

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

化學氣相沉積反應室內旋轉基板旋轉效應
對於流場影響之研究

Flow Visualization inside Chemical Vapor Deposition Chamber
with Rotating Substrate

研究生：曾力瑋

指導教授：劉耀先 博士

中華民國一百零一年六月

化學氣相沉積反應室內旋轉基板效應對於流場影響之研究

學生：曾力瑋

指導教授：劉耀先

國立交通大學

摘 要

本文主要以實驗的方式，對常壓化學氣相沉積反應室內流場情形進行分析，同時應用粒子影像測速儀作為反應室內流場可視化的主要設備。藉由改變不同的進氣流量、進氣高度、基板溫度以及基板旋轉等，粒子影像測速儀則拍攝並探討反應腔內的流場分布情形。基板在加溫和旋轉下會分別因熱浮力效應以及旋轉效應影響，使腔體內產生不同型式的渦流。另外進氣量以及進氣高度會影響腔體內流場的穩定性。實驗結果中，單孔進氣式之CVD腔體中，會因不同的熱浮力效應與旋轉效應造成不同的流場變化。基板靜止情形下，進氣高度造成的熱浮力效應將比增加基板溫差來的明顯。而旋轉基板中，若基板到達一定轉速，旋轉效應將取代熱浮力效應主導整個流場的變化。

關鍵字：

化學氣相沉積、流場可視化、粒子影像測速儀、熱浮力效應、旋轉效應。

ABSTRACT

Flow Visualization inside Chemical Vapor Deposition Chamber with Rotating Substrate

Student: Li-Wei Tseng

Advisor: Yao-Hsien Liu

The flow field of the Chemical Vapor Deposition chamber was experimentally measured. In order to observe the field flow and velocity distribution in the chamber, particle image velocimetry was used as the flow visualization technique. There are several experimental parameters which effect the chamber flow field and stability such as inlet flow rate, impinging height, substrate temperature and disk rotational speed.

The result shows that, in the single jet atmospheric chamber, the buoyancy force and rotating Reynolds Number cause different patterns of flow fields and vortex. In the stationary substrate, increasing impinging height has stronger effects on buoyancy force than increasing substrate temperature. On the other hands, the rotating effect dominates the flow field in the chamber when the rotating disk reaches a specific rotational speed.

Keywords: Chemical vapor deposition, Flow visualization, Particle image velocimetry, Buoyancy force, Effect of rotation

誌謝

碩士班兩年的研究期間，從進實驗室開始接觸 PIV 設備，到實際操作，協助工研院的薄膜製程計劃，自行設計 CVD 機台，參加研討會，一直到學位論文的完成。整個求學軌跡能如此順利，首先得感謝劉耀先老師，無論在理論上的提點與實作上的建議，都受益良多。雖然一開始對自己的實驗結果都沒有十足的把握，但老師不斷提醒我要對自己做的東西有信心。當學生遇到困難或犯錯時，也能提供不同的意見與方向。在這邊特別感謝劉老師對我們的細心指導。

另外特別感謝吳宗信老師與吳宗信實驗室學長的幫忙，提供一整套 PIV 設備並重新組裝測試。感謝陸傑科技業務經理陳壁生先生給于 PIV 運作的相關建議。感謝工業技術研究院的黃志勇博士，提供薄膜製程技術的相關資料與研究經費支援。感謝實驗室同仁王京璽同學與林裕順同學在課業上與研究上經驗分享交流，並互相砥礪，特別是京璽同學在碩一時，一起辛苦合作完成工研院的計畫。感謝賴冠甫學弟協助儀器設備的操作。在校園之外也要感謝胡溫杰先生，教導演講口試的口語表達訓練。以及好友李亞璇、程婉貽、林芳萍與甘庭姿等，在課業之外邀約出遊與各種活動調適我忙碌的研究生涯。最後感謝父母在求學路上的全力支持，從小到大的養育以及給我最好的教育。我把此榮耀獻給最敬愛的父母。

在交大的大學四年加上碩班兩年，兩千多個日子的歲月，從懵懂無知的青少年到即將步入職場，感謝交通大學這些年給我的一切。交大生活的點點滴滴將會變成我一輩子的回憶。感謝我在交大認識的所有同學與學長姐學弟妹，祝福大家在未來都各自有精彩的人生，感謝大家。

曾力璋 謹誌

一百零一年七月于交大

目錄

摘要	I
誌謝	III
目錄	IV
表目錄	V
圖目錄	VI
附錄圖目錄	VIII
符號表	X
第一章:緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 文獻回顧	3
1.3 實驗目標	6
第二章:理論基礎	7
2.1 噴流雷諾數	7
2.2 熱浮力效應	7
2.3 空氣密度比	8
2.4 旋轉效應	8
2.5 PIV 分析原理	9
第三章:實驗設備與步驟	11
3.1 實驗設備介紹	11
3.2 曲面折射與位移誤差	15
3.3 基板穩態測試	18
3.4 實驗步驟	18
3.5 量測不準度	19
第四章:結果與討論	21
4.1 不同基板溫度的流暢探討	22
4.2 不同基板轉速的流場討論	22
4.3 不同進氣高度的流場探討	23
4.4 腔體流場型態分類與關係	25
第五章:結論與未來建議	28
5.1 結論	28
5.2 未來建議	29
參考文獻	30
附錄:不同條件參數之腔體流場圖	63

表目錄

表一 分析格粒子座標分布.....	35
表二 兩張顯影之粒子位移對應表.....	35
表三 粒子位移量統計.....	36
表四 靜止基板之不同條件物理參數	37
表五 無加溫旋轉基板之不同條件物理參數.....	38
表六 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=20mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	38
表七 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=20mm， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	38
表八 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=40mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	39
表九 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=40mm， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	39
表十 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=60mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	40
表十一 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=60mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	40

圖目錄

圖 1-1	化學氣相沉積技術應用圖	41
圖 1-2	MOCVD 功率矩陣分析圖	41
圖 2-1	實際進氣溫度 25°C 不同基板溫差下模擬溫度對照圖	42
圖 2-2	Autocorrelation Process	42
圖 2-3	Cross-correlation Process	43
圖 2-4	交錯函數方程式分布圖.....	43
圖 3-1	化學氣相沉積流場可視化系統主示意圖	44
圖 3-2	PIV 設備運作示意圖	45
圖 3-3	雙脈衝 Nd-YAG 雷射設備圖	46
圖 3-4	雷射光與透鏡組折射圖.....	46
圖 3-5	高速攝影機設備圖.....	47
圖 3-6	粒子噴灑器設備以及測試圖.....	48
圖 3-7	CVD 模型與實體圖.....	49
圖 3-8	CVD 模型運作圖.....	50
圖 3-9	半圓形實心壓克力試片光學折射圖.....	51
圖 3-10	圓形中空壓克力腔體光學折射圖	51
圖 3-11	光線訊號折射路線圖	52
圖 3-12	腔體各位置之粒子位移與誤差對應圖	53
圖 3-13	加熱穩態實驗	54
圖 4-1	靜止基板， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 不同流量之流場變化圖.....	55
圖 4-2	靜止基板， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ 不同流量之流場變化圖.....	55
圖 4-3	無加溫基板之不同轉速變化圖。	
	H=40mm，Q=1SLM.....	56

圖 4-4	無加溫基板不同流量變化圖。	
	H=40mm, $\omega=100\text{RPM}$	56
圖 4-5	加溫旋轉基板於不同轉速下變化圖。	
	H=40mm, Q=1SLM, $\Delta T=40^\circ\text{C}$	57
圖 4-6	旋轉基板於不同基板溫度下變化圖。	
	H=40mm, Q=1SLM, $\omega=50\text{RPM}$	57
圖 4-7	不同進氣高度下靜止加溫基板變化圖。	
	Q=1SLM, $\Delta T=40^\circ\text{C}$	58
圖 4-8	不同進氣高度下靜止加溫基板變化圖。	
	Q=1SLM, $\Delta T=80^\circ\text{C}$	58
圖 4-9	不同進氣高度下旋轉加溫基板變化圖。	
	Q=1SLM, $\Delta T=40^\circ\text{C}$, $\omega=50\text{RPM}$	59
圖 4-10	不同進氣高度下旋轉加溫基板變化圖。	
	Q=1SLM, $\Delta T=40^\circ\text{C}$, $\omega=100\text{RPM}$	59
圖 4-11	靜止基板下之噴流效應流場	
	Q=5SLM, H=40mm	60
圖 4-12	靜止基板下之熱浮力效應流場	
	Q=2SLM, $\Delta T=40^\circ\text{C}$	60
圖 4-13	旋轉效應流場	
	H=40mm, Q=1SLM, $\omega=100\text{RPM}$	61
圖 4-14	旋轉效應與熱浮力效應共存	
	H=40mm, Q=1SLM, $\omega=50\text{RPM}$, $\Delta T=40^\circ\text{C}$	61
圖 4-15	靜止基板下流場型態分布圖	61
圖 4-16	旋轉基板下流場型態分布圖	62

附錄圖目錄

靜止基板加溫基板流場圖。H=20mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	63
靜止基板加溫基板流場圖。H=20mm， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	63
靜止基板加溫基板流場圖。H=40mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	64
靜止基板加溫基板流場圖。H=40mm， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	65
靜止基板加溫基板流場圖。H=60mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	66
靜止基板加溫基板流場圖。H=60mm， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	67
無加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=1SLM	68
無加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=10SLM	69
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=0.5SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	70
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=1SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	70
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=2SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	71
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=0.5SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	71
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=1SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	72
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=2SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	72
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=1SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	73
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=2SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	73
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=5SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	74
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=1SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	74
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=2SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	75
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=5SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$	75
加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=1SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	76
加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=2SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	77
加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=5SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$	78

加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=1SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$79
加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=2SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$80
加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=5SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$81



符號表

Re: 噴流雷諾數	β : 體積膨脹係數(1/ k)
Re _D : 粒子於流場雷諾數	Q: 氣體流率(SLM)
D _j : 噴流口出口直徑(m)	σ : 標準差
V _j : 噴流出口速度 (m/s)	ε : 標準誤差
H: 進氣高度 (m)	d: 粒子球體直徑(μm)
η : 位移誤差	V ₀ : 粒子終端速度(m/s)
N: 顯影組數	ρ_p : 粒子密度 (g/ cm ³)
ν : 動力黏滯係數(N * S/m ²)	C _D : 粒子阻力係數
Gr: 葛拉修數	F _D : 粒子阻力 (N)
g: 重力加速度 (m/s ²)	
ΔT : 基板溫度與外界溫差 (°C)	
Re _w : 旋轉雷諾數	
T _w : 反應基板溫度(°C)	
T _i : 進氣溫度(°C)	
ω : 基板轉速(Φ/s)	
D _r : 基板直徑(m)	
T _f : 薄膜溫度(°C)	

第一章、緒論

1.1 研究背景與動機

1.1.1 薄膜製程與化學氣相沉積技術

在半導體科技中薄膜製程目前分為物理方法的蒸鍍(Evaporation)以及濺鍍(sputtering)，而近日最廣泛使用的則為化學方法之化學氣相沉積技術(Chemical Vapor Deposition,CVD)。

化學氣相沉積技術為半導體元件產生性質優良與純度高之薄膜的重要技術。此技術目前主要應用於太陽能面板,LED 以及各種需要磊晶薄膜以保護元件免於受靜電等外在環境干擾之半導體組件，薄膜製程發展至今已成為半導體業與面板產業中最重要之製程之一。圖 1-1 為化學氣相沉積製程以及應用元件圖。

化學氣相沉積技術系統大致包括氣體混合與發生反應的反應腔(Reacting Chamber)，氣體控制與混合系統(Gas handling & mixing system)，反應源(Precursor)以及廢氣處理系統(Scrubber)。製程的步驟為將晶圓放置於基底上並暴露於多種前驅物中，而薄膜成長所需的反應源經由氣體控制與混合系統導入反應腔體中與載流氣體混合，並於加熱基板上產生化學反應產生沉積薄膜。最後系統末端的有毒氣體將經過廢氣處理系統進行吸收和無毒處理，以減少對環境傷害。然而反應腔內載流氣體的流場情形，在大多數 CVD 製程中，將決定薄膜品質以及均勻度，對於薄膜的品質良率將扮演關鍵因素。因此近年來對於半導體製程改良與研究中，CVD 反應腔內的流場情形也是大多數人探討的重要議題。

1.1.2 化學氣相沉積技術分類

化學氣相沉積法發展至今已有相當廣泛的應用，根據不同種類的薄膜材料，如單晶，非晶等磊晶材料進行沉積製程。另外 CVD 也依不同操作環境與沉積材料分類成不同的沉積技術。

首先依照腔體的反應壓力可分為常壓化學氣相沉積(APCVD)、低壓化學氣相沉積(LPCVD)和超真空化學氣相沉積(UHVCVD)。降低腔體壓力目的在於減少不必要的氣相反應以增加薄膜均勻性。若依氣相性質則分為氣溶膠輔助氣相沉積(AACVD)、液體注入化學氣相沉積(DLICVD)與有機金屬化學氣相沉積(MOCVD)。氣溶膠輔助沉積為將以交融物質取代傳統前驅物以加速薄膜增長。液體注入沉積則是將液態前驅物先進行蒸發在進行沉積。最後有機金屬沉積主要使用有機金屬(Organometallic)作為沉積物反應源，是目前 LED 生產中重要的製程技術。近年來電漿技術的引進發展出電漿化學氣相沉積(MPCVD)，利用電漿區加速前驅物反應，藉此引許 CVD 在低溫下進行製程。而近年來遠距電漿增強化學氣相沉積(RPECVD)更可將反應溫度接近於室溫，除了提升安全性之外也降低高溫製程所造成的高成本與腔體流場不穩定性。

1.1.2 化學氣相沉積製程參數

而在 CVD 製程設備的研究中，所需技術包括物理，數學，化學，流體力學，熱傳學與材料學等。如圖 1-2 以化學氣相沉積(MOCVD)為例，影響薄膜良率的關鍵性方向包括(1)流場穩定度(2)基板溫度均勻性(3)進氣構造設計(4)基板旋轉情況下的影響(5)反應腔體的整體設計。若能針對上列各點設計並測試其氣流均勻性與加熱的均勻性，將有助於改善 CVD 設計的參考依據。

1.2 文獻回顧

1987 年 Evans 等人[1,2]利用數值模擬方法，以 Navier-Stokes 和 energy equations 等流體力學的基本方程式作為基礎，計算旋轉基板上的混合對流現象，並應用在垂直式氣相沉積反應室，同時考慮浮力與旋轉基板大小之效應。他們發現解決因氣體迴流現象造成薄膜不均勻性的方法為增加反應室入口的均勻流體速度與加入基板旋轉，如此可以有效抑制腔體中渦流的產生。1992 年 Young 等人[3]模擬常壓製程下之垂直式氣相沉積反應室，研究進氣流體慣性力和熱浮力相互作用之關係。熱浮力效應造成的腔體內迴流導致入口氣體方向的變化，影響製程品質。1997 年 Chung 等人[4]利用有限元素法分析垂直氣相平台之腔體，主要改變噴氣頭形狀、製程參數以及反應室的幾何形狀，再利用數值方法預測並有效增進薄膜均勻度。同年 Joh 等人[5] 同樣研究垂直式腔體內之流體和熱傳現象，文中強調在氣體入口處和高速旋轉基板距離之關係。研究中指出旋轉基板的熱傳現象主要受進氣雷諾數與旋轉雷諾數影響，而在高度比率(進氣高度與基板半徑比值 H/D)為 0.54 與 2.16 的比較中，比率在較低的條件下熱傳效果比較明顯。同年 Weyburne 等人[6]綜合腔體幾何形狀的設計和操作參數之影響，在考慮流體速度和腔體溫度分佈，探討上述條件對於流場穩定性關係。並發展出熱浮力效應與進氣雷諾數平方的比值(Gr/Re^2)可作為流體穩定參數的重要依據。2002 年 Park 等人[7]實驗研究沉積反應室內之流場，腔體設計改為進氣入口從底部導入並由頂部排出。發現當載流氣體為氮氣時，較高的進氣速度以及較大的長寬比會造成較大的溫度梯度，流場中渦流方向並未因進氣方向相反而有所變化，同時也利用數值模擬作為驗證。

大部分化學氣相沉積反應皆在低壓情形下進行，近年來常壓化學氣相沉積反應由於具有降低成本的市場潛力。由於過去常壓反應會造成其他不必要的化學反應以及複雜流場的形成影響薄膜品質，但隨著科技技術的演進，常壓反應的可行性也重新為人探討。1990 年 Koh 等人[8]利用數值模擬常壓 CVD 中，以 SiC 化合物作薄膜反應物並與載流氣體作 0.6%~1.2%的混合比例於 650°C~850°C 基板進行反應，並同時考慮氣體黏滯性，傳

導性以及熱擴散等性質下，總結出在低載流氣體量，高混合比率以及腔體內的高溫度梯度會減少薄膜形成的均勻性。2000年 Van Santen 等人[9]探討了在 30cm 大尺寸基板之常壓 CVD 擾流現象。常壓腔體與大尺寸腔體會因強烈的自然對流造成腔體內的擾流形成。擾流的形成會增加基板的熱傳現象，而主導擾流現象的瑞利數 Ra 從 1×10^6 增加至 5×10^6 之後熱傳現象會大幅增加。另外研究結果指出，即使自然對流所造成的擾流會造成基板部分位置的不均勻性，但是對於大尺寸基板而言，擾流反而能增加全區域的均勻度。2002年 Mathews[10]利用雷射光擴散技術(RLS)證明常壓 CVD 的流場穩定情形亦可以利用葛拉修數、雷諾數、壓力以及基板溫度做判定，並以上述物理參數加以界定區分穩定流場。2004年 Luo 等人[11]調整反應腔的幾何形狀，例如改變進氣高度(2cm~4cm)，或將腔體邊角改成圓弧狀，並利用數值模擬的方法，配合不同的進氣流量(180SLM~360SLM)以及基板轉速(0RPM~800RPM)可有效降低常壓化學氣相沉積反應中，基板上方的渦流產生，也降低了磊晶的不均勻性。最佳情況為圓弧腔體下將 27% 的不均勻度降低至 2%。同年 Vanka 等人[12,13]數值模擬常壓 CVD 在旋轉情形下的薄膜均勻度的探討分析，結果指出若能選取適當的進氣流量為 0.5SLM 與轉速 1000RPM~1500RPM，可有效避免常壓腔體造成的不均勻度，提升低成本的常壓腔體的實用性。另外常壓 CVD 在改變腔體的幾何形狀下，也能有效抑制熱浮力效應，增加薄膜的均勻度。此結果一併與 0.1atm 和 0.01atm 的低壓腔體做比較與驗證。

而現今普遍使用的有機金屬化學氣相沉積反應(MOCVD)之世界級廠商，如 VECCO 公司也對氣相沉積平台做相關研究以改進其特性。2006年 Mitrovic 等人[14]研究了大範圍的條件參數如氣體流量(10SLM~350SLM)、壓力分佈(10Torr~1000Torr)、壁面溫度(25°C ~ 250°C)以及旋轉速度(0RPM~1500RPM)的關係，判斷浮力驅動之流場以及旋轉力驅動之流場。將腔體流場分類出平推流場(Plug flow)、熱浮力效應流場(Buoyancy-induced flow)以及旋轉效應流場(Rotating-induced flow)。最後以不同操作條件下的流場穩定度對應薄膜磊晶均勻度作比較。同年[15]研究新式 VECCO 沉積平台，將新型的進氣盤幾何形狀設計利用 Design of experiments (DOE)做 3D 測試，來達到最佳控制基板磊晶生長的均勻性。2007年[16]則利用計算流體力學的數值原理，探討不同參數使磊晶過程達到最

佳化的效果，為了增加磊晶速率，如果提高反應氣體流量($Q>100\text{SLM}$)即可允許使用較高的腔體壓力。另外進氣雷諾數低於某一臨界值($Re<35$)之後，磊晶均勻性會快速下降。

由於電腦科技的進步，近年來大部份化學氣相沉積反應研究均使用數值方法或軟體作電腦模擬。不過數值模擬結果與真實環境下的流場與製程情況仍有一定差異。而在化學沉積技術的實驗部分，流場可視化技術逐漸引進運用在 CVD 流場的探討中。對於化學氣相沉積反應的流場實驗方面，近年來主要以放入煙線等追蹤粒子進行流場的可視化判別研究。Setyawa[17]等人於 2002 年探討於高真空環境(2~4Torr)與不同基板溫度($25^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$)之下，灑入追蹤粒子作流場可視化的分析，發現在基板溫度較高的腔體中，追蹤粒子移動情形受腔體壓力變化的影響較為明顯，而追蹤粒子會因靠近基板而明顯造成方向的改變。同年 Chang[18]等人建立實體反應腔室並同時利用煙線以達成流場可視化效果，觀察混合對流下熱浮力效應渦流以及迴流，在不同基板溫度差($\Delta T=0^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$)、不同壓力下(300Torr~760Torr)以及不同進氣流量(~5SLM)下的渦流與迴流面積分布消長，證實降低腔體壓力可以有效降低熱浮力效應的影響。2004 年 Hsieh 等人[19]也用相同的流場可視化方法探討盅罩式化學氣相沉積反應腔內的渦流產生情形，鐘罩式腔體可有效抑制熱浮力效應造成的流場不穩定性，而且一併趨緩外側迴流。2007 年 Cheng 等人[20]將進氣孔改成多孔形式，並將流場型式分為平推流(Plug flow)，熱浮力效應流場(Buoyancy-induced flow)以及熱浮力平推流混和流場(Mixed plug and buoyancy-induced flow)。2009 年 Chen 等人[21]參考先前的研究中，將之前 H/D 為 4~6 的高度比率改變至 H/D=1~3 的範圍，探討熱浮力效應與外側迴流的變化情形。與先前大部分都探討的比率做比較，發現 H/D ≥ 3 之後，增加 H 所造成的渦流變化已較不明顯。以上實驗均為靜止基板的腔體流場可視化實驗。而對於旋轉基板的腔體中，煙線放入之後因旋轉效應使的煙線流動方向難以用肉眼判定，因此必須使用其他流場可視化技術作旋轉基板腔體的研究量測。

根據先前的文獻探討，影響腔體流場變化的主要因素為熱浮力效應，旋轉效應以及熱傳現象。上述幾項因素可進而分類為下列條件參數:基板溫度、進氣流量、基板轉速以及腔體壓力等等，這些參數經常作為研究化學氣相沉積的數據參考。

1.3 實驗目標

本實驗首先設計實體 CVD 腔體模型與建立基板旋轉機台。工作流體以常溫空氣為主以節省實驗成本，旋轉基板以馬達做驅動。接著運用 PIV 流場可視化設備在不同的操作參數下拍攝 CVD 腔體內的流場情形。

操作參數分別為主導熱浮力效應的基板溫度、氣體入口至基板距離(進氣高度)，主導旋轉效應的基板轉速分別搭配不同的進氣流量作分析探討。



第二章、理論基礎

對於常壓化學氣相沉積反應中，影響反應過程的主要操作參數(基板溫度、基板轉速、進氣流量以及衝擊高度)可利用雷諾數、旋轉雷諾數、葛拉修數、以及薄膜溫度作分析。

2.1 噴流雷諾數

噴流雷諾數(Reynolds number)表示反應氣體流動的慣性力和黏滯力之比值，公式如下：

$$Re = \frac{V_j \times D_j}{\nu} \quad (1)$$

其中 V_j 為進氣口速度， D_j 為進氣口直徑， ν 為空氣的動黏滯係數。

2.2 熱浮力效應

基板在加熱情形下葛拉修數(Grashof number)表示基板於加熱之下的熱對流情形，為熱浮力與氣體黏滯力比值：

$$Gr = \frac{g\beta(T_w - T_i)H^3}{\nu^2} \quad (2)$$

其中 T_w 為反應基板的加熱溫度， T_i 為反應氣體溫度， H 為腔體中反應氣體對應基板的進氣高度。體積膨脹係數 β 於理想氣體的假設下為：

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (3)$$

另外 T_f 則表示為薄膜溫度(Film Temperature):

$$T_f = \frac{T_w + T_i}{2} \quad (4)$$

基板在靜止的狀態下，流體穩定性可利用 Gr/Re^m 來做判斷。而 m 值主要依反應腔幾何形狀而定，其值通常小於或等於 2。本實驗則取 m 值為 2 作計算依據。

2.3 空氣密度比

一般 CVD 薄膜製程均在高溫底下進行化學反應，反應基板溫度高溫可達攝氏 500 至 1000 度左右，反應氣體也有攝氏 100 度以上的高溫。而本實驗受限於設備材料的耐熱範圍，無法實際模擬真實製程溫度。因此我們利用基板溫差與薄膜溫度之間的密度比值與溫度比值接近的理論下，利用較小的空氣基板溫差來推測較大溫差下的流場變化。空氣密度比公式如下：

$$\frac{T_w - T_i}{T_i} \quad (5)$$

利用上述公式計算空氣密度比值，假設實驗中空氣以常溫狀態(25°C)下進入反應腔體模型，在基板溫度與進氣溫度差值 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ (基板溫度 65°C) 的實驗環境下，若選定 200°C 進氣溫度可模擬 263.5°C 基板溫度下的實驗環境 ($\Delta T=40^\circ\text{C} \rightarrow 63.5^\circ\text{C}$)。而在 $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 環境下可模擬 327°C 的基板溫度 ($\Delta T=80^\circ\text{C} \rightarrow 127^\circ\text{C}$)。圖 2-1 中為實際進氣溫度 25°C 的條件下在選定不同模擬進氣溫度與實驗基板溫差下，得到不同的模擬基板溫度。

2.4 旋轉效應

當基板在轉動的狀態下，由於旋轉會產生離心力效應，對反應腔的流場和溫度場產生影響。反應氣體會被離心力推向軸心外而改變熱浮力效應產生的迴流方向。旋轉雷諾數為基板旋轉所產生的離心力與空氣黏性的比值，公式表示如下：

$$Re_\omega = \frac{\omega Dr^2}{\nu} \quad (6)$$

ω 為基板角速度， Dr 為基板半徑。加熱基板在旋轉數較大時，反應腔會因旋轉效應增加流體穩定性，而旋轉基板腔體的流場穩定性可利用 $Gr/ReRe_\omega$ 作為分析依據。

2.5 PIV 影像分析原理

Insight 分析程式最常使用的顯影分析原理分為兩種：Autocorrelation，以及 cross-correlation。此二分析法的差別在分析區域位於兩張間隔時間內曝光的顯影性質。

2.5.1 Autocorrelation 與 FFT

Autocorrelation 為 PIV 分析原理中最基礎的分析法。其原理為將單張顯影，同時運用在兩組分析影像上，並利用二維傅利葉轉換(Two-dimensional Fast Fourier Transformation, FFT)作為分析方式。以下利用簡單的圖解方法說明 FFT 對 Autocorrelation 的數學分析方式。

首先電腦將單張顯影分成數個相同大小之分析格(Interrogation spot)，分析格大小(Spot size)則以固定像素(Pixel)為單位。假設分析格中捕捉到六個質點(如圖 2-2)，將六個質點分別以二維平面座標定義。表 1 為每個質點的編號與對應座標。並將此顯影同時定義為顯影 1 與顯影 2(Frame1,Frame2)。兩張顯影中的每個質點均對另外一張影像的所有質點進行相對位移的計算，可得到表 2 的結果，最後分別對於每種位移量進行統計可得表 3。

表 3 中可得知重疊峰值在位移量為零處(0.0,0.0)，次數出現六次。但粒子並非零位移，因此非所求。電腦必須濾掉零位移信號之後，尋找次高出現重疊數的位移量分別為(-0.3,-0.1)以及(0.3,0.1)。最後除以間隔時間即為分析格內的速度向量。由於電腦同時分析出兩個同量卻方向相反之向量，因此得靠 Image shift 來判別正確的速度方向。

2.5.2 cross-correlation

交錯相關函數分析法(cross-correlation)分析法類似於 Autocorrelation，而差別在於交錯函數分析法為將兩次曝光分別顯影於兩張分析影像上。分析過程類似 Autocorrelation。如圖 2-3，高速攝影機在間隔時間內捕捉之一對顯影圖(Frame1,Frame2)，

而在同一位置的分析格中，每個粒子的位移量利用相關函數方程式(Cross-correlation function)作為主要的分析函數，此方程式主要由灰階值(Gray level)作為粒子影像的判斷依據。相關函數方程式如下：

$$R(m, n) = \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} [f_1(x,y)f_2(x+m,y+n)]dS_XdS_Y}{\{\iint_{-\infty}^{+\infty} [f_1(x,y)]dx dy\}\{\iint_{-\infty}^{+\infty} [f_2(x,y)]dx dy\}} \quad (7)$$

其中 $R(m, n)$ 為分析格內在位置位移向量 (m, n) 的灰階值乘積， m 和 n 分別為橫向和縱向位移量，而 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 分別為兩張影像在同一位置的灰階值。如圖 2-4，為方便相關函數計算，利用 FFT 將相關方程式得到 $R(m, n)$ 所產生的極大值 R_D ， R_D 相對於 $R(0,0)$ 的位移量 $S_D(m, n)$ 即為分析格內的位移向量(Particle displacement)，進而除以脈衝間隔時間，即分析格中粒子平均速度，平均位移速度以向量箭頭作表式。最後將影像中所有分析格的速度向量作統整，即可得出待測的流場(Velocity field)。

相關函數的物理意義類似 Autocorrelation，兩張定量灰階值之顯影底下(相關函數之分母部分)，若顯影 2 的追蹤粒子在位移量 (m, n) 後與顯影 1 的粒子有最大的重疊率，則位移 (m, n) 後之顯影 2 的與原顯影 1 之灰階值累積相乘(相關函數之分子部分)之後將得到最大值。此為 cross-correlation 簡易物理意義。

而對於雙顯影交錯相關函數法(2-Frames cross-correlation)來說，由於雙脈衝時間先後已被定義，因此曝光後所分析得到知速度方向也隨之被決定，不需經由 Image shift 辨認流場方向。

第三章、實驗設備與步驟

3.1 實驗設備介紹

圖 3-1 為 CVD 流場可視化系統的主示意圖。主要設備包括空氣來源與流量系統、粒子影像測速儀系統、實體 CVD 模型、基板加熱系統以及基板旋轉系統。

3.1.1 空氣來源與流量控制系統

工作氣體來源為一台 Puma 公司製造 AC1530 空氣壓縮機，驅動電力為 110 伏特交流電，功率 1.5 匹馬力，工作流量為 130L/min。壓縮空氣驅動進入並儲存於容量 30 公升的空氣桶。但由於空氣桶已過於老舊，空氣桶壓力最高不得超過 5 大氣壓以策實驗安全，最低亦不可低於 2 大氣壓確保空氣正常輸出。流量計則為欣川工業製造 H-100FS-10J-GWN 面積式流量計，可量測流量範圍為每分鐘 2~20 公升。

3.1.2 粒子影像測速儀

TSI 公司設計製造的粒子影像測速儀包括：雙脈衝雷射、同步器、CCD 高速攝影機、粒子噴灑器以及 Insight 分析軟體等。圖 3-2 為 PIV 設備運示意圖。利用兩道雙脈衝雷射，在設定時間內先後照射於散布流場中的追蹤粒子，其中追蹤粒子主要經由粒子噴灑器噴灑並隨流場散布流動。追蹤粒子反射脈衝雷射的兩道訊號，再經由 CCD 高速攝影機捕捉，形成一對顯影底片。TSI 公司提供影像處理與分析軟體 Insight 可分析兩張顯影中的粒子位移，再除以雙脈衝間隔時間，即可進行分析計算出流場向量分布圖。另外 Insight 可藉由同步器控制 CCD 攝影機以及雙脈衝雷射的運作時間。

以下對粒子影像測速儀各個部件的介紹：

脈衝雷射(Mini Dual Nd-YAG Laser)

雙脈衝 Nd-YAG 雷射，設備如圖 3-3，雷射波長為 523nm(綠光)，脈衝頻率最高可達 15Hz。雙脈衝則分為 YAG1 以及 YAG2 兩道雷射訊號，利用 Q-Switch 功能累積雷射功率，最大功率發生在 Q-Switch 的累積時間 175 微秒，Q-Switch 功能可使每道雷射功率範圍控制在 12mJ/pulse 到 200mJ/pulse 之間，雙脈衝雷射時間範圍在 50 μ s~100000 μ s，可根據不同的實驗環境作雷射能量與脈衝時間的調整。

雷射光束原始直徑為 3.75mm，配合凹透鏡與凸透鏡組成的稜鏡鏡片組，將光束折射成扁平光束面。為盡量使光束面照射之流場呈二維分布，流場位置於光束面厚度最薄的腰部附近做拍攝效果最佳，如圖 3-4。而理想的光束面厚度將控制在 1mm 以內。

CCD 高速攝影機(CCD Camera)

CCD 攝影機型號為 PIVCAM10-30，可安置於一般攝影專用三角架上，如圖 3-5，CCD 攝影機專門擷取 PIV 系統中雙脈衝雷射的反射訊號。攝影機為一百萬像素 (1008x1018 pixels)，並以固定像素數將影像分割成多個分析格，以此產生單位向量場。

同步器(synchronizer)

同步控制器主要功能為連結並同步觸發雙脈衝雷射的發射頻率以及高速攝影機的拍攝與曝光時間。最後同步器將影像擷取訊號輸出回傳至電腦中供使用者作影像處理。

粒子噴灑器

TSI 公司設計之 Model 9306 six jet atomizer 噴灑器，如圖 3-6，可噴灑定量的追蹤粒子(Tracing particle)，本實驗將使用鹽水溶液或砂糖水溶液，水溶液被高速噴流濺出並快速蒸發成極小微粒，再經由稀釋空氣閥控制混合稀釋空氣輸出粒子煙霧。水溶液濃度決定追蹤粒子顆粒大小。舉例來說，對於重量百分比 5%的鹽水溶液，其噴灑粒子直徑可小至 4 μ m 以下[22]。

追蹤粒子終端速度

追蹤粒子與工作流體混合進入腔體後，將受重力影響形成一定下墜速度，在流速極低的流場中此下墜速度可能造成垂直的速度場，使流場產生差異。此誤差可利用流體力學公式計算追蹤粒子在空氣中的終端速度與載流氣體速率作比較。

假設追蹤粒子為光滑圓球體，在計算終端速度之前須先定義出粒子下墜時的阻力系數 C_D (drag coefficient)。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho_p V_0^2 A} \quad (8)$$

其中 F_D 為粒子受空氣阻力。若粒子已到達受重力下降之最大速度(終端速度)，則根據牛頓第二定律，阻力將等於粒子受重力($F_D = mg$)。 ρ_p 為粒子密度， A 為粒子球體受空氣阻力截面積， V_0 為粒子終端速度。公式(8)可簡化為

$$C_D = \frac{m \times g}{\frac{1}{2}\rho_p V_0^2 \times A} = \frac{\frac{4}{3}\left(\frac{d}{2}\right)^3 \pi \rho_p \times g}{\frac{1}{2}\rho_p V_0^2 \times \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{\frac{4}{3}dg}{V_0^2} \quad (9)$$

另外粒子球體受載流氣體阻力之雷諾數 Re_D 定義為

$$Re_D = \frac{\rho_p V_0 d}{\mu} \quad (10)$$

其中 μ 為空氣動黏滯系數， d 為粒子球體直徑。在球體直徑 d 為極小值與動黏滯系數 μ 為極大值情形下，可估計雷諾數將遠小於1。在雷諾數遠小於1，($Re_D \ll 1.0$)前提下，雷諾數 Re_D 與阻力系數 C_D 的關係為

$$C_D = \frac{24}{Re_D} \quad (11)$$

將公式(10)代入(11)並配合(9)，可得公式如下

$$C_D = \frac{24\mu}{\rho_p V_0 d} = \frac{\frac{4}{3}dg}{V_0^2} \quad (12)$$

最後計算出粒子終端速度 V_0 公式為

$$V_0 = \frac{\rho_p d^2 g}{18\mu} \quad (13)$$

ρ_p 為糖粒子密度為 1.582 g/cm^3 ，粒子球體直徑 d 為 $4 \mu\text{m}$ ，空氣動黏滯係數 μ 為 $1.846 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \times \text{s}$ 。經過計算，終端速度為 $7.464 \times 10^{-8} \mu\text{m/s}$ 。由於終端速度極小，因此在巨觀流場中粒子終端速度影響可忽略不記。

Insight 質點影像測速分析軟體

TSI 公司發展的 Insight Version V3.26 軟體透過同步控制器接管並控制脈衝雷射槍的發射功率，Q-Switch 延遲時間，脈衝頻率以及兩道脈衝時間間隔等，利用控制器配合脈衝發射時間與 CCD 攝影機的曝光時間。程式中依照流場複雜度提供五種不同像素數量作為每單位分析格的大小 (8×8 , 16×16 , 32×32 , 64×64 , 128×128 pixels)。為避免質點位移超過分析格產生雜訊，必須慎選分析格大小。

3.1.3 模型設計

本實驗以實體反應腔模型並利用粒子影像測速儀量測基板上方的流場分布情形。模型與實體如圖 3-7。模型材料以壓克力為主，底座為不鏽鋼金屬。反應腔體模型製程模擬運作如圖 3-8，帶有追蹤粒子的工作流體首先進入混合室經由整流網格使粒子與氣體均勻分布，再通過直徑 16.3 mm 的進氣入口流動至加熱基板。基板直徑 160 mm ，反應腔內壁直徑 194 mm 。噴氣流衝擊加熱基板之後再經過底座排氣孔排出。

3.1.4 基板加熱系統，旋轉系統

基板加熱系統由圓片狀矽膠加熱片至於基板底部提供熱源，最高加熱功率可達 150 瓦，並可經由電源供應器調整交流電電壓控制加熱溫度。矽膠加熱片經過測試之後預計加熱溫度可達 150 度。T-type 熱電偶線黏置於加熱基板下方，溫度訊號連接至電腦中的訊號擷取程式 Labview 作溫度量測與記錄。基板旋轉系統由 Fukuta 公司生產的旋轉馬達配合變頻器作轉速的輸出與控制，最高馬力輸出為 0.5 HHP 。Mercotac 製造 H-6 型旋轉集電環 (slip ring) 可將旋轉基板上的矽膠加熱片以及熱電偶線分別與供應電源和訊號擷取程式作連結，而在基板旋轉時可維持一定的電子訊號。因考慮集電環的訊號連接效能，實驗轉速必須限制在 500 轉以內。

3.2 曲面折射與位移誤差

反應腔體壁面使用的是圓柱形透明壓克力材料。根據光學的折射效應，曲面透明圓管會因折射造成視覺上的差異(實際位移量會大於 PIV 量測的位移量)。此差異經由攝影機拍攝，其速度場的水平分量與真實結果相比會產生扭曲的現象。2005 年 Elsinga 等人 [23] 定義了 PIV 在訊號折射情形下，對於單一質點的位置誤差(Position error)為真實質點位置和量測位置的差異對應質點之真實位移的比值：

$$\eta = \frac{y'_p - y_p}{y_p - y_o} \quad (14)$$

其中 y'_p 和 y_p 分別為質點折射後量測點位置以及質點的實際位置。 y_o 為質點於脈衝時間內位移之參考起始點。2010 年 Murphy 等人 [24] 研究雷管震波 PIV 量測中，使用半圓形的實心透明壓克力為震波傳遞介質，再利用 PIV 以及位置誤差的理論量測震波變化。圖 3-9 為半圓形實心壓克力的折射假設中脈衝訊號經折射後均垂直進入攝影機。綠點與綠線分別為質點實際位置與反射訊號行經路線，質點反射的脈衝訊號因折射造成量測位置的誤差，而白點與虛線即代表質點於影像中位置。本實驗為中空壓克力圓管，參考 Micheal 的訊號折射方向假設，在訊號垂直進入攝影機的前提下，壓克力材質中與反應腔體內的訊號因兩次折射而造成路線變化，如圖 3-10。

在訊號的折射線像中，必須遵守司乃爾定律(Snell's law)，入射訊號與折射訊號則必須滿足下列公式：

$$n \times \sin \theta = n' \times \sin \theta' \quad (15)$$

其中 n 為空氣折射率， n' 為壓克力圓管折射率，分別為 $n = 1.00227$ 以及 $n' = 1.46$ 。

質點於脈衝時間內從 X_o 之起始位置移動至 X_p ，而攝影機捕捉之影像位置為 X'_p ，而影像位置因不同的折射角度與位置而改變，因此 X'_p 可視為 X_p 的函數：

$$X'_p = f(X_p) \quad (16)$$

3.3.1 質點影像與實際質點位置分析

為了精確求出腔體中不同質點之實際位置與影像位置，假設半徑 97mm 之腔體中每厘米皆有擷取到的質點影像。在光線訊號折射圖 3-11 中，每道訊號線 S 於座標系統之方程式可表示成下列公式

$$S: x = x'_p \quad (17)$$

其中 x'_p 值為整數，其值範圍為 0~97。

3.3.2 中空壓克力腔體座標方程式

假設壓克力腔體圓心座落並重疊於座標系原點，其內徑 C_1 與外徑 C_2 之座標方程式分別為：

$$C_1: x^2 + y^2 = 97^2 \quad (18)$$

$$C_2: x^2 + y^2 = 100^2 \quad (19)$$

第一次折射

訊號線 S 首先與外徑 C_2 交會於第一次折射點 (A_1, B_1) ，並發生第一次折射，根據斯乃爾定律，第一次折射的入射角與折射角關係式為：

$$n \times \sin \theta_1 = n' \times \sin \theta'_1 \quad (20)$$

L_1 為第一次折射的法線方程式與斜率 α_1 為：

$$L_1: y = \frac{A_1}{B_1} x \quad (21)$$

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \frac{A_1}{B_1} \quad (22)$$

第一次折射線 S_1 即可用點斜式表示為

$$S_1: \tan(\alpha_1 + \theta'_1) \times (x - A_1) = (y - B_1) \quad (23)$$

第二次折射

第一次折射線 S_1 與內徑 C_1 交會於第二次折射點 (A_2, B_2) ，第二次折射线方程式斜率可表示為：

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \frac{A_2}{B_2} \quad (24)$$

而第二次入射角 θ_2 為

$$\theta_2 = (\alpha_1 + \theta'_1) - \alpha_2 \quad (25)$$

第二次入射角與折射角關係式則為

$$n' \times \sin \theta_2 = n \times \sin \theta'_2 \quad (26)$$

第二次折射线 S_2 可表示為

$$S_2: \tan(\alpha_2 + \theta'_2) \times (x - A_2) = (y - B_2) \quad (27)$$

S_2 與 X 軸交會點即為質點實際位置 X_p

腔體內之粒子位移誤差可表示為

$$\eta = \frac{X'_p - X_p(X_p)}{X_p - X_o} \quad (28)$$

在假設腔體中之追蹤粒子皆有不同的起使位置 X_o ，而基板半徑為 Dr ，在針對腔體右半邊每個質點的不同起始位置 $X_o = 0Dr、0.2Dr、0.4Dr、0.6Dr、0.8Dr、1.0Dr、1.2 Dr$ 之位移誤差變化如圖 3-12

其中 x 軸為質點位移距離，y 軸為對應之位移誤差。由圖可得知，粒子位移越小，或是粒子靠近腔體壁面，折射現象產生的位移誤差越大。但大部分的誤差不超過 1%，而最大的位移誤差發生點在 $X = 1.2 Dr$ 的最小位移，誤差可達 56%。然而基於靠近壁面拍攝效果不佳，因此腔體流場分析面將不包含位置 $1.2 Dr$ 。在低位移誤差量之下，本實驗將所得之位移誤差視為圓管 PIV 的量測誤差之一，誤差最大在 4% 以內。

3.3 基板穩態測試

矽膠加熱片大面積覆蓋在銅製基板底部可提供均勻熱源並有效傳遞至基板上半部。並根據比爾數計算(biot number)，3mm 厚銅製基板溫度預測為均勻分布。但由於基板中心受較低溫的載流氣體衝擊影響，基板在熱穩態測試中發現基板內外的穩態溫度在 $3^{\circ}\text{C}\sim 6^{\circ}\text{C}$ 之間。因此可將內外圈的溫度作平均，作為實驗的基板穩態溫度。圖 3-13 為 5SLM 進氣流量，基板溫差 40 度的加溫時間圖，加溫時間至 90 分鐘後熱電偶線的訊號在隨後 20 分鐘內跳動不超過 0.2 度，可視為達到熱穩態。

3.4 實驗步驟

- A. 開啟空壓機，旋轉馬達，真空幫浦，加熱片以及溫度記錄器。並依照不同的實驗參數調整基板溫度，轉速以及空氣流量直到熱電偶線溫度訊號穩態。而基板穩態溫度與工作流體溫度差視為加熱溫度差 ΔT 。
- B. 開啟 PIV 系統，並調整攝影機焦距以及光圈令即時影像清晰。雷射光從最弱光強度漸增避免高光量對高速攝影機造成損壞，同時調整光源和光圈使兩張顯影的曝光效果相同。
- C. 開啟粒子噴灑器，使追蹤粒子進入進氣系統，由於開啟粒子噴灑器會增加進氣總流量，因此必須迅速調整稀釋空氣閥使總流量回到原訂值。
- D. 觀察瞬時影像判斷追蹤粒子濃度，濃度過淡會增加實驗誤差，過濃則會污染透明壓克力觀測窗形成霧面影響影像的擷取。
- E. 利用高速攝影機快速拍攝功能於短時間內擷取 50~200 組影像。影像組數量視不同的流場性質作適當調整。
- F. Insight 軟體擷取影像向量圖，並能對多組流場影像作速度場與方向的 Time-averaged velocity 的平均處理，可求得品質較高與更準確的結果。

3.5 量測不準度

3.5.1 標準誤差值(Standard error)

PIV 在拍攝多組影像並進行平均化的過程中，每組顯影所分析出來的向量場皆有不準度(Uncertainty)的存在，利用統計學原理計算數據的離散性以求得多組顯影數據的不準度。對於所有顯影組之速度場標準差與量測顯影組數量開根號的比值作為標準誤差值(Standard error, ε)此誤差值以速度(m/s)為單位

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (29)$$

其中 σ 為固定多組顯影所統計的速度場標準差， N 為 Time-averaged velocity 的顯影數量。只要數據信賴度在 95%區間內，或者樣本數 N 趨近於無限大，則根據中心極限定理(central limit theorem)可將多組數據樣本視為常態分布[25]。但為了簡化計算，並且在觀察每組顯影所拍攝的向量場差異不大的前提下，樣本數 N 可為有限之數量。可以再利用此公式衍算出的相對不準度通常小於 5% [26]。由公式(24)觀察可知，拍攝顯影組數越多，多組影像平均之測量流場誤差也就越小。對於本實驗所選取 $N=50$ 組顯影所分析求得之每組顯影的水平平均方向速度(\bar{U})，垂直方向平均速度(\bar{V})以及平均速率(U_b)與其所統計之標準差 σ 如下表。

	\bar{U}	\bar{V}	U_b
平均值(m/s)	-0.00155	-0.05736	0.05981
σ (m/s)	0.00694	0.00945	0.00935

對於水平速度場 \bar{U} ， $\varepsilon = \frac{0.00694}{\sqrt{50}} = 0.000982 \text{ m/s}$

對於垂直速度場 \bar{V} ， $\varepsilon = \frac{0.00946}{\sqrt{50}} = 0.00134 \text{ m/s}$

對於平均速率 U_b ， $\varepsilon = \frac{0.00935}{\sqrt{50}} = 0.00132 \text{ m/s}$

因此對於 50 組顯影平均求得之速度場，水平平均方向速度(\bar{U})，垂直方向平均速度(\bar{V})以及平均速率(U_b)所統計之標準誤差值 ε 如下表。

	\bar{U}	\bar{V}	U_b
ε (m/s)	0.000982	0.00134	0.00132

3.5.2 相對不準度(Relative Uncertainty)

而相對不準度(Relative Uncertainty)為標準誤差與平均速率的商數

對於水平速度場 \bar{U} ，相對不準度為 $0.000982/0.05981 = 1.70\%$

對於水平速度場 \bar{V} ，相對不準度為 $0.00134/0.05981 = 2.34\%$

對於平均速率 U_b ，相對不準度為 $0.00132/0.05981 = 2.29\%$

對於 50 組顯影平均求得之速度場，水平平均方向速度(\bar{U})，垂直方向平均速度(\bar{V})以及平均速率(U_b)所統計之相對不準度如下表。

	\bar{U}	\bar{V}	U_b
Relative Uncertainty(%)	1.70	2.34	2.29

第四章、結果與討論

本實驗針對常壓腔體下的數種影響流場變化的實驗參數:基板溫度差、基板轉速、進氣高度變化作探討。各個實驗條件與參數對照如表4至表9。流場結果圖中無因次參數 Dr 表示為基板半徑, H 為腔體高度。因腔體邊緣於拍攝效果不佳而並未量測流場全域, 觀測流場大小分別為水平寬度最多在 $\pm 1.197Dr$ (全域: $\pm 1.21Dr$), 而可拍攝之最高垂直高度為 $0.952H$ 。下列實驗中, 基板直徑為 160mm , 腔體內徑為 194mm , 進氣高度分別為 20mm 、 40mm 、 60mm 。本文中所有實驗條件的流場結果圖請參見附錄。

4.1 不同基板溫度的流場探討

圖 4-1 與 4-2 為靜止基板在加溫情形下, 基板和工作流體的溫差以及工作流體流量將主導熱浮力效應造成的渦流變化。圖 4-1 與 4-2 的溫基板溫差分別為 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 、 80°C ($Gr=181912$ 、 342423), 兩圖流量變化皆為 $Q=1\text{SLM}$ 、 2SLM 、 5SLM ($Re=63$ 、 125 、 314)。形成熱浮力效應主導的腔體流場(buoyancy-induced flow)。當基板溫差 ΔT 增加為 40°C , 腔體流場受到熱浮力效應影響。 $\Delta T=40^\circ\text{C}$, $Q=1\text{SLM}$ 情形下, 工作流體接觸基板後不久又受熱上升, 同時偏基板外側流體亦隨著上升氣流引導上升。上升氣流最後受腔體頂部阻擋造成分流, 往內部的分流氣體重新與出口噴流會合形成熱浮力渦流(buoyancy-induced vortex)。而流向外部的分流氣體沿著腔體頂部向外側流動形成外側迴流(outer circulation)。並由流場速度分布可得知熱浮力效應造成的上升氣流維持一定速度, 並無明顯減速的現象。在同樣流量下, 當 ΔT 從 40°C 持續增加至 80°C ($Gr=181912 \rightarrow 342423$), 葛拉修數的倍增, 流場中較高的流速分布將更加明顯。但是隨著工作流體流量的增加, 熱浮力效應將明顯降低。隨著慣性流體主導流場變化, 工作流體自噴氣口進入腔體, 接觸基板後沿著基板往外徑向流動。流體流動至基板邊緣並接觸腔體壁面, 部分流體受壁面引導往上並受重力影響形成迴流。並由圖 4-1 與 4-2 比較可得知, 改變流量造成的變化將明顯於改變基板溫度的變化, 換言之噴流雷諾數對流場

的影響將大於葛拉修數的影響。

在一般的化學氣相沉積中，若基板上方氣流若能平順的往腔體邊緣徑向流動，將能維持薄膜均勻生成。然而進行薄膜沉積反應必須加熱基板，載流氣體與加溫基板的溫差會因熱浮力效應使基板上方的載流氣體上升，產生渦流，影響薄膜生成的品質和均勻性。而根據上述結論，在固定進氣高度以及靜止基板情形下，增加流量可將渦流推擠至基板腔體邊緣，相對減少熱浮力效應產生的不穩定性。

4.2 不同基板轉速的流場探討

4.2.1 無加溫基板的旋轉效應

圖 4-3 為無加溫基板對應不同轉速的變化圖。流量皆為 $Q=1\text{SLM}$ ($Re=63$)，基板轉速分別為 $\omega=25\text{RPM}$ 、 50RPM 、 100RPM 、 250RPM 、 500RPM ($Re_{\omega}=807$ 、 1613 、 3227 、 8067 、 16134)。基板在無加溫情形下，基板旋轉因離心力形成旋轉效應改變流場變化。腔體下方靠近旋轉基板部分因離心力較大，使原本漩渦狀的迴流下半部開始變型擠壓，同時噴流兩側因迴流被擠壓產生的空間，形成鐘罩型低流速區。隨著基板轉速的增加，旋轉效應的增強使得整個迴流被排擠至腔體壁面形成旋轉效應流場(rotating-induced flow)。類似於旋轉灑水器的原理，旋轉效應流場中，腔體中高速流場分布低流速區上緣，高速流體流動至基板附近再受壁面引導形成扁平型狀之旋轉渦流(rotating vortex)，另一方面低流速區面積也隨旋轉效應逐漸擴大。而在同樣轉速下，若將流量從 1SLM 增加至 10SLM ($Re=63 \rightarrow 630$)，如圖 4-4，因進氣雷諾數的增加使得旋轉渦流無法如圖 4-3 之流場，隨轉速增加被迅速擠壓至腔體壁面，相對的低流速區也因旋轉渦流面積較大而被壓縮。

4.2.2 基板加溫情形下的旋轉效應

圖 4-5 為加溫基板配合旋轉效應變化圖。進氣流量為 $Q=1\text{SLM}$ ($Re=63$)，基板溫差為 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ ($Gr=181912$)，基板轉速分別為 $\omega=$ 靜止、50RPM、100RPM、250RPM ($Re_\omega=0$ 、1613、3227、8067)。原本的靜止加溫基板所主導的熱浮力效應流場，在加入旋轉效應之後將有明顯的變化。在 $\omega=50\text{ RPM}$ ($Re_\omega=1613$) 下原先靠近噴流的熱浮力渦流下雖然與旋轉渦流共存於腔體中，卻因旋轉效應而被推擠至腔體邊緣。而在轉速增加至 $\omega=100\text{ RPM}$ ($Re_\omega=1613 \rightarrow 3227$) 之後熱浮力渦流幾乎消失，取而代之的為旋轉效應渦流的形成，而成為旋轉效應渦流。接著比較旋轉基板升溫所造成的流場變化。而圖 4-6 為基板固定轉速下不同溫差的變化圖。在進氣流量相同 $Q=1\text{SLM}$ 下，基板轉速為 $\omega=50\text{ RPM}$ ($Re_\omega=1613$)，基板溫差分別為 $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 、 40°C 、 80°C ($Gr=0$ 、181912、342423)。在固定流量與轉速之下，無加溫基板 $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 與 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 的比較中可發現因葛拉修數的存在使熱浮力渦流與旋轉渦流共存於腔體中。但在增加基板溫度從 $\Delta T=40^\circ\text{C} \rightarrow 80^\circ\text{C}$ ($Gr=181912 \rightarrow 342423$)，葛拉修數的增加兩倍，流場已無太大變化，由此可得知旋轉效應對腔體流場的影響大於熱浮力效應

根據上述討論結果，旋轉基板造成的離心力將渦流推擠到腔體得更邊緣處，如此可避免熱浮力渦流或迴流等不穩定流場發生在位於薄膜反應產生的基板上方。然而增加進氣流量反而使旋轉基板需要更高的轉速才能使迴流推擠至腔體邊緣。

4.3 不同進氣高度的流場探討

由於葛拉修數與進氣高度的三次方成正比 ($Gr \sim H^3$)，因此相較於基板溫差 ($Gr \sim \Delta T$)，改變進氣高度所造成的熱浮力效應變化將更為明顯。以下將探討進氣高度從原本的 $H=40\text{mm}$ 分別調整為 $H=20\text{mm}$ 以及 $H=60\text{mm}$ 之後所造成的流場變化。若在其他實驗條件相同的環境下，進氣高度調整為 $H=20\text{mm}$ 以及 $H=60\text{mm}$ 所造成的葛拉修數變化分別為原進氣高度的 3.375 倍以及 0.125 倍。

4.3.1 靜止基板下的變化

圖 4-7 為加溫靜止基板($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)不同進氣高度的腔體下的流場變化圖。進氣流量為 $Q=1\text{SLM}(\text{Re}=63)$ ，基板溫差為 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ，進氣高度分別為 $H=20\text{mm}$ 、 40mm 、 $60\text{mm}(\text{Gr}=22739、181912、613953)$ 。靜止加溫基板在不同進氣高度下，因熱浮力效應的急劇變化而產生腔體流場明顯改變。在與 $H=40\text{mm}$ 腔體的比較中， $H=60\text{mm}$ 腔體的流場圖中因進氣高度 H 增加 1.5 倍使葛拉修數 Gr 增加 3.375 倍，上升氣流速率分布明顯提升。相反之下 $H=20\text{mm}$ 腔體流場因葛拉修數只剩原先的 $1/8$ ，熱浮力效應受到明顯抑制，上升氣流被拉至基板邊緣，外側迴流面積相對被壓縮。

圖 4-8 為加溫靜止基板($\Delta T=80^{\circ}\text{C}$)不同進氣高度的腔體下的流場變化圖。進氣流量為 $Q=1\text{SLM}(\text{Re}=63)$ ，基板溫差為 $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ ，進氣高度分別為 $H=20\text{mm}$ 、 40mm 、 $60\text{mm}(\text{Gr}=42803、342423、1162515)$ 。與圖 4-7 作比較，在 $H=20\text{mm}$ 腔體中，當基板溫差從 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 增加至 $80^{\circ}\text{C}(\text{Gr}=22739\rightarrow 42803)$ ，葛拉修數的倍增無論在速度分布與流場方面幾無變化。另外在 $H=60\text{mm}$ 腔體中，葛拉修數的倍增($\text{Gr}=613953\rightarrow 1162515$)除了中心噴流已無法觸及基板表面之外，流場情況仍無明顯變化。由上述觀察比較可得知，調整進氣高度所造成的流場變化較調整基板溫差來的明顯。

4.3.2 不同基板轉速的變化

圖 4-9 為不同進氣高度下旋轉基板($\omega=50\text{RPM}$)流場變化圖。進氣流量為 $Q=1\text{SLM}(\text{Re}=63)$ ，基板溫差為 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ，旋轉基板轉速為 $\omega=50\text{RPM}(\text{Re}_{\omega}=1613)$ ，進氣高度分別為 $H=20\text{mm}$ 、 40mm 、 $60\text{mm}(\text{Gr}=22739、181912、613953)$ 。 $H=20\text{mm}$ 腔體由於熱浮力效應相對較低，基板於 $\omega=50\text{RPM}$ 轉速下造成的旋轉效應使得熱浮力效應形成之渦流並不明顯，而腔體內渦流近似於靜止無加溫狀態下的單純氣體迴流，但噴流兩側仍殘留小面積的低流速區，由此判定此迴流為大面積旋轉渦流存在於腔體中。而在 $H=60\text{mm}$ 腔體中由於增強的熱浮力效應仍影響腔體流場，熱浮力渦流的增加相反擠壓了旋轉渦流與低流速區的面積。

圖 4-10 為不同進氣高度下旋轉基板($\omega=100\text{RPM}$)流場變化圖，進氣流量為 $Q=1\text{SLM}(Re=63)$ ，基板溫差為 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ ，旋轉基板轉速為 $\omega=100\text{RPM}(Re_\omega=3227)$ ，進氣高度分別為 $H=20\text{mm}$ 、 40mm 、 $60\text{mm}(Gr=22739、181912、613953)$ 。與圖 4-9 的比較中，若將基板轉速從 $\omega=50\text{RPM}$ 增加至 $\omega=100\text{RPM}(Re_\omega=1613\rightarrow 3227)$ ， $H=20\text{mm}$ 腔體中旋轉渦流面積幾無明顯變化，而 $H=40\text{mm}$ 腔體與 $H=60\text{mm}$ 腔體中因旋轉效應增強，擠壓所有渦流與迴流至腔體邊緣。由上述比較可推論若壓縮進氣高度可抑制旋轉效應造成的影響。另外 $H=60\text{mm}$ 腔體中熱浮力渦流仍然存在，代表熱浮力效應對腔體流場仍有影響。

根據上述結論，化學氣相沉積腔體為了避免腔體溫差產生的熱浮力效應，調整進氣高度是較有效率的方式，同時也驗證若增加進氣高度反而造成流場有更強烈的不穩定性。另外減低進氣高度除了抑制熱浮力效應，亦能抑制旋轉效應，避免低流速區影響基板上方的薄膜形成，使腔體中維持較穩定的流場。

4.4 腔體流場型態分類與關係

本實驗中影響腔體流場的主要條件參數分別為工作流體入口流量，基板與入口流體溫差，進氣高度以及基板旋轉速度。若以無因次參數表示各實驗條件分別為噴流雷諾數 (Re)，葛拉修數 (Gr) 和旋轉雷諾數 (Re_ω)。根據實驗觀察可將腔體流場大致分為數個類型。

4.4.1 噴流效應流場(impinging flow-induced flow)

圖 4-11 為靜止基板腔體中的噴流效應流場。進氣流量為 $Q=1\text{SLM}(Re=63)$ ，基板溫差為 $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}(Gr=0、181912)$ 。噴流效應流場流場圖的右半邊以 stream line 作表示方便觀察探討。由於無熱浮力效應或熱浮力效應無法影響流場變化，入口噴流進入腔體後，流體衝擊基板並沿著基板流動至邊緣，最後流體受腔體壁面引導一分為二，其中向上引導流體於腔體上半部流動一段時間後受重力形成迴流(Flow circulation)。

4.4.2 熱浮力效應流場(buoyancy-induced flow)

圖 4-12 靜止基板腔體中的熱浮力效應流場。進氣流量為 $Q=2\text{SLM}(\text{Re}=125)$ ，基板溫差為 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ ，進氣高度分別為 $H=40\text{mm}$ 、 60mm ($\text{Gr}=181912$ 、 613953)。腔體中因為基板溫差或進氣高度產生的葛拉修數變化將主導流場的變化。工作流體在基板上流動至一定距離後因氣體升溫上浮而產生上升氣流。熱浮力效應較強的流場中，上升氣流發生在噴流附近，而迴流面積相對較大，若熱浮力效應較弱的流場中上升氣流位置則靠近基板邊緣。相較於慣性力造成的迴流，熱浮力效應使得上升氣體流速大於迴流上升的流速。

4.4.3 旋轉效應流場(rotating-induced flow)

圖 4-13 為旋轉效應流場。進氣流量為 $Q=1\text{SLM}(\text{Re}=63)$ ，基板溫差為 $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 、 40°C ($\text{Gr}=0$ 、 181912)，基板轉速為 $\omega=100\text{RPM}(\text{Re}_\omega=3227)$ 。腔體中流場因基板旋轉使得原本的迴流因離心力變形並推擠至腔體壁面。若腔體中因加溫存在熱浮力效應，則旋轉基板的影響也會使熱浮力渦流不復存在。中心噴流兩側形成鐘罩型狀的低流速區域。區域上方的條狀高速區表示工作流體大部分集中在旋轉渦流所在的腔體壁面。

在某些情況，在加溫基板轉速較低的情形下，熱浮力效應與旋轉效應會同時影響並存在於流場中。圖 4-14 中加溫基板於 $\omega=50\text{RPM}$ 的低轉速下，原本的熱浮力渦流以及外側迴流因旋轉效應抬升至腔底頂部，上升氣流因旋轉效應被拉扯至基板邊緣。旋轉渦流則出現在靠近基板邊緣的上方。

4.4.4 靜止基板流場型態關係

根據先前的實驗結果，靜止基板下各個實驗條件以及相對應之流場型態分布如圖 4-15。圖表結果可得知流場型態在低雷諾數下較對熱浮力效應產生的變化較為敏感。因此可藉由提高雷諾數以避免熱浮力效應影響腔體的流場型態。而對於靜止基板腔體，腔體流場在 Gr/Re^2 為 $5.78\sim 6.24$ 的區間內開始變化， Gr/Re^2 在此區間以上則會產生熱浮力效應流場，反之則為較穩定的噴流效應流場。

4.4.5 旋轉基板流場型態關係

圖 4-16 為旋轉基板腔體中的流場型態變化分布圖。加熱基板若有些微旋轉便存在離心力導致流場內並存熱浮力與旋轉渦流並存流場。此兩種效應共同主導流場變化。然而在旋轉基板轉速逐漸增加下，熱浮力渦流將迅速消失。由圖表觀察雖然提高葛拉修數可讓熱浮力效應暫存於流場中，但由於基板轉速對於流場的影響將遠大於熱浮力效應。只要旋轉雷諾數持續增加，熱浮力效應造成的渦流將不復存在。而在旋轉基板腔體中， $Gr/ReRe_0$ 值在 0.67~0.84 區間內產生流場型態變化，若大於此區間值內，熱浮力渦流將與旋轉渦流共存在旋轉基板腔體中，相反則腔體僅呈現旋轉渦流之腔體流場。



第五章、結論與未來建議

5.1 結論

對於常壓化學氣相沉積腔體的薄膜沉積研究中，解決熱浮力效應造成的不穩定性為改善薄膜沉積的主要目標。工作流體進入腔體後因與基板產生摩擦力造成氣體減速，而基板升溫導致減速氣體因受熱浮力往上流動。為了達成腔體流場的穩定性，提高噴流雷諾數縮短停留在基板上的加熱時間。另外根據熱浮力效應理論，葛拉修數與進氣高度的三次方成正比，因此在設計 CVD 腔體時，降低進氣高度也可增加抑制熱浮力的效率，而在降低基板溫度所造成的流場變化，相對於增加進氣流量或壓低進氣高度來說並不明顯。而對於旋轉基板的腔體流場，在上述章節的討論中，旋轉效應儘管在高進氣雷諾數下有發展上的限制，但只要有些微離心力存在，即可因腔體上下半部的流速差造成外側迴流的變形，另外基板旋轉可維持甚至增加氣體動量。

相對於其他流場可視化技術，粒子影像測速儀不僅可快速量測出腔體內流場方向，亦可同時定量計算出流場中的速度分布以方便作 CVD 流場的探討。但由於高速攝影機的像素限制，使得低進氣流量的長扁型腔體流場拍攝效果較為不佳。另外腔體壁面的反光也問題使得腔體邊緣產生雜訊以及誤差的機會增加，本實驗中在決定擷取分析區域時必須避免腔體壁面在分析區域內，此結果會導致拍攝高速旋轉基板流場中，可能遺漏渦流位於腔體邊緣的變化情形。

5.2 未來建議

1. 本實驗皆為常壓氣相化學沉積流場探討，雖然近日常壓 CVD 的可行性因技術的進步而被重新評估，但低壓 CVD 的在目前的薄膜設備市場中仍占多數。因此可建立可抽真空式低壓腔體，探討低壓腔體的流場變化。
2. 本實驗中各條件所繪製的流場型態分布圖中，若針對流場的分界求得相關函數仍會有相當大的誤差。因此流場分界內的實驗條件進行分析以求出更準確的分界函數。
3. 目前的化學氣相沉積技術中已不侷限於單一進氣孔，量測不同孔徑的進氣口或改成多孔進氣方式可較接近目前的 CVD 進氣技術，將具有更高的參考性。
4. 由於腔體壁面反光會造成高速攝影機的曝光嚴重，不僅干擾電腦的粒子影像分析，也會傷害攝影機本身，因此可在腔體中作避免反光的表面處理，改善拍攝品質。
5. 量測流場中所包含的像素數量越多可增加流場的解析度，但由於鏡頭焦距的限制，無法讓攝影機無限接近量測流場已達成此目的。俱備像素數量更高的高速攝影機可為日和探討更複雜流場提供更高的影像品質。
6. 由於 CVD 的工作流體與前驅物可能不止一種，若能加入多種不同密度氣體可較為接近製程中的流場情形。

參考文獻

- [1] G. Evans, and R. Greif, “Effect of Boundary Conditions on the Flow and Heat Transfer in a Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactor”, Numerical Heat Transfer, Vol. 12, Issue 2, pp. 243-252, February 1987
- [2] G. Evans, and R. Greif, “A Numerical Model of the Flow and Heat Transfer in a Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactor”, Transactions of the ASME, Journal of heat transfer, Vol. 109, pp. 928-935, July 1987
- [3] G. W. Young, S. I. Hariharan, and R. Carnahan, “Flow effects in a vertical CVD Reactor”, SIAM Journal on Applied Mathematics, Vol. 52, No. 6, pp. 1509-1532, December 1992
- [4] W. Y. Chung, D. H. Kim, and Y. S. Cho, “Modeling of Cu Thin Film Growth by MOCVD Process in a Vertical Reactor”, Journal of Crystal Growth, Vol. 180, pp. 691-697, 1997
- [5] S. Joh, and G. H. Evans, “Heat Transfer and Flow Stability in a Rotating Disk/Stagnation Flow Chemical Vapor Deposition Reactor”, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol. 31, Issue 8, pp. 867-879, April 1997
- [6] D. W. Weyburne, and B. S. Ahem, “Design and operating considerations for a water-cooled close-spaced reactant injector in a production scale MOCVD reactor”, Journal of Crystal Growth, Vol. 170, Issue 1-4, pp. 77-82, January 1997

- [7] C. Park, J. Y. Hwang, M. Huang, and T. J. Anderson, "Investigation Of An Up Flow Cold-Wall CVD Reactor By Gas Phase Raman Spectroscopy" , Thin Solid Films, Vol. 409, Issue 1, pp. 88-97, March 2002.
- [8] J. H. Koh, and S. I. Woo, "Computer Simulation Study on Atmospheric Pressure CVD Process for Amorphous Silicon Carbide", The Electrochemical Society, Vol. 137, No. 7, pp. 2215-2222, July 1990
- [9] H. V. Santen, C. R. Kleijn, E. A. Harry, and V. D. Akker, "On Turbulent Flow In Cold-Wall CVD Reactor", Journal of Crystal Growth, Vol. 212, Issue 1-2, pp. 299-310, April 2000.
- [10] A. G. Mathews, and J. E. Peterson, "Flow Visualizations And Transient Temperature Measurements In An Axisymmetric Impinging Jet Rapid Thermal Chemical Vapor Deposition Reactor", Journal of Heat Transfer, Vol. 124, Issue 3, pp. 564-570, June 2002
- [11] G. Luo, S. P. Vanka, and N. Glumac, "Fluid Flow and Transport Processes In a Large Area Atmospheric Pressure Stagnation Flow CVD Reactor For Deposition Of Thin Films", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, Issue 23, pp.4979-4994, November 2004.
- [12] S. P. Vanka, G. Luo, and N. G. Glumac, "Parametric effects on thin film growth and uniformity in an atmospheric pressure impinging jet CVD reactor", Journal of Crystal Growth, Vol. 267, Issue 1-2, pp. 22-34, June 2004

- [13] S. P. Vanka, G. Luo, and N. G. Glumac, "Numerical Study of Mixed Convection Flow in an Impinging Jet CVD Reactor for Atmospheric Pressure Deposition of Thin Films", Journal of Heat Transfer, Vol. 126, No.5 , pp. 764-775, October 2004
- [14] B. Mitrovic, A. Gurary, and L. Kadinski, "On the flow stability in vertical rotating disk MOCVD reactors under a wide range of process parameter", Journal of Crystal Growth, Vol. 287, Issue 2, pp. 656-663, January 2006
- [15] B. Mitrovic, A. Parekh, and J. Ramer, "Reactor Design Optimization Based On 3D Modeling Of Nitrides Deposition In MOCVD Vertical Rotating Disc Reactor", Journal of Crystal Growth, Vol. 289, Issue 2, pp. 708-714, April 2006.
- [16] B. Mitrovic, A. Gurary, and W. Quinn, "Process Conditions Optimization For The Maximum Deposition Rate And Uniformity In Vertical Rotating Disc MOCVD Reactors Based On CFD Modeling", Journal of Crystal Growth, Vol. 303, Issue 1, pp. 323-329, May 2007.
- [17] H. Setyawan, M. Shimada, K. Ohtsuka, and K. Okuyama, "Visualization And Numerical Of Fine Particle Transport In A Low-Pressure Parallel Plate Chemical Vapor Deposition Reactor", Chemical Engineering Science, Vol. 57, Issue 3, pp. 497-506, February 2002.

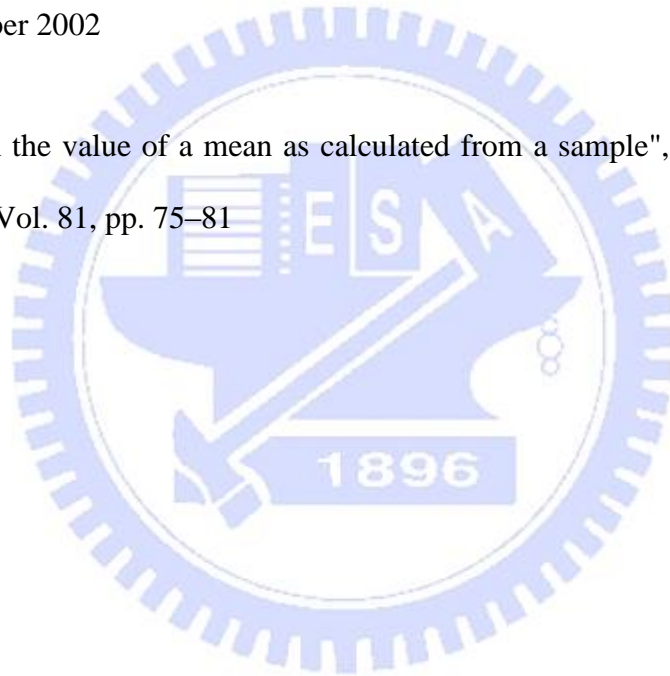
- [18] T. C. Chang, P. H. Chiou, and T. F. Lin, "Visualization Of Mixed Convective Vortex Rolls In An Impinging Jet Flow Of Air Through A Cylindrical Chamber", International Journal of Heat and mass transfer, Vol. 45, Issue 16, pp. 3357-3368 , July 2002.
- [19] J. C. Hsieh, C. W. Cheng, and T. F. Lin, "Suppression Of Buoyancy-Driven Vortex Flow Resulting From A Low Speed Jet Impinging Onto A Heated Disk In A Vertical Cylinder By Cylinder Top Tilting", International Journal of Heat and mass transfer, Vol. 47, Issue 14-16, pp. 3031-3045, July 2004.
- [20] T. C. Cheng, T. F. Lin, J. Y. Yang, and S. R. Jian, "Visualization of vortex flow patterns with a uniformly perforated showerhead in a model lamp heat, single-wafer thermal processor", Chemical Vapor Deposition, Vol. 13, Issue 8, pp. 427-432, August 2007
- [21] K. M. Chen, F. C. Hsieh, J. C. Hsieh, and T. F. Lin, "A further investigation of effects of jet-disk separation distance on steady mixed convective vortex flow resulting from a confined impinging air jet", International Journal of Heat and mass transfer, Vol. 52, Issue 23-24, pp. 5348-5357, November 2009
- [22] Trust Science Innovation Inc, Model 9306 six jet atomizer Owner's manual, St. Paul, MN;2010

[23] Elsinga. GE, van Oudheusden. BW, Scarano. F, "Evaluation of aero-optical distortion effects in PIV", Experiment In Fluid, Vol. 39, pp. 246-256, 2005

[24] M. J. Murphy, R. J. Adrian, "PIV through moving Shock with refracting curvature", Experiment In Fluid, Vol. 50, No. 4, pp. 847-862, 2011

[25] S. Y. Son, K. D. Kihm, J. C. Han, "PIV flow measurements for heat transfer characterization in two-pass square with smooth and 90° ribbed walls", Vol. 45, Issue 24, pp. 4809-4822, November 2002

[26] L. Isserlis, "On the value of a mean as calculated from a sample", Journal of the Royal Statistical Society , Vol. 81, pp. 75-81




內文表

表一 分析格粒子座標分布

Particle Number	X Centroid	Y Centroid
1	0.4	0.7
2	0.1	0.6
3	0.8	0.6
4	0.5	0.5
5	0.6	0.3
6	0.3	0.2

表二 兩張顯影之粒子位移對應表

	First Image Particle Number and Position					
	#1(.4,.7)	#2(.1,.6)	#3(.8,.6)	#4(.5,.5)	#5(.6,.3)	#6(.3,.2)
Second Image Particle Number and Position						
1(.4,.7)	(0,0)	(.3,.1)	(-.4,.1)	(-.1,.2)	(-.2,.4)	(.1,.5)
2(.1,.6)	(-.3,-.1)	(0,0)	(-.7,.0)	(-.4,.1)	(-.5,.3)	(-.2,.4)
3(.8,.6)	(.4,-.1)	(.7,.0)	(0,0)	(.3,.1)	(.2,.4)	(.5,.4)
4(.5,.5)	(.1,-.2)	(.4,-.1)	(-.3,-.1)	(0,0)	(-.1,.2)	(.2,.3)
5(.6,.3)	(.2,-.4)	(.5,-.3)	(-.2,-.4)	(.1,-.2)	(0,0)	(.3,.1)
6(.3,.2)	(-.1,-.5)	(.2,-.4)	(-.5,-.4)	(-.2,-.3)	(-.3,-.1)	(0,0)

表三 粒子位移量統計

ΔX	ΔY	Number of count
-7	0.0	1
-5	-4	1
-5	.3	1
-4	.1	2
-3	-1	3
-2	-3	1
-2	-4	1
-2	.4	2
-1	-5	1
-1	0.2	2
0.0	0.0	6
.1	-2	2
.1	.5	1
.2	-4	2
.2	.4	1
.2	.3	1
.3	.1	3
.4	-1	2
.5	-3	1
.5	.4	1
.7	0.0	1
	Total count	36

表四 靜止基板之不同條件物理參數

H=20mm , $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$, P=760Torr , Gr=22739 , Ra=15999				
case	Q=0.5SLM	Q=1SLM	Q=2SLM	
Re	31	63	125	
Gr/Re ²	23.13	5.78	1.45	
H=20mm , $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$, P=760Torr , Gr=42803 , Ra=29928				
case	Q=0.5SLM	Q=1SLM	Q=2SLM	
Gr/Re ²	43.54	10.88	2.72	
H=40mm , $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$, P=760Torr , Gr=181912 , Ra=127993				
case	Q=1SLM	Q=2SLM	Q=5SLM	Q=10SLM
Re	63	125	314	627
Gr/Re ²	46.26	11.56	1.85	0.46
H=40mm , $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$, P=760Torr , Gr=342423 , Ra=239422				
case	Q=1SLM	Q=2SLM	Q=5SLM	Q=10SLM
Gr/Re ²	87.07	21.77	3.48	0.87
H=60mm , $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$, P=760Torr , Gr=613953 , Ra=431977				
case	Q=1SLM	Q=2SLM	Q=5SLM	
Gr/Re ²	156.12	39.03	6.24	
H=60mm , $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$, P=760Torr , Gr=1162515 , Ra=813342				
case	Q=1SLM	Q=2SLM	Q=5SLM	
Gr/Re ²	293.87	73.46	11.75	

表五 無加溫旋轉基板之不同條件物理參數

H=40mm, $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$, P=760Torr, Q=1SLM					
case	$\omega=25\text{RPM}$	$\omega=50\text{RPM}$	$\omega=100\text{RPM}$	$\omega=250\text{RPM}$	$\omega=500\text{RPM}$
Re_{ω}	807	1613	3227	8067	16134

表六 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=20mm, $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$

H=20mm, $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$, P=760Torr, Gr=22739, Ra=15999			
Q=0.5SLM, Re=31			
case	$\omega=25\text{RPM}$	$\omega=50\text{RPM}$	$\omega=100\text{RPM}$
Gr/ReRe $_{\omega}$	0.9	0.45	0.23
Q=1SLM, Re=63			
case	$\omega=25\text{RPM}$	$\omega=50\text{RPM}$	$\omega=100\text{RPM}$
Gr/ReRe $_{\omega}$	0.45	0.22	0.11
Q=2SLM, Re=125			
case	$\omega=25\text{RPM}$		
Gr/ReRe $_{\omega}$	0.23		

表七 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=20mm, $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$

H=20mm, $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$, P=760Torr, Gr=42803, Ra=29928			
Q=0.5SLM, Re=31			
case	$\omega=25\text{RPM}$	$\omega=50\text{RPM}$	$\omega=100\text{RPM}$
Gr/ReRe $_{\omega}$	1.69	0.85	0.42
Q=1SLM, Re=63			
case	$\omega=25\text{RPM}$	$\omega=50\text{RPM}$	$\omega=100\text{RPM}$
Gr/ReRe $_{\omega}$	0.85	0.42	0.21
Q=2SLM, Re=125			
case	$\omega=25\text{RPM}$		
Gr/ReRe $_{\omega}$	0.42		

表八 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=40mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$

H=40mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ，P=760Torr，Gr=181912，Ra=127993			
Q=1SLM，Re=63			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	1.80	0.9	0.36
Q=2SLM，Re=125			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	0.9	0.45	0.18
Q=5SLM，Re=314			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	0.36	0.18	0.07

表九 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=40mm， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$

H=40mm， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ ，P=760Torr，Gr=342423，Ra=239422			
Q=1SLM，Re=63			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	3.38	1.69	0.68
Q=2SLM，Re=125			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	1.69	0.85	0.34
Q=5SLM，Re=314			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	0.68	0.34	0.14

表十 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=60mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$

H=60mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ，P=760Torr，Gr=613953，Ra=431977			
Q=1SLM，Re=63			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	6.07	3.03	1.21
Q=2SLM，Re=125			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	3.03	1.52	0.61
Q=5SLM，Re=314			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	1.21	0.61	0.24

表十一 加溫旋轉基板之不同條件物理參數。H=60mm， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$

H=60mm， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ ，P=760Torr，Gr=1155676，Ra=80849			
Q=1SLM，Re=63			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	11.42	5.71	2.28
Q=2SLM，Re=125			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	5.71	2.86	1.14
Q=5SLM，Re=314			
case	$\omega=50$ RPM	$\omega=100$ RPM	$\omega=250$ RPM
Gr/ReRe $_{\omega}$	2.28	1.14	0.46

內文圖

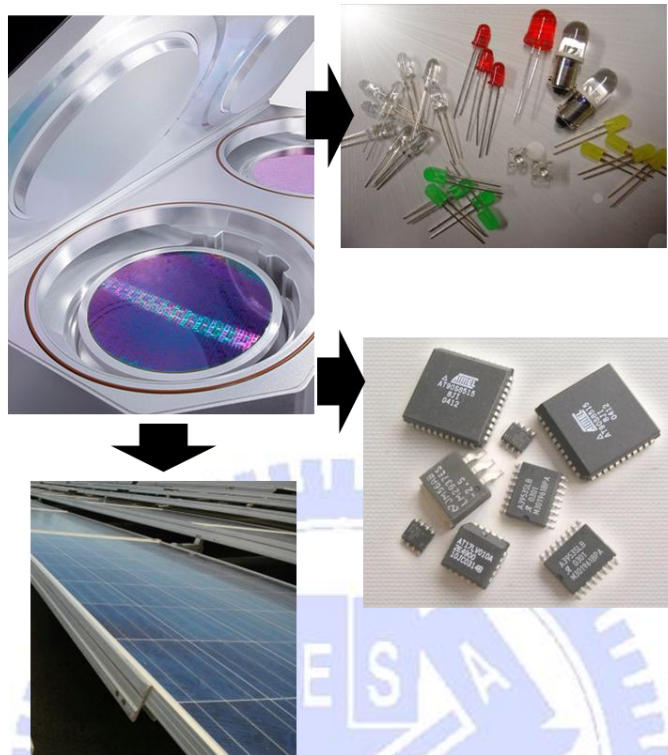


圖 1-1 化學氣相沉積技術應用圖

技術功效分析		影響程度	
技術手段	機構設計	A-1. 氣流場設計	★★★★★
		A-2. 進出料機構	★★★★★
		A-3. 加熱機構	★★★★★
		A-4. 檢測監控裝置及方法	★★★★★
		A-5. Feedthrough	★
		A-6. 反應腔體設計	★★★★★★
		A-7. 基板轉動機構	★★★★
		A-8. 基板載入載出設計	★
		A-9. 管路設計	★★★★
		A-10. precursor 蒸發器設定	★★★★
		A-11. 氣體純化器	★
		A-12. 試片乘載座設計	★★★★

圖 1-2 MOCVD 功率矩陣分析圖

資料來源:工研院

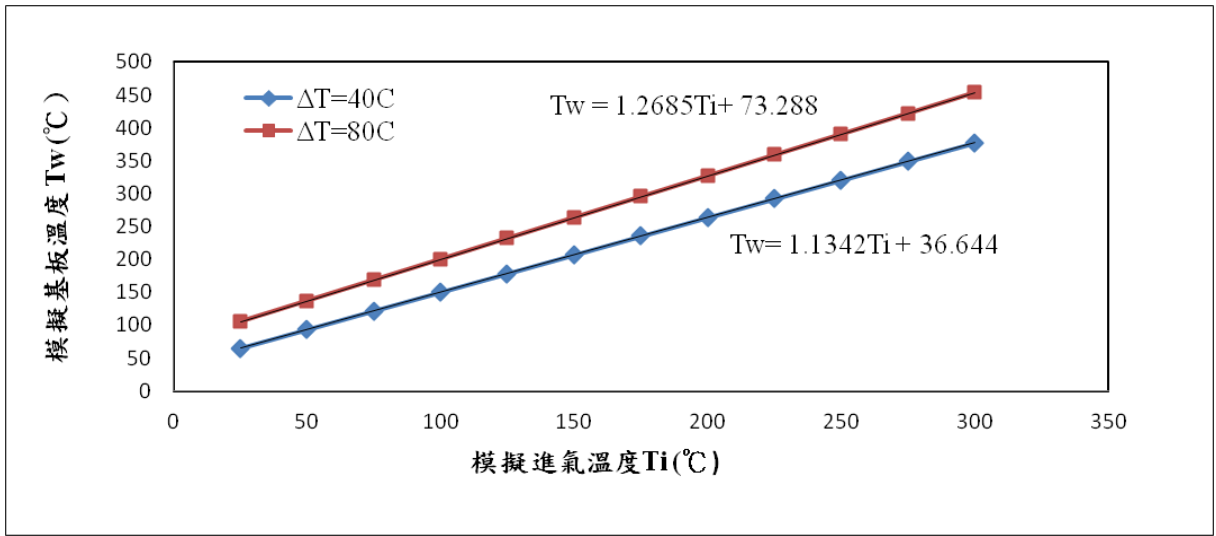


圖 2-1 實際進氣溫度 25°C 不同基板溫差下模擬溫度對照圖

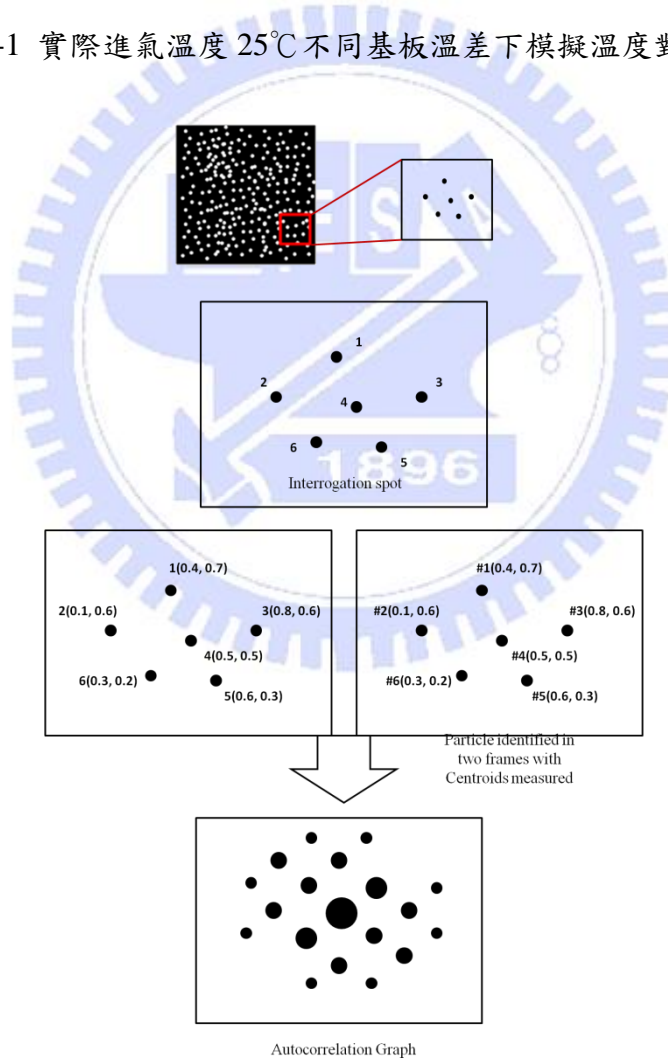


圖 2-2 Autocorrelation Process

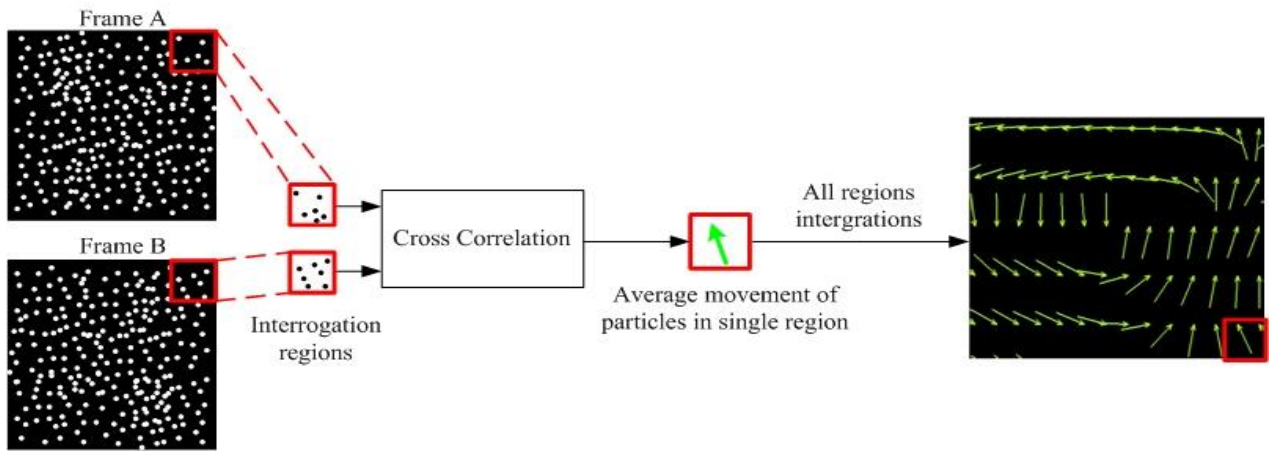


圖 2-3 Cross-correlation Process

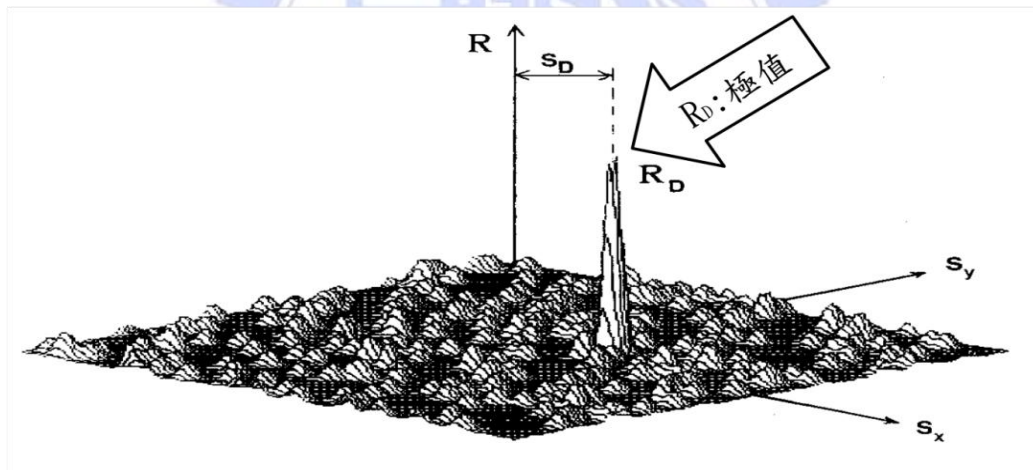


圖 2-4 交錯函數方程式分布圖

資料來源: Particle Image Velocimetry A Practical Guide

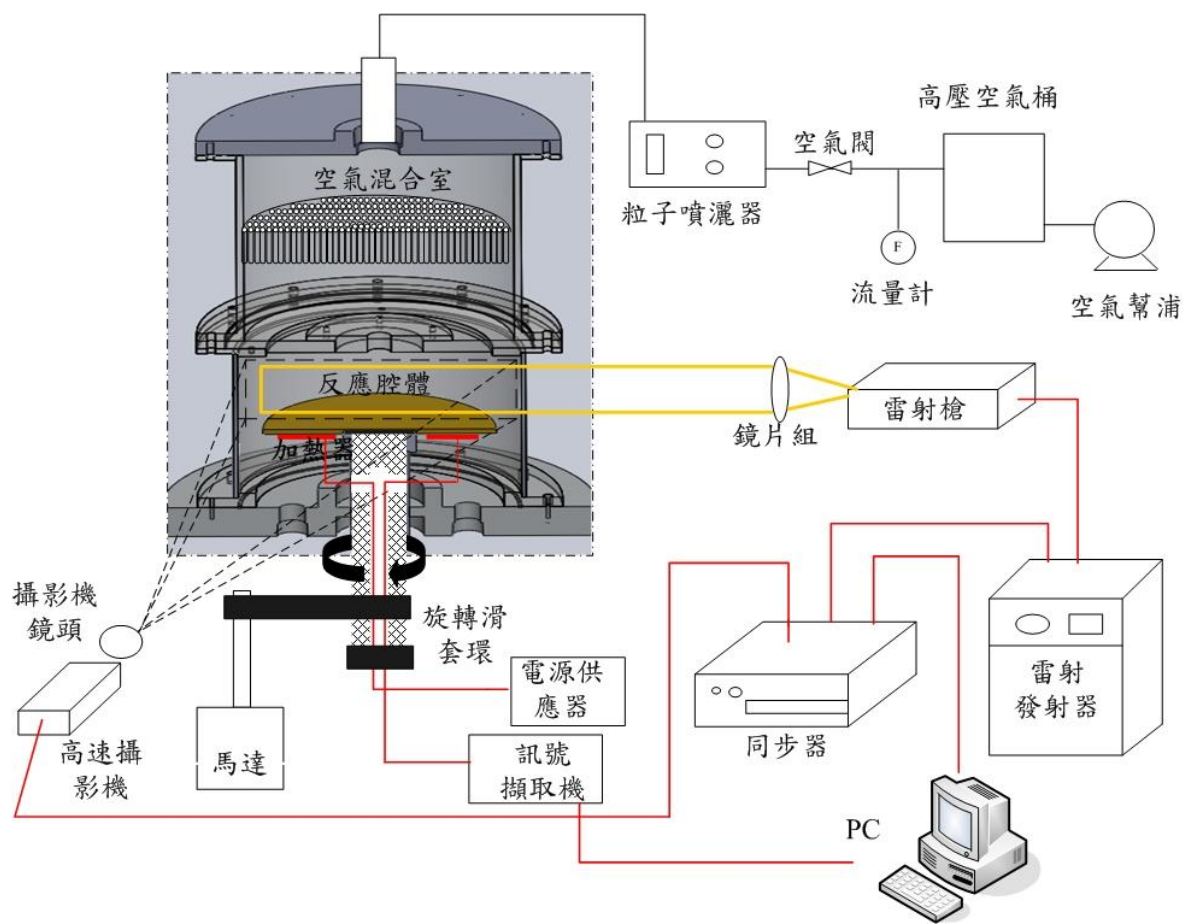


圖 3-1 化學氣相沉積流場可視化系統主示意圖

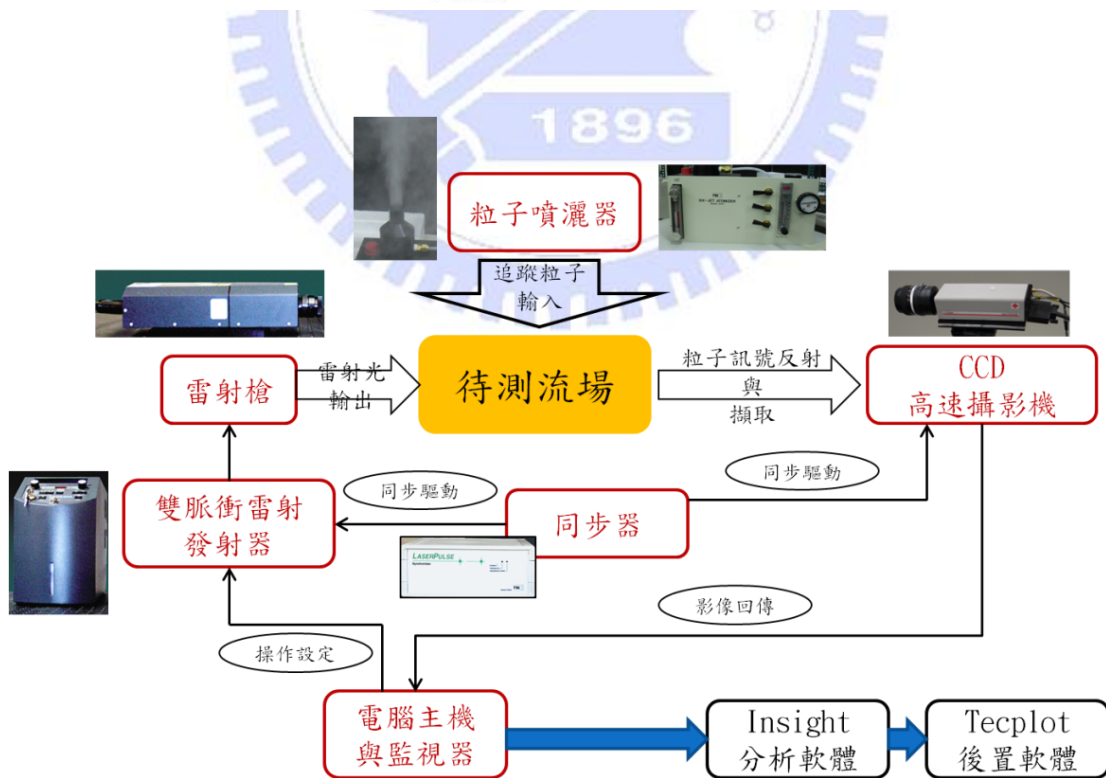
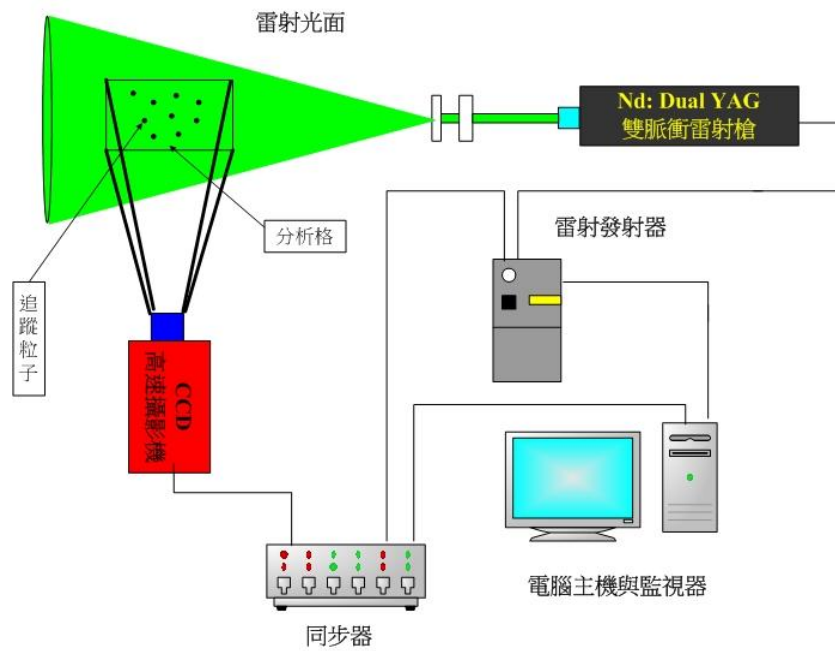


圖 3-2 PIV 設備運作示意圖

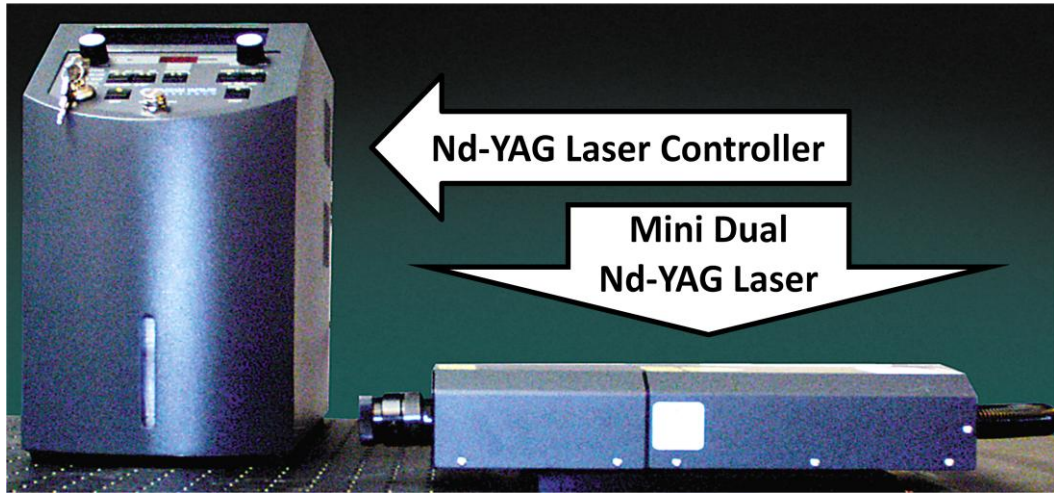


圖 3-3 雙脈衝 Nd-YAG 雷射設備圖
資料來源:TSI 公司

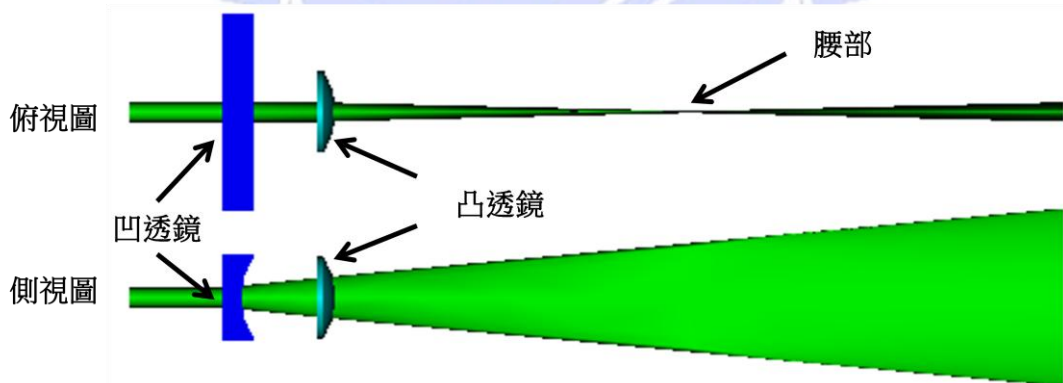


圖 3-4 雷射光與透鏡組折射圖
資料來源:TSI 公司



圖 3-5 高速攝影機設備圖

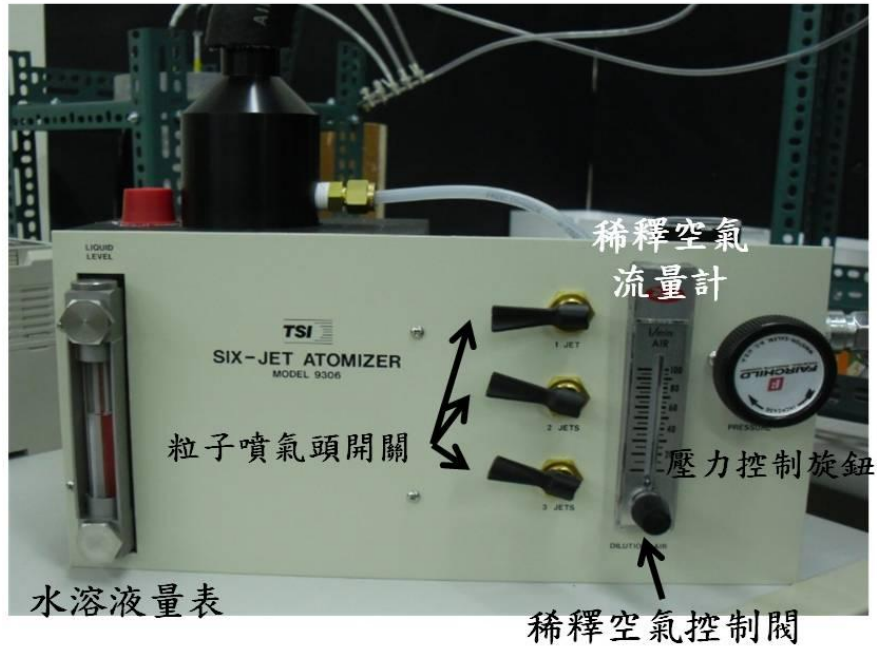


圖 3-6 粒子噴灑器設備以及測試圖
(粒子來源:飽和糖水溶液)

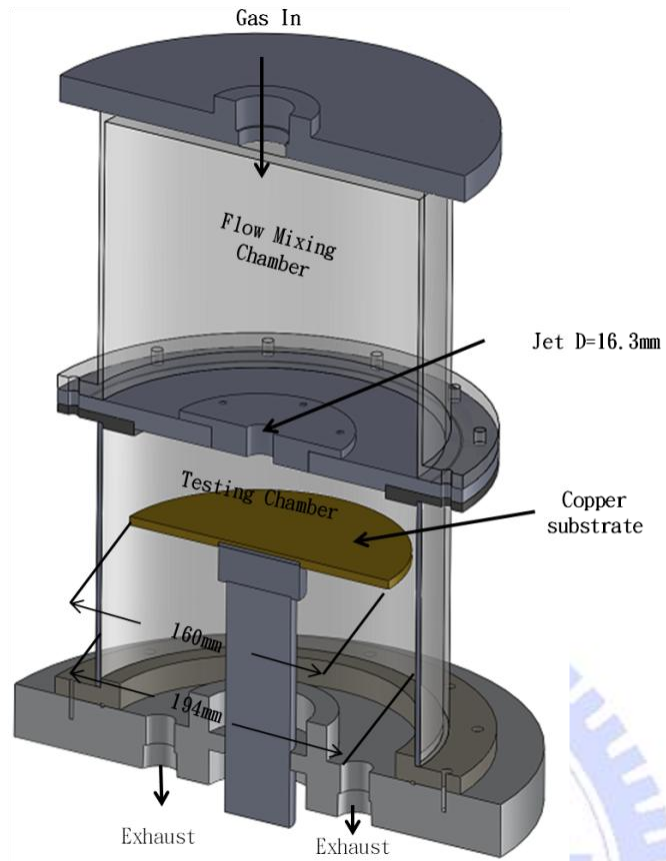


圖 3-7 CVD 模型與實體圖

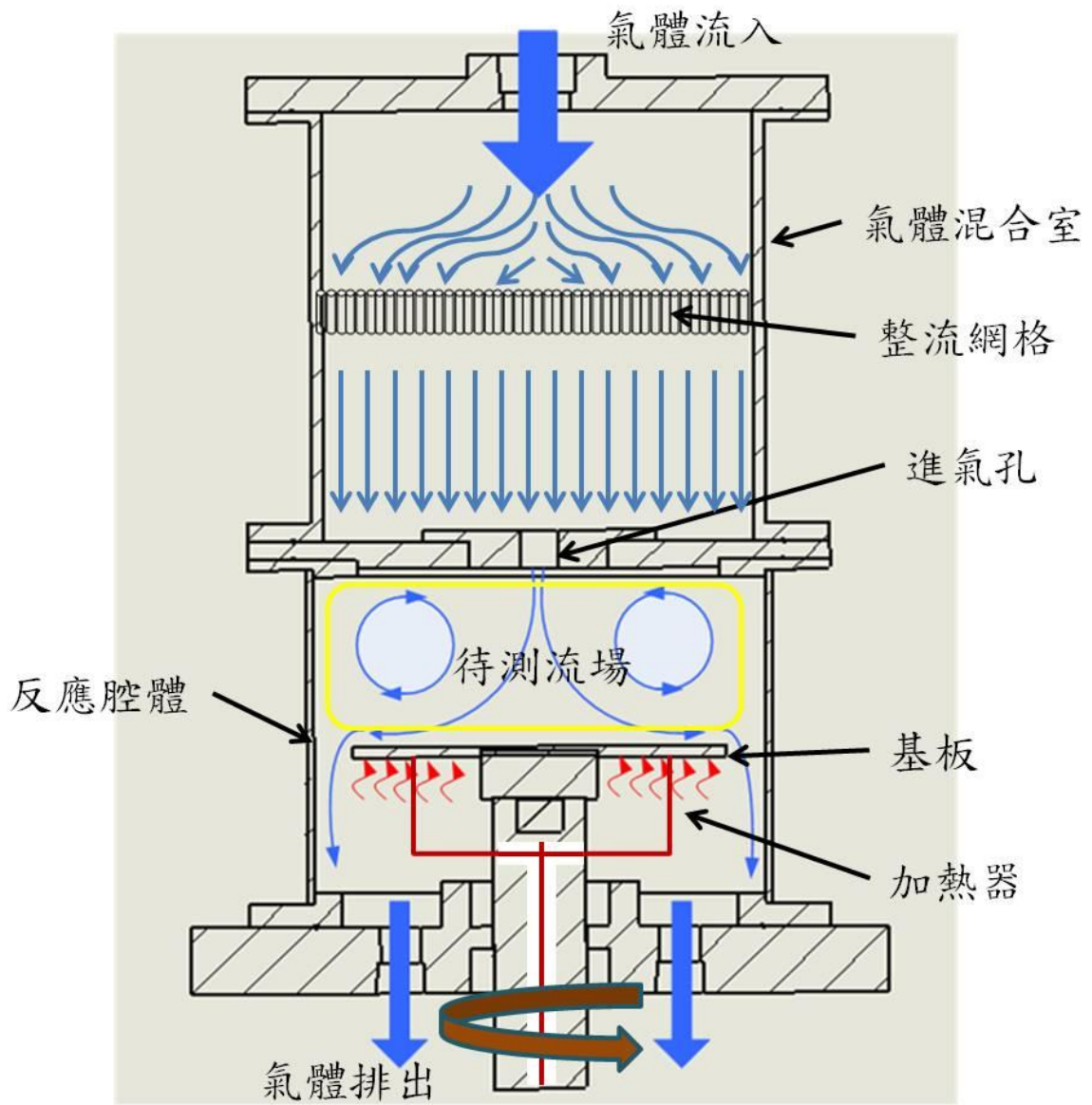


圖 3-8 CVD 模型運作圖

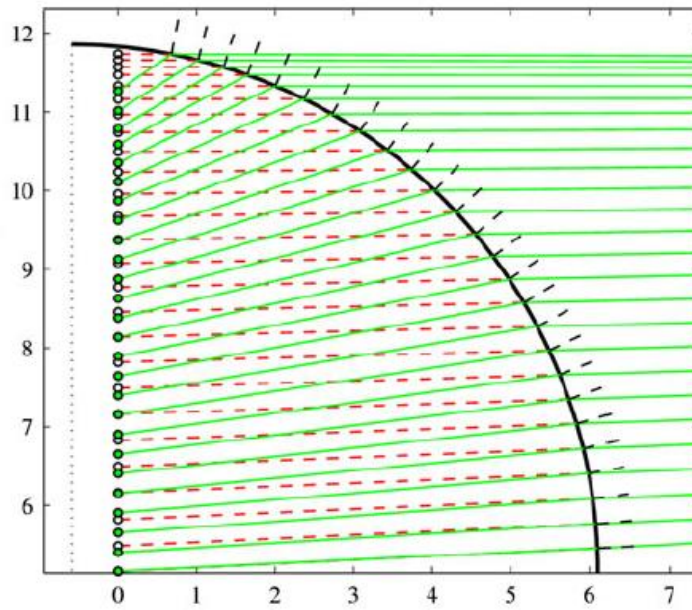


圖 3-9 半圓形實心壓克力試片光學折射圖

資料來源: M. J. Murphy

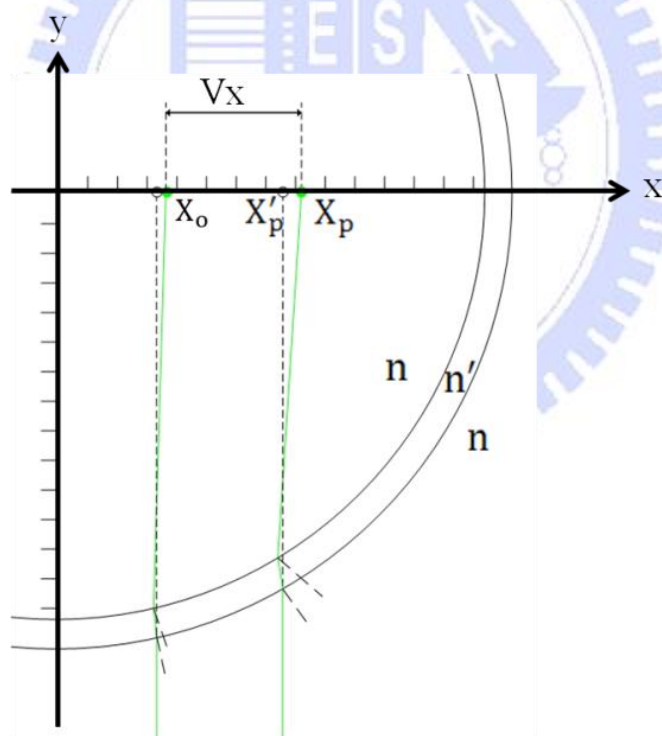


圖 3-10 圓形中空壓克力腔體光學折射圖

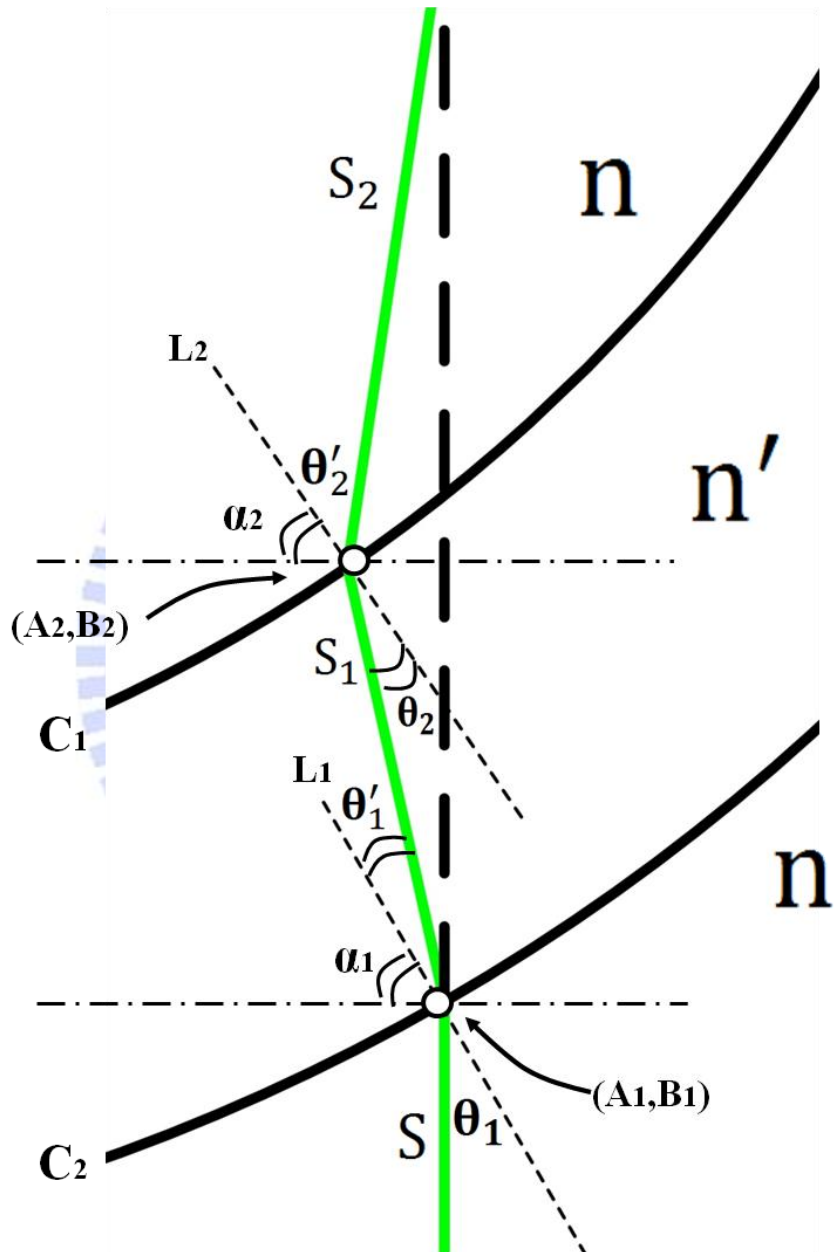


圖 3-11 光線訊號折射路線圖

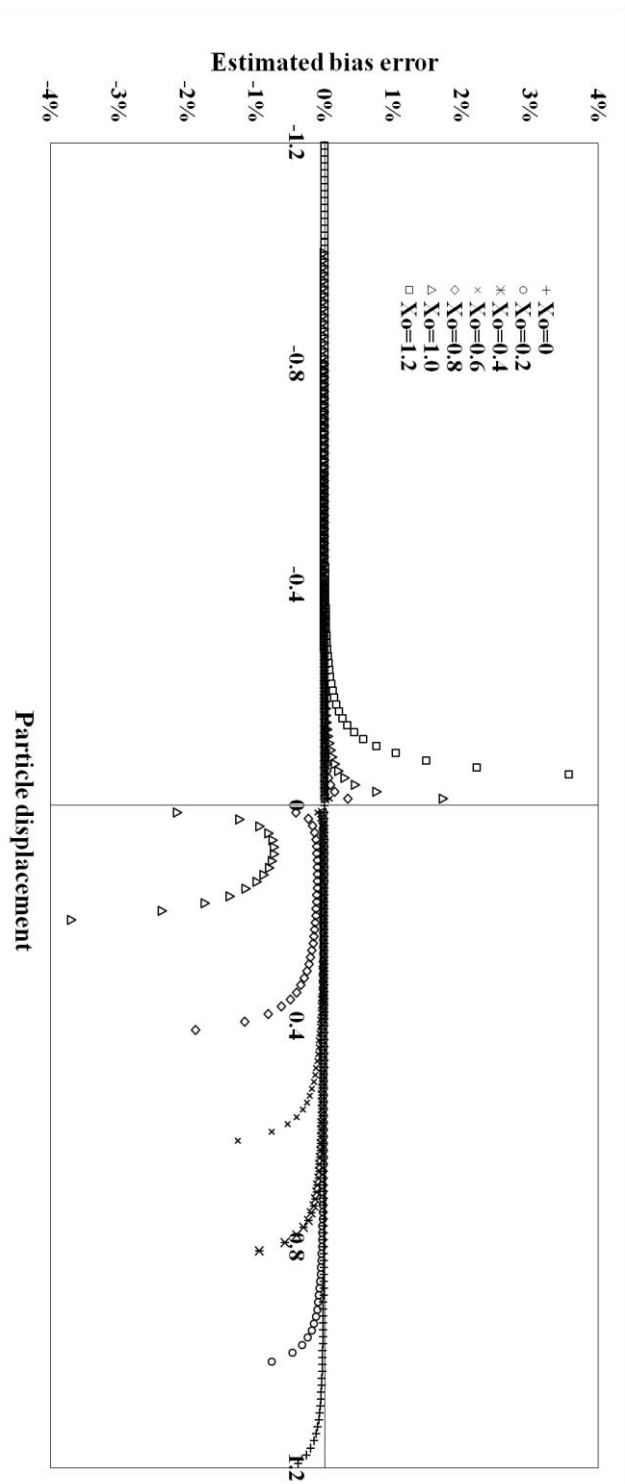


圖 3-12 腔體各位置之粒子位移與誤差對應圖

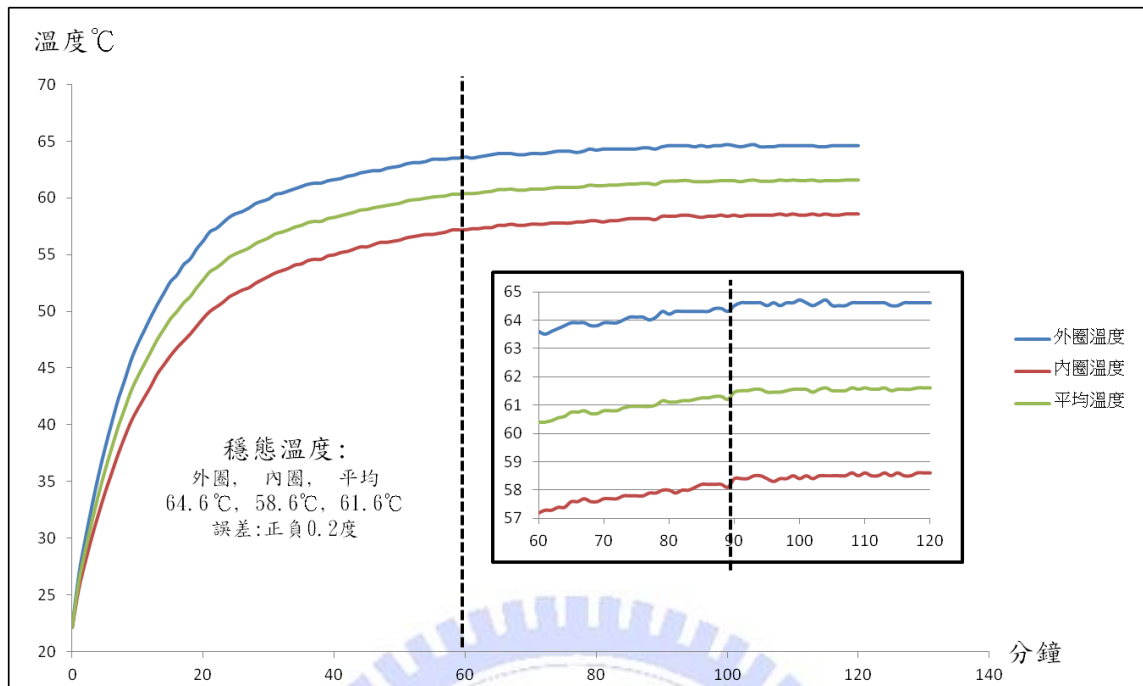


圖 3-13 加熱穩態實驗



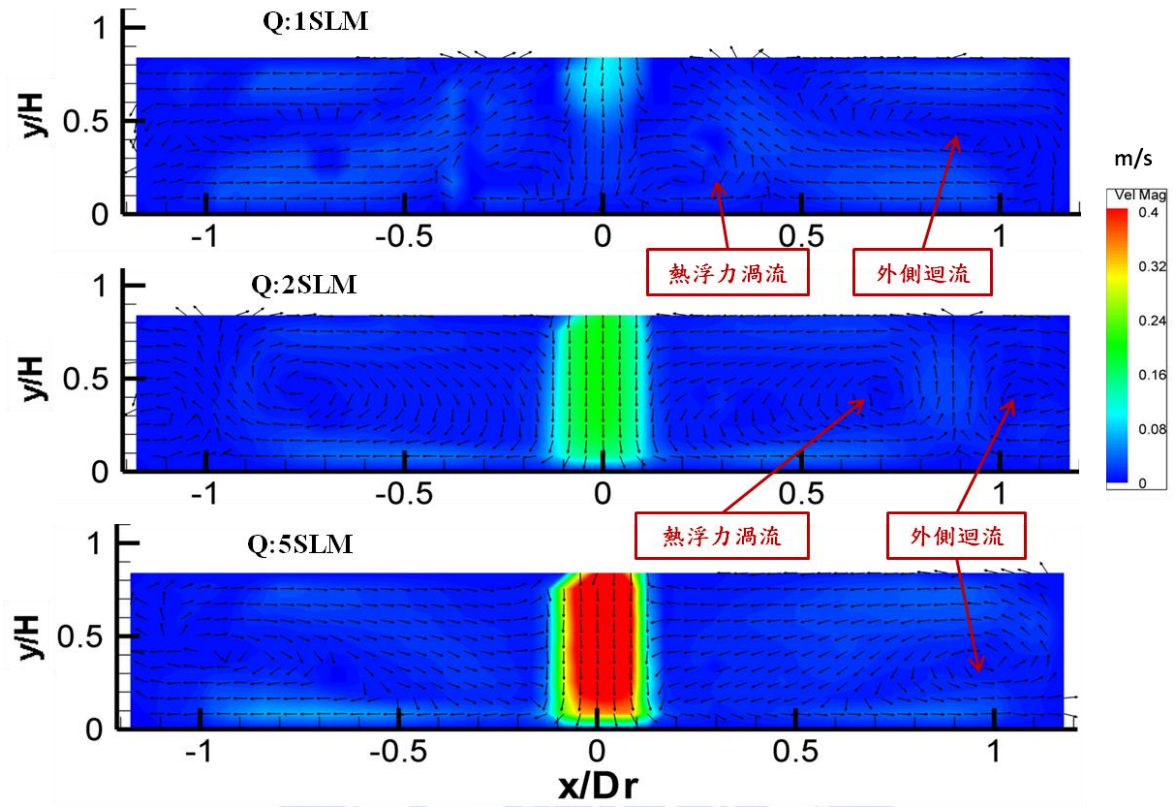


圖 4-1 靜止基板， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 不同流量之流場變化圖。

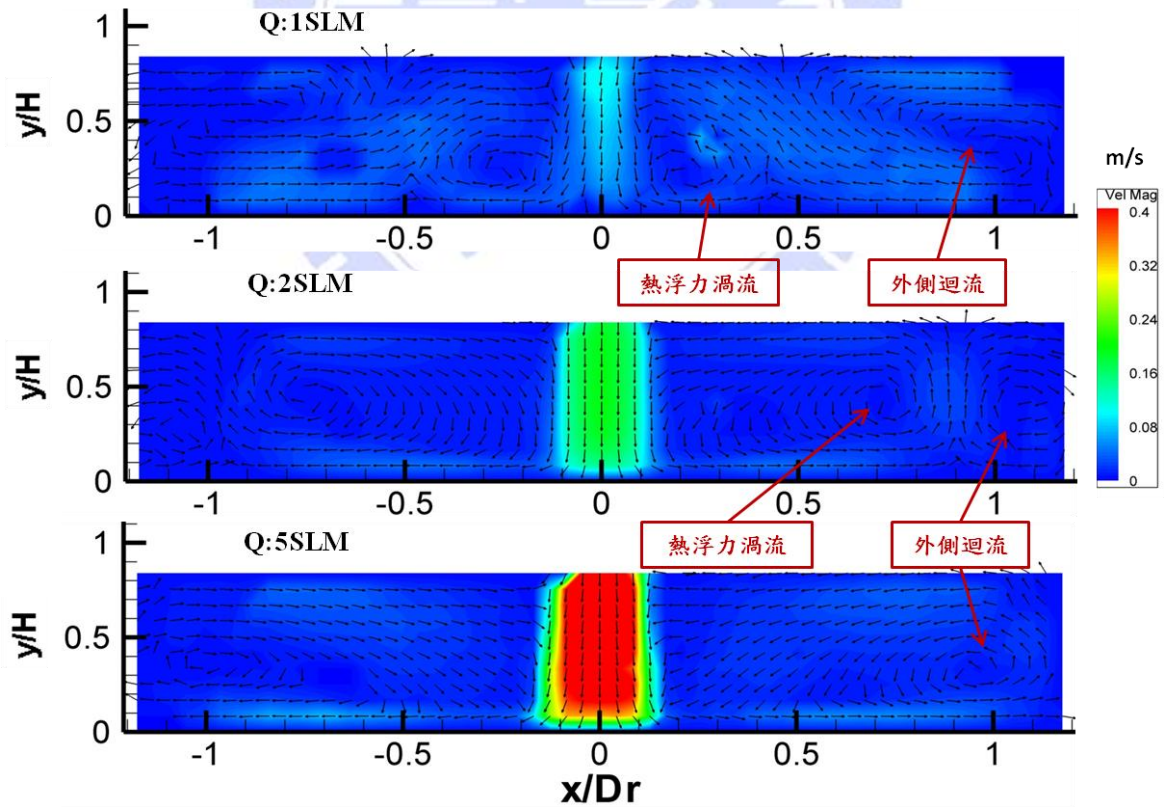


圖 4-2 靜止基板， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 不同流量之流場變化圖。

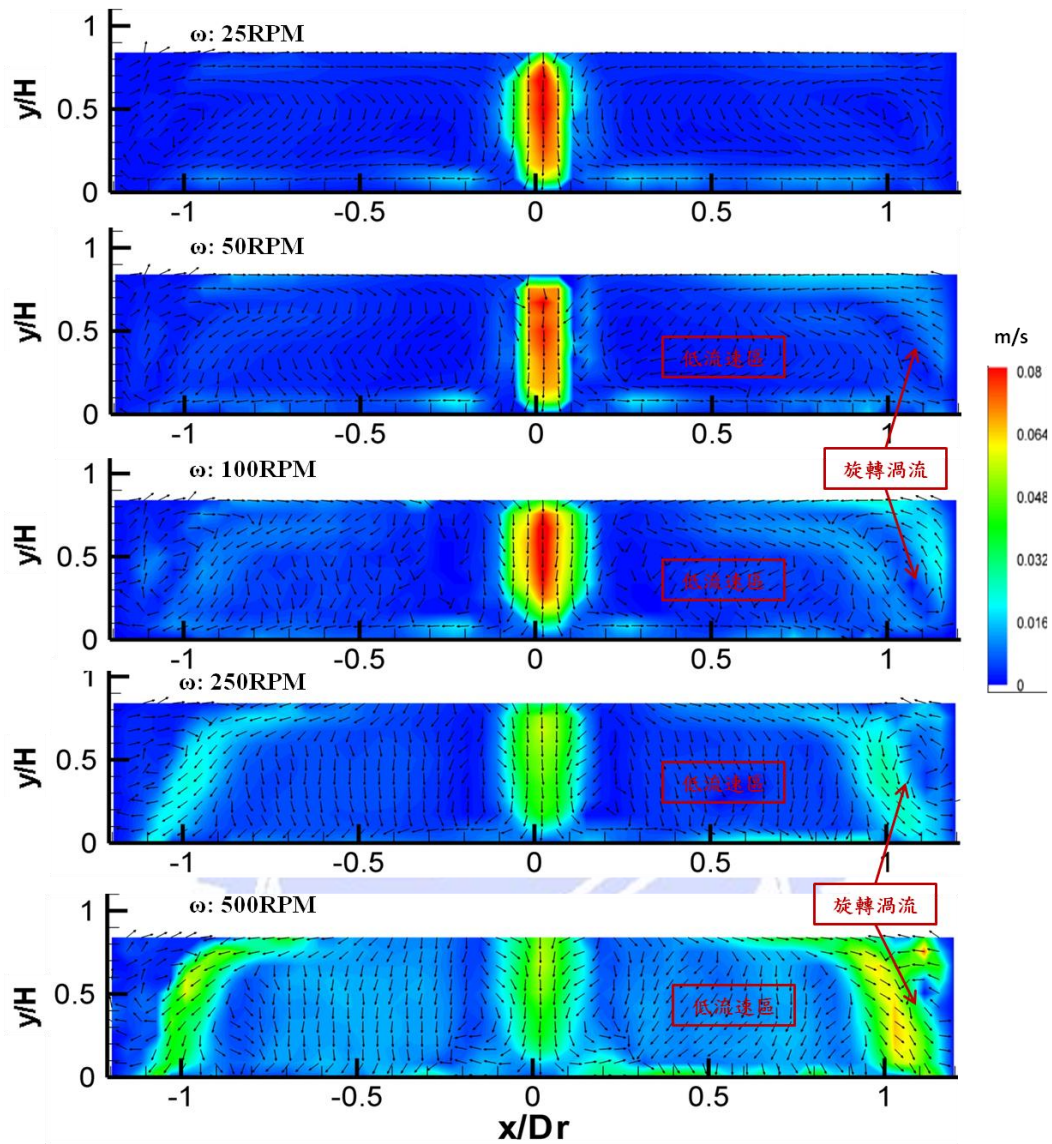


圖 4-3 無加溫基板之不同轉速變化圖。H=40mm，Q=1SLM。

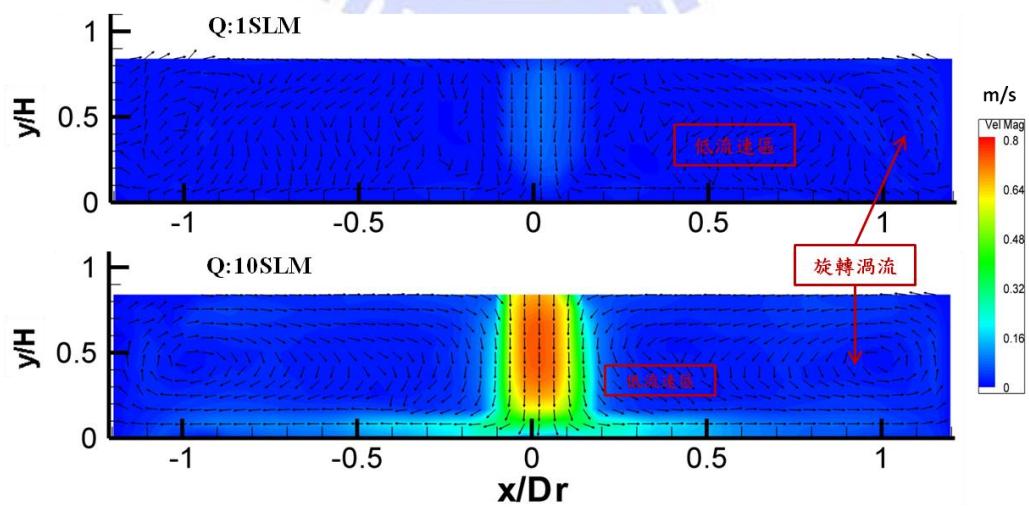


圖 4-4 無加溫基板不同流量變化圖。H=40mm， $\omega=100\text{RPM}$

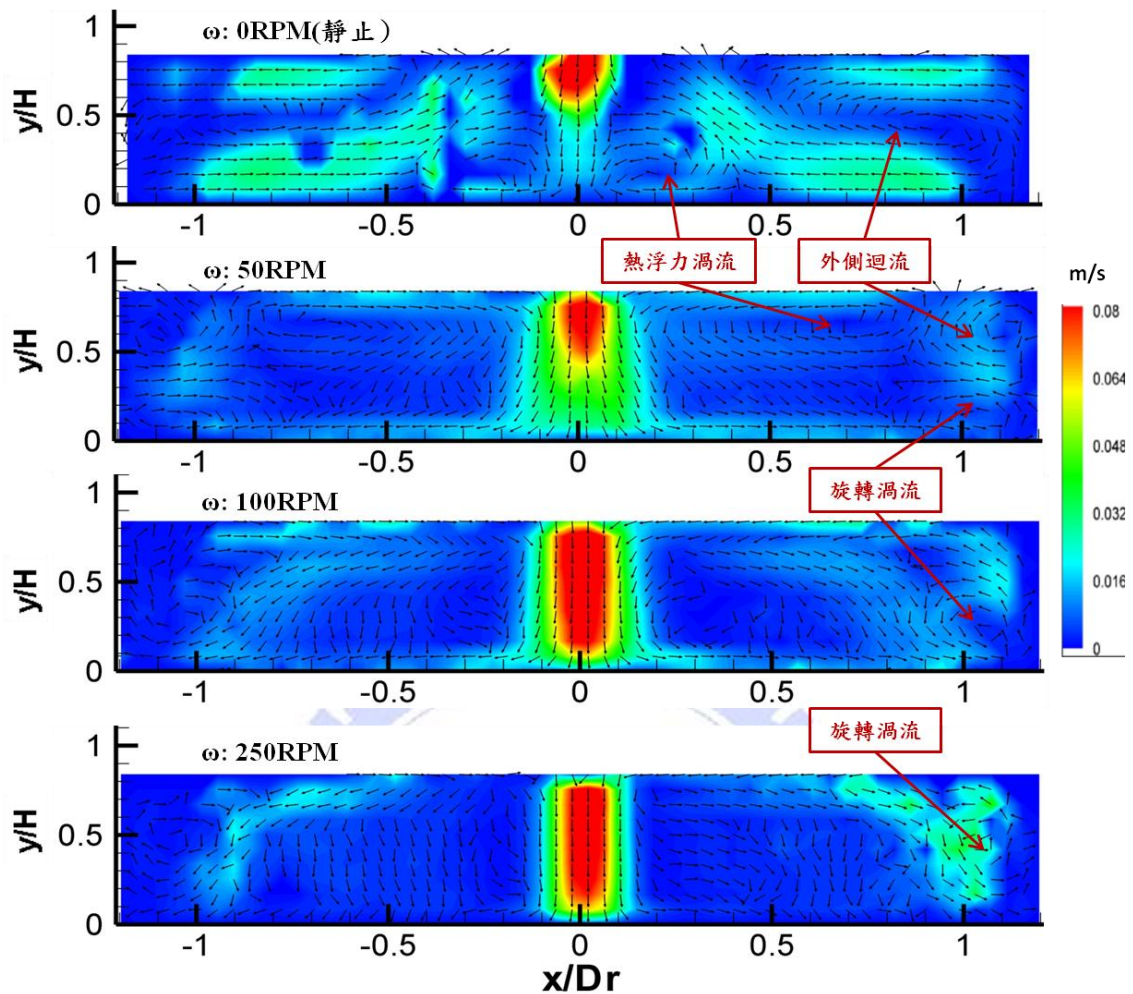


圖 4-5 加溫旋轉基板於不同轉速下變化圖。H=40mm，Q=1SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。

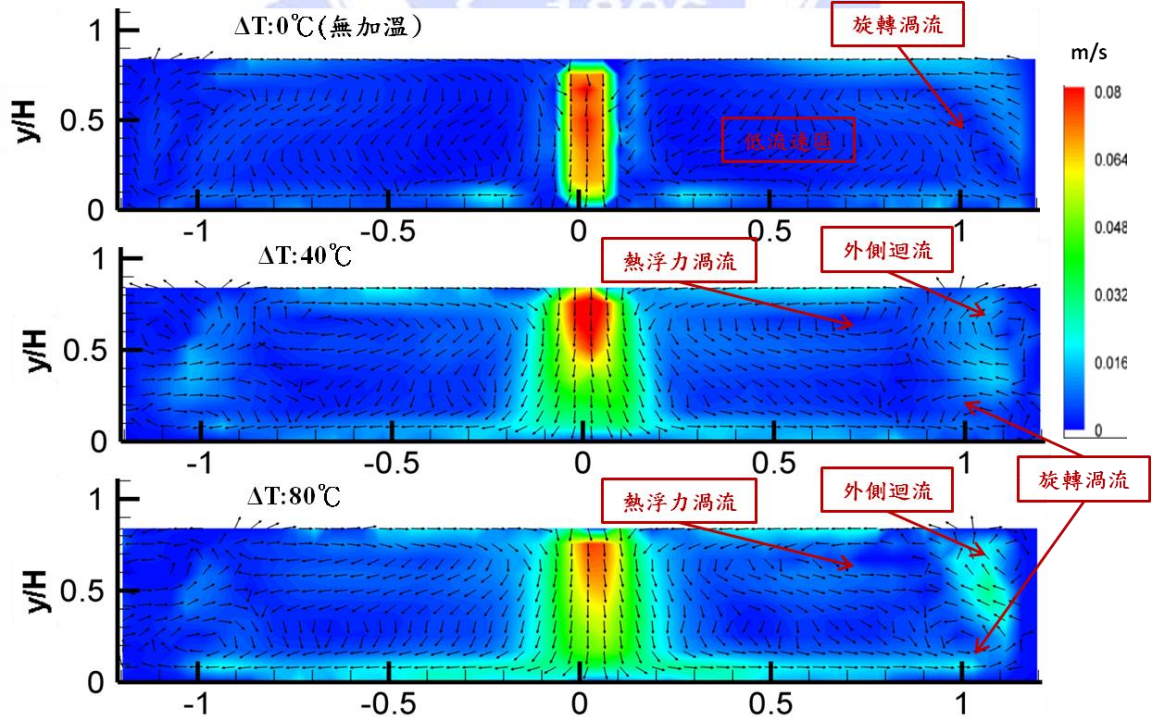


圖 4-6 旋轉基板於不同基板溫度下變化圖。H=40mm，Q=1SLM， $\omega=50\text{RPM}$ 。

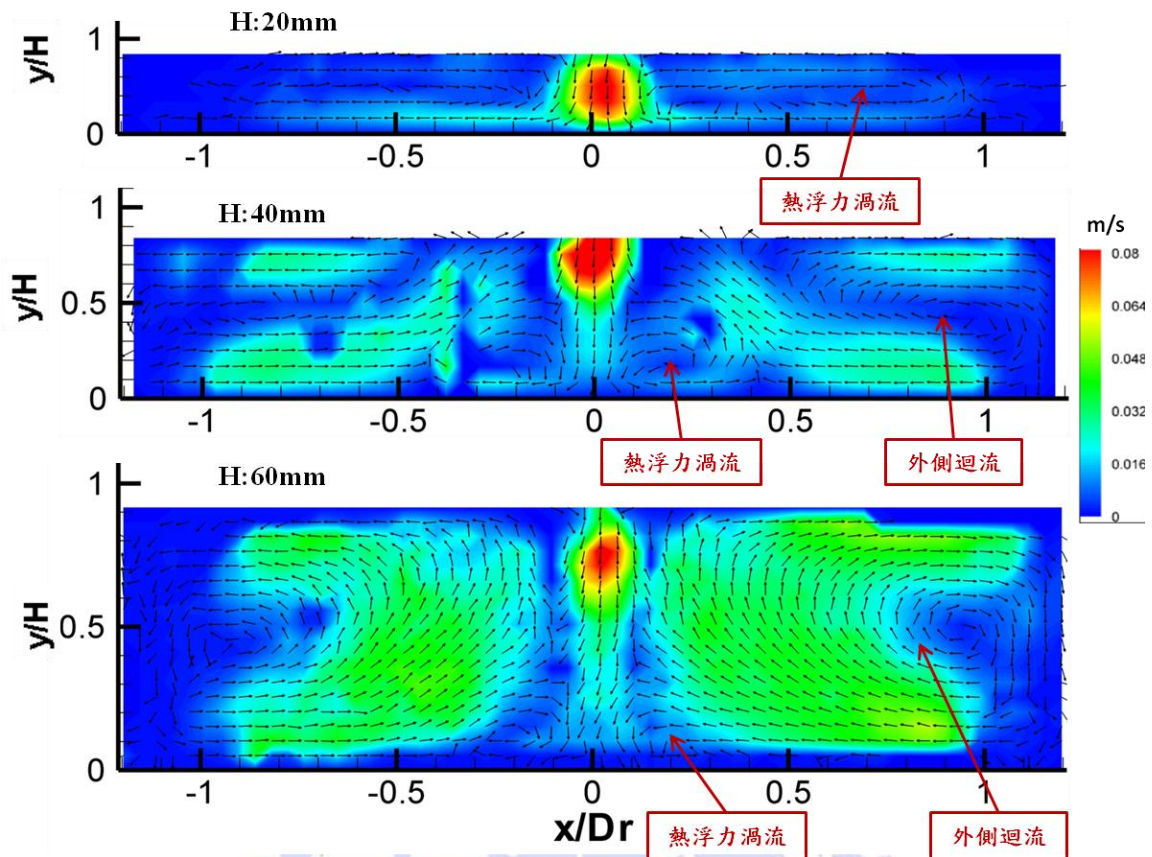


圖 4-7 不同進氣高度下靜止加溫基板變化圖。Q=1SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。

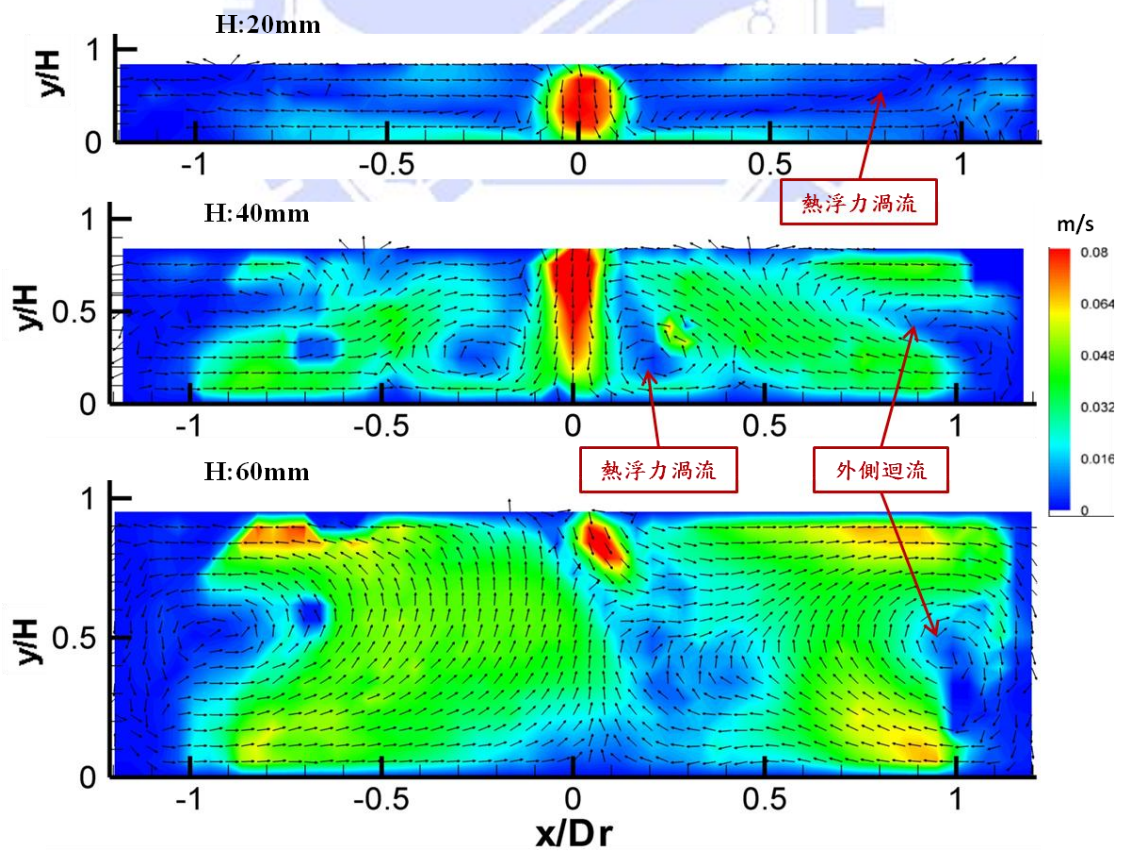


圖 4-8 不同進氣高度下靜止加溫基板變化圖。Q=1SLM， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。

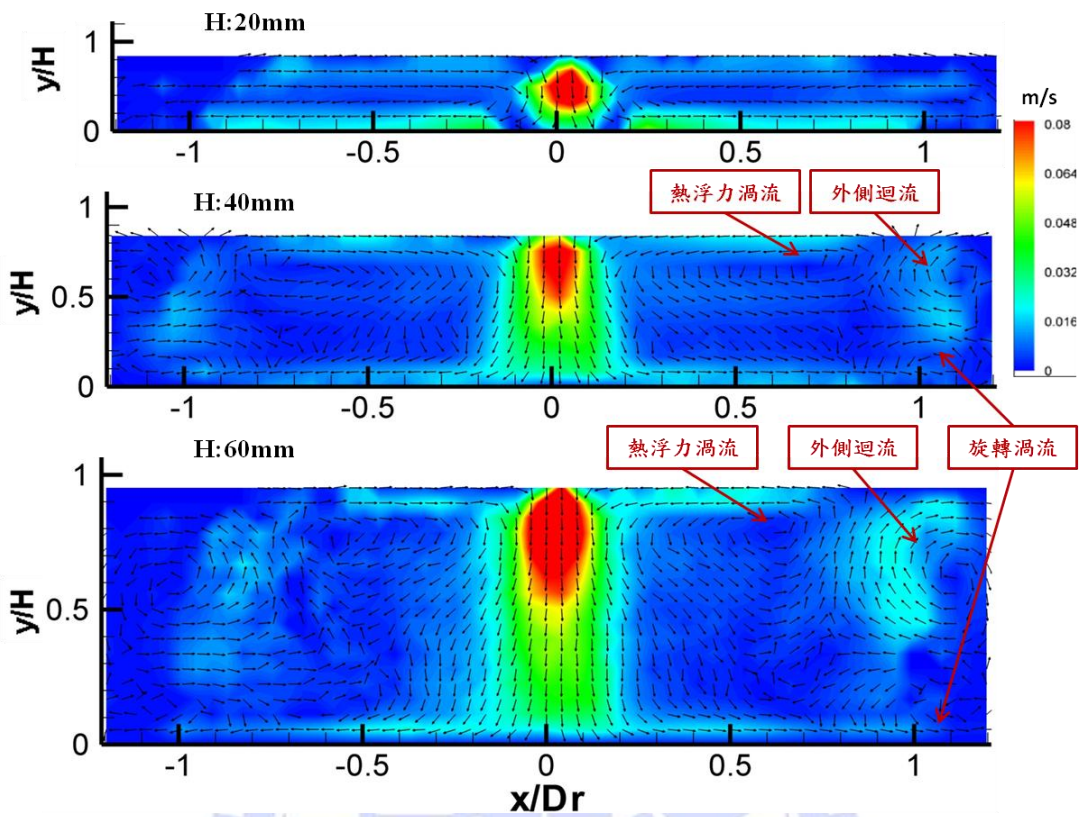


圖 4-9 不同進氣高度下旋轉加溫基板變化圖。Q=1SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ ， $\omega=50\text{RPM}$ 。

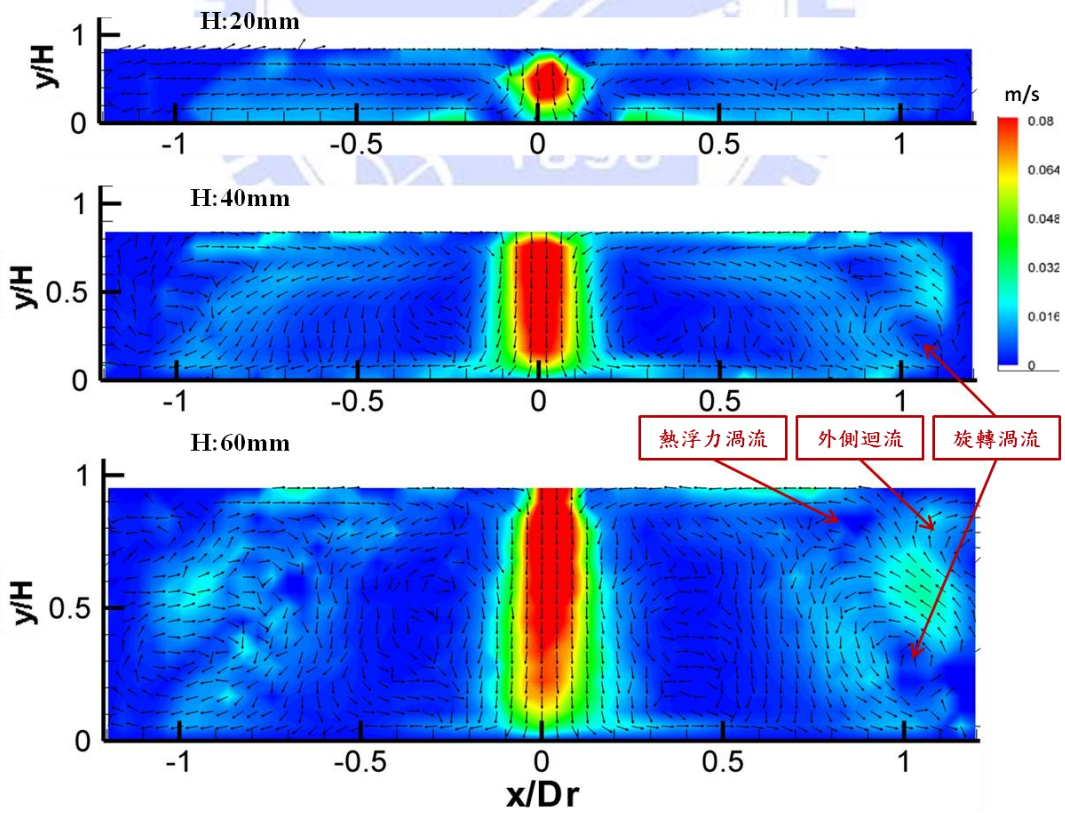


圖 4-10 不同進氣高度下旋轉加溫基板變化圖。Q=1SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ ， $\omega=100\text{RPM}$ 。

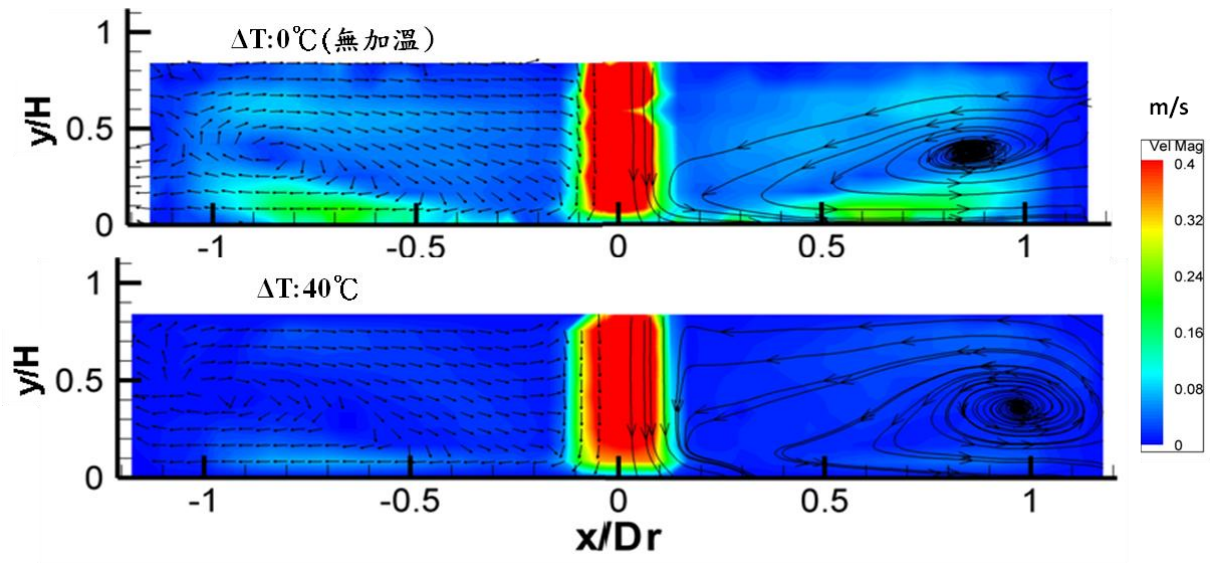


圖 4-11 靜止基板下之噴流效應流場 $Q=5\text{SLM}$ ， $H=40\text{mm}$ 。

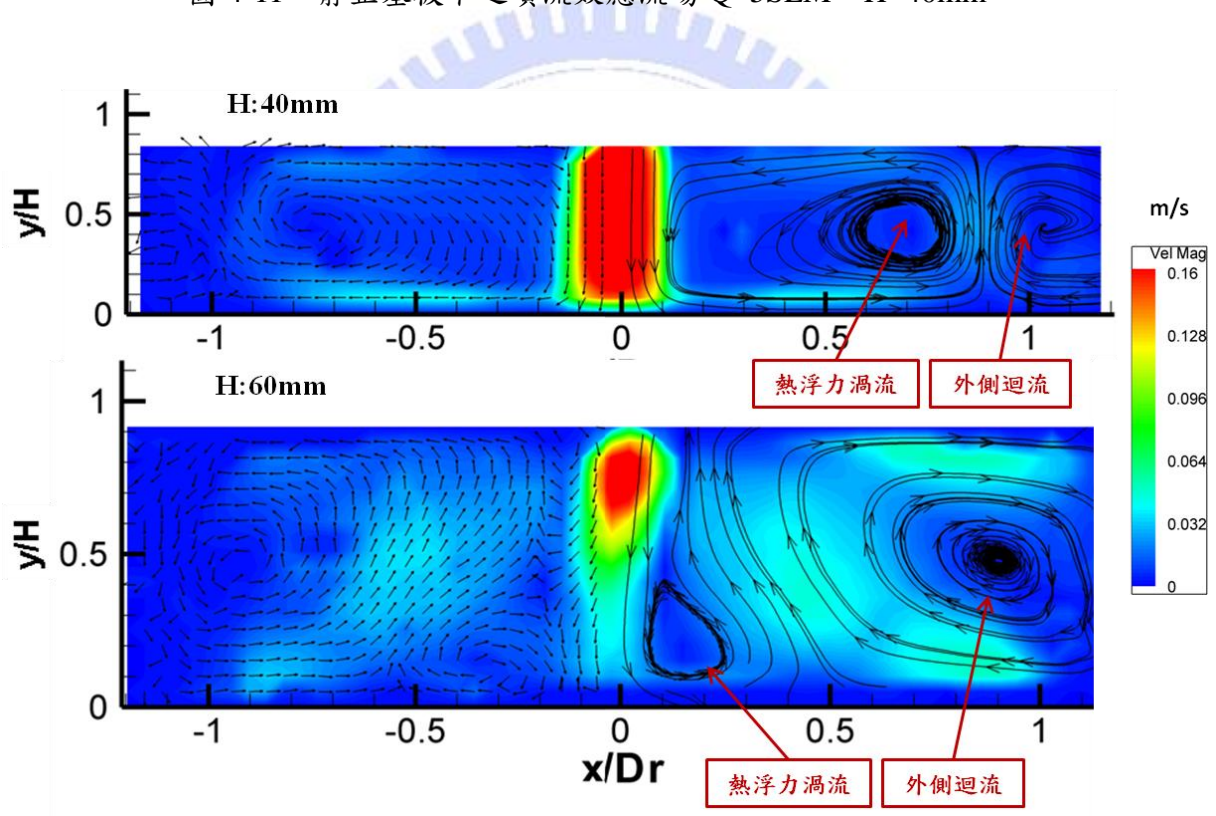


圖 4-12 靜止基板下之熱浮力效應流場 $Q=2\text{SLM}$ ， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。

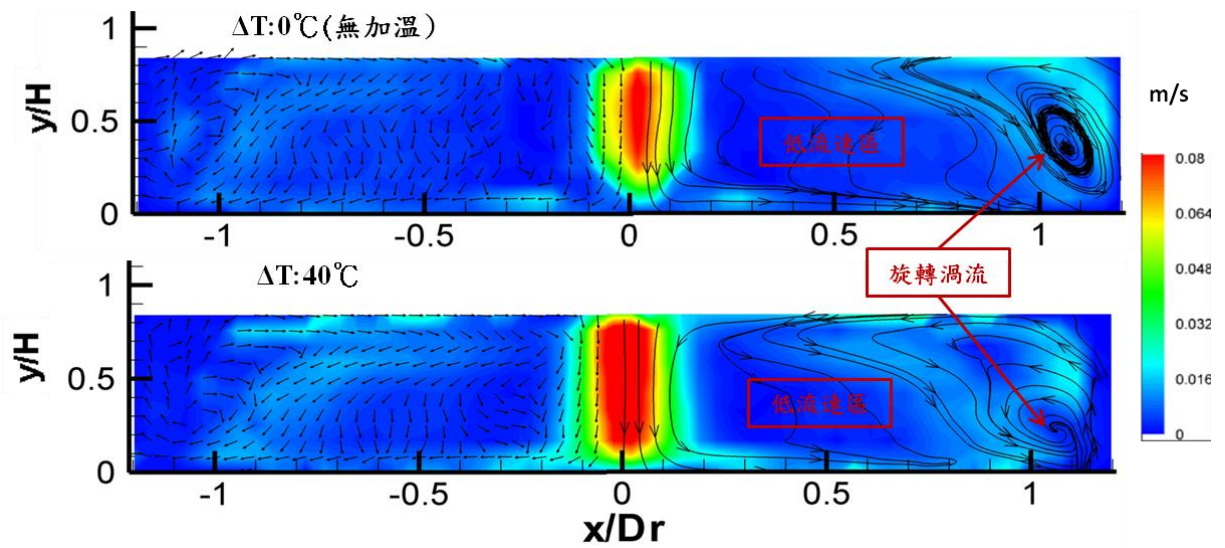


圖 4-13 旋轉效應流場 $H=40\text{mm}$ ， $Q=1\text{SLM}$ ， $\omega=100\text{RPM}$ 。

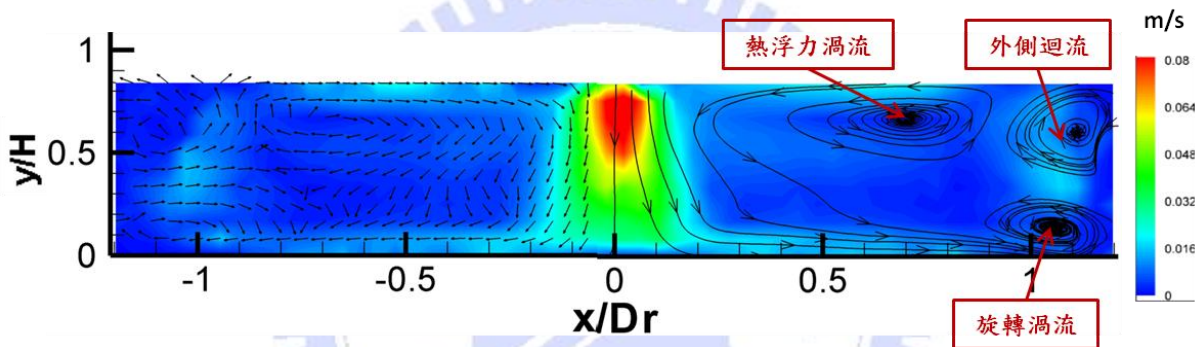


圖 4-14 旋轉效應與熱浮力效應共存 $H=40\text{mm}$ ， $Q=1\text{SLM}$ ， $\omega=50\text{RPM}$ ， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。

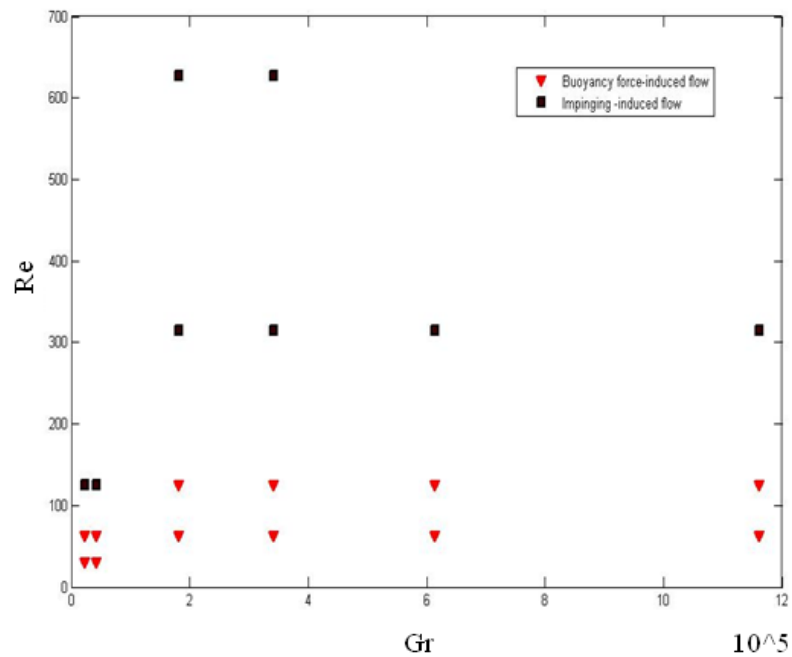


圖 4-15 靜止基板下流場型態分布圖

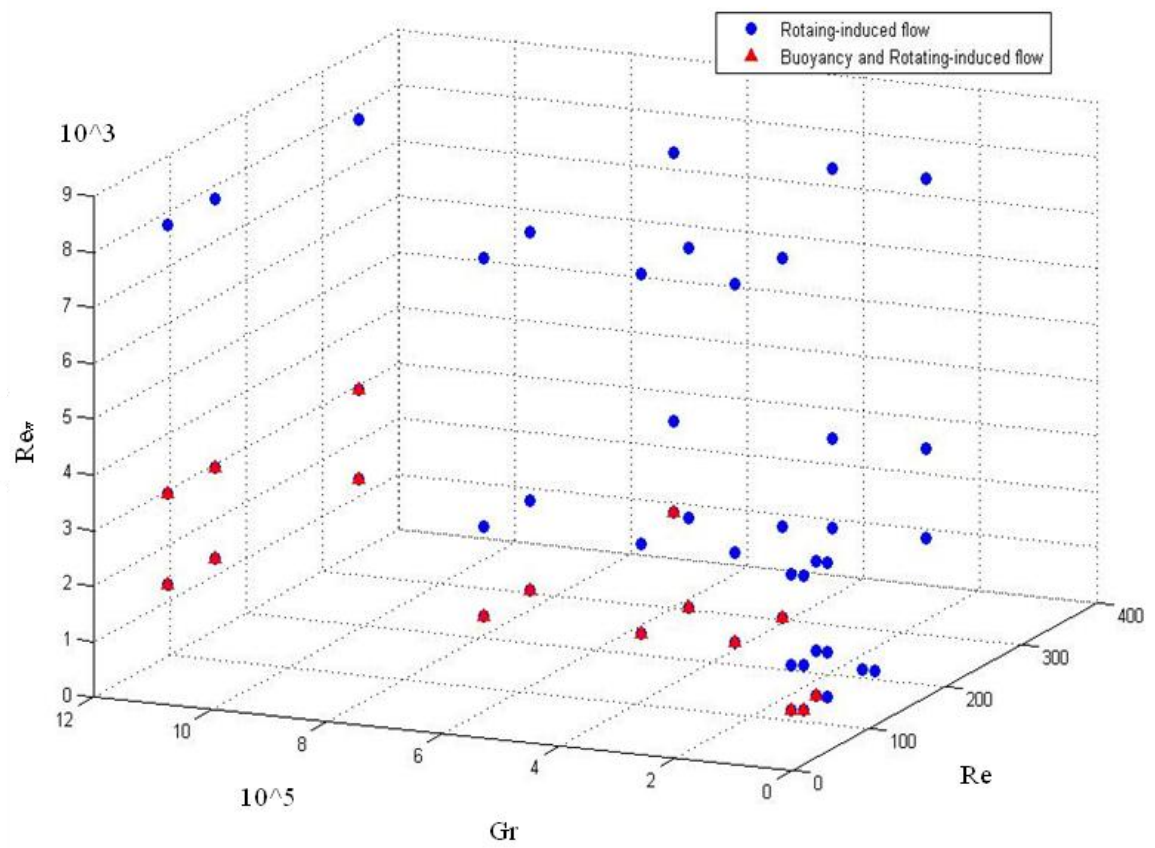
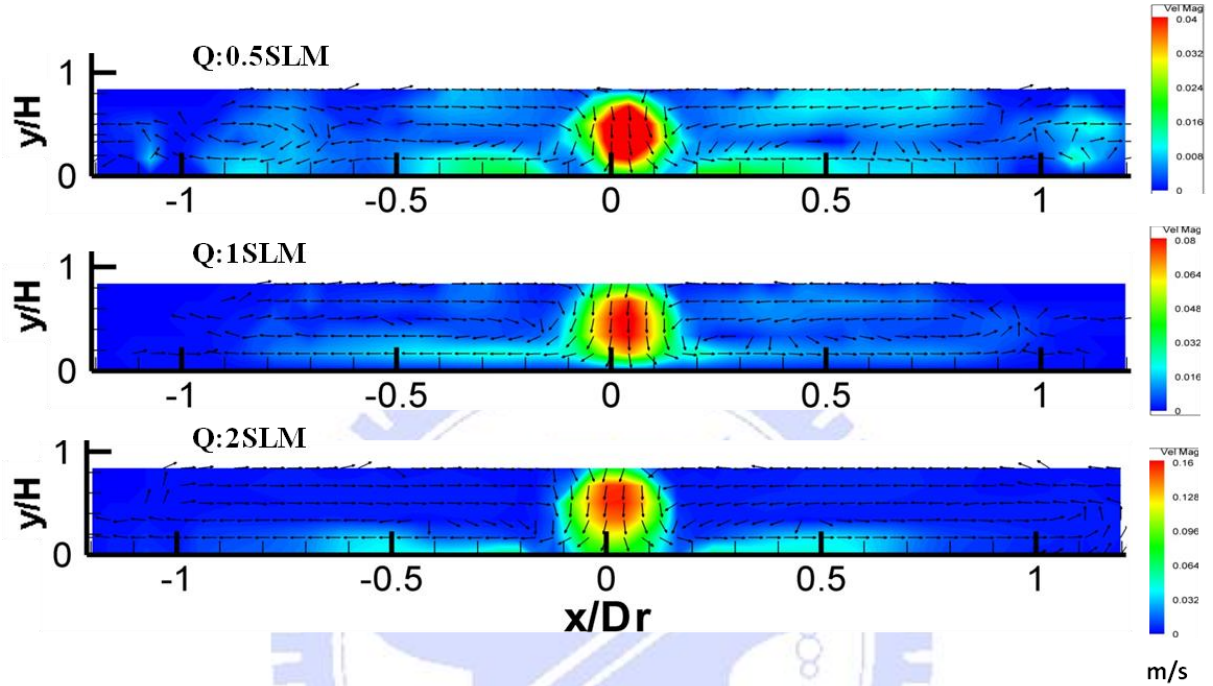


圖 4-16 旋轉基板下流場型態分布圖

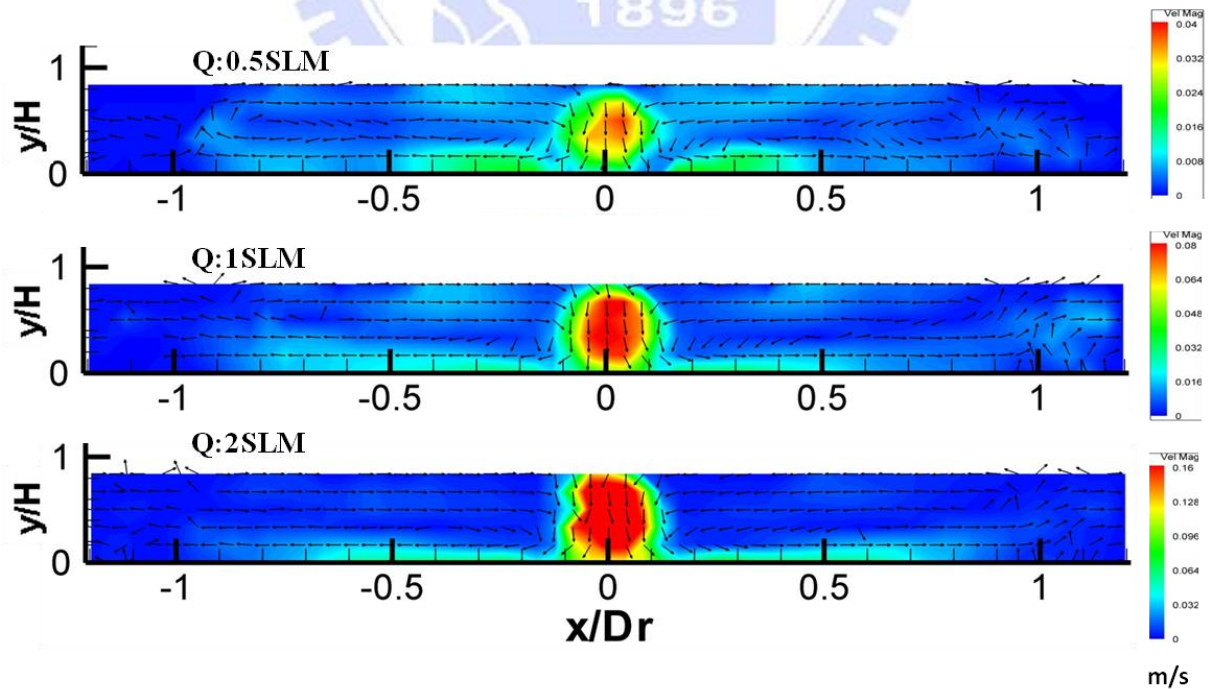


附錄 不同條件參數腔體流場圖

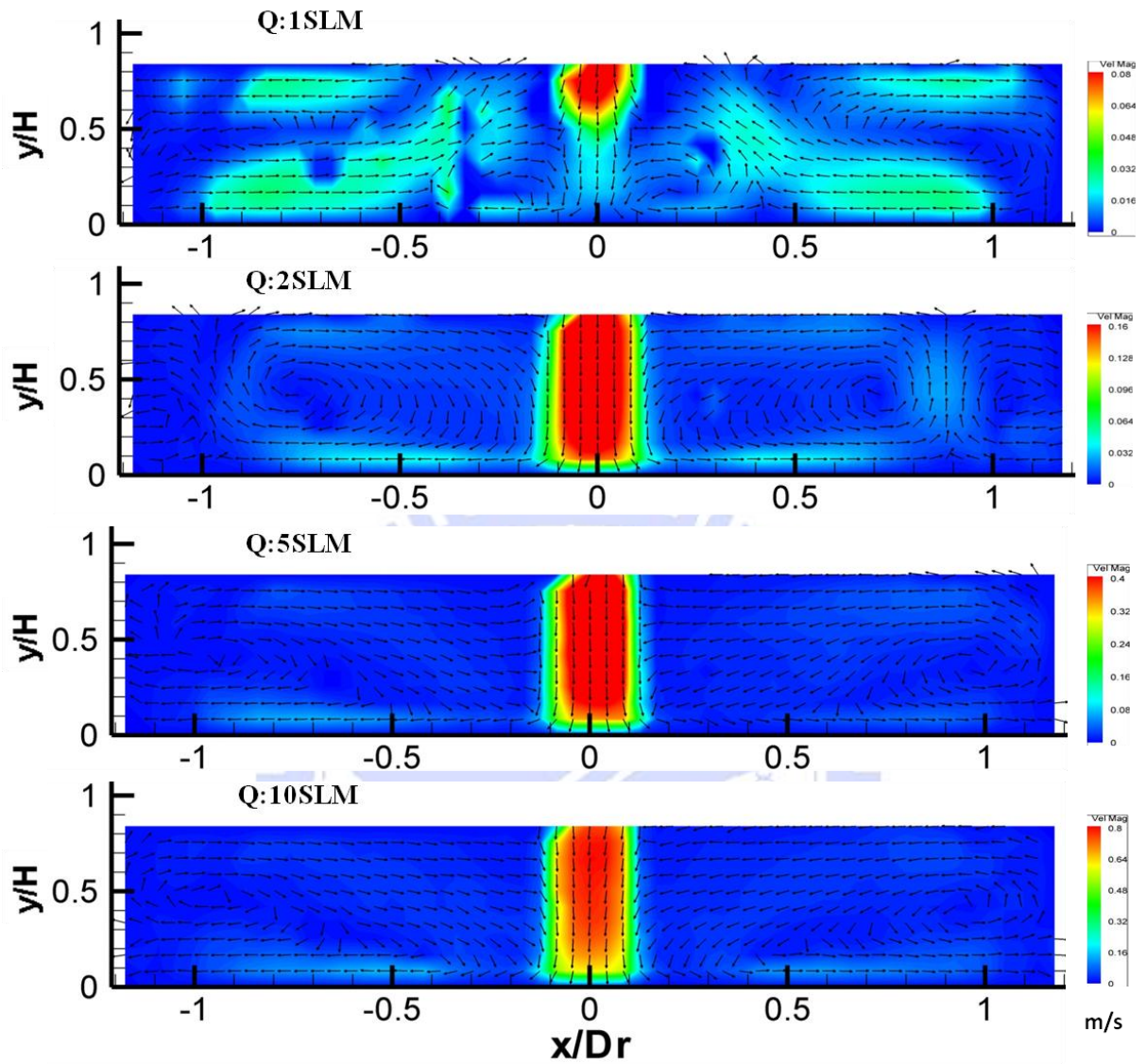
靜止基板之流場變化



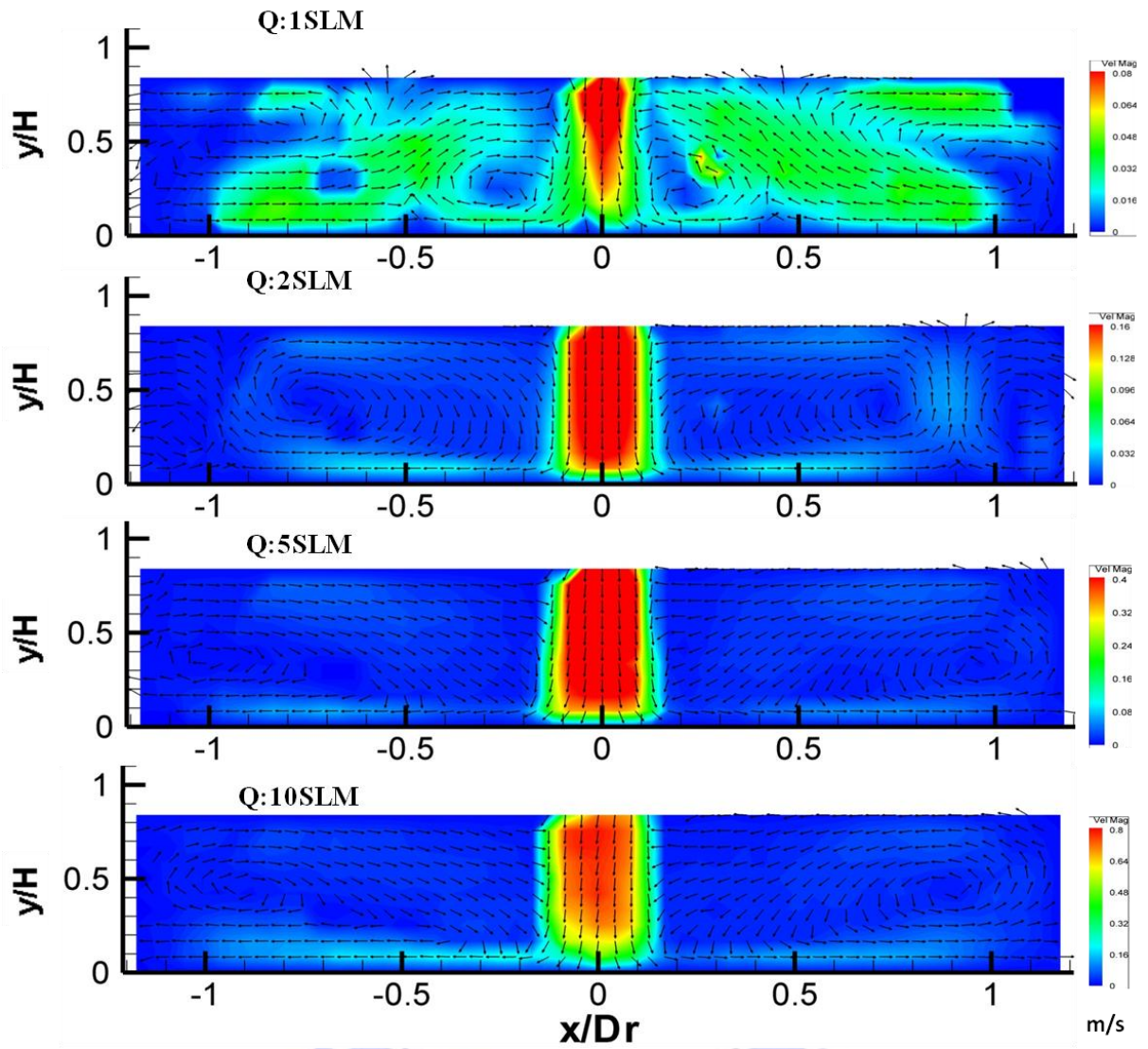
靜止基板加溫基板流場圖。H=20mm， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。



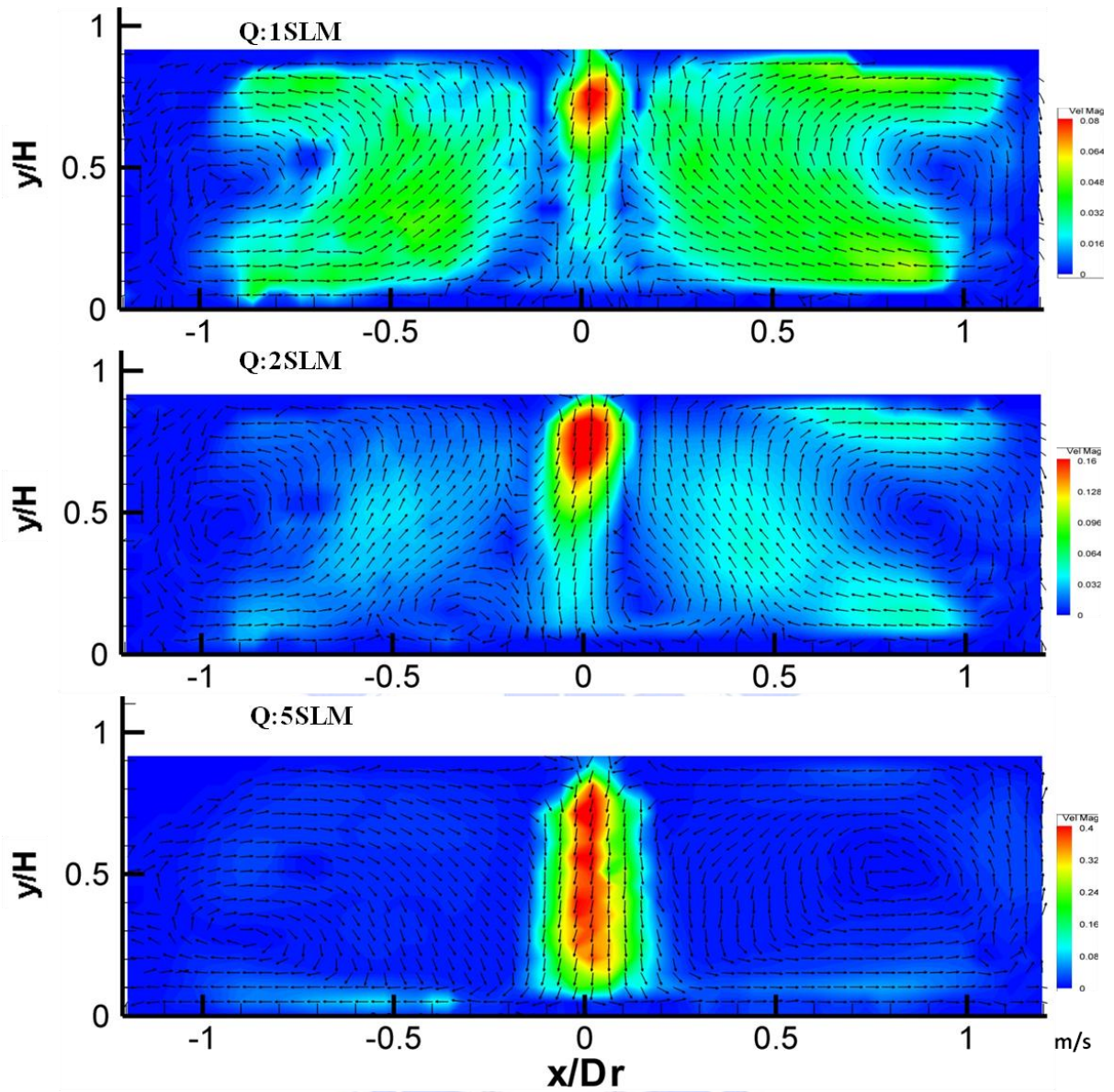
靜止基板加溫基板流場圖。H=20mm， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。



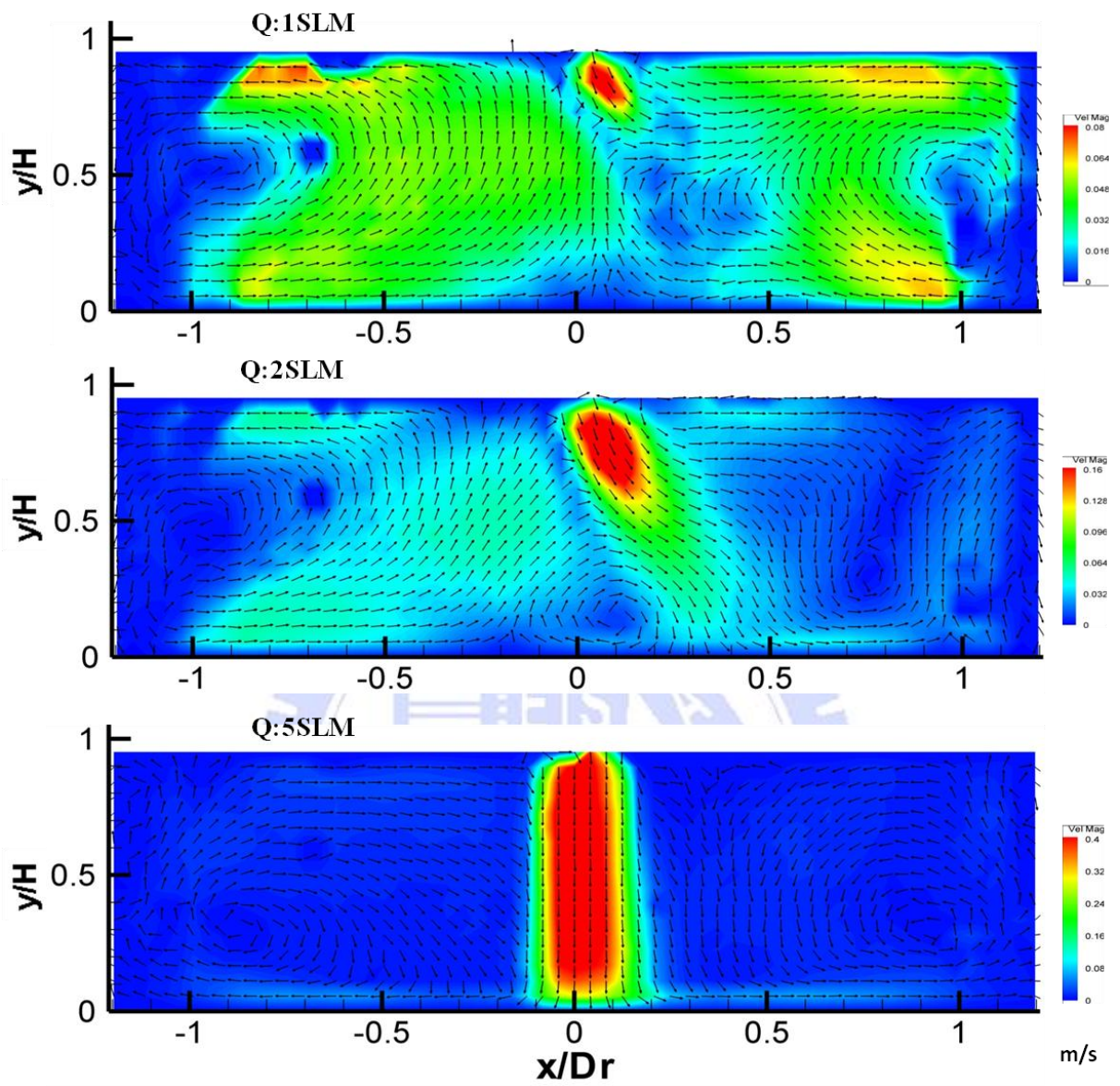
靜止基板加溫基板流場圖。H=40mm， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。



靜止基板加溫基板流場圖。H=40mm， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。

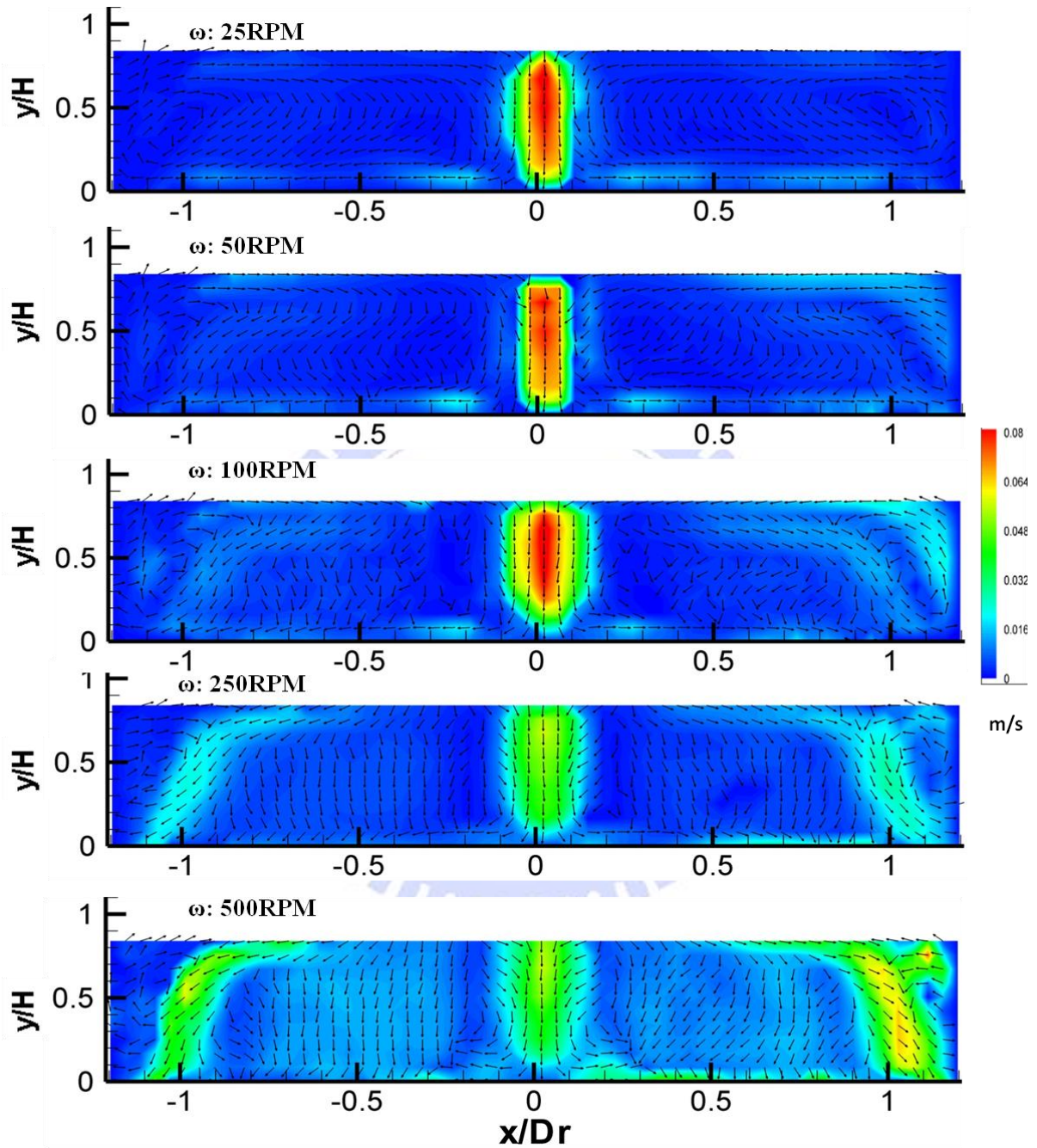


靜止基板加溫基板流場圖。H=60mm， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。

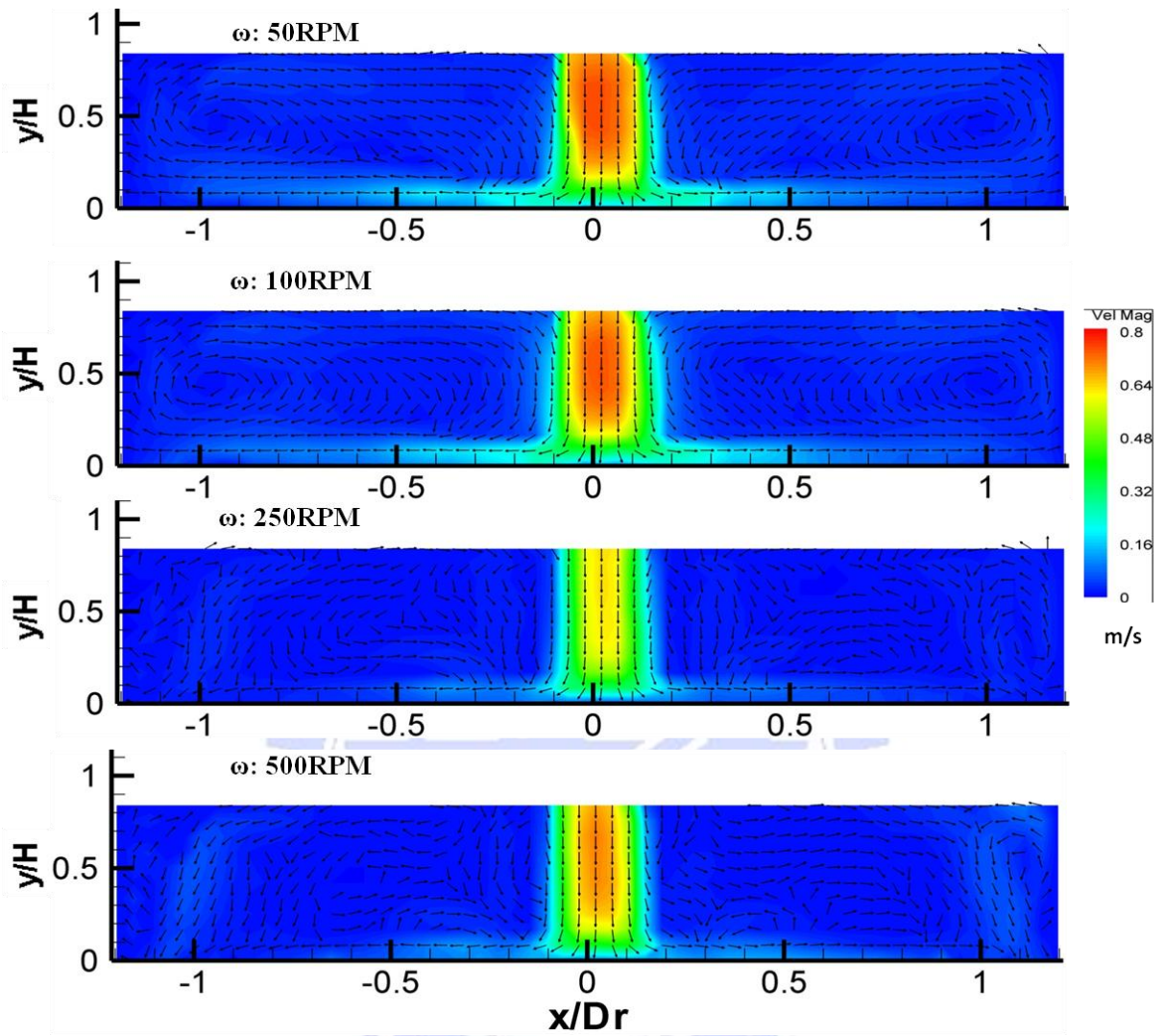


靜止基板加溫基板流場圖。H=60mm， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ 。

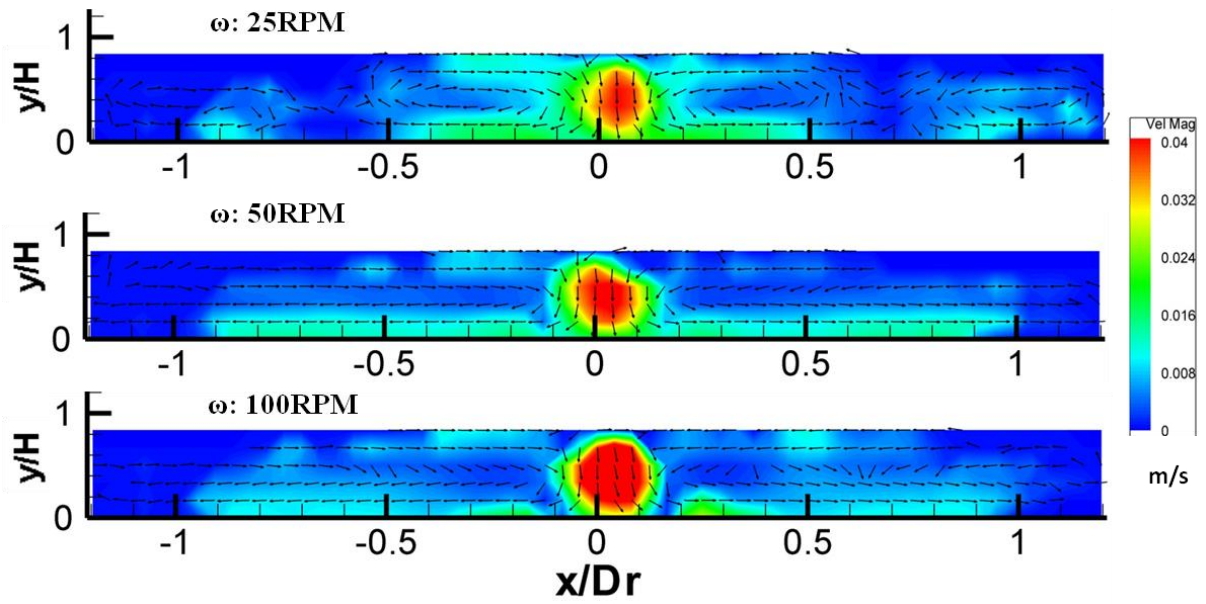
旋轉基板之流場變化



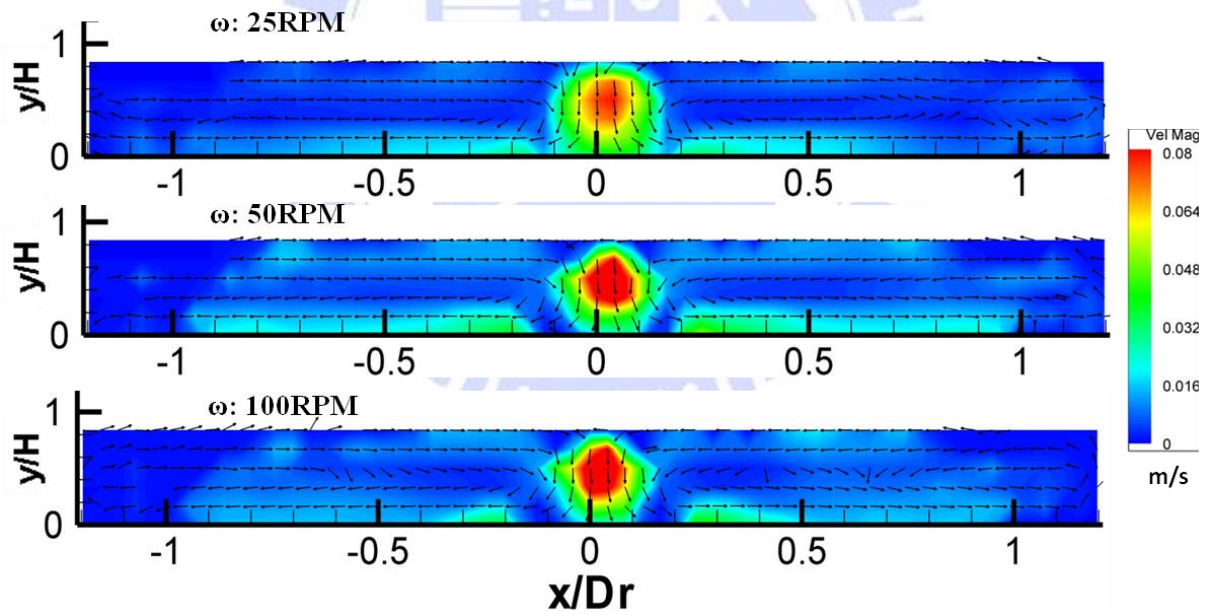
無加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=1SLM。



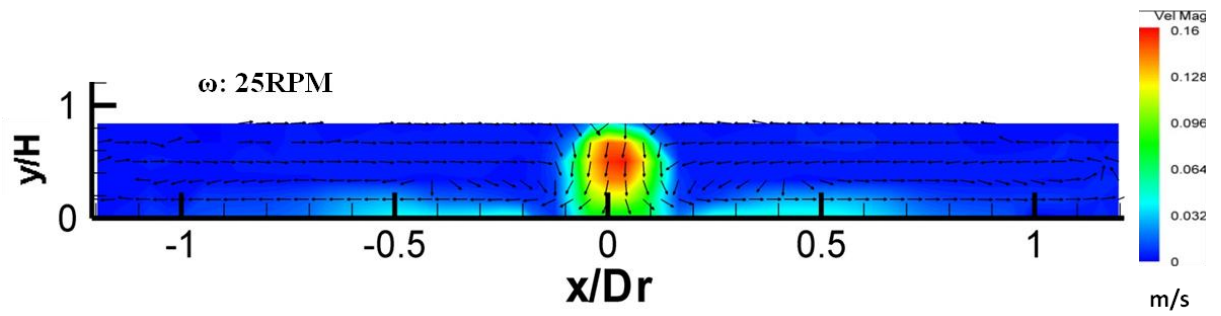
無加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=10SLM。



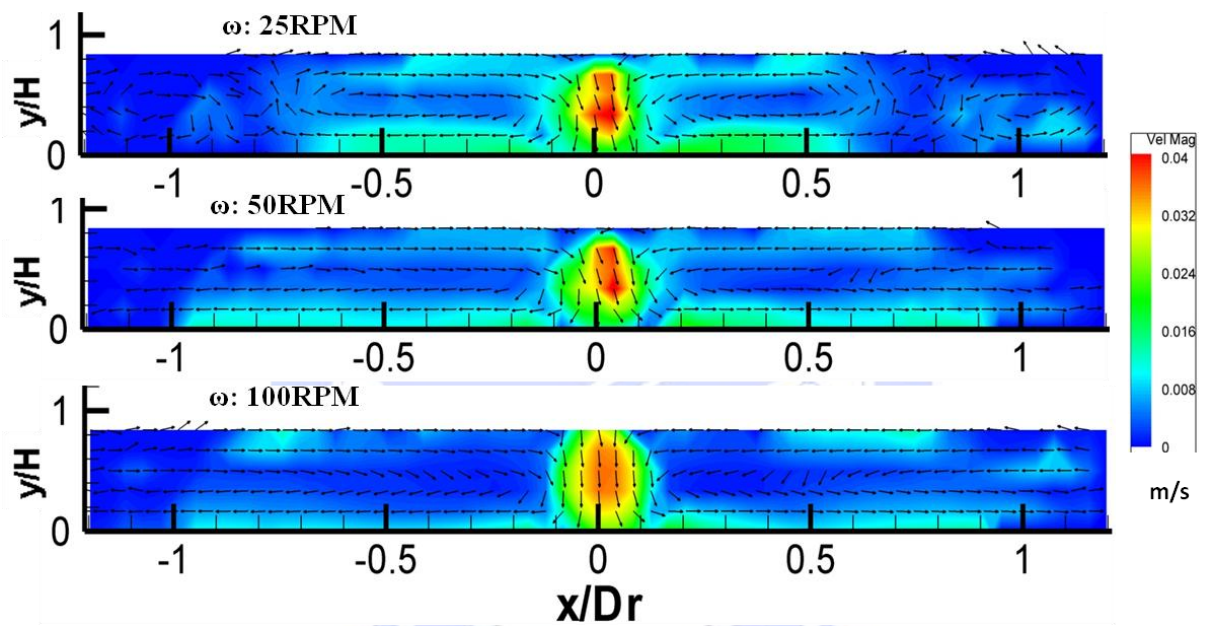
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=0.5SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 。



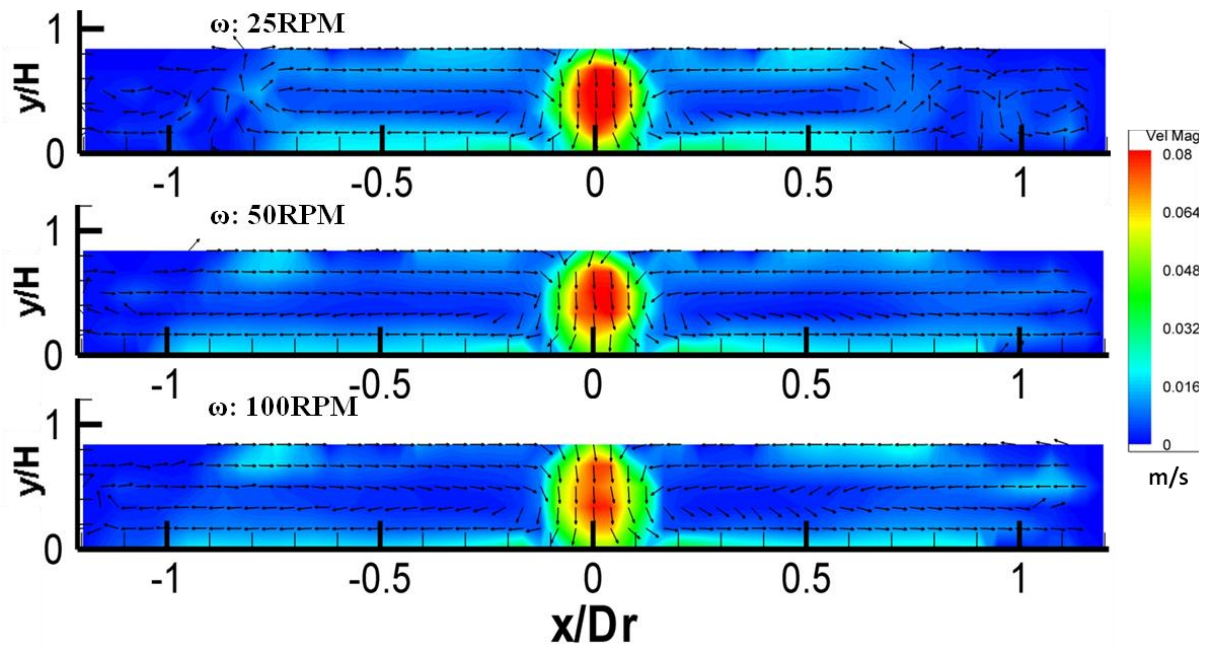
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=1SLM， $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 。



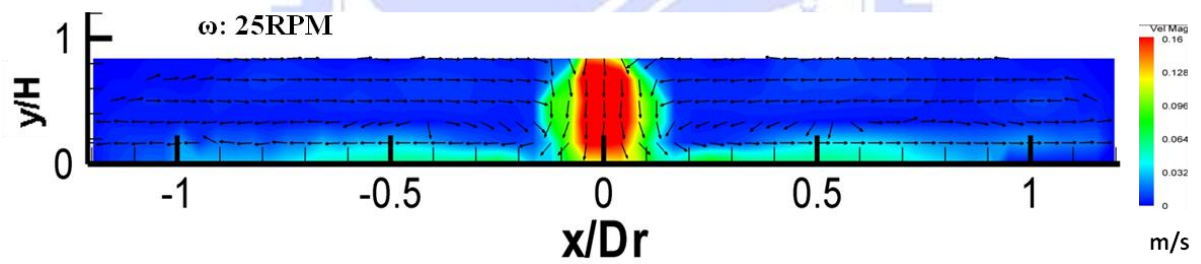
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=2SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。



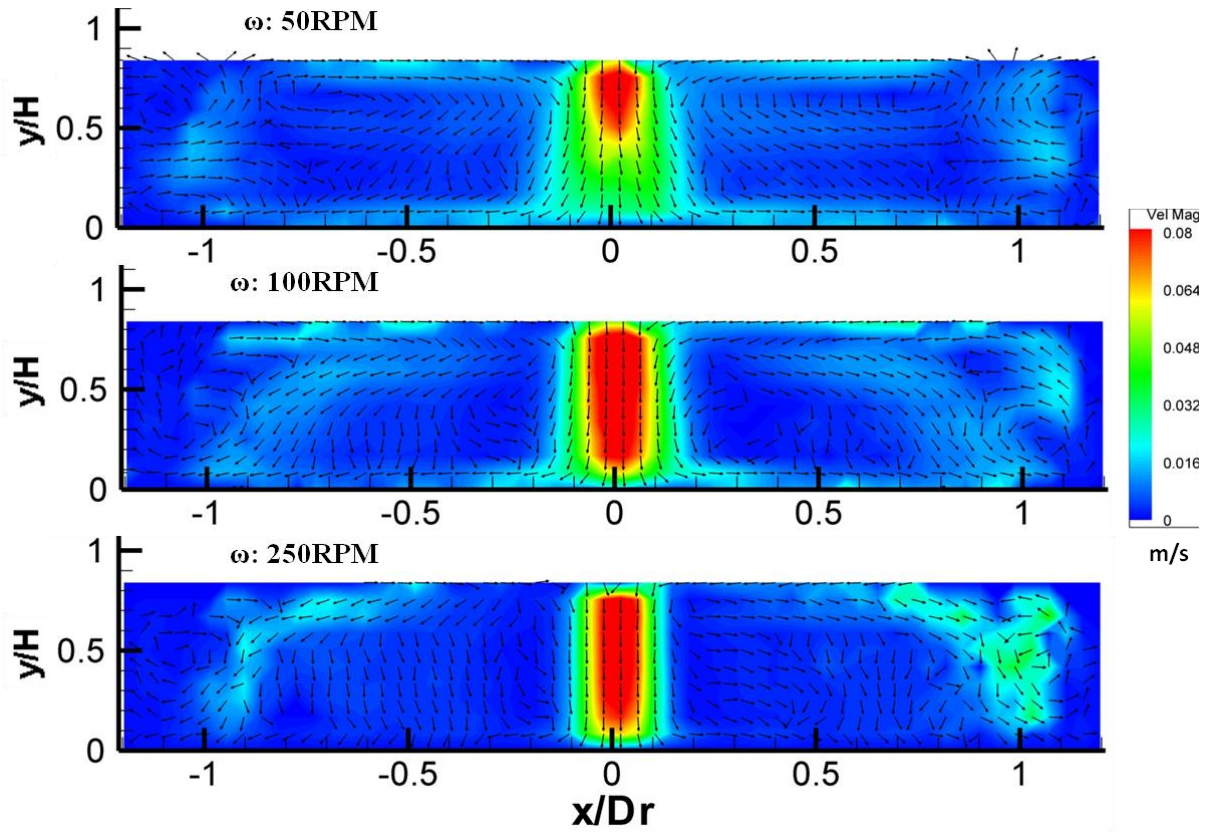
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=0.5SLM， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。



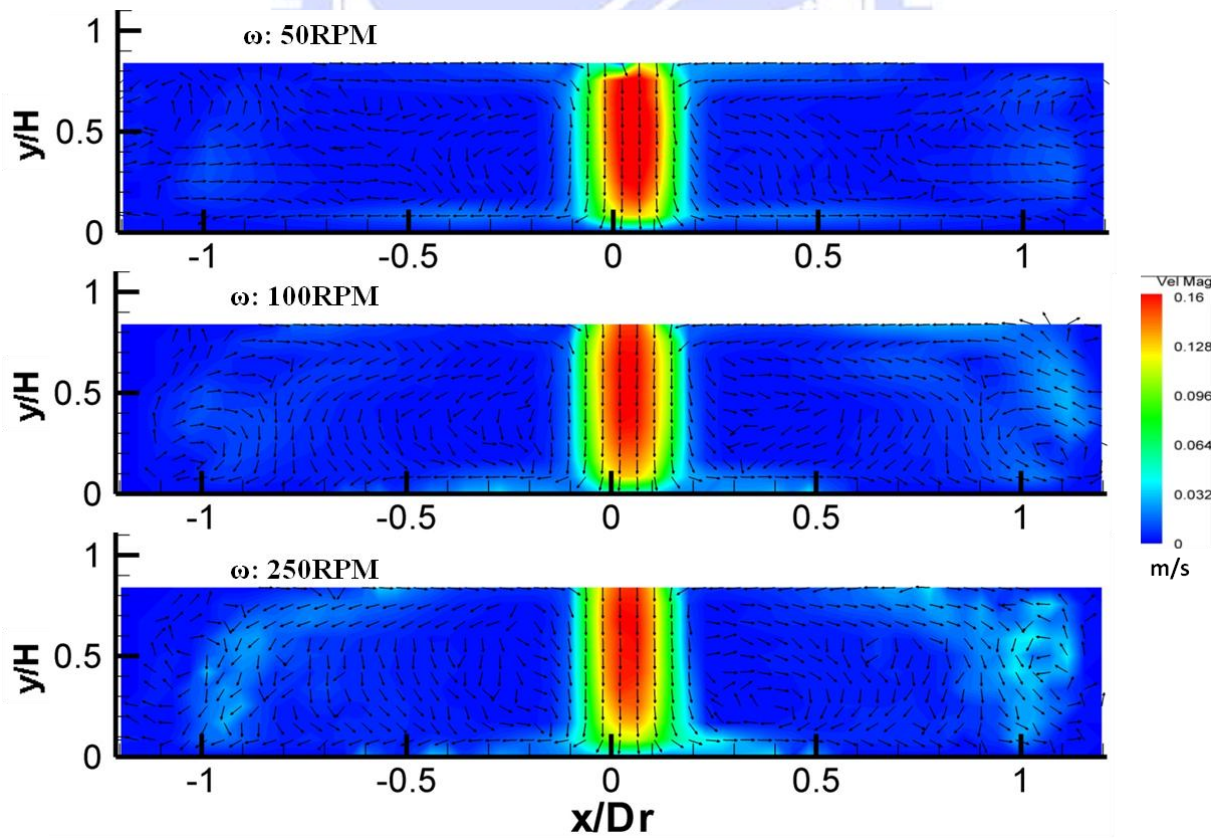
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=1SLM， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。



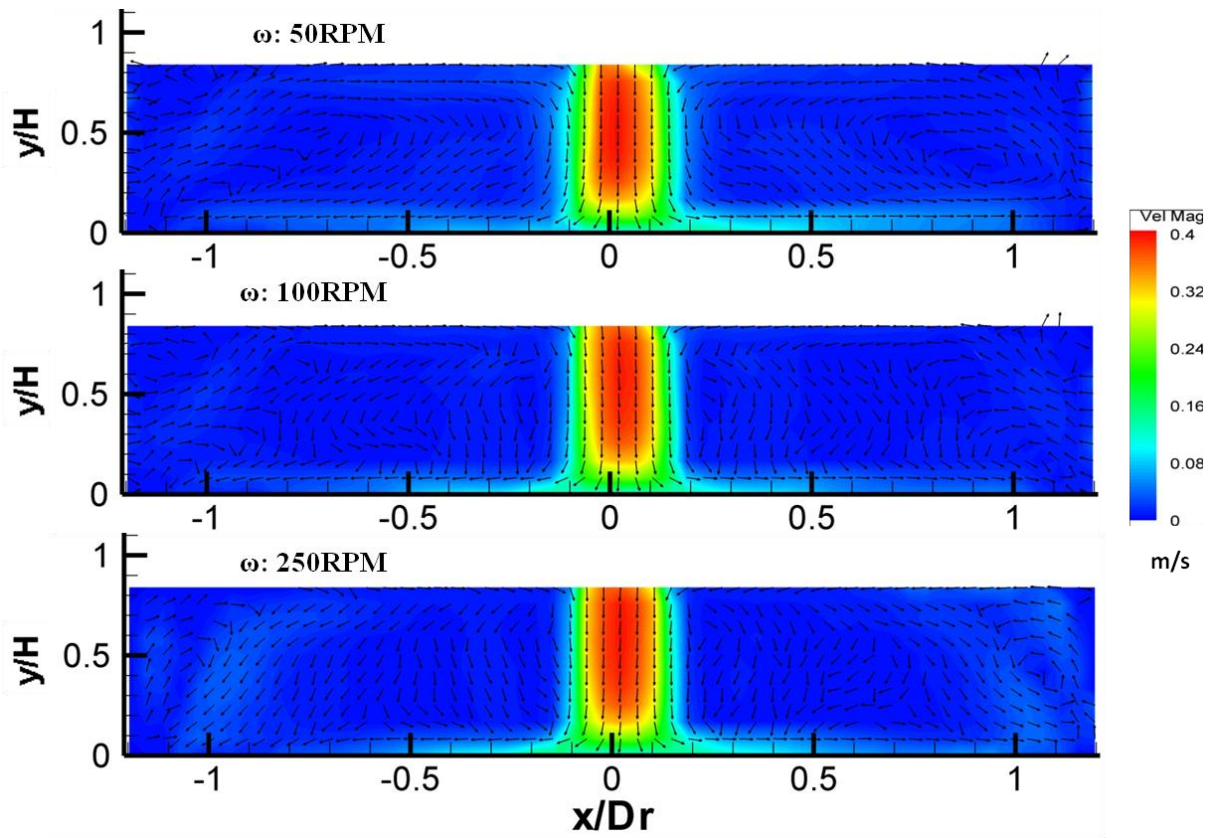
加溫基板不同轉速流場圖。H=20mm，Q=2SLM， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。



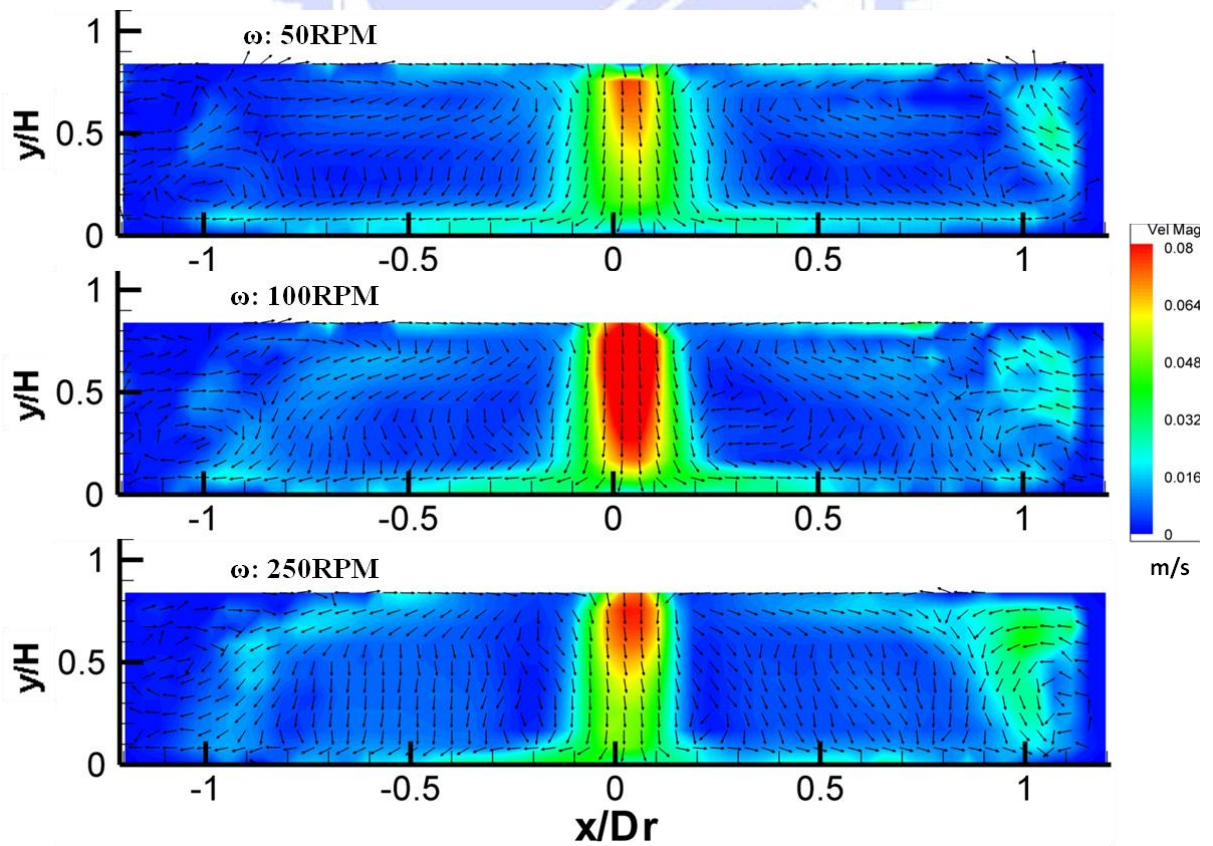
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=1SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。



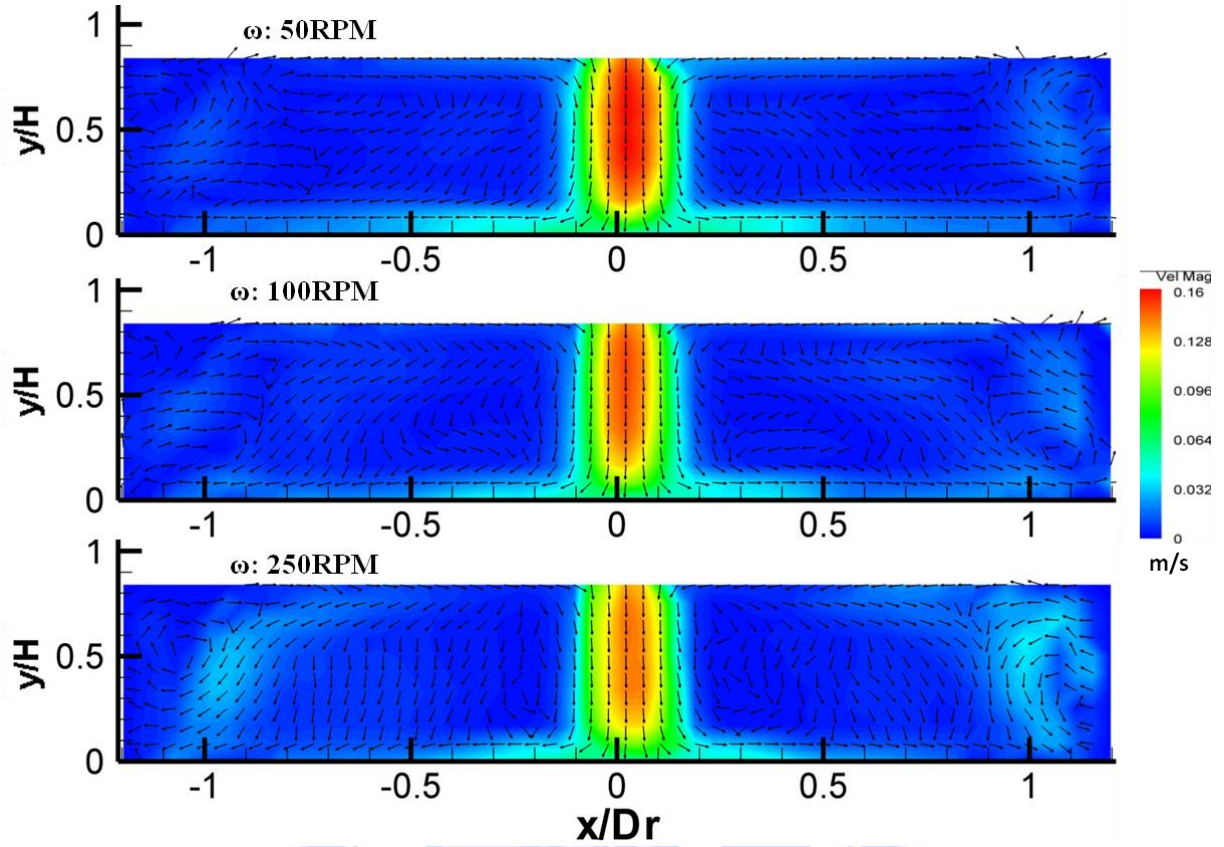
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=2SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。



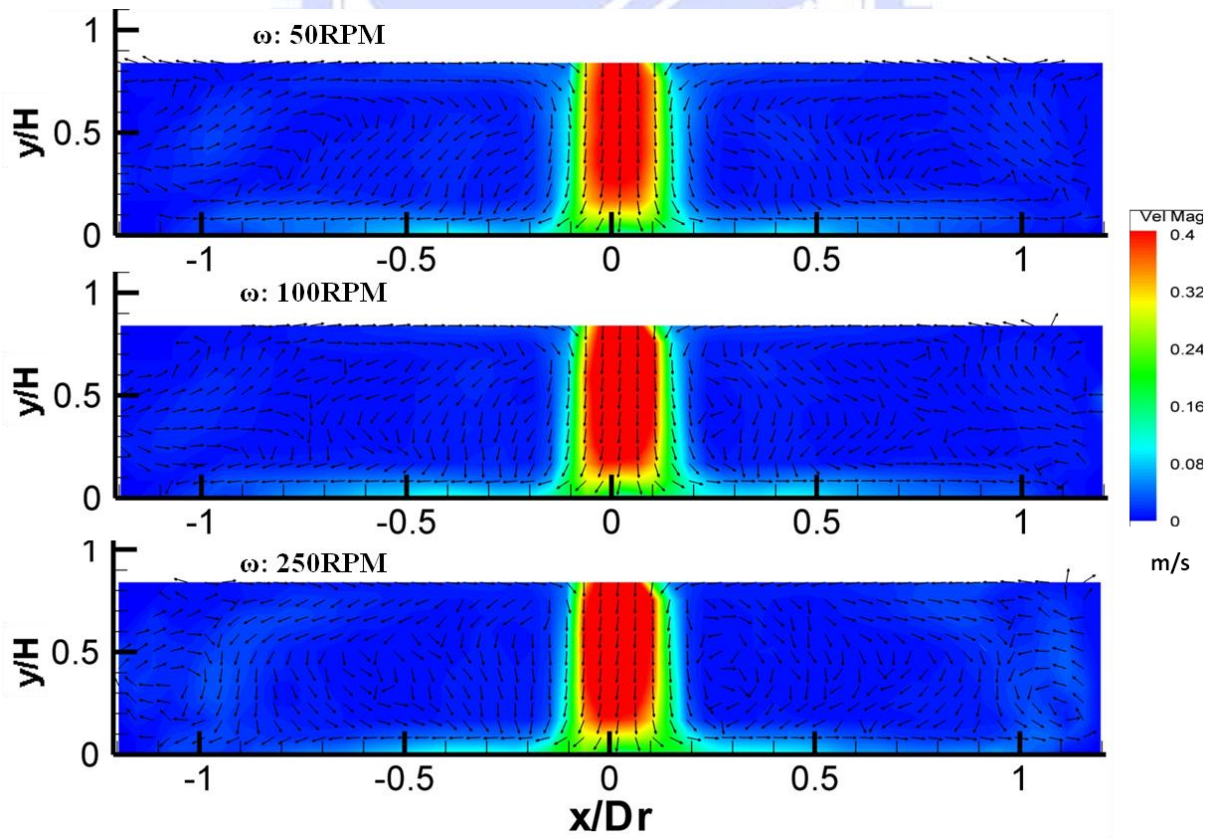
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=5SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。



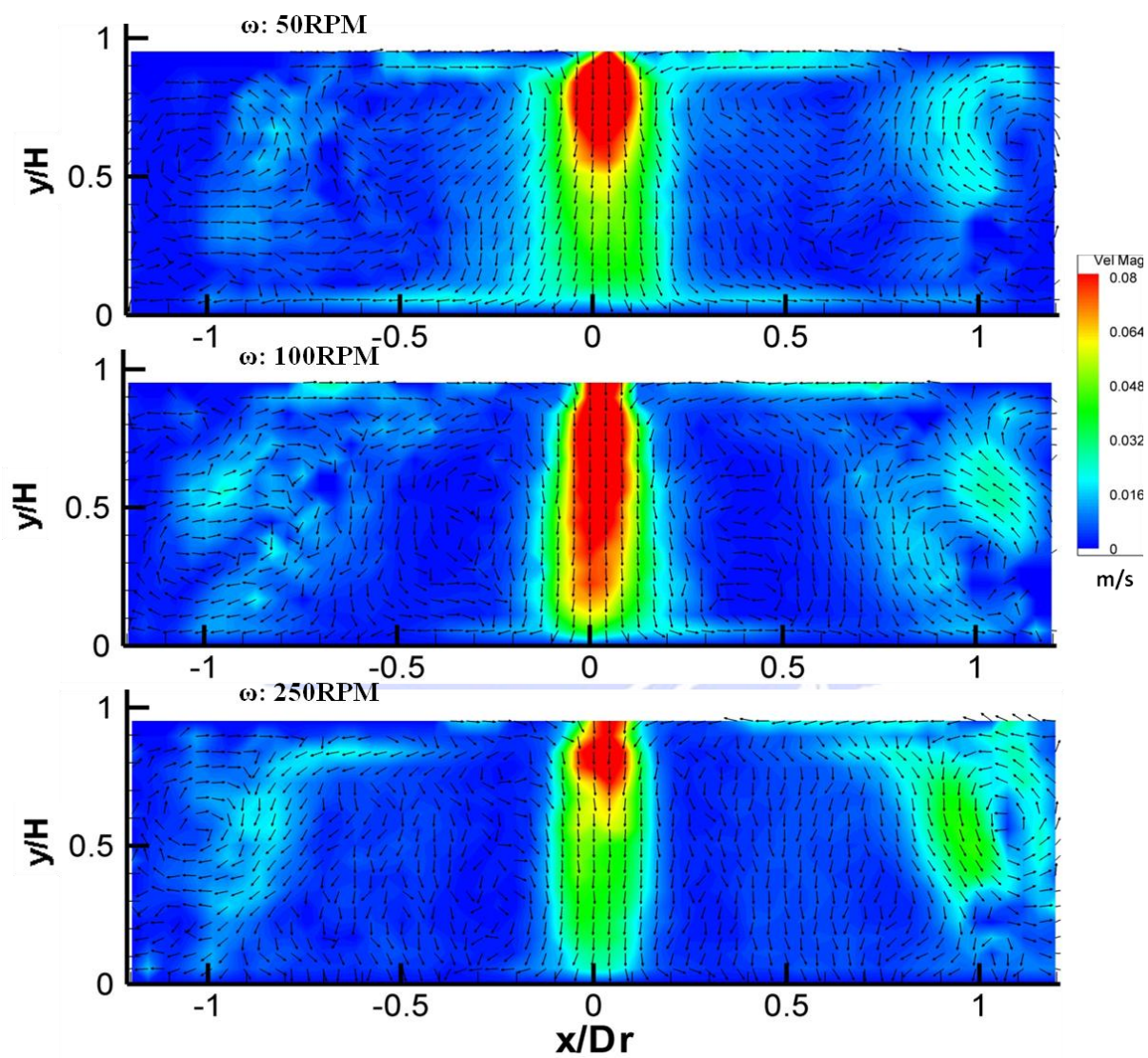
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=1SLM， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。



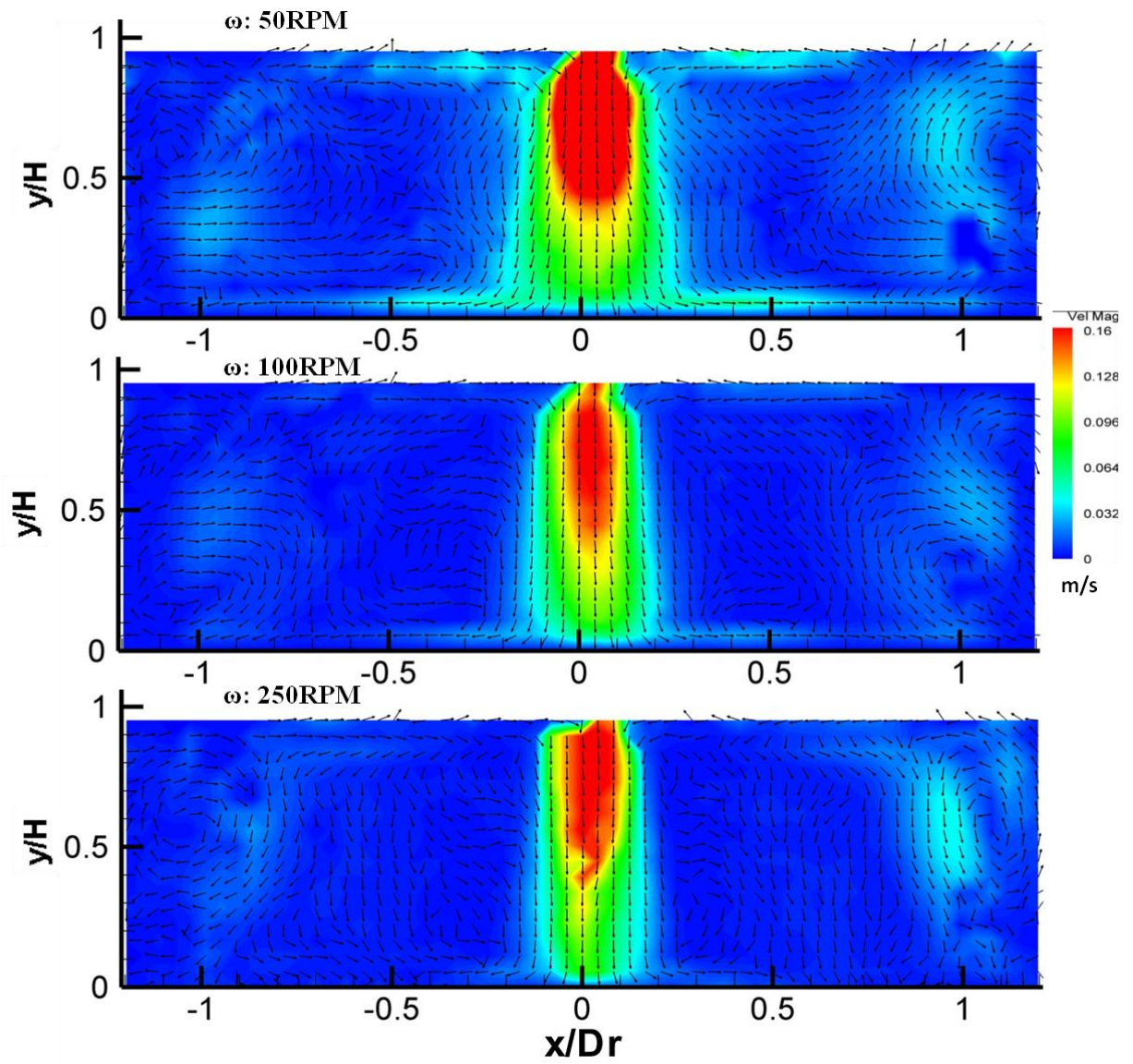
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=2SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ 。



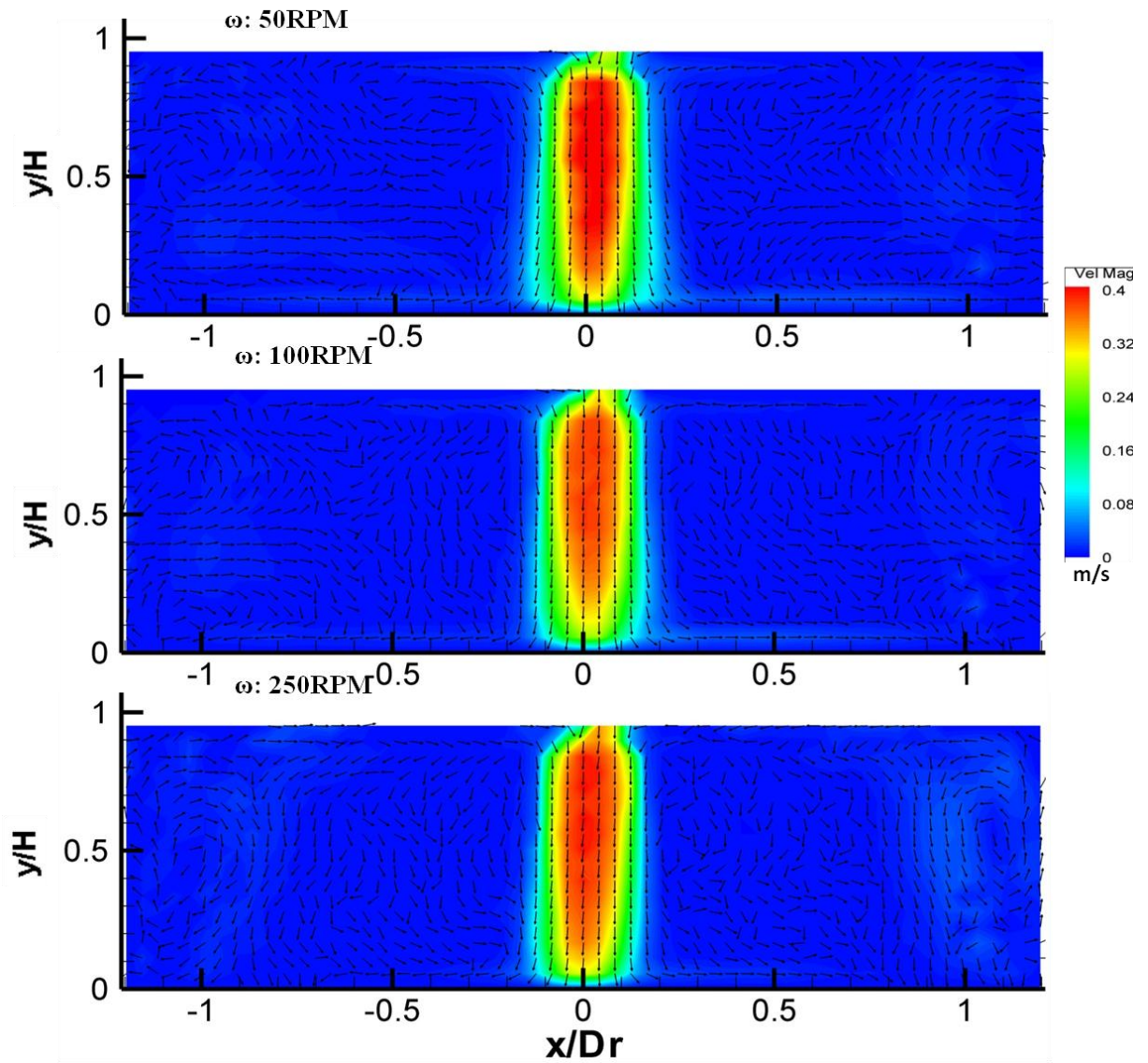
加溫基板不同轉速流場圖。H=40mm，Q=5SLM， $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ 。



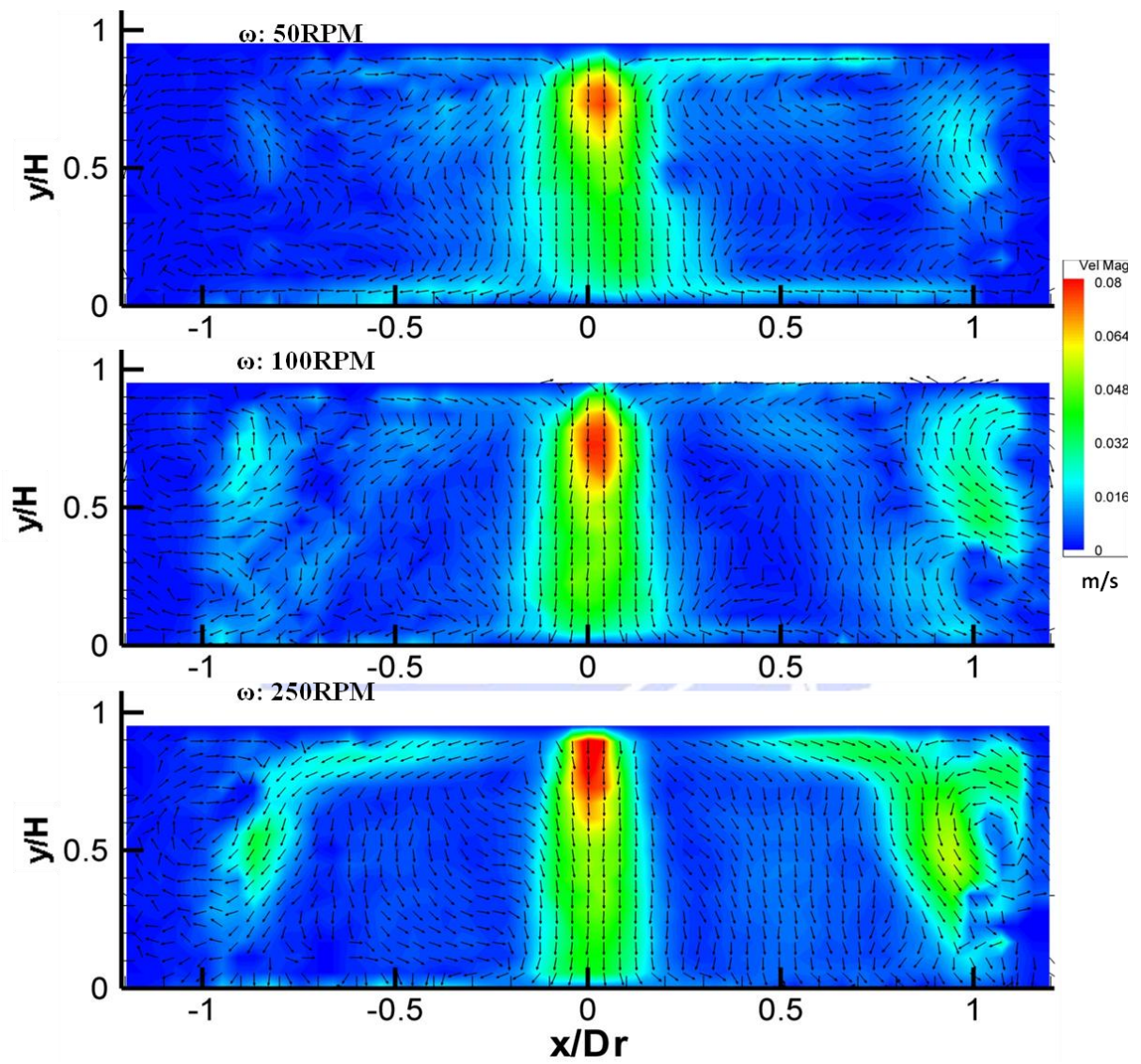
加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=1SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。



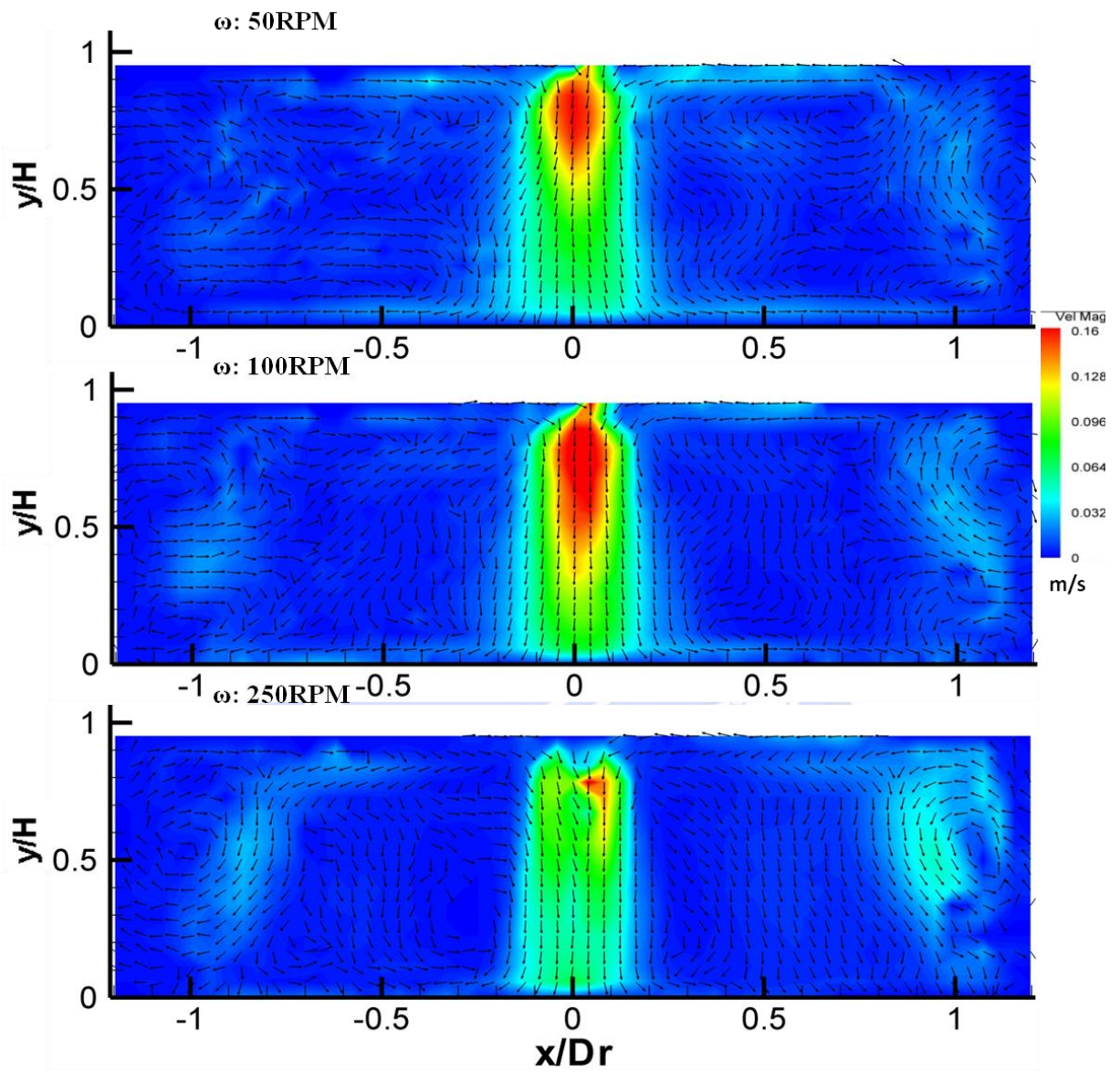
加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=2SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。



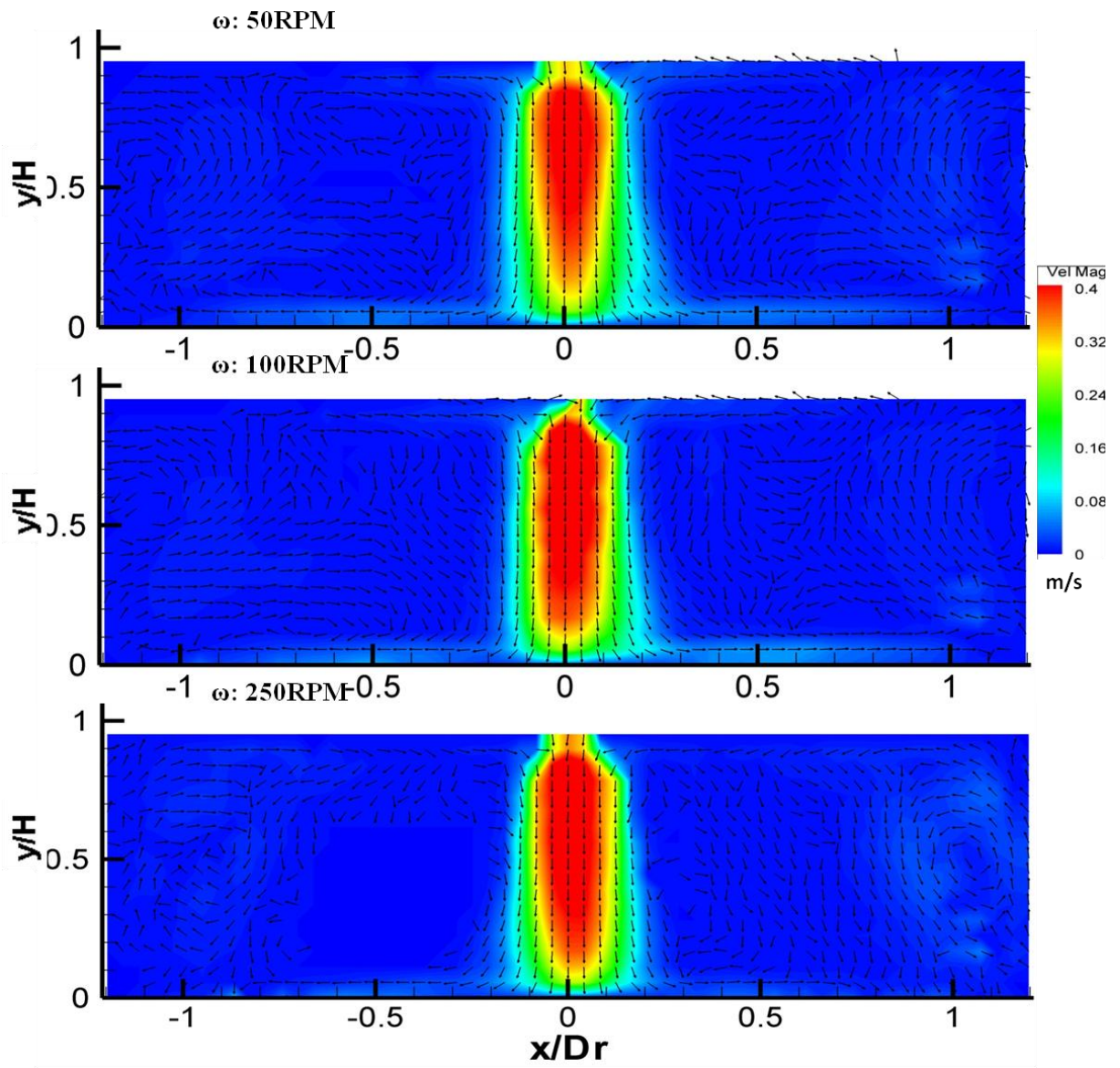
加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=5SLM， $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 。



加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=1SLM， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。



加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=2SLM， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。



加溫基板不同轉速流場圖。H=60mm，Q=5SLM， $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 。