

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02868

研究課題名（和文）流体構造連成解析による大動脈瘤成長・破裂のリスク予測システムの開発

研究課題名（英文）Development of Rupture-Risk-Prediction System for Aortic Aneurysm Using Fluid&#8211;Structure Interaction Analysis.

研究代表者

竹原 康雄（Takehara, Yasuo）

名古屋大学・医学系研究科・特任教授

研究者番号：70188217

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,880,000円

研究成果の概要（和文）：腹部大動脈は加齢により動脈硬化し、過長弯曲した流路変形が局所乱流を引き起こし、局所の壁剪断応力（WSS）の低下を招く。これが凝固線溶免疫系を介した粥状硬化の悪化と更なる壁脆弱性を助長し、局所壁膨隆から更に乱流を生ずる。この悪循環を流体構造連成解析を用いてiterativeに再現するin-silicoモデルを試作し、実際の12例のAAA患者で、造影MR angiography・4D Flow MRIによるin-vivoの結果並びにファントム実験によるin-vitroの結果と比較して検証した。試作したモデルでは、非拡張腹部大動脈がリモデリングして実際のAAAに形状が近づいてゆく様子が観察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

腹部大動脈瘤（AAA）の患者数は増加しており、高齢化に伴いさらなる増加が予想される。また近年、ステントグラフト内挿術（EVAR）の普及により、治療件数も増加し、適応拡大が医療費の膨張を招く恐れがある。このモデルを完成させることができればAAAの予後予測と治療介入時期の最適化を行い、患者の予後を改善するとともに、医療費の削減にも寄与することができる。学術的には、血流の乱れが動脈壁の脆弱化や動脈瘤の成長にどのように影響するかを明らかにするという生理学的、基礎医学的命題の解決に寄与し、流体解析、数値流体力学を基盤とする流体構造連成解析という数学・物理学的手法を医療実践に結びつけるという意義もある。

研究成果の概要（英文）：The abdominal aorta undergoes arteriosclerosis with aging, resulting in elongated and curved flow paths that induce local turbulence and a decrease in local wall shear stress (WSS). This promotes the worsening of atherosclerosis and further wall weakening through coagulation-fibrinolysis and immune systems, leading to local wall bulging and further turbulence. This vicious cycle creates abdominal aortic aneurysms. We developed an in-silico model using fluid-structure interaction (FSI) analysis to iteratively reproduce this vicious cycle. This model was validated against in-vivo results from contrast-enhanced MR angiography and 4D Flow MRI, and in-vitro results from phantom experiments, in 12 actual AAA patients. The prototype model showed that the non-dilated abdominal aorta remodels and gradually approximates the shape of an actual AAA.

研究分野：放射線医学

キーワード：流体構造連成解析 腹部大動脈瘤 数値流体力学 流体ファントム 壁剪断応力 oscillatory shear index 動脈瘤破裂

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

腹部大動脈瘤(AAA)は我が国において増加傾向で、疾患比率も増加しており、潜在患者数は 200 万人ともいわれる(欧米における有病率は 4~7%とされる)。また、治療対象となる大動脈瘤の患者数も増加傾向で、AAA の手術件数は 2008 年以降、年間 8000 件近くが継続して登録され(日本血管外科学会統計)、高齢化が進行する我が国においては、AAA 患者は今後も増加傾向にあると考えられる。更に近年、ステントグラフト内挿術による EVAR(endovascular aortic repair)が開始されると、急速な普及をみて、直達手術件数を超える患者数が EVAR で治療されるようになった。低侵襲の手技として、直達手術に耐えられない患者でも適応となるため、高齢化の進む我が国では今後も EVAR 治療は増加の傾向を辿ることが予想される。しかし半面、EVAR ではステントグラフトをはじめ物品費用のみでも一手技 200 万円を超える高額な費用を要し、適応を限らないと、医療費の膨張に更なる拍車をかける恐れもある。術後の ADL や QOL の観点からはもちろん、医療経済学的にも介入の適応決定や適切な施行時期決定が重要となりつつある。AAA の主たる要因は粥状硬化で、これを促進する因子としては様々なものがあるが、血管内の血行動態の異常が大きな因子となっている証拠が生理学領域で多数提出されている。具体的には血管内皮細胞にかかる壁剪断応力(WSS: wall shear stress) の低下($<1.5\text{Pa}$ とされる) や剪断振動指標(OSI: Oscillatory Shear Index) の上昇が凝固線溶系、免疫系の伝達物質産生や VEGF-R2 等の遺伝子の発現を誘発し動脈硬化形成に深く関与することが生理学的に知られている。

WSS と粥状硬化: WSS とは、血流が動脈壁に与える摩擦力という喩えがわかりやすいが、粘性と壁近傍の速度勾配(dv/dx)の積で計算可能で、3 次元壁表面にマップも表示可能である。血管壁を裏打ちする血管内皮にはこの WSS を感知する mechanoreceptor があり、WSS の低下から流速の低下を検知した内皮細胞は、免疫系、凝固線溶系を発動して、血管内径を縮小、粥状硬化に誘導することにより流路を狭くして流速を保つ。しかし副作用として、動脈壁の粥状硬化性変化と同時に壁の脆弱化が進行することで、粥状硬化性変化の究極の表現形としての動脈瘤の形成や、血管閉塞による循環の途絶をきたす。脆弱化した大動脈の流路が内圧に負けて拡張が生ずると逆圧力勾配になりやすく、流れが乱れることで、内皮細胞の mechanoreceptor が感知する WSS は更に低下し、WSS のゆらぎである OSI も更に上昇する。申請者らは、血管に生じた軽度の形態学的な変化や血流の乱れが動脈瘤の“芽”となると考えている。非拡張の状態において、その芽は大動脈過長による蛇行であったり、コンプライアンスを失った下肢動脈からの血流の反射波と大動脈の順行性血流との衝突であったりするであろう。そのような部分に粥状硬化のスイッチが入り、弱くなった壁に変形が生じ、それが流れを乱し、といった悪いサイクルに入り、加速度的に大動脈瘤を成長せしめると考えている。なお、血流が淀むと、凝固線溶系を介して壁に血栓が沈着し、内皮が検知する WSS はゼロになり、この悪いサイクルを助長、壁に血栓層は、血液からの酸素の拡散を妨げ、vasa vasorum の閉塞と共に壁の hypoxia を生じ、更に壁脆弱化に寄与する強力な因子となる。動脈瘤成長のリスク定量は可能か? : 大動脈瘤は破裂すると大量の失血により致命的となる。大動脈瘤は最大径 55mm を超えると破裂のリスクが加速度的に高まるとされているが、それより小さな動脈瘤が安全ということも無い。特に嚢状瘤では紡錘状瘤と比較して増大スピードは速く、予後が悪いと言われている。これはメインストリームからの血流の剥離が生じ、嚢状瘤の WSS が紡錘状瘤よりも著しく低下しているためであると申請者らは推定している。いうまでもなく、患者個別の治療基準、対応が望まれるのである。WSS の分布はこれまで in-vivo で概観したり、定量したりすることは不可能であった。4D-Flow MRI は新しく臨床現場にもたらされた画像診断技術のイノベーションであり、関心領域に設定した 3 次元空間(あるいは心時相の時間軸を含めると 4 次元空間)内での流速ベクトルを in-vivo で後方視的に任意の測定ポイントで無制限に計測できることから、3 次元構造物である大血管の流速・流量の定量や、WSS やそれに派生する OSI, GON (gradient oscillatory number) 等の指標を網羅的に 3 次元モデルで可視化し、また、ROI の設定により任意の領域の同数値を定量化することが可能となった。ところで、流路内の流体速度を実測せずに、シミュレーションする方法も近年進歩が著しく、血管壁の伸縮を含めた流体構造連成解析(FSI: fluid-structure interaction)により高精度な推定が可能となっている。計測の場合、速度勾配の最大値は計測解像度により決定する。実際の推定される WSS を勘案すると定量評価には 4 D-Flow MRI では十分ではないことが知られており、シミュレーションの併用は不可欠である。一方、流体構造連成解析は秒単位の現象を捉えるもので動脈瘤成長は年単位の現象である。したがってリスクの定量化においては、この WSS に基づく“動脈硬化の芽”をもとに、瘤成長のモデルが必要である。ここで、計測可能な血管壁の形状は圧力負荷時の形状であり、無負荷時(ZSS: zero-stress state)ではない。そこで、WSS に基づく芽を利用して壁の ZSS を変更する成長モデルが必要となる。

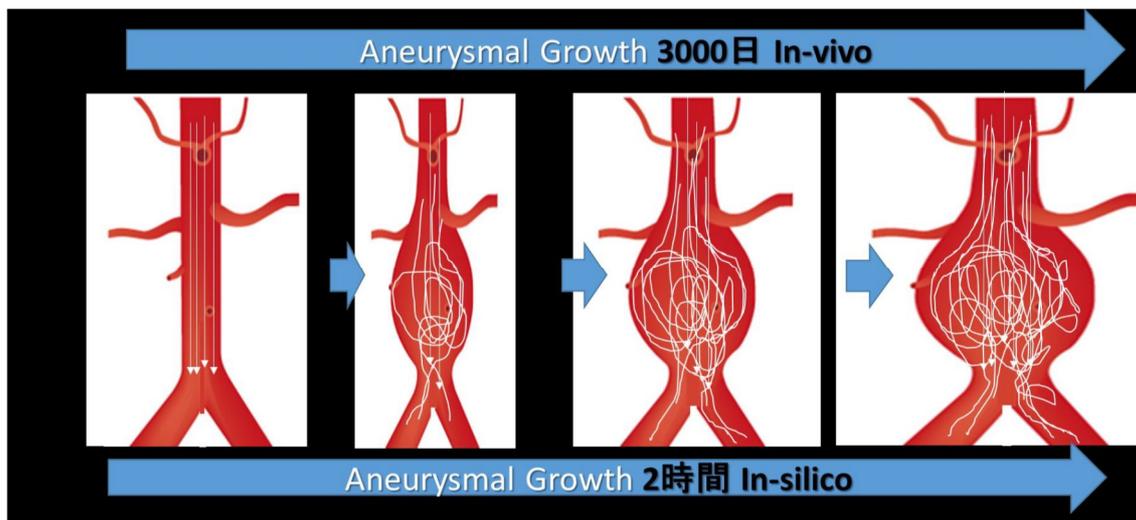
2. 研究の目的

このモデルと実例との整合性が取れれば年単位の変化予測は可能である。本研究は申請者らの

仮説である、局所乱流形成 WSS の低下($<1.5\text{Pa}$) 壁在血栓沈着・粥状硬化の進展 壁脆弱化 壁膨隆 流路拡張 局所乱流形成の悪いサイクルを in-vivo ならぬ in-silico で iterative に繰り返し、仮想空間で AAA の育成を行い。これにより In-vivo で 3000 日かかる瘤成長を in-silico で数時間で予想するモデルを構築することである(下記概念図)。このプロセスは、FSI (Fluid-Structure Interaction) と相性の良いものであり、流体が構造物を変形させ、構造物が流体に影響を与える現象といえる。また、前述の相互作用がどのような時間軸で進行するかは既存の実症例の縦断的データから割り出すことができる。更に、破裂症例の特徴量を抽出し、リスク定量に使用することにより、適切な介入時期の選択につなげることができる。つまり、従来研究にあるような仮想空間のみでの simulation を行うのではなく、in-vivo 並びに in-vitro 個別の流体解析と個別物性値による構造解析といった実空間データでの補正を行い、瘤成長破裂予想システムの信頼性、再現性向上を目指すのが、本研究の従来研究に無い特徴である。

概念図

in-vivo で 3000 日かかる腹部大動脈瘤成長を in-silico で 2 時間で完成させる。



3. 研究の方法

流体構造連成解析 (FSI) による in-silico での腹部動脈瘤 (AAA) 成長のモデル作製と、その検証を数値流体力学 (CFD) を用いて行った。それを検証するための実空間での流体ファントム実験を行い、また、4D Flow MRI を施行した 12 例の実症例を用いてモデルの妥当性を検討した。WSS 低下によって脆弱化する動脈壁の膨隆のさせ方に関してはいくつかの可変パラメータを含むが、基本的にゼロ応力仮説 (Zero-Stress State Hypothesis) を用いた。この仮説は、血管に内力や外力が全くかかっていない状態 (ゼロ応力状態, Zero-Stress State, ZSS) を基準にして、血管の形状や力学的特性を評価するもので、ZSS を考慮することで、動脈瘤の発生や進展に関するシミュレーションの精度が向上する。ZSS を推定するための手法として、以下の 3 段階のステップが取られる。1) 初期形状の取得: 医用画像 (本研究では MRI) から血管の形状データを取得。この形状は実際の生体内での応力がかかった状態を反映している。2) 逆シミュレーション: 血管壁の形状から血圧負荷時に血管形状データと同じになるように、最終的なゼロ応力状態の形状を推定する。この過程では、弾性理論や非線形力学を用いて解析を進める。3) 力学的特性の評価: ゼロ応力状態の形状を基に、血圧を変化させるシミュレーションを行い、応力や歪みなどの血管壁の力学的特性を評価する。

本研究では、数値解析手法としては、Space-Time Isogeometric Analysis (ST-IGA) や変分マルチスケール法 (Space-Time Variational Multiscale; ST-VMS) を用いた。ST-IGA は、流体解析における数値解析手法の一つであり、特に時間方向と空間方向の両方に対して有限要素法を適用する方法である。ST-IGA の主な特徴は、従来の有限要素法 (FEM) と比較して、より高い精度と効率を持つことである。ST-VMS は時間方向と空間方向の両方に有限要素法を適用し、変分マルチスケール法 (VMS) を組み合わせた数値解析手法である。この手法は、流体の複雑な挙動を高精度かつ効率的に解析するために使用される。

仮説やモデルの妥当性を検証するために使用した評価方法は、形状分野で用いられる Shape Index (形状指数) と呼ばれるもので局所の局所的な状態を表現する曲率 (法曲率と呼ばれる符号付きの 2 つの曲率半径の逆数) から定義されるスカラー値である。Shape Index (形状指数) は、3 次元の形状を曲率の正負とその組み合わせで分類するための指標であり、 -1 から $+1$ までの数値で表現される。Shape Index は、主に生体内の複雑な形状解析に使用され、特に動脈瘤や血管の形状変化の研究において有用である。形状の局所的な曲率を定量化することで、形状の特徴を数値的に表現することができる。

4. 研究成果

加齢とともに、動脈硬化のために大動脈が過長となり、それによって大動脈の弯曲・蛇行を生じることが知られている。弯曲の大弯側と小弯側において血流の乱れが生じるが、その乱流の生じ方に差があり、それが局所壁剪断応力（WSS）の低下を招く。WSSの低下した壁では、血管内皮細胞がそれを感知し、凝固線溶系、免疫系の伝達物質産生や VEGF-R2 等の遺伝子の発現を誘発し壁脆弱性を生じることが生理学的に既知である。脆弱化した壁は内圧に屈して膨隆し、その膨隆が更に局所の乱流と時間平均 WSS（TAWSS）の低下を招くという悪循環に入り、膨隆に加速度がつくという仮説を立て、この仮説の下で動作するモデルを仮想空間に構築した。

まず、大動脈の蛇行に関しては構造力学的要因で生じるものであり、特に血管の残留応力によると考えられる。一方このような現象は大動脈を格納する胸腹腔の容積変化などのより大きな身体の変化に依存するため、ここでは蛇行が生じ、動脈が曲がった場合どのようにしていくかを観察することで仮説に対する検証とすることにした。まず、動脈硬化のないまっすぐな腹部大動脈を対象とした計算[1]では、流れに顕著な特異性が見受けられず、ほぼ均一な壁剪断応力の分布をみた。そのため、疾患のある血管から太い箇所を補足し蛇行しているということを実現した上で低剪断の箇所を膨らませそこから傾向を探るという実験[2]を仮想空間で実施した。この方法は全体を一様に膨らませるといった方法とは異なる顕著な傾向があることが示された[3]。

この評価指標を用いてシミュレーションを行ったところ、腹部大動脈の形状を均一に膨らませた場合 shape index の変化方向が形状によって一意に決定されるが、壁面剪断応力を用いた方法ではこの傾向とは一致せず逆に疾患によって生じる膨らみの方向に類似している。これが本研究で仮説を肯定する傾向として評価する理由である。

実症例を用いた検証プロセス

前述の AAA に関する仮説や前提が、実際の症例でも矛盾なく機能するか検証するため、4D Flow MRI を含む MR 検査を施行した AAA を有する実症例 12 例の造影 MR angiography を STL に変換し、弯曲の中心線を共有するような非拡張モデルを作製した。これに 4D Flow MRI で計測した実際の症例における血液の流入速度を境界条件として、3 次元的に TAWSS を計測し、TAWSS の低下した壁を僅かに膨隆させた新たなモデルを作製した。これに再度 CFD を行って、新たな WSS の分布を計測するというプロセスを繰り返したところ、TAWSS の分布を基に解析格子を 2 回拡大した結果、shape index（3D 形状を曲率の正負とその組み合わせで分類した指標）が 1 に近い部分が増え、実際に完成した AAA 形状の特徴に近いモデリングが得られた。仮説に基づく AAA の成長モデルとして矛盾しないものが完成した。

流体ファントムによる検証

3D printer で形状を正確に再現した流体ファントム実験を要所、要所で 4D Flow MRI を施行して流体解析しており、流体構造解析の結果で得られる流体の挙動を支持する結果を得ている。特に、壁に伸展性が生ずるような材質を使用して、壁のコンプライアンスを与えたモデルでの検証も行っており、より実症例に近い結果が得られている。

結語と将来展望

コロナ禍の只中で、撮影現場や解析現場でのやりくりがつかず、今回は、多数の実症例での時間縦断的な検証まではできなかったが、FSI による大動脈瘤成長・破裂のリスク予測システム構築の端緒には漕ぎ着けることができた。今後は、縦断的に追跡できた実症例を蓄積することにより、現在未定のパラメータを決定して、FSI による大動脈瘤成長・破裂のリスク予測システムを完成させたい。

参考文献

- 1) W. Fukuda, Y. Saito, T. Terahara, K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, "Shape and blood flow changes in abdominal aortic aneurysm formation", in Proceedings of the 37th Symposium on Computational Fluid Dynamics, Nagoya, Japan, (2023).
- 2) W. Fukuda, "Hemodynamic analysis of aneurysm progression in the abdominal aorta", Bachelor's thesis, Waseda University, 2024.
- 3) W. Fukuda, "Hemodynamic analysis of aneurysm progression in the abdominal aorta", Bachelor's thesis, Waseda University, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Hyodo Ryota, Takehara Yasuo, Naganawa Shinji.	4. 巻 127
2. 論文標題 4D Flow MRI in the portal venous system: imaging and analysis methods, and clinical applications.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Radiol Med.	6. 最初と最後の頁 1181-1198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11547-022-01553-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamanaka Y, Sano M, Katahashi K, Inuzuka K, Takehara Y, Ojima T, Takeuchi H, Unno N.	4. 巻 S1078-5884(23)
2. 論文標題 Pre-Operative Four Dimensional Flow Sensitive Magnetic Resonance Imaging Assessment of Aortic Side Branches as a Method to Predict Risk of Type II Endoleak Resulting in Sac Enlargement After EVAR.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Eur J Vasc Endovasc Surg.	6. 最初と最後の頁 00076-X
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejvs.2023.01.042.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takehara Yasuo, Sekine Tetsuro, Obata Takayuki	4. 巻 21
2. 論文標題 Why 4D Flow MRI? Real Advantages	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Magnetic Resonance in Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 253 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2463/mrms.e.2022-1000	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takehara Yasuo	4. 巻 21
2. 論文標題 Clinical Application of 4D Flow MR Imaging for the Abdominal Aorta	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Magnetic Resonance in Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 354 ~ 364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2463/mrms.rev.2021-0156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sugiyama Masataka, Takehara Yasuo, Naganawa Shinji	4. 巻 21
2. 論文標題 Does the Pulsatile Non-uniform Flow Matter in MR Flowmetry?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Magnetic Resonance in Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 365 ~ 371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2463/mrms.rev.2021-0099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Itatani Keiichi, Sekine Tetsuro, Yamagishi Masaaki, Maeda Yoshinobu, Higashitani Norika, Miyazaki Shohei, Matsuda Junya, Takehara Yasuo	4. 巻 21
2. 論文標題 Hemodynamic Parameters for Cardiovascular System in 4D Flow MRI: Mathematical Definition and Clinical Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Magnetic Resonance in Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 380 ~ 399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2463/mrms.rev.2021-0097	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Terada Masaki, Takehara Yasuo, Isoda Haruo, Wakayama Tetsuya, Nozaki Atsushi	4. 巻 21
2. 論文標題 Technical Background for 4D Flow MR Imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Magnetic Resonance in Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 267 ~ 277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2463/mrms.rev.2021-0104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miyajima Keisuke, Urushida Tsuyoshi, Ito Kazuki, Kin Fumihiko, Okazaki Ayako, Takashima Yasuyo, Watanabe Tomoyuki, Kawaguchi Yoshitaka, Wakabayashi Yasushi, Takehara Yasuo, Maekawa Yuichiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Four-dimensional flow magnetic resonance imaging visualizes reverse vortex pattern and energy loss increase in left bundle branch block	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EP Europace	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/europace/euab299	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hyodo Ryota, Takehara Yasuo, Mizuno Takashi, Ichikawa Kazushige, Yokoyama Shinya, Ishizu Yoji, Naganawa Shinji	4. 巻 -
2. 論文標題 Assessing the Complicated Venous Hemodynamics and Therapeutic Outcomes of Budd-Chiari Syndrome with Respiratory-gated 4D Flow MR Imaging During the Expiratory and Inspiratory Phases	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Magnetic Resonance in Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2463/mrms.ici.2021-0110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hyodo Ryota, Takehara Yasuo, Mizuno Takashi, Ichikawa Kazushige, Ogura Yasuhiro, Naganawa Shinji	4. 巻 20
2. 論文標題 Portal Vein Stenosis Following Liver Transplantation Hemodynamically Assessed with 4D-flow MRI before and after Portal Vein Stenting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Magnetic Resonance in Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 231 ~ 235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2463/mrms.ici.2020-0057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hyodo Ryota, Takehara Yasuo, Mizuno Takashi, Ichikawa Kazushige, Ishizu Yoji, Sugiyama Masataka, Naganawa Shinji	4. 巻 51
2. 論文標題 Time resolved 3D cine phase contrast magnetic resonance imaging (4D flow MRI) can quantitatively assess portosystemic shunt severity and confirm normalization of portal flow after embolization of large portosystemic shunts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hepatology Research	6. 最初と最後の頁 343 ~ 349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/hepr.13616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Katsunori, Takehara Yasuo, Sakata Mayu, Kawate Masanori, Ohishi Naoki, Sugiyama Kosuke, Akai Toshiya, Suzuki Yuhi, Sugiyama Masataka, Kawamura Takafumi, Morita Yoshifumi, Kikuchi Hiroto, Hiramatsu Yoshihiro, Yamamoto Masayoshi, Nasu Hatsuko, Johnson Kevin, Wieben Oliver, Kurachi Kiyotaka, Takeuchi Hiroya	4. 巻 16
2. 論文標題 Daikenchuto increases blood flow in the superior mesenteric artery in humans: A comparison study between four-dimensional phase-contrast vastly undersampled isotropic projection reconstruction magnetic resonance imaging and Doppler ultrasound	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 0245878 ~ 0245878
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0245878	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hyodo Ryota, Takehara Yasuo, Mizuno Takashi, Ichikawa Kazushige, Horiguchi Ryota, Kawakatsu Shoji, Mizuno Takashi, Ebata Tomoki, Naganawa Shinji, Jin Ning, Ichiba Yoshito	4. 巻 308
2. 論文標題 Four-dimensional Flow MRI Assessment of Portal Hemodynamics and Regeneration after Portal Vein Embolization Hepatic	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Radiology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1148/radiol.230709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Horiguchi Ryota, Takehara Yasuo, Sugiyama Masataka, Hyodo Ryota, Komada Tomohiro, Matsushima Masaya, Naganawa Shinji, Mizuno Takashi, Sakurai Yasuo, Sugimoto Masayuki, Banno Hiroshi, Komori Kimihiro, Itatani Keiichi	4. 巻 57
2. 論文標題 Postendovascular Aneurysmal Repair Increase in Local Energy Loss for Fusiform Abdominal Aortic Aneurysm: Assessments With 4D flow MRI	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetic Resonance Imaging	6. 最初と最後の頁 1199 ~ 1211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jmri.28359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hyodo Ryota, Takehara Yasuo, Ishizu Yoji, Nishida Kazuki, Mizuno Takashi, Ichikawa Kazushige, Horiguchi Ryota, Kurata Nobuhiko, Ogura Yasuhiro, Yokoyama Shinya, Naganawa Shinji, Jin Ning, Ichiba Yoshito	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of 4D Flow MRI Derived Relative Residence Time as a Marker for Cirrhosis Associated Portal Vein Thrombosis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Magnetic Resonance Imaging	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jmri.29357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Ryota Hyodo, Yasuo Takehara, Takashi Mizuno, Kazushige Ichikawa, Yasuhiro Ogura, Shinji Naganawa
2. 発表標題 Hemodynamic changes in liver transplant donors after surgery: analysis with 4D flow MRI
3. 学会等名 European Congress of Radiology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Takashi Mizuno, Yasuo Takehara, Ryota Hyodo, Ryota Horiguchi, Kazusige Ichikawa, Haruo Isoda, Shinji Abe, Yoshito Ichiba, Shinji Naganawa
2 . 発表標題 Effect of Stent Graft implantation after EVAR on Energy Loss Measurements
3 . 学会等名 European Congress of Radiology (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Takashi Mizuno, Yasuo Takehara, Ryota Hyodo, Ryota Horiguchi, Kazusige Ichikawa, Haruo Isoda, Shinji Abe, Yoshito Ichiba, Shinji Naganawa
2 . 発表標題 Energy loss measurement associated with morphological change by stent graft placement
3 . 学会等名 Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe Annual Congress (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Ryota Hyodo, Yasuo Takehara, Yoji Ishizu, Takashi Mizuno, Kazushige Ichikawa, Shinji Naganawa
2 . 発表標題 Embolization of the large portosystemic shunt increases portal blood flow and improves liver function: a 4D Flow MRI analysis
3 . 学会等名 Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe Annual Congress (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Ryota Hyodo, Yasuo Takehara, Yoji Ishizu, Takashi Mizuno, Kazushige Ichikawa, Shinji Naganawa
2 . 発表標題 Patients with liver cirrhosis have more stagnant portal venous blood flow compared to non-cirrhotic subjects: analysis using 4D flow MRI
3 . 学会等名 ISMRM & ISMRT Annual Meeting & Exhibition (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryota Hyodo, Yasuo Takehara, Takashi Mizuno, Kazushige Ichikawa, Masataka Sugiyama, Tokoki Ebata, Shinji Naganawa
2. 発表標題 Portal blood flow in the remnant portal branches is increased after percutaneous transhepatic portal vein embolization (PTPVE) for biliary tract cancer: An analysis with 4D flow MRI
3. 学会等名 European Society of Gastrointestinal and Abdominal Radiology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masataka Sugiyama, Yasuo Takehara, Takasuke Ushio, Tetsuya Wakayama, Atsushi Nozaki, Satoshi Goshima, Shinji Naganawa
2. 発表標題 A Flowmetry Study Of Superior Mesenteric Artery Using 4D-Flow MRI; Efficient Blood Delivery To The Superior Mesenteric Artery Might Be Reduced In Abdominal Aortic Aneurysm Patients Compared To The Controls With Non-dilated Abdominal Aorta.
3. 学会等名 European Congress of Radiology (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	杉本 昌之 (Masayuki Sugimoto) (00447814)	名古屋大学・医学部附属病院・講師 (13901)	
研究分担者	磯田 治夫 (Haruo Isoda) (40223060)	聖隷クリストファー大学・リハビリテーション科学研究科・臨床教授 (33804)	
研究分担者	杉山 将隆 (Masataka Sugiyama) (40724844)	名古屋大学・医学系研究科・特任助教 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	滝沢 研二 (Kenji Takizawa) (60415809)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	
研究分担者	板谷 慶一 (Keiichi Itatani) (70458777)	名古屋市立大学・薬学総合研究院(医学)・講師 (23903)	
研究分担者	駒田 智大 (Tomohiro Komada) (80718354)	名古屋大学・医学部附属病院・講師 (13901)	
研究分担者	兵藤 良太 (Ryota Hyodo) (80831388)	名古屋大学・医学部附属病院・助教 (13901)	
研究分担者	牛尾 貴輔 (Takasuke Ushio) (00402313)	浜松医科大学・医学部・助教 (13802)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関