

令和元年5月21日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06100

研究課題名(和文)MRIを用いた流れの可視化と適用範囲の評価

研究課題名(英文)Flow visualization and applicability evaluation of various channel flows obtained by time-resolved MRI

研究代表者

細谷 和範 (HOSOTANI, Kazunori)

津山工業高等専門学校・総合理工学科・准教授

研究者番号：60509107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は工業製品内で発生する基礎的な流れをMRIによる時間分解撮像を行い、可視化が可能な流れを整理した。タグが与えられた水塊を時間分解撮影するTime-SLIP法を用いて樹脂製の流動ファントム内を過ぎる流れを撮像してMRIの流れ観察の適用性を評価した結果、二次元性の強い層流場では移動水塊を明瞭に撮像し、流れの特徴を十分に把握できることがわかった。一方で流速が大きい往復流場では管内流を除いて、取得画像から流れを把握することはできなかったが、乱れの発生個所や定性的な流れの把握が可能であった。このようにMRIは多くの制限を伴うが利用の仕方によっては強力な設計援用ツールとなりうるということがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、流動把握が可能なMRIが開発され、非侵襲的に流れの把握ができるようになった。しかしながら流動を観察できる流れ場の把握や整理は十分に行われていない。本研究で実施したTime-SLIP法による管内流などの基礎的な流れ場の時間分解撮像は、これまで直接観察することができなかった流路を過ぎる流れに対するMRIによる観察の適用性を調べたものであり、学術的意義を有する。またMRIは水や油などさまざまな流体を識別することが可能であり、医療分野から工業分野の広い分野にわたる流れの解析支援ツールとして活用できることを示したことに社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：In this study, time-resolved magnetic resonance imaging (MRI), a noninvasive medical diagnostic imaging technique, was evaluated as a non contact measurement tool for intuitively understanding fluid machinery. Simple pipe flows and channel flows are investigated to estimate this method's applicability to fluid machines by the 2D Time-SLIP;spatial labeling inversion pulse (Time-SLIP) method, which can track a labeled water mass and visualize it using two-dimensional images.

Test results suggest that the time-SLIP method of tracking a labeled water mass is sufficiently accurate for use in simple flow paths such as piped flow and swirling flow under low Re number conditions. On the other hand, unclear images were obtained in fast flow with turbulence and it makes estimation of velocity distribution more difficult. Thus, it has been confirmed that MRI has highly possibility to become a powerful tool for machine design, although it still has many limitations.

研究分野：流体工学

キーワード：MRI 流れの可視化 PIV 管内流 循環流 機械設計 熱交換器 Time-SLIP

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) MRIによる時間分解撮像

液体や気体が流動する工業製品の多くはCAD/CAMを用いて効率的でエネルギー損失を抑えた設計が行われている。設計される管内を流れる流体の挙動はCFD (computational fluid dynamics) によりシミュレートされ、複雑な流路を過ぎる流れや温度場、圧力場を直観的に把握することが可能になった。今日、CFDは工業分野だけでなく医療分野においても活用され、体内を流れる血流のシミュレーションなども行われている。しかしながら強い乱れを伴う流れや混相流場などの計算が難しい流れを扱う場合は実機や模型を用いた検証実験も重要である。広範囲の流れを非接触に計測するには流体内に投入されたトレーサー粒子の軌跡から速度ベクトル場を得るPIV (particle image velocimetry) やLDV (laser Doppler velocimetry)、超音波パルス測定法などがあるがいずれも観測できる範囲に限られ、複雑な流路内や管内奥部の計測は難しい。他方、医療分野で活用されている非侵襲的な画像診断装置であるX線CT画像装置やMRI (magnetic resonance imaging) 装置に時系列撮像や時間分解撮像が可能なモデルが開発され、嚥下の状況や脳動脈瘤内の血流観察に応用され始めている¹⁾。とりわけ造影剤なしに撮像できるMRIは油や水などのさまざまな流動観察が可能と見込まれ、燃料電池内に発生する水の挙動の可視化に活用されている²⁾。近年、より速い流れに対応したMRIも登場し、観察対象の液体塊にタグを付けて観察するASL (arterial spin labeling)法やTime-SLIP (time-spatial labeling inversion pulse)法は脳脊髄液の動的な挙動やメカニズムの解明に活かされている³⁾。また流れる流体と静止体との位相差を用いるPC (phase contrast) 法を基礎とする4D-MRIは流速に制限があるものの三次元の流速ベクトルが得られ、血栓内等の流動観察が行われている⁴⁾。こうした時系列あるいは時間分解撮像を行うことができるMRIの画像取得シーケンスは流れに応じたチューニングが必要で、観察できる流速に限られるなどの制限を伴う。

(2) MRIによる複雑な流れの観察

時間分解撮像が可能なMRIはこれまでCFDでしか全体像を把握できなかった機械内部の複雑な流れを非接触に把握できる可能性がある。しかしながらMRIによる流れの観察は手法により様々な制限を受け、乱れの強い流れ場や移動物体がある流れ場、剥離渦等、速度変化が大きい流れ場やアーチファクトが発生しやすい流れ場への適用は難しい。画像取得シーケンスが比較的簡単なASL法や派生型のTime-SLIP法でも適用可能な流れが十分に整理されていない。

2. 研究の目的

本研究では管内の過ぎる一様流や往復流場のような、主に工業分野にみられる基礎的な流れ場のほか、医工連携分野に共通する流れ場をモデル化した水理実験装置（流動ファントム）を開発し、MRIの撮像結果とPIVやその他の手法と比較して各流動場に対するMRI時間分解撮像の適用性を把握することを目的とする。この研究では撮像が比較的簡単な2D-Time-SLIP法を使用する医療用MRIを使用し、人体用の撮像設定を用いて実験を行う。

3. 研究の方法

(1) MRIガントリー内に設置可能な水理実験装置（流動ファントムシステム）の開発

MRI内部に設置可能な図1の水理実験装置の開発を試みた。試験に用いる流体は主に水（水道水）やグリセリンを淡水で希釈したものとし、試験流路（流動ファントム）に供給される流れは低Re数の定常流と周期数秒の往復流とした。往復流は圧縮空気によって駆動するペローズポンプにより作られる。試験流路や装置はPIV計測や可視化が容易に行えるよう、透明なアクリル素材で製作した。タンクから供給される流量は5cm³/s程度とし、往復流では周期数秒の条件を与えることができる設計を行った。

(2) MRIによる流れの測定とPIV等との比較検証

本申請課題では水等のように水素原子を持つ流体の中で任意のボリュームにタグパルスを与え、一定時間の経過後のボリューム形状を撮像する二次元のTime-SLIP法を用いてMRI撮像を行った。Time-SLIPの撮像方法は図2に示すように、タグパルスを与えたボリュームをBBTIと呼ばれる待機時間の後、TE (Time of Echo)区間で共鳴信号を得て画像化する。そして再び初期位置のボリュームにタグパルスを与えるが今後はdelay時間を加えて撮像することで移動水塊の形状を観察する。この撮像方法は定常流であれば時系列の流れの特徴を把握することができ、時系列性を考慮しなければ非定常流場の撮像も可能である。撮像は人体に用いられる条件 (TE = 78ms, BBTI = 1500 ms, delay = 100ms) を与えて行い、PIVやCFD、解析解と比較してMRIが流れの特徴を定量または定性的に評価可能かどうかを調べた。与える流速場は主に低Re数領域の層流場と周期2秒程度の往復流場とするが、応用実験では剥離渦や循環流れを撮像するために数百のRe数の流れを与えた。

a)管内流（定常流，脈動流）：円管と屈曲円管

b)異径管（定常流，脈動流）：ベンチュリー管，円筒バルブ

c)物体まわりの流れ：鈍頭物体の後流，流体ダイオード内の流れ，管群を過ぎる流れ

d)応用：噴流，攪拌槽内の流れ，気泡を含む流れ，温度差のある流れ場

e)その他：脊髄構造を参考にした弾性管内の流れ

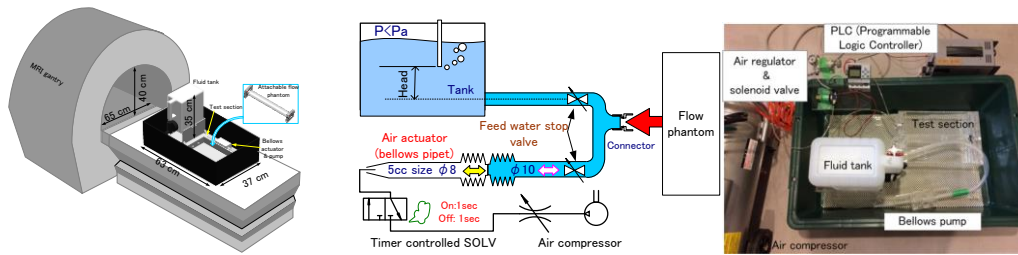


図1 開発した流動ファントムシステム

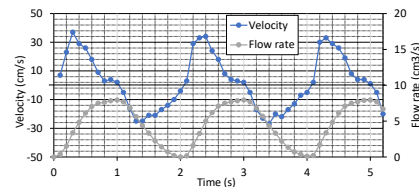
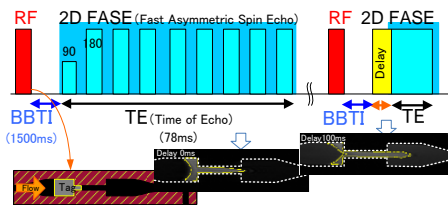


図2 Time-SLIP 法によるタグ水塊画像取得シーケンス 図3 ベローズポンプによる流量・流速の時系列

4. 研究成果

(1) 開発した水理実験装置（流動ファントムシステム）

図1(右)に開発した簡単な流動ファントムシステムを示す。装置はMRIガントリー内に容易に設置可能で、着脱式の試験流路（流動ファントム）を簡単に取り換えることができる。装置には一定流量で送水が可能な5リットルのタンクと任意のタイミングで駆動可能なベローズポンプを持ち、定常流と往復流の二系統の流路を持つ。30 cmのテストセクションに収まるように作られる供試流動ファントムはMRI撮像の他にPIV計測や可視化実験を行う必要があるため、透明なアクリル素材で製作される。ファントムに与えられる定常流はファントムの容量にもよるが、 Re 数が数百の主に層流条件を与えることができることを確認した。また往復流場では最大流速を基準とする $Re_m=1000$ 程度の流れを与えることができた。しかしながらこの簡単な試験装置は流量調整が難しいことや往復流場は図3に示すように正弦波状でないことから、精度を要求する水理実験はできないことがわかった。

(2) MRI撮像された流れと評価

流動ファントムシステムを用いてMRI撮像された結果をPIVやCFD、解析解と比較した。

a) 管内流（定常流，脈動流）：二重円管と屈曲円管

アクリル樹脂製の二重円管（同芯，偏芯の二種類）に $Re=500$ の一様流を与えた場合のタグ水塊の撮像結果を図4に示す。ここで供試円管は外管内側の直径が $\phi 26$ mmで内管径が $\phi 16$ mmであり、長さは300 mmである。タグが与えられるスライス面は幅5 mmで流れ方向に40 mmの水塊とした。定常流中のタグ水塊の形状は同芯管・偏芯管とも砲弾型の形を示している。水塊の外縁部の変化から求めた定常流や往復流の流速分布はPIVの結果と整合した。また周期2.5秒の往復流（流速最大時の $Re_m=1000$ ，Womersley number(Wo)数=5.3， Wo 数は粘性と周波数及び流路サイズによって表現される脈動流の特徴を表す無次元量）を与えた場合のタグ水塊はやや平坦な砲弾形状を示し， Wo 数で分類される流れの特徴と整合した。他方，図5は内径7 mmのPP樹脂製のエルゴ接手に流量5 cc/s程度（ $Re=470$ ）の定常流場を与えたケースのタグ水塊の撮像画像である。エルゴ管内にはDean渦と呼ばれる縦渦が発達するが，2DのTime-SLIP法による画像からタグ水塊の三次元的な挙動を把握することはできない。また直交部を通過する水塊からのアーチファクトも認められた。このように管内流のMRI撮像は可能であるが，三次元的でかつ急激に流向が変化する場合は注意が必要であることがわかった。

b) 異径管：ベンチュリー管，ボールバルブ

ベンチュリー管を模した流動ファントムを製作し， $Re=136$ の層流場を与え，タグ水塊の撮像結果を図6に示す。ファントムは長さ240mmで狭窄部は5 mm幅，拡大部で20 mmの幅を有する二次元形状で，奥行き幅は5 mmである。また図右には二次元の数値シミュレーションで得られた流れ場を元に仮想粒子の追跡シミュレーションを行った結果である。タグ水塊は水路中央部で増速されて長く伸びた形状を示し，数値シミュレーション結果と整合する。本研究ではこのベンチュリー管形状の流路以外にも急拡大・急縮小部を持つ流れ場なども試験を行ったが，層流条件の場合，タグ水塊の輸送形態は数値シミュレーションと整合し，水塊の形状から流れの様子を直観的に把握することができた。

円筒バルブを模した流動ファントムを通過する流れの撮像結果を図7に示す。流路は1 cm×1 cmの断面を持つ矩形状流路であり，円筒部の直径は2 cmである。この実験ではバルブ角を45°に固定して実験を行った。はじめに Re 数500の層流条件を与えたケースの撮像結果及び二次元の数値シミュレーションで得られた流速場(図7(上))を見ると，流体塊はバルブ開口部の間

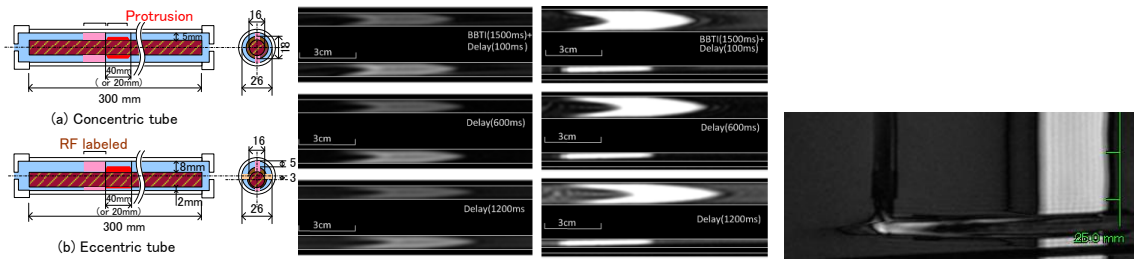


図4 同芯・偏芯二重円管内を過ぎるタグ水塊の動き 図5 エルボ管を過ぎる水塊 (Re=470)

隙を縫うように移動し、円筒部内によどみ領域が発生していることがわかる。タグ水塊パターンはバルブの開口部に沿って帯状の流速分布を示すシミュレーション結果と整合している。一方、図7(下)は周期2秒の往復流場が与えられた撮像結果を示す。往復流の最大流速は約30cm/sで、Re数より流れは乱流となっており、タグ水塊は複雑な濃淡模様を示した。このようにタグ画像から流れ場の様子を伺い知ることはできないもの、流れの乱れによってバルブ内全体にわたって流体が行きわたっていることがわかる。なお図7(下)は数度にわたって行った実験結果のうち、同じ位相時刻の画像を並べたもので、濃淡模様は類似していることがわかる。

c) 物体まわりの流れ：鈍頭物体後流の流れ、流体ダイオード、管群を過ぎる流れ

図8は流路幅30mmで奥行き3mmの流路に直径8mmの単一円柱を設置し、周期2秒で $Re_m = 2400$ の往復流場を与えたケースのMRI撮像画像とPIVによる結果(渦度、流線)を示す。PIV結果より往復流の加速に伴い、双子渦の発生が確認できる。流れはカルマン渦が生成する前に流れが逆進する様子が観察された。MRI撮像結果を見るとタグ水塊は双子渦の特徴を示しており、円柱背後で巻き込む流れを連想させる水塊パターンを示している。しかしながら、渦による循環パターンは把握できなかった。本実験に加え、Re数が500程度の定常流を与えてカルマン渦の撮像を試みたが、良好な画像を取得することができなかった。この原因の一つはタグ水塊が撮像までの1.5秒の待機時間(BBTI)の間にファントム外に移動してしまうことと撮像にかかる時間(TE)が78msと長いことに起因する。

渦流型流体ダイオードを模した流動ファントムと円管群を過ぎる流れの撮像結果を図9(1)(2)に示す。図9(1)の右図はPIVによる速度ベクトルを示す。流体ダイオードは順方向(図左から右)の場合、流れは壁面に沿って出口に向かうために流動抵抗が小さいのに対して逆方向の場合は水路内に時計回りの循環が発達し、流動抵抗が大きくなる。供試ファントムは流路幅3mmで円形部の直径は21mmである。MRI撮像画像を見ると、順方向のケースではタグ

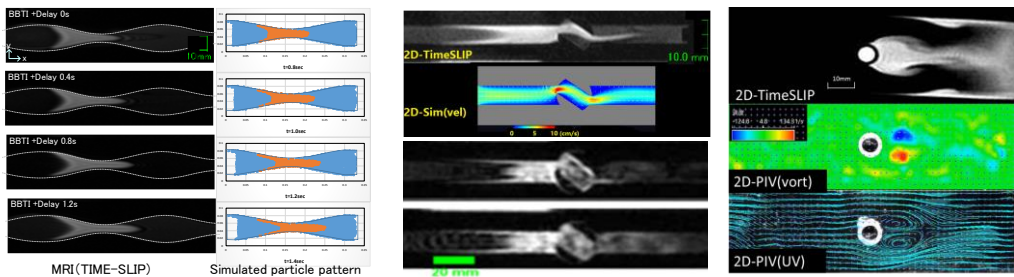


図6 ベンチュリー管 (Re =136) 図7 円筒バルブ (Re=50, Re_m=1000) 図8 単一円柱 (Re_m=2400)

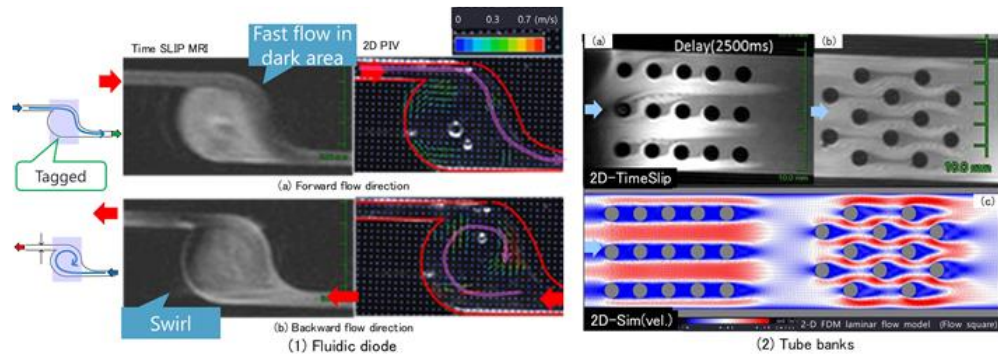


図9 流体ダイオード内のタグ水塊 (左) と円管群を過ぎるタグ水塊 (右)

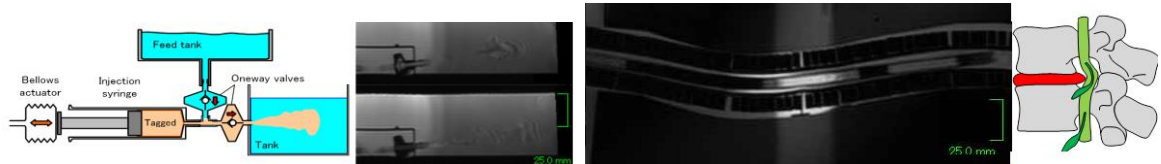


図10 シリンジによる噴流のMRI撮像結果 図11 脊髄内のCSFをモデルとした流動ファントム

水塊が通過した後に流入した水による暗い領域が流路右側壁面に沿って帯状に分布しており、スムーズな流れであることがわかる。一方で逆方向のケースでは円形流路に帯状の流路パターンは見られず、時計回りの循環によって流れにくくなっている様子がわかる。図 9(2)は熱交換器等にみられる円管群をモデルとした流動ファントムである。円柱は直径 8 mm で配列は格子状及び千鳥状とした。それぞれの配列間隔はスパン方向に 15 mm, 流下方向に 20 mm である。図下は二次元の数値シミュレーションによる流速分布 (赤: 2 cm/s) を示す。Re = 137 の層流場を与えたところ、配置に特徴的な流れ場が撮像されて、計算結果とも整合した。

d) 応用: 噴流, 攪拌槽内の流れ, 気泡, 温度差のある流体の流れ場

50 ml サイズのガラス製シリンジをペロローズアクチュエータに接続し、水中に吐出される噴流を撮像した結果を図 10 に示す。シリンジ内に貯められたタグ水塊は噴射されるとともにタンク内に拡散され、水塊の濃淡画像から噴流の様子を伺い知ることができる。しかしながら噴流の輪郭は不鮮明であるほか、噴流に伴って生じるせん断渦構造は把握できない。また気泡を混入させたケースを撮像したところ、TE が 78 ms と長いために気泡の形状を把握することはできなかった。

MRI は緩和時間や拡散係数, 化学シフト量に温度依存性を有する。ビーカー内におよそ 70 °C の湯を 1 リットル入れ、その中に 2 cc/s の流量で 15 °C 以下の冷水が流れるシリコンチューブ (内径 ϕ 8 mm) を設置して MRI 撮像を行ったところ、単純撮像画像 (T2 強調画像) では冷却された領域が識別できたが Time-SLIP 法による温度分布の把握はできなかった。

e) その他: 脊髄構造を参考にした弾性管内の流れ

流体機械内部で生じる流れ場は人体内で発生する流れ場と共通するものも多い。ここでは一つの例として、脊柱管を満たす脳脊髄液 (CSF) の流れを模擬する弾性二重円管を製作し、4 秒周期の往復流場を与えて撮像した (図 11)。タグ水塊の動きは前述の二重円管の流れと類似し、実際の CSF と同様に内管 (脊柱管を想定) と外管 (くも膜と硬膜を想定) の数 mm の隙間を往復移動する水塊の時間分解撮像ができた。このように今後さまざまな疾患状況を作り出し、患部を過ぎる CSF の流れをシミュレートできる CSF ファントムとして発展できる可能性がある。

(3) 結果のまとめ

本研究では主に工業製品内で発生しうる基礎的な流れを対象に MRI による時間分解撮像を行い、可視化が可能な流れを整理した。樹脂製の流動ファントム内を過ぎる流れを 2D-Time-SLIP 法による MRI で時間分解撮像を行い、タグ水塊の移動の様子を PIV 計測結果等と比較して評価を行った。この結果、管内を流れる二次元性の強い層流場では移動する水塊パターンを明瞭に観察することができ、定量的な評価も可能であることがわかった。また円筒バルブ、流体ダイオード、円管群を過ぎる流れも明瞭に把握することができ、定性的な評価は十分可能であることがわかった。一方で Re 数が大きい往復流場では管内流を除いてタグ水塊パターンが不明瞭になり、流れパターンの把握は困難であった。ただし乱れの様子や循環流や渦構造の定性的な把握は可能であった。また気泡や噴流は撮像時間 (TE) が長い場合不明瞭であったほか、プロペラ等の移動物体が FOV に入ると強いアーチファクトが生じることがわかった。以上より Time-SLIP を用いた MRI による流動観察は多くの制限を伴うが流体機械等の強力な設計援用ツールとなり得ることがわかった。本研究において調べた基礎的な流れ場のうちいくつかは人体内部の流れと共通しており、得られた知見は分野横断的な活用が期待できる。

<引用文献>

- ① 才藤ほか, 嚥下 CT の登場: 嚥下研究の新しい地平線, The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine, 2012, 49 巻, 12 号, p. 879-884.
- ② Tsushima and S. Hirai, Magnetic resonance imaging of water in operating polymer electrolyte membrane fuel cells, Fuel Cells, vol. 9, 5, 2009, pp. 506-517.
- ③ K. Takeuchi, et. al, Visualization of cerebrospinal fluid flow in syringomyelia through noninvasive magnetic resonance imaging with a time-spatial labeling inversion pulse (Time-SLIP), J Spinal Cord Med., 40 (3), 2017, pp. 368-371.
- ④ M. Markl, et. al, Time-resolved three-dimensional phase-contrast MRI, J. Magn. Reson. Imaging, 17, 2003, pp. 499-506.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Kazunori HOSOTANI, Shota UEHARA, Toru ISHIHARA, Atsushi ONO, Kazuhiro TAKEUCHI and Yusuke HASHIGUCHI, Development of the MRI Flow Phantom System Focused on Low Speed Flows in Fluid Machinery, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol. 30 No. 4, 2018, pp. 650-659. <https://doi.org/10.20965/jrm.2018.p0650>
- ② Kazunori HOSOTANI, Atsushi ONO, Kazuhiro TAKEUCHI, Yusuke HASHIGUCHI and Tomoya NAGAHATA, FLOW VISUALIZATION OF SIMPLE PIPE AND CHANNEL FLOWS OBTAINED BY THE MRI TIME-SLIP METHOD, Journal of Visualization, 査読有, Volume 20, Issue 2, 2016, pp 321-335. doi:10.1007/s12650-016-0395-1

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① Kazunori HOSOTANI, Kotaro OKA, Kazuhiro TAKEUCHI, Atsushi ONO, Yusuke HASHIGUCHI and Toru ISHIHAR, Flow Visualization on Fluidic Diodes and Tube Banks Using 2D Time-SLIP MRI and 2D-PIV, The 8th International Conference on Manufacturing Machine Design and Tribology (ICMDT2019, 4/24-26), 2019, Proceedings of ICMDT.
- ② 細谷和範, 石原徹, 上原笙汰, 竹内一裕, 小野敦, 橋口雄助, 工業製品内部の流れの可視化を目指した MRI 用流動ファントムシステムの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2017 (福島), 5/10-11), 2017, 1A1-J02.
- ③ 細谷和範, 石原徹, 上原笙汰, 竹内一裕, 小野敦, 橋口雄助, 脳脊髄液の流れを模擬した簡易 MRI フローファントムの試作, 第 30 回バイオエンジニアリング講演会 (京都, 12/14-15), 2017, pp. 122.
- ④ 上原笙汰, 細谷和範, 石原徹, 小野敦, 竹内一裕, 橋口雄助, Time-SLIP MRI を用いた攪拌槽内流動の可視化, 第 30 回バイオエンジニアリング講演会 (京都, 12/14-15), 2017, pp. 123.
- ⑤ 上原笙汰, 細谷和範, 石原徹, 竹内一裕, 小野敦, 橋口雄助, 日本機械学会中国四国学生会 第 47 回学生員卒業研究発表講演会, 2017.
- ⑥ 細谷和範, 上原笙汰, 竹内一裕, 小野敦, 橋口雄助, Time-SLIP MRI による突起部を有する二重円管内流れの可視化, 可視化情報学会全国講演会 (日立, 10/8-9), 2016, D103.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計 0 件）
- 取得状況（計 0 件）

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：竹内 一裕

ローマ字氏名：(TAKEUCHI Kazuhiro)

所属研究機関名：独立行政法人国立病院機構岡山医療センター

部局名：臨床研究部

職名：リハビリテーション科医長

研究者番号 (8 桁)：30304306

研究分担者氏名：小野 敦

ローマ字氏名：(ONO Atsushi)

所属研究機関名：川崎医療福祉大学

部局名：医療技術学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：20804743

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。