

平成22年 5月 26日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560343

研究課題名 (和文) パルス熱磁気駆動を用いた機能性インク吐出機構の研究

研究課題名 (英文) Ink jet mechanism by using thermo-magnetic effect and pulse heating

研究代表者

越本 泰弘 (KOSHIMOTO YASUHIRO)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：60314556

研究成果の概要 (和文)：

温度により飽和磁化の大きさが異なる磁性材料に温度特性を与えることにより発生する熱磁気効果を磁性流体で実現を目指す。この目的のため、効率的な発生力を得る磁極構造と液体粘度・流体の自発磁化の影響の定量化、塗料化するための磁性微粒子の実現性、微小領域で急速な熱分布を実現する加熱機構の検討を行い、熱磁気駆動による機能性インクの吐出機構を研究する。

研究成果の概要 (英文)：

To realize the novel liquid propulsion mechanism by using Thermo-magnetic effect of thermal sensitive magnetic material, relation between pumping force and the structure design of magnetic circuit, characteristics of magnetic fluid are studied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス電子機器

キーワード：熱磁気効果 磁気応力 磁性流体 粘性抵抗 マイクロトレンチ

1. 研究開始当初の背景

電子回路配線技術の一つとして、磁性や誘電特性、導電性などの機能性インクを用いて基板上に直接配線パターンを作成する技術が注目されている。これは、単なるパターンのみならずインクの選別により抵抗器・コンデンサ、さらには半導体素子など機能素子形成の可能性も持っている為、注目される技術である。機能性を活用する上で、実際にはす

でに出来ている回路への追加印刷や立体配線など、平坦性の悪い状況で稼働させる事が重要である。しかし、従来のインク駆動噴射では飛翔距離を長くするために液滴押し出し力を大きくすると液滴が分解飛散し微細印刷が困難となる。機能印刷を実現する上で液滴飛行距離の長い、換言すれば空中散乱の影響の少ない高比重液滴を高加速で射出する新しい技術が必要であった。

2. 研究の目的

液体の吐出圧力を高める方法として、均一磁界中にある磁性体の温度分布により磁性体自体に力(Maxwell 応力)が発生する熱磁気効果を利用して比重の大きな磁性流体をインクとして利用することを目的とする。その実現のための磁気回路構造、磁性流体の特性と吐出圧力の関係を明確にし、併せて瞬間的な微小領域の加熱機構を実現する。

3. 研究の方法

本研究では磁場を印加した平行チャンネルの磁性流体の一部を加熱することにより液体を吐出する圧力発生を目的とする。基本構造は図1に示すように、インク溜まりから狭いチャンネルを介して液滴を吐出する。圧力発生部分はチャンネル先端部にあり、チャンネルに発生する力が粘性力に打ち勝つことが不可欠であり、それぞれの発生力の見積もりが研究の第一歩となる。

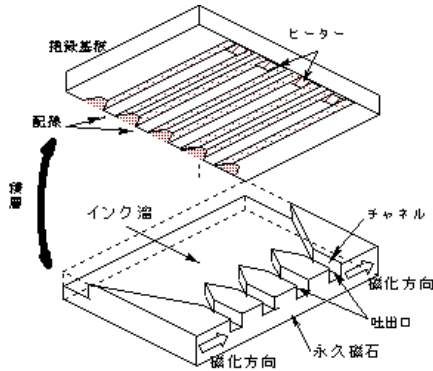


図1 吐出部の概念構造

この見積もりに有限要素法を用い、数値の妥当性を勘案しつつ磁極構造・磁性流体および勘案しつつ実験的検討を行った。

4. 研究成果

(1) 熱磁気応力の見積もり

解析すべき基本パラメータは、チャンネル幅(2a)、チャンネル長さ(L)の他にインク溜まりからノズルのチャンネルに導く構造がある。ここではチャンネルの長さL、インク溜まりからチャンネルに向かう構造をテーパ絞りとしたときのApex角 θ をもつ対称構造の磁気回路としてモデル化を行い、有限要素法を用いて発生力解析をおこなった。解析領域は0.5mm角の領域とし、ノズルの先端100[μ m]四方の領域を加熱した場合の発生力を求めた。磁極には飽和磁束密度0.45Tの磁性材料を用い、解析境界部分に配置した800KA/mの永久磁石により磁場を与え、磁性流体の磁化は15mTとした。解析結果を図3に示す。解析モデルを図2に示す。

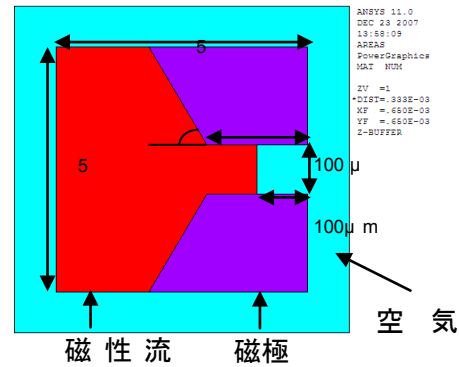


図2 解析モデル

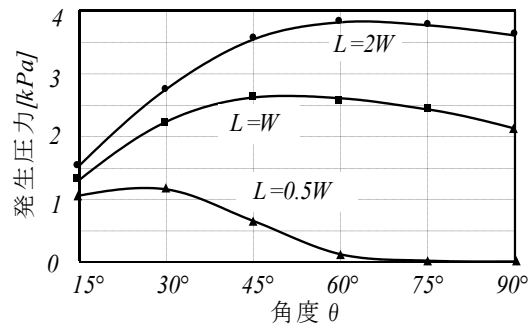


図3 発生圧力(解析結果) ($W=100 \mu$ m)

(2) 粘性抵抗見積もり

動粘性係数 η はチャンネルを円筒近似し、Poiseuille'sの式から、管の半径 a 、管の長さ l 、時間 t に流れる流体の体積 v とすると、流体を流すのに必要な圧力 P は以下の関係で表せる。

$$P = \frac{8\eta l}{\pi a^4} Q \quad (1)$$

水の10倍程度の粘度 $\eta=10 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ 、 $Q=4 \pi a^3/3 (\text{m}^3/\text{s})$ とした場合の管径 a ($w/2$)、チャンネル長 l の関係は図-4のようになる。

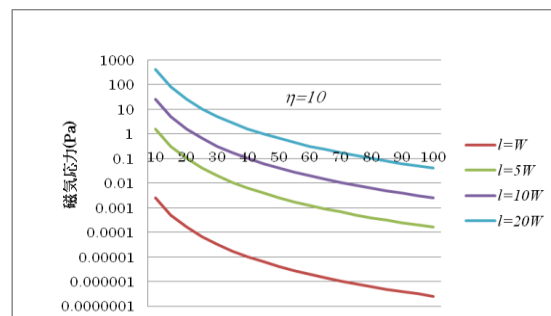


図4 チャンネル幅、チャンネル長さとの粘性抵抗力の関係

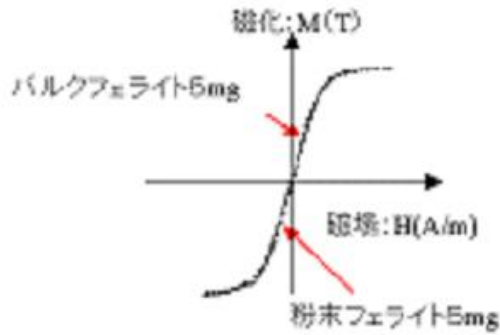
図3で求めた発生熱磁気応力から、粘性係数がトレンチ幅10 μ m($a=5 \mu$ m)程度までは粘性抵抗に抗して液体を吐出する発力を発生

させうることが可能であると判断できる。

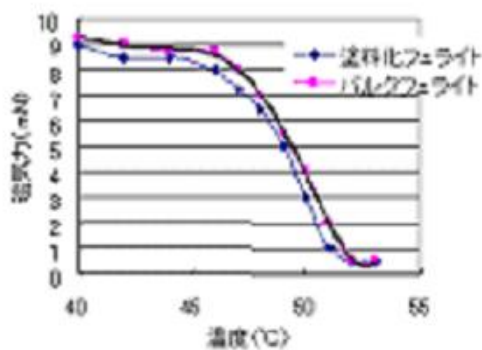
(3) 磁性流体の作成

熱磁気効果を発現させるには自発磁化が大きく、温度変化による磁化変化が大きく、かつ熱履歴によって材質変化のないことが要求される。本研究ではキューリー点が低く、温度による磁化変化の急峻なR型フェライトを用いることとした。

微粒子化はシンターして特性を制御したフェライトブロックを、ミルにより微細化し、フィルター処理して $1\mu\text{m}$ 以下とした粒子を界面活性剤に入れ、その後超音波拡散状態で分散させた。図5に塗料化した磁性流体と原材料のシンターフェライトの温度特性を示す。実測での平均粒径は $0.6\mu\text{m}$ 、室温での $M_s=0.32\text{T}$ 、 $T_c=52^\circ\text{C}$ で、微粒子化により磁化が3%ほど減少したが温度特性の劣化は観測されなかった。



(a) MH特性の変化



(b) 温度特性の変化

図5 微粒子化による特性変化

磁性流体化は破碎したシンターフェライトを一旦100メッシュの篩にかけ、通過粉を振動型ミルに約12時間掛けた後、ミルポッドにラウリル硫酸を添加してペースト状とした後、イソパラフィン液中に滴下し、超音波攪拌を行った。磁性流体の含有率は微粒子の特性劣化がないものと考え、磁化量から推定した。イソパラフィンには比重0.75、実験時の粘度約 0.75mPaS のものを用いた。

作成した磁性流体の粘度はオストワルド粘度計では測定できなかったため、ガラス吸着法で測定した結果、磁化量 30mT のもので 36mPa と、溶媒自体の粘度に比べて大幅に増加した。そこで、純水を溶媒として同じ界面活性剤処理をした微粒子を分散させたが、磁化量 25mT のもので約 30mPa と、いずれにせよ市販の磁性流体に比べて粘度が高くなった。市販の磁性流体の微粒子が数nmから 10nm と言われているのに比べ、今回試作した微粒子は温度制御を目的としたフェライト粉碎品であり、粒子は必ずしも円形ではないことも関係しているのかもしれない。いずれにせよ、熱磁気効果を発現できる磁性材料の微粒子化と分散処理が課題である。

(4) 磁気応力の確認

目的と異なる粘度の大きな磁性流体であるが、磁気応力には磁化量だけが関係するため、磁性流体をチャンネルに置いた状態で静水圧を印加して保持力を実測した。静水圧は磁性流体を導入後、インク溜に水を入れたポリエチレンパイプを接続し、さらにレギュレータで調圧した電動空気ポンプの圧縮空気を用いて印加した。チャンネルは78パーマロイ板で構成し、保磁力(公称) 620KA/m のNdFeB磁石でチャンネル内に平行磁場を与える構造である。

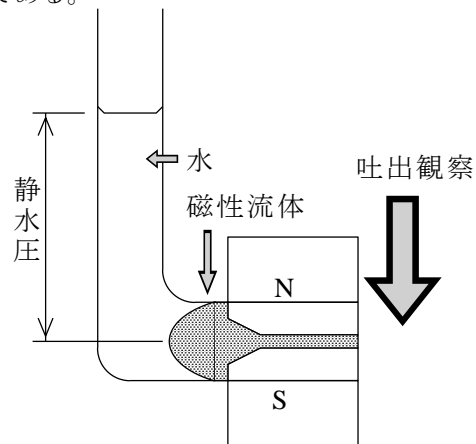


図8 保持限界圧測定の実験原理

試作したパーマロイチャンネルの幅は $10\mu\text{m}$ 、Apex角 60° 、チャンネル長さは $200\mu\text{m}$ であった。チャンネル内の磁界強度並びにその分布はチャンネル幅が小さすぎ、手持ちのガウスメータでは実測できなかった。

吐出観察には顕微鏡下で磁性流体の移動状況を観察するように準備したが実際には予想より簡単であった。静水圧をゼロから徐々に高めてゆき、臨界以上の静水圧が掛かると磁性流体全量が連続的に流出した。この結果、1回の測定ごとに静圧印加部の分解—磁性流体の挿入—パイプの再接続、という手

順が必要となり、実験回数を増やすことが出来なかった。

このようにして測定した結果、保磁力は70MPa±5MPaと、シミュレーション値38MPaに比べ大きな値が得られた。シミュレーションに比べ $L=20W$ とチャンネルが長いことの影響とも考えられるが、磁界強度が実測できていないためにその理由を解明できていない。より磁化と粘度の低い水ベースの市販磁性流体を用いてもその傾向は変わらないため、設計解析に比べ、磁界強度が大きくなっているものと推定される。

(5) 微小領域加熱による効果

先端部のみを急速に加熱する方法として薄膜抵抗加熱とレーザー集光加熱を検討した。薄膜抵抗ではパーマロイ磁極による接続不良が生じて再現性が取れなかったため、レーザー加熱を中心に行った。具体的には顕微鏡（ミットヨ VMU-L 対物 10X）を改造して同時観察しながら外部からのレーザー光を集光する構造とし、連続出力200mWの半導体赤色レーザー（波長 670nm）をパルス駆動した。焦点位置でのビームウェストは12 μ m、対物レンズ透過後のエネルギー130mWであった。

この実験系で熱磁気駆動を行ったが、想定していた連続吐出は行えず、最初の1滴のみが移動する結果になった。実験後、チャンネルを顕微鏡で観察した結果、インクの移動が遅く、インク溜まりから加熱部へのインクの注挿に時間がかかっている結果であった。

永久磁石を用いた保持力はマノメータ法で約7MPaと、磁極形状の改善前と同様に解析値(4.8MPa)を大幅に上回った。この理由を確認するため、非磁性材料（ガラス）で作ったチャンネルで同様に圧力測定をした結果、磁気保持をしないにもかかわらず2.5MPaの差圧が測定された。そこで、流体を油性磁性インク(2 $\times 10^{-2}$ PaS)から粘度の低い純水(10 \sim 3Pa.S)に変更して実験した結果、粘度を低減しても差圧が低減せず、液体の表面張力によりチャンネル内の流動が制限されていると判断できた。

この現象を解析した結果、均一磁場を発生させるために長い(200 μ m)平行チャンネルを形成した結果、流路抵抗が大きくなったことが原因であると判断し、チャンネル長さを40 μ mとしたサンプルではマノメータ実験で約3MPaと、解析値2.5MPaに近い値となった。このチャンネルを用いて熱磁気駆動した結果、光のパルス照射によっても液滴が分離して形成されることはなく、磁性流体がチャンネル口から垂れ出る結果となった。これは静的な測定値に比べ動的な応力が低いことを示唆する結果であり、原因はまだ不明であるが、高磁場中での磁性流体の粘性抵抗が計算値

と大きく異なることが想定されること、特にapex角部での磁場集中で磁性粒子が凝集する結果であると考えられた。再び磁場解析に戻って詳細な磁気力分布を行ったところ、Apex角部に磁場が集中する結果、磁性流体の凝集が起こりうる状況であることが分かった。界面活性剤の表面張力によって均一に分散した磁性粒子が不均一磁場の中で粒子間距離が短くなり、高濃度磁性流体となってApex部に集中する結果、粘性抵抗が増大していると考えられる。実験後に使用した磁性流体を顕微鏡観察した結果、図9に示すようにミル粉碎した微粒子形状が均一な球状でなく角張っていること、複数の粒子が集合した粒塊が存在していることがわかった。磁性流体の調整後には見られなかった凝集塊が磁場中で再形成されたものと考えられる。



図9 実験後の磁性微粒子像

この問題の解決のためにはより分散の良い界面活性剤の探索と磁気回路形状の更なる工夫が必要であること、磁力のさらなる向上と粘度の低い磁性インクの開発が今後の課題であることは明らかとなった。この解決のためにはより分散の良い界面活性剤の探索と磁気回路形状の更なる工夫が必要であること、磁力のさらなる向上と粘度の低い磁性インクの開発が今後の課題であることは明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

(1) 松葉、幹、越本「ナノホールを用いた機能性磁気細線」第14回知能メカトロニクスワークショップ 2009.9.26 和歌山市

(2) 村井、幹、越本「熱磁気効果による磁性インクポンプ」電子情報通信学会 2008年全国総合大会 2008.3.19 北九州学術研究都市

(3) 西村、岩田、幹、越本「静電加速を用いたインクジェットの検討」電子情報通信学会 2008 年全国総合大会 2008.3.19 北九州 学術研究都市

〔図書〕(計 1 件)

桑野、越本 他(共著) 株式会社テクノシステム「MEMS/NEMS 工学全集」ISBN 978-4-924728-59-2, 2009 pp.662-668

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称:「磁性流体用ポンプ」

発明者: 越本泰弘

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2008-230390

出願年月日: 平成 20 年 9 月 9 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.wakayama-u.ac.jp/~kosimoto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

越本 泰弘 (KOSHIMOTO YASUHIRO)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号: 60314556

(2) 研究分担者

石井 修 (ISHI OSAMU)

山形大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 80282234

三輪 昌史 (MIWA MASAFUMI)

徳島大学・大学院リサーチサイエンス研究部・

講師

研究者番号: 40283957

幹 浩文 (HAN HIROFUMI)

和歌山大学・システム工学部・助教

研究者番号: 20403363

(3) 連携研究者

()

研究者番号: