

学位論文審査結果の概要

氏名	福田 幾夫
学位論文審査委員氏名	主査 笹川 和彦
	副査 佐川 貢一
	副査 村田 裕幸
	副査 城田 農
	副査 藤崎 和弘
	副査
論文題目	Evaluation of Perfusion Technique on Extracorporeal Circulation Based on Fluid Dynamics Using Experimental Modeling, Computational Fluid Simulation and Clinical Relevance（体外循環送血法におけるモデル実験、コンピュータシミュレーションおよび臨床的計測を用いての流体力学的検討）
審査結果の概要（2,000字以内）	
<p>第1回審査を2020年1月21日に行い、予備審査の際の指摘箇所を中心に論文審査を行った。また、予備審査の際に課した専門分野3科目の課題に対して口述試験を行った。同年2月17日に論文公聴会を開催し、論文内容の説明の後、参加者からの質疑応答を行った。同日、第2回審査を行って、第1回審査の際に課した学位論文に関連する専門課題についての口述試験と英語の学力確認を行った。</p> <p>大動脈瘤は大動脈の内膜と中膜の硬化変性により、血管壁が損傷し、血圧によって拡大する疾患であり、高齢化とともに罹患率が増加する。胸部大動脈瘤の治療では、瘤が破裂する前に病変部を人工血管に置換する手術（人工血管置換術）を行うが、その間全身の血流を停止させないために人工心肺装置を用いた循環補助が必要となる。このとき、大動脈瘤症例ではしばしば著しい血管の内側表面への脂質の沈着と変性があり、人工心肺装置から大動脈へ血流を戻す際の流速の早い送血が大動脈内面の粥状硬化病変部を剥離させ、脳をはじめとする塞栓症を引き起こす危険性が高い。本論文は、塞栓症の合併頻度を減少させる送血方法を流体力学的に検討し、臨床応用することを目的として、人工心肺装置から大動脈への送血モデルを作成し、血管内部の血流の流速とせん断応力を解析することにより、臨床で用いられる送血管（カニューレ）ならびに送血方法の違いに対する血管内部の挙動を検討した結果をまとめたものであり、6章よりなる。</p> <p>第1章では人間の大動脈の形態的特徴と動脈硬化性粥状硬化症の病理学的特徴について述べ、本研究の目的に関して解説している。</p> <p>第2章では、ガラス管弓部大動脈モデルを用いた実験解析について述べている。実際の患者の光造形法を用いた三次元モデルからガラス管を用いて正常および大動脈瘤モデルを再現し、模擬体外循環系を構築するとともに、模擬血流計測にはParticle Image Velocimetry法を用い、血流の可視化を行っている。血流非減衰型のend-holeカニューレ、血流減衰型のDispersion、Soft-Flowカニューレ、新たに開発したStealth Flowカニューレ、Dispersionカニューレを大動脈基部に向けた場合を扱って、大動脈の長軸方向と横断面における灌流液の流速、方向、せん断応力の指標としてMagnitude</p>	

of Strain Rate Tensor (MSRT)、流れの乱れの指標として流速の二乗平均平方根（乱れ強度、Urms）に着目した解析結果について述べている。

第3章では、Dispersion カニューレ、Soft Flow カニューレを用いた実際の手術における大動脈内の血流を経食道エコーと直接エコー図を用いて、弓部大動脈内の血流速度と乱流強度分布を解析した結果について述べている。

第4章では数値計算モデルによる検討を行なっている。大動脈瘤症例のCTデータから再構築した三次元モデルに送血カニューレを挿入した場合の弓部大動脈内の血流を解析している。計算モデルとガラス管実験モデルの流速分布の比較から、両者ではほぼ一致した結果が示されている。

第5章では、本研究で用いた流体力学的解析手法の心臓血管外科領域への応用について考察している。本研究の手法を用いることにより、一定の条件下で血流速度、MSRT、流れの乱れを評価することができ、送血カニューレの性能評価、送血方法の比較評価が可能となったが、手法の煩雑さを補うため、数値計算モデルで個々の症例の大動脈モデルを作成し、コンピュータ・シミュレーションで検討を行うことが有用であると結論付けている。第6章は参考文献である。

以上を要するに本論文は、心臓血管手術時の体外血流循環に伴う送血法に関して、初めて実形状に即した大動脈モデルに対し流体力学的な血流挙動解析手法を適用するとともに、臨床で用いられる送血カニューレの評価および新たなカニューレの開発を行い、その有用性を示したものであり、機械工学および医用工学に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位を与えるに値すると認める。

#### 学位論文の基礎となる参考論文

1. Fukuda I, Fujimori S, Daitoku K, Yanaoka H, Inamura T. Flow velocity and turbulence in the transverse aorta of a proximally directed aortic cannula: hydrodynamic study in a transparent model. The Annals of Thoracic Surgery 2009;87(6):1866-1871.
2. Fukuda I, Osanai S, Shiota M, Inamura T, Yanaoka H, Minakawa M, Fukui K. Computer-simulated fluid dynamics of arterial perfusion in extracorporeal circulation: From reality to virtual simulation. International Journal of the Artificial Organs. 2009;32(6):362-370.
3. Fukuda I, Yanaoka H, Inamura T, Minakawa M, Daitoku K, Suzuki Y. Experimental fluid dynamics of transventricular apical aortic cannulation. Artificial Organs 2010;34(3):222-224.
4. Minakawa M, Fukuda I, Igarashi T, Fukui K, Yanaoka H, Inamura T. Hydrodynamics of Aortic Cannulae During Extracorporeal Circulation in a Mock Aortic Arch Aneurysm Model. Artificial Organs. 2010;34(2):105-112.
5. Minakawa M, Fukuda I, Inamura T, Yanaoka H, Fukui K, Daitoku K, Suzuki Y, Hashimoto H. Hydrodynamic evaluation of axillary artery perfusion for normal and diseased aorta. General Thoracic and Cardiovascular Surgery 2008;56:215-221.
6. Kitamura S, Shiota M, Fukuda W, Inamura T, Fukuda I. Numerical simulation of blood flow in femoral perfusion: comparison between side-armed femoral artery perfusion and direct femoral artery perfusion. Journal of Artificial Organs. 2016;19:336-342.