

心血管系 1 次元数値シミュレーションモデルの高精度化

北脇 知己^{*}, 清水 優史[†], 姫野 龍太郎[#]

^{*} 岡山大学 医学部 保健学科
岡山県岡山市鹿田町 2 - 5 - 1
E-mail: kitawaki@md.okayama-u.ac.jp

[†] 東京工業大学大学院 情報理工学研究科
東京都目黒区大岡山 2 - 1 2 - 1
E-mail: mshimizu@mei.titech.ac.jp

[#] 理化学研究所 生体力学特別研究ユニット
埼玉県和光市広沢 2 - 1
E-mail: himeno@riken.jp

要旨 臨床において、血圧脈波波形を計測して循環器系状態変化を測定する試みが行われている。このため、計測した脈波波形から循環器系の変化を定量的に解析・理解するために、高精度な数値シミュレーションモデルが求められている。そこで本研究では、生体循環器系を模して、多分岐構造を持つ 1 次元シミュレーションモデルを高精度化することを研究の目的とし、分岐部の角度条件、流れの非定常性、血管壁の粘弾性、を取り込んだ新しい解析モデルを構築した。

1. はじめに

心血管系解析を行う生体力学シミュレーションモデルとして、これまでに種々の数値計算モデルが構築されている^[1]。なかでも血管軸に沿って流れ状態を表現する 1 次元分布定数モデルは、従来から生体現象の定性的な理解に役立っている^[2,3,4]。

1 次元モデルを用いた生体力学シミュレーションの有用性は、近年になって再認識されている。例えば、血流の定量的な解析が可能なことを利用して血管バイパス手術の術前検討に用いられたり^[5]、局所的な流れ場を計算する 3 次元モデル計算と全身血管系の 1 次元モデルを組み合わせたモデル構築の必要性が指摘されたり^[6]している。なぜならば、今日のコンピュータの能力を持ってしても、全身の循環器系 3 次元シミュレーションモデルを構築することはほぼ不可能なため、対象領域のみを局所的な 3 次元モデルで記述した上で、全身の挙動については 1 次元モデルで記述することが現実的なモデルとなるからである。こうした解析においては、これまでの 1 次元モデルでは求められなかった、定量的で近似誤差の少ない高精度な 1 次元モデルが求められている。

そこで、本プロジェクトでは「心血管系 1 次元数値シミュレーションモデルの高精度化」を目的として、3 つの観点から高精度化したモデルを構築した。

2. 研究概要

心血管系 1 次元高精度モデルを構築するには、下の 5 つの項目を考慮すべきである。

- (1)血管構造 (テーパ・分岐など)
- (2)流れの非定常性 (流体粘性)
- (3)血管壁の動き (血管の粘弾性)
- (4)血液の非ニュートン性
- (5)境界条件

これらの項目の中から、生体力学シミュレーションを行う上で誤差に与える影響力の大きいものとして、血管分岐角度、流れの非定常性 (非定常粘性)、血管壁の粘弾性、の 3 つに着目し、それぞれ新しいモデルを構築した。

2.1 分岐角の影響

管分岐部の半径比率と分岐角度に着目し、入力流れ方向の x 軸とこれに垂直な y 軸の 2 軸のそれぞれについて運動量保存則を記述し、分岐部における新しい取り扱いを規定したモデルを構築した。この新しいモデルを用いて、血管分岐部の半径比率と分岐角とをそれぞれ変化させ、入力圧力波が分岐部でどのように反射するかを解析した。この結果、血管半径の違いによる変化に加えて、分岐角の違いによって反射波が増強されたり減少したりする現象が発生した。この結果から、特に慣性項の影響が大きい大血管の分岐部において新しい分岐部モデルを用いる必要性があることが示された^{(10),(2)}。

2.2 非定常性粘性の影響

剛体管内において、非定常的に振動する流れによる粘性抵抗を 1 次元計算モデルにおいて高精度に計算する手法を、弾性管内を伝播するモデルに拡張し、高速計算技法とともに 1 次元モデルに取り込み、その影響を考察した。計算結果は流体実験結果とよく一致したが、非定常粘性のみを取り込んでチューブ粘弾性を考慮していないこの段階のモデルでは実験結果と計算結果が完全に一致するまでには至らなかった^{(3),(4)}。

2.3 血管壁の粘弾性の影響

一般化粘弾性モデルを管粘弾性モデルとして用いた管法則を導入し、新たに提案した高速計算法を用いることで、非定常粘性と管粘弾性を同時に考慮することのできる数値計算モデルを構築した。このモデルを用いた数値計算結果を実験結果と比較することで各々の数値モデルの近似誤差を評価し、今回構築したモデルの計算誤差がきわめて小さいことを示し、この手法の有効性を示した^{(5),(6)}。

以上の結果から、構築した新しいモデルが十分に高精度であり、生体シミュレーションに用いることが可能であることを示すことができた^{(11),(7)}。

3. 発展研究

その後、さらに研究を発展させて、これまでのモデルを応用した全身の生体循環器系シミュレーションモデルを構築しており^{(8),(9)}、様々な条件での計算が可能となったため、今後生体内現象の解明に向けての成果が期待される。また、さらなる発展として、3次元モデルとの結合に向けた研究なども進める予定である。

参考文献：

- [1]日本機械学会編, 生体力学, (1991), 158, オーム社.
- [2]Snyder, M. F., Rideout, V. C. and Hillestad, R. J., Computer modeling of the human systemic arterial tree, *J. Biomechanics*, **1**(1968), 341-53.
- [3]Avolio A. P., Multi-branched model of the human arterial system, *Medical and Biological Engineering and Computing*, **18-6** (1980), 709-18.
- [4]Schaaf, B. W., Abbrecht, P.H., Digital computer simulation of human systemic arterial pulse wave transmission: a nonlinear model, *J. Biomechanics*, **5** (1972), 345-364.
- [5]Wan, J., Steele, B., Spicer, S. A., Strohsand, S., Feijoo, G. R., Hughes, T. J.R., and Taylor, C. A., A One-Dimensional Finite Element Method For Simulation-Based Medical Planning For Cardiovascular Disease, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, **5**(3) (2002), 195-206.
- [6] Kamm, R. D., Shim, E-B., Shirai, A., Bathe, M., Younis, H., Kaazaempur-Mofrad, M. R., and Hwang, W., Multi-scale simulation in biological systems, *Proceedings of the First Internation Symposium on Advanced Fluid Information*, (2001), 121-124.

発表文献リスト：

- (1)北脇 知己・大谷 敏夫・姫野 龍太郎, 血管生理特性変化が血圧変化に与える影響 - 1次元流体モデルを用いた数値流体解析 -, 医用電子と生体工学 第38巻 特別号 (第39回日本エム・イー学会大会論文集), (2000-5), 205 .
- (2)北脇 知己・姫野 龍太郎, 1次元多分岐流体モデルを用いた循環器系数値流体解析, 日本機械学会2000年度年次大会講演論文集, No00-1 (2000-8), 275-276 .
- (3)北脇 知己・清水 優史・姫野 龍太郎・田部 一久・宮脇 義徳, 非定常粘性の影響を考慮した循環器系1次元数値流体解析, 日本機械学会 第11回バイオエンジニアリング学術講演会・秋期セミナー講演論文集, No00-26 (2000-10), 109-110 .
- (4)Kitawaki, T., Shimizu M., Liu, H. and Himeno, R., One-Dimensional Numerical Analysis of Blood Flow with Consideration of Unsteady Viscous Influence,

**Proceedings of the 10th International Conference on Bio-Medical Engineering,
(2000-12), 395-396 .**

(5)北脇 知己・清水 優史・劉 浩・姫野 龍太郎・田部 一久・宮脇 義徳，非定常粘性と管粘弾性を考慮した循環器系 1 次元数値流体解析，日本機械学会 第 13 回バイオエンジニアリング講演会・講演論文集，No00-35 (2001-1)，66-67 .

(6)Kitawaki, T., Shimizu M., Liu, H., Himeno, R., Tanabe, K. and Miyawaki, Y., One-Dimensional Numerical Analysis of Blood Flow with Consideration of Generalized Arterial Viscoelastic Model, Proceedings of the First International Symposium on Advanced Fluid Information, (2001-10), 103-104 .

(7)北脇 知己・清水 優史・姫野 龍太郎・劉 浩，心血管系数値解析のための 1 次元数値計算 - 一般化粘弾性モデルを用いた高速数値計算モデル - ，日本機械学会論文集，69-677，A(2003)，55-61 .

(8)北脇 知己・清水 優史・姫野 龍太郎，全身動脈樹を模した心血管系数値解析に与える血管粘弾性の影響，日本機械学会第 14 回バイオフロンティア講演会・講演論文集，No03-19 (2003-9), 79-80 .

(9)北脇 知己・清水 優史・姫野 龍太郎・岡 久雄，全身動脈樹を模した心血管系シミュレーションによる、血管粘弾性の血圧変化に与える影響解析，第 26 回 ME 学会中四国支部，(2003-11)，37 .

理研シンポジウム発表リスト：

(10)Kitawaki, T. and Himeno, R., 1-Dimensional numerical analysis of blood flow in multi-branched arteries, Proceedings of the RIKEN Symposium 2000, (2000-5), 26-33 .

(11)北脇知己・清水優史・姫野龍太郎・劉浩，血管系数値解析のための 1 次元数値計算-非定常粘性と一般化粘弾性を取り入れた高速数値計算モデル-，理研シンポジウム 2003 年度，(2003-5)，ポスター発表 .