

平成21年 6月 9日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2006～2008
課題番号：18560163
研究課題名 (和文) 磁気機能性流体中微粒子が形成するメゾスケール構造
研究課題名 (英文) Meso-scale structure of suspended particles in magnetic functional fluids
研究代表者 井門 康司 (IDO YASUSHI) 名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授 研究者番号：40221775

研究成果の概要：磁性流体や MR 流体などの磁場に応答する液体である磁気機能性流体中でミクロンサイズの強磁性粒子あるいは非磁性微粒子が形成する構造を可視化することは困難であるが、これを単純化されたストークス動力学法による数値解析を用いて明らかにした。印加磁場方向への鎖状クラスター形成割合を示す接触係数などを用いて統計的に構造を調べた。また、磁気混合流体による研磨過程での砥粒などの粒子の挙動を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,100,000	0	2,100,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	390,000	3,790,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：機能性流体, 磁性流体, MR 流体, クラスター, 粒子法, ストークス動力学法, 磁気混合流体

## 1. 研究開始当初の背景

磁場に応答する機能性流体として磁性流体, MR 流体, 磁気混合流体があるが, これらに磁場を印加するとメゾスケール構造 (強磁性体微粒子によって形成されるクラスターなど) が形成され, 流体の特性に大きな影響を与えていることが知られている. このようなメゾスケール構造を考慮した基礎方程式系は未だ提案されていない. また, 粒子法やモンテカルロ法などによる数値解析では主として静的, あるいは定常場における粒子

の配向状態を取り扱っており, 動的な応答解析を行っているものはほとんどない. また, 磁気混合流体については静的な定常場での粒子の配向状態も明らかになっていない.

## 2. 研究の目的

本研究ではストークス動力学法に基づく粒子法による解析を行う. 長期的には磁気機能性流体中のメゾスケール構造がマクロな流れ場に与える影響やクラスター生成・崩壊を含めたメゾスケール構造の応答や変化に

についてデータベースを構築し、これを利用してメソスケール構造を考慮した磁気機能性流体の基礎方程式系の導出を計画している。短期的にはメソスケール構造とマクロな現象との相関関係を明らかにすることを構想している。特に、磁気混合流体中の微粒子が形成する構造の解明、磁気機能性流体の流れ場とメソスケール構造の相互作用、特に非定常流や変動磁場下における動的特性を解明すること、および流れ場とメソスケール構造が磁気機能性流体研磨に対して果たしている役割を解明することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1)MR 流体中のマイクロサイズ強磁性粒子と非磁性粒子が形成するメソスケール構造を、ストークス動力学法を単純化した粒子法を用いて解析を行った。粒子の挙動は、運動方程式と角運動量方程式で記述される。粒子に作用する力として、粒子が持つ磁気モーメントによる磁気双極子相互作用力、流体からの粘性力、DLVO 理論に基づく斥力およびブラウン力があり、粒子に作用するトルクとして磁気双極子相互作用トルク、印加磁場による磁気トルクおよびブラウントルクがある。本解析では MAGIC(MAGnetic Intelligent Compound) 砥石の製作過程を想定した解析を行った。接触係数、Christiansen の均一性係数などを用いて、粒子が形成する構造を定量的に評価した。

(2)磁気混合流体中でマイクロサイズ強磁性粒子と非磁性粒子が形成するメソスケール構造について粒子法を用いた解析を行った。ここで磁気混合流体を、磁化を有する連続体として取り扱う磁性流体とマイクロサイズの強磁性粒子の混合流体としてモデル化した。この場合、磁性流体中の強磁性粒子および非磁性粒子は共に、磁性流体に対して見掛けの磁化を有する粒子となる。(1)の場合と同様に、接触係数や均一性係数などにより、粒子が形成するメソスケール構造を定量的に評価した。

(3)磁気混合流体を用いた研磨過程におけるマイクロサイズ強磁性粒子と非磁性砥粒の挙動について、粒子法を用いた数値解析を行い、研磨過程における粒子の挙動を明らかにした。磁気混合流体の取扱は(2)の場合と同様である。本解析では磁極間に挟まれた円管内部を研磨する場合を想定し、MR 流体や磁性流体を使用した場合の非磁性砥粒の挙動との比較検討を行った。

(4)流体の流れ場は差分法を、粒子の運動は粒子法をそれぞれ用いて計算し、流体と粒子の相互作用を考慮して解析する Hybrid 粒子法

を開発した。解析例として、ER 流体の振動せん断流を取り上げ、マイクロサイズ粒子のクラスター形成と崩壊過程について明らかにした。

### 4. 研究成果

ここでは得られた成果から抜粋し、いくつかについて示す。

#### (1)MR 流体中の微粒子が作るメソスケール構造

MR 流体中にはマイクロサイズの強磁性粒子が含まれているが、それにさらにマイクロサイズの非磁性粒子を加えた場合、印加磁場下で形成される粒子によるメソスケール構造を粒子法で解析した。図1に計算結果の例を示す。この場合、各方向には周期境界条件を適用している。図1は強磁性粒子と非磁性粒子の粒子径と体積分率が同じ場合の結果で、粒子全体の体積分率は32%である。図1から明らかなように、磁場を印加すると強磁性粒子が磁場方向に鎖状に整列し、クラスターを形成している。図1(b-2)から、強磁性粒子のクラスター同士が結合し壁のような構造を形成していることがわかる。一方非磁性粒子は、強磁性粒子の間隙に入り込むような形で、初期状態よりも磁場方向に再配列されているものと考えられる。これを定量的に評価するため、接触係数を用いて調べた。接触係数は、磁場方向に対象粒子のすべてが鎖状クラスターを形成している場合の磁場方向粒子接触点数に対する実際の磁場方向粒子接触点数の割合を示したもので、1に近いほど鎖状クラスターの形成割合が大きいことを示す。図2に本解析における接触係数  $C_v$  の結果を示す。横軸は全粒子の体積分率に対

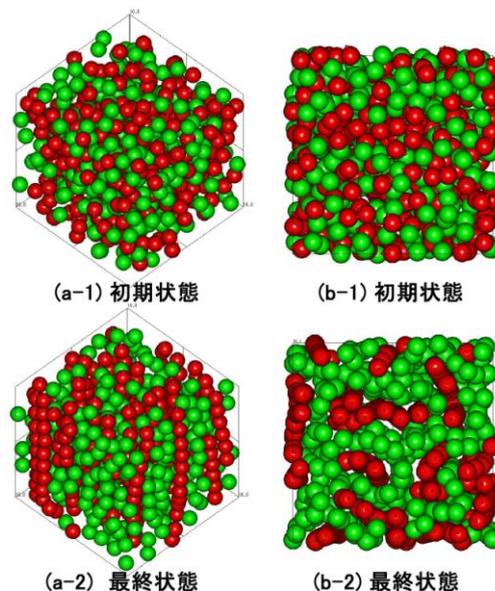


図1 MR 流体中微粒子の配向状態 (赤球：強磁性粒子，緑球：非磁性粒子)

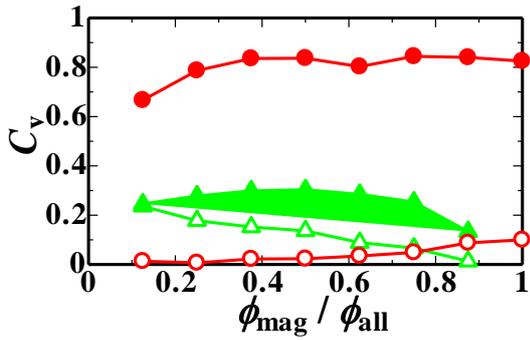


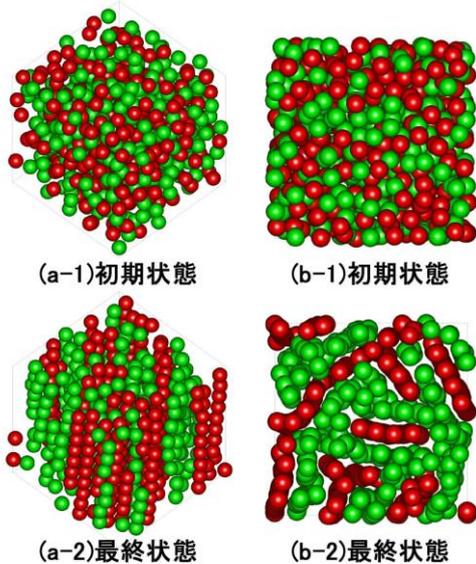
図2 MR流体中粒子の接触係数

する強磁性粒子の体積分率で、縦軸が接触整数である。図2より、強磁性粒子の場合は明らかに磁場方向に鎖状クラスターを形成していることがわかる。それに対して、非磁性粒子は、強磁性粒子の体積分率がある程度大きい場合に磁場方向に再配列されていることがわかる。

MR流体中で強磁性粒子が形成するメソスケール構造の解析を行った結果は過去に多く報告されているが、非磁性粒子を混合した場合についての報告は著者に知る限り国内外とも見あたらない。また、本解析結果はMAGIC砥石の製作過程を想定しており、必要な特性を有する砥石を作製するための条件を明らかにするため、重要な知見を与える者である。

(2)磁気混合流体中の微粒子が作るメソスケール構造

磁気混合流体は磁性流体にマイクロサイズの強磁性粒子を混合したものである。これに非磁性粒子を混入させ、一様印加磁場を与えた場合にマイクロサイズ粒子が形成するメソスケール構造の解析を行った。図3は計算結果の一例である。磁気混合流体の場合、



MR流体の場合とは異なり、非磁性粒子も流  
図3 磁気混合流体中粒子の配向状態  
(赤球：強磁性粒子，緑球：非磁性粒子)

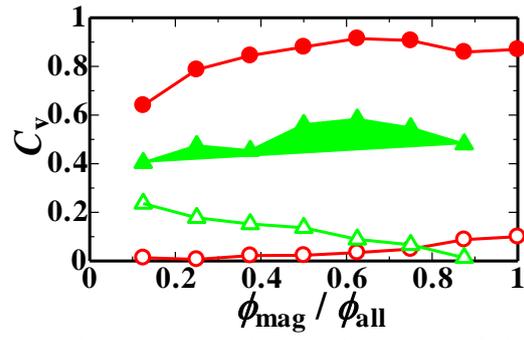


図4 磁気混合流体中粒子の接触係数

体（磁性流体）に対して見かけの磁化を持っているため、磁場印加によって磁気双極子相互作用が働く。このため、図3からもわかるように、強磁性粒子のみならず非磁性粒子も印加磁場方向にクラスターを形成していることがわかる。MR流体の場合と同様に、これを定量的に評価するため、接触係数による解析を行った。図4に接触係数を示す。図4より、強磁性粒子・非磁性粒子ともに磁場印加により磁場方向に鎖状クラスターを形成することがわかる。特に非磁性粒子は図2のMR流体の場合と比較すると、鎖状クラスターの形成割合が大きい。これは非磁性粒子も見かけの磁化を持つため、磁場方向に再配列しやすいためであるが、強磁性粒子と比較すると鎖状クラスター形成割合が小さいのは、強磁性粒子に比べて非磁性粒子の見かけの磁化が小さいためである。その結果、まず強磁性粒子が鎖状クラスターを形成し、その後、その間に非磁性粒子がクラスターを形成することになる。

本解析は、磁気混合流体中の微粒が形成するメソスケール構造を初めて明らかにしたものである。国内外ともこのような解析結果および可視化の報告はない。流体内で形成されるメソスケール構造がマクロな特性に大きな影響を与えていることから、今後、このような磁気混合流体を利用した応用開発において重要な基礎的知見を与えるものと考えられる。

(3)磁気混合流体を利用した研磨過程における微粒子の挙動

富山高専の西田教授らによって提案されている磁気混合流体を利用した研磨過程における強磁性粒子と非磁性砥粒の挙動を明らかにするため、粒子法による解析を行った。図5は西田教授らによる実験装置に基づいて設定した解析モデルである。ただし、円管の大きさは計算負荷の関係上、かなり小さくなっている。円管内に磁気混合流体と非磁性砥粒の混合流体が充填されており、図のように外部から非一様磁場を印加する。さらに円管を一定角速度 677rpm で回転させる。円管の回転は中心からの距離に比例した大きさを持つ円周方向の流速を与えることによ

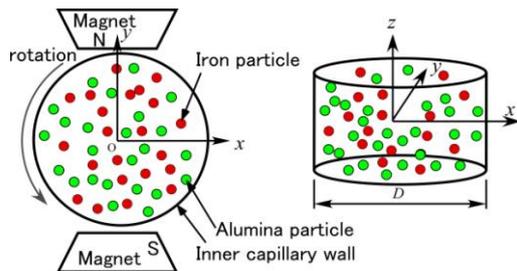


図5 磁気混合流体研磨の解析モデル

て表現した。円管の直径は強磁性粒子径の30倍、管軸方向の長さは15倍とし、管軸方向には周期境界条件を設定した。磁気混合流体として、ケロシンベース磁性流体にカルボニル鉄粉を強磁性粒子として加え、非磁性砥粒としてアルミナ粒子を想定し、印加磁場として最大で70mTとなる磁場を想定した。強磁性粒子と非磁性砥粒の径はともに同じものとし、 $1.1\mu\text{m}$ 程度のものでした。

以上のような条件で、(a)強磁性粒子を491個、非磁性砥粒を982個(体積分率比1:2)とした場合、(b)強磁性粒子を208個、非磁性砥粒を1265個(体積分率比1:6)とした場合の計算結果の一例を図6に示す。図6は初期状態でランダム分散していた粒子に磁場を印加し、その後円管を回転させ始めてから4周期半経過した時点での粒子分布を示している。図6より、強磁性粒子が二つの磁極間に形成した鎖状クラスターを取り巻くように、非磁性砥粒によるクラスターが形成されていることがわかる。このようなメゾスケール構造は、円管が回転していてもほとんどくずれない。ただし、図6(b)のように強磁性粒子の体積分率があまり大きくない場合、非磁性砥粒が形成するクラスターの一部分が両磁極間で形成されている大きなクラスターか

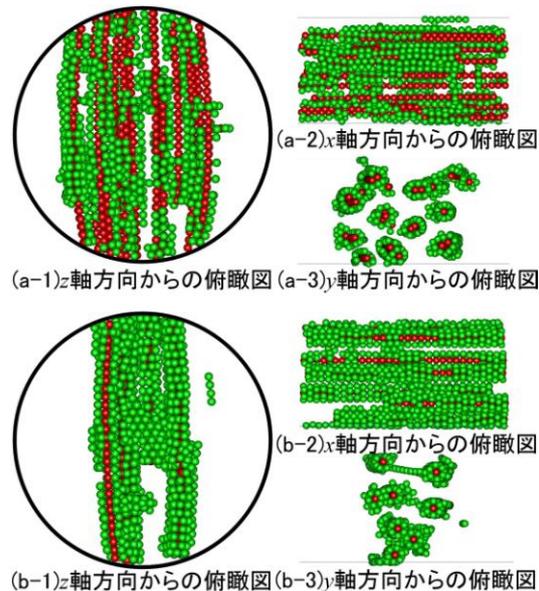


図6 磁気混合流体研磨過程の粒子分布 (赤球：強磁性粒子，緑球：非磁性砥粒)

らはがれ、円管の回転に伴う流れに乗って再び大きなクラスターに吸収される。

本解析結果、磁気混合流体研磨においてミクロンサイズの強磁性粒子と非磁性砥粒の動的挙動を初めて明らかにしたものである。これまで、このような磁気混合流体を利用した研磨では現象論的に研磨は出来るものの、その原理については明らかになっていなかった。本解析結果、および今後の解析により、磁気混合流体研磨におけるミクロレベルでの研磨機構の解明が進むものと考えられる。

#### (4) Hybrid 粒子法の開発

流体の運動はHSMAC法を、粒子の運動は上述の前述の粒子法をそれぞれ用いて計算し、流体-粒子間の相互作用を取り入れることにより、流体と粒子を連成させたHybrid粒子法を開発した。開発した計算コードを利用して、ER流体の振動せん断流中において粒子が形成するメゾスケール構造について動的な解析を行った。計算領域として球形誘電体粒子径の18倍を各方向にとり、下面は静止壁、上面を振動壁とし、左右には周期境界条件を適用した。本解析の場合、粒子に作用する力は電気双極子相互作用力、DLVO理論に基づく斥力、ブラウン力および流体から受ける粘性力である。ただし、上下壁面が電極板であることから、電極板に対する鏡像粒子を取り入れた。

上壁面の移動振動数10Hzとした場合の粒子の配向状態の例を図7に示す。図中の流から出ている棒は粒子の移動速度の大きさを表している。図7より、振動せん断流中では印加電場によって形成されたクラスターの軸がほぼ同期して左右に振動していることがわかる。また、せん断の強さを変化させて解析を行った結果、印加電場の強さとせん断の強さが形成されたクラスターの生成・崩壊過程に大きな影響を与えることがわかった。解析結果から、クラスターの軸が印加電場方向に対して約 $30^\circ$ 以上傾くとそのクラスターはせん断によって分断され、小さいクラスターに分離することがわかった。図8に

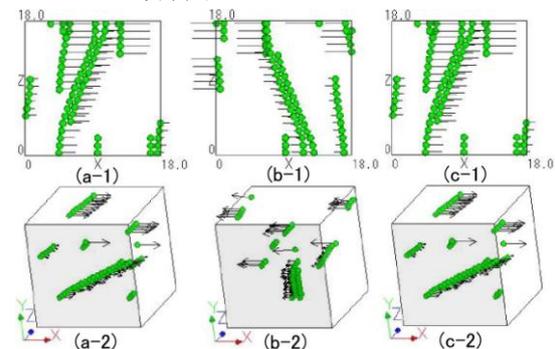


図7 ER流体の振動せん断流中微粒子 (棒の長さは粒子の速度の大きさを表している。振動数10Hz, タイムステップ(a)  $1.8 \times 10^7$ , (b)  $2.2 \times 10^7$ , (c)  $2.4 \times 10^7$ )

1つのクラスターを構成する平均粒子数の変化を示した。図8より、せん断が強くなりすぎるとクラスターが分断され、クラスターの長さが短くなることわかる。

開発したHybrid粒子法により、流れ場が時間的に変化する場合、あるいは粒子の動的挙動によって流れ場が影響を受ける場合など、粒子と流体の相互作用が無視できない場合についても解析が可能となった。Hybrid粒子法による解析についてはシドニーで開催された国際会議で発表し、日本AEM学会誌に英文論文として採択された。本論文により平成20年度の日本AEM学会論文賞を受賞し、高い評価を得た。

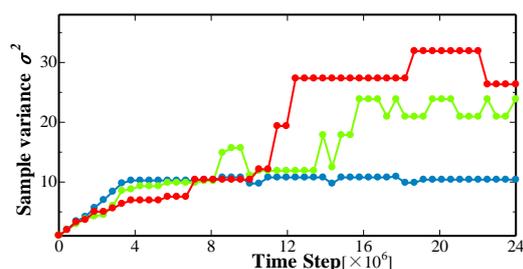


図8 1つのクラスターの平均構成粒子数(せん断, 青: 0.25, 赤: 1, 緑 4 [ $\times 10^4$ ])

## 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)

[雑誌論文] (計9件)

- (1) 井門康司・稲垣貴文, 「磁気混合流体中の微粒子が形成するマイクロ構造の解析」, 日本機械学会論文集, 第75巻, 第753号, B編 (2009) pp.978-984, 審査有
- (2) Yasushi Ido and Takafumi Inagaki, “Numerical Analysis of Microstructure Formation of Magnetic Particles and Nonmagnetic Particles in MR Fluids”, Journal of Physics: Conference Series, Vol.149 (2009), 012057, 審査有
- (3) Kouji Tomiyama and Yasushi Ido, “Behavior of Magnetic Particles in a Liquid under Non-uniform Magnetic Field and Gravity”, Magnetohydrodynamics, Vol. 44, No. 4 (2008), pp. 369-378, 審査有
- (4) Yasushi Ido and Takafumi Inagaki, “Computer Simulation of Distributions and Structure Formations of Magnetic Spherocylinder Particles and Nonmagnetic Sphere Particles in MAGIC Fluid Under Steady Magnetic Field”, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol.10, No.5 (2008), pp. 1057-1060, 審査有

- (5) Yasushi Ido, Takafumi Inagaki and Noritsugu Umehara, “Numerical Simulations of Distributions of Magnetic and Nonmagnetic Particles in MAGIC Fluids”, Magnetohydrodynamics, Vol.44, No.1 (2008), pp.83-91, 審査有
- (6) Yasushi Ido and Takafumi Inagaki, “Numerical Simulations of Structure Formation of Magnetic Particles and Nonmagnetic Particles in MAGIC Fluid Under Steady Magnetic Field”, Complex Systems, AIP Conference Proceedings, Vol.982 (2008), pp. 598-605, 審査有
- (7) 井門康司, 稲垣貴文, 梅原徳次, 「MAGIC 砥石製作過程の数値解析(球形粒子体積分率の粒子分布への影響)」, 日本AEM学会誌, Vol.15, No.3 (2007), pp. 341-347, 審査有
- (8) Yasushi Ido and Hisao Fukami, “Numerical Simulation of Cluster Formation in Vibration Shear Flows of ER Suspensions”, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.15, No.3 (2007) pp. 246-249, 審査有
- (9) 井門康司, 「磁性流体の基礎方程式系—理論解析と可視化—」, 可視化情報, Vol.27 (2007), pp.27-32, 審査無

[学会発表] (計21件)

- (1) 山口喬也・井門康司, 「磁気混合流体中微粒子が形成するマイクロ構造の数値解析」, 平成20年度磁性流体連合講演会, 同志社大学, 12月12~13日(2008)
- (2) 井門康司・深見尚男, 「分散系ER流体の振動せん断流中におけるクラスター形成の数値解析」, 第17回MAGDAコンファレンス, 日立シビックセンター, 11月20~21日(2008)
- (3) 井門康司・稲垣貴文・木倉宏成・有富正憲, 「磁気機能性流体中における強磁性微粒子および非磁性微粒子の挙動」, 日本混相流学会年会講演会2008, 会津大学, 8月8~10日(2008)
- (4) Yasushi Ido and Takafumi Inagaki, “Numerical Analysis of Microstructure Formation of Magnetic Particles and Nonmagnetic Particles in MR Fluids”, The 11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Dresden, Germany, Aug.25-29 (2008)
- (5) 井門康司・山田卓弥・西田均, 「磁気混合流体を利用した管内面研磨における粒子挙動の数値解析」, 日本機械学会2008年度年次大会講演会, 横浜国立大学, 8月4~7日(2008)

- (6) 井門康司・稲垣貴文・木倉宏成・有富正憲, 「磁気機能性流体中微粒子の挙動解析—数値解析と実験のコラボレーション—」, 日本実験力学学会流体機能化分科会第二回機能性流体に関する公開研究会, 名古屋工業大学, 12月7日(2007)
- (7) 山田卓弥・井門康司・山口喬也・西田均, 「MCF を用いた管内面研磨における内部粒子挙動の数値解析」, 平成19年度磁性流体連合講演会, 名古屋工業大学, 12月6~7日(2007)
- (8) Yasushi Ido and Takafumi Inagaki, “Numerical Simulations of Structure Formation of Magnetic Particles and Nonmagnetic Particles in MAGIC Fluid Under Steady Magnetic Field”, The 4th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Sep. 26-28 (2007)
- (9) Yasushi Ido and Takafumi Inagaki, “Computer Simulation of Distributions and Structure Formations of Magnetic Spherocylinder Particles and Nonmagnetic Sphere Particles in MAGIC Fluid under Steady Magnetic Field”, The 5th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials, Larnaca, Cyprus, Sep. 16-19 (2007)
- (10) Yasushi Ido, Takafumi Inagaki and Noritsugu Umehara, “Numerical Simulations of Distributions of Magnetic and Nonmagnetic Particles in MAGIC Fluids”, The 11th International Conference on Magnetic Fluids, Kosice, Slovakia, Jul. 23-27 (2007)
- (11) Takafumi Inagaki, Hiroshige Kikura, Yasushi Ido and Masanori Aritomi, “Real Observations and Numerical Simulations of Cluster Formation of Nonmagnetic Particles in Magnetic Fluids”, The 11th International Conference on Magnetic Fluids, Kosice, Slovakia, July 23-27 (2007)
- (12) Kouji Tomiyama and Yasushi Ido, “Behavior of Magnetic Particles in a Liquid under Non-uniform Magnetic Field and Gravity”, The 11th International Conference on Magnetic Fluids, Kosice, Slovakia, Jul. 23-27 (2007)
- (13) Takafumi Inagaki, Yasushi Ido, Hiroshige Kikura and Masanori Aritomi, “Cluster Formation of Nonmagnetic Particles in a Kerosene-Based Magnetic Fluid”, The 12th French-Japanese International Seminar on Magnetic Fluids, Paris, French, Jul. 20 (2007)
- (14) Kouji Tomiyama and Yasushi Ido, “Structure Formation of Magnetic Particles in a Liquid Under Non-uniform Magnetic Field”, The 12th French-Japanese International Seminar on Magnetic Fluids, Paris, French, Jul. 20 (2007)
- (15) 井門康司・稲垣貴文, 「MAGIC 砥石製作過程の数値解析 (磁性体粒子と非磁性体粒子の直径が異なる場合)」, 第19回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 早稲田大学, 5月16~18日(2007)
- (16) 富山幸治・井門康司, 「重力を考慮した非一様磁場における強磁性体粒子の挙動解析」, 平成18年度磁性流体連合講演会, 北海道大学, 12月7~8日(2006)
- (17) 稲垣貴文・井門康司・梅原徳次, 「MAGIC 砥石製作過程の数値解析」, 平成18年度磁性流体連合講演会, 北海道大学, 12月7~8日(2006)
- (18) 井門康司・稲垣貴文・梅原徳次, 「非磁性体粒子を含むMR流体中粒子の一様定常磁場下における配向特性 (MAGIC 砥石製作過程の数値解析)」, 第15回MAGDAコンファレンス, 桐生市市民文化会館, 11月1~2日(2006)
- (19) 井門康司・深見尚男, 「ハイブリッド粒子法によるER流体中粒子の配向特性解析」, 日本機械学会2006年度年次大会講演会, 熊本大学, 9月19~21日(2006)
- (20) Yasushi Ido and Hisao Fukami, “Numerical Simulation of Cluster Formation of ER Suspensions in Vibrating Shear Flows”, Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Sydney, Australia, Jul. 20-21 (2006)
- (21) 井門康司・稲垣貴文・梅原徳次, 「非磁性粒子を混入したMR流体中粒子の配向特性に関する粒子法解析」, 第18回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 神戸市国際会館, 5月18~19日(2006)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井門 康司 (IDO YASUSHI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 40221775

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし