

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560166

研究課題名（和文）VOF 法と境界埋め込み法を併用した人体内流動と熱輸送のマルチスケール並列解析

研究課題名（英文）Multiscale analysis of flow and heat transfer in human body using VOF and immersed boundary method on parallel environment

研究代表者

白崎 実（MINORU SHIRAZAKI）

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授

研究者番号：50302584

研究成果の概要（和文）：人体内部では、マクロからマイクロへと大きくそのスケールを変えるマルチスケールの流れが多くみられる。呼吸器系や循環器系で見られるような、他数回の分岐を経てマクロスケールからマイクロスケールへと変化する 3 次元形状に対して、ボクセル格子（直交格子）上で Immersed Boundary 法による直接的な表現と VOF 法（FAVOR 法）による間接的な表現を併用した手法を提案し、計算モデルの作成とその解析を行うことで計算手法の妥当性について確認した。

研究成果の概要（英文）：In the human body, the scale of flow changes widely and it is difficult to consider macro and micro regions simultaneously. The purpose of this study is to construct a method of modeling and flow analysis for the multi-scale human respiratory and circulatory systems. We use the Cartesian grid to reduce computational costs. To handle the whole scale seamlessly, we apply the VOF method (the FAVOR method) for micro scale regions and use the Immersed Boundary method for the other regions to improve the accuracy of the shape representation. Some suitability and validity of the proposed method for the human respiratory systems are shown.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・バイオ流体力学

キーワード：計算流体力学，生体力学，微小循環系，熱・物質輸送，並列計算

1. 研究開始当初の背景

近年、計算力学的な手法を医療分野へ適用して、病因の解明、治療の計画や評価、医用機器の設計へ役立てることに対する期待が高まっている。人体内部では、マクロからミ

クロへと大きくそのスケールを変えるマルチスケールの流れが多くみられる。代表的なものとして血流が挙げられる。血流では、比較的太い血管からなる巨視的循環系から、毛細血管などで構成される微小循環系を經由

して再び巨視的循環系へと巡る流れがあり、この血流は酸素や栄養分を末梢組織までくまなく行き渡らせると同時に体内における熱輸送を行っている。血流の他にも、呼吸器では、最大のスケールである気管から最小スケールの末梢気道に至るまでに、管の内径は数十分の一、気流速度は数千分の一以下になること言われている。循環器系疾患や呼吸器系疾患の発症、病変等において流れの影響は少なくないと考えられ、そのメカニズムの解明は重要である。

しかしながら、人体内部のこれらの流れに関する知見を得るためには、測定や実験時に各部位や細胞が「生きている状態」であることが必要であり、このことが実験的なアプローチを困難にしている。そこで、計算機シミュレーションが有力な手段として期待されるが、このアプローチにも困難がある。それは、これらの流れは、マクロからマイクロへ大きくスケールが変わる上に、具体的な形状の把握が難しいことがあるばかりか、末梢部分すなわちマイクロ側の最小スケールでは、流れは細胞組織へ「染み込む」ような状況になっていると考えられる点である。人体の末梢部分を含む熱や物質輸送についての理解のためには、マクロスケールとミクロスケールとを分離することなく、末梢部分での細胞組織への染み込みを同時に扱うことがひとつの大きな鍵となる。

2. 研究の目的

本研究では、前述の実験的なアプローチが困難な末梢部分を含むミクロスケールとマクロスケールの両方の流れや輸送現象を同時に取り扱いことが可能な計算手法の構築を目指す。具体的には、明確に定義可能な流路（血管や気管）に関しては、Immersed Boundary法（以下、IB法）で取り扱う。一方、具体的な形状の表現が困難なミクロスケールや末梢部分においては、VOF法（FAVOR法）を用いて表現する。これら2つの方法を解析領域内で同時に、適切に併用するアルゴリズムを構築することにより、人体内部の血液や気流の流れ、熱・物質輸送現象のシミュレーションを可能とすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では計算格子として、格子生成のコストや計算のロバスト性、医用画像との親和性といった点で境界適合格子などよりも有利なボクセル格子（直交格子）を用いる。比較的マクロなスケールに対してはIB法によって形状を精度良く表現する。IB法で表現されたこれらの境界は、変形、拍動等を取り扱うことも容易である。一方、形状を捉えきれ

ないマイクロなスケールに対しては、流体と生体組織が混在した多孔質内の流れ場とみなし、各計算セル内における流体占有率および面積開口率を考慮したVOF法（FAVOR法）により取り扱う。以上のような2つの手法の併用により、マクロとマイクロの統一的な解析が可能となる。対象とする流体はニュートン流体であるとし、考えている流れのレイノルズ数は小さいことから、非圧縮性の層流であるとして取り扱う。計算セルにおける流体の体積占有率（VOF値）とセル表面の面積占有率（AOF値）を導入した上で、IB法を適用した非圧縮流れの連続の式およびNavier-Stokes方程式を支配方程式として、有限体積法によって空間離散化を行い、流速と圧力のカップリングにはSIMPLE法を用いる。

4. 研究成果

本提案手法は人体内の呼吸器系、循環器系の両方に適用可能であるが、ここでは呼吸器系を想定し、Weibelのモデルにもとづいて、自己相似性を持って分岐していく気道内を模擬したモデルとそのモデルで解析を行った結果について示す。

図1は、流入部を分岐の第10世代、流出部を第15世代を想定した6世代分の流路である。5回の分岐によって1本の管が32本に枝分かれしている。このモデルは、物体境界はIB法によりなめらかに表現したもので、以下では「全IB法モデル」と呼ぶことにする。すでに述べたように、ミクロスケールにおける形状は、一般にこのように明確に把握ことは困難であると考えられるが、ここでは比較のために、ミクロスケールに該当する部分まで明確に形状を表現したモデルを利用する。

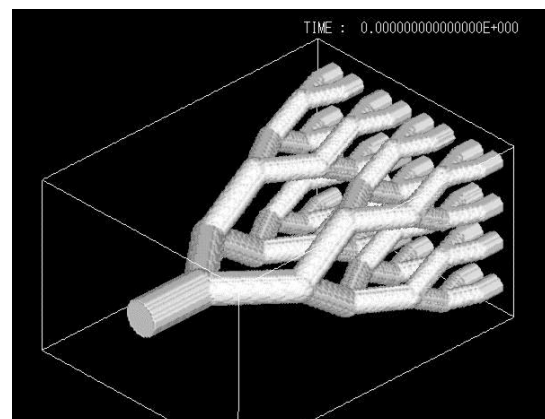


図1 5分岐形状モデル（全IB法）

一方、図2は図1の分岐の最終世代をミクロ領域と考えると、ブロック状の多孔質として

VOF 法を用いて表現したものであり、「IB 法+VOF 法モデル」と呼ぶことにする。VOF 法を用いて表現したミクロスケールの部分では、本来の分岐管が占めていた体積の比率を流体占有率として与えている。その流体占有率の分布を図 3 に示す。図 4、図 5 はこれらのモデル流速ベクトル分布である。

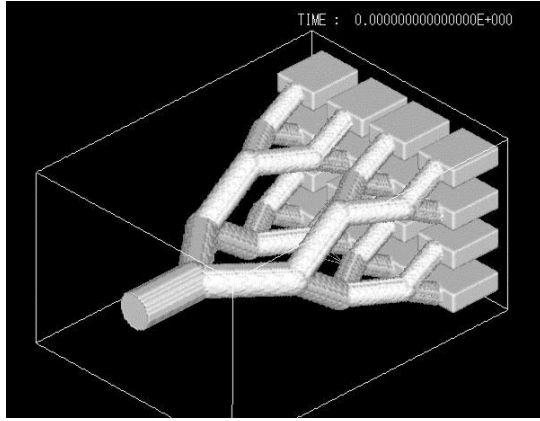


図 2 5分岐モデル (IB法+VOF法)

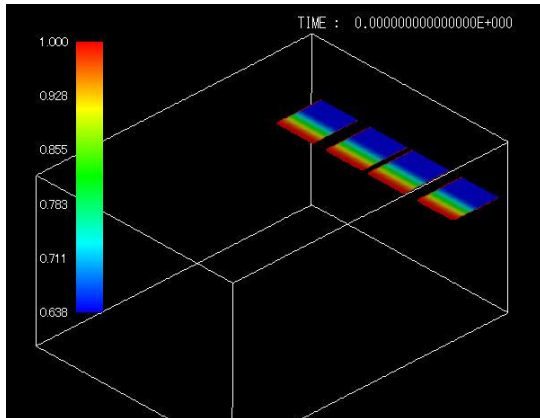


図 3 5分岐モデルの流体占有率分布

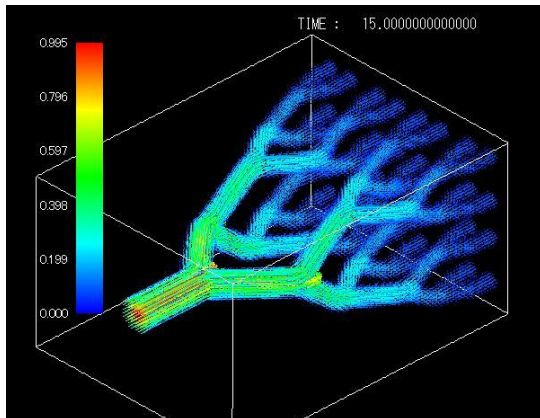


図 4 5分岐モデルの流速ベクトル (全IB法)

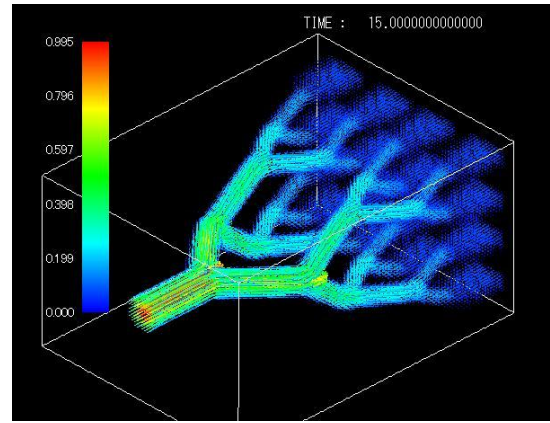


図 5 5分岐モデルの流速ベクトル (IB法+VOF法)

図 6、図 7 は、それぞれ、流入部を分岐の第 10 世代、流出部を分岐の第 17 世代とした 8 世代分の分岐管形状を作成した全 IB 法モデルと、第 15 世代から第 17 世代までの末梢側 3 世代分をミクロスケール部分とし、ブロック状の多孔質として VOF 法を用いて表現した IB 法+VOF 法モデルにおける流速ベクトル分布である。

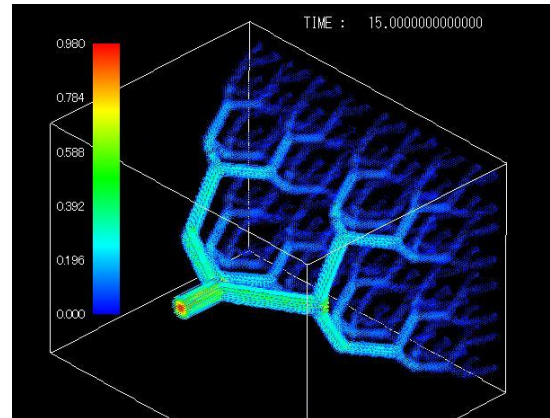


図 6 7分岐モデルの流速ベクトル (全IB法)

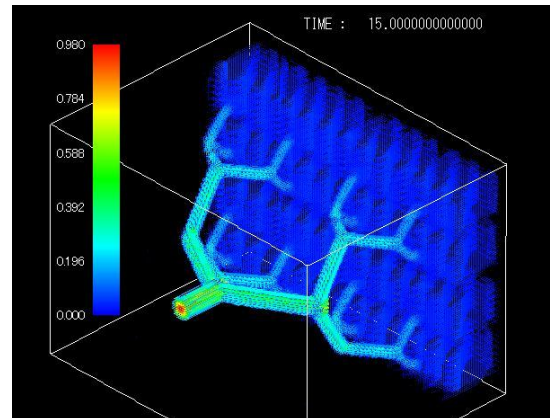


図 7 7分岐モデルの流速ベクトル (IB法+VOF法)

IB法+VOF法モデルでは、ミクロスケール部分では、流れ方向と垂直な断面内で流速分布が平均化されることになるため、この領域での速度分布は、全IB法モデルと一致はしないものの、各分岐世代における流速値はほぼ一致し、質量保存則も満たされていることを確認している。一方、マクロスケールにおける流れは両モデルで差異はなく、末梢部分をVOF法で表現したことによるマクロスケール領域への悪影響はなく、両スケールのシームレスな取り扱いを実現出来ていると考えられる。

生体を対象としていることから、確定出来ないパラメータも存在し、計算条件の設定に今後検討を要する部分も残るものの、流れのスケールに応じて形状表現手法を使い分け、人体内の呼吸器系や循環器系に適用できるマルチスケールなモデリングおよび流れ解析手法について、その基礎となるものを構築することが出来たと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計6件)

- ① 松井貴信, 白崎 実, ”埋め込み境界法による小腸の分節運動が内容物に与える影響の解析”, 第25回数値流体力学シンポジウム 講演予稿集(USBメモリ), 2011年12月19-21日, 大阪
- ② 白崎 実, 藤原康平, 安原浩司, ”微小循環領域を考慮した流れと熱輸送解析のためのモデリング”, 日本機械学会第23回バイオエンジニアリング講演会論文集, pp.371-372, 2011年1月8-9日, 熊本
- ③ 安原浩司, 白崎 実, ”VOF法による微小循環領域のモデリングと血流を考慮した生体熱輸送解析”, No.10-16 日本機械学会流体力学部門講演会講演論文集, pp.323-324, 2010年10月30-31日, 米沢
- ④ 藤原康平, 白崎 実, ”VOF法とIB法を併用した人体内のモデリングと流れ解析の試み”, 日本機械学会 第23回計算力学講演会講演論文集 (CD-ROM), 2010年9月23-25日, 北見
- ⑤ 白崎 実, 藤原康平, 安原浩司, ”直交格子を用いた微小循環領域における流れと熱輸送モデル”, 計算工学講演会論

文集 Vol. 15, No. 2, pp.789-790, 2010年5月26-28日, 福岡

- ⑥ Minoru SHIRAZAKI, Kouhei FUJIWARA and Koji YASUHARA, “A computational model for flow and heat transfer in microcirculation”, 2nd German-Japanese Workshop on Computational Mechanics Book of Abstracts, March 28-29, 2010, Yokohama, JAPAN

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白崎 実 (MINORU SHIRAZAKI)
横浜国立大学・環境情報研究院・准教授
研究者番号: 50302584

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし