磁性流体インクジェットプリンタに関する基礎的研究*

(第3報, サテライトについて)

石 橋 幸 男^{*1}, 富 田 幸 雄^{*2}
山 根 隆一郎^{*3} 進 邦 紀 夫^{*4}

Fundamental Study on a Ferrofluid Ink Jet Printer

(3rd Report, Satellite Formation)

Yukio ISHIBASHI, Yukio TOMITA,
Ryuichiro YAMANE and Toshio SHINBO

In this paper, the influence of various factors on satellite formation and the behavior of satellites are experimentally examined in a uniform satellite region in which satellites are released very regularly from the tip of a nozzle under nonuniform magnetic fields. For that purpose, the outside diameter of the nozzle (the inside diameter is constant) and the inside diameter of the nozzle (the outside diameter is constant) are widely varied. In addition, liquids having different values of density and surface tension are used. Then, various factors governing the appearance condition of the satellite and the satellite diameter are found by dimensional analysis. Furthermore, empirical formulae for dimensionless magnetic force per unit volume and dimensionless satellite diameter are given.

Key Words: Fluid Mechanics, Ferrofluid, Capillary Nozzle, Satellite Formation, Surface Tension, Magnetic Field, Viscosity

1. 結 言

磁性流体とはマグネタイト、ニッケル、コバルトなど強磁性体微粒子を界面活性剤で表面処理して液体中に分散させたコロイド溶液である。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、沈殿および分離が生じることなく見掛け上、液体自身が強い磁性を有するかのような挙動を示すため、磁気力を流体に加えることによって流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応用技術開発の研究が機械、電気、音響、化学、資源、電子、情報工学および医学などの各分野で活発に行われている。特に情報工学の発展に伴いワードプロセッサシステム、パーソナルコンピュータ用の各種プリンタやファクシミリなどのインクに磁性流体が用いられているが、これまでの磁性インクは磁氣的性質を利用しての液滴の方向制御に関連するものが多かった^{(1)~(4)}。前報⁽⁵⁾ではノ

ズル内、外径、磁気体積力および表面張力を広範囲に変化させ、液滴の生成の周期、液滴径などを調べた。ところでインクジェットプリンタは主滴の後に小径の液滴であるサテライトを発生し、ノズルヘッドの周辺や印刷される紙をよごしたり、記録の乱れなどの障害が生じている。またその一方ではサテライトを制御してより小さな液滴を利用するインクジェットプリンタなどが考えられている⁽⁶⁾が、サテライトがどのような条件で発生するのかについてはほとんどわかっていない状態である。

そこで本研究では細管ノズル先端に非一様磁場を印加させ、極めて規則的に放出される主滴に伴う規則的なサテライトの生成およびその挙動ならびにそれらに及ぼす諸因子の影響を調べる。そのために、ノズル外径(ノズル内径一定)、ノズル内径(ノズル外径一定)を広範囲に変化させると共に液体濃度、表面張力を変えて実験を行う。さらに次元解析を行なって、サテライトの発生条件、サテライトの径に大きく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

実験装置の概略を図1に示す。装置は液体供給部、圧力部、磁場作用部、ヘッド部および測定部から構成

* 原稿受付 平成3年10月16日。

^{*1} 正員、千葉職業訓練短期大学校(●286 成田市並木町221)。

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

^{*3} 正員、東京工業大学工学部(●152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*4} 正員、東京都立航空工業高等専門学校(●116 東京都荒川区南千住8-53-1)

されている。供試磁性流体は圧縮空気により液体タンクからノズルに供給される。ここで、磁性流体に磁場を印加すると、磁性流体はメニスカスを形成し、電磁石のほうに引かれる。細管ノズルは黄銅製で外径 d_o 、内径 d_i および長さ l_n はそれぞれ表1に示す。ノズル先端は管軸に直角に研磨してある。またノズル先端と電磁石の距離は $L=6\text{ mm}$ 一定とした。実験に使用した電磁石は全長 74 mm 、磁極径 122 mm のソレノイドコイルである。電源には定電流電源を用い、磁束密度 B は約 0.33 T まで連続的に変えることができる。ノズル先端と電磁石までの距離をノズル中心軸に沿って測定した磁束密度分布を図2に示す。供試磁性流体は蒸留水で重量濃度 17.5% A, 21 , 27 , 33% に希釈したものと表面張力を変化させるために、重量濃度が 17.5% 一定で界面活性剤を添加した 17.5% B, 17.5% C の合計6種類である。いずれも磁性微粒子は同一のマグネタイトを使用している。これらの液体の物性値を表2に示す。なお実験中、液温を一定 (25°C) に保つ

ように注意した。

3. 実験結果および考察

3.1 磁気体積力 励磁電流 I および磁性流体の濃度 ϕ を変化させた場合における電磁石-ノズル先端間 (ノズル中心軸に沿った) の距離 L と単位体積当たりの流体に働く磁気体積力 $F=|\mu_0(\mathbf{M}\cdot\nabla)\mathbf{H}|$ (μ_0 : 真空中の透磁率, $\mathbf{M}$: 磁化強さ, $\mathbf{H}$: 磁場強さ, F はこの式による計算値) の関係を図3に示す。図3より励磁電流が大きいくほど磁気体積力は大きくなっていることがわかる。また濃度が大きく、電磁石-ノズル先端間の距離 L が小さいほど磁気体積力も大きくなっているのが見られる。そして $\phi=17.5\%$ B, $\phi=17.5\%$ C の流体が 17.5% A のそれと同じ磁気体積力であることを確認してある。

3.2 流量 図4は重量濃度 $\phi=17.5\%$ A の磁性流体を用い、磁気体積力をパラメータとして背圧 P と流量 Q の関係を示したもので、両者は直線関係に

表1 ノズル寸法

Nozzle	d_i mm	d_o mm	l_n mm
I-1	0.20	0.53	4.0
I-2	0.20	0.63	4.0
I-3	0.20	0.69	4.0
I-4	0.20	0.80	4.0
I-5	0.20	1.08	4.0
O-1	0.26	0.69	4.0
O-2	0.30	0.69	4.0
O-3	0.36	0.69	4.0
O-4	0.41	0.69	4.0

表2 磁性流体の物性値

	Density kg/m ³	Surface tension N/m	Kinematic viscosity m ² /s
Water base			
33.0%	1.33×10^3	3.27×10^{-2}	6.33×10^{-6}
27.0%	1.26×10^3	3.30×10^{-2}	3.81×10^{-6}
21.0%	1.20×10^3	3.34×10^{-2}	2.57×10^{-6}
17.5%A	1.18×10^3	3.31×10^{-2}	2.13×10^{-6}
17.5%B	1.17×10^3	2.81×10^{-2}	2.17×10^{-6}
17.5%C	1.17×10^3	2.08×10^{-2}	2.17×10^{-6}
wt%			

- ① Electromagnet
- ② Ammeter
- ③ DC Power Supply
- ④ Nozzle
- ⑤ Flow Current Meter Tube
- ⑥ Stroboscope
- ⑦ Camera
- ⑧ Reservoir
- ⑨ Manometer
- ⑩ Air Tank
- ⑪ Compressor

図1 実験装置概略図

図2 磁束密度分布

ある。これらの直線が原点を通らないのは表面張力によって形成されるメニスカスにおける圧力増加分とそれに作用する磁気力のためである。他のノズル内径についての測定結果も同様である。またノズル内径一定でノズル外径を変えた場合はほとんど流量、背圧関係には変化がないことを確認してある。図5は背圧一定で磁性流体の濃度をパラメータとして磁気体積力 F と流量 Q の関係を示したものである。図4, 5より磁気体積力が増加すれば流量は増加し、磁性流体の濃度が高くなるほど一定の磁気体積力の下で流量は減少することがわかる。また表面張力を変化(17.5%A, 17.5%B, 17.5%C)させても、流量は変わらないことも確認してある。

図3 磁気体積力分布

(φ=17.5%A, ノズル 0-1)

図4 流量 Q -背圧 P

3.3 サテライトの発生 図6~8は磁性流体濃度 $\phi=17.5\%$ A でノズル 0-1 の場合におけるサテライト発生各状態その他を写真撮影したものである。図6は背圧 $P=0.49$ kPa, 磁気体積力 $F=15.4 \times 10^4$ N/m³ の場合で、図6から以下のことがわかる。ノズル先端においてメニスカスを形成し、大きな円体へと成長していく、そしてメニスカスにくびれが生じ、くびれは糸をひき、ちぎれて1個の独立した円体の液滴となる。その際、ノズル側に細長いメニスカスが存在し、それがくびれサテライトとなり主滴の後について電磁石の方に飛しょうして行く、これを前進サテライトとする。図7は背圧 $P=2.35$ kPa, 磁気体積力 $F=10.4 \times 10^4$ N/m³ の場合で、サテライトが発生するまでは図6と同じであるが、サテライト発生後にサテライトはノズル側の方に引きもどされ、メニスカスに引き込まれる。これを後退サテライトとする。図8は背圧 $P=2.94$ kPa 磁気体積力 $F=18.1 \times 10^4$ N/m³ の場合で前図と異なって液滴が生成せず液体のジェットとなっている。サテライトの発生状態を調べるために磁性流体濃度 $\phi=17.5\%$ A でノズル I-1, I-5 を用いて背圧 P と磁気体積力 F の関係を求めた結果を図9(a), (b)に示す。図9(a)よりノズル外径が小さい場合にはサテライトの後退は背圧に関係なく磁気体積力が小さくても発生することがわかる。そしてサテライトの前進は $F=12 \times 10^4$ N/m³ 以上になると背圧の低いところで発生している。また $F=12 \times 10^4$ N/m³ 以上における前進サテライトにおいて磁気体積力が大きくなると背圧は僅かであるが高くなっている。さらにこの場合には液体ジェットは発生しない。図9(b)よりノズル外径が大きい場合にはサテライトの前進、後退は磁気体積力が $F=5 \times 10^4$ N/m³ で発

(P=1.95 kPa, ノズル 0-1)

図5 流量 Q -磁気体積力 F

生し始まるが、前進サテライトは背圧の低いところから高いところまで広い範囲で、後退サテライトは背圧が高いところのみで発生しているのがわかる。前進サテライトと後退サテライトの境界は磁気体積力の増加と共に背圧も高くなっており、磁気体積力 $F=7 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ で背圧はピークになりそこで後退サテライトは終わっている。そしてさらに磁気体積力が増加すると新たに液体ジェットが発生、前進サテライトと液体ジ

ェットの境界は磁気体積力の増加と共に背圧が急に減少している。サテライトの発生に対するノズル外径の影響を調べるためにノズル内径 ($d_i=0.2 \text{ mm}$) を一定としてノズル外径を変化させた。図10はこの場合における背圧と磁気体積力の関係を示す。図10より前進サテライトと後退サテライトの境界は磁気体積力の増加と共に僅かであるが背圧も大きくなっており、そして一定の磁気体積力における、前進サテライトと後退サテライトの境界はノズル外径が大きくなるほど背圧も大きくなっている。これはノズル外径が大きくなれば磁性流体がノズル断面に広く付着するためと考えられる。これに対して図11はノズル内径の影響を調べるためにノズル外径 ($d_o=0.69 \text{ mm}$) 一定としてノズル内径を変化させたときの結果を示す。図11より内径が大きくなるにつれてサテライトの前進、後退の境界の背圧が低くなっているのがわかる。またいずれのノズル内径の場合でも磁気体積力が増加すればサテライトの前進、後退の境界の背圧が大きくなっていることがわ

($\phi=17.5\% \text{ A}$, $P=0.49 \text{ kPa}$, $F=15.4 \times 10^4 \text{ N/m}^3$, ノズル 0-1)

図6 前進サテライト

($\phi=17.5\% \text{ A}$, $P=2.35 \text{ kPa}$, $F=10.4 \times 10^4 \text{ N/m}^3$, ノズル 0-1)

図7 後退サテライト

($\phi=17.5\% \text{ A}$, $P=2.94 \text{ kPa}$, $F=18.1 \times 10^4 \text{ N/m}^3$, ノズル 0-1)

図8 ジェット

(a) $\phi=17.5\% \text{ A}$, ノズル I-1

(b) $\phi=17.5\% \text{ A}$, ノズル I-5

図9 サテライト発生状態図

かる。そしてその背圧の増加量は内径が小さいほど大きくなっている。なお内径が大きくなるほどサテライトの発生する磁気体積力の範囲が狭く、すぐに液体ジェットが現れる。これは内径が大きくなると共に流量が増加するためだと思われる。

表面張力がサテライト発生に及ぼす影響を調べるために磁性流体 (重量濃度 17.5%) に界面活性剤を添加し表面張力を変化させて実験を行った。サテライト発生状態を背圧と磁気体積力について調べた結果を図

($\phi=17.5\%$ A, ノズル 1-1)

図 10 サテライト発生状態におけるノズル外径の影響

($\phi=27\%$, ノズル 0-4)

図 11 サテライト発生状態におけるノズル内径の影響

12 に示す。図 12 よりノズル外径が小さい場合には、この程度に表面張力を変化させても、サテライト発生に対して著しい変化は見られないがノズル外径が大きくなると、磁気体積力一定の場合、表面張力の小さい方が背圧は大きくなっている。

3・4 前進サテライト 以下に實際上重要となる前進サテライト径に及ぼす諸因子の影響について調べた結果を述べる。

3・4・1 背圧, 磁気体積力の影響 図 13 は磁気体積力を一定として、ノズル外径を変化させた場合におけるサテライト径と背圧の関係を示す。図 13 より一定のノズル外径であれば背圧が大きくなるほど僅かであるがサテライト径は大きくなっているのが見られる。これは背圧が大きくなると、流量も増加するためと思われる。また一定の背圧に対してノズル外径が大きいほどサテライト径も大きくなる。図 14 はノズル径一定とし背圧をパラメータとしてサテライト径 D_s と磁気体積力 F をプロットしたものである。図 14 より磁気体積力が大きくなるほどサテライト径は僅かに大きくなっているが、これに対して主滴径は磁気体積力の影響によって著しく変化 (磁気体積力が大きくなると主滴は小さくなる)⁽⁵⁾ している。

3・4・2 表面張力の影響 表面張力のサテライト径に及ぼす影響を調べるために界面活性剤を添加し、表面張力を変化させて実験を行った。図 15 は表面張力をパラメータとしてサテライト径 D_s と磁気体積力 F の関係をプロットしたものである。図 15 より磁気体積

図 12 サテライト発生状態における表面張力の影響

力一定であれば表面張力が小さいほどサテライト径は大きくなっているのがわかる。これは主滴径の場合とは逆の傾向を示している。また一定の表面張力であれば磁気体積力が大きいほどサテライト径は大きくなっている。

3・4・3 ノズル内径の影響 ノズル内径の影響を調べるために、ノズル外径 ($d_0=0.69$ mm) を一定として実験を行なった。その結果、サテライト径 D_s とノズル内径 d_i の関係を磁気体積力 F をパラメータとして図 16 に示す。磁気体積力一定であれば、ノズル内径が大きいほどサテライト径が大きくなっている。これは背圧が一定であればノズル内径が大きいほど流量が増加するためと思われる。他の濃度に対しても同じ傾向にある。

3・4・4 ノズル外径の影響 ノズル外径の影響を調べるために、ノズル内径 ($d_i=0.2$ mm) を一定として、ノズル外径を変化させた。図 17 は磁気体積力をパラメータとしてサテライト径 D_s とノズル外径 d_0 の

関係を示す。図 17 よりノズル外径が大きくなるほどサテライト径が大きくなっていることがわかる。磁性流体メニスカスはノズル外径が大きいほどノズル端面に沿って広がるために長く引き伸ばされていき、サテライト径が大きくなるのではないと思われる。

3・5 次元解析的考察 実験結果を整理するに当たり、まず以下のような考察を行う。前進サテライトが発生する磁気体積力 F およびサテライト径 D_s に影響を及ぼす因子として、ノズル外径 d_i 、ノズル外径 d_0 、磁性流体の密度 ρ 、粘度 η 、表面張力 σ 、管内平均流速 v_a 、印加磁場の強さ H 、磁化による磁束密度 $P_s = \mu_0 \bar{M}$ が考えられる。ここで $\bar{M}$ は平均磁化強さ、 μ_0 は真空の透磁率を示す。これより前進サテライト発生時の磁気体積力およびサテライト径を支配する無次元量として以下のものが挙げられる。

$$We = \sqrt{\frac{\rho v_a^2 d_i^2}{\sigma d_0}} = v_a d_i \sqrt{\frac{\rho}{\sigma d_0}}$$

D_s ($\phi=17.5\%$ A, $F=6.77 \times 10^4$ N/m³)

図 13 背圧 P -サテライト径

($P=0.98$ kPa)

図 15 表面張力における磁気体積力 F -サテライト径 D_s

D_s ($\phi=21\%$, ノズル I-3)

図 14 磁気体積力 F -サテライト径

($\phi=21\%$, $P=0.49$ kPa)

図 16 ノズル内径 d_i -サテライト径 D_s

($\phi = 17.5\%A$, $P = 0.98 \text{ kPa}$)

図 17 ノズル外径 d_o -サテライト径 D_s

図 18 $F^* - k^{0.08} We^{0.023} Re^{0.15}$

$$\propto \sqrt{\frac{\text{慣性力}}{\text{表面張力による力}}}$$

$$k = \frac{d_i}{d_o} = \frac{\text{ノズル内径}}{\text{ノズル外径}}$$

$$Re = \frac{\rho v_a d_i}{\eta} \propto \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}}$$

ここで We , Re はそれぞれウェーバ数, レイノルズ数を示す。

よって前進するサテライト発生は無次元磁気体積力 F^*

$$F^* = \frac{F}{\frac{P_s H}{d_o}} = \frac{F d_o}{\mu_0 M H} = f_1(k, We, Re)$$

.....(1)

またサテライトの無次元液滴径 D_s^* は

$$D_s^* = \frac{D_s}{d_o} = f_2(k, N_m, We, Re) \dots \dots \dots (2)$$

ここで

$$N_m = \frac{P_s H d_o}{\sigma} = \frac{\mu_0 M H d_o}{\sigma} \propto \frac{\text{磁気力}}{\text{表面張力による力}}$$

と書き表すことができる。図 18 は前進サテライトが発生するときの無次元磁気体積力 F^* を整理した結果を示す。すなわち F^* の実験式として

$$F^* = 0.32 k^{0.08} We^{0.023} Re^{0.15} \dots \dots \dots (3)$$

が得られる。図 19 はサテライトの無次元液滴径 D_s^* を整理した結果を示す。これより

$$D_s^* = 0.23 k^{0.75} We^{0.012} Re^{0.15} N_m^{-0.46} \dots \dots \dots (4)$$

なる実験式を得る。

4. 結 論

磁性流体インクジェットの基礎的研究として細管ノズル先端に非一様磁場を作用させ、種々のノズル径を用い、また磁性流体の濃度および表面張力を変えてサテライトの生成過程およびその挙動を調べると共に次

図 19 $D_s^* - k^{0.75} We^{0.012} Re^{0.15} N_m^{-0.46}$

元解析的考察を行った。その結果以下のことが明らかになった。

(1) 発生するサテライトには前進サテライトと後退サテライトが存在する。

(2) ノズル外径 (内径一定) が大きくなるほど前進サテライトと後退サテライトの境界は磁気体積力の増加に伴い背圧も僅かに大きくなっている。また一定の磁気体積力の下ではノズル外径が大きいほど前進サテライトと後退サテライトの境界の背圧は大きくなっている。

(3) ノズル内径 (外径一定) が大きくなるにつれ前進サテライトと後退サテライトの境界の背圧は低くなっている。いずれの内径の場合でも磁気体積力が大きくなれば背圧も大きくなっている。

(4) ノズル内径, 外径および磁気体積力が大きいほど, また表面張力が小さいほど前進サテライト径は大きくなっている。

(5) 前進サテライトの発生する無次元磁気体積力 F^* は無次元数 k , We , Re に, サテライトの無次元液滴径 D_s^* は k , We , Re , N_m にそれぞれ依存する実験式によって表される。

文 献

- (1) Helinski, E. F., *IBM. Tech Discl Bull.*, **18**-4(1975), 1053.
  - (2) Fan, G. J., *IBM. Tech Discl Bull.*, **18**-4(1975), 1277.
  - (3) Fan, G. J., *IBM. Tech Discl Bull.*, **18**-8(1976), 2699.
  - (4) McCurry, R. E., *IBM. Tech Discl Bull.*, **19**-10(1977), 3075.
  - (5) 石橋・ほか3名, 機論, **55**-516, B(1989), 2253.
  - (6) 松田, 油圧と空気圧, **16**-3(1985), 18.
-