

脳動脈の血流動態に与える重力の影響について

横浜国立大学 西野耕一

東京理科大学 河村洋

横浜国立大学 原千絵、倉田丈裕

浜松医科大学 磯田治夫

Effect of Gravity on Hemodynamics in Cerebral Artery

Koichi Nishino, Yokohama National University*

Hiroshi Kawamura, Tokyo University of Science

Chie Hara, Takehiro Kurata, Yokohama National University

Haruo Isoda, Hamamatsu University School of Medicine

* Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

E-mail: nish@ynu.ac.jp

Abstract: An experimental-computational hybrid simulator for hemodynamics in cerebral artery is developed as a first step toward biofluid mechanics in microgravity. A realistic model of cerebral artery is reproduced from 3-D shape data taken by MRI. Three-dimensional distribution of steady blood flow in the model is measured by using an index-matching stereo PIV technique. The computation results are in good agreement with the present experimental data. Some features of pulsatile blood flow are revealed from the computational results.

Key words: Biofluid Mechanics, Hemodynamics, Cerebral Artery

1. はじめに

微小重力環境における流体力学は、これまで主として理工学に係わる流体现象を対象としてきたが、今後は生物学あるいは生理学に係わる流体现象へと対象を拡大する必要がある。それは、長時間有人宇宙実験や有人惑星探査に向けて、微小重力環境における生物流体力学への取り組みが求められるからである。具体的には、血液循環・リンパ液循環・呼吸気交換といった生体内流体挙動ならびに生体と周囲環境との熱・物質交換が研究対象となる。さらに、室内空調、調理、洗浄、排泄、シャワーや洗濯といった日常的な現象や行為に対しても、微小重力環境における流体现象の振る舞いが大きな影響を及ぼす可能性がある。

本稿では、微小重力環境における生物流体力学への展開が可能な取り組みの第一歩として、医工連携研究として進められている脳動脈の血流動態シミュレータの開発について報告する。本シミュレータは、脳動脈瘤の発生・成長・破裂という生体现象への流体现象の関与を明らかにすることを目的とするもので、重篤な症状を引き起こし得る血管疾患の予知・予防に寄与するものと期待されている。血流動態は、地上と微小重力環境とで顕著に変化し、例えば、体液の頭方移動による顔面浮腫の発生はよく知られている。血流動態シミュレータは、そのような症状を

引き起こす微小重力環境下の血流動態の流体力学的特性を明らかにすることにも役立つと期待される。

2. 血流動態シミュレータ

本研究で開発した血流動態シミュレータは、脳血管実体モデルとインデックスマッチング方式のステレオ PIV を用いた模擬血流 in vitro 計測と、脳血管 CAD データを用いた in silico 数値解析とで構成される。

2.1 脳血管実体モデル

複雑な三次元形状を呈する脳動脈の血流動態を再現するため、MRI で得られる脳血管画像から三次元血管データを構築する。Fig.1 は脳動脈瘤を含む脳動脈の三次元 CAD データの一例である。

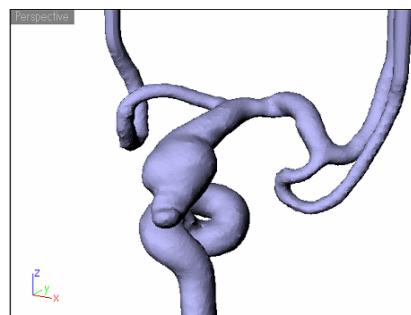


Fig.1 3-D data of a cerebral aneurysm.

三次元 CAD データが構築されると、粉体積層法や光造形などの高速造形技術 (rapid prototyping) を用いて脳動脈の立体形状モデルが製作される。それを中子として鋳造を行うと、血管部分を流路として有するモデルが製作される。Fig.2 はシリコンゴム製の血管モデルの一例である。本モデルは 3 倍拡大モデルであり、流入 1 カ所、流出 3 カ所の分岐管を構成している。



Fig.2 Silicone model of cerebral artery.

2.2 インデックスマッチング方式のステレオ PIV

シリコンゴムの屈折率は約 1.4 であり、濃度調整したグリセリン水溶液の中に浸すと、屈折率が合致した状態 (インデックスマッチング状態) が得られる。同じグリセリン水溶液を作動流体としてモデルに流入させると、モデルが透明化するため、内部流動の可視化計測のための光学的アクセスが得られる。そのことを利用した速度 3 成分計測手法がインデックスマッチング方式のステレオ PIV である。Fig.3 はその様子を示した写真である。インデックスマッチング流体の中でモデルが透明化していることがわかる。Fig.4 はレーザ光シートによって撮影された実体脳血管モデルの断層画像の一例、Fig.5 は得られた速度 3 成分分布の一例である。

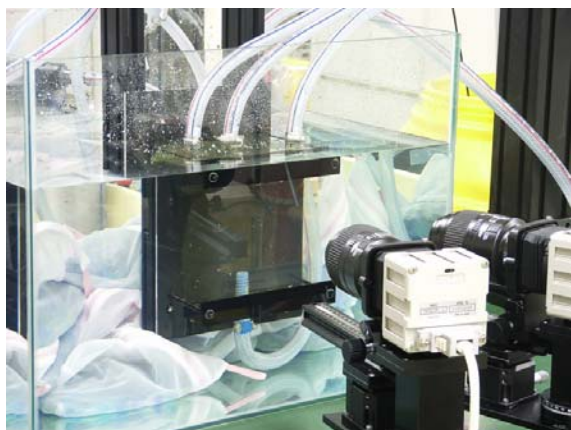


Fig.3 Index-matching stereo PIV.

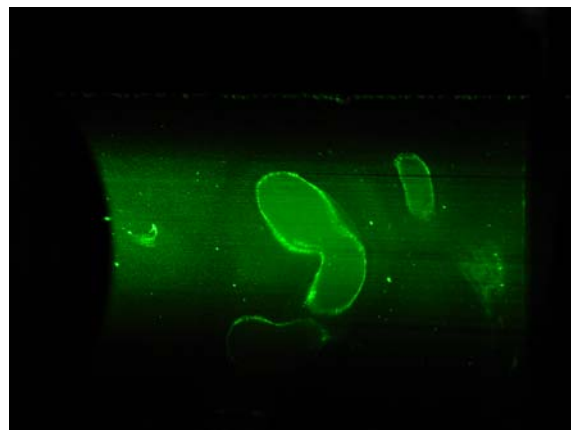


Fig.4 Cross-sectional cut of silicone model of cerebral artery with a laser light sheet.

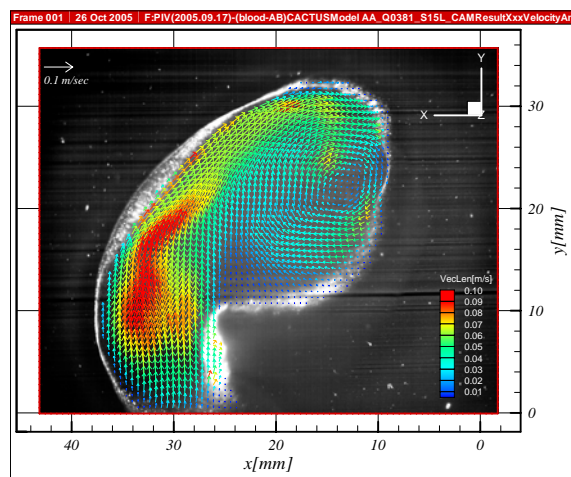


Fig.5 Typical result of index-matching stereo PIV.

インデックスマッチング状態にあると、モデルを液体中で移動させても光学的状態が変化しない。その特徴を利用することによって、複雑三次元形状を呈する実体脳血管モデルの多断面における stereo PIV 計測を効率的に行うことが可能となる。Fig.6 は多断面計測結果を表示したものである。

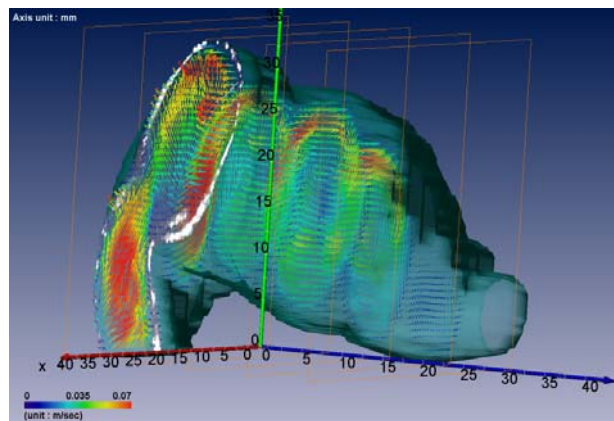


Fig.6 3-D plot of index-matching stereo PIV results.

上述の計測は定常流に対して行われ、代表血管直径に基づくレイノルズ数を 120~370 の範囲で変化させた。

2.3 数値解析

有限体積法による市販 CFD コードを用いて数値解析を行った。Fig.7 は計算格子を示したものである。壁面せん断応力を精度良く解析するため、振動流速度境界層である Stokes layer に比べて十分に薄いレイヤーを壁面近傍に設けた。

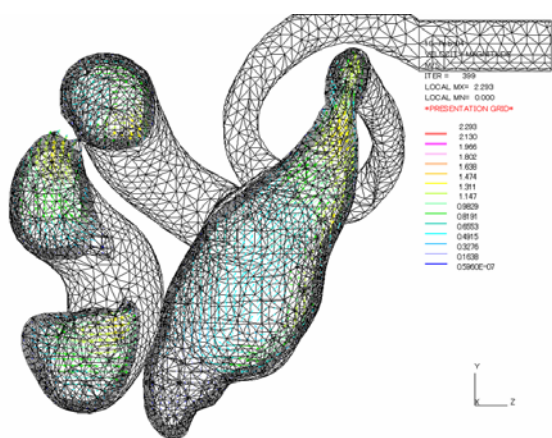


Fig.7 Grid system for CFD.

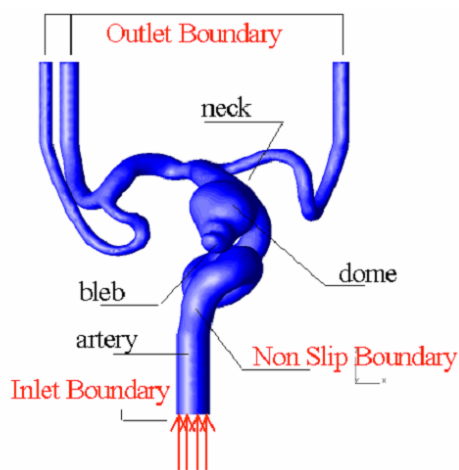


Fig.8 Boundary conditions and inlet-outlet conditions.

Fig.8 は境界条件と流入・流出条件を示した図である。モデル入口部には十分に長い直管部を設け、その端部で一様速度分布を与えた。流出条件は圧力勾配ゼロの自由流出条件である。血管壁面では速度ゼロの粘着条件とし、血液はニュートン流体とした。流入条件は実験結果と比較するための定常流と、実際の血流動態を模擬した拍動流の2種類を与えた。Fig.9 は拍動流入条件である。周期は0.864s とした。

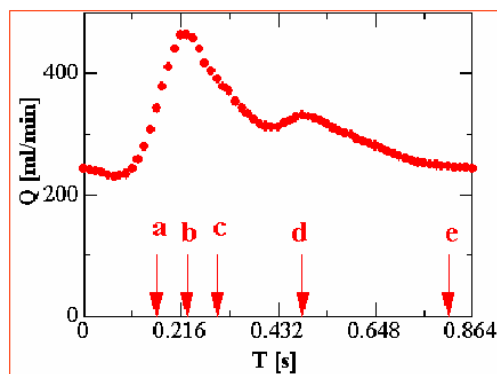


Fig.9 Inlet condition: (a) 1st acceleration (0.162s), (b) peak systole (0.2295s), (c) 1st deceleration (0.297s), (d) 2nd peak systole (0.486s), (e) 2nd deceleration (0.81s).

Table 1 Conditions of CFD and experiment for steady blood flow.

	CFD	Experiment
Dennsity [kg/m ³]	1055	1145
Kinematic viscosity [m ² /s]	3.7×10 ⁻⁶	4.91×10 ⁻⁶
Reference diameter [m]	4.5×10 ⁻³	13.5×10 ⁻³
Flow rate [ml/min]	96	381
Inlet velocity [m/s]	0.086	0.044
Reynolds number	122	122

Table 1 に定常流における数値解析と実験の条件を比較した。実験は3倍拡大モデルを用いたが、入口流速を調整することにより、実験と CFD のレイノルズ数は揃えられている。

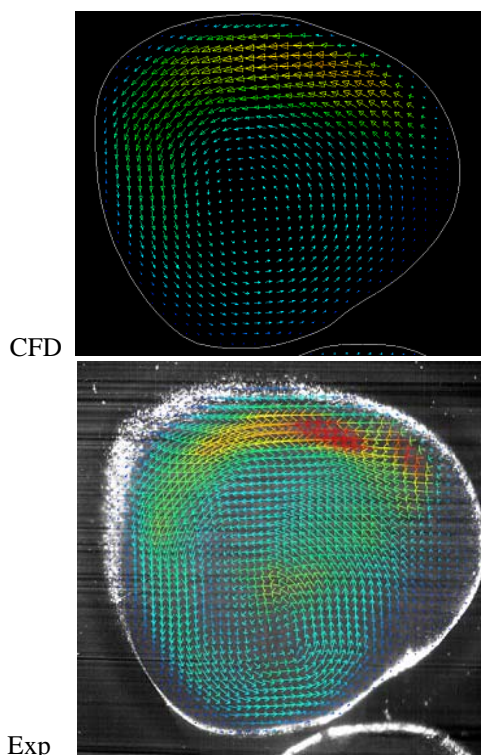


Fig.10 Comparison between CFD and experiment.

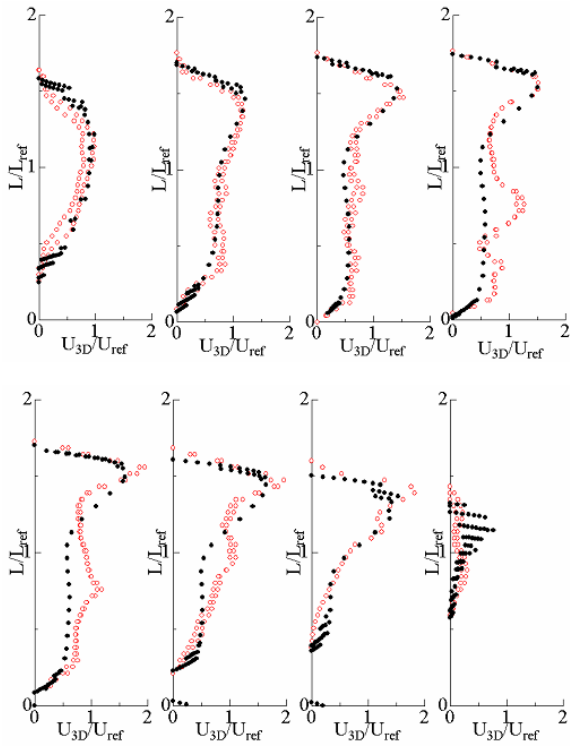
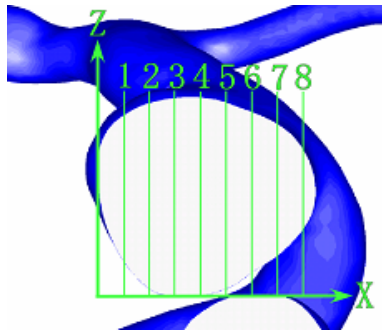


Fig.11 Comparison of velocity profiles between CFD and experiment

Fig.11 は定常流における CFD 結果と実験結果とを詳細に比較したものである。図中の 1~8 の線上における速度分布をプロットしたもので（黒丸：CFD、白丸：実験）、両者には妥当な一致が見られる。

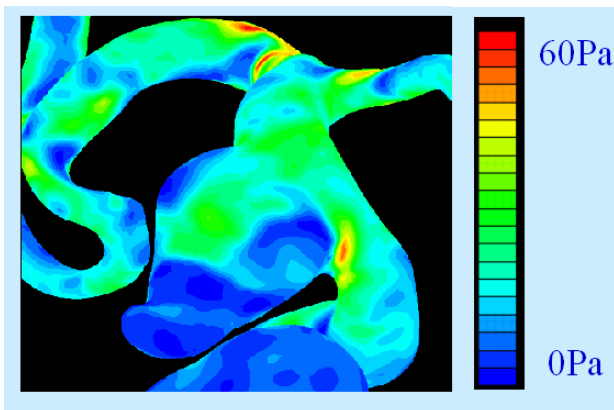


Fig.12 Distribution of instantaneous wall shear stress.

Fig.12 は拍動状態の CFD 結果より壁面せん断応力分布を描いたものである。動脈瘤の発生・成長は壁面せん断応力が血管壁細胞に与える刺激が関与していると考えられており、壁面せん断応力分布を定量化することが求められている。本血流動態シミュレータでは、実験的に信頼性が確認された数値解析手法を用いて壁面せん断応力を評価することが可能である。

3. まとめ

本稿では、微小重力環境における生物流体力学への展開の第一歩として、脳動脈の血流動態シミュレータの開発について報告した。本シミュレータは、脳動脈瘤の発生・成長・破裂という生体现象への流体现象の関与を解明することを目的とするもので、血管疾患の予知・予防に寄与するものと考えられる。インデックスマッチング方式のステレオ PIV を用いた実験結果と、脳動脈の三次元 CAD データを用いた数値解析結果とは、定常流について良好に一致することを示した。

血流動態は、地上と微小重力環境とで顕著に変化することが知られている。血流動態シミュレータは、そのような症状を引き起こす微小重力環境下の血流動態の流体力学的特性を明らかにすることにも役立つと期待される。

謝辞

本血流動態シミュレータの開発において、脳動脈血管モデル（三次元データおよびシリコンゴムモデル）の製作は(株)アールテックで行われた。また、模擬血流のステレオ PIV 計測は(株)フローテック・リサーチで行われた。ここに記して謝意を表する。