

智慧型流體:磁性流體液滴界面之操控-從突出峰到迷宮

計畫主持人: 陳慶耀教授 國立交通大學機械工程系

一. 前言

鐵磁性流體(ferrofluids, 或簡稱為磁性流體)為一人工合成流體, 此流體組成如圖 1-1 所示: 包含奈米級鐵磁性粒子(氧化鐵粒子)、表面活性劑(surfactant)與載基流體(base fluid)。基本上, 磁性流體最主要的製造方法是經由化學合成的方法, 將表面活性劑依附在奈米級鐵磁粒子上面, 並將其均勻溶解於水性或油性之載基流體中, 使其同時具有磁性而且可流動之雙重特性。而利用此特性, 有別於一般流體之較不可操控性, 磁性流體則可利用外部磁場加以控制流體流動, 故而磁性流體通常亦被稱為智慧型流體或功能性流體, 且因其奈米級粒子尺寸, 可充分使用於相關先進生物科技與微奈米流體機械系統。

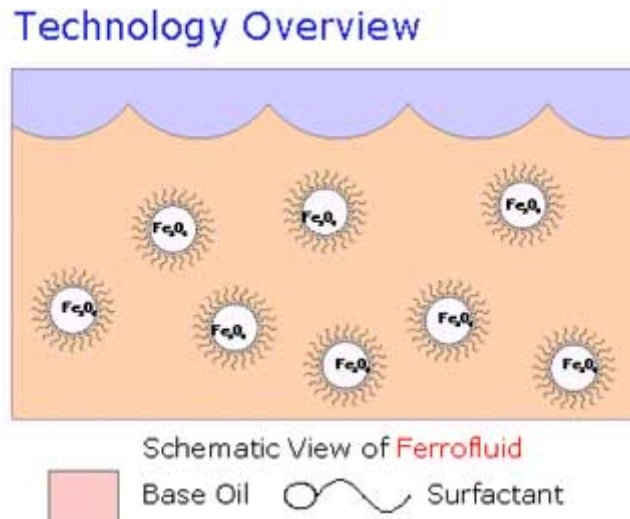


圖 1-1: 磁性流體包含奈米級鐵磁性粒子(氧化鐵粒子)、表面活性劑(surfactant)與載基流體(base fluid, 通常為水或礦物油)。

現階段成熟之磁流體一般應用主要在於三大部分:(a)太空科技、(b)阻泥機制及(c)軸封技術。於太空中, 因受無重力因素影響, 傳統利用自然對流所設計之熱傳導機構(如熱管)無法有效應用, 因而可使用磁性流體, 並以外加磁場替代重力場產生對流效應。再者一般而言, 磁流體之黏滯度會隨著外加磁場之存在而顯著增加, 在常見的阻尼器中可藉由局部的磁場強度, 來增大黏性效應, 因而被廣泛應用為阻尼機制。而於軸封方面, 則著眼於磁流體可為外加磁場所支持而附著於軸壁, 無須如一般流體需要容器支撐, 即可有效分隔軸封。在其他未來應用方面, 磁流體粒子之奈米級尺度及其於溫度變化下所產生之磁化強度變化, 亦可運用在新一代之電子冷卻系統, 配合新近發展之微流道機構, 可將原本於微流道中用於散熱用之工作流體加置磁性粒子, 而利用磁性粒子吸熱產生之磁化變化

現象，推動流體循環以進行熱量傳輸，達到散熱效果。同時磁性粒子因其優異之生物相容性，及其奈米特質，亦已被應用於生物醫學技術上，如細胞分離、精準釋藥與腫瘤細胞之追蹤與治療技術等。

欲充分進行上述磁性流體之工程應用，必需仰賴對磁性流體操控性之充分了解，同時除了工程應用外，磁性流體受磁場影響下之複雜界面變化(如下圖 1-2 所示)，於單純物理或藝術觀點而言，亦充滿研究價值。故而對磁性流體界面之研究，在磁性流體於 1960 年代被合成成功後，一直為研究人員努力之重要項目之一，其中對磁液滴之界面變化更是研究之焦點。本研究即專就一微小磁性流體液滴，受一均勻垂直磁場下之界面型態變化進行探討，並試圖以不同接觸條件及流體組合，操控其界面型態變化。

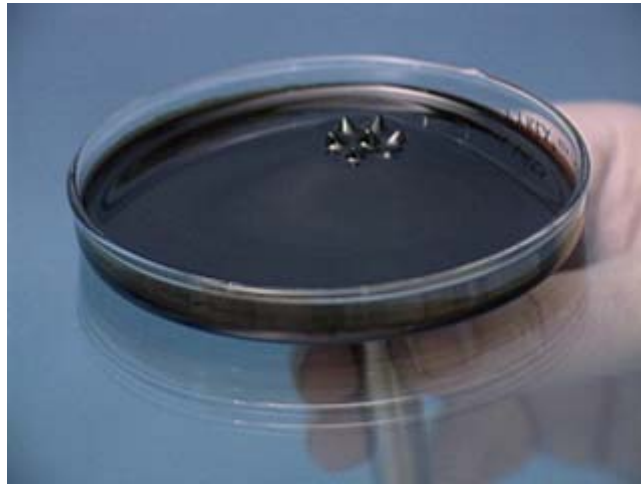


圖 1-2: 磁性流體受一下方磁鐵影響下產生之界面變化，其界面隨磁力線進行方向，產生多個放射分布之突出峰。

二. 研究成果

1. 垂直磁場下磁性流體界面之型態

於傳統磁性流體受一均勻垂直磁場影響下之界面型態研究中，可分為二大類型:(1)突峰型(即所謂 Rosensweig 不穩定); (2)迷宮型(Labyrinthine 不穩定)。若一磁性流體液滴放置於平板上且受與平板垂直之磁場影響，則其界面會產生 1 或多個突出峰(如上圖 1-2 及下圖 2-1 所示)，而此磁力並與重力及時表面張力達到平衡，使得突出峰型態維持不變，即為所謂羅森史維格(Rosensweig)不穩定現象。而若將磁性流體液滴置放於二平板間，並一樣施予與平板垂直之磁場，因原欲往上方突出發展之突峰型受上平板限制無法形成，故而轉而往與平板平行之方向進行，並與環境流體(如空氣)互動，而產生如迷宮式之型態(如下圖 2-2 所示)，即為所謂迷宮型(Labyrinthine)不穩定現象。

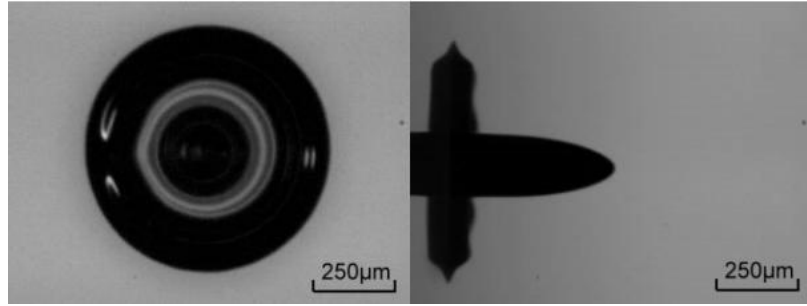


圖 2-1：磁性流體液滴受一垂直磁場之影響下產生單一突出峰(左：上視圖；右：側視圖)；側視圖之磁場方向為由左至右，左邊界之對稱部分為攝影反光重影。

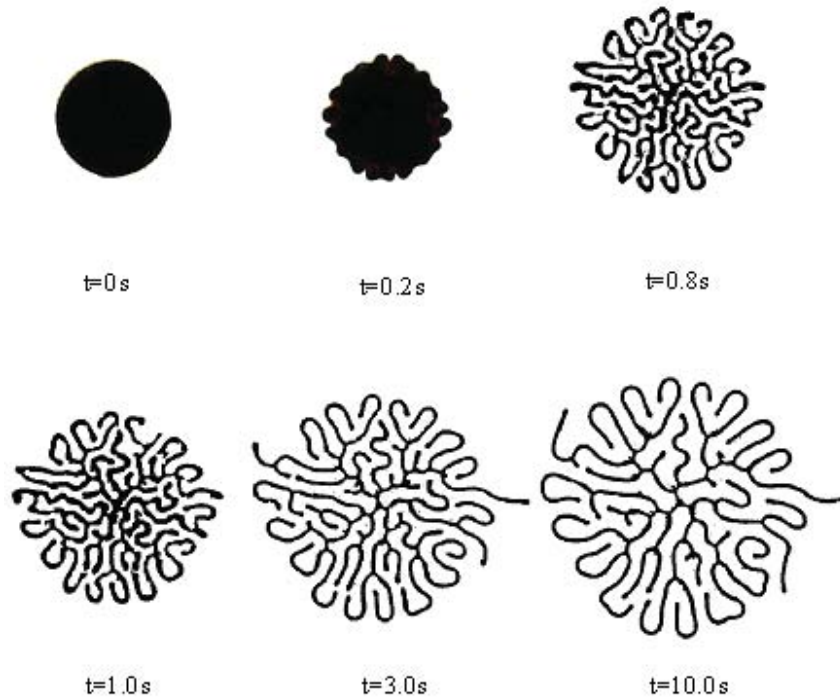


圖 2-2：磁性流體液滴置放於二平板間，受一垂直磁場之影響下產生之界面變化上視圖；界面產生如迷宮式之型態。

2. 微小磁性液滴之突峰型(羅森史維格)不穩定現象-應用於非侵入式微液滴之均勻分割與收集技術

先前關於突峰型(羅森史維格型)界面研究，大多著重於較大尺寸之液滴，隨著微機電系統之發展，本研究則專注於微小尺寸(數百至數千微米)之液滴，實驗研究發現一新的界面型態。如下圖(圖 2-3)所示，對微小磁性液滴於均勻垂直磁場進行突峰型(羅森史維格)不穩定現象實驗時，發現於不同磁場強度或液滴直徑下，可產生不同類型之有序液滴分裂模式，且分裂所形成之次微液滴有慢往外飄移之現象，此類有序微小磁性液滴分裂及次微液滴飄移現象，於以往研究較大尺寸液滴之文獻中尚無類似現象之發表。

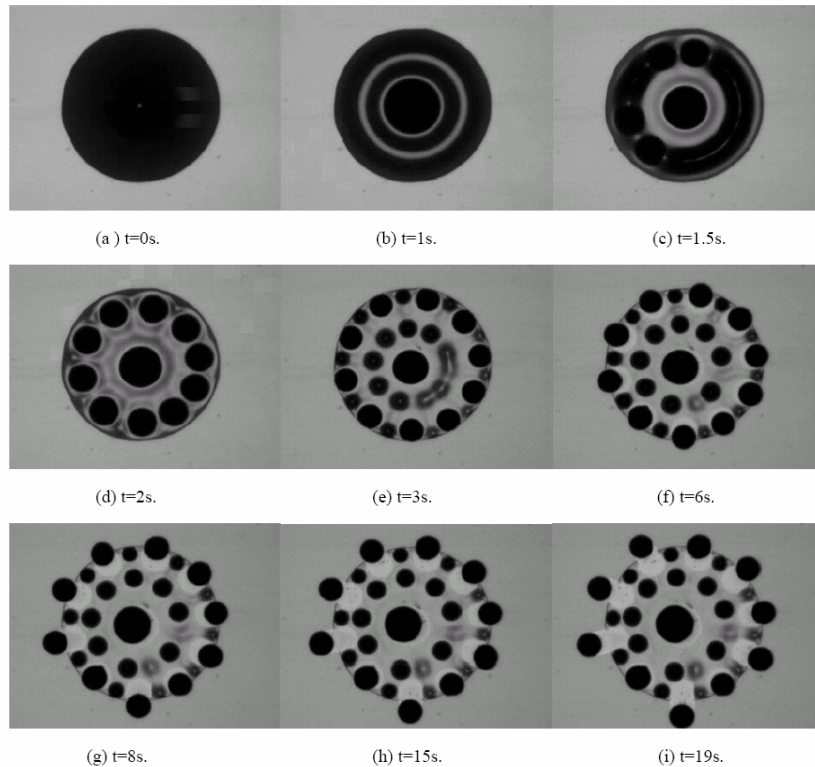


圖 2-3: 不同時間下直徑為 1,700 微米之微小磁性液滴(上視圖)於均勻垂直磁場下，所產生之液滴分裂與分裂後之次液滴往外飄移現象。

然而若將磁性液滴置放於未經處理之乾燥平板條件下(如圖 2-4 左圖之液滴上視與側視圖所示)，其液滴分裂則呈體積不均勻之現象，分裂後之位於中心之次液滴體積顯著大於外圍之次液滴，此不均勻性乃導因於原始液滴之曲面高度。因決定次液滴之最終形成型態，乃取決於磁力與重力與表面張力之平衡，故而於原始液滴曲面之高度最大處(即液滴中心)，其表面張力壓力值最微弱，故而導致曲面最易變形，而形成體積最大之次液滴。此分裂之不均勻性，可以預溼之接觸條件解決之。相對於上述方式將磁性液滴置放於未經處理之乾燥平板前，可先將平板塗抹可與磁性流體之載基流體相互溶解之流體，如進行礦油基之磁性流體液滴分裂實驗前，塗抹矽油於平板表面，如此可使原始液滴之曲面較為平緩，進而使各區域表面張力壓力值平均分佈，形成均勻之液滴分裂，如下圖 2-4 右圖所示。

於微機電系統與生醫檢測技術中，常須要有於微量液體樣本中採取更微量檢體之情形，故而對發展進行微量液體分割與收集之技術有其必要性。而上述研究成果之液滴分裂則可被利用發展一簡易非侵入式且快速之微液滴分割技術，且分裂後之次液滴收集則可利用其往外飄移現象收集之，此技術已申請獲得中華民國發明專利。

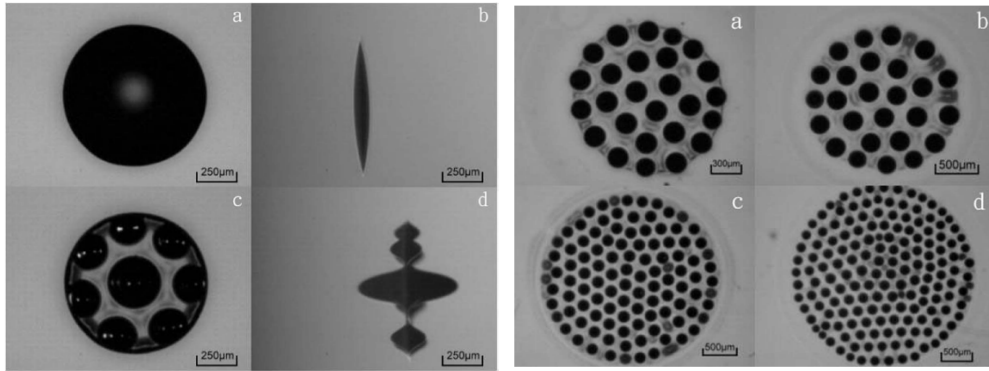


圖 2-4: (左圖)於乾燥接觸條件下，微小磁性液滴之非均勻分裂上視(a, c)與側視圖(b, d)，其中圖(a, b)為原始磁性液滴影像，(c, d)為分裂後之液滴影像；(右圖)於預溼接觸條件下，不同尺寸之微小磁性液滴均勻分裂之上視圖。

3. 新型態之混合型界面-從突峰到迷宮

傳統上，上述突峰型與迷宮型二不穩定型態，因不管於發生狀況或其力學機制均不相同，故而被歸類分屬二不同研究課題。而本研究則進一步利用上述預溼之接觸條件，發展一簡單之實驗設計，使此二不穩定之型態同時發生，且因此二不穩定型態之相互影響，亦產生有別於其個別發生時之有趣現象。有別於前段介紹預溼之接觸條件，如若將此一預先塗覆之預濕層厚度增加，使磁性流體液滴完全浸泡於此可互溶流體層中，再施予一均勻垂直磁場，則一開始液滴仍呈現 Rosensweig 不穩定之單 1 突出峰，然而隨時間增加，此突出峰基部與可互溶流體擴散影響，致使磁力減弱無法平衡重力與表面張力，故而突出峰高度隨時間遞減直到完全沒入可互溶流體層，如附圖 2-5 上列之側視圖所示。附圖 2-5 之下列則為流體界面上視圖，於此情形下，可互溶流體層之表面張力提供部分類似上平板之限制，故而於平面上亦產生迷宮型不穩定現象，而此現象亦因突出峰高度遞減而使界面分裂更為明顯。此創新成果，不僅發現一非常有趣之混合型磁性流體界面型態，同時開亦可開展一項新的研究課題。

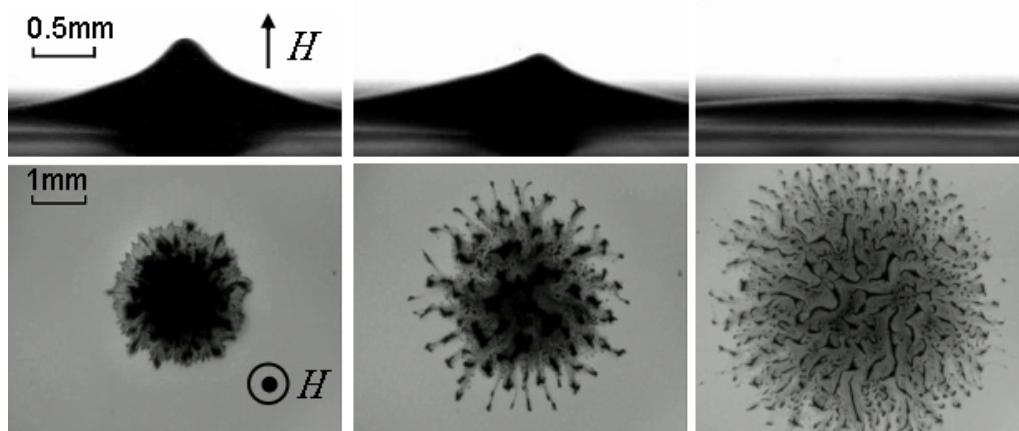


圖 2-5: 不同時間下突峰型不穩定之突出峰(上列)與迷宮型不穩定之界面分裂(下列)同時發生之影像。

此發現於 2008 年五月出版的 Physical Review E 期刊發表，並受到美國物理協會(American Institute of Physics)出版之《今日物理》(Physics Today)月刊的矚目，將此新發現報導於六月號的〈物理新知〉(Physics Update)專欄，此乃 1995 年有此專欄來，台灣學者之研究登上此專欄的首例。此專欄目的在於報導最具新聞性之物理新發現，而報導之新聞內，明確敘述研究成果來自臺灣之科學家，應對增加國家形象有所助益。同刊中被〈物理新知〉報導之成果除作者之研究外，另有 2 篇論文來自 Physical Review Letters 及 Science 與 Nature 各 1 篇。

三. 結語

有鑑於鐵磁性流體之可操控性與鐵磁粒子之奈米級的結構及生物相容性，其對未來發展尖端之微奈米機電系統與生物/生醫科技，具有非常高之應用可能性。雖然越來越多高品質之磁性流體被材料工程學者開發成功，然而對於其電磁力與流動物理性質間複雜之偶合互動，仍無明確簡易之定論。誠如上述所言，欲充分進行先進之磁性流體工程應用，必需仰賴對磁性流體操控性之充分了解。此篇報告乃針對於特定(均勻垂直)磁場下，對液滴界面變化進行探討，未來應可對更複雜之磁場組合加以研究及設計，同時若能發揮創意巧思，必可獲得更佳或更多之應用可能性，充分發揮其**智慧型流體**之特質。

四. 作者簡介



陳慶耀 教授
國立交通大學機械工程學系
美國南加州大學航太工程博士

主要研究領域：

1. 計算/實驗流體力學
2. 磁性流體
3. 界面穩定

陳慶耀，美國南加州大學航太工程博士。歷任大葉大學機械系助理教授/副教授(1999/8~2003/7)，國立雲林科技大學機械系副教授/教授(2003/8~2007/7)，現任國立交通大學機械工程學系教授(2007/8~)。作者從事基礎流體力學學理之數值分析與實驗研究，近年來積極致力於探討磁性流體之界面穩定性，成果數次獲國際肯定，包含(1)獲選刊登於 *Physics of Fluids* 官方紀念海報(2005/11)，(2)獲報導於美國物理協會(AIP)出版之《Physics Today》2008 年六月號之〈Physics Update〉專欄，(3)獲選為 Physical Review E 首頁 2008 年 7 月(首期)封面萬花筒(Kaleidoscope)。