

論文審査の結果の要旨

氏名 小柴信子

本論文は、「多孔質超弾性体血管における血流と LDL 輸送のマルチフィジックシミュレーション」と題して6章よりなる。

近年、アテローム性動脈硬化発症に重要な役割を果たしていると考えられている LDL などの物質輸送の数値シミュレーションが進められているが、本論文は、動脈内腔と動脈壁の LDL (低比重リポ蛋白) の輸送を正確に予測することを目的として、血流と飽和多孔質体としてモデル化された血管壁との相互作用を考慮した流体構造連成問題と、それに基づく移流拡散問題の解析を可能とする数値シミュレーションシステムを開発し、開発したシステムを冠状動脈の実形状モデルに適用することにより、拍動をともなう血流や血管壁内部の間隙流と血管壁の変形が LDL 輸送に与える影響について検討したものである。

第1章においては、序論として本研究の背景と目的が述べられている。ここで論文提出者は、アテローム性動脈硬化の発生機序を解明することの意義をのべるとともに、血流と血管壁に関する研究活動、血液と血管壁の物質輸送に関する研究活動をまとめることにより、アテローム性動脈硬化の発生を解明する解析手段として、血管壁を多孔質超弾性体として定式化することの重要性を述べている。

第2章において、論文提出者は、生体を構成する物質形態として間隙が流体で満たされた飽和多孔質体について説明し、血管壁を多孔質超弾性体としてモデル化する際の基礎式を示し、有限要素式を導いている。その際、生体における飽和多孔質体では間隙流体も構造も非圧縮性を示すことから多孔質超弾性体は非圧縮性として定式化している。

第3章において、本研究のひとつの柱である流体・構造連成解析の基礎式が導かれる。ALE 法による有限要素流体解析の基礎式、total Lagrange 法による多孔質超弾性体の有限要素構造解析の基礎式が示され、強連成法を適用した場合の構造・流体連成問題に対する基礎式が導かれている。非線形方程式の代表的静的解析手法である増分型 Newton Raphson 法と非線形方程式の動的解析手法として、構造解析における代表的陰解法である Newmark- β 法及び流体解析における PMA(Predictor-Multicorrector-Algorithm) 法を適用したメッシュ制御法を

用いた構造・流体連成問題の解析手法が示されている。

第4章において、本研究のもうひとつの柱である LDL 輸送を記述する移流拡散方程式の基礎式に基づいて有限要素定式化され、移流拡散方程式を解析する際の安定化手法として SUPG(Streamline-upwind Petrov-Galerkin) 法が示されている。また、動脈内腔と動脈壁の濃度場解析に関する境界条件が説明されている。

第5章では、本研究において開発した解析コードを、多孔質超弾性体、血流と血管壁の連成解析、移流拡散の諸問題に適用し検証している。血管壁を多孔質超弾性体としてモデル化することにより生体血管の粘弾性特性が多孔質体の間隙流により表現されることが検証されている。この検証を踏まえて、アテローム性動脈硬化が好発する実形状のヒト右冠状動脈について血管壁と血流を連成解析し、得られた血管内腔血液と血管壁内の間隙流体の流速場を用いて移流拡散方程式を解いて LDL 濃度分布が解析されている。血管壁を多孔質超弾性体でモデル化した場合、超弾性体に比べて、(1)拍動にともなう血管壁の厚さのひずみは大きく、周方向のひずみは小さく、軸方向では多孔質超弾性体では伸張方向、超弾性体では短縮方向となること、(2)血流場は、湾曲の内側で逆流・還流がみられること、(3)湾曲の内側ではせん断応力が小さく、低せん断応力領域が、超弾性体では多孔質超弾性体より広いことが解析されている。LDL 濃度の解析では、血流場で逆流・還流がみられ、せん断応力が小さい湾曲の内側で高濃度となることが示されている。多孔質超弾性体では、血管内腔と血管壁の間に拍動にともなう透過流の流入・流出が解析され、血管内腔から血管壁への流出のみを仮定した超弾性体に比べて、LDL 濃度が低いことが解析されている。

第6章において本論文全体の結論が述べられている。

以上を要するに、本論文は、多孔質超弾性体に基づく流体構造連成数値シミュレーションシステムと、移流拡散解析システムを開発し、LDL 輸送を解析した結果、拍動をともなう血流場の解析にあたり血管の変形を考慮することの重要性を示し、また血管壁内部の間隙流体と血液の間の透過流の挙動が LDL 輸送に影響することを実証することにより血流と血管壁との相互作用について新たな知見を与えたものであって、医学・生理学、計算科学に貢献するところ大である。

従って、博士（科学）の学位を授与できると認める。