透析シャント瘤における数値流体解析を用いた血流の可視化

山﨑政虎[1)*]，荒木敬裕[1)]，深村　光[1)]，力久哲郎[2)]，野中枝理子[1)]
池田裕貴[1)]，福田　誠[1)]，吉原万貴[1)]，伊藤　学[3)]，宮園素明[1)]

1）佐賀大学医学部　腎臓内科
2）佐賀県医療センター好生館　腎臓内科
3）佐賀大学医学部　心臓血管外科

Visualization of Blood Flow in Dialysis Access Aneurysms Using Computational Fluid Dynamics（CFD）

Masatora Yamasaki[1)], Takahiro Araki[1)], Hikaru Fukamura[1)], Tetsuro Rikihisa[2)], Eriko Nonaka[1)], Yuki Ikeda[1)], Makoto Fukuda[1)], Maki Yoshihara[1)], Manabu Ito[3)], Motoaki Miyazono[1)]

1）Department of Nephrology, Saga University Faculty of Medicine
2）Department of Nephrology, Saga-ken Medical Centre Koseikan
3）Department of Thoracic & Cardiovascular Surgery, Saga University Faculty of Medicine

【要約】
本研究では，透析用自己血管内シャント瘤の血流動態を数値流体解析（CFD：Computational Fluid Dynamics）により可視化し，さらに仮想手術による再建後の血流動態変化も評価した．対象症例の造影CTデータから血管形状を取得し，超音波で計測した鎖骨下動脈の血流を用いてシミュレーションを行った．可視化する指標はWSS（wall shear stress），OSI（Oscillatory Shear Index）とした．WSSは瘤先端，OSIは瘤先端や内側で高値が確認された．再建シミュレーションではOSIが高い部分の位置に変化がみられた．今回，透析シャント瘤においてCFDにより血流を可視化することができた．今後はデータを積み重ねていくとシャント瘤の発達や再建後の血流の予測にCFDが寄与する可能性がある．

【Keyword】
CFD，数値流体解析，WSS，OSI

I. 緒言

血液透析を行うためには，ブラッドアクセスが必要であり，安定して血液透析行うためにはブラッドアクセスの維持が不可欠である．ブラッドアクセスには自己血管による内シャント，グラフトシャント，カテーテル，動脈の表在化等があるが，開存性・抗感染性・各種合併症の発生などの観点からみて，自己血管内シャントができ得る限り第一選択とすることが推奨される[1)]．内シャントは高圧の動脈と低圧の静脈が吻合されており，静脈内に発生する加圧や渦流により内膜損傷をきたし，狭窄や閉塞の原因となると考えられている[2)]．透析シャントは瘤化することもあり，透析シャント瘤が生じた際の臨床的な問題点として瘤の破裂・出血のリスクや，瘤に関連した血流障害，血栓，疼痛，整容面，穿刺可能位置の制限がある，破裂・出血に関しては破裂を示唆するような所見（瘤の増大，瘤の皮膚が菲薄化・光沢・脱色している，潰瘍・痂皮化している，上肢を上げたときにつぶれない，止血に時間がかかる）を認めたときは治療を急ぐべきであるとされている[3)]．

受付日：2025.8.24/ 受理日：2025.9.25
* 連絡先：〒849-8501　佐賀県佐賀市鍋島5-1-1　佐賀大学医学部 腎臓内科
tel:0952-34-2370 fax:0952-34-2017　sn5260@cc.saga-u.ac.jp

狭窄や閉塞，瘤化などのシャントトラブルの発生プロセスを解明するメカニズムは不明なままであり，血行動態環境を明らかにすることが望まれる．

今回，我々は，数値流体解析（CFD）を用いてシャント瘤の血流を可視化し，さらに仮にシャント再建を行った場合の血流の可視化も行った．

Ⅱ．血流解析の技術

血流解析には種々の方法がある，近年利用されている方法として今回使用したCFDの他に4D flow MRIという技術がある．3次元的な速度場を実測できるMRIの撮像方法の1つであり，心臓大血管領域では研究や術前評価に用いられている．透析シャントの血流解析を行うには空間分解能（1〜3 mm）や時間分解能が十分ではない．対して，数値流体解析（CFD）は流体を記述する方程式をもとにコンピュータ上で流体の挙動をシミュレーションすることが可能な手法であり，心臓血管外科領域での術前のシミュレーション等に使用された症例が報告されている[4]．透析シャントの血流解析を行う場合，一般診療で用いられるCTや超音波から解析可能である．

Ⅲ．数値流体解析 （CFD:Computational Fluid Dynamics）

流体を記述する方程式をもとにコンピュータ上で流体の挙動をシミュレーションする技術であり，解析を行う上で条件を設定する必要がある．どのような場所（血管の形状）で，どのような流体（血液）を，どういう状態（速度や圧力）でという情報を定義することによってシミュレーションが可能となる．臨床の場面では，血管の形状は造影CTによって非侵襲的に得ることができる．流体に関しては血液となるので，血液の粘度を利用できる．速度や圧力に関しては血液が流入してくる速度（流出境界条件）を鎖骨下動脈のエコー所見からこれも非侵襲的に得ることができる．

また，可視化する指標は，今回はWSS(wall shear stress)，OSI（Oscillatory Shear Index）を用いた，WSSはずり応力といわれるもので，血管の表面上を流れる血液が内皮に及ぼす接線方向の力である．拍動性血流と動脈構造との相互作用によって，血管壁には時間的・空間的に複雑に変化する血行力学の状態が発生している．一定の層量を保った接線方向のWSSによる刺激は，血管内皮を保護する方向に働くが，WSSの変動によって生化学的シグナルの変化が生じることで，大動脈瘤および冠動脈瘤を含むいくつかの心臓血管疾患の発生や進行が促進されることが知られている．OSIは振動剪断指数で，WSSを評価するための別の重要な血行力学的パラメーターである．血流の拍動に伴い血流が血管壁に及ぼす壁面剪断の方向が空間的に変化する割合を示す指標であり，心臓周期中の血流の基本的な流れの方向に対して，どれだけWSSの方向が変動したかという割合を定量化したものである．WSSの変動は血管壁の恒常性を乱し，大動脈病変を誘発する可能性があるといわれている[5]．

今回，CFDの解析を行うにあたって，株式会社Cardio Flow Designに解析を依頼し，解析ソフトはOpenFOAM v8.0を使用した．

Ⅳ．症例

72歳男性．原疾患はネフローゼ症候群で，透析歴は11年の患者，シャント瘤があり，当科に紹介となった．吻合部直上に長径4.0 ㎝程度のシャント瘤を認め，増大傾向であるためシャントの再建を検討することとした．再建するにあたり，シャント内のCFDによる血流の可視化，また，シャントを再建した後の血流の可視化を行った．図1aにシャントの外観，図1bに造影CTにより構築された血管の形状を示す．図1cは図1bの○で囲われた部分の拡大である．この部分を図1dのように仮想手術を行った場合のシミュレーションを行った．流入境界条件である鎖骨下動脈の血流はエコーで測定した．2199 ml/minと血流量は多量であった．血液が流出していくときの速度や圧力（流出境界条件）に関しては，既報[6), 7)]を参考に数値を代入した（図2）．仮想手術に関しては2199 ml/minと血流が豊富であったことから，仮想再建の吻合径は4 mmとした．

Ⅴ．結果

CFDでは血液の流れを流線として示すことができるが，動画での仮想手術前のシャント瘤周辺のWSS，OSIを図3に示す．WSSは時間経過で変化するものであるため，この画像はWSSの時間平均した値，TWSS（Time Averaged Wall Shear Stress）である．動脈内や，瘤の先端に大きな値を示していることが視覚的に明らかとなった．次に同じシャント瘤周辺のOSIを図4に示す．OSIが高値な部分は，瘤の先端もであるが，瘤の内側でOSIが高いことがわかる．

次に中枢で再建する仮想手術を行った場合のシミュレーションを行った結果を示す．図5は，仮想手術前後

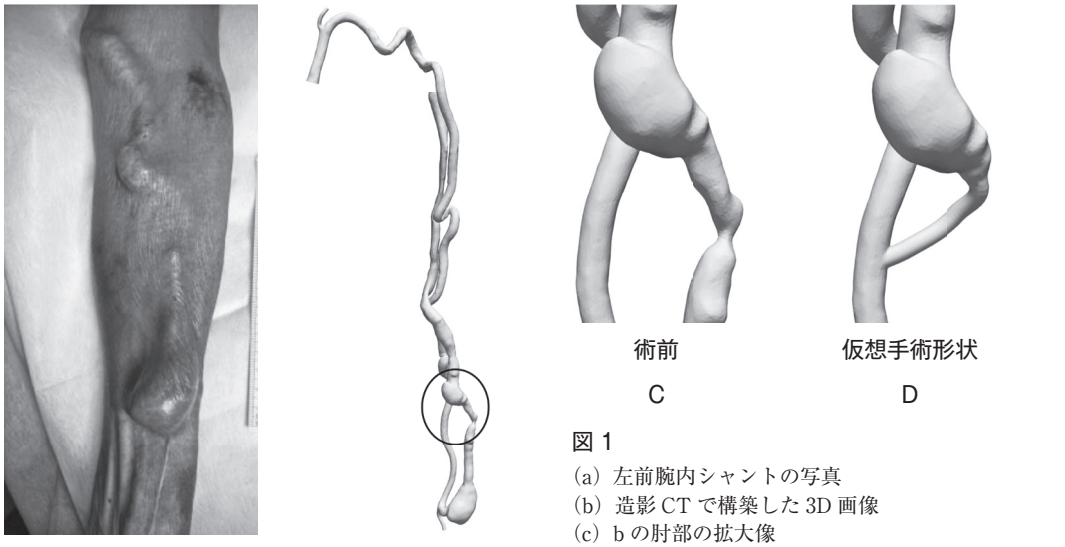

図 1
(a) 左前腕内シャントの写真
(b) 造影 CT で構築した 3D 画像
(c) b の肘部の拡大像
(d) c の部分でシャント再建を行った場合の 3D 画像

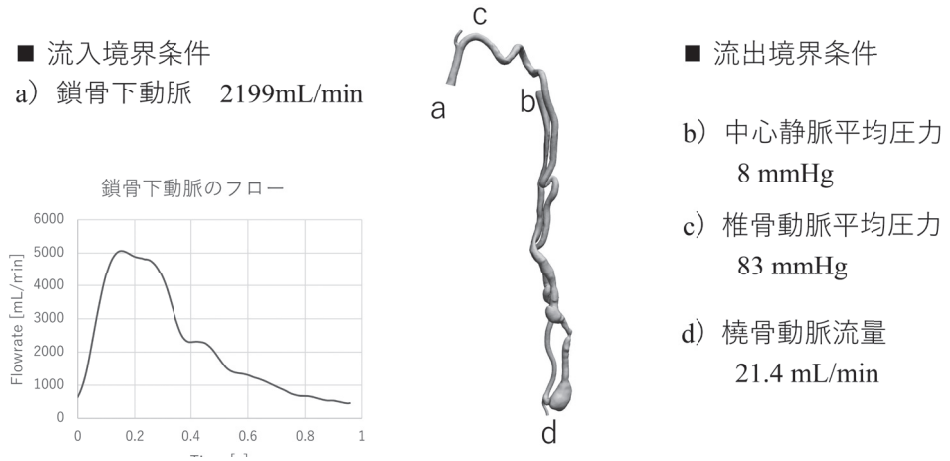

図 2. 流入境界条件と流出境界条件

の TWSS を示している．吻合した後の瘤の末梢側で TWSS が高値になっていることがわかる．図 6 には仮想手術前後の OSI を示しているが，OSI が高い部分の位置が瘤の中心から末梢側へ変化していることがわかる．

Ⅵ. 考察

近年「血流解析」は高度な画像診断・コンピュータ技術によって新たな発展を遂げ，渦流や乱流などの血流のみならず，血管内皮に加わる力学的なストレスも可視化することが可能となった[8]．先天性心疾患など心臓血管外科領域での術前のシミュレーション，術後の血流評価等において使用された症例が報告されるようになってきているが[4),9)]．シャント血流を解析した報告は依然として少ない現状がある．一定の層量を保った接線方向の WSS による刺激は，血管内皮を保護する方向に働くが，WSS の局所的な上昇が冠状動脈プラークの破裂に関連している可能性が指摘されている[10)]．また，一心拍の中で WSS の向きが大きく変動すると，血管内皮細胞から活性酸素が出やすいことが知られている[11)]．また，高い OSI が大動脈瘤の好発部位に一致していることが報告されている[12)]．

今回，我々は自己血管内シャント瘤の造影 CT 画像や，超音波を用いた鎖骨下動脈血流速度，既報から得られた橈骨動脈末梢の血流速度，圧力を基に数値流体解析を用いて流線，WSS，OSI の項目の解析を行い，シャント瘤内の WSS, OSI の局在を可視化することができた．また，再建の仮想手術のシミュレーションで WSS や OSI が変化していた．仮想手術シミュレーションに基づき，実際に施行したデータの検証を行い，症例を積み重ねていく

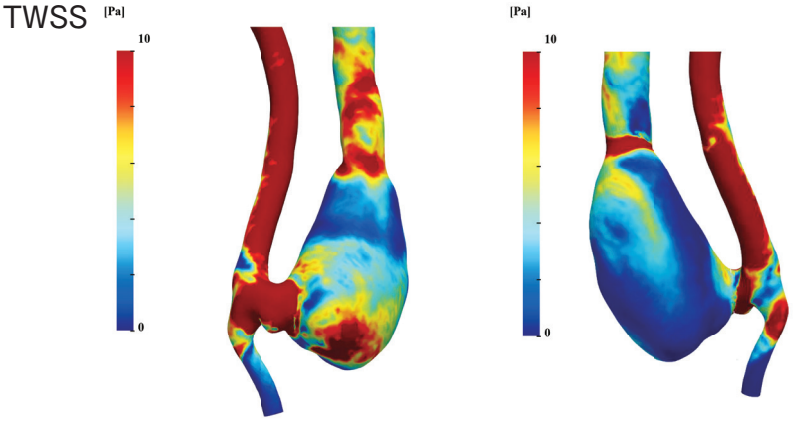

図 3.　吻合部直後のシャント瘤の TWSS（Time Averaged Wall Shear Stress）

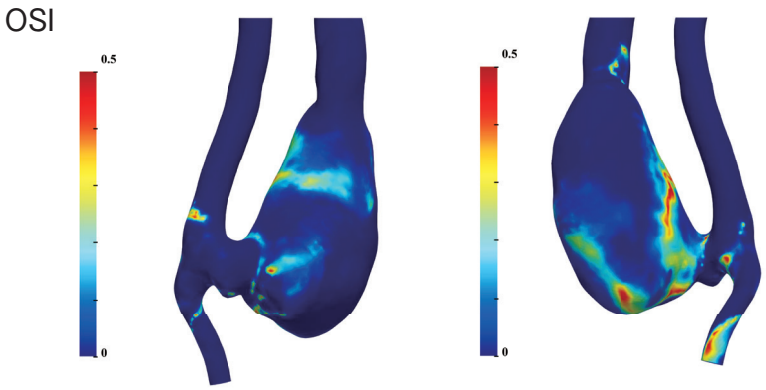

図 4.　吻合部直後のシャント瘤の OSI（Oscillatory Shear Index）

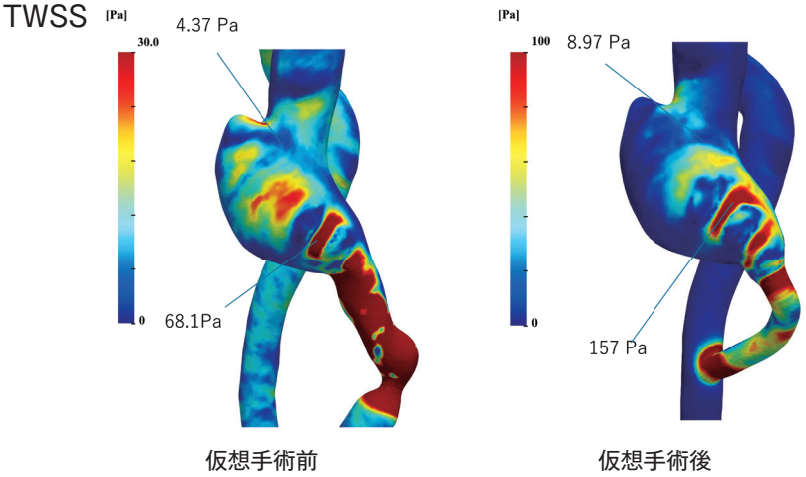

図 5.　肘部での仮想手術前後の TWSS（Time Averaged Wall Shear Stress）

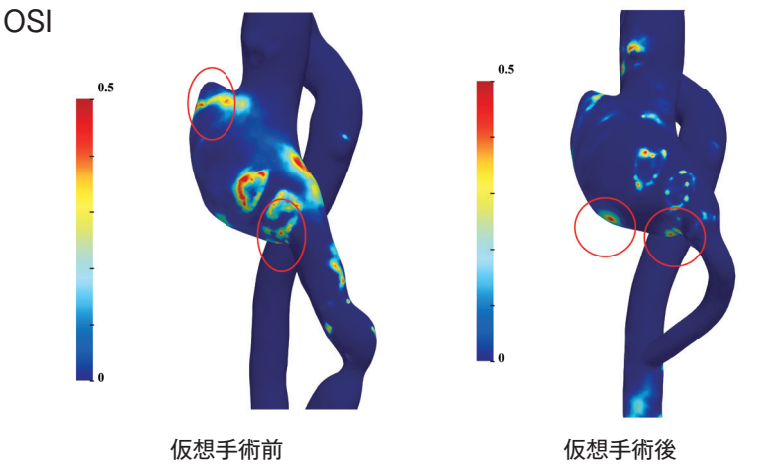

図 6.　肘部での仮想手術前後の OSI（Oscillatory Shear Index）

と将来の瘤化を予測できる可能性がある．

透析シャントの臨床研究，基礎研究を行う際，個々の症例の血管形状や血流に違いが大きく，一般化した結果を示すことは難しい．AVF は，血管の発達不足や狭窄，瘤化などが問題となり得る．血管吻合角度に関するレビューでは，吻合角を 40～50 度に維持することで，AVF の優れた成熟度と開存性をもたらしたことが示されている[13]．吻合部の血管径に関しては，AVG での報告があり，直径 14.5 mm の設計が壁面せん断応力と乱流の最小化という点で理想的であると報告されているが[14]，AVF に関する検証は不十分である．吻合部近傍の背側枝の存在はその周囲で狭窄が生じることを臨床的に経験する．吻合部からどれくらいの距離で，本幹との合流角度がどの程度であれば狭窄の原因となるリスクが減るのかは未検証である．また，CFD を用いたシャントの血流解析はシャント造設術直後の横断的報告が多いが，静脈が発達していくという AVF の特性を考慮して同一症例の縦断的な報告もなされた[15]．高 WSS が AVF の成長に関連しているという報告もされている[16]．CFD の技術を用いれば，AVF を成熟させ，シャントトラブルが少なく管理するために理想的な血管吻合径，吻合部角度，静脈の直径，狭窄の原因となる背側枝の角度，時間経過に伴う静脈発達の予測などをシミュレーションにより解明できる可能性がある．

心臓大血管領域と比較すると透析シャントの基礎データが少なく，実臨床の血管形状，血流の情報を蓄積することが必要である．

Ⅶ. 結語

数値流体解析（CFD）を用いてシャント瘤内の血流，WSS，OSI を可視化することができた．シャント再建のシミュレーションでも WSS や OSI が変動することが示唆された．シャント瘤の発達やシャントの再建後の血流変化などが事前にわかると，再建の部位，吻合径，吻合角度を変化させた場合のシミュレーションもできる可能性がある．瘤ができにくいシャントを作成する条件を事前に知ることができ，それを手術に反映することができるようになる可能性がある．今後，CFD での解析がすすみ，シャントの手術戦略に貢献することが期待される．CFD による解析を一般化するためには，シャントの実臨床の血管形状，血流の情報を蓄積することが必要である．

【参考文献】

1）久木田和丘，大平整爾，天野，他，2011 年版　社団法人日本透析医学会「慢性血液透析用バスキュラーアクセスの作製および修復に関するガイドライン」，透析会誌 44:855-937, 2011

2）大平整爾，阿部憲司，蓮実透，今忠正，透析会誌 23 (10): 1099-1107, 1990

3）Lok CE, Huber TS, Lee T, et al; KDOQI Vascular Access Guideline Work Group, KDOQI clinical practice guideline for vascular access: 2019 update, Am J Kidney Dis 75(4)(suppl 2):S1-S164, 2020

4）Jun Fujisue, Yoshishige Takayama, Shuto Tonoki, Hiroshi Tanaka, Utility of computational fluid dynamics for prediction of efficacy of the surgical interventions for aortic coarctation in adults, JTCVS Tech 18:16-21, 2023

5）植田琢也，水藤寛，大動脈疾患におけるコンピュータ数値流体力学，東北大学医学部保健学科紀要 28(1):5-13, 2019

6）Robinson Joannides, Agathe Costentin, Michaela Iacob, Patricia Compagnon, Agne`s Lahary, Chris tian Thuillez, Influence of vascular dimension on gender difference in flow-dependent dilatation of peripheral conduit arteries, American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology 282(4):H1262-H1269, 2002

7）Xiaowei Zhou, Chunming Xia, Gandy Stephen, et al. Investigation of Ultrasound-Measured Flow Velocity, Flow Rate and Wall Shear Rate in Radial and Ulnar Arteries Using Simulation. Ultrasound Med Biol 43(5):981-992, 2017

8）Robert S, Reneman, Theo Arts, Arnold P,G, Hoeks, Wall shear stress—an important determinant of endothelial cell function and structure—in the arterial system in vivo, Discrepancies with theory, J Vasc Res 43:251-269, 2006

9）Kato N, Yamagishi M, Itatani K, et al, Effects of blood flow dynamics on autologous pericardial degeneration in reconstructed pulmonary arteries, Interact Cardiovasc Thorac Surg 26(2):293-300, 2018

10）Yusaku Fukumoto, Takafumi Hiro, Takashi Fujii, Localized Elevation of Shear Stress Is Related to Coronary Plaque Rupture: A 3-Dimensional Intravascular Ultrasound Study With In-Vivo Color Mapping of Shear Stress Distribution, Journal of the American College of Cardiology 51(6):645-650, 2008

11）Hwang J, Saha A, Boo YC, et al, Oscillatory Shear Stress Stimulates Endothelial Production of from p47phox-dependent NAD(P)H Oxidases, Leading to Monocyte Adhesion, J Biol Chem 278:47291-47298,2003

12）Chiara Trenti1, Magnus Ziegler, Niclas Bjarnegård1, Tino Ebbers, Marcus Lindenberger, Petter Dyverfeldt, Wall shear stress

and relative residence time as potential risk factors for abdominal aortic aneurysms in males: a 4D flow cardiovascular magnetic resonance case–control study, Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance 24:18, 2022
13）Xinyang Li, Chong Liu, Haidi Hu, Prevailing insights into anastomotic angles of surgically created arteriovenous fistulas: a literature review, BMC Nephrology 26:252, 2025
14）Roland Jayson Panganiban, Reniela Redem Lictaoa, Martin Lance Mesia, Jordan Angelo Amorado, Heherson Cabrera, Computational Fluid Dynamics (CFD) in Arteriovenous (AV) Graft Implantation Through End-to-Side Anastomosis with Varying Tube Diameters Across Different Vascular Access Locations for Dialysis Treatment, Medicina (Kaunas) 60(10):1704, 2024
15）Luca Soliveri, Michela Bozzetto, Paolo Brambilla, Anna Caroli, Andrea Remuzzi, Hemodynamics in AVF over time: A protective role of vascular remodeling toward flow stabilization, Int J Artif Organs 46(10-11):547–554, 2023
16）Hannah Northrup, Yong He, Ha Le, Scott A Berceli, Alfred K Cheung, Yan-Ting Shiu,Differential hemodynamics between arteriovenous fistulas with or without intervention before successful use, Front Cardiovasc Med 9:1001267, 2022