

平成 22 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2009

課題番号：18560181

研究課題名 (和文) 機能・知能性流体による流体計測・輸送および制御の機能化・知能化

研究課題名 (英文) Intelligent fluid measurement and transport system and control by using intelligent functional fluids

研究代表者

山口 博司 (YAMAGUCHI HIROSHI)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：80191237

研究成果の概要 (和文) : 本研究は、知能・機能性流体を利用した高性能産業機器の創成を念頭に、磁場制御による流体計測、エネルギー変換・輸送装置、さらに流量制御機構の実現に向け基礎的、また応用研究を行い以下の知見を得た。液相に磁性流体を微量添加することで電磁誘導を利用したボイド率計測、気泡速度計測、流動様式の定量的判別が可能であった。低沸点溶液混合磁性流体を用いた熱輸送では熱輸送方向が水平に近いほど磁気成分による自己駆動力が得られ、鉛直方向に近いほど磁気成分に浮力成分が加味され、いずれの熱輸送方向への自己循環型熱輸送が可能であることを確認した。導電性高分子混合磁性流体を用いた MHD 発電装置では実験による出力値が理論出力値と非常に良い一致傾向を示し、流体温度の上昇に伴い導電率が上昇した。磁気粘弾性体を用いた流量制御弁の流量制御機構では変形可能な磁性流体のエラストマー (磁気粘弾性体) を用いて、直管を通過する水の流れを印加磁場によって効果的に制御可能となった。

研究成果の概要 (英文) : In this study, our aim is to develop high-performance industrial machines utilizing "Intelligent" and "Functional" fluids such as magnetic fluids. For this aim, we have performed basic and applied studies on measurement devices using the magnetic fluid, a novel system for energy conversion and transportation and a flow rate control system using "magnetic-elastomer". The devices for measuring of void fraction, bubble velocity and flow regimes of gas-liquid two-phase flow can be achieved by adding a quite small amount of the magnetic fluid to liquid phase. The energy transportation system using a mixture of "magnetic fluid" and "low-boiling-point liquid" can achieve self-circulation of the heat in both horizontal and vertical direction. The MHD (Magnetic Hydro Dynamics) electric power generation device which utilize "electric conductive polymer" has a characteristic that conductivity rises with a rise of the fluid temperature. The output value of voltage by the experiment shows a good agreement to the theoretical value. The flow rate control system using magnetic elastomer is found to be able to control the flow rate effectively by controlling the magnetic field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,600,000	0	1,600,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,400,000	540,000	3,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流・機能性流体 (1) 磁性流体 (2) 磁性弾性体 (3) 気液二相流 (4) 気泡速度計測 (5) 流量制御 (6) 熱輸送 (7) 熱工学 (8) 流体工学

1. 研究開始当初の背景

流体に外部より電磁場を作用させることにより、機能・知能性の発見を得る試みが国内外で活発に進められている。その中でも流体工学分野に於いては、すでに機能・知能性流体として応用が求められている磁性流体や電気粘性流体を他の流体および材料を混合することにより、優れた機能を発揮する流体の開発、磁場制御による流体計測やエネルギー変換・輸送装置の研究開発、また流体制御による流量や圧力コントロールの実現に向けた試みなどが国内外の研究の動向として存在する。

2. 研究の目的

本研究では、研究背景を反映して以下に挙げる項目を研究課題として設定した。

- (1) 磁性流体の添加による電磁誘導を利用した流体計測装置の試作とデータ処理法の開発および実証実験
- (2) 低沸点溶液混合磁性流体を用いた熱輸送装置の開発と基礎特性の調査
- (3) 導電性ポリマー混合磁性流体を用いたMHD発電についての流動特性および発電特性の評価
- (4) 粘弾性流体混合磁性流体膜を用いた流量制御弁の試作と特性評価

3. 研究の方法

以下に、各研究課題における研究の方法を示す。

- (1) はじめに、空気-磁性流体気液二相流について、気泡速度の計測をおこなった。この際、磁性流体と同じ物性に調整したグリセリンを用いて可視化を行い、比較した。次に計測データを分析し、流動様式の定量的判別を試みた。また、固液二相流への応用を試みた。
- (2) 水平方向への本熱輸送装置による自己循環型熱輸送の実現が可能かを実験により検証した。次に熱輸送方向を変化させた場合の本熱輸送装置の駆動力特性を実験および数値解析により調査を行った。
- (3) 作動流体として用いた、導電性高分子磁性流体に対して物性調査を行い、次にMHD発電に対する出力測定実験を行った。また、発電チャンネル内部の流れの挙動及び特性に関して、電磁場

の影響を調べる数値解析的検討を行った。

- (4) 無負荷時における印加磁場と開口断面積との関係について評価を行い、軸方向から見た絞り機構部内部の形状の可視化を行った。次に作動流体流動時におけるレイノルズ数と流量係数との関係の評価を行い、実験値と解析との比較により半径方向から見た絞り機構部の形状が流れの挙動に及ぼす影響について調査、検討した。

4. 研究成果

研究成果は、各研究課題について別記する。

(1) 磁性流体気液二相流における気泡速度計測においては、本研究テーマで以前提案された電磁誘導を用いたボイド率計測技術を基に以下のように発展させた。まず、初年度では、流路の上下二箇所磁束密度変化検出用の二次コイルを配置し、二つのコイルについて、誘導起電力波形の時間差を相互相関関数により求め、その時間差から気泡速度を求める方法を提案し、有用性を検証した。検証のため、本計測装置の検出コイルから得た誘導起電力の波形の相関から得られた気泡速度と、磁性流体と同じ物性値のグリセリン水溶液による可視化実験から得られた気泡速度、さらにZuberによる理論式から得た値と比較した。その結果、磁性流体の濃度が100[vol. %]と5[vol. %]である流体の気液二相流におけるスラグ流およびチェーン流域において、この手法による気泡速度計測方法が妥当であることを確認した。気泡速度計測結果一例を図1に示す。

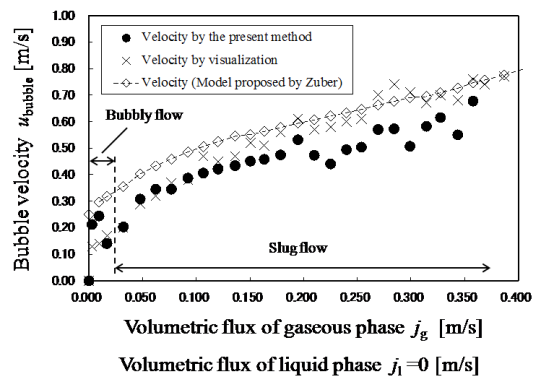


Fig.1 An example of the bubble velocity measurement result

また、これまでの気液二相流計測技術では、流動様式についての有効な定量的判別法があまり存在しなかったことに関して、新たな流動様式の定量的判別法を提案し、その有用性について検証した。提案手法は、本計測装置から得られる誘導起電力波形を、情報工学分野で近年盛んに用いられているニューラルネットワーク (ANN: Artificial Neural Network) を用いて分類することで、流動様式を判別する。この際に、wavelet 変換を用いて信号のノイズ除去を行う補助的な技法を見出したことで、気泡速度計測と、流動様式判別の精度を向上させることができた。

以上で述べた気泡速度計測法と流動様式の定量的判別法、ならびにボイド率計測法は、空気・磁性流体の気液二相流系から、空気-0.1vol.% 希釈磁性流体系気液二相流において有効であることを確認した。特に、空気-0.1vol.% 希釈磁性流体系気液二相流において有効であるということは、一般にみられる気液二相流系の液相に、流動に影響の出ない程度の濃度で磁性流体を添加することで、本計測装置による計測を可能にできることを示しており、本計測装置の一般的な応用の可能性を示唆するものである。

最終年度では、本計測装置の固液二相流への応用を図った。固液二相流についても、気液二相流などの二相流系と同様に、流動に関するパラメータが無数にあり、真に一般的である流動条件というのは存在しない。また、先行研究においては、水平・垂流路に関する精緻なデータが存在するものの、その他の条件についての流動様式マップ等はあまり行われていない。そこで、本研究では、工業において生じる固液二相流の中でも、特に石油・天然ガス採掘時の掘屑運搬パイプラインを想定した傾斜型の流路を用いて、本計測装置による管内の平均固相濃度の計測と、想定する応用場面のための流動様式マップの作成を目的として実験を行った。計測結果の評価は、蒸留水を液相に用いた可視化により求めた固相濃度との比較により行った。その結果、摺動流・非均質流・擬均質流域についての計測結果の平均誤差は 10%未満であった。これは、固液二相流に対する一般的な濃度計測技術と同等であることを示す。精度は、波形データ処理方法の改良によるノイズ除去処理により向上すると考えられる。流動様式マップについては、フルード数を用いた整理を試みた。

以上のことを総括する。本研究で提案された、液相に磁性流体を微量添加することによる電磁誘導を用いた二相流計測技術は、気液二相流についてのボイド率計測、気泡速度計測、流動様式の定量的判別と、固液二相流についての固相濃度の計測が可能であることが示された。

(2) 低沸点溶液混合磁性流体を用いた熱輸送装置においては、流体に作用する磁気力により自己駆動力が得られるため、工学的に重要な水平方向への自己循環型熱輸送が可能と考えられる。そこで本研究では、水平設置熱輸送装置を試作し、低沸点溶液混合磁性流体を用いた自己循環型熱輸送装置の実現の可能性を調査した。図 2 に水平設置時の本熱輸送装置の駆動力特性の結果を示す。

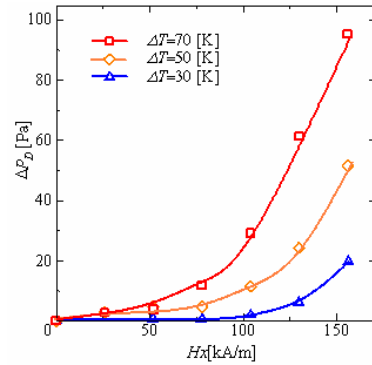


Fig.2 Driving characteristics when the inclination of heat transport is horizontal

ここで、縦軸の ΔP_D は駆動力圧力成分であり、正への増大は流体に自己駆動力が作用していることを表す。また、横軸は印加磁場強度を表す。図 2 より磁場印加により自己駆動力が増加し、水平方向への本熱輸送装置による自己循環型熱輸送が可能であるということが示された。また、この結果から本熱輸送装置はいずれの方向への熱輸送が可能と考えられる。自己循環型熱輸送装置において熱輸送方向を変化させた場合の特性の把握は工学的に非常に重要である。そこで、熱輸送方向可変型熱輸送装置を試作し、熱輸送方向を変化させた場合の駆動力特性を実験および数値解析により調査を行った。その結果を図 3 に示す。ここで代表印加磁場強度は 153.0kA/m である。

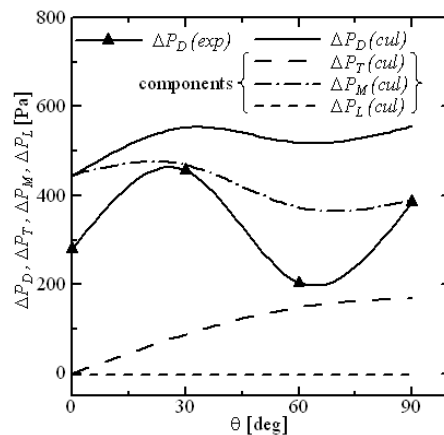


Fig.3 Driving characteristics when the inclination of heat transport varies

ここで、 ΔP_T 、 ΔP_M 、 ΔP_L はそれぞれ駆動力圧力成分 ΔP_D における浮力成分、磁気力成分、圧力損失成分である。また横軸は熱輸送方向を示す。図3より熱輸送方向が 30° において自己駆動力が最大となることが分かる。また、磁気力成分 ΔP_M において、熱輸送方向が水平方向に近いほど大きな値を示すことが分かる。これは、低沸点溶液の沸騰による空間平均的な磁化率の低下に起因する。従って、熱輸送方向が水平に近いほど磁気成分による自己駆動力が得られ、一方鉛直方向に近いほど磁気成分に浮力成分が加味され自己駆動力が得られることが分かる。以上より、本熱輸送装置はいずれの熱輸送方向への自己循環型熱輸送が可能であるということが示された。

(3) 導電性高分子磁性流体の物性を調査することは必要であるため、流体温度および歪み速度を変化させ無磁場状態での流体のせん断粘度特性を調査した。その結果、導電性高分子混合磁性流体の粘度特性は、無磁場状態において、歪み速度の変化に対してせん断粘度が一定となるニュートン流体の性質を示すことが判明した。また、流体温度が上昇すると、粘度が低くなる傾向が見られた。さらに発電特性に影響を及ぼす電気特性について調査を行った。その結果、導電性高分子混合磁性流体の導電率は 1.74 [mS/cm]であり導電性を示すことが判明した。また、本実験装置で導電性高分子混合磁性流体を用いたときの出力性能を確認するため実験を行った。導電性高分子混合磁性流体を作動流体に用いた出力測定実験により得られた出力電力の結果を図4に示す。

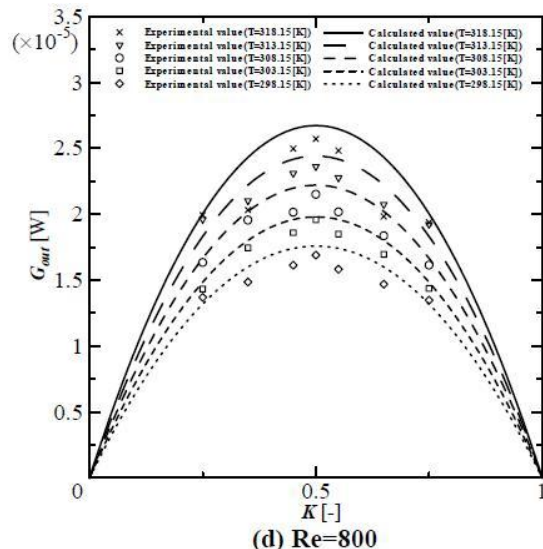


Fig.4 Generated output vs load factor under different temperatures
図4より電気負荷率 $K = 0.5$ のとき、装置から得られる出力の最大値となり K の変化に伴い出力の減少傾向がみられた。実験による

出力値と理論出力値の比較では 298.15K 、 303.15K 、 308.15K 、 313.15K 、 318.15K の各サンプルでよい一致を示した。導電性高分子混合磁性流体を作動流体に用いた出力測定実験により得られた各電気負荷率における出力電力と Reynolds 数の関係を図5に示す。

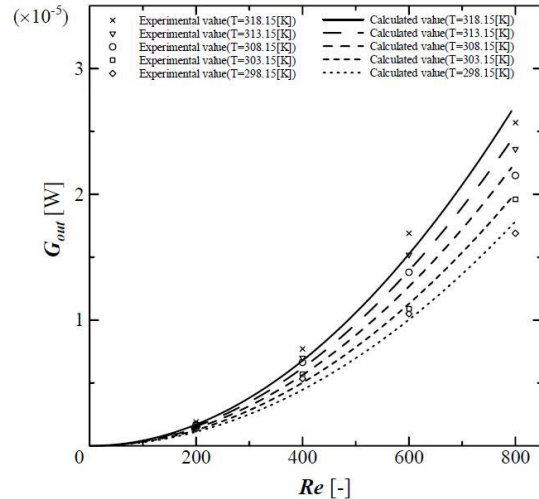


Fig.5 Generated output vs Reynolds numbers under different temperatures ($K=0.5$)

図5より、各電気負荷率の実験結果において Reynolds 数の変化に伴い出力値が二次関数的な増加をすることが確認された。また、各 Reynolds 数の条件下で流体温度の上昇に伴い出力が上昇することが確認された。これは物性特性から温度が上昇すると導電率が增加することが起因していると考えられる。さらに、各実験結果において Reynolds 数の上昇に伴い、流体温度の上昇における出力値の増加量が大きくなることが確認された。すなわち、Reynolds 数が大きくなることで、流体温度の上昇による出力の影響が非常に大きくなるということである。これはファラデーチャンネル内に流れる流体が早くなれば流体の温度の変化による出力の増加が非常に効果的であるという結果を得られたことになる。

(4) 粘弾性流体混合磁性流体膜を用いた流量制御弁の試作と特性評価について。

①測定原理

図6に流量制御機構の原理図を示す。このテストセクションの作製にあたり、あらかじめ軸方向に絞り機構部となる穴の開いた磁気粘弾性体を作製し、それをパイプの中に挿入し、固定した。磁気粘弾性体の磁場による開口制御では、ソレノイドコイルにより磁場を印加することで強磁性微粒子に半径方向の磁気体積力が作用し、強磁性微粒子とその周りに存在するシリコーンゲルがソレノイドコイル側に引き寄せられ、絞り機構部の形状が変化する現象を利用した。ここで、磁気

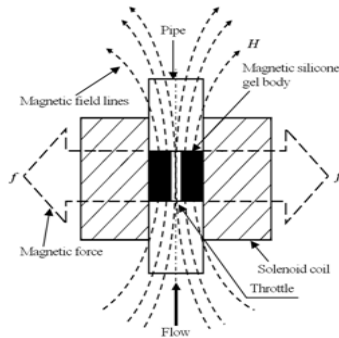


Fig. 6 The principle of flow rate control structure

粘弾性体内部に作用する局所的磁気体積力ベクトル f は、磁化ベクトル M と磁場勾配 ∇H との内積で表される。またテストセクションでの磁気粘弾性体に作用する力は、開弁時には印加電流を上げることで平均磁化ベクトル \bar{M} の強さが増加し磁気体積力が増すことにより発生するものである。すなわち、磁気粘弾性体では半径方向の平均磁場勾配 ∇H が作用し、磁気粘弾性体に働く半径方向の平均磁気体積力 f により開口断面積が増加する。逆に閉弁時は印加磁場を減少させることで、シリコーンゲルの復元力により絞り機構部の開口断面積は減少する。その結果、テストセクションでは磁気粘弾性体の前後に差圧が生じ、流量制御が可能となる。

②実験装置

作動流体には水を用い設定温度は 20°C とした。絞り機構部前後に圧力トランスデューサーを取り付け、対象とする絞り機構部の差圧を、更に電磁式精密流量計を絞り機構部下流側に設置し、流量の精密測定を行った。

③強磁性体を用いた絞り機構部の準備

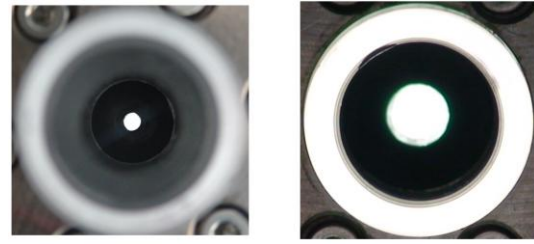
本研究で用いた強磁性微粒子は、Carbonyl SQ で、粒子形状は球状、平均粒径は $5.4[\mu\text{m}]$ である。また分散媒体はシリコーンゲル TSE3062 を用いた。磁気粘弾性体の作製方法を真空脱泡しながら攪拌し、パイプに流し込んだ後、恒温槽で加熱し、硬化することで作製される。絞り機構部の初期開口断面積は $S_1=4.9[\text{mm}^2]$ を採用した。

④無負荷時における印加磁場に対する絞り機構部の形状変化の可視化と開口断面積

絞り機構部が印加磁場に対して開閉する時の動画撮影、ならびに開口断面積の測定を行った。

図 7(a) と図 7(b) に印加磁場強度が $H=0[\text{MA/m}]$ と $0.282[\text{MA/m}]$ の時の、無負荷時における軸方向から見た絞り機構部の可視化写真を示す。最大開口面積比は、印加磁場強度 $0 \leq H \leq 0.282[\text{MA/m}]$ の範囲において、 $38.5/4.9=7.9$ となった。

⑤レイノルズ数 Re に対する流量係数 C_v の変化



(a) $0[\text{MA/m}]$

(b) $0.282[\text{MA/m}]$

Fig. 7 Visualization of throttle control

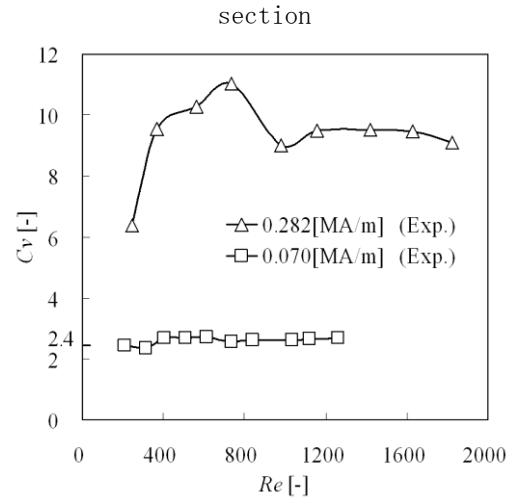


Fig. 8 Flow coefficient C_v

図 8 に流量制御実験の結果を示す。横軸はレイノルズ数 Re 、縦軸は流量係数 C_v である。この結果から印加磁場 $H=0.070[\text{MA/m}]$ の場合においてはレイノルズ数に関わらず、流量係数はほぼ一定である。これに対し、印加磁場 $H=0.282[\text{MA/m}]$ では低レイノルズ数領域において流量係数が増加傾向にあるのに対し、高レイノルズ数領域において流量係数はほとんど一定であることが判明した。これは、高印加磁場下では、絞り機構部の開口断面積が大きく、通常のオリフィス型流量制御弁に見られるように、レイノルズ数が低い領域では、層流支配となり絞り機構部における渦の影響を強く受けるためであると思われる。また流量係数の急激な変化の傾向は主として磁気粘弾性体の絞り機構部前後で生じる圧力差による変形が原因と考えられる。

そこで本研究では磁気粘弾性体の変形が、流れの挙動及び絞り制御に及ぼす影響について検討を行った。すなわち $200 \leq Re \leq 1800$ の範囲では（本研究では層流流速分布を前提とした）流量係数 ($2.4 \leq C_v \leq 12$) の範囲に対する絞り制御が、印加磁場 $0.070 \leq H \leq 0.282[\text{MA/m}]$ の範囲において可能であることが示されるものの、高レイノルズ数、例えば $Re=1000$ 付近での高印加磁場下 ($H=0.282[\text{MA/m}]$) における流量係数の特異な振る舞いが観測される。

⑥結言

磁気粘弾性体を用いた流量制御弁の流量制御機構について新たに提案することを目的とし、作動流体流動時において絞り機構部の形状変化及び流れの挙動に及ぼす影響について調査し、検討した結果、以下の知見を得た。

1. 磁気粘弾性体が水圧によって変形する形状を簡易モデル化し、数値流体解析を行うことにより、作動流体流動時における半径方向から見た絞り機構部の形状を可視化することができた。
2. 印加磁場 $H=0.070$ [MA/m]、レイノルズ数 $200 \leq Re \leq 1200$ の範囲における流量係数 C_v は、無負荷時における軸方向から見た絞り機構部の開口断面積 $S=11.6$ [mm²] を基準とし、ひずみ角度・1 とテーパ角度・2 をそれぞれ 10° とした簡易解析モデルを設定することにより、絞り機構部内部とその前後での圧力分布、速度ベクトル等の流動様式を再現することができた。
3. 印加磁場 $H=0.282$ [MA/m]、レイノルズ数 $1000 \leq Re \leq 1800$ の範囲における流量係数 C_v は、無負荷時における軸方向から見た絞り機構部の開口断面積 $S=38.5$ [mm²] を基準とし、ひずみ角度・1 とテーパ角度・2 をそれぞれ 15° とした簡易解析モデルを設定することにより、絞り機構部内部とその前後での圧力分布、速度ベクトル等の流動様式を、レイノルズ数により制限はあるものの再現することができた。

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)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ①松村和彦, 山口博司, 磁気粘弾性体の磁化特性及び弾性率の評価, 日本レオロジー学会誌, 査読有, Vol. 37, No. 4, 2009, pp. 199-204
- ②T. Kuwahara, F. De Vuyst, H. Yamaguchi, Bubble velocity measurement using magnetic fluid and electromagnetic induction, Physics of Fluids, 査読有, Vol. 21, Issue 9, 2009, 097101
- ③松村和彦, 空野正輝, 山口博司, 磁気粘弾性体による流量制御, 日本機械学会誌, 査読有, 75 巻, 753 号, 2009, B 編, pp. 1000-1006
- ④H. Yamaguchi, X. R. Zhang, S. Higashi, Study on power generation using electro-conductive polymer and its mixture with magnetic fluid, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, 320, 2008, pp. 1406-1411
- ⑤松村和彦, 村上隆史, 山口博司, 外部磁場

制御による磁気可燃粘弾性体の流量制御特性, 日本実験力学学会誌, 査読有, Vol. 8, No. 3, 2008, pp. 250-256

⑥桑原拓也, 山口博司, Florian De Vuyst, スラッグ流およびチャーレン流における磁性流体気液二層流の気泡速度計測, 日本混相流学会論文集, 査読有, 2007, pp. 133-140

⑦桑原拓也, 大西雅志, 山口博司, 須知成光, 磁性流体を用いた熱輸送装置の磁場分布形状による熱輸送および駆動力特性への影響, 日本機械学会論文集(B 編), 査読有, 73 巻, 734 号, 2007, pp. 2085-2091

[学会発表] (計 16 件)

- ①岩本悠宏, 山口博司, 牛小東, 感温性磁性流体を用いた自己循環型熱輸送装置の特性に関する研究, 平成 21 年度磁性流体連合講演会, 2009. 12. 3, 慶応義塾大学
- ②長岡書悟, 桑原拓也, 山口博司, 磁性流体を用いた固液二相流の管内濃度計測, 混相流学会年会講演会, 2009. 8. 9, 熊本大学
- ③松村和彦, 空野正輝, 山口博司, 磁気粘弾性体による流量制御, 平成 20 年度磁性流体連合講演会, 2008. 12. 13, 同志社大学
- ④山口博司, 松村和彦, 空野正輝, 磁気粘弾性体の特性と流量制御, 機能性流体を活用した次世代型フルードパワーシステムに関する公開シンポジウム講演, 2008. 11. 6, 東北大学
- ⑤松村和彦, 山口博司, 磁気可変粘弾性体の流量制御への応用, 電磁力関連ダイナミクス講演会, 2008. 5. 22, 大分大学 (別府)
- ⑥松村和彦, 村上隆史, 山口博司, 磁場が磁気可変粘弾性体の弾性率に及ぼす影響, 平成 19 年度磁性流体連合講演会, 2007. 12. 6, 名古屋工業大学
- ⑦村上隆史, 松村和彦, 山口博司, 強磁性微粒子を含むシリコーンゲルを用いた磁場制御による流量制御弁への応用, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2007. 11. 17, 広島大学

[その他]

ホームページ等

<http://www1.doshisha.ac.jp/~hyamaguc/yalab/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 博司 (YAMAGUCHI HIROSHI)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号: 80191237

(2) 研究分担者

須知 成光 (SHUCHI SHIGEMITSU)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号: 00347204

(3) 連携研究者 無し