

# 磁性流体の界面変形の制御

—磁性流体の界面現象—

## Control of Interfacial Transform Magnetic Fluids

原 絢 子

Ayako HARA

(Department of Applied Science, Kochi Womens University, Kochi 780 Japan)

(平成5年11月16日受理)

### Abstract

An experiment and theoretical study is presented for the interfacial of magnetic fluids. Experiments were performed to determine the critical field intensity incipient instability of magnetic fluids in rectangular containers subject and agglomerate magnetic drops in non-magnetic fluids, and to observe the growth of instability warps, projections of magnetic drops.

Magnetic fluids used in experiments were Kerosin base ferricolloid FNC-50 and its dilution with distilled Kerosin.

It was found that interfacial instability appeared when the field intensity exceeded the threshold value and grew in warp with the field intensity, and that the interfacial instability and the growing in warp depended upon the field intensity and the dimensions of the container.

It was also found that projections for magnetic drops depended upon the field intensity.

### 1. 緒 言

磁性流体とは、ベースとなる液体に多数の強磁性微粒子を懸濁したコロイド溶液である。磁場下での磁性流体は、流体自身が磁気を帯び、磁化する<sup>1)</sup>。このことにより磁場に応答していくつかの興味ある挙動を示す<sup>2)</sup>。磁場に応答する磁性流体の特性を利用して様々な分野への応用のための基礎研究が行われている<sup>3,3)</sup>。また、プリント基盤上への配線印刷の印刷インクのコントロールなどの応用に関して、界面変形を自由に形成せしめる、自由形状の融解、凝固を行わしめる応用が広く存在する<sup>3-5)</sup>。そこで、着目流体に隣接する第2の液体の界面を任意に制御することによって、目的液体の界面を設計することを試みる。

ここでは、第2の作動流体として磁性流体をとり上げ、この界面を外部印加磁場でコントロールすることにする。これはまた、外部印加磁場による界面変形を用いた往復動ポンプやアクチュエータ<sup>7-9)</sup>、インクジェットプリンタなど多くの応用機器への流体理論的な解析への応用も考えられる。

本報では、一つの円筒形永久磁石でも与えうる条件によって、非磁性流体中の磁性流体液滴<sup>8-9)</sup>と、長方形容器内に部分的に満たされた磁性液体自由界面<sup>10)</sup>の界面制御を実験的に試み、その特異な形状の形成条件を明らかにした。従来、液滴や2,3の界面変形の検討の報告があるものの少しの条件の変化で異った形状となるところから、応用に示唆する事例が少なかった。ここでは一つの永久磁石で作らるる磁場を用いて得られた比較的広配囲の形状とその条件を提示するものである。

## 2. 実験

### 2. 1 供試磁性流体と磁石

実験には、松本油脂製薬(株)のケロシンベース磁性流体 FNC-50 (920808K) を使用した。その室温 (25°C) における比重  $n$ , 粘度  $\eta$ , 磁化の大きさ  $M$  は以下の通りである。 $n=1.396$ ,  $\eta=22.9$  CPS,  $M=5.07 \times 10^{-2} T$ 。使用した磁石は希土類磁石 KD-2 (直径 10mm, 厚さ 5 mm) である。磁石の磁化状態は図 1 に示す。

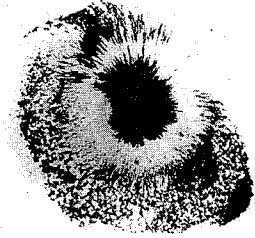


図 1 磁石の磁化状態

### 2. 2 実験装置および方法

#### A) 磁性液滴

図 2 に実験装置の概略を示す。角柱容器①はアクリル樹脂素材の高さ50mm, 奥行き50mm, 幅50mm である。アクリル板②は大きさ50mm×50mm, 厚さ 2 mm で 9 枚置き, 枚数を変化させることで, 印加磁場の大きさを変える。容器内液滴底面での磁石からの距離による磁束密度分布を図 3 に示す。磁束密度は磁束形ホール素子形 GK-3 P 形, 精度  $10^{-4} T$  によって測定した。測定は非磁性流体 (水) の深さ  $Wh$  を 10.0mm, 15.0mm, 20.0mm と 3 つの状態では, 磁性液滴の体積は 0.05ml, 0.10ml とし, 各々磁束密度の大きさを変化させて形状変化の実験を行った。

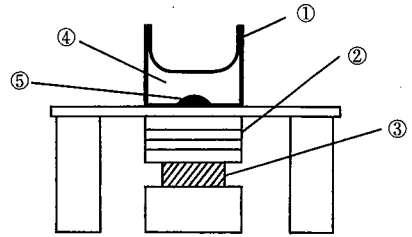


図 2 実験装置の概略

- ①角柱容器 ②アクリル板 ③磁石
- ④非磁性流体 ⑤磁性液滴

#### B) 磁性液体自由界面

実験容器は光学的観察を行うため透明アクリル樹脂で制作し, 全て高さ50mm, 壁厚 2 mm, 横幅 25mm で縦幅は異なる寸法の長方形容器とした。5 種類の容器を制作し, C1, C2, C3, C4, C5 としその寸法を表 1 に示す。容器の両側に設置した磁石の位置を変化させることにより磁場を変化させて, 容器内の磁束密度分布を測定した。図 4 に示す。容器の中心点を 0 とし左右を+, - とする。図中の A, B, C, D は最大磁束密度 (容器壁での大きさ) が 0.180T, 0.042T, 0.017T, 0.009 T, 0.0003T, である。各種容器に磁性流体を 33mm の高さまで満たし, 磁場を磁性液体界面に対して平行に, 液体層に対して直角になるように印加し, 長方形容器と磁石の距離を変化させることにより磁場の大きさを変化させて実験を行った。A), B) の実験は常温で行い, 20°C~25°C の範囲にあった。界面の変化量, 磁性液滴の伸長は 0.01mm まで精密に読みとり可能であるバーニアキャリパスを用い

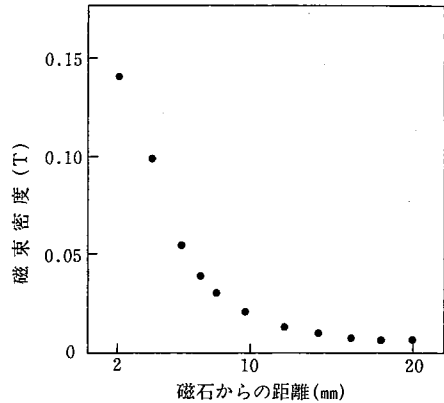


図 3 距離による磁束密度分布

表 1 容器の形状

Container	Dimension (a × b × c mm)	Wall thickness (mm)
C1	25 × 2 × 50	2
C2	25 × 4 × 50	2
C3	25 × 6 × 50	2
C4	25 × 8 × 50	2
C5	25 × 10 × 50	2

た。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 磁性液滴

磁場の強さを増加させて、最大値までもつてゆき、次に減少させた場合のヒステリシスを調べる。図5は磁性液滴の体積を  $V=0.05\text{mm}^3$  とし、 $W_h=10.0\text{mm}$  の場合の液滴伸長のヒステリシスを示している。磁性液滴の伸長と分裂の様相は図6に示す。

伸長は図6に示される変形で、スパイクの最大高さ  $h_{\text{max}}$  をとったものである。増加の場合と減少の場合で、伸長軌跡は異なり、伸長の差は大きいところで36%である。体積の違いによる差は見られず、 $V=0.10\text{mm}^3$  でも同じような軌跡となる。

非磁性液の深さ  $W_h$  (圧力)、磁性液滴の体積  $V$  にはかかわらず形状変化の軌跡は磁場の増加とともに増加つづいて減少し、最小値をとりその後、増加する。また、印加磁場が同じでも増加磁場と減少磁場では異ったヒステリシスを示している。

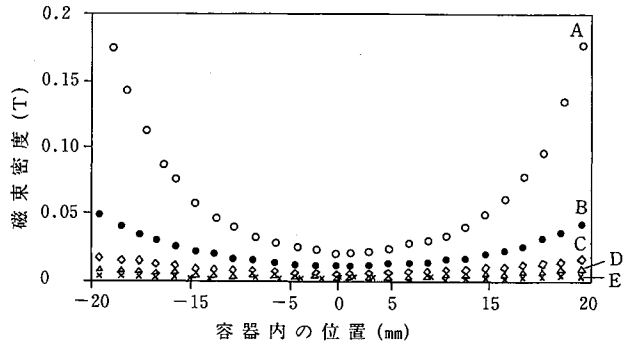


図4 磁束密度分布

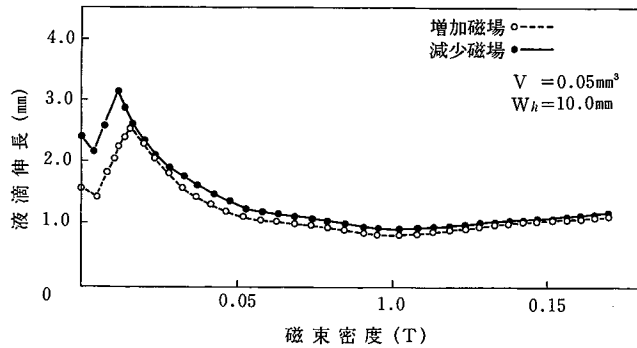


図5 磁性液滴の伸長とヒステリシス

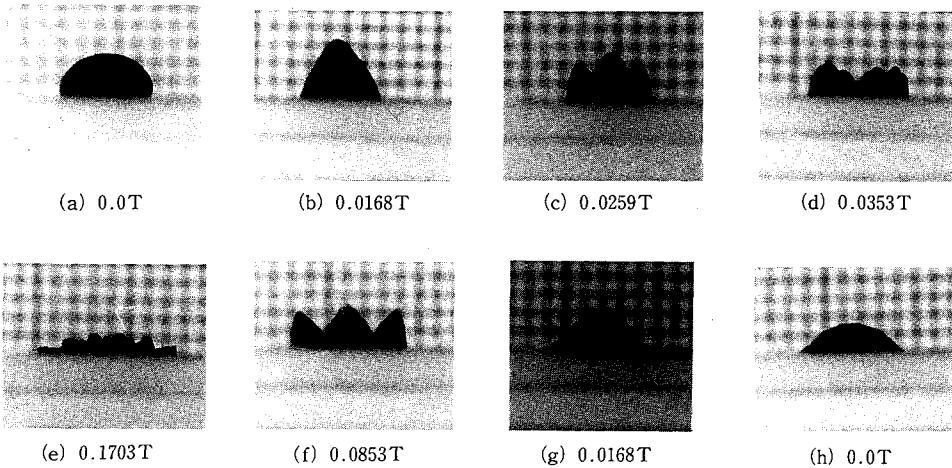


図6 液滴の伸長と変形

液滴変形機構については、液滴は印加磁場の小さい場合は平板に対して垂直な対称軸をもつ円錐形として磁場方向に伸長する。磁場の増加とともに不安定性が生じ山を形成し山の数が増す。平板に接している部分が広がり、伸長は減少するが、対称性は保たれている。印加磁場を減少させてゆくと増加の場合と同じような機構をたどるが対称性がわずかくずれる。一度、液滴上部に亀裂が形成されると、磁気双極子特性による反撥力が作用して液滴上部の分裂が助長される。ここで、増加磁場に対して、分裂が生じたときの磁束密度 B1 と、磁少磁場に対する磁束密度 B2 を表 2 に示す。磁性液滴の伸長  $h_{max}$  と底面の幅  $a$  の磁場の変化による増減を図 7 (a) に、 $h_{max}$  と  $a$  の分散を図 7 (b) に示す。

次式を用いて  $h_{max}$  と  $a$  の相関係数  $r$  を求めた。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})(a_i - \bar{a})}{(n-1) S_h \times S_a}$$

但し、 $n$ : データ数,  $h_i, a_i$ :  $i$  番目の  $h, a, S_h; S_a$ :  $h, a$  の標準偏差である。非磁性流体の深さが大きいほど相関が高く、 $V=0.05\text{mm}^3, W_h=20\text{mm}$  で  $r=-0.90$  となる。

### 3. 2 長方形容器内の磁性流体自由界面

磁性流体の界面に磁場を印加し、その強さ  $H_0$  を徐々に増加してゆくと、平坦であった界面に変化が起る。界面の変化は磁場の強さ  $H_0$  の増加と共に成長する。その様子の代表例を C1 容器、濃度 40.0% の場合を図 8 に示す。図 8 から界面変形が二次元的であること、容器中心部のくぼみが磁場の強さの増加とともに深くなってゆくことがわかる。

図 9 に中心部の深さと磁束密度の関係を容器別、重量濃度別に示す。これから、磁場の強さ  $H_0$  の増加とともに、変形はほぼ直線的に成長していることがわかる。図 9 (a) から濃度が高くなると変形が大きい。図 9 (b) から濃度 20% 以外は容器の縦幅による違いは顕著には見られない。図 10 のように臨界磁場  $H_c$  を (1)→(2) への形状変化を起した時と規定して、縦幅  $b$  に対する臨界磁場を図 11 に示す。幅が広くなると臨界磁場が減少してゆく傾向を示している。C3 の形状で最も小さい  $H_c$  をとりわずかな増加している。

磁性流体の濃度効果については、中心深さと同じ傾向を示し、各々の容器において、臨界磁場は

表 2 分裂数と磁束密度

V (ml)	0.05		
Wh (mm)	10.0	15.0	20.0
B 1 (T) 山の数	0.0168 2	0.0259 3	0.0259 3
B 2 (T) 山の数	0.0259 3	0.0168 2	0.0168 2

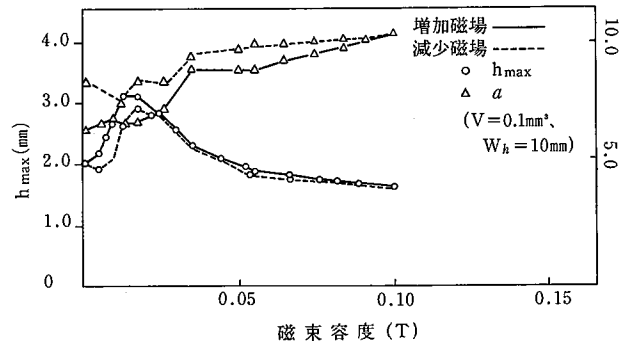


図 7 (a)  $h_{max}$  と  $a$  の変化

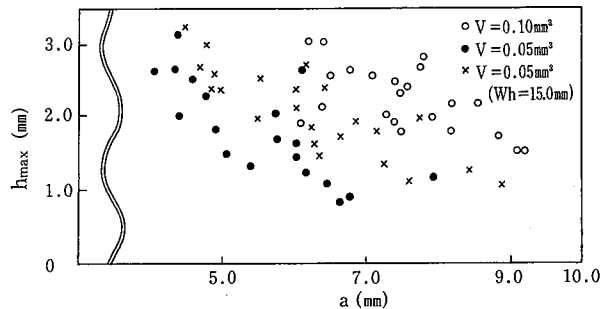


図 7 (b)  $h_{max}$  と  $a$  の分散

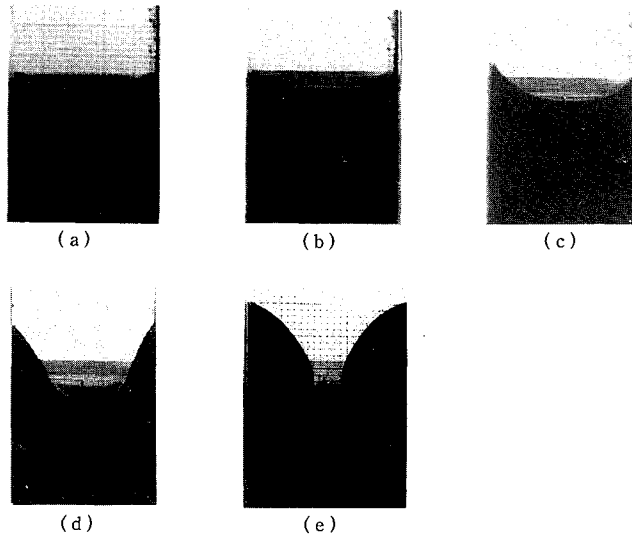


図8 磁性流体界面の形状変化の様相

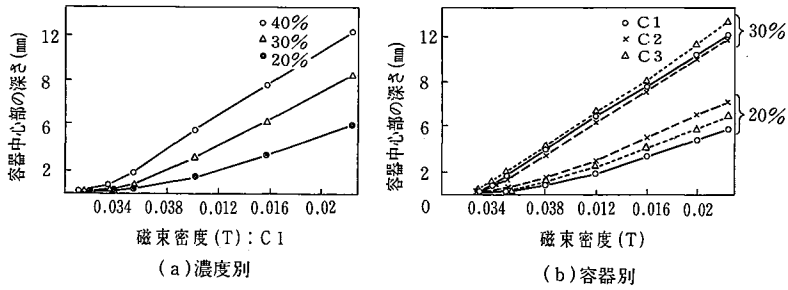


図9 磁場による形状変化

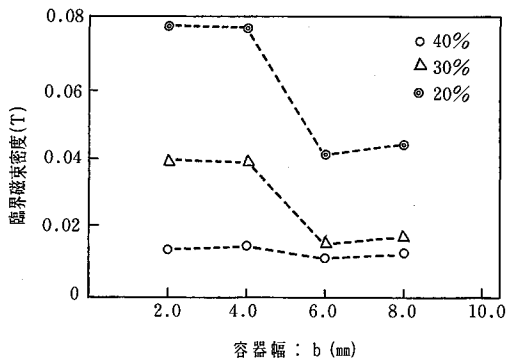


図11 b に対する臨界磁場

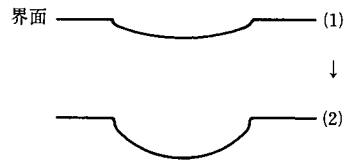


図10 臨界磁場の規定

濃度が高いほど小さくなっている。一方、高濃度では図11に示すように容器の形状の影響を受けにくい。このことは前述したと同じ結果を示している。磁化の大きさは磁化した物体の体積に比例した磁気モーメントで表わされるので、重量濃度が高いと、磁化の大きさが増し、形状変化も大きくなる。また、低濃度では、流体の移動が起りやすく容器の形状が界面変化に関与すると考えられる。

## 7. 結 論

磁性液滴が界面に対して鉛直方向の、また長方形容器内の磁性流体が界面に対して平行方向の磁場の作用を受けるときに発生する界面不安定性に対して実験を行った。磁場の違い、容器の寸法の違いによる界面の具体的な形の様子を明らかにした。得られた結果を要約すると次のようになる。

### 1. 磁性液滴について

- (1)磁性液滴は磁場方向に伸長し、臨界磁束密度  $B_1$ ,  $B_2$  以上になると伸長は減少しはじめ、界面に分裂が生じる。磁場の増加とともに分裂数(山の数)も多くなる。
- (2)非磁性流体で囲まれた平板上に存在する液滴伸長はヒステリシスを示している。
- (3)非磁性流体の深さ(圧力)は磁性液滴の形状変化にはかかわらないが、液滴伸長  $h_{max}$  と底面の幅  $a$  に関係する。

### 2. 長方形容器内の磁性流体界面について

- (1)本実験で使用した長方形容器内に発生する界面不安定性は二次元的であり界面変化は中心部の落ち込みと左右からの盛り上がりのみられ、印加磁場の強さと共に大きくなる。
- (2)界面の不安定性は臨界磁場の強さ  $H_c$  以上で起り、 $H_c$  の値は磁性流体層の厚み  $b$  の増加とともに減少する。
- (3)磁性流体の濃度を変化させた場合、本実験範囲において20%のものがもっとも高い  $H_c$  を示す。磁性流体層の厚さについてはC3の形状:幅が6mmのものが低い  $H_c$  を示す。

終わりに、供試磁性流体を提供いただいた松本油脂製薬㈱、他の方々に、ここに付記して謝意を表する。

## 文 献

- 1) 神山新一, 下飯坂潤三: 日本機械学会誌, 88, 799 (1985)。
- 2) 富田幸雄: 機械の研究, 37, 10 (1987)。
- 3) Zahn, M., sheton, K. E.: IEEE Trans. Magn. MaG 16-2 (1980)。
- 4) Rosensweig, R. E.: Adv. in Electr. & Electr. phys. 48 (1979)。
- 5) Rosensweig, R. E.: Ferrohydrodynamics. Cambridge Un. iversity Press, 1 (1985)。
- 6) 佐藤彰, 小山忠正, 神山新一: 日本機械学会論文集, 57, 534, B (1991)。
- 7) A. Sato, T. Oyama, K. Koike, and S. Kamiyama: Proc. 2nd KSME-JSME Fluid Eng. Conf. 2, 310 (1990)。
- 8) 神山新一, 渡辺純, 佐藤彰: 日本機械学会論文集, 57, 537, B (1991)。
- 9) 三田村好矩, 和田龍彦, 酒井圭輔: 磁性流体連合講演会講演論文集, 34 (1991)。
- 10) V. I. SHAGROVA: Journal of Magnetism and Magnetic Materials 85 (1990)。
- 11) 須藤誠一, 橋本弘之, 片桐一成: 日本機械学会論文集, 52, 484, B, (1988)。