



## 血流シミュレーションによる 心臓手術の設計支援

研究・開発機関 : 株式会社 Cardio Flow Design  
 利用施設 : FOCUSスパコン、スーパーコンピュータ「富岳」、自社施設内計算機  
 計算規模 : 32~120コアを用いた並列計算の場合、24時間以内の計算時間  
 利用ソフトウェア : OpenFOAM

### Before

●生まれつき心臓やその周囲の血管に異常がある先天性心疾患では、その治療としての手術が小児期早期に実施されます。さらに多くの患者では、その後の成長に伴い、血行を良好に保つための再手術が必要となります。しかしながら、先天性心疾患では患者ごとの解剖学的・血行的な病態が多様であり、統一された治療指針の策定や最適化された手術設計を行うことが困難でした。

### After

○術前のCTスキャンデータにより心臓・大血管の形状を抽出し、そこに数値流体力学を活用して血流シミュレーションを実施することにより、術後の血行動態の予測が可能になりました。  
 ○医師経験に基づいた術式の選択ではなく、血行動態とその他の重要なパラメータを定量的に血流解析した結果をもとにした選択が可能となりました。今後、手術成績の向上と再手術の低減が期待できます。

### 背景と目的

先天性心疾患(CHD: Congenital Heart Disease)は出生児の約1%に発症し、その中で複雑な血行再建術を要する中等度以上の症例は約32%(年間2,198人)に上ります。CHDの治療においては、新生児期や幼児早期に初回の手術を受けた後、成長に伴って再手術が必要となるケースが多くあります。患者ごとの病態はそれぞれ千差万別であり、画一的な手術アプローチではなく、症例ごとに個別化された手術設計が求められるものです。

日本におけるCHD手術の歴史は約50年と世界でも最長で多くの経験的な知識が蓄積されてきていますが、客観的な指標を用いての、個別化された手術設計を立案する技術は確立されていませんでした。

そこで、本研究では、数値流体力学(CFD)を応用した血流解析技術を用いて、圧力分布、壁面せん断応力(WSS)、エネルギー損失、流線パターンなど多角的なパラメータを評価した上で、個々の症例に最適化された手術設計を選択できるシステムの開発に取り組みました。

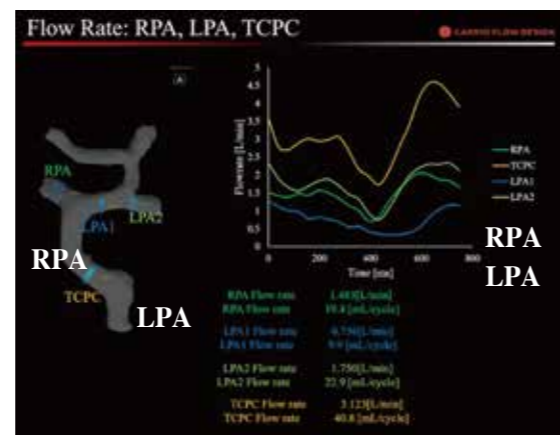


図1 手術前の左肺動脈(LPA・緑)と右肺動脈(RPA・青)の血流量

### 臨床応用事例

本稿では、小児期にCHD手術を受けた成人患者の後発的合併症に対する再手術検討において、血流シミュレーションが有効に活用された事例を紹介しします。

症例は、新生児期に左上大静脈(LSVC)と左肺動脈に対するグレン手術、続いて幼少期に右肺動脈へのフォンタン手術を施行されたものです。成長に伴い、血中酸素飽和度の低下を主訴とする臨床症状が出現しました。画像診断評価により、左右肺動脈間の血流分布不均衡が示唆され、特に左肺への灌流低下が疑われました。この問題に対し、担当

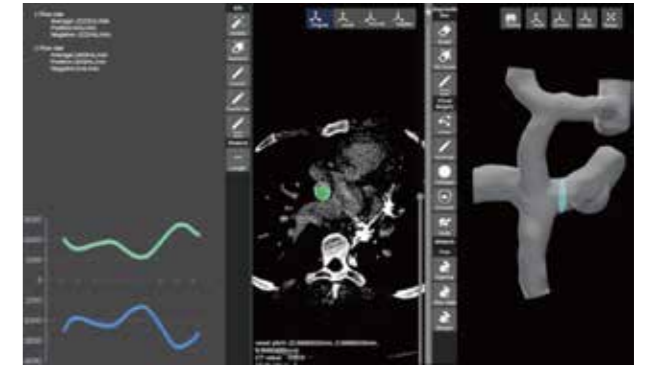


図2 右肺動脈と左肺動脈の流量の均一性確認

医は下大静脈から左肺動脈への人工血管接続による修正TCPC(Total Cavopulmonary Connection)手術を検討しました。本修正手術では、幼少期に実施された既存吻合部の閉鎖も必要とされました。この治療戦略の妥当性評価において、以下の2点の検証が必要とされました。



図3 仮想手術におけるTCPCでの血流の比較  
 左: 仮想手術前後の流量の違い 右: 改善された動態を強調

- 左右肺動脈間の血流分布不均衡の客観的検証
- 提案された修正手術が肺循環全体の血流改善に寄与するかどうかの検証

検証過程では、まず4D Flow MRIを用いた血流量測定により、術前状態における左右肺動脈間の明確な血流不均衡が確認されました(図1)。この結果に基づき、グレン手術の再施行が妥当であると考えられることが示されました。医師は仮想的手術モデルを設計し、血流シミュレーションによる手術計画の評価を実施しました。シミュレーションにより得られた血流分布予測値は、実測値と高い一致性を示しました(図2)。さらに、予定された修正TCPC手術後の血流動態解析により、病的な血流加速が生じないことが確認されました(図3)。これらの知見に基づき、最適なグレン手術プランを策定することができました(図4)。



図4 仮想手術結果を考慮した手術設計

### 臨床的意義

本技術により、患者ごとに個別化された最適な術式を選択することが可能となります。シミュレーション技術を活用することで、術前・術後の血行動態や血流パラメータを事前に評価できるため、経験に基づいた「運任せ」の手術という限界から開放され、客観的なデータに基づいた綿密な手術が可能となり、手術成績の改善につながるものと考えています。

このシステムは(国研)日本医療研究開発機構(AMED)の令和3年度「小児用医療機器の実用化を目指す医師主導治験・臨床研究」に採択され、名古屋市立大学、埼玉医科大学国際医療センター、岡山大学大学院医歯薬学総合研究所と医療機器化を進めています。