

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04164

研究課題名(和文) 支配方程式の型変化を伴う物体まわりの粘弾性流体の流れに関する研究

研究課題名(英文) A study of viscoelastic flow problems around bodies associated with the change of type of the governing system of equations

研究代表者

三神 史彦 (Mikami, Fumihiko)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40272348

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：一様流中に置かれた物体からは、せん断波と呼ばれる渦度の波が発生する。波の広がる半径は粘弾性マッハ数のみに依存し、支配方程式の型を決める。一方、半径方向の渦度分布はデボラ数のみによって決まり、渦度の輸送は、デボラ数が比較的小さいときは拡散型、デボラ数が比較的大きいときは波動型となり、物体まわりの流れは支配方程式の型変化だけでなく、デボラ数の影響も受けることを明らかにした。また、デボラ数がかかなり大きい場合は、流体中の張力の振る舞いが重要な役割をすることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Josephら(1985)が提唱した物体まわりの粘弾性流体の流れの空気力学的描像では粘弾性マッハ数のみがパラメータに使われているのに対して、本研究で提唱するモデルでは、粘弾性マッハ数とデボラ数の2つのパラメータを使用しており、実際の流れ場をよりの確に表すことができる。デボラ数がかかなり大きい流れでは、張力が流体に貼り付いて運動する様子が見られたことから、磁気流体力学的な描像も重要になってくることが示唆される。

研究成果の概要(英文)：In a uniform viscoelastic fluid flow, shear waves or vorticity waves are generated on the body surface. The radius of the propagating wavefront depends only on the viscoelastic Mach number and determines the type of the governing equations. In contrast, the Deborah number determines the radial profile of vorticity that can be classified into two different types depending on the Deborah numbers. One is the diffusion-type transport when the Deborah number is relatively small, and the other is the traveling wave-type transport when the Deborah number is relatively high. The flow is affected by the Deborah number effect as well as by the consequence of a change of type of governing equations. We also find that the tensile forces in the fluid play an important role in the flow at a considerably high Deborah number.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 粘弾性流体 型変化 数値シミュレーション 可視化 粘弾性マッハ数 デボラ数

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の学術的背景 粘弾性流体中では、流体のもつ弾性によって、せん断波が伝播することが知られている。横波のせん断波の伝播速度は縦波の圧力波よりもかなり遅く、物体の運動速度がせん断波の伝播速度を簡単に超えることがある。このとき、せん断波の伝播速度に対する物体の運動速度で定義される粘弾性マッハ数が重要なパラメータとなり、流体中の波動現象を考慮する必要が出てくる。しかし、粘弾性流体中での波の伝播は、非ニュートン流体力学やレオロジーの分野ではほとんど取り扱われることのなかった領域である。

Joseph [文献①②] は、粘弾性流体のさまざまな流れの問題を波動現象の切り口から論じており、その中で、粘弾性流体の複雑な流れ現象を波動の観点から捉え直そうという試みが見られる。例えば、弾性要素のばねと粘性要素のダッシュポットが直列につながれた Maxwell モデルと呼ばれる粘弾性流体の基本モデルを用いて、Maxwell モデルに従う流体の定常流れの線形化した支配方程式を圧縮性流体のオイラー方程式と同じようにベクトル形の 1 階の偏微分方程式で表し、特性方程式を解くことによって係数行列の固有値から偏微分方程式の特性曲線の方向を求めている。特性曲線の方向のうち 2 つは流線に相当する実数 (重解)、2 つは非圧縮流れであることによる純虚数、残り 2 つは流速や応力場によって 2 つの実数または複素数の値をとり、最後の 2 つが支配方程式の型変化と関係する。物体まわりの流れでは、物体から発生した擾乱が特性曲線に沿って伝播すると解釈できる。特性曲線の方向が複素数から実数に変化するときに起こる支配方程式の型変化は、航空機が音速を超えたときに現れる現象のように、流れ場に大きな変化をもたらす。このように Joseph は、粘弾性流体の支配方程式に関する偏微分方程式の理論に基づいて、粘弾性流体の流れを空気力学的描像によって理解しようと試みた。

(2) 学術的「問い」 支配方程式の特性曲線の情報は、流れ場と密接な関係があると考えられるが、圧縮性オイラー方程式では型変化によって特性曲線の方向がすべて実数になるのに対して、Maxwell モデルの支配方程式の場合は型変化によっても特性曲線の方向のすべてが実数にはならない複合型と呼ばれるタイプの偏微分方程式に分類されることに注意が必要である。このような複合型の偏微分方程式の性質はあまりよく知られていないため、実験結果や数値シミュレーション結果と対比させながら、支配方程式の型変化や特性曲線との関係を調べるのが重要になる。

また、一般に粘弾性流体の流れを支配するパラメータには、レイノルズ数、デボラ数、弾性数、粘弾性マッハ数の 4 つがあり、このうち 2 つが独立であるが、一様流中におかれた物体まわりの流れの場合、型変化に影響を与えるパラメータは粘弾性マッハ数のみである。粘弾性マッハ数のほかのパラメータが流れに及ぼす影響については、よくわかっていない。

(3) 本研究の着想に至った経緯 研究開始時点までに研究代表者らは、振動平板から発生するせん断波の可視化計測によって、粘弾性流体中のせん断波の伝播速度や減衰特性についての基本的な知見を得ていた [文献③]。その後の研究で、粘弾性流体中を沈降する球のまわりにせん断波マッハコーンが形成されること [文献④]、鞭毛螺旋模型の回転による推進力特性が粘弾性マッハ数 1 を境に急変すること [文献⑤] などが明らかになり、支配方程式の型変化や特性曲線が重要な役割をしていると考えるに至った。

(4) 国内外の研究動向 上に述べた Joseph による研究のほかに粘弾性流体中での波動現象を論じたものは非常に少なく、以下の書籍の一部で取り扱われている程度である。Tanner [文献⑥] の教科書では、せん断波の伝播についての記述がある。Böhme [文献⑦] の教科書は、波動現象や特性曲線も取り扱った数少ない教科書である。また、Owens & Phillips [文献⑧] の粘弾性流体の数値計算に関する本でも型変化について触れている。これらのほとんどは理論研究であり、対応する実験例がないものも多い。国内の研究動向も、波動現象を意識したものは極めて少ない。本研究の特徴は、支配方程式の型変化という視点で粘弾性流体の流れ現象を見渡し、理論と実験の対比に基づいた研究を行う点にある。

2. 研究の目的

物体まわりの粘弾性流体の流れについて、型変化や特性曲線を基本とした粘弾性流体の流れを支配する偏微分方程式に関する理論と、可視化した流れの画像から得られる情報に基づいて、圧縮性オイラー方程式の型変化との違いや、型変化が流れ場や物体にはたらく力に与える影響を明らかにする。粘弾性流体の流れは基礎分野から応用分野まで幅広く見られるが、このような流れを取り扱う非ニュートン流体力学やレオロジーの学問分野では、せん断波の伝播や支配方程式の型変化についてほとんど取り上げていない。本研究では、いくつかの興味ある粘弾性流体の流れの問題に着目して、非ニュートン流体力学やレオロジーでは取り上げてこなかった支配方程式の型変化という視点から新しい解釈を付け加えることを目的とする。

3. 研究の方法

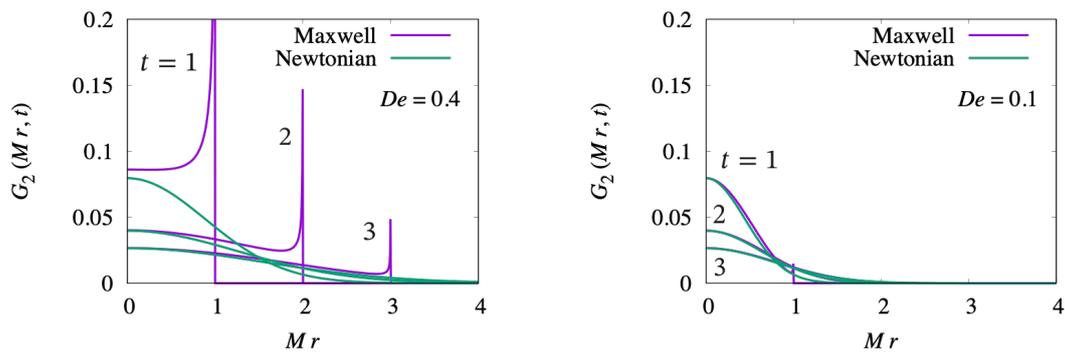
(1) 粘弾性流体中の渦度輸送に関する理論の構築 一様流中に物体を置いたときに、流速、圧力、偏差応力の値が一様流の状態からわずかに変化するものとして、これらを Maxwell 流体の二次元定常流れの支配方程式に代入して二次の微小量を省略すれば、渦度の伝播を表す波動型の 2 階の偏微分方程式（電信方程式）が得られる。本研究では、物体表面での渦度の生成を表す生成項のある電信方程式を考えた。この解は、無限領域でのグリーン関数を用いて書き表せることが知られている。このグリーン関数は渦度の輸送プロセスを表していることから、考えている電信方程式のグリーン関数の性質を調べることで、粘弾性流体中での渦度輸送モデルを構築した。

(2) 可視化実験 粘弾性流体として、界面活性剤のひも状ミセル水溶液を用いた。ひも状ミセルは屈折率の異方性をもつ。流体粒子が変形すると流体中のひも状ミセルの配向が起こり、複屈折が観測され、流体には応力が発生する。容器中で静止している流体の中で円柱を運動させたときの複屈折分布を観測することで、円柱まわりの流れ場の応力分布を可視化する。微弱な複屈折を捉えるために、クロスニコルの光学系に鋭敏色板を置いて、白色光源を用いたときに観察される干渉色の変化をカラー CMOS カメラで撮影して記録した。粘弾性マッハ数は、計測したせん断波の伝播速度に基づいて算出した。また、コーンプレート型粘度計を用いて流体のゼロせん断粘度を計測し、流れ場を支配するもう一つのパラメータであるデボラ数を算出した。

(3) 数値シミュレーション 流れの支配方程式は、運動量の式、連続の式、および粘弾性流体の UCM (Upper Convected Maxwell) モデルの構成方程式である。計算手法には流れ関数-渦度法を採用し、埋め込み境界法の一つである penalization 法を用いて物体を表現する。移流項には Kurganov-Tadmor スキーム、時間積分には 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法を用いた。制限関数には、generalized minmod リミタを用いた。計算対象として、時刻 0 で円柱が突然出発したときの流れを扱う。入口境界では一様流を与え、出口境界では対流流出条件を与えた。また、上下の境界は周期境界条件を与えた。静止した円柱表面では、penalization 法によって粘着条件が課せられる。2 ノードからなる PC クラスタ型の計算サーバを作成し、条件を変えた計算を並列して実行した。

4. 研究成果

(1) 粘弾性流体の渦度輸送モデル 電信方程式のグリーン関数の形から、渦度が波動的に広がる半径は粘弾性マッハ数のみに依存し、デボラ数が半径方向の渦度の分布形状を決めていることがわかった。流れの代表速度に対する流体の緩和時間の比であるデボラ数が比較的大きい場合は、渦度は波紋のように中心から外側に向かって波動的に広がっていく（図 1 (a)）。このとき、渦度分布の最大値は波頭の位置にあり、渦度は波によって運ばれるが、やがて波は減衰し、半径方向の渦度分布は中心部に最大値をもつ形へと変化していく。一方、デボラ数が比較的小さい場合は、渦度はニュートン流体の場合のように渦核の特徴を保ったまま拡散的に広がり、中心部分に渦度が集中する（図 1 (b)）。このとき、拡散で情報が伝播する速度は拡散方程式に従う場合とは異なり、電信方程式から決まる波の伝播速度に制限される。



(a) デボラ数が比較的大きい場合

(b) デボラ数が比較的小さい場合

図 1 渦度の半径方向分布（半径 r を粘弾性マッハ数 M で規格化）

この結果からわかる最も重要なことは、粘弾性マッハ数は広がっていく渦度の波の波頭の半径を決めているだけにすぎず、実際に波頭の位置まで渦度が到達しているかどうかは、デボラ数によって決まるということである。すなわち、空気力学の問題のように型変化によって流れの様相が大きく変化するの、渦度が波動的に輸送されるデボラ数が比較的大きい場合に限られるということである。デボラ数によって特徴が大きく変わる渦度輸送の機構は、粘弾性流体の流れの多様性の発現にもつながっていると考えられ、実験で得られたデータに基づいて帰納的に法則を見つけ出すことを困難にしている。

(2) 支配方程式の型変化に伴う流れ場の変化 図2は、一様流中におかれた円柱まわりの流れのシミュレーション結果を示したもので、円柱表面で発生した渦度が一様流流速で下流に流れていくときのようすを、粘弾性マッハ数から予測される波面の拡がりを表した円で示している。図中に示した円の中に、デボラ数によって決定される図1に示したような渦度分布をあてはめてみると、数値シミュレーションで得られた渦度の分布に近いことがわかる。円の拡がりには粘弾性マッハ数のみによって決まり、粘弾性マッハ数が1よりも大きい条件では、波面の包絡線がせん断波のマッハコーンを形成するため、流れの様相が変化することが予想される。デボラ数が比較的大きい0.4の場合は、粘弾性マッハ数が0.8の結果(図2(a))ではマッハコーンが形成されていないのに対して、粘弾性マッハ数が3.0の結果(図2(b))ではマッハコーンの形成が見られ、予想どおりの結果となった。ところが、粘弾性マッハ数が同じ3.0の場合でも、デボラ数が比較的小さい0.1の条件では、図2(c)のように渦列を伴う流れが観察され、マッハコーンが形成されなかった。これは、図1からわかるように、デボラ数が比較的小さい時の渦度の分布は、中心付近のみに渦度が集中しているためと解釈できる。すなわち、型変化と関係する円の拡がりとは、実際の渦度の拡がりに対応していないことによる。

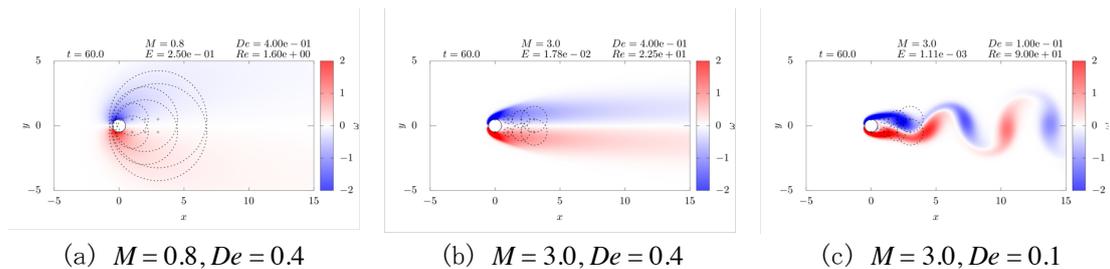


図2 円柱まわりの流れの渦度分布

この結果は、粘弾性マッハ数が1よりも大きい場合に、必ずしも Joseph の粘弾性流体の支配方程式の型変化の理論から予測されるような流れにはならないことを示している。これに対して、上に述べた粘弾性マッハ数とデボラ数をパラメータとする渦度の輸送モデルを考えることによって、粘弾性マッハ数とデボラ数を指定したときの数値シミュレーションの結果をうまく説明できるようになる。本研究で提唱した渦度輸送モデルは、実際の流れ場をより的確に表すことができ、物体まわりの粘弾性流体の流れの直観的な理解に役立てることができる。

(3) 渦度輸送モデルの適用限界 デボラ数の増加とともに弾性力の影響が支配的になってくるため、微小擾乱の仮定のもとで得られた渦度輸送モデルが適用できなくなると考えられる。図3に示すように、デボラ数がかかなり大きくなると、シミュレーション結果ではマッハコーンがV字型から弓形に変化し、円柱から離脱するようすが見られる。円柱から離脱した丸みを帯びたマッハコーンは、鋭敏色法による可視化実験でも確かめられている(図4)。したがって、本研究で提唱した渦度輸送モデルは、弾性力に比べて慣性力が支配的な流れ場、すなわちレイノルズ数に対するデボラ数の比で定義される弾性数が小さい場合に有効なモデルであるといえる。

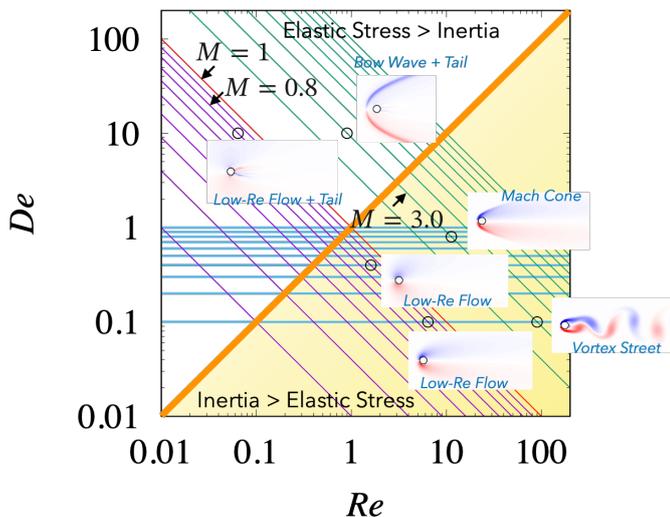


図3 渦度輸送モデルの適用範囲(黄色の部分)

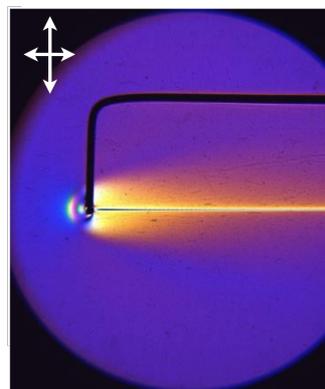


図4 鋭敏色法による可視化写真 ($M = 2.6, De = 387$)

(4) 高デボラ数における流れ 高デボラ数での数値シミュレーション結果からは、当初予想していなかった興味深い現象が観察された。図5は、デボラ数が3.0の場合の円柱列のまわりの流れの様子を示している。円柱に衝突する流体塊は円柱前方で上下に引き伸ばされて高い主応力差（張力）を生じ、円柱に絡め取られるようにして、後流に筋状の領域を形成する。デボラ数が高い場合には張力が流体に凍結して運動すると考えられ、他の流体と混ざることがない。このため、円柱間には狭い流路が形成され、流体が大きな速度で通過する。また、図6のデボラ数が6.0の条件では、円柱から伸びる筋に波打つような不安定性が見られた後、張力の筋のつなぎ変えが発生している。

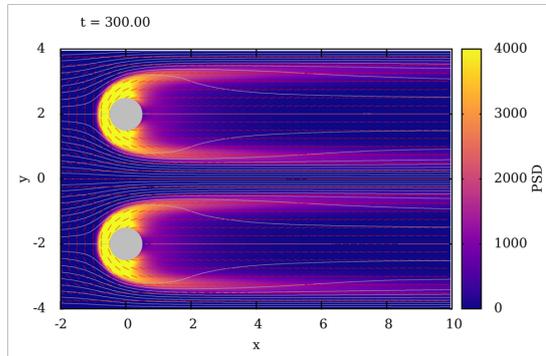


図5 円柱列まわりの流れの主応力差分布 ($De = 3.0, Re = 750$)

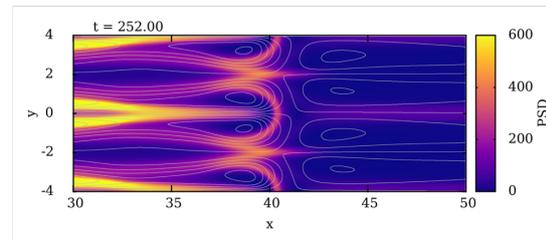


図6 円柱列後流での張力のつなぎ変え ($De = 6.0, Re = 750$)

粘弾性流体と磁気流体の支配方程式は、デボラ数と磁気レイノルズ数が無限大の極限で、アナロジーが成立することが知られている。磁気流体の場合に見られる磁場の凍結や磁気リコネクションに相当する現象は粘弾性流体中では知られていないが、このシミュレーション結果で観察された現象は、張力の凍結とリコネクションによるものと推定され、高デボラ数の流れでは、磁気流体力学的な描像も重要になってくることが示唆される。

<引用文献>

- ① Joseph, D. D., Renardy, M., Saut, J. C., Hyperbolicity and change of type in the flow of viscoelastic fluids, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 87(3) 1985, 213-251
- ② Joseph, D. D., *Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids*, Springer, 1990, 127-208
- ③ 山本 将寛, 三神 史彦, ひも状ミセル水溶液中を伝播するせん断波の可視化による粘弾性計測, *日本機械学会論文集*, 81(823), 2015, 14-00610 (13pp)
- ④ 三神 史彦, 八木 良明, 粘弾性流体中でのマッハコーンの形成, *宇宙航空研究開発機構特別資料*, JAXA-SP-16-007, 2016, 161-166
- ⑤ 田島 和哉, 三神 史彦, 粘弾性をもつ各種流体中における鞭毛螺旋模型の推力特性, *日本機械学会論文集*, 2018, 18-00303 (16pp)
- ⑥ Tanner, R. I., *Engineering Rheology*, 2nd. ed., Oxford University Press, 2000, 334-335
- ⑦ Böhme, G., *Strömungsmechanik nichtnewtonscher Fluide*, Teubner, 2000, 276-280
- ⑧ Owens, R. G., Phillips, T.N., *Computational Rheology*, Imperial College Press, 2002, 195-199

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Fumihiko Mikami
2. 発表標題 A Lagrangian vortex model for viscoelastic fluid flows
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2020+1) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤 怜士, 三神 史彦
2. 発表標題 並列円柱を通過する粘弾性流体の流れに及ぼすデボラ数の影響
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三神 史彦, 富樫 優天
2. 発表標題 円柱をよぎる粘弾性流体の高速流れに及ぼすデボラ数の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三神 史彦
2. 発表標題 物体まわりの粘弾性流体の流れ：波動，型変化，張力の視点から
3. 学会等名 日本レオロジー学会第18回希薄溶液の流動学講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三神 史彦, 後藤 怜士
2. 発表標題 並列配置された円柱をよぎる粘弾性流体の流れの数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三神 史彦
2. 発表標題 粘弾性流体中の渦度輸送と円柱後流の構造
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三神 史彦, 富樫 優天
2. 発表標題 偏光画像による粘弾性流体計算の可視化
3. 学会等名 日本機械学会 関東支部第27期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三神 史彦, 大塚 隆太郎
2. 発表標題 粘弾性流体中の球の後流
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------