

平成 22 年 6 月 30 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007 年度～2008 年度
 課題番号：19560163
 研究課題名（和文） 人体内伝熱予測のための微小循環系を考慮した血流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 including microcirculation in human body on parallel environment
 研究代表者
 白崎 実（MINORU SHIRAZAKI）
 横浜国立大学・教育人間科学部・准教授
 研究者番号：50302584

研究成果の概要：血流を含めた体内の熱的な挙動を調べるうえでは、人体の末梢部分すなわち毛細血管を含んだ微小循環領域を考慮する必要がある。微小循環領域にも血液やその他の液体の流れがあり、その流れはよりマクロな領域から流れ込むものであることから、結局、ミクロな領域とマクロな領域を一緒に取り扱う必要がある。本研究では、血液の流れと体内組織の熱現象とを考慮するためのモデリングと計算手法の構築を試み、対象とする現象への適合性について確認を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成 20 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：バイオフィ体力学

1. 研究開始当初の背景

人体に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経由して再び巨視的循環系へとめぐる血液の流れがある。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。この血流による体内の熱輸送は人体にとって本質的なものであることから、広い応用分野や関連分野が存在する。例えば、癌の温熱療法やレーザーの医療応用、低温外科手術などに

おいては各部位の熱的な挙動を詳細に把握する必要があり、血流を含めた体内の熱輸送現象に関する知見は実際の医療を行う上でも重要である。

微小循環系に対して実験的に観測や測定を行う場合、通常、細胞組織が「生きている状態」であることが必要であり、これが実験的アプローチを困難にしている。このため、計算機を用いた数値シミュレーションは有力な手段と考えられるが、数値シミュレーションにおいても、(1) 巨視的循環系から微小

循環系に至る流れと熱輸送を考えた場合、スケールがマクロからマイクロへ変わる、(2) 微小循環系には組織、血液の流れる血管の他にリンパ液が流れる毛細リンパ管があり、これらの中で液体の交換がなされ「染み込む」あるいは「染み出す」流れがある、といった課題がある。

人体部位の熱的な挙動を把握するためには、微小循環系のみを考慮することは適切ではなく、巨視的循環系と微小循環系の流れを同時に扱うことが望ましい。特に、熱輸送現象を考えるうえでは上記の (2) について考慮する必要がある。言い換えると、マクロな血液の流れとともに、液体（血液、リンパ液）と固体（細胞）が混沌とした領域における流れと熱輸送を表現することがひとつの鍵であると言える。

2. 研究の目的

微小循環系、特に毛細血管内の流れに関する研究としては、赤血球の変形や毛細血管の分岐等を考慮した解析が盛んに行われている。本研究ではそれらの形状を含めた詳細に立ち入るのではなく、それよりはややマクロな視点から微小循環系の流れと熱輸送を取り扱うことを考える。すなわち、人体内部の流れおよび伝熱現象を把握するために微小循環部分のマイクロな領域だけではなく、巨視的循環系（マクロ）と微小循環系の両方を取り扱い、血液の流れと体内組織の熱現象とを考慮できるモデリングおよび計算手法の構築を目指す。

3. 研究の方法

毛細血管を含む微小循環領域の詳細構造全てを把握することは困難であるが、微小循環領域では毛細血管壁を通して水や他の物質が周囲の組織の間で交換されていると言われており、血管壁の透過性についても考慮する必要がある。このことから、マクロな視点から見た微小循環系領域というのは、「血液（液体）でもあり、細胞組織（固体）でもある」という中間的な存在と考えることができる。そこで局所的な血液やリンパ液の流れや熱輸送そのものは不明であっても、ある領域において液体の質量や熱の収支は合っているという点に着目する。基本的な考え方としては多孔質体内の熱流体の取り扱いに準じ、有限体積法にもとづいて計算セル表面における流体の面積占有率（AOF 値）と計算セルにおける流体の体積占有率（VOF 値）を考慮した FAVOR 法を用いることで、任意の部位における流れおよび熱輸送現象を表現する。

FAVOR 法は Fig. 1 に示すように、物体形状の近似レベルにおいては通常の VOF 法とカッ

トセル法との中間的な位置づけであると考えられる。しかし、FAVOR 法はカットセル法とは異なり、計算セル表面と固体との交差面については、セル表面の流体の面積占有率を用いるだけであるという点が異なる。前述のような流体と固体の中間的な存在を表現した計算セルの概念図を Fig. 2 に示す。

微小循環系領域における細胞組織、毛細血管、毛細リンパ管等の具体的な形状全てを把握することは難しいが、この考え方によってセル内部の細胞組織や毛細血管、毛細リンパ管の個々の形状を陽に考慮することなく、流体の質量および熱の収支を合わせることができると考えられる。計算セル毎の流体占有率と流体の面積占有率を設定することが出来れば、具体的な形状が判明しているマクロな血管部分と微小循環領域部分とを同時に表現することが出来るため、これら両領域にわたるシームレスな解析が期待出来る。

人体に関する既知の物性値についてはそれらを採用するが、その一方で、微小循環領域の微細構造や生きた状態での具体的な諸データなどについては入手困難なものも多い。このため、入手出来ないものについては仮の値を設定して計算を行う。また、ここでは、原則として計算セルにおける AOF 値 (A) は VOF 値 (V) と同一値に設定する (Fig. 3)。しかし隣接する計算セルで VOF 値が小さくなる (AOF 値も小さくなる) 場合には、小さい方の AOF 値を採用することで不整合が起きないようにしている。

対象とする流体はニュートン流体であるとする。また、微小循環領域はもちろんであるが、微小循環領域に接続する動脈および静脈におけるレイノルズ数も小さいことから、流れは非圧縮性の層流として取り扱う。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、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。なお、流体部分と固体部分の熱交換を支配するエネルギー方程式についても、多孔質体における流体と固体の熱の取り扱いに関する考え方を採用し、組織部分 (固体) の流体に接する表面積が大きいほど熱が伝わりやすいモデルを採用する。

4. 研究成果

流入部から流路に沿って管径が広がり、中央で最大の幅となった後に流出部で元の管径に戻るようなモデルを考える (Fig. 4)。図の中央部分に近づくにつれて流体占有率は小さくなって固体占有率が増す一方で、流路の断面積が大きくなっている。中央部分を過ぎると逆に流体占有率は大きくなり、流路の断面積は小さくなる。これは、動脈および静

脈に接続された微小循環領域を模擬している。管路に流入した流れは、流体占有率が低くなり流路の断面積が増えることによって広がるとともに流速値を低下させ、流体占有率の増加にともなってほぼ元の速度に回復する。Fig. 5 は、流入部のレイノルズ数が 100 の場合の定常状態の流速ベクトルの分布を示している。VOF 値と AOF 値を領域全てにおいて 1 に設定した場合、つまり管路全体が流体のみで構成されて固体が存在しない場合 (Fig. 6) と比較して、中央部の広い範囲に流れが行きわたっていることがわかる。このモデルにより、血管が分岐を繰り返すことで血管の断面積が増加していくこと、および固体を含む領域を通り抜ける流体 (血液やリンパ液) の動きが表されている。末梢部分 (微小循環部分) に近づくにつれて流速は低下しつつも流体質量の保存性が保たれ、微小循環領域に流れが広く行きわたる状況を表現できたと言え、簡単なモデルではあるものの、毛細血管を含む微小循環領域近くを模擬した流れを再現することが出来たと考えられる。

流入部におけるレイノルズ数を小さくすることは、より小さいスケールで現象を見ること、すなわちよりマイクロな部分をクローズアップして見るということに相当する。レイノルズ数を 10 とし、VOF 値を 1 から 0.5 まで変化させるとともに、最も小さい VOF 値を持つ微小循環領域相当部分をさらに広くしたモデルが Fig. 7 および Fig. 8 である。人体の末梢部分に相当する微小循環領域を加熱すると、流体の移流と拡散の両方の効果によって、固体 (組織部分) に温度変化が生じていることが確認できる (Fig. 9)。これは、部位の一部を加熱した際に、内部の血流等の流れの影響を考慮した上で、組織部分および流体の温度変化をとらえていることに相当する。

本手法はそのまま 3 次元解析への拡張が可能である (Fig. 10)。また、汎用的な PC 環境上でターンアラウンドタイムを短縮するためにプログラムの並列化を行った結果、解析規模や他の条件に依存するものの、特別なチューニングを行っていない状態で 4 コアを利用した並列計算により 1 コア時の 2.3 から 2.5 倍程度の速度向上が得られることが確認できた。課題としては、形状および血液等と細胞組織との熱交換のモデリングの精度を高めるために、人体についてのもう少し詳細なデータやパラメータを得ることが挙げられる。

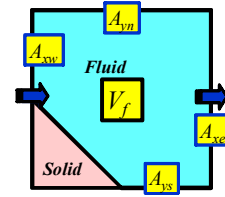


Fig.1 計算セルの概念図

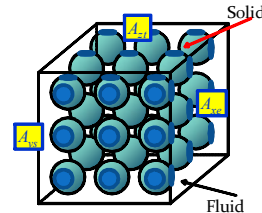


Fig.2 計算セルの概念図

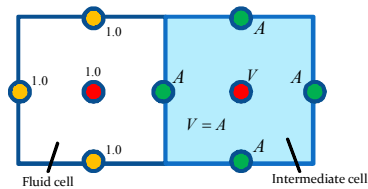


Fig.3 隣接する計算セルの VOF 値および AOF 値

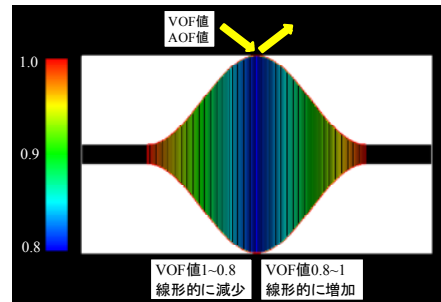


Fig.4 VOF 値の分布 (モデル A)

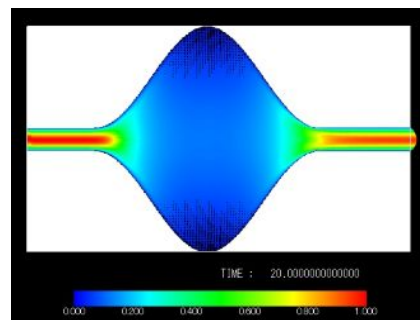


Fig.5 流速分布 (モデル A, レイノルズ数 100)

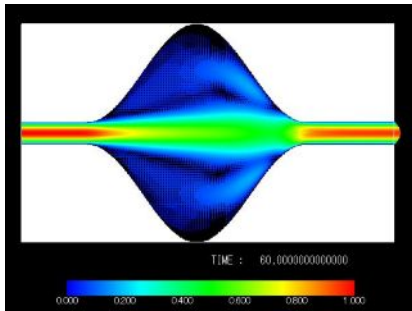


Fig.6 全域でVOF値が1の場合の流速分布 (モデルA, レイノルズ数100)

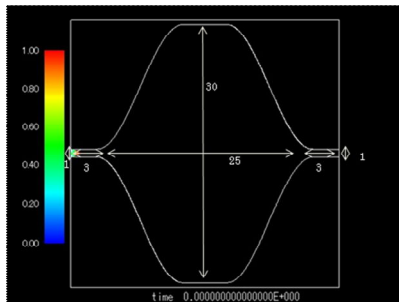


Fig.7 計算領域 (モデルB)

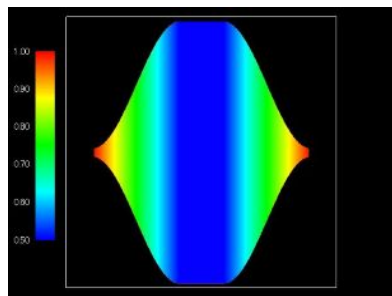


Fig.8 VOF値の分布 (モデルB)

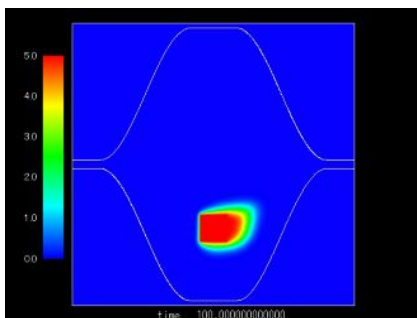


Fig.9 組織 (固体) 部分の温度分布 (モデルB)

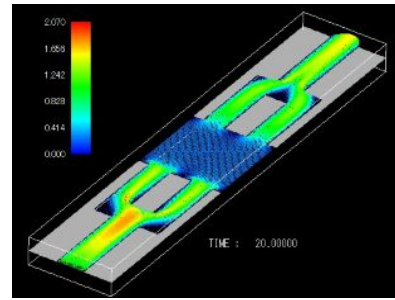


Fig.10 3次元解析結果 (レイノルズ数100, z=const.面での流れ)

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 4 件)

- ① 白崎 実, "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", 日本計算工学会第15回計算工学講演会, 2010年5月27日, 福岡
- ② Minoru SHIRAZAKI, "A computational model for flow and heat transfer in microcirculation", 2nd German-Japanese Workshop on Computational Mechanics, March 29, 2010, Kanagawa
- ③ 白崎 実, "直交格子にもとづく微小循環領域の熱輸送現象モデル", 日本機械学会第21回計算力学講演会, 2008年11月1日, 沖縄
- ④ 白崎 実, "生体の微小循環領域における熱輸送現象に対する計算モデルの検討", 日本機械学会 2007年度年次大会, 2007年9月11日, 大阪

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白崎 実 (MINORU SHIRAZAKI)
 横浜国立大学・教育人間科学部・准教授
 研究者番号: 50302584

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者