

國立臺灣體育運動大學
National Taiwan University of Physical Education and Sport
體育研究所碩士學位論文

自行車衣服纖維結構之流場模擬分析先期研究
Numerical Analyses of Aerodynamics of Cloth Textiles for Cyclist



研究生：林哲宇 撰
指導教授：陳裕鏞 博士
賴大渭 博士

中華民國 102 年 6 月

論文名稱：自行車衣服纖維結構之流場模擬分析先期研究

總頁數：45 頁

校院所組別：國立臺灣體育運動大學體育研究所

研究生：林哲宇

指導教授：陳裕鏞、賴大涓

中文摘要

本研究目的在於探討各種不同自行車衣服紡織纖維的結構，在不同速度下的流場變化與影響，並藉由分析結果找出最佳的紡織纖維結構。本研究使用 CFD 軟體進行流場分析，所選擇之商用套裝軟體為 Ansys® Fluent 模組，針對六種不同 2-D 衣纖維之紡織表面結構作模擬計算，並依流場特性設定統御方程式、網格系統與邊界條件，待計算收斂後探討整個流場的速度、壓力等物理現象，相互比較與分析阻力關係。分析結果發現，六種紡織纖維結構的阻力係數皆比光滑表面的阻力係數來的小，其中類似連續圓弧形的纖維結構其阻力係數較光滑表面的阻力係數小 5.6%。結論與建議，若從能量傳遞定義上來看，紊流邊界層因為會有許多大小不等的渦旋產生，而使得能量傳遞優於層流邊界層，因此若能使用本文所分析出來的紡織纖維的表面粗糙度控制流場，使流場進入紊流邊界層，即可達到減阻的效果。

關鍵字：計算流體力學、自行車衣服、衣服纖維結構

Che-Yu, Lin (2013). Cycling clothes Simulation of Flow Field Analysis of fiber structure preparatory study. National Taiwan University of Physical Education and Sport.

英文摘要

The purpose of this research is to evaluate whether significant aerodynamic advantage could be achieved by the geometrical parameters of textile structures. 6 different textile fabrics in plain structure were produced. Their geometry and aerodynamic parameters were measured and analyzed by the CFD software: Ansys® Fluent. To compute the aerodynamic behavior of the fabrics produced, some assumptions would be defined. The aerodynamic resistance was acquired at different speeds. And the analysis result is that the drag coefficients of 6 different textile structures are lower than the smooth one. And the lowest drag coefficient is bi-half-circle-like textile structure. The drag coefficient is 5.6% lower than the smooth one. We all know that the energy transfer of turbulent boundary layer is better than the laminar boundary layer. So in our recommend, if the textile structures can transmit the energy of the fluid well, it well reduces the air resistance.

Key: CFD, structure of cloth fiber, bicycle sewing

目錄

中文摘要	ii
英文摘要	iii
目錄	iv
表次	v
圖次	vi
第壹章、緒論	1
第一節 問題背景	1
第二節 研究目的	3
第三節 研究範圍與限制	3
第貳章、文獻探討	4
第一節 理論基礎	4
第二節 文獻探討	12
第參章、研究方法	21
第一節、基本假設	21
第二節 統御方程式	22
第三節 研究流程	23
第肆章、結果與討論	27
第一節 整體流場速度分佈	27
第二節 阻力係數	30
第三節 前端微型溝槽內速度分佈	31
第四節 後端微型溝槽內速度分佈	32
第伍章 結論與建議	34
參考文獻	35

表次

表 2-1 流體與固體的差異比較	4
表 3-1 自行車選手騎乘姿勢肢段角度定義	23
表 3-2 表面粗糙單元深、寬尺寸	25
表 4-1 各微溝槽平板前端最高速度值	28
表 4-2 各微溝槽平板末端最大逆壓力值	29
表 4-3 各微溝槽平板的阻力係數	31

圖次

圖 2-1 壓力阻力與黏滯阻力示意圖	6
圖 2-2 翼尖渦流示意圖	6
圖 2-3 平板邊界層之示意圖	7
圖 2-4 邊界層分離點示意圖	8
圖 2-5 分離泡的形成位置	9
圖 2-6 平滑圓柱在各雷諾數下的阻力係數	10
圖 2-7 高爾夫球的空氣動力學	11
圖 2-8 海豚下表皮的各層結構	14
圖 2-9 歐洲椋鳥的可視化流場分析	14
圖 2-10 模擬鳥類翅膀在不同攻角之下的流場狀況	15
圖 2-11 以 CFD 模擬燕子滑翔實的誘導阻力	15
圖 2-12 CFD 模擬在翅膀末端不同角度小翼所造成的流場	16
圖 2-13 鳥類翅膀的斷面圖	16
圖 2-14 鳥羽因應流場演化的示意圖	17
圖 2-15 顯微鏡下的鳥羽結構	17
圖 2-16 顯微鏡下的鳥羽結構	17
圖 2-17 平織方法示意圖	18
圖 2-18 針織方法示意圖	18
圖 2-19 顯微鏡下的鯊魚裝	19
圖 3-1 自行車選手騎乘姿勢設定圖	23
圖 3-2 流場建模尺寸設定圖	24
圖 3-3 流場設定為 Quadrilaterals domain	25
圖 3-4 研究架構圖	26
圖 4-1 表面平整之平板前端流場速度分佈	28
圖 4-2 各微溝槽平板前端流場速度分佈	28
圖 4-3 表面平整之平板尾端流場速度分佈	29
圖 4-4 各微溝槽平板前端流場速度分佈	29
圖 4-5 前端微型溝槽內部的速度分佈	32
圖 4-6 末端微型溝槽內部的速度分佈	33

第壹章、緒論

第一節 問題背景

自行車競賽是指以最短時間到達終點的選手為勝利者，其主要決勝的關鍵在於速度，因此對於提升速度就成了一項運動科學的研究議題。然而自行車競賽成績的表現，受到相當多也複雜的因素影響，其中不外乎選手本身的肌力、肌耐力、技巧等等，還得配合競賽時的戰術策略（例如配速、合法阻擋、跟車等等），當然還有最重要的戰駒自行車。一輛頂級訂做的自行車，確實能給競賽成績帶來非常大的助益，所以一直以來，世界各國的對於自行車的設計，包含自行車車身結構、車身材料輕量化、踏板角度等等，發表了相當多的論文和研究報告，也因此國際自行車協會（Union Cycliste Internationale, UCI）為了避免自行車的優、劣成為影響競賽成績主要的關鍵，嚴謹地制定了自行車尺寸結構的規格限制。

這樣的限制並沒有減少自行車競速的相關研究，反而開啟了許多新的研究議題，例如車架與騎乘姿勢的關係，針對競速自行車車架提出建議的調整公式，希望藉由騎乘高度的升降修正騎乘者的騎乘姿勢，而達到最佳的騎乘姿勢(de Vey Mestdagh, 1998)。近年來，研究自行車在空氣中行進時的流場分析也愈來愈多，而此類研究的目標大多是利用減少阻力，以達到增加行進速度，因此針對減阻的自行車設計、改變騎乘姿勢以減少阻力等等，都成了熱門的研究議題。

競速運動中，不乏針對減阻的研究，可見減阻此議題確實相當熱門，其中最有名的產品就是游泳競賽的衣著「鯊魚裝」，也就是廣為人知的模仿鯊魚皮的結構，以達到水中減阻使推進效果大幅提升，Speedo 公司的 AquaLab 使用知名的計算流體力學軟體，作為流場分析的模擬平台，然而這背後當然有流體力學理論的支持，也就是真正對水作流場分析後控制流場所得到的結果。

雖說計算流體力學(computational fluid dynamics, CFD)已經發展到了可信度與應用層面相當廣大的程度，也拜現代科技所賜，電腦速度大幅度提升，計算流體力學可以透過電腦做大量且複雜的運算，甚至發展出流固耦合的一套理論，但仍需要實驗相互驗證、相互支持。因此與其說鯊魚裝是由 CFD 軟體開發設計而來，倒不如說此產品更大價值在於模仿鯊魚表皮粗糙結構的減阻設計，此種模仿生物的生活習性、外型、構造或功能等等的設計應用，即稱為仿生工程(biomimetic engineering)。雖然人類亦是由魚類演化而來，但人類作為陸上生物的長期演化之下，與水中生物的構造及功用有極大的差異，水中生物為了適應水中的環境，演化成適合水中的生理構造，因此效仿水中生物作為減阻的效果，也就成了非常重要的研究方向與方法。

然而有了這樣的概念，產生了一個新的問題，若自行車競賽的衣著，能使用鯊魚裝的仿生設計概念，開發或改良自行車衣纖維結構，控制流場以達到最好的減阻效果，最終降低自行車選手的能量消耗。

第二節 研究目的

在過去的研究中，雖有許多文獻探討不同紡織法衣服的減阻效果，但大多都是針對著裝後整體的減阻效果，僅有少數研究是針對不同紡織法對流體邊界層的影響，因此本研究將探討不同紡織結構對流體邊界層的影響。

本篇研究之目的在於以計算流體力學（CFD）方法，研究不同 2-D 衣纖維之紡織結構在流場中所造成的邊界層現象對空氣阻力的影響，再以分析的結果設計較好減阻效果的 2-D 衣纖維紡織結構。

第三節 研究範圍與限制

本校之研究領域多為動作分析、適應體育和運動訓練等等，所以對於本研究所需的可視化流場實驗設備不足，無法以實驗相互驗證結果，因此僅使用 CFD 軟體 Ansys® Fluent 作為流場模擬分析，待未來再以實驗相互驗證。而本研究所使用的 CFD 軟體，是本人親自至國立成功大學航空與太空學系的研究室使用，為正式授權軟體。

第貳章、文獻探討

第一節 理論基礎

一、流體與固體

在我們所學過的物理學中，物質主要分成三態：固態、液態以及氣態（註：亦存在電漿（plasma），此處不討論），其中液態與氣態又被稱為所謂的流體（fluid），因此在流體力學中（fluid mechanics）清楚的定義流體與固體。下表為流體與固體在定義上的差異比較：

表 2-1 流體與固體的差異比較

	流體	固體
比較 1	受到無論多微小的剪力作用時，會立即相對發生持續變形。	在彈性限度內，受外力後，剪應力與剪應變成正比關係。
比較 2	除非外力除去，否則即使外力不再增加，變形亦不會停止。	除非斷裂，若外力不再增加，則變形不再增加。
比較 3	變形發生後，即是外力除去，亦不會恢復到原始狀態。	外力除去之後，物體會恢復到原始狀態。
比較 4	剪應力與剪應變率成正比	剪應力與剪應變成正比

然而流體的流動通常受限於固體的表面，因此了解固體表面是如何影響流體流動亦是一門非常重要的學問。

二、空氣阻力

空氣阻力來自於物體周邊的空氣所施予的壓力和黏滯力，分別稱為壓力阻力（pressure drag）和黏滯阻力（viscous friction）。

1. 壓力阻力：主要受到物體的大小和形狀輪廓影響，因此又可稱為形狀阻力（form drag），最常見的例子就是機翼（圖 2-1(a)），機翼在流體中形成不同的壓力分佈，同時造成阻力和升力（lift force），其中阻力方向與流體運動方向相同，升力則與流體運動方向垂直。其方程式可表示為

$$F_{d,pressure} = \oint_A p da_n \quad (\text{Eq. 2- 1})$$

p : 壓力, a_n : 面積

2. 黏滯阻力：作用於物體表面的剪力（shear forces），當流體流過物體表面時，流體因黏滯力關係在表層為不滑動（no-slip）的現象（圖 2-1(b)），主要受到雷諾數（reynolds number）的影響，因此與流體本身的性質諸如流體密度（density）、流體黏滯性（viscosity）、可壓縮性（compressible flow）等等都有關係；而黏滯阻力亦可解釋為切線方向的剪應力（shear stresses）作用於物體上所產生的摩擦阻力（friction drag），所以也與物體的表面粗糙度有關。其方程式可表示為

$$F_{d,viscous} = A \cdot \tau_w \quad (\text{Eq. 2- 2})$$

A : 表面積, τ_w : 切線方向剪應力

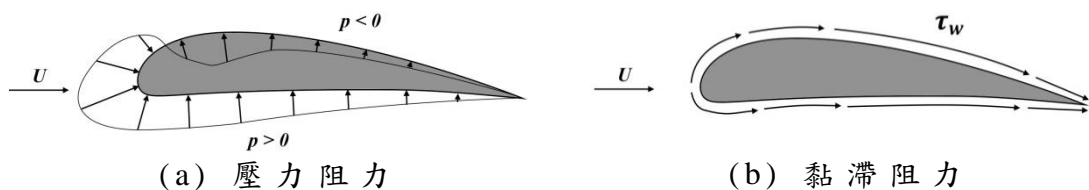


圖 2-1 壓力阻力與黏滯阻力示意圖

3. 誘導阻力：在空氣動力學（aerodynamics）中的誘導阻力（induced drag），主要是與機翼產生升力有關，飛機機翼按白努力原理設計，使上下翼面產生壓力差形成升力，但這樣的壓力差會讓空氣在翼（末）端從下往上翻捲，造成旋轉的翼尖渦流（tip vortex）所形成的阻力。

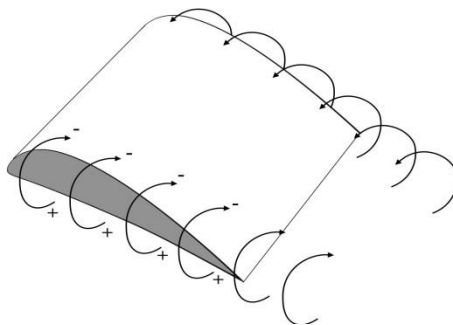


圖 2-2 翼尖渦流示意圖

三、邊界層

流體流經物體表面所形成的邊界層（boundary layer），若從渦量（vorticity dynamics）觀點而言是因為流體黏滯力的影響，然而這樣的影響會使得流體在愈接近物體表面的流速逐漸遞減，最終在物體表面上的流速為 0 m/s，即為流體不滑動（no-slip）的現象，而受流體黏滯力影響流速的範圍就稱為邊界層厚度（boundary layer thickness），至於離物體表面較遠處，流速不受黏滯力影響，因此可當作無黏性流（inviscid flow）或勢流（potential flow）。

邊界層厚度是慣性力 (inertial force) 與黏滯力比例的函數，而慣性力與黏滯力的比例就是我們熟知的雷諾數 (Re)，其方程式為：

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} x}{\mu} = \frac{U_{\infty} x}{\nu} \quad (\text{Eq. 2-3})$$

U_{∞} ：自由來流流速， x ：特徵長度， μ ：動力黏滯係數 (dynamic viscosity)， ν ：運動黏滯係數 (kinematic viscosity)

簡而言之，邊界層厚度會受到雷諾數的影響，當雷諾數增加時邊界層的厚度就會減少。1881 年學者 Stokes 從 Navier-Stokes 方程式導出邊界層厚度 (δ) 的近似方程式：

$$\delta \approx \sqrt{vt} \quad (\text{Eq. 2-4})$$

另外，邊界層厚度更簡易的界定方式就是觀察流場中物體表面附近流速為自由來流 (free stream) 速度的 99% 處。如圖 2-3 為流體流經平板發展的邊界層。

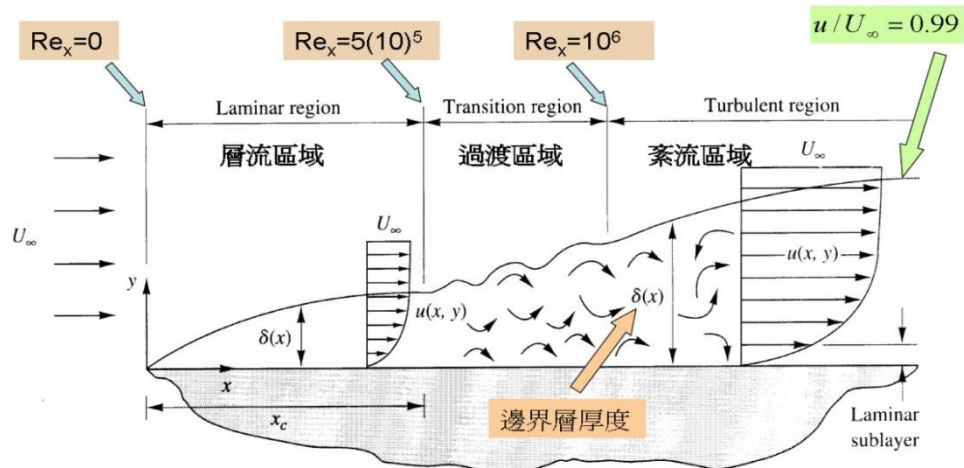


圖 2-3 平板邊界層之示意圖

(資料來源：Hagen, K. D. (1999). *Heat Transfer: With Applications*. United States: Prentice Hall PTR.)

四、流動分離點

對於無黏性流體而言，流經對稱物體所造成的壓力，在物體的前方與後方皆相同，因此不會有邊界層的阻力產生；可是對於黏性流體就會產生邊界層，若此時邊界層內的流體受到逆壓力梯度（adverse pressure gradient），則最靠近物體表面的流體會因為黏滯力散失而持續的損失動能（kinetic energy），造成速度逐漸下降，當損失所有動能後且缺乏其他能量以抵抗所受到的逆壓力梯度時，流體就會停下來（流速為 0m/s ），即為分離點（separate point）位置，接著流線開始逐漸離開壁面，而此流線內部的流體受到逆壓力梯度的影響開始逆流（流速為負值），因此在此區域內必然產生不規則的渦旋（eddy flow），而渦旋的形成則會讓此區域內的壓力減小，導致物體前方壓力大於後方，產生所謂的壓力阻力，因此若能控制分離點的出現，則可控制弱區的範圍大小，進而控制壓力阻力的增減。

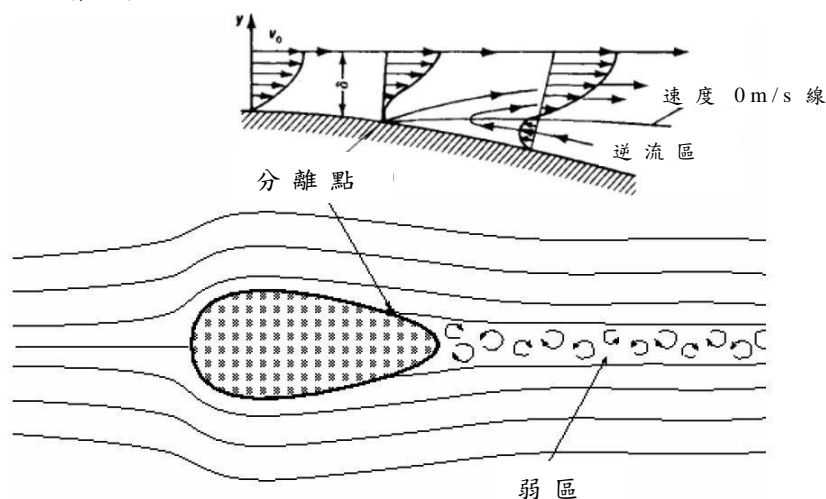


圖 2-4 邊界層分離點示意圖

(資料來源：Loitsianskii, L. G. (1957). *Mekhanika zhidkosti i gaza*. Moskva: Gos. izd-vo tekhniko-teoret. lit-ry.)

更進一步的，若是物體在低雷諾數的條件下，會出現層流分離泡，此現象是因為分離後的邊界層流體，在外界流場的強力剪應力作用下，重新引入能量，使邊界層又獲得足夠的動量，造成分離的流線又回到表面上再次附著。

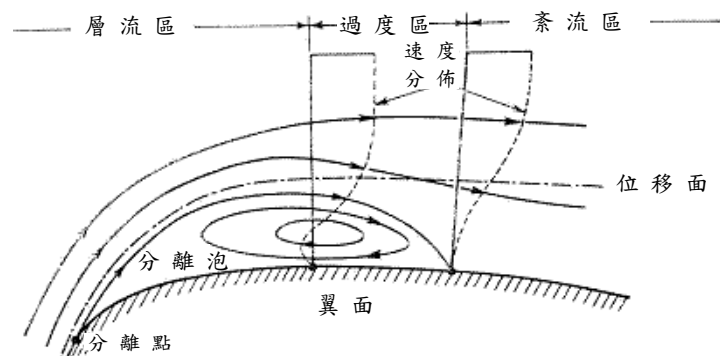


圖 2-5 分離泡的形成位置
(資料來源：Thwaites, B. (1960). *Incompressible aerodynamics*. United States: Dover Publications.)

五、平滑圓柱的阻力

一般空氣阻力與速度平方以及物體掃過的截面積成正比，因此空氣阻力的方程式為：

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A \quad (\text{Eq. 2-5})$$

ρ : 空氣密度， v : 空氣流速， A : 截面積， C_d : 阻力係數

其中阻力係數 C_d (drag coefficient) 可於風洞中直接測量，最常見的例子為市售車輛會在銷售廣告中標榜阻力係數，告知消費者較低的阻力係數可以有比較好的性能表現。一般而言，同一物體的阻力係數並不一定會是定值，會隨著空氣流速或雷諾數而變化，例如：平滑圓柱層流條件下的阻力係數值非常高，而在紊流條件下的阻力係數為 0.47。

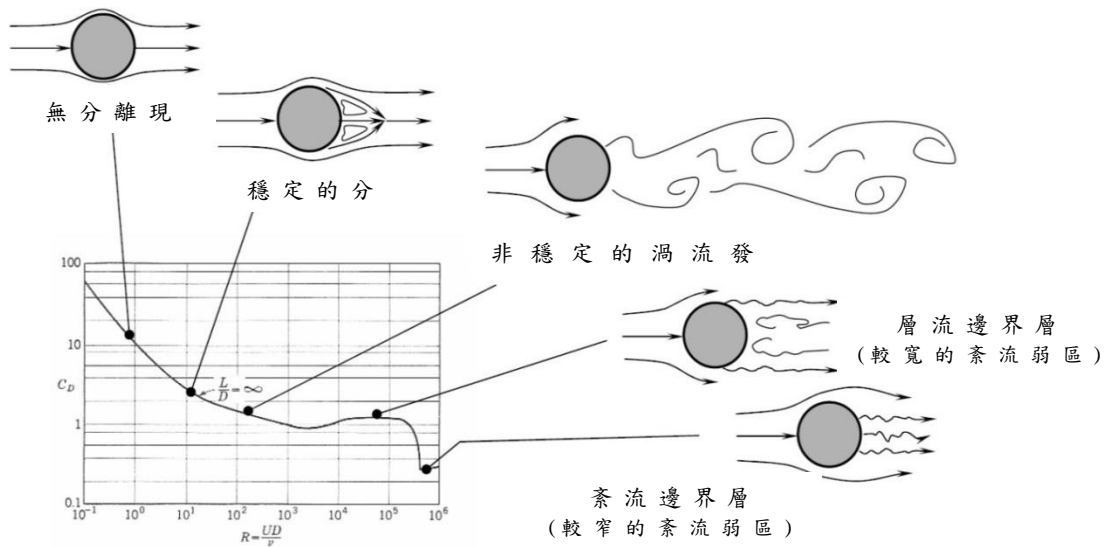


圖 2-6 平滑圓柱在各雷諾數下的阻力係數

另外，雷諾數對於邊界層的影響是相當敏感的，即流體邊界層的現象非常容易受到雷諾數的改變而變化，例如圖 2-6，在低雷諾數 ($Re < 1$) 的條件下，慣性力的效應皆比壓力和黏滯力來的小，其阻力係數的變化隨著雷諾數上升而下降；在較適中雷諾數 ($1 < Re < 10^3$) 的條件下，圓柱後方的流場會以馮·卡曼渦流 (von Karman vortices) 的形式開始分離。在較高雷諾數 ($10^3 < Re < 10^5$) 的條件下，圓柱後方的流場會完全分離並產生逆壓區；當雷諾數繼續提升，則邊界層開始發展成紊流邊界層，因為紊流的能量傳遞較佳，分離點就會開始延遲出現，此時會造成阻力係數忽然降低。

除了提高雷諾數外，要使流場發展成紊流亦可增加物體的表面粗糙度，其中很有名的例子就是高爾夫球，高爾夫球上布滿了酒窩型 (dimple) 的凹槽，其目的在於增加空氣的摩擦力，讓球飛得更遠，而這些

凹槽就是使邊界層發展成紊流，以延遲分離點的出現（圖 2-7）。

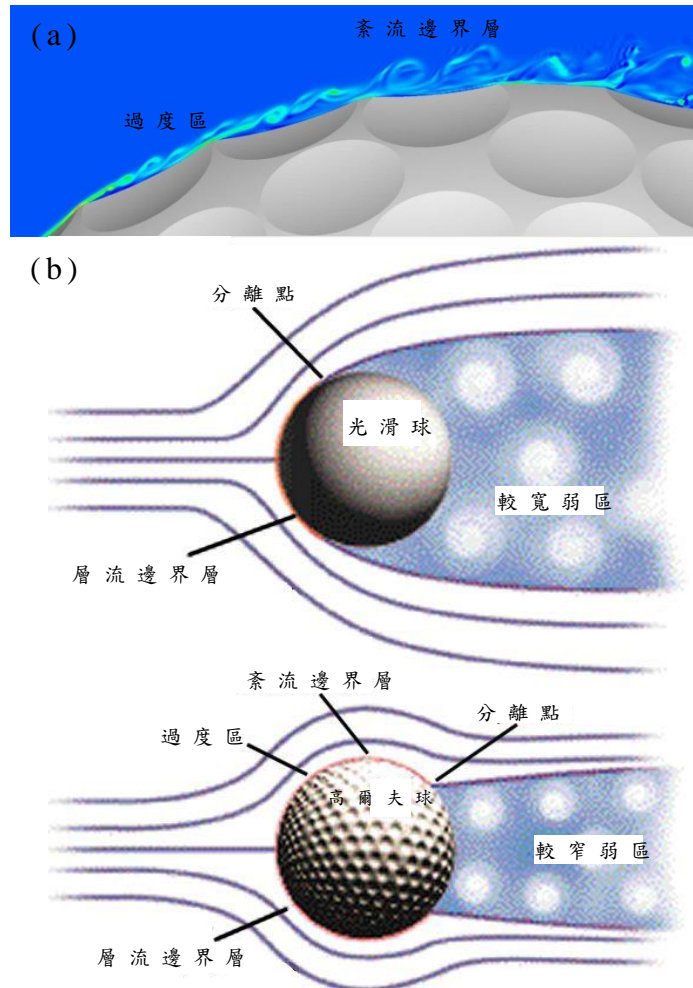


圖 2-7 高爾夫球的空氣動力學

而應用類似高爾夫球凹槽設計達到減阻效果的商品仍不少，例如：Nike 公司為短跑選手開發的減阻服裝 Nike Pro TurboSpeed；德國 Schubert 公司開發的摩托車安全帽 Speed；Louis Garneau 公司為自行車選手開發的 Vorttice 安全帽；太陽能概念車 Hexa，其車頂的太陽能板有著類似高爾夫球凹槽的設計等等。

第二節 文獻探討

一、游泳阻力分析與能量消耗之相關研究

人在水中的前進速度與游泳動作有直接的關係，意思是指前進的速度與划手的頻率、距離有著絕對的關係，Fritzdorf 等人（2009）在其研究中，以划頻和划距作為前進速度數學建模：

$$\text{前進速度} = \text{划距} / \text{時間} = \text{划距} \times \text{划頻} / 60s$$

$$\text{划距} = \text{前進速度} \times \text{時間} = \text{前進速度} \times 60s / \text{划頻}$$

如此即可使用攝影機拍攝受試者，從影片中計算受試者的划頻、划距間接推估其前進速度。同樣的，前進速度亦與阻力有關，而有了阻力值就可以推估出人體所需消耗的能量，2004 年 Huub 等人與 2002 年 Baudouin 等人的研究中，對阻力與前進速度做了數學建模：

$$\text{阻力} = \text{阻力係數} \times \text{前進速度}^2$$

$$\text{功率} = \text{阻力} \times \text{前進速度} = \text{阻力係數} \times \text{前進速度}^3$$

因此若游泳者在游泳時輸出的功率皆相同，減少各阻力係數就可以增加前進速度。

對於水中運動的研究而言，大多數的研究方法仍停留在使用攝影機拍攝受試者，然後計算滑幅、滑頻、前進距離或前進速度等等，並統計出結果做為水中運動的阻力、運動學或生物力學的分析，主要原因是水中運動在測量儀器上仍受到非常大的限制，導致無法使用直接的測量結果。

有鑑於科技的進步以及電腦運算能力的大幅提升，水中運動導入了使用電腦計算流體力學的研究方法，

Bixler 和 Schloder 是最早將計算流體力學應用於游泳的學者 (1996)，其研究中使用的是二維的 CFD 分析 (two-dimensional CFD)，計算手掌大小的圓板在水中加速的狀況，此文獻最後建議若要分析人型的游泳者則要使用三維的 CFD 分析，才能得到較有用的資訊。

2007 年學者 Bixler 與 Speedo 公司的研究者，發表了一篇針對計算流體動力學對於男子游泳選手水中阻力值的運算，其目的在於建立一套較為精準的計算模組，用以計算作用於水中游泳者身體周圍的流場和阻力，研究中利用泳姿的假人作為數值建模的模型，並 CFD 軟體分析模型前進時的流場與阻力，再以水中繩索拖拉泳姿假人以及真人所得到的阻力值，作為與 CFD 計算值的比較標準，其結果發現使用 CFD 計算的阻力值的範圍在假人繩索拖拉阻力值的 4% 以內，而假人繩索拖拉的阻力值卻比真人繩索拖拉阻力值小了 18%，其原因在於真人並無法像假人一樣，一直保持著使阻力最小的最佳姿勢，即使是微小的攻角都會使阻力值上升，而另一個原因在於假人與真人的皮膚材質，雖然曾有文獻指出海豚是利用皮膚的彈性以適應水中流場並減少水阻，而此研究中的真人皮膚相較於假人有彈性，所以應該不會增加阻力，因此原因在於人體的皮膚相較於假人來的粗糙。文末表示雖然此研究仍有些假設與限制存在，但是給予游泳多了一種研究方法。

二、仿生流場相關研究

對於生物而言，生活環境受到流體流動影響最大的動物，不外乎就是水中的魚類和空氣中的鳥類，因此要探討仿生流場，就得先研究魚類或鳥類在流場中適應的方法。例如：海豚在游泳時，身體周遭並不會產生渦流，在美國橡膠公司工作的 Kramer 博士模仿海豚皮膚的構造，在 1960 年研製出一種名叫「片流膜」的人工海豚皮，將此片流膜裝在潛水裝置上進行實驗，發現可使航行時所產生的紊流減少 50%。

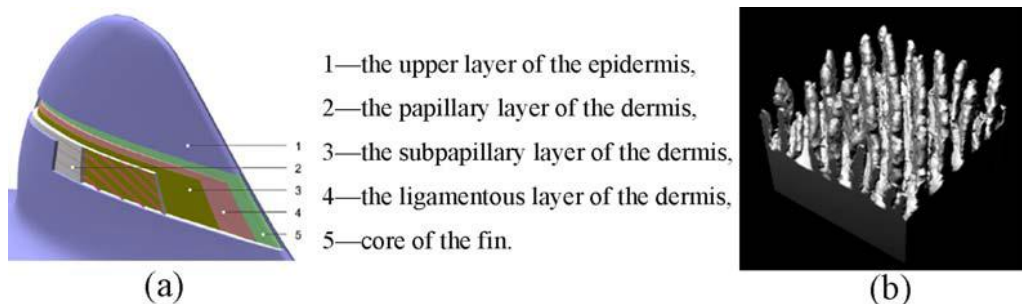


圖 2-8 海豚下表皮的各層結構

而對於鳥類而言，鳥類身體外型的足以影響其飛行時的流場，2001 年 Maybury 在其研究中提到，歐洲椋鳥在沒有尾巴飛行時的空氣阻力，較有尾巴的空氣阻力來的大 25%~55%。如下圖 2-2 的 (b) 和 (c) 圖後方的弱區較 (a) 後方來的大。

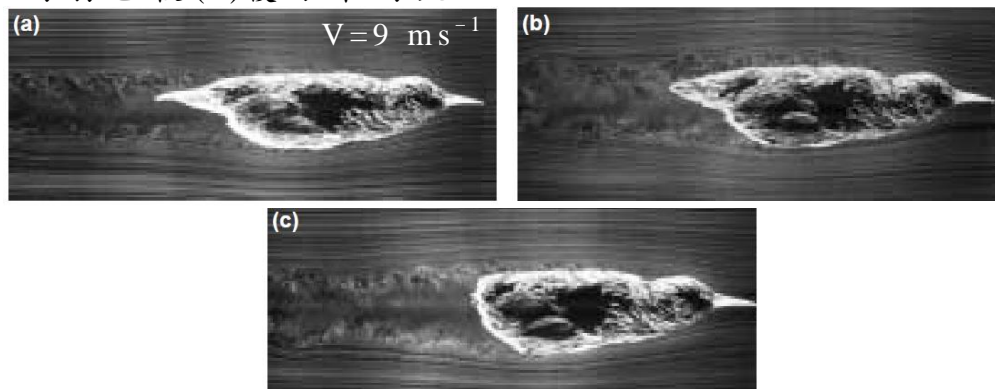


圖 2-9 歐洲椋鳥的可視化流場分析

1981 年 Whithers 的鳥類翅膀的空氣力學研究中指出，在低雷諾數流體的測試中，翅膀最小的阻力係數為 0.03-0.13，最大的升力係數為 0.8-1.2，最大的升阻比為 3-17。而翅膀的影響因子 0.8-1.2 (aerofoil efficiency factors) 較低於一般機翼 0.9-0.95，是因為是鳥類飛行於低雷諾數和高形狀阻力。

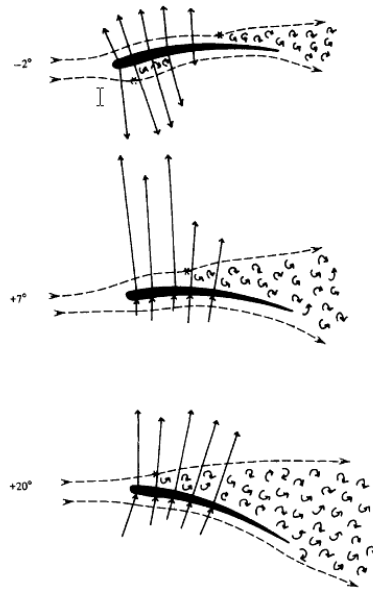


圖 2-10 模擬鳥類翅膀在不同攻角之下的流場狀況

2010 年 Henningsson 的燕子滑翔的空氣力學研究中指出，當風洞空氣速度在 9.5m/s 時，受試燕子的升阻比 (lift-to-drag ratio) 達到最大值 12.5，主要原因來自於翼端的和尾巴的兩對誘導阻力。

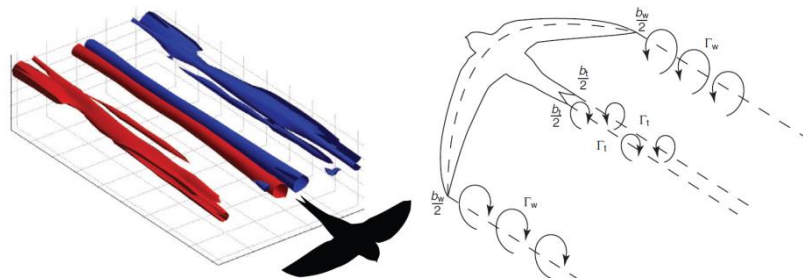


圖 2-11 以 CFD 模擬燕子滑翔時的誘導阻力

2001 年 Schatz 等人的研究指出，鳥類翅膀末端的可變動型小翼，會按照飛行所需改變阻力，以達到想要的飛行，同樣的也可應用於一般的飛行載具中。

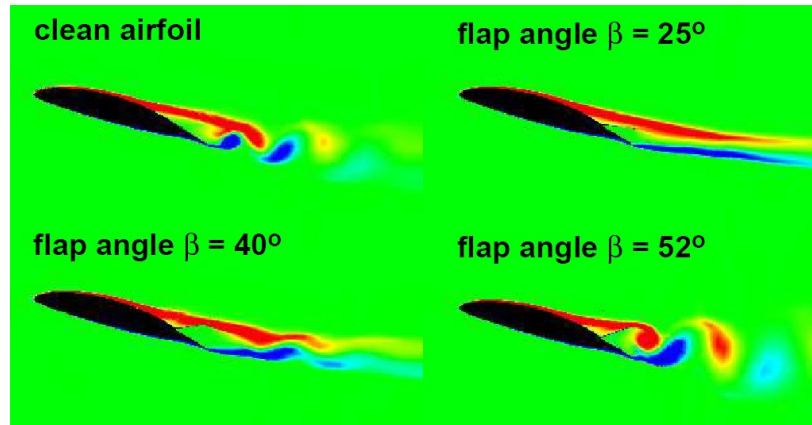


圖 2-12 CFD 模擬在翅膀末端不同角度小翼所造成的流場

三、鳥羽結構

然而除了鳥類外型會影響流場外，其羽毛構造也因為要適應飛行時流場的變化，而演化的現在這個樣子。1998 年 Muller 的研究中提到，鳥類翅膀的斷面外型內、外側皆不一樣，為的是能夠得到更好的飛行流場。

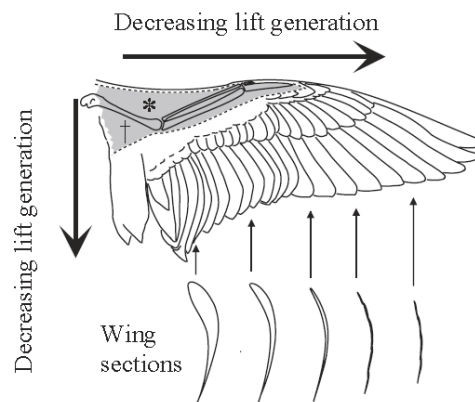


圖 2-13 鳥類翅膀的斷面圖

2000 年 Samue 等學者，在其研究中對於鳥羽的演化提出空氣動力與結構的觀點，鳥類因為需要在空氣中飛行，因此其羽毛的會因應減低阻力而演化，如圖 2-7 即為作者根據鳥羽因應空氣流場的所作演化的推論。

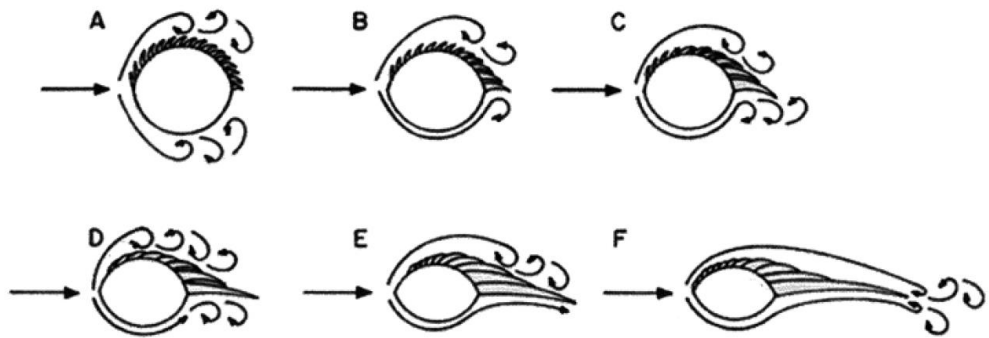


圖 2-14 鳥羽因應流場演化的示意圖

而在顯微鏡的觀察之下，羽毛和羽毛之間存在著小勾（圖 2-15），Ennos (1995) 等人的研究指出，其主要演化的目的是為了維持羽毛原來的結構，避免在飛行時受到翅膀運動或者空氣阻力而變形，導致發生危險。但文中並未探討這樣的羽毛結構是否會影響流場的變化？(Ennos, Hickson, & Roberts, 1995)

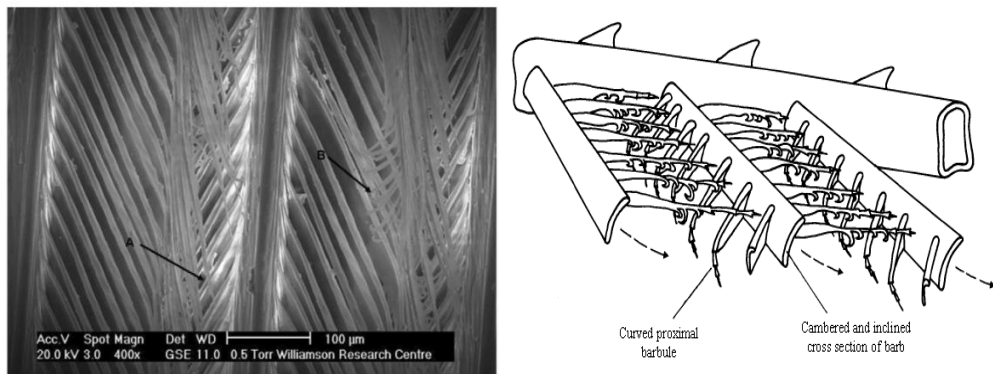
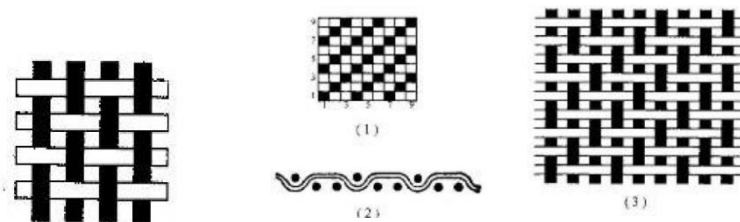


圖 2-15 顯微鏡下的鳥羽結構

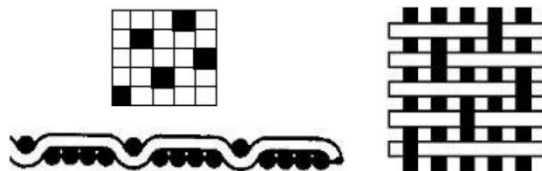
四、衣服紡織結構

1. 平織 (Plain Weaves)

最簡單之布紋組織，由 2 根經紗及 2 根緯紗相互連續交織而成的組織。平紋組織：織紋變化性低，布身結構穩定性高，耐磨擦度高。



斜紋組織 (Twill Weave)



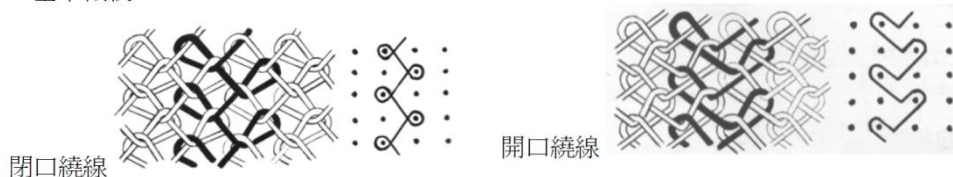
緞紋組織 (Satin Weave)

圖 2-17 平織方法示意圖

2. 針織 (knitting) :

在一根織針上，將一條紗線穿過一個針圈 (Loop)，並使這個原先的線圈脫離針鉤，而過原先穿過針圈的那根紗線繞於針柄上，另成一個新的針圈，如此循環而織成的衣料。

基本織紋：



基本織紋：

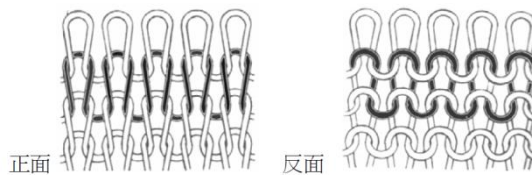


圖 2-18 針織方法示意圖

3. 鯊魚裝 LZR Racer 織法

「鯊魚裝」用的材料是借助了美國國家航空及太空總署（NASA）是航太器進入地球大氣層後表面承受摩擦力的風洞，對 100 餘種材料進行了測試後選定的。而 SHARKSKIN/ FASTSKIN 材質是一種模仿鯊魚皮膚組織構造搭配 Aquablade II 的魚鱗 V 形條紋。



圖 2-19 顯微鏡下的鯊魚裝
（拍攝於臺灣體育運動大學研究室，2012）

五、不同衣服的空氣阻力

因應紡織科技的進步（包含紡織機、紡織纖維材料和紡織結構等等），使得我們日常生活中的衣著，愈來愈多選擇，也同時具有不同的功能性，例如排汗衫、發熱衣、防紫外線衣等等，當然也有減少流體阻力的衣服，水中最著名的就是英國 Speedo 公司開發的鯊魚裝，而空氣中則有 Nike 為短跑選手開發的減阻裝。由此可見，具功能性的衣著也漸漸成為學術研究或產品研發的議題了。

而在自行車運動盛行的歐洲，針對自行車衣減阻效果的研究已有相當多，Kyle 等人早在 1984 年的研究中發現，自行車選手穿著全長的萊卡彈性纖維服裝 (standard Lycra Spandex skin suit) 時可降低 11% 的風

阻係數，原因在於全長的服裝可以遮蔽手腳的毛髮而達到減阻的效果，因此不同的表面粗糙度，明顯的影響了空氣阻力。在另一研究中，探討自行車選手穿著緊身服裝與寬鬆服裝對空氣阻力的影響，騎結果發現穿著緊身的自行車服較穿著夾克和長褲少了 30% 的空氣阻力，可能的原因在於寬鬆的衣服會隨著空氣流動任意飄動，而造成較大的阻力 (Pons 1989)。

有了上述的研究結果，使得許多研究人員開始深入研究衣服表面粗糙度對流場的影響，而最直接影響衣服表面粗糙度的就是紡織方法，因此在 2004 年 Brownlie 等人的研究中，探討高速滑冰的服裝阻力，其研究發現，有規律的纖維排列可以讓邊界層產生紊流 (turbulent)，造成選手較弱的下壓力 (downstream)，使選手與地面的摩擦力減少得以提升速度。其研究最後也成功的使用雷諾數設計針對身體各部位的大小和形狀不同纖維。在 Kyle (2002) 的研究中指出，Nike 和 Speedo 公司在開發減阻服裝時，會特別針對接縫部位做高週波的融合，亦會對纖維的粗糙度做特殊設計，以達到控制流體的分離點。

然而不止紡織方法會影響流體阻力，衣服所使用的布料亦會影響阻力的大小，在 Kyle (1991) 研究中比較不同布料對於減阻的效果，其中萊卡布料製成的衣服較羊毛針織衫減少了 7.6~8.4% 的阻力，也較聚丙烯材質的熱身服減少了 9.8~10.5% 的阻力，而上過膠的 (rubberised) 萊卡布料又比基本的萊卡布料的效果更好一些。

第參章、研究方法

本篇研究為先期研究，因此僅針對先期之研究方法做描述。本研究使用 CFD 軟體進行流場分析，所選擇之商用套裝軟體為 Ansys® Fluent 模組，針對 2-D 衣纖維之紡織表面結構作流體的流動模擬，並依流場特性設定統御方程式 (Governing equation)、網格 (Mesh) 系統與邊界條件 (Boundary condition)，待計算收斂後探討整個流場的速度、壓力等物理現象。

第一節、基本假設

對於 CFD 計算流體力學分析而言，由於實際流場、幾何形狀等都是相當複雜，數值計算也相對增加其困難性及費時，並且若有任何設定不合理或錯誤，皆會影響運算結果。但為了能夠減少計算困難度與加快模擬分析速度，於建模、網格鋪設、參數設定、邊界條件等等皆做以下嚴謹且適當的假設與簡化：

1. 二維流場 (2-D flow field)
2. 穩態 (Steady state)
3. 不可壓縮流 (Incompressible flow)
4. 忽略重力的影響 (Neglect body force)
5. 忽略自然對流的影響 (Neglect natural convection)
6. 忽略黏滯性損失 (Neglect viscous dissipation)
7. 無熱源 (No heat source)
8. 物理性質為定值 (Constant physical properties)

於流場變化不考慮時間項，若有時間項會使分析更加複雜，因此假設流場為穩態。本研究針對自行車衣著的流場分析，實驗環境設定於自行車選手正在競賽中，因此對計算流體力學的環境而言採用強制對流的外流場（External flow）分析，流體性質為不可壓縮、低雷諾數（Low Reynolds number），並且無熱源影響，所以亦無熱對流與熱輻射的效應。

第二節 統御方程式

從理論分析可知，在強制對流之流場速度是連續方程式（Continuum equation）與動量方程式（Momentum equation）的交集，因此若先求解連續方程式與動量方程式，即可獲得完整的流場資訊。根據 3.1 節的基本假設，將二維穩態連續方程式、動量方程式與能量方程式簡化：

簡化後的連續方程式

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

簡化後的動量方程式

x 方向：

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

y 方向：

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

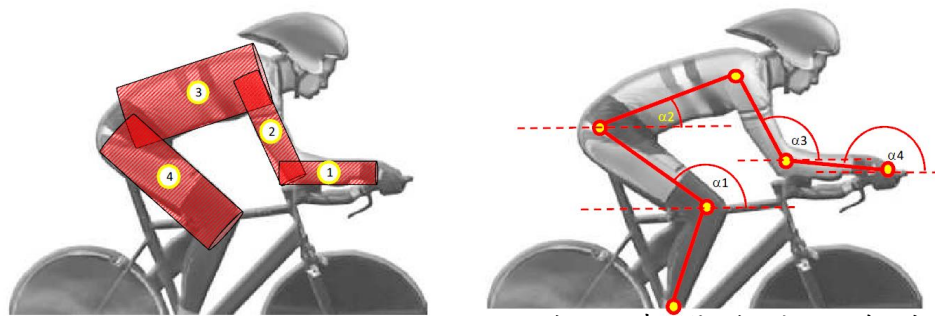
簡化後的能量方程式

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

第三節 研究流程

1. 環境設定

本研究之環境設定於自行車選手正在參加競賽，因此選手之騎乘姿勢設定如圖 3-1，其中選手的肢段結構、騎乘姿勢之角度、騎乘速度等，皆以 Chowdhury 等人於 2010 年發表文獻中的設定為基準。



(a) 自行車選手肢段 (b) 自行車選手肢段角度

圖 3-1 自行車選手騎乘姿勢設定圖

表 3-1 自行車選手騎乘姿勢肢段角度定義

肢段角度	公路賽 姿勢	計時賽 姿勢
大腿 (α_1)	0° - 115°	0° - 115°
軀幹 (α_2)	45°	0°
上臂 (α_3)	115°	105°
前臂 (α_4)	115°	0°

2. 建模

本篇為先期研究，目的在於研究不同 2-D 衣纖維紡織表面結構的邊界層現象，因此在建模部分，是將衣服紡織纖維之微型結構槽設置於平板上（即平板上的表面粗糙單元），平板長度為 200mm，平板厚度則設定為衣服厚度約 1mm，並將此平板放置於 900mm × 400mm 的流場之中（圖 3-2），平板的攻角（attack angle）為圖 3-1 中的肢段角度；平板表面的粗糙單元可以分為方型凹槽、半圓凹槽、V 型凹槽、U 型凹槽等，每種粗糙單元之深寬比（aspect ratio = h/w ）設定如表 3-2。根據學者 Chowdhury(2010)在其文中描述，競速自行車之行進速度大約 8.3m/s ~ 16.7m/s，而本研究為將自行車行進速度設定為自由來流的流速 10m/s。

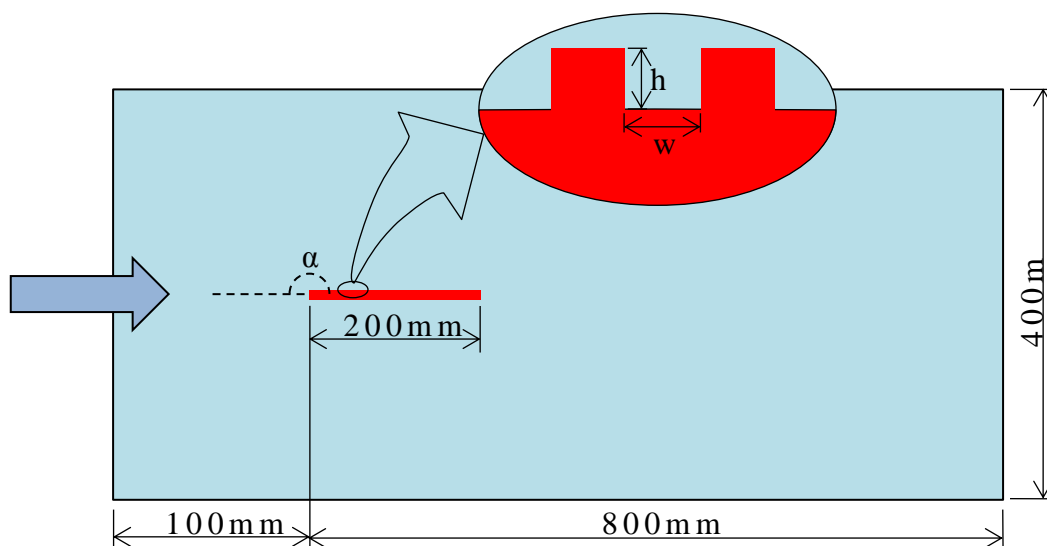


圖 3-2 流場建模尺寸設定圖

表 3-2 表面粗糙單元深、寬尺寸

面粗糙單元	深 (h) 單位： mm	寬 (w) 單位： mm	深寬比 h/w
平織	0.5	0.5	1.0
	0.5	1.0	0.5
針織	1.0	1.0	1.0
	0.5	0.5	1.0
自訂	0.5	0.5	1.0
	0.5	2.0	0.25

3. 網格設定

本研究為外流場模擬分析，因此會對於外流場鋪設 Quadrilaterals 網格，並在平板周圍加密以增加運算的精準度；另外因邊界層的數值和流場亦為本研究期望能夠控制的因素之一，所以在仿衣纖維之微型結構槽與流場的接觸面上，亦會鋪設邊界層（圖 3-3）。

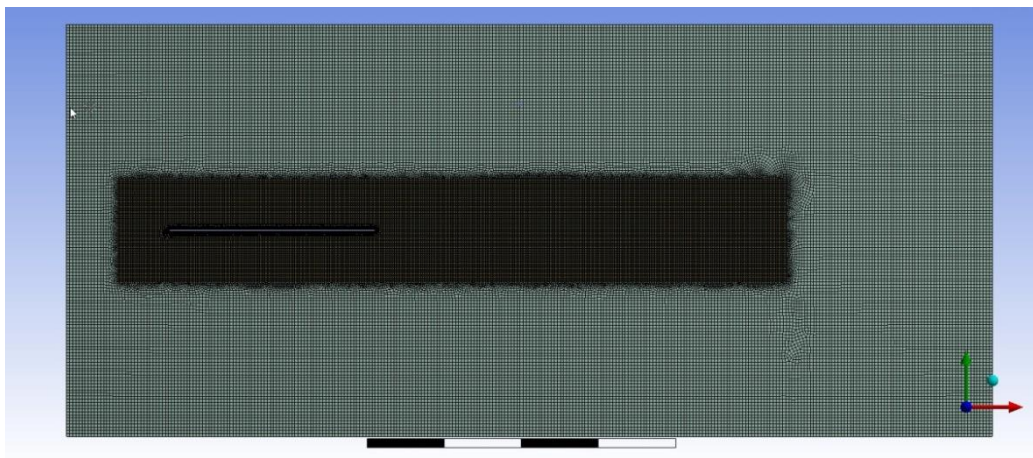


圖 3-3 流場設定為 Quadrilaterals domain

4. 邊界條件與計算模式

邊界條件：入口自由來流的速度設定為 10m/s，模擬自行車騎乘時的速度；出口設定為 0 pa 相對壓力，即為出口壓力為 1 tam；而仿衣纖維結構的平板設定為流體不可穿透的牆 (Wall)；流體性質為具有黏滯性與低雷諾數的空氣；使用紊流模式下 k-omega 的 SST 模型。**計算模式：**為了不讓其解的變化太大，則使用 PISO 的二階計算方法；數值計算疊代的收斂條件設為 10^{-6} 。

5. 流場分析與討論

完成各種模擬後統整結果，並做討論與分析，以得到對於流場控制最有利的纖維排列方式。

6. 研究架構

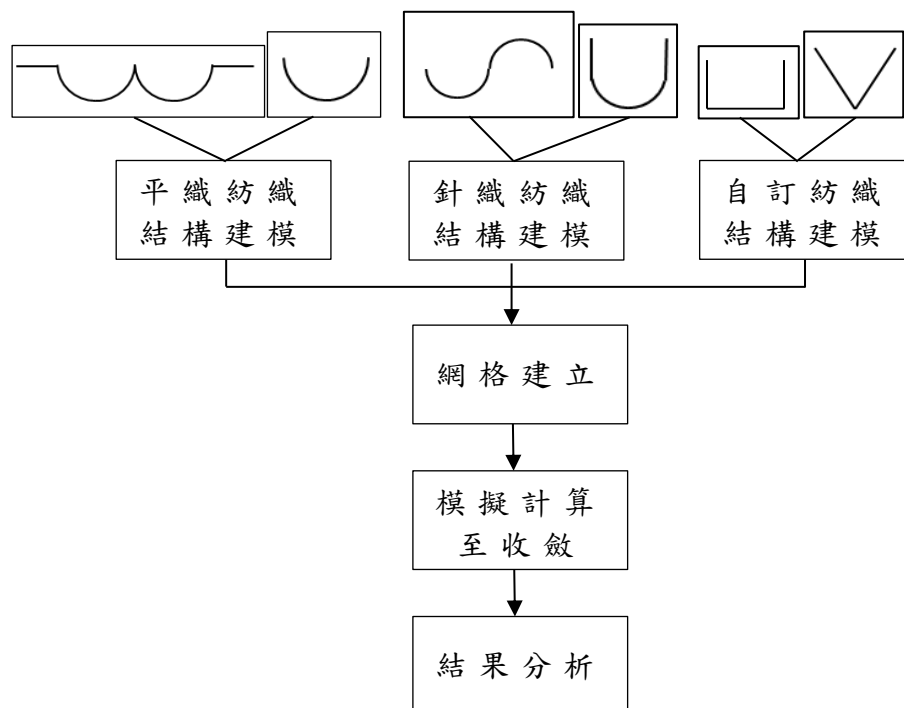


圖 3-4 研究架構圖

第肆章、結果與討論

本研究在模型的部分，除表 3-2 中提到的六種不同造型之微溝槽外，還有對照組的平板，因此會有七組數據做比較。在結果的部分主要分成四大類探討，第一：整體流場的速度分佈，第二：阻力係數(Drag coefficient)，第三：最前端微溝槽內的速度分佈，第四：最末端微溝槽內的速度分佈。

第一節 整體流場速度分佈

對於表面平整的平板流場而言(圖 4-1)，在流體接觸到最前方時速度為 0m/s，稱之為停駐點，此一現象於其他微溝槽平板亦會產生(圖 4-2)。在前端圓弧周邊會有一個流場的加速區，此一現象於其他微溝槽平板亦會產生，但加速的程度皆不一樣，最高為平滑平板 12.84m/s，最低為雙半圓弧 12.00m/s(表 4-1)。

表面平整的平板後端流場，因為平板造型並無流線型的收尾，因此會造成後方產生弱區(圖 4-3)，但會因為其他不同微溝槽平板而有壓力阻力的不同(圖 4-4)，最高為平滑平板 53.28pa，最低為半圓造型 31.66pa(表 4-2)。

在整體速度分佈的部分，平板前端最先接觸流體的地方，因為流體方向與黏滯力的關係，造成前端流體的停滯區，根據白努力原理(Bernoulli's law)速度與壓力成反比，意思是指此停滯區有著較大的壓力，可說是造型阻力，這也是也為什麼要減阻就要把物體造型前端做成較為流線的原因。

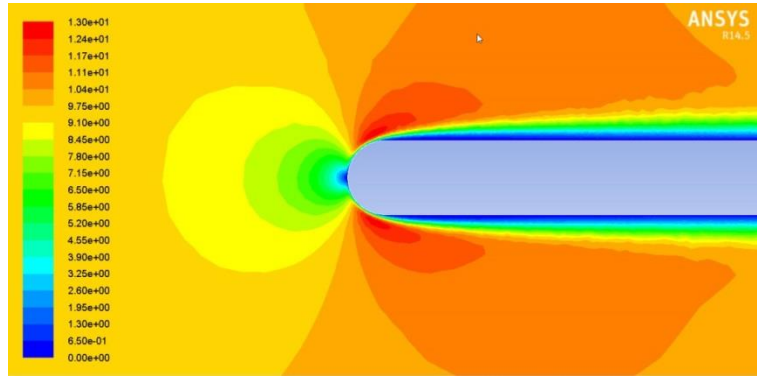


圖 4-1 表面平整之平板前端流場速度分佈

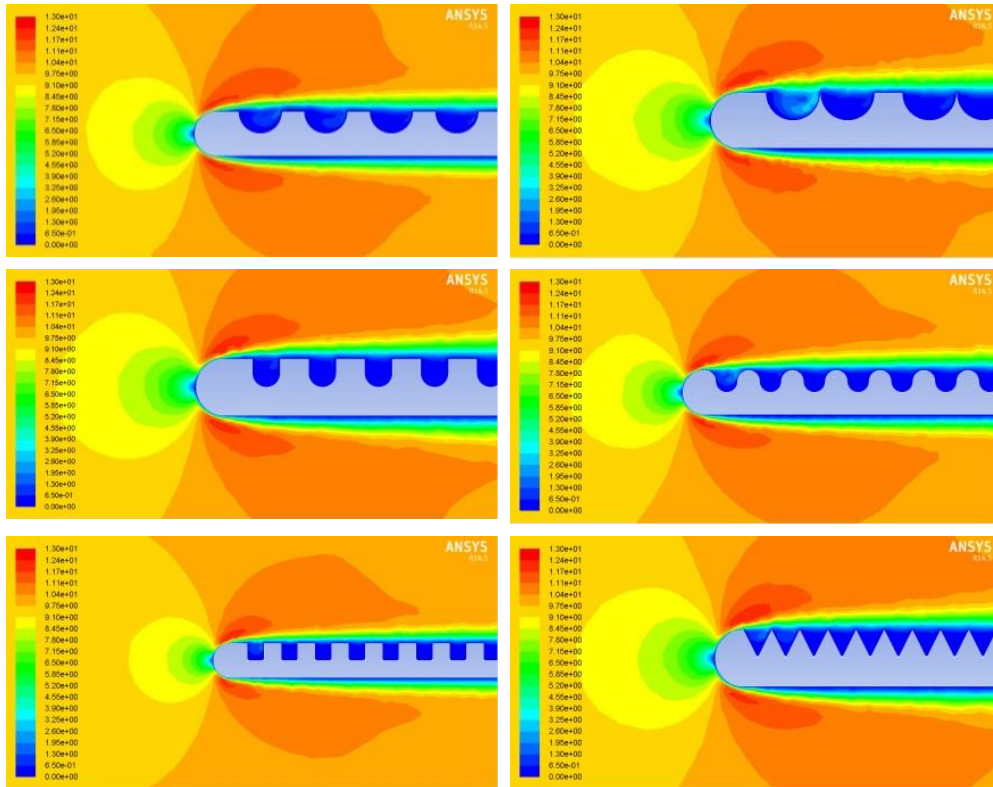


圖 4-2 各微溝槽平板前端流場速度分佈

表 4-1 各微溝槽平板前端最高速度值

溝槽造型	平滑	方形	U型	V型	半圓	連續圓弧	雙半圓弧
最高速度 (m/s)	12.84	12.40	12.38	12.20	12.11	12.44	12.00

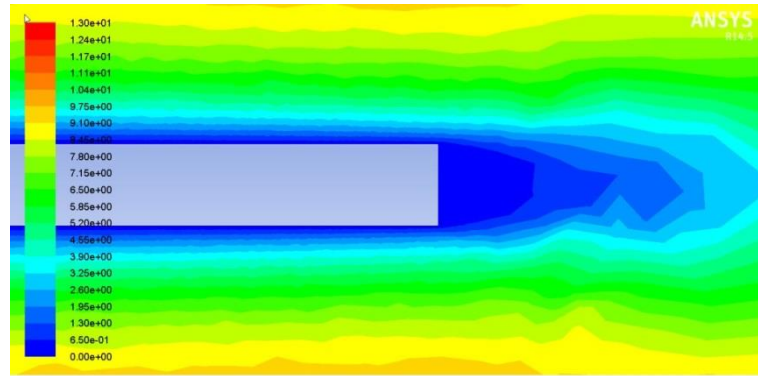


圖 4-3 表面平整之平板尾端流場速度分佈

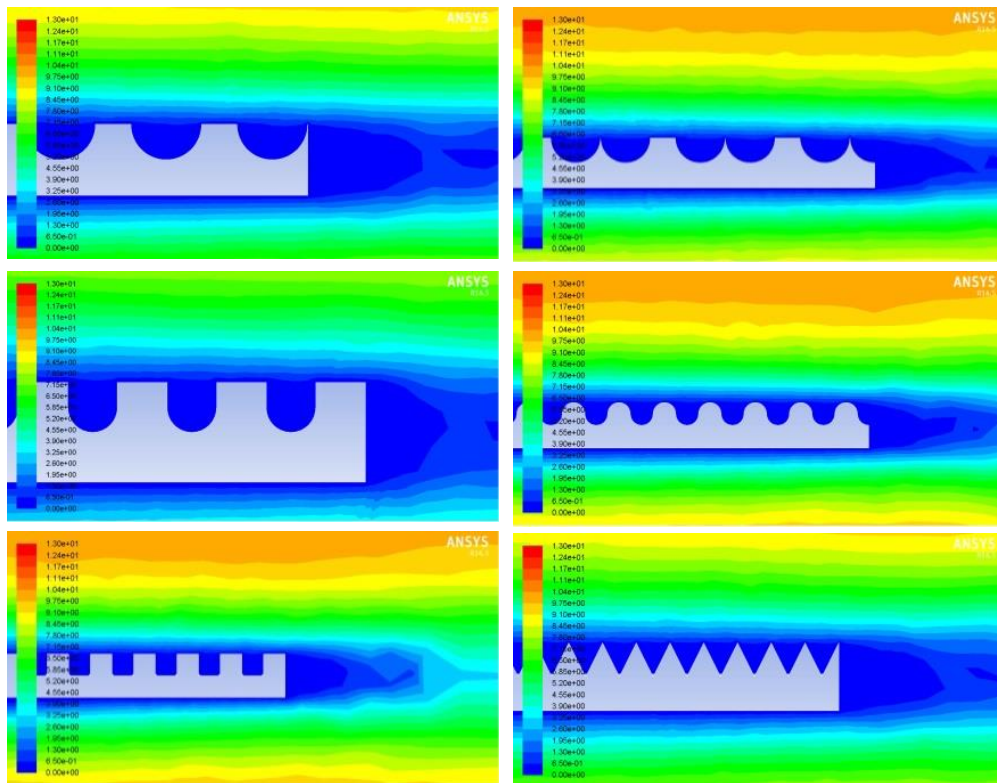


圖 4-4 各微溝槽平板前端流場速度分佈

表 4-2 各微溝槽平板末端最大逆壓力值

溝槽造型	平滑	方形	U型	V型	半圓	連續圓弧	雙半圓弧
最大逆壓 (pa)	53.28	38.06	35.34	44.92	31.66	33.80	33.25

而前端因為平板圓弧的關係，造成流體慣性往上下兩端分離，因此造成了加速的狀況，根據白努力定律此區塊若是加速的愈大，則壓力也愈大；另外流體也因為黏滯力的關係，而繼續保持與平板表面做不滑動的現象，這也使得流體流入了凹槽的造型之中，同時也影響了加速區的發展，從數據顯示加速最大的為平滑平板，最小的為雙半圓弧，原因在於凹槽的影響而使得加速區的加速減緩，而使得壓力提升。

至於後端的部分，因為平板造型並無流線型的收尾，因此會造成後方產生弱區，此弱區造成逆向的壓力，而產生所謂的壓力阻力，能夠嚴重影響整體的阻力，根據數據表示最大逆壓為平滑平板，而最小逆壓為半圓微結構造型的平板，由此可知平板上的表面粗糙度亦會影響後方弱區的發展。

第二節 阻力係數

最容易判斷阻力的無因次 (Non dimensional) 參數就是阻力係數，從章節 1.4.5 的理論基礎中可知，阻力係數來自於空氣阻力，因此阻力係數亦為本研究中之重要參數 (表 4-3)，最大為平滑平板 1.77，最小為半圓造型 1.66。

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$$

ρ : 空氣密度， v : 空氣流速， A : 截面積， C_d : 阻力係數

阻力係數值的部分，因為其係數值直接與阻力相關，可說是觀測阻力最直觀的一種無因次因子，其數字愈大

則表示阻力愈大，根據數據顯示阻力係數最大的為平滑平板，最小為半圓微結構造型的平板，由章節 5.1 的分析可知，平滑平板不管在前端的停滯點抑或是後方的弱區的壓力阻力值，都是七種表面微結構中最大者，所以其阻力係數亦為最大，由此可推論阻力的大小會與表面微結構有關，亦即與表面粗糙度有關。

表 4-3 各微溝槽平板的阻力係數

溝槽造型	平滑	方形	U 型	V 型	半圓	連續圓弧	雙半圓弧
阻力係數	1.77	1.76	1.67	1.70	1.66	1.67	1.72

第三節 前端微型溝槽內速度分佈

最前端溝槽內部的速度幾乎等於 0m/s，必須將速度刻度尺的最大值定義於 6m/s 才能清楚地看見內部的流場狀況，對於各造型最底部的速度值趨近於 0m/s (圖 4-5)，此一現象足以造成邊界層厚度的不同，有不同能量傳遞的效果，進而使阻力值不同。

當流體流過平板時，最初的接觸就會造成能量的散失，因此前端的微結構造型是影響後方邊界層發展的最重要因子。而前端的微結構是因為黏滯力的關係而使得流體得以流入，但也是因為流體流入，而同時使能量被消耗，這也就是為何若當法控制表面粗糙單元結構時，對於愈光滑的表面愈能減少阻力。

但根據流體力學在層流邊界層 (Laminar boundary layer) 與紊流邊界層 (Turbulence boundary layer) 的能量

傳遞定義上，紊流邊界層因為會有許多大小不等的渦旋（eddy）產生，而使得能量傳遞優於層流邊界層，因此若能使用表面粗糙度控制流場，使流場進入紊流邊界層，即可達到減阻的效果。

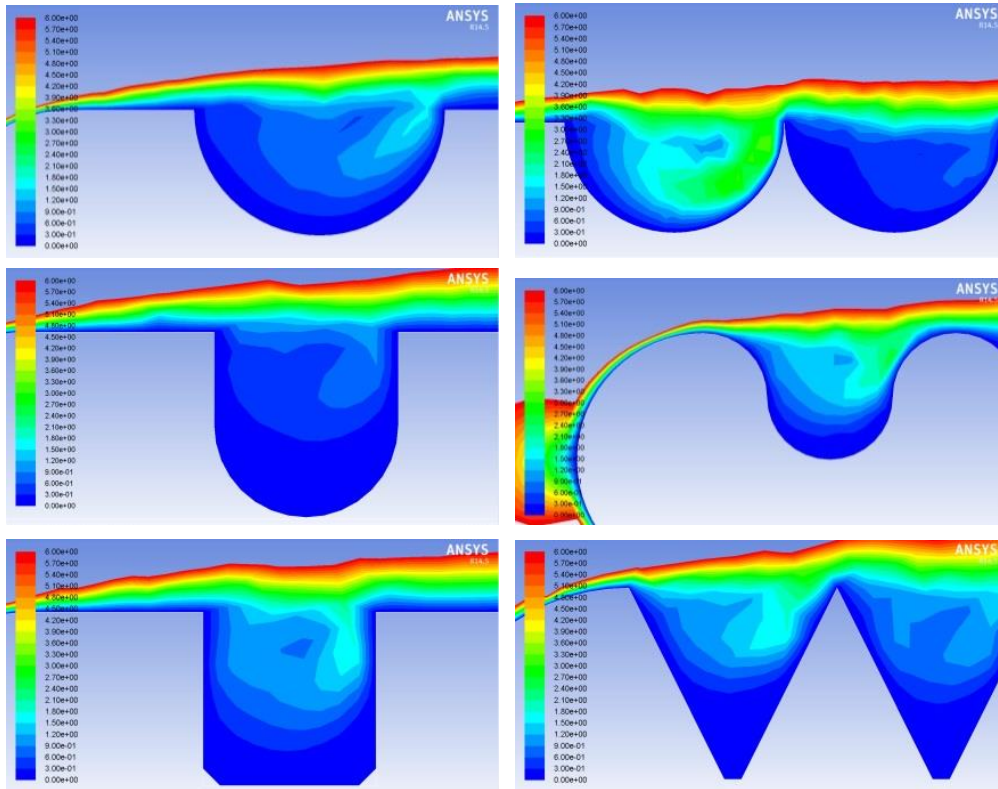


圖 4-5 前端微型溝槽內部的速度分佈

第四節 後端微型溝槽內速度分佈

最末端的溝槽內部速度亦幾乎等於 0m/s，必須將速度尺度之最大值定義於 1m/s 才能夠較明顯的看出速度分佈，除了影響最後的邊界層狀況之外，還會影響後方弱區的發展（圖 4-6）。

至於平板表面後端的微結構造型，因為能量傳遞的減弱，使得後方微結構造型內部的流速幾乎為 0m/s，但對於

後方尾流的影響就很大了，當後方造型不是流線型的縮減時，後方的弱區就會造成阻力，因此若無法有較好的流線型時，微結構的造型也就相當重要了。

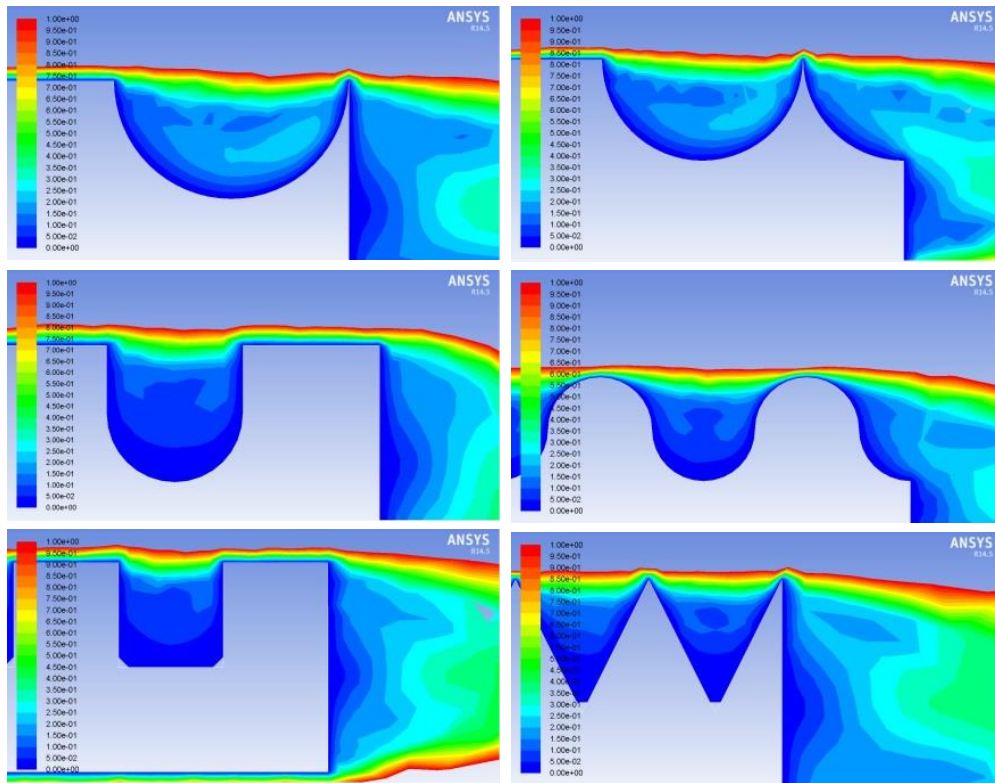


圖 4-6 末端微型溝槽內部的速度分佈

第五章 結論與建議

本研究之所以分成前期與後期研究，最大的原因在於文獻的缺乏，對於衣服紡織纖維的邊界層研究而言是近十年的事情，而且許多的研究皆涉及商業機密，所以在文獻都搜尋上困難重重，加上多數對於衣纖維的研究都是整件衣服穿著於受試者後的全流場模擬，幾乎沒有特別針對衣纖維的微形結構（亦可稱為衣服的表面粗糙度）做邊界層的研究，因此本研究將根據計算出來的結果作為分析與討論。

本研究的數據中明顯的看到，衣服紡織纖維表面的微造型結構確實會影響阻力，不同的結構也會使得阻力上升或下降，因此若能找到一種最有優勢的造型（亦可混和各種微結構或者控制結構鋪設的範圍），那麼對於表面粗糙度的減阻則可以提升非常多，同時也感謝科技的進步，使得人類在微尺度工程的能力愈來愈提升，也能夠控制表面的粗糙單元造型。簡而言之，若能控制流場即表示可以控制阻力。

但本研究仍為 2D 計算流體力學的模擬，仍然需要大量的實驗數據做為參考與驗證，若能加上實驗驗證的話，會使得本數據更有參考性，因此在 3D 計算流體力學的模擬之前，會再做實驗驗證，以確保數據的嚴謹度。也期許未來能夠達到本研究最終的目標，利用仿生的微結構造型，開發出適合競技自行車所使用的衣著。

參考文獻

一、英文文獻

- Apelt, C.J., West, G.A. & Szewczyk, A. A. (1975) The effects of wake splitter plates on, and the flow past, a circular cylinder in the range $104 \leq Re \leq 5104$. Part 1. *Journal of Fluid Mechanics*, 61, 187–198.
- Ashley, S. (1993) Cheetah sprints to world record. *American Society of Mechanical Engineers*, 56–59.
- Benjanuvatra, N., Dawson, G., Blanksby, B. A., Elliott, B. C. (2002). Comparison of buoyancy, passive and net active drag forces between Fastskin and standard swimsuits. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 5, 115-123.
- Brownlie, L.W., Kyle, C.R., Harber, E., MacDonald, R. & Shorten, M.R. (2004) Reducing the aerodynamic drag of sports apparel: Development of the Nike Swift sprint running and SwiftSkin speed skating suits In: *5th International Conference on the Engineering of Sport*, Vol. 1 (eds. Hubbard, M., Mehta, R. D. & Pallis, J. M.) U.C. Davis, USA, pp. 91–96.
- Bixler, B., Pease, D., & Fairhurst, F. (2007). The accuracy of computational fluid dynamics analysis of the passive drag of a male swimmer. *Sports Biomechanics*, 6(1), 81-98.
- Capelli, C., Rosa, G., Butti, F., Ferretti, G.,

- Veicsteinas, A. & di Prampero, P. (1993) Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles. *European Journal of Applied Physiology*, 67 (1), 144–149.
- Chatard, J.-C., & Wilson, B. (2008). Effect of fastskin suits on performance, drag, and energy cost of swimming. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40, 1149-1154.
- de Vey Mestdagh, K. (1998). Personal perspective: in search of an optimum cycling posture. *Applied Ergonomics*, 29(5), 325-334.
- Ennos, A., Hickson, J., & Roberts, A. (1995). Functional morphology of the vanes of the flight feathers of the pigeon *Columba livia*. *J Exp Biol*, 198(Pt 5), 1219-1228.
- Garland Fritzdorf, S., Hibbs, A., & Kleshnev, V. (2009). Analysis of speed, stroke rate, and stroke distance for world-class breaststroke swimming. *Journal of Sports Sciences*, 27(4), 373-378.
- Greenwell, D.I., Wood, N.J., Bridge, E.K. L. & Addy, R.J. (1995) Aerodynamic characteristics of low-drag bicycle wheels. *Aeronautical Journal*, 99 (983), 109–120.
- Hagen, K. D. (1999). *Heat Transfer: With Applications*. United States: Prentice Hall PTR.
- Henningsson, P., & Hedenstrom, A. (2011).

- Aerodynamics of gliding flight in common swifts.. *J Exp Biol*, 214(Pt 3), 382-393.
- Kyle, C.R. (1989a) The aerodynamics of handlebars and helmets. *Cycling Science*, 1 (1).
- Kyle, C.R. (1989b) The aerodynamics of helmets and handlebars. *Cycling Science*, 1, 122–25.
- Kyle, C.R. (1990) Chain friction, windy hills and other quick calculations. *Cycling Science*, 2 (3), 23–26.
- Kyle, C.R. (1991a) New aero wheel tests. *Cycling Science*, 3 (1), 27–30.
- Loitsianskii, L. G. (1957). *Mekhanika zhidkosti i gaza*. Moskva: Gos. izd-vo tekhniko-teoret. lit-ry.
- Maybury, W. J., Rayner, J. M., & Couldrick, L. B. (2001). Lift generation by the avian tail. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 268(1475), 1443-1448.
- Muller, W., & Patone, G. (1998). Air transmissivity of feathers. *The Journal of Experimental Biology*, 201 2591-2599.
- Roberts, B. S., Kamel, K. S., Hedrick, C. E., McLean, S. P., & Sharp, R. L. (2003). Effect of a FastSkin™ suit on submaximal freestyle swimming. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35, 519-524.
- Schatz, M., Bunge, U., Lubcke, H., & Thiele, F. (2001). Numerical study of separation control by movable flaps. *Notes on Numerical Fluid Mechanics*,

Aerodynamic Drag Reduction Technologies,
385-390.

Starling, R. D., Costill, D. L., Trappe, T. A., Jozsi, A. C., Trappe, S. W., & Goodpaster, B. H. (1995). Effect of swimming suit design on the energy demands of swimming. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 27, 1086-1089.

Tarsitano, S. F., Russell, A. P., Horne, F., Plummer, C., & Millerchip, K. (2000). On the evolution of feathers from an aerodynamic and constructional view point. *American Zoologist*, 40(4), 676-686.

Thwaites, B. (1960). *Incompressible aerodynamics: an account of the theory and observation of the steady flow of incompressible fluid past aerofoils, wings, and other bodies*. United States: Dover Publications.

Toussaint, H. M., Truijens, M., Elzinga, M.-J., van de Ven, A., de Best, H., Snabel, B., & de Groot, G. (2002). Effect of a FASTSKIN™ 'body' suit on drag during front crawl swimming. *Sport Biomechanics*, 1, 1-10.

Whitt, F.R. & Wilson, D.G. (1982) *Bicycling Science*,
The Massachusetts Institute of Technology.

Withers, P. C. (1981). An aerodynamic analysis of bird wings as fixed aerofoils. *Journal of Experimental Biology*, 90, 143-162.

Zdravkovich, M.M. (1992) Aerodynamics of bicycle wheel and frame. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 40 (1), 55 - 70.

二、中文文獻

陳政宏(2003)。鯊魚裝與機器魚-淺談仿生減阻與仿生推進。 *科學發展*，365期，56-61。

那雯(2008)。菲爾普斯的「鯊魚皮」。 *青年科學*，10期，39-39。

吳明康(2009)。仿鯊魚皮泳衣技術的發展與應用前景。 *紡織科技進展*，2期，90-91。