

スポットライト

～第11回「高校生・高専学生ポスター発表」最優秀賞～

外部磁場による磁性流体の スパイク形成の条件

兵庫県立姫路東高等学校

陰山麻愉 松田理沙 飯田凌央 石井 漸
永井 翔 中村賢矢 富士佳蓮

1. 研究目的

磁性流体の平面に対して上下方向に外部磁場を加え、磁性流体上に発生する磁力が臨界値に達すると、磁力線に沿って盛り上がり、図1に示すようなスパイクを形成する⁽¹⁾。本校は2022年3月から磁性流体の研究を始めた。2022年の研究では、磁性流体にさまざまな強さの磁場を加え、磁性流体の表面に形成されるスパイクの底面の形状や面積、スパイクの高さ、スパイクの数について研究を行い、次のことを明らかにした⁽²⁾。①スパイクは、磁性流体表面の磁力と表面張力、重力のつり合いによって形成される。②7～8 mTで生じた円形のスパイクは、外部磁場を強くしていくにつれて円形から六角形へと変化し、隣接するスパイクが磁性流体の表面張力によって接着する。接着面を上から見ると、スパイク間の最短距離を結ぶ直線が、磁性流体の酸化鉄超微細粒子間の斥力を失って六角形をなす。③さらに外部磁場を強めると、10 mT付近でスパイクは不安定化して五角形や七角形に崩れていく。

本研究では、過去の研究においては未解明であった以下の(1)～(4)を明らかにすることを目的とした。(1)磁石を磁性流体から遠ざけたり近づけたりすることにより、磁性流体にはたらく磁場を変化させた場合に、磁性流体に作用する磁力線の

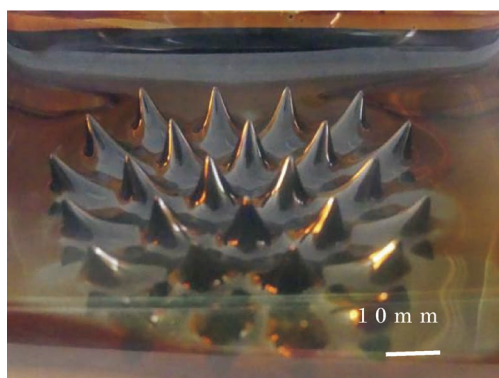


図1 磁性流体スパイク。(オンラインカラー)

密度(磁束密度)の変化、(2)スパイクが最初に形成される磁束密度およびスパイク初期形成位置、(3)磁性流体中の酸化鉄の含有割合(磁性流体の濃度)がスパイクの高さや形状に与える影響、および磁性流体濃度とスパイク形成臨界磁束密度の関係、(4)外部磁場を加える磁性流体の深さとスパイク形成挙動の関係。

2. 研究方法と結果

実験1：磁性流体にはたらく磁束密度の確認実験

磁性流体は、酸化鉄、イソパラフィン、イソステアリン酸を成分とする、シグマハイケミカル社製DS-50(見かけ密度1.40 mm³(20℃)、粘度97 mPa/s(20℃)、飽和磁化9 mT、濃度48%)を用いた。縦100 mm×横100 mm×厚さ10 mmのケニス社製角形フェライト磁石(140 mT)SQ100を1～3枚重ねて用いたため、磁石との距離による測定各点の磁場強度の増減の割合が一定であることを確認することにした。

磁性流体37 mlを内底面が86 mm×86 mmのスチロール樹脂製容器に入れ(深さ5.0 mm)、フェライト磁石を容器底面から遠ざけたり近づけたりして、形成されるスパイクを観察した(図2)。磁束密度の測定は、カネテック社製ガウスメーターTM-801(直流磁界標準分解能測定モード0～200.0 mTの分解能:0.1 mT, 精度±5% of rdg.+3 digit/200.1～3000.0 mTの分解能1 mT, 精度±5% of rdg.+10 digit)を用いた。測定回数は各168回である。

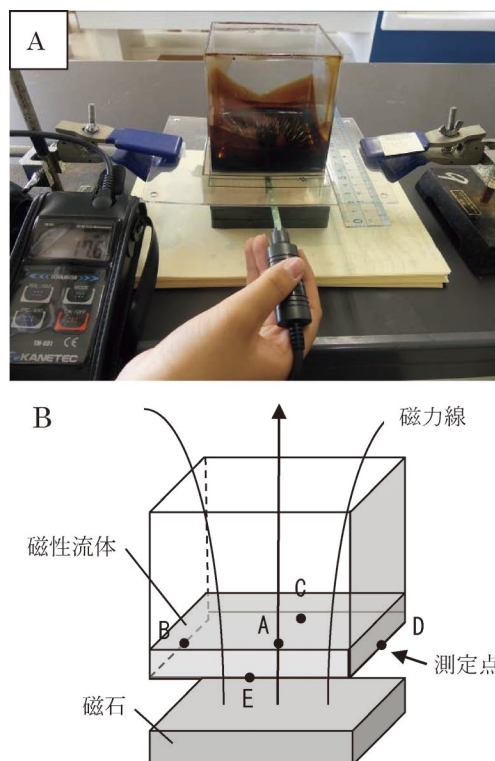


図2 磁力の測定の様子(A)と磁力の測定点A～E(B)。(オンラインカラー)

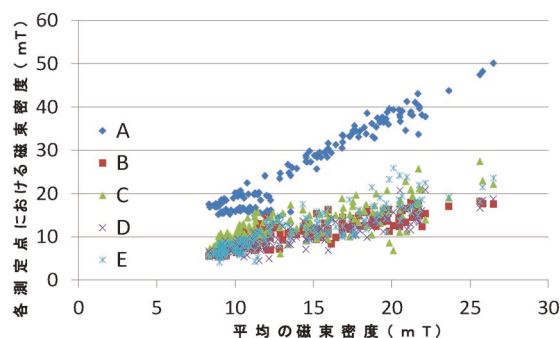


図3 平均磁束密度と各測定点の磁束密度。(オンラインカラー)

容器底面5か所で測定した平均の磁束密度と、各測定点における磁束密度はいずれの測定点においても、容器底面と磁石が近くなるほど磁束密度は大きく、磁石中央の測定点Aの磁束密度が最も大きいことがわかった。さらに図3より、平均の磁束密度と各測定点の磁束密度は直線関係にあることが明らかとなった。

実験2：磁性流体の濃度とスパイク形成の有無およびスパイクの高さ

磁性流体DS-50をイソパラフィンで薄めて、濃度が48%、27%、14%の磁性流体を作成した。それぞれの磁性流体に印加する磁場の強さを変化させて、スパイク形成の有無、スパイクが形成された場合にはその高さを測定した。中央および容器底面の合計5か所で磁束密度を測定し、その平均値を平均磁束密度とした。測定回数は、濃度が48%、27%、14%の磁性流体それぞれに対して36回、43回、49回である。

印加する磁場の強さを増加させていくと、磁束密度が最も高い中央部からスパイクが形成され始めた(図4)。この中央のスパイク1本の形成に注目して、スパイク形成に必要な磁束密度の臨界値を調査した。測定回数は、濃度48%、27%、14%の磁性流体それぞれに対して37回、43回、49回である。

磁性流体の濃度が48%では12 mT、27%では15 mT付近でスパイクが形成された(図5)。濃度が高いほどスパイクが形成される磁束密度が小さいことがわかった。スパイクの高さは濃度が低い方が低く、一度スパイクが形成されると、磁束密度を増加させてもスパイクの高さはほとんど変わらないことが明らかとなった。濃度が14%の磁性流体は、磁束密

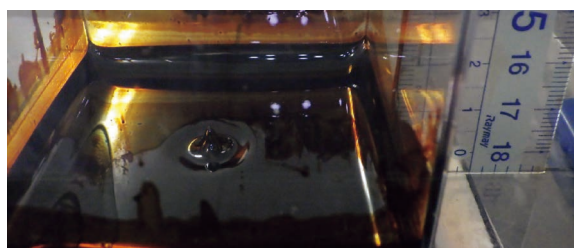


図4 最初に形成されるスパイク。(オンラインカラー)

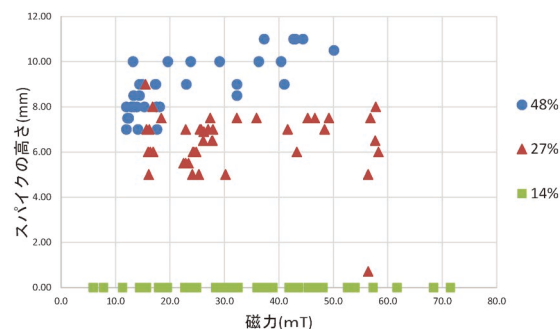


図5 磁性流体の濃度とスパイク形成の有無と高さ。(オンラインカラー)

度を71.5 mTまで増加させてもスパイクは形成されなかった。

実験3：磁性流体の深さとスパイク形成の有無

濃度48%の磁性流体について、内底面が86 mm×86 mmのスチロール樹脂製容器に入れる磁性流体の体積を変えて、深さが2.5 mm、5.0 mm、10.0 mmの3パターンを準備し、実験1と同様の手法で磁性流体に印加する磁場の強さを変化させて、スパイク形成の有無、および形成されたスパイクの高さを観察、測定した。実験2を補完するために、磁性流体の濃度も48%、27%、14%の3パターンを準備した。測定回数は磁性流体深さ2.5 mm、5.0 mm、10.0 mmそれぞれに対して48回、36回、43回である。

濃度48%の磁性流体は、磁性流体の深さが深いほどスパイクが形成されるために高い磁束密度が必要であるが、一度臨界値をこえてスパイクが形成されると、容易に底面が6角形や4角形のスパイクに変化した。深さが10.0 mmあれば、20 mTですでに4角形のスパイクが形成されている。また、深さが2.5 mmのときには磁束密度が10~20 mTの間でもスパイクの本数が変化するが、深さが5.0 mmでは10~50 mTで、深さが10.0 mmでは15~65 mTでスパイクの本数が変化した。さらに、スパイクの本数は、深さが浅い方が磁場の強さの影響を受けやすいことがわかった。スパイクが形成される際、深さが深いほどスパイクの初期高さは高く、底面積が大きい傾向が確認された。深さ2.5 mmでは、磁束密度が同程度でもスパイク底面積のばらつきが大きかったことが明らかとなった。

深さ5.0 mmで磁性流体の濃度を変えた場合、濃度が低いほどスパイク形成に必要な磁束密度が高くなる傾向が確認された。濃度48%と27%を比べると、27%のほうが4角形のスパイクが形成されるために高い磁束密度が必要であった。また、磁性流体濃度が低いほどスパイク高さも低い、底面積に有意な差は認められなかった。濃度48%、深さ2.5 mmおよび10.0 mmでは、スパイクの高さがほぼ一定だが、濃度48%、深さ5.0 mmでは、約20 mTまで磁束密度を増加させるにつれてスパイクは高くなり、20 mTよりも磁束密度を増加させてもスパイクの高さが11.0 mmより高くなることはなかった。

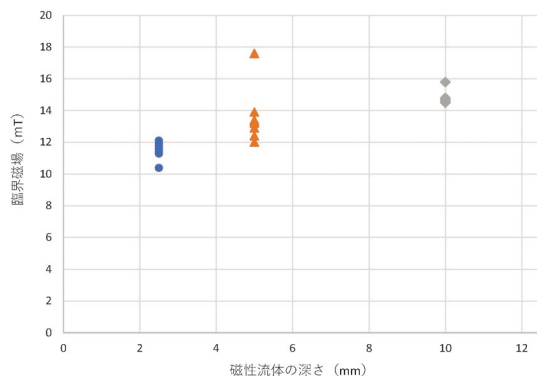


図6 磁性流体の深さと臨界磁力の関係(測定30回)。(オンラインカラー)

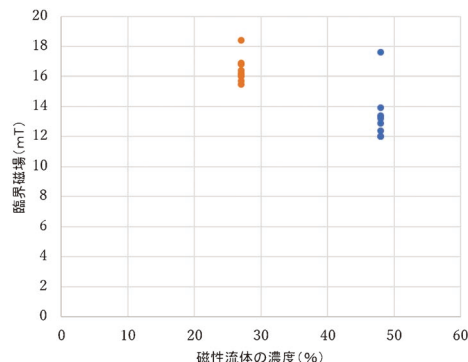


図7 磁性流体の濃度とスパイク形成における磁束密度の臨界値の関係(深さ 5.0 mm/測定20回)。(オンラインカラー)

3. 考 察

(1) 図3に示した平均磁束密度と各測定点における磁束密度の関係をみると、測定点Aとその他の測定点の磁束密度の差異はみられるものの、周辺部B～Eの磁束密度と平均の磁束密度はほぼ一致するため、磁性流体にはたらく磁束密度の高さに違いはなく、磁力線の向きはほぼ一定に保たれていると考えられる。また、微細粒子が周縁から中央部に向けて収束する磁界の影響を受けて、最初のスパイクは中央部に形成されることが考えられる。

(2) 濃度48%の磁性流体の深さとスパイク形成に必要な磁束密度の臨界値の関係を図6に示す。磁性流体の深さが深いほどスパイク形成に高い磁束密度が必要であった。磁束密度が臨界値をこえるとスパイクが形成され、その後は容易にスパイクの形が変化した。

また、磁性流体の濃度が高いほどスパイクが形成されるために必要な磁束密度は小さく、高いスパイクを形成することから、スパイクの形成には磁性流体の深さよりも濃度が重要な条件であることがわかる。磁性流体の濃度が低い(超微細粒子の密度が低い)と、外部磁場によって超微細粒子どうしが引き合う力が、表面張力と重力の合力よりも大きくなることができず、また粒子どうしが数珠つなぎになって構造をつくれるほど空間的に密でない。磁性流体の濃度が14%では外部磁場の強さにかかわらずスパイクが形成されないことか

ら、スパイク形成に関する磁性流体の臨界濃度は27%～14%の領域にあると考えられる(図7)。また、濃度27%の磁性流体のスパイク形成における磁束密度の臨界値は15.0 mTであり、濃度が高いほど臨界値は小さいことがわかる。

4. 今後の課題

磁性流体を入れる容器の形状や大きさはスパイクの高さに影響を及ぼさないことが、先行研究によって示されている⁽³⁾。しかし本実験では、磁性流体の容器内の深さがスパイクの形成に大きな影響を与えている。したがって今後の研究では、磁性流体を入れる容器の形状や大きさとスパイク形成挙動の関係についても明らかにする。

文 献

- (1) M. Cowley and R. Rosensweig: J. Fluid Mech, **30**(1967), 671–688.
- (2) 志村実咲, 菅原 楓, 陰山麻愉, 松田理沙: まてりあ, **62**(2023), 809–811.
- (3) 福田芳行, 堂原教義: 日本機械学会論文集, **66**(2000), 139–146.

(2024年7月22日受理)[doi:10.2320/materia.64.398]
(連絡先: 〒670-0012 姫路市本町68番地70)