

[課程-2]

審査結果の要旨

氏名： 板谷 慶一

本研究は解剖学的にも生理学的にも複雑で、今日でも遠隔期予後が問題視されている単心室症の手術において、循環生理学と流体力学に基づき術後の血流動態を理論的に詳細に評価し、心負荷を予測し、最適な術式を検証するという新たな試みであり、以下の結果を得ている。

1. **Total Pressure (全圧)**による流れのエネルギー損失は血管内の拍動流では血液の粘性摩擦によって生じるエネルギー損失とほぼ同値であることを **Navier-Stokes** 方程式を積分し証明した。また単心室の心拍出の仕事量を簡易的に計測する方法を示し、**Fontan** 手術や **Norwood** 手術部位ではエネルギー損失が単心室の心拍出仕事量の数%から 10%前後に相当し、これを減らすことが心負荷を軽減する可能性があることを示した。
2. 呼吸性変動と心拍変動とが複合した **Fontan** 手術後肺動脈圧波形を **Fourier** 変換の手法を用いて、呼吸変動と心拍変動の成分に分離する手法を確立した。12例の術後肺動脈圧波形をこの方法に基づき解析した。結果、呼吸変動は横隔神経麻痺症例では著明に低下し、呼吸が能動的引き込み駆動力であることが示された。一方で心拍変動と心室拡張能の指標である等容性拡張期の $\max -dp/dt$, 時定数 τ , 拡張末期圧との相関から、拡張能が悪いほど心拍変動が大きくなることが示された。**lumped parameter model** の結果から、心拍変動は心拡張による能動的引き込みではなく、心室からの受動的な反射波を見ていることが示された。
3. **Fontan** 手術後 1 年後のカテーテル検査の平均値をもとに、14, 16, 18, 20, 22 mm 人工血管のモデルを作成し、コンピューターによる流体シミュレーションを行った。呼吸性的変動を加味し、安静時と運動負荷 2 段階での条件を設定した。14mm 人工血管では運動負荷時に特にエネルギー損失が大きく増加した。20mm 以上の人工血管のモデルでは呼気時に上大静脈血流が人工血管内に流入し、また人工血管外側で逆流を生じ、血流がよどむことが分かった。過大な人工血管では大きなよどみを生じた。これは臨床上の観測結果とよく一致した。結果から 16 mm, 18 mm の人工血管が最適であること結論付けられた。

4. 狭小肺動脈での Fontan 手術の適応限界について肺動脈径を変えたモデルを作成し、Fontan 循環が成立する PAI の下限値を検討した。狭小な肺動脈はそれ自体が抵抗となり中心静脈圧が上昇し、循環が破綻することが示された。PAI の下限値は安静時で 80、運動負荷時で 110 であると結論付けられた。
5. 左心低形成症候群の Norwood 手術で術式の異なる 9 例の Norwood 術後 CT データから 3 次元形状を構築し、患者別流体シミュレーションを行い、術式違いがどのようにエネルギー損失に影響するかを検討した。大動脈弁狭窄例では主肺動脈、上下行大動脈、大動脈弓を統合する形で再建すると吻合のスペースが広く、大動脈弓もなだらかで shear stress が小さくエネルギーを温存することが分かった。大動脈弁閉鎖例は特に大動脈弓の角度が急峻になりやすく、急峻な大動脈弓は shear stress、エネルギー損失を増大させた。大動脈弓小弯側から下行大動脈へ縦切開を置くことでなだらかな大動脈弓が再建される可能性が示唆された。
6. 従来の全圧によるエネルギー損失は圧と流速の両方の分布が分からなければ計算できない。近年の MRI、超音波での血流可視化技術を用いれば粘性摩擦のエネルギー損失であれば算出可能であり、我々は速度分布データから粘性摩擦のエネルギー損失を計測するシステムを作成した。このシステムを用い、粘性摩擦のエネルギー損失と従来の全圧によるエネルギー損失とを比較した。単純な血管狭窄モデルや血管吻合モデルの結果では両者のエネルギー損失はかなりの精度で一致することが示され、さらに粘性摩擦のエネルギー損失は局所の情報を与えることが分かった。

以上、本論文は Fontan 手術や Norwood 手術で流れのエネルギー損失を低く抑える術式を種々の条件で検討し議論した。本研究は臨床的 evidence の少ない複雑心奇形手術において、これまで困難とされた生理学的な流体力学モデルを確立し、詳細な血流解析結果から術式の是非を理論的に解明したものであり、学位の授与に値するものと考えられる。