

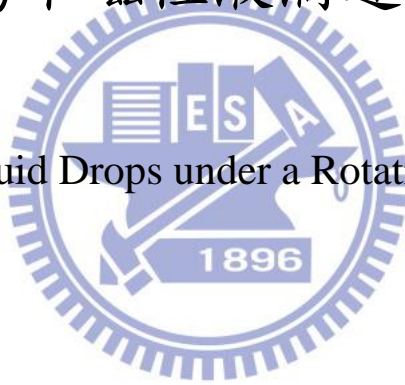
國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

旋轉磁場下磁性液滴運動之研究

Motion of Ferrofluid Drops under a Rotating Magnetic Field



研究生：薛皓中

指導教授：陳慶耀 博士

中華民國一百零二年七月

旋轉磁場下磁性液滴運動之研究

**Motion of ferrofluid Drops under a Rotating Magnetic Field**

研究生：薛皓中

Student : Hao-Chung Hsueh

指導教授：陳慶耀

Advisor : Ching-Yao Chen

國立交通大學



**A Thesis**

**Submitted to Department of Mechanical Engineering**

**College of Engineering**

**National Chiao Tung University**

**in Partial Fulfillment of The Requirements**

**for the Degree of**

**Master of Science**

**in**

**Mechanical Engineering**

**July 2013**

**Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國一百零二年七月

# 旋轉磁場下磁性液滴運動之研究

學生:薛皓中

指導教授:陳慶耀

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

本文以實驗方法研究磁性流體於大氣環境下，與不可互溶流體於旋轉磁場的作用下之運動情形。本文使用旋轉磁場所產生的磁力使磁性液體擴張。實驗主要的目的是研究磁場強度與初始液滴大小對液滴拉伸運動的影響。實驗架構是由磁性液滴至於不可互溶非磁性溶液中，使用平面旋轉磁場的作用使得液體產生拉伸變化。此種外觀由初始之尚未開啟磁場所保持的圓形，轉變成為磁場開啟後之橢圓形。本文使用多種液滴初始直徑以及多種不同的磁場強度。從實驗數據分析在旋轉磁場機制下 Bond number 與介面張力係數的關係。本文之旋轉磁場力學機制與徑向塗佈之力學機制相似，旋轉磁場之磁力與徑向塗佈之磁力皆與徑向半徑  $r$  成正比。

關鍵字:磁性液滴、旋轉磁場、介面張力。

## 致謝

德國劇作家布萊希特曾說：“不要為已消盡之年華嘆息，必須正視匆匆溜走的時光。”我想這句話在我當學生的最後這兩年中，是最深的體悟；在這充實的碩士生涯即將結束，迎接而來的是未知的社會新鮮人的開始，想起剛進入研究所時的期待與不安，一路走來這一切都要感謝許多人對我的幫助與提攜。

首先要感謝教授陳慶耀博士這兩年來的悉心指導，老師的教誨有如春風化雨般地令人受用，以及不時地討論與指導我正確的方向。此外也感激老師在為人處事方面的照料和生活上的關心與教導，讓學生不只在學問上有所進步，也在做人處事中學會謙虛與自信。師恩浩瀚，筆楮難窮，謹誌於此，以表由衷感謝與敬意。

其次要感謝彥宏、聖焱、合慶、裕盛諸位學長在研究上給予指導及提供許多研究方向意見，還有同袍好友佩玲與開俊，感謝一路上的相伴以及幫助，也要感謝學弟定宇、建樺、嘉瑋幫忙分攤實驗室的業務，因為有你們的相陪，讓我的碩士生涯多采多姿。

最後我要感謝一路栽培我以及支持我的家人、爸爸、媽媽謝謝你們的養育之恩與栽培，弟弟謝謝你不時地從美國電話關心，感謝上帝在我困惑時聆聽我的祈禱，給我力量以及勇氣前進，讓我能無後顧之憂全力以赴的完成學業，在此致上十二萬分的謝意，謝謝大家！

# 目錄

摘要.....	I
致謝.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	X
符號說明.....	XI
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 文獻回顧.....	4
1-3 研究動機及目的.....	6
第二章 實驗原理、方法及設備.....	15
2-1 實驗儀器說明.....	15
2-2 實驗步驟.....	16
2-3 理論背景.....	17
第三章 結果與討論.....	26
3-1 磁性流體之界面張力.....	26
3-1-1 單一磁場實驗.....	26
3-1-2 旋轉磁場實驗.....	28
3-2 磁性流體的運動行為.....	30
3-2-1 磁液滴在不同磁場相位差之運動情形.....	30
3-2-2 串接磁液滴在顆數變化下運動之情形.....	33
3-2-3 串接磁液滴在磁場強度變化下運動之情形.....	34
3-2-4 串接磁液滴在尺寸變化下運動之情形.....	34
3-3 磁性流體之運用.....	35
3-3-1 磁液滴在尺寸變化下之混合情形.....	35

3-3-2 磁液滴在磁場變化下之混合情形.....	36
3-3-3 液滴串在尺寸變化下之混合情形.....	36
第四章 結論.....	84
參考文獻.....	86



## 圖目錄

圖 1-1 磁性流體包含奈米級鐵磁性粒子、表面活性劑與載基流體...8	8
圖 1-2 羅森史維格結構物[1].....8	8
圖 1-3 介面呈現六角形的羅森史維格結構物[2].....9	9
圖 1-4 大型容器中產生不穩定單獨波[3].....9	9
圖 1-5 利用 X 射線技術觀測磁流體表面產生羅森史維格不穩定現象 .....10	10
圖 1-6 受到垂直磁場及旋轉磁場影響下所產生之界面演變[16].....10	10
圖 1-7 模擬受垂直磁場及切線方向磁場影響所產生之現象[17].....11	11
圖 1-8 磁性液滴在非磁性流體中施以旋轉磁場所產生指狀化現象[25] .....11	11
圖 1-9 磁性液滴在非磁性流體中外加垂直磁場所產生拉身形變現象 .....12	12
圖 1-10 拉伸長度比與 bond number 關係圖.....12	12
圖 1-11 此四張照片在使相同磁場 H(a)剛開啟磁場 H'。(b)1 分鐘後 (c)1/4 分鐘後(d)1 分鐘後:穩態形狀。.....13	13
圖 1-12 磁珠串在擺動磁場作用下，擺動情形.....13	13
圖 2-1 實驗設備示意圖.....20	20
圖 2-2 交流電電源供應器.....20	20
圖 2-3 高斯計 SYPRIS 6010.....21	21
圖 2-4 X 軸上線圈磁場分布圖.....21	21
圖 2-5 Y 軸上線圈磁場分布圖.....22	22
圖 2-6 原點之磁場與時間關係圖.....22	22
圖 2-7 原點磁場的極座標圖.....23	23
圖 2-8 實驗裝置實體圖.....24	24
圖 2-9 輕礦油基系列 EMG900/EMG901/ EMG 905.....24	24



圖 2- 10	EMG905 磁化率曲線 .....	25
圖 3- 1	均勻磁場作用( $H_0=47$ Oe), $d=2.078$ mm 拉伸形變過程 .....	37
圖 3- 2	均勻磁場作用( $H_0=56.4$ Oe), $d=2.078$ mm 拉伸形變過程 .....	37
圖 3- 3	均勻磁場作用( $H_0=65.8$ Oe), $d=2.078$ mm 拉伸形變過程 .....	38
圖 3- 4	均勻磁場作用( $H_0=75.2$ Oe), $d=2.078$ mm 拉伸形變過程 .....	38
圖 3- 5	均勻磁場作用( $H_0=84.6$ Oe), $d=2.078$ mm 拉伸形變過程 .....	39
圖 3- 6	均勻磁場作用( $H_0=94$ Oe), $d=2.078$ mm 拉伸形變過程 .....	39
圖 3- 7	均勻磁場作用( $H_0=47\sim 94$ Oe) 拉伸形變 .....	40
圖 3- 8	磁性液滴在均勻磁場作用下的拉伸比與磁場強度關係圖 .....	41
圖 3- 9	磁性液滴之表面張力與磁場強度關係圖 .....	41
圖 3- 10	旋轉磁場作用( $H_0=47$ Oe), $d=2.842$ mm 拉伸形變過程 .....	42
圖 3- 11	旋轉磁場作用( $H_0=56.4$ Oe), $d=2.842$ mm 拉伸形變過程 .....	42
圖 3- 12	旋轉磁場作用( $H_0=65.8$ Oe), $d=2.842$ mm, 拉伸形變過程 .....	43
圖 3- 13	旋轉磁場作用( $H_0=75.2$ Oe), $d=2.842$ mm, 拉伸形變過程 .....	43
圖 3- 14	旋轉磁場作用( $H_0=84.6$ Oe), $d=2.842$ mm, 拉伸形變過程 .....	44
圖 3- 15	旋轉磁場作用( $H_0=94$ Oe), $d=2.842$ mm, 拉伸形變過程 .....	44
圖 3- 16	旋轉磁場作用, $d=2.947$ mm 拉伸形變過程 .....	45
圖 3- 17	旋轉磁場作用, $d=3.105$ mm 拉伸形變過程 .....	46
圖 3- 18	磁性液滴在旋轉磁場下的拉伸比與磁場強度關係圖 .....	47
圖 3- 19	磁性液滴在旋轉磁場下的表面張力與磁場強度之關係圖 .....	47
圖 3- 20	磁性液滴於均勻磁場以及旋轉磁場下之表面張力與磁場強度關係圖 .....	48
圖 3- 21	磁場相位差 $50^\circ$ -磁場強度與時間關係圖 .....	48
圖 3- 22	磁場作用在液滴串之運動圖 .....	49
圖 3- 23	磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	50
圖 3- 24	磁場相位差 $60^\circ$ -磁場強度與時間關係圖 .....	50
圖 3- 25	磁場作用在液滴串之運動圖 .....	51



圖 3-26 磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	51
圖 3-27 磁場相位差 $70^\circ$ -磁場強度與時間關係圖 .....	52
圖 3-28 磁場作用在液滴串之運動圖 .....	52
圖 3-29 磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	53
圖 3-30 磁場相位差 $80^\circ$ -磁場強度與時間關係圖 .....	53
圖 3-31 磁場作用在液滴串之運動圖 .....	54
圖 3-32 磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	54
圖 3-33 磁場相位差 $90^\circ$ -磁場強度與時間關係圖 .....	55
圖 3-34 磁場作用在液滴串之運動圖 .....	55
圖 3-35 磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	56
圖 3-36 磁場相位差 $50^\circ$ -液滴串運動圖 .....	56
圖 3-37 磁場相位差 $60^\circ$ -液滴串運動圖 .....	57
圖 3-38 磁場相位差 $70^\circ$ -液滴串運動圖 .....	57
圖 3-39 磁場相位差 $80^\circ$ -液滴串運動圖 .....	58
圖 3-40 磁場相位差 $90^\circ$ -液滴串運動圖 .....	58
圖 3-41 磁場相位差 $50^\circ$ -磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	59
圖 3-42 磁場相位差 $60^\circ$ -磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	59
圖 3-43 磁場相位差 $70^\circ$ -磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	60
圖 3-44 磁場相位差 $80^\circ$ -磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	60
圖 3-45 磁場相位差 $90^\circ$ -磁場與液滴串旋轉軌跡圖 .....	61
圖 3-46 磁場相位差變化比較圖 .....	61
圖 3-47 液滴串顆數=2---旋轉軌跡圖 .....	62
圖 3-48 液滴串顆數=2---角速度圖 .....	63
圖 3-49 液滴串顆數=3---旋轉軌跡圖 .....	64
圖 3-50 液滴串顆數=3---角速度圖 .....	65
圖 3-51 液滴直徑 1.67mm—旋轉運動 .....	66

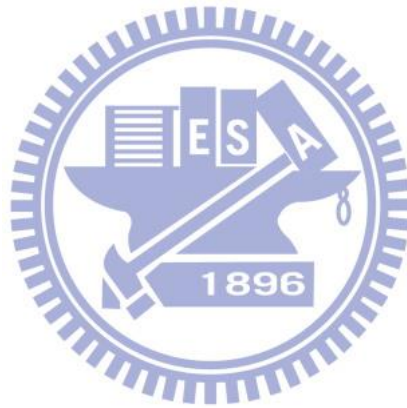
圖 3- 52 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 2---旋轉運動 .....	66
圖 3- 53 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 3---旋轉運動 .....	67
圖 3- 54 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 4---旋轉運動 .....	67
圖 3- 55 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 5---旋轉運動 .....	68
圖 3- 56 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 6---旋轉運動 .....	68
圖 3- 57 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 7---旋轉運動 .....	69
圖 3- 58 串接顆數變化與公轉頻率關係圖 .....	69
圖 3- 59 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 47G 串接顆數 2~4 運動情形	70
圖 3- 60 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 47G 串接顆數 5~7 運動情形	70
圖 3- 61 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 56G 串接顆數 2~4 運動情形	71
圖 3- 62 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 56G 串接顆數 5~7 運動情形	71
圖 3- 63 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 70.5G 串接顆數 2~4 運動情形 .....	72
圖 3- 64 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 70.5G 串接顆數 5~7 運動情形 .....	72
圖 3- 65 磁場強度變化與公轉頻率比較圖 .....	73
圖 3- 66 液滴直徑 1.67mm 磁場強度 56G 串接顆數 2~4 運動情形	74
圖 3- 67 液滴直徑 1.67mm 磁場強度 56G 串接顆數 5~7 運動情形	74
圖 3- 68 液滴直徑 1.89mm 磁場強度 56G 串接顆數 2~4 運動情形	75
圖 3- 69 液滴直徑 1.89mm 磁場強度 56G 串接顆數 5~7 運動情形	75
圖 3- 70 液滴尺寸變化與公轉頻率比較圖 .....	76
圖 3- 71 磁液滴之混合實驗示意圖 .....	76
圖 3- 72 磁液滴直徑 1.83mm 磁場強度 56G 混合情形.....	77
圖 3- 73 磁液滴直徑 2.28mm 磁場強度 56G 混合情形.....	77
圖 3- 74 磁液滴直徑 2.39mm 磁場強度 56G 混合情形.....	78
圖 3- 75 磁液滴直徑 2.56mm 磁場強度 56G 混合情形.....	78

圖 3- 76 混合面積變化與液滴尺寸比較圖 .....	79
圖 3- 77 磁液滴直徑 3.0mm 磁場強度 47G 混合情形.....	79
圖 3- 78 磁液滴直徑 3.0mm 磁場強度 56G 混合情形.....	80
圖 3- 79 混合面積變化與磁場強度比較圖 .....	80
圖 3- 80 液滴串顆數為 2 液滴直徑 1.72mm 磁場強度 56G 混合情形 .....	81
圖 3- 81 液滴串顆數為 2 液滴直徑 1.83mm 磁場強度 56G 混合情形 .....	81
圖 3- 82 液滴串顆數為 2 液滴直徑 2.17mm 磁場強度 56G 混合情形 .....	82
圖 3- 83 混合面積變化與液滴串尺寸關係圖 .....	82
圖 3- 84 混合面積變化-單獨磁液滴與液滴串顆數為 2 比較圖 .....	83



## 表目錄

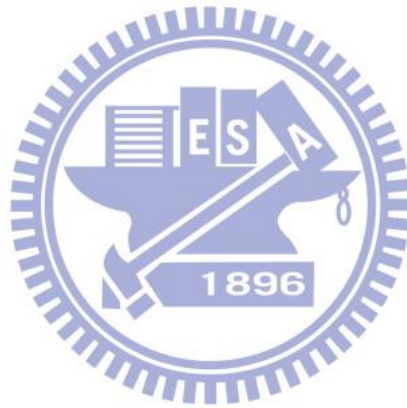
表 1-1 磁性流體的製造方法.....	14
表 2-1 線圈 A、B 在不同電壓下之磁場強度表格.....	23



## 符號說明

$B$	磁通量密度
$H$	磁場強度
$M$	磁性流體磁化率或磁化強度
$M_s$	磁性流體飽和磁化率
$\mu$	黏滯度
$\rho$	密度
$\mu_d$	磁性流體之磁導率
$\mu_m$	不可互溶流體之磁導率
$\mu_0$	真空磁導率
$p$	壓力場
$F_s$	超聚力
$a$	液滴變形之長軸長
$b$	液滴變形之短軸長
$k$	消磁因子
$E$	偏心率
$B_0$	Bond number

$V$	電壓
$f_0$	公轉頻率
$A_0$	初始混合面積
$A_n$	第 $n$ 秒後混合面積
$\Delta A$	混合面積變化



# 第一章 緒論

## 1-1 前言

在現今的科學界中，磁性流體的研究漸漸引起學者的興趣，由於磁性流體具有液體的可流動性，又可受到外加磁場的控制，打破了傳統水往低處流的觀念，所以在應用上面也有日新月異的突破，然而在於磁性流體受到磁場效應的作用下，所產生的相關物理機制，也越來越被受矚目，在此研究中磁性流體受到垂直磁場影響下所以產生的介面不穩定現象，成為了對磁性流體不可獲缺的相關研究。

本文將採用旋轉磁場所產生的磁力，研究並探討當磁性液滴置於不可互溶之流體中，此磁性液滴受磁場梯度之吸引，產生的拉伸型態與其磁性液體內部之物理性質之研究。

鐵磁性流體(ferrofluids, 或簡稱為磁性流體)為一人工合成流體，1965年由美國航空太空總署(NASA) S.S.Papell 發明，當時阿波羅計劃首創人類登入月球時，其磁性流體因而首度亮相，由於太空人漫步月球時，處於真空狀態，必須利用磁性流體使太空衣內部保持一定的大氣壓力並且能使頭盔可以自由旋轉，而發明了磁性流體。

磁性流體為平均粒徑約為10奈米，由具強磁性之鐵氧化合物，通常可將此強磁性超微粒表面包覆一層界面活性劑，而透過界面活性劑的作用或是以布朗運動之方式均勻散佈於溶媒中的膠體溶液，磁性奈米粒子受到布朗運動之影響，因此較不易受到磁力、凡得瓦力及重力的影響而產生聚集沉澱。



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，並將其均勻溶解於載基流體中。磁性流體的組成分包括奈米級鐵磁性膠粒子(氧化鐵粒子)、表面活性劑與載基流體如(圖 1-1)所示。磁性流體之鐵奈米粒子通常來自於磁鐵礦、赤鐵礦或是其它包含鐵的混合物。一般而言，導磁體通常為固體，像是鐵、鈷、鎳及其合金。而磁流體為一種固液共存的磁性材料，既具有液體的流動性，又有導磁固體的物理特性。因此我們可以利用磁性流體的這項特性，藉由外加的磁場來控制磁性流體運動方式，而磁性流體又稱為智慧型流體或功能型流體。

磁性流體的製程則可分為兩個階段:第一階段是把強磁性物質變成超微粒子或加工成超微粒子形狀的製程。第二階段是為防止強磁性超微粒子凝集，以介面活性劑包住強磁性超微粒子而分散的製程。磁性流體的製造方法除了粉碎法外，還有火花侵蝕法、共沉法、熱分解法、真空蒸發法、紫外線分解法及電著法如(表1-1)所示。

在工業方面，磁懸浮式旋轉機制使旋轉軸承少了摩擦阻力的限制，所以可製造高速旋轉儀器，如高速渦輪引擎、高速分子渦輪幫浦、汽車引擎等，超強磁鐵材料更使得發電機的發電效率大幅提昇。磁性液體在不同磁場強度作用下，其黏滯度也會有所改變，而這項特性可使磁性液體有效地應用於阻尼機構中。磁性奈米粒子也可大幅提升磁記錄媒體的超高儲存容量，如磁碟、磁碟機等。在交通方面，應用在超高速、無噪音、無磨擦兼節能省電又具環保效益的磁浮列車。目前在生物醫學方面，磁性液體中的奈米顆粒可穿過細胞膜，並且可以隨著人體代謝排除體外，廣泛地應用於多種生物醫學檢測和醫藥治療的應用上。而磁性流體中的熱磁自由對流效應也遠比一般重力環境下浮力

誘導的自然對流還要顯著，因此可用來加強變壓器等高功率散熱裝置的冷卻效率。磁性流體也可當作一種冷卻劑，當溫度高於某一定值時，磁性流體將不再具有磁性，附近溫度低的流體將會將其推出，而當溫度下降後，磁性液體又會再被吸引，將無磁性的流體推出，如此的循環之下，可達到散熱的效果。在旋轉機構之接觸面上滴些磁性流體，藉由磁場將其限制於固定的地方，使磁性液體能夠在所設計的位置上扮演油封的角色。利用磁性液體在旋轉磁場下可達到近似於旋轉塗佈的效果，可用於半導體產業的晶圓。

現階段成熟的磁性流體技術應用在許多方面，主要於(一)阻尼機制、(二)太空科技及(三)軸封技術。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。在太空科技，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。在軸封方面，因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。

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，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，於磁性流體在 1960 年代被合成成功後，一直為研究人員努力之重要項目，其中對磁液滴之界面變化更是研究之焦點之一。本文將近年來研究於一微小磁性流體液滴，受不同型式磁場下，產生之界面型態變化進行介紹，並試圖以不同接觸條件及流體組合，操控其界面型態變化。

## 1-2 文獻回顧

利用一組 Helmholtz 線圈通以固定電流，以產生垂直磁場或徑向磁場，使微小磁性流體液滴界面產生變化。若將上述之線圈組施以相同方向之電流，則可於實驗平板上產生一均勻向上之垂直磁場。界面不穩定現象可分為四大類型，於傳統磁性流體研究中受一均勻垂直磁場影響下之界面型態可分為 (1)羅森史維格不穩定;(2)迷宮型 (Labyrinthine)不穩定現象。上述羅森史維格型與迷宮型二不穩定型態，因其力學機制均不相同產生不同的界面型態，故而被歸類分屬二不同研究課題。近期則有研究利用混合界面條件，發展一簡單之實驗設計，使此二不穩定之型態同時發生，而產生(3)混合型(Hybrid)不穩定。若將 Helmholtz 線圈施以相反方向之電流，則於實驗平板上產生一線性磁場大小之徑向磁場，其型態為(4)複雜指狀化現象。

磁性流體受到磁場之作用下而產生界面不穩定現象，在工程科學和藝術上也使學者感到興趣；將磁性流體放置在載具上，施以垂直磁場於液滴中心，此時磁性流體並無加上蓋限制，磁性流體受到磁場影響，產生沿垂直磁場方向的垂直拉力，使磁性流體受到磁化，磁性液體與空氣之界面產生新型態的結構物(如圖 1-2)，此結構物即為羅森史維格不穩定現象[1]。經 Zahn 學者的研究發現，在兩個相鄰的羅森史維格結構物介面間呈現六角形的形狀(如圖 1-3)，這種情形跟磁性流體最小表面張力有相當大的關係存在[2]。

而另一個代表性研究是 Rither 等學者，在大型的載具上放置大量的磁性流體，使磁性流體擁有較大面積及厚度的條件來進行實驗，在施加垂直磁場並控制整個磁場強度，讓磁場維持在相同瞬間磁場下，在大型磁流體介面下(如圖 1-4)可以明顯地發現一些不穩定的單獨波

[3]。利用 X 射線技術 Gollwitzer et al. 觀測磁性流體表面產生之羅森史維格不穩定現象，透過有限元素法模擬出磁性流體表面趨勢，觀察到在持續增加的磁場中，因為磁場的不均勻現象使得羅森史維格現象由容器邊緣逐漸往中心發生[4] (如圖 1-5)。

磁性流體除了受到單一磁場會產生不穩定現象外，若使磁性流體同時受兩種磁場之影響也會產生另一種形式的不穩定現象。Rhodes et al.將磁性流體置於 Hele-Shaw Cell 機制中，同時施予垂直磁場及旋轉磁場，當磁性流體受垂直磁場影響時產生迷宮化現象，同時又受到順時針方向的旋轉磁場之影響而使得磁性流體分支末端產生了順時針方向的彎曲[5](如圖 1-6)。此外，其他學者利用數值模擬的方式，研究磁性流體受垂直磁場及切線方向磁場影響所產生之複雜性指狀化現象[6] (如圖 1-7)。Lebedev et al.將磁性液滴滴入相同密度之非磁性液體中，並施加旋轉磁場，發現當旋轉磁場有微小的偏差時，對於旋轉運動的液滴會有重大的影響[7] (如圖 1-8)。

然而磁性流體在不可互溶的流體，因為外加磁場的作用，使得磁性流體進行形變，因此其形變所造成的力平衡，不僅僅與磁場強度大小也密切關係，更重要的是此行遍最後趨於穩定下，其超聚力，也就是影響最大的界面張力，扮演著十分重要的腳色。因此研究磁性流體與不可互溶流體間的界面張力係數成為了現今棘手的問題。S. AFKHAMI 學者將磁性流體至於一不可互溶的流體中，並外加一垂直磁場，觀察此液滴的拉身形變現象[8](如圖 1-9)。並且根據實驗數據得知拉伸長度比與 Bond number 的關係圖(如圖 1-10)。由於液體界面張力在實驗參數下十分地困難得知，S. AFKHAMI 學者另外由數值模



擬，進行比對，並且得知此不可互溶流體與磁性流體間的界面張力係數。

Bacri 和 Salin 等學者[9]研究在磁性流體置於一外加磁場時，磁性液滴的外形會因為外加磁場的作用，而趨於橢圓形。在這形變的過程間，磁性液滴會有不穩定現象(如圖 1-11)。發生不穩定的現象於 Bond number 與拉伸長度比之關係圖裡(如圖 1-10)的 S 形曲線。藉由外加磁場尚未大於不穩定現象時的磁場前，從能量觀點得知磁性液滴被包覆於一非磁性流體溶液中的界面張力。

李彥宏[10]研究奈米級磁珠在擺動磁場的作用下，磁珠的運動情形，發現磁珠的擺動方向會隨著磁場的改變而改變，且磁珠串和擺動磁場間有延遲角，也就是有相位角差，且每當磁珠串受擺動磁場作用時，之間的延遲角差，只要每超過  $90^\circ$  磁珠的擺動方向就會與原本擺動的方向相反，(如圖 1-12)；此原因是由於磁珠受磁場的磁化後，就如同為單一磁鐵，與相鄰的磁珠間有互相作用力，稱為磁偶及力。磁偶及力也是造成磁珠串會擺動的原因，且磁偶及力的切方向，與正弦函數有關係。在此實驗中也發現，磁珠串接數目越多，擺動的角速度會下降，推估是因為 stokes drag force 的緣故。

### 1-3 研究動機及目的

自從磁性流體於美國在 1965 年，因為太空需求所而發明問世來，經過數十年載，國內外學者們的不斷研究，與業界不斷的研發，日今磁性流體不僅僅只於太空科學應用，而被廣泛地運用於機械、微機電以及近年來蓬勃發展的生醫工程。因為磁性流體的性質例如:比重、黏滯性、表面張力和光學分異性等...，皆會因為外加磁場的不同而有

所改變，此性質增加了許多工業上以及學術上研究方向。有鑑於此，了解與剖析磁性流體的物理性質、化學性質、操控能力範圍等...，儼然變得格外重要。

本研究試圖使用磁性流體具有的液體可流動性、可受外加磁場來加以控制其運動模式的特性，探討磁性流體的基本性質以及如何使用磁性流體增加不同互溶液體之混合速率，並且將所量取的數據做無因次化，建立 the magnetic Bond number 與磁性流體之伸長率的關係圖，並與參考文獻做比較。利用磁性流體具有的磁化效果，並且利用外部磁場的作用，進行磁性液滴的串接，並使之擺動、轉動、移動。為了瞭解磁性液滴在磁場的作用下，所產生的運動現象，本研究將以磁場強度、磁場相位差、磁場頻率、磁性流體尺寸等，進行逐一分類的探討，並與參考文獻進行比較。



## Technology Overview

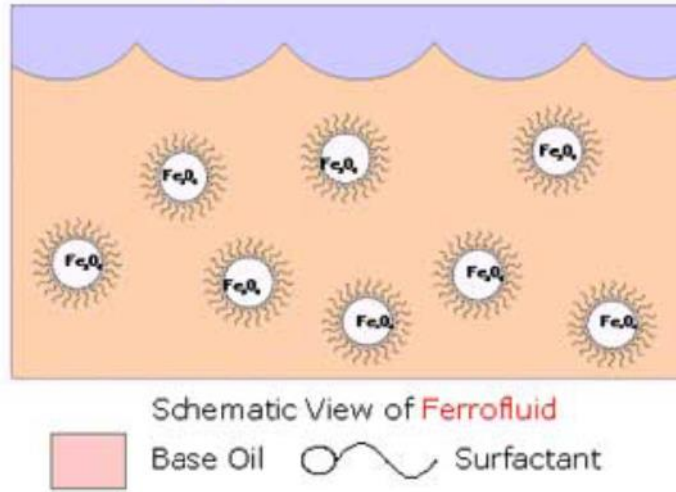


圖 1-1 磁性流體包含奈米級鐵磁性粒子、表面活性劑與載基流體

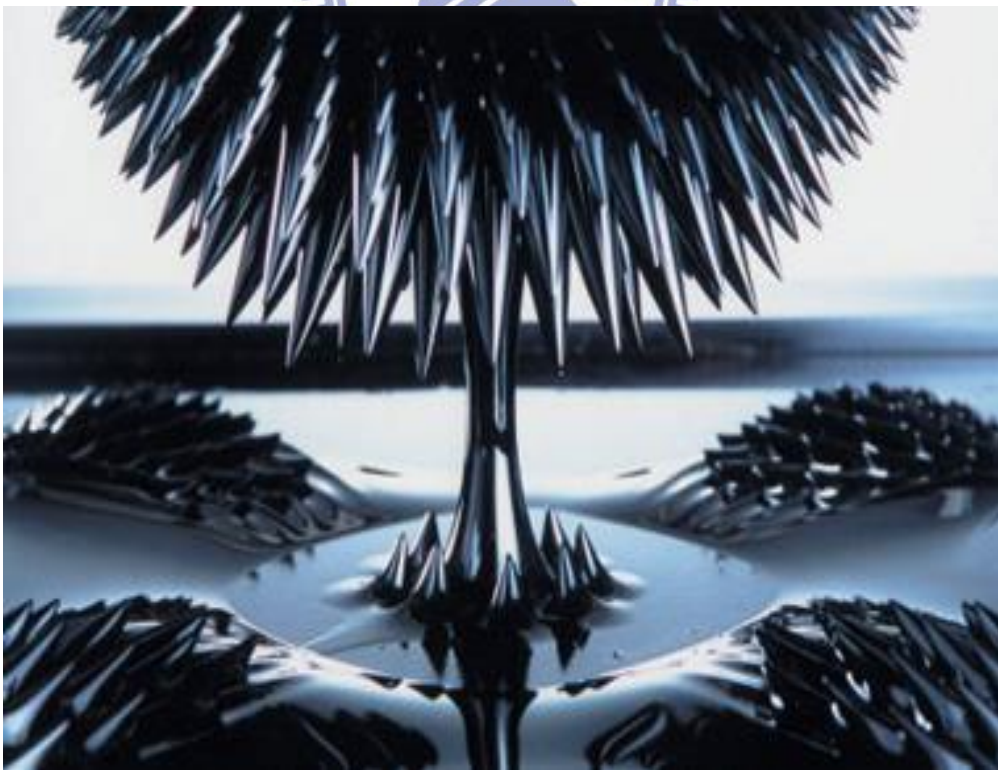


圖 1-2 羅森史維格結構物[1]



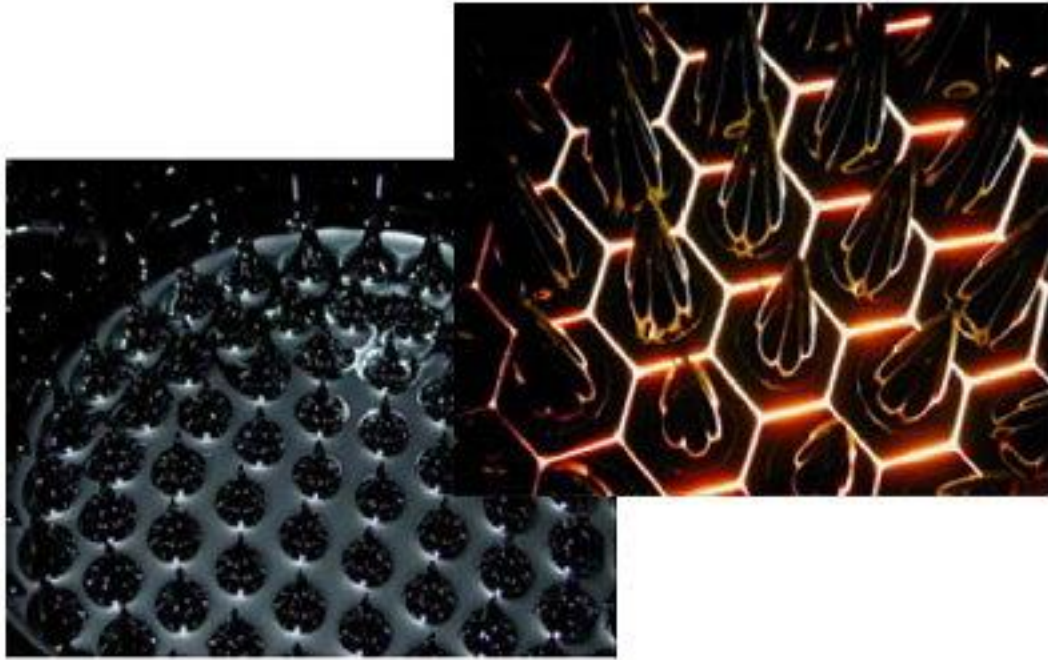


圖 1-3 介面呈現六角形的羅森史維格結構物[2]



圖 1-4 大型容器中產生不穩定單獨波[3]

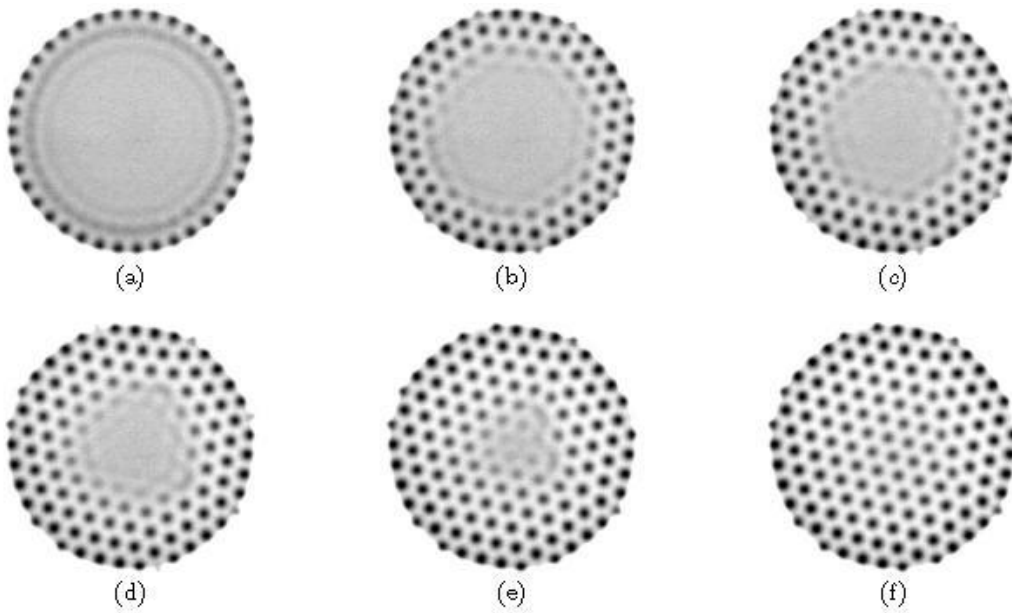


圖 1-5 利用 X 射線技術觀測磁流體表面產生羅森史維格不穩定現象

[4]

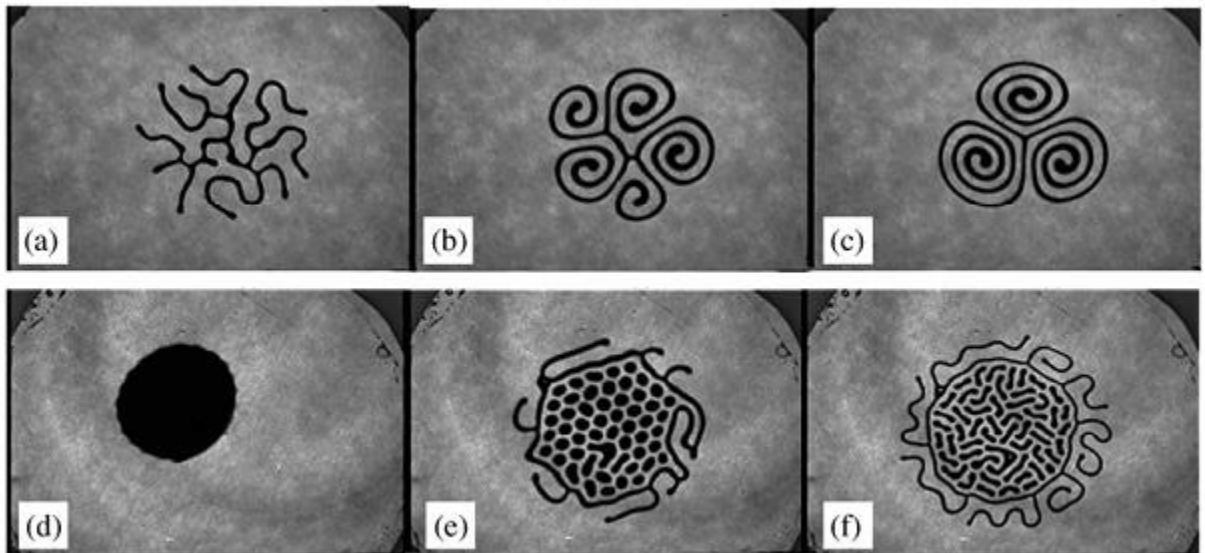


圖 1-6 受到垂直磁場及旋轉磁場影響下所產生之界面演變[16]

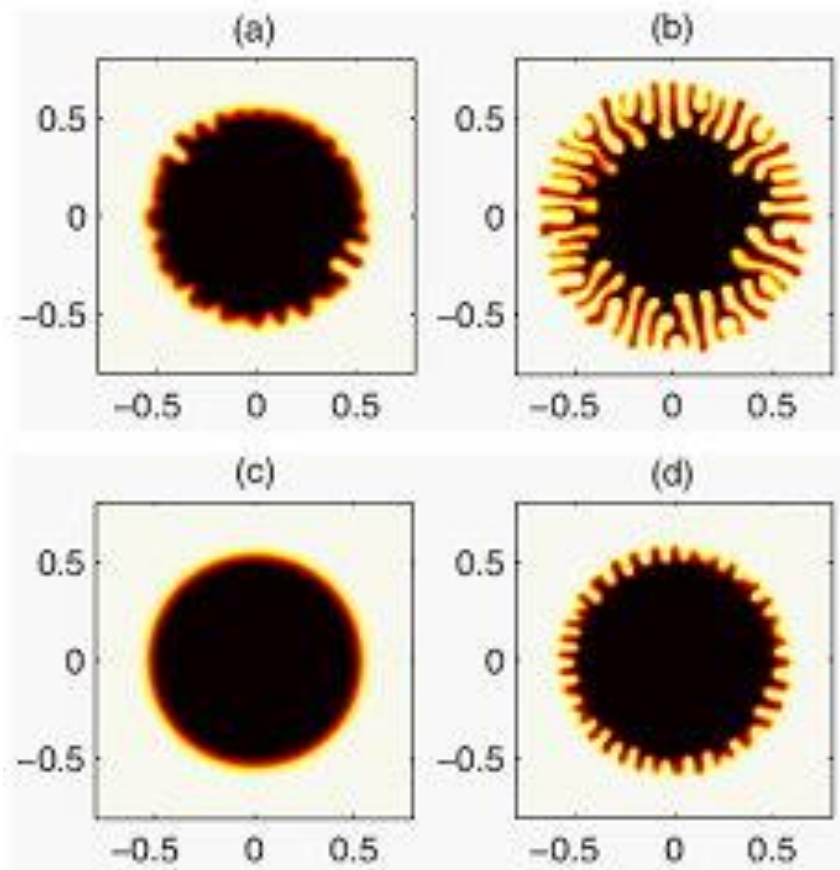


圖 1-7 模擬受垂直磁場及切線方向磁場影響所產生之現象[17]

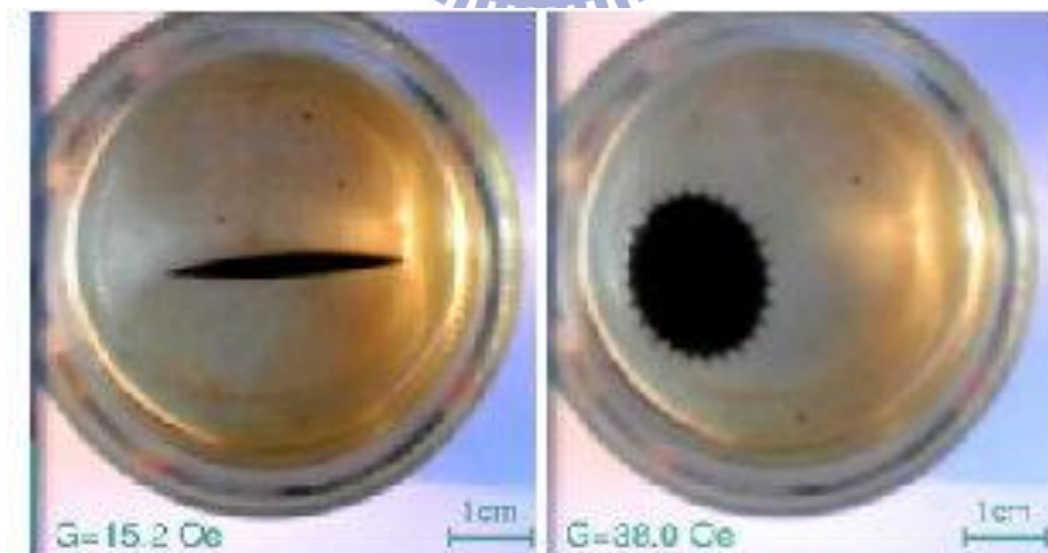


圖 1-8 磁性液滴在非磁性流體中施以旋轉磁場所產生指狀化現象

[25]



圖 1-9 磁性液滴在非磁性流體中外加垂直磁場所產生拉身形變現象

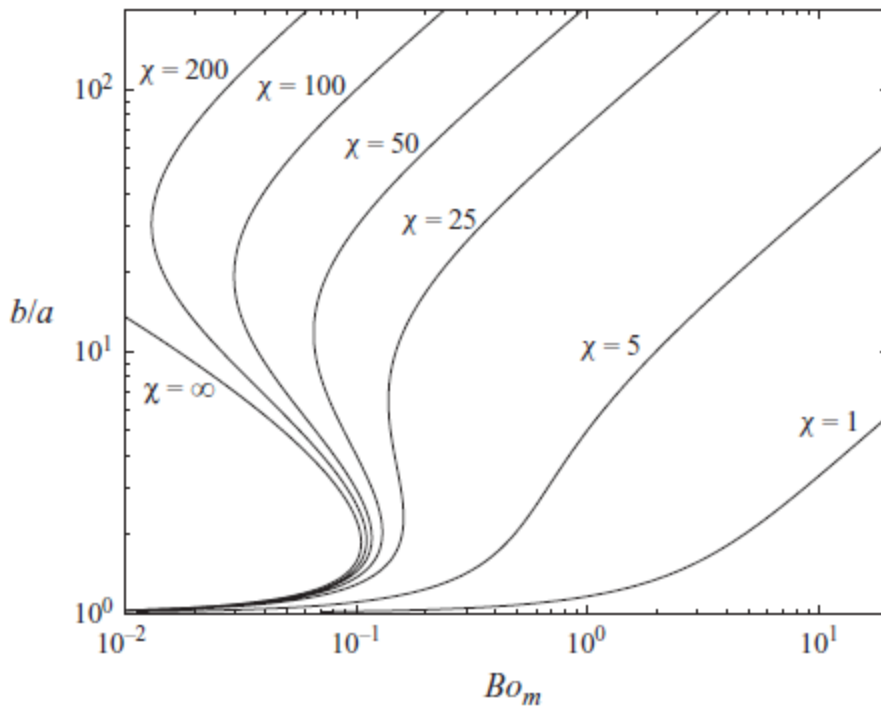


圖 1-10 拉伸長度比與 bond number 關係圖



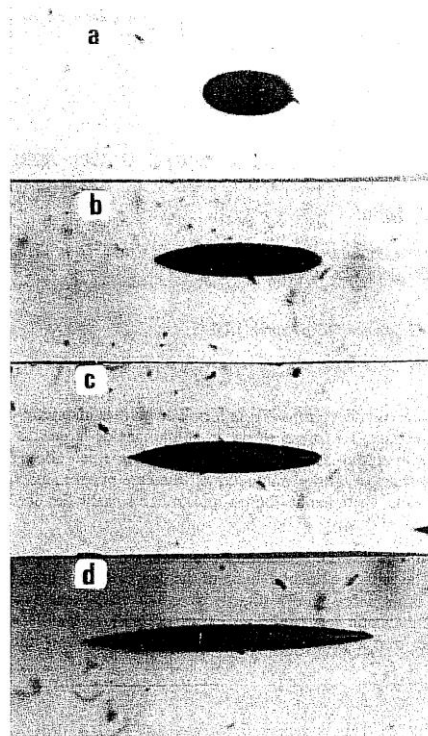


圖 1-11 此四張照片在使相同磁場 H(a)剛開啟磁場 H。(b)1 分鐘後  
(c)1/4 分鐘後(d)1 分鐘後:穩態形狀。

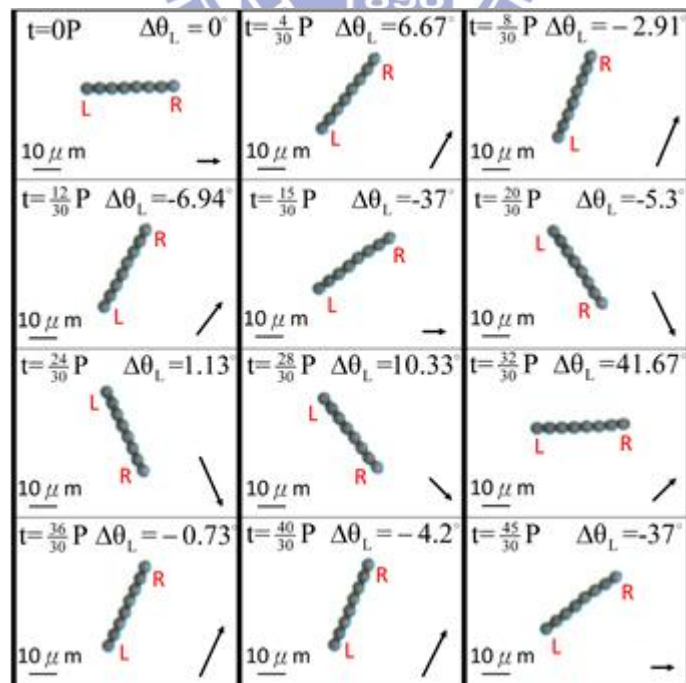


圖 1-12 磁珠串在擺動磁場作用下，擺動情形

表 1-1 磁性流體的製造方法

製造方法	說明
粉碎法	強磁性磁鐵礦在粉碎機中粉碎成超微粒子，再加介面活性劑，安定分散於溶媒，形成磁性流體。
火花侵蝕法	把金屬電極插入液體中，在液體放電，使電極金屬以膠體粒子形溶入液體中，即火花放電使電極金屬蒸發，在液體中急冷，成為超微粒子。
共沉法	用第一鐵鹽與第二鐵鹽在水中反應時，會產生磁鐵礦微粒子，即可生成磁性流體。
熱分解法	把化學上不安定的有機金屬熱分解，析出金屬單體，此時析出的金屬成為超微粒子析出溶媒中，作為磁性流體。
真空蒸發法	在抽真空的鐘罩中，把金屬加熱蒸發，在真空中急冷，作成金屬的超微粒子，形成磁性流體。
紫外線分解法	以高能量光(紫外線)取代熱分解，分解有機金屬，作為金屬的超微粒子，形成磁性流體。
電著法	把水銀為陰極裝入 $\text{FeSO}_4$ 水溶液，通電流而溶解，於是 Fe 離子析出，此時攪拌水銀析出超微粒子，分散於水銀中，預先使錫溶於水中，阻止鐵超微粒子成長，生成安定的水銀溶媒鐵膠體粒子磁性流體。

## 第二章 實驗原理、方法及設備

本實驗利用兩組 Helmholtz 線圈透過交流電電源供應器，以不同型態的磁場變化觀察磁性液滴之型態變化以及運動模式，經由可變焦距光學顯微鏡觀察磁性液滴，並將實驗影像利用 CCD 攝影機擷取影像，最後分析實驗影片及數據整理。

### 2-1 實驗儀器說明

本研究實驗硬體設備主要有光學顯微鏡平台、交流電電源供應器、Helmholtz 線圈 2 組、EMG 系列磁性流體、培養皿、高斯計、背光板、電腦。將本研究之實驗設備簡單繪製成實驗示意圖，如圖 2-1 所示。

實驗的磁場是由交流電電源供應器產生，如圖 2-2 所示，其提供固定交流電電壓給兩對 Helmholtz 線圈組，當電源供應器在開啟的瞬間會產生一均勻的磁場。實驗用的線圈是由手工打造，因此與理論上有些許的誤差，在 30mm×30 mm 平面上共 961 個測量點，磁場大小由高斯計 SYPRIS 6010 如圖 2-3 所示，設定一固定電壓振幅，量測各點兩個方向的磁場分別為  $H_x$ 、 $H_y$  如圖 2-4、圖 2-5 所示，觀察  $H_z$  方向的磁場遠小於  $H_x$ 、 $H_y$  方向磁場，故可忽略  $H_z$  對磁場之影響。由圖 2-4、圖 2-5 看出本文所採用之旋轉磁場與徑向距離  $r$  呈近似線性關係，定義磁場  $H_r$  為  $[H_x^2 + H_y^2]^{1/2}$ ，如圖 2-6、圖 2-7 所示。交流電電源供應器之電壓震幅是維持固定，在 10V、15V、20V 電壓大小下，兩組線圈磁場強度，如表 2-1 所示。



磁性液滴界面發展過程中，影像資料藉由 CCD 攝影機，從上拍正視方向直接錄製整個液滴變形過程。然後於 CCD 攝影機上加裝光學鏡頭，以至於能夠清晰得觀察到微細界面型態，最後影片經由傳輸線儲存到電腦，影片再加以擷取圖片大小為 720×480 像素，最後透過商業軟體 MATLAB 程式語言，加以分析實驗數據，繪製出實驗圖形與表格以得到精準的實驗結果。實驗裝置之實體圖如圖 2-8 所示。

## 2-2 實驗步驟

首先架設實驗用的 CCD 攝影機，調整攝影機的色溫及彩度、改善對比並調整解析度使得液滴輪廓清晰可辨。調整背光板亮度以改善對鏡頭光線的反射以免影響到截圖的品質。最後開啟影像擷取軟體，完成初步實驗儀器準備。

先將一與磁性流體不可互溶之混合流體至於培養皿中，使之靜置數分鐘後，將磁性流體藉由針頭滴入培養皿中，使得不可互溶混合流體完全包覆磁性液滴，藉由電腦控制交流電電源供應器，使得兩組 Helmholtz 線圈產生  $\pi/2$  之相位差，進而開啟旋轉磁場，利用 CCD 攝影機錄製影像，並傳至電腦做紀錄。

本實驗中所使用的磁性流體為型號 ENG905 的輕礦油基磁性流體，而培養皿內的混合流體則是由甘油(丙三醇)和蒸餾水依重量百分濃度 10:1 調配而成。其中 EMG905 磁性流體的黏滯度  $\mu=9$  cp、密度  $\rho_d=1.24$  g/ml 和飽和磁化率  $M_s=400$  Oe 和原始磁化率  $X=1.9$ ，如圖 2-9、圖 2-10 所示。甘油的黏滯度  $\mu=1500$ cp、密度  $\rho=1.252$ gm/ml。蒸餾水的黏滯度  $\mu=0.001003$ kg/m\*s、密度  $\rho=998.2$ kg/m<sup>3</sup>。

## 2-3 理論背景

磁性液滴在一不可互溶之流體內並置於一均勻磁場下，其物理背景必滿足(1)Maxwell equations、(2)the Navier-Stokes equations

Maxwell equations 在一非導電磁性液體下，其公式如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{B}(x, t) = \begin{cases} \mu_d \mathbf{H} & \text{在磁性流體中} \\ \mu_m \mathbf{H} & \text{在不可互溶之流體中} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{B}$  為磁通量密度， $\mathbf{H}$  為磁場強度， $\mu_d$  為磁性流體之磁導率， $\mu_m$  為不可互溶流體之磁導率。

在本實驗中，不可互溶流體為甘油與蒸餾水之混合溶液，因此其磁導率近似真空磁導率  $\mu_0$ ，因此吾人將  $\mu_m = \mu_0$ ，並令  $\phi$  為磁場純量，且  $\mathbf{H} = \nabla \phi$ ，因此滿足以下：

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \phi) = 0 \quad (3)$$

本實驗假設磁場磁化強度為線性  $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$ ， $\chi$  為磁化率， $\chi = (\mu - \mu_0) / \mu_0$  因此磁通量密度  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H}$ ，其流體力學動量方程式 Navier-Stokes equations:

$$\rho \frac{du}{dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 u + F_s + \mu_o M \nabla H \quad (4)$$

其中  $u$  為速度場、 $p$  為壓力場、 $\eta$  為黏滯係數、 $\rho$  為密度以及  $F_s$  為超聚力(body force)。

$$F_s = \rho g \hat{e}_z + \sigma \kappa' \quad , \quad \kappa = -\nabla \cdot n \quad (5)$$

其中  $\sigma$  為界面張力係數、 $\kappa$  為主要曲率、 $n$  為一在界面處方向朝外之單位向量。

根據 S.Afkhami 學者等人的文獻中提到，將 Navier-Stokes equations 與 Maxwell equations 結合並簡化得到 the magnetic Young-Laplace equation:

$$-[[p]] + \left[ \left[ \frac{\mu}{2} ((H \cdot n)^2 - (H \cdot t)^2) \right] \right] = \sigma \kappa \quad (6)$$

其中  $[[x]]$  為  $x_{matrix} - x_{drop}$  分別在磁性液滴與不可互溶流體之界面上， $t$  為正交正切向量。

由於磁性液滴完全被包覆於一不可互溶之混合流體中，因此可以使用邦德數(Bond number)來定義，公式如下:

$$Bo_m = \frac{\mu_o H_o^2}{\sigma \kappa_o} \quad (7)$$

其中 $H_0$ 為線圈磁場強度， $\kappa_0$ 為磁性液滴尚未變形前之曲率，Bond number 是磁場強度與界面張力的無因次化比值。

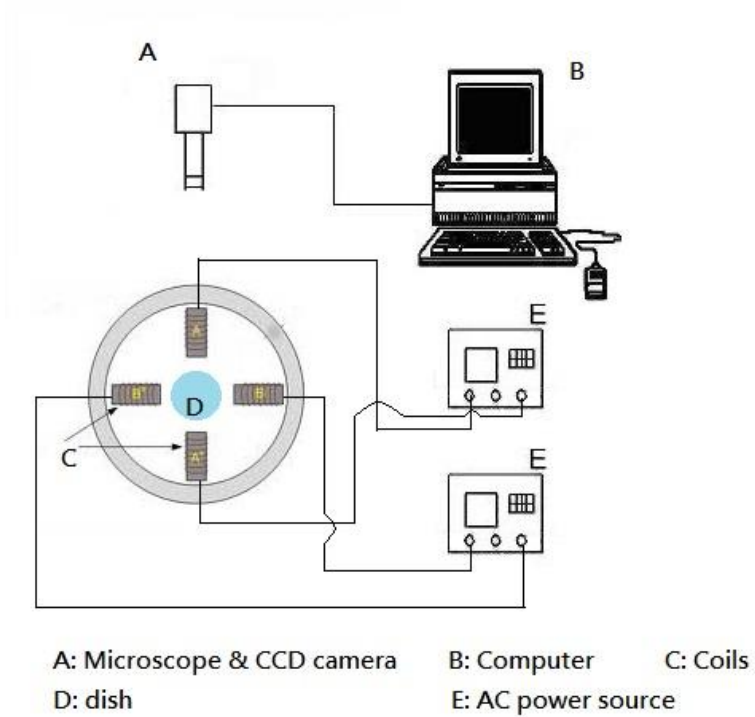
根據 S.Afkhami 學者等人的文獻中提到，Bond number 可轉換成為與磁性液滴拉伸比之關係形式，其公式如下：

$$Bo_m = \left[ \frac{1}{\chi} + k \right]^2 \left( \frac{b}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \left( 2 \frac{b}{a} - \left( \frac{b}{a} \right)^{-2} - 1 \right) \quad (8)$$

其中 a 為液滴變形後之長軸長，b 為液滴變形後之短軸長，k 為消磁因子。

$$k = \left( \frac{1-E^2}{2E^3} \right) \left( \ln \frac{1+E}{1-E} - 2E \right), \quad E = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (9)$$

其中 E 為偏心率(eccentricity)。



1896  
 圖 2-1 實驗設備示意圖

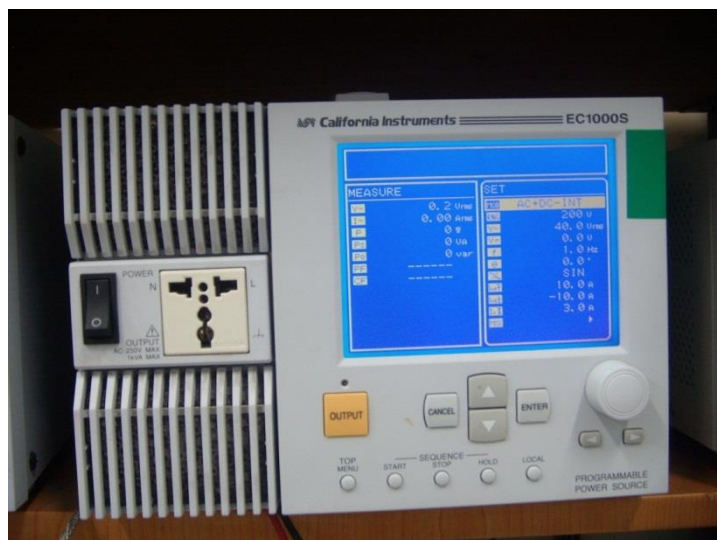


圖 2-2 交流電電源供應器



圖 2-3 高斯計 SYPRIS 6010

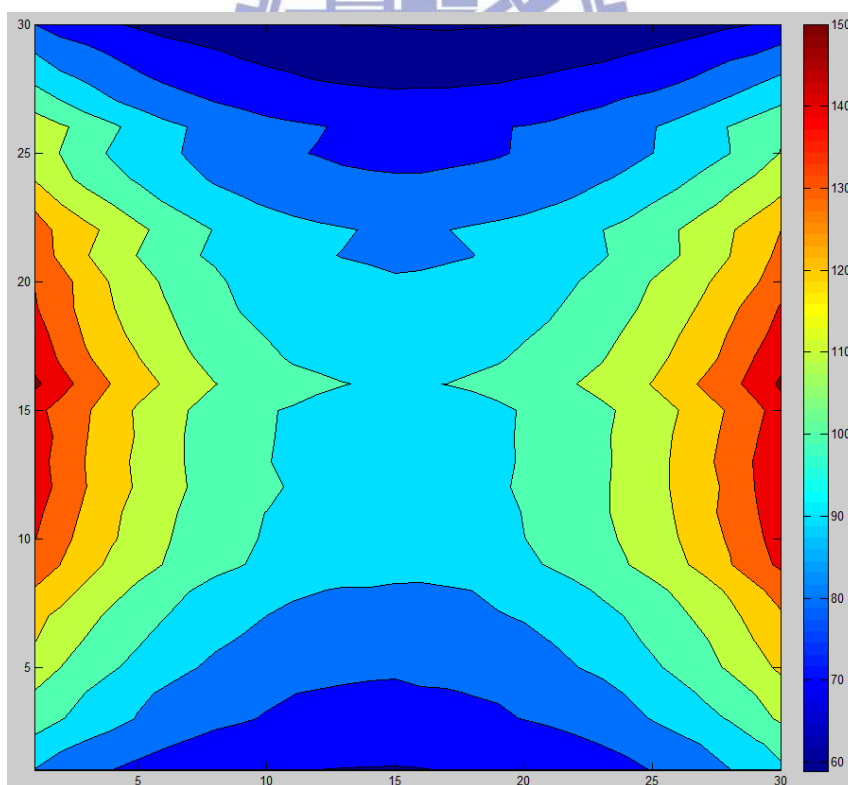


圖 2-4 X 軸上線圈磁場分布圖

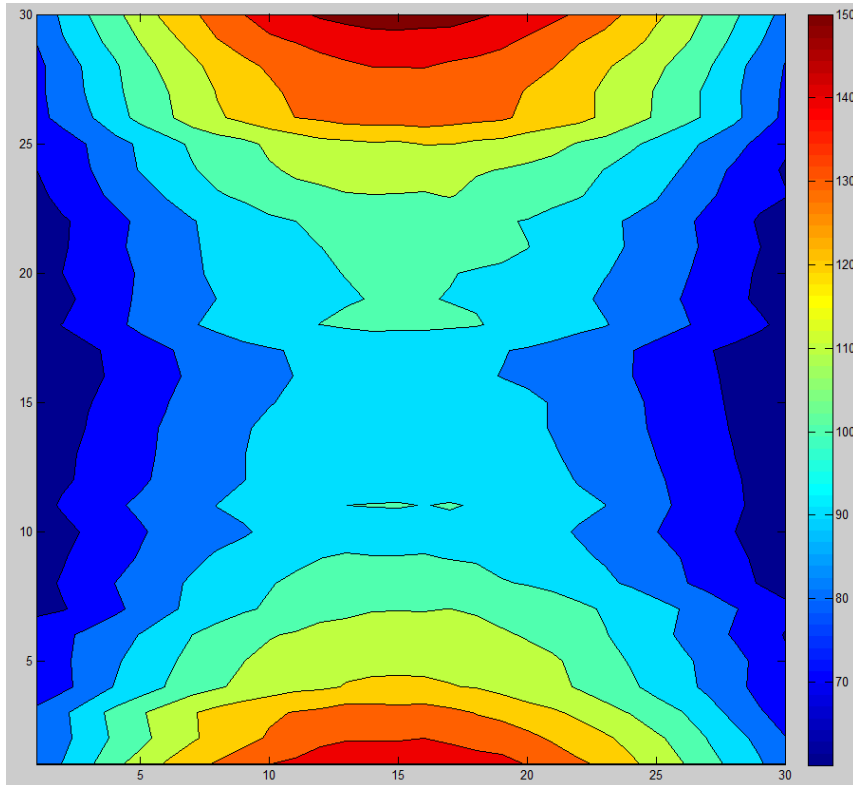


圖 2-5 Y 軸上線圈磁場分布圖

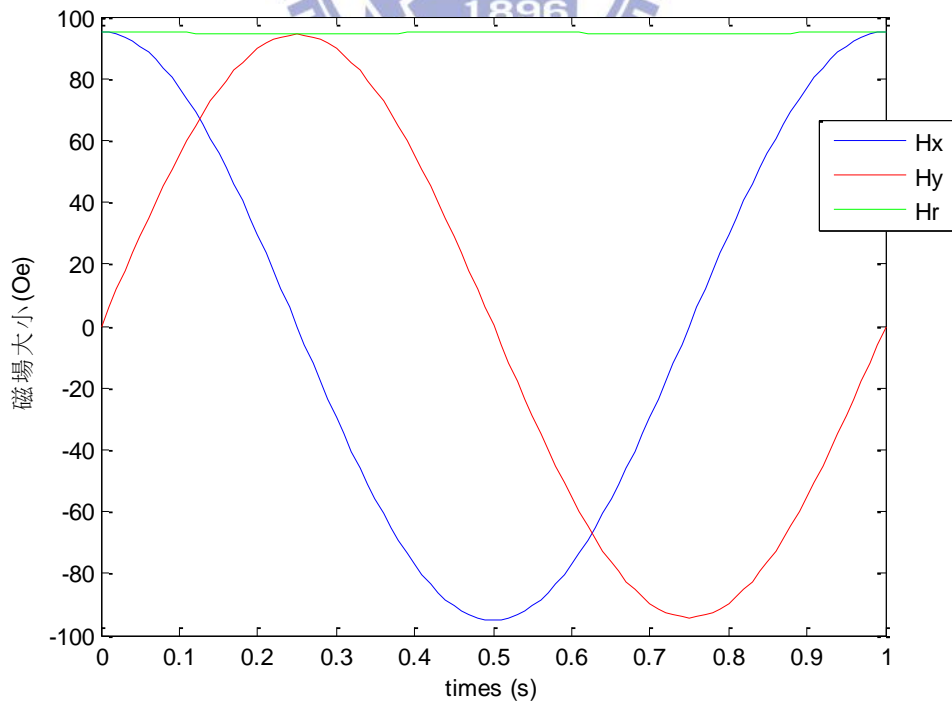


圖 2-6 原點之磁場與時間關係圖



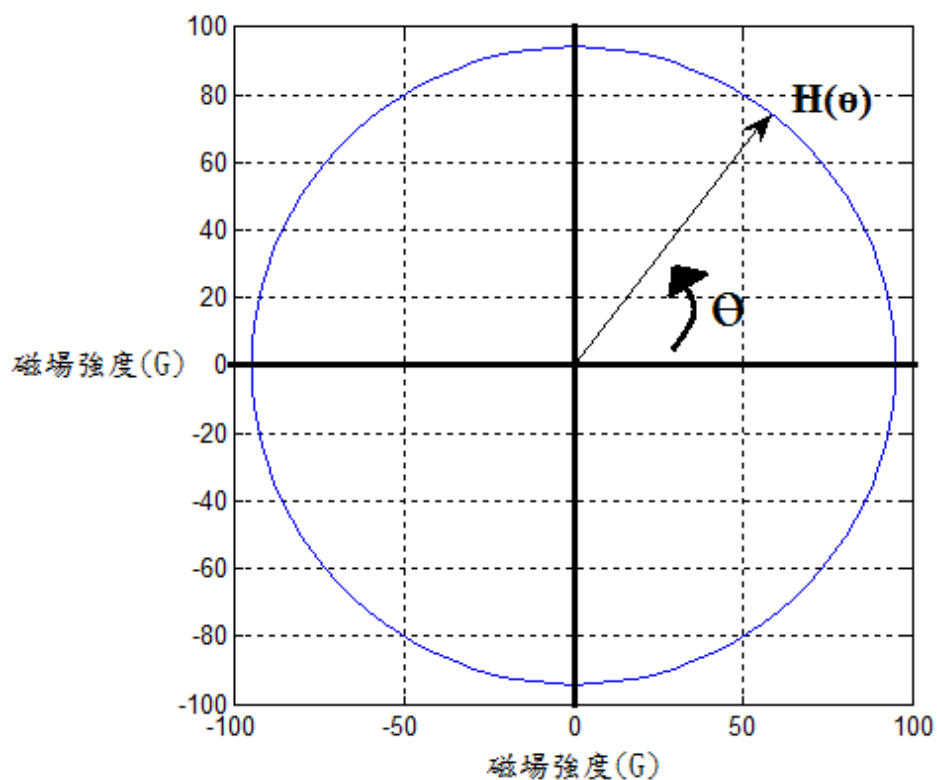


圖 2-7 原點磁場的極座標圖

表 2-1 線圈 A、B 在不同電壓下之磁場強度表格

	A coil	B coil	A+B coil
磁場強度(G)	$4.709775V \sin 2\pi t$	$4.75883V \cos 2\pi t$	$4.75883V \cos 2\pi t \hat{i}$ $+ 4.709775V \sin 2\pi t \hat{j}$
V=10	$47.09775 \sin 2\pi t$	$47.5883 \cos 2\pi t$	$47.5883 \cos 2\pi t \hat{i}$ $+ 47.09775 \sin 2\pi t \hat{j}$
V=15	$70.646625 \sin 2\pi t$	$71.38245 \cos 2\pi t$	$71.38245 \cos 2\pi t \hat{i}$ $+ 70.646625 \sin 2\pi t \hat{j}$
V=20	$94.1955 \sin 2\pi t$	$95.1766 \cos 2\pi t$	$95.1766 \cos 2\pi t \hat{i}$ $+ 94.1955 \sin 2\pi t \hat{j}$

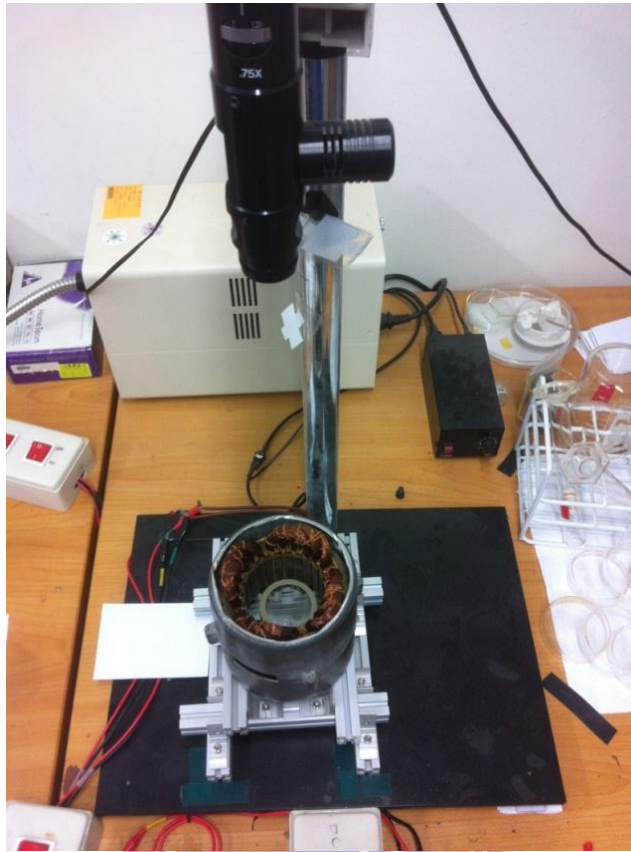


圖 2-8 實驗裝置實體圖



圖 2-9 輕礦油基系列 EMG900/EMG901/ EMG 905

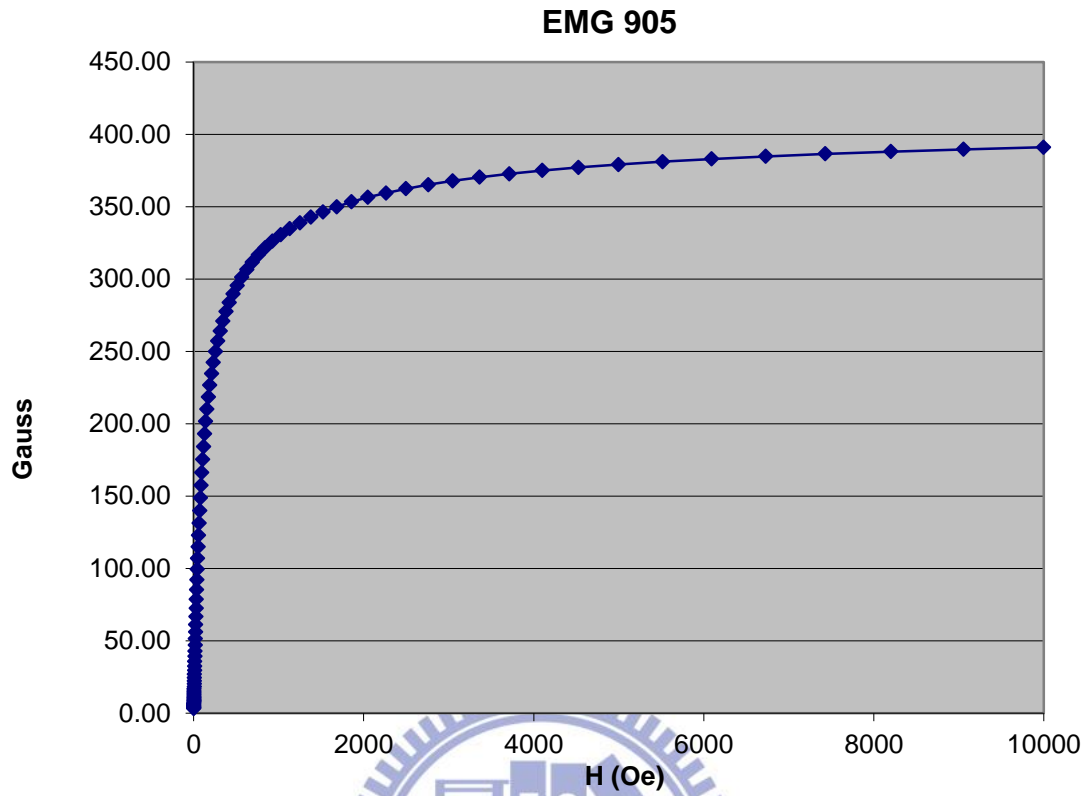
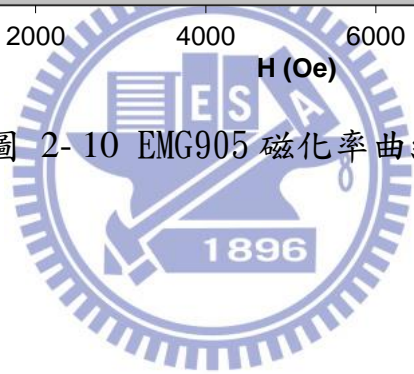


圖 2-10 EMG905 磁化率曲線



## 第三章 結果與討論

本實驗觀察與分析磁性液體於不可溶之混合溶液中，開啟電源產生磁場，在磁場的作用下出現界面變形之現象，探討磁場強度、液滴拉伸比和界面張力對液滴運動模式之影響。本文進行了數量眾多的研究，不同初始液滴直徑大小和不同的磁場強度，並找出能府和其運動模式之理論。

### 3-1 磁性流體之界面張力

#### 3-1-1 單一磁場實驗

將磁性液滴(液滴直徑約  $d=2.078\text{mm}$ )置入單一方向磁場中，並受到  $V=10\text{ V}(H_0=47\text{ Oe})$  之外界均勻磁場吸引，並在一混合溶液(甘油與蒸餾水 10:1)中進行二維運動與變化，如圖 3-1 所示。圖 3-1 是由電子顯微鏡拍攝紀錄之系列照片。剛開始磁性液滴注入於一充滿混合溶液之器皿內，對應於線圈磁力中心點處，如圖 3-1 所示。當磁場啟動產生磁力，磁性液滴被磁化，磁性液滴保持初始形狀，慢慢朝著磁力方向拉伸，如圖 3-1。隨著磁場持續作用，到磁性液體拉身長度不在改變為止，並關閉磁場，使原磁性液滴回到原點處，再開啟磁場  $V=12(H_0=56.4\text{ Oe})$ ，直到磁性液滴拉伸長度不在改變為止，如圖 3-2。並依序開啟實驗磁場  $V=14(H_0=65.8\text{ Oe})$ 、 $V=16(H_0=75.2\text{ Oe})$ 、 $V=18(H_0=84.6\text{ Oe})$ 、 $V=20(H_0=94\text{ Oe})$ 。分別如圖 3-3、圖 3-4、圖 3-5、圖 3-6。為了增加實驗的準確度，吾人分別以三個不同尺寸大小的磁性液滴分別施以同步驟，並進行攝影以及實驗分析，其三個不同尺寸大小液滴分別為直徑:  $2.157\text{mm}$ 、 $2.842\text{mm}$ 、 $3.315\text{mm}$ 。如圖 3-7(a)、圖 3-7(b)、圖 3-7(c)。

為了建立磁性流體 EMG905 的拉伸長度比與磁場強度關係圖，並根據 Bacri 和 Salin 等學者[9]所使用的能量方程式為

$$E_T = E_M + E_S \quad (1)$$

$$E_M = -\frac{VH^2\mu_m}{8\pi} \frac{1}{1/\chi+n} \quad (2)$$

$$E_S = \sigma 2\pi a^2 K [K + \epsilon^{-1} \sin^{-1} \epsilon] \quad (3)$$

其中 $E_T$ 為總能量， $E_M$ 為作用在磁性流體上的電磁能， $E_S$ 為作用在磁性流體上的表面張力能。 $V$ 為磁性液滴體積， $H$ 為磁場強度， $n$ 為消磁因子 $n = K^2(-2\epsilon + \ln[(1 + \epsilon)/(1 - \epsilon)])$ ， $K = b/a$ ， $\epsilon$ 為偏心率。

然而根據力平衡史的作用在磁性液體上的總能量必定趨於最小值，由此我們可以得知

$$\frac{\partial}{\partial K} (E_T = E_M + E_S) = 0 \quad (4)$$

並且得到以下無因次參數

$$\frac{\mu_m H^2 R_0}{\sigma} = g(K) \quad (5)$$

$$g(K) = 8\pi(n + 1/\chi)^2 \epsilon^2 K^{-4/3} \left(1 + 2K^2 + \frac{(1-4K^2)}{\epsilon K \sin \epsilon}\right) \left(-6 + \left(\frac{2+K^2}{\epsilon}\right) \ln \frac{1+\epsilon}{1-\epsilon}\right)^{-1} \quad (6)$$



由圖 3-1~圖 3-7，可觀察出磁性液滴的拉伸比例隨著磁場的增加而變大，如圖 3-8 所示，確實因為磁場的增加而使得拉伸比變大成一線性。

因為上文所介紹的 Bond number  $Bom$  與  $g(K)$  存在著常數的差別，並將實驗數據分析可得到  $\sigma$  表面張力為  $2.85 \times 10^{-3} \text{N/m}$ ，如圖 3-9 可看出在磁場強度小於 50Oe 前表面張力有負值，主要原因是由於本文所使用的理論方程式是為方便探討磁場作用在磁性流體上的能量以即使磁性流體變形的能量而進行簡化，所以當磁液滴拉伸比尚未超過 1.6 時，所計算的表面張力會有負值，但是在磁場強度大於 50Oe 後，其表面張力  $\sigma$  可以發現趨於穩定，因此我們可以得知磁性流體與混和溶液間的表面張力。

### 3-1-2 旋轉磁場實驗

將磁性液滴(直徑  $d=2.842\text{mm}$ )置入旋轉磁場中，並受到  $V=10$   $V(Hr=47 \text{ Oe})$  之外界旋轉磁場吸引，並在一混合溶液(甘油與蒸餾水 10:1)中進行二維運動與變化，如圖 3-10 所示。圖 3-10 是由電子顯微鏡拍攝紀錄之系列照片。剛開始磁性液滴注入於一充滿混合溶液之器皿內，對應於線圈磁力中心點處，如圖 3-10。當磁場啟動產生磁力，磁性液滴被磁化，磁性液滴保持初始形狀，朝著磁力線方向拉伸，並且改變其拉伸方向。隨著磁場持續作用，到磁性液體旋轉一圈為止，並關閉磁場，使原磁性液滴回到原點處，再開啟磁場  $V=12(H_0=56.4 \text{ Oe})$ ，直到磁性液滴旋轉一圈為止，如圖 3-11。並依序開啟旋轉磁場  $V=14(Hr=65.8 \text{ Oe})$ 、 $V=16(Hr=75.2 \text{ Oe})$ 、 $V=18(Hr=84.6 \text{ Oe})$ 、 $V=20(Hr=94 \text{ Oe})$ 。分別如圖 3-12、圖 3-13、圖 3-14、圖 3-15。為了

增加實驗的準確度，吾人分別以兩個不同尺寸大小的磁性液滴分別施以同步驟，並進行攝影以及實驗分析，其兩個不同尺寸大小液滴分別為直徑:2.947mm、3.105mm。如圖 3-16、圖 3-17。

再次從圖 3-10~圖 3-17，觀察到經由一旋轉磁場作用於磁性液滴時，磁性液滴的拉伸比也與磁場大小成一線性，如圖 3-18 所示。

並且再次經由無因次參數 $g(K)$ 的分析，得到表面張力與磁場強度的關係圖，如圖 3-19 所示。由圖 3-19 可觀察出當磁場強度小於 50Oe 時，表面張力有負值，但當磁場強度高於 50Oe 後，表面張力趨於穩定並且可得知此表面張力為 $2.9785 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 。

我們將上述得單一磁場實驗以及旋轉磁場實驗的實驗數據進行比較，由於磁性液滴會因為外加磁場的作用而被磁化，並且朝著磁力線方向運動。因此通於旋轉磁場之中，磁性液滴會因為旋轉磁場的磁力線隨著週期而轉動，並且根據實驗量測，旋轉磁場中心位置的磁場強度大小維持定值，方向隨著交流電週期而改變。因此假設磁性液滴受旋轉磁場作用下且無延遲，進行影片截圖，取得磁性液滴在磁場方向為 Y 軸時的拉身形變，並且與一均勻磁場實驗數據做比較。其表面張力與磁場強度關係圖如圖 3-20 所示。

因此我們得知使用旋轉磁場作為外在磁場條件與單一磁場的條件下，此兩者機制近乎一樣，差別在旋轉磁場的磁場方向隨著交流電頻率而改變。所以由本實驗可以量測到磁性流體與其不可互溶之混合溶液間的表面張力 $\sigma$ ， $\sigma \approx 2.91425 \times 10^{-3} \pm 2.2\% \text{N/m}$ 。

## 3-2 磁性流體的運動行為

### 3-2-1 磁液滴在不同磁場相位差之運動情形

將磁性液滴置入旋轉磁場中，且旋轉磁場的相位角差為  $50^\circ$ ，並受到  $H(i, j) = 47 \sin(2\pi t + 50^\circ)\hat{i} + 47 \sin(2\pi t)\hat{j}$  (Oe) 外部旋轉磁場吸引，並在混合溶液(甘油與蒸餾水 10:1)中進行二維運動與變化，其磁場強度與時間的變化如圖(3-21)，圖(3-22)為磁性液滴串顆數=2 時在該磁場下的運動情形，我們發現液滴串在該磁場的作用下會有上下擺動的現象，由圖(3-22)可以看出，在磁場開啟時，液滴串受到磁場的影響而旋轉，此時我們假設液滴串與垂直軸的夾角為  $\alpha$ ，旋轉磁場方向為  $\beta$ ，由於液滴串無法跟上旋轉磁場的方向改變，所以會有一相位角差，旋轉磁場方向與液滴串之間的相位差為  $\theta = (\beta - \alpha)$ ，只要  $\theta$  超過  $90^\circ$ ，液滴串的旋轉方向就會改變，而當  $\theta$  超越下一次  $90^\circ$  時也就是  $\theta > 180^\circ$ ，液滴串的旋轉方向又會再次改變，因此出現這種上下擺動的運動情形。

根據磁偶極力在圓柱坐標系(r,  $\theta$ )中

$$\vec{F} = \frac{3\mu_0\mu_d\vec{m}^2}{4\pi r^4} [(1 - 3\cos^2\Delta\theta)\hat{r} + \sin(2\Delta\theta)\hat{\theta}]$$

$\mu_d$  磁流體之磁導率;  $\vec{m}$  磁偶極距; r 磁液滴間距離

由磁偶極力可以觀察出在圓柱坐標系中的切方向， $\theta$  方向，是讓液滴串能旋轉的關鍵，從此公式便能說明，磁場與液滴串間的相位角

差  $\Delta\theta$  每超過  $(n+1)\pi/2$ ，液滴串的  $F_\theta$  會反向一次，導致旋轉方向也相反。

由圖(3-22)我們可以看出，液滴串裡各別的單一液滴旋轉方向與速度確實是隨著磁場方向的改變而無延遲，當我們將液滴串接成液滴串時，各液滴之間本身會受到磁偶極力的吸引而成串，因為磁場的方向改變，導致各液滴間磁偶極力的吸引及相斥以及磁力的作用，使得液滴串會隨著磁場方向改變而旋轉，由於液滴串在旋轉時會有阻力，所以會和磁場產生相位差，導致液滴串會擺動。液滴串與磁場間的相位差變化如圖(3-23)。接著將旋轉磁場的磁場相位角差調至  $60^\circ$ ，其磁場為  $H(I, j) = 47 \sin(2\pi t + 60^\circ)\hat{i} + 47 \sin(2\pi t)\hat{j}$  (Oe)，其磁場強度與時間的變化如圖(3-24)，液滴串顆數=2 時受磁場的作用如圖(3-25)，液滴串與磁場間的相位差變化如圖(3-26)。接著再將旋轉磁場的磁場相位角差調至  $70^\circ$ ，其磁場為  $H(I, j) = 47 \sin(2\pi t + 70^\circ)\hat{i} + 47 \sin(2\pi t)\hat{j}$  (Oe)，其磁場強度與時間的變化如圖(3-27)，液滴串顆數=2 時受磁場的作用如圖(3-28)，液滴串與磁場間的相位差變化如圖(3-29)。旋轉磁場的磁場相位角差調至  $80^\circ$ ，其磁場為  $H(I, j) = 47 \sin(2\pi t + 80^\circ)\hat{i} + 47 \sin(2\pi t)\hat{j}$  (Oe)，其磁場強度與時間的變化如圖(3-30)，液滴串顆數=2 時受磁場的作用如圖(3-31)，液滴串與磁場間的相位差變化如圖(3-32)。旋轉磁場的磁場相位角差調至  $90^\circ$ ，其磁場為  $H(I, j) = 47 \sin(2\pi t + 90^\circ)\hat{i} + 47 \sin(2\pi t)\hat{j}$  (Oe)，其磁場強度與時間的變化如圖(3-33)，液滴串顆數=2 時受磁場的作用如圖(3-34)，液滴串與磁場間的相位差變化如圖(3-35)。而由實驗數據發現，當旋轉磁場的磁場相位角達到  $70^\circ$  時，液滴串與磁場方向的相位角差為  $n\pi < \theta < (n+1)\pi/2$  時，液滴串旋轉方向與磁場旋轉方向為同向。而  $(n+1)\pi/2 < \theta < (n+1)\pi$  時液滴串旋轉方向與磁場旋轉方向相反，而且液



滴串旋轉方向與磁場旋轉方向為同向的時間大於液滴串旋轉方向與磁場旋轉方向為反向的時間，此時意味著液滴串已經開始進行圓周旋轉運動。其中  $n=0, 1, 2, 3, \dots$ ; 而旋轉磁場的磁場相位差達到  $90^\circ$  時，也就是我們所謂的等速度圓周運動的旋轉磁場。液滴串顆數為 3，磁場相位差分別為  $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $90^\circ$  時，液滴串受磁場的作用分別如圖(3-36)、圖(3-37) 圖(3-38) 圖(3-39) 圖(3-40)，磁場與液滴串旋轉軌跡圖，分別為圖(3-41)、圖(3-42)、圖(3-43)、圖(3-44)、圖(3-45)若我們由旋轉磁場的磁場相位差變化如圖(3-46)觀察，由圖(3-46)便能發現旋轉磁場的磁場相位差越接近  $90^\circ$  時，磁場強度的振幅也隨之趨緩而達到定值。代表著旋轉磁場的磁場角速度變化，也趨於平緩而達定值。由此便能得知磁場角速度變化得越快，液滴串越無法跟上磁場旋轉的方向，導致液滴串與磁場方向為同向的時間與反向的時間趨於一致旋轉。倘若我們比較液滴串顆數為 2，其液滴串旋轉軌跡圖如圖(3-47)，由圖我們可以明憲看出，液滴串在磁場相位差  $50^\circ$  與  $60^\circ$  時，液滴串呈現來回震盪，且可以看出液滴串擺動的幅度在磁場相位差  $60^\circ$  時大於磁場相位差  $50^\circ$ ，可以從圖(3-46)看出磁場相位差越小時，磁場轉動的角速度也相對地變大，意味著磁場與液滴串的相位差變化也越快，也相對的越快達到  $\theta > 90^\circ$ ，則液滴串旋轉的角度也相對變小。由圖(3-48)磁場與液滴串旋轉角速度圖中，發現在磁場相位差分別為  $50^\circ$  以及  $60^\circ$  時，角速度為正的與角速度=0 的基準線所構成的面積，是液滴串轉動方向與磁場轉動方向相同的時候之總角度變化；而角速度為負的與角速度=0 的基準線所構成的面積，是液滴串轉動方向與磁場轉動方向相反的時候之總角度變化。可以看出，液滴串與磁場轉動方向相同時的旋轉角度等於相反時的旋轉角度，從這可以更明確的瞭解液滴串為什麼會上下擺動。在磁場相位差  $70^\circ$ 、 $80^\circ$  以及  $90^\circ$  時，角速度為正的與角速度=0 的基準線間所構成的面積磁場大於



角速度為負的與角速度=0的基準線間所構成的面積，液滴串開始旋轉。若再將液滴串顆數為3的旋轉軌跡與磁場相位變化如圖(3-49)與液滴串旋轉角速度圖如圖(3-50)進行比較，從圖(3-47)與圖(3-49)中，液滴串顆數為2時的旋轉角速明顯大於液滴串顆數為3。

根據 Stokes' drag force

$$F_D = 3\pi\mu U d_e K$$

其中 $d_e$ 為與液滴串的總體積相同下之球狀直徑，K為調整因子。

$$d_e = \left(\frac{6}{\pi} \text{Volume}\right)^{1/3}$$

由此我們可以得知，若串接液滴顆數越多，則等效後得到的 $d_e$ 也越大，在相同流速下，阻力 $F_D$ 也變大，導致液滴串旋轉的速度變慢。

### 3-2-2 串接磁液滴在顆數變化下運動之情形

將磁性流體置入旋轉磁場中，磁場強度為 $H_r=56(\text{Oe})$ ，並在混合溶液(甘油與蒸餾水 10:1)中進行二維運動與變化。利用影片截圖每秒30張進行後處理分析，如圖(3-51)為磁液滴顆數為1，液滴直徑為1.53mm的運動情形，由圖我們可以發現磁液滴的旋轉方向與旋轉磁場的旋轉方向一致，且無延遲。磁液滴顆數為2，液滴直徑為1.67mm的液滴串運動情形如圖(3-52)，由圖我們可以發現液滴串整體的旋轉方向已經與旋轉磁場的旋轉方向有相位角差，此原因可能是因為阻力和各磁液滴自身旋轉所產生的流場變化所造成。

磁液滴顆數為3，液滴直徑為1.67mm的液滴串運動情形如圖(3-53)，磁液滴顆數為4，液滴直徑為1.67mm的液滴串運動情形如圖(3-54)，磁液滴顆數為5，液滴直徑為1.67mm的液滴串運動情形如圖(3-55)，

磁液滴顆數為 6，液滴直徑為 1.67mm 的液滴串運動情形如圖(3-56)，磁液滴顆數為 7，液滴直徑為 1.67mm 的液滴串運動情形如圖(3-57)，在此我們設定液滴串整體旋轉的頻率為公轉頻率 $f_{orbital}(f_o)$ ，公轉頻率 $f_o$ 與液滴串顆數變化如圖(3-58)。由圖(3-58)可以觀察出液滴串顆數越多則公轉頻率下降。

### 3-2-3 串接磁液滴在磁場強度變化下運動之情形

將磁性流體置入旋轉磁場中，分別以磁場強度為 $H_r=47(\text{Oe})$ 、 $H_r=56(\text{Oe})$ 以及 $H_r=70.5(\text{Oe})$ 進行比較。磁性流體在混合溶液(甘油與蒸餾水 10:1)中進行二維運動與變化。液滴直徑 1.44mm，在磁場強度為 $H_r=47(\text{Oe})$ 下液滴串旋轉變化如圖(3-59)、圖(3-60)；在磁場強度為 $H_r=56(\text{Oe})$ 下液滴串旋轉變化如圖(3-61)、圖(3-62)；在磁場強度為 $H_r=70.5(\text{Oe})$ 下液滴串旋轉變化如圖(3-63)、圖(3-64)。利用影片截圖每秒 30 張進行後處理分析，分別計算在磁場強度為 $H_r=47(\text{Oe})$ 、 $56(\text{Oe})$ 、 $70.5(\text{Oe})$ 之液滴串顆數不同的公轉頻率 $f_o$ ，並且進行比較如圖(3-65)。由圖(3-65)可以明顯觀察出磁場強度越強則液滴串的公轉頻率也越高，因為磁場作用在液滴串上的力矩越大使得液滴串的旋轉角速度增加，因此液滴串的旋轉角加速度增加也使得公轉頻率增加。

### 3-2-4 串接磁液滴在尺寸變化下運動之情形

將磁性流體置入旋轉磁場中，磁場強度為 $H_r=56(\text{Oe})$ ，並在混合溶液(甘油與蒸餾水 10:1)中進行二維運動與變化。分別以磁液滴直徑為 1.44mm、1.67mm 以及 1.89mm 進行比較。在液滴直徑為 1.44mm 的液滴串隨旋轉磁場作用的變化如圖(3-61)、圖(3-62)。在液滴直徑為

1.67mm 的液滴串隨旋轉磁場作用的變化如圖(3-66)、圖(3-67)。在液滴直徑為 1.89mm 的液滴串隨懸置轉磁場作用的變化如圖(3-68)、圖(3-69)。並利用影片截圖每秒 30 張進行後處理分析，液滴串的公轉頻率因磁液滴尺寸變化如圖(3-70)，由圖(3-70)中發現磁液滴直徑變大，則公轉頻率下降。因為液滴尺寸變大，阻力 $F_D$  變大，導致液滴串旋轉角速度下降。

### 3-3 磁性流體之運用

由上述種種實驗中，我們粗略的了解磁性流體在旋轉磁場下的運動模式，在本節中，將利用磁液滴因旋轉磁場的作用下的自身旋轉以及磁液滴串接成液滴串後的整體旋轉，來使周圍的流體進行混合。此實驗下，我們使用相同的混合溶液(甘油:純水=10:1)但將其一半染色，而另一半維持原來的顏色，並將磁液滴置入該溶液中如圖(3-71)，開啟磁場，進行影片拍攝以及後處理分析。

#### 3-3-1 磁液滴在尺寸變化下之混合情形

將磁性液滴置入欲混合的兩溶液界面間，並將磁場強度設定在 56(Oe)，磁性液滴直徑大小分別為 1.83mm、2.28mm、2.39mm 以及 2.56mm，其旋轉混合運動如圖(3-72)、圖(3-73)、圖(3-74)、圖(3-75)。可以觀察到磁液滴受磁場的作用而旋轉會帶動周圍的流體進行混合。並且使用影像後處理分析，設定灰階值 0~255，將起始尚未開啟磁場時的有顏色區域設為初始面積 $A_0$ ，接著開啟磁場後，有顏色的區域會與無顏色區域混合，此時再將混合後的有顏色區域再次計算有顏色區域的面積 $A_n$ ，則混合面積變化 $\Delta A$ 。 $\Delta A = A_n - A_0$ ，n 為開啟磁場後所經過的時間。混合面積變化與時間的關係，如圖(3-76)。由圖(3-76)觀察出磁液滴直徑越大則混合的面積越大，因為液滴直徑越大受相同的磁場作用下，拉伸長度就會越長，所以能混合的面積就越大。

### 3-3-2 磁液滴在磁場變化下之混合情形

將磁性液滴置入欲混合的兩溶液界面間，磁性液滴直徑為 3.0mm，磁場強度為 47(Oe)時，其旋轉混合運動如圖(3-77)，磁性液滴直徑為 3.0mm，磁場強度為 56(Oe)，其旋轉混合運動如圖(3-78)，由圖(3-77)與圖(3-78)，可以看出來磁場強度變化影響最大的就是磁液滴的拉伸比，明顯的圖(3-78)被拉伸成橢圓形後的長軸大於圖(3-77)，並且從混合面積變化與時間關係圖，如圖(3-79)中可以看出，磁場較大的情況下，混合面積也較大。

### 3-3-3 液滴串在尺寸變化下之混合情形

將串接磁液滴置入欲混合的兩溶液界面間，磁場強度設定在 56(Oe)，而由磁液滴直徑 1.72mm 組成的液滴串、磁液滴直徑 1.83mm 組成的液滴串以及磁液滴直徑 2.17mm 組成的液滴串。由於液滴串接的難度，所以本文只使用液滴串顆數為 2 來作運用。其分別如圖(3-80)、圖(3-81)和圖(3-82)。由圖(3-80)、圖(3-81)、圖(3-82)可以看出，液滴串裡的液滴直徑越大則混合的面積也越大，從後處理分析的混合面積變化與時間關係圖，如圖(3-83)更能說明液滴直徑越大則混合的面積也越大。倘若我們比較單獨磁液滴與液滴串的混合面積變化，我們取磁液滴直徑 1.83mm 做比較如圖(3-72)與圖(3-81)，其混合面積變化與時間關係圖，如圖(3-84)。由圖中我們可以觀察出若是相同液滴直徑大小，則液滴串的混合面積較單獨液滴來的多，由於液滴串受磁場作用整體拉伸後的旋轉半徑大於單獨磁液滴的旋轉半徑，所以整體混合面積較大。



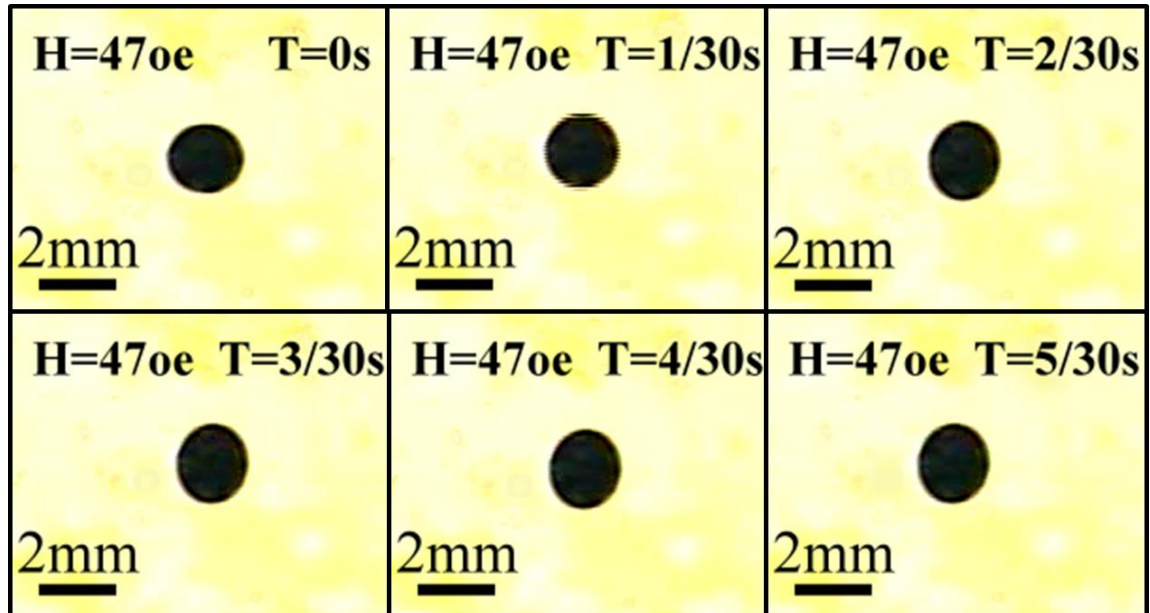


圖 3- 1 均勻磁場作用( $H_0=47\text{ Oe}$ )， $d=2.078\text{mm}$  拉伸形變過程

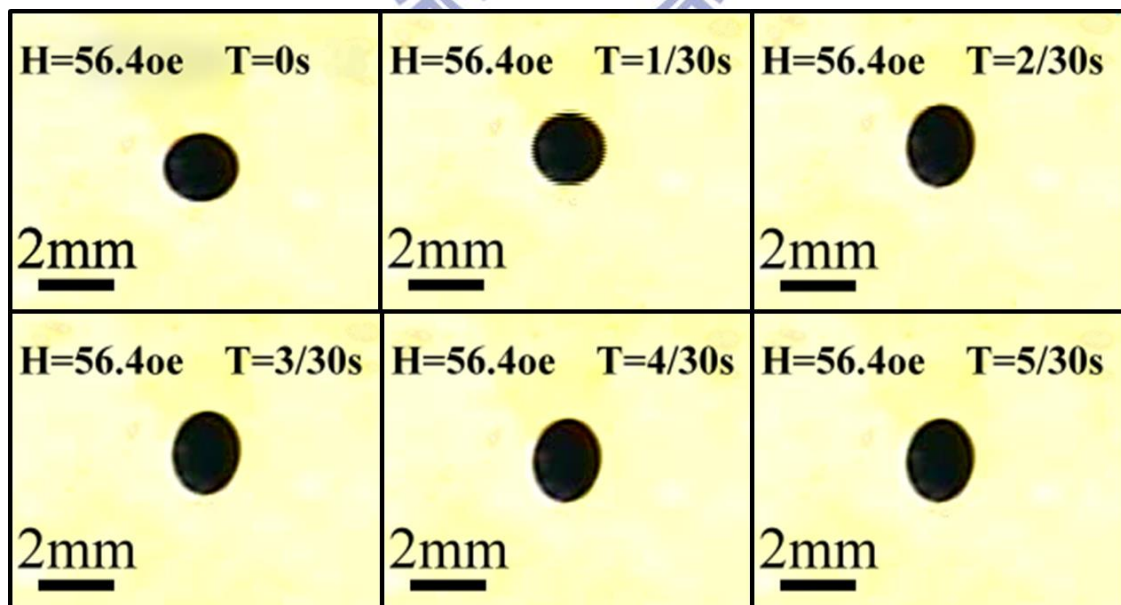


圖 3- 2 均勻磁場作用( $H_0=56.4\text{ Oe}$ )， $d=2.078\text{mm}$  拉伸形變過程



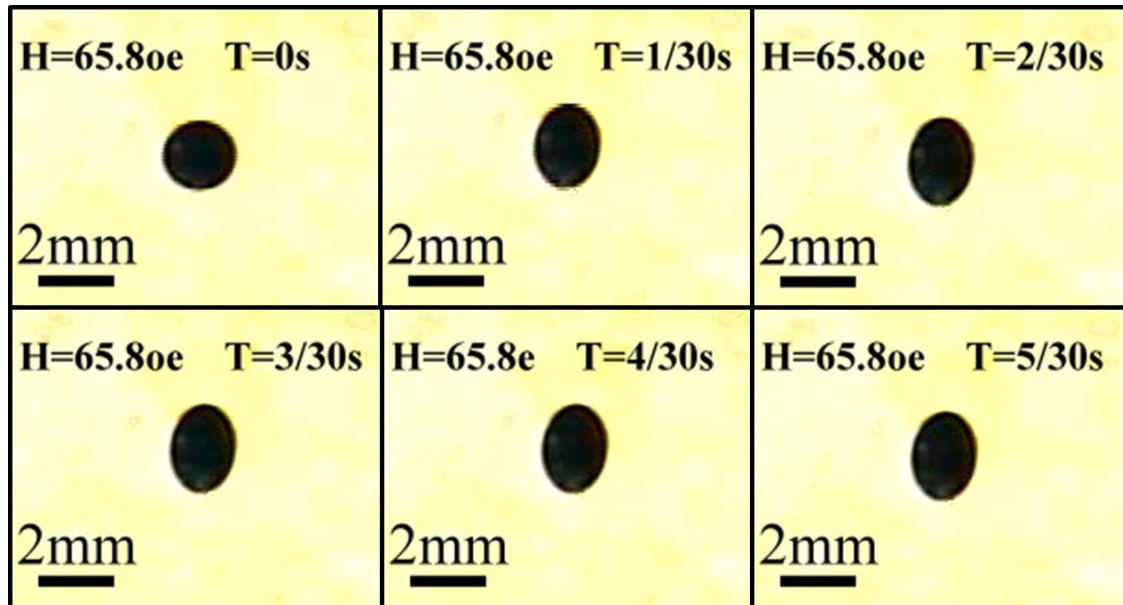


圖 3-3 均勻磁場作用 ( $H_0=65.8\text{ Oe}$ )， $d=2.078\text{mm}$  拉伸形變過程

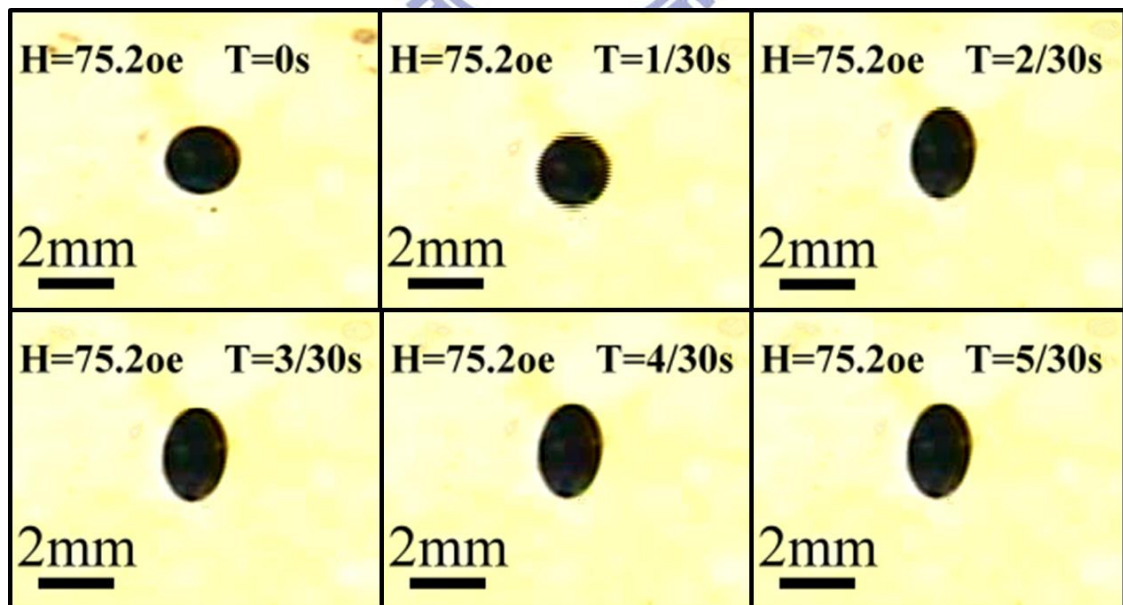


圖 3-4 均勻磁場作用 ( $H_0=75.2\text{ Oe}$ )， $d=2.078\text{mm}$  拉伸形變過程

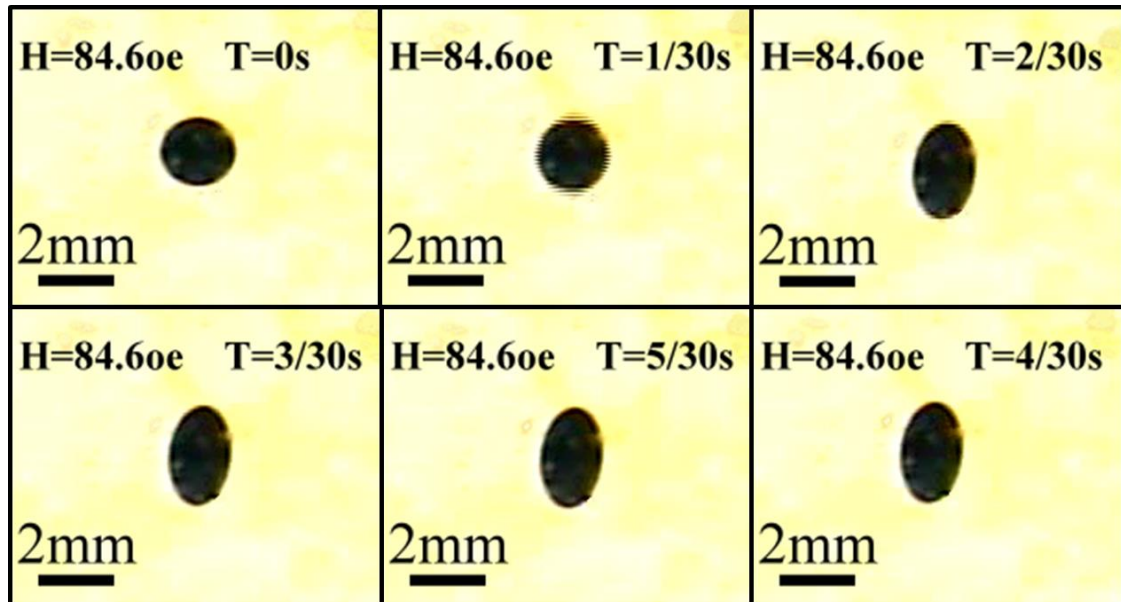


圖 3-5 均勻磁場作用( $H_0=84.6\text{ Oe}$ )， $d=2.078\text{mm}$  拉伸形變過程

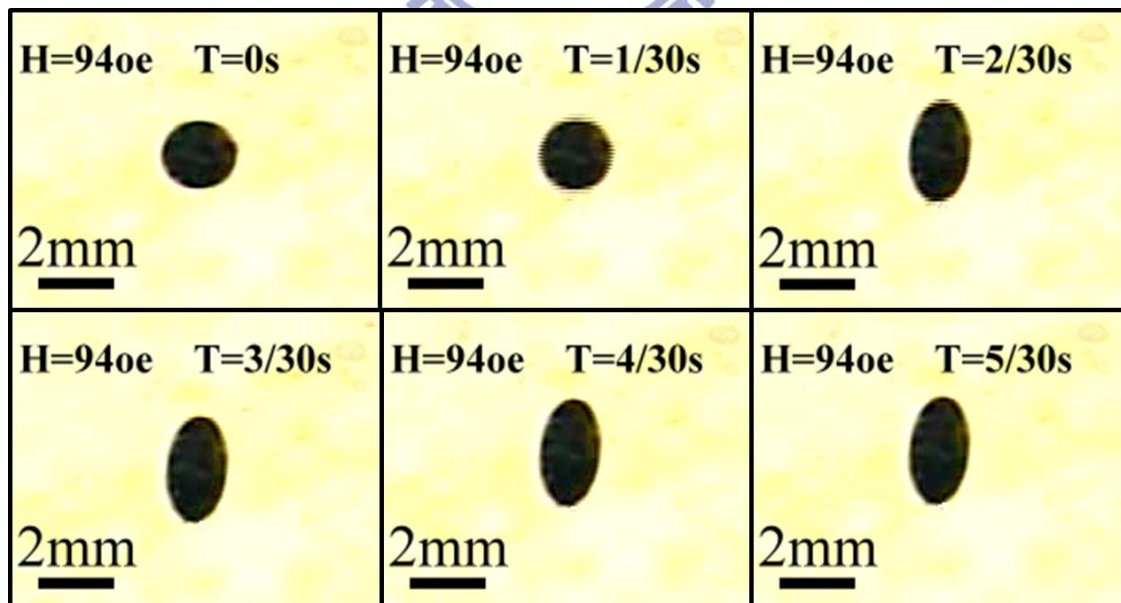


圖 3-6 均勻磁場作用( $H_0=94\text{ Oe}$ )， $d=2.078\text{mm}$  拉伸形變過程

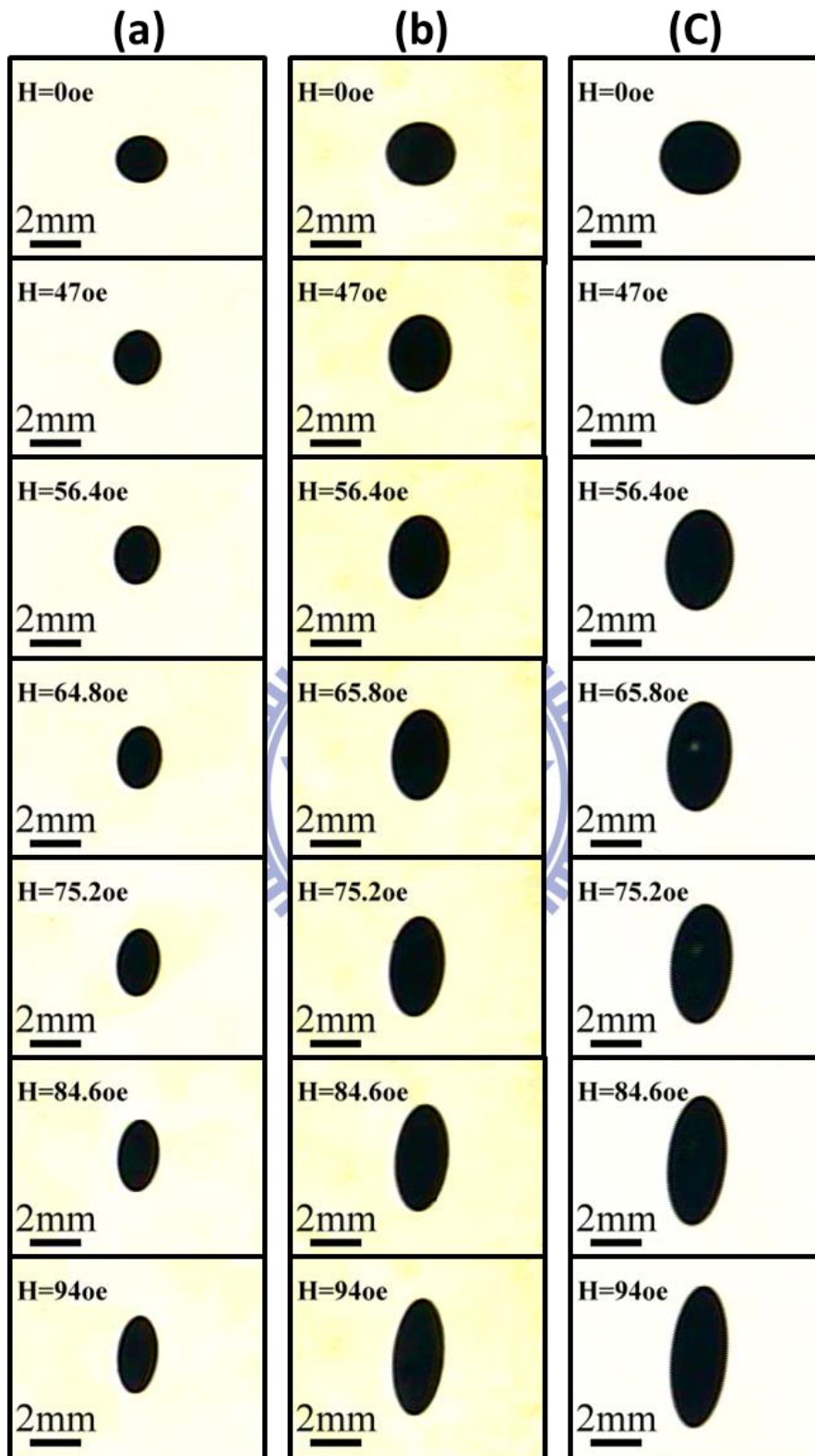


圖 3-7 均勻磁場作用( $H_0=47\sim 94$  Oe) 拉伸形變

(a)  $d=2.157\text{mm}$  (b)  $d=2.842\text{mm}$  (c)  $d=3.315\text{mm}$

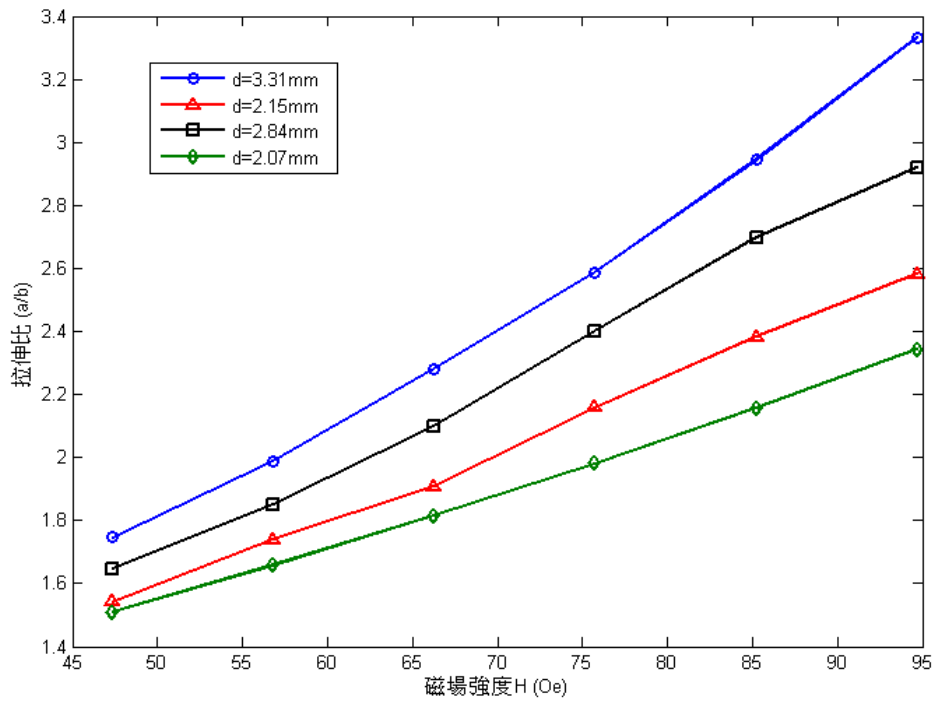


圖 3-8 磁性液滴在均勻磁場作用下的拉伸比與磁場強度關係圖

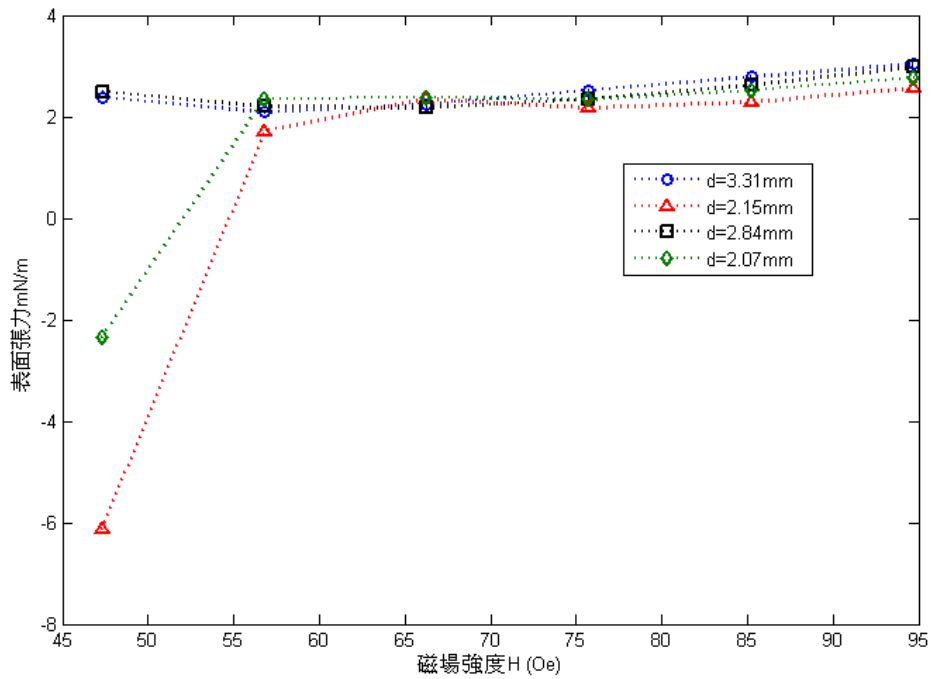


圖 3-9 磁性液滴之表面張力與磁場強度關係圖



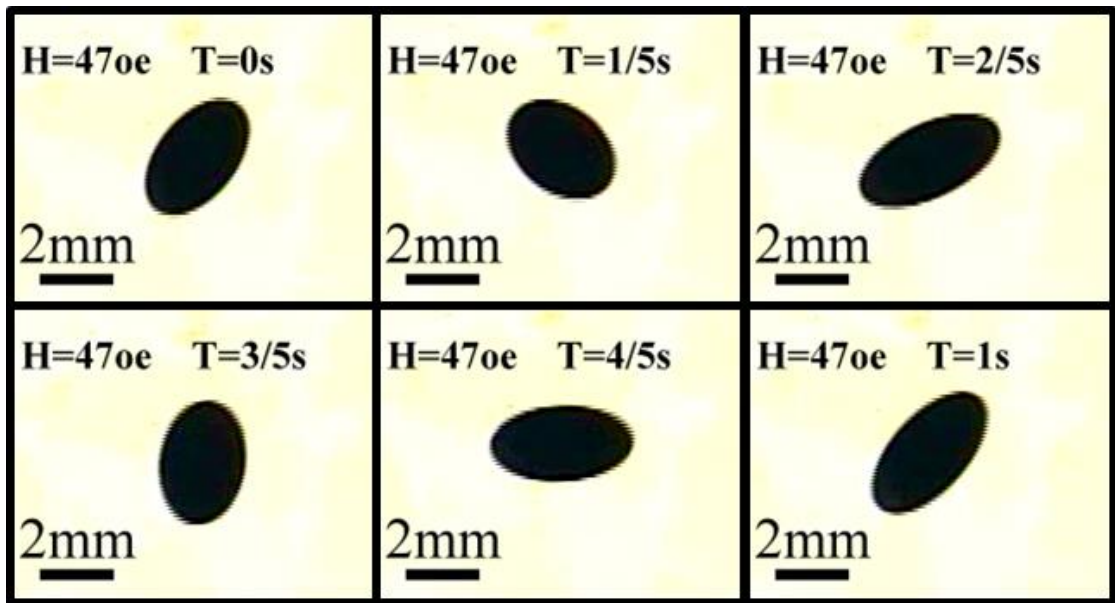


圖 3- 10 旋轉磁場作用( $H_0=47$  Oe) ,  $d=2.842$ mm 拉伸形變過程

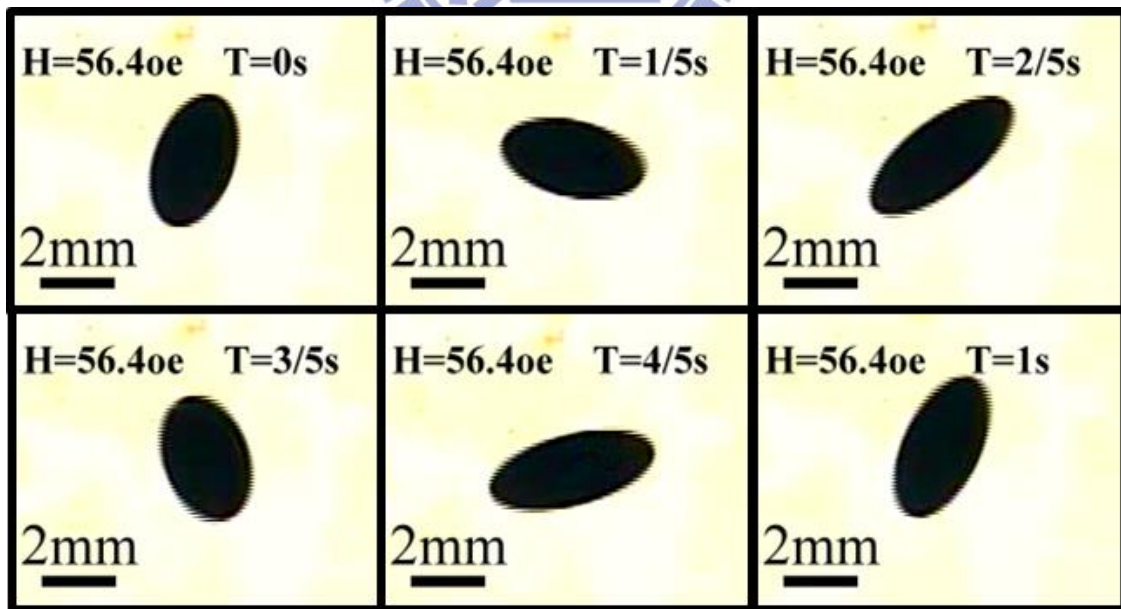


圖 3- 11 旋轉磁場作用( $H_0=56.4$  Oe) ,  $d=2.842$ mm 拉伸形變過程



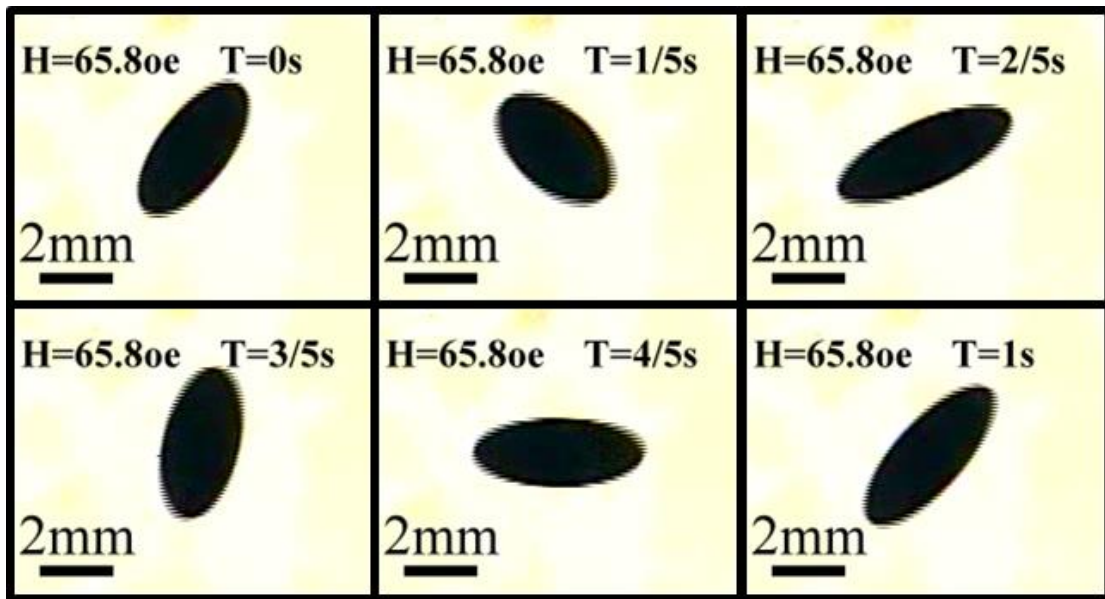


圖 3- 12 旋轉磁場作用( $H_0=65.8 \text{ Oe}$ )， $d=2.842\text{mm}$ ，拉伸形變過程

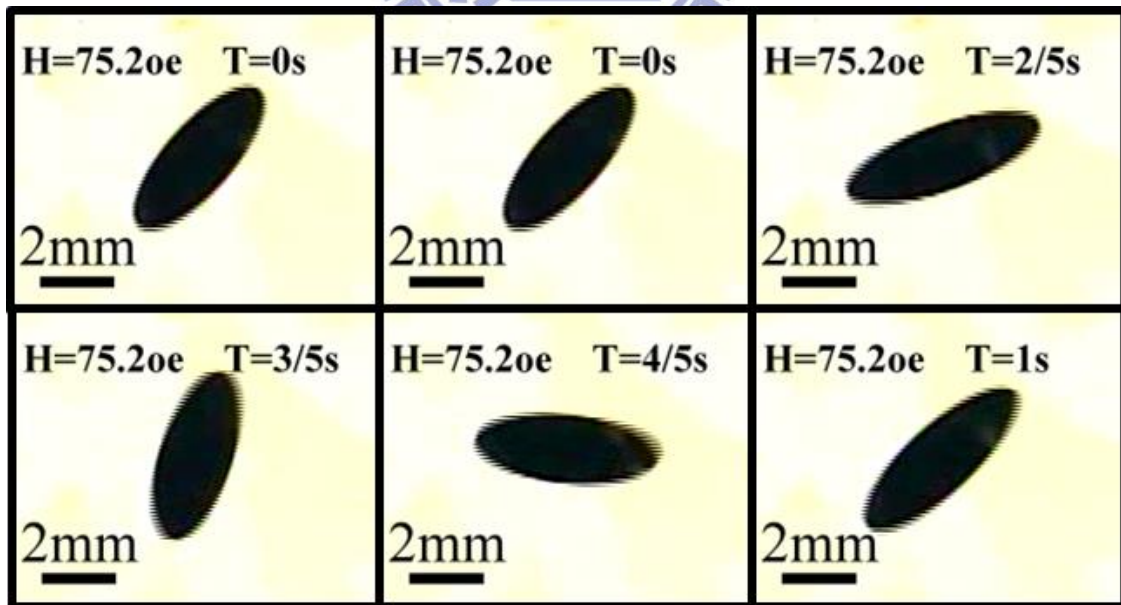
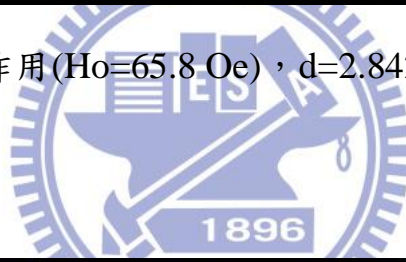


圖 3- 13 旋轉磁場作用( $H_0=75.2 \text{ Oe}$ )， $d=2.842\text{mm}$ ，拉伸形變過程

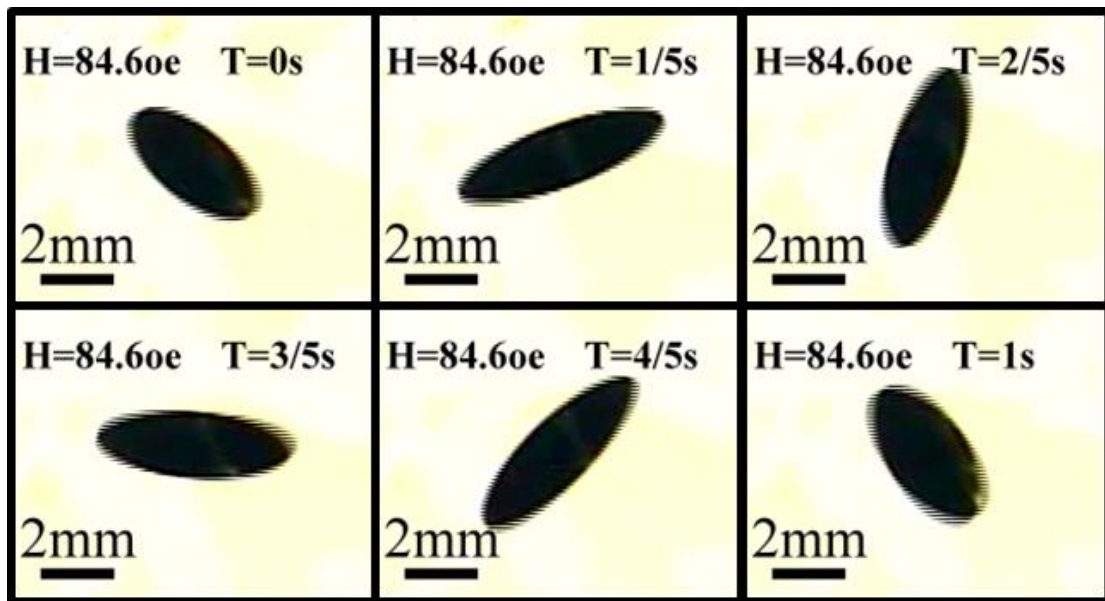


圖 3- 14 旋轉磁場作用( $H_0=84.6$  Oe)， $d=2.842$ mm，拉伸形變過程

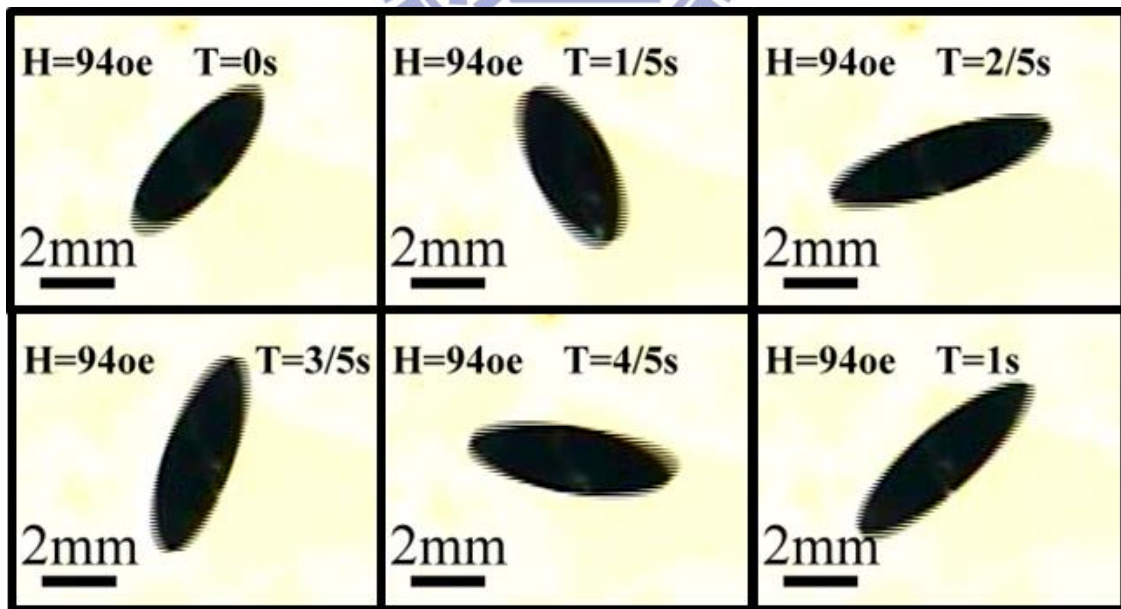


圖 3- 15 旋轉磁場作用( $H_0=94$  Oe)， $d=2.842$ mm，拉伸形變過程

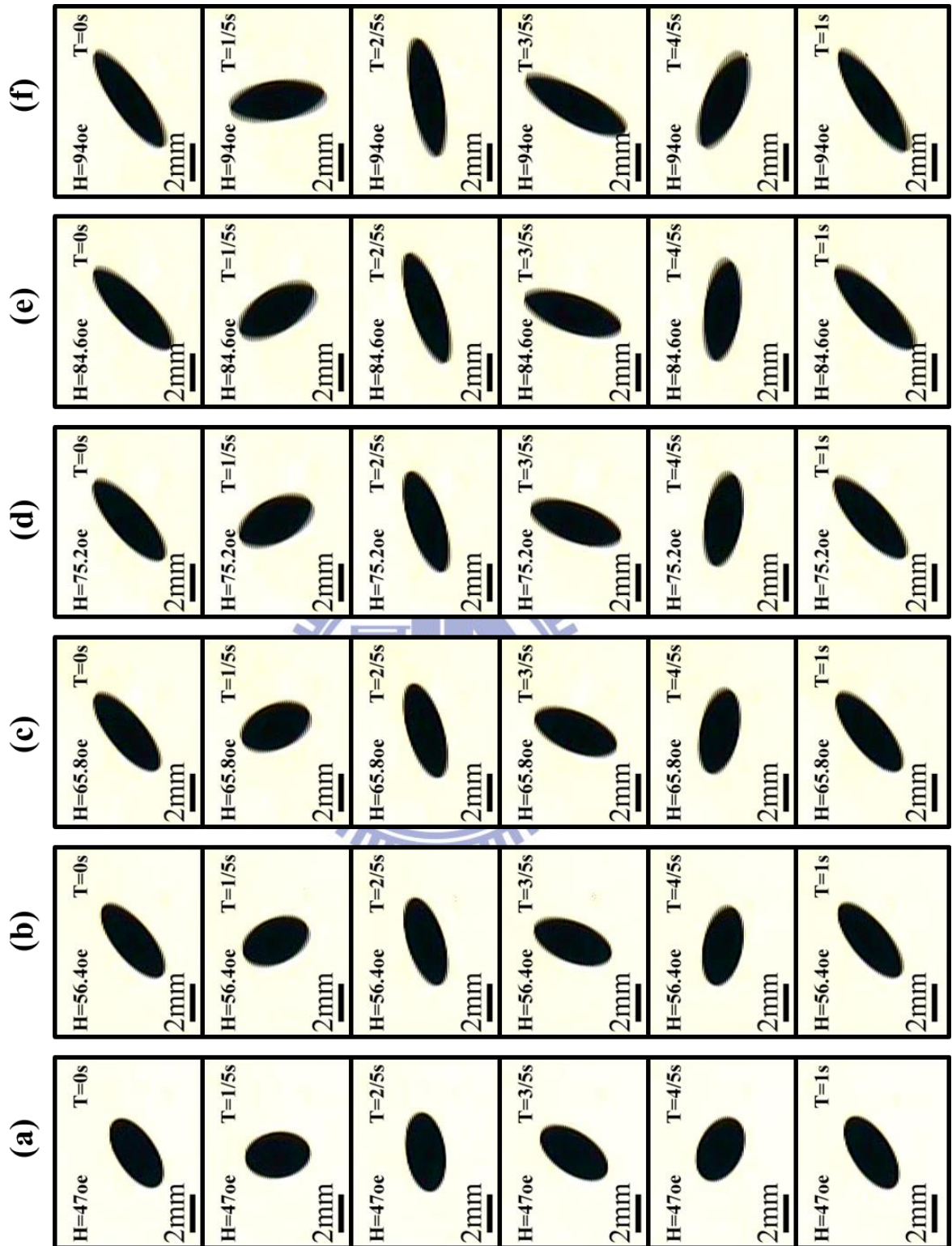


圖 3- 16 旋轉磁場作用， $d=2.947\text{mm}$  拉伸形變過程

(a)  $H_0=47\text{ Oe}$  ;(b)  $H_0=56.4\text{ Oe}$  ;(c)  $H_0=65.8\text{ Oe}$  ;  
 (d)  $H_0=75.2\text{ Oe}$  ;(e)  $H_0=84.6\text{ Oe}$  ;(f)  $H_0=94\text{ Oe}$  ;



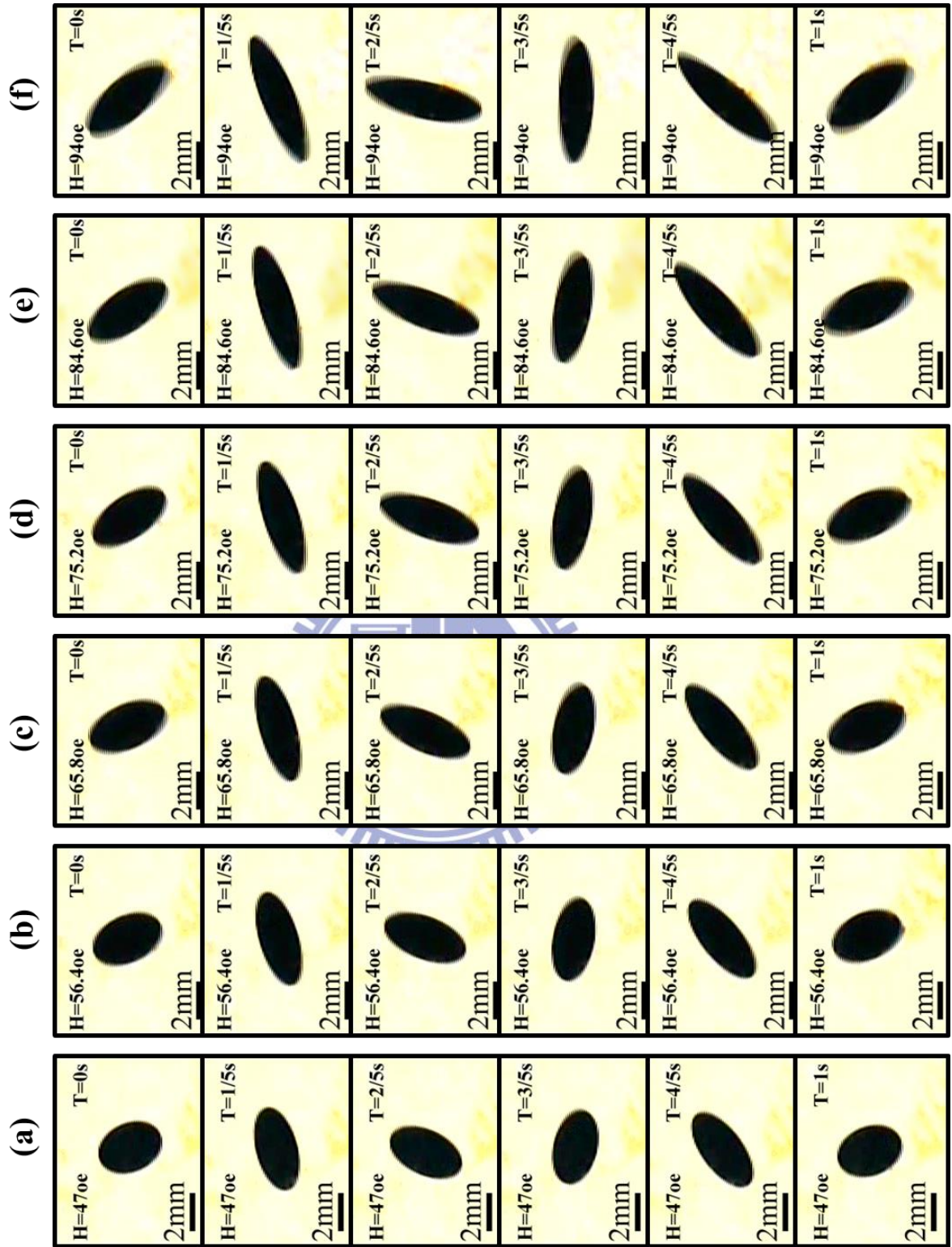


圖 3- 17 旋轉磁場作用， $d=3.105\text{mm}$  拉伸形變過程

- (a)  $H_o=47\text{ Oe}$  ; (b)  $H_o=56.4\text{ Oe}$  ; (c)  $H_o=65.8\text{ Oe}$  ;
- (d)  $H_o=75.2\text{ Oe}$  ; (e)  $H_o=84.6\text{ Oe}$  ; (f)  $H_o=94\text{ Oe}$  ;

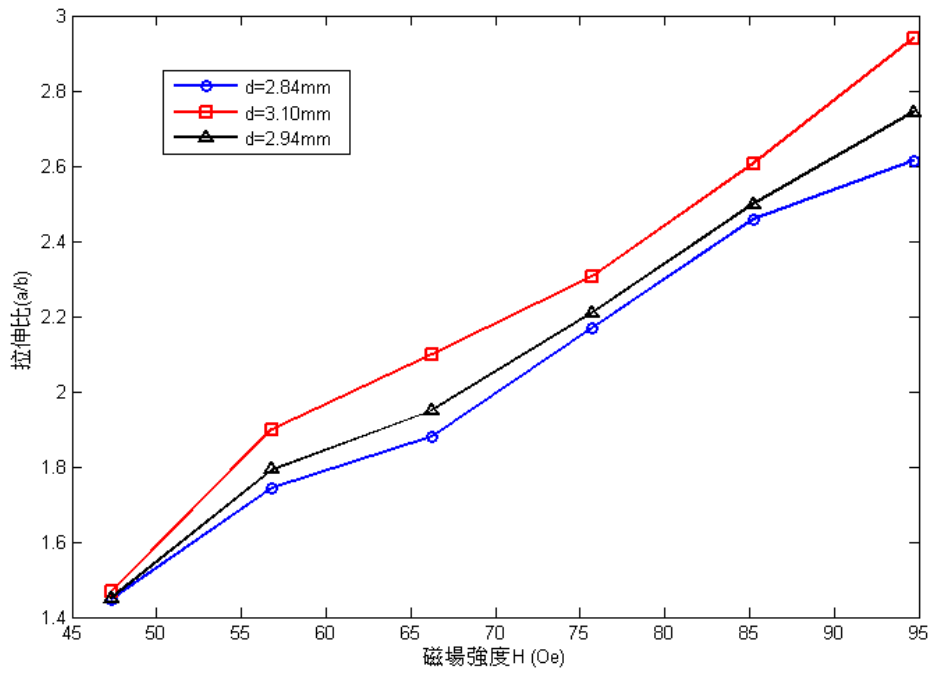


圖 3-18 磁性液滴在旋轉磁場下的拉伸比與磁場強度關係圖

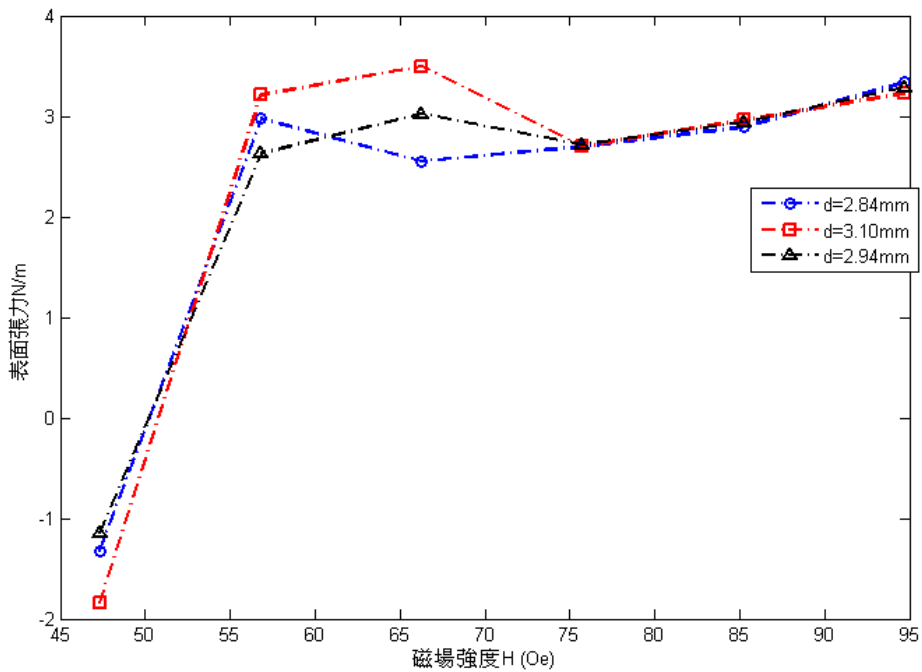


圖 3-19 磁性液滴在旋轉磁場下的表面張力與磁場強度之關係圖



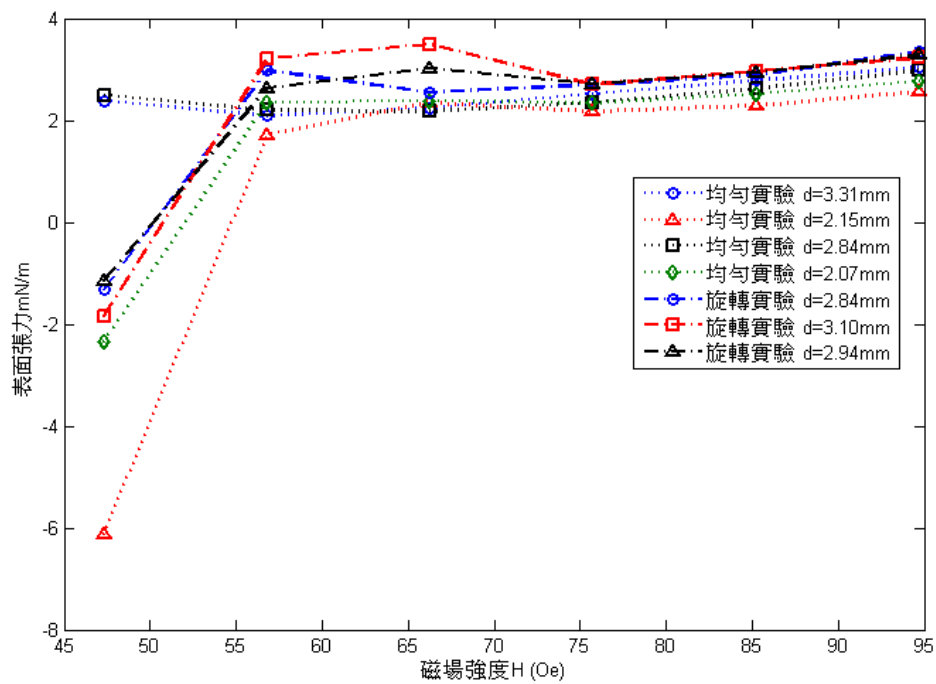


圖 3- 20 磁性液滴於均勻磁場以及旋轉磁場下之表面張力與磁場強度關

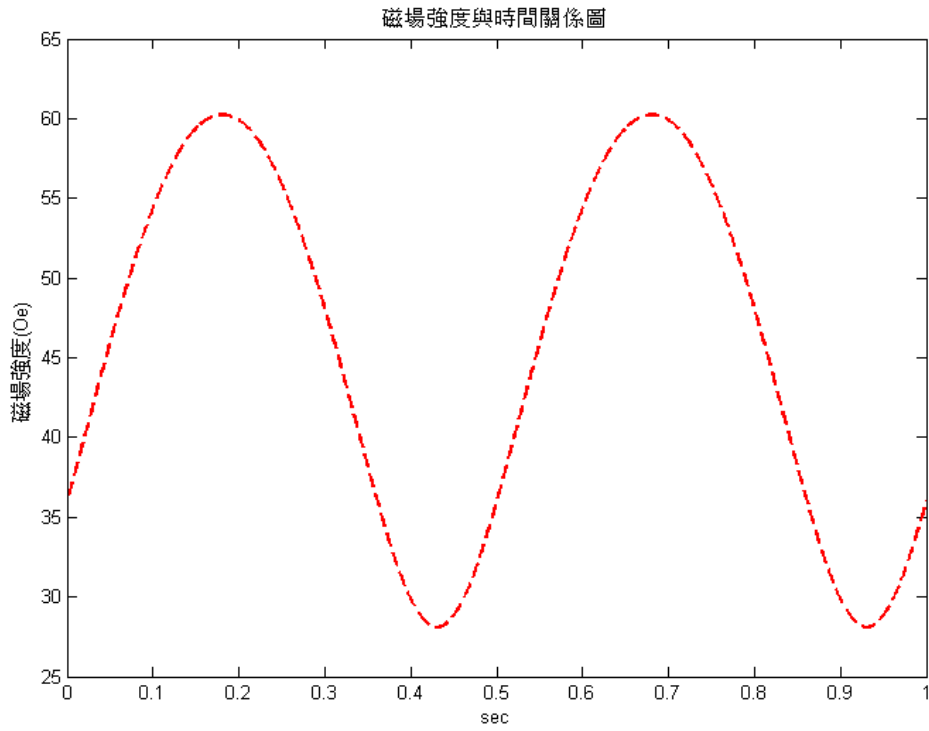


圖 3-21 磁場相位差  $50^\circ$ -磁場強度與時間關係圖

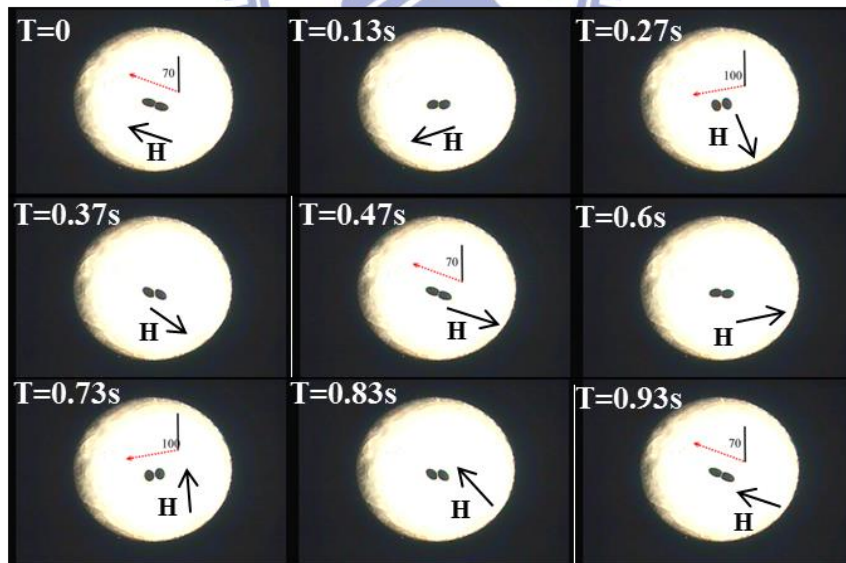
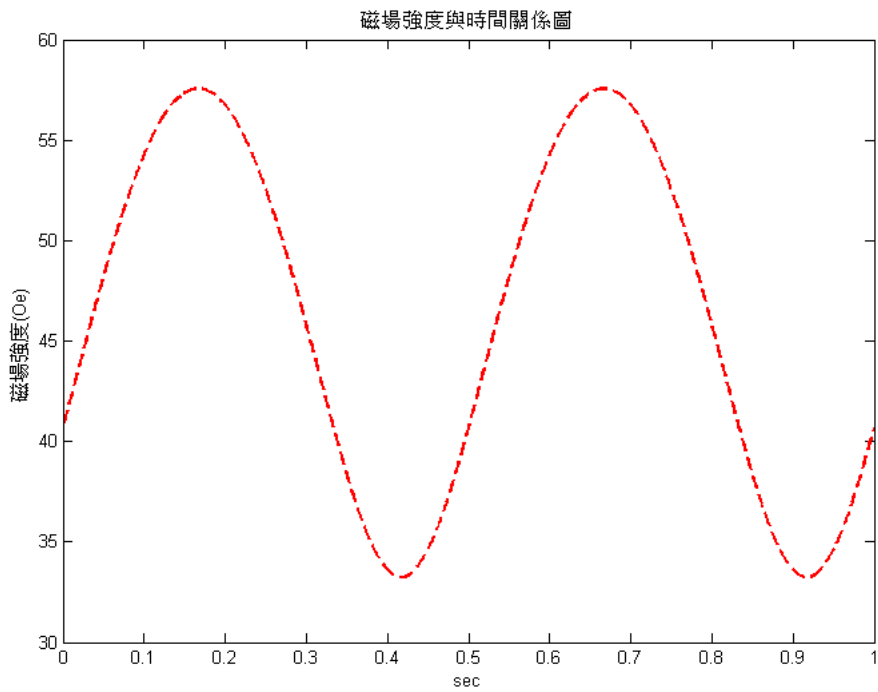
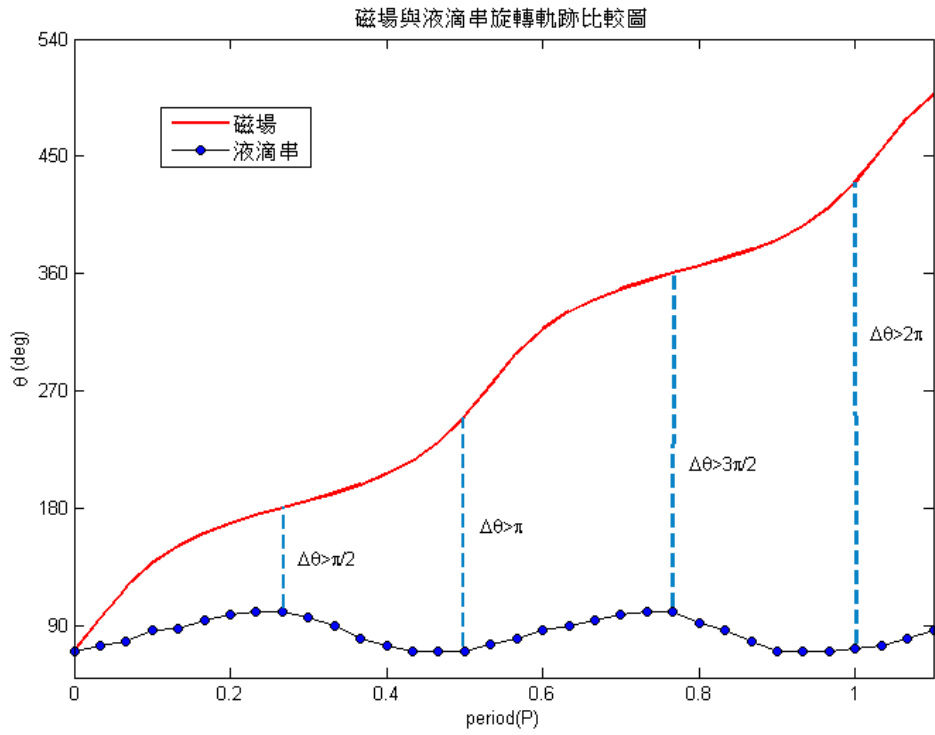


圖 3-22 磁場作用在液滴串之運動圖



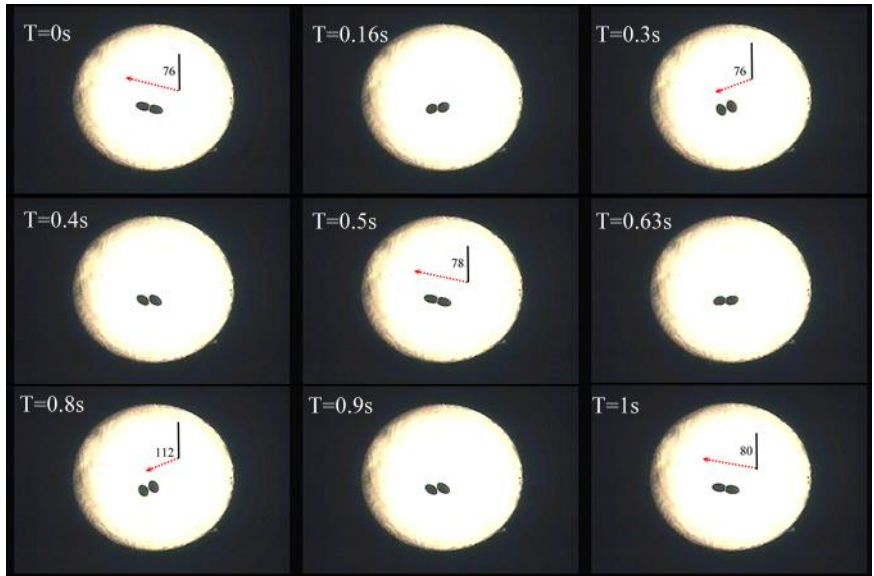


圖 3- 25 磁場作用在液滴串之運動圖

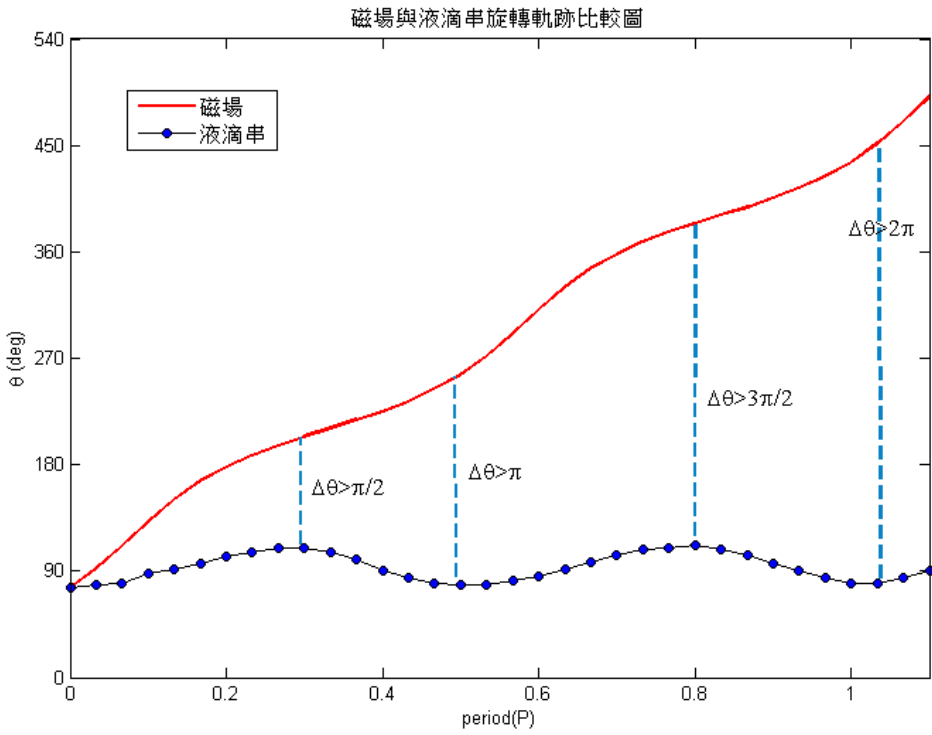


圖 3- 26 磁場與液滴串旋轉軌跡圖

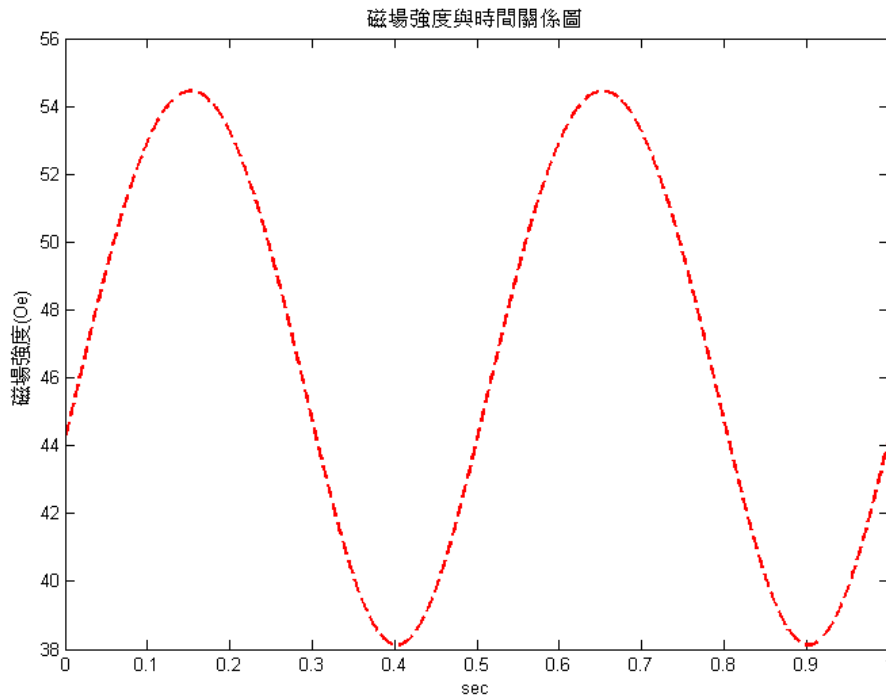


圖 3-27 磁場相位差  $70^\circ$ -磁場強度與時間關係圖

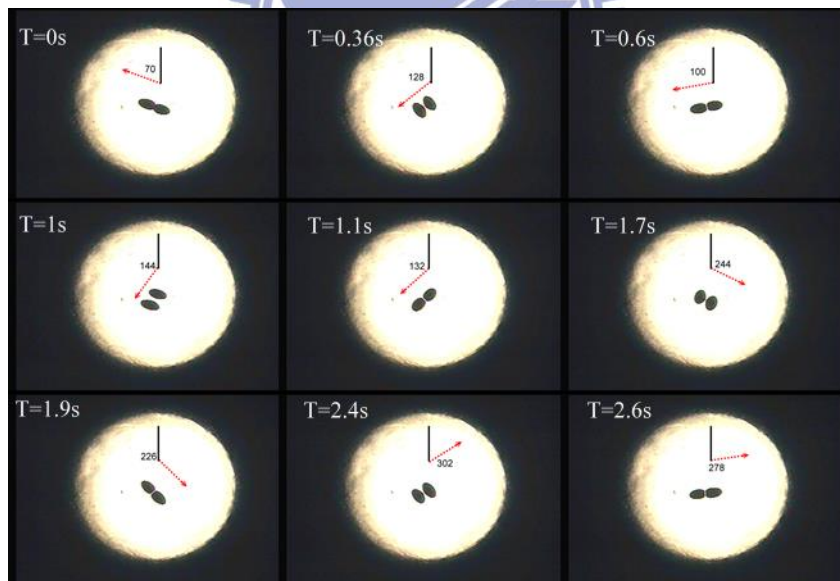


圖 3-28 磁場作用在液滴串之運動圖



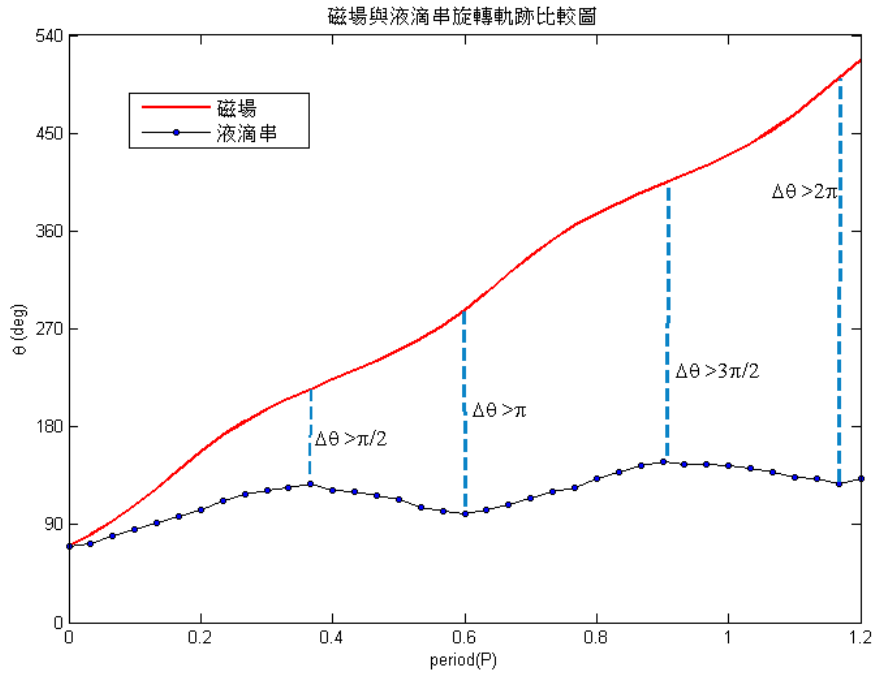


圖 3-29 磁場與液滴串旋轉軌跡圖

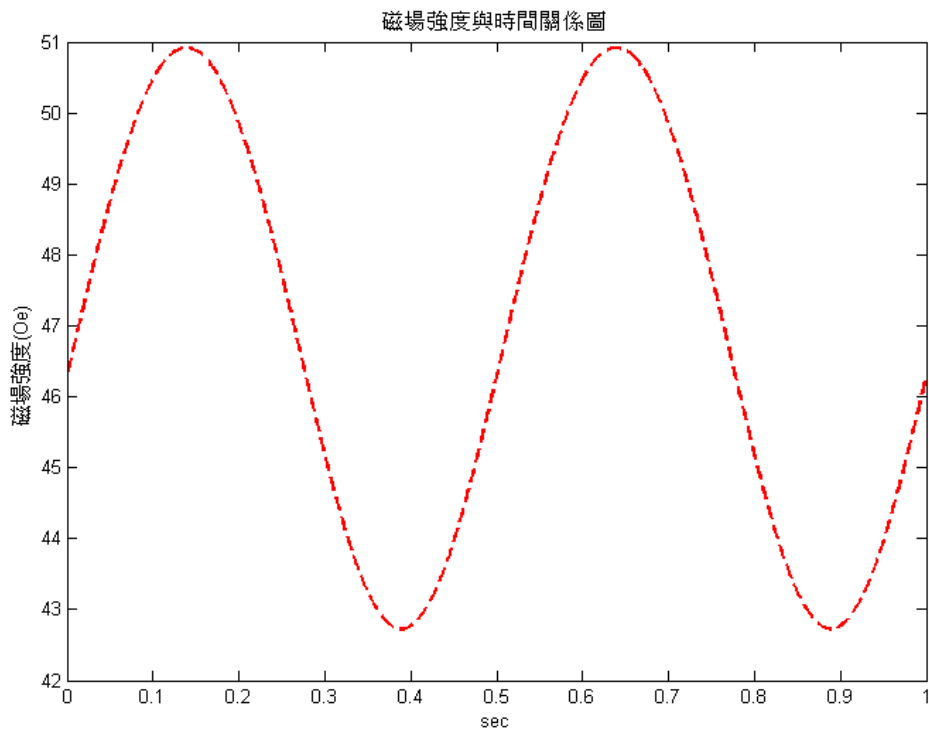


圖 3-30 磁場相位差  $80^\circ$  磁場強度與時間關係圖

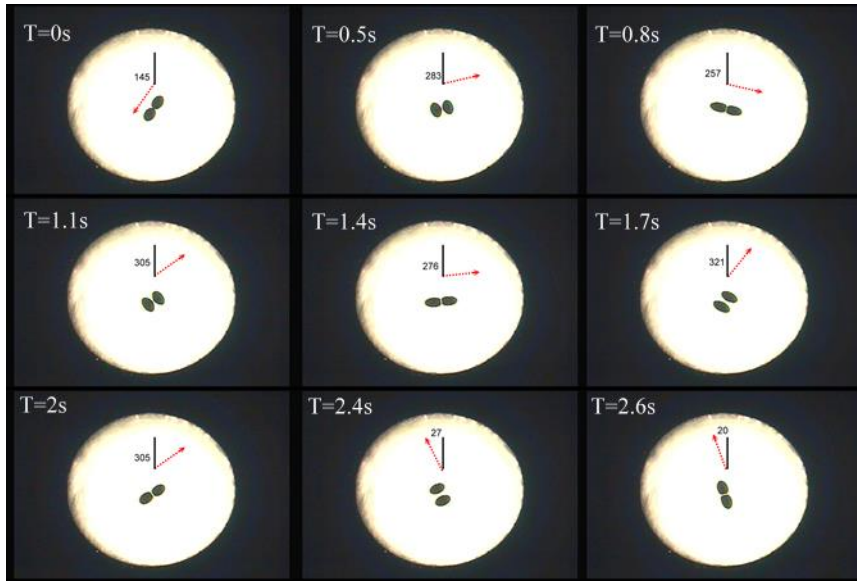


圖 3-31 磁場作用在液滴串之運動圖

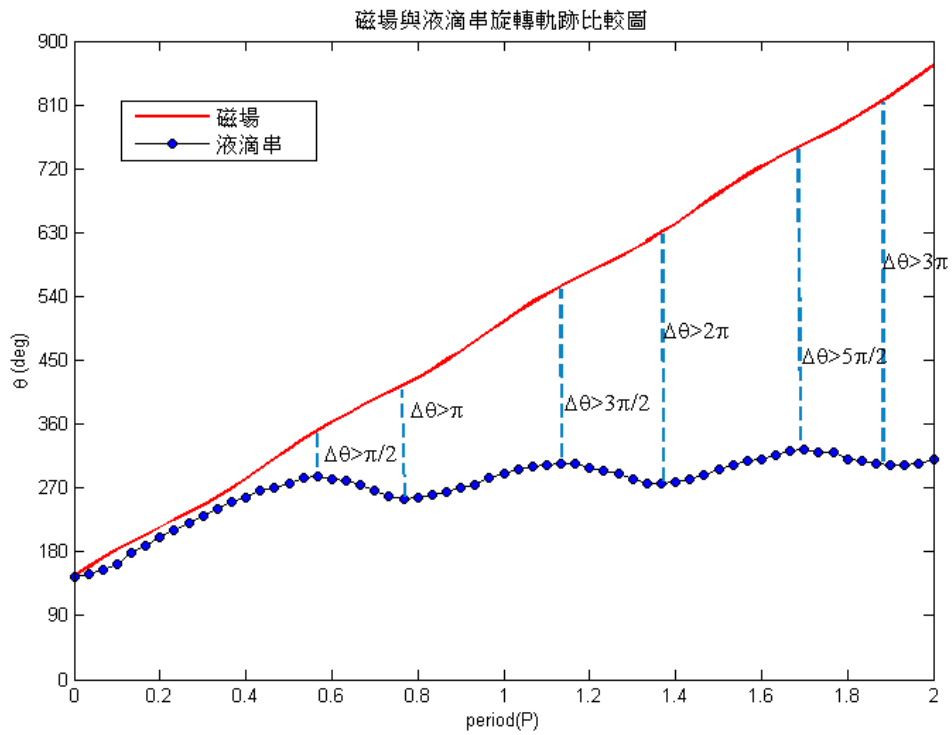


圖 3-32 磁場與液滴串旋轉軌跡圖

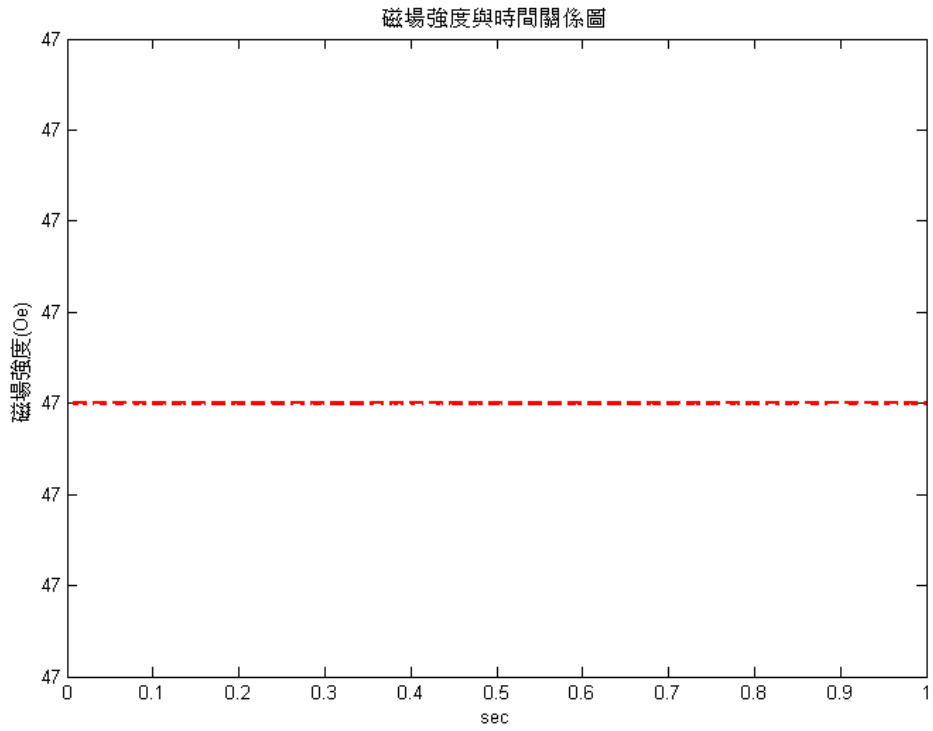


圖 3-33 磁場相位差  $90^\circ$ -磁場強度與時間關係圖

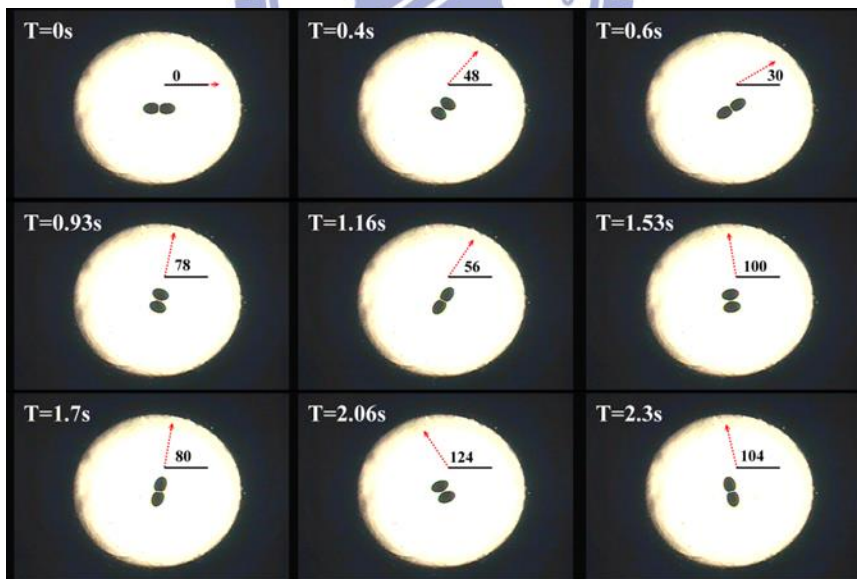


圖 3-34 磁場作用在液滴串之運動圖

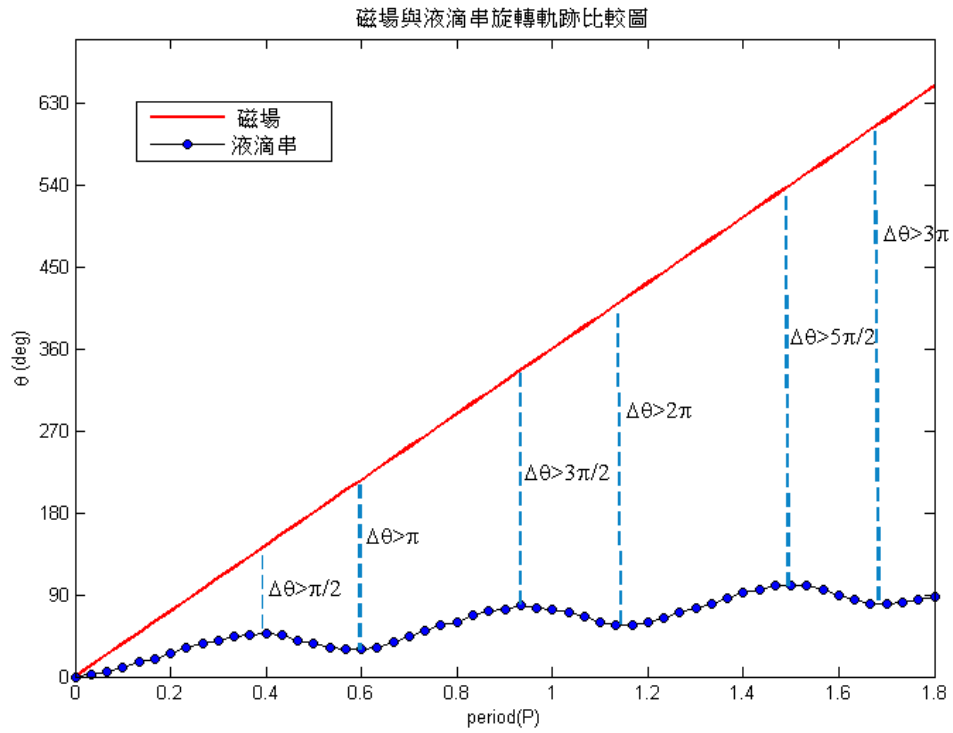


圖 3-35 磁場與液滴串旋轉軌跡圖

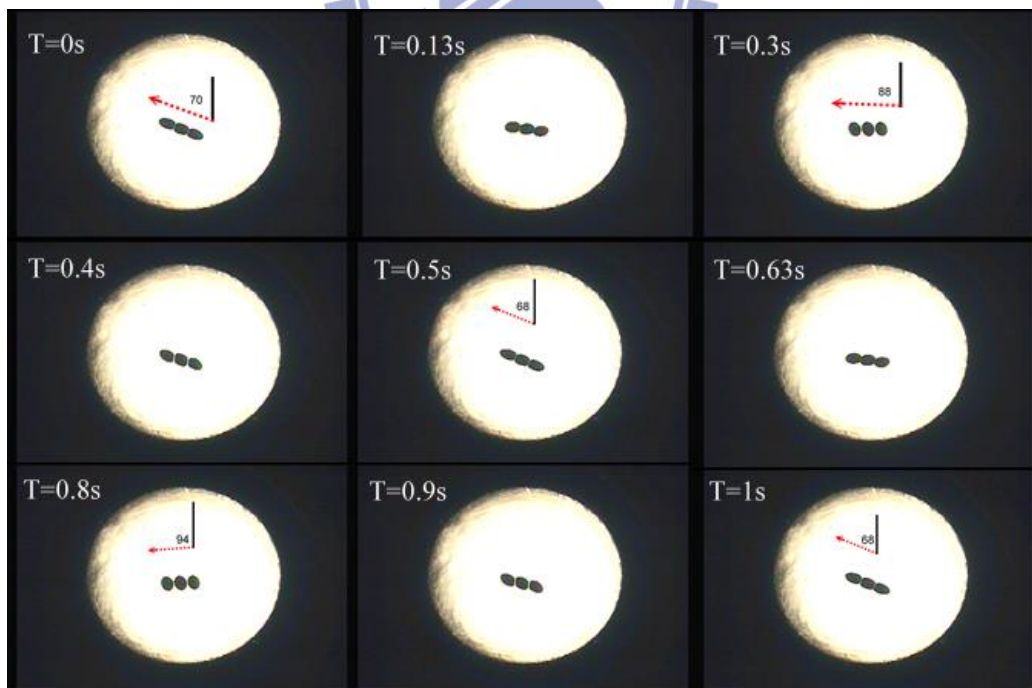


圖 3-36 磁場相位差  $50^\circ$ -液滴串運動圖

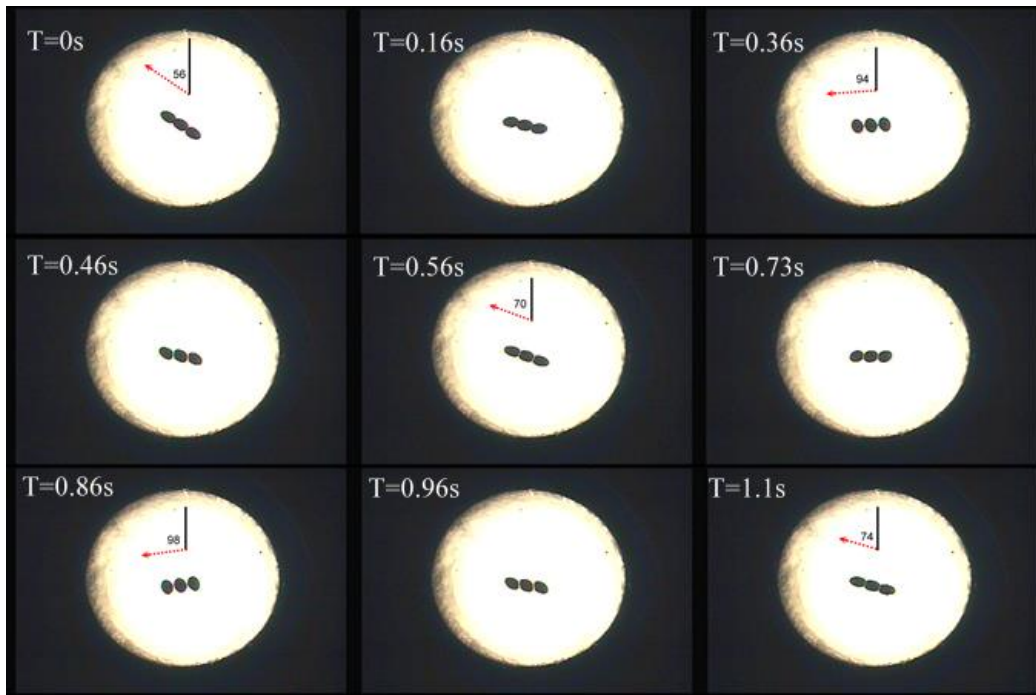


圖 3-37 磁場相位差  $60^\circ$ -液滴串運動圖

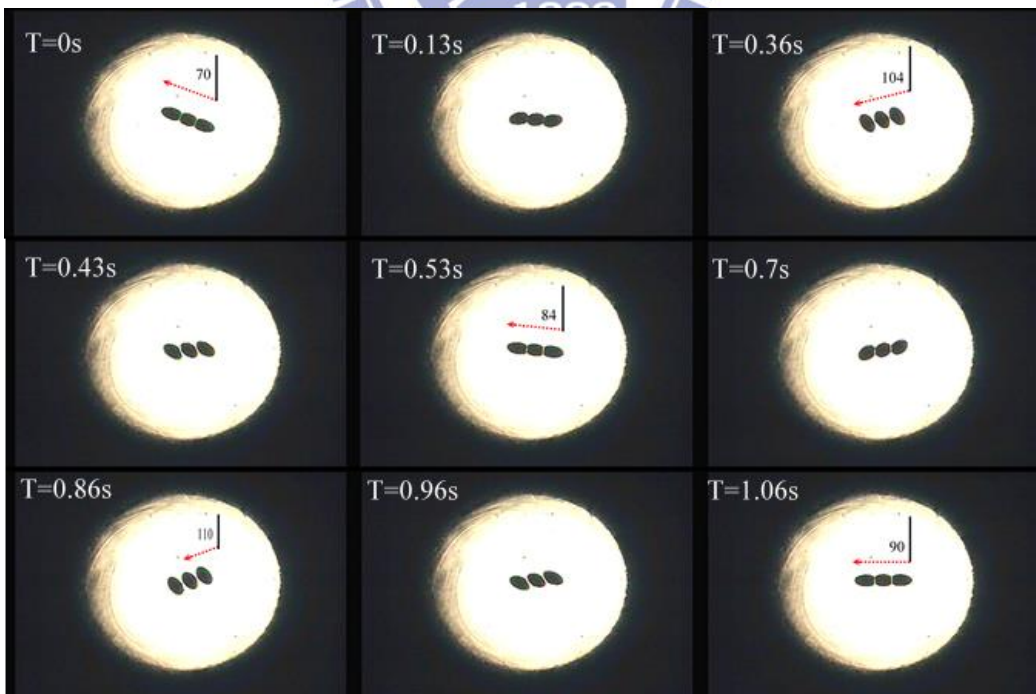


圖 3-38 磁場相位差  $70^\circ$ -液滴串運動圖



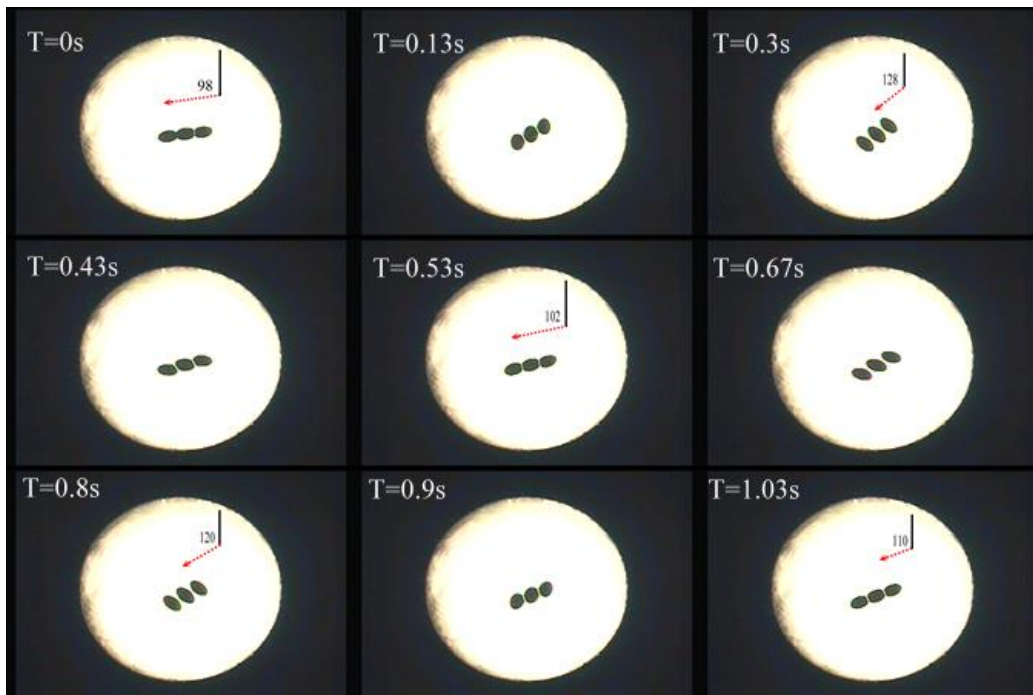


圖 3-39 磁場相位差  $80^\circ$ -液滴串運動圖

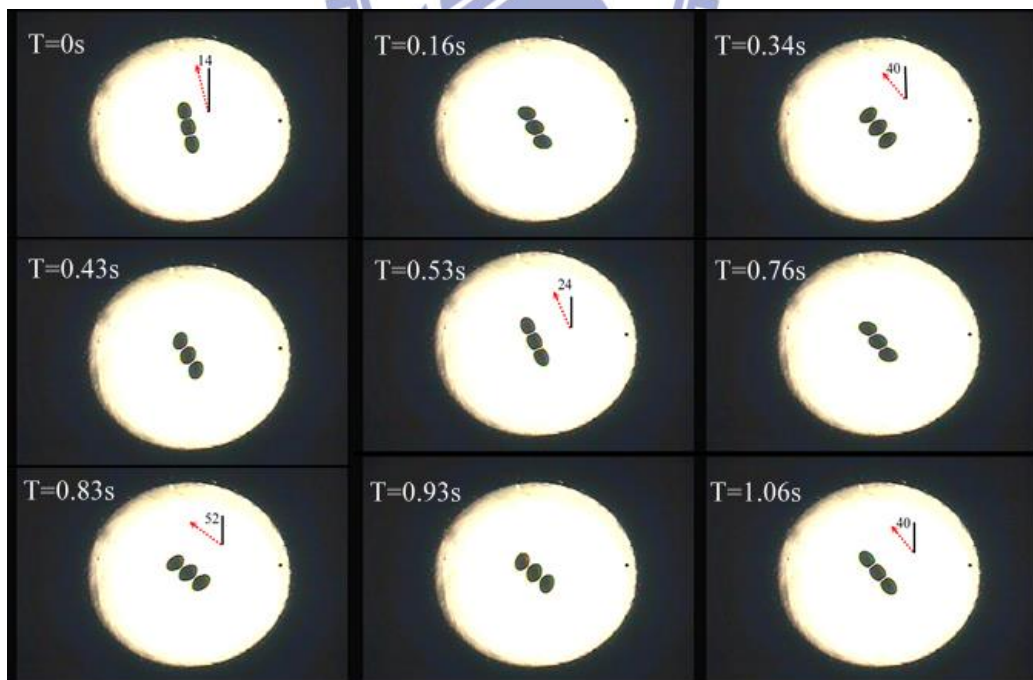


圖 3-40 磁場相位差  $90^\circ$ -液滴串運動圖

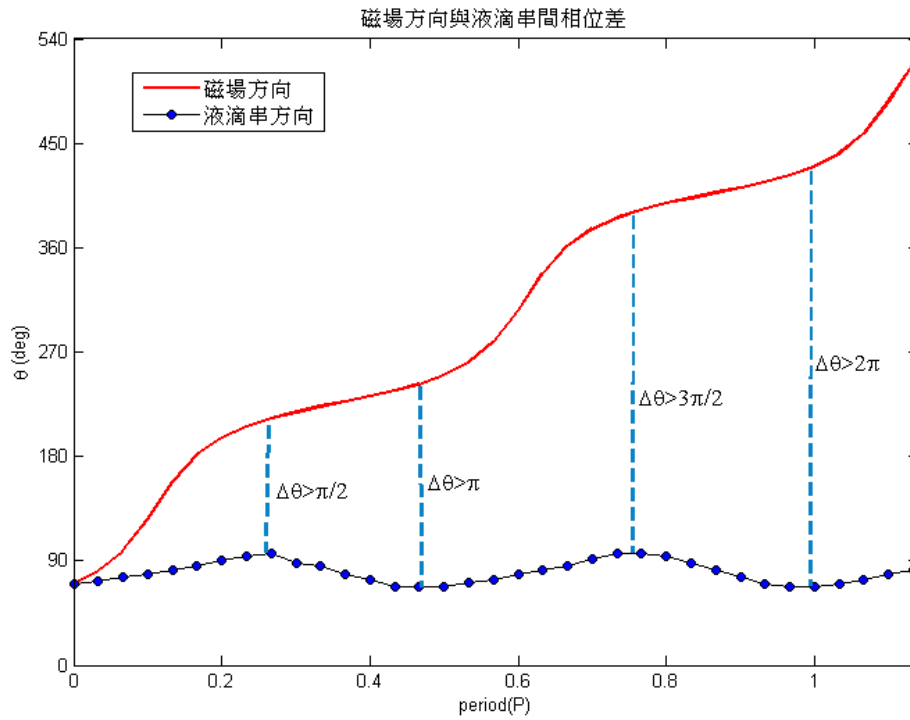


圖 3- 41 磁場相位差 50°-磁場與液滴串旋轉軌跡圖

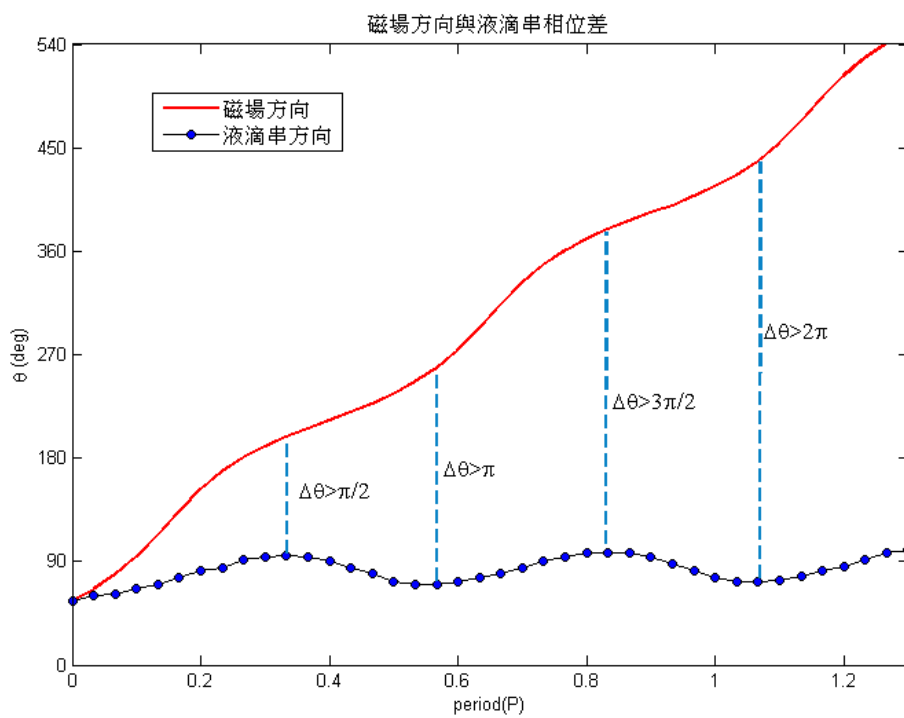


圖 3- 42 磁場相位差 60°-磁場與液滴串旋轉軌跡圖

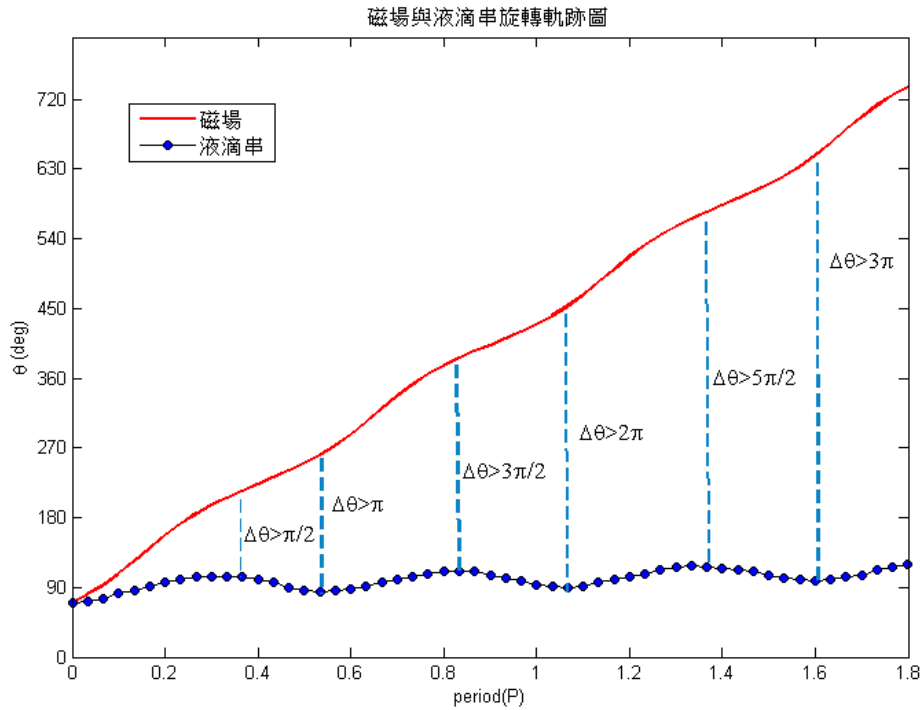


圖 3- 43 磁場相位差  $70^\circ$ -磁場與液滴串旋轉軌跡圖

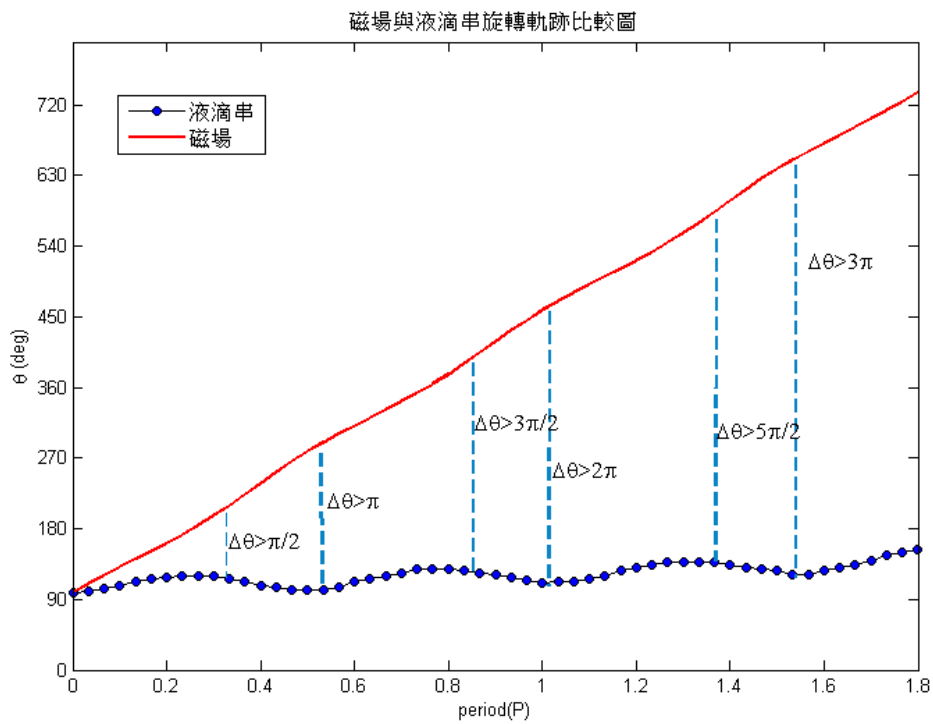


圖 3- 44 磁場相位差  $80^\circ$ -磁場與液滴串旋轉軌跡圖

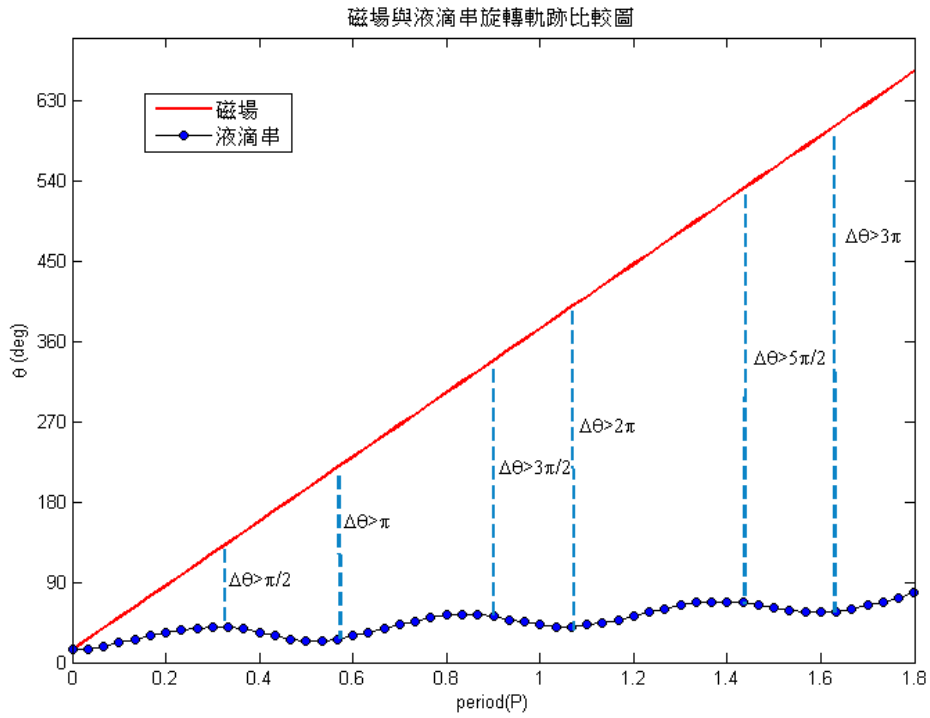


圖 3- 45 磁場相位差  $90^\circ$ -磁場與液滴串旋轉軌跡圖

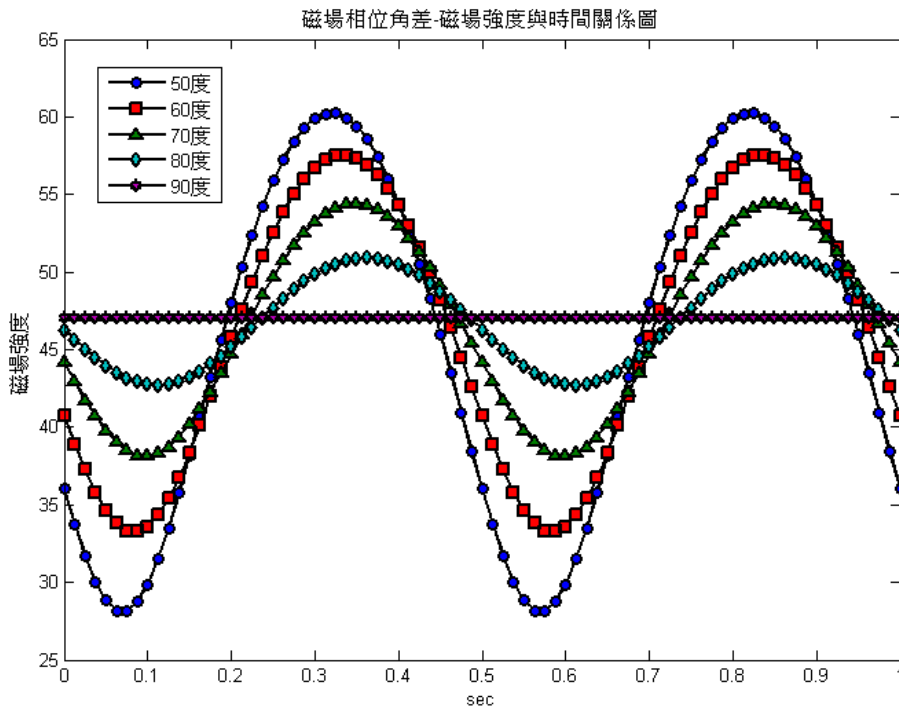


圖 3- 46 磁場相位差變化比較圖

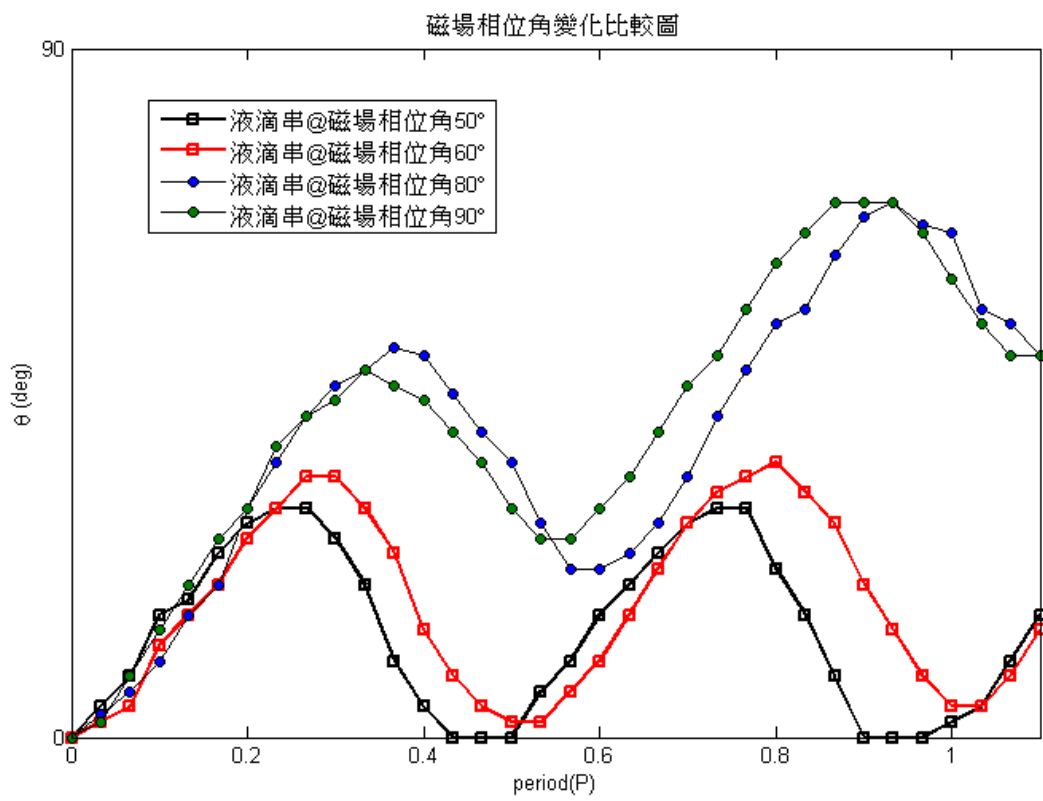


圖 3-47 液滴串顆數=2---旋轉軌跡圖



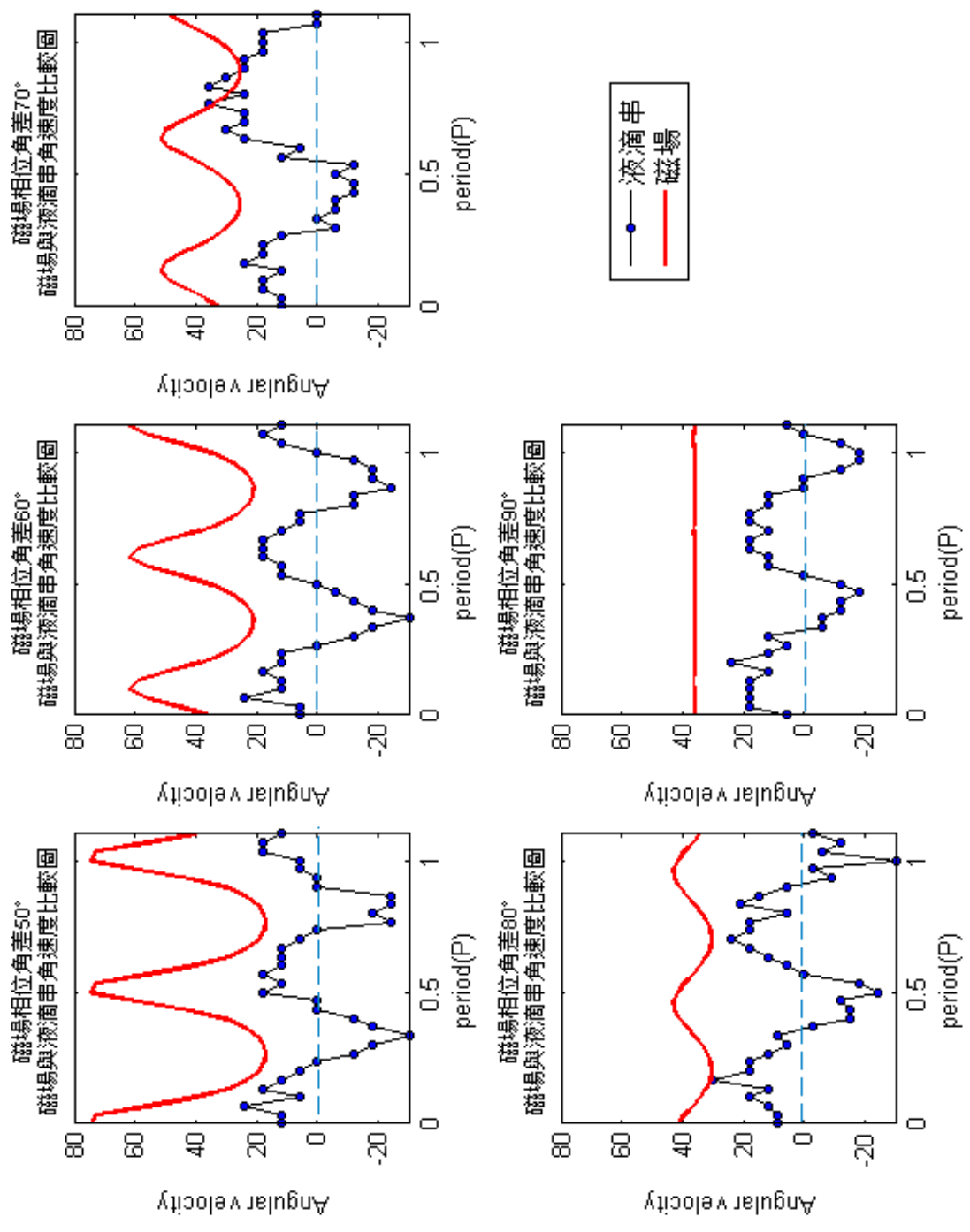


圖 3-48 液滴串顆數=2---角速度圖

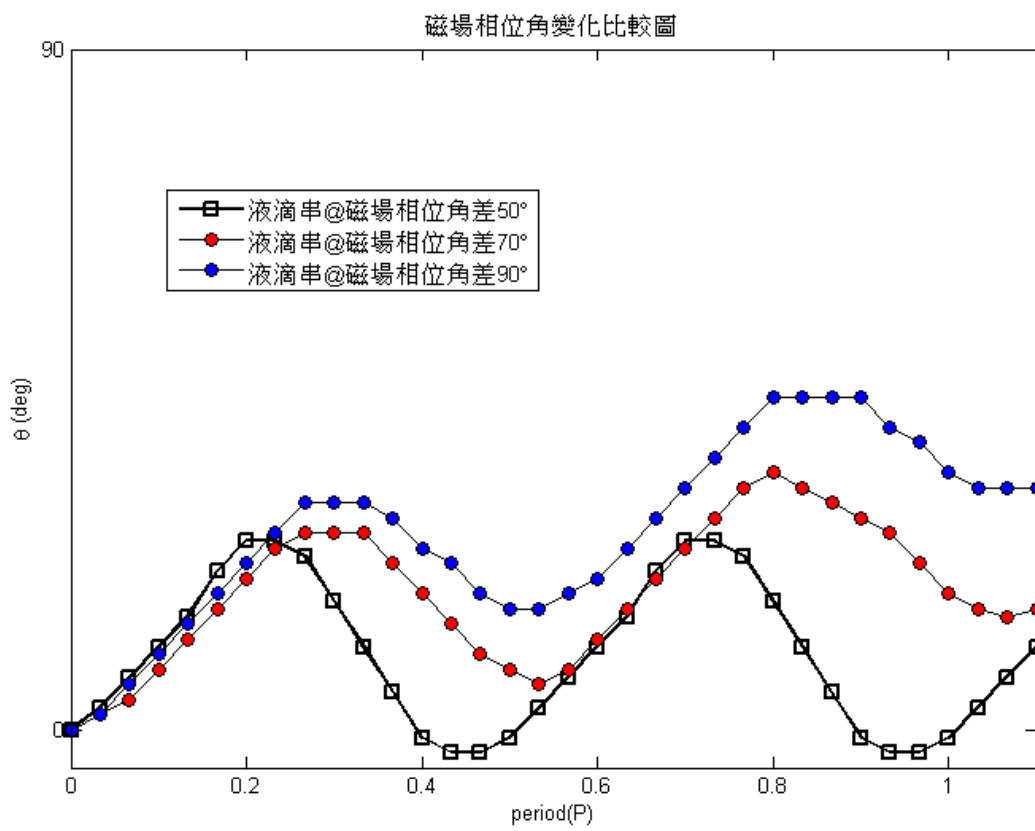


圖 3-49 液滴串顆數=3---旋轉軌跡圖

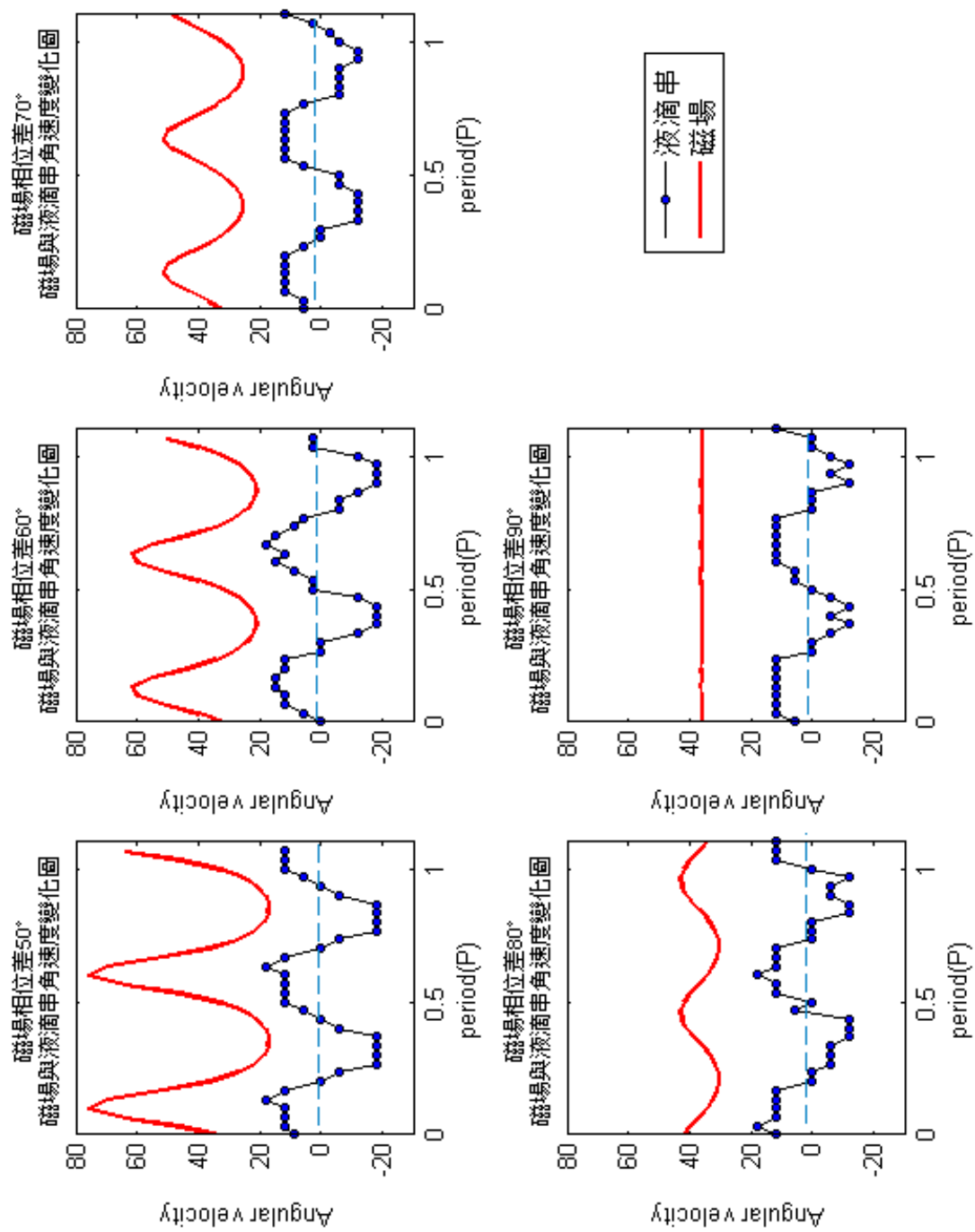


圖 3- 50 液滴串顆數=3---角速度圖

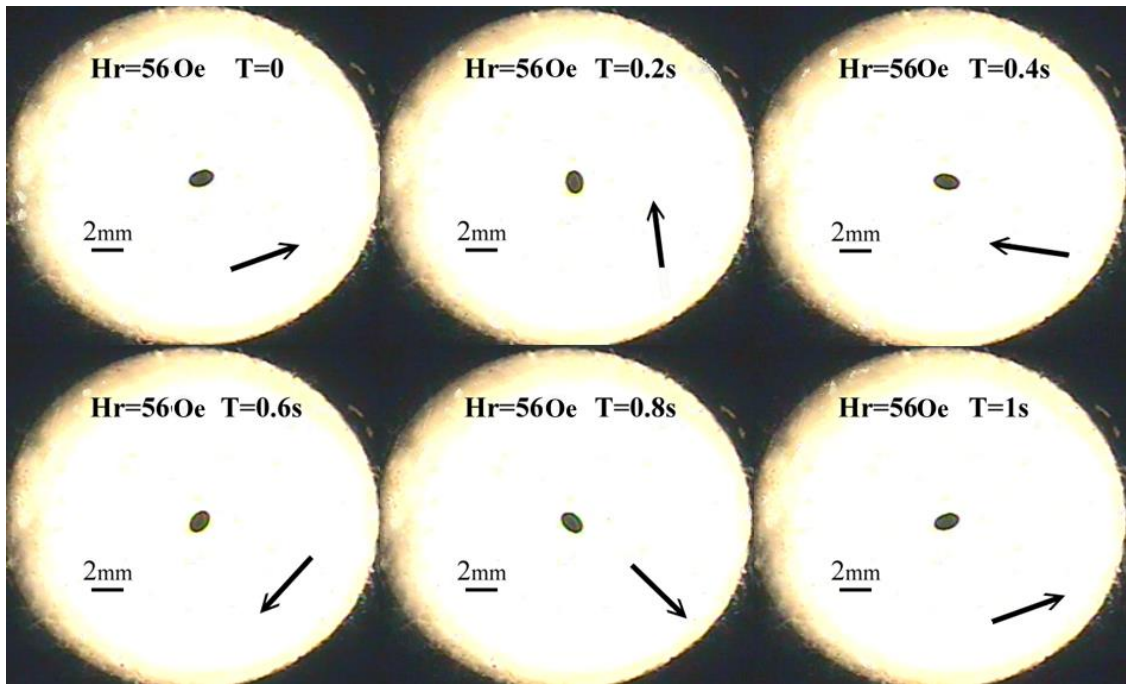


圖 3- 51 液滴直徑 1.67mm—旋轉運動

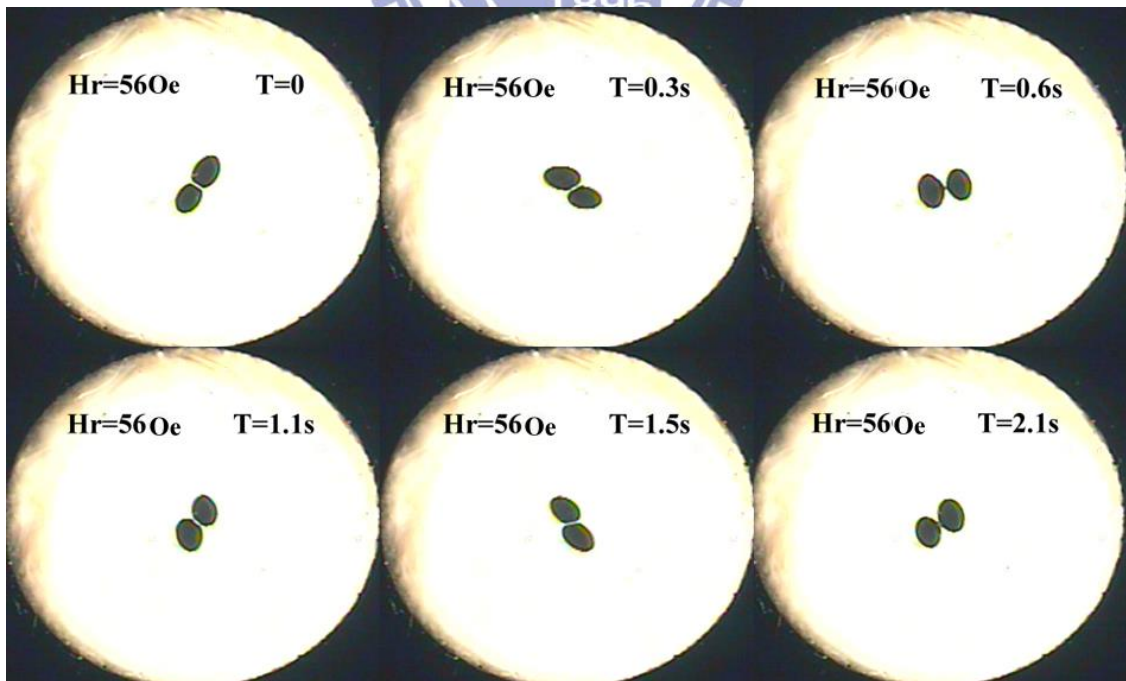


圖 3- 52 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 2---旋轉運動

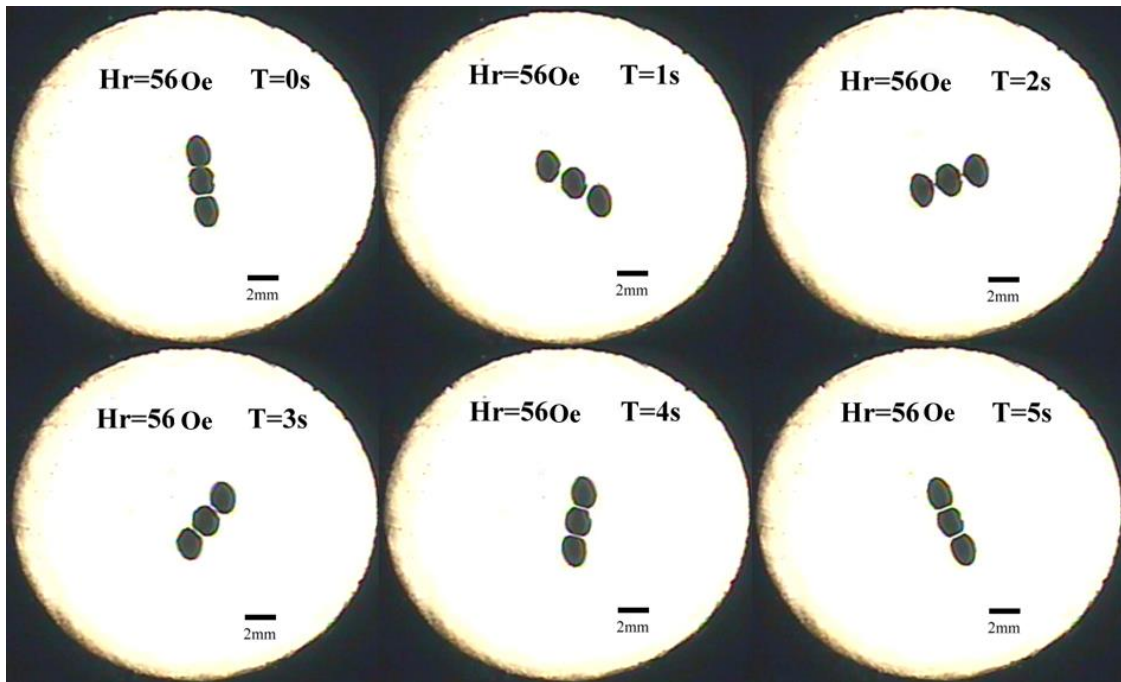


圖 3- 53 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 3---旋轉運動

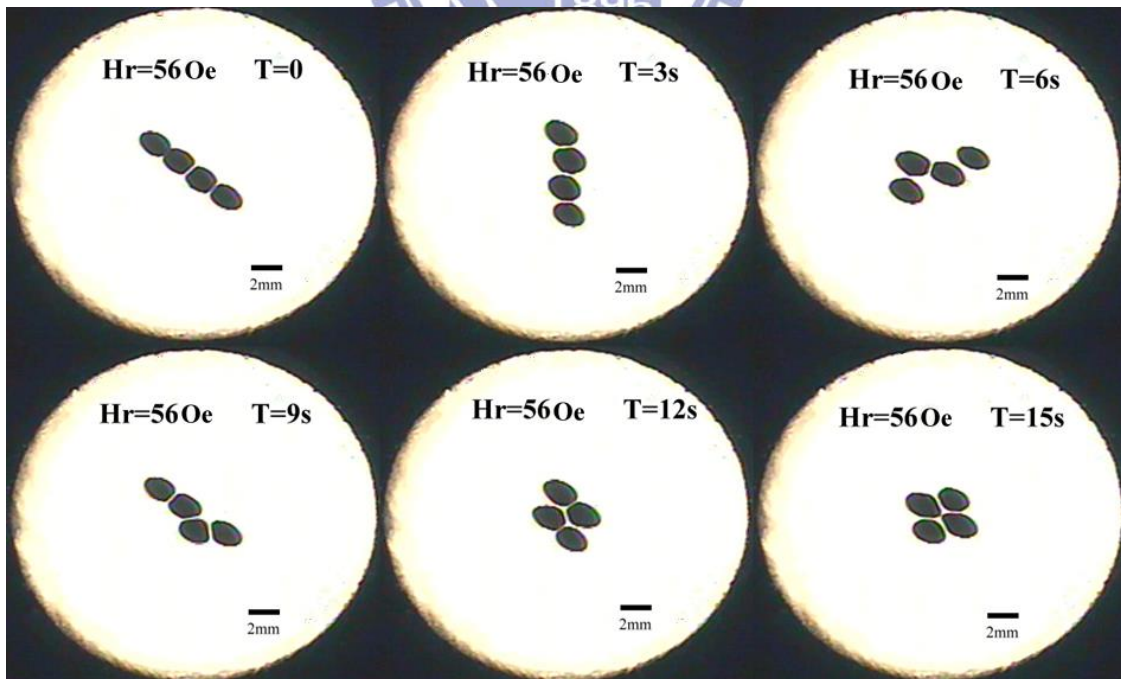


圖 3- 54 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 4---旋轉運動



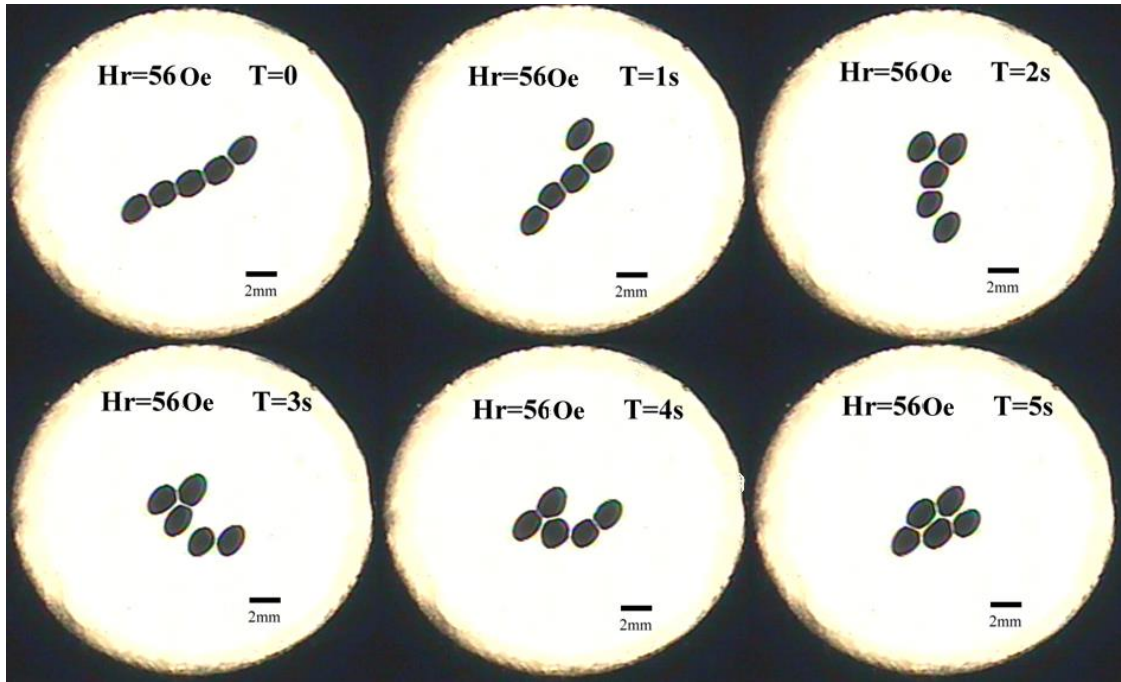


圖 3-55 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 5---旋轉運動

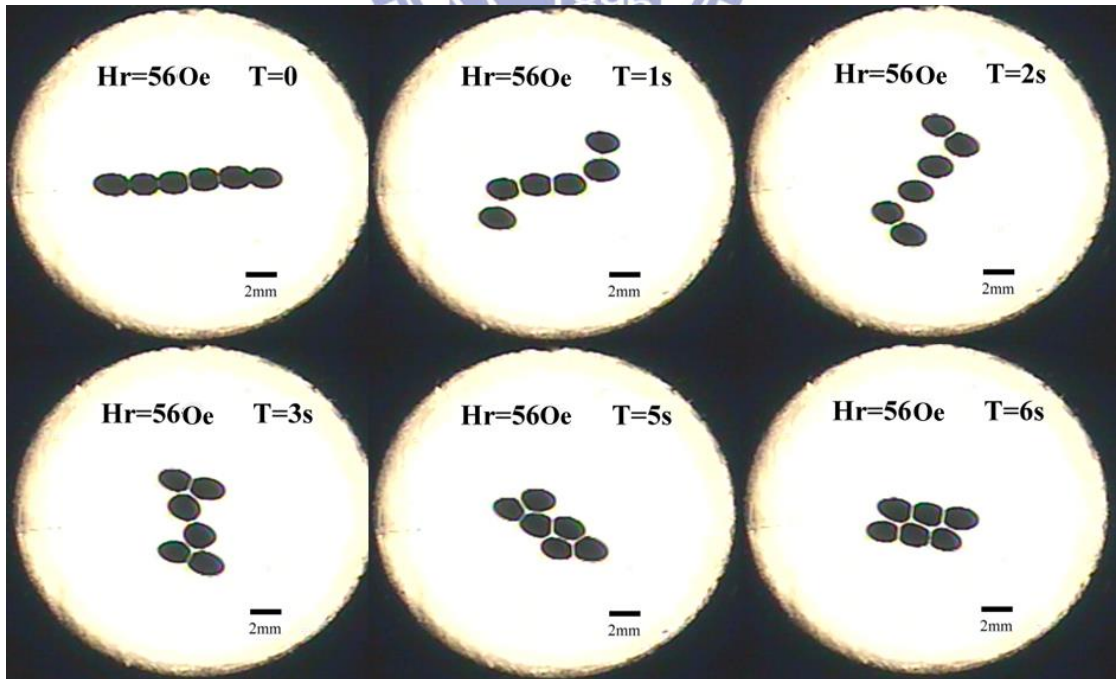


圖 3-56 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 6---旋轉運動

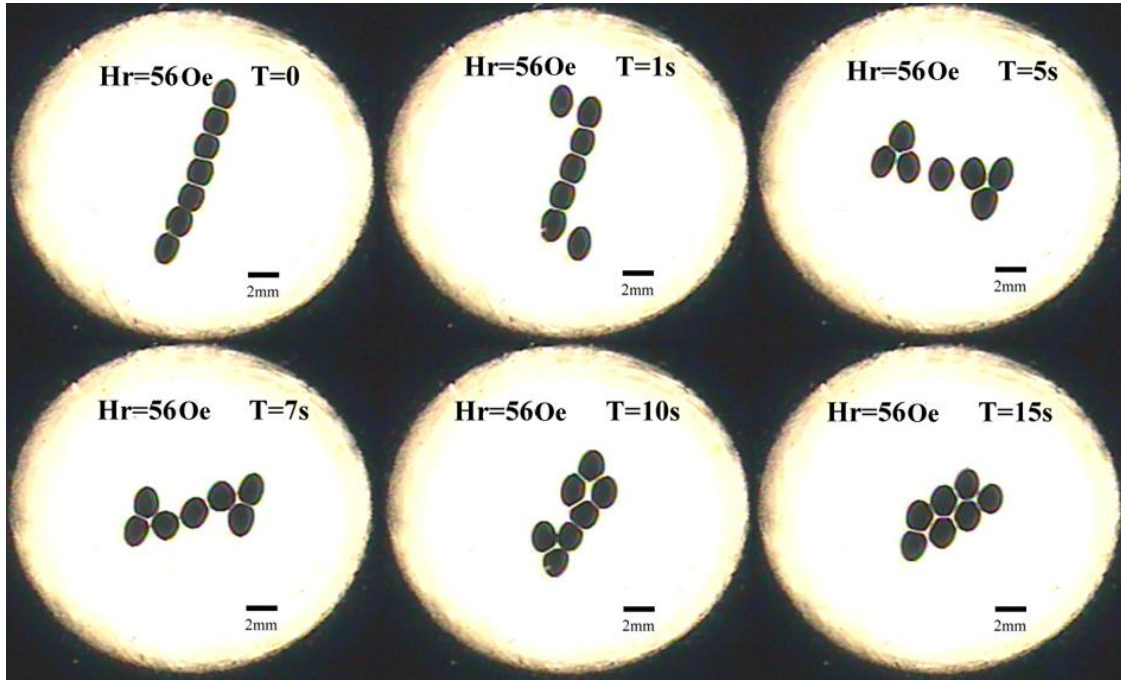


圖 3-57 液滴直徑 1.67mm-串接液滴數 7---旋轉運動

串接磁液滴顆數變化-公轉頻率比較圖

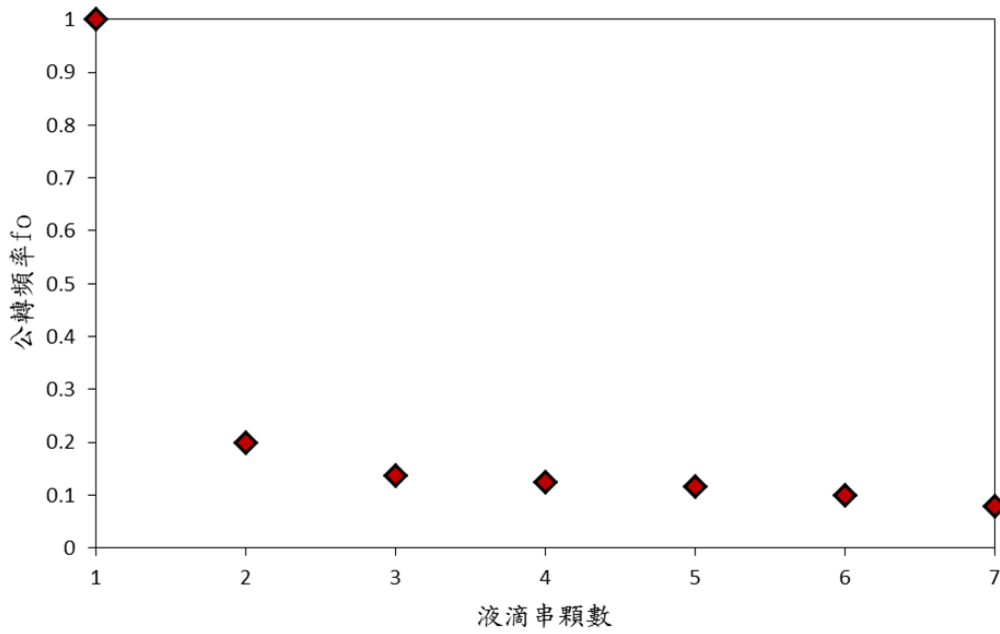


圖 3-58 串接顆數變化與公轉頻率關係圖

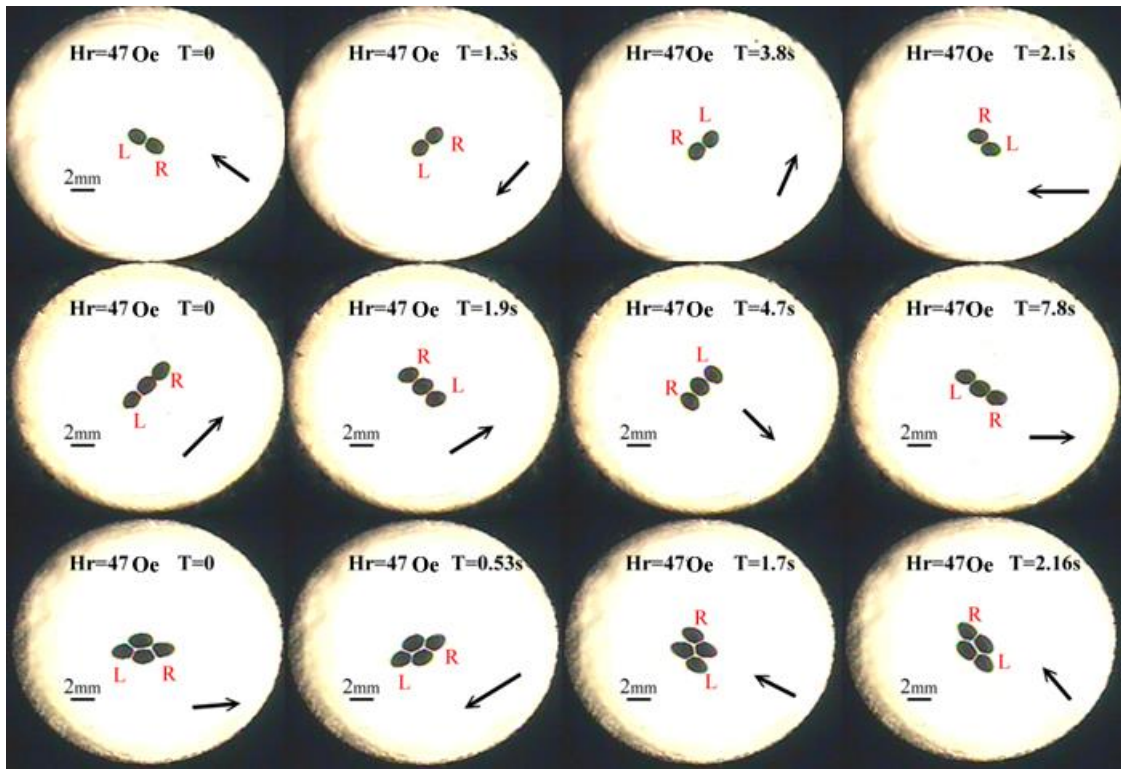


圖 3- 59 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 47G 串接顆數 2~4 運動情形

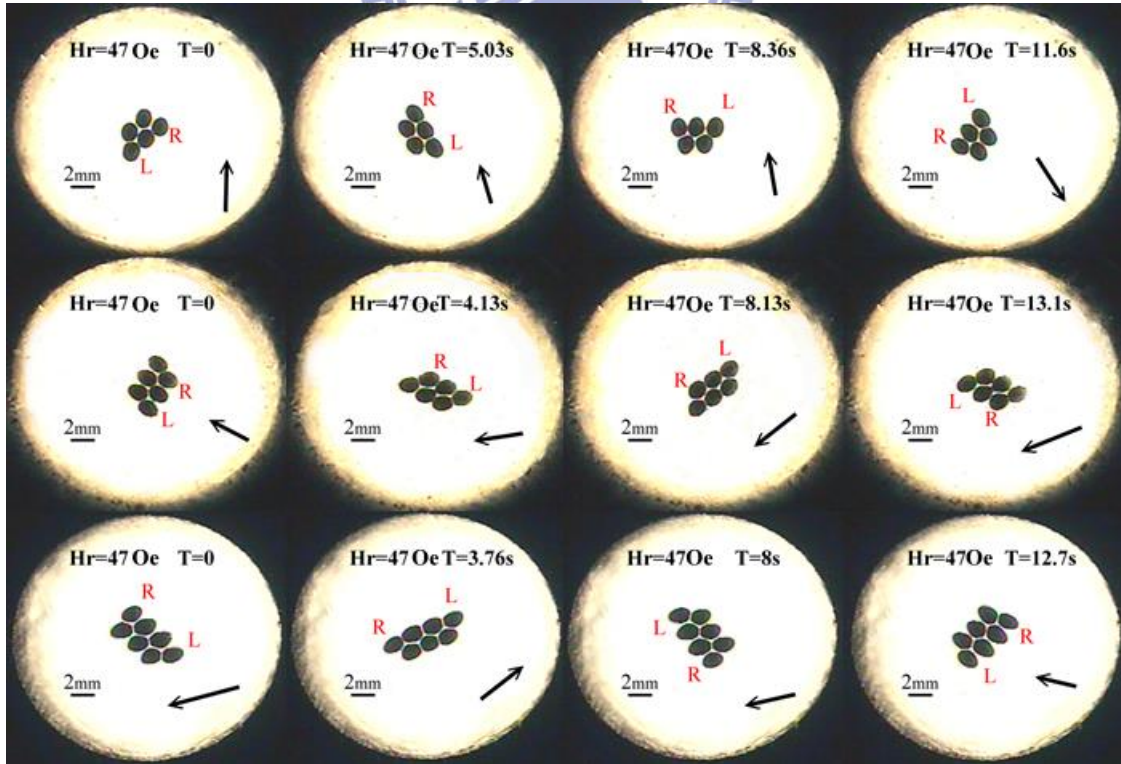


圖 3- 60 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 47G 串接顆數 5~7 運動情形



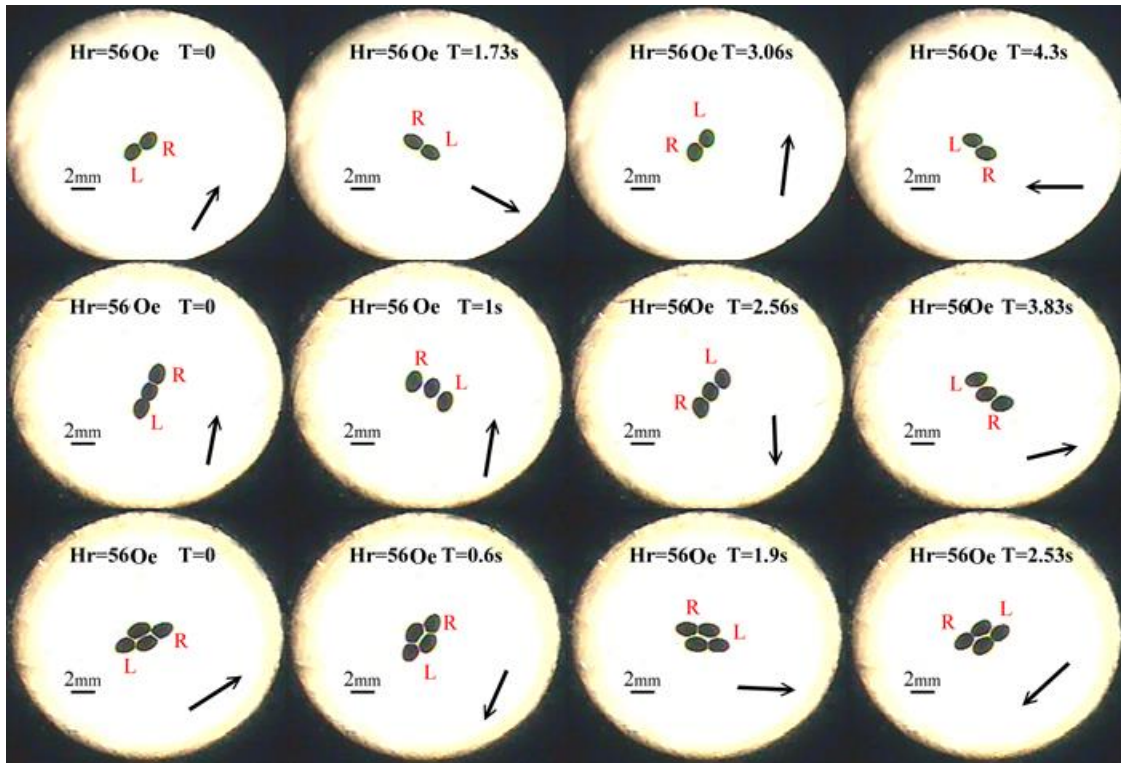


圖 3- 61 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 56G 串接顆數 2~4 運動情形

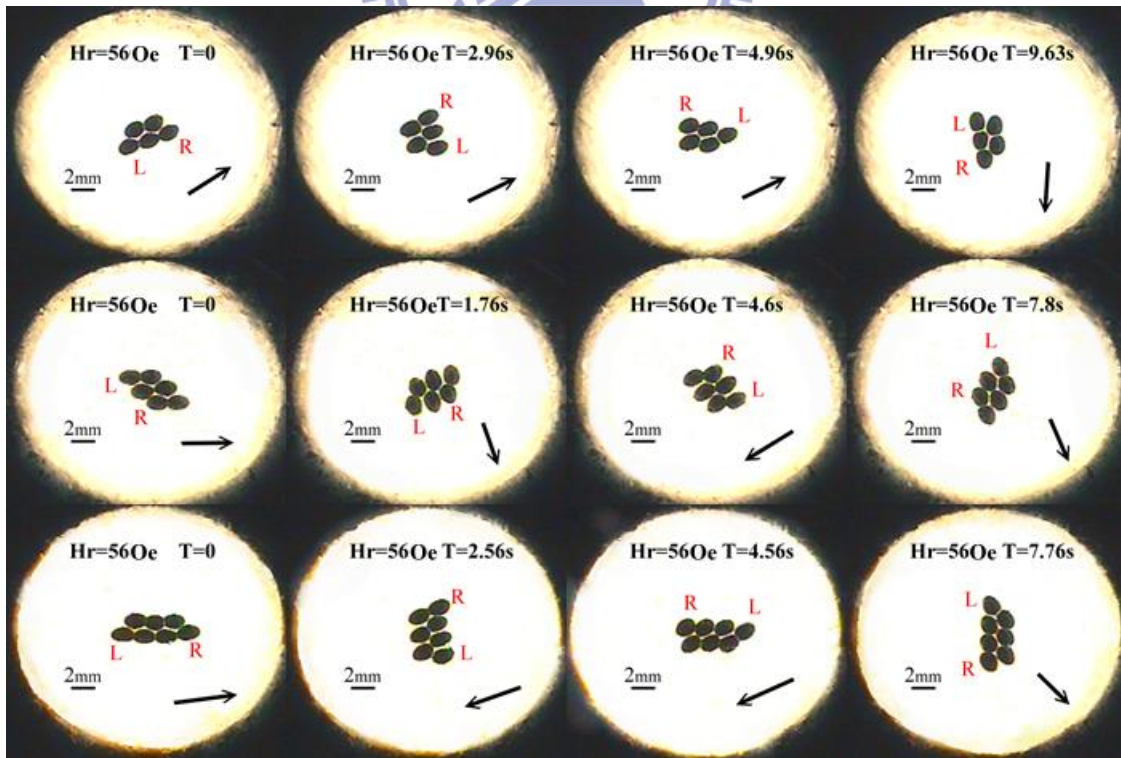


圖 3- 62 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 56G 串接顆數 5~7 運動情形

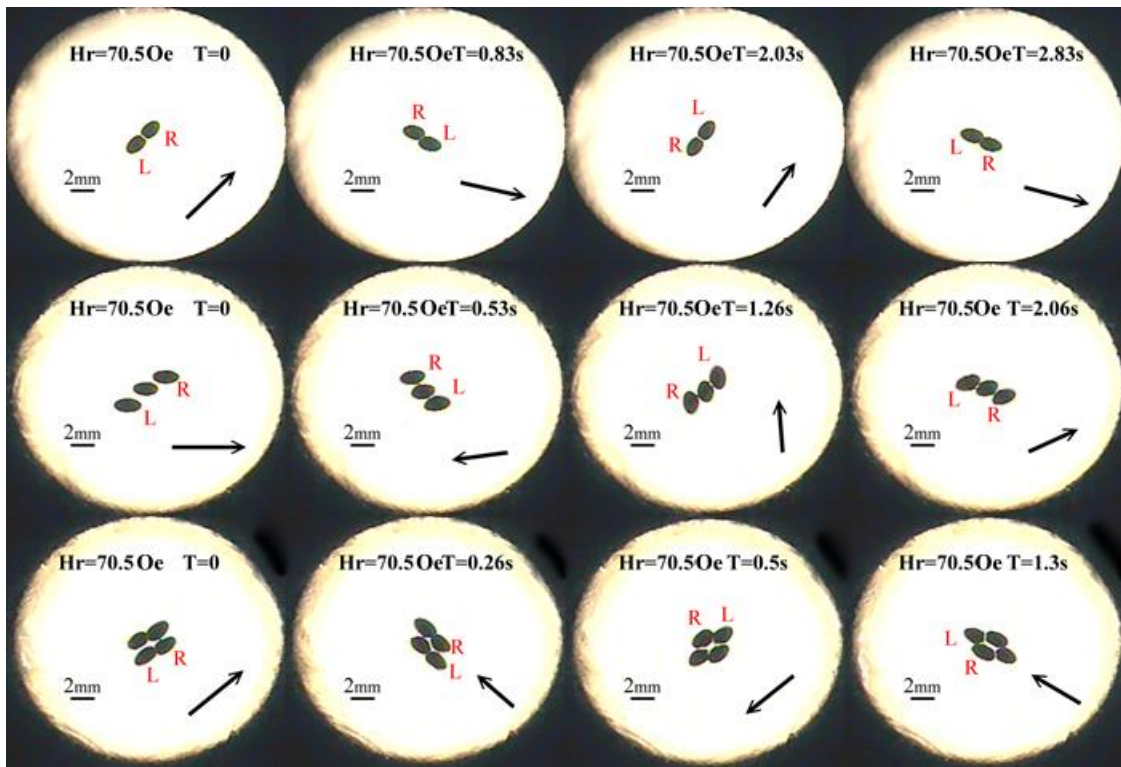


圖 3- 63 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 70.5G 串接顆數 2~4 運動情形

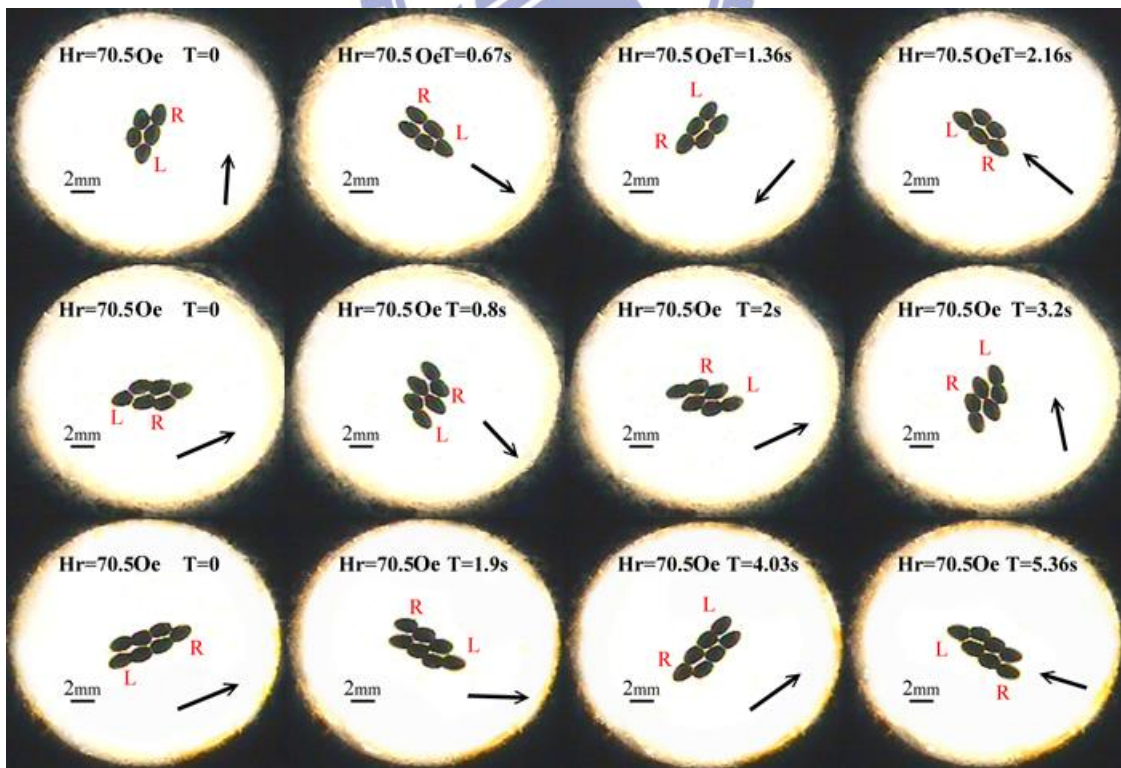


圖 3- 64 液滴直徑 1.44mm 磁場強度 70.5G 串接顆數 5~7 運動情形



磁場強度變化-公轉頻率比較圖

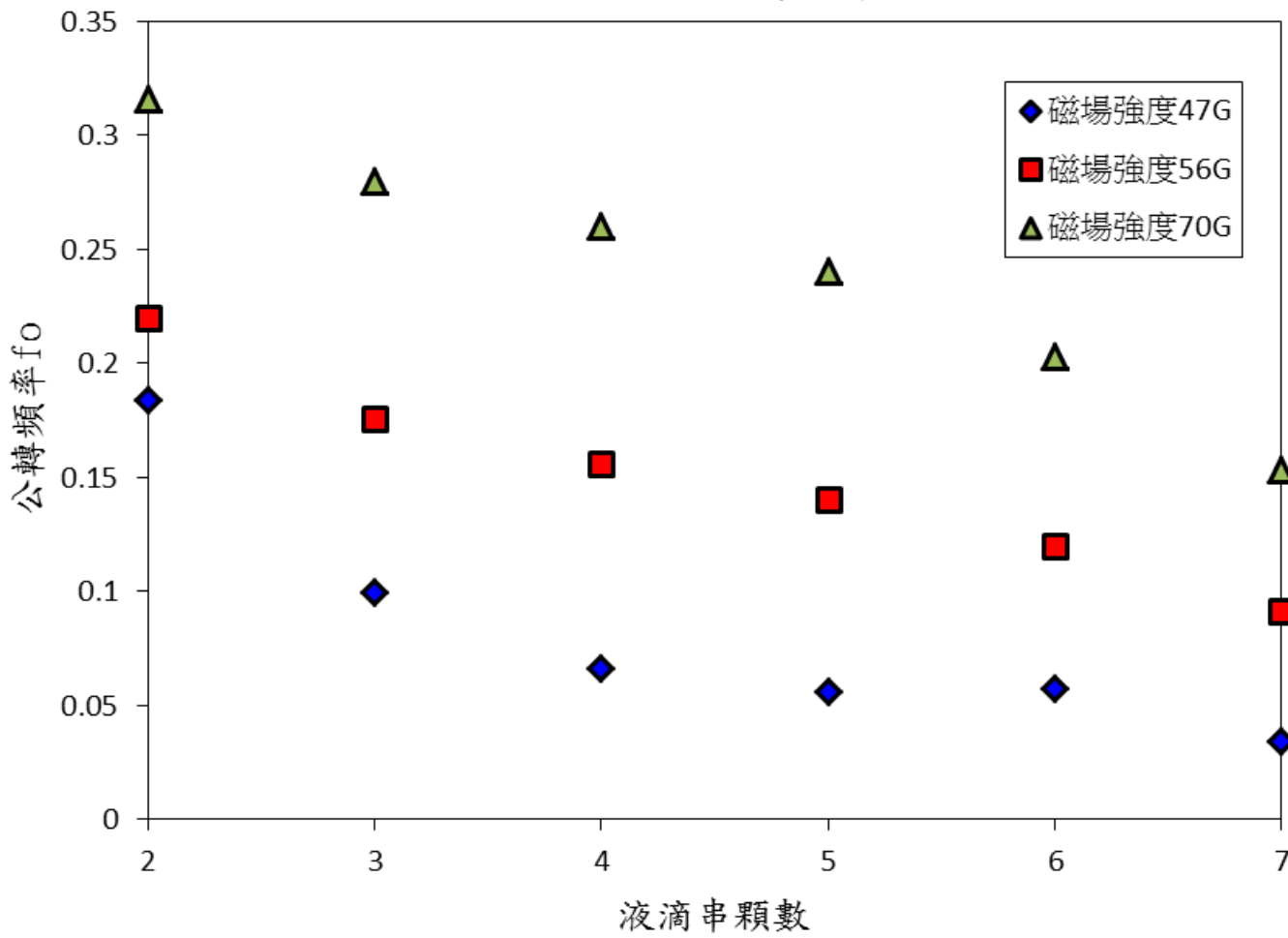


圖 3- 65 磁場強度變化與公轉頻率比較圖

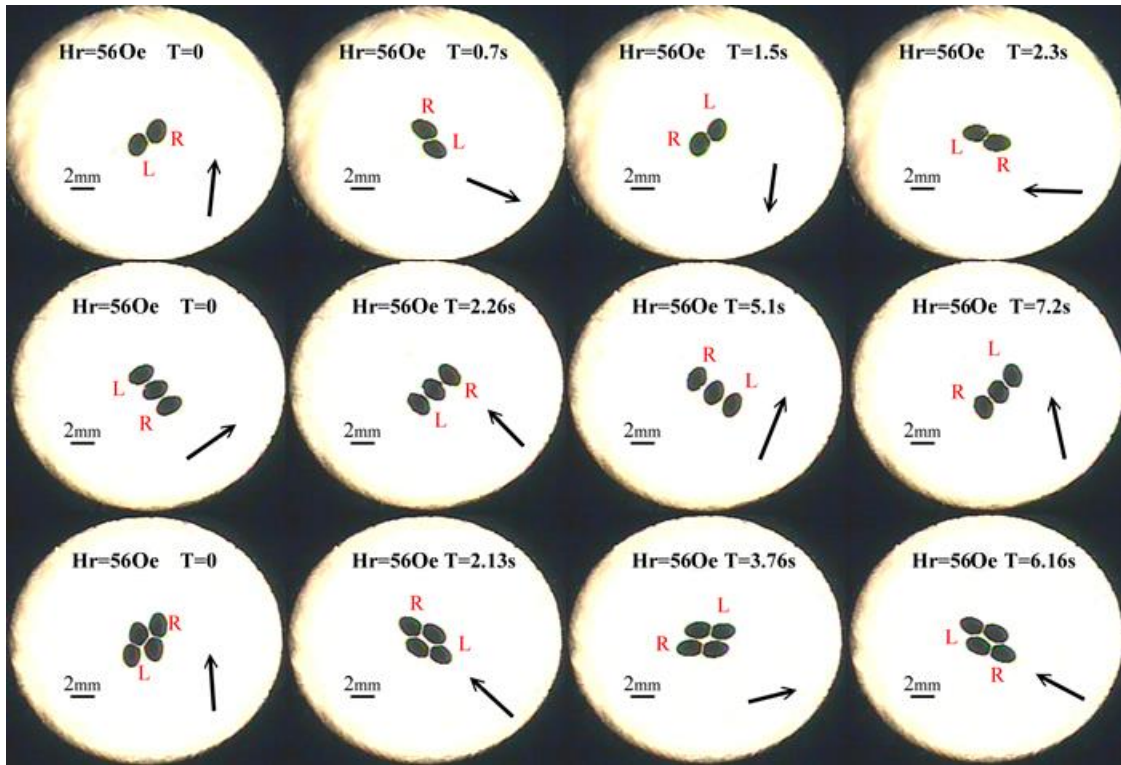


圖 3- 66 液滴直徑 1.67mm 磁場強度 56G 串接顆數 2~4 運動情形

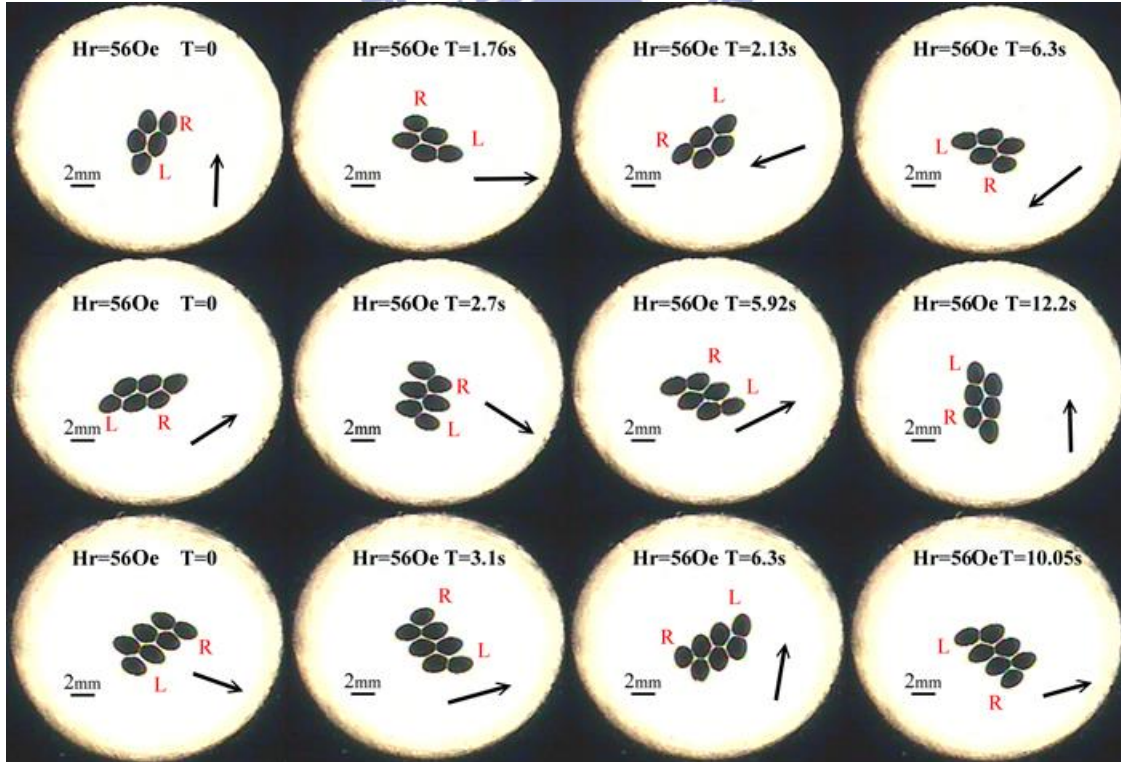


圖 3- 67 液滴直徑 1.67mm 磁場強度 56G 串接顆數 5~7 運動情形

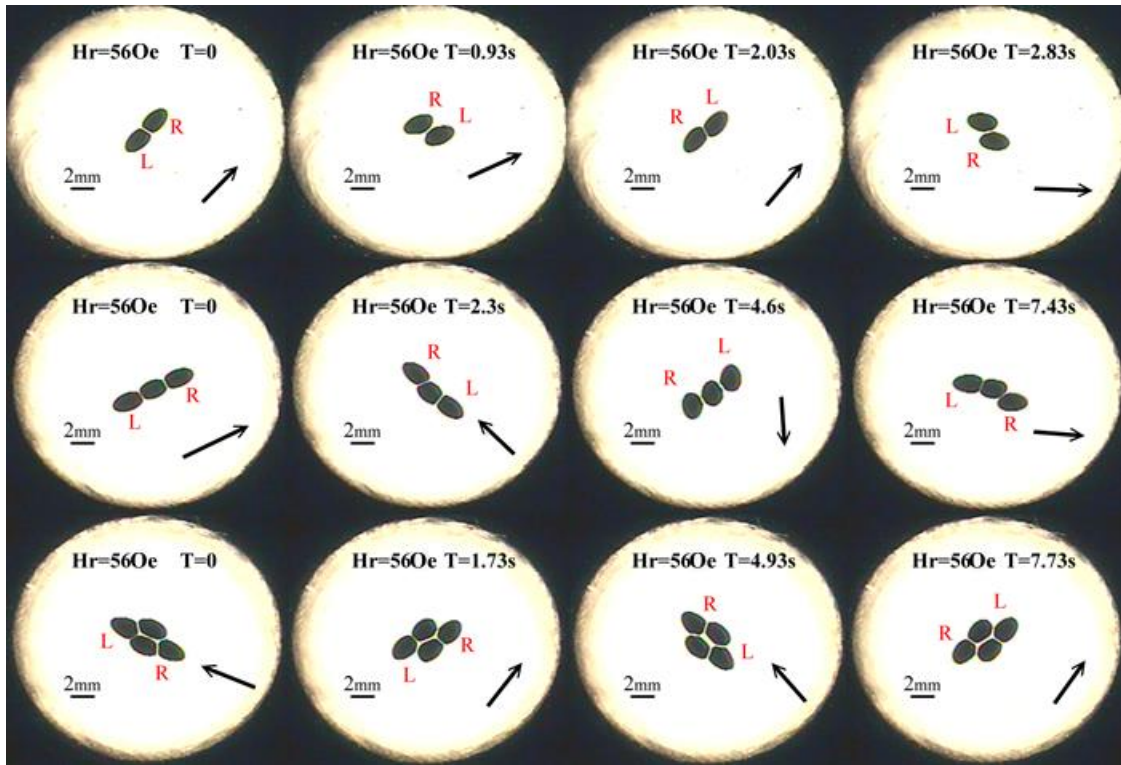


圖 3- 68 液滴直徑 1.89mm 磁場強度 56G 串接顆數 2~4 運動情形

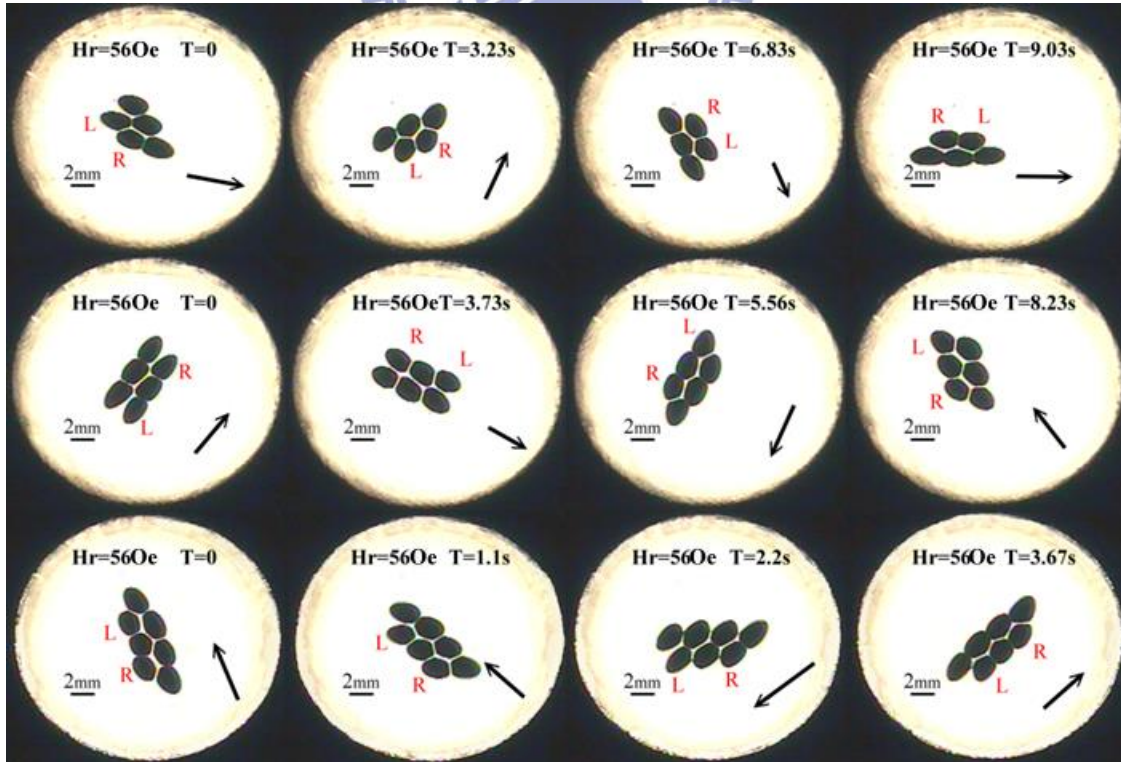


圖 3- 69 液滴直徑 1.89mm 磁場強度 56G 串接顆數 5~7 運動情形

液滴尺寸變化-公轉頻率比較圖

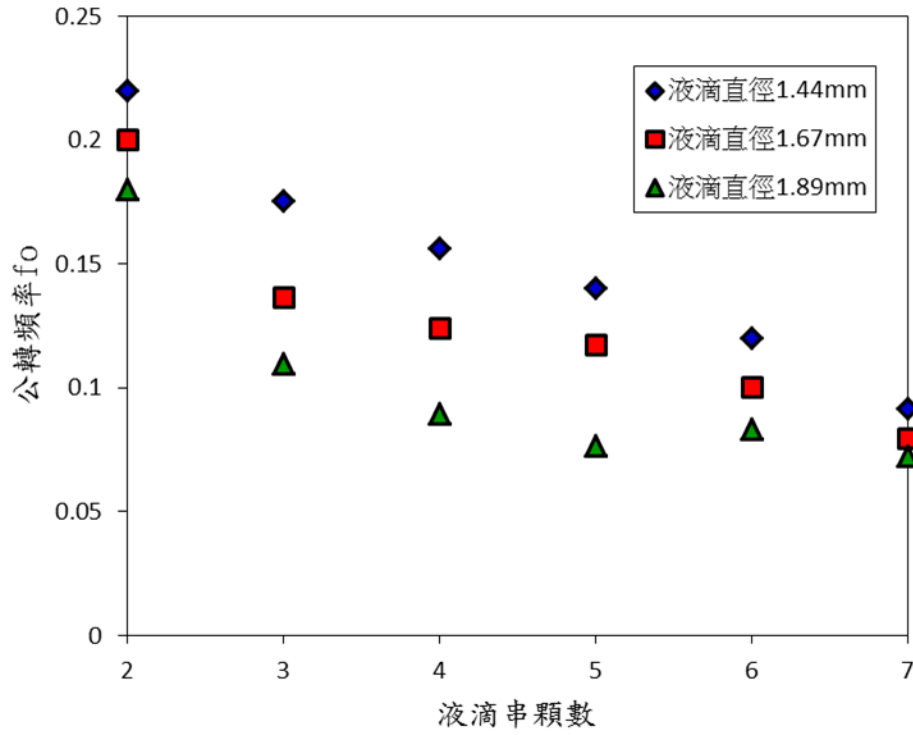


圖 3-70 液滴尺寸變化與公轉頻率比較圖

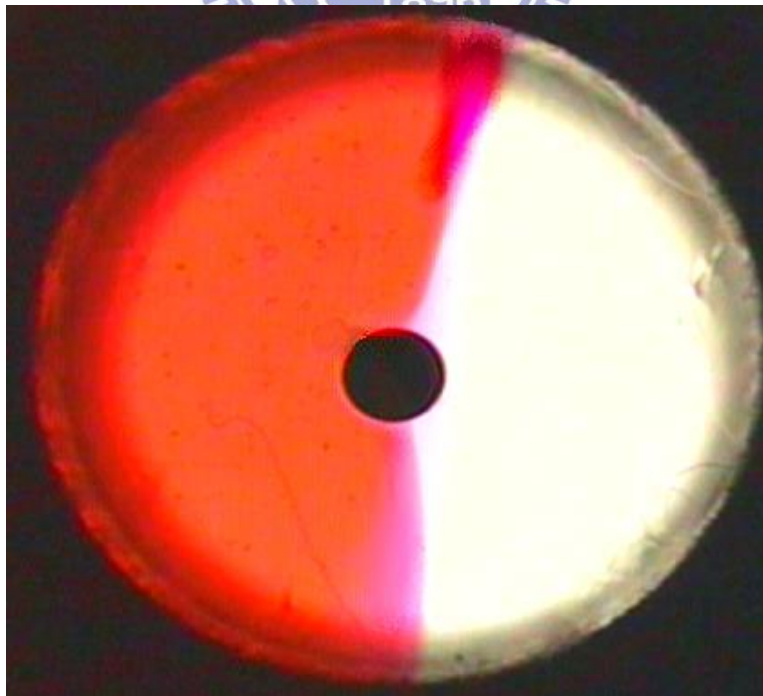


圖 3-71 磁液滴之混合實驗示意圖



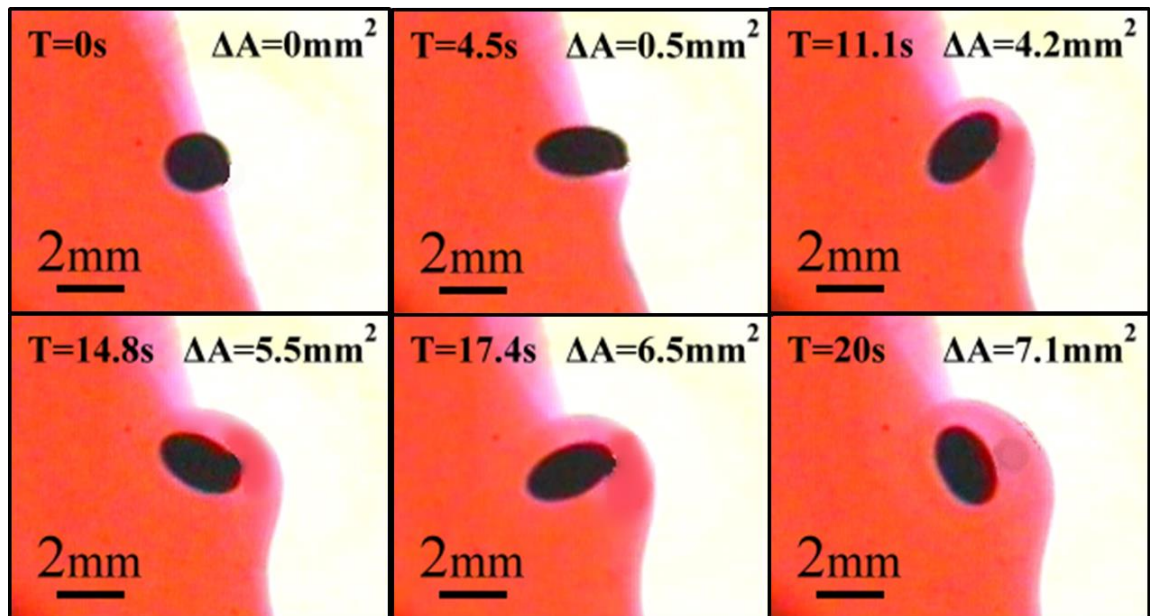


圖 3- 72 磁液滴直徑 1.83mm 磁場強度 56G 混合情形

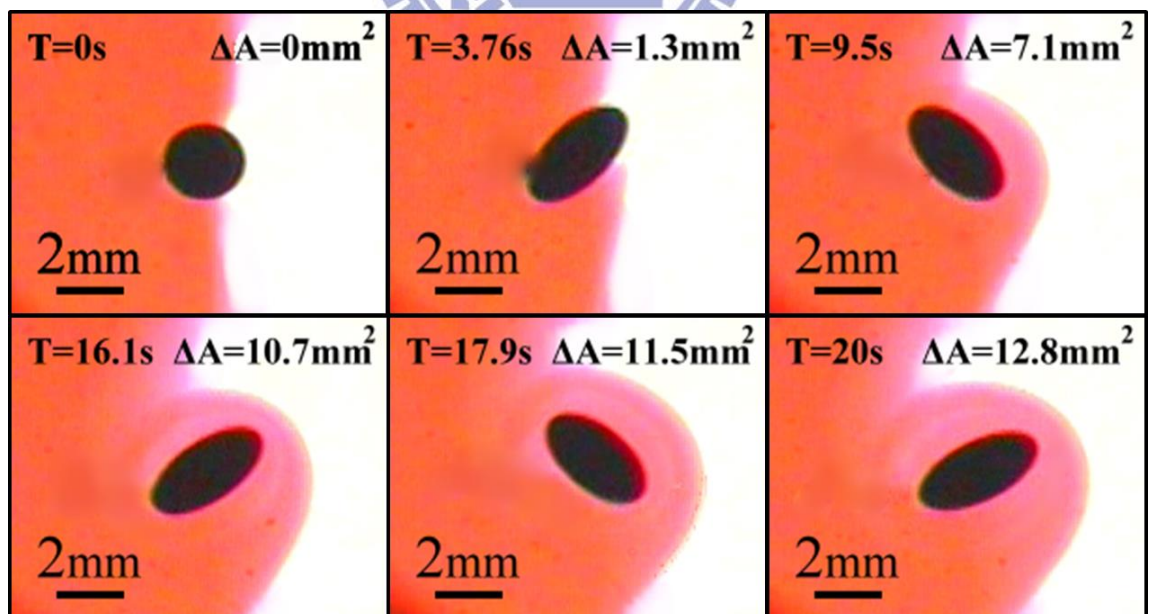


圖 3- 73 磁液滴直徑 2.28mm 磁場強度 56G 混合情形



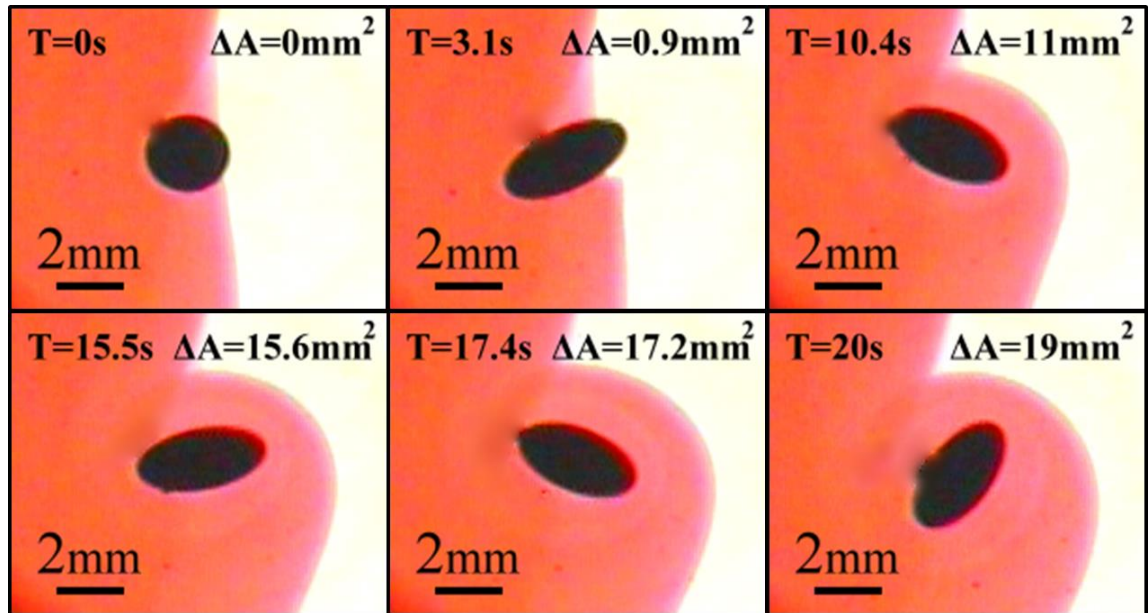


圖 3-74 磁液滴直徑 2.39mm 磁場強度 56G 混合情形

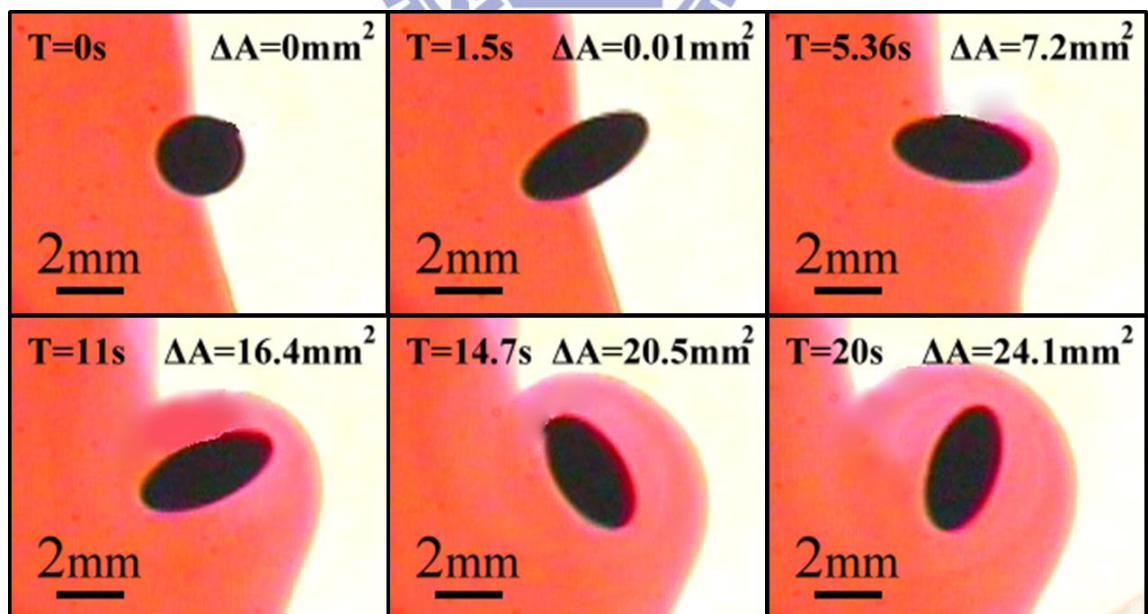


圖 3-75 磁液滴直徑 2.56mm 磁場強度 56G 混合情形

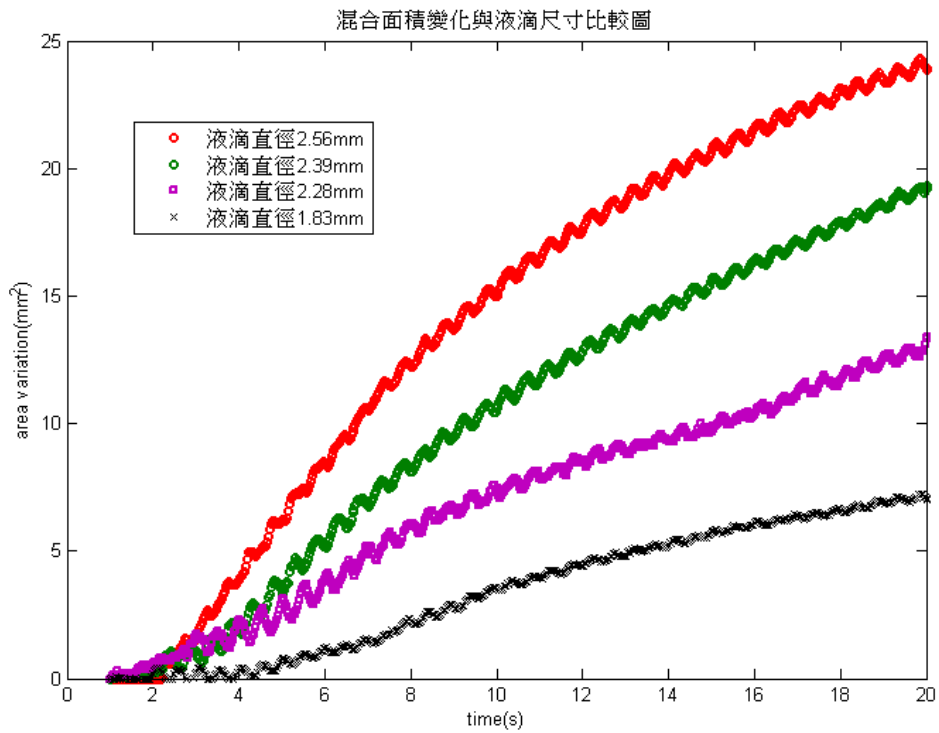


圖 3-76 混合面積變化與液滴尺寸比較圖

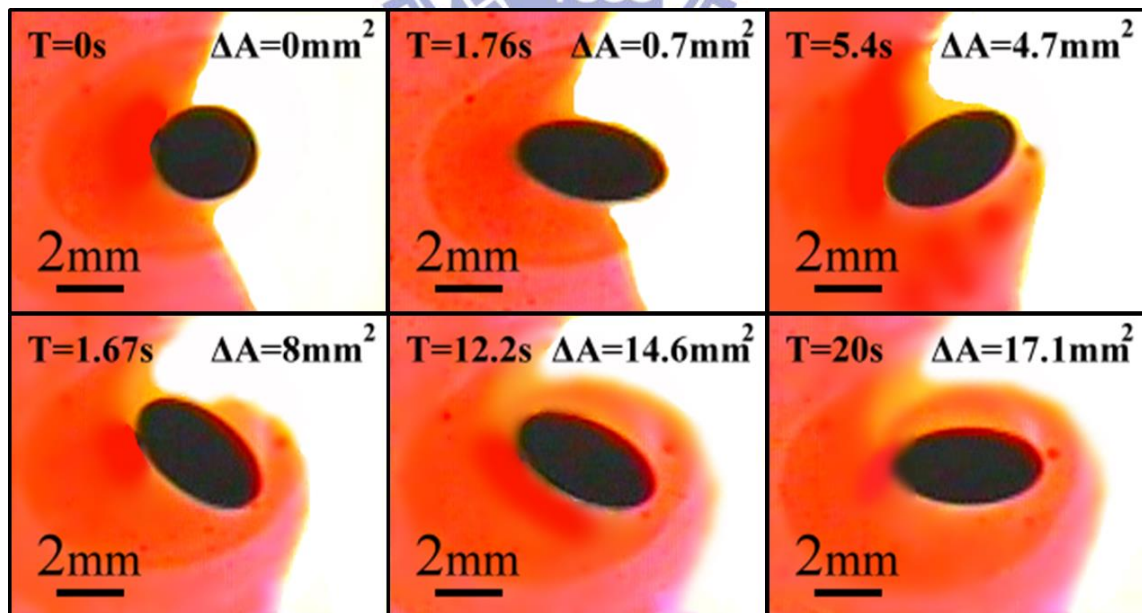


圖 3-77 磁液滴直徑 3.0mm 磁場強度 47G 混合情形

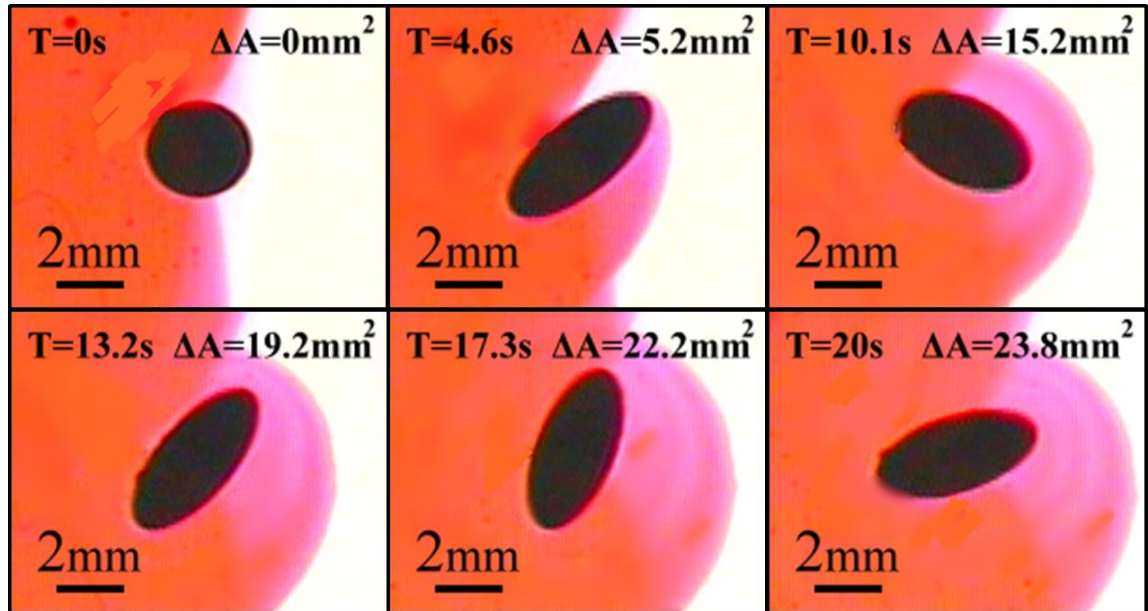


圖 3-78 磁液滴直徑 3.0mm 磁場強度 56G 混合情形

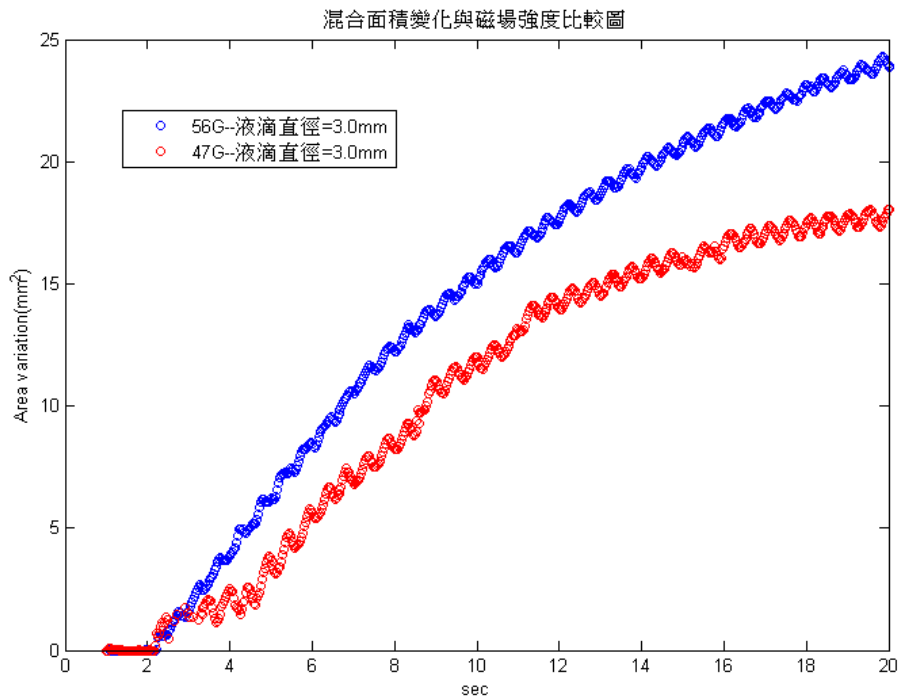


圖 3-79 混合面積變化與磁場強度比較圖



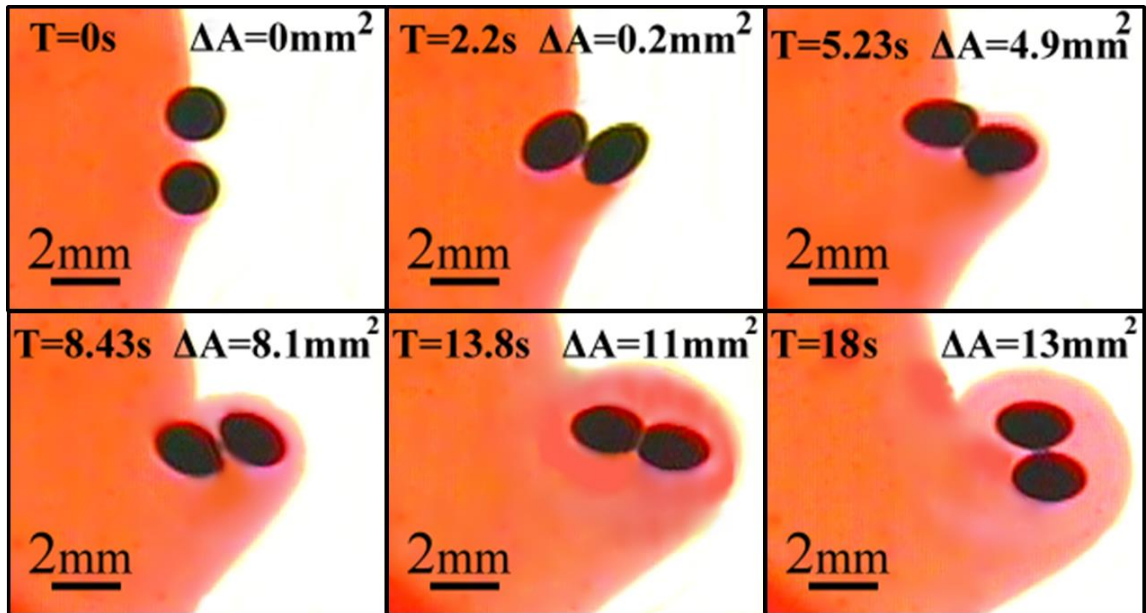


圖 3- 80 液滴串顆數為 2 液滴直徑 1.72mm 磁場強度 56G 混合情形

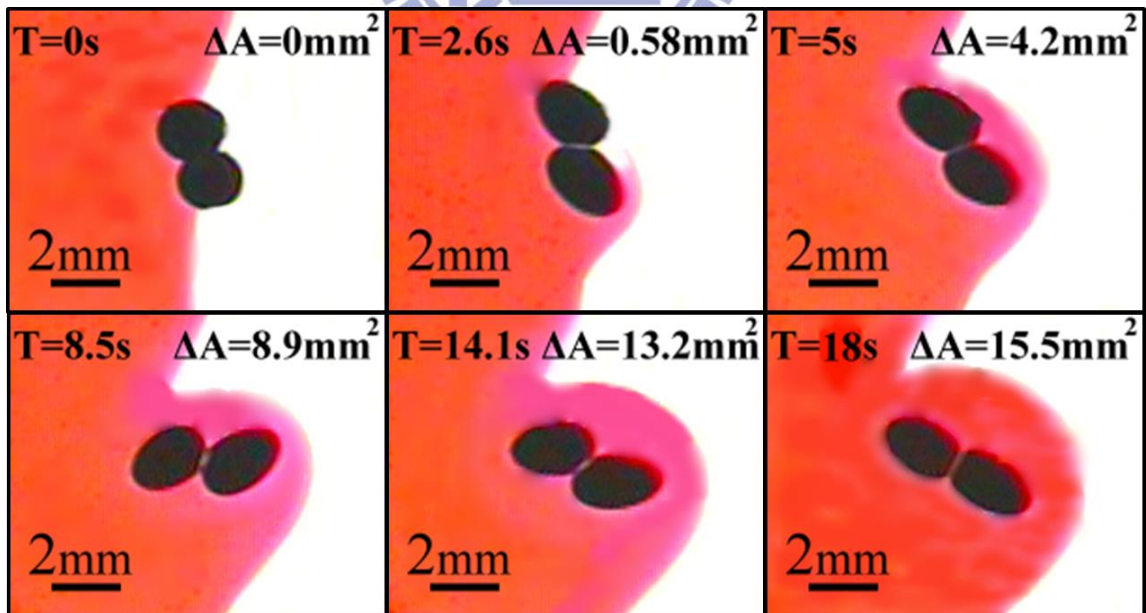


圖 3- 81 液滴串顆數為 2 液滴直徑 1.83mm 磁場強度 56G 混合情形

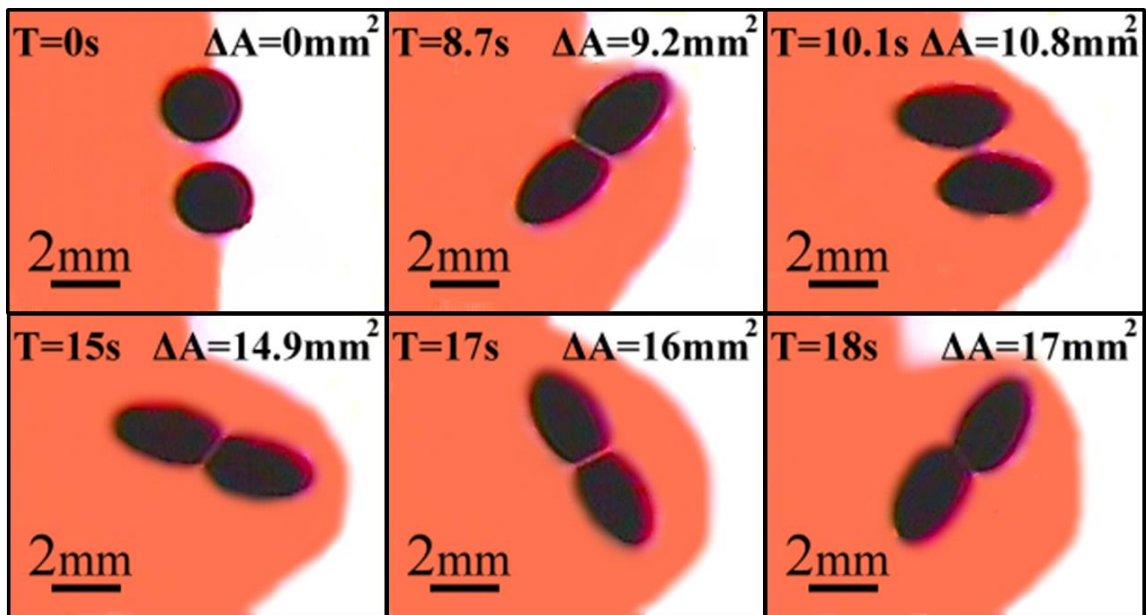


圖 3- 82 液滴串顆數為 2 液滴直徑 2.17mm 磁場強度 56G 混合情形

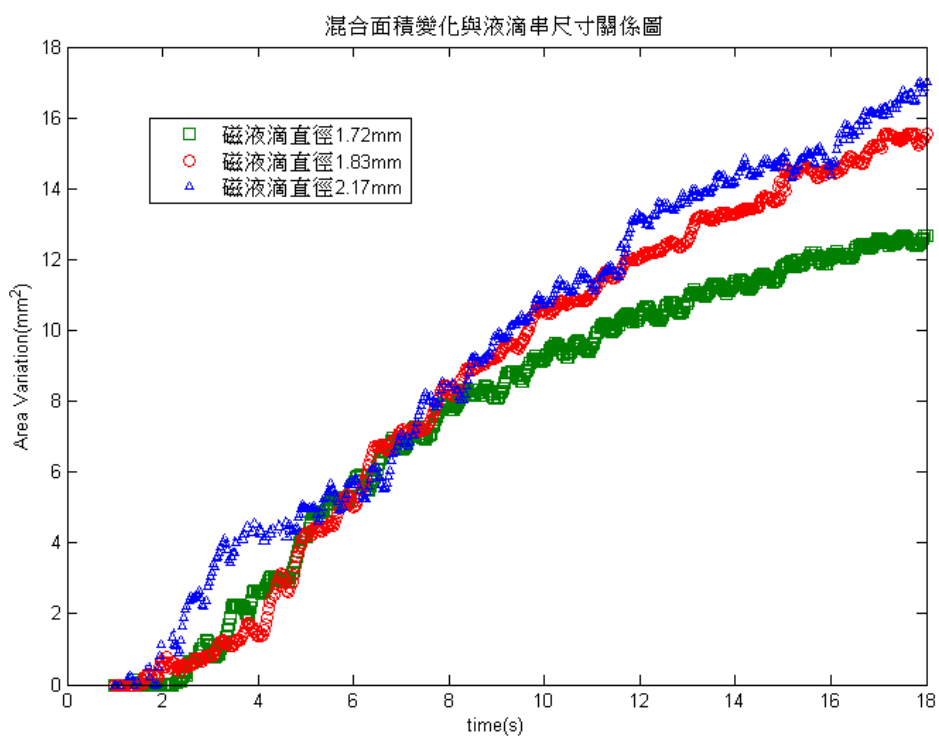


圖 3- 83 混合面積變化與液滴串尺寸關係圖



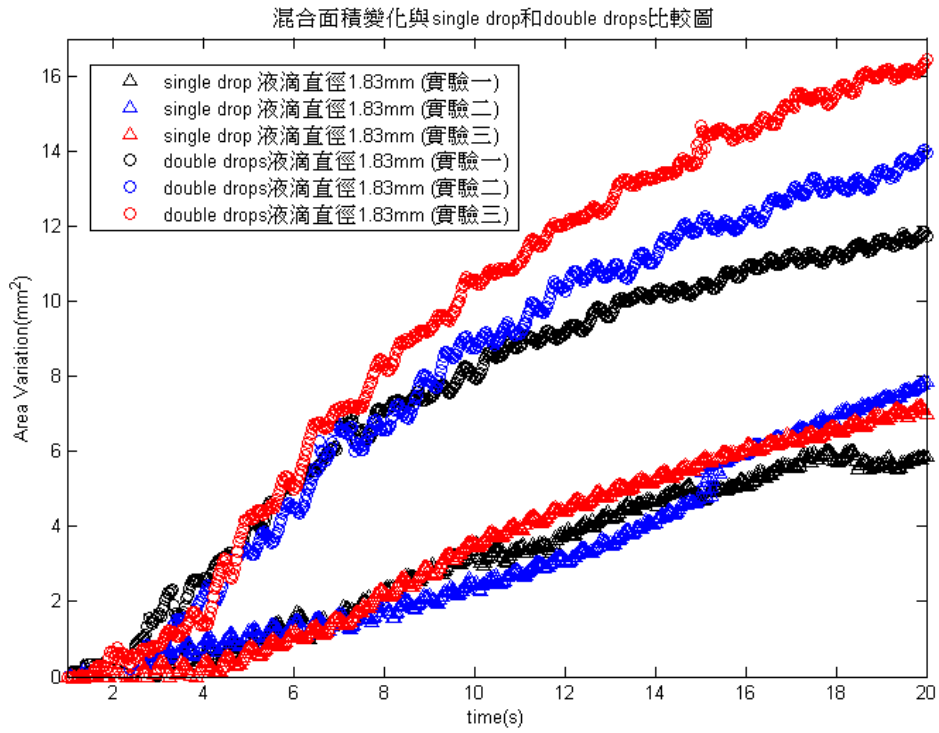


圖 3-84 混合面積變化-單獨磁液滴與液滴串顆數為 2 比較圖



## 第四章 結論

本實驗研究磁性流體之運動行為。在本文研究首先主要探討磁性流體在混合溶液中的界面張力，由於市面上量測界面張力的儀器造價不斐，本實驗欲利用文獻裡計算界面張力。由於市面上所使用的量測方式是由 3D 計算欲得知物周圍的曲率，本實驗利用 2D 的拍攝模式，基本上與其準確性是有一定的誤差，但是我們上可由實驗數據得知，該磁性流體界面張力的範圍，而不至於錯估量值。又由於磁性流體是屬於混合物，本文中發現其界面張力並非為定值，而會因磁場的變化而改變其界面張力，這與文獻中不謀而合，但由於本實驗的磁場強度變化不劇烈，所以本文中將界面張力在本實驗裡當成是定值。若需要使用磁場強度較高的實驗，磁性流體這方面的研究還需多加探討。

在磁性流體的運動行為中，本實驗使用旋轉磁場進行研究，在本實驗中主要研究巨觀下的運動模式，但由於磁性流體會因為磁場而磁化，而磁化力卻是需要利用電腦模擬才能計算出來，所以本文並不探討定量的結果，而是朝整體定性的研究方向。從本實驗不難看出來，磁性流體在巨觀下的運動模式，與文獻裡微觀下的磁液珠受磁場的作用的運動模式相似。在其運動模式下的確磁液滴構成的液滴串與磁液珠所構成的液珠串都會因為與磁場間的角度差每超過 90 度就會反向運動，所以我們在這裡可以很明確地指出在微觀下所運動的理論方程式與在巨觀下所使用的理論方程式，是有一定的關聯。本研究也發現當磁液滴構成的液滴串，其每單顆的磁液滴旋轉的方向都與磁場旋轉的方向一致而無延遲，由於本實驗使用的是低頻率的旋轉磁場，所以磁液滴在較低頻率下其受磁場的感磁還來的及磁場變化的反應時間，所以不會有延遲。而液滴串接顆數越多的情況下，整體的液滴串公轉

頻率會因為阻力的關係而下降，在本研究中並未清楚地計算出阻力的大小，其原因也是因為需要運用電腦的模擬才能得知，但仍可以由阻力的公式中看出若串接數越多，則阻力會越大。也因為液滴串的旋轉並非只有單單磁力和阻力的造成，其每單一顆的磁液滴因磁場的作用而旋轉就會產生流場的影響，但流場的影響本文裡也暫時不進行探討。本實驗的研究中，做了許多方面的量測，若要繼續探討，其實還是有許多尚未的知的現象可以去討論。

本研究的最後章節，粗略的利用旋轉磁場讓磁性流體能讓不同溶液混合，而提高混合效率。在本實驗裡從混合面積變化裡進行觀察，實驗的數據也符合物理意義，其影響混合面積的最主要因素就是液滴的旋轉半徑，若液滴因磁場的作用而拉伸長度變長，也就是代表所能影響的界面的範圍也越廣，所以很明顯地從實驗數據中觀察出；磁液滴要讓兩溶液間的界面十分的平整以及不彎曲，若又要將磁性流體滴入於正中心，在本實驗是一項考驗。只要磁液滴並不剛好介於界面的中心，混合的面積就會有差異。又加上若要將此技術實際運用，回收磁液滴也是一項難題，要回收磁液滴必定會破壞界面的均勻性，在這方面是我們必須克服的。

## 參考文獻

- [1] M. D. Cowley and R. E. Rosensweig, “The interfacial stability of a ferromagnetic fluid,” *J. Fluid Mech.*, 30, 671(1967).
- [2] M. Zahn, “Magnetic fluids and nanoparticle applications to nanotechnology”, *Journal of Nanoparticle Research*, 3, 73, (2001)
- [3] R. Richter and I. V. Barashenkov, “Two-dimensional solitons on the surface of magnetic fluids”, *Phys. Rev. Lett.*, 94, 184503, (2005).
- [4] C. Gollwitzer, G. Matthies, R. Rither, I. Rehberg and L. Tobiska, “Surface topography of a magnetic fluid—a quantitative comparison between experiment and numerical simulation”, *J. Fluid Mech.*, 571, 455-474, (2007).
- [5] S. Rhodes, J. Perez, S. Elborai, S.-H. Lee, and M. Zahn, “ Ferrofluid spiral formations and continuous-to-discrete phase transitions under simultaneously applied DC axial and AC in-plane rotating magnetic fields ” *J. Magn. Mater.* 289, 353, (2005).
- [6] C.-Y. Chen, S.-Y. Wu and J. Miranda, “Fingering Patterns in the Lifting Flow of a Confined Miscible Ferrofluid,” *Phys. Rev. E.*, 75, 036310 (2007).
- [7] A. V. Lebedev, A. Engel, K. I. Morozov, and H. Bauke, “Ferrofluid drops in rotating magnetic fields,” *New Journal of Physics* 5, 57.1–57.20(2003).
- [8] S Afkhami, AJ Tyler, Y Renardy...” *Deformation of a hydrophobic ferrofluid droplet suspended in a viscous medium under uniform magnetic fields* “ *Journal of Fluid* 2010 Cambridge Univ Press
- [9] J.C Bacri and D. Salin “instability of ferrofluid manetic drops under magnetic field.” *J Physique* 43(1982) L-649 L-654
- [10] Bacri J-C and Salin D (1982). *Physique* 43 L649

[11] Chandrasekhar S 1987 Ellipsoidal Figures of Equilibrium (New York: Dover)

[12] Yan-Hom Li "Trajectory Shift of Magnetic Microchains in an Oscillating Field" 國立交通大學機械工程學系 (2013)

[13] Chen CY, Li CS (2010) Ordered Microdroplet Formations of Thin Ferrofluid Layer Breakups. *Phys. Fluids* 22, 014105.

[14] Chen CY, Wu WL, Miranda JA (2010) Magnetically induced spreading and pattern selection in thin ferrofluid drops. *Phys. Rev. E* 82, 056321.

[15] Li YH, Sheu ST, Pai JM, Chen CY (2012a) Manipulations of Oscillating Micro Magnetic Particle Chains. *J. Appl. Phys.*, 111: 07A924.

[16] Li YH, Chen CY, Sheu ST, Pai JM (2012b) Dynamics of a Microchain of Superparamagnetic Beads in an Oscillating Field. *Microfluid Nanofluid* in press.

