

# 第18回 血流会

## プログラム・抄録集

当番世話人 上嶋徳久、宮崎翔平

開催日：2026年1月24日（土）

会場：早稲田大学121号館 コマツ100周年記念ホール

## ◆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。

## ◆会場へのアクセス

早稲田大学121号館 コマツ100周年記念ホール  
東京都新宿区早稲田鶴巻町513  
早稲田大学リサーチ・イノベーション・センター（121号館）

## ◆交通案内

- ・東京メトロ 東西線 早稲田駅から徒歩3分
- ・東京メトロ副都心線 西早稲田駅から徒歩16分
- ・JR 山手線 高田馬場駅から徒歩21分
- ・西武鉄道 西武新宿線 高田馬場駅から徒歩21分

## ◆周辺地図

<https://maps.app.goo.gl/pJoTJ8rATXBpB4iUA>



## ◆タイムテーブル

13:00 - 13:30 世話人会

13:30 - 13:35 開会挨拶 宮崎 翔平 先生

### セッション1: 心臓構造と血流力学の基礎

座長: 上嶋 徳久 先生 (心臓血管研究所)  
宮崎 翔平 先生 (株式会社Cardio Flow Design)

13:35 - 14:00 ウィンドケッセル効果を考慮した左心室壁の構造  
解析 三浦 純花 先生  
早稲田大学

14:00 - 14:25 左心系内における僧帽弁周囲の流体解析および弁  
尖表面が受ける壁面せん断応力 寺原 拓哉 先生  
早稲田大学

休憩 14:25 - 14:35

### セッション2: 血流解析技術の臨床応用と実践

座長: 合屋 征二郎 先生 (日本大学)  
滝沢 研二 先生 (早稲田大学)

14:35 - 15:00 頸動脈狭窄症患者に対する4D Flow MRIにより算出  
された乱流運動エネルギー測定の有用性 関根 鉄朗 先生  
日本医科大学

15:00 - 15:25 術前CTに基づく術式設計支援システム、iT Surgery  
の医療機器開発とその使用経験 鈴木 康平 先生  
株式会社Cardio  
Flow Design

休憩 15:25 - 15:35

## セッション3: 心内血流異常の可視化と評価

座長： 関根 鉄朗 先生 (日本医科大学)  
中村 匡徳 先生 (名古屋工業大学)

15:35 - 16:00 イヌ慢性血栓塞栓性肺高血圧症モデルにおける肺動脈反射波圧解析を用いた重症度別評価 杉本 菜野 先生  
日本大学

16:00 - 16:25 Vector flow mappingによる心不全患者の左室内渦流の検討 小林 若葉 先生  
聖隸三方原病院

16:25 - 16:50 左室心内渦血流のトポロジカル構造の抽出法について 板谷 慶一 先生  
株式会社Cardio Flow Design

16:50 - 16:55 閉会挨拶 板谷慶一先生

## ◆演題1

### ウィンドケッセル効果を考慮した左心室壁の構造解析

三浦紘花 1) 寺原拓哉 1) 滝沢研二 1) Tayfun E. Tezduyar 2) 鳥井亮 3)

- 1) 早稲田大学 滝沢研究室
- 2) Rice University
- 3) University College London

本研究は、医用画像データを用いて、患者ごとの左心壁の心筋線維配向を推定する手法を構築することを目指す。左心壁には、血圧、能動収縮力、ひずみによる応力がかかり、それらがつり合う。心筋は、筋線維の配列による異方性を有することに加え、筋線維の方向に収縮することから、心筋線維の配向は左心室の変形動態や血液循環機能に大きな影響を与える。本研究では、心筋線維配向を変化させた複数の左心壁に対し、構造解析を用いて血圧による拡張と能動収縮を再現し、筋線維配向が左心室の変形動態に及ぼす影響を考察する。

左心壁には筋線維方向とコラーゲンファイバー方向に対して異方性を有する非線形弾性体モデルを用いる。また、左室圧はウィンドケッセル3要素モデルを用いて決定する。図1に示すような筋線維の配向に対し、左心室の容積変化、圧力変化、形状変化について議論する。

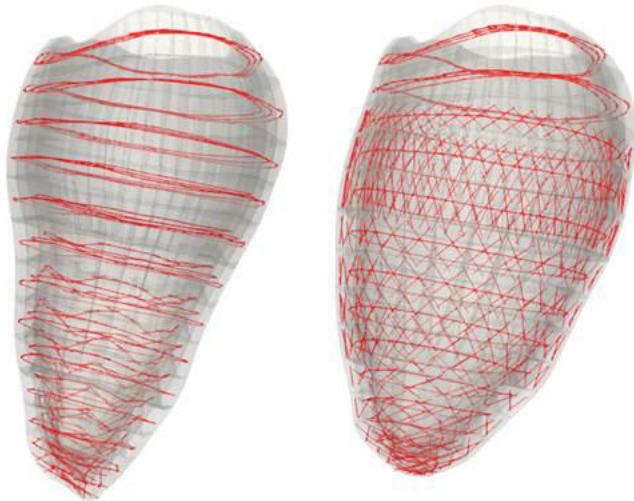


図1  $t/T = 0.188$  における左心室形状および筋線維配向。左心室内壁を白色、筋線維を赤色で示す。左から順に、周方向に配向させた場合、配向が壁の内側から外側へ  $120^\circ$  変化する場合。周期  $T = 0.8$  s.

## ◆演題2

### 左心系内における僧帽弁周囲の流体解析および弁尖表面が受ける壁面せん断応力

寺原拓哉 1) 滝沢研二 1) Tayfun E. Tezduyar 2) 小林祐顕 1)

1) 早稲田大学 滝沢研究室

2) Rice University

本研究では、左心房-僧帽弁-左心室における数値流体解析研究である。心臓電気生理学と力学に基づいた拍動する左心系の心臓壁形状 [1] を使用し、僧帽弁をモデルリングした。解析格子には壁面せん断応力を精度良く捉えるため、境界適合格子を用い、時空間有限要素法により、心臓弁の開閉によるトポロジー変化を捉える [2]。解析結果から左心房、左心室内における流れの可視化、弁尖表面が流体場内で受ける壁面せん断応力を可視化する。

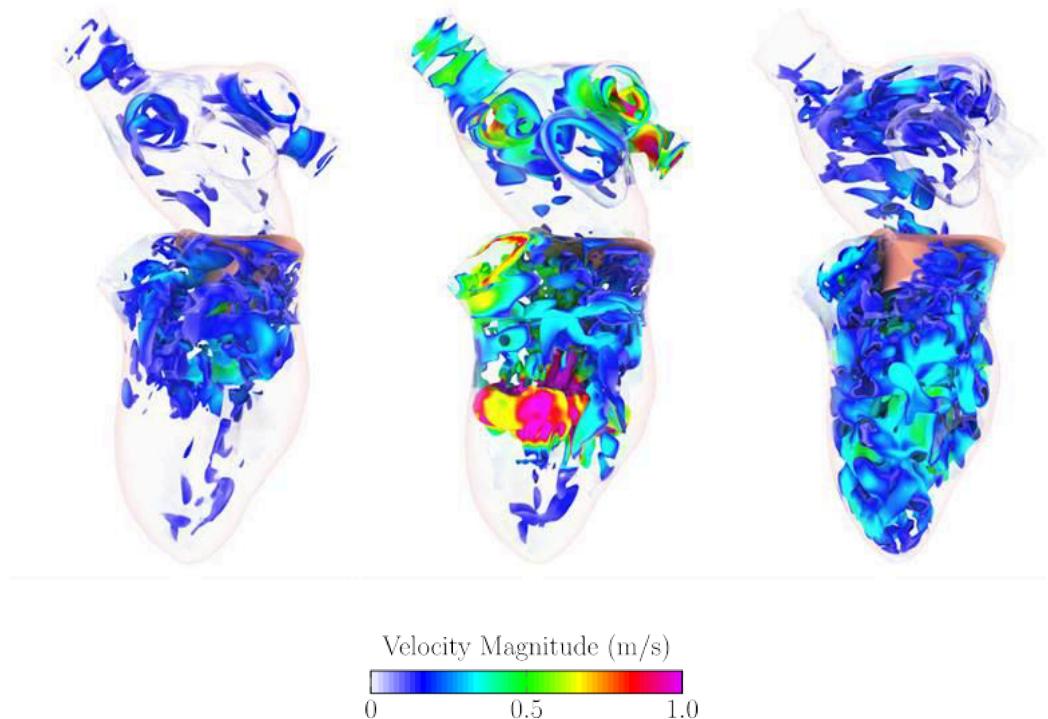


図1  $t/T = 0, 0.044, 0.68$ における速度勾配テンソルの第二不变量の正の等値面。速度で色付け。周期  $T = 0.9$  s.

- [1] S. Sugiura, T. Washio, A. Hatano, J. Okada, H. Watanabe, and T. Hisada, “Multi-scale simulations of cardiac electrophysiology and mechanics using the University of Tokyo heart simulator.”, *Prog Biophys Mol Biol.*, **110** (2–3) (2012) 380–9.
- [2] 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.

## ◆演題3

### 頸動脈狭窄症患者に対する4D Flow MRIにより算出された乱流運動エネルギー測定の有用性

関根鉄朗 安藤嵩浩  
日本医科大学 付属病院 放射線科

**背景:** 頸部内頸動脈狭窄は虚血性脳卒中の既知の危険因子であるが、形態学的重症度だけでは血行動態の変化を十分に反映していない。4D Flow MRI から算出される乱流運動エネルギー (TKE) は狭窄血管における指標として有用だが、頸動脈での応用は十分に検討されていない。

**目的:** TKE 測定の再現性を検証し、MRA から得られる狭窄率、black-blood T1WI から得られるプラーカスケール、および超音波パラメータとの関連を評価すること。

**対象:** 脳血管症状または頸動脈超音波スクリーニングで ICS が疑われた 23 例（女性 6 例 [26%]、年齢中央値 72 歳、四分位範囲 60–80 歳）。

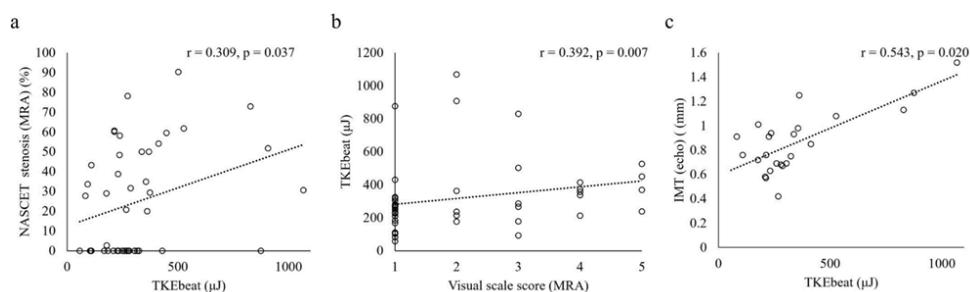
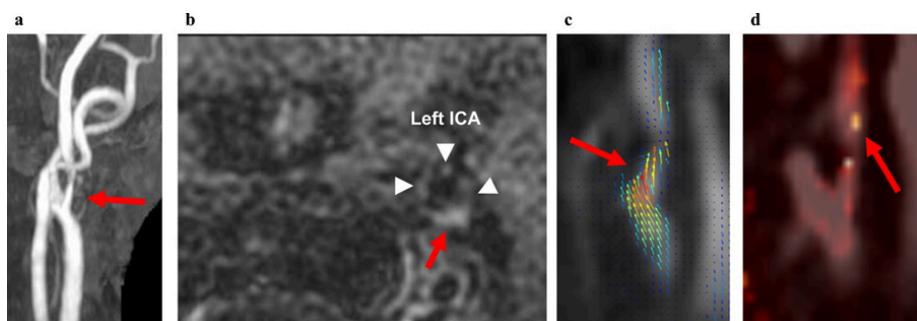
**撮像条件:** 3T Philips Avhieva、速度エンコード 33-100-300 cm/s のmulti-VENC 4D フロー MRI (1.0 mm<sup>3</sup>)、k-t PCA 5倍速-7倍速。

**評価項目:** TKE は bifurcation 直近の近位部から ICA 狹窄部遠位側までの体積領域で測定し、2 名の神経放射線科医で観察者間評価を実施。心周期全体で積分した総 TKE を TKEbeat と定義。狭窄率とプラーカ所見は MRA と T1BB で評価。

**統計解析:** 観察者間一致は ICC と Bland-Altman 解析で評価。TKEbeat と従来指標の関連は Spearman 順位相関で検討。狭窄・プラーカグレード・血管危険因子によるサブグループ間で TKEbeat を Mann-Whitney U 検定で比較。有意水準  $p < 0.05$ 。

**結果:** TKEbeat の ICC は 0.922。TKE は狭窄率 ( $r = 0.309$ )、プラーカスケール ( $r = 0.392$ )、IMT ( $r = 0.543$ ) と相関。

**結論:** Multi-VENC 4D Flow MRI により算出された TKE は頸動脈狭窄およびプラーカ特性と良好に相関する指標となり得る。



## ◆演題4

### 術前CTに基づく術式設計支援システム、iT Surgeryの医療機器開発とその使用経験

鈴木康平

株式会社Cardio Flow Design

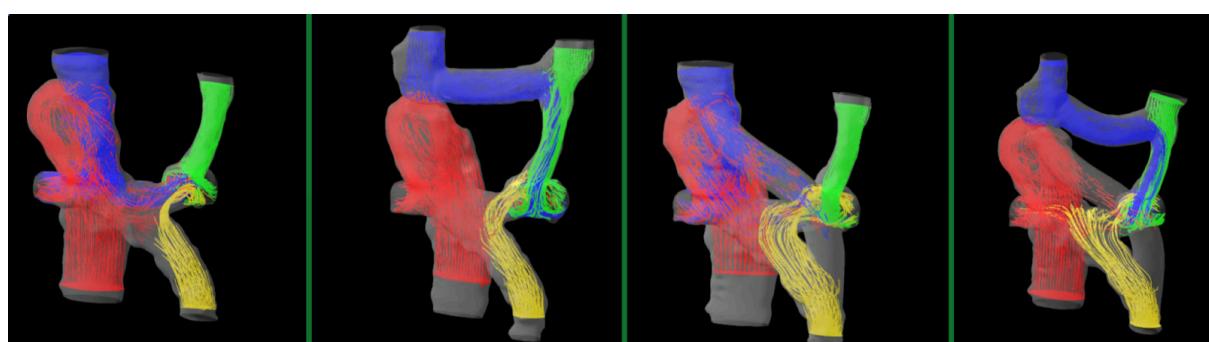
背景: 近年、心血管外科領域においては、大動脈疾患、肺動脈疾患、冠動脈疾患、先天性心疾患など、多様かつ複雑な病態に対する手術が行われている。これらの症例では、患者ごとに解剖学的構造や血流動態が大きく異なるため、術式選択や再建形状のわずかな違いが術後血行動態や予後に影響を及ぼす可能性がある。そのため、術前画像に基づき、個別患者の解剖学的特徴を反映した術式設計を支援する技術の重要性が高まっている。

目的: 本講演では、術前CT画像に基づき、手術設計からCFD解析、可視化までを一体的に行う術式設計支援システム iT Surgery の医療機器開発の概要と、実臨床データを用いた使用経験について報告する。

方法: iT Surgeryは、DICOM形式の術前CTデータを入力とし、領域拡張法による半自動セグメンテーション、術前形状を基に、同ソフトの手術設計機能を用いた仮想導管設計、ならびに有限体積法に基づくCFD解析を同一プラットフォーム上で実行可能なオンサイト型ソフトウェアである。本研究では、大動脈、肺動脈、成人Fontan症例を対象に、iTFlowを用いてCFD解析結果と4D Flow MRI所見を比較し、血流分布および流線構造の定性的なValidationを行った。

結果: 仮想術式間で大動脈および肺動脈を含む血流分布や流れの対称性、エネルギー損失に差が認められ、再建形状や吻合位置の違いが術後血行動態に与える影響を定量的に評価することが可能であった。また、従来は分断されていた形状作成・解析・可視化工程を一体化することで、解析ワークフローの大幅な効率化が達成された。

結論: iT Surgeryは、術前CTに基づく患者個別化手術設計を支援する有用なシステムであり、仮想手術とCFD解析を通じて術式選択の客観的根拠を提供し得る。今後は、医療機器としての規制対応および臨床検証を進めることで、外科的的意思決定支援ツールとしての臨床実装が期待される。



術前

Pattern1

Pattern2

Pattern3

## ◆演題5

### イヌ慢性血栓塞栓性肺高血圧症モデルにおける肺動脈反射波圧解析を用いた重症度別評価

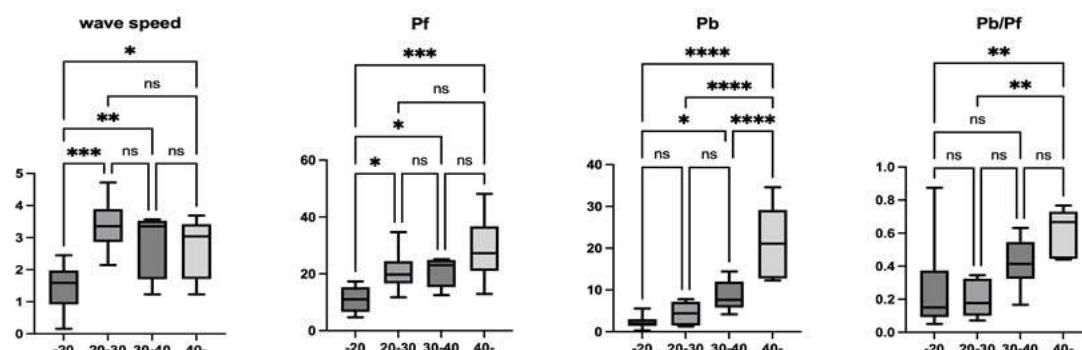
杉本菜野 1) 合屋征二郎 1) 吉田智彦 2)

- 1) 日本大学獣医放射線学研究室
- 2) 帯広畜産大学動物医療センター

慢性血栓塞栓性肺高血圧症(CTEPH)は、末梢肺血管の慢性閉塞により肺動脈圧が上昇する病態であり、早期発見および病態進行の適切な評価が重要である。心臓超音波検査は非侵襲的評価法として汎用されているが、末梢肺血管病変の悪化や血管特性の変化を十分に反映できない場合がある。近年、肺動脈反射波圧解析が肺血管の弾性低下や病変分布を反映する指標として注目されているが、CTEPHの重症度との関連を検討した報告は限られている。本研究の目的は、イヌCTEPHモデルにおいて、肺動脈反射波圧解析指標を重症度別に比較し、病態進行に伴う変化を評価することである。

健常ビーグル犬 8 頭に対してマイクロスフィアを末梢肺動脈へ6ヶ月間反復投与することで CTEPHモデルを作製した。1ヶ月に1回、麻酔下にて右心カテーテル検査を行い、肺動脈圧を測定した。同日に心臓超音波検査を実施し、一般的な右心系指標、左心系指標を測定するとともに、肺動脈血流速度波形と三尖弁逆流速度波形からwave speed、前進波(Pf)、反射波(Pb)、反射係数(Pb/Pf)を算出し、平均肺動脈圧(mPAP)に基づいて重症度別(正常: <20 mmHg、軽度PH: 20-30 mmHg、中等度PH: 31-40 mmHg、重度PH: >40 mmHg)に比較した。

右室自由壁厚および主肺動脈大動脈径比は正常群と比較して軽度PH群から増加し、肺動脈圧上昇に伴う心血管の構造的变化が早期から認められた。一方、右室収縮能指標は重症度間で差を示さなかった。肺動脈反射波圧解析では、wave speedおよびPfが正常群と比較して軽度PH群から増加し、肺動脈の弾性低下や拍動特性の変化を早期から反映した(図)。PbおよびPb/Pfは正常群と比較して中等度および重度PHの群で顕著に増加した。肺動脈反射波圧解析は右室機能低下のない段階からmPAPの変化を捉え、CTEPHにおける病態理解および重症度評価を新たな視点から補完する手法となることを本研究は示した。



## ◆演題6

### Vector flow mappingによる心不全患者の左室内渦流の検討

小林若葉

聖隸三方原病院 循環器科

背景：近年心血管疾患患者の病態解明として左室内渦流解析が注目されている。EFの低下した心不全患者（HFrEF）において薬物治療で心機能が改善する患者が少なからず存在するが、その左室内渦流の変化は明らかになっていない。

目的：HFrEF患者の心機能改善前後の左室内渦流の変化を明らかにすること。

方法：当院で加療を行ったHFrEF患者で薬物治療前後の経胸壁心エコー図検査が施行され心機能が改善していた13例を対象とした。治療前後のエコー画像をVector flow mappingで解析を行い、前後の最大・最小・平均Energy loss (Max\_EL, Min\_EL, Ave\_EL), 最大・最小・平均Circulation (Max\_Circulation, Min\_Circulation, Ave\_Circulation), MNVを比較した。心エコー図はGE社Vivid E75で撮像し、画像解析及び渦流解析はGE社View Pal, Cardio flow design社It echoを用いた。

結果：年齢は68±11歳で男性64.2%，虚血性心疾患が42.9%であった。治療前EFは31.9±6.6%，治療後EFは46.8±8.9%であった ( $p<0.01$ )。治療前後の最小Energy lossでは有意な差は無かったが (Min\_EL; 0.19±0.30 vs 0.14±0.26,  $p=0.38$ ), 最大、及び平均Energy lossは有意に改善していた (Max\_EL; 9.8±8.7 vs 5.4±3.8,  $p=0.049$ , Ave\_EL; 2.3±1.6 vs 1.3±1.1,  $p=0.025$ .)。なおCirculation, MNVに関してはいずれも有意差を認めなかった (Max\_Circulation; 0.0013±0.0027 vs 0.0039±0.0091,  $p=0.328$ . Min\_Circulation; -0.0162±0.0073 vs -0.0170±0.0084,  $p=0.70$ . Ave\_Circulation; -0.0047±0.0043 vs -0.0053±0.0029,  $p=0.64$ . MNV; 30.79±16.07 vs 26.79±19.17,  $p=0.589$ .)。

結語：HFrEF患者において心機能改善に伴う心機能効率の改善がその予後に関与している可能性がある。

## ◆演題7

### 左室心内渦血流のトポロジカル構造の抽出法について

板谷慶一

株式会社Cardio Flow Design

【背景】古来より心臓内での渦血流は効率よく心臓が血液を駆出するために発生すると信じられ、生命の神秘であるかのように扱われてきた。近年の画像診断医療機器およびその後処理の発達により血流可視化が診療用の心臓超音波や心臓MRIで可能になってきたために左室心内血流や渦流も視覚的にとらえられるようになり、その臨床応用や循環生理学の解明、可視化方法の開発と向上のために本研究会『血流会』が立ち上がり12年の歳月が過ぎたが、渦流を同定定量する方法に関しては一定の見解を見ないためにその生理学的ないし病態生理にかかわる意義を解明するのは容易ではなかったが、渦流が解析学的には単なる物理現象に過ぎないため無理もない話であった。

一方数理科学ではTFDA(トポロジカル流体データ解析)という流線の幾何学を取り扱う分野があり、工業的に広く実用に至っている。その根底には流れの特異点である渦中心や流線の交差点(saddle)が有する指数和が流れ場の幾何形状の特性(Euler標数)に一致するとするPoincare-Hopfの指数定理に制御されており、一般的な工業的な系と異なり左室心内血流が心筋運動や心臓弁の開閉などの移動境界に流れの発生吸収源としての特異点が存在することにある。このため心臓内血流のTFDAでは境界特異点の取り扱いのみが特殊であった。

【方法と結果】超音波VFMでの血流ベクトル情報をもとにTFDAをかけて渦領域をsegmentationするアルゴリズムを開発した。

アルゴリズムの骨格として

- I トポロジカル構造の構成要素の抽出として
  - I -A: 各計測gridでの指数とそのOctant分割による特異点の抽出
  - I -B: Boundary switching pointとしての境界特異点の抽出
  - I -C: Saddle点を囲むgridでのswitching pointを用いた分界線(separatrix)の同定
  - I -D: Poincare mapを用いたlimit cycleの同定
- II 平面二部グラフ生成によるトポロジカル構造の同定として
  - II -A: 特異点の発生・収拾分類とpolygon分割によるsemifaceの導入
  - II -B: 数値解としてのseparatrixの分解能限界の問題への左手系mergeでの解決
  - II -C: 不安定境界特異点の対消滅法の導入
- III 流れ場の計測系の構造安定性の証明、つまり中心多様体を含まないflow of finite typeであり、境界特異点を有するMorse-Smale flow (Morse-Smale- $\partial$ )であるとの実証と摂動ノイズ標準偏差の誤差評価

に基づき渦流れ場の同定が可能となることをデモを併用して示す。

【今後の可能性】TFDAでは多くの微細な渦流が発生し、その中で再現性のある生理学的なあるいは病態生理にかかわる渦流の抽出が望まれ、そのために散逸渦を除去できる可能性があるか、またTFDAの時間発展を追跡できる可能性があるか、などを議論する。