

第19回 血流会

プログラム・抄録集

当番世話人 長谷川 英之（富山大学）

2026年7月25日（土）

ボルファートとやま 4F 琥珀の間

◆参加者の皆様へ

研究会に参加される方は必ず受付をお願いいたします。参加費：¥500

◆講演発表の先生方へ

・発表について

講演は1演題25分（発表15分、質疑10分）です。持ち時間を厳守し、座長の指示に従い円滑な進行にご協力をお願いします。発表の10分前には会場にご着席ください。

※横山 博俊 先生の演題は50分（発表35分、質疑15分）です。

・発表データについて

発表はご自身のPCの持ち込み、またはUSBフラッシュメモリー・外付けハードディスクによるメディアの持ち込みが可能です。動画や音声をご使用の場合にはご自身のPCをお使いください。データ破損等を考慮し、USBでのバックアップデータをご準備ください。

◆座長の先生方へ

座長の先生は担当セッション開始の15分前には会場にご着席ください。時間厳守でのセッションの進行をお願いいたします。

◆会場・交通案内

ゴルフアートとやま 4F 琥珀の間

〒930-0857 富山県富山市奥田新町 8-1

JR 富山駅から徒歩5分

◆タイムテーブル

13:00 - 13:30 世話人会

13:35 - 13:40 開会挨拶 長谷川 英之 先生（当番世話人）

セッション 1

座長：板谷 慶一 先生（Cardio Flow Design／順天堂大学）、寺原 拓哉 先生（早稲田大学）

13:40 - 14:30 心臓は機械的ポンプではない。心臓から発射された非線形圧力波動が、血液に唯一の経路を選択させる。

横山 博俊 先生（株式会社ペンギンハートリサーチ）

休憩 14:30 - 14:40

セッション 2

座長：長谷川 英之 先生（富山大学）、上嶋 徳久 先生（心臓血管研究所）

14:40 - 15:05 血液透析回路内血流における凝固傾向の高速超音波特徴解析

大村 眞朗 先生（富山大学）

15:05 - 15:30 僧帽弁逆流症例における心室内圧較差（IVPG）解析の適用可能性と課題 ―予備的検討―

田中 綾 先生（東京農工大学）

15:30 - 15:55 経皮的左心耳閉鎖術後の左房内・左心耳デバイス周囲血流をどう捉えるか

小川 孝二郎 先生（筑波大学）

休憩 15:55 - 16:05

セッション 3

座長：高橋 健 先生（順天堂大学医学部附属浦安病院 小児科）、中村 匡徳 先生（名古屋工業大学）

16:05 - 16:30 高速超音波イメージングによる頸動脈プラーク内微小血流の計測

長谷川 英之 先生（富山大学）

16:30 - 16:55 超高時空間分解能乱流輸送血流解析の実装：乱流理論の 4 次元拡張が明かす温故知新

板谷 慶一 先生（Cardio Flow Design）

16:55 - 17:00 閉会挨拶

◆演題 1

心臓は機械的ポンプではない。心臓から発射された非線形圧力波動が、血液に唯一つの経路を選択させる。

横山博俊

株式会社ペンギンハートリサーチ

心臓は機械的ポンプであり、血液を大動脈へ力強く駆出すると循環生理学の教科書には記載されている。本当にそうだろうか。解剖学的に見れば、心臓は機械的ポンプとしてしか考えられないではないか、というところであろう。しかし、もう一つの物理学的機序が存在する。それは、「非線形波動による物質の移動」である。非線形波動は 1965 年に Physical Review Letters に報告された比較的新しい物理学的概念である。非線形波動について研究すれば、「非線形波動による物質の移動」という概念に容易にたどり着く。弾性バネにおいて伸びと応力の間に非線形関係があれば、そのバネを連ねた非線形格子には波動がエネルギーの塊として伝搬する。いわば、波と粒子の性質を兼ねた物理学的実在である。

心周期図を見ると、左心室圧が大動脈圧よりも高いのは収縮期の前半だけである。後半は大動脈圧が高いにも関わらず、左心室からの血液の流出は継続する。この図を掲載している教科書は、この現象を慣性の法則に基づくと説明している。慣性の法則は質点に力が加わらない場合に、直線運動が継続することであり、上記の現象を慣性の法則で説明することはできない。圧力波動の伝搬が血液の駆出の原理ならば、位相が遅れる大動脈圧が収縮期の後半で左室圧よりも高くなるのは当然の現象である。教科書によっては収縮期の間、左室圧が大動脈圧よりも高く表示しているものも多い。これらの教科書は、慣性の法則の理解は正しいが、心臓周期図に手を入れていると考えられる。

左心室圧が大動脈圧よりも高くなっても、大動脈弁は即座に開放しない。これは圧力波動がバルサルバ洞の終端に到達し、バルサルバ洞を拡張することによって大動脈弁を開放しているために、小さな時間を要するためである。小さな時間は左心室圧に十分な大きさの初期圧力波を作りだすことを可能にしている。

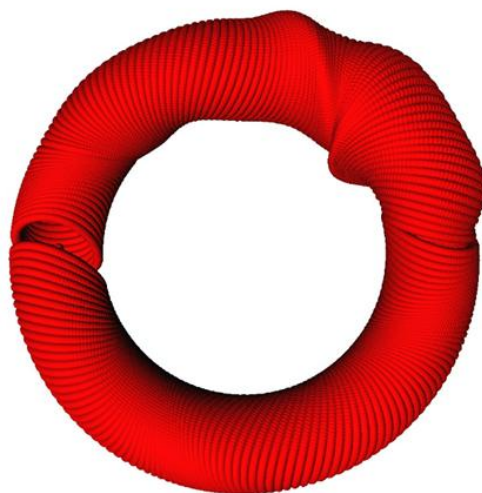
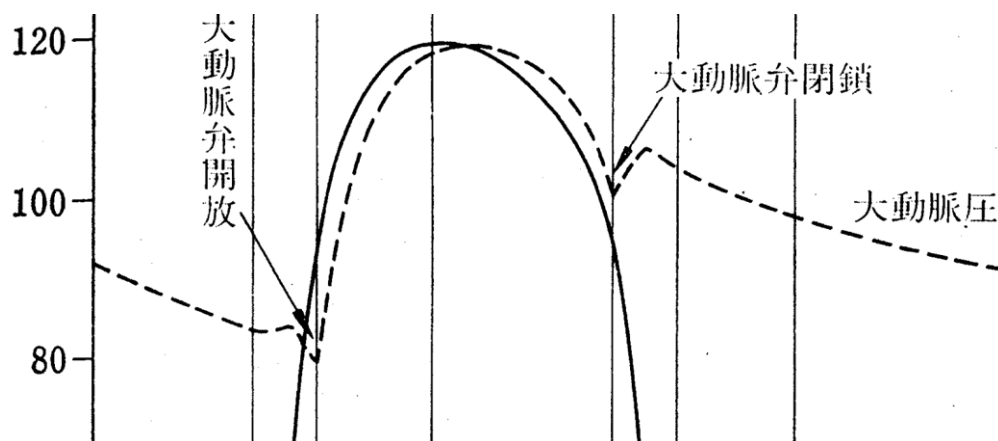
心臓から発射された圧力波動は大動脈に伝搬すると、大動脈壁を円周方向と血管軸方向に血管腔を拡張させる。血管軸方向に直線的に伸びていくわけにはいかないため、圧力波動は始点と終点の間の長さを変化させずに、血管軸方向にはたわみ、円周方向には拡張する変化を伴いながら、非線形波動として大動脈・血管系を螺旋状に伝搬する。これは動脈壁の円周方向と血管軸方向に対し、伸びと伸展応力の間に非線形関係が存在するためである。螺旋の向きは心臓から大動脈を見て、時計方向（右回り）である。

動脈の血流は血管系に非線形波動が伝搬することによって、幾何学的な変形を生じ、その結果、血液が動く」と説明した。実際に見れば、血管壁と血液は同時に動いているように見えるが、物理学的には血管壁が非線形波動として主体であると考えなくてはならない。血管壁が主であり、内部の血液は従である。したがって、血管壁と血液の間に外部摩擦（ずり応力）は存在しない。このことは、血液に経路の選択をゆだねることが出来、その結果、血液の経路がただ一つに限定される。もし、血液が主体で血管壁の中を進行すると、血液は経路を選択できず、無数の経路を取らなければ

ならなくなる。「乱流」が発生するために、経路をただ一つに決定することが出来なくなるからである。

血管壁の状態を A 、 t 秒後の血管壁を B とすれば、血流は微分可能多様体 A と B の間の写像と考えられる。この写像がどのような経路をとるかについては、変分原理によって最もエネルギーを消費しない経路を取る。この写像を調和写像と考えれば、作用積分（エネルギー）の最小値もしくは停留値をとる経路が血液の経路となる。作用積分とはすべての粒子の作用経路（運動経路、移動経路）の合計である。（モース理論）この経路は結果的に隣り合う血液粒子間の移動距離の差を極小にし、内部摩擦を最小にする。このため全血液粒子の移動距離の合計が最も少ない経路が解となる。移動時間 t をどんどん短くしても、 A 、 B 間の写像はただ一通りしか存在しない。したがって、 t を逆に大きくしても、 A 、 B 間の写像経路はただ一通りに限定される。 A 、 B はすべてコンパクトリーマン多様体と考えることができる。ゆえに A 、 B 間の調和写像はただ一つ存在し、ただ一つのみである。動脈系は考察の範囲内で境界がなく、閉じている。この条件は調和写像の存在条件である、パレ・スメールの条件を満たしているからである。（血液粒子は赤血球 1 個のことではなく、血液を粒子の集合と考えた数学的表現である。）

Qtcreator C++にて作成 大動脈をトーラスにし、波動伝搬をグラフィック化した。



◆演題 2

血液透析回路内血流における凝固傾向の高速超音波特徴解析

大村眞朗 1), 宮島哲也 2), 佐藤邦昭 2), 小池勤 2), 長谷川英之 1)

1) 富山大学 学術研究部工学系

2) 富山大学附属病院

血液透析回路内凝固は、返血不能や回路交換につながる重要な問題である。現在、凝固傾向は静脈圧や血液色を参考に判断されるが、圧変動は体位や補液操作の影響も受けるため、凝固前段階を定量的に把握する手法が求められている。本研究では、静脈チャンバ内血流を対象に、間欠的高速超音波計測を行い、血流信号パワーの統計量を解析した。

予備的検証として、既存の圧力・光学監視で警告が出ない段階に血流信号パワーの統計量変動が認められ、空間分布上にも血栓を疑う一例を確認した。また、静脈圧上昇や補液のタイミングで、高輝度エコーの混在、線状構造様エコー、空間的不均一性の変化が一過性に観察された。これらは血球・血小板成分の局所凝集、あるいはフィブリン網様構造の浮遊を反映する可能性がある。本検討は予備的段階であるが、透析回路内の凝固傾向を超音波信号特徴として早期に捉えられる可能性を示す。

◆演題 3

僧帽弁逆流症例における心室内圧較差（IVPG）解析の適用可能性と課題 — 予備的検討 —

常盤啓太 1), 畑中あかり 1), 林莉緒 1), Hussein Elhousseiny1), 田中 綾 1)

1) 東京農工大学大学院 農学府 共同獣医学専攻

【背景】心室内圧較差（intraventricular pressure gradient；IVPG）は、Color M-mode Doppler 画像と Euler の運動方程式を用いて左室内圧較差を非侵襲的に推定する手法であり、左室拡張機能や心室内血流動態を反映する新たな指標として注目されている。一方、僧帽弁逆流（mitral regurgitation；MR）症例では、左房圧や左室前負荷の変化に加え、逆流ジェットによる左室内血流パターンの変化を伴うため、既存の IVPG 解析法をそのまま適用できるかは明らかではない。特に、現行の解析法は Color M-mode 画像から得られる流速情報を Euler の運動方程式へ適用することを前提としており、MR に伴う複雑な流れ場や乱流を十分に反映できていない可能性がある。今回、MR 症例における IVPG 解析の適用可能性を検討するとともに、その技術的課題について考察する。

【方法】MR を有する犬を対象として Color M-mode 画像を取得し、IVPG 解析を試みた。発表時までに解析可能であった症例について予備的解析を実施し、解析成功例および解析困難例を提示する。また、画像取得条件、Color M-mode の設定、解析ラインの設定方法、MR 重症度との関連について検討する。

【結果】発表時には予備的解析結果を提示し、解析可能例と解析困難例を比較することで、MR 症例における IVPG 解析の問題点を整理する。また、解析精度向上に必要と考えられる撮像条件や解析方法について報告する。

【結論】MR 症例における IVPG 解析では、画像取得条件や解析ラインの設定に加え、MR に伴う複雑な血流や乱流が解析結果へ影響を及ぼす可能性が考えられる。本演題では、解析結果そのものだけでなく、MR 症例に対する IVPG 解析をどのように実施・解釈すべきかという技術的課題を提示し、血流解析および工学的観点から、現行の解析アルゴリズムの適用範囲や改良の可能性について議論したい。

◆演題 4

経皮的左心耳閉鎖術後の左房内・左心耳デバイス周囲血流をどう捉えるか：CT・経食道エコー・血管内視鏡からみる血栓形成と閉鎖デバイス表面内皮化の進展

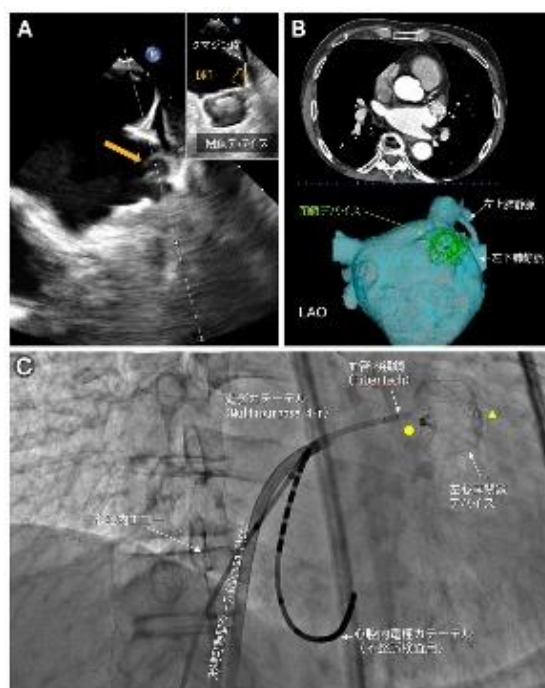
小川孝二郎 1) 山崎浩 1) 南健太郎 1) 町野智子 1) 石津智子 1)

1) 筑波大学 循環器内科

【背景】経皮的左心耳閉鎖術(LAAC)は、心房細動(AF)の血栓塞栓症抑止目的に抗凝固療法の代替として行われる治療である。閉鎖デバイスは経時的に自己組織で被覆され血栓形成リスクが低下し、抗血栓療法の変更や中止ができることとされる。術後デバイスに血栓(デバイス関連血栓, DRT)ができ、抗凝固薬の再開を要する例がある。DRT は術後の重要な懸念で、脳梗塞発症と関連する。DRT 発生における血流指標の有用性は十分明らかではない。

【症例】70 歳台男性、繰返す血尿、前立腺癌、脳梗塞の既往がある。経皮的 LAAC (Watchman FLX 27mm) を受けた。術後 4 か月に経食道エコー図検査(TEE)で、DRT が指摘された(図 A)。抗凝固薬が再開され、3 か月後の CT で DRT は消失した(図 B)。LAAC 後 10 か月で AF のカテーテル治療時に、血管内視鏡で心腔内から直視観察を行った(図 C)。以前 DRT を認めた部位を含め閉鎖デバイス辺縁部は全て内皮被覆されていた。中央部は限局的に内皮被覆が不十分と判断された。TEE 画像および造影 CT 画像を CFD 社(iTEcho 及び iTSimulation)を用いて解析し、DRT や内皮化の進展程度との関係を探索的に評価した。

【考察】LAAC 後 DRT を生じた症例で、造影 CT、TEE、血管内視鏡により形態、血流、表面治癒過程を多面的に評価し得た。DRT を生じた部位と内皮化不十分部位は必ずしも一致せず、DRT 形成と内皮化遅延には異なる寄与因子が関与する可能性が示唆された。今後、血流指標による LAAC 後抗血栓療法の至適化を目指したい。



◆演題 5

高速超音波イメージングによる頸動脈プラーク内微小血流の計測

長谷川英之 1), 長岡 亮 1), 大村眞朗 1), 斎藤こずえ 2)

1) 富山大学学術研究部工学系

2) 奈良県立医科大学神経内科・脳卒中センター

超音波イメージングは非侵襲かつ時間分解能（フレームレート）が高く循環動態の観察に適している。通常の超音波診断装置におけるフレームレートは数十 Hz 程度であるが、送信に平面波などの非集束ビームを用いることにより、フレームレートをさらに高めることが可能であり、数千 Hz のフレームレートが実現できる。血流イメージングにおいては、血球からの微弱なエコー信号を可視化する必要があり、そのためには反射・散乱強度が血球に比べて 40 dB ほども大きい血管周囲軟組織からのエコー信号をクラッタフィルタにより抑圧する必要がある。しかし、周囲組織からの不要エコーを抑圧しても、血流信号自体が微弱で信号対雑音比が低いいため、加算平均による雑音低減が必須である。また、流速が低い微小血流の描出においては、周囲組織の拍動等による移動の速度その差がほとんどないため、移動速度をもとに周囲組織からの不要エコー信号を抑圧することを目的としたクラッタフィルタによって、微小血流からのエコー信号も抑圧される傾向にあり、信号対雑音比はより厳しくなる。高速超音波イメージングでは、単位時間当たりのフレーム数が従来法に比べはるかに多いため、加算平均回数を増加させることができ、微小血流イメージングに適していることが示されている[1]。本報告では、平面波を用いた高速イメージング[2]を用いて頸動脈プラーク内の微小血流の可視化を試みた。7.5 MHz のリニアアレイプローブを用いて平面波を送信し、1736 Hz のフレームレートを実現した。受信したエコー信号に特異値分解を用いたクラッタフィルタ[1,2]を適用することにより周囲組織からのエコー信号を抑圧して血流像を得た。高速超音波イメージングと並行して造影超音波エコーも行い、微小血流を同定した。造影超音波像を参照し、高速超音波イメージングによる血流像を評価したところ、造影超音波像に比べ微小血流の可視化能は当然劣るものの、描出されている微小血流も多く、非造影で微小血流の存在を確認できる点で有用であると考えられた。

参考文献

- [1] C. Demené, T. Deffieux, M. Pernot, B.-F. Osmanski, V. Biran, J.-L. Gennisson, L.-A. Sieu, A. Bergel, S. Franqui, J.-M. Correias, I. Cohen, O. Baud, M. Tanter, "Spatiotemporal clutter filtering of ultrafast ultrasound data highly increases Doppler and fulltrasound sensitivity," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 34, no. 11, pp. 2271-2285, 2015.
- [2] H. Hasegawa, M. Omura, and R. Nagaoka, "On the investigation of autocorrelation-based vector Doppler method with plane wave imaging," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 69, no. 4, pp. 1301-1311, 2022.

◆演題 6

超高時空間分解能乱流輸送血流解析の実装：乱流理論の 4 次元拡張が明かす温故知新

板谷慶一 1,2) 庄若彤 1) 松本剛 3) 宮崎翔平 1) 鈴木康平 1) 西野輝泰 1)

1) Cardio Flow Design Inc.

2) 順天堂大学 心臓血管外科

3) 京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

【背景】心臓内血流は心周期内で Reynolds 数が激しく変動し、非定常性の強い乱流であることが推定される。そこで、1941 年に Kolmogorov が発表し現在も乱流理論の礎となっている冪則理論を心内乱流で検証し、さらにこれを 4 次元に展開した。

【方法】健常左室例での 4D flow MRI の解析データで 3 次元ないし 4 次元でのエネルギー Spektrum を算出した。時間分解能 14 frame/beat, 空間分解能 $1.7 \times 1.7 \times 4.0 \text{ mm}$ での左室血流例を対象とした。4 次元 Spektrum は Kolmogorov 類似の冪則の成立の有無を確認し、対数線形に基づく upsampling を行い、低波数領域での Yaglom-Orszag の繰込み群を適用した。

【結果】Kolmogorov 理論で知られる空間方向での低波数エネルギー注入領域と中程度波数エネルギー輸送領域(慣性領域)との境界周波数は健常左室ではおよそ左室渦半径程度のオーダーで、慣性領域と高波数領域散逸領域との境界の Kolmogorov 波数は空間分解能の数分の 1 程度のオーダーであった。慣性領域の冪則は低周波数ほど非定常乱流の $-7/3$ 乗に近く、中程度波数慣性領域では定常乱流の $-5/3$ 乗に近づいた。一方空間方向でも知られる冪則 -2 乗は慣性領域でよく整合し、Kolmogorov 周波数は計測周波数の数倍のオーダーであった。このことから 4 次元 Spektrum は時空間の慣性領域ではねじれ平局面に沿った対数線形性が成立することが示唆され、散逸領域は filtering できると推定した。そこで、エネルギー輸送に Yaglom-Orszag の繰込み群を適用させると概ね低波数領域が再現され、非圧縮条件に伴う Leray 射影のため圧応力は求まらないが、トラクション外力として相応なホワイトランダム力の存在が確認された。これらの知見をもとに、Parseval の定理を前提に速度場を upsampling し、心周期性と Fourier 位相が Hilbert 空間上の連続関数で拘束できるとして速度場を、時空間分解能を増大(時間分解能 350 frame/beat, 空間分解能 0.17mm)を実装すると、心内渦流の生成、消滅等の動態を目視で追跡可能となった。

【結論】4D flow MRI での血流計測は乱流現象の時空間でのプロットに過ぎず、心内血流は壁面応力に伴う非定常性の強い 4 次元乱流を構成し、これを再構築できることが示唆された。