

1 日目

世話人会 12:30-13:00

開会の辞 13:00-13:05 日立製作所中央研究所 田中智彦

セッションI 左室心内圧較差と拡張機能の新たな知見 13:05-13:55

座長 順天堂大学 小児科 高橋 健

淀川キリスト教病院 麻酔科 秋山浩一

13:05-13:30 細野 優 順天堂大学 小児科

小児がん生存者における年代別拡張早期左室内圧較差の検討

13:30-13:55 八色 暁 東京農工大学 獣医外科学研究室

ラット心臓における IVPG を用いた拡張能の評価について

13:55-14:20 岩島 寛 中東遠総合医療センター 小児循環器科

「新生児哺乳中における心機能について (Active Feeding Echo)」

Active Feeding Echocardiography-New stress echocardiography for infant

休憩 14:20-14:35

セッションII 血管疾患・動脈硬化疾患への新たなアプローチ 14:20-15:50

座長 名古屋工業大学 電気・機械工学科 中村匡徳

日本医科大学 放射線科 関根鉄朗

14:20-14:45 馬場康貴 広島大学 放射線診断科

機械学習を用いた EVAR (Endovascular Aortic Repair) 術後の endoleak 予測

14:45-15:10 伊藤順平 早稲田大学 創造学部 総合機械工学科

胸部大動脈瘤の形成及び進展と力学的因子の関連性についての基礎検討

15:10-15:35 清水一力 株式会社日立製作所 研究開発グループ

VFM を用いた血管壁の Wall Shear Stress 測定

休憩 15:35-15:50

特別企画『血流テクノロジーと臨床応用の Update』 15:50 – 18:00

座長 日立製作所 中央研究所 田中智彦

京都府立医科大学 心臓血管外科・心臓血管血流解析学 板谷慶一

講演 1. 15:50-16:20 上嶋徳久 心臓血管研究所付属病院

血流研究の進捗に関する Overview と今後の期待

講演 2. 16:20-16:50 長谷川英之 富山大学 工学部 知能情報工学

血流計測テクノロジーの開発と基礎的検討

16:50-17:20 総合討論

コメンテータ① 東京医科大学八王子医療センター 循環器内科 山田 聡

コメンテータ② 淀川キリスト教病院 麻酔科 秋山浩一

講演 3. 17:20-17:50 大田英揮 東北大学大学院医学系研究科 先進 MRI 共同研究講座

大血管領域における 4D flow MRI の臨床応用～当院の経験から～

17:50-18:10 総合討論

コメンテータ① Cardio Flow Design Inc. 宮崎翔平

コメンテータ② 株式会社日立製作所 研究開発グループ 横沢 俊

2日目

セッションIII 超音波血流解析を用いた心不全の機序への新たな挑戦 9:30-10:45

座長 心臓血管研究所 循環器内科 上嶋 徳久

東京農工大学 農学研究院動物生命科学部門 田中 綾

9:30- 9:55 葉山裕真 国立国際医療研究センター病院

肺高血圧症における肺動脈反射波圧の臨床的意義

9:55-10:20 岩下憲行 慶應義塾大学医学部小児科

4D flow を用いた Fallot 四徴症心内修復術後 (TOF p.o.) の右室流出路血流の測定

10:20-10:45 平崎裕二 済生会宇都宮病院麻酔科・東京慈恵会医科大学解剖学講座

爬虫類の心臓はなぜ複雑な構造を持つのか？

休憩 10:45-11:00

セッションIV 心血管疾患の診断と治療における新たな計測系 11:00-12:20

座長 早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 滝沢研二

名古屋市立大学 循環器内科 瀬尾由広

11:00-11:25 上村拓生 千葉大学 流体数理工学研究室

体外循環における血栓および血液状態の電気インピーダンス計測

11:25-11:50 法里優 京都府立医科大学 心臓血管外科

大動脈弁狭窄症における流体力学的血流解析に基づく心負荷の検討

11:50-12:15 長岡 亮 富山大学 大学院理工学研究部 知能情報工学専攻

超高時間分解能ベクトルフローマッピング法による心臓内血流ダイナミクスと
2次元速度情報の評価

12:15-12:20 閉会の辞

京都府立医科大学 心臓血管外科・心臓血管血流解析学 板谷慶一

小児がん生存者における年代別拡張早期左室内圧較差の検討

細野優¹⁾、高橋健¹⁾、重光幸恵¹⁾、井福真由美¹⁾、秋本智史¹⁾、秋谷梓¹⁾、佐藤恵也¹⁾、
加護浩之¹⁾、板谷慶一²⁾、清水俊明¹⁾

1) 順天堂大学 小児科学講座

2) 京都府立医科大学 大学院医学研究科心臓血管外科・心臓血管血流解析学講座

【背景】鋭敏な拡張能指標である左室内拡張早期圧較差(Intra ventricular pressure gradient: IVPG)が、化学療法後の小児がん生存者において鋭敏に低下していることを、我々は26歳以下40人の小数例の研究で過去に報告した。

【目的】小児がん生存者におけるIVPGの変化を、より幅広い年齢層でより多くの患者で検討すること。

【方法】5歳から40歳の小児がん生存者75例と年齢を近似した正常対照群74例を3群に分類し(C1、N1:5-9歳、C2、N2:10-15歳、C3、N3:16-40歳)、IVPGを計測した。

【結果】C3群間はN3群に比較し、Total IVPG(0.36 ± 0.09 mmHg/cm vs. 0.29 ± 0.10 mmHg/cm, $p = 0.001$)とMid to apical IVPG(0.20 ± 0.06 mmHg vs. 0.14 ± 0.06 mmHg, $p < 0.001$)が有意に低下していた。

【結語】IVPGは小児がん生存者の年長者群で低下している。更に多くの患者を解析し、IVPGの他、ストレインなどの心機能指標の変化の特徴を明らかにする。

ラット心臓における IVPG を用いた拡張能の評価について

八色暁¹⁾、松浦泰功¹⁾、吉田智彦¹⁾、Pitipat Kitpipatkun¹⁾、Danfu Ma¹⁾、島田香寿美¹⁾、高橋健²⁾、田中綾¹⁾

- 1) 東京農工大学 獣医外科学研究室
- 2) 順天堂大学 小児科学教室

【背景】心室内圧較差 (IVPG) は、心臓の拡張能を反映するエコー指標の 1 つであり、大きくは Basal IVPG、Mid IVPG、Apical IVPG の 3 つから構成される。過去の研究において、ヒトではうっ血が起こると Basal IVPG が上昇し、拡張不全の心臓では Mid IVPG が低下することが明らかになっており、イヌでも前負荷が上昇すると Basal IVPG が上昇し、拡張能が上昇すると Mid IVPG が上昇することが明らかになっている。

しかしながら、他の動物では上記のような関連性は明らかになっておらず、IVPG の発生機序には依然として不明な点が多い。

【目的】ラットを用いて心負荷試験を実施し、各 IVPG が心臓のどのような変化に影響され、心壁の動きとどのように関連しているのかを解明、比較し、ヒトないしは他動物における IVPG の発生機序の解明に役立てる。

【方法】5 ヶ月齢のラット 6 頭にイソフルラン麻酔下で頸静脈にカテーテルを設置し、以下の条件で心臓超音波による一般項目、2DTT、IVPG の計測を行った。

- ① 負荷なし
- ② 強心：ミルリノン静脈内投与 (10 µg/kg/min)
- ③ 容量負荷：HES 製剤静脈内投与 (総量=全血液量の 60%，速度=全血液量の 5%/min)

当日に結果と考察を報告する予定である。

「新生児哺乳中における心機能について (Active Feeding Echo)」

Active Feeding Echocardiography-New stress echocardiography for infant

岩島覚¹⁾、早野聡¹⁾、關圭吾¹⁾、高橋健²⁾

1) 中東遠総合医療センター 小児循環器科

2) 順天堂大学 医学部小児科学教室

[はじめに]哺乳不全は新生児心不全症状の一つである。[対象、方法]心疾患を認めない新生児 33 例。哺乳中に心エコーにて各種心機能指標および Color M-mode 法より Euler の法則を用いた Intra ventricular pressure difference (IVPD, mmHg), Intraventricular pressure gradient (IVPG, mmHg/cm) について Active→End of Feeding の変化について検討した。結果は Median で示し $p < 0.05^*$ を有意差ありとした。

[結果] 対象の出生時体重 median 2864g. 検査日齢 2 日。Active→End of Feeding: Heart Rate: 152→131bpm. Total IVPD: 1.43→1.00*, Total IVPG 0.65→0.46* と Feeding 開始前後で有意差を認めた。その他の指標では Mitral E wave (cm/sec); 59.0→52.5* と有意差を認めたが、LVEF (% by Simpson 法): 65.3→68.0 %, LV E/e': 7.65→ 8.25 については有意差を認めなかった。

[まとめ] 新生児期の Feeding 時には Sucking Force の有意な増大を認めた。Active Feeding Echo は有用である Stress Echo になる可能性が示唆された。

機械学習を用いた EVAR (Endovascular Aortic Repair) 術後の endoleak 予測

馬場康貴¹⁾、舩田隆則²⁾、佐藤友保²⁾

1) 広島大学 放射線診断科

2) 土谷総合病院

腹部大動脈における EVAR 術後一年以内の endoleak を機械学習にて予測できるかを検証した。症例は土谷総合病院で 2014/12~2019/9 に腹部動脈瘤と診断され EVAR が施行された 111 例 (男性 94 例、女性 17 例。年齢中央値 80 才)。特徴量は臨床情報と形態情報 (造影 CT による測定) であり (計 50 個)、分類器は勾配ブースティング決定木 (Gradient Boosting Decision Tree) のアルゴリズムを実装したオープンソースのライブラリである XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) と CATBoost (Category Boosting) を用いた。前処置や parameter 調整を行った後、症例分割を train (70%) と test (30%) に分割し、過学習起こす前に学習を終了させた (early stopping)。結果は test sample にて XGBoost は accuracy 73.5 %, ROC (AUC) 0.54, CATBoost は accuracy 76.4 %, ROC (AUC) 0.707 であった。Feature importance にて XGBoost は“左総腸骨動脈内径”、“右外腸骨動脈内径”、“瘤の前後角度”を挙げ、CATBoost は“下腸間膜動脈径”、“右外腸骨内径”、“瘤の前後角度”を挙げた。EVAR 術後 endoleak 予測にて CATBoost が XGBoost より優れており両者共に feature importance は“右外腸骨内径”、“瘤の前後角度”を挙げた。

胸部大動脈瘤の形成及び進展と力学的因子の関連性についての基礎検討

伊藤順平、島村駿輔、玉井佑、井上岳、滝沢研二

早稲田大学 創造学部総合機械工学科

概要：大動脈瘤の形成及び進展の血行力学的因子に関して、壁面せん断応力の小ささが原因になるという先行研究がある。これは生理学的にはアポトーシスによる血管壁変性と関係しており力学的因子ではない。このとき壁面せん断応力は、平均的に見れば血管の膨張に伴い低下する。仮に壁面せん断応力の小ささのみが瘤の形成や進展に関与しているとすると、どんな血管も拡大することになる。そこで、本研究では、正常時に安定状態を保てるように大動脈壁の張力という力学的因子に着目し、安定な状態と大動脈瘤の形成の両者を表現できる単一モデルを提案する。将来的には、流体解析および構造解析を繰り返し大動脈瘤の発生及び進展を早期に予想することを目指している。

VFM を用いた血管壁の Wall Shear Stress 測定

清水一力¹⁾、田中智彦¹⁾、岡田孝²⁾

1) 株式会社日立製作所 研究開発グループ

2) 株式会社日立製作所 ヘルスケアビジネスユニット

血管壁に作用するせん断応力(WSS : Wall Shear Stress)は内皮細胞に影響し、0.4 Pa 以下では動脈硬化が進むといわれており[1], WSS 測定は動脈硬化のリスク評価に役立つと期待されている。本研究では超音波診断装置で血流ベクトル分布を得る VFM (Vector Flow Mapping)技術を用いて簡易に WSS を測定する手法を開発した。開発手法では、壁近傍流れを平行流仮定の下でモデル化することで、血流速度から壁面上の速度勾配を求める計算式を導出し、さらに血液粘度値を乗じることで WSS を得る。頸動脈を模擬したファントムで in vitro 検証を行った結果、開発手法で測定した壁面速度勾配と、Particle Image Velocimetry (PIV)で測定した壁面速度勾配は高い相関を示すことを確認し、開発手法の有用性を示した。([1] Adel M. Malek et al., JAMA, (1999))

血流研究の進捗に関する Overview と今後の期待

上嶋徳久

心臓血管研究所付属病院

エコー、MRI 等の可視化手法の進化により、簡便に血流解析が出来るようになった。研究の歴史の黎明期には可視化そのものが主要な命題であったが、成熟するにつれ臨床的な意義が問われるようになってきた。ファンシーな絵だけではもう駄目である。今一度、血流解析の意義について考察してみたい。

左室を例にとってみると、血流を解析することの最大の目的は左室機能を評価することにある。血流の変化は左室壁の動きに比べると鋭敏に変化するため、より感度の高いマーカーとなる可能性がある。また左室壁の機能では表現しえない心機能指標が得られるかどうか目指すべきポイントである。

臨床診断における検査の良し悪しは、検査前確率を検査後にどれくらい引き上げられるかで決まる。医師は、エコーや MRI 検査の前に必ず問診・診察や単純レントゲン写真、心電図、血液生化学的検査を行い、得られた情報から診断の見当をつけている。エコーや MRI 検査でどれくらい付加的な情報が与えられるかが、臨床上活用されるか否かを左右する。血流解析に限って見てみると、大動脈疾患の血流解析などは他の検査では代用できないために優位性が際立っているが、心不全ではどうだろうか？身体所見やレントゲン写真を上回る情報が得られるだろうか？血流解析がどれくらい有用であるのか臨床診断のシナリオに沿った検証が必要である。

血流計測テクノロジーの開発と基礎的検討

長谷川英之

富山大学

超音波による血流計測は臨床において広く活用されており、代表的な手法としてドプラ法が挙げられるが、超音波ビーム方向の速度成分しか検出できないという制限がある。そのような制限を克服するための様々な取り組みが行われており、複数の異なる方向から計測したビーム方向速度を合成して血流速度ベクトルを推定するベクトルドプラ法などが提案されている。また、血流描出能の向上のためにはクラッタフィルタの開発も重要であり、近年では特異値分解を利用したフィルタ等が提案されている。本講演ではそれら血流計測法について概説するとともに、近年血流計測に適用されている超高フレームレート超音波イメージング法についても述べる。

大血管領域における 4D flow MRI の臨床応用～当院の経験から～

大田英揮

東北大学 大学院医学系研究科 先進 MRI 共同研究講座

4D flow MRI は、生体内の血流動態を実測に基づいて 3 次元的に表現できる、ユニークなツールである。当院では、主に心臓・大血管領域において、4D flow MRI 撮像している。本講演では、主に当院での経験例をもとに、肺動脈疾患（肺高血圧症）、大動脈疾患（大動脈弁狭窄症）および成人先天性心疾患の領域で、臨床応用について紹介する。1) 肺高血圧症：肺高血圧症における MRI は、一般的に精査目的に用いられ、包括的な画像評価が可能である。4D flow MRI では中枢側における 3 次元的な肺動脈血流評価が可能であり、肺高血圧症では肺動脈幹における渦流形成が特徴的である。一部の肺高血圧症では手術や血管内治療による病態改善が期待できる。4D flow MRI においても、その治療効果を表現することが可能である。2) 大動脈弁狭窄症では、大血管へ駆出される血流の低下、および上行大動脈の加速血流、らせん流形成が認められる。4D flow MRI では、手術介入による大動脈血流改善、流線の形態の変化、頭部・体幹部血流分布の変化などを評価することが可能である。3) 成人先天性疾患においては、血流動態における問題点の検出・評価と、それに基づく治療戦略の例を提示する。

肺高血圧症における肺動脈反射波圧の臨床的意義

葉山裕真^{1)、3)}、上嶋徳久²⁾、守山英則³⁾、板橋裕史³⁾、片岡雅晴³⁾、村田光繁⁴⁾

- 1) 国立国際医療研究センター病院
- 2) 心臓血管研究所付属病院
- 3) 慶應義塾大学付属病院
- 4) 東海大学付属八王子病院

大血管の圧波形は、心臓からの拍出により形成される前進波と末梢から反射して戻ってくる反射波の合成波とみなすことができ、wave intensity の概念を応用することで両者を分離することが理論上可能である。肺循環においても同様に考えられ、Junjing Su らのグループは、カテーテルによる肺動脈内の圧と流速の実測から反射波を推定し、肺高血圧の原因疾患により特徴が異なることを示した。我々はエコードプラ法により計測された三尖弁逆流波形と右室流出路波形から右室圧曲線と流量曲線を推定し、肺動脈血管床からの反射波圧を推定した。これを慢性肺血栓塞栓症に対して検証したので報告する。

4D flow を用いた Fallot 四徴症心内修復術後 (TOF p.o.) の右室流出路血流の測定

岩下憲行¹⁾、前田潤²⁾、山岸敬幸¹⁾、奥田茂男³⁾

- 1) 慶應義塾大学 医学部小児科
- 2) 東京都立小児総合医療センター 循環器科
- 3) 慶應義塾大学 医学部放射線診断科

TOF p.o.遠隔期、再手術適応を決定するための右心室機能および肺動脈弁逆流の評価には、心臓 MRI が必須である。従来、血流計測には 2D Phase contrast 法が用いられているが、右室流出路血流量が左室流出路血流量と乖離する症例がしばしば問題となる。TOF p.o.の右室流出路では残存狭窄・逆流による乱流が生じやすく、その影響が考えられるが、この問題を解決するための報告は少ない。今回私たちは、撮像後に任意の断面で流量および逆流率を計算でき、血流を可視化することが可能な 4D flow を用いて、TOF p.o.の血流量の誤差が生じる原因を明らかにした。この結果をもとに、TOF p.o.症例の撮像時に、右室流出路の乱流による誤差を受けにくく、より正確に計測できる断面設定に関して議論したい。

爬虫類の心臓はなぜ複雑な構造を持つのか？

平崎裕二

済生会宇都宮病院 麻酔科・東京慈恵会医科大学解剖学講座

背景

爬虫類は2心房1心室からなる心臓と、2本の大動脈と1本の肺動脈を持つ。さらに、心室が動脈心腔 (CA)、静脈心腔 (CV)、肺心腔 (CP) と呼ばれる3つの区画に分けられることなどから、脊椎動物の心臓の中で最も複雑な形態を有している。この複雑な心臓の形態が持つ機能的な意義については未解明である。

対象と方法

タイマイ (*Eretmochelys imbricata*) 心臓標本 (n=3) の肉眼解剖とマルチスライス X線 CT 撮影を行い、心室内部の立体構造、心房—心室間の連結様式、大血管起始部の形状について検討した。生体内の血流を評価するため、生後1年未満のアオウミガメ (*Chelonia mydas*, n=8) を対象に、無鎮静・経腹甲的に心臓エコー画像を撮像した。

結果

左心房は左房室弁を介して CA と接続し、右心房は右房室弁を介して CV と接続していた。CA と CV は厚い心筋壁で囲まれた一つの腔 (左心腔) を形成していた。右心房は左心房よりも、CV は CA よりも大きかった。頭部と前肢を灌流する右大動脈は左心腔から、腹部内臓と後肢を灌流する左大動脈と肺動脈は CP から起始していた。CV と CP との境界には狭い通路が存在した。CP の壁は左心腔に比べて薄く、体血圧と肺血圧に差があることが示唆された。高周波数ビームを用いた心エコーでは、左心腔の血液が左大動脈と右大動脈へ、CP の血液が右大動脈と肺動脈に向かう様子が描出できた。

考察

ウミガメの心臓形態は共通房室管を形成した段階の哺乳類の心臓と類似しており、左心腔 (CA+CV) と CP は、それぞれ哺乳類における左心室と右心室に相当する。哺乳類と爬虫類の心臓では共通の発生機構が用いられている可能性が示唆された。静脈血が左心腔に流入する構造は、静脈血中の酸素を体循環で再利用して長時間の潜水を行うのに有利であると考えられた。肺で酸素化された血液は前半身に優先的に送られ、再び肺に送られないように大血管が配置されていると考えられた。爬虫類が複雑な心臓を持つのは、状況に応じて静脈血中の酸素を体循環で再利用するためだと考えられる。ウミガメ以外の爬虫類においても、酸素の再利用という観点から心室内構造物の機能的意義について再評価を行う必要がある。

体外循環における血栓および血液状態の電気インピーダンス計測

上村拓生¹⁾、檜山昇太郎¹⁾、Sifuna Martin Wekesa¹⁾、松浦功泰²⁾、吉田智彦²⁾、上原拓也³⁾、田中綾²⁾、Sapkota Achyut⁴⁾、武居昌宏¹⁾

- 1) 千葉大学 流体数理工学研究室
- 2) 東京農工大学 獣医外科学研究室
- 3) 麻布大学 小動物外科学研究室
- 4) 木更津工業高等専門学校 情報工学科

体外循環装置の問題点として、血栓症のリスクが増大するということが挙げられる。本研究は、電気インピーダンス分光法を用いて血液循環装置に形成された血栓を検出することを目的とする。複数の周波数における誘電率および導電率を用いてヘマトクリット、温度、血栓形成に特化したパラメータを作成し、実験により評価した。実験では、閉流路にブタ血液を満たして循環させ、塩化カルシウム溶液を添加することで血栓形成を促し、電気計測を行った。また、イヌにおける臨床例の計測として、手術中の体外循環血液の電気計測を行った。循環装置にセンサを取り付け、ヘマトクリットや温度等の計測と合わせて電気計測を行った。

大動脈弁狭窄症における流体力学的血流解析に基づく心負荷の検討

法里優^{1)、2)}、板谷慶一¹⁾、松尾あきこ³⁾、平松健司²⁾、後藤智行²⁾、小林卓馬²⁾、
宮崎翔平⁴⁾、西野輝泰⁴⁾、夜久均¹⁾

- 1) 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
- 2) 京都第二赤十字病院 心臓血管外科
- 3) 京都第二赤十字病院 循環器内科
- 4) Cardio Flow Design Inc,

現在のガイドラインでは、大動脈弁狭窄症(AS)において左室駆出率は保たれているが低心拍出量である paradoxical low flow low gradient AS (pLF/LG AS)は、症状の有無のみで手術適応を判断せざるを得ない。わが国では比較的小柄な患者が多く、元々small heartであるため心拍出量が少なく pLF/LG AS に分類され、誤った重症度評価をうける症例も少なからず存在する。そこで、血流解析によりエネルギー損失 (EL) を計測。EL は心拍出量 (CO) の影響を受けやすいため、CO で除した EL/CO (mW/L/min) をエネルギー効率と定め、AS 患者におけるエネルギー効率を比較し心負荷の程度及び AS 重症度を検討した。

超高時間分解能ベクトルフローマッピング法による心臓内血流ダイナミクスと 2 次元速度情報の評価

長岡亮、茂澄倫也、長谷川英之

富山大学 大学院理工学研究部 知能情報工学専攻

超音波ドプラ法によって得られる心臓内の血流速度情報は、心血管系疾患の重要な診断指標の 1 つであるが、超音波ビーム方向に沿った 1 次元の速度情報に限られている。近年、超高速超音波断層法を用いて血流ベクトル情報を推定する研究が進展し、さらに詳細な心臓内血流動態の評価が可能となりつつある。本報告では、時間・空間周波数特性の差異に着目した特異値分解フィルタを用いて血球からの超音波エコーを高感度に抽出し、血流ダイナミクスを可視化する手法を提案する。また、その血流情報に対してベクトルフローマッピング法を適用することで 2 次元血流速度情報も同時に推定した結果を報告する。