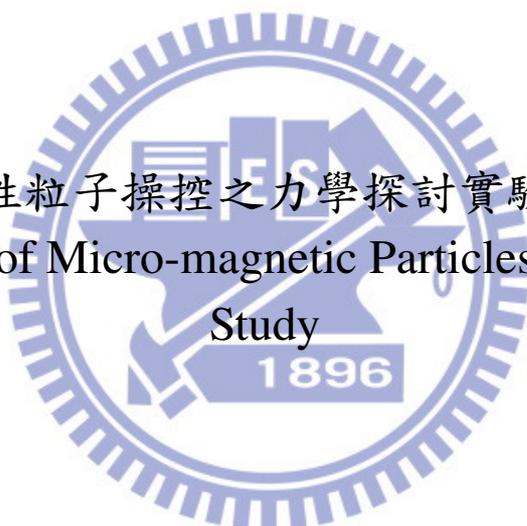


國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

微磁性粒子操控之力學探討實驗研究
Manipulation of Micro-magnetic Particles Experimental
Study



研究生：許世聰

指導教授：陳慶耀 博士

中華民國一百年七月

微磁性粒子操控之力學探討實驗研究

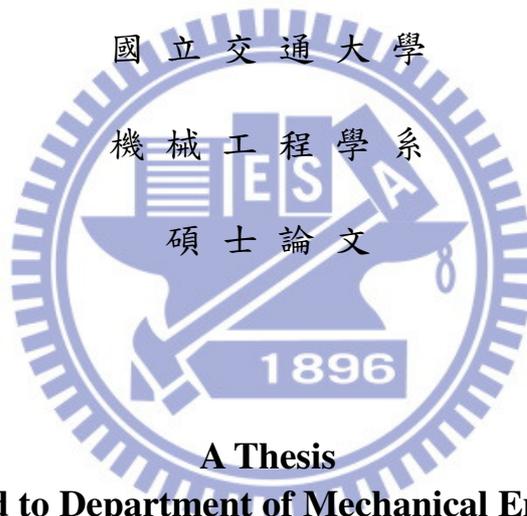
Manipulation of Micro-magnetic Particles Experimental Study

研究生：許世聰

Student : Shih -Tsung Sheu

指導教授：陳慶耀

Advisor : Ching-Yao Chen



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 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年七月

磁性流體電能轉換應用於流場量測之實驗研究

學生:許世聰

指導教授:陳慶耀

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

本文針對微米尺度磁性粒子之順磁性質，首先利用外加磁場進行磁性粒子運動之操控實驗研究，包含將粒子串接成為直線鏈狀以及操控其擺動模式，以組構成為一可調控式之微機構。同時針對此微機構致動時之力學機制進行理論探討，並配合流場模擬所得之流場特性，完整了解其鏈狀微機構所受包含磁力、慣性力與流體阻力等之相互關係，估測其運動狀態及結構強度。有別於昂貴且複雜之利用DNA串接之奈米磁性粒子串，此類型之可調控式微機構具有簡易且可逆性之特色，適合應用於先進生物技術或者微機械系統。於實驗方面成功完成微磁粒子串於擺動磁場下之操控，並測試其擺動強度之極限與其破裂之模式，此模式與理論分析所獲得之結果趨勢吻合。

關鍵詞：微磁性粒子，可調控式微機構，擺動磁場

誌謝

在這碩士的兩年生涯中，首先要感謝陳慶耀教授，在他這兩年的指導下，順利的進行研究，即使途中遇到許多瓶頸，都在老師的指引下一一解決，順利的完成論文，同時也感謝老師讓我們在碩士兩年內接觸了許多學者的研究，讓我們對於這項領域更加的有收穫。除了學業上的教導，陳老師也很關心我們的平常生活，也關心著我們未來的前途，讓我們在這兩年內順利的完成了學業，並且讓我們準備好邁向人生的下一個階段。

此外、還要感謝學長姐立杰、程雄、鴻筠、琦雯、聖焱在研究上的協助和人生經驗上的分享，讓我們了解他們一路上來的辛苦和努力，還要感謝研究團隊彥宏、杰民一同的為這項研究付出，並且時常的提供建議讓整項研究過程順利完整的進行，當然還要感謝啟鳴、裕盛、柏瑋、佳芬在我碩一時實驗研究上的幫助，並且讓我很快的融入了這間實驗室，以及感謝同窗文良、國安，不但在修習課程上的幫助，更讓這兩年碩士生活充滿了快樂。此外還要感謝學弟定宏、隆福、育辰、彥志在實驗中的輔助和幫忙，讓實驗更加的順利，並且讓複雜性流體實驗室不但是個實驗室，更是一個歡樂的大家庭。

最後我要感謝我父母的栽培，讓我有這個機會研讀吸收更多的知識，也感謝我身邊的朋友，給予我很多鼓勵，讓我順利的完成這篇論文。此外，尚有許多曾幫助過我的人，雖無法盡舉，在此獻上最誠摯的敬意和謝意，所有感激無法言喻，僅以此論文獻給我所有感謝的人。

目錄

摘要.....	I
誌謝.....	II
目錄.....	III
表目錄.....	V
圖目錄.....	VI
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.....	8
第二章 實驗原理、設備及方法	19
2-1 實驗儀器及說明.....	19
2-2 實驗步驟.....	21
2-3 理論背景.....	22
第三章 結果與討論	37
3-1 兩磁性粒子在均勻磁場下受力分析.....	37
3-2 磁性粒子串接成鏈.....	39
3-3 磁性粒子串鏈之擺動及旋轉操控.....	40

3-4 磁性粒子串鏈之擺動力學探討	42
3-4-1 粒子串兩邊斷裂	43
3-4-2 粒子串中央分離	44
3-5 粒子串游動	47
3-6 結論	47
參考文獻	79



表目錄

表一 磁性流體 M-450 Epoxy 物理性質	35
表二 M-450 Epoxy 之物理性質	36
表二 蒸餾水之物理性質	36
表四 兩不同磁場大小磁性粒子互相接觸之受力值比較.....	51
表五 單位時間粒子串游動距離與 St 值	76
表六 單位時間粒子串游動距離與 St 值(小振幅).....	77
表七 單位時間粒子串游動距離與 St 值(大振幅).....	78



圖目錄

圖 1-1 磁性粒子拍攝畫面	10
圖 1-2 多顆粒子串接成鍊情形	10
圖 1-3 磁性粒子應用於 DNA 吸附.....	11
圖 1-4 Joanne H. E. Promislow 以及 Alice P. Gast 學者之實驗式裝置圖	11
圖 1-5 Joanne H. E. Promislow 以及 Alice P. Gast 學者磁性粒子拍攝圖	12
圖 1-6 不同體積容率之粒子串在不同外加磁場長度下隨時間變化圖	12
圖 1-7 相同外加磁場之下，不同體積容率粒子串接長度隨時間之變化圖	13
圖 1-8 磁場 $H=12.4\text{kA/m}$ 體積容率 $\phi=0.0005$ 頻率 $f=0.0005$ 順時針旋轉 ..	14
圖 1-9 磁場 $H=12.4\text{kA/m}$ 體積容率 $\phi=0.0005$ 頻率 $f=0.0005$ 逆時針旋轉 ..	14
圖 1-10 磁場 $H=12.4\text{kA/m}$ 體積容率 $\phi=0.0005$ 頻率 $f=0.05$ 順時針旋轉 ..	15
圖 1-11 不同外加磁場大小之下相位角隨著旋轉頻率增加之變化圖	16
圖 1-12 磁性粒子串在旋轉磁場下，Ma 數由 0.0012 變化至 1.2 之情形.....	16
圖 1-13 利用粒子串在微流道中之開關閥門應用圖	17
圖 1-14 利用 DNA 串接表面鍍有鏈黴素之磁性粒子示意圖.....	17
圖 1-15 磁性粒子隨時間擺動實驗圖	18
圖 2-1 實驗架構示意圖.....	26

圖 2-2 交流電源供應器.....	26
圖 2-3 直流電源供應器.....	27
圖 2-4 電木材質線圈之尺寸設計圖	27
圖 2-5 壓克力平台尺寸設計圖	28
圖 2-6 壓克力平台.....	28
圖 2-7 量測磁場碳棒及高斯計	29
圖 2-8 資料截取器.....	29
圖 2-9 產生均勻磁場之線圈擺設.....	30
圖 2-10 兩線圈串連連接直流電源供應器圖	30
圖 2-11 產生擺動磁場之線圈擺設.....	31
圖 2-12 四線圈配合直流及交流電源供應器示意圖	31
圖 2-13 利用碳棒量取線圈中心之三軸方向之磁場變化	32
圖 2-14 利用兩交流電源供應器分別控制兩線圈示意圖	32
圖 2-15 Invitrogen 公司生產之 Dynabeads M-450 Epoxy 及 M-270 Epoxy ...	33
圖 2-16 磁性流體 M-450 Epoxy 之磁化曲線.....	33
圖 2-17 兩顆磁性粒子在均勻磁場下示意圖	34
圖 2-18 磁性粒子擺動受力情形示意圖	34
圖 2-19 計算磁性粒子串正向力示意圖	35
圖 3-1 外加磁場為 72.8Oe，二原始分離之磁粒子隨時間之運動情形。	49

圖 3-2 外加磁場為 72.8Oe 磁性粒子位置隨時間變化圖.....	50
圖 3-3 外加磁場為 72.8Oe 磁性粒子受力隨時間變化圖.....	51
圖 3-4 外加磁場為 72.8Oe 磁性粒子受力隨位置變化之理論值	51
圖 3-5 不同磁場大小粒子串接情形	52
圖 3-6 不同濃度粒子在相同磁場大小 51Oe 開啟後 1 至 4 秒串接情形	52
圖 3-7 8 顆粒子串擺動情形	53
圖 3-8 15 顆粒子串擺動情形	54
圖 3-9 粒子串擺動之最大角度與磁場震盪擺動之最大角度關係	55
圖 3-10 磁場大小與擺動角度關係	55
圖 3-11 8 顆粒子串擺動情形加入對應時間之磁力線	56
圖 3-12 15 顆粒子串擺動情形加入對應時間之磁力線	56
圖 3-13 8 顆和 15 顆粒子擺動過程角度差隨時間變化	57
圖 3-14 8 顆和 15 顆粒子 phase lag 隨時間變化	58
圖 3-15 頻率 $f=1$ 之粒子旋轉運動	59
圖 3-16 頻率 $f=2$ 之粒子旋轉運動	60
圖 3-17 軸向方向和徑向方向示意圖	61
圖 3-18 軸向方向受力情形	61
圖 3-19 徑向方向受力情形	61
圖 3-20 11 顆粒子串兩邊斷裂過程.....	62

圖 3-21 15 顆粒子串兩邊斷裂過程	63
圖 3-22 16 顆粒子串兩邊斷裂過程	64
圖 3-23 20 顆粒子串兩邊斷裂過程	65
圖 3-24 20 顆粒子串中間分離過程	66
圖 3-25 16 顆粒子串中間分離過程	67
圖 3-26 11、15、16、20 顆粒子串斷裂時間記錄圖	68
圖 3-27 三維 11 顆粒子串流場($Z=0$)之壓力分布圖	68
圖 3-28 三維 15 顆粒子串流場($Z=0$)之壓力分布圖	69
圖 3-29 三維 20 顆粒子串流場($Z=0$)之壓力分布圖	69
圖 3-30 三維 11 顆粒子串所受之徑向磁偶極力(Y 軸為時間軸).....	70
圖 3-31 三維 15 顆粒子串所受之徑向磁偶極力(Y 軸為時間軸).....	70
圖 3-32 三維 20 顆粒子串所受之徑向磁偶極力(Y 軸為時間軸).....	71
圖 3-33 三維 11 顆粒子串所受之向心力(Y 軸為時間軸).....	71
圖 3-34 三維 15 顆粒子串所受之向心力(Y 軸為時間軸).....	72
圖 3-35 三維 20 顆粒子串所受之向心力(Y 軸為時間軸).....	72
圖 3-36 三維 11 顆粒子串所受之流體阻力(Y 軸為時間軸).....	73
圖 3-37 三維 15 顆粒子串所受之流體阻力(Y 軸為時間軸).....	73
圖 3-37 三維 20 顆粒子串所受之流體阻力(Y 軸為時間軸).....	74
圖 3-36 三維 11 顆粒子串受到流體阻力相鄰粒子角速度差異圖	74

圖 3-37 三維 15 顆粒子串受到流體阻力相鄰粒子角速度差異 75

圖 3-38 三維 20 顆粒子串受到流體阻力相鄰粒子角速度差異 75

圖 3-42 大小顆粒子串接在擺動磁場中游動 76

圖 3-43 粒子串在較小擺動振幅下游動 77

圖 3-44 粒子串在較大擺動振幅下游動 78



符號說明

η	流體黏滯係數
f	轉動頻率
μ_0	真空磁導率
μ_s	溶劑磁導率
M	磁化強度
m	磁偶極矩
a	粒子半徑
χ	磁化率
H_0	外加磁場
β	磁導率對比因子
μ_p	磁性粒子磁導率
ξ	摩擦係數
v	移動速度
N	正向力
F^d	偶極力
F^h	流體組力
C	修正係數



r	兩粒子之間之距離
ω	角速度
α	角加速度
I	轉動慣量
m_i	粒子質量



第一章 緒論

1-1 前言

流體研究已經是極為成熟且具歷史性的領域，對於不同性質之流體，學者們為了方便分類研究將其分類成不同的型式名稱，配合著不同的統御方程式解決了許多相關之研究問題，同樣的也利用不同的流體性質應用於不同之層面。而對於較一般流體不同類型之流體，其特性在於這些流體內部懸浮了許多微小的感磁性或者感電的粒子，而此時流體便可隨著外界磁場或者電場環境之改變，呈現出新的流體黏滯度以及其他機械性質，間接的利用此特性發展了許多相關之產品以及提出了許多相關之研究。而於1999年 Larson 學者[1]將此種特殊的流體命名為複雜性流體(complex fluid)，而為了方便研究，隨著不同的複雜性流體之特性學者也將其分類成主要三大類：

- (1) The magnetorheological fluids [2]，簡稱為(MR fluid)，成份為由微米大小等級的順磁性粒子散佈在一般有機溶液或者水液之中組成，由於粒子顆粒遠大於奈米大小粒子，因此在流體中受布朗運動的影響程度較奈米級的粒子來的小，對於其受力分析以及運動型態較奈米粒子容易估測不受影響。可利用此粒子之順磁特性，由不同型態之外加變化磁場來改變粒子在溶劑中的排列狀態以及運動模式，藉此可以運用於先進生物技術或者微奈米之機械系統。而本文將針對較易觀測且較容易操控之微米尺度之磁性粒子做為研究對象，並且觀測紀錄磁性粒子在不同型式磁場之下的運動模式並且估算其受力情形。磁性粒子於溶液中之散佈情形如圖 1-1 所示。此外磁性粒子在外在磁場移除之後，將會恢復到沒有磁極之狀態(初始狀態)，配合著磁性粒子球體表面上可以附加不同功能之化合物，這兩項特性結合一起將可方便利用於許多現今之科技應用並且可以達到重複的使用以降低成本的目的。

(2) The ferrofluids[3]，為一般較常聽見之磁性流體，通常由 Fe_3O_4 或者 Fe_2O_3 等成份組成，和(MR fluid)主要不同之處在於其懸浮在流體中之磁性粒子為奈米尺度大小。此種奈米等級的磁性粒子因為質量較小所以受到布朗運動的影響較大，較難預測其運動模式，ferrofluid 之應用範疇也極為廣泛，包含了太空科技、阻尼機制及軸封技術。因於太空中受無重力因素影響，傳統利用自然對流所設計之熱傳導機構無法有效應用，因此可使用磁性流體替代，並以外加磁場替代重力場產生對流效應。此外磁性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，來增加變化黏性效應，因而被廣泛應用於阻尼機制。而在軸封方面，則著眼於磁流體可為外加磁場所支持而附著於軸壁，無需如一般流體需要容器支撐，即可有效分離軸封。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率變化，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。

(3) The electrorheological fluids[4] 又簡稱(ER)fluid，流體中粒子大小尺寸和(MR)fluid 相似，於1947由Winslow學者發展出同時獲得專利並於1949年發表，相關之研究包含1989年Gast和Zukoski學者[5]以及1996年Parthasarathy和Klingenberg學者[6]所發表之文獻。(ER)fluid之組成成份為由不導電之微米尺度大小等級之粒子懸浮於溶液之中，其性質會隨著外加環境電場改變，在外加電場加入後，(ER)fluid將會表現出部分固

體之特性，而且反映時間極為快速，並且也有著可逆的性質，在外加電場移除之後流體將會回復到原始狀態。而此流體應用層面也非常的廣泛，像是應用於微閥門裝置，可利用外加電場以改變流體之性質來控制閥門開關，甚至在未來可應用於軍事方面，利用(ER)fluid 來填充防彈背心以達到相同功能但是減輕重量的目的。

隨著磁場改變其性質(包含其有效黏滯性以及降伏應力)的流體又稱為磁變流液，於 1948 年由 Rabinow[7]學者發展出來，並且在三年後 1951 年獲得美國專利[8]，同時將磁性流體應用於離合器系統之中。磁性流體之研究隨之展開，即便如此但是在應用層面卻是發展的緩慢，直到 1986 年 Shulman[9]學者以及 1988 年 Block 和 Kelly 學者[10]研究出磁性流體的穩定性以及機械性質之後，磁性流體在應用層面變開始卓越的發展，由於磁性流體在感磁之後會有不同的特性，此外磁性流體在未受磁感應時可視為一般性的牛頓流體，但是在受到外加磁場的影響之下，若磁性粒子磁化後對彼此產生的偶極力大於其在流體中的運動阻力時，將會隨著外在磁力線方向排列，如圖 1-2 所示，此時這些鏈狀粒子串將會限制流體之流動，而流體之黏滯力也隨之增加，而於 1991 年 Bossis 學者[11]以及 1999 年 Larson 學者[1]也提出了磁性流體在一均勻磁場以及剪力流之下呈現的流體性質為 Bingham plastic 流體，有鑑於此特性，早期研究學者較多將磁性流體應用於阻尼系統以及相關的震盪以及避震機制，如 1992 年 Shtarkman[12]學者所研究的將磁性流體應用於振波之吸收並且獲得專利，以及 Carlson[13]學者在 1994 年以及 1996 年發表了多篇磁性流體應用於阻尼機制的研究論文，包含了應用在橋梁以及較高之建築物對於地震或者暴風之下的震盪防禦系統，甚至也有學者研發將磁性流體應用在減少機械噪音的裝置之上，像是一般的家電用品等等。應用層面算是非常的廣泛。

現階段磁性粒子在生物技術也已經有著卓越的發展，廣泛地應用於多種生物醫學檢測和醫藥治療的應用上，如定點標靶藥物傳輸、精確釋藥、大幅提高基因治療的有效轉殖效率、改進醫學影像對比劑的效應與磁熱治療，以及快速有效地分離細胞、DNA 和各種生物單元等方面有相當大的發展性、以 invitrogen 生物科技公司[14]所研發的磁性流體為例，其中一項磁性流體產品(Dynabead Epoxy-450) 之中粒子為親水性球粒(hydrophobic beads)，並且於球體表面加上不同的化合物，例如磺酰團(tosyl groups)、氨基化合物(amino groups)等等，如圖 1-3 所示。利用不同的化合物成份粒子表面就可以直接共價吸附特定的蛋白質例如 DNA，接著開啟外加磁場將在流體中的粒子吸附，過濾掉剩餘的之雜質，最後關掉外加磁場後便可達到 DNA 分離的目的。

再者由於粒子在不同型態的外加磁場之下，可以展現出不同的運動型態，加上粒子為微米或者奈米尺度，因此可應用於微流道之中，其中一項具體之應用為在微小的流道中加上外加磁場，粒子因此受磁化作用而串接成鏈條狀，藉由外加磁場方向以及磁場大小之改變，粒子串可以隨之改變其方向而達到一微流道中開關的作用。此外，若粒子受到外加的旋轉磁場時，液體中的粒子串也回隨著磁場的方向改變而進行旋轉的運動型態，如此可以達到微型混合攪拌器的目的，再者若施予粒子一個來回反覆的磁場，則粒子的運動型態就會類似微生物的游動方式，產生一推力向前游動而可達到仿生的效果。

1-2 文獻回顧

由國外很多的論文期刊中可以明顯發現對於磁性流體中磁性粒子之研究，不論是學術理論層面或者應用產品之層面，發展算是非常的成熟迅速，而對於此篇論文研究也有著極大的幫助。

最早期在 1994 年由史丹佛大學化工系之 Joanne H. E. Promislow 和 Alice P. Gast[15]等兩位學者提出有關於磁性粒子在溶劑中施加一方向之磁場所產生的排列模式之研究，同時配合理論解來運算粒子的運動受力情形。此篇論文之實驗方法為將磁性流體(MR) fluid (粒子成份為四氧化三鐵，直徑大小為 $0.6\pm 0.2\mu\text{m}$ ，磁化率約 0.9)放置在兩顆銅線線圈之中並且施予單一之方向均勻磁場，並利用 CCD(charge-coupled device)配合光學顯微鏡將實驗過程拍攝紀錄於電腦之中，其實驗裝置示意圖如圖 1-4 所示。最後在由影片中粒子的運動過程得到粒子在不同磁場大小之下不同的串接結果，再將實驗參數代入理論方程式做計算及比較，拍攝到之磁性粒子串接情形如圖 1-5，明顯觀察出隨著時間進行，粒子串接長度也隨之越長。而此實驗線圈設備裝置以及研究方法也是往後許多學者參考之方法，不同之處在於儀器之改進以及改變其外加磁場之模式或者改變不同性質之磁性流體以得到不同的結果，同時利用不同的數值模擬研究方法來得到理論解，此實驗方法同時也是本篇論文實驗方法的主要構思來源。此外這兩位學者還統整出不同磁性粒子之體積佔有率(磁性粒子體積/總流體體積)的(MR)fluid 磁性粒子在均勻磁場之下不同時間粒子串接的平均長度變化圖，如圖 1-6 所示。可以明顯發現當(MR)fluid 之粒子的體積佔有率越大時(磁性流體內粒子濃度越大)，在相同的時間內以及相同的磁場之下粒子串接的長度越長。而在相同的粒子體積佔有率之下施予越大的外加磁場大小粒子串接的長度也相對的越長，如圖 1-7 所示。此篇研究給後續研究相關領域之學者對磁性粒子有更加一步的了解。

於 2000 年 Sonia Melle、Gerald G. Fuller 以及 Miguel A. Rubio[16]等三位學者發表了將磁性流體放置於旋轉磁場之下之論文，觀測磁性粒子(半徑為 $1.24\mu\text{m}$)在不同的旋轉頻率之磁場下粒子串轉動之情形，如圖 1-8 至圖 1-10 所示，由實驗圖片中可以發現隨著頻率的增加，粒子串轉動會因為慣性力的關係由直線變形成 S 型的彎曲形狀，最終發生粒子串斷裂的情形。

而在實驗結果分析部分此篇文獻將重點著重於粒子串轉動和轉動磁場之間的相位差，如圖 1-11 所示，呈現出不同磁場大小以及不同磁場轉動頻率時粒子轉動和磁場之間的相位差之分佈。此篇文獻幫助架構了實驗中旋轉磁場的線圈擺設模式，對往後實驗中的磁場設計有很大的幫助。

隨後在 2003 年 Sonia Melle[17]等三位學者於 physical 期刊中發表了一篇利用無因次參數(Mason number)來判定磁性粒子串在旋轉磁場受磁化作用旋轉時，當彼此之間的吸引力無法承受轉動的慣性力以及流體阻力時，粒子串將會在轉動的過程中斷裂，如圖 1-12 所示，明顯看到 Mason number 由 0.0012 變化至 1.2 之磁性粒子串的連結變化為粒子串接長度變得較短，而 Mason number 被定義為 $\eta f / \mu_0 \mu_s M^2$ ，其中 η 為流體之黏滯係數， f 為旋轉磁場之頻率， μ_0 以及 μ_s 為真空磁導率以及溶劑的磁導率， M 為磁性粒子之磁化強度，很明顯可以由定義中看到此無因次參數之物理意義為黏滯力以及磁力之比值，而於文獻中也說明當旋轉磁場之轉動頻率過大時，較長的粒子串會有較大的轉動相位差而無法承受流體之阻力因此斷裂成較小段之粒子串，而當 Mason number 由小於 1 逐漸變大至大於 1 時，意味著旋轉頻率變大而粒子間磁吸引力無法負荷過大的扭力而造成磁性粒子串斷裂成較小段的粒子串。

在應用方面之相關論文也是非常的廣泛，除了於前言中簡介過的應用(包含阻尼、剎車)等等較大型的應用之外，將磁性粒子應用於微流道系統也是相當的具實用性。於 2002 年 Alex Terray 等學者[18]發表了將膠體粒子應用於微流道中之相關論文於 Science 期刊，利用膠體粒子製程流道之中閥門開關的功能，而其大小約為人體之紅血球之大小，如圖 1-13 所示。圖中之箭頭為流體之方向，圖 1-13 之 A 部分 1~3 小圖為流體由右往左流動時，會將粒子製作之閥門打開，使得其他流體中之粒子可以通過流道。而 A 圖中 4~6 小圖為流體變成由左往右流動時，間接的把閥門關閉，使得流道中其他

粒子不會造成回流的情況產生。而於圖 1-13 之 B 部分很明顯可以看出 1~3 小圖中利用粒子製作之閘門將上半部流道關閉，使流道中其他粒子只能往下半部之流道流動，而 4~6 小圖則為方向相反之流動方向，其技術可以說是相當成熟。對於本實驗研究之未來發展更有參考之應用價值。

近期之研究中，於 2005 年 Remi Dreyfus[19]等學者在 nature 期刊中發表了有關 artificial microswimmer(人造微型游泳器)之相關研究論文。此篇研究利用多數長度為 107 奈米的雙鏈 DNA 將直徑為 1 微米的磁性粒子串接起來，如圖 1-14 所示，將磁性粒子表面鍍上鏈黴素，使得 DNA 和磁性粒子之間可利用生物素相連接。磁性粒子串末端連接上較大型的紅血球，做為欲攜帶的物品。而外加磁場部分於橫向 x 軸方向為單一均勻磁場 ($\vec{B}_x = b_x \vec{X}$)，以確保磁性粒子串會隨著橫向磁場變成直線橫條狀，縱軸 Y 方向則是施予一個 sin 週期的震盪型磁場 ($\vec{B}_y = b_y \sin(2\pi ft) \vec{y}$)，兩種方向磁場的交互作用下使得粒子串會呈現上下擺動的運動模式，擺動過程如圖 1-15 所示，而磁性粒子串將會因為上下擺動震盪在流體中產生推力向前游動，形成人工游泳器，並且可以攜帶較大型之物體向前游動。雖然要造成粒子串上下擺動不是個困難的實驗，但是要使得微米尺度的粒子串在雷諾數很小的情況下克服流體的黏滯力並且其擺動模式必須打破運動對稱性向前游動[20]，卻是極大之挑戰，更是本研究最先之主要研究目標，而其磁場之架設也是本實驗目前最主要之使用方法。

近期對磁性粒子在旋轉磁場下之理論分析於 2009 年 James E. Martin[21] 學者在 physical 期刊中所發表，而此學者也曾經和先前提及之 Sonia Melle 學者合作建立了磁性粒子串在旋轉磁場之下之物理模型[22]，並曾於 2003 年發表，裡面詳細介紹種種磁性粒子在旋轉磁場中的統御方程式，由最簡單的兩個磁偶極之間的相互作用力開始推導至較複雜的外加旋轉磁場，隨後包含了粒子串在轉動過程中受到的流體阻力、慣性力、軸向向心力以及之前

介紹過的粒子轉動和旋轉磁場之間的相位差，並且利用理論推導磁性粒子串接長度和外加磁場之間的關係式。此文獻對本篇論文之研究在實驗之後的理論分析方面有很大的幫助。

1-3 研究動機

磁性流體由於其特殊的性質和隨著外加磁場反應出不同性質之特性，因此備受矚目並對於微奈米之磁性粒子之應用在國外已經發展了很長一段時間，包含了實驗結果、實際應用於機械系統之中以及電腦模擬之理論解的相關論文也是琳瑯滿目，然而對於了解上述應用以及實驗過程外，磁性流體中粒子受磁化作用而改變其運動型態的相關資料以及量測其運動受力的情況為十分重要的議題。其難度在於粒子之尺度已經小到微米或者奈米的尺寸，要觀察到其運動的狀態已經十分不易，也因此要從運動的軌跡中得知粒子分別所受的力，包含外加磁力、黏滯力以及粒子和粒子之間的吸引力更是一大挑戰。另一方面，對於利用粒子仿生游動的技術而言，如何由粒子游動的軌跡來獲得其所產生的推力以及所受到的阻力也是一大難題。因此本研究先針對磁性粒子運動時的受力以及操控為主要研究目標，將實驗影片中得到之數據代入理論方程式得到受力情形，為未來在應用方面，不論是在微流道中之應用或者製做成仿生之人工游泳器奠下良好的基礎。

本研究建構不同型式之外加磁場，包含上下振盪之交錯型磁場等，以進行磁性粒子運動操控之研究，並配合高倍率金相物鏡來觀測其粒子在溶劑中的運動軌跡，並且由實驗影片及圖片中利用 matlab 之掃圖運算功能推算粒子受力的情形。最後並和電腦模擬之文獻配合比較結果。

和文獻回顧中之學者的研究比較，本實驗研究著重於磁性粒子之可逆性(磁場關閉之後磁性粒子將回復到原始狀態)以及串接後的應用性，在做其

它較複雜的磁場研究之前，將會先進行磁型粒子的串接，之後再對鏈狀粒子串進行其他研究分析，包含振盪和擺動斷裂以及產生推力向前游動等等。



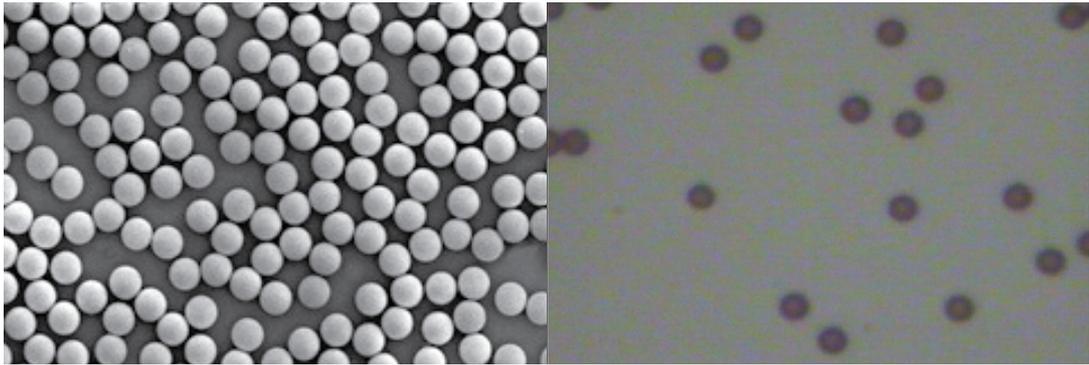


圖 1-1 左圖為由 invitrogen 生物科技提供之磁性粒子之畫面[14]
 右圖為利用本實驗室中之光學顯微鏡配合高倍率金相物鏡拍攝之畫面
 圖中磁性粒子之直徑為 $4.5\mu\text{m}$ ，溶劑為蒸餾水

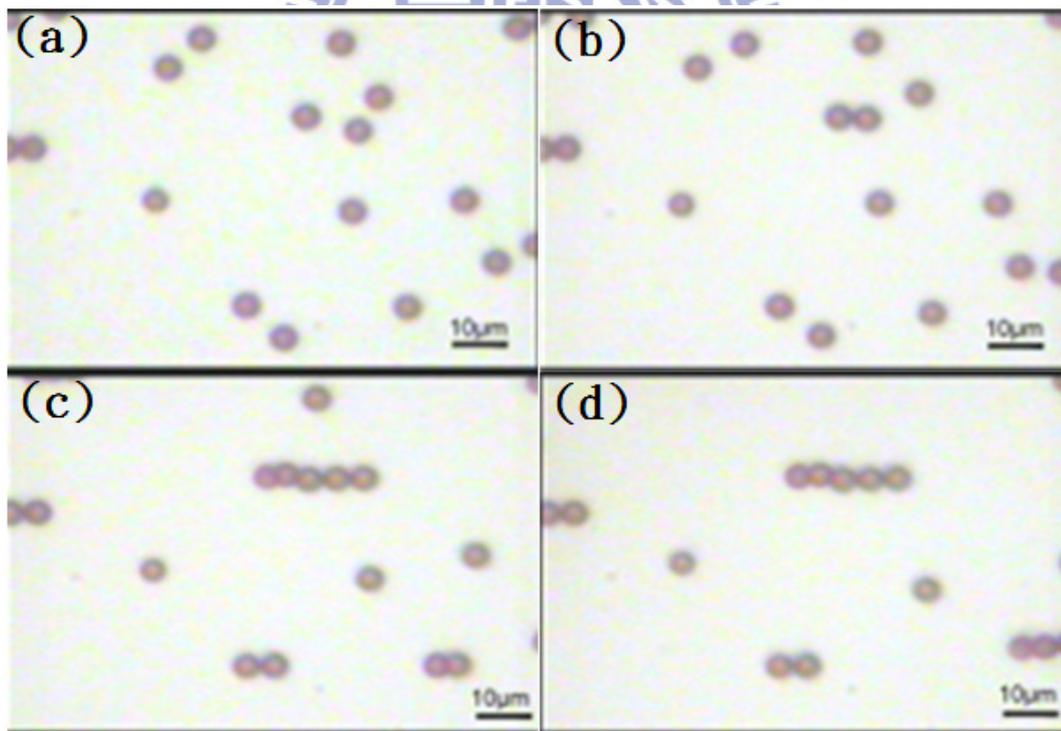


圖 1-2 多顆粒子串接成鍊情形(a) $t=0\text{s}$ ；(b) $t=6\text{s}$ ；(c) $t=16\text{s}$ ；(d) $t=18\text{s}$ 。

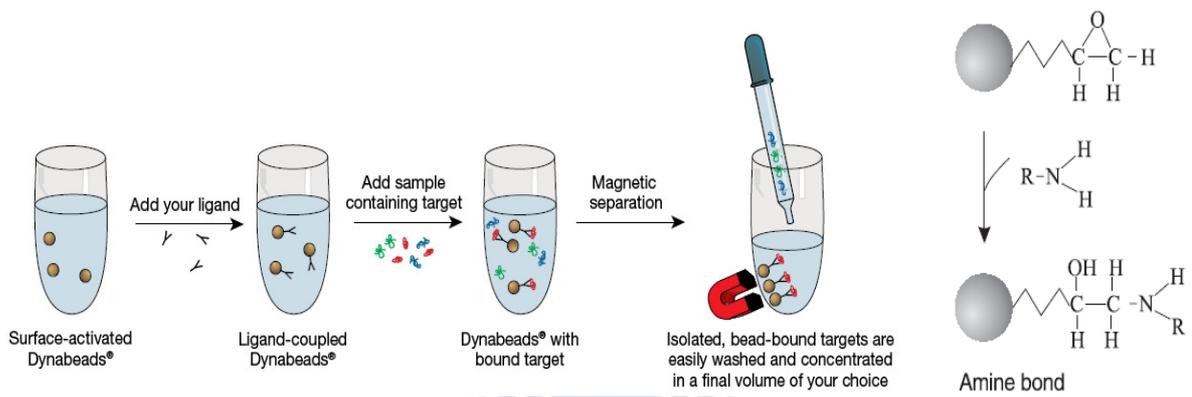


圖 1-3 invitrogen 生物科技公司所提供之磁性粒子用於 DNA 吸附流程 [14]

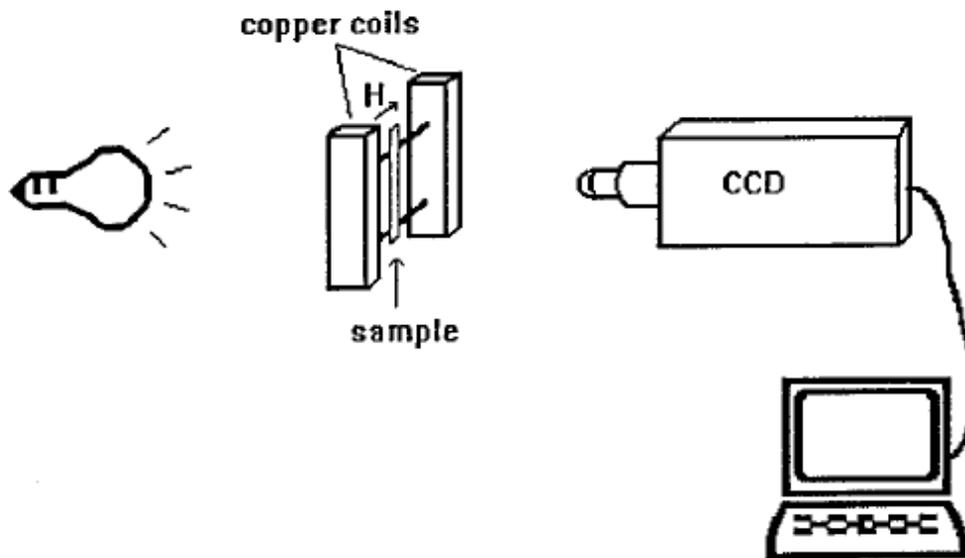


圖 1-4 Joanne H. E. Promislow 以及 Alice P. Gast 學者之實驗裝置示意圖[15]

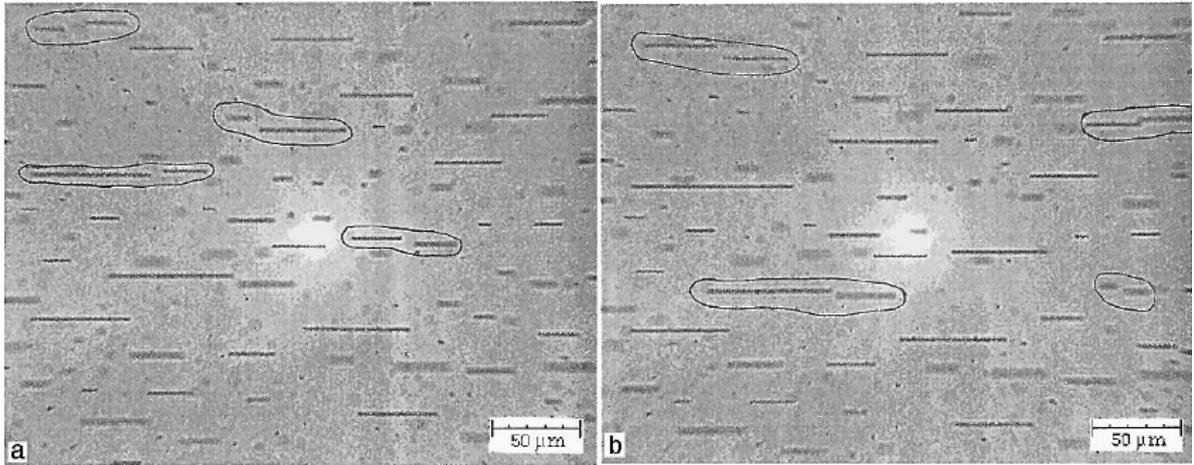


圖 1-5 Joanne H. E. Promislow 以及 Alice P. Gast 學者磁性粒子成串拍攝圖

(a)開啟磁場後45秒(b)開啟磁場後50秒[15]

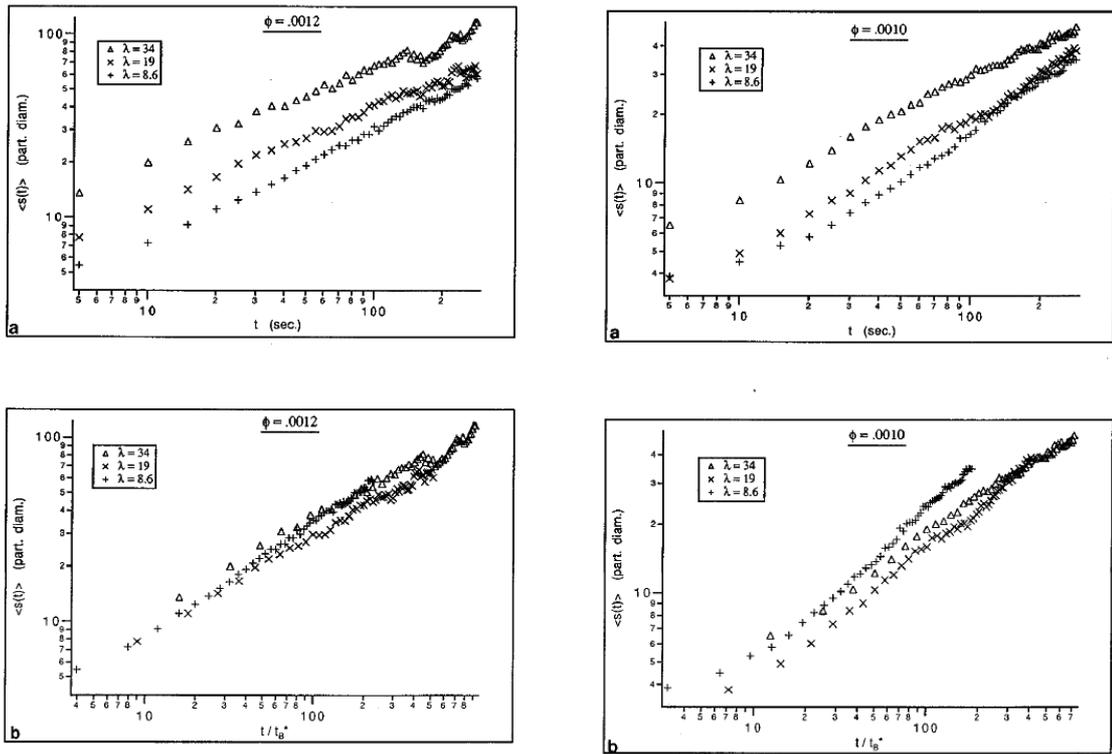


圖 1-6 不同體積容率(buck volume fraction)之粒子串在不同外加磁場長度下

隨時間變化圖[15]

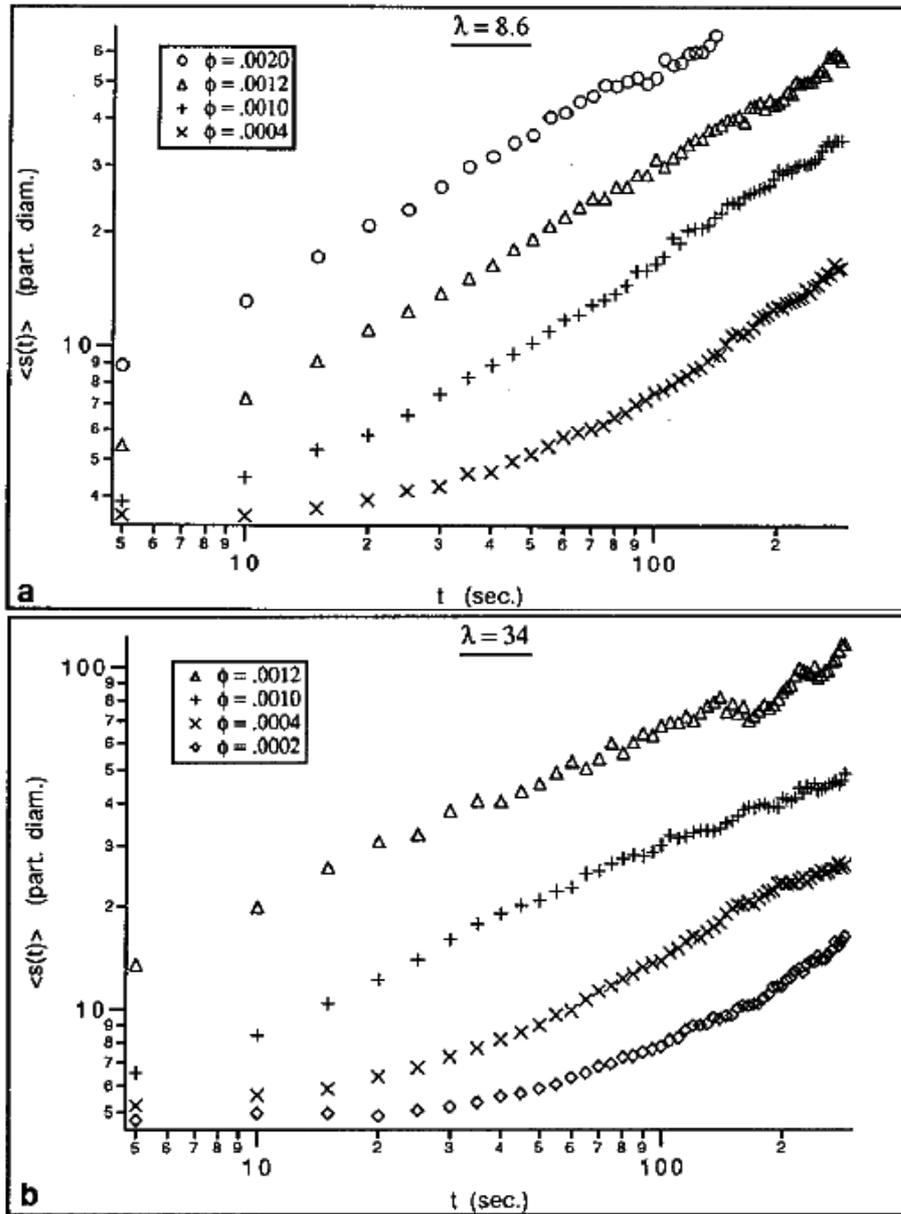


圖 1-7 在相同外加磁場之下，不同體積容率(buck volume fraction)之粒子串
接長度隨時間之變化圖[15]

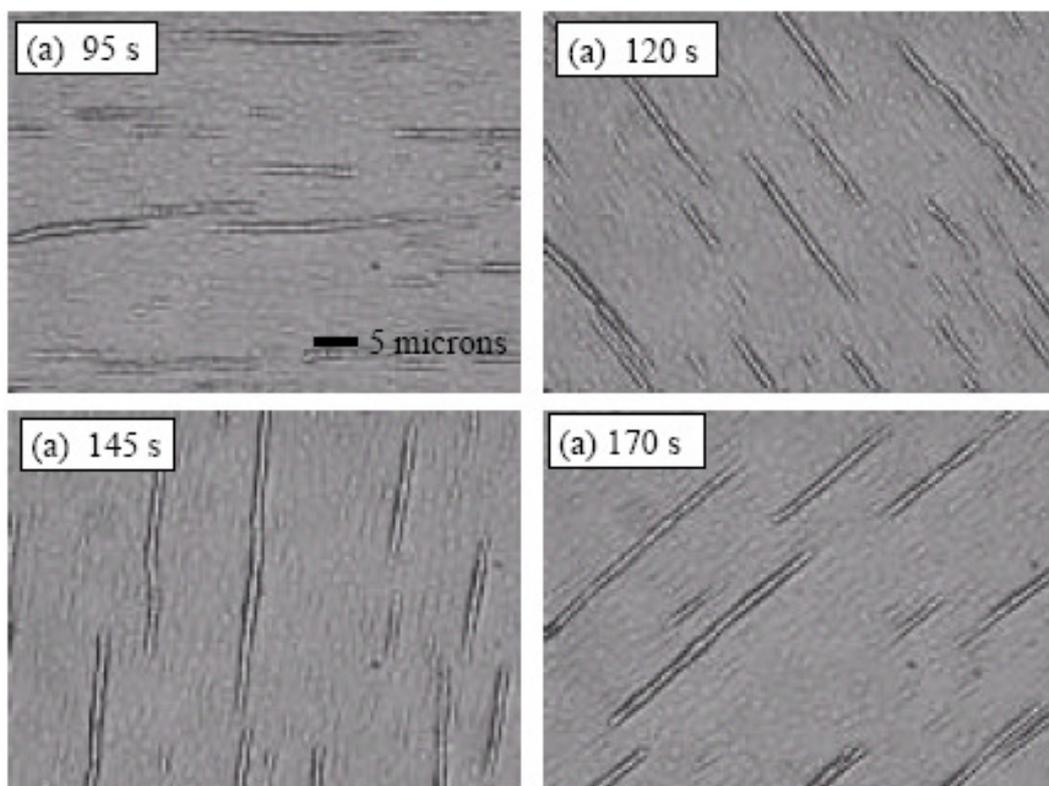


圖 1-8 磁場 $H=12.4\text{kA/m}$ 體積容率 $\phi=0.0005$ 頻率 $f=0.0005$ 順時針旋轉[16]

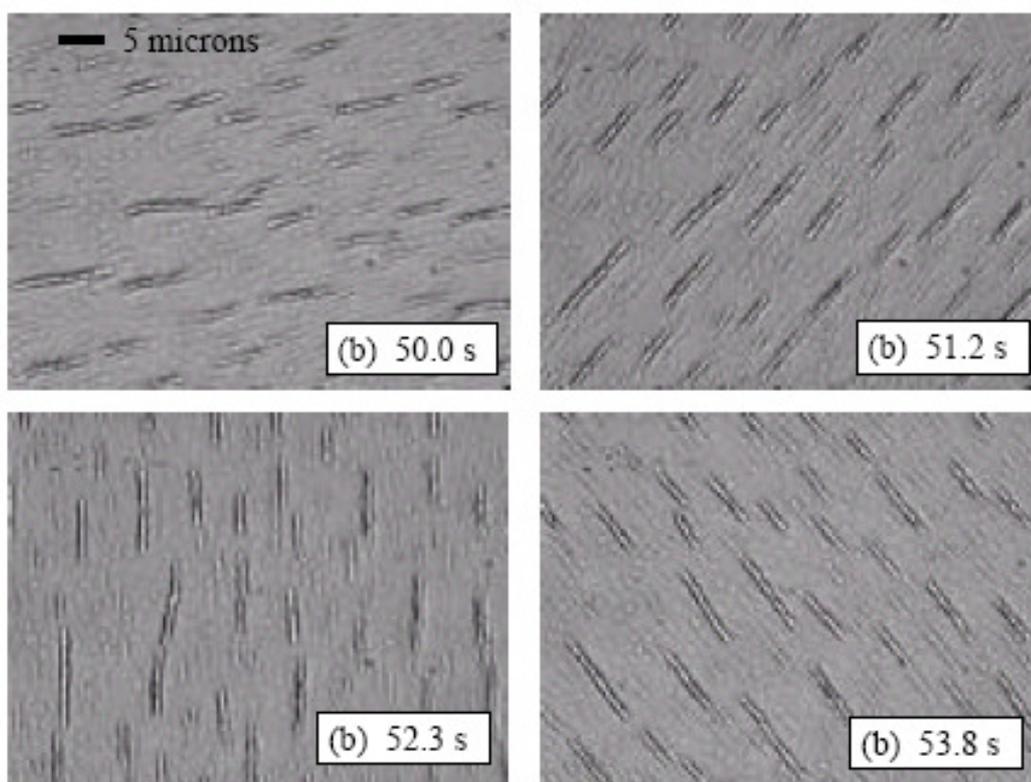


圖 1-9 磁場 $H=12.4\text{kA/m}$ 體積容率 $\phi=0.0005$ 頻率 $f=0.0005$ 逆時針旋轉[16]

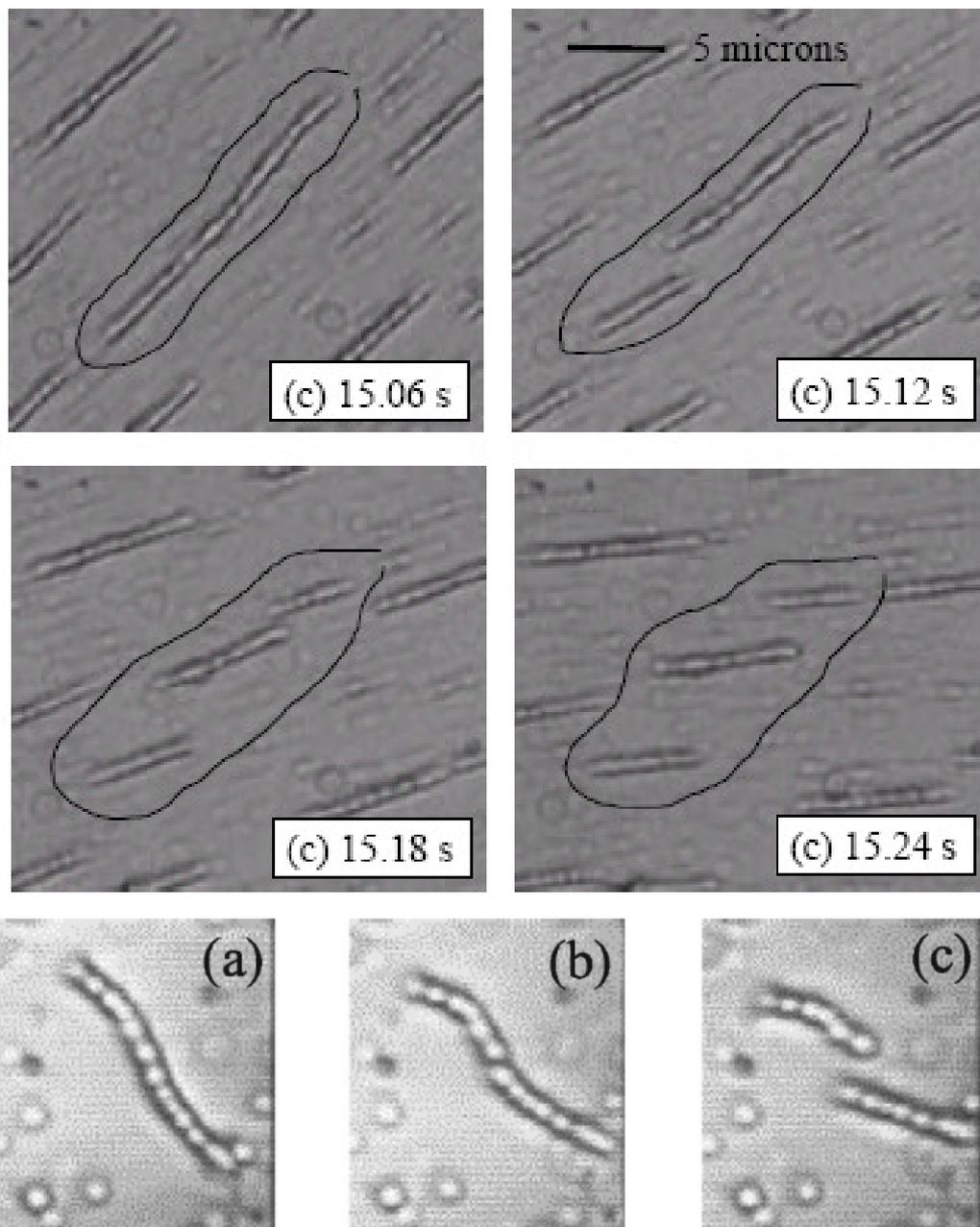


圖 1-10 外加磁場 $H=12.4\text{kA/m}$ 體積容率 $\phi=0.0005$ 頻率 $f=0.05$ 順時針旋轉

由圖中可明顯發現磁性粒子串變型斷裂過程，下圖為斷裂過程圖[16]

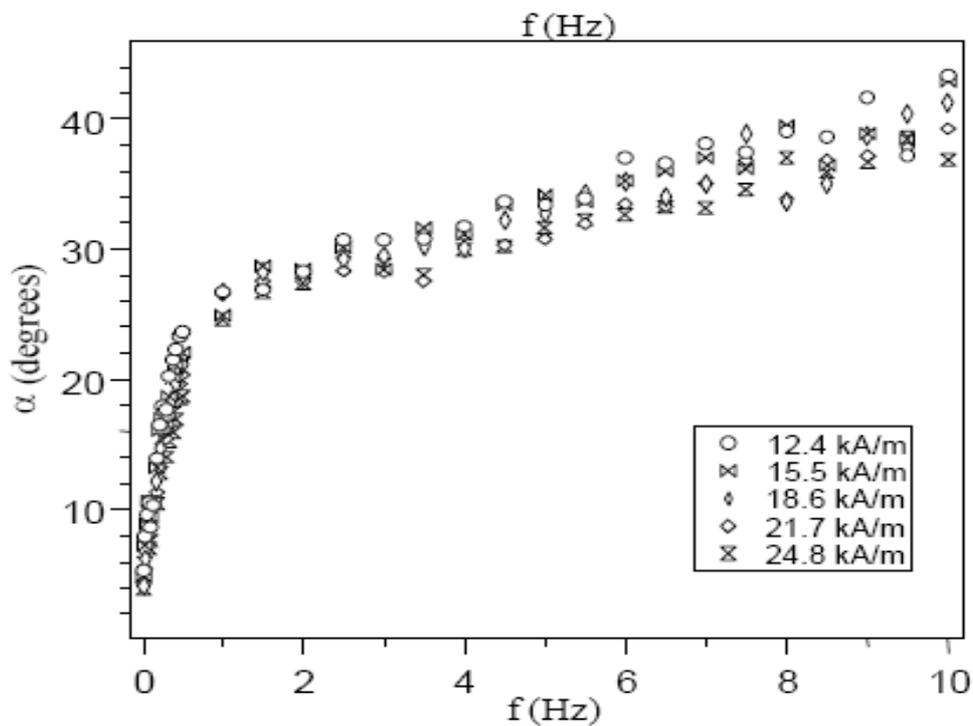


圖 1-11 為不同外加磁場大小之下相位角隨著旋轉頻率增加之變化圖[17]

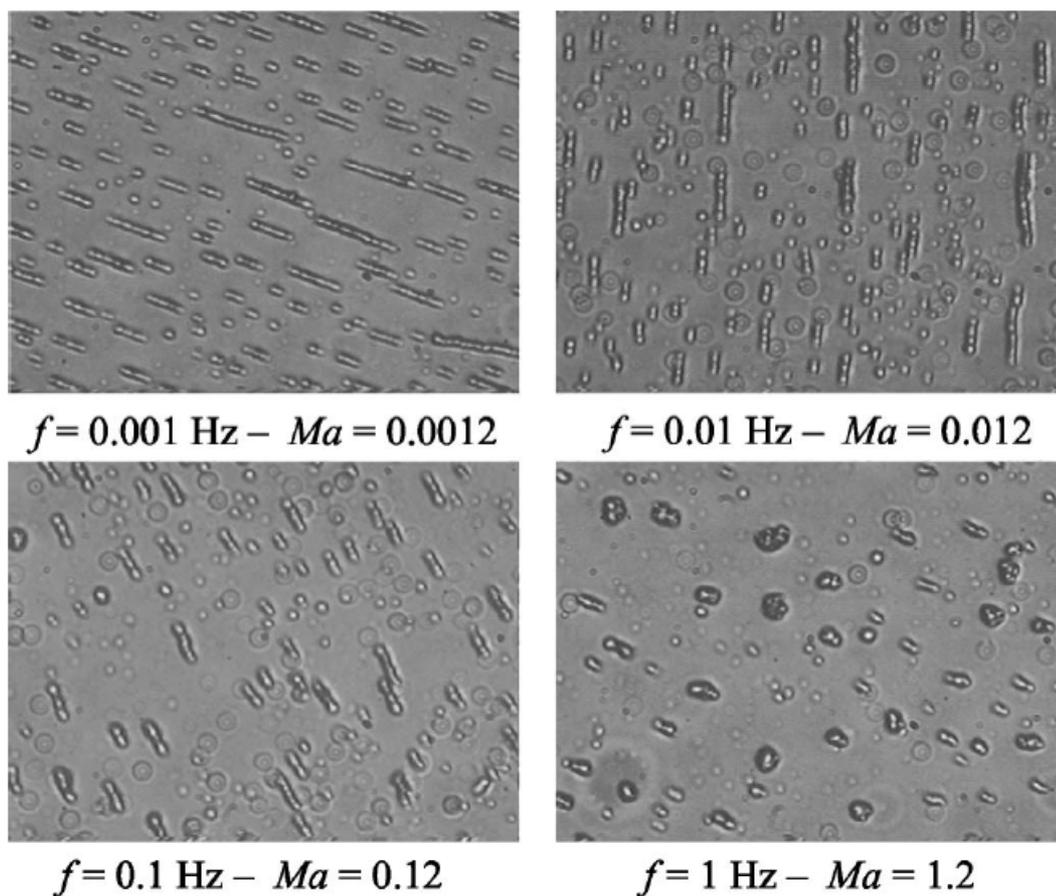


圖 1-12 磁粒子串在旋轉磁場下，Ma 由 0.0012 變化至 1.2 之運動變化情形[17]

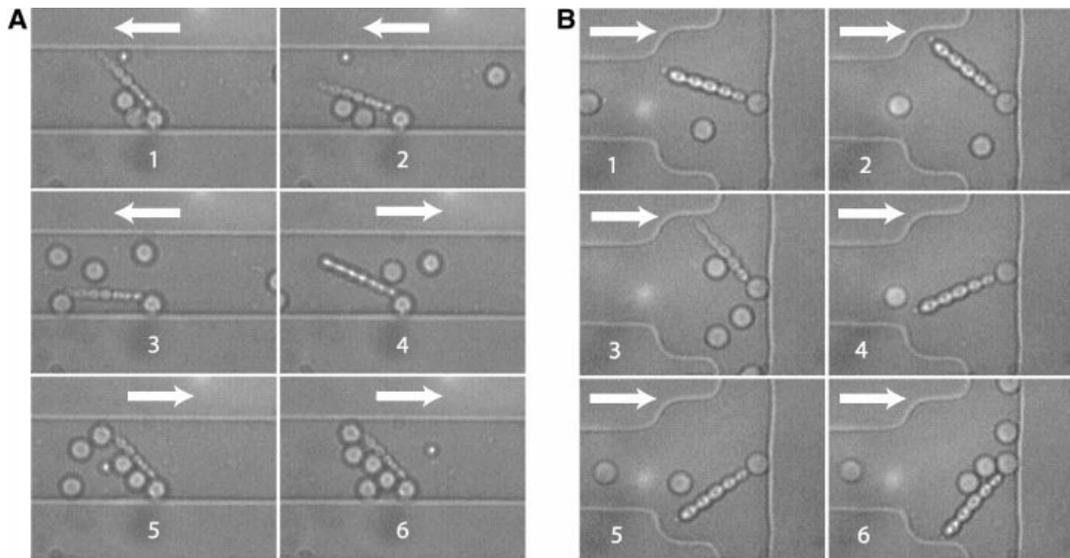


圖 1-13 利用粒子串在微流道中之開關閥門應用圖[18]

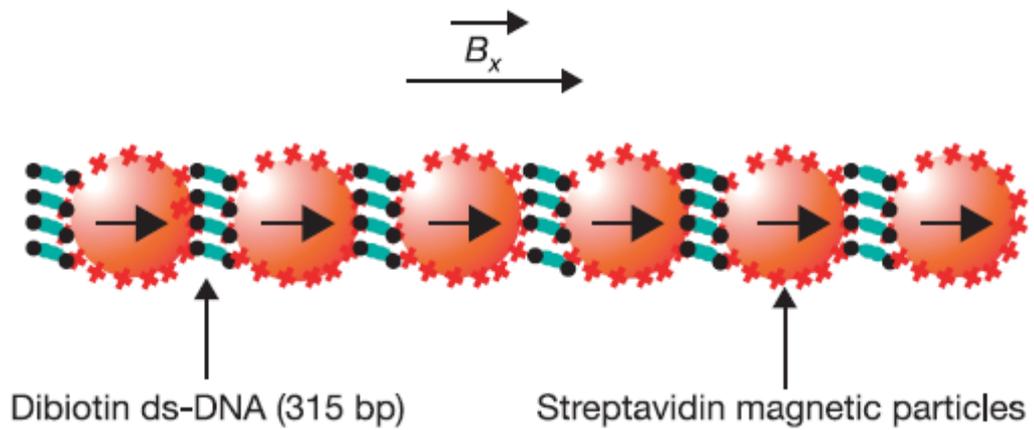


圖 1-14 利用 DNA 串接表面鍍有鏈黴素之磁性粒子示意圖[19]

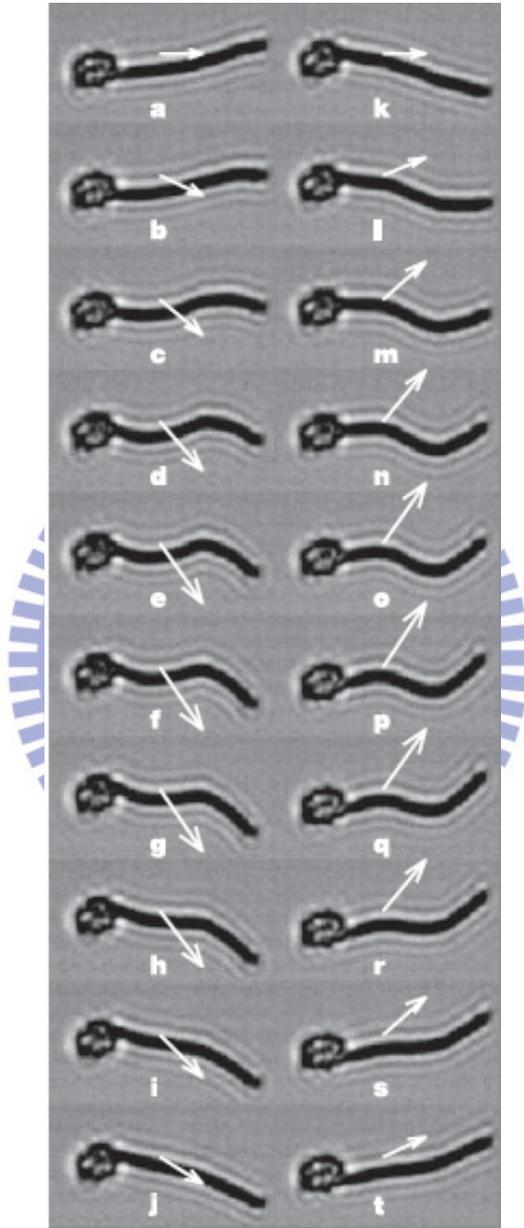


圖 1-15 磁性粒子隨時間擺動實驗圖，由 a 變化至 t，前端為攜帶物紅血球
磁場大小 $B_x=8.3\text{mT}$ ， $B_y=13.7\text{mT}$ ，頻率 $f=10\text{Hz}$ [19]

第二章 實驗原理、設備及方法

本研究之實驗方法以及目標為對磁性流體施加不同型式之磁場並且研究流體中磁性粒子在不同磁場下的運動情形以及受力分析。不同磁場模式包含單一方向之均勻磁場、隨著時間改變方向之上下震盪型磁場、以及旋轉磁場(磁場方向大小固定，方向隨時間改變)，並且利用高倍率之金相物鏡配合高速彩色 CCD 以及光學顯微鏡將流體中磁性粒子之運動模式拍攝紀錄於電腦之中，將影片截取成數張實驗圖片之後，隨後在使用 matlab 程式軟體之中的掃圖運算功能計算出磁性粒子移動時的種種受力情形。

2-1 實驗儀器及說明

本實驗中所使用之觀測儀器包含了 10 倍金相物鏡、可調節倍率式光學顯微鏡最大可以放大至 6.5 倍配合內部光源產生器、高速彩色 CCD，影像擷取卡以及個人電腦等等，鏡頭由上方向下觀測並面向二維移動平台。平台上方可放置滴有磁性流體之載玻片，其架構示意圖如圖 2-1，將其搭配組合起可明顯觀測到微米等級之磁性粒子之輪廓以及完整記錄運動模式。磁場之產生為利用可程式交流電電源供應器、直流電電源供應器配合線圈變化產生出不同型式之磁場。交流電電源供應器如圖 2-2，廠牌型號為 California Instruments EC1000S，功率最高可達 1000 瓦，頻率可以調整最低至 1Hz 以滿足實驗需求。直流電源供應器如圖 2-3，其功率最大可達 90 瓦，線圈組則是利用不導電、耐高溫之性質穩定之電木做為線圈軸心以及外殼，設計圖如圖 2-4，線圈軸心外則利用銅線緊密圍繞並且控制相同圈數以達到最大量且可產生均勻之磁場，此外為了確保線圈至中間載玻片的距離固定以達到磁場受力均勻的效果，因此設計一壓克力平台固定放置架設線圈和載玻片以控制實驗變因，設計圖如圖 2-5 而實際使用之壓克力平台如圖

2-6 所示。磁場量測之儀器為使用高斯計以及量測用碳棒，如圖 2-7，並且配合資料擷取器將量取到的磁場訊號儲存於個人電腦之中，其量測示意圖如圖 2-8 所示。

在外加磁場架構方面，首先單一方向之均勻磁場為由一台直流電電源供應器配合串連兩顆線圈產生，如圖 2-9 以及 2-10，而上下型之震盪磁場為利用一台交流電源供應器以及一台直流電源供應器搭配四顆線圈產生，如圖 2-10 以及 2-12 所示。由於交流電源供應器正負電流會隨著時間交錯反覆變化，因此串連交流電之線圈組所產生的磁場極性也會隨著時間變化上下相反，配合方向和其垂直之單一均勻方向磁場便可產生一上下震盪得磁場型式，而在四顆線圈中央位置(磁性流體放置處)所量測到之三方向之磁場隨時間變化圖如圖 2-13。而旋轉磁場為利用兩台交流電電源供應器分別各控制兩顆線圈，其示意圖如圖 2-14，兩台交流電電源供應器需調整為輸出相位角相差 90 度，但電流、電壓以及頻率必須調整為完全相同之狀態，此架設方式將使磁力之合力大小不改變，但是方向會隨著頻率的高低向同一方向進行旋轉。

實驗中使用的磁性粒子為由 invitrogen[14] 生物科技公司所購買之微米大小等級之磁性粒子，第一種型號為 Dynabeads M-450 Epoxy(圖 2-15)，成份為聚苯乙烯珠而外層包覆了氧化鐵並且呈現順磁性，物理性質如表一，磁粒子之磁化曲線如圖 2-16 所示，圖中曲線顯示其無磁滯效應，故而其串接操控具可逆性之特色。此外還有不同半徑大小之磁性粒子 M-270 Epoxy(圖 2-15)性質如表二，兩種磁性粒子所使用之溶劑皆為蒸餾水，蒸餾水之一些物理性質如表三所示，本研究將針對此兩種不同的磁性粒子進行實驗操控，並且配合上述介紹之外加磁場已完成整體實驗性。

2-2 實驗步驟

實驗過程首先利用針頭吸取少許磁性流體並滴至於乾淨的載玻片上，由於磁性粒子為微米大小尺度，因此載玻片上的沾附灰塵以及表面之刮痕有影響實驗品質的可能性，所以實驗前必需檢查載玻片之表面，並利用酒精消毒後，再利用拭淨紙及吹球將載玻片清潔乾淨。滴上磁性液滴後，將玻片放置於二維平台上，調整對齊到鏡頭光源底下，由於懸浮在液滴中的磁性粒子會受到重力之影響而逐漸沉澱於玻片底部，因此一組實驗之時間必須要控制不可過長以避免沉澱後影響到粒子移動的自由度。此外必須調整焦距直到電腦銀幕中可清楚看到磁性粒子之外型輪廓為止，同時注意光源之控制，因倍率越大時所需要之光源也越大。若由電腦銀幕中可以看清楚磁性粒子之輪廓，便可打開外加磁場以及開啟電腦中的錄影程式軟體，將磁性粒子得運動情形錄製成影片檔案以供之後分析。

實驗裝置可概分為 2 部分，包含(1)磁粒子串接成鏈；(2)磁粒子鏈操控。粒子串接技術實驗部份，首先將磁粒子上方放置高解析度之金相顯微鏡。而為了將粒子成串的接在一起，須外加之磁場為一串聯線圈如圖 2-9 所示，之後開啟穩定之直流電流，此時線圈將產生一均勻穩定的磁場。由於粒子為順磁性物質，因此將會受磁化作用而形成一鏈狀結構，而同時也將粒子之串接時的運動情形以影片格式紀錄於電腦之中。

而於串接成鏈部分之力學分析首先針對兩粒子在溶液中所受之總力包含：(1)外加磁場之磁力以及(2)兩粒子之間的相互磁作用力，並加上(3)粒子移動時受到之流體的黏滯阻力，將實驗參數帶入理論方程式則可估算出其運動與作用力，並與上述實驗觀測成果進行比對，以了解並驗證理論模型之正確性，以為後期更複雜情形之基礎。

第二階段為將外加磁場改變成擺動型式的震盪磁場以及旋轉磁場，實

驗線圈裝置則如圖 2-11 所示，其中直流電源用途為使粒子串接成鏈狀，交流電源為使粒子串產生擺動的運動模式。利用上述裝置於一特定電流強度下，其磁場分佈如圖 2-13 所示。實驗分析部分將首先驗證磁粒子串擺動的角度吻合和磁場的磁力線方向。於完成磁場驗證後，則控制加大交流電源強度，使得磁粒子串會在擺動過程中，因為慣性力和流體阻力之間的交互作用下產生斷裂的運動情形，並將利用基本物理方程式，來估算在斷裂瞬間所受的力，而本實驗必須配合其他數值模擬的方法輔助計算(商用 fluent 模擬軟體)，以對照磁性粒子串斷裂的位置和時機。最後將本研究推廣至應用層面，利用大小尺寸不同之磁性粒子串接成鏈狀後，至於震盪磁場底下，目的是為了使整條磁性粒子串展現出左右不對稱之擺動情形，以達到粒子串流體中可以產生單方向推力向前游動，成為人工游泳器，並且探討其運動速度和擺動情形之間的關係。

2-3 理論背景

首先為了了解磁性粒子之運動受力情形，將問題簡化至對一顆懸浮於液體中的磁性粒子施加一個均勻磁場 \vec{H}_0 時，其會相對應隨外在磁場產生一個磁性偶極矩[22]:

$$\vec{m} = 4/3\pi a^3 \vec{M} \quad (2-1)$$

其中 a 為磁性粒子的半徑(m)， \vec{M} 為磁化強度而可表示成:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}_0 \quad (2-2)$$

其中 χ 為磁化率又可以表示成:

$$\chi = 3\beta = 3(\mu_p - \mu_s)/(\mu_p + 2\mu_s) \quad (2-3)$$

(2-3)式中 β 為磁導率對比因子， μ_p 為磁性粒子的磁導率， μ_s 為溶液的磁導率。藉由上三個關係式可以將實驗條件代入方程式估算磁性粒子在流體中磁化的情形。

此外若對兩顆互相不接觸之磁性粒子施加單方向均勻磁場，如圖 2-17 所示，兩磁性粒子之間的吸引力可表示如下：

$$\vec{F}_{1j}^d = \frac{3\mu_0\mu_s m^2}{4\pi r^4} [(1 - 3\cos^2\alpha)\hat{r} - \sin(2\alpha)\hat{\alpha}] \quad (2-4)$$

其中 \hat{r} 為兩磁性粒子半徑向量方向（軸向）， $\hat{\alpha}$ 為外加磁場和兩顆磁性粒子半徑向量之間的角度方向。

上式為兩顆粒子之間之磁吸引力，此外若考慮外加磁場對此兩顆磁性粒子的影響，則需要對(2-4)式進行修正：

$$\vec{F}_{1j}^d = \frac{3\mu_0\mu_s m_s^2 c^2}{4\pi r^4} [(c_1 - 3c_2 \cos^2\alpha)\hat{r} - c_3 \sin(2\alpha)\hat{\alpha}] \quad (2-5)$$

其中(2-5)中三個修正因子 c_1 、 c_2 和 c_3 表示如下

$$c_1 \equiv \frac{1}{[1+\psi/2]^2} \quad c_2 \equiv \frac{1+\frac{\psi^2}{2}}{[1-\frac{\psi}{2}-\frac{\psi^2}{2}]^2} \quad c_3 \equiv \frac{1}{[1-\frac{\psi}{2}-\frac{\psi^2}{2}]}$$

$$\text{其中 } \psi \equiv \frac{\chi}{12} \left(\frac{2a}{r}\right)^3$$

χ 為磁化率如(2-3)式， a 為磁性粒子之半徑(m)， r 為兩顆磁性粒子之間中心至中心的距離(m)。

除了外加磁場以及兩磁性粒子之間的受力外，由於磁性粒子是懸浮於溶液中，因此在運動過程中也會受到流體對粒子的摩擦阻力作用，其摩擦阻力理論方程式可表示式如下：

$$\vec{F}_1^h = -\xi \vec{v} \quad \text{stokes friction} \quad (2-6)$$

其中 $\xi = 6\pi\eta a$ 為摩擦係數， η 為流體的黏滯係數， a 為磁性粒子之半徑， \vec{v} 為磁性粒子移動的速度。

考慮到在實驗中磁性粒子串在擺動磁場中會受到的力。磁性粒子串將會以中心點為圓心做上下擺動震盪的運動。擺動過程中粒子將會受到擺動時的慣性力、向心力和流體給予阻力等等，受力示意圖如圖 2-18，而這些運動過程所受的力除了流體阻力之外，其餘皆由外加磁場因素造成不同方向的受力情形，因此若考慮 N 顆磁性粒子串在擺動時所受的力，首先必須計算出粒子和粒子之間的磁吸引力以及間接推導至粒子表面和表面之間的正向力，其計算方式如圖 2-18 所示，由最外層之磁性子表面所受到的正向力來推算至旋轉中心，由圖中可以看出在不考慮離心力(向外甩出之力)的前提下，由最外層粒子和鄰近粒子之表面所受到之正向力等於其他粒子對它之磁吸引力之和，如式 2-7 所示：

$$N_{12} = \sum_{i=2}^n F_{i1} \quad (2-7)$$

由(2-7)式由最外層磁粒子受到之正向力向內推導至第二截面之正向力：

$$N_{23} = \sum_{i=3}^n F_{i2} - \sum_{i=1}^{n-2} F_{i2} + N_{12} \quad (2-8)$$

(2-8)式中等號右邊第一項為對由外層向內數第二顆之粒子受到其右邊所有

粒子之吸引力，等號右邊第二項為由外層向內數第二顆受到其左半邊之粒子吸引力之總和，第三項為(2-7)式推導出第一截面之正向力。持續往內部推導便可計算出整串粒子鏈之正向力分佈情形。



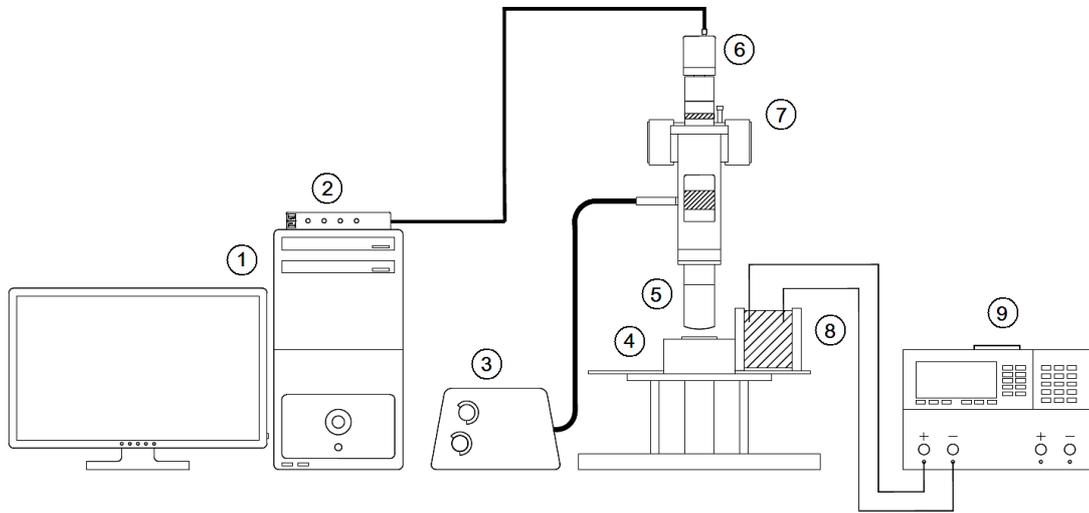


圖 2-1 實驗架構示意圖

①個人電腦；②影像擷取器；③光源產生器；④二維移動平台；⑤金相物鏡；⑥高速彩色 CCD；⑦粗細調節輪；⑧線圈；⑨直流電源供應器。



圖 2-2 交流電源供應器



圖 2-3 直流電源供應器

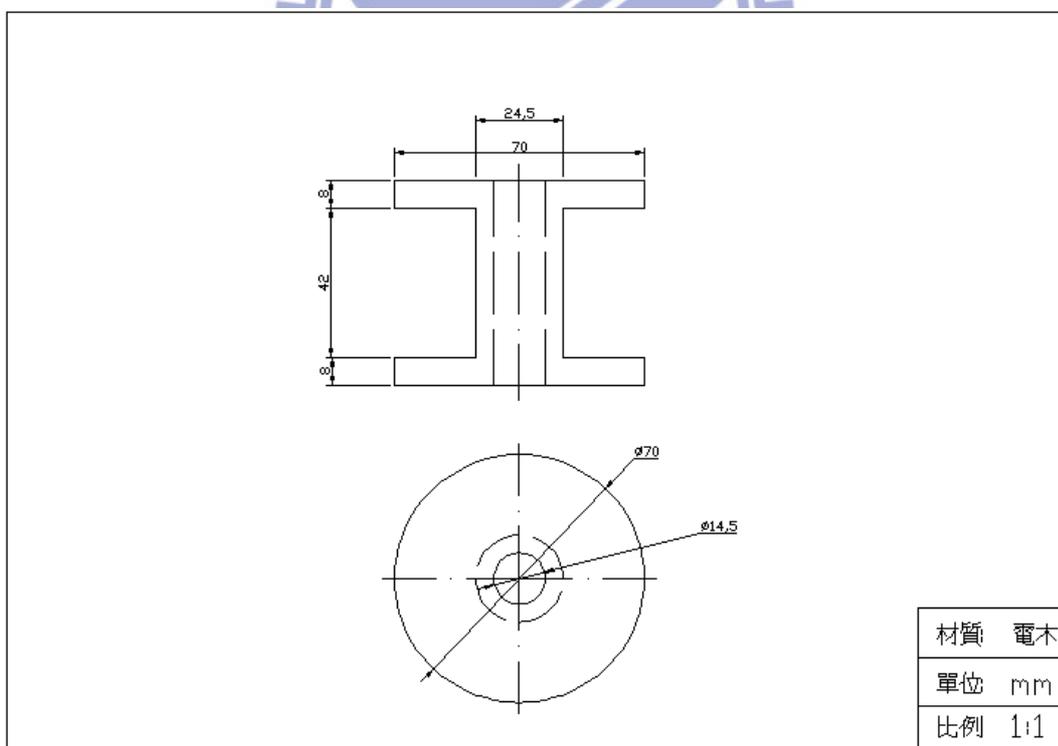


圖 2-4 電木材質線圈之尺寸設計圖

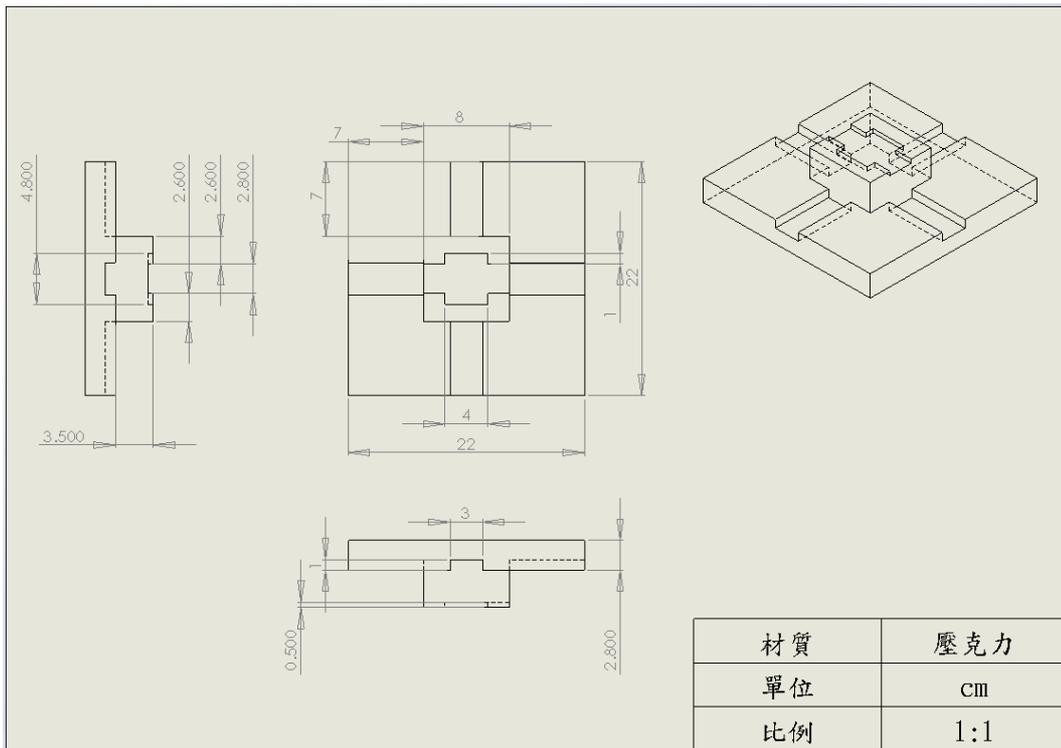


圖 2-5 壓克力平台尺寸設計圖

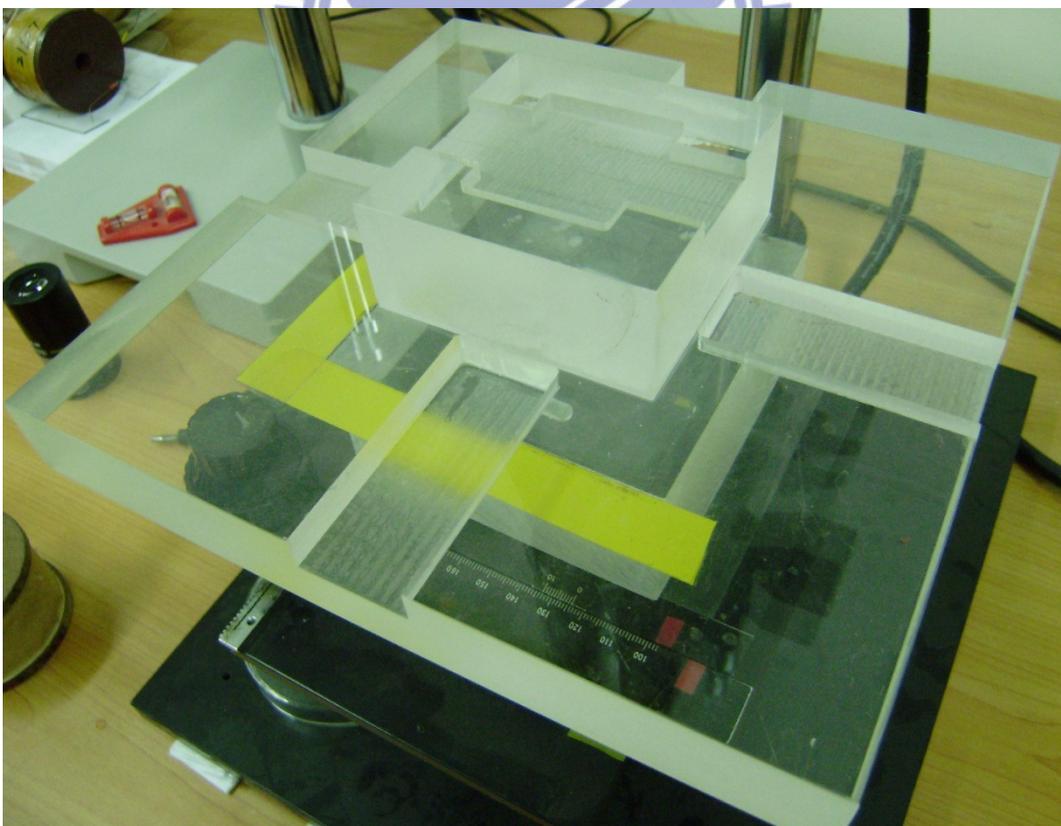


圖 2-6 壓克力平台

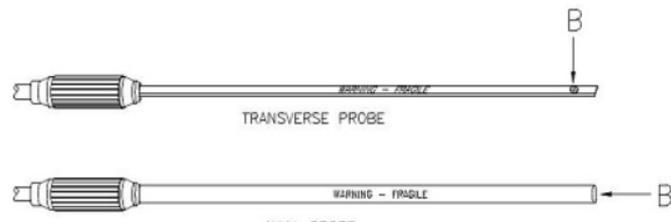


圖 2-7 量測磁場磁棒及高斯計



圖 2-8 資料截取器

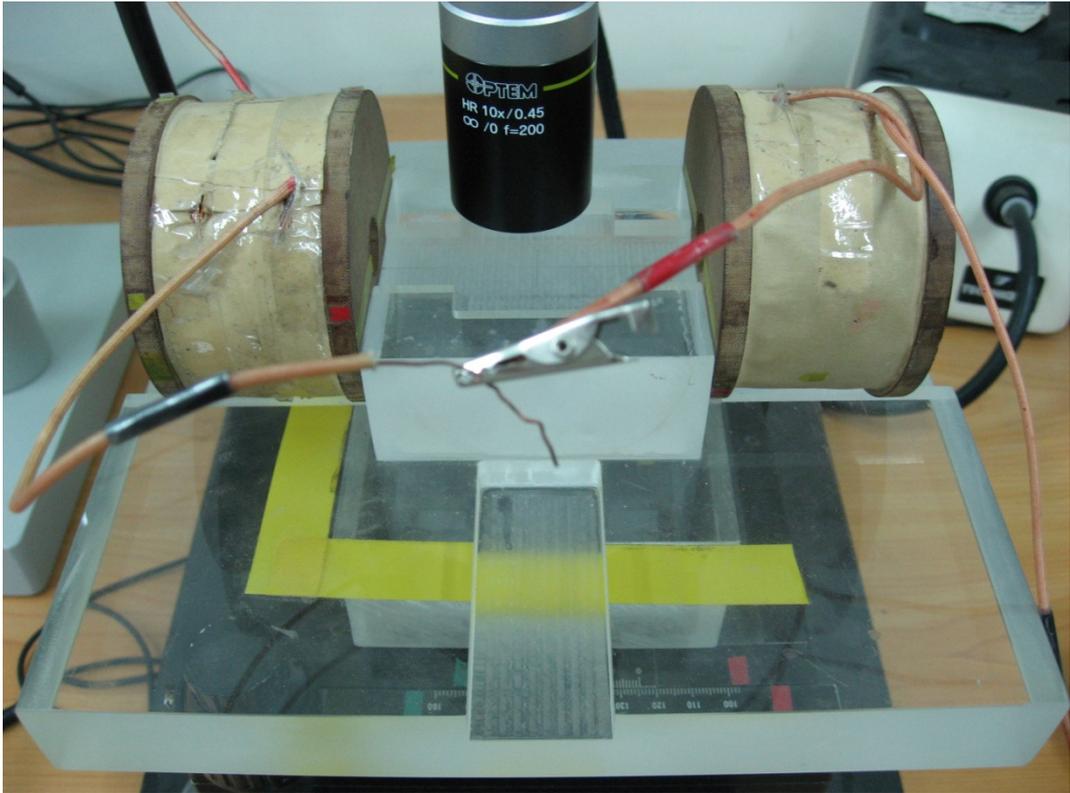


圖 2-9 產生均勻磁場之線圈擺設

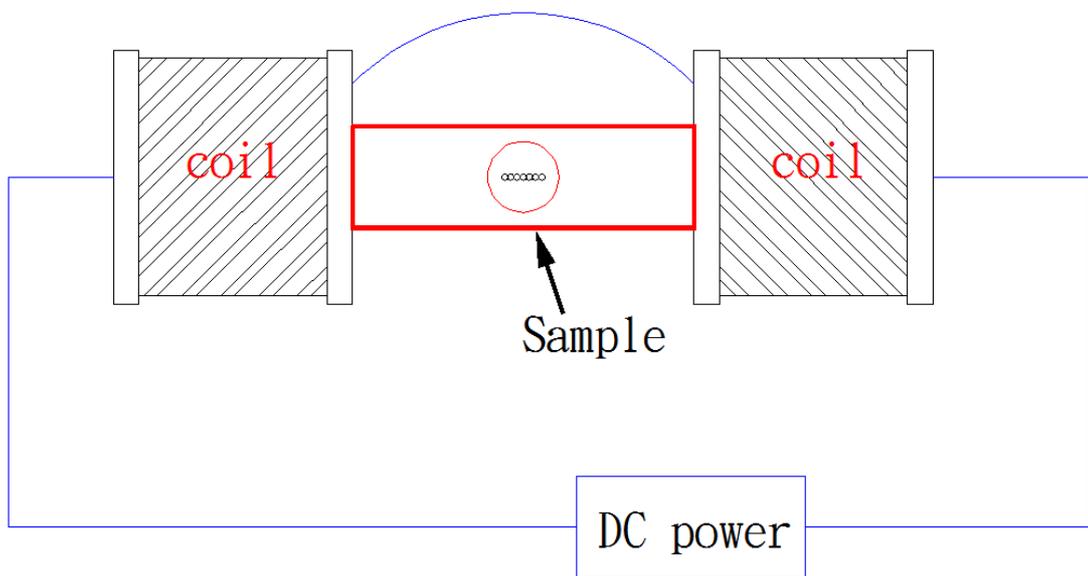


圖 2-10 兩線圈串連接直流電源供應器圖

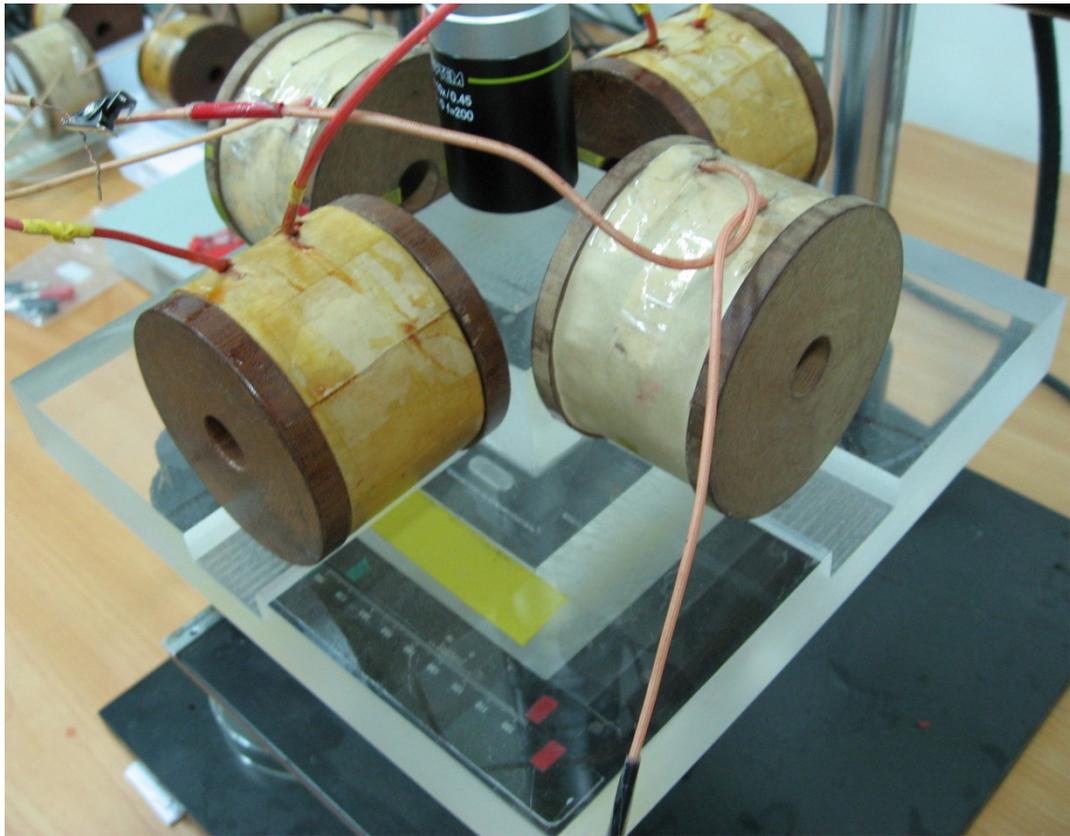


圖 2-11 產生擺動磁場之線圈擺設

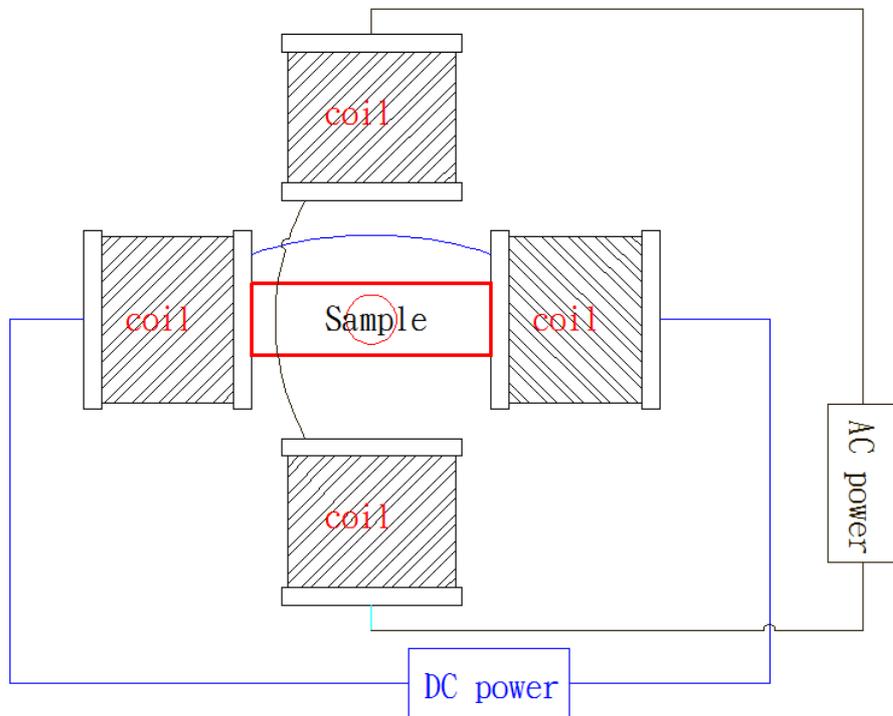


圖 2-12 四線圈配合直流及交流電源供應器示意圖

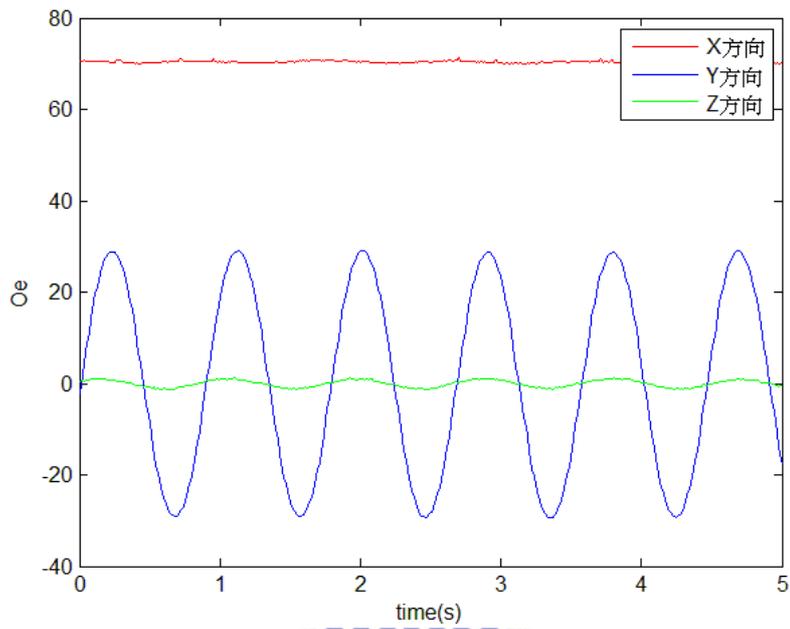


圖 2-13 利用碳棒量取線圈中心之三軸方向之磁場變化

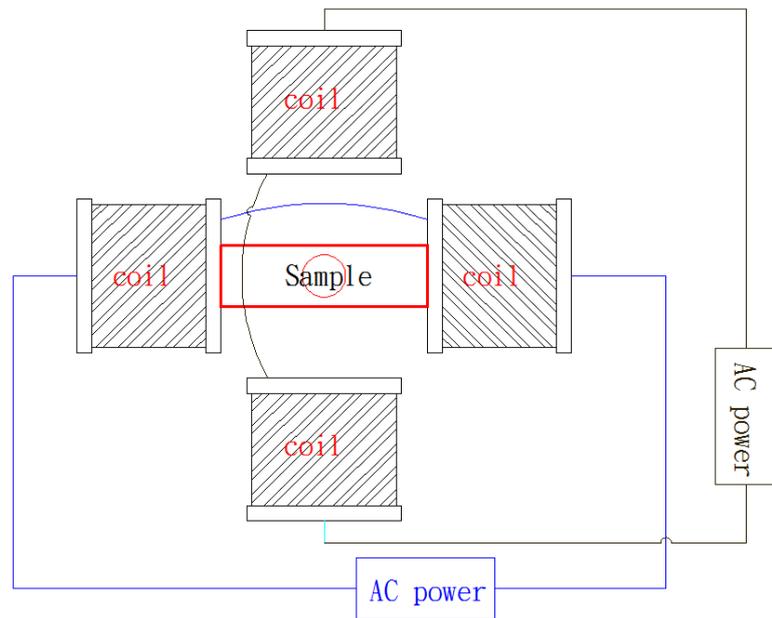


圖 2-14 利用兩交流電源供應器分別控制兩線圈示意圖



圖 2-15 Invitrogen 生技公司生產之 Dynabeads M-450 Epoxy 及 M-270 Epoxy

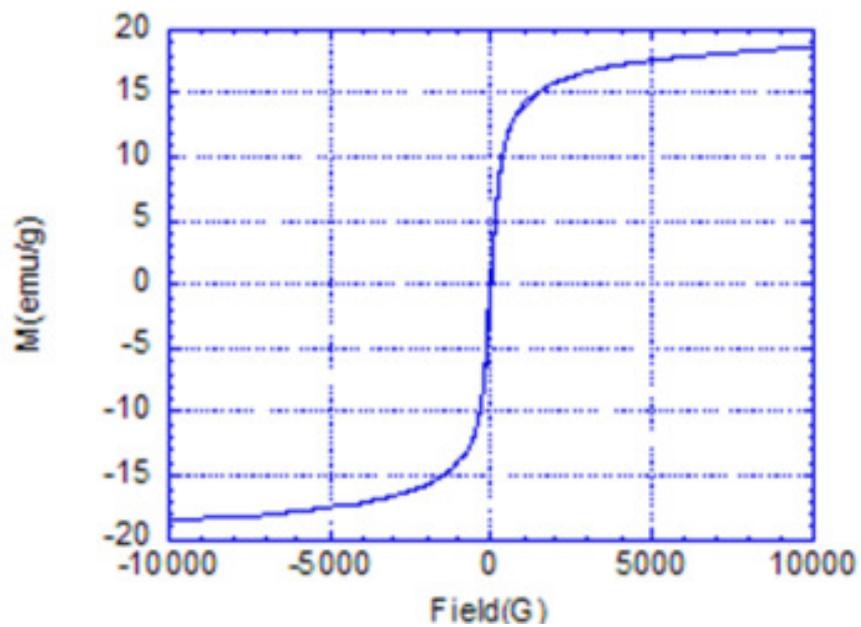


圖 2-16 磁性流體 M-450 Epoxy 之磁化曲線

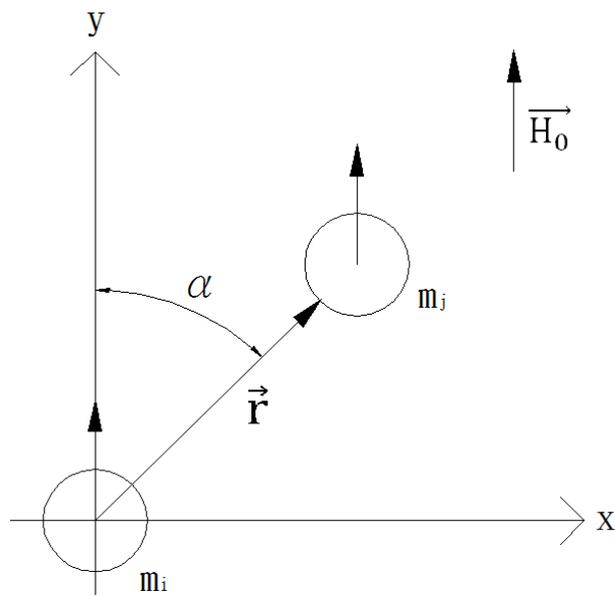


圖 2-17 兩顆磁性粒子在均勻磁場下示意圖

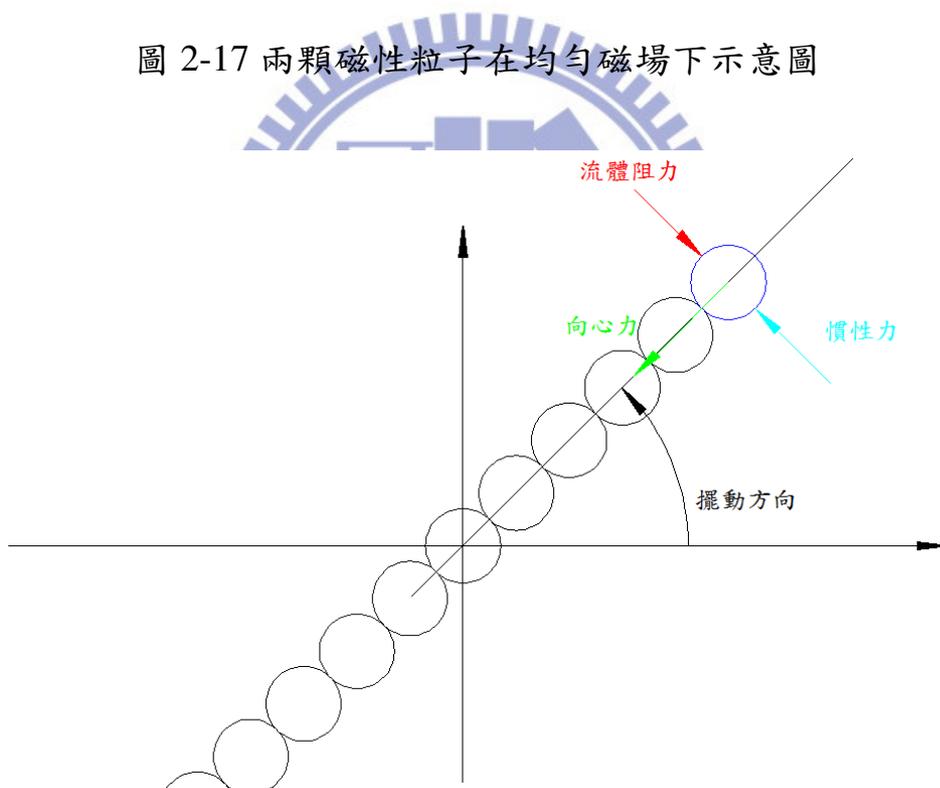


圖 2-18 磁性粒子擺動受力情形示意圖

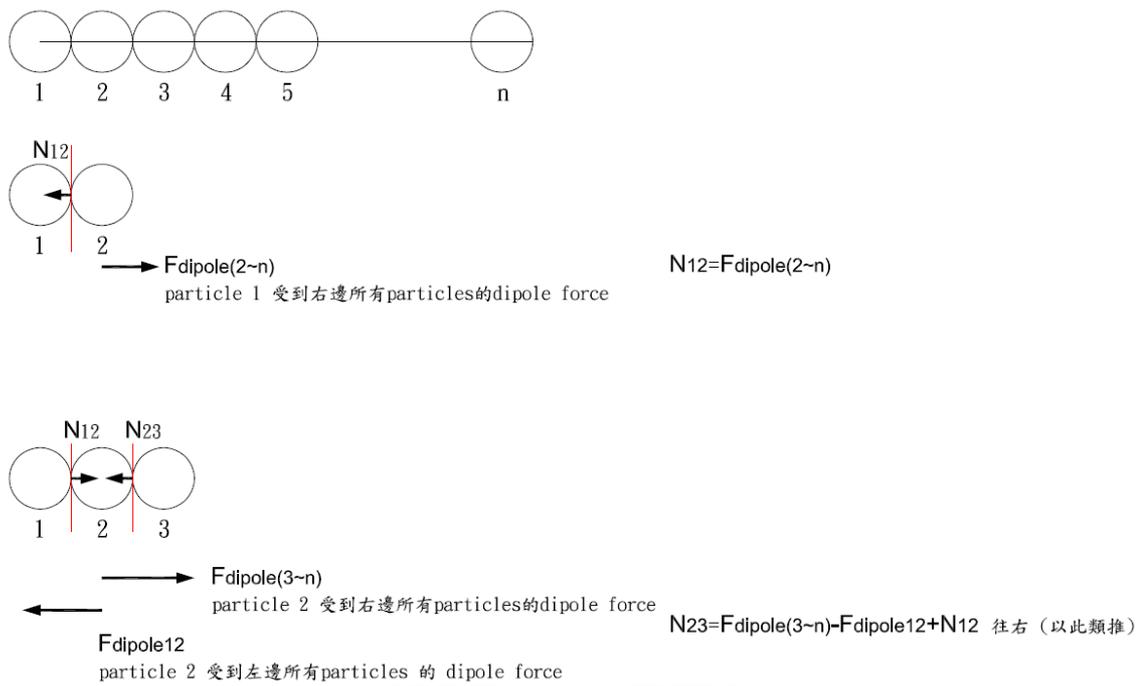


圖 2-19 計算磁性粒子串正向力示意圖

粒子直徑	4.5 μm
粒子密度	1.5 g/cm ³
粒子磁化率	1.6

表一磁性流體 M-450 Epoxy 物理性質

粒子直徑	2.8 μm
粒子密度	1.3 g/cm ³
粒子磁化率	1

表二 M-450 Epoxy 之物理性質

磁導率	1.2566270 $\times 10^{-6}$ H/m
動黏滯係數	10 ⁻⁶ m ² /s
密度	998 kg/m ³

表三蒸餾水之物理性質

第三章 結果與討論

本實驗之目的在於建立多種不同型式之外加磁場，並且將磁性流體放置於不同磁場之下，包含單一均勻方向磁場、上下震盪型磁場以及旋轉磁場等等，利用光學顯微鏡配合高倍率金相物鏡來觀測並且記錄磁性粒子之運動模式，並且利用 matlab 軟體中之掃圖運算功能計算出粒子運動之受力情形。而磁性粒子的運動型式概括可分成串接、擺動、旋轉以及在擺動之過程中斷裂和最後的在流體中游動之模式，最後和實驗團隊成員的商用計算軟體(FLUENT)模擬結果進行粒子運動受力趨勢以及現象上的比對。本實驗研究之過程為先利用較基本之實驗結果來驗證基本物理方程式，接著推展至較複雜的運動模式，最終目標在於有效的操控磁性粒子之運動模式並且估算磁性粒子串在運動過程中之受力分析，包含估計磁性粒子串擺動時的斷裂位置等等，電腦計算方面則先進行二維模擬節省運算時間並確認其可行性後在進行三維模擬以符合實驗參數來增加準確性，為往後應用層面奠下基礎。

3-1 兩磁性粒子在均勻磁場下受力分析

本實驗將由基本的兩顆磁性粒子互相吸引碰觸的過程受力分析開始著手，並驗證理論中兩顆磁性粒子間磁吸引力隨著距離變化之方程式(2-5)。首先在顯微鏡頭視野之中找尋只有兩顆磁性粒子分佈之區域，以避免在估算受力實驗值受到其它磁性粒子之吸引力干擾影響，同時整體實驗時間不可過長以避免發生蒸餾水蒸發完畢以及磁性粒子沉澱而無法被其他粒子吸引產生位移，調整好鏡頭焦距後便可開啟磁場並且同時拍攝磁性粒子移動過程。此外將利用碳棒配合高斯計量測磁場大小值以求實驗參數，磁場量測大小約為 72.80e，而由實驗影片截圖可以看出在開啟磁場約 6.2 秒左右，

兩顆磁性粒子因為彼此之間的吸引力慢慢移動直到互相接觸為止，同時發現了隨著兩粒子之間距離越近，其粒子移動速度越快，如圖 3-1 所示，圖中可以很明顯發現磁性粒子之運動過程。

實驗後在受力分析部分研究方法為利用 matlab 中掃圖指令功能，先將影片隨著不同時間之截圖轉換成灰階圖後，利用其像素之高低值來判定磁性粒子在影片中所在的位置坐標，經過多張圖片進行掃圖及紀錄磁粒子坐標之後，便可以得到兩顆磁性粒子之距離隨時間之變化如圖 3-2，而圖中可以看出隨著時間兩粒子之間的距離越近，其移動相對位置隨時間變化之曲線之斜率也越大，意味著隨著兩粒子相對距離越近時其相對移動速度也越快，同時我們也可由方程式(2-5)中看出隨著兩粒子之距離減少，其受力將和距離呈現四次方反比逐漸遞增，趨勢相當吻合。由實驗影片結果得到距離隨時間變化圖之後，由於影片拍攝過程中夾雜著晃動等外在因素之雜訊對分析結果造成誤差，因此利用 matlab 程式軟體中的曲線擬合功能 (curve-fitting) 進行四階曲線擬和得到較為平滑之位置時間曲線圖，接著對時間軸進行二次微分得到粒子之相對加速度隨時間變化之曲線，再利用牛頓第二運動定律將加速度乘以磁性粒子之質量便可以得到粒子移動過程中的總受力隨時間的變化情形，如圖 3-3。而理論值之計算則是將量測到之磁場大小、真空磁導率、溶劑(蒸餾水)磁導率、以及磁性粒子之半徑長度等實驗參數輸入方程式(2-5)中，計算出兩磁性粒子在不同距離下相對應的磁吸引力(F_{dipole})，此外流體對磁性粒子造成的阻力也必須納入考量，其磁性粒子受力可以用式 3-1 表示：

$$F_{\text{particle}} = F_{\text{dipole}} - F_{\text{stokes drag}} \quad (3-1)$$

意即磁性粒子在運動過程中受到的總力(F_{particle})可以等於粒子之間的磁吸引力(F_{dipole})(造成磁性粒子移動之力)減去流體給予粒子的阻力($F_{\text{stokes drag}}$)。

方程式中流體給予的阻力($F_{\text{stokes drag}}$)計算可以將粒子不同的移動速度代入利用方程式(2-6)計算出粒子在不同移動速度之下的流體阻力，將所有計算結果代入式(3-1)便可以得到隨著位置之受力變化情形如圖 3-4。最後我們將發現在兩粒子距離相鄰近時，其受力之實驗值和理論值之數值相近，如表四，驗證了實驗結果和理論方程式相互吻合，確認理論方程式所得結果與實驗數據結果具有一致性。故而可依此基礎進行更進一步之粒子串接技術之研究，其研究內容可分為技術方面(如串接粒子數目，如圖 3-5)及力學性質理論值和實驗值之計算二方面。

3-2 磁性粒子串接成鏈

由前一節已驗證兩顆粒子之間吸引力方程式和實驗值吻合，這一節將探討針對多顆磁性粒子在不同大小之外加磁場之下的串接情形。分別考慮多種不同大小外加磁場為 16.30Oe(1.29kA/m)、40.50Oe(3.22kA/m)以及 64.90Oe(5.16kA/m)等三種單一方向均勻磁場，由於要平均控制磁性粒子之初始體積容率等參數為一項困難的議題，因此在此三種不同外加磁場之實驗中將會選擇在初始電腦錄影畫面視窗中觀測粒子之均勻分布之磁性粒子為對象，分別給予不同磁場大小並且拍攝錄影串接情形，如圖 3-5 所示，可以明顯發現磁場越大的實驗組在短時間內便可以串接長度較長的粒子串，而隨著時間增長，距離較遠的磁性粒子也慢慢的串接在一起呈現鏈狀結構，在影片中可以明顯觀測到許多粒子鏈狀結構逐漸產生。此外若調整不同體積容率之磁性粒子(錄影畫面中粒子顆數的多寡)，而固定外加均勻磁場約 510Oe，如圖 3-6，可以明顯看出較大之體積容率的磁性粒子可以再短時間內串接長鏈，更可以了解到影響粒子串接長度之參數包含了起始粒子的濃度之外，外加磁場大小以及磁場開啟經過時間都是重要的影響因子。完成粒子之串接技術研究後，則仍利用上述方法，計畫進行粒子串之運動與力學性質之實驗及理論研究。具體內容乃開始邁向複雜型態之外加磁場，以操控粒子串之位移運動及旋轉擺動，並量測及計算及其運動阻力與扭力，以

了解運動粒子串之結構力學，作為未來進行特定應用之須。

3-3 磁性粒子串鏈之擺動及旋轉操控

對於磁性粒子之串接已有基礎之後，接著將外加磁場改變成較複雜之模式。利用交流電源供應器提供隨時間改變極性之震盪磁場並且配合直流電源提供單一方向均勻磁場，實驗示意圖如圖 2-12。實驗過程為在放入磁性流體於線圈中央後，先打開橫向方向(x 方向)線圈之直流電源，使得磁性粒子串接成鏈狀，接著再橫向磁場開啟的狀態下，打開縱向方向(y 方向)之線圈之交流電源(頻率為 1Hz)，此時之磁場分佈示意圖如圖 2-13，實驗結果如圖 3-7，可以明顯觀測到粒子串進行上下擺動的運動方式。同時若改變交流電流大小時(改變振盪磁場大小)，其粒子串之擺動角度隨之改變，同時在實驗中發現了針對不同長度的磁粒子鏈進行實驗時，長度較長的粒子串在左右兩側有產生形變的現象(S-shape)，如圖 3-8，而較短的粒子串在擺動過程中鏈狀結構並沒有發生變形的現象(呈一直線狀)，為有效瞭解磁性粒子串擺動操控機制，則須了解磁性粒子串擺動之最大角度和合磁力線的磁場震盪最大擺動角度的之間關係。若考慮小串之磁性粒子串，實驗中在磁場方面固定參數為橫向(x 軸)之串接磁場 47.75Oe 而變數為縱向之振盪磁場，分別為 7.96Oe、15.39Oe、22.50e、30.20e、37.57Oe、44.90e 以及 52.10e 等七種不同之振盪磁場大小，並且針對五種不同實驗組進行實驗(包含一組五顆粒子串、兩組六顆粒子串、一組 7 顆粒子串以及一組 11 顆粒子串)，並且觀測記錄運動結果，而磁性粒子之擺動最大角度先利用影片截圖找出最大角度之圖片編號後，再利用 matlab 軟體內建掃圖功能進行運算出其斜率以及角度。磁力線角度方向取得方法為將量測碳棒放至於實驗中磁粒子放置處固定後，分別對互相垂直之三軸方向進行磁場量測，配合高斯計以及資料擷取器將磁場隨時間變化的數據儲存於電腦之中，最後利用磁力線具有的向量特性做向量相加得到磁力線角度值，實驗結果以及量測到的磁力

線角度如圖 3-9 所示。由圖中可明顯看出隨著縱軸振盪磁場越大，磁力線的最大角度以及實驗中磁性粒子之擺動角度也相對越大，同時也發現了在這四組五顆到七顆之磁性粒子串的實驗中，磁力線擺動的最大角度和實驗最大擺動角度值也相互吻合。此外若針對較長串的磁性粒子串配合較大的震盪磁場進行實驗(粒子串長度分別為 11 顆、15 顆、20 顆)，外在設定磁場橫向為 17.01Oe，縱向擺動磁場分別為 124.58Oe, 56.25Oe 以及 87.05Oe，利用同之前之實驗處理方法得到實驗中擺動最大角度和磁力線之擺動最大角度，可以發現磁力線的擺動最大角度有大於實驗粒子串的最大擺動角度的趨勢，如圖 3-9，若將擺動角度和對應磁場大小統整後可得到圖 3-10。為了解磁力線角度大於實驗擺動角度之原因，必須先了解粒子串運動過程和磁力線之間的關係，由之前 James 和 Sonia 學者發表之文獻[21]中推導了粒子串在旋轉磁場下之運動受力情形，其中包含了粒子之間的磁偶極力、流體阻力等等，而在這些作用力的交互作用下，粒子串的旋轉角度和外加磁場產生的磁力線角度之間會有 phase lag 產生，意及粒子串擺動的過程中，其角度不會和磁力線擺動角度互相貼合，兩者之間會有角度差，且粒子串擺動角度會落後磁力線之擺動角度。此外 phase lag 也是帶動粒子串轉動或者擺動的重要參數，但是要從實驗中同步進行觀測磁力線角度和粒子串擺動角度之間的關係是非常困難的，由 Sonia 實驗中之實驗方法為使用 linear dichroism optical train 來計算粒子角度和磁力線角度 [16]，其儀器昂貴不易取得，因此本研究嘗試使用數張實驗影片截圖和對應時間之磁力線方向來計算兩者之角度差，如圖 3-11 以及 3-12，分別將磁力線加入實驗圖片中，圖中藍線方向即為磁力線方向，藍線長短為磁力大小，可以看出橫向磁場為定值，縱向磁場會隨著時間做上下大小改變，並且也可看出長度較長的粒子串(15 顆)，其 phase lag 較長度短(8 顆)之粒子串來的大，此外可以統整出粒子擺動一周期內 phase lag 隨時間之變化，如圖 3-13 以及 3-14。可以了解到磁場和粒子串運動之間的關係，而由此兩張圖中可看出在較短的粒子串以及外加磁場不大的情形下，磁力線和粒子串之間的角度差異性較小，

而對於較長串之粒子串或者較大的磁場下，磁力線和粒子串之間的角度差也越大，也說明了 phase lag 和粒子串的顆數以及外加磁場大小有著密切的關係。

此外對同一串粒子鏈分別給予不同頻率的旋轉磁場，可以發現粒子串將會符合預期的隨著不同的磁場頻率進行旋轉的運動模式，如圖 3-15 以及圖 3-16，外加磁場分別為轉動頻率 1 以及 2，而實驗結果也可以觀測到粒子串的轉動頻率和外加磁場頻率吻合，更確認了磁性粒子的運動是隨著磁力線的變化(磁力線變化方向及變化頻率)而產生，對於之後要發展至應用層面更有了一大進展。而本研究著重在粒子串擺動的實用性以及分析其物理受力情形。

3-4 磁性粒子串鏈之擺動力學探討

於有效了解磁性粒子串擺動的運動情形以及操控特性之後，則須探討粒子串之擺動力學結構，以了解其應用之適用限制。下文進行控制磁性粒子在相同震盪頻率($f=1$)和串接磁場(17.01)之下，改變擺動磁場(縱軸方向磁場)的大小，並且刻意製造較大之擺動磁場，使得粒子串運動過程有較大的角加速度以及慣性力，造成磁性粒子串在運動過程中發生斷裂破壞的情形，如圖 3-20 至圖 3-25。隨後將實驗結果配合由研究團隊成員使用的電腦模擬分析結果進行力學分析探討，除了統整出粒子串的破壞原因、斷裂現象外，更大之作用在於避免在未來應用層面時發生此狀況造成不便或者利用此斷裂的情形發展出更多的應用。在不考慮重力和流體浮力之影響下，首先將粒子串受力分類成兩方向：徑向(和粒子串半徑向量平行)和軸向(和粒子串半徑方向垂直，和粒子串擺動方向平行)，如圖 3-17，而徑向方向受力包含了磁偶極力(粒子和粒子之間的磁吸引力)、向心力(擺動過程粒子角加速度所形成)以及最後粒子和粒子表面接觸形成的正向力(由磁偶極力和向心力作用合力的結果)，如圖 3-18。軸向方向受力包含了運動中的流體阻

力、粒子表面接觸之間的摩擦力以及外加磁場之磁力線和粒子串之間以 phase lag 為形式造成粒子串擺動的磁力，如圖 3-19。了解粒子串受的分力情形後，將針對實驗結果配合電腦模擬進行力學分析。

總體而言推論其斷裂的方式有兩種模式：

- (1) 正向力破壞(甩斷)，即為磁性粒子串擺動的徑向離心力大於磁性粒子之間的磁偶極力，由最外層將磁性粒子甩出造成粒子間的分離。
- (2) 切向力破壞(折斷)，為擺動過程中因為慣性力加上流體阻力的影響大於磁性粒子表面之間的摩擦力造成粒子串折斷的現象。詳細針對上列之破壞模式之理論探討將於下章節詳述之。

3-4-1 粒子串兩邊斷裂

由實驗現象中歸納出幾種不同的斷裂位置、斷裂時間以及斷裂方式。在圖 3-20 至圖 3-25 的四種實驗結果中可以發現粒子串斷裂的位置在左右兩側，除了 11 顆粒子串斷裂處為單邊之外(推論和粒子串長度有關)，其餘 15 顆、16 顆以及 20 顆等三種實驗結果可以發現斷裂位置有著左右對稱的趨勢，意及左右受力大致上為均勻的。此外由圖 3-21(15 顆)和圖 3-21(16 顆)兩種實驗結果可以發現粒子串斷裂後，粒子之間有分離未接觸的現象，相較於 15 顆和 16 顆的結果，在 20 顆的實驗結果可以發現粒子串斷裂後粒子之間沒有分離。由實驗影片中觀測到對於斷裂後分離的實驗中，分離的部分粒子串會分別以各自中心點為旋轉中心，繼續的隨著外加磁力線方向做擺動的運動模式，較特別的是未分離的磁性粒子串，由實驗中發現左右兩側折斷後整串的鏈狀物有著反轉的得現象產生而短時間內不會隨著磁力線繼續做擺動，推測原因為未分離的粒子串在折斷的瞬間產生一個反作用力使得整串鏈狀進行反轉，而反轉過程在極小時間內完畢，之後的磁性粒子串又會隨著外加磁場繼續的做擺動運動。此外由這四組實驗結果可以發現

其斷裂的時間也非常的接近，統整出數據如圖 3-26，以周期為單位來紀錄，可發現其四組實驗結果斷裂時間都在 0.25 週期至 0.5 週期內產生斷裂現象，推測在那段週期內擺動受力情形產生極大的變化。

3-4-2 粒子串中央分離

實驗中除了發現粒子串兩邊有產生斷裂的現象外，也發現實驗組中磁性粒子串會發生中間分離的現象，如圖 3-24 以及圖 3-25 等兩個實驗結果，和前一節實驗參數設定不同的地方在於發生中央分離現象的實驗組其初始的擺動角度較小，意及在尚未產生兩邊斷裂前及產生了中央分離現象，此外斷裂時間也和兩邊斷裂的結果有明顯的差異，似乎都在粒子串起步瞬間發生斷裂，推測粒子串的擺動起步瞬間也有著極大的力學變化造成粒子間分離，須配合理論模擬計算整個粒子串的運動情形來分析斷裂位置以及斷裂時間。

3-4-3 粒子串擺動受力分析討論

為了解其粒子串受力，須配合由研究團隊成員利用電腦模擬使用商用軟體來計算運動過程的受力情形，以 11 顆、15 顆以及 20 顆的三種實驗結果為研究對象。分別將實驗中的種種參數，包含了粒子串的長度(粒子顆數)、擺動最大角度、擺動頻率、粒子以及溶劑(蒸餾水)的特性(粒子直徑、磁化率)輸入模擬軟體中以配合實驗條件。而粒子運動則是利用 FLUNT 商用軟體中的 UDF(User Defined Function)掛載以控制其運動模式。跑出結果後利用後製軟體(Matlab 以及 tecplot)將數據繪出，並且比較其受力趨勢。

為了符合實驗條件，將進行三維電腦模擬計算，針對圖 3-20(11 顆)、圖 3-21(15 顆)以及圖 3-23(20 顆)的實驗結果進行電腦模擬，其粒子串前半周期(0s~0.5s)之運動過程以及流場壓力分布情形如圖 3-27(11 顆)、圖 3-28(15 顆)和圖 3-29(20 顆)，可以看出在粒子串左右邊緣有著較大的壓力梯度差，也可表示出在外圍左右兩側粒子運動過程有著較大的形狀阻力。

在粒子串的受力計算分析中，首先探討粒子串徑向方向受力情形，作用在粒子串上每顆磁性粒子所受到的磁偶極力，可以利用先前學者推導之兩粒子間之磁偶極力方程式(2-5)進行多顆粒子間磁偶極力的疊加計算推導得到：

$$F_D^N = \sum_{o=\frac{k+1}{2}}^{\frac{k-N}{2}} \frac{3\mu_0\mu_s m^2}{(2\pi((k-o)d)^4)} \quad (3-2)$$

在此考慮 N 顆磁性粒子串， F_D^N 代表第 N 顆粒子所受之磁偶極力，k 表示總粒子數，分別將所有實驗參數(k=11、15 以及 20、粒子直徑 $d=4.5 \mu m$ 以及不同時間之對應磁場，磁粒子磁化率等)代入後可得到圖 3-30(11 顆)、圖 3-31(15 顆)以及圖 3-32(20 顆)之磁粒子串上每顆粒子所受到的磁偶極力隨時間變化圖。而另一作用在徑向方向之向心力則使用物體轉動之運動方程式表示：

$$F_R^N = Mr\omega_0^2 = \frac{\rho_p \pi d^4 |k - 2N + 1| \omega_0^2}{12} \quad (3-3)$$

同方程式 3-2 一樣的處理方法將實驗和粒子之物理性質代入 3-3 式後便可得到粒子串上每顆粒子所受到的向心力大小，如圖 3-33(11 顆)、圖 3-34(15 顆)以及圖 3-35(20 顆)。考慮徑向方向磁偶極力和向心力對粒子運動所造成的影響，磁偶極力為粒子之間吸引力，也就是穩定粒子串運動時的力量，而向心力為在運動過程中將粒子往外甩出之力量。由三種不同顆數之粒子

串的計算結果中可以看出兩者的磁偶極力大小約為 10^{-11} ，而向心力大小約在 10^{-16} 左右，因此理論上前面推論的第一種斷裂方式(徑向甩出)是不可能發生的，而由實驗過程中，尚未發現有任何磁性粒子串在擺動過程中將粒子由徑向甩出的現象，所有觀測結果都為推論的第二種斷裂模式(切線方向折斷)，因此現階段可以驗證斷裂方式計算結果和實驗結果的一致性。

確認斷裂方式皆為切線方向折斷後，將進行斷裂位置的估算以方便日後之應用，由前節討論之實驗結果中統整出斷裂位置可分為中間分離以及兩邊斷裂，而實驗影片觀測出中間分離和兩邊斷裂之粒子串型態上之不同處在於中間分離之實驗結果其粒子串在運動過程中產生 S 形變化(S-shape)的程度相對於兩邊斷裂來的極小。中間斷裂的實驗結果中粒子串幾乎為一直線狀態，有趨近於剛體(rigid body)的現象，意即斷裂前粒子串擺動中幾乎無形態上之改變，而斷裂後分離的粒子串分別又以各自旋轉中心進行擺動。而兩邊斷裂的實驗結果中可以看出粒子串斷裂前的擺動過程已有明顯的形態上改變(S-shape)，對於粒子串之型態上是否為剛體的表現有待往後之研究，現階段著重於擺動力學分析，首先由三維電腦模擬結果計算出切線方向受力，分析出流體阻力在 11 顆、15 顆和 20 顆的分布結果如圖 3-36、圖 3-37 和圖 3-38，此外流體阻力將會給予粒子串角加速度，其值教小的情況下也就代表著粒子和粒子之間相對位移較小，也代表著此處所受的內力值較大，容易產生斷裂，因此進一步的將粒子和粒子之間在斷裂瞬間的角加速度差異計算出來如圖 3-39 至圖 3-41，由圖中可以發現在 11 顆粒子串的結果中，由左右外層向內數來第四顆至第五顆的角加速度差異性最小，而在 15 顆粒子串的計算結果中可以發現由左右兩側由外層向內數來第三顆至第五顆處角加速度差異性最小，以及 20 顆粒子串其左右兩側由外層向內數來第四顆至第六顆處角加速度差異性最小，也就是粒子串容易發生斷裂處，同時也發現了計算結果之趨勢和實驗中斷裂位置符合，此階段不但已經確認斷裂模式(切線方向斷裂)，更可以估計出擺動過程中的斷裂位置。

3-5 粒子串游動

對於磁性粒子擺動模式了解之後，將著手於應用層面的實驗，利用不同大小的磁性粒子做串接成鏈刻意造成左右不對稱的磁性粒子串，開啟外加擺動磁場使的粒子串產生一個不對稱的擺動模式藉以破壞運動對稱性，由實驗結果成功的發現擺動不對稱的磁性粒子運動模式除了擺動外，整體的粒子串在流體中產生了一推力向前游動如圖 3-42，並且實驗中發現粒子串游動可操控之變因除了粒子串的形狀(左右不對稱之程度)外，還包含了擺動的振幅大小(震盪磁場大小)以及擺動頻率(震盪磁場頻率)，由實驗影片中可以明顯發現頻率加快時磁性粒子串游動之速度差異甚大。而由圖 3-43 以及圖 3-44 等兩個實驗結果為針對同一個實驗組，給予不同的震盪磁場大小，意味著給予不同的振幅大小。明顯發現振幅較大的實驗組游動速度明顯大於擺動振幅小的粒子串，此外再利用 matlab 軟體處理實驗影片便可將粒子串每一秒內游動的距離計算出來，如表五以及表六分別顯示兩種不同振幅下每一秒粒子串游動的距離，歸納出粒子串游動的平均速度以及無因次參數 $St=f*A/U$ ，其中 f 為震盪頻率， A 為擺動振幅而 U 為整體游動速度，而由生物流體力學中得知了魚類游動之最佳化 St 範圍位於 0.25~0.4，而本研究目前所建立之游泳器和其相差甚遠，即便成功的發展出微米尺度之人工游泳器，但是對於其最佳化設計在於產生最大效能上仍須進行更深入的研究。

3-6 結論

對於磁性粒子鏈在串接以及振盪型磁場之受力分析以及實驗架設和操控磁性粒子技術已於本研究中做深入探討，但對於要實際應用於微流道或者效率高之人工游泳器還是需要進一步實驗研究，除了要克服磁性粒子隨著時間沉澱而無法隨著磁場移動之困難外，要有效率且經濟的使用磁粒子在生物科技領域更是一大難題，即便如此但基本之操控技術已發展好準備

邁向應用之層面。

而和文獻回顧中之學者們實驗研究最大不同處在於其本實驗為先對磁性粒子進行串接的動作，隨後再進行擺動等其他型式之磁場之後續的實驗步驟。而對粒子鏈狀操控之變化更為複雜且具挑戰因為此時必須考量到粒子串之串接強度以避免實際應用時斷裂，而對於粒子串斷裂這部分之受力分析也正是本論文主要之探討目標並已做了詳細的受力分析運算，相信本實驗研究之受力分析對往後之應用奠定了良好的基礎。

磁性流體之應用以及相關研究雖發展了多年，但針對實用性來說即便許多應用方面之論文以及專利一一被提出，但要真的廣泛的被許多常見之機械系統應用除了必須了解其性質以及穩定性之外，於成本造價方面也是需要考量因素之一，雖然磁性流體有著可回復到初始狀態之性質，但是否能一再重複的使用而不減弱其特性強度也是需要投入研究。

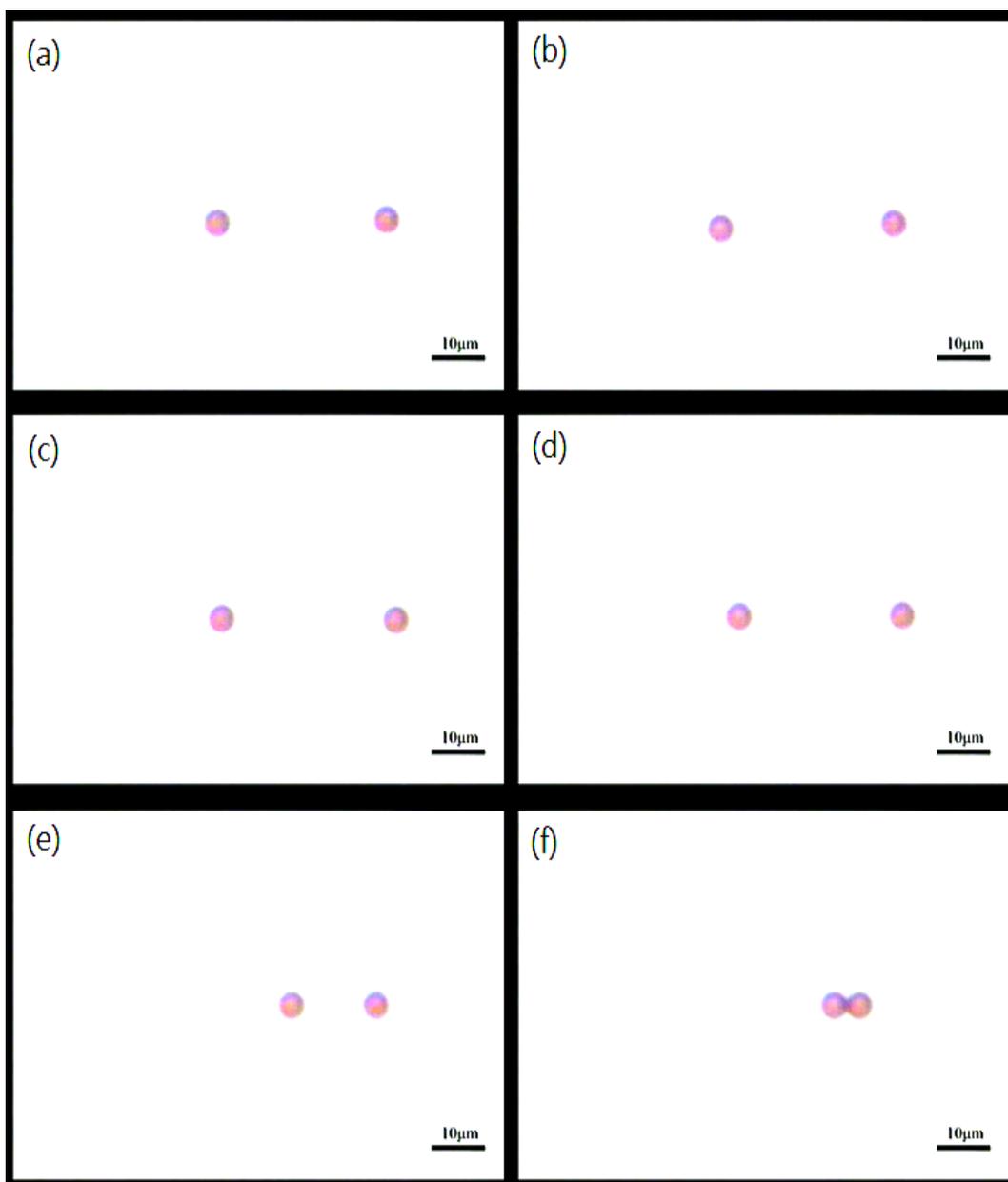


圖 3-1 外加磁場為 72.8Oe，二原始分離之磁粒子隨時間之運動情形。

(a) $t=0s$; (b) $t=2s$; (c) $t=3s$; (d) $t=4s$; (e) $t=5s$; (f) $t=6.2s$ 。

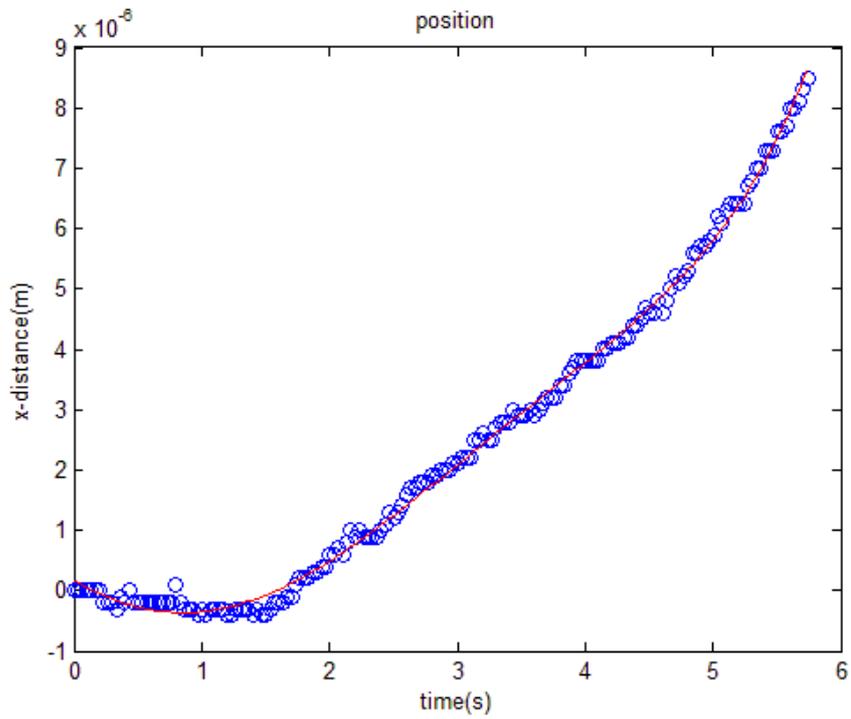


圖 3-2 外加磁場為 72.8Oe 磁性粒子位置隨時間變化圖

紅色部分為四階曲線擬合之結果

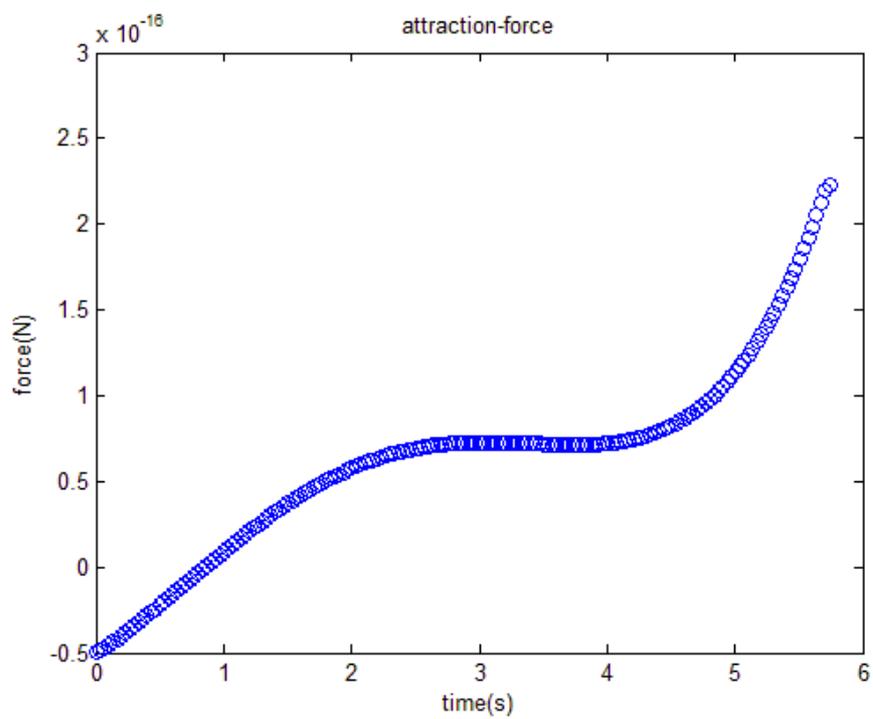


圖 3-3 外加磁場為 72.8Oe 磁性粒子受力隨時間變化圖

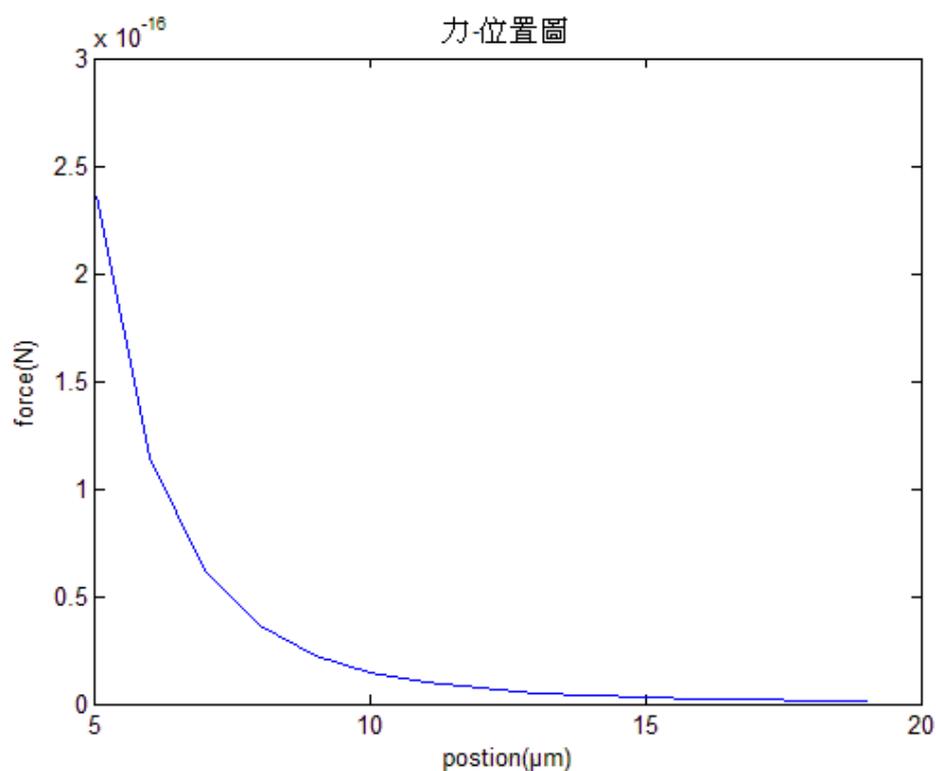


圖 3-4 外加磁場為 72.8Oe 磁性粒子受力隨位置變化之理論值

	Case1 起始距離:43.2μm 磁場大小 62.8Oe	Case2 起始距離: 22.8μm 磁場大小 72.8Oe
實驗值	1.758e-16(N)	2.365e-16(N)
理論值	1.873e-16(N)	2.244e-16(N)

表四為兩不同磁場大小磁性粒子互相接觸之受力值比較

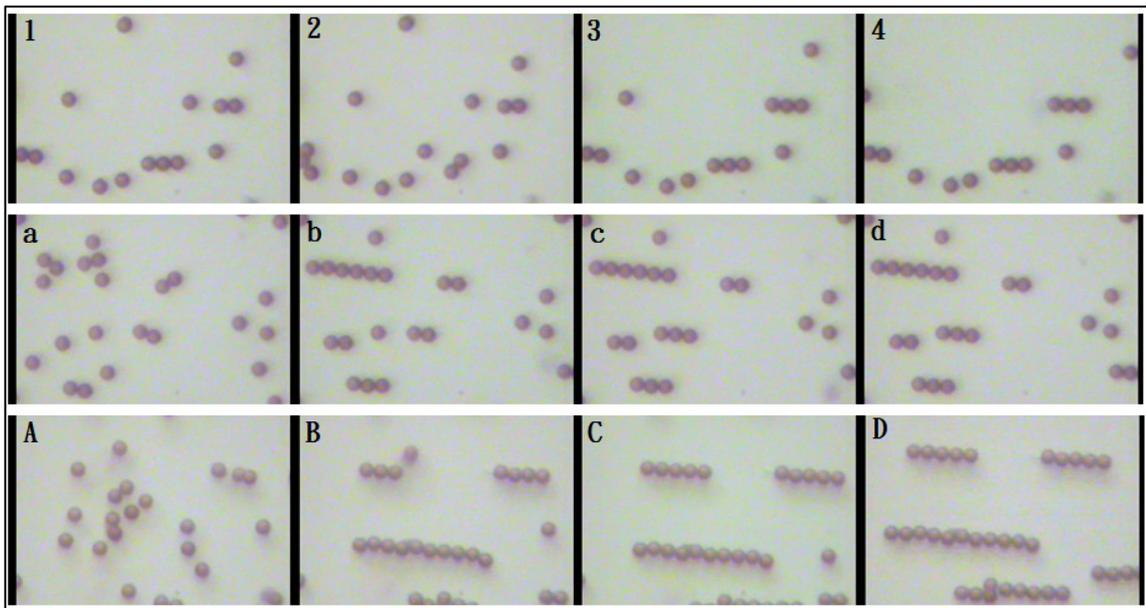


圖 3-5 不同磁場大小粒子串接情形

第一列(1~4)為磁場大小16.3Oe 間隔兩秒之串接情形

第二列(a~d)為磁場大小40.5Oe 間隔兩秒之串接情形

第三列(A~D)為磁場大小64.9Oe 間隔兩秒之串接情形

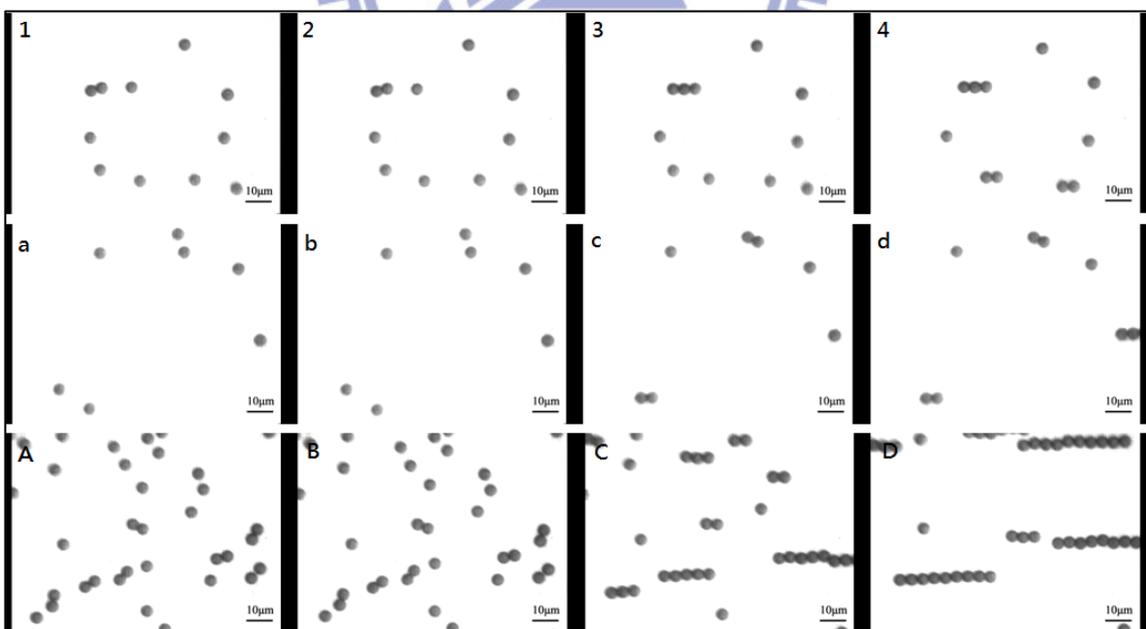


圖 3-6 不同濃度粒子在相同磁場大小 51Oe 開啟後 1 至 4 秒串接情形

第一列(1~4)濃度中 第二列(a~d)濃度低 第三列(A~D)濃度高

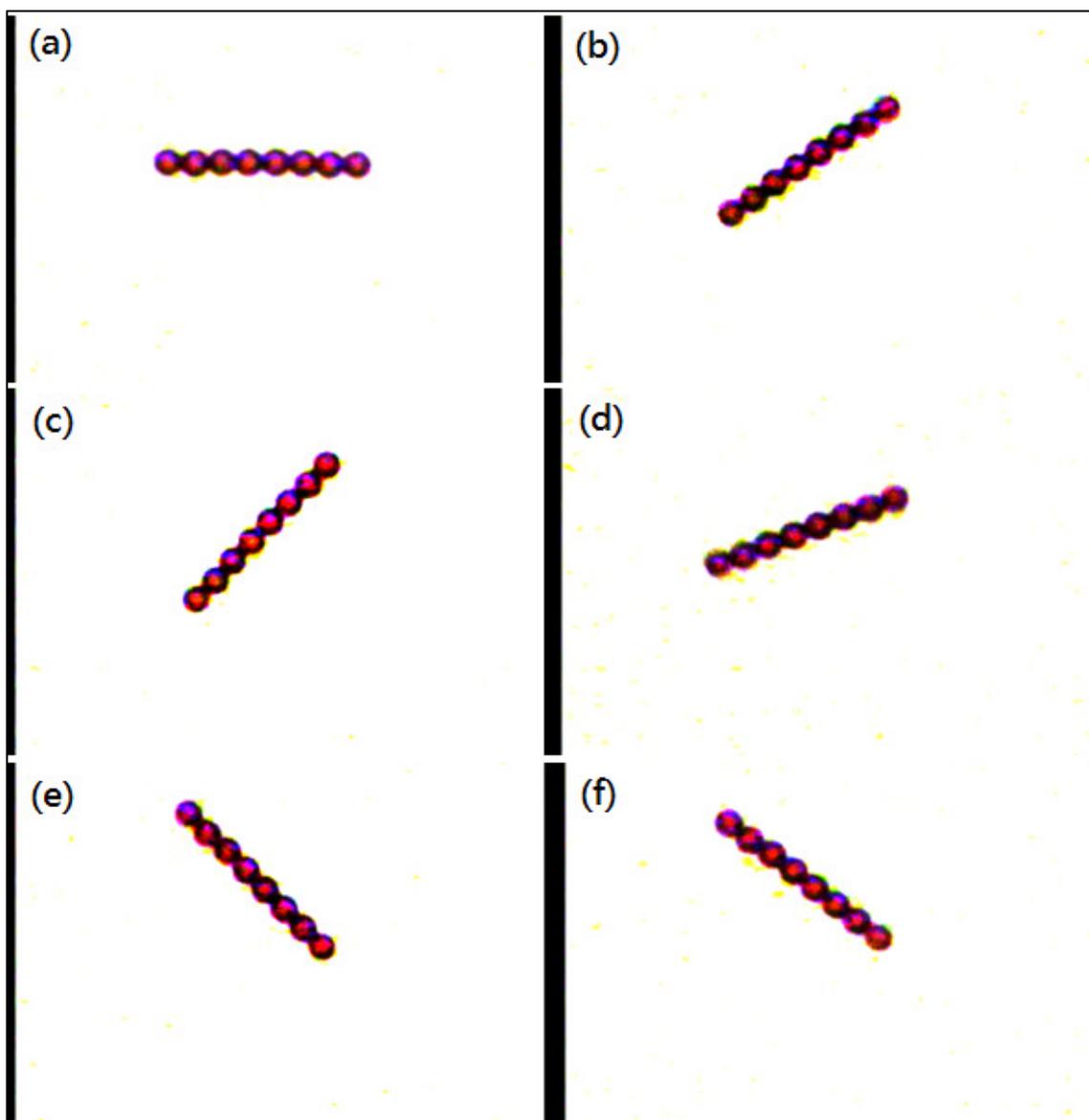


圖3-7 8顆粒子串擺動情形(a) $t=T$ ；(b) $t=T+5/30t$ ；(c) $t=T+10/30t$ ；(d) $T+15/30t$ ；
 (e) $T+22/30t$ ；(f) $T+28/30t$ 。(T 為磁場開啟時間，t 為一周期時間)

串接磁場大小	52.18 Oe
振盪磁場大小	X:52.18Oe Y:48.02 Oe
粒子顆數	8
振盪頻率	1 Hz
粒子串擺動最大角度	47.152 度
磁力線量測方向	47.375 度

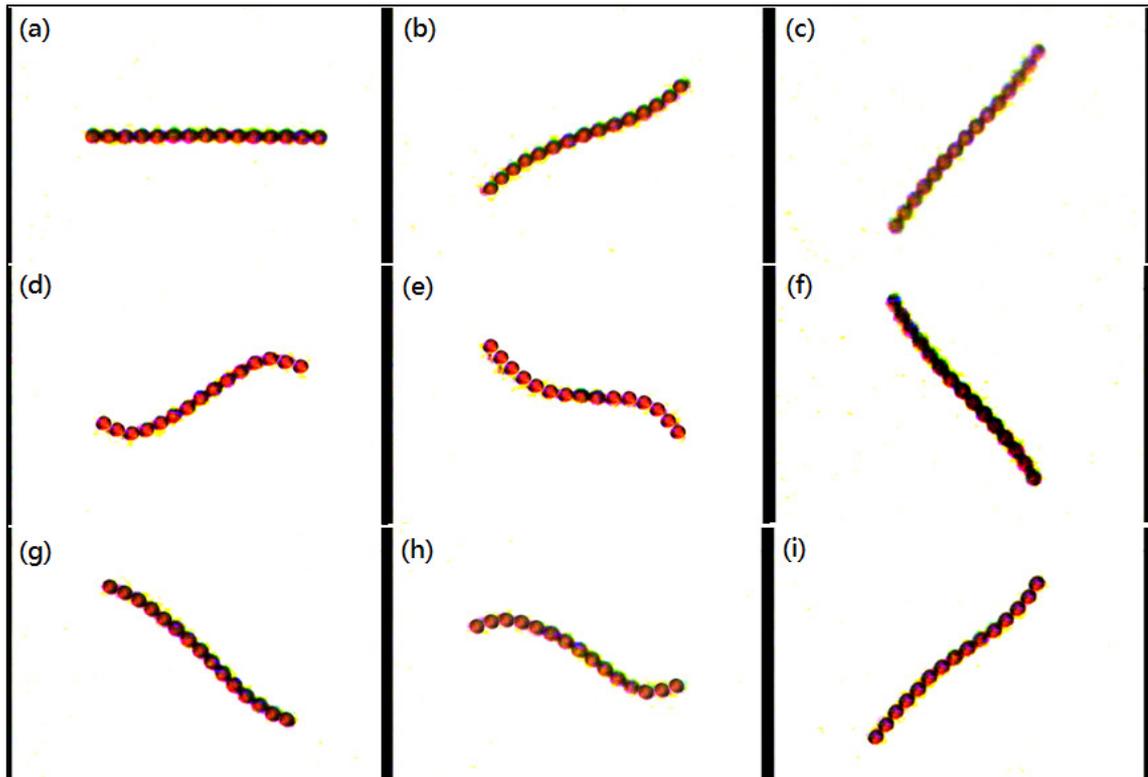


圖 3-8 15 顆粒子串擺動情形(a) $t=T$ ；(b) $t=T+5/30t$ ；(c) $t=T+8/30t$ ；
 (d) $T+18/30t$ ；(e) $T+21/30t$ ；(f) $T+24/30t$ ；(g) $T+31/30t$ ；(h) $T+33/30t$ ；
 (i) $T+38/30t$ 。(T 為磁場開啟時間，t 為一周期時間)

串接磁場	52.18 Oe
振盪磁場	X:17Oe Y:48.02 Oe
粒子顆數	15
振盪頻率	1 Hz

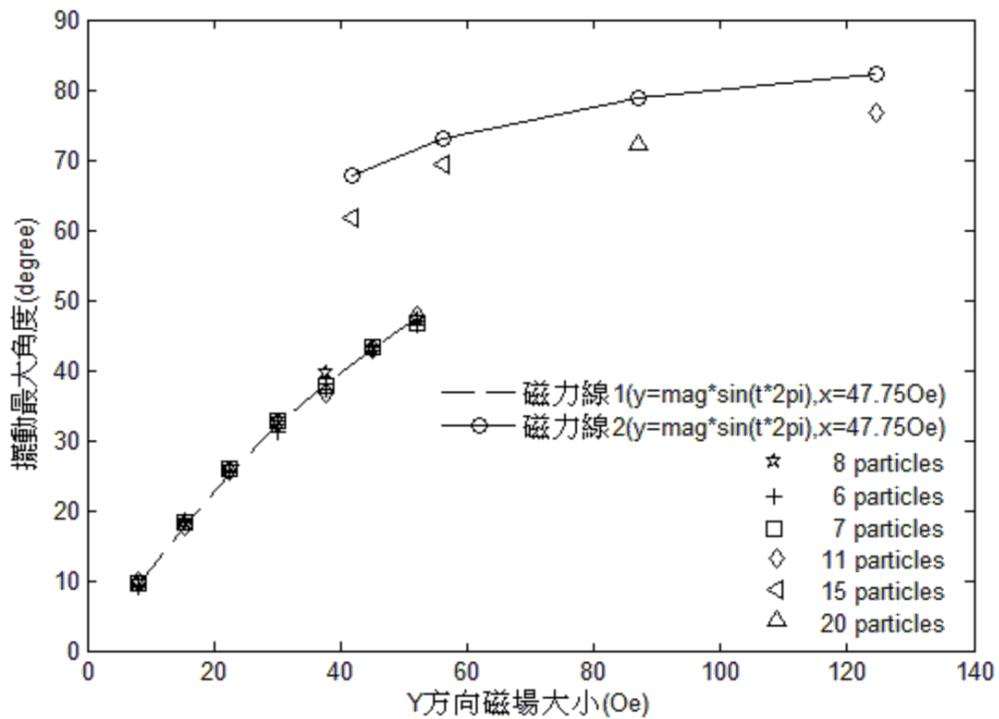


圖 3-9 粒子串擺動之最大角度與磁場震盪擺動之最大角度關係

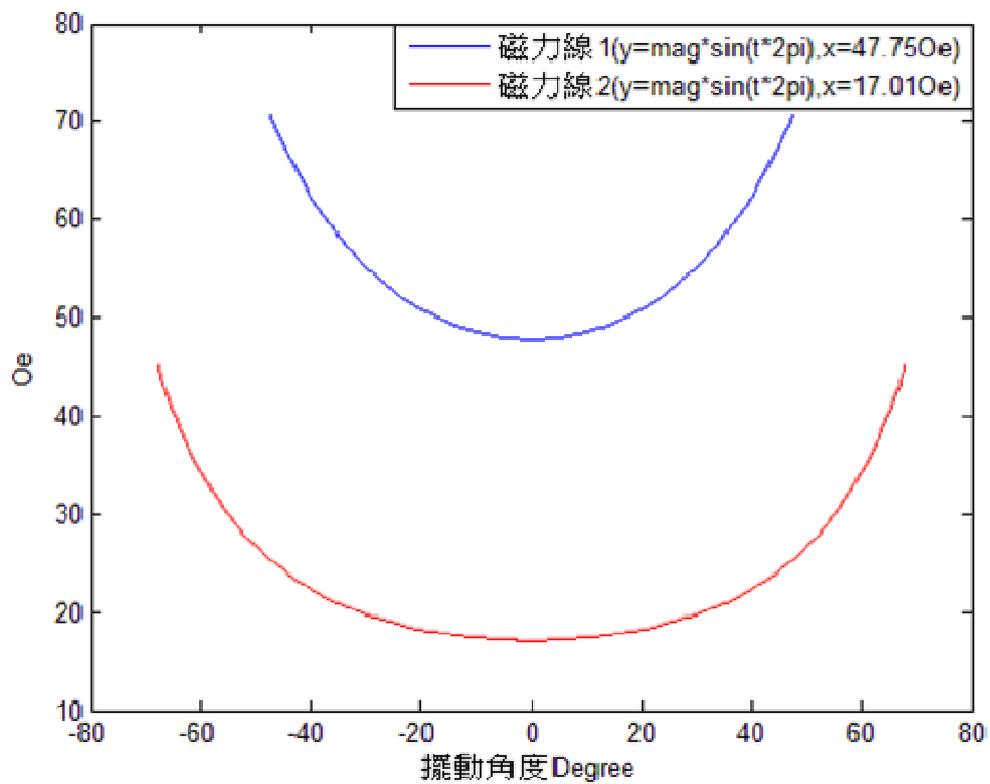


圖 3-10 磁場大小與擺動角度關係

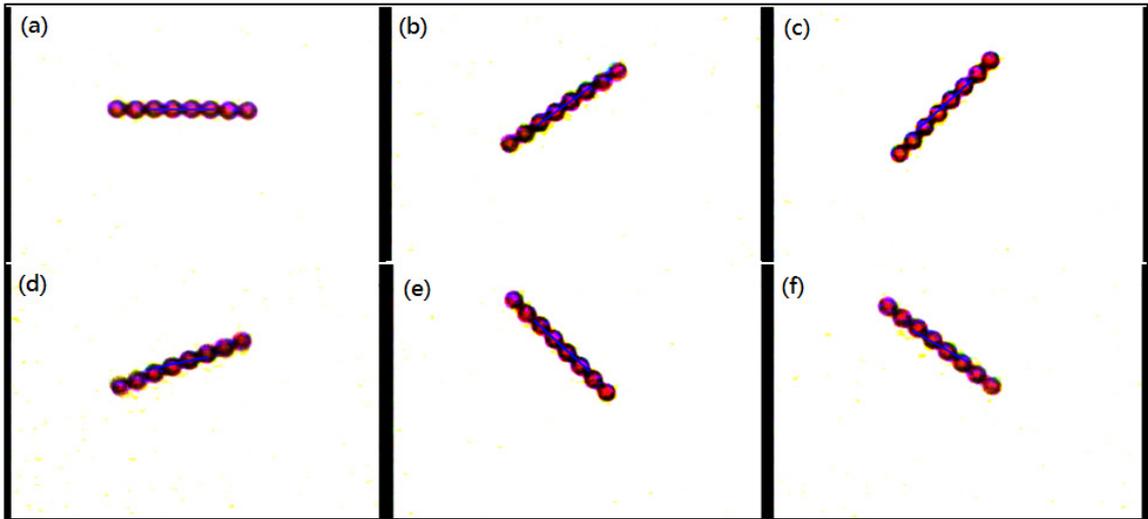


圖3-11 8顆粒子串擺動情形加入對應時間之磁力線

(a) $t=T$; (b) $t=T+5/30t$; (c) $t=T+10/30t$; (d) $T+15/30t$;

(e) $T+22/30t$; (f) $T+28/30t$

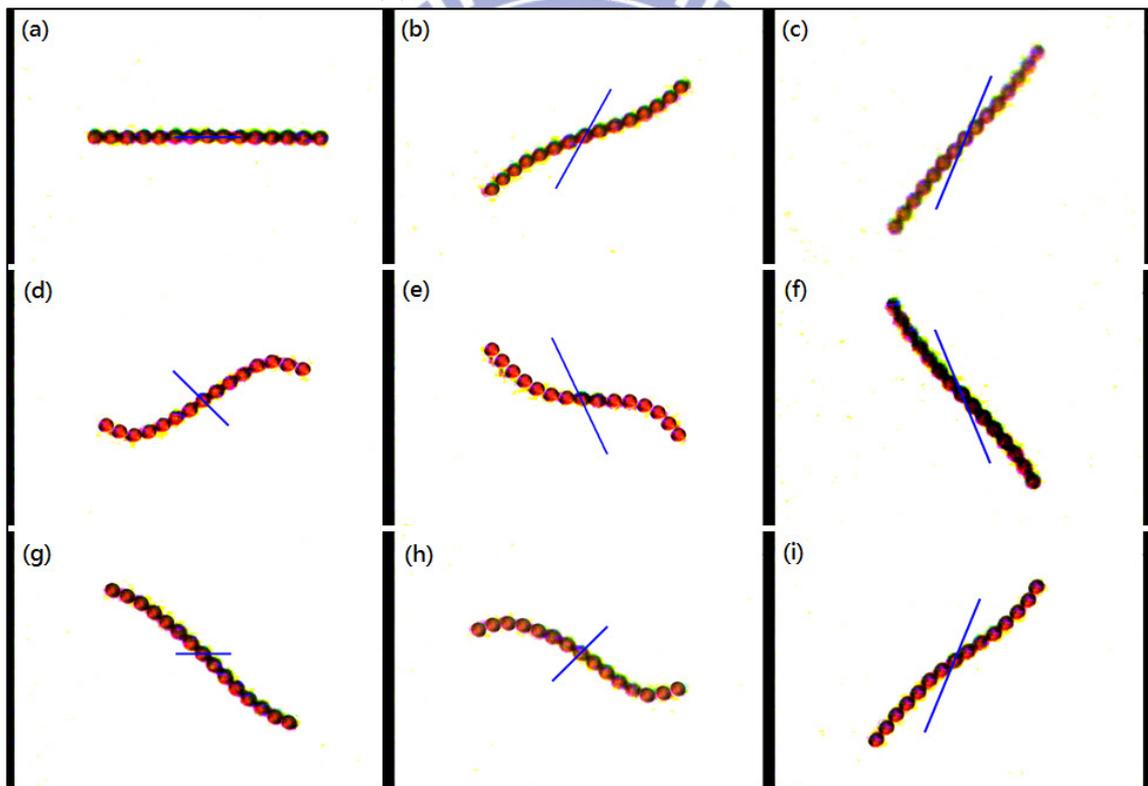


圖3-12 15顆粒子串擺動情形加入對應時間之磁力線

(a) $t=T$; (b) $t=T+5/30t$; (c) $t=T+8/30t$; (d) $T+18/30t$; (e) $T+21/30t$; (f) $T+24/30t$;

(g) $T+31/30t$; (h) $T+33/30t$ (i) $T+38/30t$

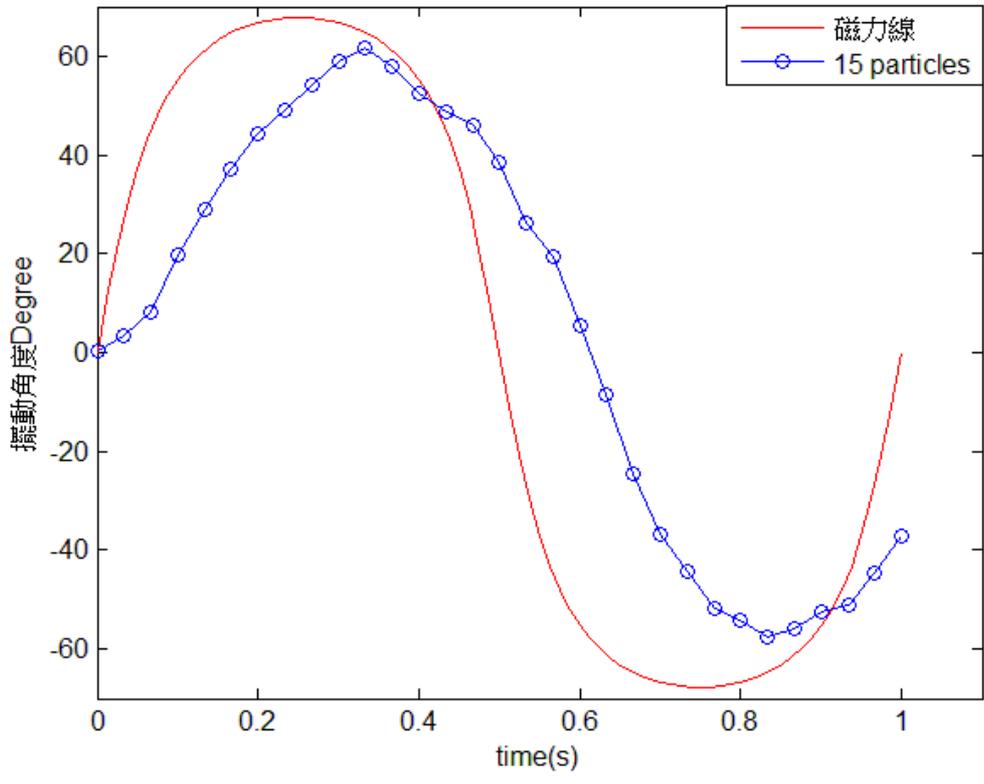
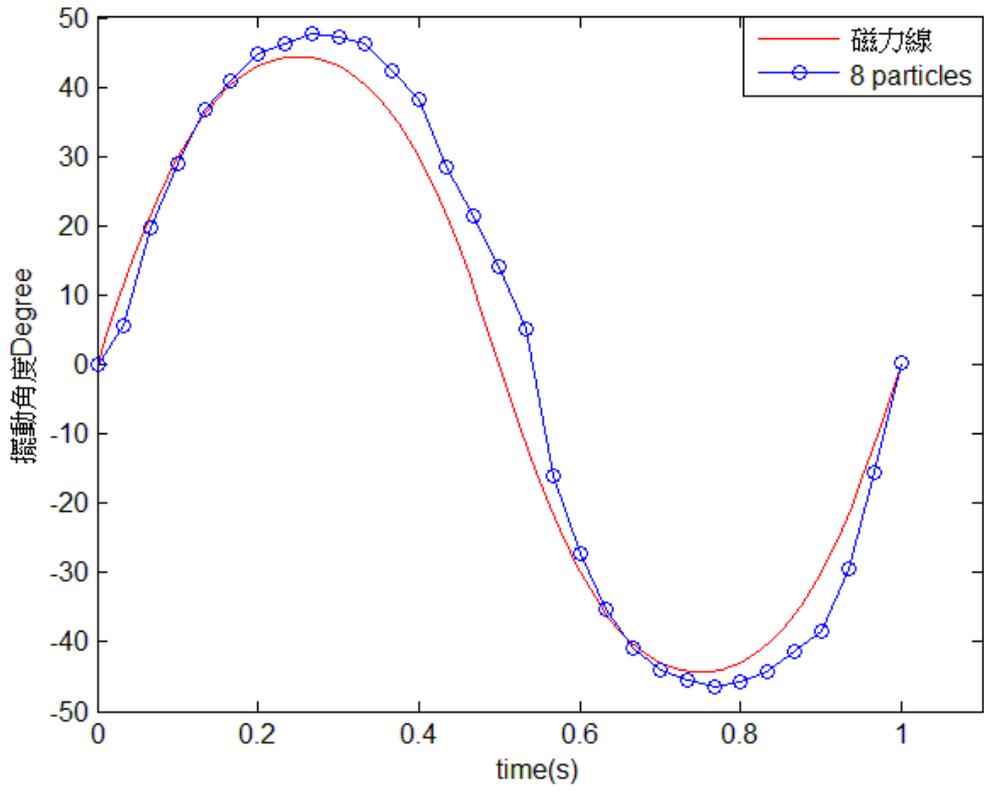


圖3-13 8顆和15顆粒子擺動過程角度差隨時間變化

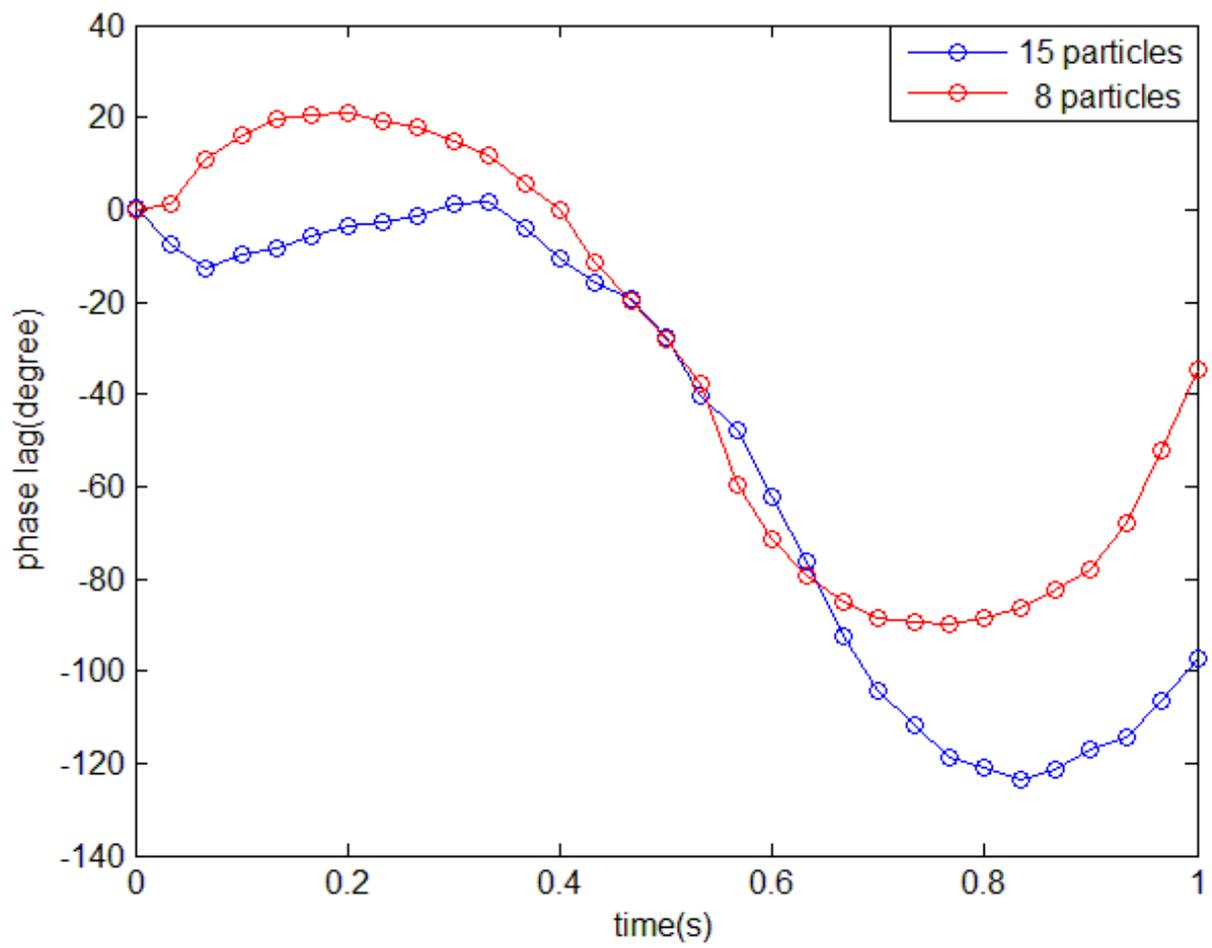


圖3-14 8顆和15顆粒子phase lag隨時間變化

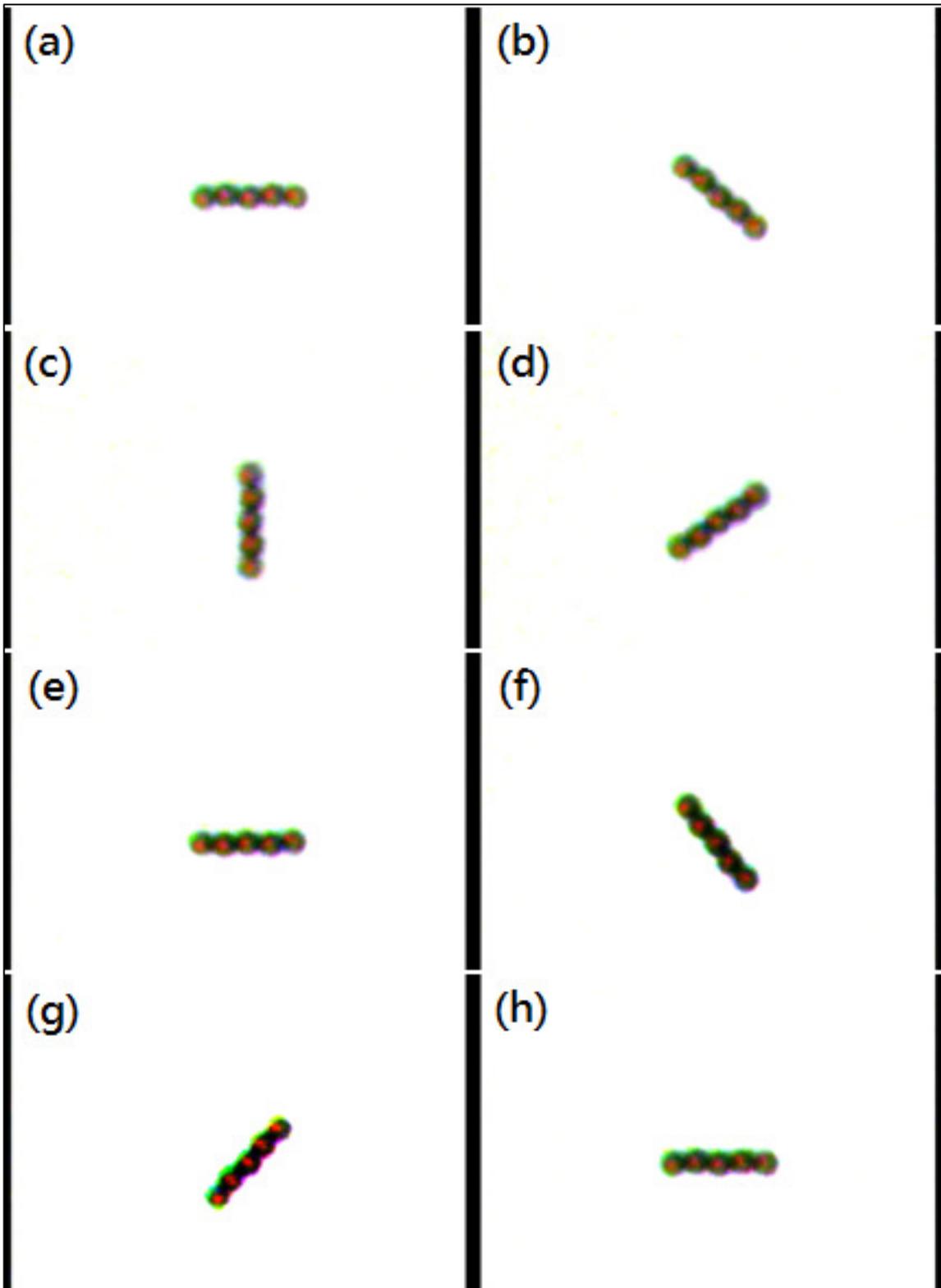


圖3-15 頻率 $f=1$ 之粒子旋轉運動

(a) $t=T$; (b) $t=T+5/30t$; (c) $t=T+9/30t$; (d) $T+13/30t$; (e) $T+16/30t$;
 (f) $T+21/30t$; (g) $T+27/30t$; (h) $T+13/30t$

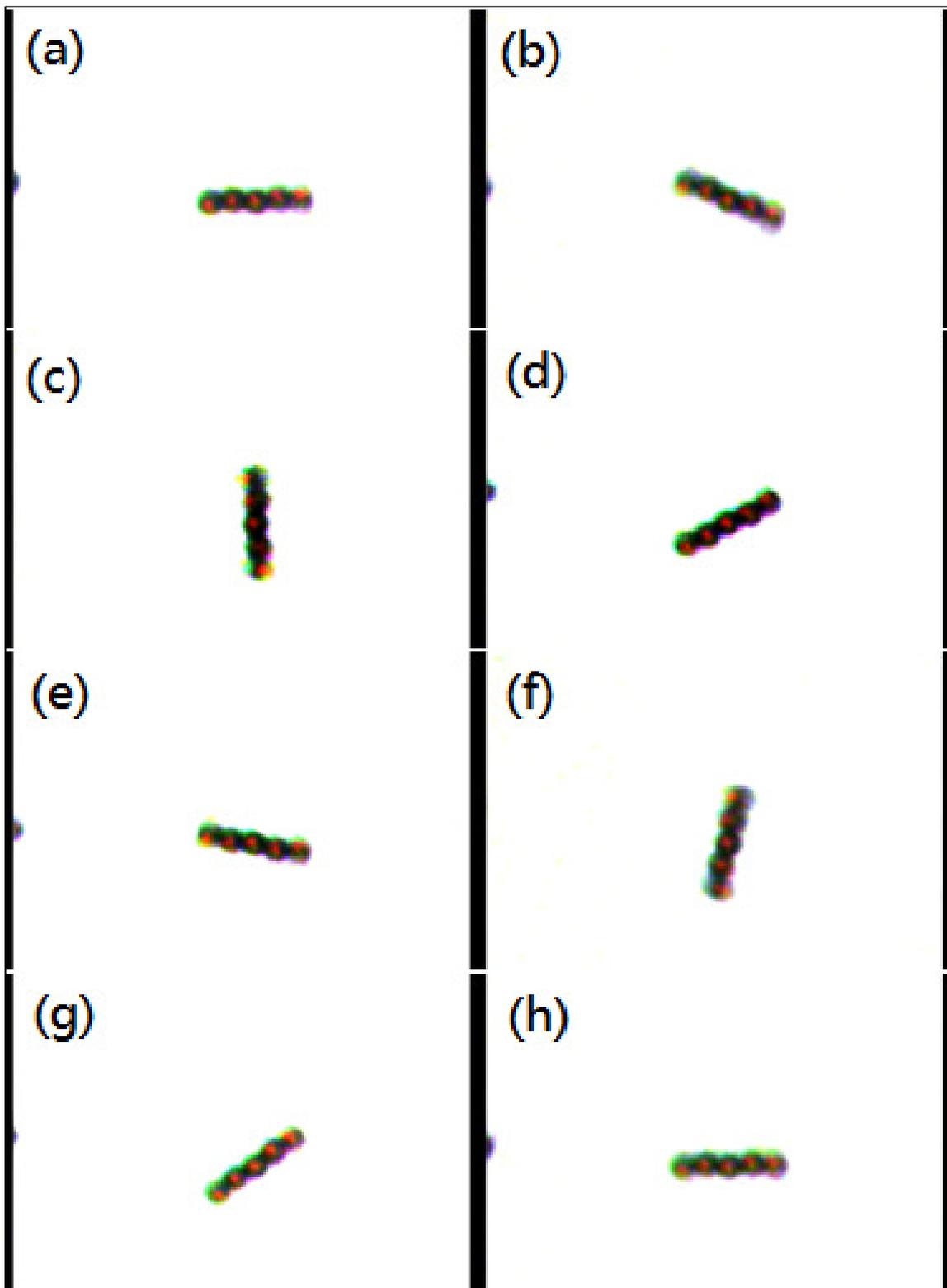


圖3-16 頻率 $f=2$ 之粒子旋轉運動

(a) $t=T$; (b) $t=T+1/30t$; (c) $t=T+4/30t$; (d) $T+7/30t$; (e) $T+10/30t$;
 (f) $T+12/30t$; (g) $T+14/30t$; (h) $T+16/30t$

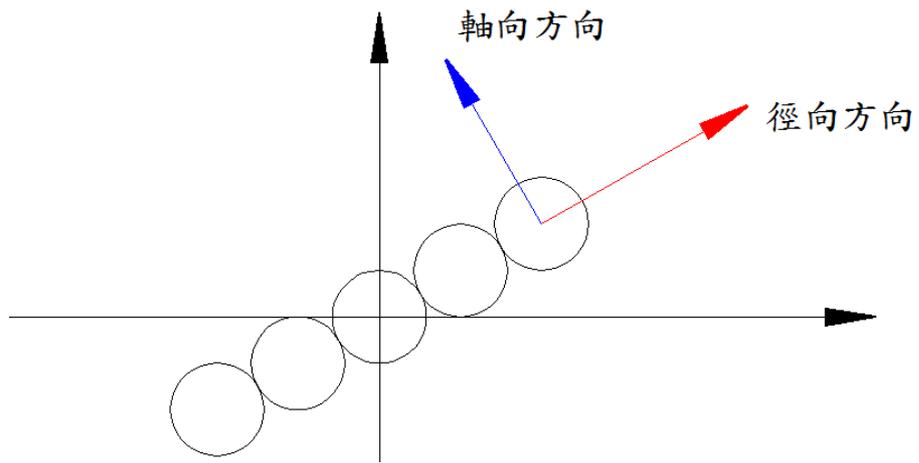


圖3-17 軸向方向和徑向方向

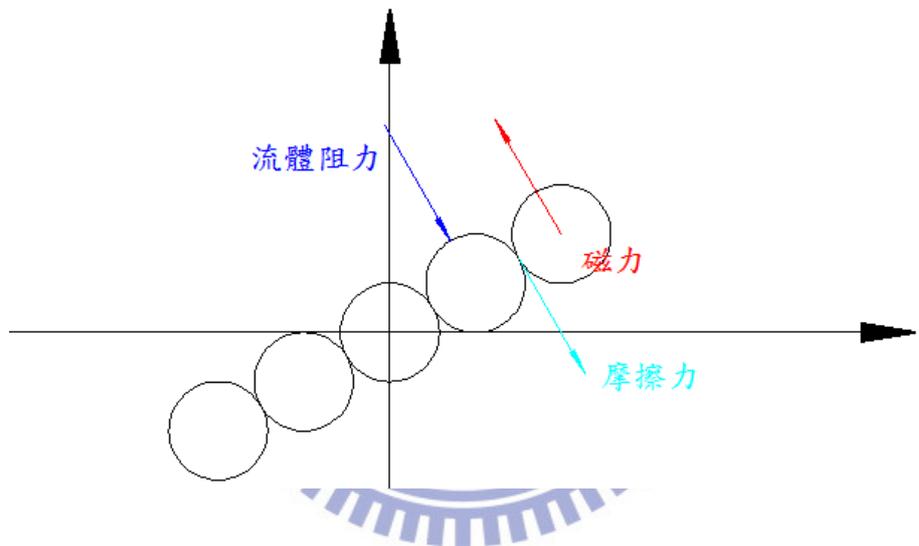


圖3-18 軸向方向受力情形

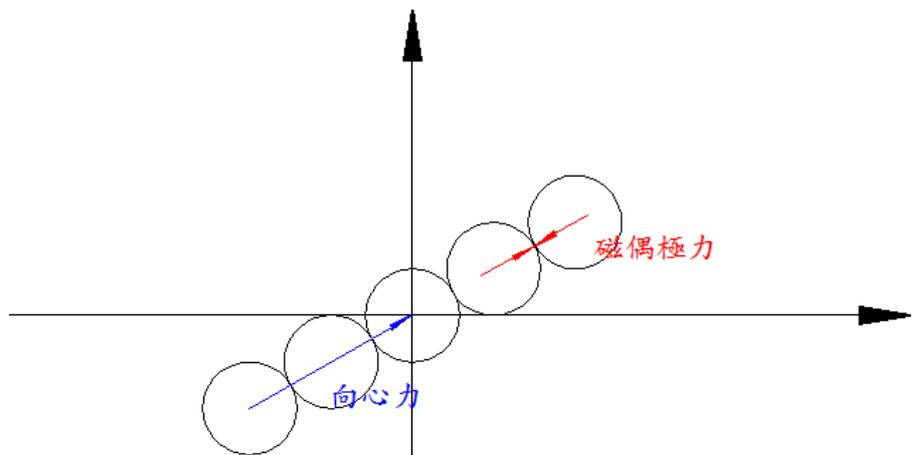
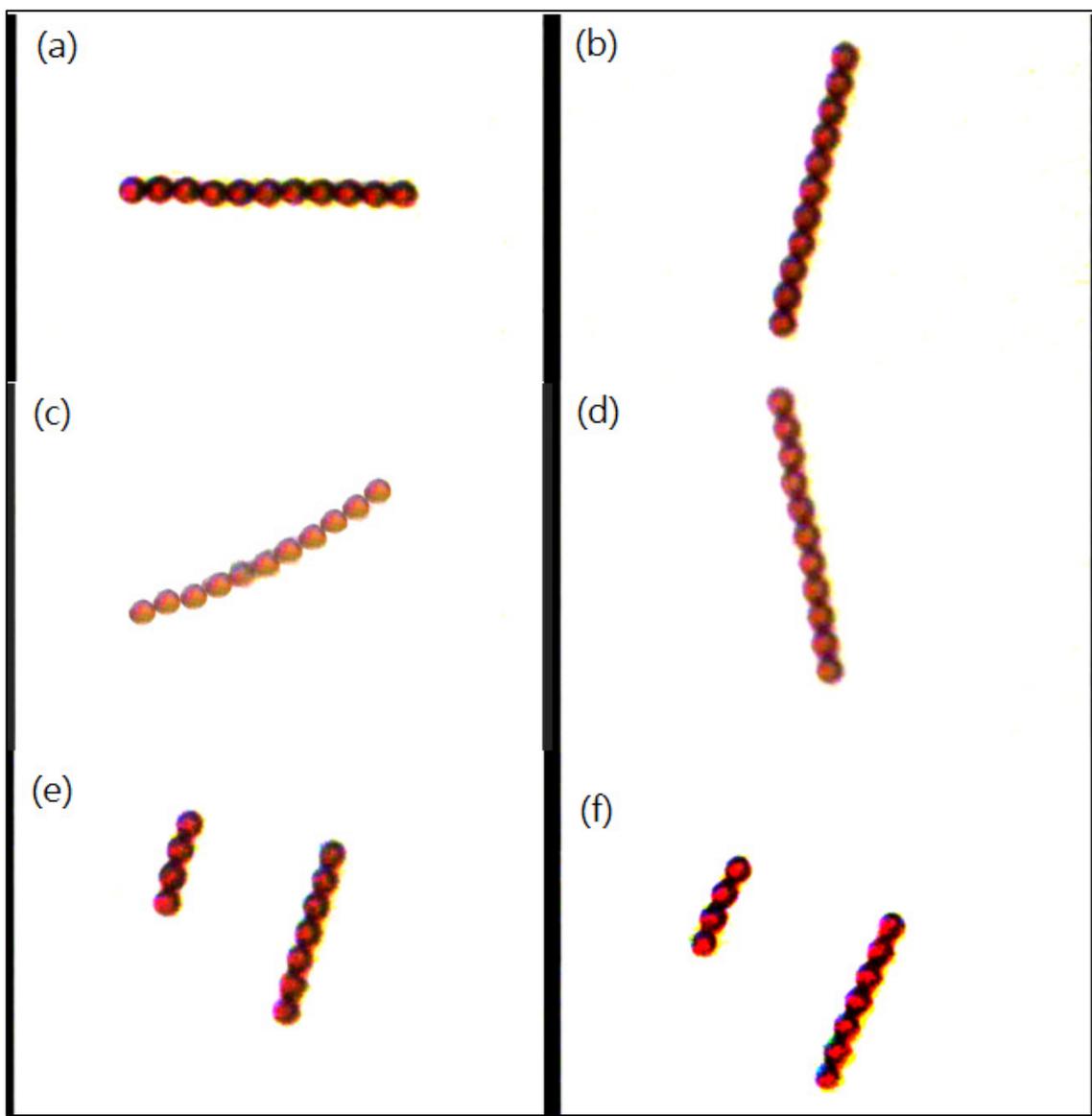


圖3-19 徑向方向受力情形

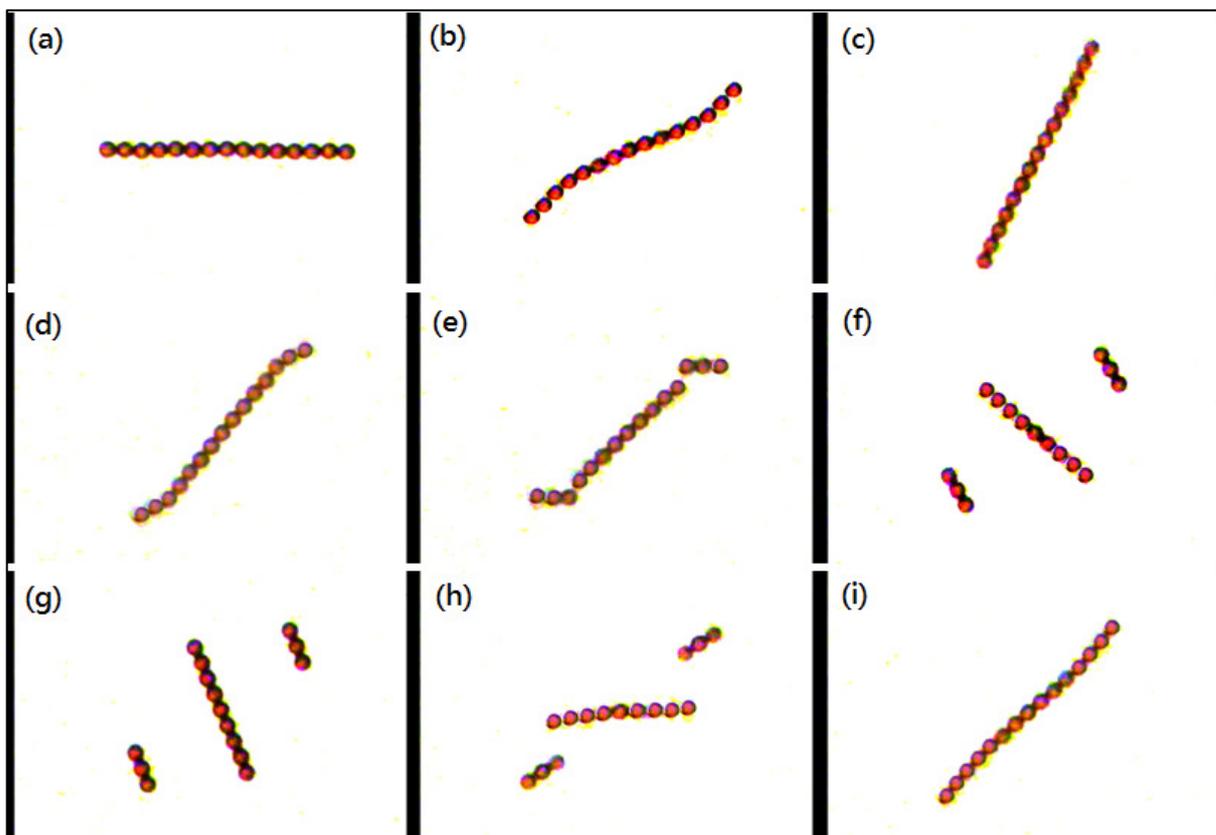


總顆數	11
斷裂角度	45.52度
擺動最大角度	76.60度
頻率	1Hz

圖3-20 11顆粒子串兩邊斷裂過程

(a) $t=T$; (b) $t=T+6/30t$; (c) $t=T+11/30t$; (d) $T+20/30t$;

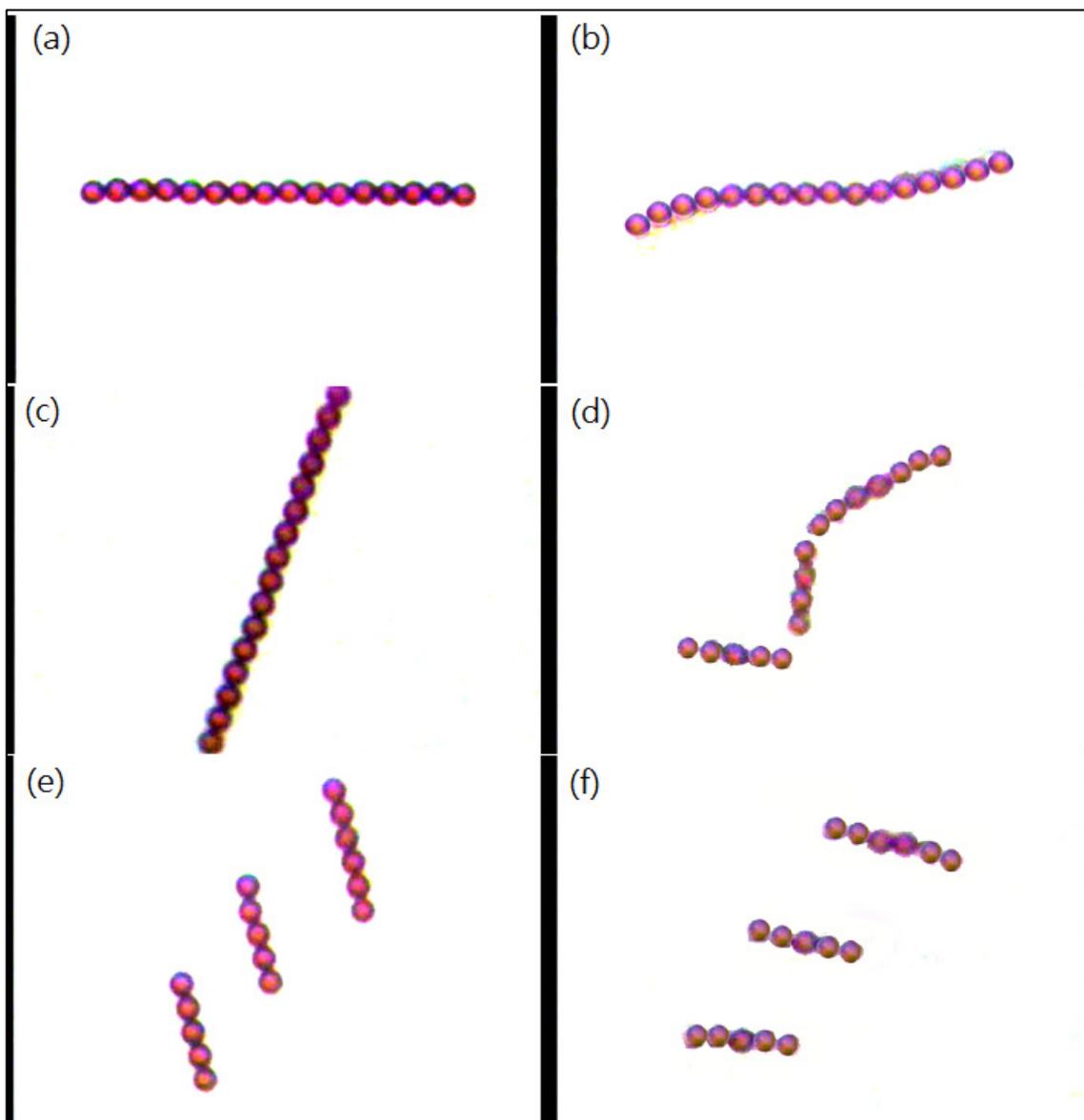
(e) $T+28/30t$; (f) $T+38/30t$



總顆數	15
斷裂角度	43.28度
擺動最大角度	69.23度
頻率	1Hz

圖3-21 15顆粒子串兩邊斷裂過程

(a) $t=T$; (b) $t=T+5/30t$; (c) $t=T+9/30t$; (d) $t= T+16/30t$; (e) $t=T+17/30t$;
 (f) $t=T+20/30t$; (g) $t= T+24/30t$; (h) $t=T+33/30t$; (i) $t=T+35/30t$

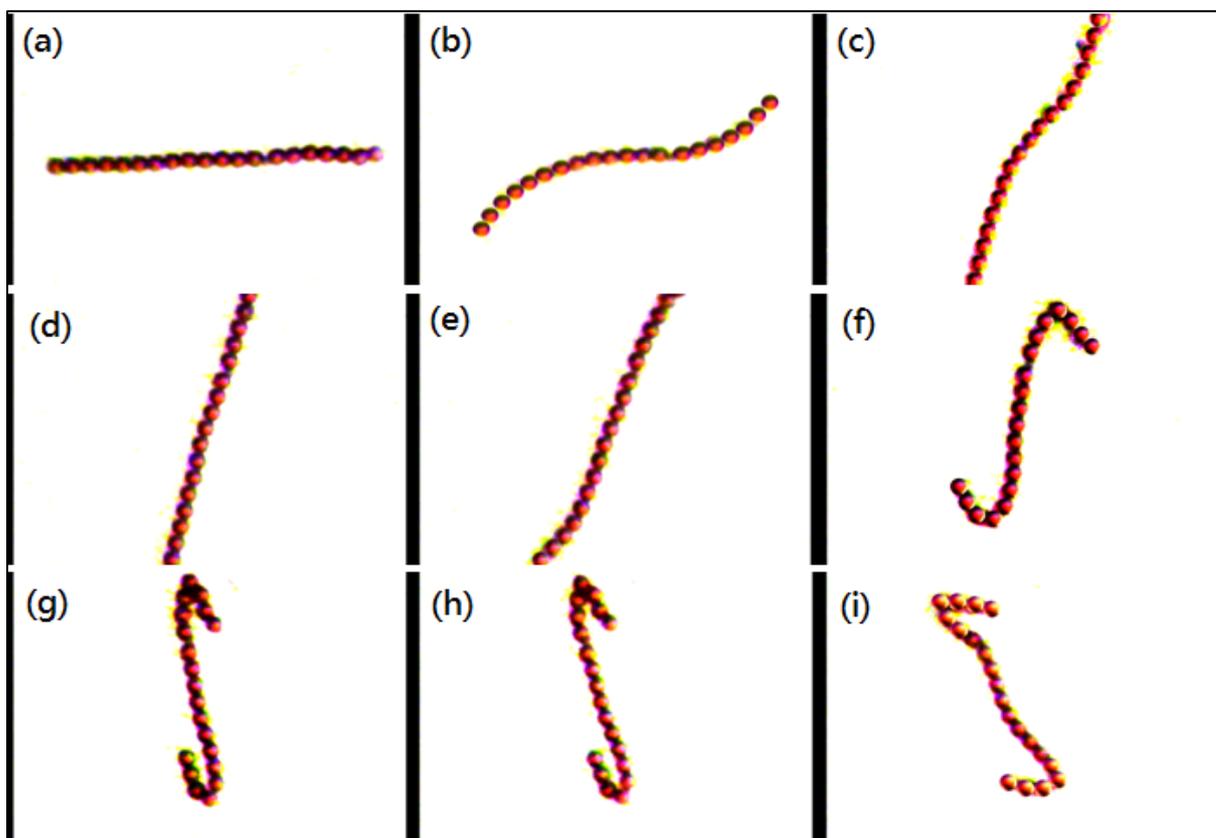


總顆數	16
斷裂角度	63.62度
擺動最大角度	72.94度
頻率	1Hz

圖3-22 16顆粒子串兩邊斷裂過程

(a) $t=T$; (b) $t=T+3/30t$; (c) $t=T+13/30t$; (d) $t= T+18/30t$; (e) $t=T+25/30t$;

(f) $t=T+32/30t$



總顆數	20
斷裂角度	69.42度
擺動最大角度	72.34度
頻率	1Hz

圖3-23 20顆粒子串兩邊斷裂過程

(a) $t=T$; (b) $t=T+4/30t$; (c) $t=T+8/30t$; (d) $t= T+12/30t$; (e) $t=T+16/30t$;
 (f) $t=T+20/30t$; (g) $t= T+24/30t$; (h) $t=T+28/30t$; (i) $t=T+49/30t$

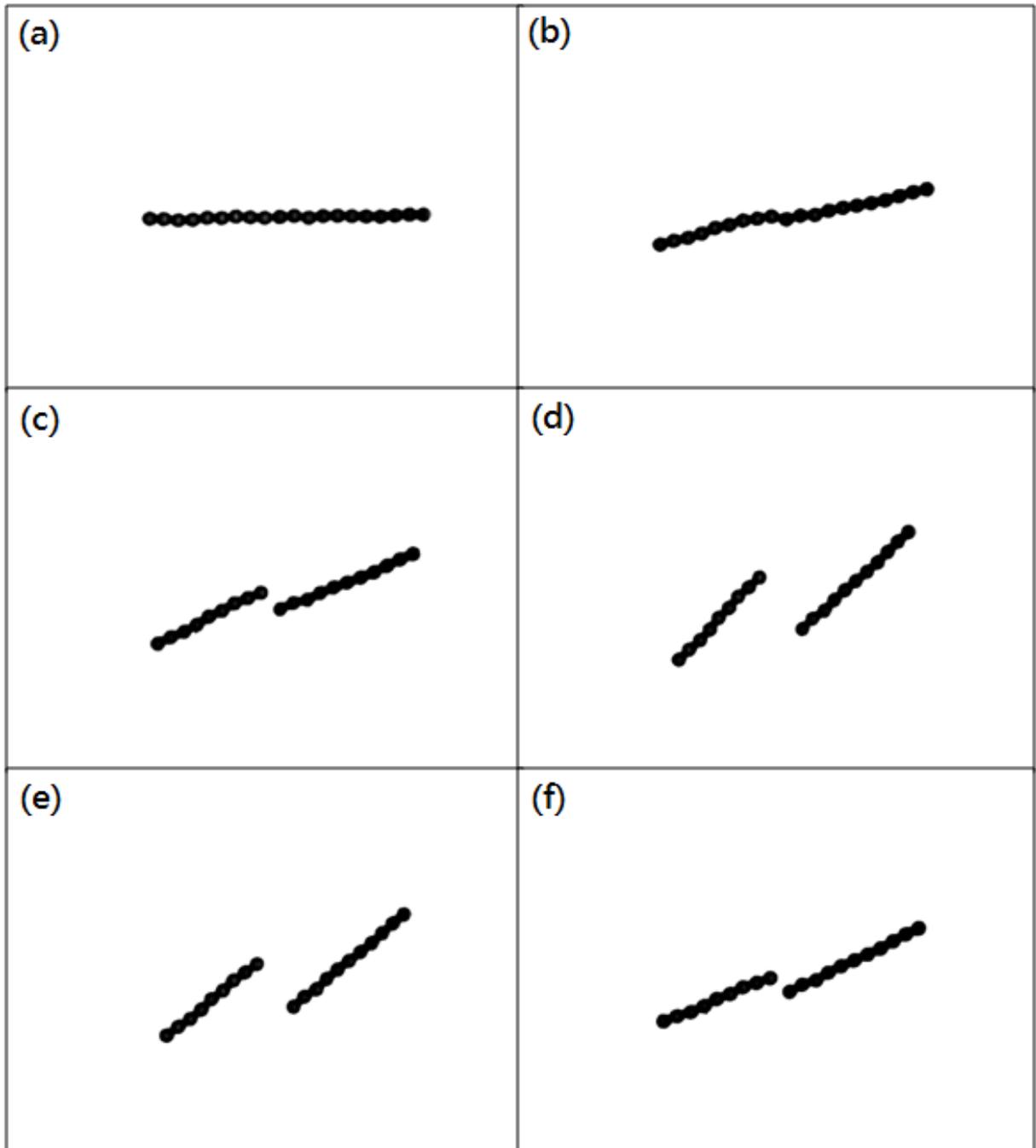


圖3-24 20顆粒子串中間分離過程

(a) $t=T$; (b) $t=T+26/200t$; (c) $t=T+35/200t$; (d) $t= T+50/200t$; (e) $t=T+86/200t$;
 (f) $t=T+100/200t$;

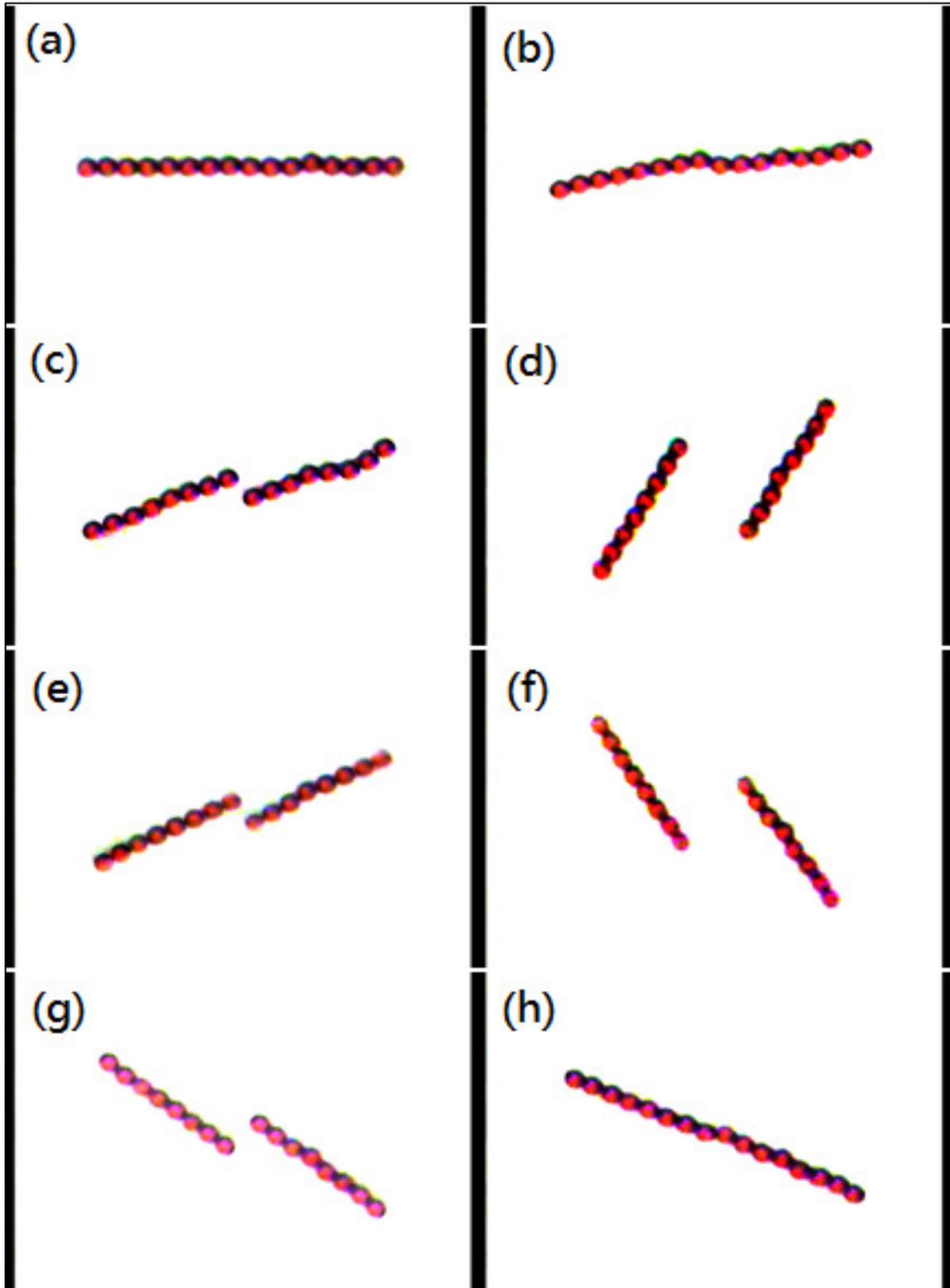


圖3-25 16顆粒子串中間分離過程

(a) $t=T$; (b) $t=T+3/30t$; (c) $t=T+4/30t$; (d) $t= T+7/30t$; (e) $t=T+16/30t$;
 (f) $t=T+22/30t$; (g) $t= T+30/30t$; (h) $t=T+31/30t$;

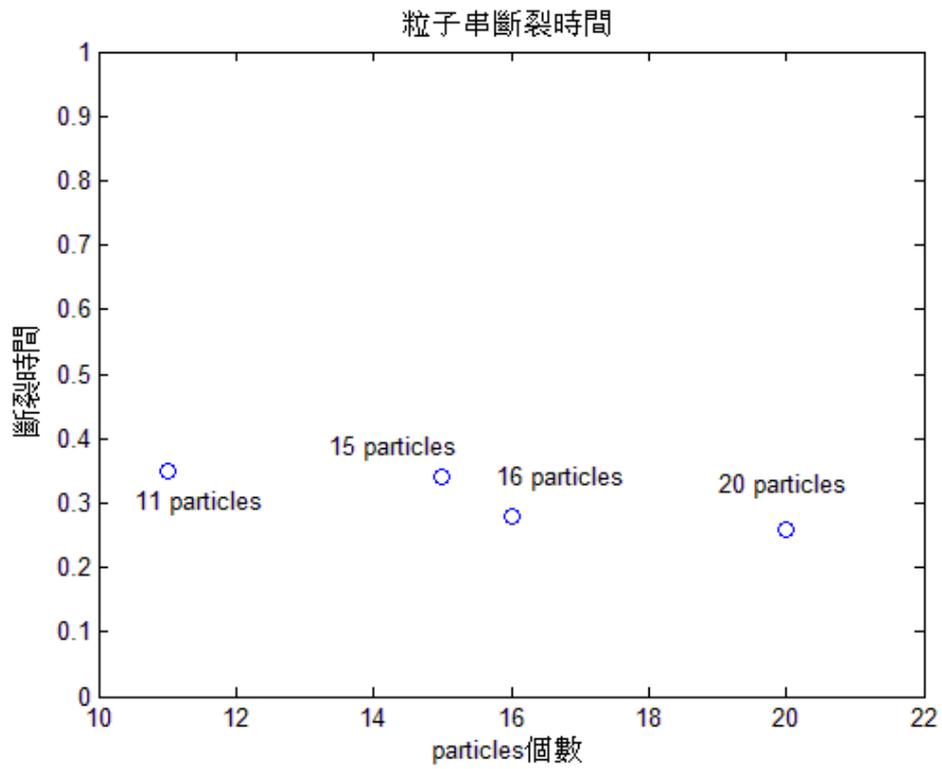


圖3-26 11、15、16、20顆粒子串斷裂時間記錄圖

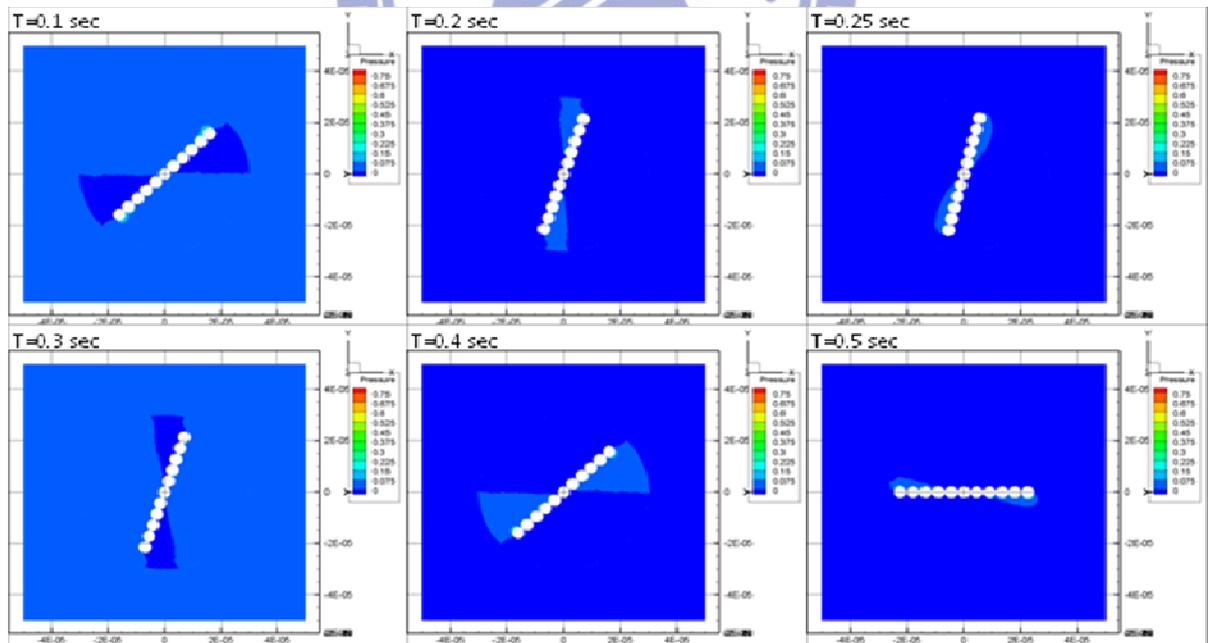


圖 3-27 三維 11 顆粒子串流場(Z=0)於時間 T=0.1 sec ~0.5 sec 之壓力分布圖

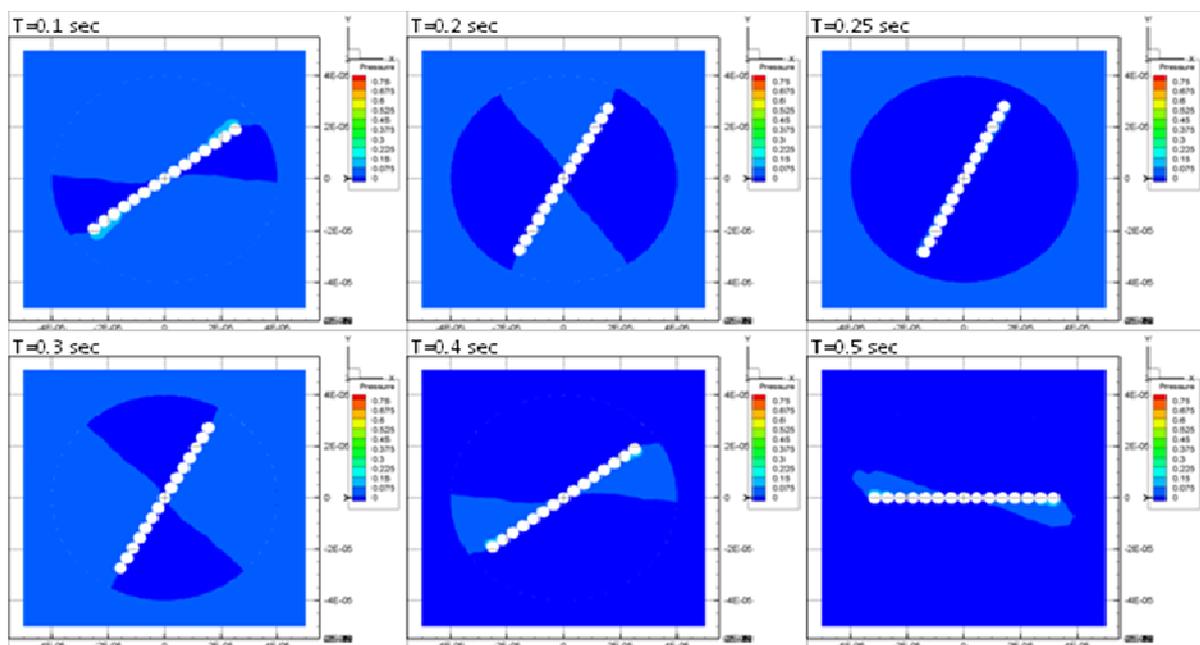


圖 3-28 三維 15 顆粒子串流場($Z=0$)於時間 $T=0.1 \text{ sec} \sim 0.5 \text{ sec}$ 之壓力分布圖

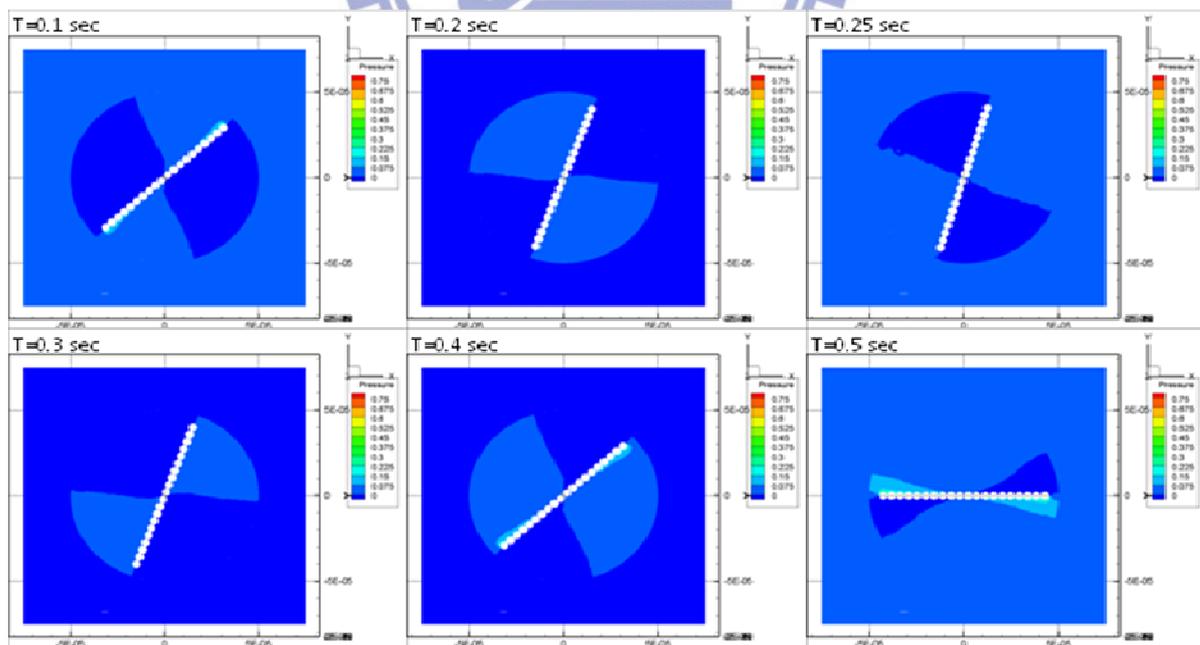


圖 3-29 三維 20 顆粒子串流場($Z=0$)於時間 $T=0.1 \text{ sec} \sim 0.5 \text{ sec}$ 之壓力分布圖

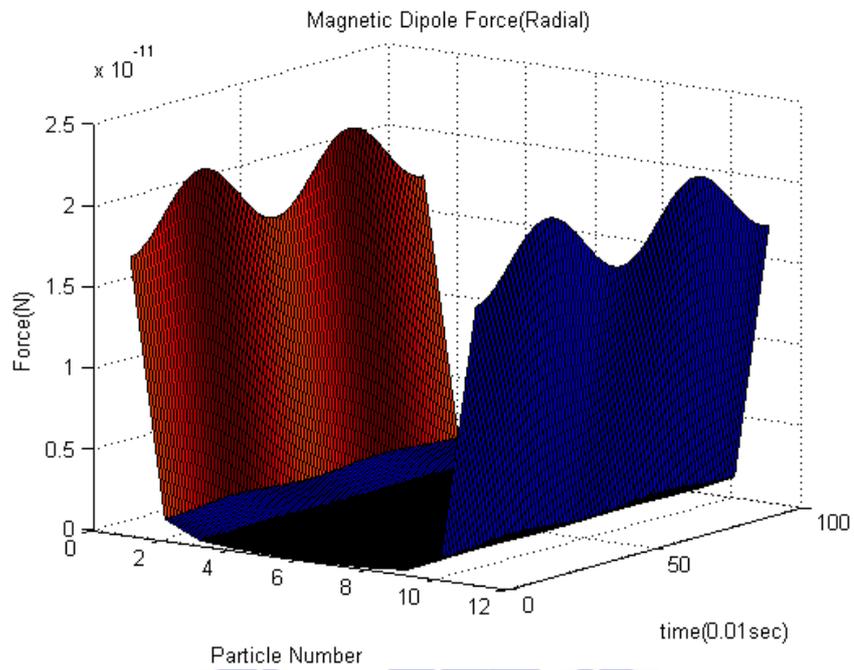


圖3-30 三維11顆粒子串所受之徑向磁偶極力(Y軸為時間軸)

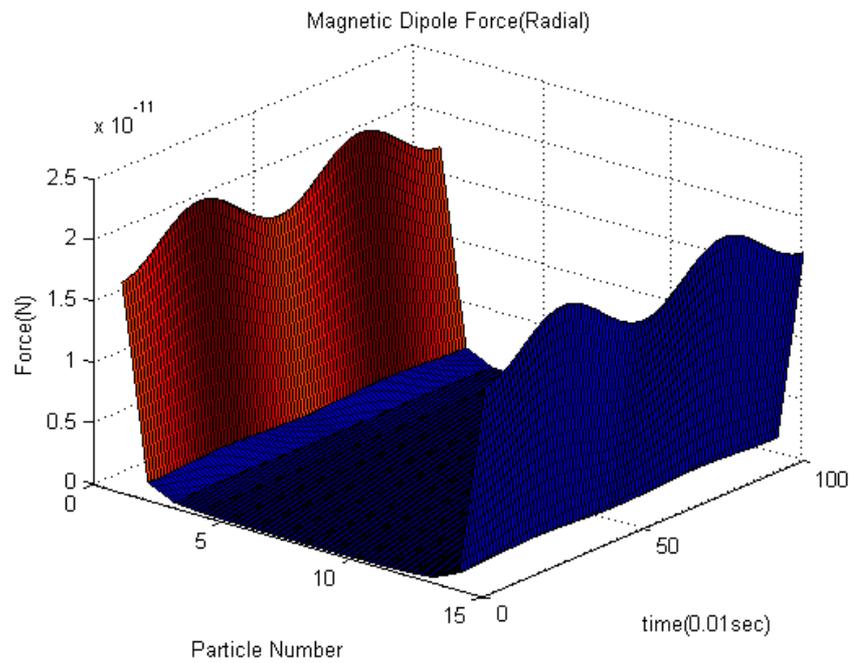


圖3-31 三維15顆粒子串所受之徑向磁偶極力(Y軸為時間軸)

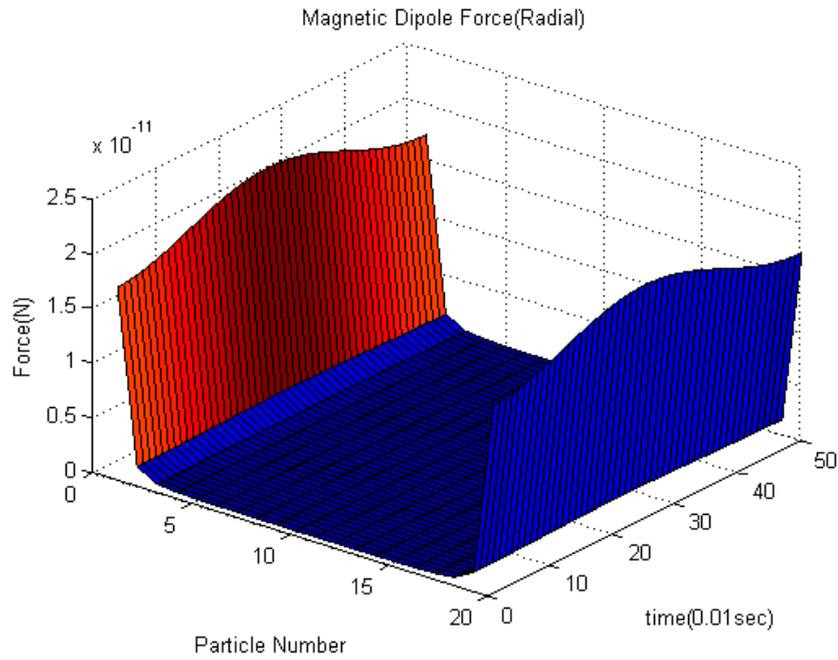


圖 3-32 三維 20 顆粒子串所受之徑向磁偶極力(Y 軸為時間軸)

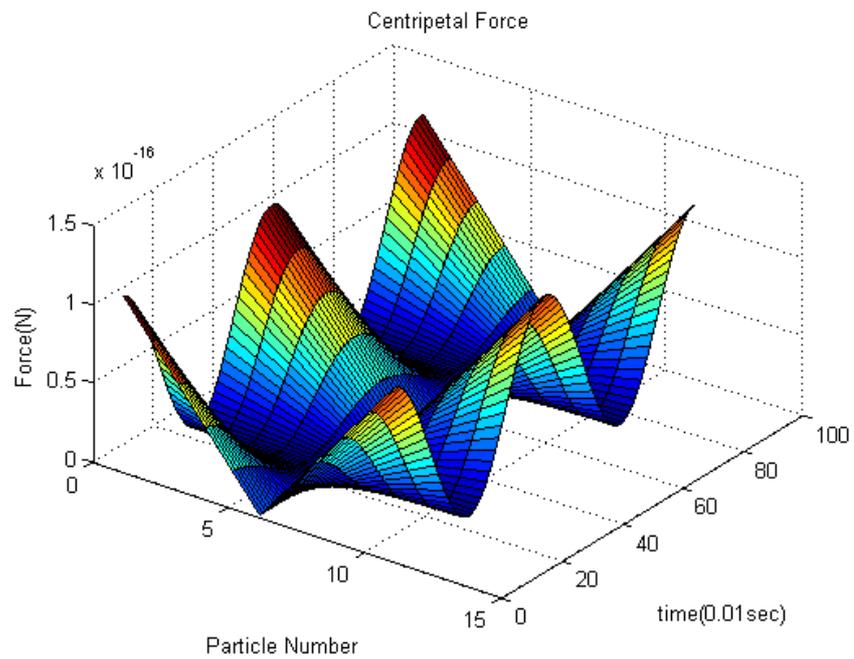


圖 3-33 三維 11 顆粒子串所受之向心力(Y 軸為時間軸)

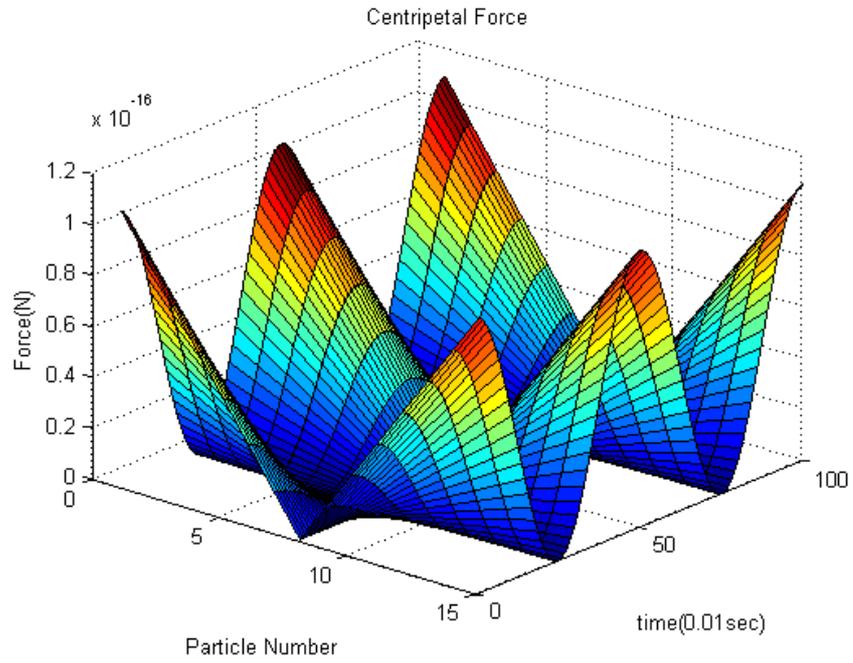


圖 3-34 三維 15 顆粒子串所受之向心力(Y 軸為時間軸)

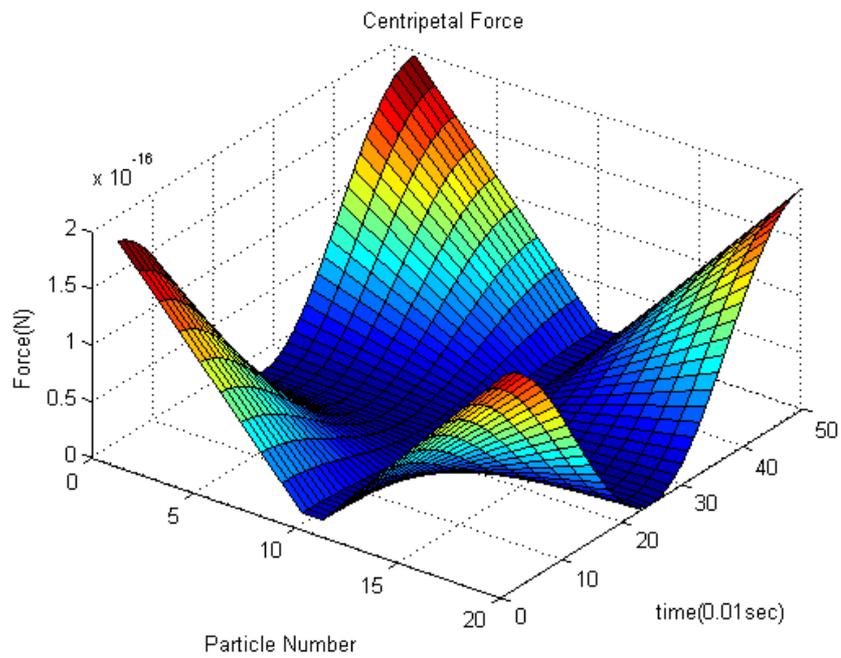


圖 3-35 三維 20 顆粒子串所受之向心力(Y 軸為時間軸)

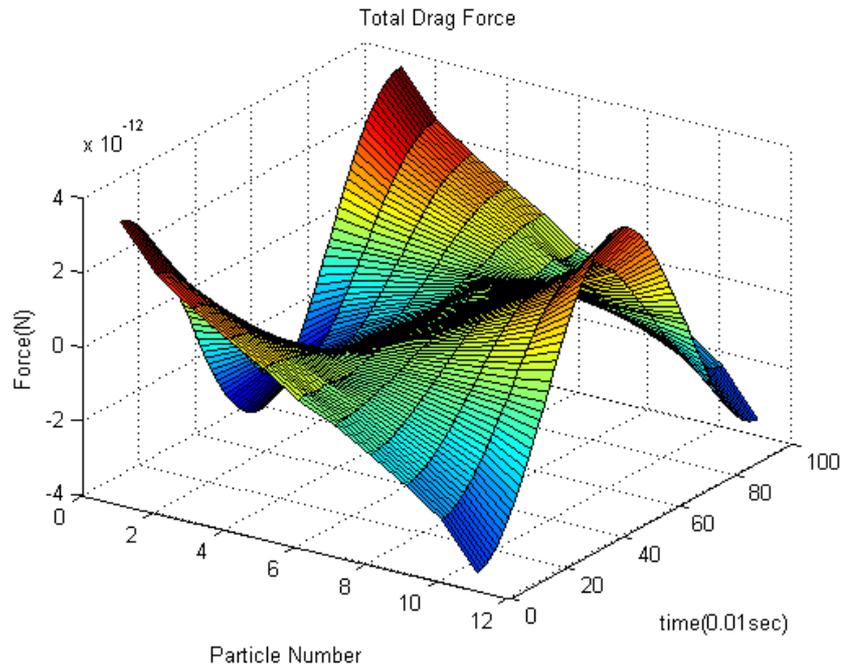


圖 3-36 三維 11 顆粒子串所受之流體阻力(Y 軸為時間軸)

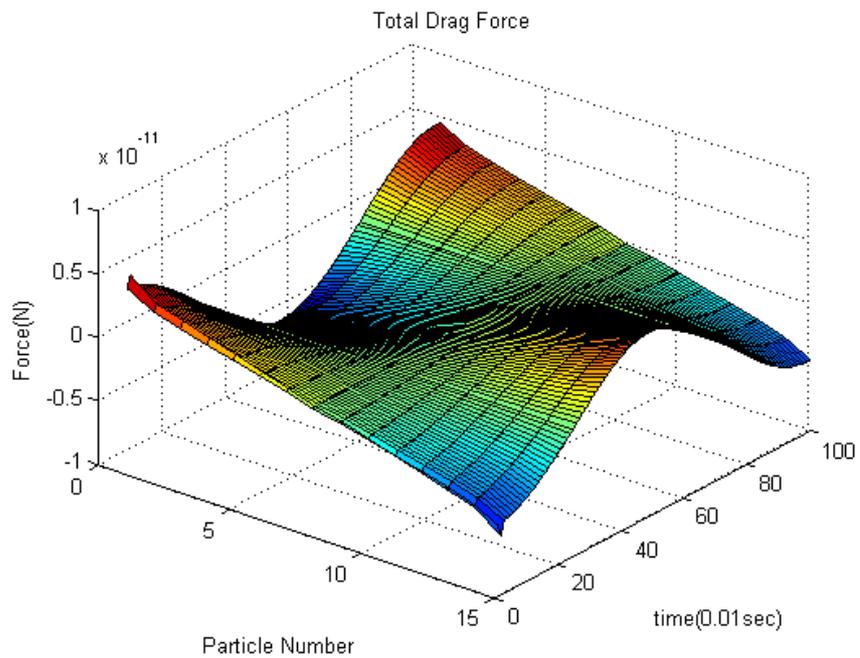


圖 3-37 三維 15 顆粒子串所受之流體阻力(Y 軸為時間軸)

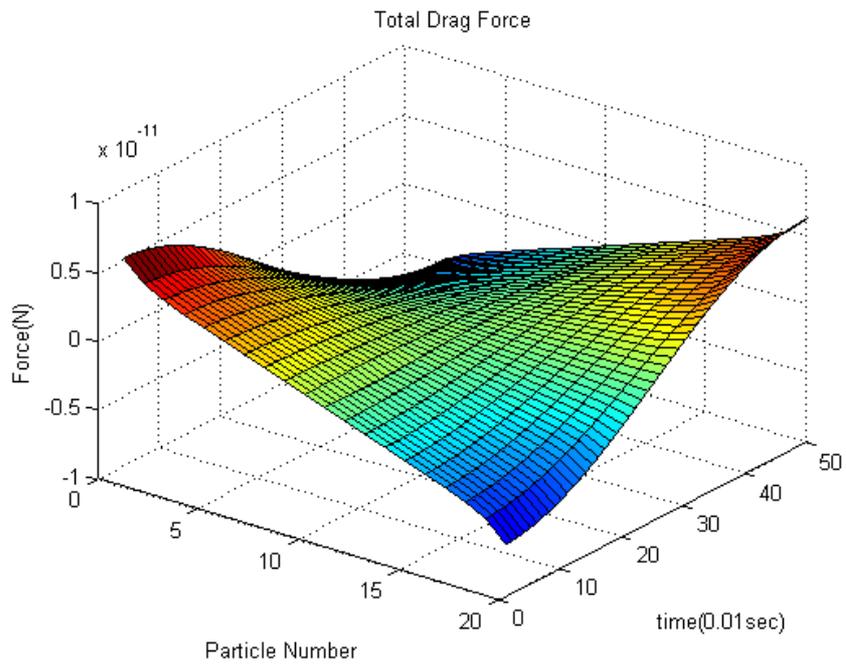


圖 3-38 三維 20 顆粒子串所受之流體阻力(Y 軸為時間軸)

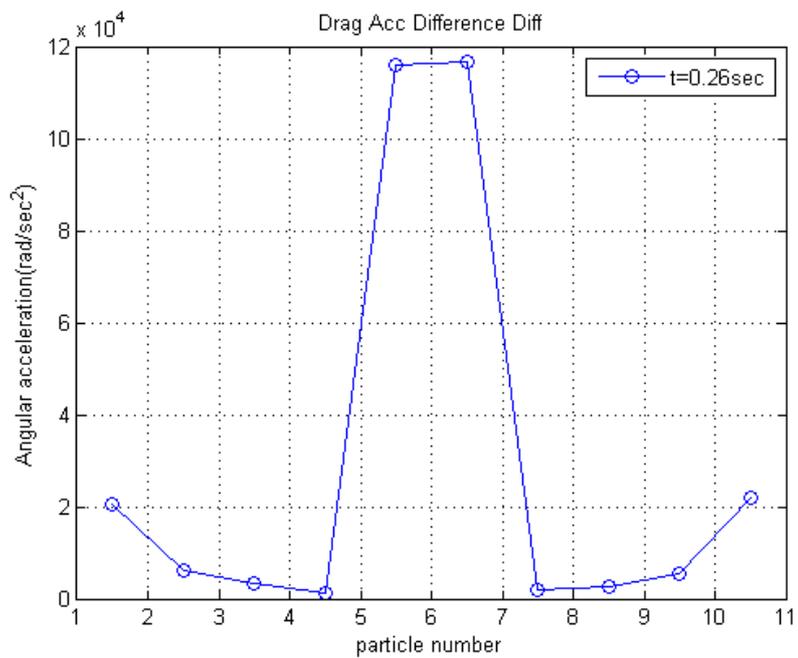


圖 3-39 三維 11 顆粒子串受到流體阻力相鄰粒子角速度差異圖

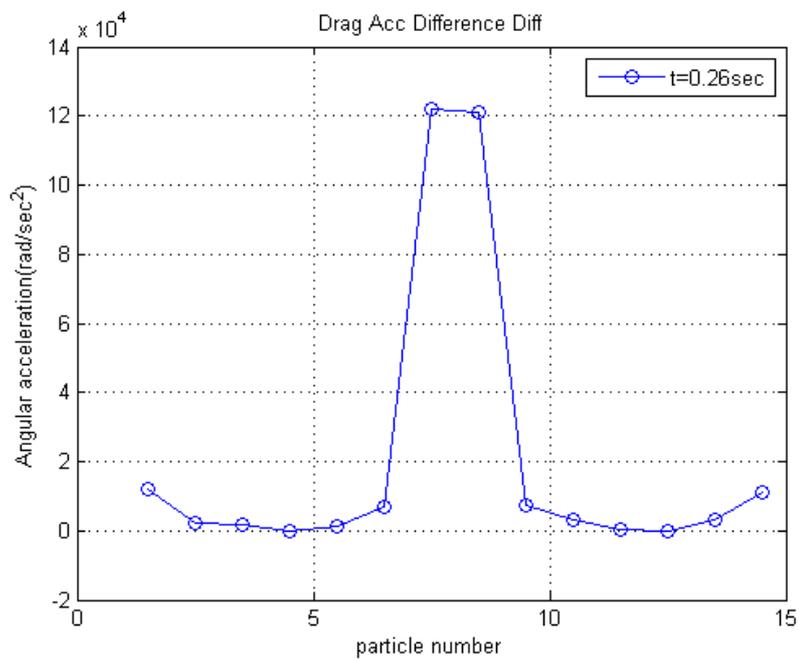


圖 3-40 三維 15 顆粒子串受到流體阻力相鄰粒子角速度差異

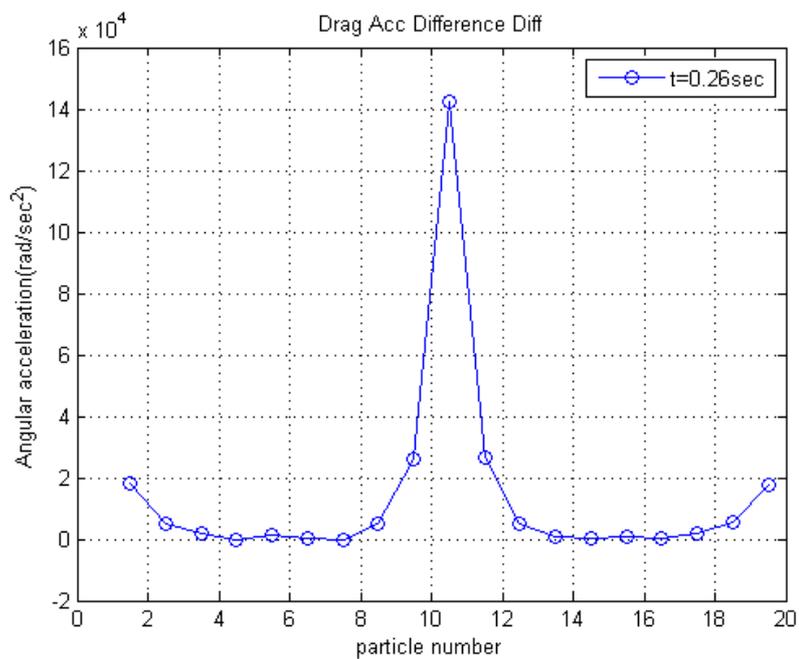


圖 3-41 三維 20 顆粒子串受到流體阻力相鄰粒子角速度差異

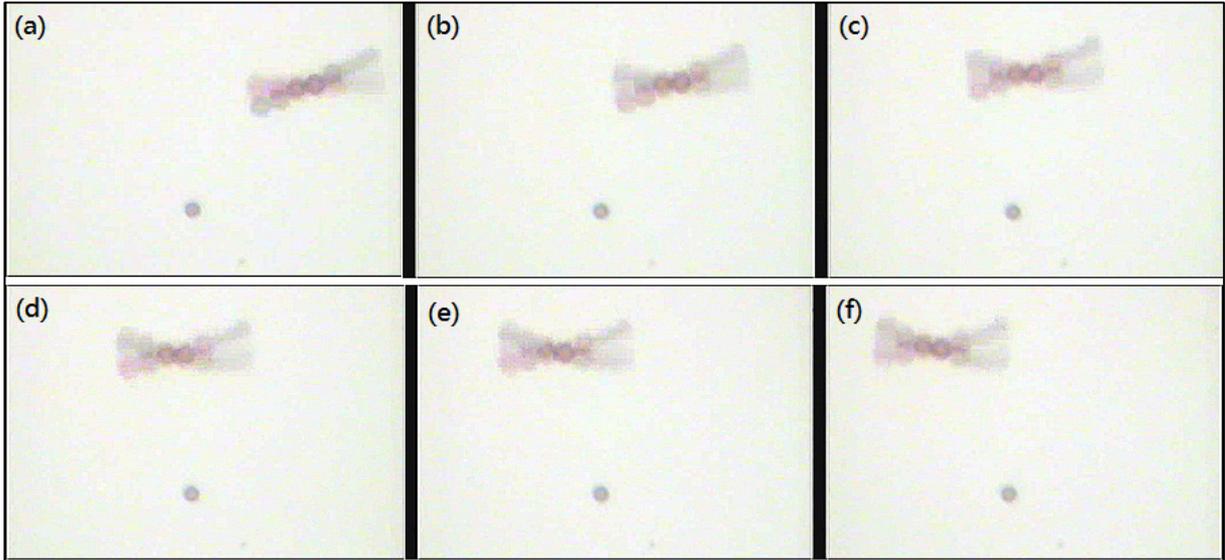


圖 3-42 大小顆粒子串接在擺動磁場中游動

(a) $t=T$; (b) $t=T+3(s)$; (c) $t=T+6(s)$; (d) $t= T+8(s)$; (e) $t=T+11(s)$;
 (f) $t=T+13(s)$;

	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10	t=11	t=12
X(μm)	2.44	2.05	4.35	2.56	3.28	3.97	2.11	3.16	2.91	4.50	2.58	2.20
St	17.60	20.96	9.868	16.75	13.09	10.81	20.33	13.58	14.72	9.523	16.60	19.52

表五 單位時間粒子串游動距離與 St 值

振幅	3.9 μm
頻率	11
平均速度	3.009 μm
平均 St	15.278

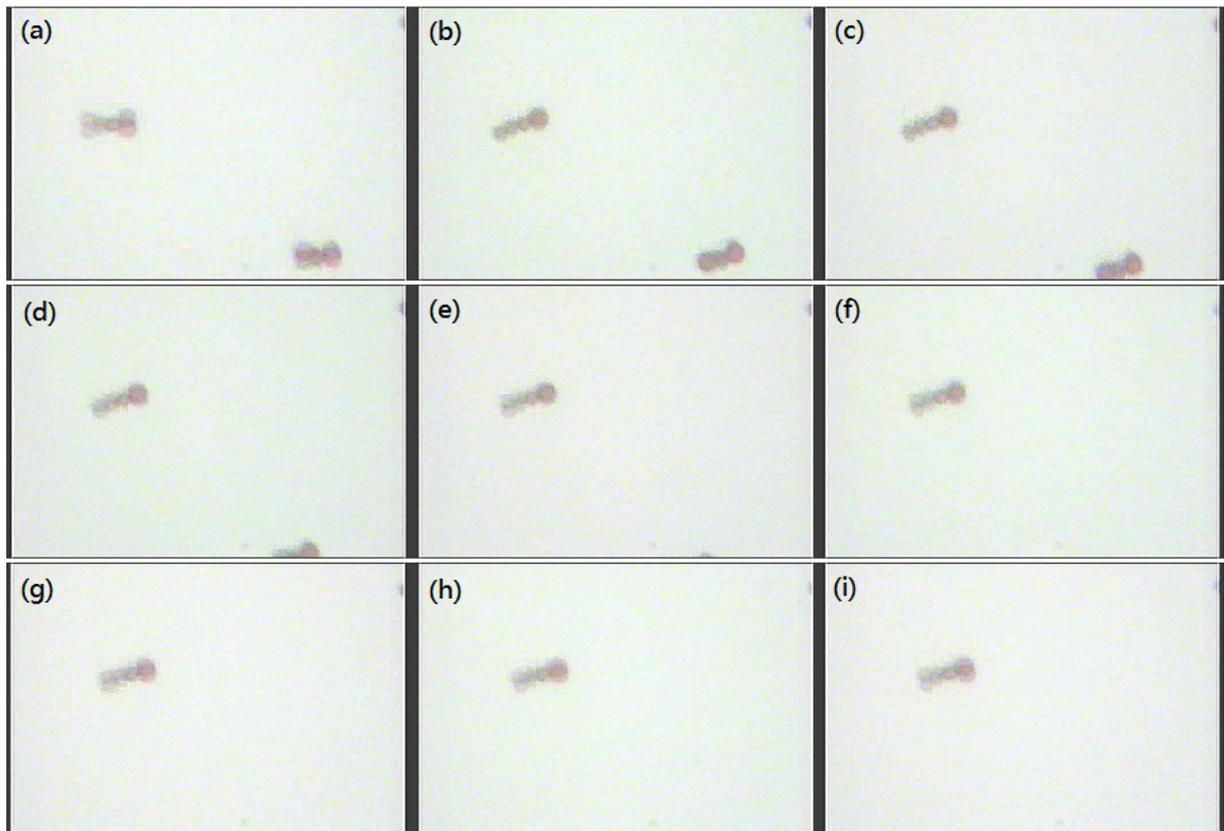


圖 3-43 粒子串在較小擺動振幅下游動

(a)t=0 ; (b)t=1(s) ; (c)t=2(s) ; (d) t= 3(s) ; (e) t=4(s) ; (f) t=5(s) ; (g) t=6(s) ;
(h) t=7 (s) ; (i) t=8(s)

	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9
X(μm)	2.86	2.40	1.09	0.34	1.29	1.00	0.48	3.14	1.06
St	22.01	26.28	57.56	183.32	48.79	62.84	131.80	20.05	59.35

表六 單位時間粒子串游動距離與 St 值(小振幅)

振幅	5.72 μm	平均速度	1.5171 μm
頻率	11	平均 St	68.00

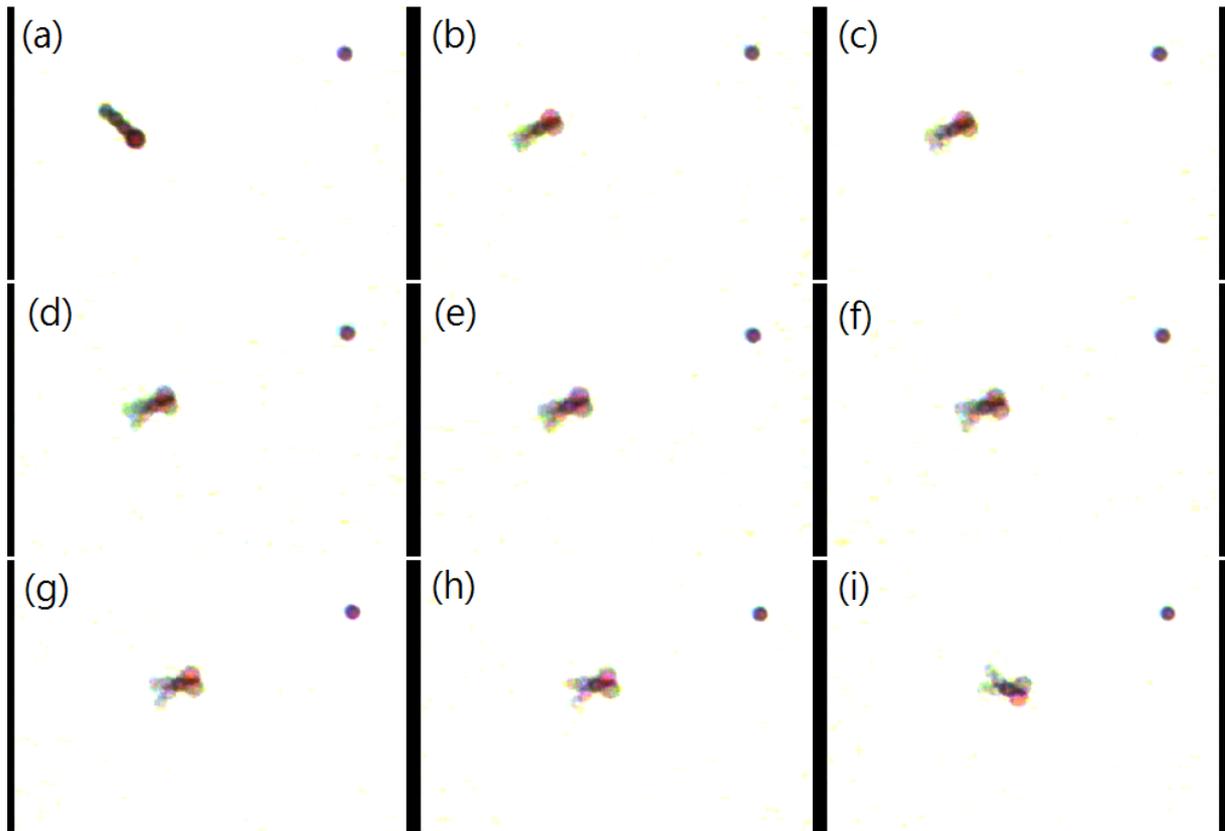


圖 3-44 粒子串在較大擺動振幅下游動

(a)t=0 ; (b)t=1(s) ; (c)t=2(s) ; (d) t= 3(s) ; (e) t=4(s) ; (f) t=5(s) ; (g) t=6(s) ;
 (h) t=7 (s) ; (i) t=7.5(s)

	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7
X(μm)	2.5722	3.702	4.4709	4.183	1.9658	1.3233	3.9147
St	33.6135	23.3552	19.3386	20.6696	43.9829	65.3376	22.0858

表七 單位時間粒子串游動距離與 St 值(大振幅)

振幅	7.86 μm	平均速度	3.1617 μm
頻率	11	平均 St	32.6262

参 考 文 献

- [1] Larson.R.G., "The Structure and Rheology of Complex Fluid. " New York : Oxford University Press ,1999.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetorheological_fluid
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrofluid>
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Electrorheological_fluid
- [5] Alice P. Gasta, b and Charles F. Zukoski, "Electrorheological fluids as colloidal suspensions." *Advances in Colloid and Interface Science Vol. 30*, Pages 153-202 ,1989.
- [6] Parthasarathy, M., and D. J. Klingenberg, "Electrorheology: Mechanisms and models" *Mater. Sci. Eng., R. 57*, 57-103,1996.
- [7] Rabinow, J., "he Magnetic Fluid Clutch" *Electric Engineering Vol.67*, pp.417-431, 1948.
- [8] Rabinow, J., "Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device" U. S. Patent 2,575,360 ,1951.
- [9] Shulman, Z.P., "Structure, Physical-properties and Dynamics of Magnetorheological Suspensions" *International Journal of Multiphase Flow 12*: 935 ,1986.
- [10] Block, H and J. P. Kelly, "Electro-rheology," *J. Phys. D. Appl. Phys. 21*, 1661 ,1988.
- [11] Lemaire E and Bossis G, "Yield stress and wall effects in magnetic colloidal suspensions" *J. Phys. D: Appl. Phys. 24* 1473-77,1991.
- [12] Shtarkman, E.M., "Rotating Shock Absorber Using MR Fluid" US Patent 5,167,850 ,1992.
- [13] J. D. Carlson and M. J. Chrzan, "Magnetorheological Fluid Dampers" U.S. Patent 5277282,1994.
- [14] <http://www.invitrogen.com>
- [15] Promislow, Joanne H. E.; Gast, Alice P.; Fermigier, Marc, "Aggregation kinetics of paramagnetic colloidal particles" *The Journal of Chemical Physics, Vol. 102*, Issue 13, April 1, 1995, pp.5492-5498 ,1995.
- [16] Sonia Melle, Gerald G. Fuller and Miguel A. Rubio, "Structure and dynamics of MR suspensions in rotating magnetic fields" XIIIth International Congress on Rheology, Cambridge, UK.2000 *Vol. 3* pag. 81 ,2000.

- [17] Sonia Melle, Oscar G. Caldero´n, Miguel A. Rubio, and Gerald G. Fuller, “Microstructure evolution in magnetorheological suspensions governed by Mason number” *Physical Review E* 68, 041503 ,2003.
- [18] lex Terray ,” Microfluidic Control Using Colloidal Devices”*Science* 7 June 2002: *Vol.* 296. no. 5574, pp. 1841 - 1844 ,2002.
- [19] Rémi Dreyfus, Jean Baudry, Marcus L. Roper, Marc Fermigier, Howard A. Stone and Jérôme Bibette,2005 ” Microscopic artificial swimmers” *Nature* 437, 862-865 ,6 October 2005)
- [20] Purcell, E. M., “Life at low Reynolds number.” *Am. J. Phys.* 45, 3–11 ,1977.
- [21] James E. Martin,” Theory of strong intrinsic mixing of particle suspensions in vortex magnetic fields” *Physical Review E* 79, 011503 ,2009.
- [22] S. Melle and J. E. Martin, *J. Chem. Phys.* 118, 9875,2003.

