

学術論文

磁化された針端に吸着した磁性流体液滴の交流磁場応答

Vibration Characteristics of Magnetic Fluid Droplet Adsorbed to Magnetized Needlepoint in Alternating Magnetic Field

猪股 聡太^{*1}, 須藤 誠一^{*1} (正員), 高奈 秀匡^{*2}, 西山 秀哉^{*2} (正員)

Sota INOMATA, Seiichi SUDO (Mem.), Hidemasa TAKANA, Hideya NISHIYAMA (Mem.)

The dynamic behavior of a magnetic fluid droplet adsorbed to magnetized needlepoint in alternating magnetic field was studied with a high speed video camera system. The directions of alternating magnetic field are parallel and opposite to static magnetic field of magnetized needlepoint. It was found that the surface of magnetic fluid droplet responds to the external magnetic field in elongation and contraction oscillation. The frequency of magnetic fluid droplet oscillation was exactly same of the external magnetic field. The oscillation of the magnetic fluid droplet adsorbed to magnetized needlepoint were revealed experimentally.

Keywords: magnetic fluid, micro fluid driving system, magnetohydrodynamics, frequency response.

1 緒言

表面張力により球形状となっている液滴の振動に関しては比較的古くから理論的, 実験的に研究がなされ, 液滴の変形や自由振動の固有振動数などがもめられている[1, 2]。平板上に置かれた液滴振動に関しても多くの研究がなされてきた[3-6]。さらに, 重力の作用下で平板や円管に液滴が付着した懸垂液滴の振動に関しても, 液体の表面張力の測定, アーク溶接における溶滴移行, 振動による液滴放出, 物質移動における化学反応などに関連して多くの研究がなされてきた[7-10]。しかしながら, 重力の作用下において細い針などに付着した液滴の振動に関しては, 重力の効果が液滴を形成する程度の液体量を針に付着することを妨げることから, ほとんど研究がなされていない。

一方, 宇宙開発技術に関連して, 水, 炭化水素, ジェステルなどの溶媒中に, マグネタイト, 鉄, コバルト, ニッケルなどの微粒子を高密度に分散させたコロイド溶液である磁性流体が開発された[11]。磁性流体は磁性と流動性を合わせ持つ流体であるため, 物理的, 工学的な観点から多くの研究が進められている。磁性流体は磁場を加えると磁化し, 磁石に吸い付けられる。そのため, 磁化された細い針先に磁性流体を吸着させ, 重力に打ち勝って液滴を形成することができる。

連絡先: 須藤 誠一, 〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4, 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科,

e-mail: sudo@akita-pu.ac.jp

^{*1} 秋田県立大学 ^{*2} 東北大学

磁性流体の液滴振動に関しても, これまで多くの研究がなされてきた。たとえば, 著者の一人は磁場の作用下で平板上に置かれた単一磁性液滴に変動加速度場を加えたときの磁性液滴の規則的な振動およびカオス的振動現象を報告した[12]。また, 混じり合わない液体中に浮遊する磁性液滴が交流磁場の作用を受けた場合の液滴変形応答についても報告した[13]。その他にも, 導電性ワイヤーに付着した磁性流体の液滴が, ワイヤーに電流を流すことにより発生する磁場によって変形する現象などが報告されている[14]。しかしながら, 細い針端に吸着した磁性流体の小さな液滴が外部交流磁場の作用を受けた場合の応答挙動については研究がなされていない。このような微小磁性流体液滴の外部交流磁場応答を調べることは, 磁性流体マイクロアクチュエータや磁性流体マイクロポンプなどのマイクロデバイスの開発に有効である[15]。

このような状況を鑑み, 本報は永久磁石によって磁化された細い針端に磁性流体を付着させ, 重力の作用下でも液滴を形成している針端 - 磁性液滴系を構成し, この磁性液滴が外部から交流磁場の作用を受ける場合の液滴形状の変形応答挙動を調べたものである。

2 試験磁性流体液滴

一般に, 針など細長物体に液滴を付着させた場合, 液体の付着力と液滴の重量との競合によって針に液滴が保持されるか, あるいは垂れ落ちるかが決定される。Fig. 1 は, 針先に付着させた水滴が丁度限界に達して垂れ落ちる瞬間を示す写真である (水滴体積は 6 μ l)。

磁性流体と磁化した針を使うことによって容易に針先端に液滴を保持できる。Fig. 1 は本報の実験で使用した 2 種類 (後述の Case1 および Case2) の針先端部分の写真を示している。

本報は、磁性流体と磁気力を使用して、重力下においてさえも細い針の先端に液滴を保持する系を提案するものである。基本的な原理を Fig. 2 に示す。液滴を付着させる針は磁性体材料であり、一端を永久磁石に接触させることによって容易に磁化する。本実験では、針の一端を永久磁石に吸着剤によって固定した。そのため、針の固定部分表面には磁石とは反対の極が発生し、針の開放端には、針と接する磁石の表面極と同極が発生する。したがって、針の開放端の生成する磁場 H によって磁性流体には式(1)[11]の磁気体積力 F_m が作用する。

$$F_m = -\nabla \left[\mu_0 \int_0^H \left(\frac{\partial M v}{\partial v} \right)_{H,T} dH \right] + \mu_0 M \nabla H \quad (1)$$

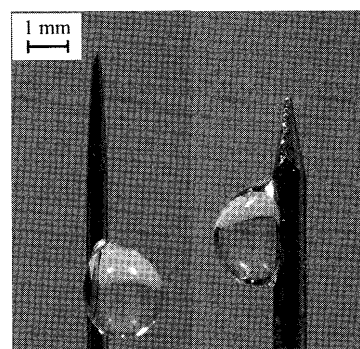
ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 M は磁性流体の磁化の強さ、 v は比体積 ($v = \rho^{-1}$: ρ は磁性流体の密度)、 T は温度である。磁性流体の液滴には式(2)によって記述される重力による力 F_g も作用する。

$$F_g = \rho V_m g \quad (2)$$

ここで、 V_m は磁性流体の体積、 g は重力加速度である。おおまかには、 $F_m > F_g$ の範囲で磁性流体の液滴は針端に吸着し、保持される。磁性流体の体積 V_m が大きくなり、 $F_g > F_m$ となった場合、磁性流体の液滴は針端から垂れ落ちることとなる。Fig. 3 は、実際に磁性流体の液滴が針端に保持されている状況を示す写真である。磁性流体の液滴は針端の生成する磁場の影響を強く受けて、上下方向に伸長した形状を示している。この液滴形状は、液滴に関するエネルギーの総和 U_T が最小値をとる形状として解釈される[11]。

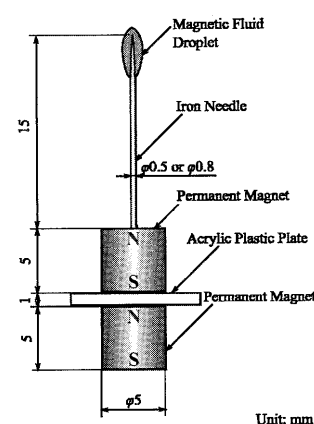
$$U_T = U_m + U_g + U_s \quad (3)$$

ここで、 U_m は磁気エネルギー、 U_g は重力エネルギー、 U_s は表面エネルギーである。本報では、さらに Fig. 2 で示すような液滴系が外部交流磁場の作用を受ける場合の応答挙動を調べた。そのため、磁性液滴は時間的に変動する磁場 $H(t)$ を受け、 U_m が時間的に変動する。 U_m の変動に伴って、 U_g および U_s が影響を受け、磁性液滴は形状振動を示すと考えられる。一般に、擬似的無重力場におかれた磁気機能性流体の液滴は 10 Hz を



(a) Case1 (b) Case2

Fig. 1 Photographs of two test needlepoints.



Unit: mm

Fig. 2 Proposed needle-magnetic fluid system.

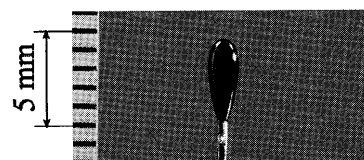


Fig. 3 Photograph of magnetic fluid droplet.

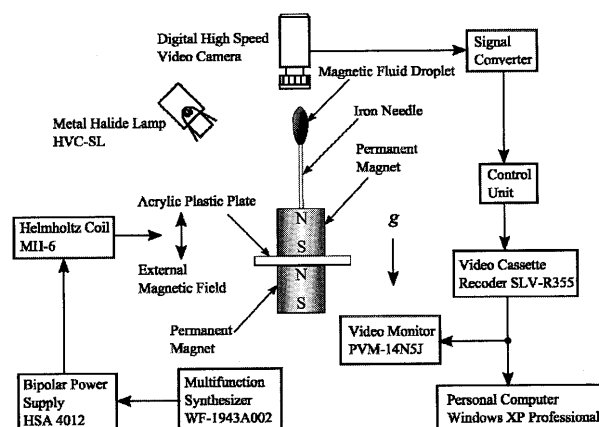


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus.

超える周波数で大きな振幅の形状振動は示さない[13]。本報で提案する微小磁性液滴が比較的高い周波数で形状応答を発現すれば、磁性流体マイクロデバイスとしての応用の可能性が大きく拓かれる。

3 実験装置および方法

前述した磁性流体液滴の交流磁場応答を調べる実験装置の概略図を Fig. 4 に示す。実験装置は磁石 - 針 - 磁性流体系、外部交流磁場発生装置系、光学的観察系、計測解析系から構成されている。磁石 - 針 - 磁性流体系は、Fig. 2 に示すように、外部交流磁場によって永久磁石が運動することを防ぐために、厚さ 1 mm のアクリル樹脂製平板を中間に挟んで 2 個の NdFeB 磁石を吸着状態としてある。磁石の表面磁束密度は $B = 440 \text{ mT}$ である。試料磁性流体はケロシンベース磁性流体（フェリコロイド HC-50）であり、その物性値を Table 1 に示す。所定の磁性流体量 V_m は精密マイクロピペットによって計量し、針端に吸着させ、液滴を形成した。実験において使用した針は太さの影響を調べるために 2 種類用いた。1 つは一定太さ部分の直径が 0.5 mm の縫い針(Case1), もう 1 つは一定太さ部分の直径が 0.8 mm の画鋲(Case2)を用いた(Fig. 1 参照)。したがって、針先端はティーパが付いて鋭角となっている。本実験において、永久磁石による縫い針先端での磁束密度は 11 mT, 画鋲先端での磁束密度は 42 mT であった。この Fig. 2 に示す試験磁性流体液滴系をヘルムホルツコイル(LakeShore MH-6, 内径 152.4 mm)の中心部に設置し、試験系に交流磁場を印加した。交流磁場は、周波数シンセサイザー(NF WF-1943A)によって信号を生成し、バイポーラ電源(NF HSA4012)によって増幅した後、コイルに電圧を印加し、磁場を生成した。印加電圧 E は式(4)のように正弦波で与えた。

$$E = \frac{E_0}{2} \sin(2\pi f_0 t) \quad (4)$$

ここで、 E_0 は印加電圧の全振幅、 f_0 は印加周波数、 t は時間である。本実験では E_0 を一定として周波数 f_0 を変化させ、磁性液滴の磁場応答を調べた。ヘルムホルツコイルに印加する電圧を一定として実験を行ったため、生成される磁場の強さは周波数によって変化する。本実験において印加した電圧振幅 $E_0 = 70 \text{ V}$ の場合の生成磁場の周波数特性を Fig. 5 に示す。Fig. 5 において B_0 はコイルによって生成された磁束密度振幅を示している。印加磁場の方向は永久磁石の磁極方向に並

Table 1 Physical properties of magnetic fluid.

Magnetic fluid	Ferricolloid HC-50
Density	1250 kg/m ³
Viscosity	9 mPa·s
Saturation magnetization	32 kA/m
Surface tension	0.0277 N/m

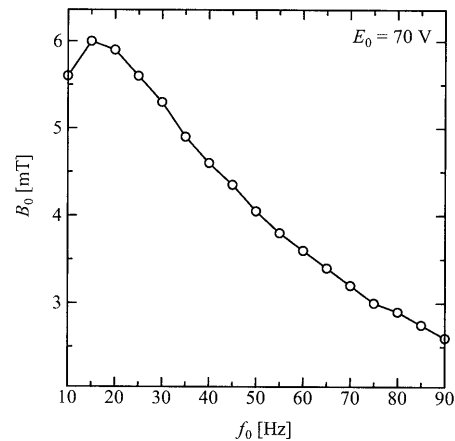


Fig. 5 Characteristics of magnetic field produced by Helmholtz coil.

行で、上下に反転する交流磁場である。磁性液滴の交流磁場による応答挙動は、Fig. 4 に示すように高速度ビデオカメラ(Photron FASTCAM-Ultima-SE)によって撮影録画し、録画画像はパーソナルコンピュータに取り込んで解析した。実験は、室内常温下で行ない、実験中の温度変化による磁性流体の磁気的特性の変化は無視できる範囲である。

4 実験結果および考察

4.1 静止磁性流体液滴の平衡形状

磁化した針および磁性流体を使用することによって針端に液滴を形成できることは Fig. 3 に示した通りである。この磁性液滴は式(3)の U_T が最小値をとるような形状が平衡状態である。一般に気液 2 相系の界面には表面張力が作用し、その釣合条件は、流体に運動がない場合、ラプラスの式(5)によって記述され、界面が曲率をもつと界面内外で圧力差 Δp が存在する。

$$\Delta p = p_m - p_a = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (5)$$

ここで、 p は圧力、 R_1 , R_2 は界面形状の主曲率半径であり、中心が液体側にあるとき正とする。また、添字

の m , a は各々液体, 気体の値を示す。Fig. 3 (液滴体積 $V_m = 6 \times 10^{-9} \text{ m}^3$) の写真によって, 磁性液滴は砲弾のような形状をしており, 液滴内の圧力は大気圧よりも高いことがわかる。しかも液滴各部の曲率半径が異なっていることから, 液滴界面の場所による圧力差も明らかである。液体が磁性流体の場合, 磁性流体界面に対して法線方向の磁化 M_n が作用し[11], 式(5)は式(6)のように書き改められる。

$$p_m - p_a = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \frac{1}{2} \mu_0 M_n^2 \quad (6)$$

この磁化項の効果は, 針の生成する磁場が磁性流体を引き寄せていることを意味している。さらに, 液滴が重力場にあることから z 軸に沿って $dp = \rho g dz$ の圧力勾配が存在するが, 本報では微小液滴であり, かつ磁性流体の液滴が磁場の作用によって針に吸着している状況から, この圧力勾配は無視して取り扱う。

4.2 Case1 における液滴の交流磁場応答

前述した Case1, すなわち比較的細い針端に吸着した磁性流体液滴の外部交流磁場応答を調べる。Fig. 6 は, 磁性流体の体積が $V_m = 4 \times 10^{-9} \text{ m}^3 (4 \mu\text{l})$ となっている液滴が, 周波数 $f_0 = 20 \text{ Hz}$ で磁場方向を上下に反転しながら振動する外部交流磁場内におかれた場合の応答挙動を時間経過順に並べた写真を示している。各フレーム間の時間間隔は $\delta_t = 5.1 \text{ ms}$ であり, Fig. 6 はおよそ 1 周期の液滴形状振動を示している。Fig. 6 のフレーム 1 から 5 に向って磁性液滴は上方に向って伸長している。また, フレーム 5 から 9 に向って磁性液滴は下方に収縮していることがわかる。この磁性液滴の形状振動を定量的に調べるために Fig. 7 に示すような座標系を設定し, 諸物理量を定義した。座標原点は液滴下部における針の中心軸上とし, 液滴上方に向って z 軸を設定した。また, 外部交流磁場の印加のない場合の液滴上端の位置を $z = \eta$ とし, その点からの液面変位 η_i (液滴上端の上下伸縮振動に対応), 静止状態の液滴下端の位置 $z = 0$ からの液滴下端変位 η_b を定義した。さらに, 所定の位置 z を 2 か所設定し, それらの点における液滴の直径を Fig. 7 に示すように定義した。Fig. 7 における b_u は液滴上方部分における直径 (水平方向の幅に対応, 特に上部で最大ふくらみを示す位置で計測した), b_l は下方部分における液滴直径 (おもに下部でふくらみを示す部分で計測した) を示している。所定

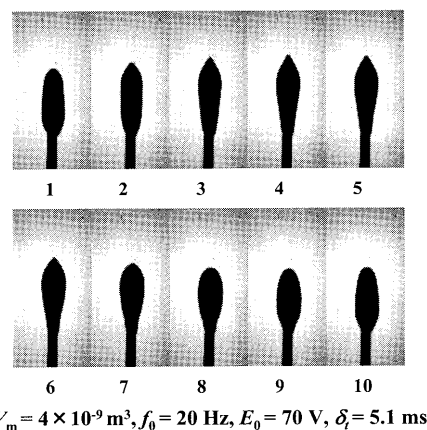


Fig. 6 Photographs showing dynamic response of magnetic fluid droplet in alternating field.

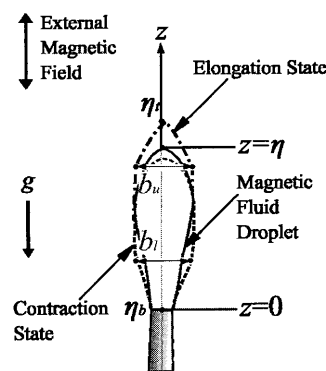


Fig. 7 Sketch of coordinate system and nomenclature.

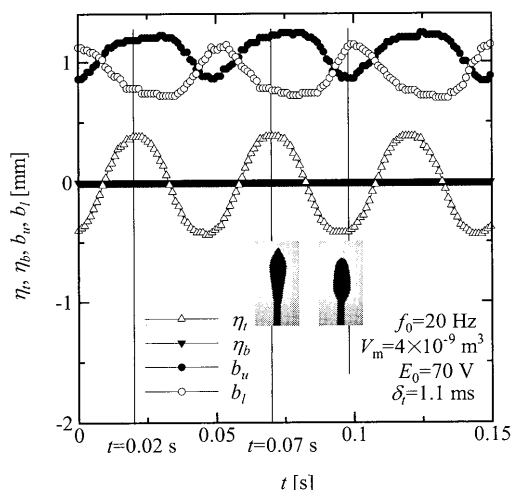


Fig. 8 Shape oscillation of magnetic fluid droplet in alternating magnetic field.

の位置 z は適宜変更したが, 通常は最大直径を与える位置あるいは変動が大きい z 位置を選択した。

解析結果の一例を Fig. 8 に示す。 η_i の 1 周期が 0.05 s である。すなわち, Fig. 8 における η_i の変動から液滴上

端は外部交流磁場の周波数と一致する周波数で上下運動していることがわかる。このような液滴の伸縮振動は、永久磁石によって針内部に生じた静磁場 H_0 と外部交流磁場の方向が同方向の場合に磁性液滴が伸長し、逆方向の場合に収縮するために誘起される。そのような状況を概略図で Fig. 9 に示す。Fig. 9 において、 H_0 は針内の静磁場であり、 H_f はヘルムホルツコイルに式

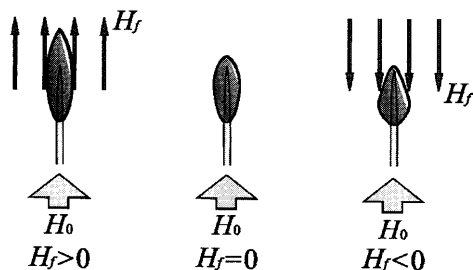
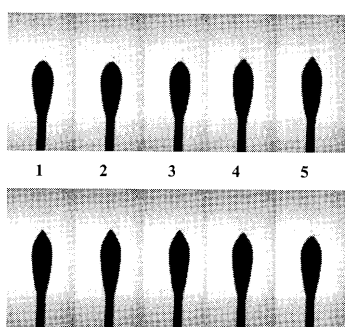
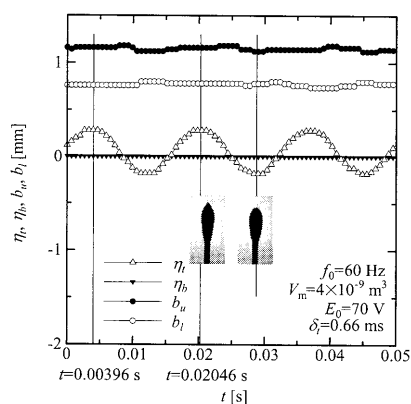


Fig. 9 Relation between droplet shape and external magnetic field.



$V_m = 4 \times 10^{-9} \text{ m}^3$, $f_0 = 60 \text{ Hz}$, $E_0 = 70 \text{ V}$, $\delta_i = 1.7 \text{ ms}$

(a) Photographs showing dynamic response of magnetic fluid droplet in alternating field.



(b) Shape oscillation of magnetic fluid droplet.

Fig. 10 Dynamic behavior of magnetic fluid droplet in alternating magnetic field.

(4)の電圧を印加することによって生成される磁場である。そのため、液滴上端の液面振動 η_t は近似的に式 (7) によって記述される。

$$\eta_t = \eta_0 \sin(2\pi f_0 t - \phi) \quad (7)$$

ここで、 η_0 は振動振幅、 ϕ は位相である。一方、液滴下端部は針に強く吸着し、Fig. 8 における η_b はほとんど変動を示さない。これは液滴の量が微量であり針の直径に比べて液膜厚さが薄く、液滴下端が伸長運動に至らないためと考えられる。Fig. 8 には $z = 4.0 \text{ mm}$ の位置における液滴の水平方向直径 b_u および $z = 1.0 \text{ mm}$ の位置における直径 b_l の変動も示されている。Fig. 8 から b_u と b_l は丁度逆位相で振動していることが明らかである。すなわち、液滴伸長時には磁性液滴全体が上部に持ち上げられ、収縮時には液滴全体が下方に押し下げられている。

このような磁性流体液滴の交流磁場応答を周波数を変えて調べた。交流磁場の周波数が $f_0 = 60 \text{ Hz}$ の場合を Fig. 10 に示す。Fig. 10(a) は磁性液滴の形状振動を示す写真、Fig. 10(b) は液滴上端の液面変位 η_t 、下端変位 η_b 、液滴上部直径 b_u ($z = 4.0 \text{ mm}$)、および液滴下部直径 b_l ($z = 1.0 \text{ mm}$) の時間変化を示している。周波数が $f_0 = 60 \text{ Hz}$ においても磁性液滴は形状振動を示すことが明らかである。ただし、Fig. 8 と Fig. 10(b) を比較すると、周波数が高い場合には振動振幅が小さくなることが明らかである。鋭角に伸長している部分の体積の割合は液滴全体の体積の 3 % であることから η_t の振幅に対して b_u や b_l がほとんど変動しないことがわかる。また、Fig. 10(a) の写真を見ると、液滴伸長時の上部先端は鋭角を形成しているため、液滴内部の圧力変動は周波数が高い場合 ($f_0 = 60 \text{ Hz}$) でも低周波数 ($f_0 = 20 \text{ Hz}$) の場合と同程度と考えられる。すなわち、本報で提案する磁化針 - 磁性流体液滴システムは比較的高振動数においても応答機能を果たすと考えられる。

4.3 Case2 における液滴の交流磁場応答

前述した Case2, すなわち比較的太い針端に吸着した磁性液滴の外部交流磁場応答を調べる。針の直径が大きい場合、針端における磁束密度が高く $B = 42 \text{ mT}$ である。そのため針端に保持できる磁性流体量を大きくとることができる。Fig. 11 は外部交流磁場の印加のない時の静止状態の磁性流体液滴を示している。針端に吸着した磁性流体の体積は $V_m = 10 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ である。そのため液滴上端部に磁性流体界面不安定性によるチ

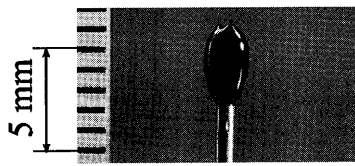


Fig. 11 Photograph of magnetic fluid droplet maintained at needlepoint ($V_m = 10 \times 10^{-9} \text{ m}^3$).

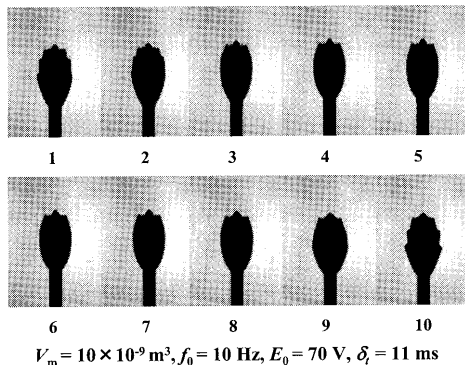


Fig. 12 Photographs showing dynamic response of magnetic fluid droplet in alternating field at $f_0 = 10 \text{ Hz}$.

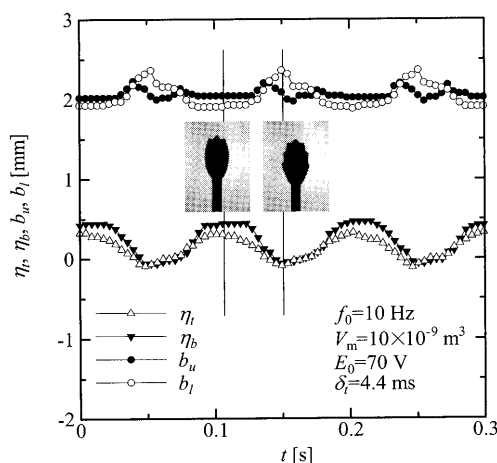


Fig. 13 Shape oscillation of magnetic fluid droplet in alternating magnetic field at $f_0 = 10 \text{ Hz}$.

ューリップのような界面突起が観察される。これは、磁性流体の界面に対して法線方向の磁場が作用し、磁性流体の磁化が臨界値を超えた場合に生ずる Rosensweig 不安定性である。このような磁化針 - 磁性流体液滴系にヘルムホルツコイルを使用して交流磁場を印加した。Fig. 12 は磁性流体液滴体積 $V_m = 10 \times 10^{-9} \text{ m}^3 (10 \mu\text{l})$ 、交流磁場周波数 $f_0 = 10 \text{ Hz}$ の場合の磁性液滴の応答挙動を示す時間経過順に並べた一連の写真である。各フレーム間の時間間隔は $\delta_t = 11 \text{ ms}$ となっており、液滴振動のほぼ 1 周期を示している。フレーム 1 から

5 に向って液滴は伸長し、フレーム 6 から 10 に向って液滴は収縮している。すなわち、交流磁場に対する基本的な応答は Case1 とほぼ同様である。しかしながら、液滴の収縮時において同心円状の階段形状が明瞭に観察される（フレーム 1 およびフレーム 10）。これは、針から生じている磁力線と外部から印加される磁場の磁力線が対向するときに、針から生じている磁力線が外側方向に曲げられるためである。すなわち、磁性流体の界面に対して法線方向の磁場が作用し、臨界値を超えて界面不安定性が発生したと考えることができる。そのため、磁性流体界面は磁力線の可視化の作用を果たしている。特に Case2 は針端における磁束密度が $B = 42 \text{ mT}$ であり、この磁力線を対向磁場によって曲げることにより、磁性流体は容易に臨界磁化を超える。Fig. 13 は、この磁性液滴の形状振動を定量的に記述したものである。Case1 の場合と異なって、液滴下端部も上下運動を示している。しかもその振動は、液滴上端部と同期している。すなわち、磁性流体の量が大きいため、液滴全体が外部交流磁場の変動に対応して上下運動している。液滴直径 b_u および b_l も振動のピークにわずかに位相差が見られるものの、ほぼ同期して振動している。これらの結果は、針の太さを変えることによって多様な界面変形制御が可能であることを示している。

4 結言

磁気特性の優れた永久磁石に連結し磁化させた針端に磁性流体液滴を吸着させた針 - 磁性液滴系を構成し、この系が外部から交流磁場の作用を受ける場合の液滴応答挙動を調べた。得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 磁化された針を使用することによって下に垂れることなく針端に磁性液滴を保持することができる。針の直径を増大することによって、保持できる液滴の体積を増加できる。
- (2) 比較的細い針(Case1)に保持された磁性液滴の外部交流磁場応答は磁場方向に伸縮振動する挙動を示し、その振動数は交流磁場の周波数と厳密に一致する。
- (3) 比較的太い針(Case2)に保持された比較的大きい磁性液滴の外部交流磁場応答は磁場方向に上下振動する挙動を示し、その振動数は交流磁場の周波数と一致する。また、磁性液滴の表面には交流磁場と同期して界面不安定性が現われる。

謝辞

本研究の一部は東北大学流体科学研究所における公募共同研究によって遂行されたことを付記し、関係各位に感謝致します。

(2011 年 4 月 4 日受付, 2011 年 9 月 3 日再受付)

参考文献

- [1] H. Lamb, *Hydrodynamics*, Cambridge University Press, 1932.
- [2] L. Rayleigh, On the capillary phenomena of jet, *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 29, pp. 71-97, 1879.
- [3] K. Adachi and R. Takaki, Vibration of a flattened drop. I. Observation, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 53, No. 12, pp. 4184-4191, 1984.
- [4] R. Takaki and K. Adachi, Vibration of a flattened drop. II. Normal mode analysis, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 54, No. 7, pp. 2462-2469, 1985.
- [5] R. Takaki, A. Katsu, Y. Arai and K. Adachi, Vibration of a flattened drop. III. Mechanism of mode transition, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 58, No. 1, pp. 129-139, 1989.
- [6] M. Strani and F. Sabetta, Free vibration of a drop in partial contact with a solid support, *J. Fluid Mech.*, Vol. 141, pp. 233-247, 1984.
- [7] E. D. Wilkes and O. A. Basaran, Hysteretic response of supported drops during forced oscillations, *J. Fluid Mech.*, Vol. 393, pp. 333-356, 1999.
- [8] R. Savino and S. Fico, Transient marangoni convection in hanging evaporating drops, *Phys. Fluids*, Vol. 16, No. 10, pp. 3738-3754, 2004.
- [9] J. M. Fernandez and G. M. Homsy, Chemical reaction-driven tip-streaming phenomena in a pendant drop, *Phys. Fluids*, Vol. 16, No. 7, pp. 2548-2555, 2004.
- [10] R. Krechetnikov and G. M. Homsy, On physical mechanisms in chemical reaction-driven tip-streaming, *Phys. Fluids*, Vol. 16, No. 7, pp. 2556-2566, 2004.
- [11] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University Press, 1985.
- [12] S. Sudo, M. Ohaba, K. Katagiri and H. Hashimoto, Dynamic behavior of magnetic liquid drop on a solid base subject to magnetic field and vertical vibration, *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 122, pp. 248-253, 1993.
- [13] S. Sudo, A. Nakagawa, K. Shimada and H. Nishiyama, Shape response of functional fluid drops in alternating magnetic field, *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 289, pp. 321-324, 2005.
- [14] J. -C. Bacri, C. Frenois, R. Perzynski and D. Salin, Magnetic drop-sheath wetting transition of a ferrofluid on a wire, *Revue Phys. Appl.*, Vol. 23, pp. 1017-1022, 1988.
- [15] S. Sudo, Y. Takaki, Y. Hashiguchi and H. Nishiyama, Magnetic fluid devices for driving micro machines, *JSME Int. J.*, Vol. 48, No. 3, pp. 464-470, 2005.