

学位論文題名

Computational Fluid Dynamics for an Advance
in the Diagnosis of a Left Ventricular Diastolic
Function Based on Color M-mode Doppler Echocardiogram

(カラーMモード・ドップラ法による左心室拡張機能診断の高度化を
目指した左心室内血流動態の数値流体解析)

学位論文内容の要旨

臨床における心機能診断では、従来、心臓の収縮機能が低下している病態を心不全と考えてきた。しかしながら、近年、収縮機能は正常でありながら拡張機能に異常が見られる病態のあることが明らかになり、これが全心不全患者の3分の1を占めることがわかってきた。そこで、現在、臨床において、左心室の拡張機能を精確に評価する方法の確立が望まれている。左心室の拡張機能を診断するためには、短時間に僧帽弁から左心室に流入する血液の流動状態を把握する必要がある。臨床においては超音波ドップラーを利用した計測が行われている。その中でも、心軸上に超音波を入射することにより、その軸上の血流速度分布を測定し、その時間的変化をカラーMモード表示する方法(CMD法)が拡張不全を見分ける方法として注目されている。しかしながら、超音波計測により得られる情報にはノイズが多く含まれ、空間的な分解能も限られていることから、代表的な部位の流速波形やグローバルな流れの特徴量が心機能の診断指標として用いられている。CMD法においても、得られた画像の特徴から左心室長軸上で流速が最大となる地点が移動する速度を求め、それを診断指標としている。こうした計測のみに頼る方法では心臓内の複雑な血流動態を完全に把握することができず、どういった心室内の流れが心室内で最大流速点を移動させる現象を引き起こし、それがどのように診断指標に反映されるのかについてはよくわかっていない。したがって、計算力学的アプローチを導入して左心室内の流れを具現し、流体力学的考察を加えることによりCMD法が捉えている現象が何であるかを明確にすれば、拡張機能の診断を高度化することが可能であると考えられる。そこで本研究では、拡張時における左心室内の流れをコンピュータシミュレーションにより解析し、その流れが拡張機能診断に用いられるCMD画像にどのように表示されるのかについて検討することで、CMD画像に対応する左心室内3次元流れがどのようなものであるかについて考察した。

まず、拡張期における左心室内の流れの基本的な特性を理解し、それとCMD画像との関係を調べるために、左心室の形状を回転楕円体の一部とする二次元軸対称モデルを作成して、拡張時の心室内の流れを計算した。その際、左心室拡張期中の圧力は数mmHg程度であることから、左心室は内部圧力により変形しないと仮定し、臨床データに基づいて各時間ステップにおける左心室の体積変化量を定め、それに一致するように心壁面を強制的に移動させた。この壁移動境界条件の下で、流れの支配

方程式であるナビエ・ストークス方程式と連続の式を汎用の有限要素法による流体解析ソフト (ANSYS・FLOTRAN ver.5.6) を用いて解くことにより血流解析を行った。その結果、拡張期中には左心室の長軸と側壁との間に渦流れが発生することにより心室内に流入する血液の流路が狭められ、左心室長軸上の血流速度が局所的に増大して、そこに最大流速点が現れることがわかった。この渦が左心室の拡張にともなって心尖部方向に成長して、渦の中心が移動すると、最大流速点も心尖方向に移動した。計算で得られた長軸上の血流速度分布を CMD 画像に表示したところ、流速値が最大流速値の 70%以上である折り返し領域が心尖方向に鋭く伸びた形が得られ、心室内の渦の成長にともなう最大流速点の移動が CMD 画像上の折り返し領域の形の特徴として現れることがわかった。

次に、左心室拡張期に心室内に発生する渦の構造を詳細に調べるために、ヒト左心室の標準的な形態に基づいた 3 次元形状モデルを作成し、正常心ならびに拡張不全心を想定した体積変化を与えて、心室内流れの数値シミュレーションを行った。その結果、正常心の場合、拡張の加速期から減速期に移行する時に大動脈弁下側に渦が発生し、左心室の拡張が進むとともに心臓の側壁に沿って周方向に発達して、最終的に環状構造の渦となることがわかった。この環状渦は大動脈弁側に偏って大きくなった構造をしており、これまでに MRI 等の高度医用計測装置を用いて左心室長軸断面において観察された非対称の 2 つの渦はこの環状渦の断面像であることが明らかとなった。また、環状渦により心尖に向かう血流の流路が狭められるため、渦の成長に伴って最大流速点が心尖方向に移動することもわかった。一方、拡張不全心の場合は、環状渦は形成されるが、その成長は遅く、最大流速点もほとんど移動しなかった。左心室長軸上の血流速度分布を表す CMD 画像では、正常心の場合は折り返し領域が心尖方向に鋭く伸びているのに対し、拡張不全心の場合はほとんど伸びていなかった。このような CMD 画像上の折り返し領域の形状の相違は臨床で得られる結果と一致した。このことから、左心室長軸上の流れの特徴を捉える CMD 画像は左心室の拡張機能を反映しており、それは心室内に発生する環状渦の成長度合いの相違を介して提示されるものであることが明らかとなった。

さらに、僧帽弁の開閉、左心室拡張開始時に心室内に残存する流れの乱れおよび左心室のねじれ運動が拡張時の左心室内の流れに及ぼす影響について検討を行った。その結果、僧帽弁の開閉を考慮して左心室流入部部の中心速度を高めた方が心室内の渦の成長が速く、臨床で得られる CMD 画像により近い画像が得られることがわかった。左心室の収縮・拡張を繰り返す計算を行った結果、拡張開始時に収縮期より残存する流れの乱れは拡張加速期において心室内の流れに影響を及ぼすが、拡張の進展とともにその乱れは緩和され、CMD 画像で捉えられる血流動態にはほとんど変化が現れないことがわかった。また、左心室の拡張運動に伴うねじれ運動は心尖部近傍においてねじれ方向に沿う旋回流を発生させるが、流入部付近に発生する渦の構造や発達にはほとんど影響を及ぼさなかった。その結果、ねじれ運動の影響は CMD 画像上では反映されなかった。これらのことから拡張開始時の流れの乱れやねじれ運動が引き起こす程度の血流の乱れは従来の左心室長軸上の血流を捉える CMD 法では検知されず、こうした流れの影響をも考慮に入れて診断したい場合には超音波を入射する部位を変えて測定する必要があることがわかった。

以上のように、拡張時における左心室内の血流動態を数値解析することにより、心室内で最大流速点が移動する現象の流体力学的機序を解明し、拡張機能診断において CMD 法が捉えている左心室内の流れの構造を明らかにすることができた。このような計算力学的アプローチにより示された情報は、臨床で計測される限られたデータを分析し、それを診断へと結びつける重要な役割を果たしている。

本研究で得られた結果は, CMD 法による計測と数値流体解析とを補完的に組み合わせて診断を行うことにより, 計測のみに頼った従来の左心室拡張機能診断をより高度化できることを示している.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 狩 野 猛

副 査 教 授 河 原 剛 一

副 査 教 授 三 田 村 好 矩

副 査 助 教 授 和 田 成 生 (東北大学大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

Computational Fluid Dynamics for an Advance in the Diagnosis of a Left Ventricular Diastolic Function Based on Color M-mode Doppler Echocardiogram

(カラーMモード・ドップラ法による左心室拡張機能診断の高度化を
目指した左心室内血流動態の数値流体解析)

臨床における心機能診断では、従来、心臓の収縮機能が低下している病態を心不全と考えてきた。しかしながら、近年、収縮機能が正常であるにもかかわらず、心機能が低下するという事例が報告され、臨床において、左心室の拡張機能を精確に評価する方法の確立が望まれている。この拡張機能を評価する方法として、短時間に左心室に流入する血液の流動状態を超音波ドップラを利用して計測する方法があり、その中でも、左心室長軸上の血流速度分布を測定し、その時間的変化をカラーMモード表示する方法(CMD法)が注目されている。しかしながら、超音波血流計により得られる信号にはノイズが多く含まれ、分解能も限られていることから、ある特定部分の流れの情報を全体的な流れの特徴量として心機能の診断に用いている。CMD法においても、得られた画像から左心室長軸上で流速が最大となる地点が移動する速度を求め、それを診断指標としている。このような計測では心臓内の複雑な血流動態を完全に把握することはできず、また、この現象を引き起こしている流体力学的なメカニズムも解からない。したがって、もしも計算力学的アプローチを導入して左心室内の流れを具現し、CMD法が捉えている現象が何であるかを明確にすることができれば、拡張機能の診断を高度化することが出来るのではないかと考えられる。そこで本研究では、拡張時における左心室内の流れをコンピュータシミュレーションにより解析し、その流れと拡張機能診断に用いられるCMD画像との関係について検討することにより、左心室内の流れのどのような特性がCMD画像に反映されるのかについて考察した。

研究の手始めとして、まず、拡張期における左心室内の流れの特性を理解し、それとCMD画像との関係を調べるために、左心室の形状を回転楕円体の一部とする軸対称二次元モデルを作成し、心壁面を強制的に移動させることにより拡張時の心室内の流れを有限要素法による流体解析ソフト(ANSYS・FLOTRAN ver. 5.6)を用いて計算した。その結果、拡張期中には左心室の長軸と側壁と

の間に長軸を取り囲むように環状の渦が発生し、それが心室内に流入する血液の流路を局所的に狭めるために長軸上を流れる血液の速度が増大して局所的に流れの速い所(最大流速点)が現れ、その渦がさらに成長することによりこの最大流速点が心尖方向に移動するということが判った。また、この計算で得られた長軸上の血流速度分布を CMD 画像に表示したところ、流速値が最大流速値の 70%以上となる部分(折り返し領域という)が心尖方向に鋭く伸びた形として得られ、心室内の渦の成長に伴う最大流速点の移動が CMD 画像の折り返し領域の形状を決定していることも判明した。

次に、ヒト左心室を僧帽弁から大動脈弁に向って湾曲した 1 本の管とみなした 3 次元形状モデルを作成し、正常心と拡張不全心の特徴を表すような体積変化を与え同様の解析を行った。その結果、3 次元形状モデルの場合でも先の軸対称二次元モデルの場合と同様に環状渦が発生するが、それは大動脈弁側が大きく膨らんだ形状をしていることが判った。このことから、これまで MRI などの高度医用計測装置により得られている左心室長軸断面における流れの映像で、長軸の両側に見られる一対の非対称な渦がこの環状渦の断面像であることが示唆された。また、左心室の拡張機能が低下すると、渦の成長が遅くなるとともに最大流速点の移動速度が減少し、左心室長軸上の血流速度分布を表す CMD 画像の折り返し領域の心尖方向への長さが減少することから、長軸上の血流速度を直接表示している CMD 画像は、左心室の拡張機能をも反映しており、それは心室内に発生する環状渦の成長度合いの相違によって非常に異なったものとなることも判った。

最後に、僧帽弁の開閉、左心室拡張開始時に心室内に残存する流れの乱れおよび左心室のねじれ運動が拡張時の左心室内の流れに及ぼす影響について検討を行った。その結果、僧帽弁の開閉は渦の成長に影響を与え、CMD 画像における折り返し領域のパターンにも影響を及ぼすことがわかった。また、拡張開始時に残存する流れの乱れや心壁のねじれ運動が引き起こす程度の血流の乱れは CMD 画像に影響を及ぼさないことも判明し、このことからこれらによる血流の乱れは従来の左心室長軸上の血流を捉える CMD 法では検知されず、こうした流れの情報が診断に必要な場合には超音波を入射する部位を変えて測定するなどの改善が必要であることが示唆された。

これを要するに、本論文はコンピュータ・シミュレーションにより拡張時における左心室内の流れを解析し、その流れと臨床において拡張機能診断に用いられているカラー M モード・ドップラ法により得られる画像との関係を明らかにしたものであり、生体工学および医用工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。