

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360099
 研究課題名(和文) 多孔質体の応用および生体内輸送機構の解明のための熱分散のモデリングと実験的検証
 研究課題名(英文) Theoretical modeling and experimental verification of thermal dispersion for its applications in porous media and exploration of bio-transfer mechanism
 研究代表者
 中山 顕 (NAKAYAMA AKIRA)
 静岡大学・工学部・教授
 研究者番号：60155877

研究成果の概要(和文)：

今まで、様々な形で提案されてきた生体組織の熱輸送の式について、多孔質体理論に基づき検討した。局所体積平均理論を用いることで、最小の仮定の下に、三次元一般生体熱移動の式が導かれることを示した。今回初めて対向する動脈と静脈の灌流の効果に加え、機械的分散の効果を加味することに成功した。

この三次元一般生体熱移動の式を用いて、肺癌の冷凍壊死療法における凍結過程のシミュレーションを実施した。本研究で確立した機械的分散のモデルおよび三次元一般生体熱移動の式が、工業的応用や生体輸送機構を考える上で極めて有効であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：

In this study, the effects of mechanical dispersion on the transport phenomena in porous media were investigated in details both experimentally and theoretically, for porous media applications in both engineering and bio-transfer. A general three-dimensional bioheat equation for local tissue heat transfer has been derived with less assumptions, exploiting a volume averaging theory commonly used in fluid-saturated porous media. The volume averaged energy equations obtained for the arterial blood, venous blood and tissue were combined together to form a single energy equation in terms of the tissue temperature alone. As for an application of the present bioheat equation, the freezing process within a tumor during cryoablation therapy was investigated both analytically and numerically. An excellent agreement between the analytical and numerical results has been achieved for the time required to freeze the tumor using the cryo-probe of one single needle.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2008年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：生体組織, 多孔質, 熱分散

1. 研究開始当初の背景

多孔質内の流れにおいては、流体が構造体を通り抜ける際に、運動量やエンタルピの機械的混合(Mechanical dispersion)が盛んに行われる。この機械的分散の効果が巨視的速度の均一化や見かけの熱伝導の大幅な増加となって現れる。特に、後者は熱分散現象として、今日まで、多くの研究がなされてきたが、未だに未解明の部分が多い。粒子充填層を始め、多孔質は様々な工業分野で応用されているが、エンタルピや濃度などのスカラー量の輸送において、機械的分散の効果を正しく把握することは、装置の高効率化・最適化をはかる上で極めて重要な鍵を握る。(なお、本研究では熱分散と物質分散の両者に注目するが、熱移動と物質移動の類似性から両者の情報はほぼ完全な互換性を有する。

この機械的分散現象の解明は生体工学においても重要なテーマの一つとなっている。多孔質内の機械的分散現象は、毛細管の上流側で注入された物質が管断面内の速度の不均一性によりどのように下流に広がりを見せるかという問題、すなわちテイラーの分散問題と密接に関連している。そのため、機械的分散現象は、造影剤などの毛細血管内での微小スケール物質移動、生体内輸送機構の解明との関連で医療工学の分野からも注目されており、その解明は、MRIなどの医療機器における検出技術の改良にも繋がるものと期待される(図2参照)。また、この機械的分散の効果なくして、呼吸死腔の下での、気道の空気輸送は説明できず、機械的分散の把握は、呼吸器のガス交換過程の解明において極めて重要視されている。

一方、巨大スケールから成る場においても、機械的分散現象の重要性が認識されている。

例えば、地下水の汚染の予測などに代表される、大規模数値シミュレーションにおいても分散の効果を適切に表現することが求められており、環境汚染およびその対策を議論する上でも分散現象の完全な解明が待たれている。このように、機械的分散現象は、微小スケールから巨大スケールにわたり我々のまわりに広範囲に見られるものであり、これを数学的に的確に記述し、現象を予測しうるところまでに導くことは、極めて波及効果も大きく、有意義であることは言うまでもない。

2. 研究の目的

機械的分散現象については、古くから勾配拡散モデルが確かな裏付けもなく用いられてきた。様々なソースの実験データを下に勾配拡散モデルにおける熱分散係数の経験式が種々提案されてきた。しかしながら、有名なYagiらの実験式とFried-Combarnousの実験データには一桁以上の違いがあるといった具合に勾配拡散モデルの限界も指摘されてきた。本研究では、このように未だに十分に解明されているとは言えない、多孔質体内の機械的分散現象に注目した。機械的分散が多孔質体内の輸送現象に及ぼす顕著な効果について実験的および理論的考察を行った。これらの考察に基づき構築された数学モデルを活用することで、多孔質体の応用の可能性をさらに広げると共に、生体輸送機構の解明を可能とすることを目的とした。

3. 研究の方法

我々が最近Navier-Stokesおよびエネルギーの式より導いた熱分散熱流束ベクトル、すなわち、速度とエンタルピのそれぞれの空間平均

値からのずれの積の空間平均値 $\rho c_p \langle \bar{uT} \rangle$ の輸送方程式に基づき多孔質内熱分散現象のモデル化を考えた。輸送方程式中の空間輸送項を除く各項(拡散項, 生成項, 再分配項, 散逸項)について, モデル化を行うべく, フルオレサイン・ナトリウム溶液を用いた濃度の可視化を行った。濃度と青色輝度値を相関することで, 濃度場を明らかにした。実験と併せて, 多孔質構造体モデルを用いた一連の数値実験を実施し, 実験データと比較するとともに, 測定が困難な相関量を数値実験データで補間した。このようにして確立した熱分散熱流束ベクトル輸送方程式を, テイラー問題, 毛細管群, 多孔質構造体群, 充填層の流動場に見られる機械的分散現象に適用し, その一般性および妥当性を検証した。

以上の, 実験的および数値解析的検討を経て, 生体組織の輸送機構における機械的分散効果の定式化を行った。特に, 生体組織に置ける血流の機械的分散効果を対向する静脈と動脈の灌流効果との比較で議論し, モデル化することに成功した。

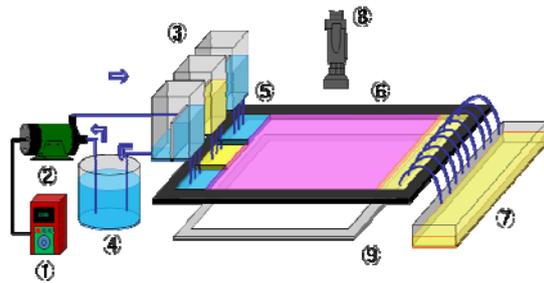
4. 研究成果

本研究における一連の成果の一部は, 既に公表されている。未発表のものについても, 今後, 公表する予定である。

多孔質体の工業的応用や生体輸送機構を考える上で重要となる機械的分散効果について, 実験的および理論的検討を行い, その定式化に成功した。このモデルを局所体積平均し得られた巨視的支配方程式に組み込み, 肺癌の冷凍壊死療法の凍結過程を含む, 様々な多孔質体内輸送現象の検討を行った。

まず, フルオレサイン・ナトリウム水溶液を用いた濃度場の可視化実験を行った。巨視的モデルに基づく数値計算結果と比較する

ことで, 分散係数を決定する方法を提案し, その有効性を示した。角柱群から成る二次元の多孔質構造体を作成し, 多孔質構造体流路の中央部よりフルオレサイン・ナトリウム水溶液を流入させた。機械的分散の様態を光学系を用いて画像撮影し, 青色輝度より濃度分布を可視化した。得られた分布を, 巨視的モデルに基づく数値シミュレーション結果と比較することで, 機械的分散係数を求めた。これらの結果は直接数値計算より決定した値と良好な一致を示すことから, 提案した可視化および分散係数の決定方法が妥当であることが分かる。



- ① Inverter ② Pump ③ Overflow tank
- ④ Inlet reservoir ⑤ Rectifying zone
- ⑥ Test section ⑦ Exit reservoir
- ⑧ Camera ⑨ Light panel

図1 機械的分散の可視化実験装置

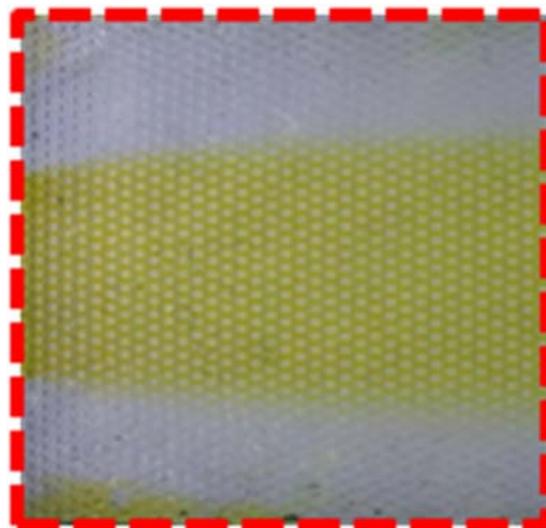


図2 可視化された濃度場

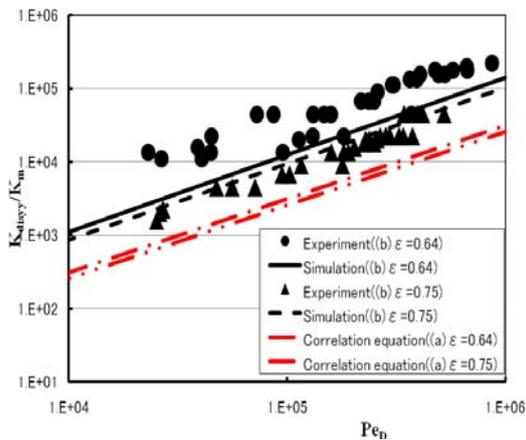


図3 機械的分散係数

今まで、様々な形で提案されてきた生体組織の熱輸送の式について、多孔質体理論に基づき検討した。局所体積平均理論を用いることで、最小の仮定の下に、三次元一般生体熱移動の式が導かれることを示した。今回初めて対向する動脈と静脈の灌流の効果に加え、機械的分散の効果を加味することに成功した。

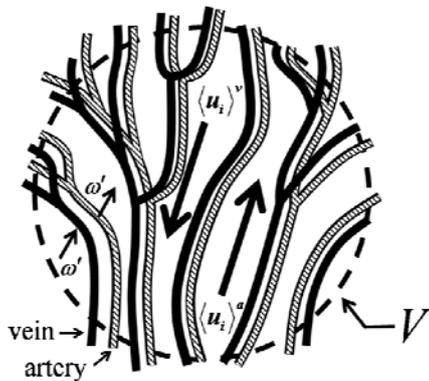


図4 局所体積平均理論における検査体積

動脈、静脈および組織に関するエネルギーの式を局所体積平均理論に基づき体積平均化し、三つの巨視的エネルギーの式を導いた。平均化の際に出現する、トーチユオシティ、機械的分散、血液灌流および界面熱伝達の各項

について、巨視的モデリングを実施し3エネルギーモデルを提案した。さらに、動脈、静脈および組織における温度の導関数がほぼ同じと予測されることに留意し、これらの3エネルギー式を連立させることにより、生体組織の温度のみを含む三次元一般生体熱移動の式を導いた。このようにして導かれた式より、血液灌流の効果が見かけの熱伝導率の増加として表現できること、また血流の機械的分散効果が無視し得ないことが分かった。

三次元一般生体熱移動の式：

$$\left(2\varepsilon_a \rho_f c_p + (1-2\varepsilon_a) \rho_s c_s\right) \frac{\partial \langle T \rangle^s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(2\varepsilon_a k_f + (1-2\varepsilon_a) k_s\right) \delta_{jk} + \frac{17(\rho_f c_p \varepsilon_a)^2 u_b^2 l_{jk}}{7a_d h_a} \right) \frac{\partial \langle T \rangle^s}{\partial x_k} + (1-2\varepsilon_a) S_h$$

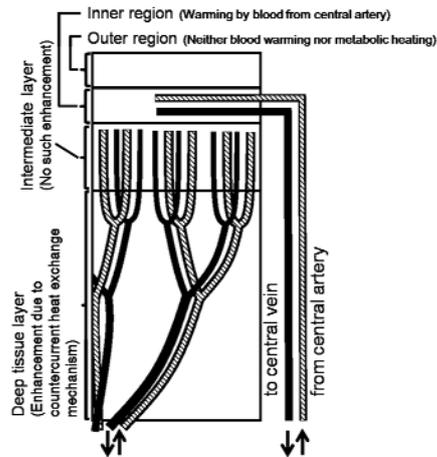


図5 生体組織の三層モデル

この三次元一般生体熱移動の式を用いて、肺癌の冷凍壊死療法における凍結過程のシミュレーションを実施した。一つのプローブで凍結し得る癌細胞の大きさに限界があることを明らかにし、この限界半径 (Limiting radius) を事前に把握しておくことが、治療プロトコルを考える上で重要であることを示した。

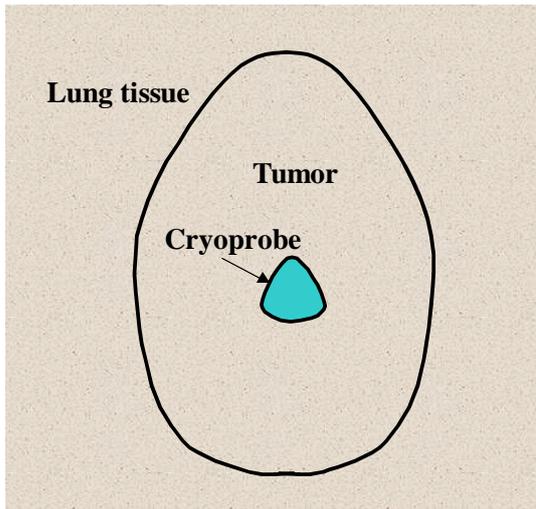


図6 肺癌の凍結過程の数学モデル

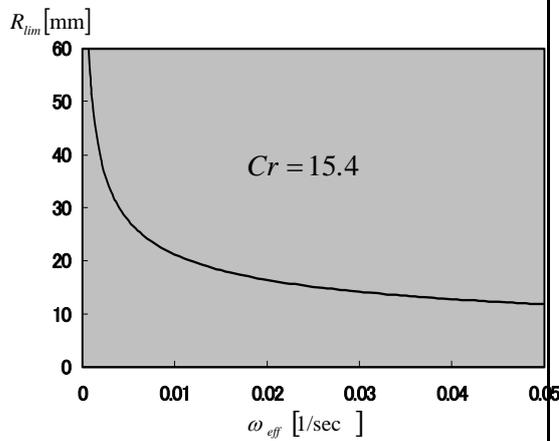


図7 限界半径と血液灌流率の関係

さらに、本研究で得られた機械的分散効果に関する知見を基に、肺におけるガス交換のメカニズムについて考察した。肺がなぜ23分岐しているのかについて、物質移動抵抗の観点から、その理由を探ってみた。当然のことながら、分岐数が増すと、ガス交換面積は増えるが、圧力損失が増す。これらの相反する効果を一元物質移動モデルに組み込み、全体の物質移動抵抗が最小となる分岐数を求めることで、肺がなぜ23分岐しているのかを説明することに成功した。すなわち、肺の分岐は、物質移動抵抗が最小となるように設定されていることを、本物質移動モデルに生

理的データを代入することで明らかにした。

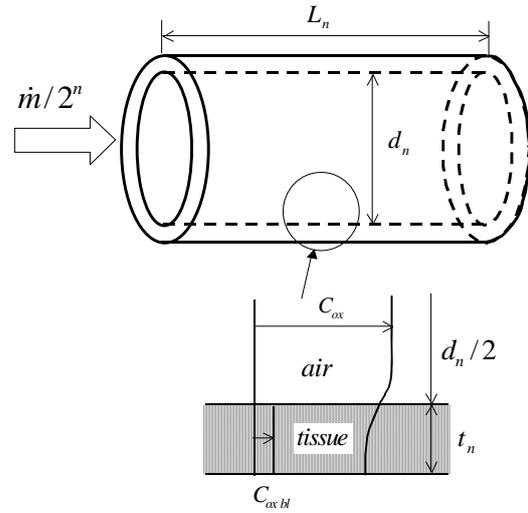


図8 気道壁の灌流モデル

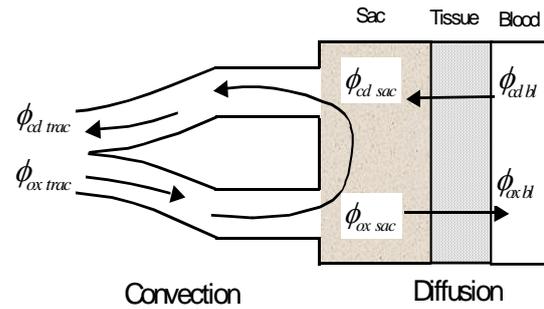


図9 肺の一次元物質移動モデル

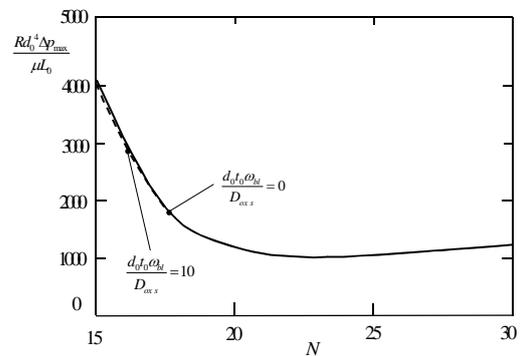


図10 物質移動抵抗と分岐数

以上、研究成果の概略として上に記したように、本研究で確立した機械的分散のモデルおよび三次元一般生体熱移動の式が、工業的応用や生体輸送機構を考える上で極めて有効であることが分かった。

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)

[雑誌論文] (計 11 件)

- 1) The limiting radius for freezing a tumor during percutaneous cryoablation, A. Nakayama and F. Kuwahara, K. Iwata et al., JOURNAL OF HEAT, 査読有, Volume: 130 Issue: 11, pp. 111101.1-111101.6, 2008.
- 2) Why do we have a bronchial tree with 23 levels of bifurcation? A. Nakayama, F. Kuwahara and Y. Sano, HEAT AND MASS TRANSFER, 査読有, Volume: 45 Issue: 3 Pages: 351-354, 2009.
- 3) A general macroscopic turbulence model for flows in packed beds, channels, pipes, and rod bundles, A. Nakayama and F. Kuwahara, J. FLUIDS ENGINEERING, 査読有, Vol. 130, pp. 101205-1-6, 2008.
- 4) A general bioheat transfer model based on the theory of porous media, A. Nakayama and F. Kuwahara, Int. J. Heat Mass Transfer, , 査読有, Volume: 51, pp. 3190-3199, 2008.
- 5) A porous media approach for bifurcating flow and mass transfer in a human lung, F. Kuwahara, Y. Sano, J. J. Liu and A. Nakayama, J. Heat Transfer, , 査読有, VOL. 131, pp. 101013-1-5, 2009
- 6) A Macroscopic Model for Countercurrent Bioheat Transfer in a

Circulatory System, A. Nakayama, F. Kuwahara and W. Liu, J. POROUS MEDIA, 査読有, Volume: 12, pp. 289-300, 2009.

- 7) Numerical modeling of a composting process with aeration, F. Kuwahara, Y. Sano, A. Nakayama, K. Nakasaki and T. Fukazawa, J. Porous Media, 査読有, Vol. 12 (10), pp. 927-938, 2009.
- 8) A study on interstitial heat transfer in consolidated and unconsolidated porous media, A. Nakayama, K. Ando, C. Yang, Y. Sano, F. Kuwahara and J. Liu, Heat Mass Transfer, 査読有, 45 (11), pp. 1365-1372, 2009.

[学会発表] (計 10 件)

1. 寒川 哲幹, 桑原 不二朗, 中山 顕, 多孔質体の機械的分散の画像処理, 第 47 回日本伝熱シンポジウム, Vol. I, 2010. 5, 札幌市.
2. 佐野 吉彦(静岡大), 桑原 不二朗, 本山 英明, 中山 顕, Crossflow-Tubular 熱交換器の熱分散, 第 47 回日本伝熱シンポジウム, Vol. I, 2010. 5, 札幌市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 顕 (NAKAYAMA AKIRA)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号: 60155877

(2) 研究分担者

桑原不二朗 (KUWAHARA FUJIO)
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号: 70215119

(3) 連携研究者

()

研究者番号: