

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760210

研究課題名（和文）高粘性液体中の強磁性を示す異物除去のための磁気分離装置の開発

研究課題名（英文）Development of magnetic separation system for removal of ferromagnetic impurity from highly viscous fluid

研究代表者

三島 史人 (MISHIMA FUMIHITO)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80558263

研究成果の概要（和文）：工業製品製造過程で、金属磨耗粉が高粘性流体中に混入することがある。この金属磨耗粉が製品の品質低下の要因となり、不純物の除去が求められている。しかし、媒質が高粘性であるために、有効な分離技術は確立されていない。分離対象粒子である金属磨耗粉は強加工されて強磁性を示すため、磁気力による分離が可能である。本研究では実用化を目指して、超電導磁石と磁気フィルタを用いた高勾配磁気分離システムの分離能力について、実験とシミュレーションから調べた。その結果、高勾配磁気分離法によって高粘性流体中の強磁性ステンレス粒子が分離可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：It is necessary to remove the metallic wear debris originating from manufacturing line in industrial plant dealing with highly viscous fluid. These impurities are difficult to separate from products with general separation technique because of high viscosity of the medium, and efficient separation technique is not established yet. These impurities can be separated from the medium with magnetic force. In this study, the separation ability of high gradient magnetic separation system with a superconducting magnet (HGMS) and magnetic filters was examined from experiment and simulation toward the practical use. As the results, the study shows that the removal of ferromagnetic SUS particle in highly viscous fluid is possible by HGMS.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：磁気分離，磁気科学

科研費の分科・細目：(分科) 電気電子工学，(細目) 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：高粘性，強磁性，超電導磁石，金属磨耗粉，磁気フィルタ，マルテンサイト変態，磁気分離

1. 研究開始当初の背景

高粘性流体の製品、また原料に高粘性流体を用いる製品製造過程で、不純物が高粘性流体中に混入することがあり、その不純物が製

品の品質低下を招くことが問題となっている。高粘性流体の製品、また原料に高粘性流体を用いる製品として、食品や、薬品、合成繊維原料、二次電池などの工業原料などが挙

げられる。近年、消費者の食の安全性への不安が高まっていること、また、工業製品の品質管理の要求されるレベルの向上に伴い、高粘性流体中に混入する不純物除去技術への工業的要求が高まっている。

高粘性流体を用いる製品製造過程で混入する不純物の大半は、粒径が $25\text{-}100\ \mu\text{m}$ のステンレス粒子である。これは、工場における製造ラインのほとんどが耐食性や耐熱性も良いステンレス仕様であり、ステンレスの装置可動部や配管接合部からステンレス磨耗粉が発生する。このような粒子が混入することで、食品ではクロム/ニッケルアレルギーを引き起こす原因となったり、工業製品の場合では、品質の低下を招いたり、不良品として廃棄されて歩留まり悪化の原因となっており、分離除去することが必要である。

2. 研究の目的

高粘性流体を用いる製品製造過程で混入する不純物の除去は、媒質が高粘性であるために、膜分離法や重力分離法などの一般的な分離技術が適用できず、今まで有効な分離技術は確立されていない。そこで本研究では、分離のための物質移動の推進力として分離対象粒子の磁氣的性質に着目した。製造ラインに使用されるステンレス鋼は、一般に SUS304、SUS316、SUS316L であることが多い。これらのステンレス鋼は、強い磁性をもたないが、分離対象粒子であるステンレス粒子は強加工されて、加工誘起マルテンサイト変態を起こして強磁性を示すため、磁気力による分離が可能である。

ステンレス粒子除去を高粘性流体から効率良く分離を可能とする磁気力を得るために、超電導磁石と磁気フィルタを用いた超電導高勾配磁気分離装置についての検討を行った。

3. 研究の方法

本研究では、磁場発生源として超電導磁石を用いた高勾配磁気分離システムを採用し、実験と粒子軌跡シミュレーションとから、今後の実用化システムへの設計指針を得ることを目指した。

(1) 分離実験

本研究での分離対象としては、工場における製造ラインのオーステナイト系ステンレスが装置可動部や配管接合部から強加工されて高粘性流体中に混入するものを想定している。そこでオーステナイト系ステンレスを冷間加工により、マルテンサイト変態させ、強磁性を示すステンレス粒子とした。また、媒質となる高粘性流体の模擬試料として、2種類の PVA(ポリビニルアルコール)を使用した。1つは、粘度 $1\text{Pa}\cdot\text{s}$ の市販の PVA 溶液を利用した。もう一つは、重合度約 2000 の

粉末の PVA、Polyvinyl alcohol 2000 (キシダ化学)を攪拌しながら常温の水に完全に溶解させ、粘度を測定し、粘度約 $10\text{Pa}\cdot\text{s}$ に調整したものを実験に利用した。

模擬試料として、高粘性液体に、強磁性ステンレス粒子を 0.1g/l の濃度で分散させ、磁気分離装置で分離する実験を行い、その分離率を測定した。分離結果として、誘導結合プラズマ原子発光分光分析装置 (ICPS-7500, Shimadzu Corp.)を用いて、媒質中の鉄イオンの濃度を測定し、分離率を求めた。その結果と次に示す粒子軌跡シミュレーション結果から精査し、装置の改良を行った。

(2) 粒子軌跡シミュレーション

超電導磁石と磁気フィルタを利用した HGMS で、分離対象粒子が磁気フィルタに捕獲される様子をシミュレーションし、そのデータを用いて分離率を算出した。磁気フィルタの最適化を行うことを見据え、フィルタ設計の指針を得ることを目的とし、粒子軌跡シミュレーションを行った。

高粘性流体中から強磁性粒子を除去する磁気分離を行う際に粒子に働く力は、主に磁気力とドラッグ力である。解析ソフトにて磁場解析、流体解析を行い、磁場分布と流速分布の解析結果から粒子に作用する力を求め、4次のルンゲ・クッタ法により時間発展で運動方程式を解き被分離粒子の軌跡を求めた。

4. 研究成果

(1) 磁気フィルタの重要性

$10\text{Pa}\cdot\text{s}$ の媒質を用いて、高勾配磁気分離 (HGMS) 実験を行った。比較のために $1\text{Pa}\cdot\text{s}$ でも実験を行った。

開放勾配磁気分離による管壁への粒子の捕捉 (分離) の効果について確認するため、磁場発生源には、超電導バルク磁石 ($4.5\ \text{T}$ in surface flux density, $600\ \text{mm}\ \phi \times 200\ \text{mm}$)を用いた。超電導バルク磁石による磁気フィルタ付近の磁束密度は $2\ \text{T}$ である。磁気フィルタとして、SUS430 製の線径 0.5mm のワイヤーを流路 (内径 10mm 長さ 50mm) に充填した。流速は 2mm/s とした。

分離結果として粘度 $1\text{Pa}\cdot\text{s}$ では、ほぼ全ての SUS 粒子を分離することができた。しかし粘度 $10\text{Pa}\cdot\text{s}$ 下では、66%の分離率であった。粘度の増加に伴い、 $1\text{Pa}\cdot\text{s}$ よりも分離率が大幅に小さくなった。

また、開放勾配磁場領域となる管壁に粒子は捕捉されない結果となった。超電導バルク磁石を用いたことにより (磁気フィルタ近傍の領域を除くと、流路下部の管壁が粒子に働く磁気力が最も強くなる領域である)、管壁への粒子の捕捉の効果が期待されたが、粒子は磁気力により磁気フィルタ表面に捕捉された。 $10\text{Pa}\cdot\text{s}$ の高粘性流体を媒質内から磁

気分離する本研究においては、流路形状より磁気フィルタの最適化を行うことが、分離率向上に必要な検討項目であることが示唆された。

(2) ソレノイド型超電導磁石を用いた高勾配磁気分離装置

ソレノイド型超電導磁石は高磁場領域が広く、磁気フィルタの充填領域部分（分離対象粒子の捕捉部）を大きく取ることができる。

ソレノイド型超電導磁石と磁気フィルタを用いた HGMS によって、どの程度の分離率が得られるのかを調べ、さらにフィルタ設計の指針を得るため、粒子軌跡計算を行った。

計算体系は、ソレノイド型超電導磁石のボア内に流路を配置し、流路内に磁気フィルタを配置している。流路は、管径 30mm である。磁気フィルタは SUS430 製とした。印加される磁束密度は、ワイヤが十分飽和磁化に達するように 2T とした。流速は平均流速 12mm/s とした。粘度は 10Pa・s として計算を行った。粒子は、ワイヤ中心から上流側に 2mm の位置から流した。磁気フィルタは 1 辺 1mm の角柱とした。この、ワイヤの断面について、粒子軌跡計算を行った。粒子軌跡計算の結果を、図 1 に示す。図 1 に示すように、ワイヤ角柱の太さに対してワイヤに捕獲される粒子の範囲を粒子捕獲範囲と定義した。流速が速いとドラッグ力が大きくなり、粒子捕獲範囲は狭くなる結果となった。また 10 Pa・s の粒子捕獲範囲は、1Pa・s と比較して 1/2~1/3 となった。粘度 10Pa・s での場合の磁気フィルタ設計を行うため、フィルタ枚数をパラメータとした計算を行った。粒子捕獲範囲からフィルタ枚数を変化させた条件で、分離率を算出した。その計算結果を図 2 に示す。

計算結果から、フィルタの枚数が 50 枚では、流速 2.5-10.0mm/s の速度域であれば分離率 99% であった。この結果に基づき、流速 7.5mm/sec にて、フィルタの枚数をパラメータとして高勾配磁気分離実験を行った。

磁気分離装置はソレノイド型超電導磁石ボア内に設置した磁気フィルタを設置し、高粘性流体を入れたタンクにコンプレッサーで圧力をかけることで、粒子懸濁液を装置に流すという設計になっている。装置分離部の内径は、粘度 1Pa・s での実験時は 50mm、粘度 10Pa・s での実験時は 30mm であり、装置の 470mm の長さである。実験に使用した磁気フィルタは SUS430 製、5 メッシュフィルタ、1 mm 四方の角柱とした。その磁気分離実験の装置を図 3 に示す。実験では図 3 右（上から 5、14、30 mesh）に示すようにさまざまなメッシュ数で検討を行ったが、メッシュ数を多くすると、圧力損失が大きくなるため、流せる最大流速を考慮し、5 mesh フィルタを使用しての検討を行うことにした。その実

験結果を図 4 に示す。

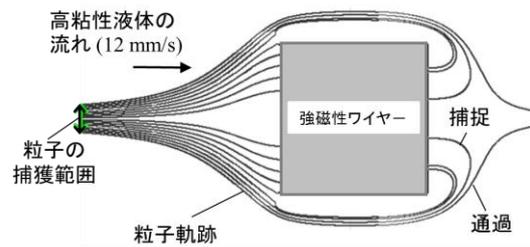


図 1. 高粘性流体中の強磁性粒子の粒子軌跡計算の一例（流速 12 mm/s）

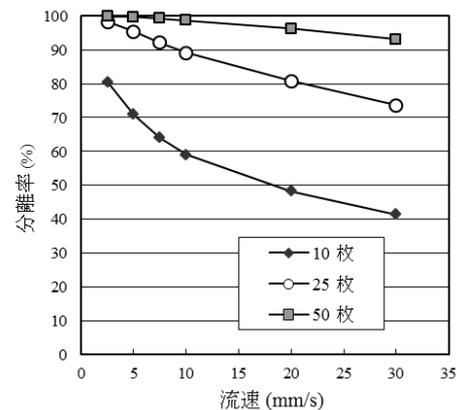


図 2. フィルタ枚数の検討

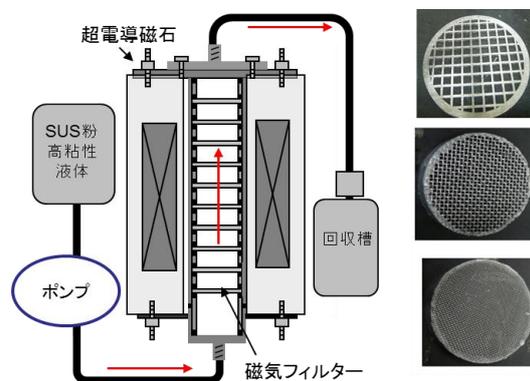


図 3. 磁気分離実験装置

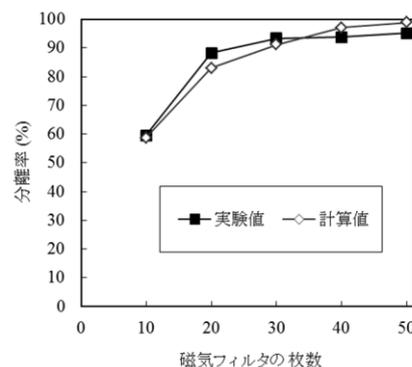


図 4. 10Pa・s の高粘性液体中からの磁気分離実験結果

フィルタ枚数 10 枚での実験での分離率が 60%弱であるのに対して、フィルタ枚数 40-50 枚程度では 95%と良好な分離率を得られることが実験から示された。実験と計算結果の値に若干の相違はあったが、その理由として、実験でのワイヤ付近の流速を計算値が完全には模擬をできていない点、また実験として圧力ポンプを用いているため、流速が完全には一致しない可能性などが考えられる。フィルタ 10 枚では計算値 64%、実験値 60%、フィルタ 50 枚では計算値 99%、実験値 95% となり、実験値と計算値が良好な一致を示し、本計算により、磁気フィルタの構成を計算より設計可能であることが示され、設計した磁気分離装置によって 10 Pa・s の高粘性流体中から、SUS 摩耗粉の除去（分離）が可能であることが示された。

(3) メッシュ数による分離能力の検討

フィルタのメッシュ数を 5 から 10mesh にした時の分離率の計算値を表 1 に示す。この時の流速は 7.5mm/s、フィルタ枚数 10 枚とした。この結果より、メッシュ数が 5mesh では分離率は 59%であったが、10mesh では分離率 81%となり、mesh 数を増加させることによる分離率向上効果を推定することができた。実際には圧力損失を考慮しつつメッシュ数を操作する（ワイヤ形状なども考慮する）ことによって、分離物質分離率向上は十分可能であると考えられる。

表 1 メッシュ数を変化させた分離率

メッシュ数 (メッシュ)	分離率 (%)
5	59
6	65
7	70
8	74
9	78
10	80

(3) ワイヤ断面形状による分離能力の検討

実用化に向けて、粒子軌跡シミュレーションを用いてワイヤの断面形状の違いによる分離能力の比較を行った。断面形状は、正方形(1mm×1mm)、円形(直径 1mm)、ひし形(1mm×1mm)とした。流速は 40mm/s、印加磁場は 2T とした。分離対象粒子は実験で使用した強磁性を示す SUS304 粒子とした。それぞれの形状のワイヤ表面の中心下方での磁場勾配を図 5、粒子軌跡の結果を図 6 に示す。粒子捕獲範囲が広さは、正方形 > 円形 > ひし形となった。正方形が最も粒子捕獲範囲が広がった理由は、磁場勾配が正で粒子を

捕獲する領域が最も広いこと、流れに対して垂直に面が多く、流速が小さい領域が広いことが挙げられる。正方形、円形では正面で捕捉されなかった粒子がワイヤの後方部にも捕捉されている。一方、ひし形では捕捉されなかった。これは、粒子がワイヤ後方に周りこんだ際に、ひし形の場合は、フィルタの後方部も磁場勾配が正で粒子を捕獲可能な領域が小さいためであると考えられる。図 5 よりワイヤ表面の最大の磁場勾配はひし形が最も大きい、磁場勾配が高い領域が狭いため粒子捕獲範囲の増加につながっていないと考えられる。以上のことから、ワイヤ断面形状は正方形が最も粒子分離能力が高いことがわかった。しかし、実用化するには圧力損失も考慮する必要がある。それぞれの形状の圧力損失は、正方形が 229Pa、円形 155Pa、ひし形が 141Pa となった。正方形の粒子捕獲能力は高いが、流れに対して垂直に面があるために圧力損失が他の 2 つと比較して 50%程度高くなった。そのため、粒子捕獲範囲と圧力損失によるフィルタの消耗のバランスから考えると、円形が最も実用化に適していると考えられる。

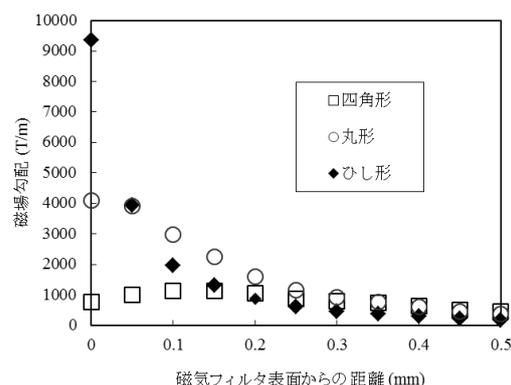


図 5. 磁気フィルタ形状と磁場勾配の関係

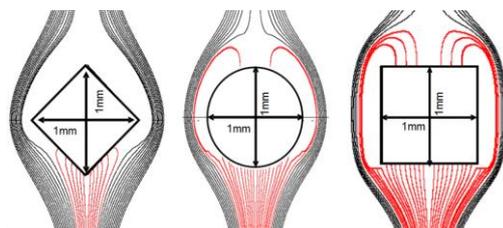


図 6. 磁気フィルタの粒子軌跡 (3 形状)

(4) まとめ

実験と粒子軌跡計算により、粘度 10Pa・s の高粘性流体中からの強磁性 SUS 粉の磁気分離の可能性を検討した。粒子軌跡計算により、粒子捕獲範囲を調べ、その値より、実験装置を想定した分離率を算出し、本実験条件では今回使用したフィルタの枚数が 50 枚程度で良好な分離率を得られた。計算と実験は

ほぼ一致し、本シミュレーションを用いて、要求される分離率に達する装置を設計可能なことが示されたと考えられる。

本研究により、超電導磁石を用いた高勾配磁気分離法によって、粘度 $10\text{Pa}\cdot\text{s}$ の高粘性流体中の強磁性ステンレス粉を分離除去可能であることが示された。

今後は実用化に向けて、圧力損失低減のためのフィルタ形状やフィルタの耐久性についての検討も行う必要があると考える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. F.Mishima, S.Hayashi, Y.Akiyama and S.Nishijima: "Development of a superconducting high gradient magnetic separator for a highly viscous fluid", IEEE Trans. Appl. Supercond. (2012), Accepted, (査読有)
2. S.Hayashi, F.Mishima, Y.Akiyama and S.Nishijima: "Development of superconducting high gradient magnetic separation system for highly viscous fluid for practical use", Physica C 471 (2011) 1511-1515 (査読有)
3. S.Hayashi, F.Mishima, Y.Akiyama, and S.Nishijima: "Study on High Gradient Magnetic Separation for Selective Removal of Impurity from Highly Viscous Fluid", IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 2055-2058 (査読有)
4. S.Hayashi, F.Mishima, Y.Akiyama and S. Nishijima: "Development of high gradient magnetic separation system for removing the metallic wear debris to be present in highly viscous fluid", Physica C 470 (2010) 1822-1826 (査読有)
5. S.Hayashi, F.Mishima, Y.Akiyama and S.Nishijima: "Development of High Gradient Magnetic Separation System for a Highly Viscous Fluid", IEEE Trans. Appl. Supercond. 20 (2010) 945-948 (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

1. F.Mishima, Y.Akiyama, S.Hayashi and S.Nishijima: Development of a superconducting high gradient

magnetic separator for a highly viscous fluid, 22nd International Conference on Magnet Technology, (14 September, 2011, Parc Chanot congress center, Marseille, France.) 3FP1-5

2. 三島史人, 林信吾, 秋山庸子, 西嶋茂宏, 高粘性流体用の超電導高勾配磁気分離装置の設計, 第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会, (2011 年 5 月 18 日, つくば市, 物質・材料研究機構.) 1B-a07
3. 林 信吾, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏, 実用化に向けた高粘性流体のための超電導高勾配磁気分離装置の開発, 第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会, (2010 年 12 月 1 日, かがしま県民交流センター) 1B-a08
4. S.Hayashi, F.Mishima, Y.Akiyama and S.Nishijima: Development of Superconducting High Gradient Magnetic Separation System for Highly Viscous Fluid for Practical Uses, 23rd Interantioanl Symoposium on Superconductivity, (3 November, 2010, Epochal Tsukuba, Tsukuba,Japan.) SAP-80
5. S.Hayashi, F.Mishima, Y.Akiyama and S.Nishijima: Study on High Gradient Magnetic Separation for Selective Removal of Impurity from Highly Viscous Fluid, Applied superconductivity conference 2010, (5 August, 2010, Omni Shoreham Hotel, Washington, D.C. USA) 4LPB-03
6. 林信吾, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏, 高粘性流体からの不純物の選択的分離のための高勾配磁気分離の研究, 第 9 回 2010 磁気力制御・磁場夏の学校, (2010 年 09 月 4 日, 東京都渋谷区国立オリンピック記念青少年総合センター.) P-12
7. 林 信吾, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏, 高勾配磁気分離を用いた高粘性流体中の不純物除去のための研究, 2010 年度春季低温工学・超伝導学会, (2010 年 05 月 12 日, 川崎市産業振興会館.) 1C-a01

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三島 史人 (MISHIMA FUMIHITO)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 80558263