

## 学位論文の要旨

ふりがな 氏名	ふくだ いくお 福田 幾夫
学位論文題目	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）
学位論文要旨 大動脈瘤は動脈硬化による疾患で、大動脈の内膜と中膜の粥状硬化変性により、大動脈の壁が破壊され、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している。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で取り替える手術（人工血管置換術）が必要であるが、全身の血流を停止させるため人工心肺装置を用いた循環補助が必要となる。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、人工心肺装置からの流速の早い噴流が大動脈内面の粥状硬化病変を破壊し、脳をはじめとする塞栓症を引き起こす危険性が高い。本研究の目的は、人工心肺装置の送血モデルを作成し、内部の血流の流速と剪断応力を計測し、塞栓症の合併頻度を減少させる方法を血流力学的に検討し、この結果を実証的に臨床応用することである。 第1章では人間の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た。 第2章では、本研究の第一の特徴であるガラス管弓部大動脈モデルを用いた解析について述べた。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、模擬体外循環を構築した。計測はParticle Image Velocimetry法を用い、以下の灌流条件で行なった。灌流液は21～23℃の水、灌流圧は60～80mmHgを維持するように調整し、灌流量は4L/分、灌流用ポンプは遠心ポンプを用いた。灌流液に75～50ミクロンのトレーサーを混入し、Nd:YAGレーザー照射装置を用いてシート状のレーザーを500microsecondの間隔で照射し、CCDカメラで撮影したレーザーの位置画像から血流のベクトルを測定した。モデル内での光の屈折を低減するために、モデルは水槽の中に沈めて測定を行なった。ベクトル計算の結果をコンピュータ処理して、大動脈の長軸方向と横断面における灌流液の流速、方向、剪断応力の指標としてMagnitude of Strain Rate Tensor (MSRT, 単位 1/sec)、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）を測定し、血流マップとして表記した。正常大動脈モデル、弓部大動脈瘤モデルにおいて、上行大動脈送血での各種送血管、腋窩動脈送血で計測を行なった。さらに、送血カニューレを大動脈基部に向けた場合、心尖部経由での大動脈送血、新しく開発したカニューレを用いた場合についても計測した。1) 正常大動脈モデルを用いた実験においては、血流非減衰型のend-holeカニューレでは、送血管からの70cm/secの血流が減速せずに大動脈小彎側をかすめ、左鎖骨下動脈より末梢の大動脈大彎側に衝突し、派生した血流が脳血管に逆流した。血流減衰型のDispersion、Soft-Flowカニューレ	

ーレでは血流速度が急激に減速し、腕頭動脈レベルでは 50cm/sec、30cm/sec となり、大動脈壁における MSRT も低値となった。Stealth Flow カニューレでは腕頭動脈レベルでの血流速度 20cm/sec であった。大動脈瘤血管モデルを用いた実験でも、血流減衰型の送血カニューレが End-hole カニューレより血流速度、MSRT の分布とも低値であり、血管壁への障害が低いことが示された。腋窩動脈送血では、腕頭動脈付近での流速と MSRT が小彎側で高い分布を示した。さらに心尖部よりの送血、Dispersion カニューレを大動脈基部に向けた場合の流速、MST の分布についても検討し、いずれも動脈硬化の強い弓部大動脈で著しい血流減衰が得られた。

第 3 章では、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 Dispersion カニューレ、Soft Flow カニューレで観察した。

Dispersion カニューレ、Soft Flow カニューレともカニューレ出口付近で流速  $2.1 \pm 0.9$  m/sec、 $1.5 \pm 0.9$  m/sec と著しく速く、弓部大動脈付近で  $0.4 \pm 0.3$  m/sec、 $0.8 \pm 0.3$  m/sec と減弱していた。

第 4 章では計算モデルによる検討を行なった。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て弓部大動脈内の血流を評価した。さらに大腿動脈モデルを同様に作成し、カニューレからの送血と人工血管からの送血で血流の状態を評価した。計算モデルと大動脈ガラス管モデルの流速分布を比較したところ、両者でほぼ一致した結果が得られた。大腿動脈送血の計算モデルでは、人工血管縫合モデルの方がカニューレ挿入モデルより動脈に加わる負荷がより少なかった。

第 5 章では、本研究の意義と血流力学的手法の心臓血管外科領域への応用について考察した。動脈硬化病変を動物実験モデルで作成するのは困難であり、人間との解剖学的な差異も大きい。超音波ドップラー血流計を用いた生体内計測は、被験者側の体格、大動脈の形態のばらつきが大きいため、一定の結果が得られない。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、ガラス管モデルを作成しなければならないこと、測定装置が大掛かりなことが問題として挙げられる。これらの欠点を補うためには、コンピュータ・シミュレーションで個々の症例の大動脈モデルを作成し、計算モデルでの検討を行うことが有用であると考えられる。