

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年6月2日現在

機関番号：34310
研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2010～2013
課題番号：22560178
研究課題名（和文） 機能・知能性流体による高性能機器への工学的応用
研究課題名（英文） Technological application for sophisticated device with use of 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
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）3,400,000円、（間接経費）1,020,000円

研究成果の概要（和文）：

本研究では、機能性流体の中でも電磁場に感応する流体に着目し、電磁誘導計測法を用いた多種系混相流の計測法の確立および、自己循環型 MHD 発電装置の実現、多孔質体中の熱磁気自然対流の熱伝達特性および流動挙動の3つのテーマに関して研究を行った。結果、電磁誘導計測法を用いた混相流計測に関する研究では、気液二相流のボイド率計測、気泡速度計測に加え、固液二相流の固相体積割合および粒子体積の計測を可能とした。MHD 発電に関する研究では、流路形状を変更することにより最大 3.6mW の発電量を確認した。多孔質内における磁性流体の熱伝達特性に関する研究では、多孔質体における間隙が大きくなるにつれ、磁場による対流が促進され、熱伝達特性が向上することを実験的・解析的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, our aim is to create high-performance industrial machines utilizing “Intelligent” and “Functional” fluids such as magnetic fluids. For this aim, we have done basic and applied studies: measurement devices for multi-phase flow using electromagnetic induction method, a novel MHD device and natural convection of magnetic fluids in porous media. In the research of measurement for multi-phase flow, the measurement of not only void fraction and bubble velocity but also concentration of solid-phase and volume of solid particle could be achieved. In the study of MHD power generator, the present generator demonstrates the maximum output electric power of 3.6 mW by changing in width of flow channel. In the study of natural convection in porous media, the experimental and numerical results show that heat transfer characteristic of the magnetic fluid is enhanced when the magnetic field is applied to the magnetic fluid.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・非ニュートン流

キーワード：流体工学，機能・知能性流体，非ニュートン流，混相流，MHD 発電，感温性磁性流体，熱伝達特性，格子ボルツマン法

1. 研究開始当初の背景

産業機器において用いられる流体に機能性を加味することにより、より高度な機能を実現したいという技術ニーズから、近年、流体工学の分野において機能性・知能性流体に関する研究が活発化している。本研究では、機能性・知能性流体の中でも特に電磁場に感応する流体に着目し、具体的に以下の3つのテーマについて重点的に研究する。（以下、

各番号は3つの研究テーマにそれぞれ対応する）

2. 研究の目的

(1) 混相流の工業的な流動形態として、例えば、石油・天然ガスの傾斜坑井掘削等においては、固-気-液三相流が発生する事が知られ、スラッシング流動などの特徴的な現象が観測される。このような混相流において重要な

パラメータである各相の体積割合や相速度の計測や流動様式の判別に関する提案・研究は多く成されているものの、固-気-液三相流計測方法は確立されていない。これまでの研究では、電磁誘導の原理を利用した計測装置を提案し、各相の体積割合や相速度の計測、流動様式の判別に関する研究を行ってきた。これまで気液二相流研究において、磁性流体の添加により、それらの体積割合・相速度計測および流動様式判別に成功し、気液二相流の気泡流からプラグ流領域に至る計測技術を確立した。本研究では、気液二相流以外の多種系混相流の基礎研究を行うとともに、その成果を基に三相流計測可能な計測装置の実現に向け、研究を推進する。

(2) MHD 発電は機械エネルギーを介することなく、運動エネルギーを直接電気エネルギーに変換する発電方法である。これまでの研究では、導電性磁性流体を作成し発電特性の調査を行ったが、導電率の低さから高い出力を得られないことが判明した。この改善方法として作動流体に高導電率の無毒性低融点合金を用いることで従来の 100 万倍の出力電力を得ることに成功した。本研究では、更なる発電特性の向上を目指すとともに、感温磁化特性を有する流体を用いることで、駆動装置を必要としない熱エネルギーを利用した自己循環型 MHD 発電装置の実現に向けた研究を推進する。

(3) 感温性磁性流体に作用する磁気力が、地上における重力と同じ体積力であるという観点から、感温性磁性流体は宇宙空間などの微小重力環境下で対流を発生させるには最適な流体である。これまでの研究では、三次元容器内での熱磁気自然対流の熱伝達特性について実験的、解析的に調査し、磁場印加に伴い熱伝達が促進されるという知見を得た。本研究では磁性流体を用いた宇宙での熱輸送技術として磁場制御可能な高効率熱輸送システムの実現に向け、多孔質体中の熱磁気自然対流の熱伝達特性および流動挙動の実験的、解析的研究を推進する。

3. 研究の方法

(1) 気液二相流のボイド率測定が可能である電磁誘導を用いる流体計測法を固液二相流に適用し、固相体積割合の計測を行った。計測によって得られた波形データから粒子径を算出する新たなデータ処理を試みた。また、計測結果を定量的に評価するため、希釈流体を用いて流動の可視化を行った。

(2) 出力電圧を計測することで、低融点合金を用いた MHD 発電の出力電力を算出した。出力能力を向上させるために、レイノルズ数、

発電部形状を変更し、層流域と乱流域での形状の違いによる出力特性の変化や出力の増減について調査した。

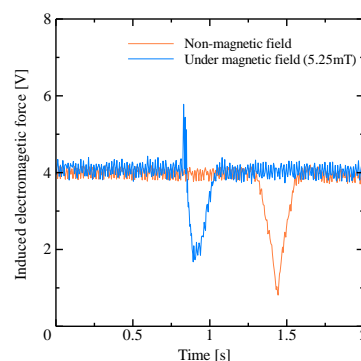
(3) 磁場および、温度場により制御が可能である感温性磁性流体について、内部に非磁性体の球体を有する三次元立方容器形状において、様々な多孔質体モデルを作成し、鉛直一様磁場印加による熱伝達特性、流動特性を実験的、解析的に調査した。

4. 研究成果

(1) 電磁誘導を利用した混相流の体積割合・速度計測および流動様式判別に関する研究においては、以前、本研究室で提案した電磁誘導を用いた気液二相流のボイド率計測技術を基に、固相を含む混相流の計測法の確立を試みた。

気液二相流に関する研究と同様に内径 25.7mm の直管を用いて、固液二相流の固相体積割合計測を行った。計測対象は樹脂球-磁性流体系の固液二相流とした。リファレンスとして、蒸留水を液相に用いて可視化を行い、画像解析による計測値と比較した。その結果、固体粒子直径と管内径の比 $d/D = 0.22[-]$ のとき平均相対誤差は 8.9% という精度で計測が可能であることを示した。また、本計測法の汎用性について調査するため、スケールの異なる内径 1.58mm の細管を用いて、同様の固相体積割合計測を行った結果、 $d/D = 0.34[-]$ のとき平均相対誤差は 11.3% という精度で計測が可能であった。これらの結果より、本計測法は固液二相流に対しても有用であり、計測精度に関しては Wavelet 変換による波形データ処理手法の改善によって向上することが期待できる。

本計測法は、磁場下の磁性流体中を非磁性体が通過する際に生じる磁化の変化をコイルで計測する従来のデータ処理手法は波形データが正弦波であることを考慮して RMS 値を用いていたのに対して、最終年度には波形の輪郭を幾何学的に分析する新たな処理手法を試みた。ここでは、計測対象を単一気泡および単一樹脂球とした。図 1 に単一気泡の計測データの輪郭を抽出した実験結果を示す。



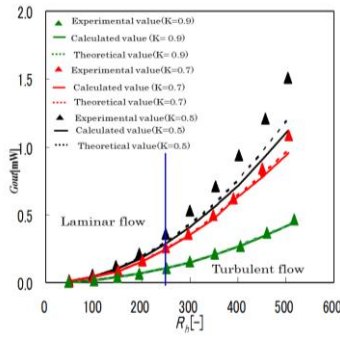


図 2 Output Power

図 1 Obtained waveform of induced electromotive force

図 1 より、無磁場時に対して、磁場を印加することで誘導起電力の輪郭線の凹部深さが減少したことがわかる。本実験においては、磁場の有無によって気泡体積が 17.0%減少したことを示した。また、固液二相流に対しても同様の処理手法を適用し、樹脂球の体積を計測した結果、波形データの凹部深さと樹脂級の体積とは線形関係にあることを示した。また、凹部幅や凹部の曲率には非磁性体の形状によって差異があることを定性的に確認した。

以上より、本研究では電磁誘導を用いる流体計測法を固気液混相流計測へ応用することを念頭に、気液二相流および固液二相流の計測実験を行った。その結果、本計測法は固液二相流の固相体積割合計測法として有用であった。また、新たなデータ処理手法として、Wavelet 変換を用いて輪郭線の抽出を行い、この凹部深さをを用いて非磁性体の体積を算出する計測法を確立した。

(2) 低融点合金を用いた MHD 発電においては、これまで最大 0.5mW の出力しか確認されておらず、実用化を図るために出力をさらに向上させる必要がある。そこで、本研究では液体金属の駆動を高レイノルズ数領域にし、また、発電部の形状を変化させることでさらなる出力の向上を図った。

高レイノルズ数までの出力電力の計測結果を図 2 に示す。図 2 の縦軸は出力電力 G_{out} 、横軸はレイノルズ数とハルトマン数の比である Rh 、 K は負荷率を表す。高レイノルズ数にすることで、 $Rh=500$ 、 $K=0.5$ のとき、従来の $Rh=373$ 、 $K=0.5$ のときの最大出力 0.5mW を超える出力 1.5mW が得られた。また、MHD 流れの乱流遷移域であるとされる $Rh \approx 250$ 前後において、出力傾向の変化は小さかった。そこで、乱流起電力のオーダー評価を行った。その結果、乱流起電力は出力を低下させる効果を持ち Rh の増加に伴い乱流起電力の影響

は増加することが判明した。しかし、乱流起電力による電力低下の値は本実験においてその割合は最大で 4%と微小な値であるため、出力に影響を与えないことが判明した。

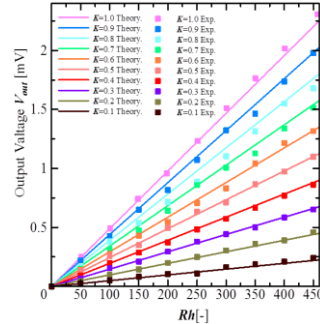


図 3 Output Voltage (Square channel)

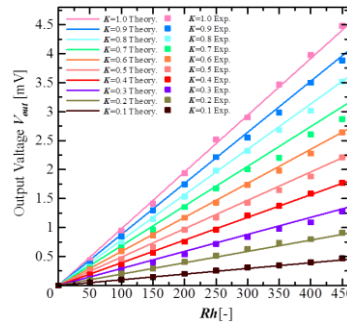


図 4 Output Voltage (Rectangular channel)

次に、流路形状による、出力特性の変化を確認するために、正方形流路および長方形流路における出力電圧の計測を行った。図 3 に正方形流路、図 4 に長方形流路の出力電圧の測定結果を示す。図 3、4 の縦軸は出力電圧 V_{out} 、横軸はレイノルズ数とハルトマン数の比である Rh 、 K は負荷率を表す。図 3、4 より、流路幅を 2 倍にすることで、2 倍の出力電圧が得られた。出力電力に関しては、電圧の 2 乗で表されるため、内部抵抗を各流路形状で統一したとき、4 倍の出力が得られることが判明した。また、レイノルズ数を増加させたとき、MHD 流れの乱流遷移域であるとされる $Rh \approx 250$ 前後において、各流路形状ともに出力電圧の増加率の変化はほとんどなかった。よって、流路形状が乱流起電力に与える影響はないことを確認した。

また、格子ボルツマン法を用いて、3 次元解析を行うことで、発電部内部の流れの様子を調査した。正方形流路、長方形流路ともに、磁場を印加することでローレンツ力の影響を受け、発電部の流れは、流速分布が一様となるハルトマン流れを確認した。

以上より、本 MHD 発電装置はレイノルズ数の増加、流路形状の変更により出力の増加を

確認した。

(3)多孔質体中における自然対流に関する研究では、矩形容器内に球形粒子を敷き詰めた固定床を用いて多孔質体をモデル化し、実験的・解析的に調査を行った。具体的には、容器内の粒子直径の変化による熱伝達特性の変化について調査を行った。粒子直径は、立方容器の一辺の長さを d とした場合に、 $d/4$, $d/2$, d の直径の異なる三種類の粒子を使用し、それぞれ case A・case B・case C とした。異なる大きさの粒子を用いて、固定床とした際の熱伝達特性の実験結果を図 5, 6, 7 に示す。

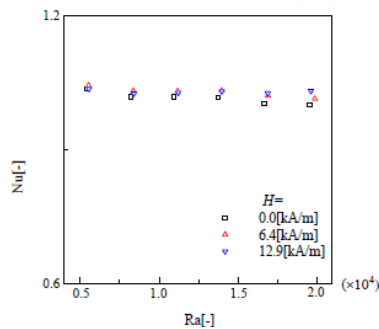


図 5 experimental results (Case A)

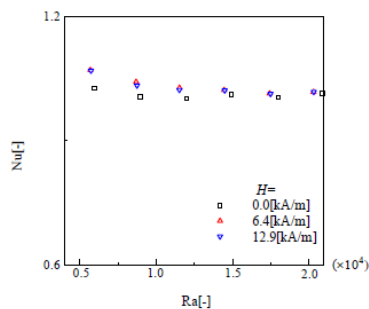


図 6 experimental results (Case B)

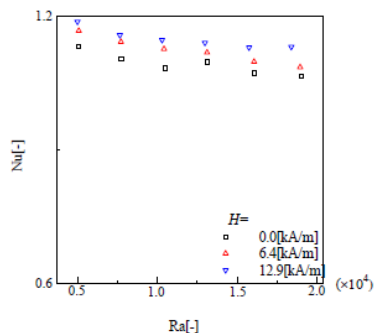


図 7 experimental results (Case C)

図 5, 6, 7 において、縦軸と横軸は Nu 数・ Ra 数を表す。また図中におけるプロットは各印加磁場条件 $H=0.0, 6.4 \times 10^3, 12.9 \times 10^3$ [A/m] における実験結果を示す。Case A では磁場の増加に伴い、 Nu 数は若干増加するものの Ra 数の増加に伴い、 Nu 数はほぼ一定であった。これは、球によって磁性流体の流れが

阻害されるため、熱伝達特性は上昇しなかったものと考えられる。また、Case B についても、 Ra 数の増加に伴う Nu 数の変化はほぼ無く、磁場印加に伴う、 Nu 数のわずかな増加が確認できた。これは、磁場印加により磁性流体に発生した磁気力により対流が促進されたため熱伝達特性が増加したとの考えられる。このことから、立方形状容器内部に直径 $d/2$ のガラス球を面心型につめた場合、磁場によって熱伝達特性が増すことがわかった。Case C では、Case A・B と同様に Ra 数の増加に伴い Nu 数は減少する一方で、 Nu 数の傾向および、磁場印加による Nu 数の変化率は上昇した。これは、Case A・B に比べ粒子間の間隔が大きくなったため、対流が促進されやすくなったものと考えられる。

次に、粒子直径の変更により、実際に内部の流動が変化したかを確認するため、格子ボルツマン法を用いた解析結果を図 8 に示す。

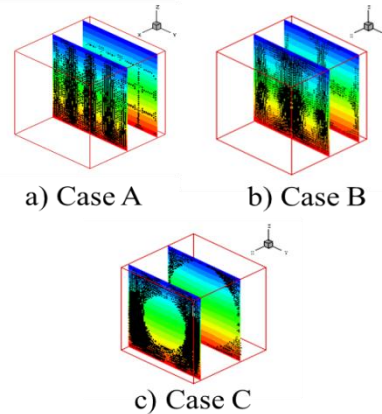


図 8 analysis results

図 8 の解析結果から、粒子数が減少し、粒子間の間隔が大きくなるにつれ、速度場が発達することが確認できた。

以上のことから、多孔質体中における磁性流体の熱磁気自然対流では、一つ当たりの間隔の大きさが重要であり、間隔が大きくなるにつれ、温度場および、磁場による対流が促進され、熱伝達特性が向上することが分かった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

① H. Yamasaki, X.-D. Niu, H. Yamaguchi, Measurement of Solid Phase Hase Concentration in Solid Liquid Flow Using Magnetic Fluid, Magnet Hydrodynamics, 49, No. 3-4, 2013, pp. 407-410(査読有).

② H. Yamaguchi, Y. Iwamoto, Heat Transport with Temperature-sensitive Magnetic Fluid for Application to Micro Cooling Device, Magnet Hydrodynamics, 49, No. 3-4, 2013, pp.

448-453.(査読有).

③ W. Gault , Y. Iwamoto, X.-D. Niu, F. Magoules , Magnetic Ejection Effect under Uniform Magnetic Field , Magnet Hydrodynamics , 49, No. 3-4, , 2013, pp. 355-359. (査読有)

④ H. Yamasaki, K. Sakai, X-D. Niu, H. Yamaguchi , Micro Power Generation using Magnetic Elastomer for Energy Harvest, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, 13, 2013 , Special issue pp.s80-s84. (査読有)

⑤ Y. Iwamoto, Y. Fuji, K. Takeda, X-D. Niu, H. Yamaguchi , Application of a Binary Temperature-Sensitive Magnetic Fluid for a Mini Magnetically-driven Heat Transport Device, Journal of Japanese Society for Experimental Mechanics, 13, 2013, Special issue pp.s18-s23. (査読有)

⑥ H. Yamaguchi, X-D. Niu, X-J. Ye, M. Li, Y. Iwamoto, Dynamic Rheological Properties of Viscoelastic Magnetic Fluids in Uniform Magnetic Fields, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 324, 2012, pp.3238-3244. (査読有)

⑦ H. Yamaguchi, X-D. Niu, X-R. Zhang, Investigation on a Low-melting-point Gallium Alloy MHD Power Generator, International Journal of Energy Research, 35, 2011, pp209-220. (査読有)

⑧ H. Yamaguchi, X-D. Niu, S. Nagaoka, F. De Vuyst , Solid Liquid Two Phase Flow Measurement Using an Electromagnetically Induced Signal Measurement Method, ASME, 113, 2011, pp.1-6. (査読有)

⑨ X-D. Niu, H. Yamaguchi, Natural Convection of Temperature Sensitive Magnetic Fluids in Porous Media, Japanese J, Multiphase Flow, 24, 2011, pp.635-640. (査読有)

⑩ X-D. Niu, H. Yamaguchi, X-R. Zhang K. Yoshikawa , Numerical study of Natural Convection of Magnetic Fluids in a Cubic Cavity with a Heat Generating Object Inside by the Lattice Boltzmann Method, Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 2, 2010, pp.76-85. (査読有)

⑪ H. Yamaguchi, X-R. Zhang, X-D. Niu, K. Yoshikawa , Thermo Magnetic Natural

Convection of Thermo-Sensitive Magnetic Fluids in Cubic Cavity with Heat Generating Object Inside, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2, 2010, pp.698-704. (査読有)

⑫ V. Roussellet, X-D. Niu, H. Yamaguchi, F. Magoulés , Natural Convection of Temperature-Sensitive Magnetic Fluids in Porous Media, Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 3, 2010, pp.121-130. (査読有)

⑬ Y. Sawai, X-D. Niu, De Vuyst, H. Yamaguchi, Measurement of Concentration in Solid-Liquid Two-Phase Flow Using Magnetic Fluid, 12th International Conference on Magnetic Fluids Physics Procedia, 9, 2010, pp.137-141. (査読有)

⑭ X-R. Zhang, L-C. Jina, X-D. Niu, H. Yamaguchi, Lattice Boltzmann Simulation for Magnetic Fluids in Porous Medium, 12th International Conference on Magnetic Fluids Physics Procedia, 9, 2010, pp.162-166. (査読有)

⑮ H. Yamaguchi, X-D. Niu, and X-R. Zhang, Investigation on a low-melting-point Gallium Alloy MHD Power Generator, International Journal of Energy Research, 35, 2010, pp.209-220. (査読有)

[学会発表] (計 16 件)

① H. Yamasaki, S. Umeda, Y. Iwamoto, H. Yamaguchi, Measurement of Vapor Void Fraction in Binary Magnetic Fluid Using Electromagnetic Induction Method, 2013/12/14, ISMTMF2013, Guangdong, China

② Y. Iwamoto, H. Yamaguchi, Miniaturized Heat Transport Device Using , The 5th International Workshop of Energy Conversion, 2013/11/26, Guangdong, China

③ H. Yamasaki, S. Umeda, Y. Iwamoto, Electromagnetic Induction Method For Measuring Multi-Phase Flow, The 5th International Workshop of Energy Conversion, 2013/11/26, Guangdong, China

④ Y. Iwamoto, H. Yamaguchi, X-D. Niu, H. Yamasaki, Thermal Flow Behaviour of a Binary Temperature-Sensitive Magnetic Fluid in a Horizontal Pipe, The 12th International Symposium on Fluid, 2013/11/2

⑤ Y. Iwamoto, X-D. Niu, H. Yamasaki, H. Yamaguchi, Hybrid Lattice Boltzmann

Simulation for Energy, The Tenth International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and Science, Oxford, UK, 2013/7/23

⑥ H. Yamasaki, X-D. Niu, H. Yamaguchi, Measurement of Solid-Phase Concentration in Solid-Liquid Two-Phase Flow using Magnetic Fluid, 13th International Conference on Magnetic Fluids, 2013/1/9, CSIR-NPL, New Delhi

⑦ H. Yamaguchi, Y. Iwamoto, Heat Transport with Temperature Sensitive Magnetic Fluid for Application to Micro-Cooling Devices, 13th International Conference on Magnetic Fluids, 13th International Conference on Magnetic Fluids, 2013/1/9, CSIR-NPL, New Delhi

⑧ H. Yamaguchi, Dynamic Rheology of Magnetic Viscoelastic Fluids, Japan-Taiwan International Conference on Magnetic Fluid, 2012/11/30, Doshisha University, Kyoto

⑨ Y. Iwamoto, X-D. Niu, H. Yamaguchi, R. Okuda T. Kuwahara, Heat Transfer Characteristics of Magnetically-driven Heat Transport Device using a Binary-temperature Sensitive Magnetic fluid, The 8th International Pamir Conference, 2011/10/6, France Club Belambra Pineto

⑩ X-D. Niu, H. Yamaguchi, Y. Iwamoto, Characteristic of A MHD Power Generator Using A Low-Melting-Point Alloy, MAGDA Conference in Pacific Asia, Kaohsiung, 2011/11/15, Taiwan Garden Villa, Kaohsiung

⑪ H. Yamasaki, X-D. Niu, H. Yamaguchi, Flow Regime Identification of Solid-Liquid Two-Phase Flow Using Magnetic Fluid Based on Electromagnetic Induction Method, MAGDA Conference in Pacific Asia, Kaohsiung, 2011/11/14, Taiwan Garden Villa, Kaohsiung

⑫ X-D. Niu, H. Yamaguchi, Y. Iwamoto, Energy Conversion using Ferrofluids, Japan-Taiwan Conference for Magnetic Nanoparticles on Biomedical Applications, 2011/11/11, Taiwan 国立中興大学

⑬ Y. Iwamoto, X-D. Niu, H. Yamaguchi, Energy Conversion using Ferrofluids, Japan-Taiwan Conference for Magnetic Nanoparticles on Biomedical Applications, 2011/11/12, Taiwan 国立中興大学

⑭ X-D. Niu, H. Yamaguchi, Y. Iwamoto, Characteristic of A MHD Power Generator Using

a Low-melting-point Alloy, Japan-Taiwan Conference for Magnetic Nanoparticles on Biomedical Applications, 2011/11/11, Taiwan 国立中興大学

⑮ X-D. Niu, H. Yamaguchi, Y. Iwamoto, International Journal of Energy Research, Natural Convection of Temperature-Sensitive Magnetic Fluids in Porous Media, The 4th International Symposium on Physics of Fluids, 2011/06/13-16, China, the Treasure Harbour International Hotel

⑯ X-D. Niu, H. Yamaguchi, Natural Convection of Temperature Sensitive Magnetic Fluids in An Enclosure With Porous Media, The 7th International Conference on Flow Dynamics, 2010/11/3, 仙台国際センター (宮城県)

[図書] (計 1 件)

① 山口博司, 磁性流体, 森北出版株式会社, 2014

[その他]

ホームページ等

同志社大学流体力学(山口)研究室
(<http://www1.doshisha.ac.jp/~hyamaguc/>)

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 (SHUUCHI 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

山田 昇 (YAMADA NOBORU)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 90321976