B111 腹部大動脈瘤モデル内の3次元 定常流れの数値的可視化

沼津高専 松沢照男

NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL FLOW IN THE ABDOMINAL
AORTIC ANEURYSM

Teruo Matsuzawa*

It is well known that the abdominal aorta is a site of predilection for the occurrence of atherosclerosis and atherosclerotic aneurysms. In this study three dimensional flow patterns in the lateral saccular aneurysm were investigated by finite element methods. The aneurysm model had dome-shaped diverticulum arising from one side of the straight circular tube and simulated lateral saccular aneurysms. Calculation were performed of steady flow at Reynolds number of 15, 75, 150, 300, 600. The flow was separated from diverging part of expansion. The formation of the vortex was occurred in essentially the same manner as those in the axisymmetric models. The downward flows from the ceiling at the diverging part were observed at Reynolds number 300, 600. At the converging part the direction of secondary flow was reversed. The formation of the vortex resulted in complex distributions of shear stress fields. These fluid motions can be important factors in thrombogenesis.

1. はじめに

腹部大動脈は動脈硬化症や動脈瘤の好発部位として知られている。さらに、腹大動脈瘤内の壁血栓の形成機序と瘤内の流れの構造とが密接に関係しているとされているが、血栓形成に血行力学的因子がどのように関与しているかについては一定の結論が導かれていない。筆者らはアルミ粉末法を用いて、動脈瘤モデル内の流れの構造を調べてきた¹⁾。また、軸対称動脈瘤モデル内の拍動流れについて、有限要素法を用いて数値的にシミュレーションしてきた²⁾。そこで本研究では、片側に内腔拡大を呈する非軸対称動脈瘤モデルの定常流れの微細構造を有限要素法を用いてシミュレーションし数値的に可視化した。

2. 方法

片側に内腔拡大を呈する非軸対称動脈瘤モデルを Fig.1 に示した。直円管の一方にドーム型の小嚢をもち、瘤部(小嚢部)は直円管の管軸に対して垂直な断面は円形とし、一方の周を管軸と平行にした。直円管の内径を 1.5 とし、最大拡大部の内径を 3.2、拡大部の長さを 7 とした。半径と面積の拡大率はそれぞれ 2.13、4.55 となる。管軸に平行で下流方向を y 軸、速度を v で表し、管軸に垂直な面内で片側に内腔が拡大する方向を z 軸とし、それに直交する方向を x 軸とし、速度をそれぞれ w 、 u で表した。座標の原点はモデルの入口端の中心とした。

幾何形状の対称性より、管軸を含む $y-z$ 平面で 2 分割した一方を計算領域とした。全計算領域を 324 個の 6 面体の有限要素で分割し、速度は 2 次関数、圧力は 1 次関数で近似

* Dept of Electrical Eng., Numazu College of Technology, 3600 Ooka, Numazu 410

した。流体を等方性の非圧縮ニュートン流体と仮定し、定常の Navier-Stokes 方程式と連続の方程式を基礎方程式とし、代数方程式への変換は Gerlerkin の方法、非線形計算は Newton-Raphson の方法によった。

境界条件は、モデルの入口端で、 y 軸方向の速度 v を Poiseulli 流れとし x 、 z 軸方向の速度 u 、 w を 0 とした。出口端は y 軸方向の速度の微分を 0 とした。管壁上ではノースリップ条件より速度は 0 とした。対称面（管軸を含む $y-z$ 平面）上では y 、 z 軸方向の速度 v 、 w の x 方向の微分を 0、 x 方向の速度 u を 0 とした。

3. 結果と考察

非拡大部の直径と平均速度で求めたレイノルズ数 (Re) が、15、75、150、300、600 について計算した。今回は $Re=75,600$ を中心に報告する。

Fig.2、3 に、対称面に平行な平面内の x 軸方向の速度 u を考慮せずに、一定時間内における疑似的な流体粒子の移動を示した。 $Re=75$ は瘤の入口端の拡大部に剥離が生じ瘤の中心近傍で再付着した。この旋回流は x が大きくなれば領域が小さくなり、 $x=1.4$ ではほとんどみられない。 $Re=600$ は、剥離渦が拡大部全体を覆っており、渦の中心が瘤の中心よりやや末梢側にずれた。

Fig.4、5、6、7 に $Re=75$ について、瘤部の流れを 3 次元的に表現した結果を示した。これらの図は基本的に streak line を表現したものであるが、2 つの streak line を初期位置 (x の値) を僅かにずらしておき、一定時間毎に 2 つの streak line に挟まれた領域を塗りつぶした。可視化における色素の注入を模倣したものである。従って、以後 2 つの streak line で挟まれて塗りつぶされた領域を色素ということにする。Fig.4 は色素の初期位置を瘤の入口端にした。 $z=0$ は非拡大部の管軸を含む平面に 4 つの色素を置いた。瘤の入口端から周辺の壁の方向に大きく曲げられた。しかし、完全に壁に沿っているのではなく、むしろ直線的に壁に向かっており剥離渦の存在が予想される。また、4 つの色素のなかでも瘤の壁近傍の色素は瘤の出口端近傍で大きく広がった。 $z=0.19$ 、 0.37 、 0.56

Fig.1 Aortic Aneurysm Model

Fig.2 Flow patterns in the $y-z$ plane ($Re=75$)

Fig.3 Flow patterns in the $y-z$ plane ($re=600$)

の位置でも基本的には $z=0$ と同じになった。Fig.5 は瘤の長さの $1/4$ の位置を色素の初期位置にした。 $z=0.67$ の4つの色素は壁に向かった。最も周辺の色素は途中で止まっているのは、速度が遅いため一定時間内にそこまでしか流れなかったことを示している。 $z=1.03$ では、最も周辺部の色素が z の負の方向に一旦向い、その後壁に向かった。 $z=1.74$ になると4つの色素が z の負の方向に向い、その後壁に向かう流れになった。これらのことから、瘤の入口端よりやや末梢側の拡大部の壁近傍に剥離渦が発生していることがわかる。Fig.6 は瘤の長さの $1/2$ の位置を色素の初期位置とした。 $z=0.85$ 、 1.25 、 1.65 は色素が壁の方向に向い、その後壁に沿って末梢側に流れた。 $z=2.05$ では、 z 軸の正の方向に向い壁の近傍で逆流になった。Fig.7 は瘤の長さの $3/4$ の位置を色素の初期位置とした。壁に沿う流れが見られる。

同様に、 $Re=600$ のときを Fig.8、9、10、11 に示した。Fig.8 は瘤の入口端を色素の初期位置にしたが、 z のどの位置においても、周辺部以外の色素は、ほとんど曲げられずに末梢側に流れた。周辺部の色素は、 z の正の方向に曲げられ、出口端よりやや中枢側の壁近傍で向きを変え、壁に沿って中枢側に逆流した。色素の広がりから、剥離渦が存在していることが分かる。Fig.9 は瘤の長さの $1/4$ の位置を色素の初期位置にした。 $z=1.03$ では、 x の小さい色素は z の負の方向に向い、すぐ後末梢側に向きを変えそのまま流れているのに対し、それ以外の色素は剥離渦の存在によって、 z 軸の負の方向を向いながら逆流

 Fig.4 Streak lines starting at $y=10$ ($Re=75$)

 Fig.5 Streak lines starting at $y=11.8$ ($Re=75$)

 Fig.6 Streak lines starting at $y=13.5$ ($Re=75$)

 Fig.7 Streak lines starting at $y=15.3$ ($Re=75$)

Fig.8 Streak lines starting at $y=10$ ($Re=600$) Fig.9 Streak lines starting at $y=11.8$ ($Re=600$) Fig.10 Streak lines starting at $y=13.5$ ($Re=600$) Fig.11 Streak lines starting at $y=15.3$ ($Re=600$)

になり、その後末梢側に向いながら z の正の方向を向いた。 $z=1.38$ 、 1.74 でも基本的には $z=1.03$ と同じになった。 Fig.10 は瘤の長さの $1/2$ の位置を色素の初期位置にした。 $z=0.85$ は x の小さい色素は、逆流しながら z の方向に向い、すぐ後、向きを末梢側に変えた。壁近傍は壁に沿う流れになった。 $z=1.25$ 、 1.65 、 2.05 も基本的に同じパターンになった。 Fig.11 は瘤の長さの $3/4$ の位置を色素の初期位置にした。 $z=0.67$ で、 x の最も小さい色素は、奇妙なパターンになっているが、これは色素の x の小さい streak line はいったん旋回しながら末梢側に流れているのに対し、 x の大きい streak line は旋回渦に巻き込まれたことによる。これ以外の色素は、旋回渦の様子を示している。 $z=1.03$ より大きい位置の色素は Fig.10 に比べ渦の末梢側の縁を示していることが分かる。

4. おわりに

剥離渦は、基本的には軸対称流れの渦輪を形成するが、瘤の3次元形状により歪められた渦になった。剥離渦の流れ場が複雑なずり応力場を形成し、内皮面との相互作用により血栓形成が導かれているものと考えられる。

[参考文献]

- 1) T.Fukushima, T.Matsuzawa and T.Honma: Visualization and Finite Element Analysis of Pulsatile Flow in Models of the Abdominal Aortic Aneurysm, BIORHEOLOGY, 26, 109-130, 1989