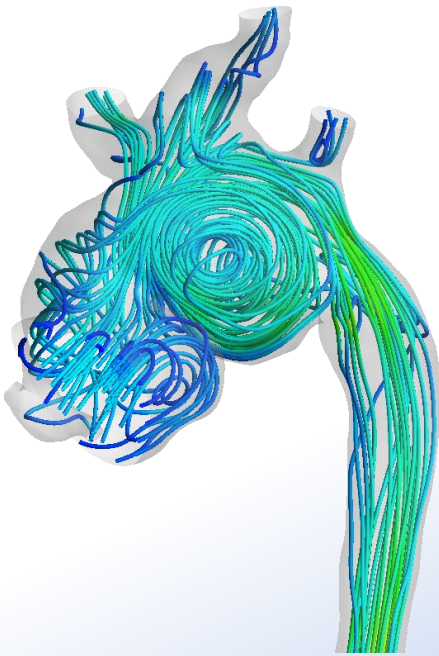


事例紹介

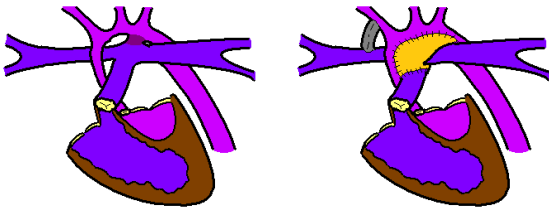
左心低形成症候群でのシミュレーション

エネルギー効率から術式を評価



左心低形成症候群とNorwood手術

左心低形成症候群は先天性心疾患の中でも特に重篤な疾患で、生後すぐに低形成の大動脈を再建する大きな手術を必要とします。この手術はNorwood手術と呼ばれ、心臓手術の中でも最も難しい手術の一つとされています。



左心低形成症候群：左室から大動脈弓にかけてが低形成で、左心室から全身へ血流を送り出すことが出来ない。生後、Norwood手術という大動脈弓を再建する手術が行われ、右室から全身へ血流を送り出すように血流の回路が組み替えられる。

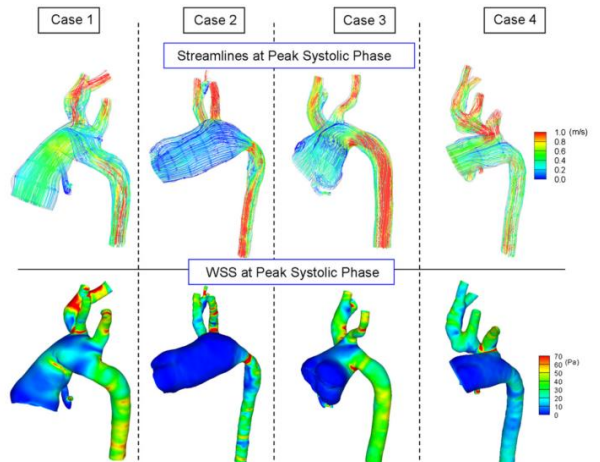
この手術は1981年に生み出された当時、考案者のNorwood本人以外の手術成績は散々たるものでしたが、その後様々な術式の改良や術後管理の向上を経て術後の生存率は大幅に向上しました。それでも術後5年の生存率は70%程度で、長期遠隔期予後が問題視されています。

様々な術式とエネルギー損失の関係

Norwood手術には様々な手術方法が存在し、手術で再建される新しい大動脈の形状は手術方法によって大きく異なります。その中で形成される血流の様相はジェット流や乱流など通常の大動脈内では見られない非生理的な流れになる場合があります。こうした流れは血管内皮に異常なストレスを与え血管内皮細胞の変性に影響したり、また乱流を引き起こし心負荷を大きくします。

CFDによる血流解析はこうした大動脈内で起こる異常な流れを、コンピュータ上の流体解析で計算することができるため、手術の良し悪しを評価することが可能です。

弊社創設者である板谷らの研究ではCFDにより様々なNorwood手術でのエネルギー損失、血流が血管壁に与えるストレス(wall shear stress)を解析し、再建された大動脈形状と血流の関係を明らかにしています。



Norwood手術の血流解析：吻合口が狭い症例、また再建された大動脈の屈曲が急である症例は血流が加速するとともに血管壁に衝突が大きく乱れていることがシミュレーション結果から判明した。血流の加速や血管壁への衝突、それによって引き起こされる乱流はエネルギー損失、wall shear stressが大きくなり予後に悪い影響を与える可能性がある。

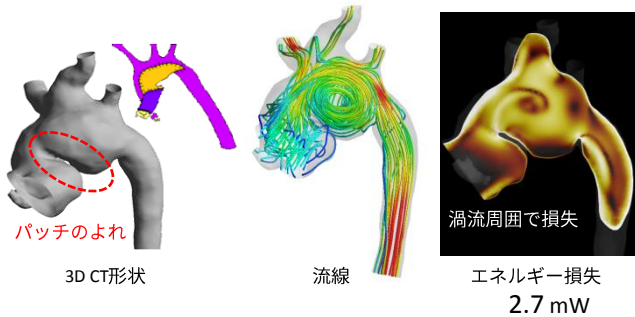
CFDで血流解析を行うことで、再建された血管の形がどのように血流に影響するか、どこで渦流を作り、なぜwall shear stressやエネルギー損失が大きくなるのか、原因と結果を3DCGで手に取るようにわかります。CFDを行うことで外科医は血流を意識した手術が容易になります。

血流の乱れが心不全の要因となった例

この症例では、日齢3で両肺動脈絞扼術が施行され、日齢81で人工呼吸器を離脱し、生後5ヶ月で体重は5.3kgまで増加しました。しかしその後チアノーゼが悪化し、生後6ヶ月でNorwood手術が施行されました。しかし、術後も心不全が遷延し、人工呼吸器とカテコラミンから離脱できない状態が続きました。

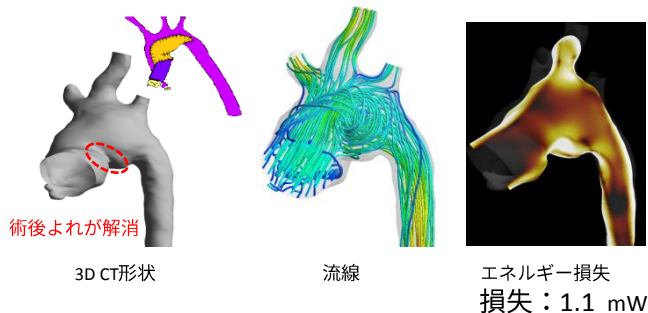
大動脈血流が心不全の要因

右室機能、三尖弁、体肺血流量比には問題なく、大動脈内の血流が心負荷になっている可能性が考えられ、コンピューターシミュレーションによる血流解析が行われました。その結果、大動脈を再建する際に用いたパッチが内側によれた部分で大きな渦流が発生しており、エネルギーを損失していることがわかりました。



手術後エネルギー効率が改善

パッチのよれた部分を切り取る再手術が行われ、大動脈内の渦流が小さくなったことにより、エネルギー損失が大幅に低下しました。術後、本症例は人工呼吸器とカテコラミンから離脱することができました。



手術後エネルギー効率が改善

CFDはNorwood手術後の血流を評価する上で非常に強力なツールですが、さらに強力なCFDの応用として我々が注目している技術に「仮想手術シミュレーション」があります。これは術前のCT画像を元にコンピュータ上で仮想的に手術を行い血流を予測するという技術です。現在の治療戦略は、術前CTから手術計画を建て手術を行い、術後の血流をカテーテルと心臓超音波で計測し手術の成否が判断されます。この時、血流が大きく加速していたり、大動脈の中で圧損失が大きい場合、生命予後を悪化させるため再度大動脈弓を再建する場合があります。

仮想手術シミュレーションを臨床現場で使うことができれば、術前CTからコンピュータ上で複数のパターンの何度も手術を試行し、最も血流が良くなる方法で患者さんに本番の手術が行えるようになります。先天性の複雑心奇形は患者による形の差が特に大きく、事前に流体力学的に手術を設計できる仮想手術シミュレーションは今後小児先天性心疾患の外科治療の形を変えうるものだと我々は考えています。

文献

1. Itatani K, Miyaji K, Qian Y, et al. Influence of surgical arch reconstruction methods on single ventricle workload in the Norwood procedure. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2012;144(1):130-138.