

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18760060  
 研究課題名（和文）赤血球のレオロジー特性と凝集構造の数理的解析とヘルスマonitoring技術開発への応用  
 研究課題名（英文）Mathematical approach and application for rheological properties and particle behaviors of the blood cells  
 研究代表者  
 氏名（ローマ字）：渡辺 知規（WATANABE TOMONORI）  
 所属機関・部局・職：千葉大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：50323431

研究成果の概要：赤血球などの血液や血管などに関する情報をもとにしたヘルスマonitoring技術開発への応用にむけて、包括的な数理モデルを構築することを目指して研究を遂行した。そのひとつとして、動脈硬化や動脈瘤など、血管壁の形態や力学的性質が、正常部と比べて不均一に分布している部位が脈波に及ぼす影響を、力学的観点から広く明らかにした。このような研究の結果として、ヘルスマonitoring技術開発を展開していく上での有用な基礎的知見を得ることができた。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	240,000	3,740,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：計算力学，数理的解析，赤血球

## 1. 研究開始当初の背景

近年，知能材料としての利用を目的として，強磁性コロイド分散系に関する研究が活発に行われている。強磁性コロイド分散系とは，強磁性微粒子を母液に懸濁しコロイド状態とすることによって，印加した外部磁場に応答し，機能性を発揮する磁性流体がなす系のことである。この系の主な特徴は，外部磁場の下で粒子が凝集して巨大クラスターを形成することである。この巨大クラスターは，流れ場中では大きな抵抗となり，見かけの粘度の著しい増加をもたらす。流体工学の分野

では，この外部磁場による粘度増加の特徴を応用し，粘度の制御が可能なダンパーの開発をはじめ，さまざまな工学的応用の試みがなされている。現在，強磁性コロイド分散系の解析には，分子動力学法をはじめとする種々の計算力学的手法が応用され，コロイド粒子の力学的挙動や凝集構造発生メカニズムについて次第に明らかになりつつある。最近では，一端に正，他端に負の磁荷をもつ棒状のコロイド粒子を単純せん断流中に分散させた系に対し，定常状態での特性が詳しく調べられ，外部から印加した磁場が，コロイド

粒子の配向分布とレオロジー特性に及ぼす影響が定性的に明らかにされている。このような強磁性コロイド分散系での解析手法を、本研究では、磁場下での、血流中の赤血球の配向分布、レオロジー特性、および、凝集構造を明らかにするために応用していくことにより、ヘルスマニタリング技術開発に役立つ知見を得ようとするのが主たる動機となっている。

## 2. 研究の目的

本研究の主たる目的は以下の三つである。

(1) 強磁性コロイド分散系での計算力学的解析手法を応用して、これまで実験によって調べられている赤血球の特性を再現する数理モデルを作り、血流中の赤血球の配向分布、レオロジー特性および凝集構造を調べ、種々の赤血球の特性が発現するメカニズムを数理的に明らかにすること。

(2) 赤血球の生化学的反応も数理的にとりこんだ、より包括的で普遍的な、血流中の赤血球の力学的特性を解析するための標準となる数理モデルを構築すること。

(3) 構築した数理モデルをもとにして、シミュレータの開発やヘルスマニタリング技術開発のために応用していくこと。

## 3. 研究の方法

本研究の主たる方法は、数値シミュレーションである。数値シミュレーションの妥当性の検討には、まず何よりも、シミュレーションの結果に関して、実験・観測データとの詳細な比較検証が重要となる。しかし、それだけでは充分ではない。そもそも、シミュレーション結果が、数値シミュレーションのもととなる数理モデルから適切に得られているのかどうかといった計算力学的な観点からの吟味も非常に重要となる。言い換えると、数値計算においては、計算機が有限精度で計算処理を行うことに起因して、しばしば、予期しない不適切な結果が得られることが知られており、そのために、数値計算が適切に遂行されているかどうかを詳細に検討することが重要となっている。特に、このことは、将来的に本研究を臨床現場に応用することを想定した場合には、シミュレーション結果には、安全性の観点から非常に高い精度が要求されるため、極めて重要になってくる。そこで本研究では、適切な数値シミュレーション結果を得るために、数理的観点から様々な

考察を行う。具体的な例としては、対象とするモデルの方程式について、摂動論などを駆使し、できるだけ解析的に厳密な取り扱いを行い、数値計算結果との比較を行い、結果の精度や妥当性の吟味を行う。これらの試みにより、結果の正しさを判定する方法を構築し、適切さがともなった数値シミュレーションを行っていく。

## 4. 研究成果

上記目的(1)のもとで、「研究の方法」での方針に従い、適切な数値シミュレーション結果を得るための数理的観点からのアプローチとして、以下の(1)~(6)の成果を得た。また、上記目的(2)と(3)のもとでは、ヘルスマニタリング技術開発に応用していくための包括的な数理モデルを構築することを目指して研究を遂行し、主として以下の(7)の成果を得た。

(1) 強磁性棒状粒子からなる希釈なコロイド分散系を対象にして、磁場および二次元流れ場中における粒子の配向分布を理論的に検討した。適切な変数変換と摂動展開の方法を用いることによって、時間を含む支配方程式の厳密解を求める方法を具体的に示し、実際に厳密解を用いて統計平均量を算出した。解析の結果、流れ場のみでは、配向分布の定常状態を実現できず、たとえ、磁場を与えたとしても必ずしも実現されるとは限らないことを明らかにし、定常状態が存在するための条件を導いた。印加した磁場に対する配向の応答性として、定常状態に収束する速さに関する評価量を導出した。これらの結果を、査読付き論文として公表した。

(2) 強磁性棒状粒子からなる非希釈なコロイド分散系を対象にして、磁場と流れ場中における、粒子間相互作用の働きと効果を時間を含めて理論的に検討し、定量的に評価した。平均場を用いることによって粒子間相互作用を考慮した。基礎方程式に対し、配向分布関数としての厳密解を得た。これにより、これまで数値的にしか得られなかった平均場を解析的に得た。粒子間相互作用の働きは、鎖状クラスター方向への拘束であり、拘束の強さはほぼ、アスペクト比に反比例する。非希釈系の効果としては、系が非希釈になることにより、希釈系の場合とくらべ、粒子間相互作用によって、粒子配向の安定性が向上し、磁場に対する応答が速くなる。これらの結果を、査読付き論文として公表した。

(3) 強磁性棒状粒子からなる希釈なコロイド分散系を対象にして、三次元流れ場中において

て印加磁場をうける粒子の配向分布を理論的に検討した。適切な変数変換と摂動展開の方法を用いることによって、時間を含む支配方程式の厳密解を求める方法を具体的に示した。厳密解を用いた解析の結果、三次元流れ場中における粒子の印加磁場に対する応答性として、配向分布の安定性と収束性、および、粒子の配向性が明らかになった。本研究の解析方法によって、空間中の代表的な三方向として、直交座標系の各軸方向を中心に任意の方向に磁場が印加されたときの配向分布の特性に対して、時間を含めた解析的な取り扱いの方法が明らかになった。これらの結果を、査読付き論文として公表した。

(4) 強磁性棒状粒子からなる希釈なコロイド分散系を対象にして、三次元流れ場中において印加磁場をうける粒子のレオロジー特性を理論的に検討した。印加磁場に対する粘度の主要な振舞いは、磁場を引数とする単純な分数関数によって記述され、少数の分数関数の係数によって、分類されることを解析的に明らかにした。流れ場に対する磁場の割合が大きいほど、粒子の配向が安定し、粘度の定常状態が早く実現される。磁場を印加したとしても、必ずしも粘度が得られるとは限らない。印加磁場を大きくしたとしても、必ずしも粘度が増加するとは限らない。これらの結果を、査読付き論文として公表した。

(5) 強磁性棒状粒子からなる非希釈なコロイド分散系を対象にして、磁場と三次元流れ場中における、粒子間相互作用の働きと効果を時間を含めて理論的に検討し、定量的に評価した。平均場を用いることによって粒子間相互作用を考慮した。基礎方程式に対し、配向分布関数としての厳密解を得た。これにより、これまで数値的にしか得られなかった平均場を解析的に得た。粒子間相互作用には、鎖状クラスター方向への拘束の働きがあり、拘束の強さは、アスペクト比の大きな粒子ほど小さくなる。非希釈系の効果としては、系が非希釈になることにより、希釈系の場合とくらべ、粒子間相互作用によって、粒子配向の安定性が向上し、磁場に対する応答が速くなる。これらの結果を、査読付き論文として公表した。

(6) 強磁性棒状粒子からなる非希釈なコロイド分散系を対象にして、磁場と三次元流れ場中における粒子のレオロジー特性を時間を含めて理論的に検討し、定量的に評価した。平均場を用いることによって粒子間相互作用を考慮した。基礎方程式に対し、配向分布関数としての厳密解を得ることにより、これまで数値的にしか得られなかった粘度を解析的に求めた。粒子間相互作用によって、定

常状態への収束時間が短くなり、粘度の応答性は向上する。磁場の影響が小さいほど、粒子間相互作用による粘度の変化が顕著になる。アスペクト比が大きな粒子ほど、形状因子により粘度そのものは大きくなるが、粒子間相互作用が粘度に与える影響は小さくなる。これらの結果を、査読付き論文として公表した。

(7) 血管壁の形態や力学的性質が脈波に及ぼす影響を力学的観点から広く明らかにすることをを行った。そのひとつとして、動脈硬化や動脈瘤など、血管壁の形態や力学的性質が、正常部と比べて不均一に分布している部位を、力学的観点から、血管の不均一部として一般化して捉えることにより、血管に生じた不均一部が脈波に及ぼす影響を、力学的観点から考察した。この研究では、不均一性は、本質的に、二つのパラメータによって記述できることを明らかにした。さらに、不均一部を通過する脈波の振幅と速度、および、不均一部にて発生する反射波に変化をもたらす要因を明らかにした。脈波が不均一部を通過する際に生じる変化は、七つの場合に分類できることを明らかにし、各場合が実現される条件を具体的に示した。これらの一連の研究成果を、学会講演ならびに査読付き論文などとして公表した。

以上が本研究の主たる成果である。現在、ヘルスマニタリング技術開発は、国の内外を問わず、非常に重要であるとされている。このような状況の中、本研究の成果は、ヘルスマニタリング技術を開発していく上での有用な基礎的知見を与えており、今後、さらなる展開が期待できると考えられる。

## 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)

〔雑誌論文〕(計 13 件)

渡辺 知規，“血管の不均一部が脈波に及ぼす影響”，日本機械学会論文集 B 編，掲載決定，(2009)，査読有

渡辺 知規，小柳津圭介，“一次元格子モデルによる異質部を有する管を伝わる波の挙動解析”，日本機械学会東海支部第 58 期総会・講演会講演論文集，No.093-1，221-222，(2008)，査読無

渡辺 知規，小柳津圭介，“血管壁の力学的性質と脈波伝播特性”，日本機械学会関東支部山梨講演会講演論文集，No.080-4，257-258，(2008)，査読無

渡辺 知規, “異質部を有する血管の一次元格子モデルにおけるスケール特性”, 日本機械学会論文集B編, Vol.74(745), 1970-1976, (2008), 査読有

渡辺 知規, “血管の異質部がもつ力学的性質が脈波に及ぼす影響”, 日本機械学会論文集B編, Vol.74(743), 1564-1571, (2008), 査読有

渡辺 知規, “血管壁の材料非線形性を考慮した一次元格子モデルの数値解析”, 日本機械学会論文集B編, Vol.74(739), 523-529, (2008), 査読有

渡辺 知規, “三次元流れ場中にある強磁性棒状粒子からなる非希釈コロイド分散系の粒子間相互作用がレオロジー特性に及ぼす影響”, 日本機械学会論文集B編, Vol.74(738), 267-272, (2008), 査読有

渡辺 知規, “三次元流れ場中にある強磁性棒状粒子からなる非希釈コロイド分散系の粒子間相互作用が粒子配向に及ぼす影響”, 日本機械学会論文集B編, Vol.73(735), 2234-2241, (2007), 査読有

渡辺 知規, “三次元流れ場中にある強磁性棒状粒子の配向分布に印加磁場が及ぼす影響”, 日本機械学会論文集B編, Vol.73(735), 2227-2233, (2007), 査読有

渡辺 知規, “三次元流れ場中にある強磁性棒状粒子のレオロジー特性に印加磁場が及ぼす影響”, 日本機械学会論文集B編, Vol.73(731), 1494-1501, (2007), 査読有

渡辺 知規, “印加磁場が流れ場中にある強磁性棒状粒子の配向分布に及ぼす影響”, 日本機械学会論文集B編, Vol.73(728), 1037-1044, (2007), 査読有

渡辺 知規, “強磁性棒状粒子からなる非希釈コロイド分散系における粒子間相互作用が粒子配向に及ぼす影響”, 日本機械学会論文集B編, Vol.73(727), 774-781, (2007), 査読有

Tomonori WATANABE, Masayuki AOSHIMA, Akira SATOH, "Rheological Properties and Particle Behaviors of a Nondilute Colloidal Dispersion composed of Ferromagnetic Spherocylinder Particles subjected to a Simple Shear Flow (Analysis by Means of Mean-field Approximation for the Two Typical External Magnetic Field Directions)", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 302, 347-355, (2006), 査読有

〔学会発表〕(計2件)

渡辺 知規, 小柳津圭介, “一次元格子モデルによる異質部を有する管を伝わる波の挙動解析”, 日本機械学会東海支部第58期総会・講演会, 2009年3月18日, 岐阜

渡辺 知規, 小柳津圭介, “血管壁の力学的性質と脈波伝播特性”, 日本機械学会関東支部山梨講演会, 2008年10月25日, 山梨

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.em.eng.chiba-u.jp/~lab2/nabe/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 知規 (WATANABE TOMONORI)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 50323431