

美麗的力學熱流新世界

文・圖／王安邦

大自然中無處沒有驚奇，而在多彩多姿中卻又處處蘊藏著美麗的力學規律。

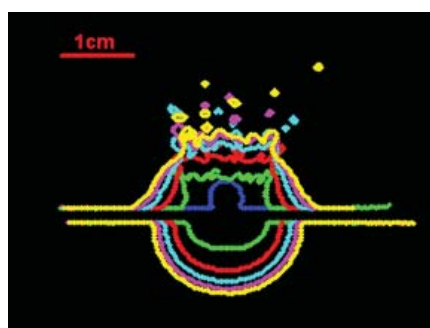
—小液滴的大千世界—

在力學的世界裡，不是只有一般人印象中的陽剛，更有她動人的陰與柔。比如說：一顆水滴落到水中，水面有時只是出現漣漪，有時則會產生浮在水面的大水泡。曾有學者發表研究論文說：有50%的機率會產生大水泡，但這種說法倒有點像說上帝在擲骰子！臺灣常下雨，臺大校內多樹，且不難在樹下找到坑窪積水處，盡信書不如無書，我們從實驗中發現：水滴落下會不會產生大水泡，其實與水滴在空氣中的力學振盪、以及落入水面前的動量與形狀大有關係：水滴動量越大、落水前形狀越尖，越容易產生大水泡；另

外，水窪越深，也越有利於大水泡的產生。這樣起碼證明了這件事不是上帝在擲骰子。

以下「凌波仙子」的场景，大家可能就比較少有機會看到了：如果一顆水滴輕輕的落下，其實水滴是可以像武俠小說所描述帶著輕功般的飄浮在水面上。有趣的是：水滴在飄浮一段時間後，還會突然像練縮骨功般縮成大約原來一半的尺寸，同時這顆縮小的水滴會如平地拔蔥似的快速從水面躍起，而後在重力下再度飄回水面。相同的表演：縮小尺寸、彈起、再飄回水面等景像還會持續上演多次，直到水滴最後在看不見中消失。而隱藏在此場景後的，其實最主要的就是力學的動態平衡。

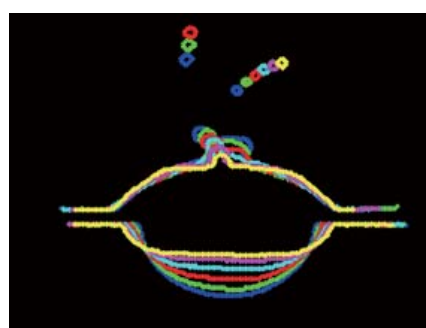
而利用專門的硬體設備，加上自行開發的影像分析軟體，以及流場顯影的技巧，我們也可以為一顆顆液



(I)成長期(Spherical expansion period)



(II)飽和期(Maximum cavity depth period)



(III)內部收縮期(Fast depth shrinkage period)

圖1：一顆水滴落到水中產生飄浮大水泡的數位液氣邊界發展過程特性圖（每張重疊圖的時間發展先後次序為：藍、綠、紅、淺藍、粉紅、黃色）。



滴譜出他們個別的「傳記」。舉例來說，圖1為一顆水滴落到水中產生浮在水面大水泡過程的前段摘要記錄。我們先以高速攝影機拍攝，再利用分析軟體找出液體與氣體的邊界影像，而後再將6張相等時間間隔的數位影像，依時間發展先後次序標上不同顏色並重疊之，於是一個代表大水泡從成長期（圖1左）、飽和期（圖1中）、到內部收縮期（圖1右）的特性圖樣就呈現出來了。而若再搭配運動學與動力學的分析，則造物主又將再一次讓我們見證大自然中美麗的力學規律。

—尾流的美麗世界—

另一個（流體）力學上常見的基本現象：流體流過鈍體（即非流線形物體），鈍體後方就會形成尾流。人是動物，而且不是流線形體，所以在有動作時，隨時都在產生尾流；只是在大部分的情況下，流體的運動總是低調掩形、默默無語，而其所產生的高速度尾流之能量混合與消散亦快，所以我們一般並不易觀察到。以下且讓我們來看一下低流速的尾流世界：肥皂膜如圖2所示由左向右經過圓柱阻擋體慢慢流入，在流速低時（圖2上），流體會在圓柱後方形形成兩個上下近乎完全對稱的迴流區；而當流速逐漸增高到超過某一臨界值後，則會轉變成一條不對稱、且隨時間作上下擺動的美麗長尾巴（圖2下）——一個從古代文明，乃至現今高科技研討會都廣被應用的雲紋圖案。

而上述的尾流中，若加入了「熱」的因素，例如冷的流體與熱的鈍體（或反之），則會發現開始產生不對稱長尾流的臨界值、分離角以及擺動頻率等都會變化。在過去，這些工作都是以個別案例探討與積沙成塔的方式來累積這方面的工程知識，但是假如我們能建構起等溫（整個系統溫度相同）與非等溫流場間的連結橋樑，也就是說如果能找得到兩者間對映的相似性(Similarity)，那麼我們將可以達到系統化的擴充工程知識的效果。在不斷的探索下，我們發現確實

是可以建立如此橫向連結的橋樑。並由此正確預測非等溫流場的定量特性（如分離角、無因次之熱傳係數及尾流擺動頻率等）。圖3為不同加熱程度下（即 T^* ，為鈍體相對於流體的絕對溫度比），無因次尾流擺動頻率（即 St ）與無因次速度或流量（即 Re ，代表雷諾數）的理論（以實線表示）與實驗（以符號表示）關係；此圖顯示對於代表兩大流體（液體與氣體）的水與空氣，我們所提出的理論與實驗都能表現出非常好的一致性。此相似性的觀念對微流體系統特別有用，也可應用於實驗室晶片(Lab-on-a-Chip)中的微流量計。

—精微熱流控制實驗室—

在一般實際工程系統中，有「熱」就會產生「流」，有「流」亦常伴生「熱」，故「熱流」兩者常被放在一齊討論，並做為概括「熱」與「流」相關學科的統稱。以上僅就實驗室過去在「熱流」領域的部分研究做一簡單的介紹。而隨著近代科技精密化、微小化的趨勢發展，使得熱流科技的發展亦逐步往「精」與「微」的方向擴展，像是微機電(MEMS)技術與實驗室晶片等。這些年來，實驗室團隊秉持著「研發世界一流的創新技術」與落實「學以致用」之理念；所以上述液滴與尾流方面的研究，就不斷的往噴墨印刷技術、微流體晶片及精密塗

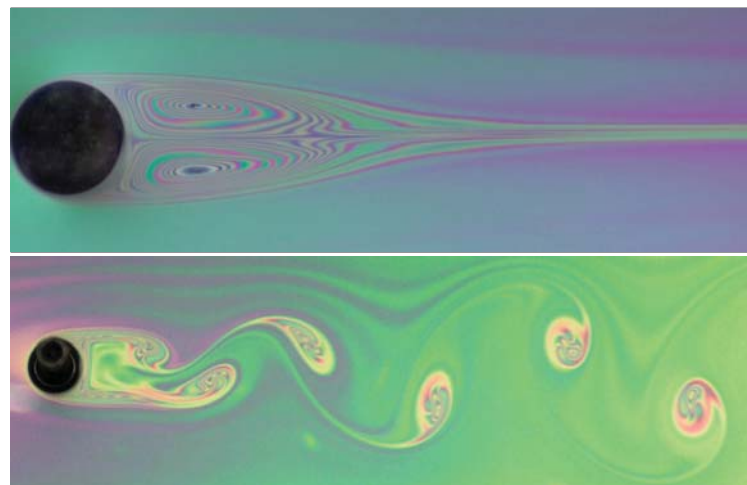


圖2：肥皂膜流經圓柱之尾流照片（攝影／陳培昀）。

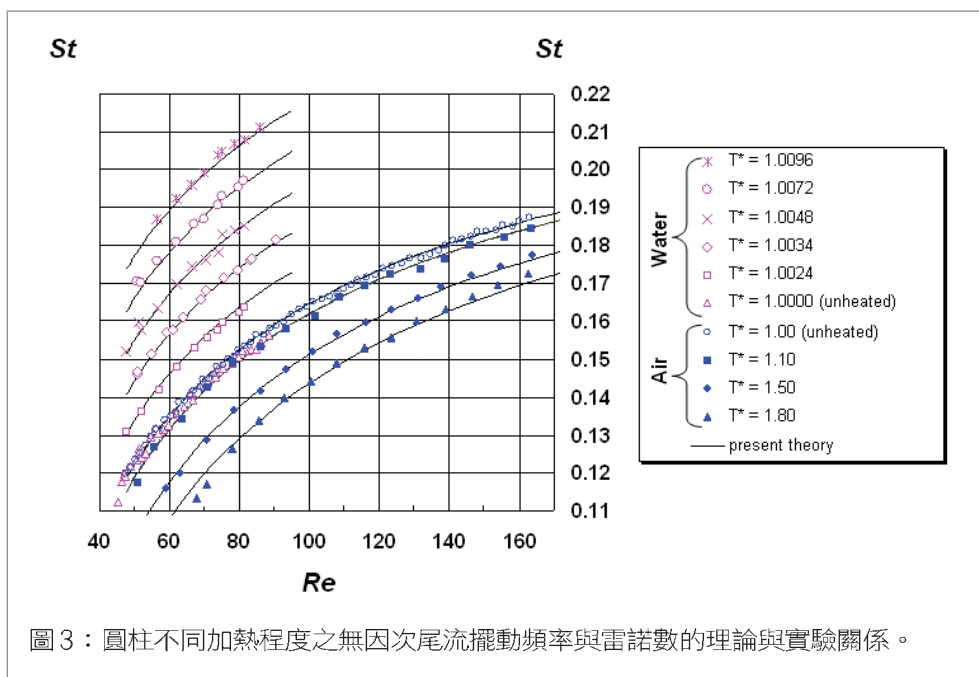


圖 3：圓柱不同加熱程度之無因次尾流擺動頻率與雷諾數的理論與實驗關係。

佈技術等產業應用領域拓展連結。感謝一直有很多的產、學、研的良師與益友，不斷的為我們引入新的學習方向與跨領域的活水；也慶幸實驗室已逐漸建立起國際化的交流環境，可以讓實驗室成員有更多元的學習。而深入的了解「熱流」特性，順其之性、取「力學」之巧，以達到能隨心所欲、如演奏樂曲般的精確調控跨領域工程系統表現，則是我們以「精微熱流控制」為研究領域者最大的挑戰。誠摯歡迎有興

趣的同好一齊合作，共同探索大自然美麗的世界。

(本期本欄策畫／材料科學與工程學系莊東漢教授)

參考文獻：

[1]王安邦，陳仕昇，宋佩芳，林怡君，陳家智，費德全，「噴滴與介面交互作用之研究——臺大應力所精微熱流控制實驗室十年相關研究回顧」，91, 103-115, 臺大工程學刊, 2004.

[2]Fedorchenko, A. and Wang, A.-B., On some common features of the drop impact on liquid layer, 16, 5, 1349-1365, Physics of Fluids, 2004.

[3]Wang, A.-B., Kuan, C.-C., Hung, W.-T., Lu, F.-Y., Shi, S.-H., Quan-

titative Tracking Analysis of Sequential Events of Drop Dynamics, Proceedings of 11th Annual Conference of Liquid Atomization and Spray System-Asia, 189-195, Taipei, Taiwan, 2007.

[4]Wang, A.-B., Trávníček, Z., Chia, K.-C., On the relationship of Effective Reynolds number and Strouhal number for the laminar vortex shedding of a heated circular cylinder, Physics of Fluids, 12, 6, 1401-1410, 2000.

[5]Maršák, F., Trávníček, Z., Yen, R.-H., Tu, W.-Y., Wang, A.-B., St-Re-Pr relationship for a heated/cooled cylinder in laminar cross flow, Proceedings of International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, Marrakech, Morocco, 2008.



王安邦小檔案

德國 Erlangen-Nuernberg 大學流體力學工學博士 (1991)，臺灣大學應用力學研究所教授 (2001 至今)。曾任教育部顧問室光機電教學資源中心主任 (2002-2004)，教育部顧問室顧問兼影像顯示科技科教計畫領域召集人 (2004 至今)。研究興趣包括實驗室晶片與微奈米機電系統整合技術、軟性電子與新世代顯示器製程技術，以及仿生工程與智慧節能應用技術等。

☞ 指導實驗室同學以「太極塗佈法」獲第一屆「奇美獎」首獎 (2007)。