磁場の作用下における磁性流体ジェットの挙動に関する研究* (第2報, 非一様磁場)

石橋 幸男^{*1}, 富田 幸雄^{*2}, 横山 俊雄^{*2}

A Study on the Behavior of a Ferrofluid Jet in a Magnetic Field (2nd Report, Nonuniform Magnetic Field)

Yukio ISHIBASHI, Yukio TOMITA, and Toshio YOKOYAMA

The purpose of this study is to investigate the basic properties of a ferrofluid jet in a nonuniform magnetic field. Using nozzles which have various diameters, the behavior, the liquid column deformation and the droplet formation of water-based ferrofluid jets in a nonuniform magnetic field being perpendicular to the flow direction are experimentally examined. Then, the factors influencing greatly the liquid column length and droplet spacing of ferrofluid jets ejected from capillary nozzles are found by using dimensional analysis.

Key Words: Fluid Mechanics, Ferrofluid, Jet, Capillary Nozzle, Magnetic Field

1. 緒 言

水やケロシンなどの溶媒中に強磁性微粒子(直径約10 nm)を界面活性剤を用いて, 安定分散させたコロイド溶液を一般に磁性流体と言う。この流体は分散性にすぐれ重力や遠心力の作用下でも凝集, 沈殿など固液分離が生じることがなく, 液体自身が強い磁性を持っているかのような挙動を示す。この流体に磁気力を加えることによって液体の圧力分布や気液界面の形状, さらには流れのパターンを変えることができる。磁性流体のこのような特性を利用した磁気インクジェットプリンタ, 潤滑剤としての利用や軸封装置, エネルギー変換装置^{(1)~(4)}など, 流動現象が直接関与する磁性流体応用機器の開発研究に関連して, 非一様磁場や変動する磁場の影響をも考慮したより複雑な流れ場の流動特性にも関心を持たれるようになり, 種々の研究が行われてきている。前報⁽⁵⁾では垂直磁場下における細管ノズルより大気中に流出する磁性流体ジェットの挙動について報告した。そこで本研究では, 管径の異なる

数種類のノズルより流出する磁性流体ジェットの非一様磁場内における挙動, 液柱の変形および液滴の生成について実験的に調べる。さらに次元解析を行って細管ノズルより流出する磁性流体ジェットの液柱の長さ, 液滴間距離に影響する諸因子を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した磁性流体および実験装置は前報で報告したものと同一なので, これに関する説明は省略し使用した細管ノズルの管径および長さを表1に示す。磁極として角度1, 3°の傾斜鉄板を磁極に取付けたもの(以下の記述において単に磁極板1, 3°と記す)を用いた。細管ノズルの出口は, 磁極板1, 3°に対して次のような位置に設けた。すなわち, 磁極板3°のとき磁極板の中心から上方30 mmの位置(A-5), 磁極板の中心0 mm(A-4), 磁極板の中心から下方30, 60 mm

表1 ノズルの寸法

		単位 mm						
Position		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2
Length, l		550	390	360	330	300	550	390
Diameter, d		0.940	0.875	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940
		1.280	0.940	1.280	1.280	1.280	1.280	1.280
		1.360	1.280	1.360	1.360	1.360	1.360	1.360
		1.425	1.360	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425
			1.425					

* 平成元年3月11日 東海支部第38期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年6月7日。

^{*1} 正員, 東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*2} 正員, 東京理科大学理工学部 (〒278 野田市山崎亀山2641)。

の位置 (A-3), (A-2) で, 磁極板 1° のときは磁極板の中心から下方 60 mm の位置 (B-2), 磁極板 3° でノズルが磁場内を通過して, ノズル出口が磁場の影響を受けない位置 (A-1), (B-1) である (図 1 参照). 実験に用いた電磁石は $140\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ の磁極を有し, 磁極間隔は 3° で最大 14 mm, 最小 7 mm, 1° では最大 10 mm, 最小 7 mm である. 電源には定電流直流電源を用い, 磁束密度を連続的に変えることができる. 磁束密度測定は前報で説明しているので省略する. 磁束密度分布とノズル出口位置および励磁電流の関係を図 2, 3 に示す. 流出流量は重量法によって求めた. そして, 各場合におけるジェットの挙動を写真撮影し, ノズル先端からジェットが液滴になるまでの長さ, 液柱の変形および液滴間の距離をそれぞれ求めた.

3. 実験結果および考察

3.1 液柱の長さ 図 4 はノズル出口位置が (A-4) の場合で, タンク内の圧力 (202.7 kPa) を一定に保って磁場の強さ (ノズル出口の磁束密度 B で表す) を増加させた場合におけるジェットの流動状態を写真撮影したものである. 磁場を印加していないときの管内

図 1 ノズル出口の位置

図 2 磁束密度とノズル出口の位置との関係

平均流速は, 1.5 m/s である. この写真から, 磁場の強さが増加すれば流出ジェットの液滴化が早く始まることがわかる. 図 5 は磁束密度 B とジェットが液滴となるまでのノズル出口からの長さ (以下の記述において単に液柱の長さとして記す) l を管径 d で割った l/d との関係をプロットしたものである. 磁場の強さの増加とともに, 液体の見掛け粘度が増加するので流速も減少し, ジェットの液柱は, 短くなっていくことがわかる. 図 6 はノズル出口の位置 (A-2) の場合における l/d と管径 d の関係を示す. 図 6 から一定の磁場に対して, l/d は管径が大きくなるほど小さくなる傾向を示して

図 3 励磁電流と磁束密度の関係

図 4 磁場の強さ B とジェットの挙動

いるが、管径の小さいところでは磁場の影響が小さくなっている。これは磁性流体のずり速度と磁場の効果の割合が管径によって異なるためと考えられる。図7

(ノズル位置 A-4 $d=1.425$ mm)

図5 l/d -磁束密度 B

(A-2 $V_a=2.0$ m/s)

図6 l/d -管径 d

($d=1.425$ mm)

図7 流速 V_a -磁束密度 B

は管径一定の場合における流速 v_a と磁束密度 B の関係をノズル出口の位置 (A-2), (A-3), (A-4), (A-5) に対してプロットしたものである。磁場の強さの増加とともに流速はいずれの場合も減少していく傾向を示す。また磁場内に入っているノズルの長さが長いほど磁場の強さの影響を大きく受けていることがわかる。特に (A-5) では $B=0.05$ T 以上になると磁場の影響をほとんどうけないことがわかる。図8は管径一定で (A-2), (B-2) の場合における流速と磁束密度 B の関係を示したものである。図8より一様磁場はわずかな磁場の強さの増加に対して流速が急に減少している。これにくらべて、磁場の傾斜が大きいほど流速の減少が少なくなっている。

3.2 滑らかな表面ジェットの最小径 ノズル出口からのジェットが滑らかな表面をしている最小径 d_m (図9) を管径 d で割った d_m/d と磁束密度 B の関係を図10に示している。磁場の強さが増加すれば d_m

($d=1.36$ mm)

図8 流速 V_a -磁束密度 B

図9 説明図

も増加していくことがわかる。液柱の長さ l および流速が減少するほど d_m は大きくなる傾向を示している。

3・3 液滴 ノズル出口の位置 (A-3) で, タンク内の圧力を一定に保って磁場の強さを増加させた場合における液滴の形成の模様を図 11 に示す。この場合,

[ノズル位置 A-3 $d=1.36$ mm]

図 10 d_m/d -磁束密度 B

(a) $B=0$ (b) 0.014 T (c) 0.067 T (d) 0.104 T

[ノズル位置 A-2 $d=1.36$ mm (V_a)_{B=0}=1.5 m/s]

図 11 液滴の生成

[ノズル位置 A-3 (V_a)_{B=0}=1.5 m/s]

図 12 x/d -磁束密度 B

管径 $d=1.36$ mm で磁場を印加していないときの管内平均流速 $v_a=1.5$ m/s である。図 11(b) は印加磁場が弱い場合で, 液柱が長く, 1 個の液滴を作ることがむずかしく不均一液滴を生成している。磁場の強さを増加すると, 図 11(c) のように液滴はほぼ等間隔の液滴列をつくり, 液滴は均一である。さらに磁場の強さを増加すると図 11(d) のように液柱は短くなり, 液滴は大きくなって下流では広がっている。図 12 は液滴化後 10 mm の距離以後の相隣り合った液滴の間隔を 15 箇所について平均した液滴間距離 x を管径 d で割った x/d と磁束密度 B の関係を示す。図 12 より管径に

[ノズル位置 A-3 $d=1.28$ mm]

図 13 x/d -流速 V_a

[ノズル位置 A-2]

図 14 $x/d-l/d$

[ノズル位置 A-4]

図 15 $x/d-l/d$

かかわらず液滴間距離は磁束密度 $B=0$ から 0.012 T 付近まで減少したあと磁場の強さとともに増加していくことがわかる。また一定磁場に対して管径が大きいほど x/d は大きくなっている。図 13 は x/d と流速 v_a の関係を示す。一定磁場に対して液滴間距離は流速が小さくなるほど大きくなる傾向を示している。図 14, 15 はノズル出口の位置 (A-2), (A-4) での l/d と x/d の関係を示す。図 14, 15 より (A-2) は液柱の長いほど液滴間距離は短くなる傾向を示している。それに対して (A-4) は液柱の長さに関係なく液滴間距離はほぼ一定なることを示している。(A-2) は (A-4) に対して磁場内にノズルが長く入っているために磁場の影響を強く受けているからであろう。また、管径が大きいほど液滴間距離は大きくなっていることを示している。図 16 は管径一定の場合における液滴間距離 x と液柱 l の関係をノズル出口の位置が (A-2), (B-2) に対してプロットしたものである。図 14 と同様に液柱が長くなると液滴間距離は短くなっていく傾向を示している。(B-2) は (A-2) より液滴間距離が大きくなっ

ている。

3・4 次元解析的考察 実験結果を整理するにあたり、まず以下のような考察を行う。一般に磁性流体は無磁場でも非ニュートン粘性を示すが、本試料ではそれが弱く、かつジェット挙動に及ぼす効果が小さいと考えられるので、簡単なためニュートン流体として取扱う。磁性流体ジェットの挙動に影響を与える物理量として、管径 d 、磁性流体密度 ρ_l 、管内平均流速 v_a 、印加磁場のない場合の表面張力 σ 、磁化の強さ M 、印加磁場の平均強さ $\bar{H} = \int_0^L H(Z) dZ / L$ 、粘度 η 、透磁率 μ_0 、重力の加速度 g などが考えられる (図 17)。かくして次元解析的考察より液柱の長さ l は

$$\frac{l}{d} = f_1 \left(Re, N_{M\sigma}, N_{v\eta}, N_{\sigma 1}, \frac{M}{\bar{H}}, \frac{a}{d} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

液滴間距離は

$$\frac{x}{d} = f_2 \left(Re, N_{M\sigma}, N_{v\eta}, N_{\sigma 1}, \frac{M}{\bar{H}}, \frac{a}{d} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表せる。磁性流体の磁化の強さ M は $\bar{H}$ から前報⁽⁵⁾

$(d=1.36\text{ mm})$

図 16 $x/d-l/d$

図 17 記号の説明図

図 18 $l/d - \{(\sqrt{Re}) N_{\sigma 1} / N_{v\eta}\} (a/d)^{0.3} \{1 + (M/\bar{H})^{0.4} N_{M\sigma}\}$

図 19 $x/d - \{(\sqrt{Re}) N_{\sigma 1} / N_{v\eta}\} (a/d)^{-0.085} \{1 + (M/\bar{H})^{0.4} N_{M\sigma}\}$

の磁化曲線を用いて求めた。上式中の無次元量はそれぞれ以下の物理的意味を持っている。

$$Re = \frac{\rho_e v_a d}{\eta} \quad (\text{レイノルズ数})$$

$$N_{M\sigma} = \frac{M_0 M \bar{H} d}{\sigma}$$

$$= \frac{\text{磁気力}}{\text{表面張力による力}}$$

$$N_{vg} = \frac{\eta v_a}{\rho_1 d^2 g} = \frac{\text{粘性力}}{\text{重力}}$$

$$N_{\sigma 1} = \frac{1}{We} = \frac{\sigma}{\rho_1 v_a^2 d} = \frac{\text{表面張力による力}}{\text{慣性力}}$$

(We: ウェーバ数)

$$M/\bar{H} \quad (\text{磁性流体の磁気的性質})$$

$$a/d \quad (a: \text{磁場内のノズル長さ})$$

図18は磁性流体ジェットの液柱の長さ l を式(1)によって、図19は液滴間距離 x を式(2)によって整理したもので、図18より l/d の実験式として

$$\frac{l}{d} = 340 \left[\frac{\sqrt{Re} \cdot N_{\sigma 1}}{N_{vg}} \left(\frac{a}{d} \right)^{0.3} \right. \\ \left. \times \left\{ 1 + \left(\frac{M}{\bar{H}} \right)^{0.4} N_{M\sigma} \right\} \right]^{-0.24} \dots\dots\dots (3)$$

を得る。また図19より

$$\frac{x}{d} = 2.1 \left[\frac{\sqrt{Re} \cdot N_{\sigma 1}}{N_{vg}} \left(\frac{a}{d} \right)^{-0.085} \right. \\ \left. \times \left\{ 1 + \left(\frac{M}{\bar{H}} \right)^{0.4} N_{M\sigma} \right\} \right]^{0.194} \dots\dots\dots (4)$$

なる x/d の実験式を得る。

4. 結 論

非一様磁場の作用下に磁性流体を数種類のノズルより流出させ、そのジェット挙動、液柱の変形および液滴の生成について調べるとともに次元解析を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 磁場の強さの増加とともにノズル内の平均流速および液柱の長さは減少している。

(2) 磁場のこう配が大きいほどノズル内の平均流速の減少は少ない。

(3) 滑かな液柱の最小径は磁場の強さが大きくなるほど小さくなる。

(4) 液滴間距離 x は磁場内にノズル長さが長く入ったほうが広い範囲にわたっているのに対して、磁場にノズル長さが短く入っているほど液柱にかかわらずほぼ一定に近い。

(5) ジェットの液柱の長さ l および液滴間距離 x は Re , $N_{M\sigma}$, N_{vg} , $N_{\sigma 1}$, $M/\bar{H}$, および a/d に依存する実験式によって表される。

本研究は、昭和61年度文部省科学研究費の補助を受けた。付記して謝意を表わす。

文 献

- (1) 下飯坂, 日本レオロジー学会誌, 5 (1977), 95.
- (2) 金子, 潤滑, 22-8 (1977), 449.
- (3) Rosensweig, R. E., *Int. Sci. Tech.*, 55 (1966), 48.
- (4) 神山・下飯坂, 機誌, 88-799 (1985), 596.
- (5) 富田・ほか2名, 機論, 52-474, B (1986), 807.