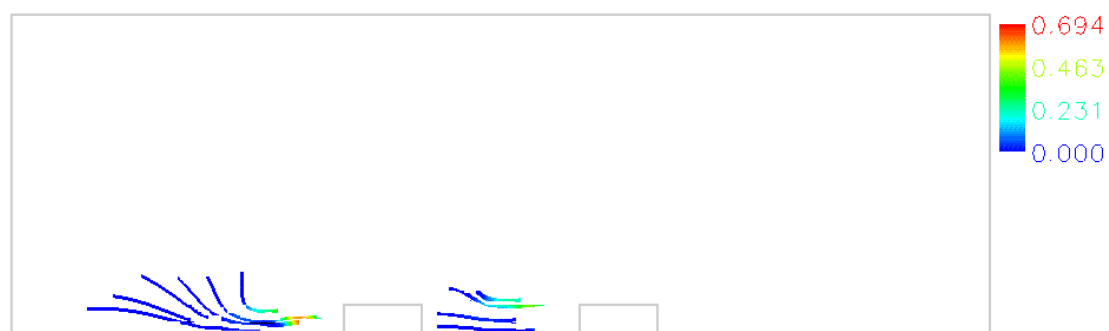


(d) 2 秒之濃度分佈圖

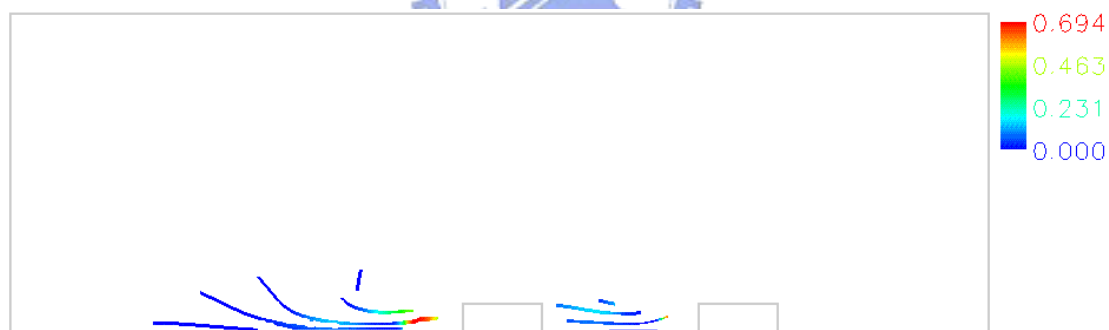
圖 4-27 濃度分佈圖



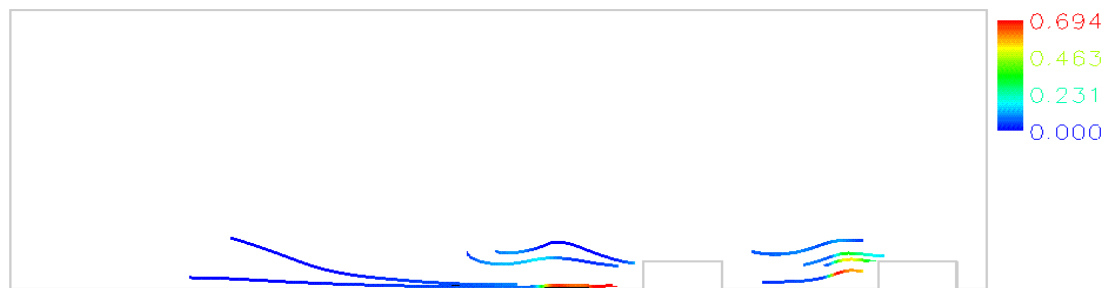
(a) 空氣粒子於流場中被濃度汙染之情形 1



(b) 空氣粒子於流場中被濃度汙染之情形 2



(c) 空氣粒子於流場中被濃度汙染之情形 3



(d) 空氣粒子於流場中被濃度汙染之情形 4

圖 4-28 空氣粒子被濃度汙染之情形

輛前進時推擠流體，使前方車輛的廢氣無法排出而停留在車輛後方，由圖 4-27(c) 中發現前方車輛排放廢氣會影響到後方的車輛，約 0.1~0.2 之重量濃度。從動畫 4-18 中可發現汽車在前進時污染源的地方污染最嚴重，汽車上方也會受到廢氣污染。



(4) 根據圖 2-5、2-6 之物理模式模擬汽車於順風、逆風情況下以 30m/s 的速度前進造成排放廢氣的污染情形。各暫態時間流場之濃度分佈，並製作濃度擴散、速度純量之動畫。本文使用 25°C 的空氣為工作流體，密度： $1.205\text{kg}/\text{m}^3$ 、黏性係數： $1.81\times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ 。濃度發散源之污染物為 CO，密度： $1.1453\text{kg}/\text{m}^3$ 、相對於空氣之擴散係數： $3.004\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 。

本文模擬的車速條件是 30m/s 的速度前進，汽車排氣管的排氣速度為 7.5m/s，順風和逆風情況下的風速為 10m/s。

圖 4-29 之(a)、(b)、(c)、(d)為順風情況下在 0.2 秒、0.5 秒、0.7 秒、1 秒時之速度純量圖。

圖 4-30 之(a)、(b)、(c)、(d)在逆風情況下之 0.2 秒、0.5 秒、0.7 秒、1 秒時之速度純量圖。

圖 4-31 之(a)、(b)、(c)、(d)在順風情況下之 0.2 秒、0.5 秒、0.7 秒、1 秒時之濃度分佈圖。

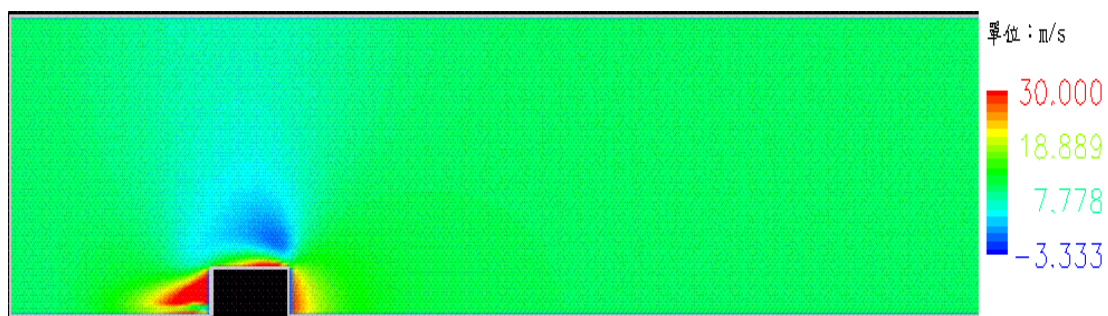
圖 4-32 之(a)、(b)、(c)、(d)在逆風情況下之 0.2 秒、0.5 秒、0.7 秒、1 秒時之濃度分佈圖。

順風條件下的速度純量、濃度擴散之動畫檔如動畫 4-19、4-20 所示。逆風條件下的速度純量、濃度擴散之動畫檔如動畫 4-21、4-22 所示。

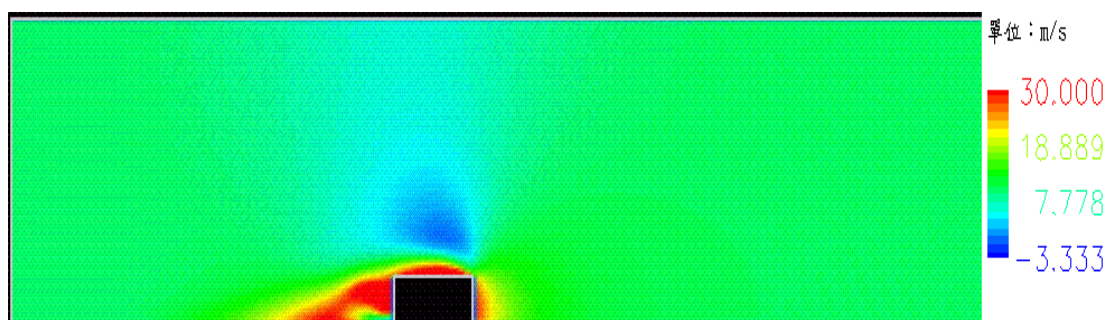
於流場中放置之微小粒子釋放後，將會沿著所屬流線移動，在其移動過程，微小粒子之顏色將會隨著流場中各位置之濃度而改變其顏色，藉由這種方法可以清楚的觀察空氣被濃度源污染的程度及污染的大致範圍，最後藉由影像覆疊軟體製作成動畫，如圖 4-33 之(a)、(b)、(c)、(d)為順風條件下汽車排放廢氣的情形。

圖 4-34 之(a)、(b)、(c)、(d)為逆風條件下汽車排放廢氣的情形。動畫檔分別如動畫 4-23、4-24 所示。

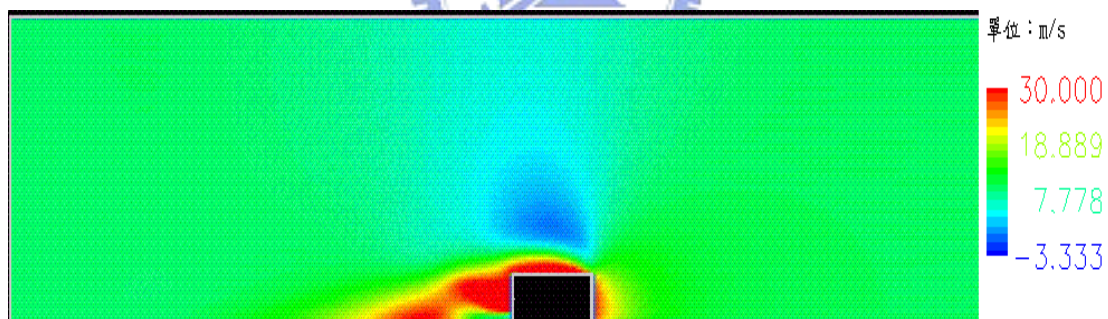
從動畫 4-23、4-24 中可以發現汽車於逆風中行進時，在汽車後方會有渦流的產生，將汽車排放的廢氣帶到汽車後方，從動畫中可以比較出在順風情況下，



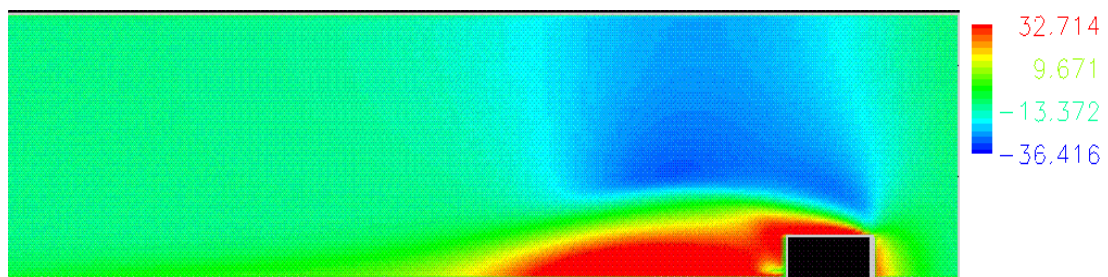
(a) 順風情況下在 0.2 秒時之速度純量圖



(b) 順風情況下在 0.5 秒時之速度純量圖

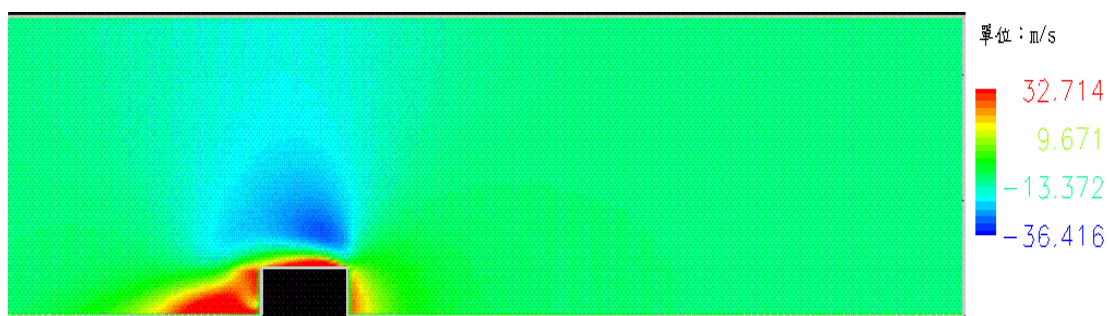


(c) 順風情況下在 0.7 秒時之速度純量圖

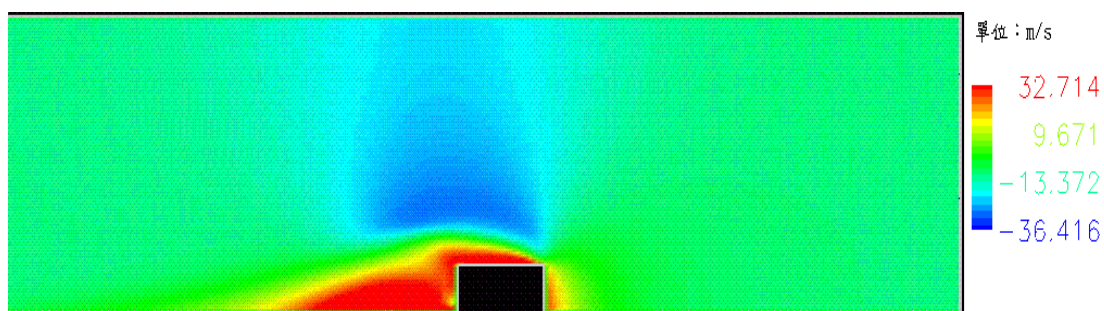


(d) 順風情況下在 1 秒時之速度純量圖

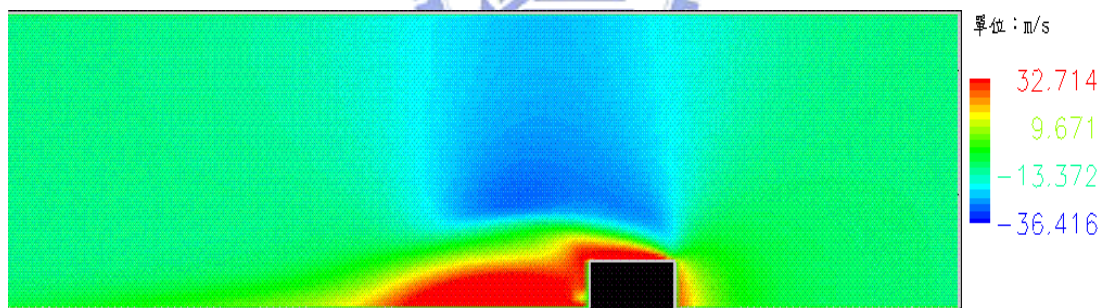
圖 4-29 順風情況下速度純量圖



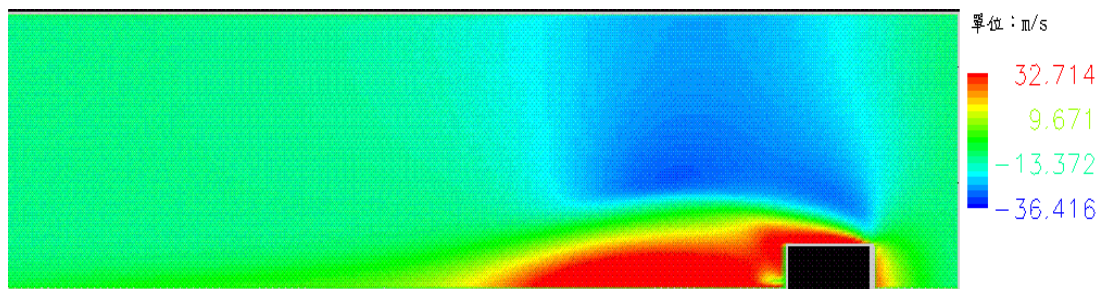
(a) 逆風情況下在 0.2 秒時之速度純量圖



(b) 逆風情況下在 0.5 秒時之速度純量圖

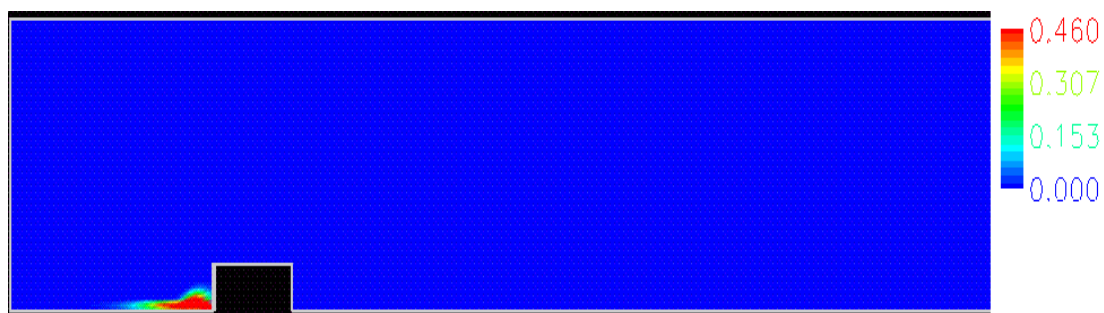


(c) 逆風情況下在 0.7 秒時之速度純量圖

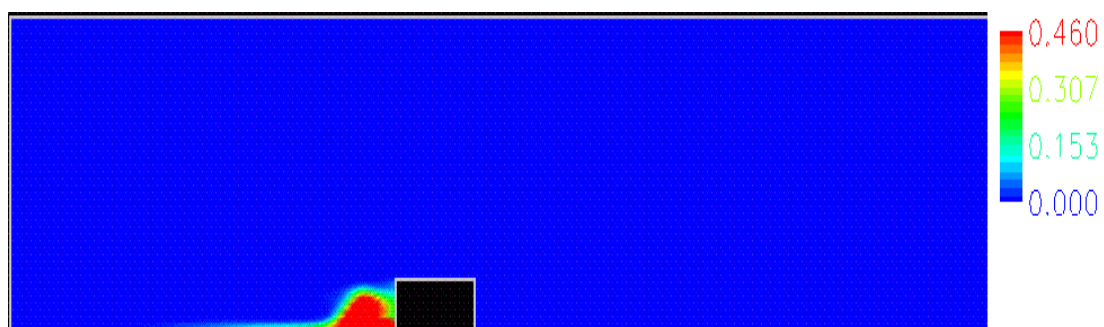


(d) 逆風情況下在 1 秒時之速度純量圖

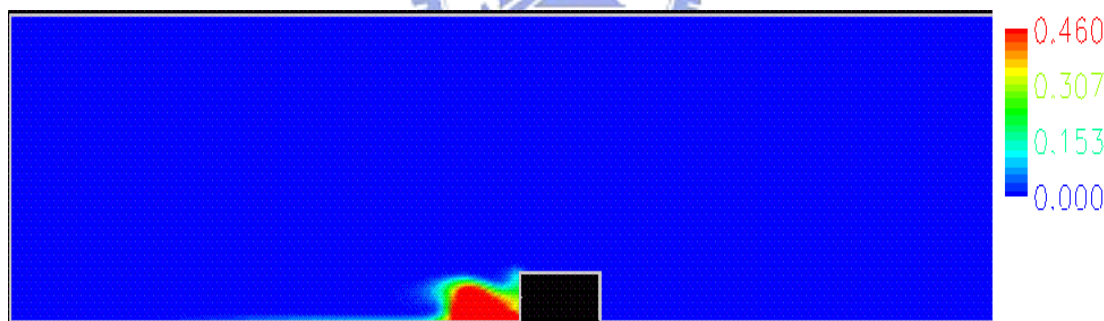
圖 4-30 逆風情況下速度純量圖



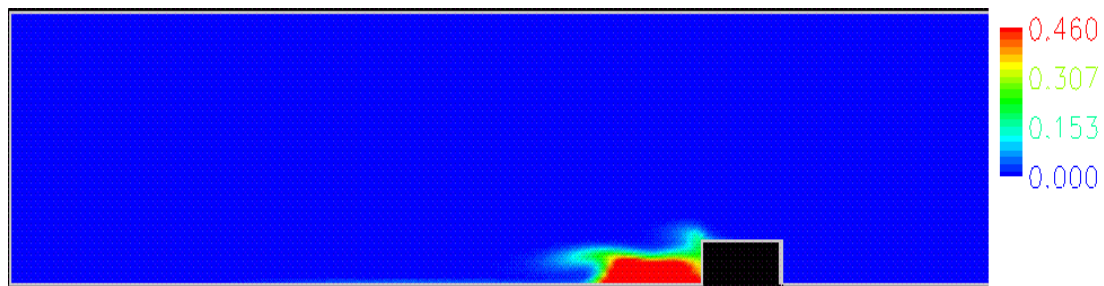
(a) 順風情況下在 0.2 秒時之濃度分佈圖



(b) 順風情況下在 0.5 秒時之濃度分佈圖

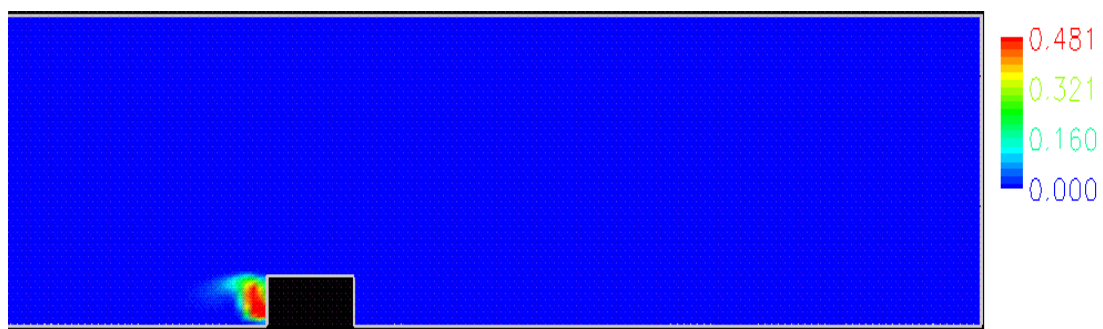


(c) 順風情況下在 0.7 秒時之濃度分佈圖

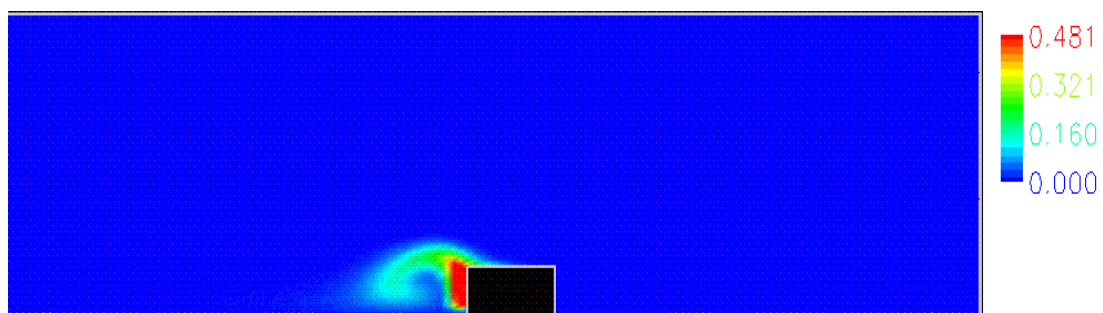


(d) 順風情況下在 1 秒時之濃度分佈圖

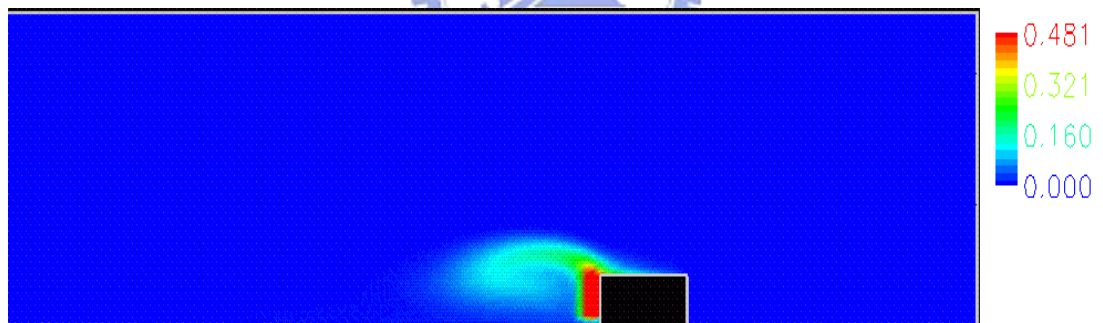
圖 4-31 順風情況下濃度分佈圖



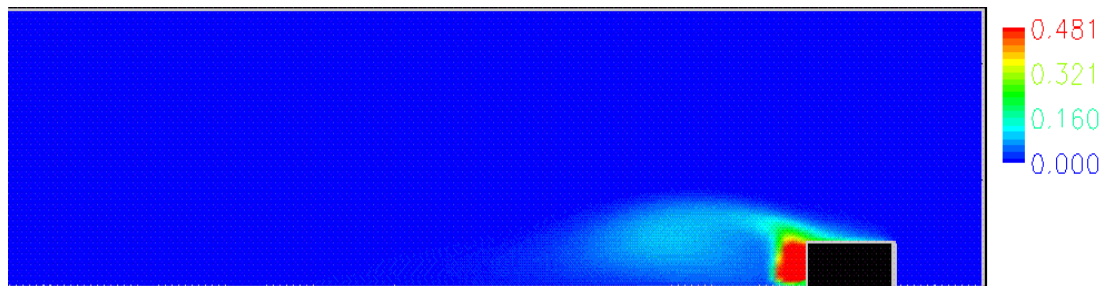
(a) 逆風情況下在 0.2 秒時之濃度分佈圖



(b) 逆風情況下在 0.5 秒時之濃度分佈圖

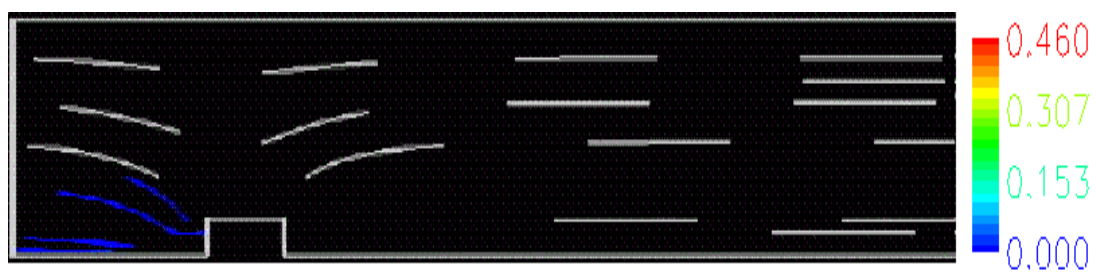


(c) 逆風情況下在 0.7 秒時之濃度分佈圖

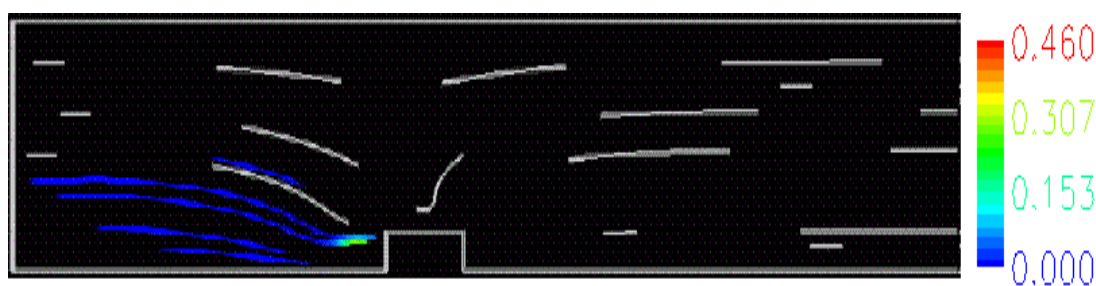


(d) 逆風情況下在 1 秒時之濃度分佈圖

圖 4-32 逆風情況下濃度分佈圖



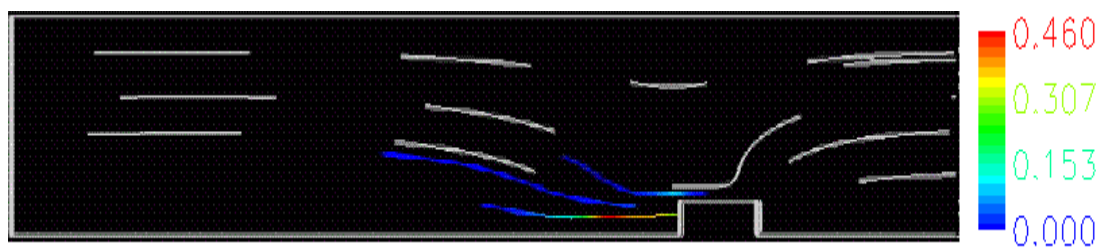
(a) 順風情況下濃度污染情形 1



(b) 順風情況下濃度污染情形 2

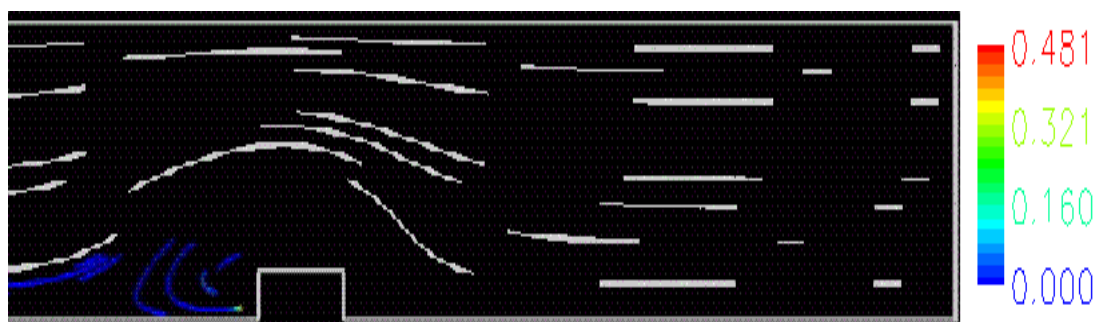


(c) 順風情況下濃度污染情形 3

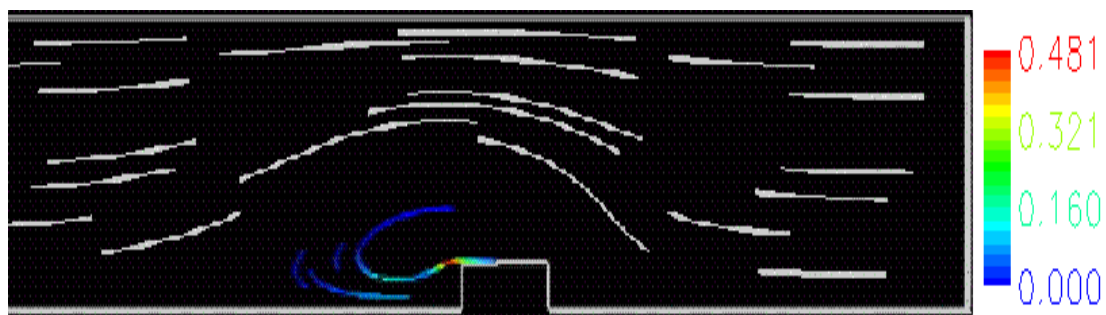


(d) 順風情況下濃度污染情形 4

圖 4-33 順風情況下之微小粒子受污染情形



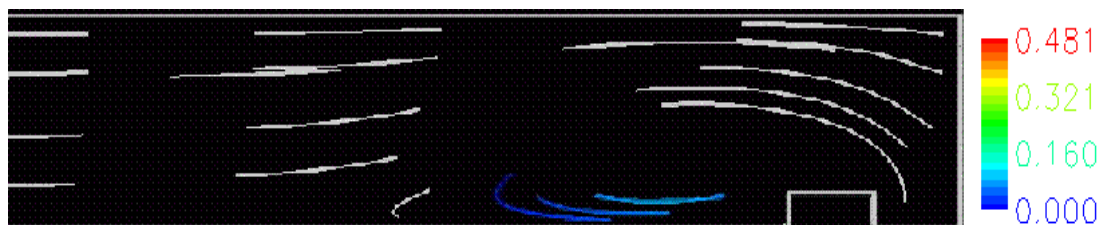
(a) 逆風情況下濃度污染情形 1



(b) 逆風情況下濃度污染情形 2



(c) 逆風情況下濃度污染情形 3



(d) 逆風情況下濃度污染情形 4

圖 4-34 逆風情況下之微小粒子受污染情形

廢氣雖然無法完全排出但不會停留在汽車後方，車輛上方受到汙染的程度較不嚴重。由速度純量和濃度分佈圖可以比較出，汽車在逆風中行進時，汽車後方的低壓區域，會受到逆風填補和汽車前方的氣流填補汽車後方的低壓區而產生迴流，且兩種速度方向相同，並推擠汽車排放的廢氣，造成速度範圍(紅色區域)大，加上迴流的效應，使得汽車排放的廢棄無法排除，因此濃度範圍(紅色區域)較小。而在順風中行駛時，雖然氣流也會填補汽車後方的空洞現象，但填補至後方的速度和順風方向相反，影響到填補空洞的效應，因此速度範圍(紅色區域)較小，濃度範圍(紅色區域)大。

本文所模擬的汽車排放廢氣中可以發現，當汽車固定不動時，汽車排放的廢氣不會停留在汽車後方而且會往外排出，汽車上方也不會有汙染的情形。當汽車在行進時，移動速度快的汽車所排放的廢氣較容易停留在汽車後方，汽車上方受到汙染的程度也比較嚴重。汽車以陣列行進時，前方車輛排出的廢氣比較容易受到汙染。順風和逆風行進時，逆風時汽車後方、上方受到汙染最嚴重。



4.3 無塵室工作台車與粒子飛行軌跡的討論

(1) 無塵室之均勻流場

根據圖 2-9 物理模式所示，模擬工作台車在無塵室移動時產生的粒子是否會停留在工作台車上，在計算出流場速度分佈後，將流場速度代入固體粒子運動方程式中以求得固體粒子之軌跡。本文使用 25°C 的空氣為工作流體，密度： $1.205\text{kg}/\text{m}^3$ ，黏滯係數： $1.81 \times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ，以工作台車移動的速度 $3.5\text{m}/\text{s}$ ，和工作台車上方 1.5m 有一氣流以速度 $0.4\text{m}/\text{s}$ 往下流動代入計算，以求得流場的速度分佈。圖 4-35 為均勻流場在時間 1 秒時之速度向量圖。固體粒子則是採用假設為球形剛體之粒子，粒徑： $1\mu\text{m}$ 、密度： $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 。

計算出流場之速度分佈後，擷取視覺化範圍，如圖 4-36 紅色區域所示，在視覺化範圍的節點處放置多顆空氣粒子，並且釋放空氣粒子，並紀錄各空氣粒子之軌跡。沿著上述空氣粒子的軌跡尋找軌跡所經過的節點，並於適當節點上放置空氣粒子，以達到視覺化範圍內氣流連續之效果，在同時釋放所有空氣粒子時，在視覺化範圍內將會出現空氣粒子連續運動的現象。如圖 4-37 為視覺化範圍內空氣粒子的軌跡。

接著判斷流場的速度向量圖製作渦流動畫，經由速度向量圖判斷出渦流發生的地點，分別位於工作台車的兩側，如圖 4-38 中紅色區域所示。為了達到渦流可視化並使渦流具有動畫的效果的，本文在渦流發生處的計算節點上的適當位置，放置多顆空氣粒子，同時釋放這些空氣粒子時，空氣粒子將會根據渦流處的速度分佈運動，該處的渦流形狀將可經由空氣粒子的連續運動軌跡描述。

完成渦流處的可視化後，同時釋放所有的空氣粒子，圖 4-39 為視覺化範圍內所有空氣粒子之運動軌跡，以影像擷取軟體錄製視覺化範圍內空氣粒子的運動情形的動畫即完成氣流場動畫的製作。氣流場動畫製作如動畫 4-25 所示。

圖 4-40、4-41 分別為密度： $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 固體粒子在流場中的運動連續軌跡圖，並以白色氣流場表示均勻流場的動畫，再利用影像編輯軟體覆疊

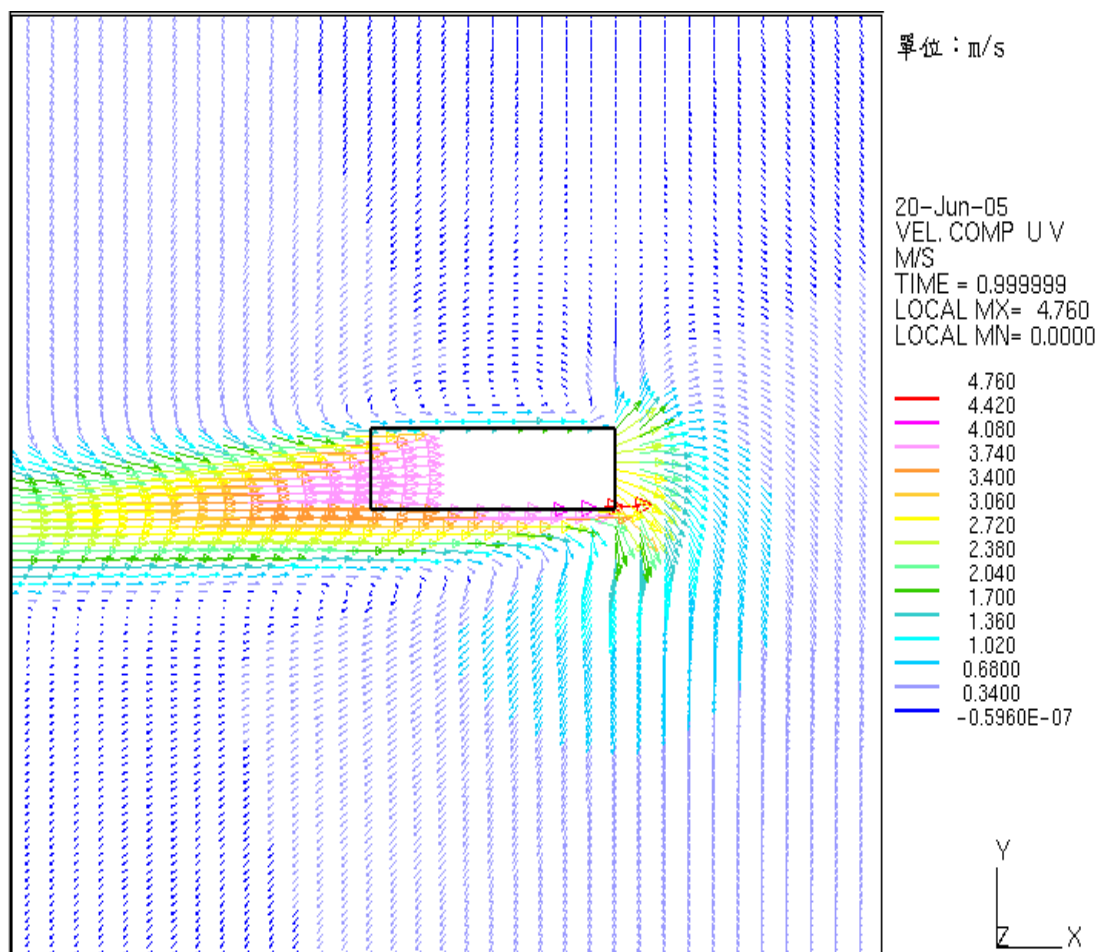


圖 4-35 均勻流場中時間 1 秒之速度向量圖

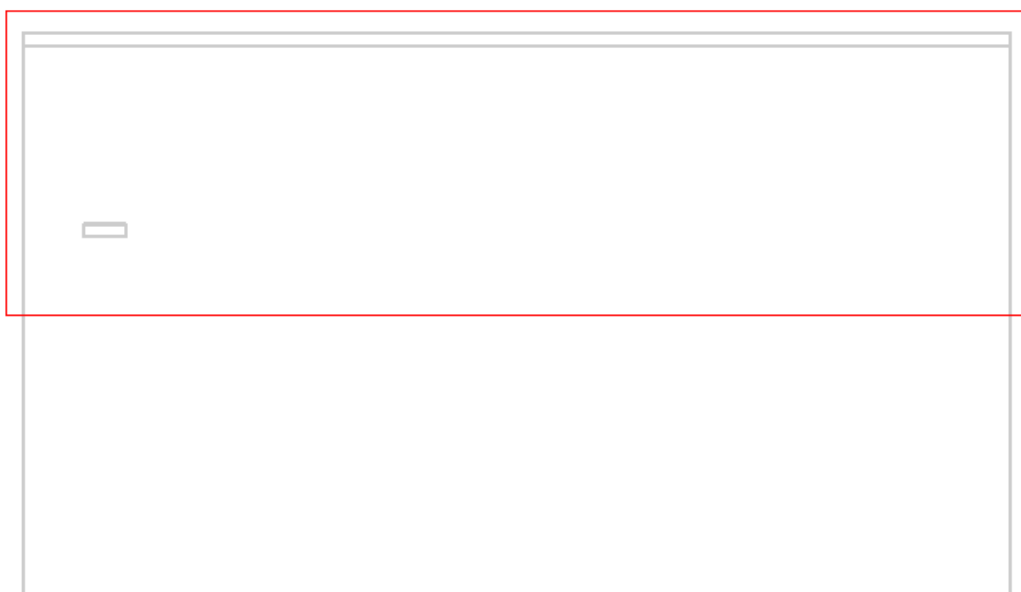


圖 4-36 視覺化範圍



圖 4-37 視覺化範圍內空氣粒子的軌跡

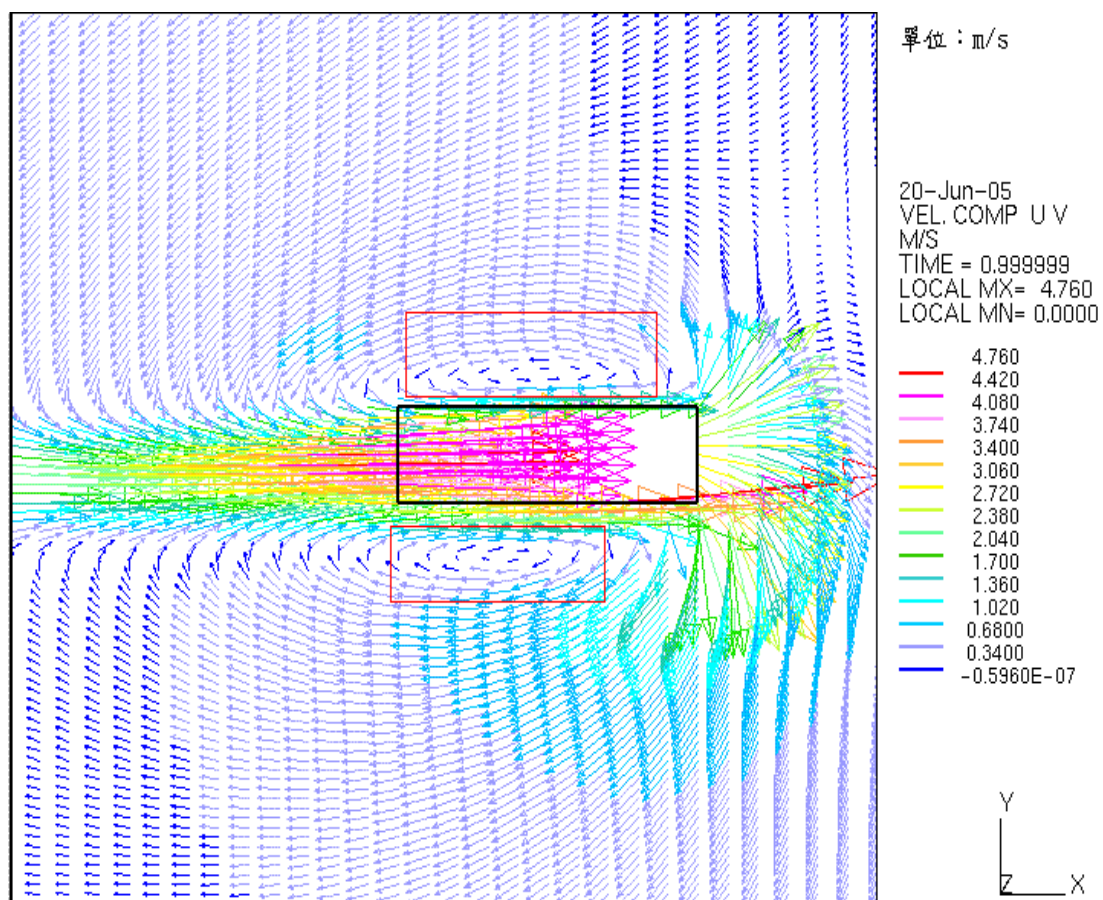


圖 4-38 渦流發生地點



圖 4-39 以空氣粒子連續運動模擬氣流場

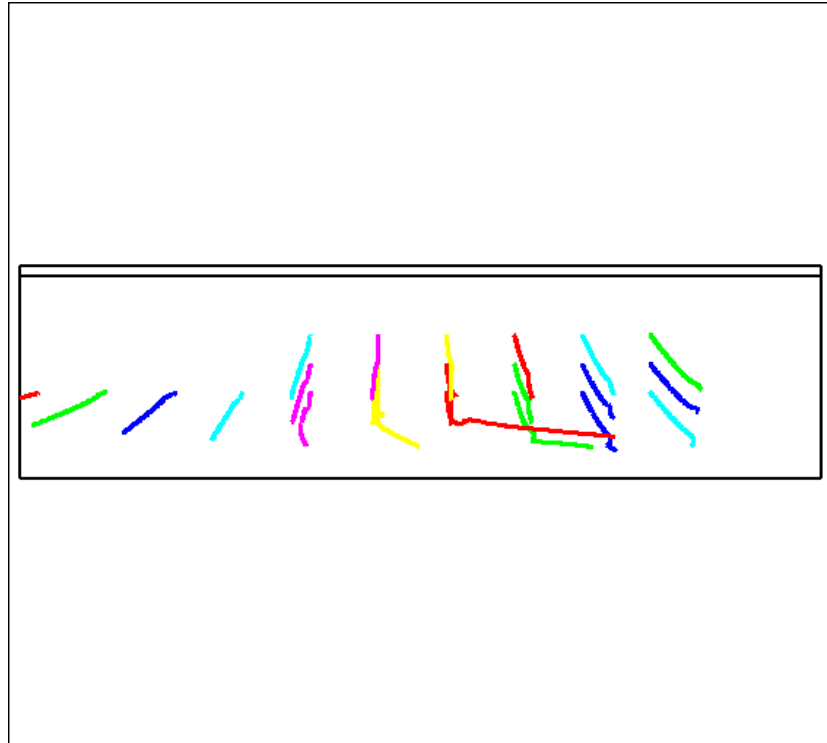


圖 4-40 密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子運動軌跡

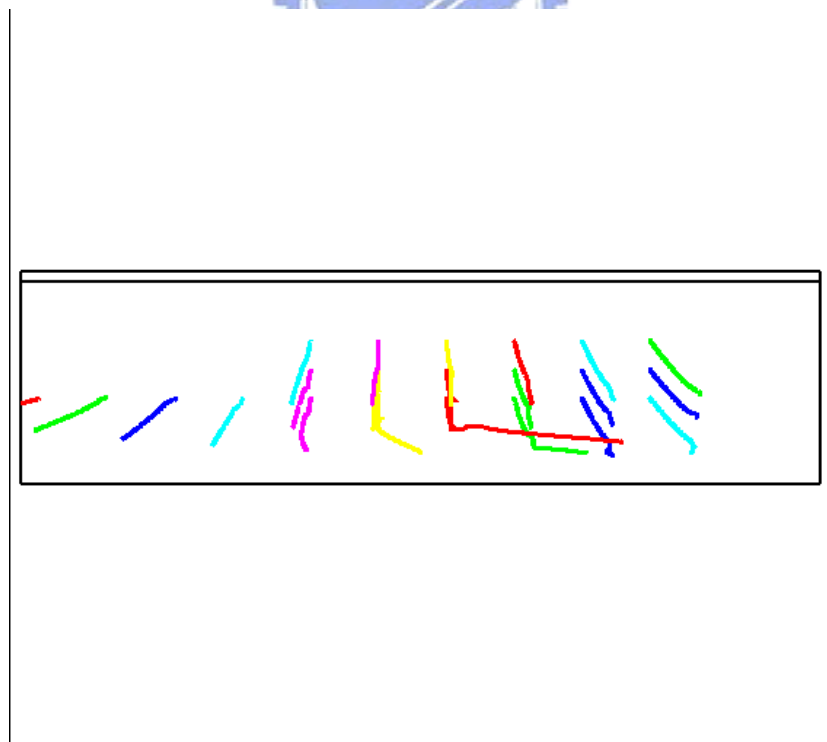
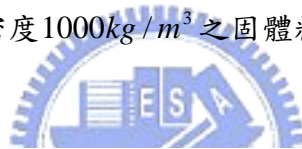


圖 4-41 密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子運動軌跡

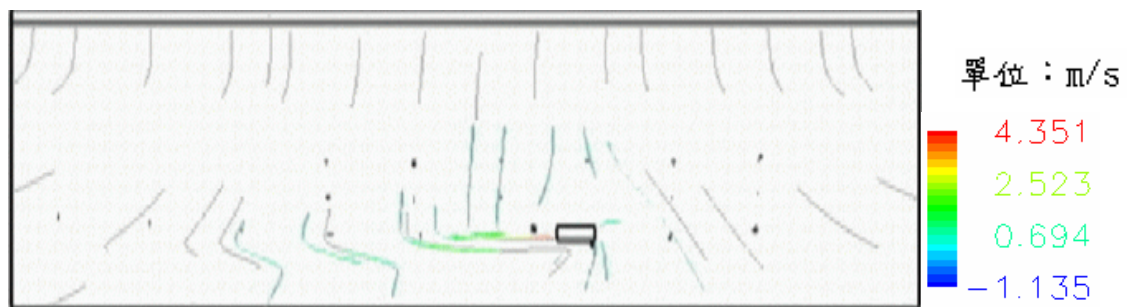
製作成固體粒子運動軌跡之動畫，如動畫 4-26、4-27 所示分別為密度：

$1000\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $10\text{kg}/\text{m}^3$ ，為了清楚觀察粒子的運動軌跡，將固體粒子以黑色表示。

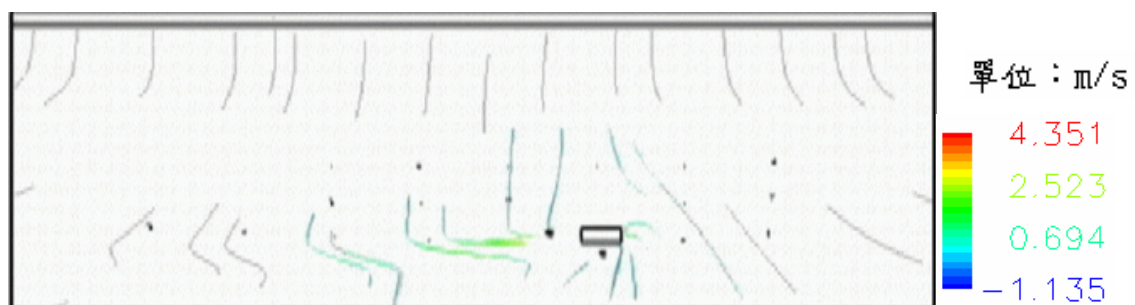
固體粒子在流場中的飛行軌跡。圖 4-42 之(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)為密度： $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 的固體粒子，放置於距離工作台車上方 30、60、90 公分處時，固體粒子與氣流之運動情形。

圖 4-43 之(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)為密度： $10\text{kg}/\text{m}^3$ 的固體粒子，放置於距離工作台車上方 30、60、90 公分處時，固體粒子與氣流之運動情形。

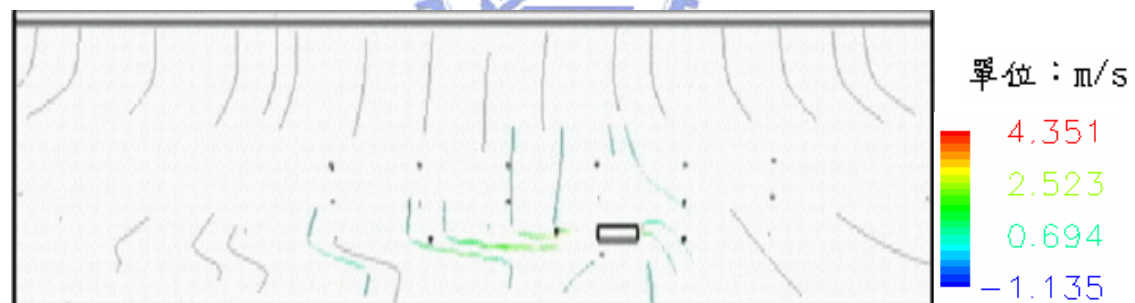
從動畫 4-26、4-27 可以觀察到粒子會隨著氣流的移動軌跡而移動，工作台車周圍的氣流是由於工作台車的前進所造成的變化，粒子移動軌跡此時也會產生較大的變化，當粒子掉落於靠近工作台車後方時，會被工作台車後方的氣流牽引，但離工作台車較遠的粒子和氣流比較不容易受到工作台車後方氣流的牽引。由粒子的密度來觀察，密度小的粒子當落再工作台車後方時，比較容易受到工作台車的牽引且粒子移動速度也比較快。



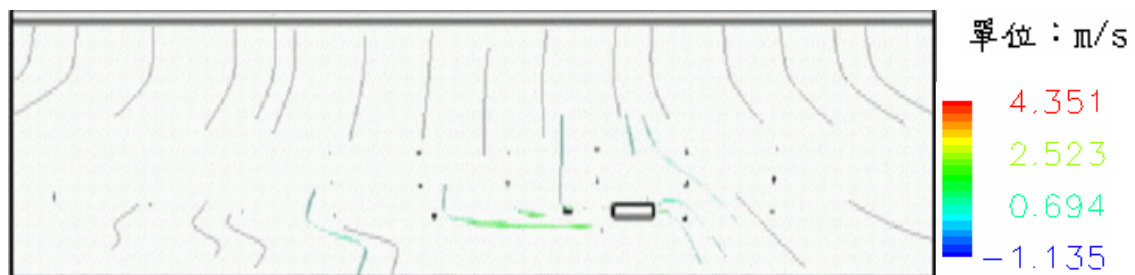
(a) 固體粒子與氣流之運動情形 1



(b) 固體粒子與氣流之運動情形 2

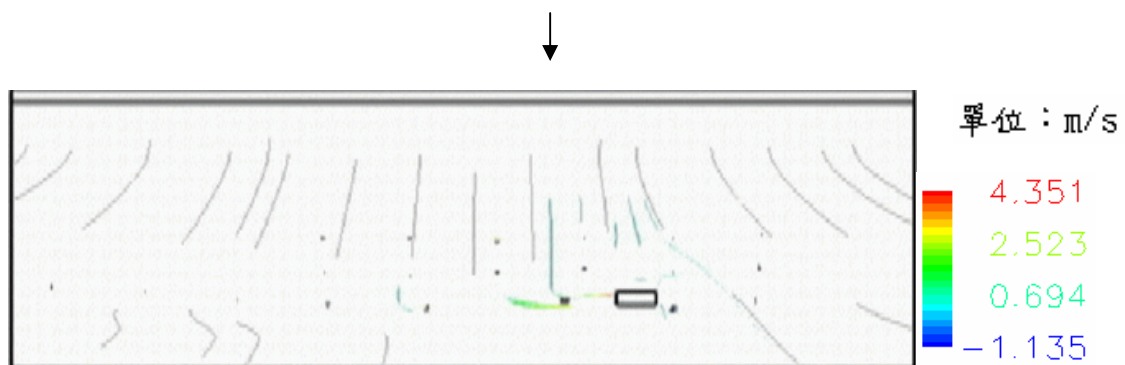


(c) 固體粒子與氣流之運動情形 3

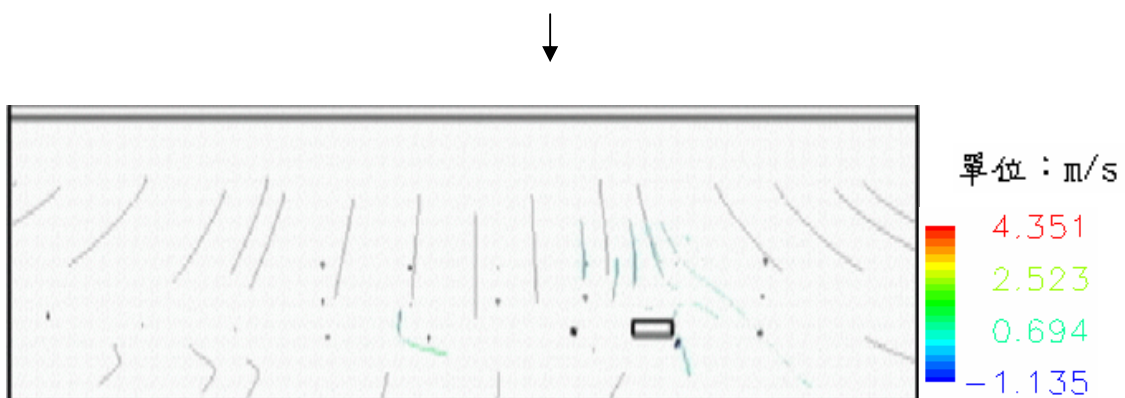


(d) 固體粒子與氣流之運動情形 4

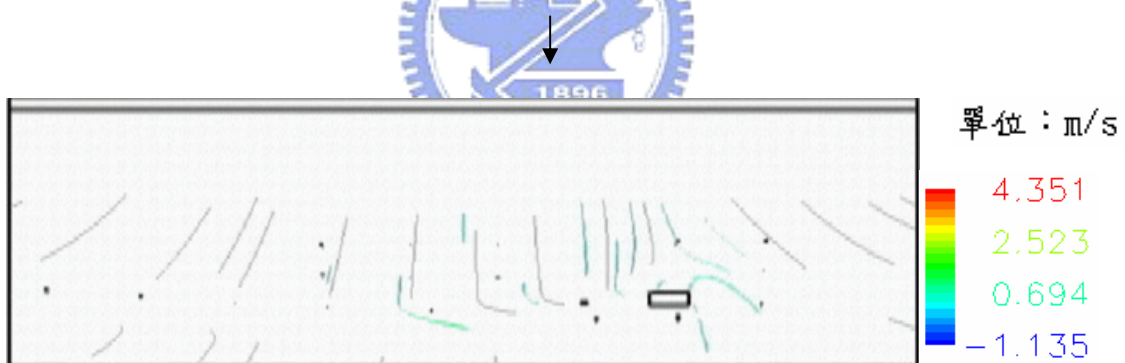
圖 4-42 密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形



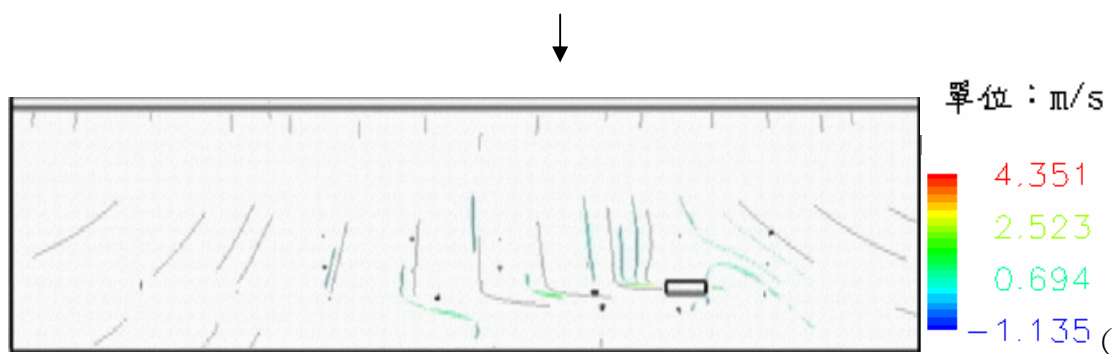
(e) 固體粒子與氣流之運動情形 5



(f) 固體粒子與氣流之運動情形 6

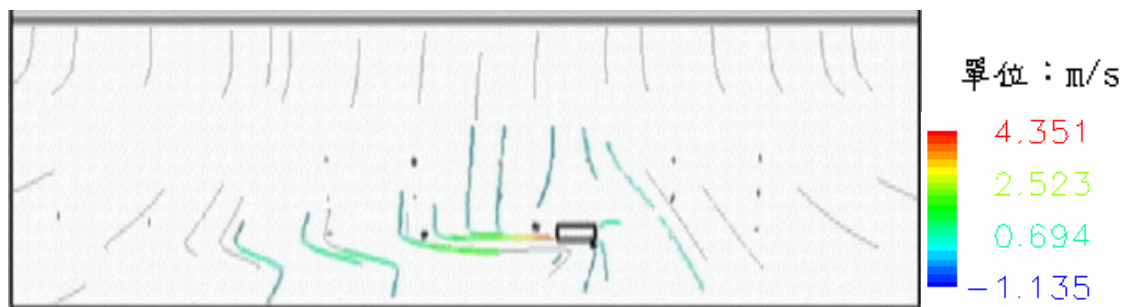


(g) 固體粒子與氣流之運動情形 7

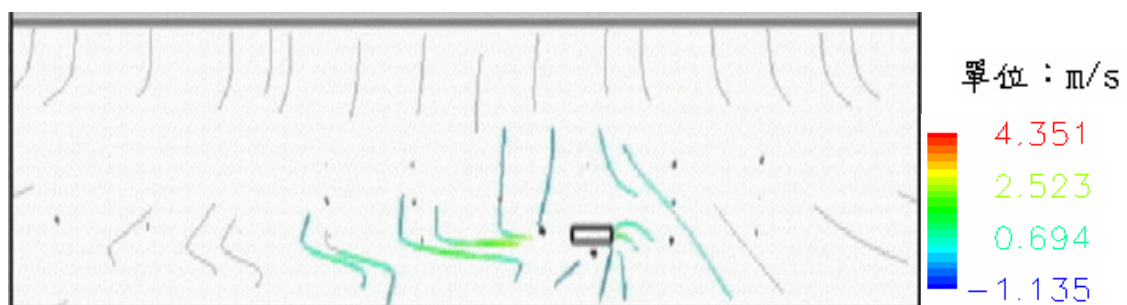


(h) 固體粒子與氣流之運動情形 8

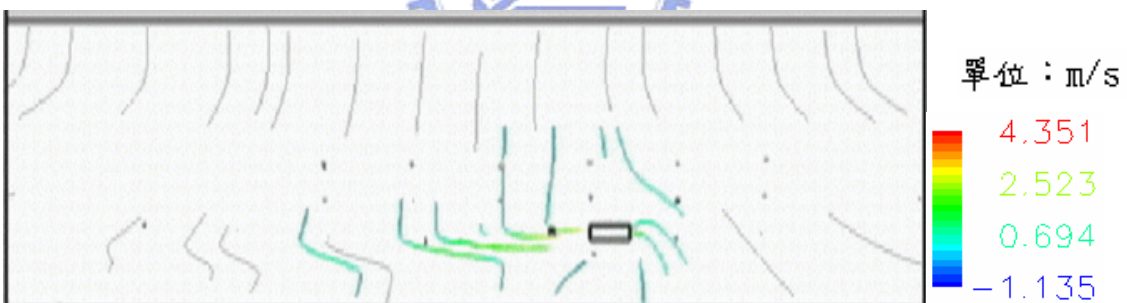
圖 4-42 密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形



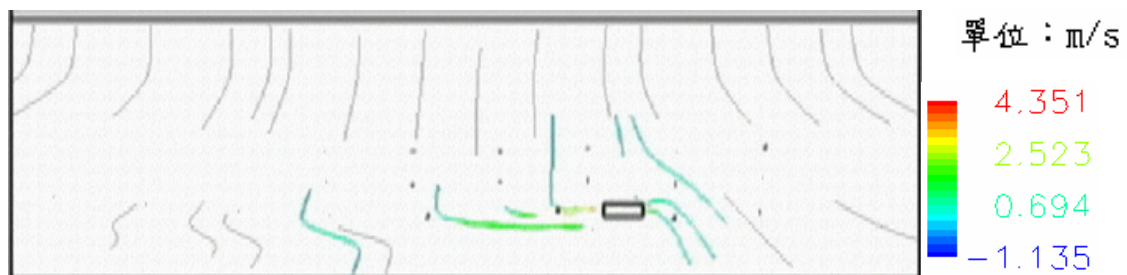
(a) 固體粒子與氣流之運動情形 1



(b) 固體粒子與氣流之運動情形 2

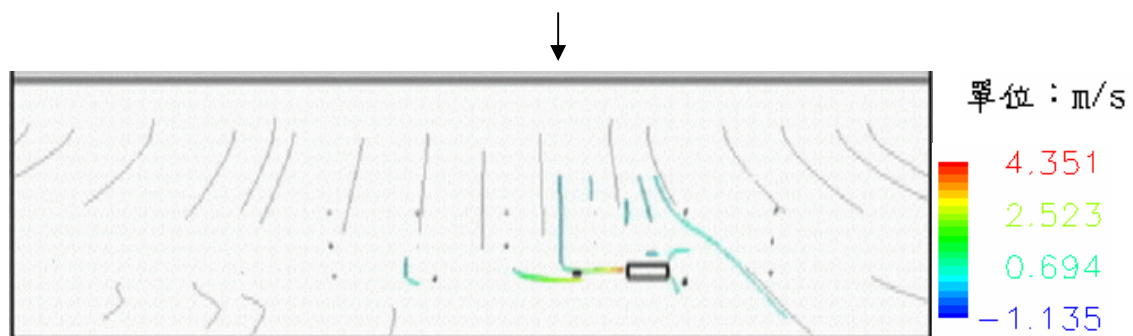


(c) 固體粒子與氣流之運動情形 3

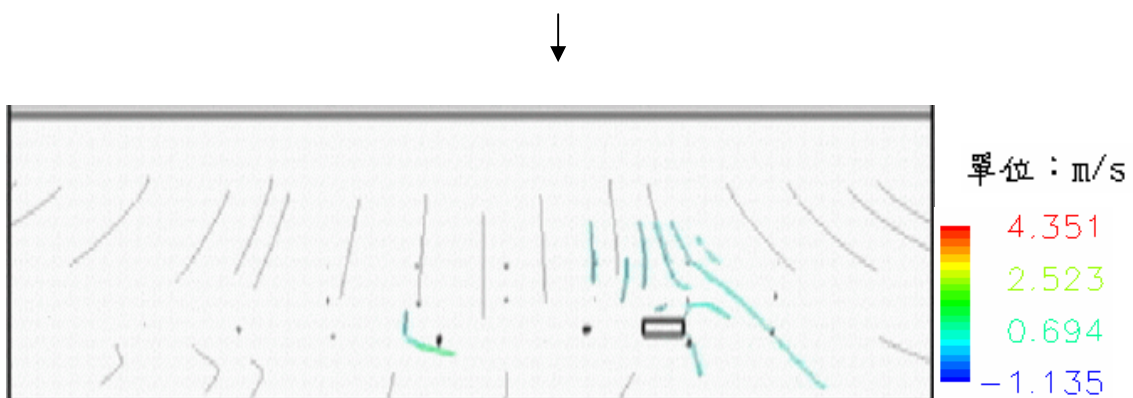


(d) 固體粒子與氣流之運動情形 4

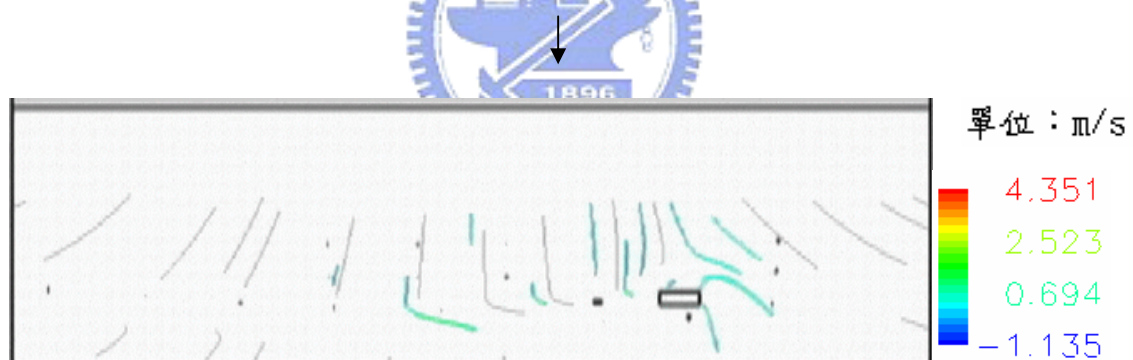
圖 4-43 密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形



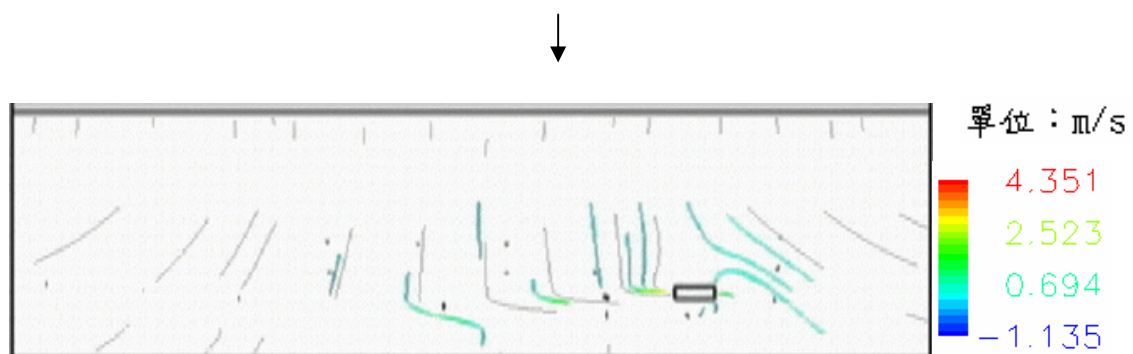
(e) 固體粒子與氣流之運動情形 5



(f) 固體粒子與氣流之運動情形 6



(g) 固體粒子與氣流之運動情形 7



(h) 固體粒子與氣流之運動情形 8

圖 4-43 密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形

(2)無塵室之非均勻流場

根據圖 2-9 物理模式所示，模擬工作台車在無塵室移動時產生的粒子是否會停留在工作台車上，在計算出流場速度分佈後，將流場速度代入固體粒子運動方程式中以求得固體粒子之軌跡。本文使用 25°C 的空氣為工作流體，密度：

$1.205\text{kg}/\text{m}^3$ ，黏滯係數： $1.81\times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ，以工作台車移動的速度 $3.5\text{m}/\text{s}$ ，和工作台車上方 1.5m 處，每間隔 50cm 有一氣流以速度 $0.4\text{m}/\text{s}$ 往下流動代入計算，以求得流場的速度分佈。圖 4-44 為 流場在時間 1 秒時之速度向量圖。固體粒子則是採用假設為球形剛體之粒子，粒徑： $1\mu\text{m}$ 、密度： $10\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 。

計算出流場之速度分佈後，擷取視覺化範圍，在視覺化範圍的節點處放置多顆空氣粒子，並且釋放空氣粒子，紀錄各空氣粒子之軌跡。沿著上述空氣粒子的軌跡尋找軌跡所經過的節點，並於適當節點上放置空氣粒子，以達到視覺化範圍內氣流連續之效果，在同時釋放所有空氣粒子時，在視覺化範圍內將會出現空氣粒子連續運動的現象。

接著判斷流場的速度向量圖製作渦流動畫，經由速度向量圖判斷出渦流發生的地點，分別位於工作台車的兩側。為了達到渦流可視化並使渦流具有動畫的效果的，本文在渦流發生處的計算節點上的適當位置，放置多顆空氣粒子，同時釋放這些空氣粒子時，空氣粒子將會根據渦流處的速度分佈運動，該處的渦流形狀將可經由空氣粒子的連續運動軌跡描述。

完成渦流處的可視化後，同時釋放所有的空氣粒子，以影像擷取軟體錄製視覺化範圍內空氣粒子的運動情形的動畫即完成氣流場動畫的製作。

圖 4-45、4-46 分別為密度： $10\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 固體粒子在非均勻流場中的運動連續軌跡圖，並以白色氣流場表示非均勻流場的動畫，再利用影像編輯軟體覆疊製作成固體粒子運動軌跡之動畫，如動畫 4-28、4-29 所示分別為密度： $10\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1\text{kg}/\text{m}^3$ ，為了清楚觀察粒子的運動軌跡，將固體粒子以黑色表示。

固體粒子在非均勻流場中的飛行軌跡。圖 4-47 之(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)為密度： $10\text{kg}/\text{m}^3$ 的固體粒子，放置於距離工作台車上方 30 、 60 、

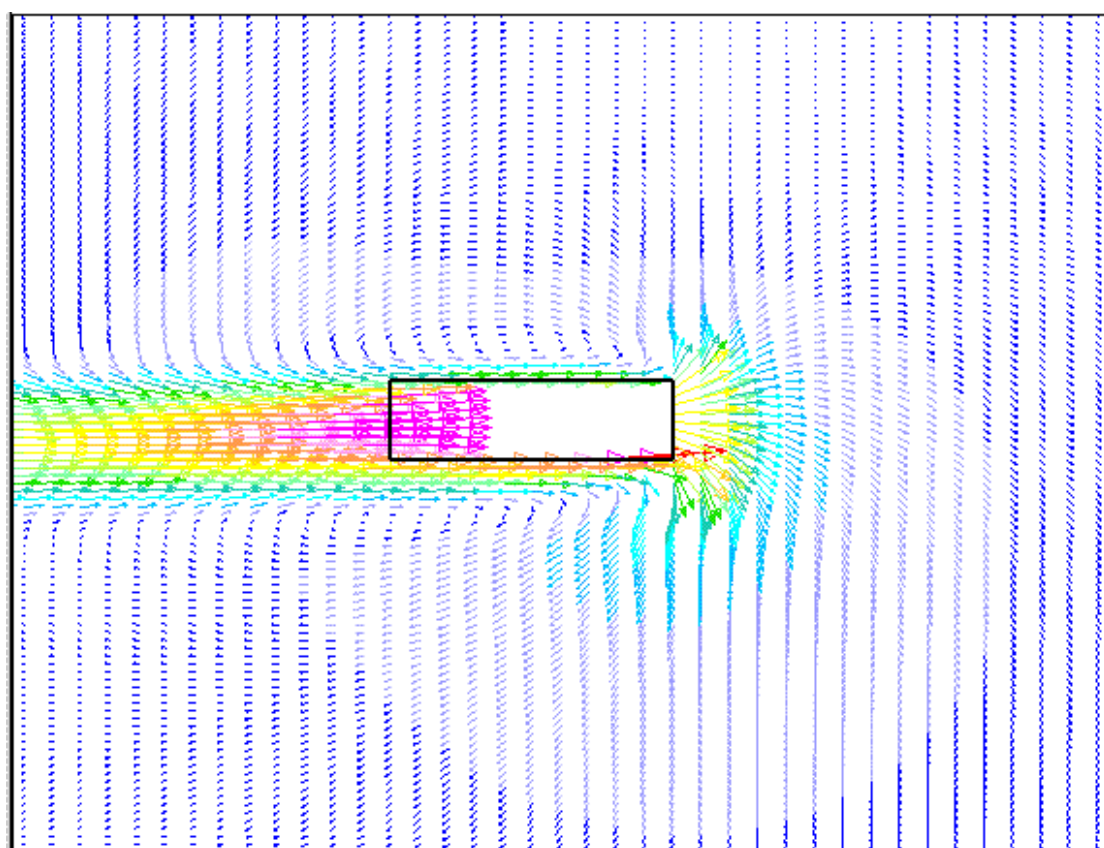


圖 4-44 非均勻流場中時間 1 秒之速度向量圖

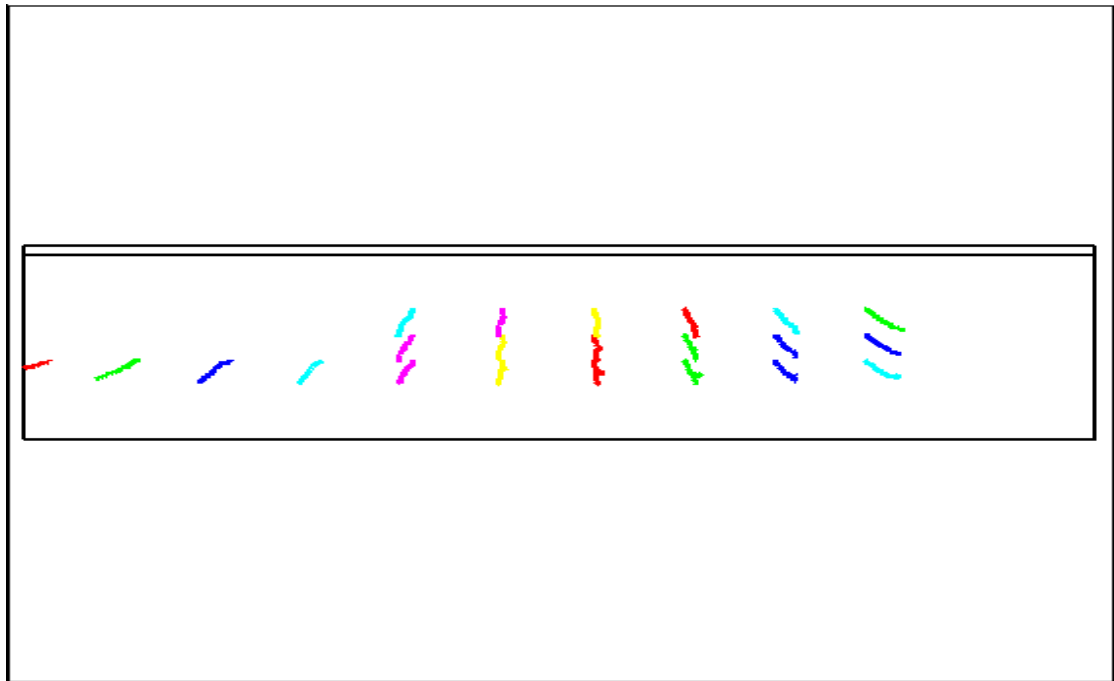


圖 4-45 密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子在非均勻流場中的運動連續軌跡圖

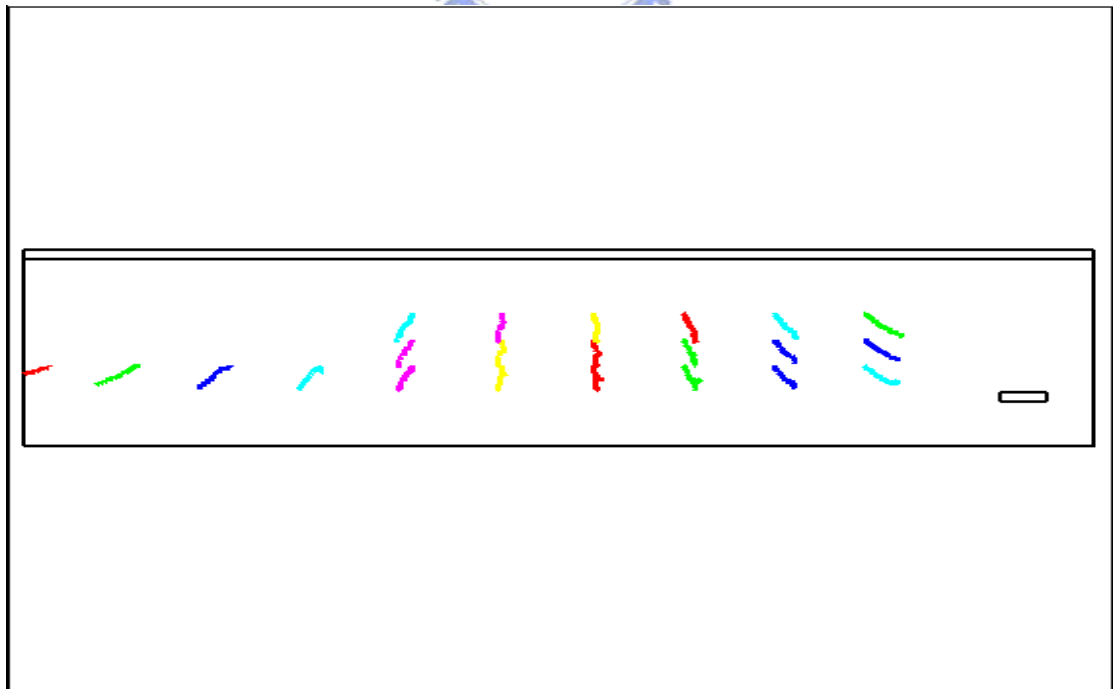
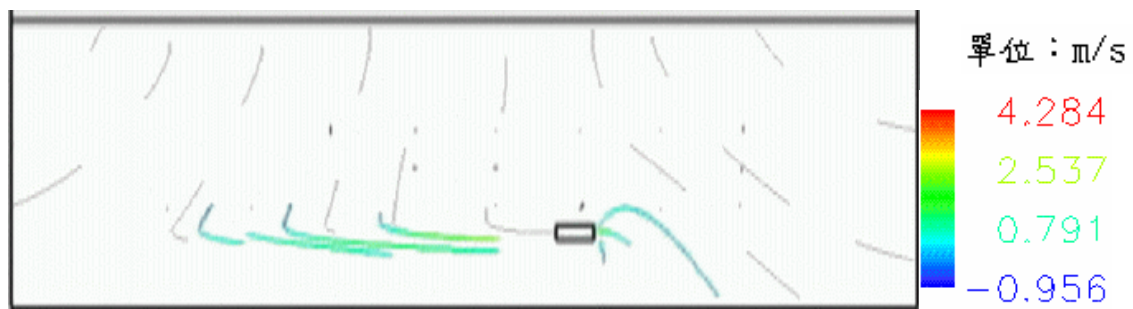
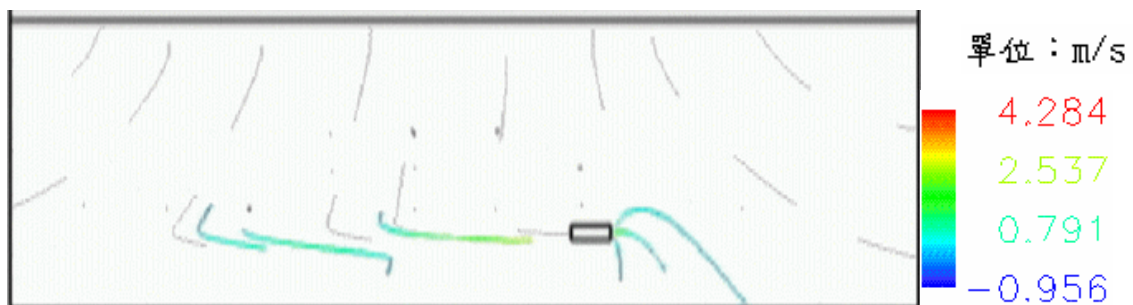


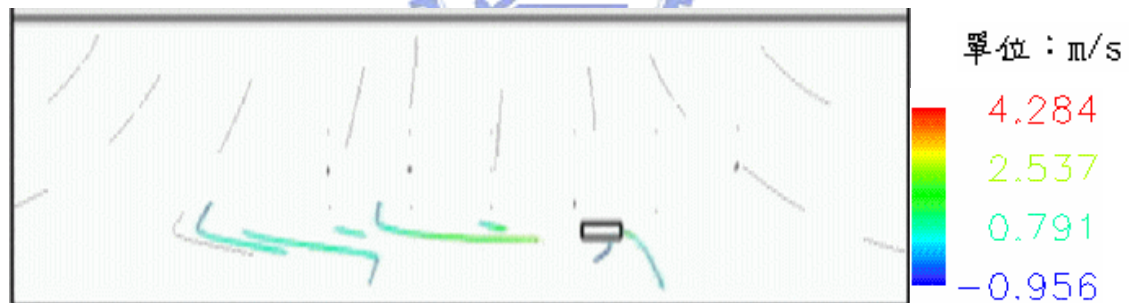
圖 4-46 密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子在非均勻流場中的運動連續軌跡圖



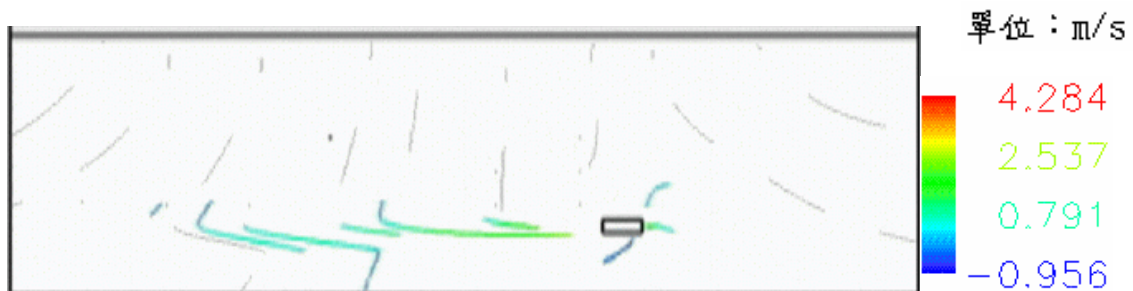
(a) 固體粒子與氣流之運動情形 1



(b) 固體粒子與氣流之運動情形 2

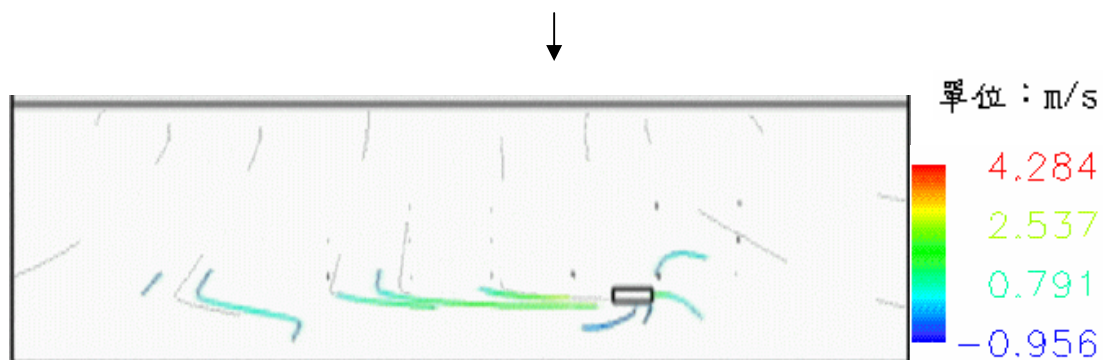


(c) 固體粒子與氣流之運動情形 3

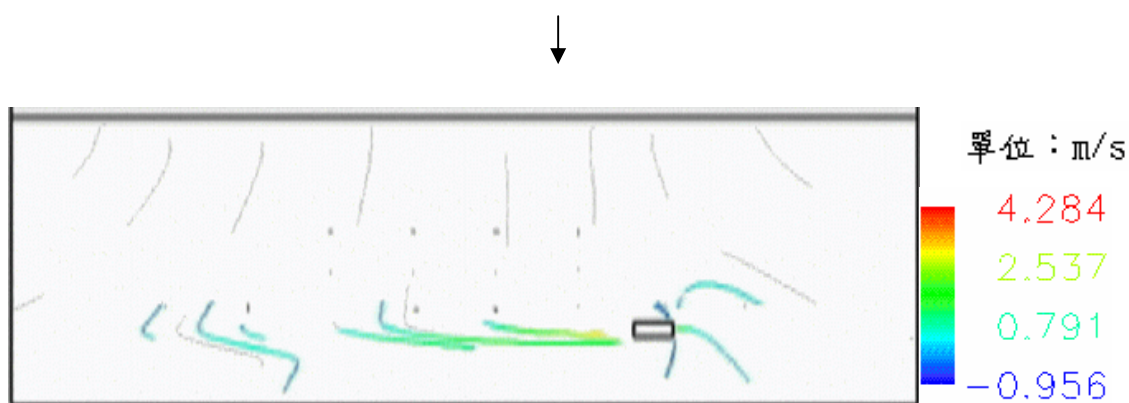


(d) 固體粒子與氣流之運動情形 4

圖 4-47 密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形



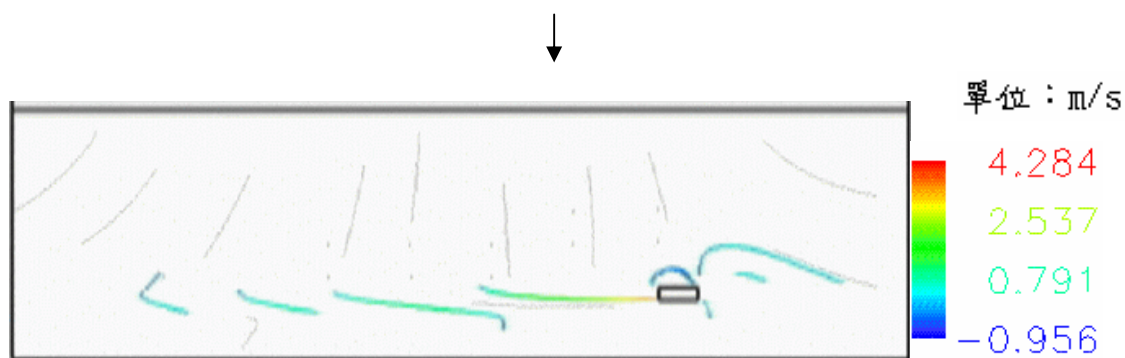
(e) 固體粒子與氣流之運動情形 5



(f) 固體粒子與氣流之運動情形 6



(g) 固體粒子與氣流之運動情形 7



(h) 固體粒子與氣流之運動情形 8

圖 4-47 密度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形

90 公分處時，固體粒子與氣流之運動情形。

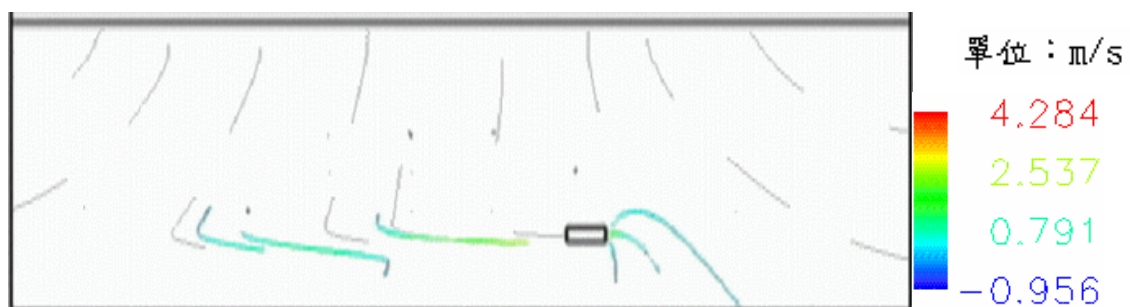
圖 4-48 之(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)為密度： $1\text{kg}/\text{m}^3$ 的固體粒子，放置於距離工作台車上方 30、60、90 公分處時，固體粒子與氣流之運動情形。

從動畫 4-28、4-29 可以觀察到粒子會隨著氣流的移動軌跡而移動，工作台車周圍的氣流是由於工作台車的前進所造成的變化，由於此部分的流場為非均勻流場，當上方氣流往下吹時，周圍氣流的速度很小，不會影響到粒子往下掉落的速度。由於粒子不考慮重力，粒子是被氣流拖下來，工作台車後方的速度已不影響粒子移動的軌跡。均勻流場之上方氣流往下吹時，周圍氣流的速度較大，影響粒子掉落的速度較明顯。

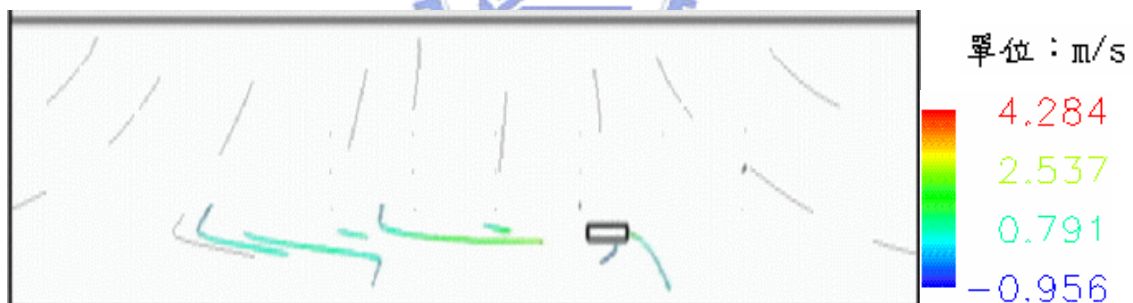




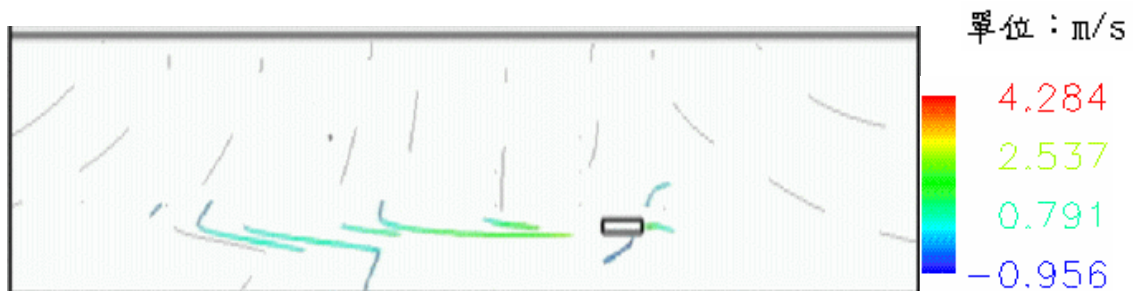
(a) 固體粒子與氣流之運動情形 1



(b) 固體粒子與氣流之運動情形 2

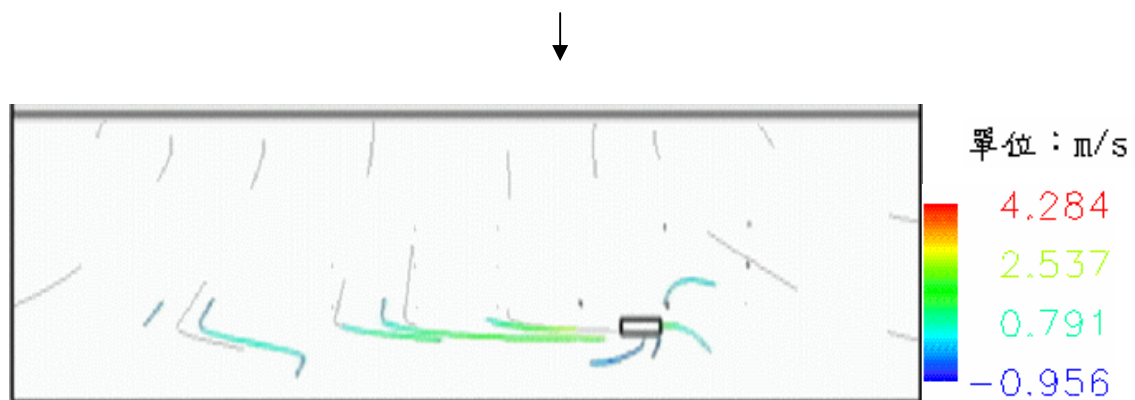


(c) 固體粒子與氣流之運動情形 3

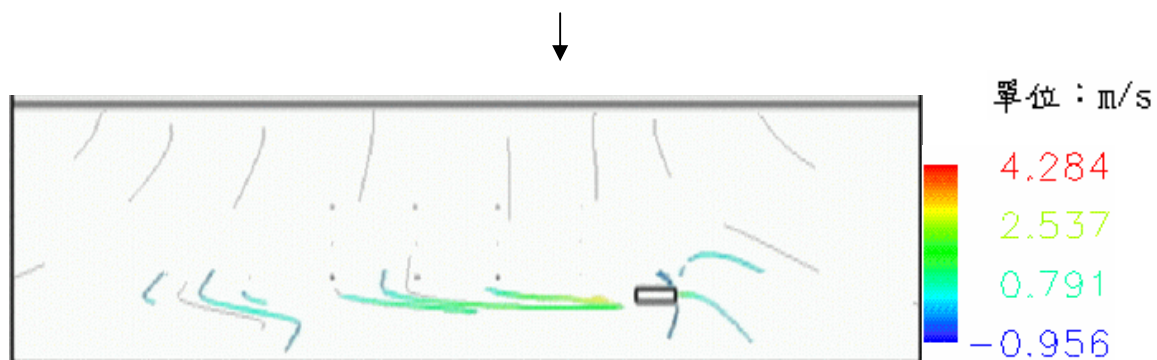


(d) 固體粒子與氣流之運動情形 4

圖 4-48 密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形



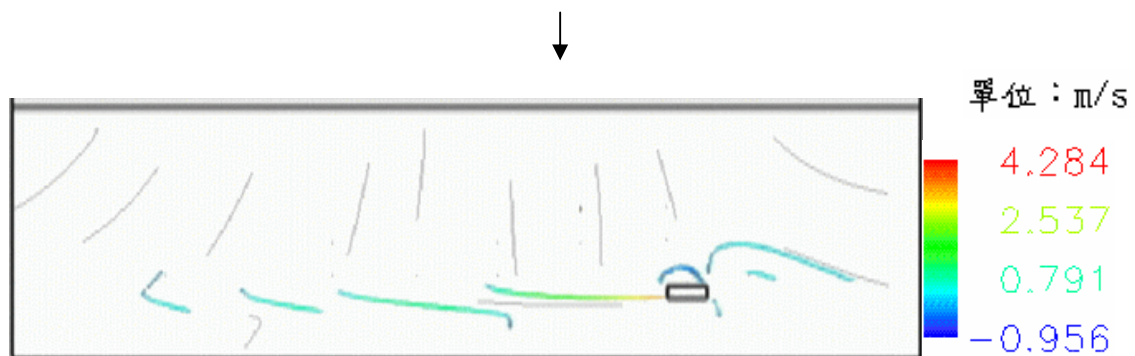
(e) 固體粒子與氣流之運動情形 5



(f) 固體粒子與氣流之運動情形 6



(g) 固體粒子與氣流之運動情形 7



(h) 固體粒子與氣流之運動情形 8

圖 4-48 密度 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 之固體粒子與氣流運動情形

第五章 結論

本文利用各種不同的方式將數值計算之數據配合後處理軟體，以簡單易懂的圖片及動畫呈現，並藉由各種方式表現出流場之特性，藉此觀察流場之現象，並進一步探討不同參數對流場的影響，經研究分析得到以下結論：

1. 流場中放置密度與空氣相同之微小粒子，可以有效的觀察流場的現象，並可以輕易的找出流場中之渦流產生處。
2. 對於顯示濃度擴散的情形，可建立一截面並依不同濃度值給予不同之顏色，即可有效的表現出濃度於流場中擴散之情形。
3. 流場中放置隨濃度改變顏色之空氣粒子，可以模擬汽車移動時，排氣管排放廢氣，周圍環境被濃度污染的程度，並可以觀察濃度污染的範圍大小。
4. 工作台車和粒子飛行軌跡的動畫之數值模擬是分開計算的，必須利用兩者的數值計算結果互相配合，並在流場中放置隨速度改變顏色之空氣粒子，模擬當工作台車移動時，周圍流場的速度變化，最後利用影像覆疊軟體製作成簡單易懂的動畫。



參考文獻

1. 機械產業速報，全球半導體後段設備市場概觀，NO. 73，pp. 2-5，民國 88 年。
2. International Technology Roadmap for Semiconductors, 1998 Update.
3. 李金田，超淨無塵室之理論與實際，國技冷熱空調公司，1987。
4. 專業研究報告，公路隧道通風設計研究，財團法人中興工程顧問社，民國 84 年。
5. 林欣毅，應用空氣動力技術於大面積污染源之通風研究－新型推挽式氣罩的發展，國立台灣科技大學機械工程研究所碩士論文，2002。
6. 王可男，往復運動薄塊對噴流中壁面熱傳影響之研究，國立交通大學機械工程研究所博士論文，2001。
7. T. Igarashi, Heat Transfer from a Square Prism to an Air Stream, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.28, pp.175-181, 1985.
8. C. Gau and I.C. Lee, Flow and Impingement Cooling Transfer along Triangular Rib-roughened Walls, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.43, pp.4405-4418, 2000. International Technology Roadmap for Semiconductors: 1998 Update.
9. 楊昇學，彩色質點影像測速法於瞬間潰壩流場之試驗研究，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2002。
10. Martin Roth and Ronald Peikert, Flow Visualization for Turbomachinery Design, 381-384, Visualization '96. Proceedings, 27 Oct-1 Nov 1996.
11. Hans-George Pagendarm and Thomas Gerhold, Flow Visualization in a Hypersonic Fin/Ramp Flow, 379 -382, Visualization '95. Proceedings, Oct.-3 Nov. 1995.
12. 王孝錚，流場動畫分析之研究，國立交通大學機械工程系碩士論文，2004。
13. D. L. Ermak and H. Buckholz, Numerical Integration of the Langerin Equation: Monte Carlo Simulation, Journal of Computational Physics, vol.35, pp. 169-182, 1980.
14. 傅武雄、黃建平，作業環境之流場流動型式數值模擬-超微小粒子流動現象分析，德基半導體股份有限公司，1995。
15. W. C. Hinds, Aerosol Technology-Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, John Wiley & Sons, 1982.
16. CD adapco Group, Methodlogy Star-Cd version 3. 10, Computerational Dynamics Limited Corp., 1999.