磁性流体の表面張力の測定と界面現象について*

須藤 誠一^{*1}, 橋本 弘之^{*1}, 池田 晃彦^{*2}Measurements of the Surface Tension of a Magnetic Fluid
and Interfacial Phenomena

Seiichi SUDO, Hiroyuki HASHIMOTO, and Akihiko IKEDA

The surface tension of a magnetic fluid subjected to a magnetic field tangential to its surface was measured. The surface tension of water-based magnetic fluid decreased with increases in the mass concentration on the constant strength of the external field. On the contrary, however, the surface tension of kerosine-based magnetic fluid increased. The surface tension of magnetic fluid increased slightly with the strength of magnetic field. The interfacial tension between nonmagnetic and magnetic fluids was measured. The interfacial tension also increased with the external field. Based on the measurements of the surface tension, the deformation of a drop of magnetized liquid in a magnetic field was investigated. The elongation of a magnetic drop was measured. The experimental results were compared with the theoretical values determined by the minima of energy.

Key Words: Magnetic Fluid, Magnetohydrodynamics, Magnetic Field, Surface Tension, Interfacial Tension, Magnetic Drop, Magnetic Energy

1. 緒 言

磁性流体は取扱いが容易で強い磁性を有する液体であるため、回転軸シール、比重選別装置、エネルギー変換装置、加工技術、アクチュエータ、ダンパ、医療などへの幅広い応用研究開発が進められている⁽¹⁾。これらの応用研究開発において、磁性流体の基本的な特性を調べることは非常に重要である。特に、各種応用機器において磁性流体は自由界面を有することが多く、界面張力が重要となる種々の界面現象が発生する⁽²⁾。また、その表面張力は外部磁場によって変化すると思われるような現象が観察されているが⁽³⁾、外部磁場が存在する場合の表面張力の測定はまだ行われておらず、表面張力が磁場に依存するかどうかは不明である。したがって、本報は磁性流体の界面に対して平行に磁場を作用させたとき、磁性流体が空気に接している場合の自由表面における表面張力、および非磁性液体と接している場合の界面張力(ここでは液-液界面での値を界面張力と呼ぶことにする)の測定を行い、磁場の強さによるそれらの見掛けの値の変化を見いだ

したものである。さらに、これらの実験結果を踏まえて、磁場中に存在する磁性液滴の変形の様子を実験的に再検討し、変形におよぼす磁気力と表面張力の関係を明らかにした。

主 な 記 号

- a : 液滴の長径
- b : 液滴の短径
- B : 磁束密度
- C : 磁性流体の重量濃度
- D : 反磁界係数
- D_0 : 無磁場中での液滴直径
- E_m : 磁気エネルギー
- E_s : 界面エネルギー
- E_T : 全エネルギー
- H_0 : 外部磁場
- k : ボルツマン定数
- K : 伸長量 $= a/R_0$
- m : 粒子の磁気モーメント
- R_0 : 無磁場中での液滴半径
- t : 温度
- T : 絶対温度
- V : 液滴の体積

* 昭和61年10月25日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年2月23日。

^{*1} 正員、東北大学高速力学研究所 (〒980 仙台市片平2-1-1)。

^{*2} 正員、みやぎ生協 (〒981-31 泉市七北田字田中70-2)。

μ_0 : 真空の透磁率

σ : 表面張力および界面張力

σ_0 : 無磁場中での表面張力

χ : 磁化率

2. 実験装置および実験方法

2.1 磁性流体の表面張力の測定 本実験では市販されている平板つり下げ形表面張力計を磁場の中でも使用できるように改造して表面張力の測定を行った。図1に測定系全体の概略図を示す。測定の基本原理解は次のようなものである。トーションワイヤ式でてんびんの一端にプレートをつける。プレート下端が液面に触れると、その周囲に表面張力が作用し、てんびんのトーション効果と釣り合うところまでプレートは液中に引き込まれる。そのときの変位を直線高分解能形差動トランスで電気的に取り出すことにより表面張力の測定を行う。測定系は磁場の影響を受けないようにワイヤを磁化しない材質とし、プレート部分を除く他の部分は電磁石から十分に離し、磁気遮へいをした。図2に使用した電磁石の磁束密度 B の分布を示す。図2から測定範囲内で磁場は一樣であることがわかる。表面張力を測定した試料液体はフェリコロイド W-35 (以下 W-35 と略す) とそれを蒸留水で希釈したもの、およびフェリコロイド HC-50 (以下 HC-50 と略す) とそれをケロシンで希釈したものを用いた。また、W-35 およびその希釈液とケロシンとの液-液界面における界面張力も測定した。また、ここでは磁場による磁性流体界面の変形が測定値に影響しない範囲で実験を行った。

2.2 磁性流体の界面現象 寸法が 50 mm × 50 mm 幅、300 mm 長さの縦長の四角柱容器にグリセリン水溶液を満たし、その中に注射器によって HC-50

の各種濃度の磁性流体を注入して磁性液滴を形成した。つぎに磁場を印加し、徐々に磁場の強さを増加させて液滴形状の変化を調べた。その際、グリセリンの密度は液滴に作用する重力の効果を排除するため磁性流体の密度と同じになるように調整した。また、磁性液滴の変形の様相は写真撮影および肉眼によって観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 磁性流体の表面張力の外部磁場依存 ここでは、今まで実測例を知見しない磁性流体の表面張力の外部磁場による影響を示す。図3は、W-35 およびそれを蒸留水で希釈してマグネタイトの濃度を変えた3種類の磁性流体に外部磁場を印加した場合の表面張力の変化を示している。外部磁場の強さ H_e が同じであれば、重量濃度 C の大きいものほど表面張力 σ の値が小さくなっている。W-35 の母液は蒸留水であり、界面活性剤で表面処理したマグネタイト粒子を水に添加してゆくことは、表面吸着によりギブスの吸着式において吸着量が正になることに対応し、表面張力を減

図2 電磁石の磁束密度分布

図1 実験装置の概略

図3 磁場の強さの表面張力への影響 (W-35)

少させることがわかる⁽⁴⁾。また、図3から外部磁場 H_e の増加とともに見掛けの表面張力 σ は増大していることが明らかである。図4はHC-50における表面張力の磁場による変化を示している。この場合には、W-35の場合と異なって、 C の大きいほうが σ も大きな値となっている。これは C の増加が表面不活性のため、吸着量 Γ が負となるためである。外部磁場 H_e の σ への効果は W-35 の場合と同様であり、 H_e の増加は σ の増加をもたらす。これらの測定結果は、理論的な予測⁽⁵⁾⁽⁶⁾を定性的に裏づけている。

すなわち、磁性流体の界面に対して平行に磁場が作用する場合、主として磁気微粒子間に働く双極子相互作用によって、外部磁場の強さの増加とともに表面張力の値が大きくなると考えられる。

なお、W-35に関して、無次元変数 $(\mu_0 m H_e)/kT$ を用いて、外部磁場が作用し温度が変化する場合の磁性流体の表面張力を表す実験式(1)を得た。

$$\sigma = \sigma_0 \{ 2.5 \times 10^{-3} (\mu_0 m H_e / kT)^{4/5} + 1 \} \dots \dots \dots (1)$$

式(1)による曲線と測定点を図5に示す。図5から、多少の測定点のばらつきは存在するが、磁場および温度変化による磁性流体の表面張力が式(1)で表示できることがわかる。

図4 磁場の強さの表面張力への影響 (HC-50)

図5 $\mu_0 m H_e / kT$ による整理

図6はケロシンとW-35の各濃度 C をもつ磁性流体界面の界面張力 σ の外部磁場の強さによる変化を見たものである。図6から、磁性流体-非磁性液体の界面においても、空気-磁性流体の場合と同様に H_e の増加とともに σ が若干増加することが明らかである。

3.2 磁性液滴の変形に関する実験 磁性流体と同密度に調整したグリセリン水溶液中に球形状を保って浮遊しているHC-50の液滴に磁場を印加した場合の液滴伸長の一例を図7に示す。これらの液滴はすべて重量濃度 C が45.8%で液滴の無磁場中における直径はそれぞれ図7(a) $D_0 = 3.98$ mm, 図7(b) $D_0 = 6.76$ mm, 図7(c) $D_0 = 9.94$ mmである。図7から、液滴が磁場の作用によって伸長するようすがはっきりとわかる。図8はそのような液滴の磁場の強さによる伸長を示したもので、縦軸は無次元液滴長さ a/R_0 である。図8から、磁場の強さの増加にともなって液滴は伸長し、また磁場の強さが同じである場合、 D_0 の大きいものほどより長く伸長することがわかる。

図6 磁場の強さの界面張力への影響

図7 磁性液滴の伸長のようす

3.3 磁性液滴の変形に関する理論的考察 前述したように、磁性液滴は磁場の作用を受けて変形する。このときの磁性液滴の変形は球形から回転だ円体になると仮定する。磁性液滴の伸長の長さをエネルギー最小の条件から求める。ここで考えられるエネルギーは界面エネルギーと磁気エネルギーである。界面エネルギー E_s は表面積と界面張力の積によって式(2)のように表される。

$$E_s = 2\pi\sigma a^2 \left\{ \frac{b^2}{a^2} + \frac{b}{a} \frac{\sin^{-1}(1-b^2/a^2)^{1/2}}{(1-b^2/a^2)^{1/2}} \right\} \dots (2)$$

ここで σ は磁場に依存する界面張力である。磁気エネルギー E_m は式(3)によって表される。

$$E_m = -\mu_0 \iint \frac{\chi H_e}{1+\chi D} dH dV \dots (3)$$

D は反磁界係数で式(4)のように表される。

$$D = \frac{1}{(a/b)^2 - 1} \left[\frac{a/b}{\sqrt{(a/b)^2 - 1}} \times \ln \left\{ \frac{a}{b} + \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 1} \right\} - 1 \right] \dots (4)$$

したがって、全エネルギー E_r は式(5)で表される。

$$E_r = E_s + E_m \dots (5)$$

式(5)に式(2)~(4)を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{E_r}{2\pi\sigma R_0^2} = & \frac{1}{K} + \frac{K^{1/2}}{(1-K^{-3})^{1/2}} \sin^{-1}(1-K^{-3})^{1/2} \\ & - \frac{\mu_0 R_0 H_e^2 \chi}{3\sigma} \left[1 + \chi \left\{ \frac{1}{K^3 - 1} \left[\frac{K^{3/2}}{(K^3 - 1)^{1/2}} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \times \ln \{ K^{3/2} + (K^3 - 1)^{1/2} \} - 1 \right] \right\} \right] \dots (6) \end{aligned}$$

また、エネルギー最小の条件は式(7)から定まる。

$$\partial E_r / \partial K = 0 \dots (7)$$

式(7)を計算して、式(8)が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\mu_0 R_0 H_e^2}{3\sigma} = & \left\{ \frac{1}{K^2} - \frac{1}{2} \frac{1}{K^{1/2}(1-K^{-3})^{1/2}} \right. \\ & \times \sin^{-1}(1-K^{-3})^{1/2} + \frac{3}{2} \frac{\sin^{-1}(1-K^{-3})^{1/2}}{K^{7/2}(1-K^{-3})^{3/2}} \\ & \left. - \frac{3}{2} \frac{1}{(1-K^{-3})K^2} \right\} \\ & \times \left[1 + \chi \left\{ \frac{1}{K^3 - 1} \left[\frac{K^{3/2}}{(K^3 - 1)^{1/2}} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \times \ln \{ K^{3/2} + (K^3 - 1)^{1/2} \} - 1 \right] \right\} \right]^2 \\ & \div \chi^2 \left[\left\{ \frac{3}{2} \frac{K^{1/2}}{(K^3 - 1)^{5/2}} \ln \{ K^{3/2} + (K^3 - 1)^{1/2} \} \right. \right. \\ & - \frac{9}{2} \frac{K^{7/2}}{(K^3 - 1)^{3/2}} \ln \{ K^{3/2} + (K^3 - 1)^{1/2} \} \\ & + \frac{3}{2} \frac{K^{3/2}(K^{1/2} + K^2/(K^3 - 1)^{1/2})}{(K^3 - 1)^{3/2}(K^{3/2} + (K^3 - 1)^{1/2})} \left. \right\} \\ & \left. + \frac{3K^2}{(K^3 - 1)^2} \right] \dots (8) \end{aligned}$$

式(8)は磁場の強さと液滴形状の関係を示している。

式(8)と実験結果を比較して図9に示す。図9から実験と理論は定性的に一致することがわかる。特に、磁場の強さが小さい場合、両者は良く一致している。しかし、 H_e の値が大きくなると両者の値はしだいに離れてくる。この理由として、理論解析で χ の値を一定と仮定したが、実際は磁場の強さの関数であること、また液滴の変形が回転だ円体になると仮定したが、回転だ円体とみなされるのは磁場強度の値が小さい場合だけであることなどが考えられる。

4. 結 論

磁性流体が空気と接している自由表面に対して平行に磁場が作用した場合の表面張力、および混じり合わない非磁性液体と接している場合の界面張力の測定を行った。さらに、表面張力および界面張力が磁場の強さに依存するという観点から、磁場中に存在する磁性液滴の変形に関する実験を行った。得たる結果を要約して以下に示す。

(1) 水ベース磁性流体における無磁場中での表面張力は重量濃度によって変化する。すなわち、重量濃度の増加とともに表面張力の値は低下する。また、ケロシンベース磁性流体に関しては、逆に重量濃度の増加とともに表面張力の値も増加する。

(2) 水ベース、ケロシンベースの両磁性流体とも磁場の印加によって表面張力の若干の増加が認められた。また、両者とも磁場の印加のもとで温度増加によ

図8 磁性液滴の磁場による伸長

図9 理論と実験の比較

って通常の流体と同様な表面張力の低下が認められた。
ある。

(3) 水ベース磁性流体がケロシンと界面を接している場合の界面張力も磁場の印加によって界面張力の増加が認められた。

(4) 磁場の作用を受ける磁性液滴は磁力線方向に伸長し、その形状は磁場の強さが大きい場合、あるいは磁性流体の飽和磁化が大きい場合はその先端部付近は回転だ円体とはならない。また、磁性液滴の変形において、磁場による界面張力の変化の影響はわずかで

文 献

- (1) 富田, 機械の研究, 37-11 (昭 60), 1249.
- (2) Rosensweig, R. E., *Adv. Electron. Electron. Phys.*, 48 (1979), 103.
- (3) Sudo, S.,ほか 3 名, *Proc. 4th Int. Conf. Magnetic Fluids*, (1986), 46.
- (4) 小野, 表面張力, (昭 55), 1, 共立出版.
- (5) Tsebers, A. O., *Magn. Gidrodin.*, 4 (1982), 21.
- (6) Bashtovoi, V. G. and Tait, E. M., *Magn. Gidrodin.*, 2 (1985), 54.