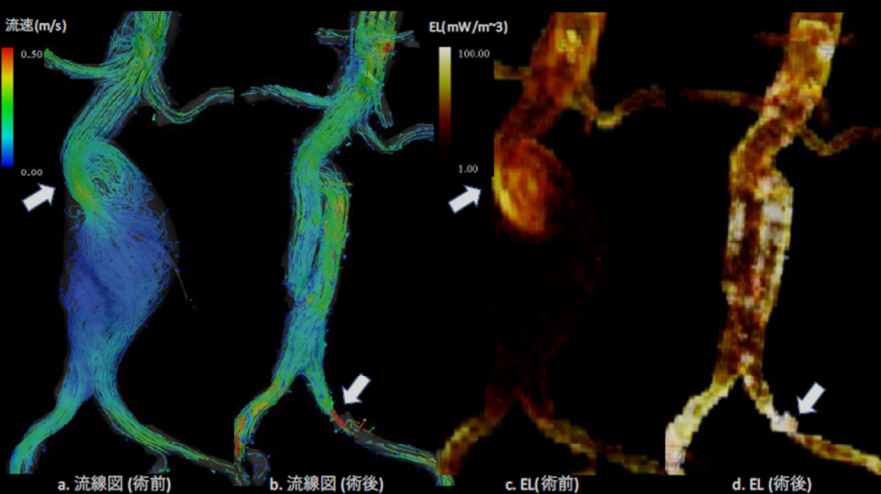
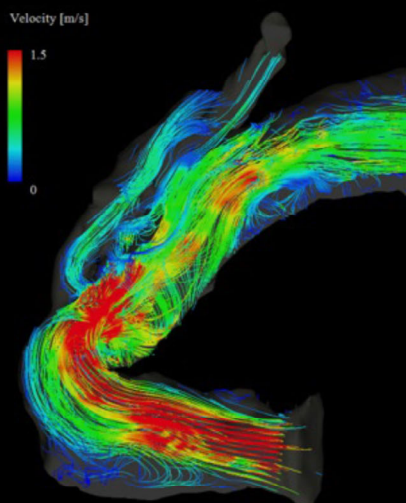
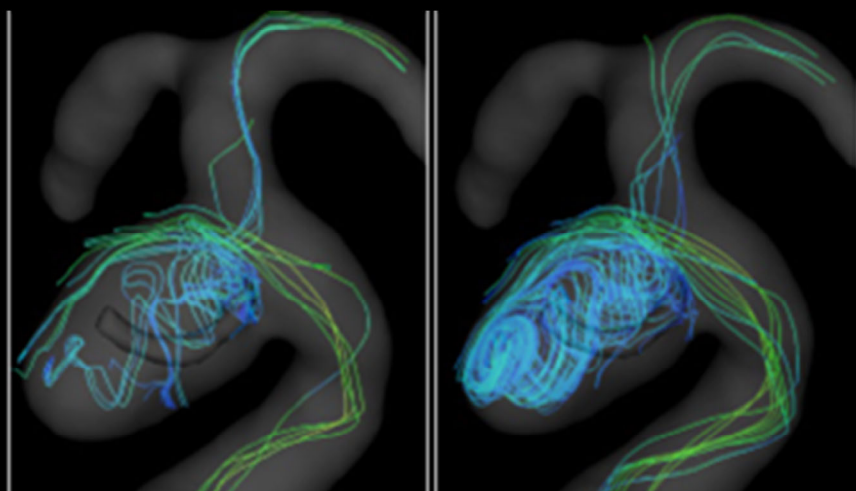
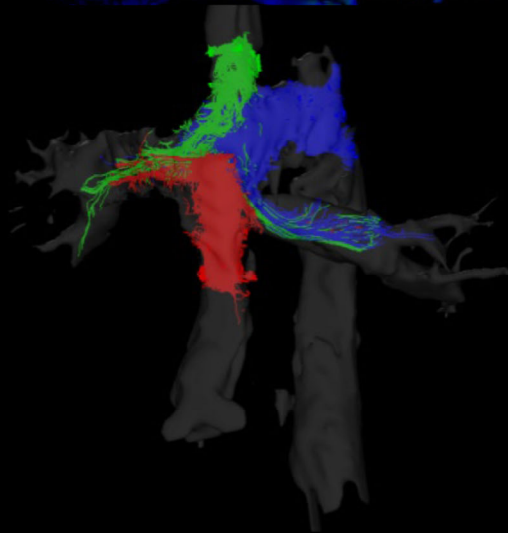
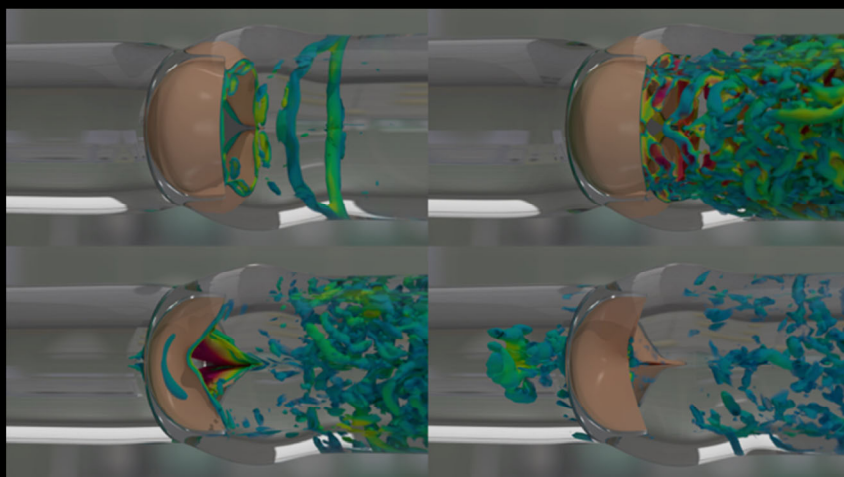
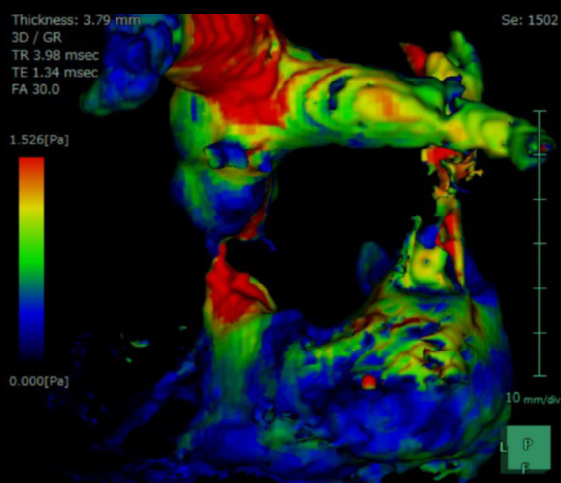


第4回 4D Flow 研究会

プログラム・抄録集



2022年9月8日(木)

会場：名古屋国際会議場 会議室131+132

開催形式：ハイブリッド + オンデマンド(-10月10日)

大会長：板谷慶一 (大阪公立大学)

実行委員長：関根鉄朗 (日本医科大学武蔵小杉病院)

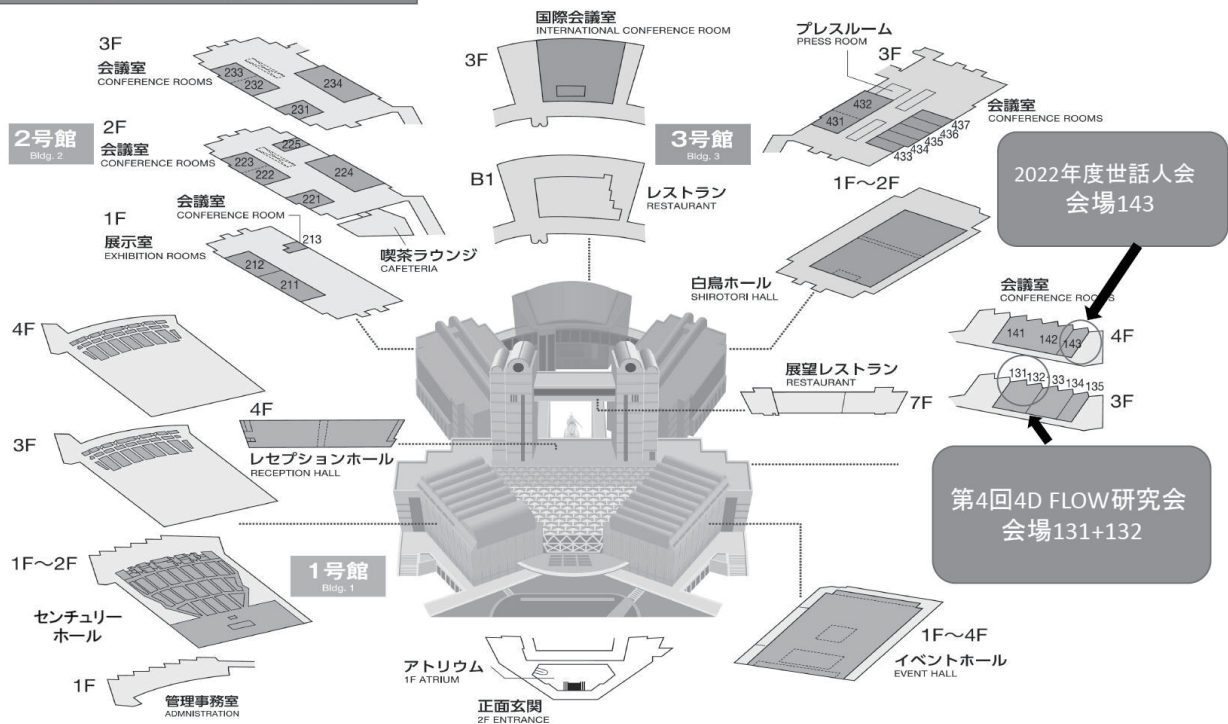
会場

名古屋国際会議場 会場 131+132

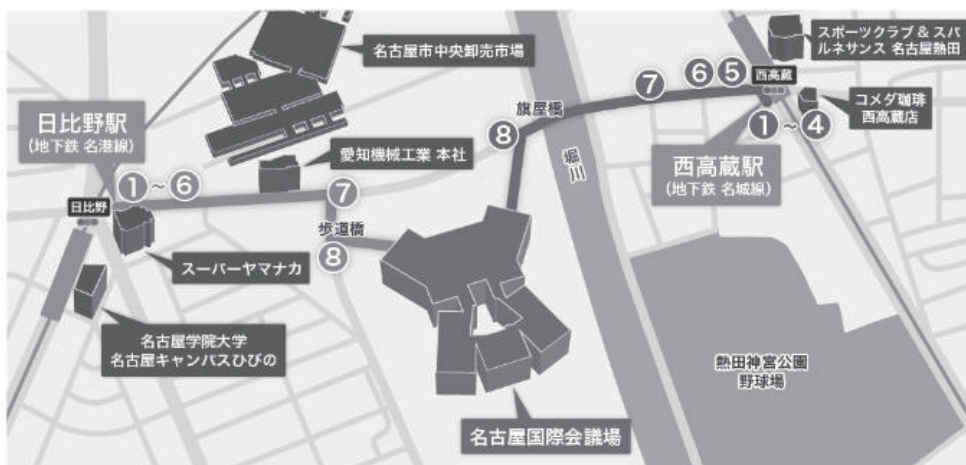
〒456-0036 名古屋市熱田区熱田西町1番1号

052-683-7711 052-683-7777 ncc@nagoya-congress-center.jp

名古屋国際会議場 案内図



名古屋国際会議場へのアクセス



名港線「日比野」駅からの行き方



地下鉄日比野駅の改札を出て1番出口へ向かいます。1番出口への通路を直進して階段を上ります。階段を上り、突き当たりを右折します。右折したら直進します。



1番出口を出たら階段またはエスカレーターで地上へ上がります。アーケードに沿って直進（約100m）します。郵便ポストの右側にある階段を上ります。道なりに進むと国際会議場の正面玄関です。

名城線「西高蔵」駅からの行き方



地下鉄西高蔵駅改札を抜けて2番出口の方向へ向かいます。2番出口階段を上ります。2番出口を出ます。2番出口を出たらUターンする形で反対方面へ向かいます。



一つ目の交差点の手前を左折します。左折したら直進します。しばらく直進（80m）したら橋を渡ります。堀川にかかる橋を渡ると左手に国際会議場が見えてきます。左折し道沿いに進めば正面玄関です。

第 4 回 4D FLOW 研究会

日程：2022 年 9 月 8 日(木)午後 12 時 40 分～19 時

会場：名古屋国際会議場 会議室 131+132

開催形式：ハイブリッド（現地よりの配信）+オンデマンド(-10 月 10 日まで予定)

住所：名古屋市熱田区熱田西町 1 番 1 号

<https://www.nagoya-congress-center.jp>

大会長：板谷慶一（大阪公立大学）

実行委員長：関根鉄朗（日本医科大学武蔵小杉病院）

研究会参加費：4000 円

現地参加+オンデマンド配信 → 現地受付でのお支払い（事前登録なし）

LIVE 配信+オンデマンド配信 → Mediner からの登録

参加 URL: https://medinar.jp/haisin_detail.php?id=148

(Mediner への事前会員登録に数日かかる場合がありますので、お早めに登録ください)

現地参加+LIVE 配信+オンデマンド配信の方は事前に Mediner への登録をお願いいたします。（現地での Mediner 登録は御案内出来ない場合があります）
Mediner への参加登録の控えをお見せ頂ければ、現地参加の際のお支払いは不要です。

第4回 4D FLOW 研究会 開催のご挨拶

4D FLOW 研究会は、3次元シネ位相コントラストMRIによる生体内流体計測を中心とした、いわゆる4D flow MRIを中心に数値流体力学モデル(CFDシミュレーション)やファントム実験による流体計測を扱い、心臓や血管の血流や髄液など臨床的な課題を『3次元生体内流れ』に着目して解決を試みる前提的な研究会としての役割を担っていると云えます。

本研究会の前身は4D flow MRIの臨床応用を目的とし、2012年に発足した「3次元シネ位相コントラスト法による血行動態解析の医療への利用促進を図るスタディグループ」で、磁気共鳴装置や放射線画像ワークステーション関連企業、放射線科医や放射線技師を中心としたメンバーで日本放射線学会と日本磁気共鳴学会の年次大会に合わせてスタディグループが開催され、当時新技術であった4D flow MRIの精度検証や後解析結果の実用を議論されましたが、それから10年の歳月が過ぎました。

MRI位相コントラスト法による血流可視化の歴史は1993年に有名なKilnerらのValsalva洞での渦血流の可視化の報告に始まりますが、しばらくこの技術は臨床現場にはなかなか届かないものとして20年くらいの時間が過ぎます。しかし医工学の歴史を振り返ると、その間2000年前後から2010年くらいの中に基礎技術の中での地味で粘り強い精度検証の議論があったことを忘れるわけにはいきません。

そして本邦でも、欧米の先進諸国でもこの10年間では4D flow MRI含めた血流解析技術の論文出版数や研究成果の報告数は指数関数的に増大し、多種多様な解析ソフトウェアが医学研究や実臨床の世界に投入されるようになりました。その飛躍的な変容ぶりはちょうど心臓弁膜疾患における心エコーでカラードプラが台頭し普及してきた歴史を繰り返していると言わんばかりの勢いがあると感じられます。

つまり『機能診断』として流れを可視化することがどれだけ実臨床の世界に光を当てるかということの実証であるかのような結果であると考えられることもできます。

4D FLOW技術の普及を加速させ臨床現場に届けるための研究会として記念すべきスタディグループ発足から10年目の今回、幅広い臨床的課題に焦点を当て、どのように病態を診断し、どのように治療方針にフィードバックしていくか、という観点から具体的に深い議論を行っていかうと考えています。皆様からの多方面での議論を楽しみにしております。

2021年10月吉日

第4回 4D FLOW 研究会 当番世話人 板谷慶一 大阪公立大学 心臓血管外科
実行委員長 関根鉄朗 日本医科大学武蔵小杉病院放射線科

第4回 4D FLOW研究会 タイムテーブル
(Medinerを用いたハイブリッド配信+オンデマンド配信)

会期: 2022年9月8日(木曜)

開催場所: 名古屋国際会議場 会議室 131+132

11:30-12:30 世話人会 (会議室143) (オンデマンド配信無し)

12:00- 会場(会議室131+132) オープン

12:40-12:50 世話人会報告・MRMSの4D Flow MRI Special Issueについて

代表世話人 竹原康
雄

12:50-13:00 開会の辞 第4回 4D FLOW研究会大会長

大会長 板谷慶
一

13:00-14:05 第一部

座長 東北大学病院 放射線診断科 大田英揮

愛媛大学 放射線医学教室 城戸倫之

13:00-13:10 右心室流出路病変に対する手術適応や術式決定に関する4D flow MRIの有用性についての初期検討 (Case)

滋賀医科大学 放射線科 沖 達也

13:10-13:20 人工血管屈曲による溶血性貧血の診断・治療においてEnergy Loss測定が有用であった1例 (Case)

獨協医科大学病院 心臓・血管外科 武井祐介

13:20-13:35 急性大動脈解離術後における4D flow MRIによる残存偽腔拡大予測

獨協医科大学病院 心臓・血管外科 武井祐介

13:35-13:50 4D-Flow MRI Visualizes Reverse Vortex Pattern and Energy Loss Increase in Left Bundle Branch Block

聖隷三方原病院 循環器科 宮島佳祐

13:50-14:05 CTEPHに対するBPA前後における肺動脈内の渦流の定量的評価

東北大学病院 放射線診断科 鎌田裕基

14:05-14:20 休憩

14:20-15:30 第二部

座長 東京女子医科大学 画像診断学・核医学講座 長尾充展

慶應義塾大学 放射線診断科 奥田茂男

14:20-14:30 薬剤性大型血管炎の4D Flow MR Imaging所見 (Case)

自治医科大学附属病院さいたま医療センター 放射線科 佐野ひろみ

14:30-14:45 4D flow MRIにて血行動態把握が可能となった先天性心疾患5症例

日本赤十字社医療センター 小児科 稲毛章郎

14:45-15:00 MRI対応拍動型循環モデルと4D Flow MRIを使った大動脈二尖弁の血流解析

東京女子医科大学 画像診断学・核医学講座 長尾充展

15:00-15:15 大動脈瘤ファントムを用いた4D flow MRIの正確度評価

山梨大学医学部 放射線医学講座 佐藤淳一

15:15-15:30 紡錘状腹部大動脈瘤におけるステントグラフト内挿術 (EVAR) 後の局所エネルギー損失: 4D-Flow MRIによる評価

市立四日市病院 放射線科 堀口瞭太

15:30-15:45 休憩

15:45-16:45 第三部

座長 滋賀医科大学 放射線医学講座 渡邊嘉之

山口大学 放射線医学講座 伊藤克能

15:45-16:00 脳血管4D Flow MRIの血流情報と脳容積の比較

日本医科大学千葉北総病院 放射線科 八方政豪

16:00-16:15 4D flow MRIによる門脈系血行動態評価と食道静脈瘤のリスクに関する検討

川崎医科大学 放射線診断学教室 檜垣 篤

16:15-16:30 4D flow MRIにおけるVENCのtrigger timeのズレが血流動体解析に及ぼす影響について- ヒト頸動脈を模擬したファントムにおける検討 -

日本医療大学保健医療学部 診療放射線学科 本庄悠人

16:30-16:45 深層学習を用いた磁気共鳴流体解析のノイズ低減

名古屋大学大学院 医学系研究科 総合保健学専攻 中島美来

16:45-17:00 休憩

17:00-18:30 特別講義 4D flow技術を支える数値流体シミュレーション技術の基礎

座長 大阪公立大学 心臓血管外科 板谷慶一

広南病院 神経麻酔科 杉山慎一郎

17:00-17:45 生体系における数値流体力学の基礎

名古屋工業大学 中村匡徳

17:45-18:30 循環器系における構造流体連成解析

早稲田大学 滝沢研二

18:30-18:40 第5回 4D FLOW研究会大会長挨拶

自治医科大学附属病院さいたま医療センター 放射線科 真鍋徳子

18:40-18:50 閉会の辞

代表世話人 磯田治夫

(閉会後も30分程度、会場を開放しています。展示企業[Cardioflow社、ENTORRES社、Fuyo社]との商談に御活用ください)

抄録集

特別講義 1

中村匡徳

1997年 早稲田大学 理工学部機械工学科 卒業

1999年 The University of New South Wales (オーストラリア), Department of Biomedical Engineering, MSc

2003年 北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 博士(工学)

日本学術振興会特別研究員 (SPD), 大阪大学 大学院基礎工学研究科 助手, 同大学臨床医工学融合研究教育センター特任准教授 (常勤),

埼玉大学 大学院理工学研究科 准教授を経て,

2017年4月より名古屋工業大学 大学院工学専攻 教授, 現在に至る.

臨床のための数値流体力学の基礎と応用

中村匡徳

名古屋工業大学 電気・機械工学科

数値流体力学とは、コンピュータを用いて、流れの物理学的支配方程式（連続の式と Navier-Stokes 方程式）を近似的に解くことで、対象とする場の流れ情報（速度、圧力等）を得る手法である。数値流体力学は、元々、宇宙・航空機産業のために開発された技術であるが、計算機が汎用的になることに伴って、自動車・鉄道・船舶等の工業製品のみならず、海流・気象・都市設計等に応用が拡大されてきた。

筆者の知る限り、本手法が医学分野に初めて導入されたのは、1972 年の Peskin による心臓弁付近の血流解析¹⁾である。二次元であったが、すでに、心臓弁の弁葉と血流との相互作用まで計算していたという事実には目を見張るものがある。2000 年になると医用画像から形状が構築され、患者個別別の解析が可能となった。出入口の条件も理想的なものから発展し、医用計測機器からの計測データを取り込むというだけでなく、低次元のモデルと組み合わせたマルチスケール解析も可能となった。流体-固体連成、データ同化等、工学的観点に立てば、数値流体力学による血流解析はここ 10 年でも目覚ましい進歩を遂げている。

一方、日常的な臨床にて数値流体力学による血流解析が役立っているという話は寡聞にして知らない。大学レベルでは個々人で数値流体力学により血流を解析して、手術計画策定に使用しているという話はあるが、医学のガイドラインにシミュレーションが入っているわけではない。

公的承認の下で数値流体力学が臨床導入された例は、Heart Flow 社の FFR_{CT}のみである。FFR_{CT}は、狭窄病変により冠動脈血流が機能的にどのくらい阻害されているかを示す指標とされ、2018 年に厚生労働省から保険適用承認を受けている。本指標に対する臨床的評価は、本講演の対象ではないので、記載はこの程度に留める。

数値流体力学による血流解析から何がわかるのか？4D Flow MRI との違いはどこにあるのか？どこに難しさがあって、どこに限界があるのか？本講演では、数値流体力学による血流解析について概説し、その適用例について紹介する。本講演が 4D Flow MRI を含めた血流解析の重要性とその限界を議論するための呼び水となれば幸いである。

参考文献

Peskin, CS, Flow patterns around heart valves: A numerical method, Journal of Computational Physics, 10, 252-271, 1972

特別講義 2

滝沢研二

- 2001年3月 東京工業大学 機械宇宙学科 卒業
- 2002年3月 東京工業大学 創造エネルギー専攻 修士課程修了
- 2005年3月 東京工業大学 創造エネルギー専攻 博士課程修了
- 2005年4月 独立行政法人海上技術安全研究所 研究員
- 2007年10月 ライス大学、リサーチアソシエート
- 2009年10月 ライス大学、リサーチアソシエート
- 2011年4月 早稲田大学、高等研究所/総合機械工学科 准教授
- 2018年4月 早稲田大学、総合機械工学科 教授（現在）
- 2019年4月 早稲田大学、フロンティア流体研究所 所長（現在）
- 2022年4月 早稲田大学、数物系科学拠点 拠点長（現在）

心臓弁解析のための新しい計算法

滝沢 研二・寺原 拓哉・Tayfun E. Tezduyar
早稲田大学

大動脈弁は開閉を伴い左心室と大動脈の間を遮断する。このように流れの領域が分断される問題の数値計算は難しいとされてきた。こうした問題に対して、これまでは弁近傍の流の精度が落ちても数値計算を実施することを優先する方法が多く開発されてきた。我々は、弁近傍の精度を損なうことなく計算するための計算手法を開発[1–4]し、それを心臓弁へ適用してきた。図1には生体弁における流体構造連成問題の解[5]の一部を示す。弁からリング状の渦が出ることがわかる。また、閉じる際に左心室側に流体が押し出される様子も見てとれる。速度の最大はおおよそ 3 m/s であった。図2には壁面せん断応力の Oscillatory Shear Index (OSI) を示す。OSI の計算にあたって、壁面せん断応力ベクトルは、代表表面上に回転した状態で計算[6]される。すなわち、表面が変形することによって OSI が高くなるわけではなく、表面に沿った方向が変化することによって大きくなる。上面は流れが乱れやすく対称性も低い。一方、下面外側の OSI は低い、中央の接触部近傍の OSI は高めとなっている。これは逆流の影響があると考えられる。対称性が高いことからわかるように乱流の影響で高いというわけではないようである。

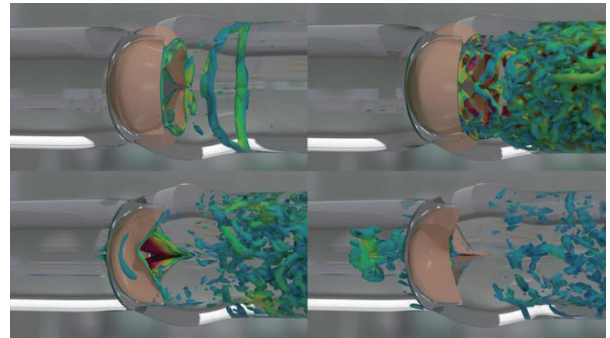


図2 生体弁開閉時の血流の渦構造

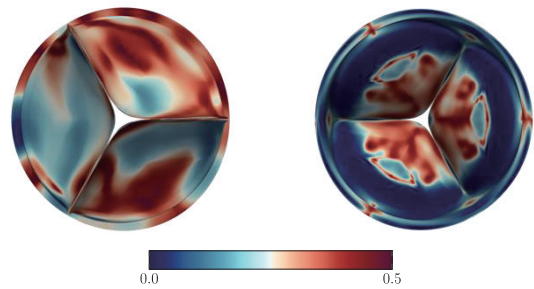


図1 弁の上部 (左) 下部 (右) の OSI

- [1] K. Takizawa, T.E. Tezduyar, A. Buscher, and S. Asada, “Space–time interface-tracking with topology change (ST-TC)”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 955–971
- [2] K. Takizawa, T.E. Tezduyar, A. Buscher, and S. Asada, “Space–time fluid mechanics computation of heart valve models”, *Computational Mechanics*, **54** (2014) 973–986
- [3] K. Takizawa, T.E. Tezduyar, T. Terahara, and T. Sasaki, “Heart valve flow computation with the integrated Space–Time VMS, Slip Interface, Topology Change and Isogeometric Discretization methods”, *Computers & Fluids*, **158** (2017) 176–188
- [4] T. Terahara, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, Y. Bazilevs, and M.-C. Hsu, “Heart valve isogeometric sequentially-coupled FSI analysis with the space–time topology change method”, *Computational Mechanics*, **65** (2020) 1167–1187
- [5] K. Takizawa, C. Moorman, S. Wright, J. Christopher, and T.E. Tezduyar, “Wall shear stress calculations in space–time finite element computation of arterial fluid–structure interactions”, *Computational Mechanics*, **46** (2010) 31–41

右心室流出路病変に対する手術適応や術式決定に関する

4D-flow MRI の有用性についての初期検討

沖達也、永谷幸裕、宮崎隆子*、谷口智史*、平塚真之輔、吉越慎、吉村雅寛、渡邊嘉之
滋賀医科大学 放射線科、*大津市民病院 心臓血管外科

背景:

後天性の右心系疾患では、治療対象となる疾患が少なく、病態の評価方法は確立されていない。加えて、流出路と流入路の軸のずれや筋層配列が心内膜側と心外膜側で直交する等、複雑な解剖学的構造を有する右心室では、単一断面での機能評価が全体的な収縮能を必ずしも反映しない。良好な組織・時間分解能を有する MRI は 3 次元動的な動態や機能異常に関する客観的評価に適している。

材料と方法:

対象：右心室流出路再建術前に右心系 4D-flow MRI を施行した 2 症例（症例 1：縦隔悪性リンパ腫に対して、腫瘍切除術及び心膜合併切除後。胸部 CT にて右心室流出路の腹側に石灰化を伴う軟部組織濃度腫瘤を認める。症例 2：ファロー四徴症根治術後経過観察中）。

方法：Cine/心筋遅延造影、4D-flow MRI 画像（stream line, velocity vector, wall shear stress (WSS)）を視覚的に評価、右心室流出路の数か所で逆流率を計測し、術前検査としての 4D-flow MRI の有用性を検討した。

結果:

症例 1) 胸骨背側に T2WI 低信号を呈する腫瘤を認め、(61×15×42mm) 腫瘤背側に位置する近位の右心室流出路に全周性壁肥厚を伴う内腔狭小化が認められた。4D-flow MRI では、狭窄化部では血流は早く、狭窄部後壁に収縮早期より比較的高い WSS を認めた(図 1)が、肺動脈内に vortex flow は確認されなかった。肺動脈弁レベルでは、拡張早期でわずかな逆流が認められ、近位右心室流出路の壁肥厚に伴う伸展性低下による肺動脈弁の閉鎖不全を反映したものと推測された。肺動脈弁は温存可能であると予想され手術が施行された。手術で摘出された胸壁背側の腫瘤は、心膜補填用のゴアテックス周囲に形成された石灰化を伴う陳旧性血種であることが確認された。線維化を伴った肥厚領域の切除及び右心室流出路形成術が施行され、RVSP の著明な低下(88→32mmHg)が確認された。

症例 2) 右心室流出路から肺動脈弁下部での狭窄は明らかではなく、VSD 等の遺残短絡は認めなかった。右心室では自由壁肥厚は認めるものの壁運動は保たれていた。計測された RVEF 及び RVFDVI は、それぞれ 55.2%、169.8ml/m² であった。4D-flow MRI では拡張初期の肺動脈に逆流を認め(図 2)、逆流率は 47%であったが vortex flow はなく、三尖弁近傍では収縮前期に逆行性 flow が認められた。手術適応であると判断され、右心室流出路再建術が施行された。術後の造影 CT で右心系の容量負荷低減が確認された。

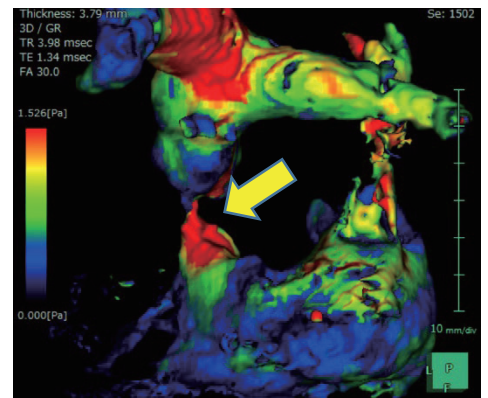


図 1: 狭窄部後壁に高い WSS あり

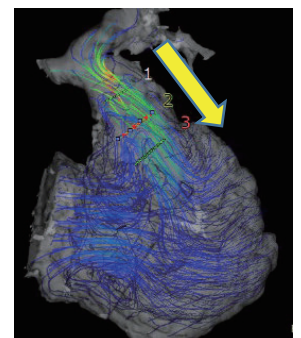


図 2: 肺動脈に逆流あり

考察:

右心系の形態/運動異常に加えて、4D-flow MRI で、局所的な血流や WSS における異常の分布を評価することにより、客観的な局所機能異常の把握が可能となると考えられる。

結論:

右心室流出路再建術の適応や最適な術式選択に、右心系 4D-flow MRI は有用である。

人工血管屈曲による溶血性貧血の診断・治療において Energy Loss 測定が有用であった 1 例

武井祐介¹, 柴崎郁子¹, 鈴木康平², 宮崎翔平²,
廣田章太郎¹, 大橋裕恭¹, 齋藤俊輔¹, 福田宏嗣¹

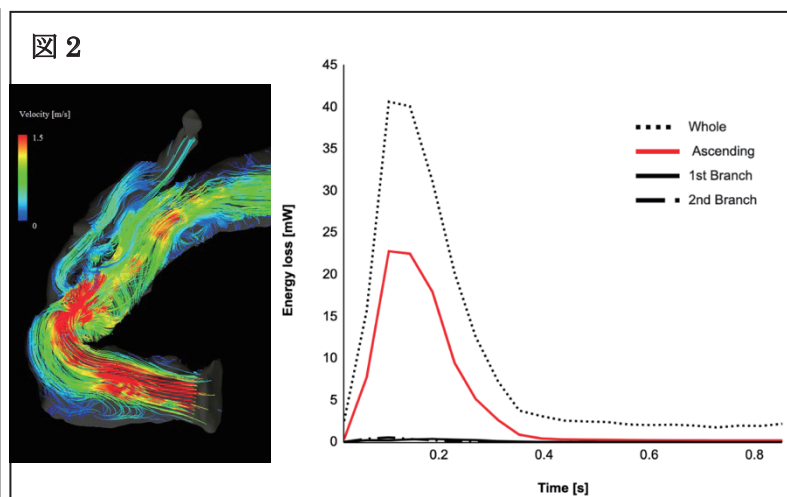
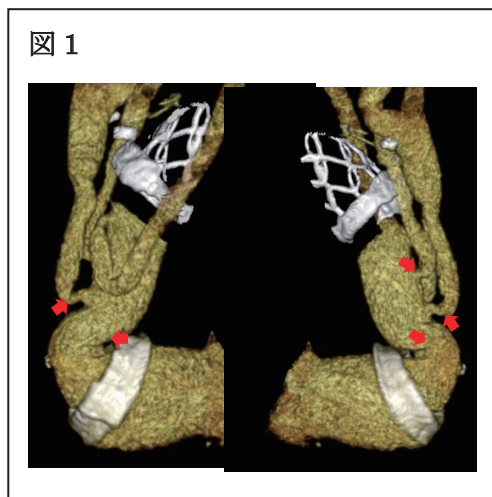
1. 獨協医科大学病院 心臓・血管外科
2. Cardio Flow Design

背景: 機械的溶血性貧血は大動脈手術後の遠隔期合併症として稀に認められ、過度に屈曲した人工血管により生じた異常血流がその原因の一つとして考えられている。異常血流が人工血管と衝突、または摩擦により赤血球が破壊され貧血を生じる。今回 4Dflow MRI を用いてその異常血流を可視化し、その摩擦によって熱エネルギーに変換された運動エネルギーに対応する粘性エネルギー損失 (VEL :Viscous Energy Loss) を測定したことが、診断及び再手術方法に有益であった 1 例を報告する。

患者と方法: 5 年前に急性大動脈解離 Stanford A 型に対して全弓部置換術の既往のある 70 歳女性が、めまいと全身倦怠感を主訴に来院された。種々の検査により機械的溶血性貧血の診断に至り、その原因が人工血管屈曲によるものと推定されたが確証を得られなかった。また人工血管の屈曲は、上行部分と 2 本の人工血管分枝起始部に認め(図 1), 当初どの部分で溶血を生じているのか同定できなかつたが、繰り返す輸血療法を行っていたことから再置換術を予定した。4D flow MRI を撮影し、iTFlow[®]2(Cardio Flow Design Inc)を用いて Streamline の構築と平均 VEL(mW)と単位体積あたりの平均 VEL(mW/mL)を測定し、溶血部位の同定を行った。また術後でも同様に同部位の VEL を測定した。

結果: Streamline で加速された渦流を屈曲した上行部分の人工血管で認めたが、同様の流線は人工血管分枝では検出されなかつた。VEL については上行・弓部: 40.6 mW(0.039 mW/mL)と高値であり、上行部: 22.8mW(0.060mW/mL)は高値であったが、人工血管の第一枝と第二枝ではそれぞれ 0.38mW(0.007mW/mL), 0.56mW(0.009mW/mL)と共に低値であった(図 2)。このことから、上行屈曲部分のみが溶血性貧血の原因であると診断し、再置換をせず屈曲部の形成術を行なった。術後貧血は改善し、術後の VEL は上行・弓部: 25.7 mW (0.024 mW/L), 上行部:17.2 mW (0.033 mW/mL)と減少を認めた。

結論:VEL を測定したことで、CT での形態的評価のみでは特定し得なかつた溶血性貧血の部位診断が可能であり、拡大手術をすることなく限定的手術で治癒し得た。



急性大動脈解離術後における 4D flow MRI による残存偽腔拡大予測

武井祐介¹, 宮崎翔平², 鈴木康平²,
斎藤俊輔¹, 大柿隼人³, 村岡祐基³, 手塚雅博¹, 柴崎郁子¹, 福田宏嗣¹

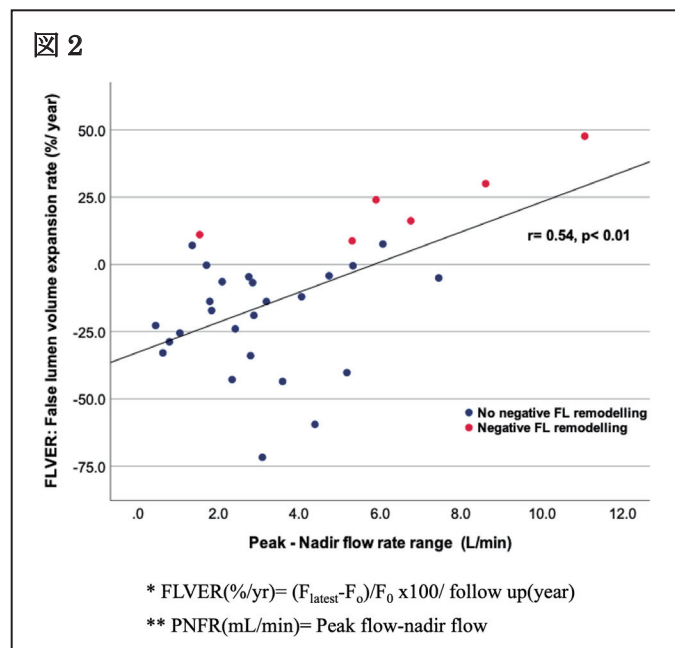
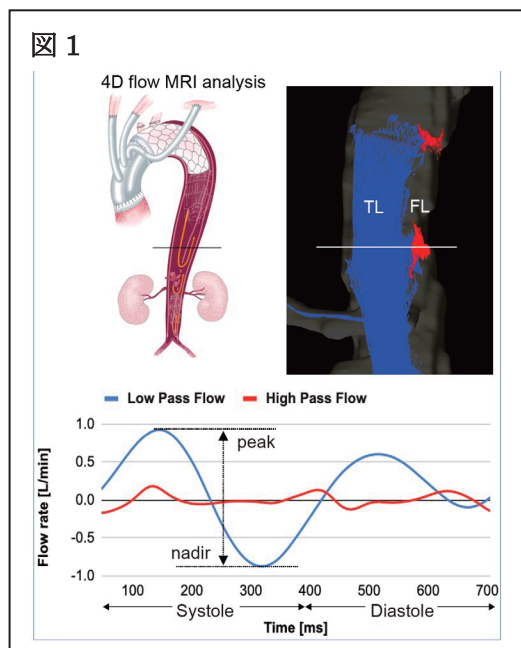
1. 獨協医科大学病院 心臓・血管外科
2. Cardio Flow Design
3. 獨協医科大学病院 放射線部

背景: 急性大動脈解離に対する Frozen elephant trunk (FET)を用いた全弓部置換術は良好な初期手術成績が報告されるとともに, 中・遠隔期において偽腔の血栓化及び退縮が認められ(Aortic remodeling), 大動脈関連イベントの発生をも抑制する. しかし一方で, FET が内挿されていない下行大動脈から腹部大動脈において, 残存するリエントリーから偽腔に血流が流れ込むことで偽腔の血栓化と退縮が抑制され, なかには拡大し, 遠隔期にその追加治療に悩まされる症例を経験する. これに対し早期に予防的血管内治療を追加してしまおうという報告もあるが, 手術合併症を鑑みると全例に行うことは議論のあるところである. 今回, 4D flow MRI 解析において, この残存偽腔拡大を予測できる指標がないか検証した.

方法: FET 後で下行大動脈の偽腔が開存している 31 症例(Stanford A 型:28 例, B 型:3 例)を対象とした. 造影 CT にて術後, 半年, 1 年毎に FET 以遠から腹腔動脈までの大動脈偽腔体積(cm^3)を測定し, 術後偽腔体積を F_0 , 直近の偽腔体積を F_{latest} とし, 偽腔体積年次拡大率:FLVER(%/year)を定義した. またここでは偽腔体積が 10%拡大したものを Negative false lumen remodeling(NFLR)とした. 一方術後に下行残存偽腔血流を 4Dflow MRI で測定し, iTFlow[®]2(Cardio Flow Design Inc)を用いて, Low pass flow の血流量(L/min):全血流量, 順行性, 逆行性, 最大血流量, 最小血流量を解析し(図 1), FLVER との回帰分析を行なった.

結果: 31 例中観察期間内に NFLR を 6 例認めた. 4Dflow MRI による解析では多くの症例で偽腔内血流パターンは収縮期に最大及び最小血流量を有する二峰性であった. また最大血流量と最小血流量との差:Peak to nadir flow range(PNFR)に着目すると, FLVER と関連性を認めた($\beta = 5.60, p=0.02$) (図 2).

考察・結論: PNFR は偽腔内でどの程度血液が動いているかを表す血流幅のような指標と考察でき, これが大きいくほど, 偽腔拡大に与える影響は大きいと推察された.



4D-Flow MRI Visualizes Reverse Vortex Pattern and Energy Loss Increase in Left Bundle Branch Block

宮島佳祐¹, 漆田毅², 田村卓己¹, 増田早騎人¹, 岡崎絢子¹, 高嶋泰世¹, 渡辺知幸¹, 川口由高¹, 若林康¹, 前川裕一郎², 竹原 康雄³

1 聖隷三方原病院 循環器科

2 浜松医科大学附属病院 第3内科

3 名古屋大学 新規低侵襲画像診断法基盤開発研究寄附講座

背景：左脚ブロックの予後が悪いことは以前より知られているが、左脚ブロック時の左室内血流パターンについての情報は少ないため、我々は4D-flow MRIを用いて検討を行った。

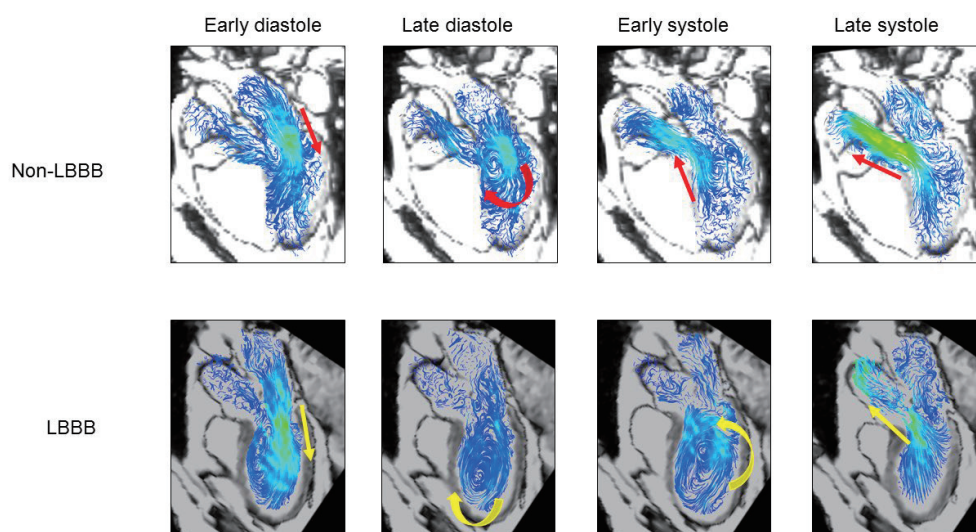
方法：Propensity-Score matchを行った16名の左脚ブロック患者(LBBB group)と16名の正常QRS患者(Non-LBBB group)に対し4D-flow MRIを行い、その左室内血流パターンの観察とenergy lossの評価を行った。

結果：両群で拡張期から収縮期にかけて僧帽弁から心尖部、左室流出路へと向かう血流と渦形成が認められた。渦には2つのパターンがあり、拡張期中期から収縮期にかけて発生する一方向のclockwiseの回転(normal pattern)とcounterclockwiseの回転(reverse pattern)が観察された。Reverse patternは、LBBB群で有意に多く観察された(LBBB 94% vs. non-LBBB 19%, $p < 0.001$)。最大energy lossは、LBBB群で有意に高かった(LBBB 12 [11-15] mW vs. non-LBBB 8.0 [6.2-9.7] mW, $p < 0.001$)。

考察：左脚ブロックにおいて、非生理学的な反時計回りの渦とエネルギー損失の増加が非効率的な左室血行動態に寄与していると考えられた。

結語：左脚ブロック患者における左室内渦の形状とenergy lossは左室非同期のマーカーになり得るかもしれない。

参考文献：Zajac J et al. Int J Cardiovasc Imaging 2018;34:587-96.



CTEPH に対する BPA 前後における肺動脈内の渦流の定量的評価

鎌田裕基¹, 大田英揮¹, 中村匡徳²

1 東北大学病院放射線診断科

2 名古屋工業大学電気・機械工学科

背景:

肺高血圧症は、右心カテーテル検査で平均肺動脈圧が 25 [mmHg]以上であることにより診断される。肺高血圧症では、肺動脈主幹部に渦流が観察されることが多いが、4D flow MRI を用いた血流の観察により、視覚的な渦流の持続時間と肺動脈圧上昇との相関が報告されている [1]。本研究では、慢性血栓塞栓性肺高血圧症 (CTEPH: chronic thromboembolic pulmonary hypertension) 患者に対するバルーン肺動脈形成術 (BPA: balloon percutaneous angioplasty) 前後の血流変化を検討し、肺動脈主幹部における渦流を定量化する客観的方法を提案し、治療効果の評価を行った。

方法:

28 名の CTEPH 患者を対象として、BPA 前後の肺動脈における 4D-flow MRI を撮影した。肺動脈幹から左右主肺動脈近位に血管の中心軸に直交する 30 断面を設定し、渦流の構成成分である逆流に着目した。逆流の持続時間として時間-流量曲線のピークの半値幅を、逆流の大きさとして各断面において逆流が占める面積率を、さらに、逆流の一心周期における流量を評価した。

結果:

BPA 後にも肺動脈主幹部に渦流が残存する症例が散見されたが、BPA 後には、逆流の半値幅、面積率、流量に有意な減少が認められた (半値幅: BPA 前, $1.88 \times 10^{-1} \pm 1.51 \times 10^{-2}$ [cardiac cycle] vs. BPA 後, $1.65 \times 10^{-1} \pm 1.82 \times 10^{-2}$ [cardiac cycle], 面積率: BPA 前, $2.67 \times 10^{-1} \pm 1.30 \times 10^{-2}$ vs. BPA 後, $2.38 \times 10^{-1} \pm 1.31 \times 10^{-2}$, 流量: BPA 前, 13.6 ± 2.21 [mL/s], BPA 後, 11.3 ± 2.36 [mL/s])。)

結論:

BPA は、肺動脈主幹部の逆流の持続時間、大きさ、流量を有意に減少させ、効率的な血液輸送を促進すると考えられた。また、これらの変化は、BPA による圧力の低下が大きい症例ほど大きくなる傾向がみられた。このことから、逆流の半値幅、面積率、流量は、BPA の治療効果を非侵襲的に評価するための有用な指標となる可能性が示唆された。

参考文献:

1. Reiter G et al: Blood flow vortices along the main pulmonary artery measured with MR imaging for diagnosis of pulmonary hypertension. *Radiology* 275(1): 71-79, 2015

薬剤性大型血管炎の 4D Flow MR Imaging 所見

佐野 ひろみ¹、関 達也²、板垣 百合子³、真鍋 徳子¹

¹自治医科大学附属さいたま医療センター 放射線科 ²華岡青洲記念病院

³フォトロン M&E ソリューションズ株式会社

背景: 大動脈とその分枝の炎症である大型血管炎は高安動脈炎・巨細胞性動脈炎・感染性動脈炎等であることが多い。一方、多くの薬剤が血管炎を起こす可能性がある。G-CSF 製剤の副作用として起こる大型血管炎は稀であるが、2014 年に長期作用型 G-CSF 製剤である pegfilgrastim が承認されて以降に、さらに投与される機会が増加してきている。

症例報告と方法: 症例は 50 歳代女性。びまん性大細胞性リンパ腫にて約 5 か月間化学療法を施行し、3 コース目から G-CSF 製剤を連日投与した。治療終了 5 日後に両側背部、心窩部痛が出現し CT にて血管壁の肥厚とエンハンス増強あり、G-CSF 製剤による薬剤性血管炎が疑われた。急性期および半年後に 4D flow MRI にて血管壁の壁厚および信号変化と壁剪断応力 (WSS) の経過観察を行った。T2 強調像における信号変化は、近傍骨格筋と血管壁の信号強度比から算出した。

3.0T Ingenia Elition S (Philips 社製) で血管走行に合わせた 2D TSE BB (TR4000 ms、TE65 ms) と 4D flow MRI (3D TFE、voxel size 1.17×1.17×1.00 mm、venc 103 cm/s) を撮像した。解析は、Pie Medical Imaging 社製の Caas (Cardiovascular angiographic analysis systems) MR 4D Flow を使用した。

結果: 胸部下行大動脈に血管壁の肥厚がみられた。G-CSF 製剤投与 20 日後の血管壁の最大厚さは 3 mm で約半年後には 1~2 mm に減少した。信号強度は約 15% 減少した。肥厚部位の WSS は経時的な減少傾向がみられた。

考察: 我々が過去の文献を検索した結果 10 件の G-CSF 製剤関連による血管炎の症例報告があった¹⁾。中高年女性が多く、発生する血管は特定の血管ではなく、全身の血管に発症し、G-CSF 製剤投与後から発症までの期間は 2 日から 1 年と幅広い報告であった。4D flow MRI を用いた画像評価の報告はなかった。

結論: G-CSF 製剤を使用した際は、投与後の状態の観察が重要である。血管炎において 4D flow MRI での画像評価が有用であった。

参考文献:

- 1) Rehan Asif et al., Granulocyte colony stimulating factor (G-CSF)-induced aortitis in a patient undergoing adjuvant chemotherapy for breast cancer. BMJ Case Rep: first published as 10.1136/bcr-2021-247237

4D flow MRIにて血行動態把握が可能となった先天性心疾患 5 症例

稲毛章郎^{1),3)}、水野直和²⁾、吉敷香菜子³⁾、嘉川忠博³⁾

1) 日本赤十字社医療センター小児科、2) 榊原記念病院放射線科、3) 同小児循環器科

背景: 近年先天性心疾患領域にて血行動態把握における 4D flow MRI の有用性が指摘されている。榊原記念病院にて、4D flow MRI が治療方針決定の一助になった 5 症例を報告する。

症例 1: ファロー四徴症、肺動脈弁欠損。4 歳時に右室流出路再建、16 歳時に右室流出路再々建を施行。19 歳時に行った 4D flow MRI にて右室から流れた左肺動脈の pathlines が折り返して右肺動脈へ流れる所見を認め、左肺血管抵抗が高いことが推察された。

症例 2: 無脾症候群、左室型単心室、単心房、共通房室弁、総肺静脈還流異常、左上大静脈。1 歳 1 ヶ月時に両方向性グレン手術、1 歳 8 ヶ月時にフォンタン型手術 (Total cavopulmonary connection; TCPC) を施行。2 歳 4 ヶ月時に行った 4D flow MRI にて TCPC conduit からの pathlines は左上大静脈から肺動脈へ吹き込むグレン血流と干渉し、主に左肺動脈へ流れる所見を認めた。右肺動脈へは主に左上大静脈からの pathlines が流れ、将来的に右肺動静脈瘻 (Pulmonary arteriovenous fistula; PAVF) が生じる可能性が示唆された。

症例 3: 無脾症候群、両大血管右室起始、肺動脈閉鎖、心房中隔欠損、総肺静脈還流異常。7 ヶ月時に両方向性グレン手術、1 歳 7 ヶ月時に開窓付 TCPC を施行、6 歳時にチアノーゼが進行したため、体肺動脈側副血管の塞栓を行うも効果は乏しかった。4D flow MRI にて TCPC conduit からの pathlines は開窓を介して心房側へ流れ、グレン血流も肺動脈へ流れず逆行性に TCPC conduit へ流れ、開窓を介して心房側へ流れる pathlines を認めた。肺血管床の問題が示唆された。

症例 4: 多脾症候群、両大血管右室起始、肺動脈閉鎖、右室低形成、下大静脈離断、半奇静脈結合、両側上大静脈。4 歳時にフォンタン型手術である total cavopulmonary shunt (TCPS) with hepatic inclusion を施行。23 歳時に喀血があり、カテーテル検査にて左 PAVF が判明した。同時に行った造影で TCPS conduit からの血流は肺動脈へ流れていたが、26 歳時に施行した 4D flow MRI では、TCPS conduit からの pathlines は半奇静脈からの血流と干渉し、主に右肺動脈へ流れる所見を認めた。左肺動脈へは主に半奇静脈からの pathlines が流れ、左 PAVF の進行が示唆された (Fig.)。

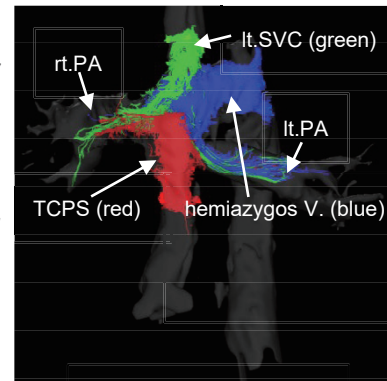


Fig. 4D flow MRI pathline

症例 5: 多脾症候群、両大血管右室起始、肺動脈閉鎖、下大静脈離断、半奇静脈結合、両側上大静脈。10 歳時に TCPS with hepatic inclusion を施行。造影剤アレルギーのため、経過観察中のカテーテル検査は困難であった。徐々にチアノーゼが進行し、33 歳時に施行した 4D flow MRI では、TCPS lateral tunnel からの pathlines は tunnel leak から殆ど心房側へ流れており、チアノーゼの原因が tunnel leak と PAVF の発生である可能性が示唆された。

結論: 4D flow MRI は、入院を要せずに血行動態の把握をすることが出来、治療方針決定に大変有用である非侵襲的な画像診断ツールである。

MRI 対応拍動型循環モデルと 4D Flow MRI を使った

大動脈二尖弁の血流解析

著者名 長尾充展
著者所属 東京女子医科大学

背景:

大動脈二尖弁は上行大動脈の拡張や大動脈弁逆流・狭窄を高頻度に合併する。二尖弁の形態と上行大動脈の拡張や aortopathy との関連はわかっていない。我々は、二尖弁の形態的特徴は、大動脈弁から上行大動脈への outflow の形成に影響しており、outflow の渦流や螺旋流が上行大動脈の拡張に直接作用すると推測した。

材料と方法:

早稲田大学の理工学部との共同研究施設である TWINS で作成した MRI 対応拍動型循環モデル内に牛・豚から作成した大動脈二尖弁を設置した。弁口サイズが対称から非対称となる様々な形態の二尖弁に対して、上行大動脈へのフローを 3 テスラ MRI 装置を使って 4D flow データを収集した。4D flow データは CardioFlow を使った。

結果:

弁口サイズが非対称な二尖弁で、上行大動脈に螺旋流や渦流の形成が多く見られた。特に内側の弁口が小さい非対称性のモデルで、上行大動脈の大弯に収縮時ジェット流の衝突を認めた。

考察:

4D Flow のデータ収集には、循環モデル内の異物アーチファクトやノイズ低減が重要で Echo planar imaging を組み入れたシーケンスが有効であった。上行～大動脈弓部の 3 次元構造を生体に近づけることに苦労した。

結論:

大動脈二尖弁の形態は上行大動脈の outflow の渦流形成に関連しており、特に非対称二尖弁で上行大動脈壁に衝突するジェット流の存在が判明した。

大動脈瘤ファントムを用いた 4D flow MRI の正確度評価

佐藤淳一¹、城野悠志¹、渡邊裕陽¹、濱崎真滉²、小川善紀²、森阪裕之¹、大西洋¹

¹山梨大学医学部放射線医学講座、²山梨大学医学部附属病院放射線部

背景：

我々はこれまで、4D flow MRI を用いて大動脈瘤症例の血流解析を行ってきた。その中で、流体の質量保存則を逸脱するような結果が度々観測されたため、そもそも 4D flow MRI の計測値がどの程度正しいのか、大動脈瘤ファントムを用いて検証することとした。

材料と方法：

脈流ポンプと流量計、直管または大動脈瘤ファントム(右図)で構成される人工流路を使用した。ガドリニウム造影剤の希釈水(1.3mL/L)を流体とし、定常流または拍動流をポンプ出力した。ファントム内の流量を 4D flow MRI (VENC 設定は 16, 32, 48cm/s) で計測し、流量計での測定値と比較した。



結果：

直管ファントムに約 1400mL/min の定常流(最大流速は約 14.8cm/s)を流し、各 VENC 設定のもと 4D flow MRI で流量計測したところ、VENC 16cm/s では約 1780mL/min と実流量より大きく、VENC 32cm/s では約 1530mL/min と実流量に近く、VENC 48cm/s では約 1010mL/min と実流量より小さい結果が得られた。

直管ファントムに拍動流(平均流量は約 900mL/min、最大平均流速は約 7.8cm/s)を流して 4D flow MRI で流量計測したところ、VENC 16cm/s では約 1150mL/min と実流量より大きく、VENC 32cm/s では約 950mL/min と実流量に近く、VENC 48cm/s では約 370mL/min と実流量よりかなり小さい結果が得られた。

大動脈瘤ファントムに上記の拍動流を流して 4D flow MRI で流量計測したところ、VENC 16cm/s では約 1300mL/min と実流量より大きく、VENC 32cm/s では約 750mL/min と実流量より小さく、VENC 48cm/s では約 950mL/min と流れの向きすら合わない結果が得られた。これらは瘤中央での計測値だが、いずれの条件においても瘤入口や瘤出口での計測流量と大きく相違し、質量保存則を満たさない結果であった。

考察と展望：

大動脈瘤ファントム内の流量を 4D flow MRI で正確に計測することは困難であった。計測流量は VENC 設定に大きく依存し、今回試したどの条件下でも質量保存則を逸脱する結果となった。

一般に VENC 設定は、折り返しアーチファクトが生じないように、最大流速よりやや大きく(決定版 MRI 完全解説(荒木力著)によると最大流速の 4/3 倍)設定するよう推奨されているが、そのような最適化(ないしは multi-VENC 撮影)を行っても、大動脈瘤の正確な血流評価は困難と思われる。さらなる原因究明と解決策の考案を目指し、基礎検証を進めたい。

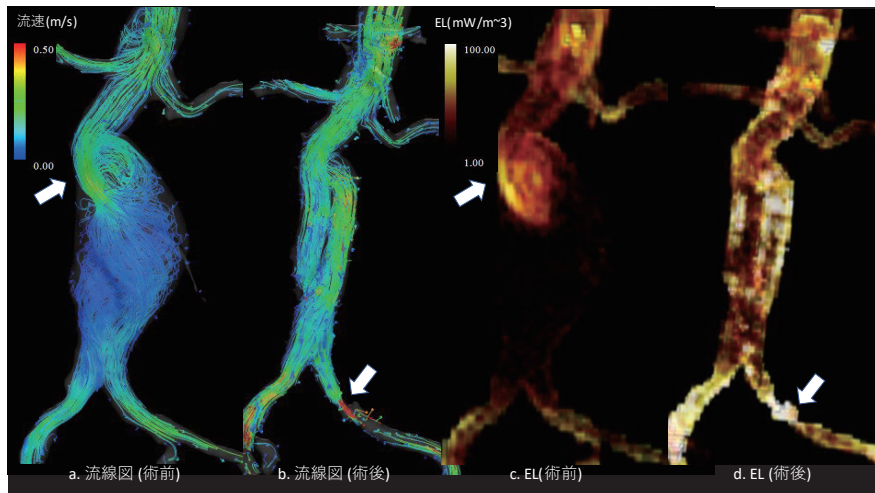
紡錘状腹部大動脈瘤におけるステントグラフト内挿術(EVAR)後の局所エネルギー損失：

4D-Flow MRI による評価

堀口 瞭太¹⁾、竹原 康雄²⁾、杉山 将隆²⁾、兵藤 良太²⁾、駒田 智大²⁾、松島 正哉²⁾、
長縄 慎二²⁾、水野 崇³⁾、櫻井 康雄³⁾、杉本 昌之⁴⁾、阪野 比呂志⁴⁾、古森 公浩⁴⁾、板谷 慶一⁵⁾
1)市立四日市病院 放射線科、2)名古屋大学医学部附属病院 放射線科、3)名古屋大学医学部附属病院 放射線部、
4)名古屋大学医学部附属病院 血管外科、5)大阪公立大学医学部附属病院 心臓血管外科

背景: EVAR の長期的影響は未解明の点も多く、ステントグラフト(SG)挿入によって心負荷が増大するとの報告もある。EVAR 術前後の治療部局所での EL を比較して EVAR による血行動態への影響を調査する。

材料と方法: 紡錘状腹部大動脈瘤への初回治療として EVAR を施行する患者 13 名に対して術前後で 4D-Flow MRI を撮影した。



腹腔動脈上端レベルから下位腎動脈下端レベルの腹部大動脈を neck、腎動脈下腹部大動脈から両側総腸骨動脈末端(内/外腸骨動脈分岐部)までの範囲を術前は an、術後は sg と定義し、それぞれの EL とその合計(total EL)を測定した。心負荷の指標として血漿 BNP 値を、形態の指標として SG ネック角と脚狭窄率を測定した。ネック角>45 度と脚狭窄率>70%を deformed SG 群と定義した。

結果: 腹部大動脈 Ao3 レベルでの平均流速(cm/s)は EVAR 術前 0.91 から術後 4.79 と約 5 倍に上昇した。Total EL(mW)は術前 0.292 から術後 0.487 と約 1.7 倍に上昇した。術前後とも total EL はネック角に相関し、相関係数は術前 $r=0.691$ 、術後 $r=0.718$ であった。術後では BNP(pg/mL)は total EL に相関($r=0.773$)した。deformed SG 群では total EL は術前 0.349 から術後 0.848 と 2.4 倍に上昇し、BNP も術前 90.3 から術後 100 と上昇した。

考察: SG 設置により渦や乱流が是正され EL が低下するとの当初の予想と反し、実際には局所 EL は 1.7 倍に増加した。EVAR で流路拡張が是正される事で流路は体積縮小し、血流速度が約 5 倍に上昇した事が大きく寄与したと思われる。上に示した図でも流速の速い部分で EL が大きく見える。

SG の形態的变化との関係では EVAR 後 EL はネック角に相関していたが、ネック屈曲により流路が狭くなり血流速度上昇を来す。同様に脚の狭窄でも血流速度上昇が起きる。これらが deformed SG 群の EL が術前と比べ術後 2.4 倍と増加が目立った原因と考える。

動脈硬化は心不全の予測因子であるが、SG はより硬く、これも EL 増加に寄与している可能性がある。イヌに SG を入れた実験ではコントロールと比較して心肥大を来したとの報告があり、ヒトでも SG 挿入により直後と遠隔期の両方で baPWV や LV mass index 上昇を認めたとの報告がある。

EL と BNP 値には正の相関が見られ、deformed SG 群では BNP が上昇しており、SG 挿入による EL 増加が心機能に影響を及ぼす可能性が示唆される。

結論: EVAR 後 EL は 1.7 倍に増加した。特に deformed SG 群では 2.4 倍に増加し、BNP も上昇した。

脳血管 4D Flow MRI の血流情報と脳容積の比較

八方政豪¹、関根鉄朗²

1. 日本医科大学千葉北総病院放射線科 2. 日本医科大学武蔵小杉病院放射線科

背景

軽度認知機能障害やアルツハイマー病に関する血管理論として CBF の低下が提唱されており、4D Flow MRI を用いた検討も散見される。4D Flow MRI での脳血流量評価は頭蓋内への流入血流量のみを測定しているが、この流入血流量は脳容積とも相関する事が知られている。背景の脳萎縮病理との交絡を排除するために、脳容量を加味した検討が必要と推測される。本研究では、認知症患者への 4D Flow MRI 研究の予備実験として、4D Flow MRI 定量値と脳容量との相関について検討した。

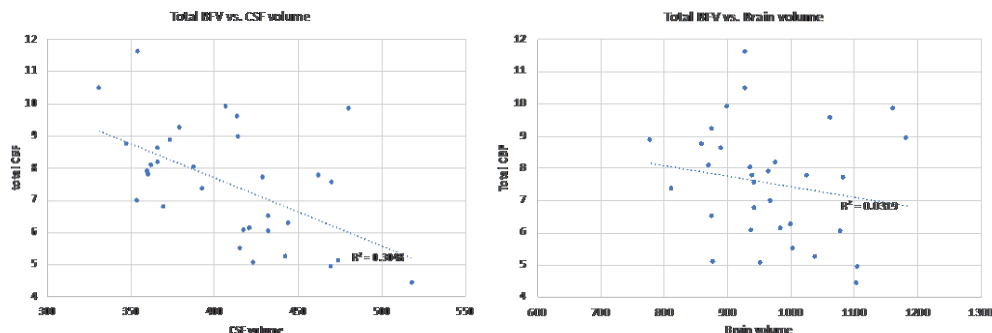
材料と方法

当院にて 2021 年 11 月～2021 年 12 月認知機能障害を疑われた 40 症例において 3D T1WI を含む認知症精査プロトコルに加え、4D Flow MRI を撮像した。撮像パラメーターは GE 3T-Pioneer, TR 6.6m, TE (shortest),空間分解能 1*1*1 mm³, kat-arc 8 倍, VENC 120cm/sec, scan time 5-7 minutes。解析は VINCENT(FUJIFILM 社)を用いた。両側の ICA 及び BA 血流量を合算し頭蓋内流入血流量(total CBF)と定義した。深層学習を応用した脳容量解析パッケージで灰白質・白質・脳脊髄液容量を推定した。血流量と brain volume (灰白質+白質)、血流量と脳脊髄液容量の相関を、SPSS を用いて評価した。

結果

血管描出が不良で血流解析にて血流量の測定が不可能であった 7 症例を除外し、33 症例に対して、解析を行った。MMSE 23 点以下で認知症を疑う症例は 14 症例であった、

脳容積と脳血流量の間に相関は認められなかった。脳血流量と脳脊髄液容量の間に相関係数と負の相関関係があることがわかった。(図 1.2)



考察

脳容積と脳血流量の間に正の相関があるという当初の想定と反した結果となった。過去の 2D-PC MRI を用いた既報では、症例群が健常症例であったのに対し、今回は血流解析ができた症例のうち約 4 割が他覚的評価で認知症が疑われる数値であったことが関係している可能性がある。

結論

認知症疑い患者を含む症例群では脳容積と脳血流量の間に相関は認められなかったが、脳血流量と脳脊髄液容量の間に相関負の相関関係が認められた。今後、症例数の蓄積を積み重ね、交絡の排除をした検討を行っていく。

参考文献

1. Alasdair G Morgan et al. (2020). 4D flow MRI for non-invasive measurement of blood flow in the brain: A systematic review. JCBFM 0(0) 1-13
2. Sung Won Youn et al. (2021). From 2D to 4D Phase-Contrast MRI in the Neurovascular System: Will It Be a Quantum Jump or a Fancy Decoration? JMRI 55(2):347-372

4D flow MRI による門脈系血行動態評価と

食道静脈瘤のリスクに関する検討

檜垣 篤、神吉 昭彦、山本 亮、玉田 勉
川崎医科大学放射線診断学教室

背景:

食道静脈瘤は肝硬変に伴う門脈圧亢進症に付随して発症し、破裂による重篤な病態を呈しうる疾患である。そのため肝疾患を有する症例では、定期的に内視鏡検査を行い、破裂の危険性のある静脈瘤を認識する必要がある。4D flow MRI は非侵襲的に門脈血行動態を評価することができ、食道静脈瘤の発生を予知する重要な指標を得られる可能性がある。

材料と方法:

当院で肝臓 MRI と内視鏡検査が施行された 17 人の慢性肝疾患患者を対象とした。4 次元速度マッピングは 3.0T の MR 装置 (Philips 社製) で空腹時に自由呼吸下で撮像した。MR パラメータ ; FOV400mm、TR/TE 5.3/3.7、SENSE 3.5、Flip angle 10°、Acquisition matrix 1.67×2.45×4 mm³、Reconstruction Matrix 0.83×0.83×2.00 mm³、velocity encoding sensitivity 20cm/sec。血流解析は Cardio Flow Design 社性の iTFlow2 を用いて行い、門脈本幹、左胃静脈、脾静脈の純血流量 (L/min)、順行血流量 (L/min)、逆行血流量 (L/min) を算出した。食道静脈瘤のリスクを内視鏡検査の所見を指標として 3 群 (Group A ; 静脈瘤なし、Group B ; 小さな静脈瘤、Group C ; F2 以上、または red color sign (RC sign) 陽性) にわけ、血流の定量値に対して群間比較を行なった。

結果:

Kruskal-Wallis 検定を用いた 3 群間の比較では、左胃静脈の純血流量 (P=.004)、順行血流量 (P=.036)、逆行血流量 (P=.002) に有意差があり、Man Whitney U 検定では、純血流量、順行血流量、逆行血流量のいずれも A 群と B 群の間で (それぞれ P=.004, P=.036, P=.002), A 群と C 群の間で (それぞれ P=.014, P=.049, P=.014), 有意差を示したが、B 群と C 群の間では有意差は認めなかった。門脈本幹、脾静脈では有意差が認められなかった。

考察:

食道静脈瘤の発生は左胃静脈の純血流量と順行血流量の減少、逆行血流量の増加と関連していた。肝硬変患者では、肝内の血管抵抗の増加により、肝外側副血行路が形成される。左胃静脈への逆流は食道静脈瘤発生の主な原因であり、今回の結果は理論的であると考えられる。言い換えると 4D flow MRI による非侵襲的な左胃静脈の血流動態観察は、静脈瘤の発生を予測する因子であることが示唆された。しかしながら B 群と C 群の間では有意差は認めなかったため、食道静脈瘤破裂のリスクに関しては内視鏡による評価が必要である。

結論:

この研究は 4D flow MRI による非侵襲的な左胃静脈の血流動態の評価が食道静脈瘤発生を予測する因子となりうることを示した。

4D flow MRI における VENC の trigger time のズレが

血流動態解析に及ぼす影響について

－ ヒト頸動脈を模擬したファントムにおける検討 －

本庄悠人¹⁾、岸本修明¹⁾、福山篤司¹⁾、磯田治夫²⁾⁴⁾、加藤裕³⁾、
市川和茂³⁾、水野崇³⁾、数井駿佑⁴⁾、中島美来⁴⁾

1) 日本医療大学 保健医療学部 診療放射線学科、2) 名古屋大学 脳とこころの研究センター、

3) 名古屋大学医学部附属病院 医療技術部 放射線部門、4) 名古屋大学大学院医学系研究科 総合保健学専攻

背景: 昨年の本研究会において、trigger time のズレが 4D flow MRI データに基づいて計算される壁剪断応力 (WSS) などの解析結果に影響を与え、不正確な結果を示す可能性があることを報告した。本研究では、より臨床に近いヒト頸動脈を模擬したファントムを使用した場合に、trigger time のズレが WSS と振動剪断指数 (OSI) の解析結果に与える影響を明らかにすることを目的とした。

材料と方法: ヒト頸動脈を模擬した血管は、総頸動脈 (内径 9mm) とそこから分岐する内頸動脈 (内径 7mm)、外頸動脈 (内径 5mm) で構成され、3D プリンタを用いて作製した。その模擬血管内に定常流と拍動流で疑似血液を流し、Siemens 社製の Verio 3T MR 装置にて prospective gating による 4D flow MR 画像を取得した。ファントムの設置方法は内頸動脈と外頸動脈が①前後方向に位置する時、②左右方向に位置する時、③その中間の 45 度に位置する時の 3 種類で行った。後処理は血流動態解析ソフト Flova を用いて、「総頸動脈」と「内頸動脈起始部背側」の WSS と OSI を検討し、比較した。

結果: 定常流の WSS、OSI はともに配置を変えても変化は見られなかったが、拍動流の③の配置でファントムを尾頭方向から見た場合に内頸動脈起始部背側で WSS の高い帯状領域が右回転で円を描くような軌道が見られ、同部位の OSI では分布の偏りが見られた。

考察: 総頸動脈、内頸動脈遠位、外頸動脈を尾頭方向に流れる疑似血液は①、②、③のファントム配置において、主に 1 方向 (頭尾方向) の VENC の関与を受ける。これに対し、内頸動脈起始部の疑似血液は①、②のファントム配置で主に 2 方向の VENC の、③のファントム配置で 3 方向の VENC の関与を受ける。定常流ではどの時間においても速度変化がないため、①～③の配置で違いが認められなかったが、拍動流では 3 方向の VENC の trigger time が異なるため、同じ心時相の 3 方向速度成分から合成された速度ベクトルの方向は真の速度ベクトルと異なると推定された。

結論: 4D flow MRI データに基づいて計算される流速ベクトルは 3 方向に速度エンコードされた画像から算出される。このため、2 方向以上のエンコードが関与する血管走行の血流に対しては、trigger time のズレが血流動態解析結果に大きな影響を及ぼすと考えられ、注意が必要である。

深層学習を用いた磁気共鳴流体解析のノイズ低減

中島 美来¹、磯田 治夫^{2,1}、平野 祥之¹、寺田 理希³、田ノ井 千春^{4,3}、泉 孝嗣⁵、櫻井 康雄⁶、長縄 慎二⁵

1.名古屋大学大学院 医学系研究科総合保健学専攻 2.名古屋大学脳とこころの研究センター 3.磐田市立総合病院

4.各務原リハビリテーション病院 5.名古屋大学大学院 医学系研究科総合医学専攻 5.名古屋大学医学部附属病院 医療技術部

背景: ヒトの血流動態の情報を得る方法には計算流体解析 (computational fluid dynamics, CFD)、磁気共鳴流体解析 (magnetic resonance fluid dynamics, MRFD) などがある¹⁾。MRFD は、ヒトから直接短時間に収集した 4D Flow MR imaging (MRI)²⁾ と 3D time of flight MR angiography (3D TOF MRA) のデータを使用する解析方法で、CFD と同様な血流情報が短時間で得られるが³⁾、4D Flow MRI に由来するノイズが含まれるため、解析結果の 3 次元速度ベクトル場の精度が低下する。本研究の目的は、深層学習を用いた人工知能 (AI) を用いて MRFD のノイズを低減し、CFD に匹敵する精度を持つ結果に変換することである。

方法: 本研究は本学の生命倫理審査委員会の承認を得た。教師データ作成の対象は、本学と関連施設で 4D Flow MRI が撮像され、CFD が実施された脳動脈瘤を持つ患者 23 名とし、CFD で得られた 3 次元速度ベクトルデータを、正解データとした。MRFD を模倣したノイズを k 空間上に加えるために、正解データの CFD の 3 次元ベクトルデータから位相画像と強度画像を作成し、高速フーリエ変換を用いて k 空間上に変換した。そして、k 空間上で MRFD を模倣する適切なガウス分布ノイズを加え⁴⁾、逆フーリエ変換を用いて 3 次元ベクトルデータに戻し、これを入力データとした。反転を用いてデータの増強を行い、教師データセットとして合計 9972 個のデータを作成した。深層学習モデルの構造は、ノイズ除去モデルである Win5-RB⁵⁾ の構造を使用した。深層学習モデルに、教師データを学習させた後、学習に用いていない患者 5 名の CFD・MRFD データを用いて、予測精度を検討するために定性および定量評価を行った。速度ベクトルにおける定量評価の評価指標は、CFD を基準として、血流速度ベクトルの角度類似指数 (angle similarity index, ASI)⁶⁾・血流速度ベクトルの強度類似指数 (magnitude similarity index, MSI)⁶⁾ とした。また、血管壁剪断応力 (wall shear stress, WSS)⁷⁾、壁剪断応力空間勾配 (spatial WSS gradient, SWSSG)⁸⁾、振動剪断指数 (oscillatory shear index, OSI)⁹⁾ における定量評価は、CFD を用いた検証のみで行い、CFD を基準として 2 乗平均平方根誤差 (root mean squared error, RMSE) を用いた。

結果: CFD を入力データとした深層学習モデルの予測データでは、ASI・MSI は向上し、WSS・SWSSG・OSI の RMSE は減少した。MRFD を入力データとした深層学習モデルの予測データでは、3 次元ベクトル図でベクトルの乱れの改善が見られ (図 1)、流線図では瘤内の流

線のつながりが良好であった (図 2)。また、ASI・MSI も向上した。

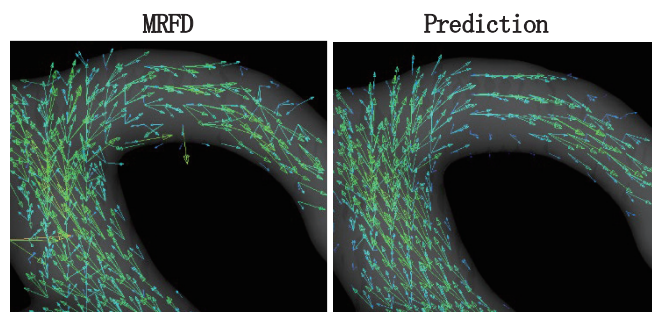


図 1 MRFD を用いた深層学習モデル予測前後の 3 次元ベクトル図

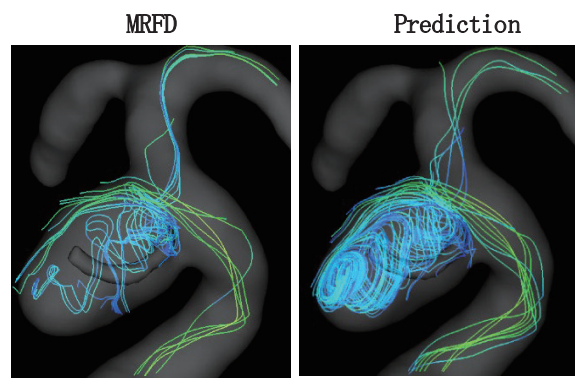


図 2 MRFD を用いた深層学習モデル予測前後の流線図

考察: CFD の 3 次元ベクトルデータの k 空間に MRFD を模倣したノイズを加えたデータを教師データとして学習させた深層学習モデルを用いて、MRFD を入力データとして予測した速度ベクトルは、定性・定量的にノイズが低減されたことから、今回作成した深層学習モデルは、MRFD のノイズを低減できたと考えられた。
結言: MRFD を模倣したノイズを加えた CFD の 3 次元ベクトルデータを教師データに用いて、Win5-RB の構造を使用した深層学習モデルを開発したところ、MRFD のノイズが軽減できた。

文献

- 1) Isoda H, et al. *Neuroradiology* 2010; 52: 913-20.
- 2) Markl M, et al. *J Magn Reson Imaging* 2003; 17: 499-506.
- 3) Isoda H, et al. *Neuroradiology* 2010; 52: 921-8.
- 4) Ferdian E, et al. *Front. Phys* ; <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00138>
- 5) Liu P, et al. *arXiv e-prints arXiv* ; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.05414>
- 6) Berg P, et al. *J Biomech Eng* 2014; 136:4.
- 7) Malek AM, et al. *JAMA* 1999; 282: 2035-42.
- 8) Meng H, et al. *Stroke* 2007; 38: 1924-31.
- 9) He X, et al. *J Biomech Eng* 1996; 118: 74-82.

[広告企業]

株式会社 Cardio Flow Design

株式会社 ENTORRES

GE ヘルスケア・ジャパン株式会社

株式会社フィリップス・ジャパン

シーメンスヘルスケア株式会社

[出展企業]

株式会社 Cardio Flow Design

株式会社 ENTORRES

フヨー株式会社

[協賛企業]

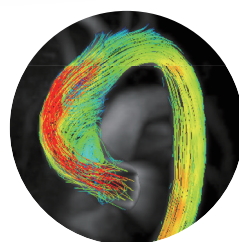
株式会社 ENTORRES

4D FLOW

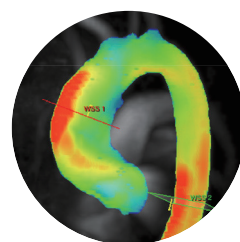
MRI 画像用 血流解析用ソフトウェア

循環器MRI画像解析ソフトウェアの パイオニアから登場

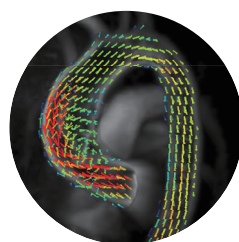
- ・ユーザビリティに優れ容易に解析が可能
- ・AP/FH/RL 方向の並び替えも全自動
- ・折り返しやゼロポイント等の補正が可能
- ・各種解析結果が動画及び DICOM で出力が可能



Streamlines



VelocityMIPS



Vector Lines

主な機能一覧

血流解析

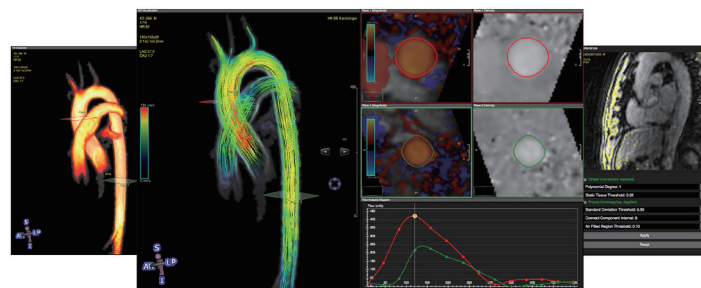
- ・ Streamlines
- ・ Pathline
- ・ Velocity MIPS
- ・ Vector Lines

血管壁圧解析

- ・ WallShearStress(WSS)
- ・ Pressure Mapping
- ・ Energy Loss

左室内血流解析

- ・ Ventricular Flow



複数のMRI装置の画像に対応

以下のMRI装置メーカーで検証済みです

- ・ GEヘルスケアジャパン
- ・ フィリップスジャパン
- ・ シーメンスヘルスケア





SIGNA™ Voyager AIR™ IQ Edition

もっと快適な検査環境を患者さんに提供するために。
高い診断能と拡大する臨床用途に対応するために。
検査ワークフローの負担を、さらに軽減するために。
最新テクノロジーの融合や撮影困難な領域への数々の取り組み、さらに
日本のお客様の声を反映させて誕生したSIGNA™ Voyager。
ワイドボア1.5Tの新たな世界が、ここからはじまります。

詳しくは、gehealthcare.co.jpをご覧ください。

製造販売 GEヘルスケア・ジャパン株式会社

製品名: SIGNA Voyager 販売名: シグナVoyager

製品名: AIR AA coil 1.5T 販売名: AIR コイル 1.5T

228ACBZX00009000

301ACBZX00001000

JB06023JA

磁気共鳴診断装置

MAGNETOM Vida with BioMatrix

Our journey to precision medicine

www.siemens-healthineers.com/jp



ソフトウェア開発だけでは、決してたどり着けない領域。
莫大な投資が必要なシステム開発を続ける理由は、
見据える未来があるから。

SIEMENS
Healthineers

PHILIPS

PHILIPS

**It's not just helium-free
MR operations.**

**It's excellent quality images
and patient-centric workflow.**

ヘリウムフリーのMR運用とAIによるタスクサポートにより
生産性の高い持続可能なMR検査体験を全ての人へ
Together, we make life better.

innovation  you

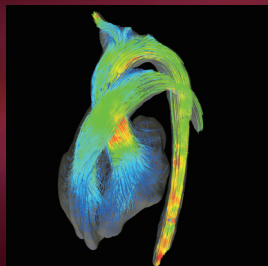
株式会社フィリップス・ジャパン
www.philips.co.jp/healthcare

販売名: フィリップス Ambition 1.5T
医療機器認証番号: 231AFBZX00015000
設置管理医療機器 / 特定保守管理医療機器
管理医療機器

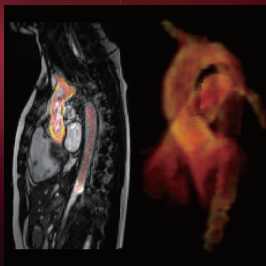
記載されている製品名などの固有名称は、Koninklijke Philips N.V.
またはその他の会社の商標または登録商標です。
©2022 Koninklijke Philips N.V.

iTFlow®

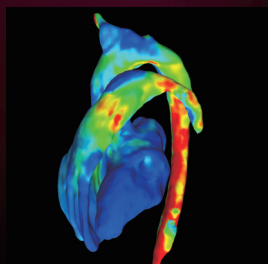
解析できる血流パラメータ例



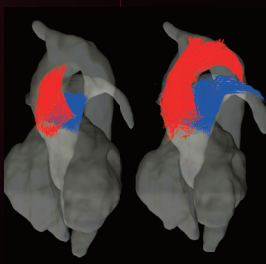
Streamlines



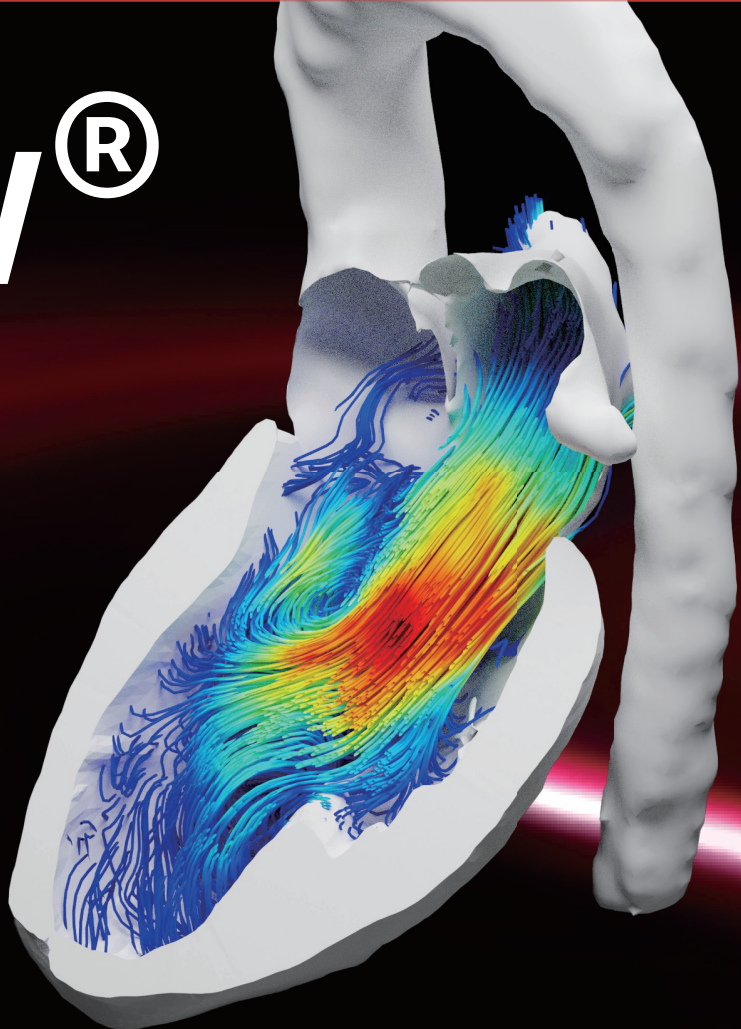
Energy Loss



Wall Shear Stress

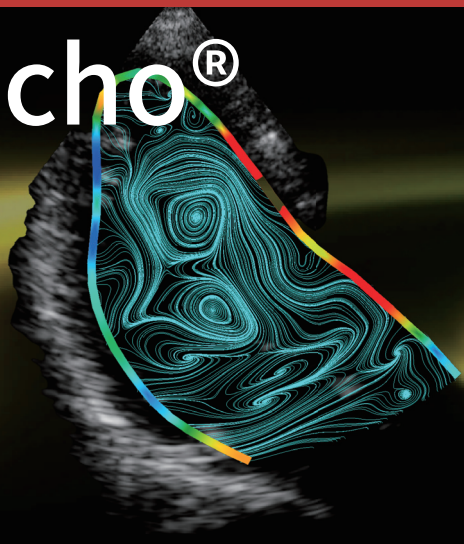


Pathlines



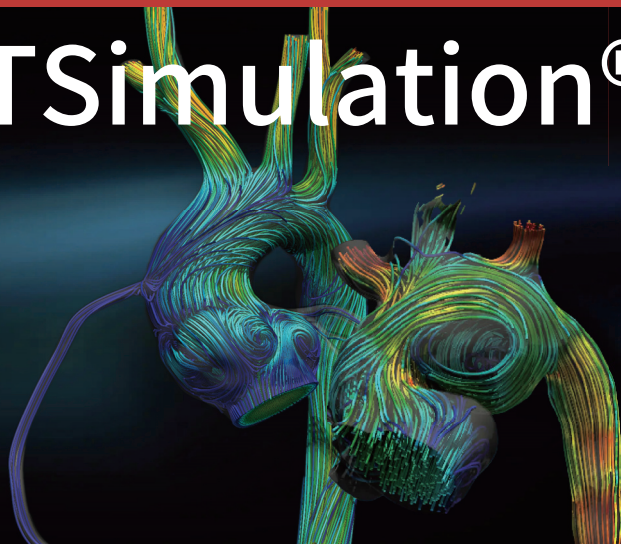
iTFlow® は、MRI のデータを元に自身で血流の解析とその可視化ができるソフトウェアです。流体力学や最新のコンピュータ・テクノロジーを利用することで、非造影の位相コントラスト Cine MRI のデータから心臓や血管内の流体を可視化 (2D, 3D) し、さまざまな指標を定量的に評価することができます。

iTEcho®



iTEcho® は、超音波画像を元に自身で血流の解析と可視化ができるソフトウェアです。VFM (vector flow mapping) と IVPD (intraventricular pressure difference) という2つのソフトウェアを包括した超音波血流解析パッケージで、心室内血流速度や圧較差の分布を簡単に評価することができます。

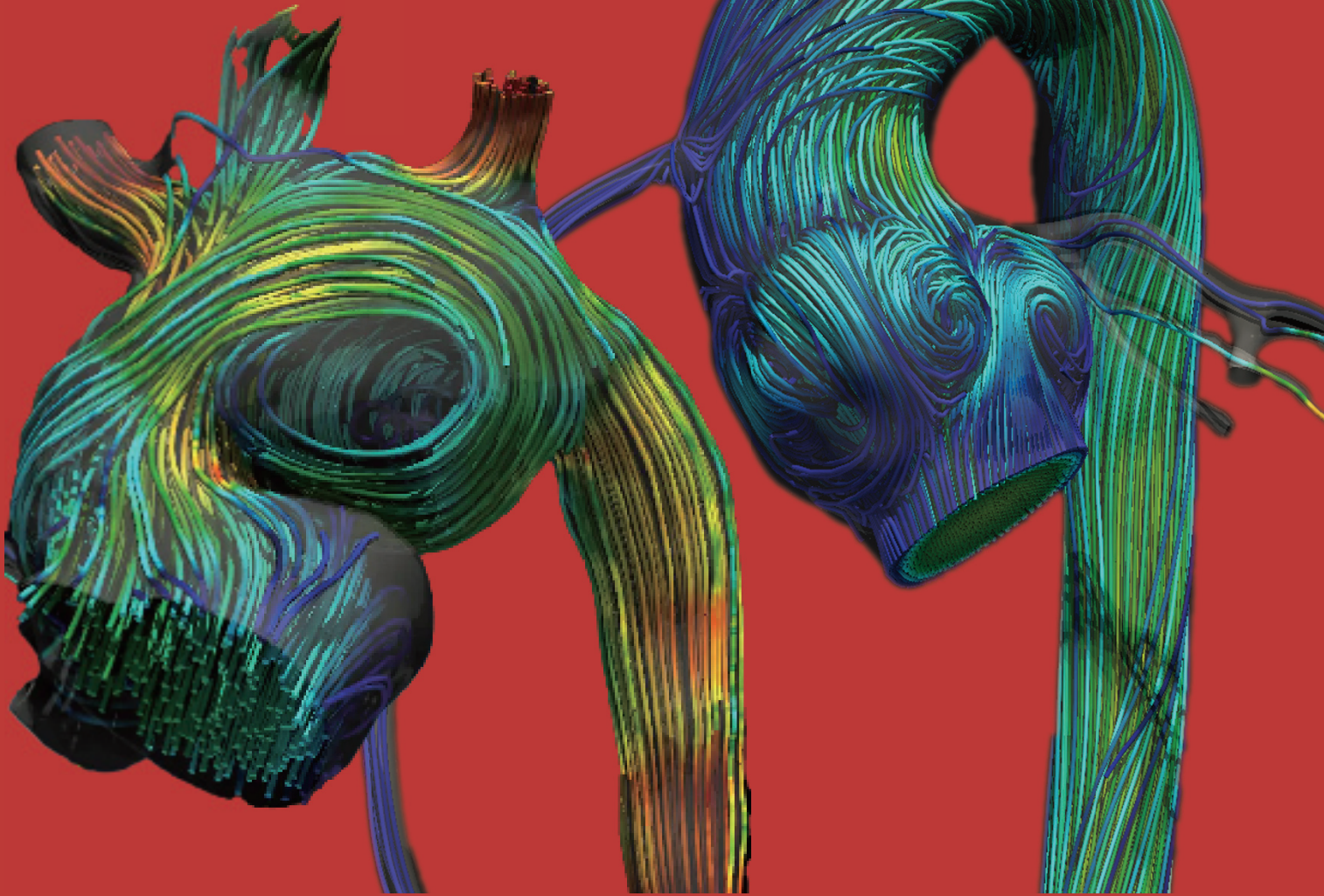
iTSimulation®



iTSimulation® は、CT 画像を元に血流のシミュレーションとその可視化を行うサービスです。CT のデータ (DICOM データ) を最先端の数値流体力学 (CFD) を利用し弊社で血流解析を行います。また、CG 技術を組み合わせることで、「仮想手術シミュレーション」もご提供できます。



心臓は血流で 診断する時代へ



Cardio Flow Design社は「血流解析で医療を変える」をミッションとし、簡単に血流の診断が行える世界を目指しています。血流の情報を元に将来の疾患を予想したり手術計画を立てる事で、循環器内科や心臓血管外科の診断・治療に大きなイノベーションを起こせると考えております。

