

氏 名	カイルザマン マムン KHAIRUZZAMAN MAMUN
本籍（国籍）	バングラディッシュ
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第322号
学位授与年月日	令和2年9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科機械・社会環境システム工学専攻
学位論文 題目	Computational simulation of physiological blood flow through arterial stenosis for measuring the effects of stenotic shapes on various flow parameters (多様な流れパラメータに及ぼす狭窄形状の影響調査を目的とした動脈狭窄部を通過する血流のシミュレーション)
学位審査委員	主査 教授 船崎 健一 副査 教授 柳岡 英樹 副査 教授 上野 和之

論文内容の要旨

The aim of this study is to investigate the flow behavior of physiological blood flow through arterial stenosis for measuring the effects of stenotic Shapes on various physiological parameters. This is to provide a basic understanding of the effects of stenotic shapes.

The blood is assumed to be incompressible, homogeneous and Non-Newtonian, while artery is assumed to be a rigid wall but in some part of this study artery is considered to be elastic. Since the blood flow is to be fully developed at inlet region of the arterial tube, so the inlet velocity profile is taken as parabolic and spiral. Moreover, the time-dependent pressure profile has been taken for outlet boundary condition. The physiological velocity profile has been imposed at inlet for unsteady condition. Reynolds number at the inlet has been ranged approximately from 86 to 966 for the investigation. As the heat transfer in the blood flow process is not considered, therefore energy equation is not solved. Pressure based solver, and finite volume method are used for calculations. Due to constriction blood passes through the throat and post stenotic region with high velocity, the flow velocity at post stenotic region increases but pressure of that region decreases. So, moderate and severe arterial stenosis can produce highly disturbed flow regions with turbulent flow

characteristics. For this reason low Reynolds number $k - \omega$ model is used as governing equation. Though, in some parts of this study laminar model has been taken.

Arterial elasticity has become a vital predictor of cardiovascular diseases in the past few of years, so numerical simulations have been done for a comparative study of blood flow through elastic stenotic artery with rigid stenotic artery. The wall of the vessels is considered to be rigid as well as elastic. Young's modulus and Poisson's ratio of the elastic wall of the artery are 1.08 MPa and 0.49 respectively. The deformation of the arteries was modeled as two-way fluid-structure interaction (FSI) using the ANSYS package. Comparative results from the arteries of rigid and elastic wall have been presented by graphical representations. Blood velocity, pressure and wall shear stress have been taken as the numerical parameters. Thus, differences between rigid and deformed walls were checked based on Blood velocity, pressure and wall shear stress for different time steps.

In addition, the investigations have been carried out to characterize the flow behavior of blood through carotid arteries. The numerical results have been presented in terms of wall shear stress distributions, streamlines contours and axial velocity contours. However, highest wall shear stress has been observed in the bifurcation area. Unexpectedly, transient or unstable flow has created flow disturbance regions in the arteries. Moreover, the disturbance of flow has risen as the severity of stenosis in the artery has been increased.

For a statistical analysis to investigate the effect of stenotic shapes and spiral flows on wall shear stress in the stenotic arteries, 120 simulations have been performed for getting the statistical data from the numerical results. Actually, the numerical results of wall shear stress have been taken for the statistical analysis. The simulations and the statistical analysis have been performed by using ANSYS - 18.1 and SPSS respectively. The cases for WSS_{max} , WSS_{min} , WSS_{ave} , $Pressure_{max}$, $Pressure_{drop}$, $Velocity_{max}$ and $Velocity_{ave}$ are statistically significant as p-value are less than 0.05. Besides, 73.4%, 55.6%, 63.6%, 61.4%, 66%, 82.1% and 78.7% of the variation of the WSS_{max} , WSS_{min} , WSS_{ave} , $Pressure_{max}$, $Pressure_{drop}$, $Velocity_{max}$ and $Velocity_{ave}$ respectively can be explained by the stenotic severity, eccentricity, and length and flow spirality. However, $Velocity_{min}$, can't be explained by the stenotic severity, eccentricity, length and flow spirality because the p-value of $Velocity_{min}$ is

greater than 0.05. The severity is the most influencing factor for WSS_{max} , but flow spirality has no influence on the WSS_{max} . Thus, the WSS_{max} has been influenced by the stenotic severity, eccentricity and length, whereas the WSS_{min} has been influenced by the stenotic severity and flow spirality. The stenotic length has an influence on the WSS_{max} , $Pressure_{max}$, $Velocity_{max}$ and $Velocity_{ave}$ whereas the stenotic severity has an influence on all of the dependent variables. The $Pressure_{max}$, $Velocity_{max}$ and $Velocity_{ave}$ have been influenced by the stenotic severity and length, so, stenotic eccentricity and flow spirality have no influence on them. The $Pressure_{drop}$ has been influenced only by the stenotic severity. However, the stenotic shape and flow spirality haven't any influence on the $Velocity_{min}$.

論文審査結果の要旨

申請された学位論文は、動脈狭窄（stenosis）による血流異常発生や血管病変発生に関する計算流体力学的及び生体工学的解明に関するものである。

第1章は生体内の血流に関する広範な解説と血流に関する研究を文献的に調査したものである。特に、今回の論文で扱っている狭窄は、心筋梗塞や脳梗塞など致死率の高い疾病の直接的な原因であり、それに関する研究例は相当数存在するが、それらに対して丁寧な調査を行い、その結果を元に研究の方向性を慎重に探っている。また、ここで紹介された研究事例に対する解析は生体流体力学に関する現状を俯瞰するための貴重な資料ともなっている。

第2章は研究対象である、人間の循環器系臓器の解説、特に、血管及び動脈狭窄についての説明を行っている。生体流体力学を扱う上で、複雑なシステムである循環器系を正しく理解し、通常の機械工学が扱う標準偏差の小さな研究対象とは異なり、形状的にも機械特性、材料特性的にもバラツキの大きさへの理解は重要である。これに端を発する形で、第3章で紹介する統計処理による分析の必要性を説いている。

第3章は、対象としている血流の特性やその運動を支配する方程式、また統計処理方法について詳述している。

血液は血球成分と血漿成分からなり、その挙動は混相流として扱われるべきものであるが、それによる数値解析コストは膨大なものとなるため、一般には流体の変形と応力の関係の比例係数である粘性係数に非線形性を導入した「非ニュートン流体」としての取扱で代替するが、本研究でも同様の手法を採用している。この非ニュートン流体のモデル（粘性係数モデル）には様々なモデルが提唱されているが、本研究では様々な過去の研究事例を元に Cross モデルが最も合理的であ

るとの結論を得て、そのモデルを血流解析に用いている。

血流の支配方程式としては、連続体仮説に基づいた最も代表的な支配方程式であるナビエ・ストークスの式を導入し、これに連続の式を組み合わせることで血流解析を行っている。実際の解析ソルバーとしては、汎用コードであり、最も定評のある ANSYS FLUENT を用いている。血流の解析で重要な議論としては、血流解析における乱流モデルの必要性である。乱流モデルは高レイノルズ数条件では必要不可欠なものであるが、血流ではそこまでの高いレイノルズになる例は多くはないことから層流解析に留める例も少なくないが、本研究では狭窄による血流異常を取り扱うことから意図的に乱流モデルを導入している。使用したモデルは、低レイノルズ数型 $k-\omega$ 2 方程式モデルである。導入の影響は、実際に計算事例で検証しており、極端な差ではないが有意差は生じていることを確認している。

また、血管の病変（形状的变化）及び血流異常が、血管狭窄の誘発に関係すると考えられている因子群とどのような関係性にあるかを同定するため、統計処理方法が概説されている。

第4章では、数値解析について詳述されている。第3章で述べたように非ニュートン流体をナビエ・ストークス方程式を数値的に解くことで動脈中の血流の挙動を明らかにすることが本研究の目的であるが、それには適切な形状表現と境界条件の設定が重要である。形状については、生体内における標準的モデルを想定し、分岐を伴う頸動脈及び標準的な直管動脈を採用し、それに対して狭窄度（断面積減少度）、狭窄部長さ、断面変形度などを変化させている。また、拍動の効果については、血流の標準的時間的変化のデータをフーリエ解析して、計算に適用している。さらに、数値解析の際に予め検討しておくべき事項も少なくないが、本章中で数値解析上検証しておくべき点についていくつかの検証が行われている。例えば、格子依存性や移流項の離散化手法の違いの効果などである。

第5章では、狭窄を伴う頸動脈分岐部計算結果及び形状、血流状態を120パターン変化させた場合の解析結果からの統計分析の結果が詳述されている。頸動脈分岐部は一般の場合でも分岐に伴う血流異常多発部となるが、それに狭窄が加わることで、特に壁面せん断応力 **WSS** が大きく変化することが解析の結果として明らかになっている。また、統計処理により、**WSS** の最大値、最小値、流速の最大値等に与える各影響因子の影響度や相関式が誘導され、病変発生に対する貢献度を探るための指標が得られている。また、このような統計処理による影響度調査の有効性も明らかにしている。

第6章では本研究で得られた知見がまとめられている。

以上のように、動脈の狭窄による血流異常という複雑な血流解析を最新の解析手法等を導入して、丁寧にかつ詳細に分析している。得られた知見は、医療における診断法の改良や血流力学の更なる発展に大いに貢献するものと期待される。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編を記載）

Statistical Analysis for Measuring the Effects of Stenotic Shapes and Spiral Flows on Wall Shear Stress by Using Numerical Simulations of Physiological Blood Flow, Khairuzzaman Mamun, Ken-ichi Funazaki and Most. Nasrin Akhter, Series on Biomechanics, Vol. 33, No. 1, pp.16-29, 2019