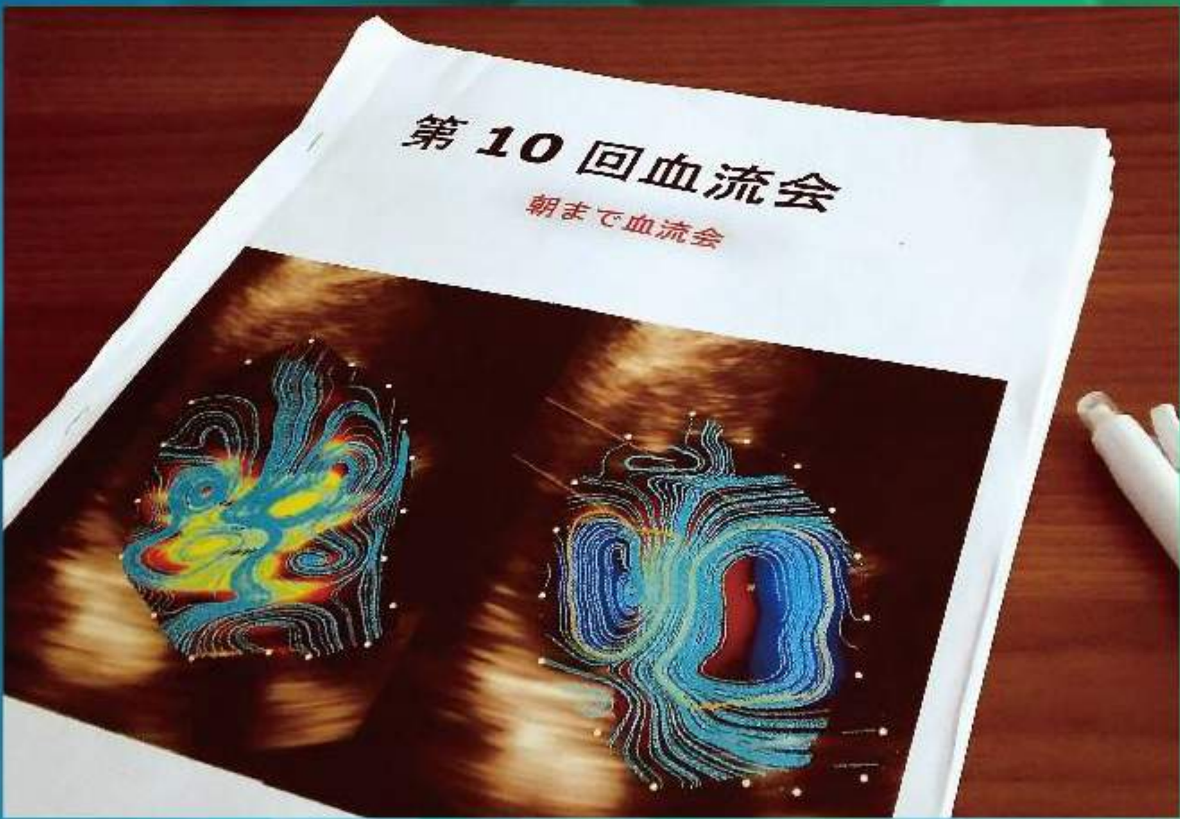


開催日　2018年6月30日（土）~7月1日（日）

会場　ほりでー湯　（長野県安曇野市堀金烏 11-1）

当番世話人　安河内 聰

（長野県立こども病院　循環器センター）

第 10 回血流会

プログラム・抄録集

当番世話人　　安河内　聰

長野県立こども病院　循環器センター

開催日　2018 年　6 月 30 日（土）　～　7 月 1 日（日）

会場：　　ほりでー湯　（長野県安曇野市堀金烏）

“朝まで血流会！”

今回第 10 回血流会のお世話をさせていただくことになりました長野県立こども病院循環器センターの安河内　聰です。

「血流会も 10 回目を迎え、何か今までの血流会と違ったイベントを考えて下さい」という第 9 回世話人の中谷敏先生からの“重い”申し送りがあり、いろいろ考えた末、今回の“朝まで血流会”という血流会始まって以来の泊まり込みの血流会を、人里離れた常念岳の登山口にある安曇野の温泉宿で開かせていただくことになりました。

今回の開催に当たっては、板谷慶一先生と上嶋徳久先生に広報から抄録集作成まで本当にお世話になりました。　両先生の支援がなければ今回の血流会は開くことができませんでした。　心から深く感謝申し上げます。

会場までのアクセスがあまり良くないので、参加される皆様には本当に迷惑な開催となりましたが、逆に開き直っていただきこの際俗世から離れた秘境で、とことん議論してみようではないかと皆様に思っていただければ幸いです。

この血流会は、血流に関するさまざまな基礎的考察や臨床への応用など基礎と臨床がぶつかり合う非常にユニークな研究会です。

今回は「night committee」として、先天性心疾患に関する血流の話題を取り上げました。　議論の間に温泉や食事を楽しみながら、いつも以上に徹底討論も楽しんいただければと存じます。

いろいろ準備が行き届かない点があるとは思いますが、安曇野の風景と温泉に免じてご容赦いただければ幸いです。

2018 年 6 月吉日

第 10 回血流会世話人

長野県立こども病院　循環器センター　　安河内　聰

参加者の皆様へ

研究会に参加される方には必ず受付をお願い致します

参加費:¥500

講演発表の先生方へ

発表について

✧ 講演は発表 15 分、質疑応答 10 分です。
✧ 講演はご自分の研究についてご発表ください。
✧ 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お願いします。

✧ 発表の 10 分前には会場にご着席ください。

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、CD-R 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。

✧プロジェクタには MiniD-SUB15 ピンのみ接続できます。変換ケーブルが必要な機種の場合には、必ず変換ケーブルをご持参ください。

✧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。

会場へのアクセス

会場：　ほりでー湯

〒399-8211　長野県安曇野市堀金烏 11-1

電話番号　0263-73-6500

交通案内

電車	東京から北陸新幹線で長野、長野から中央西線特急「しなの」で松本駅まで　（2 時間 30 分） 新宿から JR 中央東線特急「あずさ」で松本駅　（2 時間 40 分） 名古屋から JR 中央西線特急「しなの」で松本駅　（2 時間 5 分） 松本駅から豊科駅まで（大糸線）　（30 分） 豊科駅からタクシーで　15 分 ※送迎バス(28 人乗り)あり（送迎時間の指定があります） 松本駅　からほりでー湯まで　（14 時、15 時）
車	東京、名古屋から中央自動車道、長野自動車道経由で安曇野 I.C まで 安曇野 I.C から車で 25 分

１日目

14:30-15:25 世話人会

15:25– 15:30 開会の辞

当番世話人： 安河内 聰 長野県立こども病院 循環器センター

15:30-16:30 シンポジウム① 超音波血流解析で心疾患に迫る

座長

山田 聡 北海道大学大学院 医学研究院 循環病態内科学

田中 綾 東京農工大学 農学研究院動物生命科学部門

15:30 – 16:00（VFM の立場から）

何故渦評価が予後を予測するのか？私の考察

東京医科大学循環器内科 高橋 梨沙

16：00 – 16:30（IVPG の立場から）

成人心疾患における左室内圧較差

社会医療法人北海道循環器病院検査科 窪田 由季

16:30-18:00 シンポジウム② 冠動脈疾患の生理学と流体解析

座長

川瀬 瀬史明 岐阜ハートセンター 循環器内科

中村匡徳 名古屋工業大学 電気・機械工学科

16:30 – 17:00（虚血診断の立場から）

FFR と iFR についての理解と、臨床への応用

岐阜ハートセンター 大森 寛行

17:00 – 17:30（ソフトウェア FFRcfd の立場から）

数値流体力学による冠動脈機能的狭窄の非侵襲診断ソフトウェア開発の試み

京都大学大学院 医学研究科 循環器内科学 芳川 裕亮

17:30 – 18:00（プラーク予後予測の立場から）

冠動脈血流解析によるプラーク不安定化の可視化

社会医療法人北海道循環器病院循環器内科 山本 匡

休憩 18:00 – 19:00 （温泉タイム）

19:00 - 20:30 大宴会

乾杯の辞：

山田 聡　北海道大学大学院 医学研究院 循環病態内科学

20:30 - 24:00 ミッドナイトセッション　先天性心疾患の血流解析

座長：

安河内 聰　長野県立こども病院 循環器センター

板谷慶一　京都府立医科大学 心臓血管外科・心臓血管血流解析学講座

高橋 健　順天堂大学 小児科

20:30 – 21:00　（先天性心疾患の数値モデル解析から）

Fontan 循環血行動態の computer simulation から得られるもの

東京大学 小児科　犬塚 亮

21:00 - 21:30 (4D flow MRI での Fontan 循環評価の立場から)

4D flow MRI から解析したフォンタンルートの吻合方向とエネルギー効率の関係について

金沢大学附属病院 小児科　中村太地

21:30 – 22:00 （4D flow MRI での左右心室機能評価の立場から）

Ross 術後遠隔期における再手術適応評価における 4D flow MRI の役割

京都府立医科大学小児医療センター　小児心臓血管外科 藤田 周平

22:00 – 22:30（超音波 BSI の立場から）

Blood Speckle image による血流解析

GE ヘルスケアジャパン　五代儀 新

臨床例の実例紹介

国立成育医療研究センター 小児科　林 泰佑

22：30 – 23:00（超音波 IVPG の立場から）

先天性心疾患における拡張早期左室内圧較差の有用性の検討

順天堂大学 小児科　高橋　健

23：00 – 23:30 (超音波 VFM の立場から)

先天性心疾患における VFM による拡張期心室内圧較差の検討

長野県立こども病院 循環器センター　瀧聞浄宏

2日目

9:00 - 10:00 気合で朝を乗り切るセッション　心筋障害を超音波血流解析で迫る

座長

上嶋徳久　心臓血管研究所 循環器内科

林 泰佑　国立成育医療研究センター 小児科

9:00 – 9:30（健常心筋の立場から）

Vector Flow Mapping を用いた Energy Loss および渦度の成長おける変化

順天堂大学 小児科　井福 真友美

9:30 – 10:00（動物実験モデルの立場から）

ドキソルビシン投与犬における心エコー指標の変化についての検討

東京農工大学　獣医外科学研究室　佐藤琴美

休憩 (10:00 – 10:10)

10:10 - 11:40 シンポジウム③　大動脈疾患の血流解析

座長：

滝沢研二　（早稲田大学 創造理工学部総合機械工学科）

岡本一真　（明石医療センター 心臓血管低侵襲治療センター）

10:10 – 10:40（4D flow MRI の立場から）

MRI でプロトンを追跡する（４D Flow による MRFD）

名古屋大学大学院 医学系研究科 新規低侵襲画像診断法基盤開発研究寄附講座

竹原康雄

10:40 – 11:10（大動脈疾患の数値計算の立場から）

数値流体力学解析による急性大動脈解離発症機序の考察

京都府立医科大学 心臓血管外科　沼田 智

11:10 – 11:40（流体構造連成解析の立場から）

ゼロ応力状態推定法を用いた大動脈流体構造連成解析

早稲田大学 流体構造連成系応用力学研究室 佐々木 崇史

閉会の辞　(11：45-11：50)

板谷慶一　京都府立医科大学 心臓血管外科・心臓血管血流解析学講座

何故渦評価が予後を予測するのか？　私の考察

高橋梨沙

東京医科大学循環器内科

左室内の渦形成は、左室の形態や機能、左室流入に規定されることは容易に想像ができる。実際、我々の施設の基礎的検討では、拡張早期の渦強度は左室流入血流速度、左室容積以外に左室弛緩を表す僧帽弁輪移動速度が規定因子であった。一方、心房収縮期では、左室は能動的には拡張しないため、規定因子は左室流入血流速度、左室容積であった。拡張機能が低下すると、左室流入血流速度は偽正常化することが知られているが、我々の検討では、左室内に形成される渦強度は拡張機能が低下するに従い徐々に低下しており、偽正常化を起こしていなかった。我々はまた別の検討で、左室内の渦強度は心不全例において予後を予測できることを示したが、この予測能は基本的に左室の形態や機能を反映していることに起因している。しかしながら、予後予測能は左室容積や代表的な左室機能指標で補正したとしても有意であることから、何らかの別の要因が絡んでいる可能性はある。当日は渦評価の意義について考察したいと思います。

成人心疾患における左室内圧較差

窪田由季

北海道循環器病院 臨床検査科

心臓は収縮と拡張を繰り返し、循環を維持している。拡張期では左房からの血液が左室に流れ、続いて左室が収縮する事でそれらの血液を全身に送り出している。
この左室の拡張には、左室自体が ATP を消費し能動的に拡張しながら、左室内に圧較差を作り出すことで、左房の血液を吸い込む能動拡張と、受動拡張能が担っている。
この左室の能動拡張は Suction と呼ばれ、近年、超音波法により左室内圧較差（Intra Ventricular Pressure Difference: IVPD）を計測する事で評価が可能となった。
我々は、大動脈弁狭窄症、急性心筋梗塞再灌流後に関する IVPD の研究を行ってきた。
今回、これらの研究結果を含めて紹介する。

FFR と iFR についての理解と、臨床への応用

大森寛行

岐阜ハートセンター

近年、冠動脈血行再建の適応は大きく見直され、以前の angio guided PCI から、何らかのモダリティーで虚血を評価し、適切に治療適応を決定する physiology guided PCI が注目されている。FFR は、カテーテル検査の際に、血行動態的有意狭窄を同定する際に最も診断能が高い方法であり、FAME 試験や FAME2 試験など、数々の大規模研究で、FFR guided PCI の有用性が証明されている。一方で、iFR は薬剤負荷が不要で、簡便に虚血評価が行えるため注目されている。最近 DEFINE FLAIR 試験および iFR SWEDEHEART 試験にて、FFR との非劣性が証明され、臨床でも多く使われている。今回は、FFR と iFR についての理解を深めることで、臨床へどのように応用していくかを考察した。

数値流体力学による冠動脈機能的狭窄の非侵襲診断ソフトウェア開発の試み

芳川裕亮[1] 中本将彦[2] 星雄陽[2] 中村匡徳[3] 今井俊輔[4] 川瀬世史明[4] 松尾仁司[4]
齋藤成達[1]

1 京都大学大学院医学研究科循環器内科学

2 イービーエム株式会社

3 名古屋工業大学 電気・機械工学科 生体医工学研究室

4 岐阜ハートセンター 循環器内科

＜目的＞
冠動脈 CT から心筋血流予備比(Fractional Flow Reserve: FFR)を推定できる数値流体力学を用いた血流解析ソフトウェアを開発する。
＜方法＞
冠動脈 CT 及び冠動脈造影と FFR が施行された患者を後ろ向きに抽出し対象とした。冠動脈の抽出は CT データから半値法を用いて二値化処理で血管内腔領域を決定、自動抽出結果を形状から適否を判定し、必要と考えた症例は手動補正を行った。解析対象領域は、冠動脈入口部から血管径が 2 mm となった部位とし、得られた内腔情報に対して、数値流体力学計算を行なった。境界条件として入口側は冠動脈起始部に 100 mmHg の固定値を、出口側は各血管の流出血流量を与えた。冠血流は起始部の直径から総流量を決定し Murray の法則に基づいて分岐毎に直径の 3 乗比に従い血流量を分配して末梢に到達するまで分配を繰り返し各出口側での血流量を決定した。冠動脈血流量は血管拡張薬により定数倍（左冠動脈は 3 倍、右冠動脈は 1.5 倍）となると仮定した。血液は非圧縮性ニュートン流体と仮定し血管壁は剛体として滑り無し条件を与え、冠血流は定常流として有限体積法にて解析を行った。入口部の血圧 Pa=100 mmHg に対する末梢部（プレッシャーワイヤーの位置あるいは解析対象血管の抹消）の血圧 Pd の比を FFRcfd とし、実測 FFR の値(FFRinv)と比較し、感度・特異度および相関係数を検討した。
＜結果＞
対象患者は N=48, 対象冠動脈は N=72 であった。対象冠動脈の内訳は LAD=36, LCX=18, RCA=18 であった。FFRcfd および FFRinv の相関係数は 0.56, またそれぞれのカットオフを 0.80 としたところ、感度 59.1%, 特異度 94.0%となった。
＜結論＞
非スーパーコンピューターでオンサイト解析・対話的操作が可能な FFR を推定するソフトウェアを開発中である。今後も改良を重ね、前向きの validation を行う必要がある。

冠動脈血流解析によるプラーク不安定化の可視化

山本 匡 [1]　板谷慶一 [2]　古澤豊樹 [3]　宮崎翔平 [3]　西野輝泰 [3]

1　社会医療法人北海道循環器病院循環器内科

2　京都府立医科大学心臓血管外科・心臓血管血流解析学講座

3　Cardio Flow Design

【背景】

冠動脈狭窄による心筋虚血判定に冠血流予備比 FFR という指標が用いられているが, これは心臓カテーテル検査の一環として行う検査であり観血的手技である．近年，冠動脈 CT の 3 次元画像情報から CFD を行って仮想 FFR を算出する方法が出現し，非侵襲 FFR として冠動脈領域においても血流解析が虚血診断として普及しつつある．一方 CFD では血管系に与える力学的ストレスを血行力学パラメータとして抽出することが可能であり、我々は冠動脈領域の血流解析法の構築とプラーク予測診断を行った．

【方法】

(1)　冠動脈 CT から 3 次元形状構造を構築し、境界層を含めた計算 Mesh を作成

(2)　境界条件の設定と有限体積法に基づく数値流体解析：冠動脈疾患における本質的な血流現象は虚血枝での流量が狭窄病変と灌流心筋によって規定されるという立場から，冠動脈末梢血管には灌流心筋量を分枝ごとに推定し変動インピーダンスを与えた．上行大動脈には流量，大動脈末梢には反射波を推定した圧力を設定．

(3)　プラークを経年追跡し 2 区間で比較して不安定化したプラークとしなかったプラークとでの血流解析結果を比較検討.

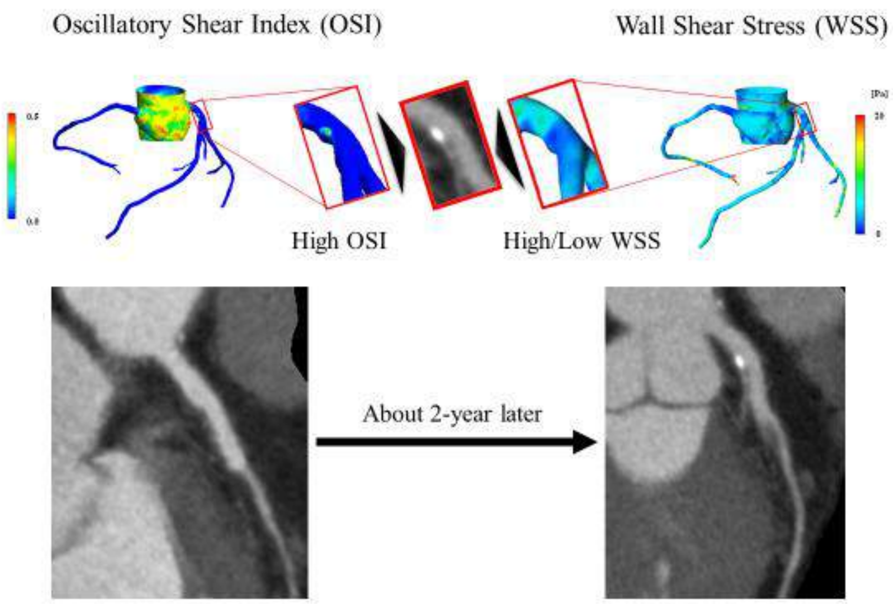
(4)　予測医療としてのプラーク解析に必要な血行力学パラメータを議論.

【結果】

壁ずり応力 WSS と単位心拍内の WSS のベクトル変化に相関する OSI(Oscillatory Shear Index)が有用な数値となり不安定化したプラークと High OSI には高い関連が認められた.

【展望】

冠動脈領域の血流解析により，プラークの予測診断を行い急性冠症候群 ACS の発症リスクを提示したり，バイパスによる冠血行再建においても虚血改善だけでなく遠隔期の patency を議論した上でのグラフトデザインを考えうる.



Fontan 循環血行動態の computer simulation から得られるもの

犬塚 亮[1]　先崎秀明[2]

1　東京大学小児科

2　北里大学新世紀医療開発センター先端医療領域開発部門小児循環器集中治療学

フォンタン循環は肺循環に対して駆出する心室を欠く特殊な循環であるが、心拍出量・血圧を維持するための適応的な心血管特性として、心室・動脈・静脈の stiffness の上昇、末梢血管抵抗の上昇などを認めることが知られている。また、フォンタン患者では、運動耐用能の低下および、心拍応答の異常や心血管反応の異常があることも知られている。これらの結果として起こる中心静脈圧の上昇は、遠隔期には肝硬変などの合併症につながるため、運動時も安静時もできるだけ中心静脈圧が低い状態でフォンタン循環を成立させることが理想的である。我々は電気回路を用いた簡便な心血管シミュレーターを用い、どのようにすれば拍出量や血圧を保ちつつ、中心静脈圧の低いフォンタン循環を成立させることができるかについて検討したので紹介する。

4D flow MRI から解析したフォンタンルートの吻合方向とエネルギー効率の関係について

中村太地 [1,2]　瀧聞浄宏 [2]　武井黄太 [2]　安河内 聰 [2]　岡村 達 [3]

1　金沢大学附属病院小児科

2　長野県立こども病院 循環器小児科

3　長野県立こども病院 心臓血管外科

【背景】フォンタン循環では機能的右室が存在しないため、効率的にフォンタンルートの血流が肺動脈に流れる手術デザインが求められる。一方、近年 4D flow MRI を用いて非侵襲的に様々な疾患の血流ベクトルを明瞭に提示することが可能となり臨床応用が期待されている。phase contrast 法で撮影した画像をもとに可視化した 4D flow MRI image を用いて 3 次元的に血流解析を行うことによって、より正確なフォンタン循環の評価をできる可能性がある。【目的】フォンタン術後患者のフォンタンルート周囲のエネルギー損失(EL)を算出し、吻合方向とフォンタンルートのエネルギー効率の関係について検討する。【方法】対象はフォンタン術後患者 29 例（男 15 例、女 14 例、平均年齢 13±5.6 歳）、MRI 装置 Multiva1.5T(Philips 社)、3D phase contrast 法により撮影された 画像をもとに作成した 4D flow MRI image を Cardio flow Station??(Cardio Flow Design 社)を用いて解析し吻合部前後の EL を算出した。心外導管と上大静脈および肺動脈ついて 3D MRI MPR により描出した中心線のなす角度を計測した。 1 心拍中の平均 EL(mEL)を上行大動脈の Q-flow から算出した一回心拍出量(SV)で補正した値と上大静脈-肺動脈、および心外導管-肺動脈の挿入角との相関関係について比較検討を行った。【結果】 1 心拍中の mEL は 1.6±1.5mW、mEL/SV は 25.9±21mJ/L であった。心外導管-右肺動脈挿入角の平均は 67±14 度で、mEL/SV との間に有意な相関関係を認めた（r＝0.47, p<0.05）。一方、上大静脈-肺動脈挿入角は、多くの症例で 90 度以上で（96±26 度）、mEL/SV と逆相関した(r=-0.45, p<0.05)。【結語】4D flow MRI を用いてフォンタンの心外導管と肺動脈吻合方向によるエネルギー効率の変化を定量的に評価できた。4D flow MRI による EL 解析で効率的な循環をもたらすフォンタンルート作成に応用できる可能性がある。

Ross 術後遠隔期における再手術適応評価における 4D flow MRI の役割

藤田周平 [1]　山岸正明 [1]　宮崎隆子 [1]　前田吉宣 [1]　谷 智史 [1]　本宮久之 [1]　夫悠 [1]
板谷慶一 [2]　夜久均 [2]
1　京都府立医科大学小児医療センター　小児心臓血管外科
2　京都府立医科大学　心臓血管外科・心臓血管血流解析学講座

【背景】Ross 術後遠隔期には新大動脈弁及び基部、右室流出路に対する再手術が問題となるが、その適応基準を考える上で両心室機能の包括的なアセスメントが必要である。また、肺動脈狭窄または閉鎖不全症を有する成人例において、症状や右室容積、右室機能を判断基準とした既存のガイドラインで手術適応となるより早くに flow energy loss が大きく正常値から逸脱することが 4D flow MRI での計測で明らかとなりつつある。Ross 術後成人期に再手術を検討された 3 症例を 4D flow MRI の結果を用いて両心室機能の点から議論したい。

【症例 1】31 歳男性。11 歳時に Ross-Konno 手術施行。23 歳時より大動脈弁閉鎖不全(AR)、左室拡大を指摘され、再手術を検討。4D flow MRI では左室拡張/収縮末期容積(EDVI/ESVI)は 216.7/126.7ml/m2 と増加、駆出率(EF) 41.5%。高度 AR(逆流率 44.4%)と基部拡大(径 45mm)および左室拡大に伴う機能性僧帽弁閉鎖不全を認めた。右室流出路(RVOT)は 2.5 m/s の加速および 20%の逆流を認めた。血流エネルギー損失(FEL)は左心系 13.8 mW（対健常比 7.8 倍）、右心系 8.4mW(対健常比 8.5 倍)であった。大動脈弁置換術、大動脈基部ラッピング、僧帽弁輪形成術、右室流出路再建術を行い、術後 4D flow MRI では左室 EDVI/ESVI が 106.0/54.7ml と reserve remodeling を得、FEL は左心系 3.4mw、右心系 3.3ｍW と著明に減少した。

【症例 2】26 歳女性。12 歳時に Ross 手術施行。術後肺動脈狭窄(PS)が進行し 17 歳時より息切れや下腿浮腫が出現。過多月経による高度貧血あり。PS は心臓カテーテル検査で圧較差 68mmHg となり上記症状も増悪傾向。4D flow MRI では右室 EDV/ESV 123.9/71.4ml/m2 と増加、EF 41.5%、RVOT で 3m/s 以上の加速あり。FEL は 8.0mW(対健常比 7.9 倍)と上昇。心臓カテーテル検査では左室収縮能は保たれるも拡張末期圧 16mmHg と上昇を認め、右室流出路再建に先行して心不全治療及び貧血治療を行う方針とした。

【症例 3】19 歳男性。5 歳時に Ross 手術施行。11 歳時より大動脈基部拡大を指摘されたが、AR なく経過。無症状であるが大動脈基部は最大短径 40mm に達し、右室流出路は扁平に変形し加速あり。4D flow MRI では、右室 EDVI/ESV 102.9/59.0ml/m2 と増加、駆出率 42.7%と低下し、右室流出路は 2.5m/s の加速及び 20%の逆流を認め、EL6.2mW(対健常比 6.3 倍)であった。今後カテーテル検査を行い、右室流出路への再手術時期を検討する予定である。

【結語】4D flow MRI は両心室の機能および血行動態の包括的なアセスメントが可能であり、二弁の問題を抱える Ross 後遠隔期の再手術適応決定に有益である。FEL と心室機能が不可逆的となる転換点や手術適応基準との関係を明らかにするため更なる症例の蓄積が必要である。

Blood Speckle image による血流解析

五代儀 新[1]　林 泰佑[2]

1　GE ヘルスケアジャパン

2　国立成育医療研究センター 小児科

超音波で用いられているカラーフローマッピングは音線に対して 1 次元のドプラシフト情報を 2 次元の断層画像上にプローブに近づく方向と遠ざかる方向を区別し、その速度に応じたカラーをその座標上にマッピングしているものである。既にこの手法がコマーシャルベースの超音波診断装置に搭載されて 40 年近くになるが、おおよそ原理原則はその当時のままで感度や表現方法は向上しているのもの情報は 1 次元情報のままである。この度 GE では超音波診断装置の Vivid E95 に従来の方法とは異なる血流の表現法である Blood speckle Image を搭載した。この手法では従来の 1 次元の情報とは異なり音線と直交する方向の 2 次元の流れの表現も可能となった。今回はこの Blood speckle Image に関して紹介したい。

先天性心疾患における拡張早期左室内圧較差の有用性の検討

高橋 健

順天堂大学小児科

先天性心疾患においては、異常心筋構造、右室からの影響、手術後の人工物の存在などが房室弁輪の動きに影響を与えるため、心エコーによる正確な拡張能評価は困難である。能動的拡張能のゴールドスタンダードとされる指標は tau index であるが、心臓カテーテル検査を必要とするため、一般的な臨床の場で行うことは現実的ではない。

拡張早期の左房から左室心尖部までの圧較差は Intra-ventricular pressure difference (IVPD)と呼ばれ、左室の拡張早期の血液の吸引力であり、能動的拡張能の本質を示し tau index とも相関する。我々は心臓超音波検査の Color-M mode 画像から IVPD を解析するプログラムを開発し、先天性心疾患での臨床応用を開始し、様々な知見を得たためここに報告する。

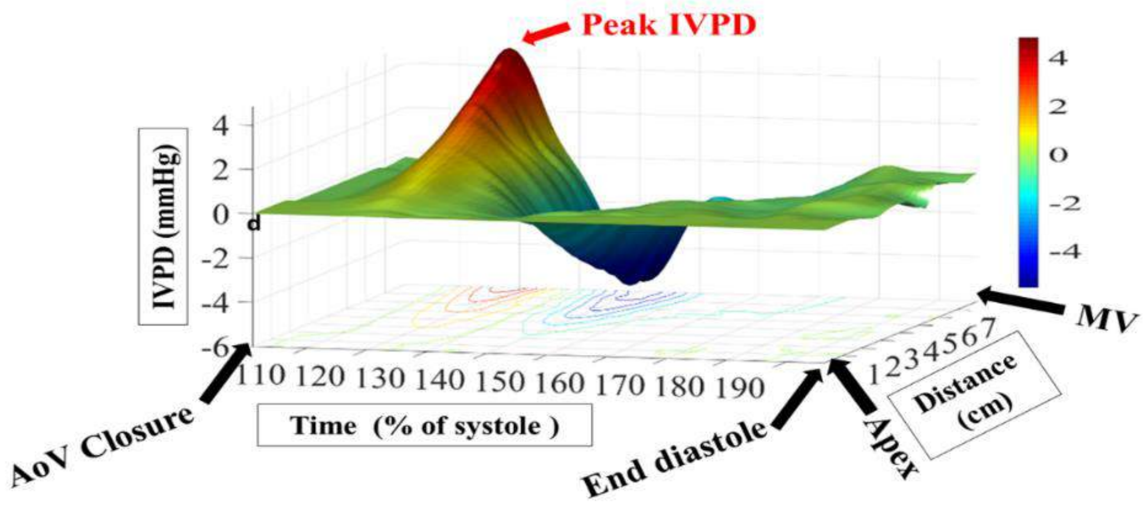
なお、小児の心臓は、新生児期から思春期まで、左室長が 3 倍近く成長するため、IVPD を左室長で除した Intra-ventricular pressure gradient (IVPG)も計測した。

正常小児においては、能動的な吸引力発生の首座であると考えられる、乳頭筋部から心尖部の IVPD（Mid to apical IVPD）が、乳児期から思春期にかけて、左室長の増大および e’と相関して増大し、Mid to apical IVPG も成長に伴い増加した。一方、主に左房圧を反映すると考えられている心基部 IVPG (Basal IVPG)は成長に伴い減少した。

左室機能が重要な生命予後決定因子であるファロー四徴症(TOF)においては、思春期から成人後の患者群において、Mid to apical IVPG が正常対照と比較して低下しており、鋭敏に能動的拡張能の低下を反映していた。その一方 Basal IVPG は患者群で増加し、左房圧の上昇を反映していると考えられ、これは TOF における心機能低下の新たな知見である。

左心室系の単心室である三尖弁閉鎖症(TA)の小児においては、フォンタン手術終了後に、従来の心機能指標は有意差を示さなかったにも関わらず、Mid to apical IVPG は TA において大きく低下し、やはり鋭敏な能動的拡張能の指標と考えられた。

以上より、IVPD および IVPG は、左室拡張能の発達の機序解明や、疾患群の心機能低下の早期発見の指標として有用である。研究及び臨床における今後の展開も含めて報告する。

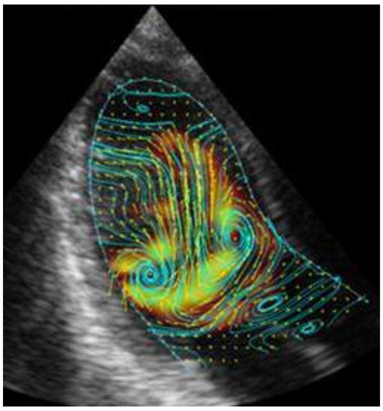


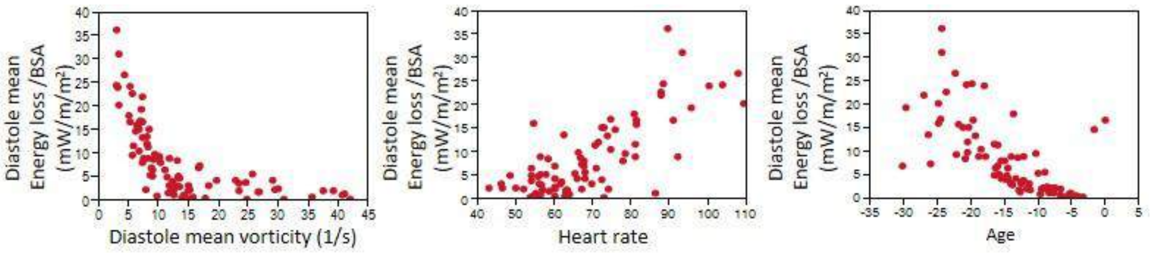
先天性心疾患における VFM による 拡張期心室内圧較差の検討

瀧聞浄宏　安河内 聰　武井黄太　斎川祐子

長野県立こども病院　循環器センター

対象は先天性心疾患 27 例（年齢：中央値 10 歳、3〜19 歳、男：13 例）、方法は、左室四腔断面もしくは長軸断面の color M mode と 2 次元 color マッピング画像を撮像。Color M mode の血流速度情報からオイラーの運動方程式もちいて IVPG(C-IVPG)を算出、また、2 次元カラーマッピング画像からは Navier–Stokes equations を用いて、心腔内相対圧分布を描出、IVPG(V-IVPG)を求めた。結果 C-IVPG と V-IVPG は有意かつ良好な相関関係にあり、V-IVPG は、C-IVPG の約 60%であった。V-IVPG と C-IVPGx0.6 のデータの Bland Altman 解析は、Bias -0.07 と小さく、95%CI は-0.68—0.54 であった。結語 V-IVPG は実際の IVPG よりやや小さくでるが、先天性心疾患においても簡易的に臨床応用できる可能性がある。





Vector Flow Mapping を用いた Energy Loss および渦度の成長おける変化

井福真友美[1]、高橋健[1]、磯武史[1]　矢﨑香奈[1]　重光幸栄[1]　山田真梨子[1]　小林真紀[1]
稀代雅彦[1]　清水俊明[1]　板谷慶一[2]

1　順天堂大学　小児科学教室
2　京都府立医科大学 心臓血管外科・心臓血管解析学講座

背景：Vector Flow Mapping によって評価される拡張期の Energy Loss（EL）は、拡張期の渦度および拡張早期の心室内圧較差など、他の血行力学的パラメータと密接に関連する可能性があり、心機能の新しい指標である。これらのパラメータは拡張能の重要な要素と考えられるが、成長による変化の報告は少ない。
目的：正常小児および青年の成長を伴う左室血行動態パラメータの変化を明らかにすること。
方法：健康な 45 人の小児および 8 人の青年の心エコー検査を用いて、VFM 解析を行った。心尖部 3 chamber view で左室内の速度ベクトルを求め、体表面積（BSA）で除した拡張期の平均 EL および平均渦度を計算した。拡張早期の心室内圧較差も、カラーM モードを用いて測定した。
結果：平均年齢は 9.5±4.0 歳であった。平均 EL、渦度、および mid - apical IVPD は、それぞれ 10.4 ± 8.5（mW/m/m2 BSA）、31.1 ± 11.7（1/s）および 1.0 ± 0.33（mmHg）であった。平均 EL および平均渦度は、年齢の増加とともに減少した（$r = -0.534$、$p < 0.001$ および $r = -0.807$、$p < 0.001$）。Mid - apical IVPD は年齢とともに増加した（$r = 0.347$、$p < 0.001$）。多変量解析では、年齢、HR および平均渦度が平均 EL の独立規定因子であった。（EL = -0.905 *年齢+ 0.151 * HR + 0.277 *渦度 - 0.445、adjusted R^2 = 0.828、$p < 0.001$）
結論： EL は年齢、HR、渦度と明らかに相関した。心疾患群のデータも加えて有用性について検討する予定である。

ドキソルビシン投与犬における
心エコー指標の変化についての検討

佐藤琴美　松浦功泰　白石 健士郎　合屋 征二郎　田中 綾

東京農工大学　獣医外科学研究室

【はじめに】抗がん剤であるドキソルビシンの副作用の一つに心筋障害が知られている。抗癌剤による心筋障害を早期に検出することは、抗癌剤誘発性心筋症の発症予防に重要であると考えられる。本研究はドキソルビシンによる心機能低下を、心エコーを用いてより早期に検出することを目的に、特に拡張能の変化に着目して検討した。
【方法】健常ビーグル犬 5 頭にドキソルビシンを 30mg/m2 を 3 週間ごとに 6 回投与（積算投与量 180mg/m2）し、各週で経時的に心電図、血圧、心エコー（従来法、TDI、2DTT、VFM、IVPD）を計測した。IVPD は color M-mode 画像より求めた。VFM は DAS-RS-1 により解析を行った。
【結果】拡張能を表す指標として知られる拡張早期心筋ストレインレートは初回投与と比較し 4 週目で有意に低下し、その後 7 週目と、10 週目以降で有意に低下を示した。IVPD も 17、18 週目で有意な Total IVPD、Total IVPG の低下を示した。その他、15 週目のみにおいて EF の有意な減少、LVIDs の有意な上昇を示した。
【考察】ドキソルビシンによる心毒性は収縮能に先行して拡張能の低下が起こると考えられるものの、その検出には IVPD や VFM といった血流を評価するよりも 2DTT のような壁運動の評価を行う方が早期に検出できるという結果が得られた。ドキソルビシンの毒性として蓄積すると拡張型心筋症様の病態になることが知られているが、今回の実験のように臨床で用いる用量で投与した場合、収縮力の低下は認められるものの、心拡大は軽度に見られるか、または見られないという結果になった。以前の我々の報告において高頻拍誘発性拡張型心筋症モデル犬では重度な心拡大を呈し、この拡大した心臓では心拍出量を維持するために血流が左心室内で大きな渦を描くような血流動態の変化を示した。しかし、今回の病態では心拡大は乏しく、血流動態の変化は早期に検出されなかった。血流動態の変化には心内腔の変化が大きく寄与する可能性が示唆された。

MRI でプロトンを追跡する（４D Flow による MRFD）

竹原康雄
名古屋大学大学院医学系研究科 新規低侵襲画像診断法基盤開発研究寄附講座

MRI では通常の撮像シークエンスに双極傾斜磁場を組み込むことによって、動きのあるプロトン群のラーモア歳差運動に位相ずれを誘発し、その位相ずれの多寡を計測することにより、voxel 内のプロトンの移動方向と速度を計算することが可能である。すなわち‘プロトンを追跡する’ことができる。この手法をもって、大きな動きをする水分子の追跡に適用すると、MR angiography（ MRA ） である位相コントラスト MRA（ Phase contrast MRA ）となる。今までこの手法は一次元×多時相（心周期中）、二次元或は三次元×1 時相或は二次元×多時相で行われることが多かったが、10 年ほどの間に、三次元×多時相でデータ収集の可能な 4D flow （ time resolved 3Dimensional Phase contrast MR angiography ）が開発され、それ以後、関心領域内のすべてのプロトンの追跡が理論上可能となった。4D Flow では適切な velocity encoding （ VENC ）を用いることにより、血管内の血液の流れを描出することができ、乱流や渦流、層流を伴う血流の hemodynamics を心時相に沿った時間軸で流線解析や粒子追跡等様々な手法で解析することが可能である。更に重要なことに、4D Flow を用いると、1 心周期中に血管壁が経験する壁剪断応力を余すところなく計測することが可能である。血管内皮が経験する壁剪断応力は動脈硬化の形成に深く関わっていることが知られている。血管内皮は血流を含む血管内の環境を感じる receptor となっており、壁剪断応力も内皮が感ずることのできる情報の一つである。壁剪断応力情報に反応して血管内皮は血管壁に対して様々な signal を送っている。現在までの生理生化学的研究において、血管壁が動脈硬化を起こさず健康であるためには一定以上（一説には 1.5Pa 以上）の剪断応力が必要であることが知られている。ということは壁剪断応力を計測することは将来で動脈壁に動脈硬化性病変が発生するかどうかを予知する biomarker でありうるかもしれないということである。これまで我々は心周期で変化する壁剪断応力を 3 次元表示するアプリケーションを用いて、様々な状態における血管壁の剪断応力の解析を行ってきた。4D Flow を用いた我々の検討では、ヒトの動脈瘤内の血流は通常の層流ではなく渦流や乱流が支配しており、これに伴い動脈瘤の壁剪断応力は健常部に比較して有意に低く、現時点での血管壁の健全性の維持が不十分になっていることと、将来のさらなる壁脆弱性を示唆する所見となっている。動脈瘤はある一定の大きさに達すると、破裂のリスクは増大する。我々は、一旦動脈瘤の拡大が始まると、内部の乱流、渦流傾向に拍車がかかり、さらなる動脈瘤増大と、将来の破裂のリスク増大をきたす vicious-circle に陥るのではないかと推測している。プロトン（主として水分子）を 非破壊的に in-vivo で追跡できるということは他の modality では示現不可能な特徴であり、磁気共鳴画像の有するユニークな利点である。こうした拡散や速度、剪断応力といった物理量が生理学的情報と結びついているということは以前は想像もできなかったことであり、磁気共鳴医学においても、これまで最も利用が遅れてきた分野であろうかと思われる。本講演では、こうした技術を軸に、4D Flow による血行動態解析の臨床研究の現状についても言及したい。

数値流体力学解析による急性大動脈解離発症機序の考察

沼田 智　板谷慶一　山崎祥子　夜久 均

京都府立医科大学 心臓血管外科

（背景）

急性大動脈解離発症のメカニズムには不明な点が多い。高血圧や結合組織疾患などの背景因子は知られているが、直接どのように関与するかは明らかでない。大動脈の最大短径は手術適応の指標だが、最大短径が小さくても解離は発症する。何時、どの部位に、どんな解離が起こるかを評価するのは非常に困難である。我々は血流速（Flow velocity）,せん断応力（Wall shear stress = WSS）,　また WSS の「ゆらぎ」を示す Oscillatory shear index = OSI 等が関与しているのではないかと考えた。WSS は適切な値が維持されない場合には内皮細胞機能障害を来たす。また、WSS が高ければ内膜と中膜を「ずらす」方向に力が加わることになる。OSI の高い部位では内膜、中膜障害との関連が注目される。これらの分布を検討する事で大動脈解離発生部位が予測できないかと考えた。

（方法）

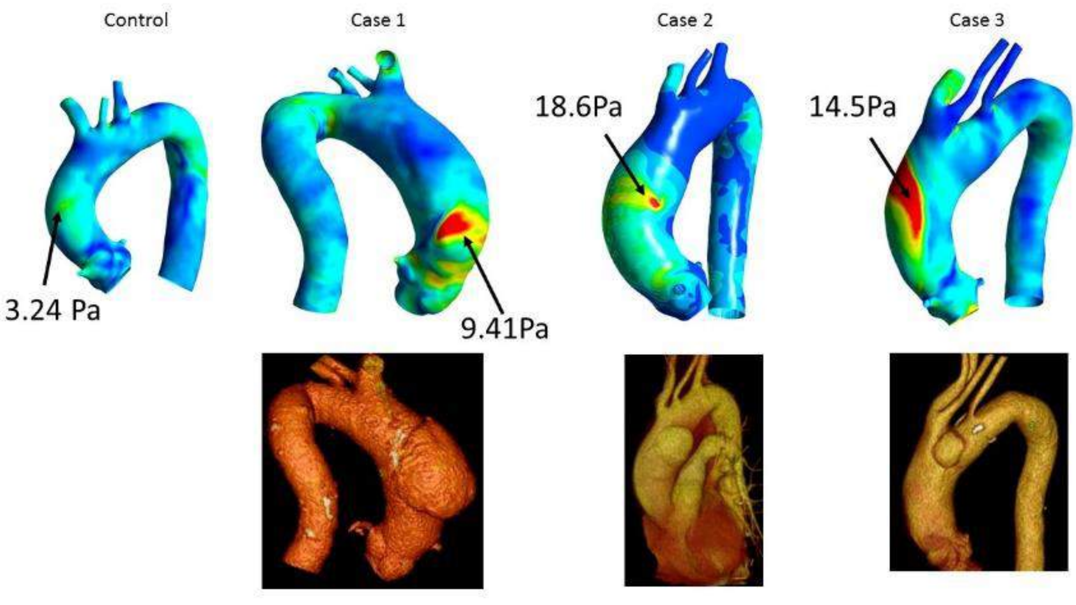
三例（Case A, B, C）の急性大動脈解離を発症した症例の造影 CT データを用いて、解離発症前の大動脈基部―上行―弓部の形状を作成した。生理学的な拍動流を数値流体解析で再現し、流体力学解析ソフトウェアを使用した血流解析を行い、Flow velocity, WSS, OSI を計算し三次元動画を作成した。またコントロールとして正常大動脈径症例を検討した。

（結果）

収縮期において、コントロール例では上行大動脈の血流は層状流であるのに対し、解離を発症した三例ではらせん状の血流を認めた。その血流速はコントロール症例では 0.56m/s,で、解離を発症した症例では A: 0.68m/s, B: 0.77m/s, C: 1.4m/s と速い傾向にあった。収縮期の最大 WSS はコントロール例で 3.24Pa(パスカル)。一方、解離例では島状に WSS の上昇する部位が存在し、同部位での WSS は A: 9.41Pa, B: 18.6Pa, C: 14.5Pa であった。A と B では WSS の高い部位はエントリー部と一致した。またエントリー部位周囲で OSI の上昇を認めた。

（結語）

解離を発症する大動脈の形状においては、上行大動脈の血流がらせん状に変化し、速度が上昇しており、その結果 WSS の分布が特殊になり、島状に上昇する部位が出現する。この部位は大動脈解離のエントリー部位と近似しており、大動脈解離の発生の可能性を示唆する。症例を蓄積する事で、流体力学的解析により急性大動脈解離の発症のリスクを正確に評価し得ると考える。



ゼロ応力状態推定法を用いた大動脈流体構造連成解析

佐々木 崇史

早稲田大学 流体構造連成系応用力学研究室

【背景・目的】

血管疾患の診断や予測に近年は血流解析を始めとした数値解析手法が注目されている。血管は通常弾性体であり、血流の流体力によって変形し、その変形がさらに血流に影響を及ぼす流体構造連成問題である。流体解析に加えて構造解析を行うため、問題の複雑性が増す一方、解析結果は生理学上より妥当な結果を得ることができる。本研究ではこれまでに開発してきたゼロ応力状態推定法を用いて大動脈構造解析を可能とし、流体解析と組み合わせることで、血流と血管壁が相互に作用する流体構造連成解析を実現する。

【方法】

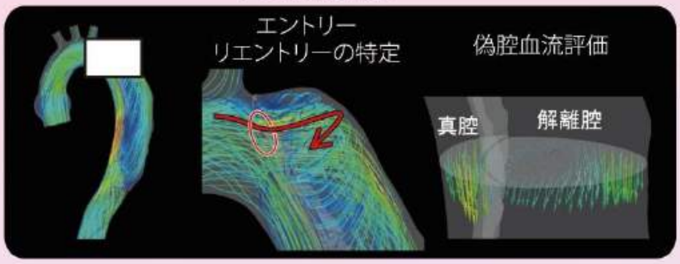
1. 大動脈を対象とし、医用画像から血管形状を抽出する
2. アイソジオメトリック離散化を行う
3. 血管を切断するとどう変形するか、という先行研究の実験結果を元に、大動脈ゼロ応力状態を推定する
4. 構造解析とメッシュの変形、流体解析を組み合わせた流体構造連成解析を行う
5. 壁面せん断応力と壁応力をみることで考察を行う

iTFlow MRI血流解析ソフトウェア

ソフトウェア

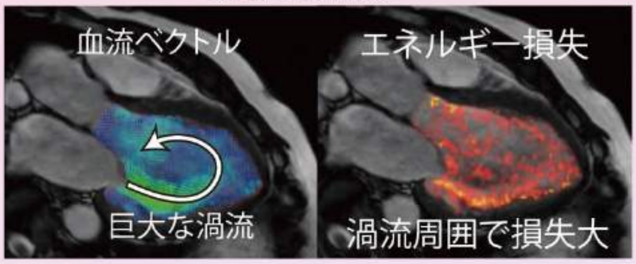
複雑な心血管の血流を可視化できます

大動脈解離



心血管疾患の血流エネルギー効率を計測できます

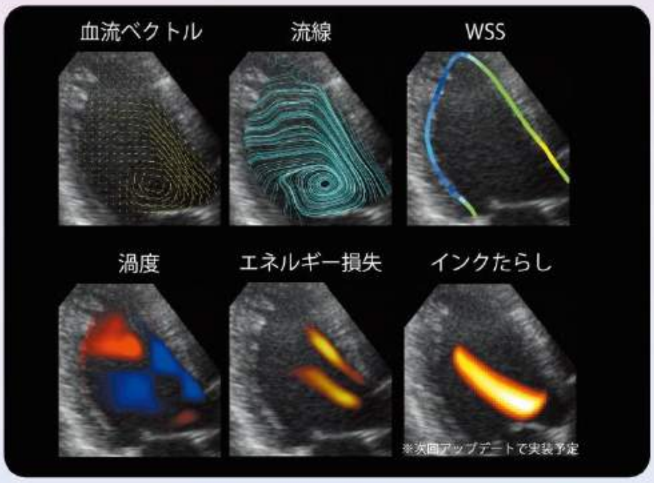
拡張型心筋症



Echo VFM IVPG

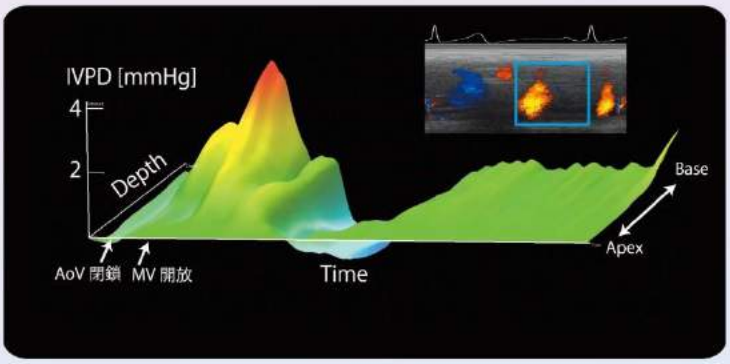
ソフトウェア

カラードプラから血流を可視化・定量化できます



ソフトウェア動作スペック	OS: Windows 10 (64bit)
推奨スペック	メモリ：8GB 以上
	CPU: 2.5GHz 以上
	ディスプレイ：FullHD 以上

Color M Modeから心内圧較差を計算できます

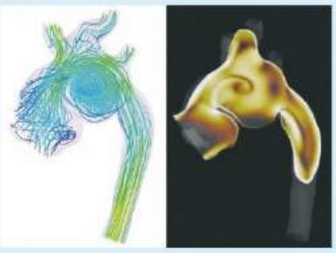


※現在 GE 製装置で EchoPac からアウトプットが可能です

CFD スパコンを用いた血流解析サービス

クラウドサービス

再建大動脈のエネルギー効率がわかります

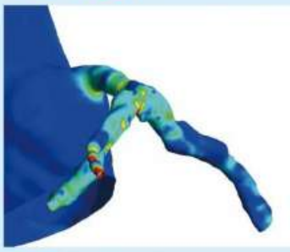


Norwood 手術後のエネルギー損失

仮想手術で術後血流の予測ができます

冠動脈バイパス血流量

血管壁へのストレスがわかります



冠動脈 Wall Shear Stress

Cardio Flow Design 詳しくは http://cfd.life/ を御覧ください。 お問い合わせ info@cfd.life