

学 位 論 文 要 旨

氏 名

宮崎翔平



論 文 題 目

「Surgical strategy for aortic arch reconstruction after the Norwood procedure
based on numerical flow analysis (数値流体解析に基づく Norwood 手術後の外科的治療戦
略)」

指 導 教 授 承 認 印

宮 地 鑑



Surgical strategy for aortic arch reconstruction after the Norwood

procedure based on numerical flow analysis

(数値流体解析に基づく Norwood 手術後の外科的治療戦略)

氏名 宮崎翔平

背景と目的

左心低形成症候群に対する Norwood 手術は技術的に最も困難で危険性の高い術式の一つである。早期の手術成績は術式と術後管理の改良により改善されている。しかし再建された大動脈弓の非効率な血流が心負荷の増加を招き、長期の心機能を低下させることが知られている。大動脈弓の再狭窄を防止し、血管内部で起こる非効率な乱流を排除するために第二段階手術において大動脈弓の再再建を行うことが有効である。しかし、圧較差や血流の加速を伴わない患者の再再建の基準は決まっていない。

Computational Fluid Dynamics (CFD)は流体の運動に関する方程式であるナビエーストークス方程式を離散化して近似解を求め、流体の挙動を把握するシミュレーション手法である。近年コンピュータの技術進歩に伴い市販のワークステーションでも高精度で計算することが可能となり非常に多くの領域で実用的なツールとして導入されている。先天性心疾患の分野ではもともと解剖学的に形態が複雑で手術後に血流がダイナミックに変化するため血流動態を予測する手段として CFD が使われており、Norwood 手術においては非効率な血流が心負荷となり遠隔期心機能に影響を与えると報告されている。その中でも心負荷を定量し、遠隔期の心不全リスクを予測する有力な指標としてエネルギー損失(Energy Loss, EL)と壁すり応力(Wall Shear Stress, WSS)が重要視されている。EL の大きさは心負荷の大きさを意味しており、また WSS は血管内皮変性に関わるとされ極端に大きな WSS は術後の再狭窄や血管壁の硬化につながり心負荷増大原因となると考えられている。

本研究では Norwood 手術において CFD を用いた血流解析を行い EL、WSS が高値になる要因となる再建血管形状の特徴と、再手術の効果を検証することを目的とする。

方法

2007 年 4 月から 2013 年 3 月にかけて北里大学病院で Norwood 手術または Arch Repair と Damus-Kaye-Stansel 吻合術を受けた 15 例(左心低形成症候群 10 例、Coarctation of Aorta(CoA), Hypoplastic arch, aortic stenosis および ventricular septal defect 3 例、single ventricle with CoA, hypoplastic arch and subaortic stenosis 2 例)を対象とした。第二段階手術および Rastelli 手術の前にカテーテル造影および 3D Computed Tomography (3D CT)検査が行われた。平均年齢は 5.3 ± 2.1 months(カテーテル計測時)、プレッシャー圧較差は AAO と DAO の間で 2.1 ± 3.9 mmHg, (range 0—12 mmHg), 9 例は圧較差がなかった。また超音波計測において 2m/s 以上の血流の加速が認められる症例はなかった。

血流流体解析には有限体積法に基づく CFD が用いられた。術後撮影された 3D CT から患者固有の血管形状を抽出し、解析形状として用いた。境界条件として体表面積で補正した血流量を大動脈弁および肺動脈弁を通過血流量として与えた。出口はカテーテルから抽出した抹消からの反射波および血管の inertance を実現する圧力境界条件を大動脈弓分枝と下行大動脈に与えた。血流の評価項目として収縮期ピークにおいて大動脈弓小彎および吻合部位にかかる WSS の最大値、再建大動脈弓内のエネルギー損失を体表面積で除して補正した Energy Loss Index(ELI)を算出した。

WSS, ELI の基準値を決める目的で、CoA 修復後のコントロール症例 5 例で ELI, WSS の計測を行い、それらの平均値を基準として定めた。対象となる Norwood 術後 15 例に対して数値流体解析を行い、この WSS と ELI の基準値がともに超える症例においては第二段階手術および Rastelli 手術時に同時に大動脈弓の再再建を行った。15 例中 6 例において大動脈弓の再再建が行われ、術前後での WSS、ELI の改善を CFD で検証した。また全例について大動脈弓曲率および吻合部と下行大動脈の断面積の比を表す Arch/dAo area ratio を算出し、再建された大動脈弓の形状の特徴と WSS, ELI の関係を調べた。

結果

CoA 修復後のコントロール症例は $WSS = 97.5 \pm 27.3$ Pa, $ELI = 42.2 \pm 16.8$ mW/m² となった。 $WSS > 100$ Pa かつ $ELI > 40$ mW/m² を再再建の基準とし、15 例中 6 例でこれらの基準を超えたため大動脈弓の再再建が行われた。Norwood 手術後に再再建が行われなかった症例はなめらかなカーブを描きながら肺動脈および上行大動脈から下行大動脈にかけてテーパー状に徐々に血管径が変化する大動脈弓が形成されており、流線の剥離や加速がなくエネルギー損失と WSS が低い流れが形成された。一方、再再建が必要だった症例では吻合部で急激に狭くなる部位や急な屈曲が存在し、流れが加速し壁と衝突することで乱流が生じて大きなエネルギー損失と WSS の原因となった。これらの症例では吻合部の狭小部に expanded polytetrafluoroethylene graft パッチを用いて拡大を行った。吻合部での大動脈弓の直径の急激な変化を排除されることにより、大動脈弓内の血流の加速や衝突、乱流が消失し ELI, WSS は大幅に低下した。

再再建がされなかった症例では $WSS = 51.6 \pm 32.1$ Pa, $ELI = 35.2 \pm 21.8$ mW/m² であった。一方、再再建が必要だった症例では再再建前の WSS は 194.5 ± 87.4 Pa、ELI は 88.5 ± 51.0 mW/m² であった。再手術後 WSS は 60.3 ± 40.5 Pa に減少 ($P=0.03$)、また ELI は 23.1 ± 10.4 mW/m² に減少した ($P<0.01$)。再再建により全症例において WSS、ELI はコントロール症例程度または以下となった。

第二段階手術および Rastelli 手術後の平均のフォローアップ期間は 60 ヶ月であった。2 例が Fontan 手術到達前に atrioventricular valve regurgitation による心不全により死亡、また、1 例が Fontan 手術後 1 ヶ月で敗血症により死亡した。生存している 12 例において術後 5 年でのカテーテル圧較差は 1.3 ± 2.3 mmHg、systemic ventricular ejection fraction = 0.62 ± 0.13 、systemic ventricular end-diastolic volume index = $110 \pm 25\%$ 、end-diastolic pressure = 6.5 ± 1.6 mmHg となり心機能が維持されていた。

また Norwood 術後の 15 例において Arch/dAo area ratio が大きいほど低 WSS ($R=0.54$, $P=0.03$)、低 ELI ($R=0.31$, $P=0.25$) になり、また曲率が大きいほど高 WSS ($R=0.81$, $P<0.01$)、高 ELI ($R=0.61$,