

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05784

研究課題名(和文)粘弾性流体中を運動する物体によるせん断波の発生と流れに関する研究

研究課題名(英文) Generation of shear waves and their flow fields by a moving body in a viscoelastic fluid

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：粘弾性流体中では横波のせん断波が伝播する。希薄な溶液中ではせん断波の伝播速度が比較的遅いため、流体中の物体の運動速度がその流体中のせん断波の伝播速度を超えることがある。このとき、沈降する球のまわりにマッハコーンが形成されるなど、粘弾性流体の流れ場に大きな変化がもたらされることを、せん断波の伝播が顕著に見られるいくつかの粘弾性流体を用いた実験で明らかにした。これらの結果は、粘弾性流体の複雑な流れ現象の理解を容易にする粘弾性マッハ数を考慮することの重要性を示唆している。

研究成果の概要(英文)：Shear waves, or transverse waves, can be propagated in viscoelastic fluids. Since the shear wave speed is slower in dilute solutions, the speed of an object through a fluid sometimes exceeds the speed of shear waves in the fluid. It is demonstrated from the experiments with some of the viscoelastic fluids showing significant shear wave propagation, that this leads to a significant change in the flow field of viscoelastic fluids including the formation of Mach cones around a falling sphere. The results suggest the importance of considering viscoelastic Mach numbers that facilitates the understanding of a complex phenomenon associated with viscoelastic fluid flow.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 粘弾性流体 波動 粘弾性マッハ数 流体力 特性曲線 マッハコーン

1. 研究開始当初の背景

粘弾性流体中では、物体が急加速や振動をするときに、横波であるせん断波が発生する。希薄な粘弾性流体中でのせん断波の伝播速度の大きさは数 10 cm/s 程度であるため、物体の速度変化が生じる時間スケールがせん断波が伝播する時間スケールと同等になる場合があり、波動を考慮する必要が出てくる。しかし、粘弾性流体中でのせん断波の伝播は、レオロジーや非ニュートン流体力学ではほとんど取り扱われてこなかった領域であり、さまざまな流れの問題を Joseph (1990) が波動現象として理論的に論じているほかは、Tanner (2000) がせん断波の伝播について著書の一部分で触れている程度である。

粘弾性流体の複雑な流れ現象を流体中の波動の観点から捉え直そうという試みが、Joseph らの理論研究の中に見られる。これは、粘弾性流体の流れ現象には、波動現象が重要な役割をしているものがあるという立場である。例えば、物体の運動速度がせん断波の伝播速度を超える場合に、いわゆる超音速の状態となり、渦度の不連続面の衝撃波が生じることを Joseph が線形理論による解析で指摘しており、支配方程式の型変化や特性曲線に基づく議論の重要性を示唆している。しかし、これらの理論に対応するような実験例は多くない。研究代表者は、実験やその結果の解釈を困難にしている原因が流体の多様性にあり、せん断波の伝播が顕著に現れるような条件下での実験が必要であると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、粘弾性流体の流動現象を流体中の波動の観点から見直して、複雑で特異な粘弾性流体の流れ現象の見通しをよくし、現象の理解を省力化することを目指す。波動が重要となる現象には、板を面内で突然動かす Stokes の第 1 問題、板を面内で振動させる Stokes の第 2 問題、せん断波の伝播速度よりも大きな速度で運動する物体まわりの流れ、急縮小流れとも関連する吸い込み流れ、などがある。本研究では、波動の伝播が顕著に現れるように最適な条件に設定した実験を行い、PIV (Particle Image Velocimetry) や偏光イメージング計測を利用して、上記のような基本的な流れ場を解析する。また、数値計算結果と実験結果の比較も行う。

3. 研究の方法

(1) 実験流体 粘弾性をもつ流体には、主として CTAB/NaSal 系のひも状ミセル水溶液を使用し、高分子水溶液にも対象を広げて比較を行った。ニュートン流体との比較には、グリセリンを用いた。界面活性剤水溶液および高分子水溶液の濃度は、それぞれの実験に最適なせん断波の伝播速度が得られるように決めた。実験流体中には、可視化のための蛍光トレーサ粒子を混入した。

(2) せん断波の伝播特性 レオメータで物性値を計測する代わりに、平板を面内で突然動かすことによって発生させたせん断波の一次元の波動伝播のようすを観測することで伝播速度を直接測定した。平板の駆動には、電動スライダまたは空気圧シリンダを用いた。せん断波に伴う流れ場を PIV によって計測し、波面に相当する渦度のピーク位置を追跡することで伝播速度を算出した。また、ピーク値の減衰から、波動が顕著に見られる流体かどうかを評価した。さらに、円偏光クロスニコルによる波面の計測も行った。

(3) 沈降球まわりの流れ 静止流体中を自由落下する球について、せん断波の伝播速度に対する球の沈降速度の比で定義される粘弾性マッハ数に着目し、粘弾性マッハ数が 1 より大きい場合と小さい場合について実験を行い、球まわりの流れ場を PIV 計測によって調べた。

(4) 鞭毛螺旋模型の推力特性 微生物の中には螺旋状の鞭毛を剛体的に回転させて推進するものがある。このような螺旋形状の模型は、流体中に模型以外のものを挿入することなく、その運動を制御できる利点がある。静止流体中で螺旋模型をステッピングモータで回転させたときに発生する推力を電子天秤で計測し、螺旋模型まわりの流れ場を PIV 計測によって調べた。せん断波の伝播速度に対する螺旋波の速度の比で定義される粘弾性マッハ数の影響を調べた。

(5) 急縮小部へ流入する流れ 平行平板間流路において、縮小比 5:1 の急縮小部上流の流れ場を PIV 計測によって調べ、急縮小部で発生した擾乱の伝播のようすを調べた。流量を変えた実験を行い、せん断波の伝播速度に対する平行平板間流れの最大流速の比で定義される粘弾性マッハ数の影響を調べた。

4. 研究成果

(1) せん断波の伝播特性 ひも状ミセル水溶液中で平板から発生したせん断波の瞬時速度分布と渦度分布を重ねて描いたものを図 1 に示す。赤色は平板の運動開始時に発生

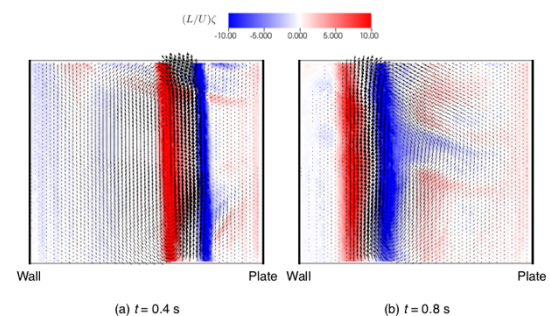


図 1 平板から発生した平面波の瞬時速度分布と渦度分布 (40 mM CTAB/NaSal 水溶液、対イオンモル比 4、平板が運動を開始した時刻を $t = 0$ とする)

した反時計回りの渦度で、青色は平板の運動停止時に発生した時計回りの渦度である。右端の平板から発生した渦度の波は、平面波の状態を保ちながら左向きに伝播し、向かい合う平面に到達すると反射した。

図2は、渦度の波の伝播の様子を示した時空間画像である。渦度のピーク位置が一定速度で伝播しているようすがわかる。ひも状ミセル水溶液では、せん断波の減衰は小さく波動の伝播が顕著に見られる。高分子水溶液であるキサンタンガム水溶液やCMC水溶液では、せん断波は比較的早く減衰する。ニュートン流体のグリセリンでは、板の運動によって発生した渦度はすぐに消滅する。

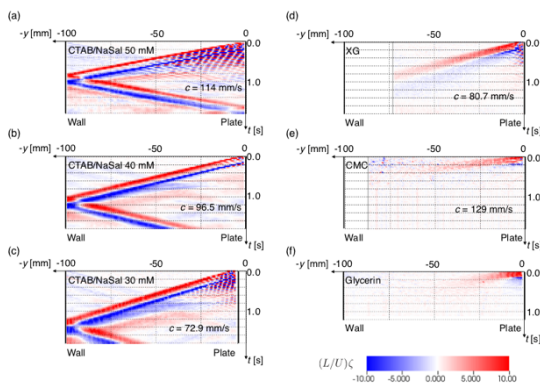


図2 各種流体中で伝播するせん断波の時空間画像 (a) 50 mM CTAB/NaSal 水溶液, (b) 40 mM CTAB/NaSal 水溶液, (c) 30 mM CTAB/NaSal 水溶液, (d) 0.5 wt% キサンタンガム水溶液, (e) 3 wt% CMC 水溶液, (f) グリセリン

図3は、平板から発生したせん断波を円偏光クロスニコルによって観測した結果で、応力波形に相当する。せん断波が左から右に伝播するにつれて、ピーク値が減衰していくようすがわかる。実験で得られた減衰特性は、弾性要素のばねと粘性要素のダッシュポットを直列につないだ Maxwell モデルで予測される理論値とは一致せず、パルス幅が時間とともに広がりながら減衰するようすは、Maxwell モデルにニュートン粘度を加えたときの数値計算結果と傾向が一致した。

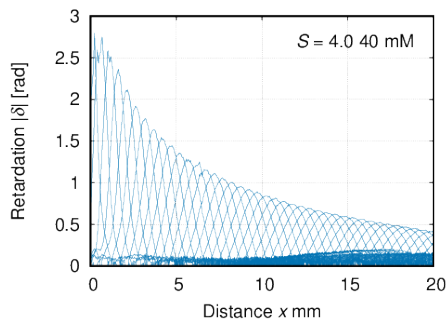


図3 円偏光クロスニコルによる応力波形の測定結果 (50mM CTAB/NaSal 水溶液, 対イオンモル比 $S = 4$, 1/200 秒ごとに波形を重ねて表示)

図3のような応力波形のピーク位置から算出した、ひも状ミセル水溶液中でのせん断波の伝播速度を図4に示す。溶液濃度が高いほ

どせん断波の伝播速度は大きく、対イオンのモル比の影響は小さい。

以上の結果から、波動伝播が顕著に見られる粘弾性流体の代表として、ひも状ミセル水溶液をあげることができる。

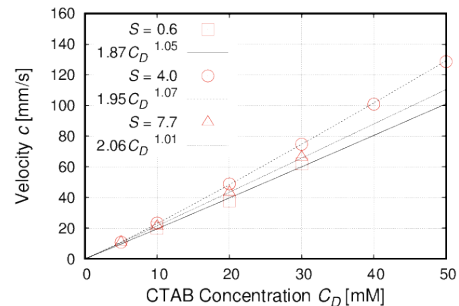


図4 CTAB/NaSal 水溶液中のせん断波の伝播速度 c と溶液濃度 C_D および対イオンモル比 S との関係

(2) 沈降球まわりの流れ 図5に、粘弾性マッハ数 M が $M = 0.20$, $M = 0.83$, および $M = 1.62$ で落下する球まわりの速度ベクトル場を示す。また、図5に対応する渦度場を図6に示す。渦度場の等高線において、赤が反時計回り、青が時計回りの渦度に対応し、渦度の大きさを色の濃さで表している。

$M = 0.20$ の流れは、後流を除いてほぼ前後対称である。後流に見られる鉛直上向きの流れは negative wake として知られており、どのマッハ数でも確認できる。 $M = 1.62$ の流れでは、球のまわりにマッハコーンが形成されているようすがはっきりわかり、渦度場においてその形状をより容易に確認できる。渦度場では、マッハコーンの前方は乱されていない領域 (zone of silence) になっており、球表面で発生した渦度はマッハコーンの外

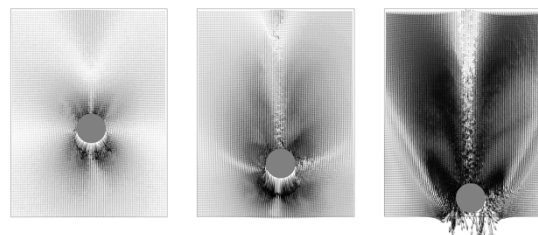


図5 粘弾性流体中を沈降する球まわりの速度場 (5mM CTAB/NaSal 水溶液, 対イオンモル比 1)

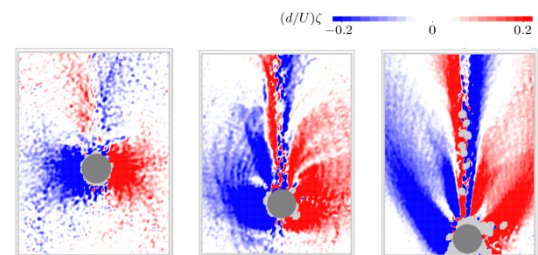


図6 粘弾性流体中を沈降する球まわりの渦度場 (5mM CTAB/NaSal 水溶液, 対イオンモル比 1)

側には伝わっていない。マッハコーンは、図7に示したように、粘弾性流体中を移動する球から発生したせん断波の包絡面であると考えることができる。また、実験結果はマッハ角とマッハ数の間の関係を満たしている。

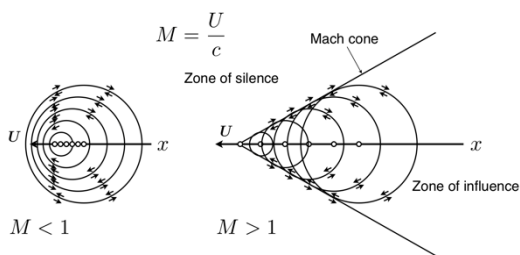


図7 粘弾性流体中を動く波源からのせん断波の伝播

Joseph によって理論的に示された粘弾性流体中でのマッハコーンの形成が、波動伝播が顕著にみられるひも状ミセル水溶液中を落下する球のまわりで実際に観測された。ここで得られた結果は、粘弾性流体の流動現象を理解する上での粘弾性マッハ数の重要性を示唆している。

(3) 鞭毛螺旋模型の推力特性 図8は、ひも状ミセル水溶液中における螺旋模型の回転角速度と推力の関係を示したものである。6種類の螺旋模型はそれぞれ弧長が異なるので、単位弧長あたりの推力で整理している。螺旋模型の概形を、それぞれ図8の中に示している。図中にはまた、周速度を基準とする粘弾性マッハ数 M_c と、螺旋波の位相速度を基準とする粘弾性マッハ数 M_x がそれぞれ1に相当する角速度を示している。

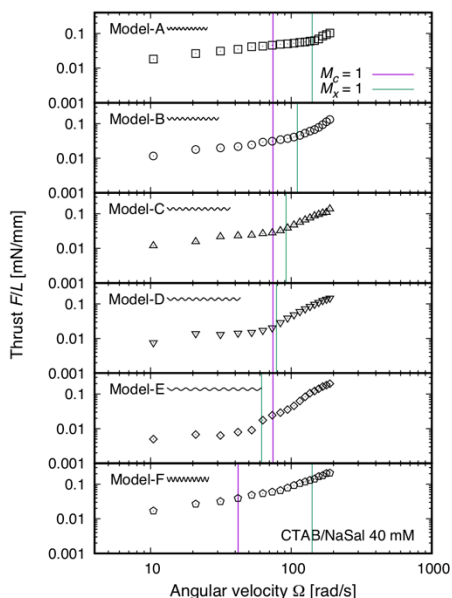


図8 螺旋模型の単位弧長あたりの推力と角速度の関係 (40mM CTAB/NaSal 水溶液、対イオンモル比4、周速度基準の粘弾性マッハ数 $M_c = 1$ と螺旋波の位相速度基準の粘弾性マッハ数 $M_x = 1$ に相当する角速度を示している)

単位弧長あたりの推力は回転角速度とともに増加するが、 $M_c = 1$ と $M_x = 1$ に相当する臨界角速度において、その増加率に変化が見られる。 $M_c = 1$ では増加率がわずかに減少するが、 $M_x = 1$ では増加率が急に大きくなり、 $M_x < 1$ での増加率から予測される推力よりも大きな過剰な推力が発生するようになる。

それぞれの溶液ごとに単位弧長あたりの推力と螺旋接線方向速度との関係をまとめたものを図9に示す。ひも状ミセル水溶液中では、いずれも $M_x = 1$ における増加率の急変がはっきり見られる。キサンタンガム水溶液中でも $M_x = 1$ における増加率の急変があるが、わずかである。また、CMC 水溶液とグリセリン水溶液の場合は、増加率の変化が見られない。このことは、図2に示したせん断波の減衰の大きさと関係していると考えられる。

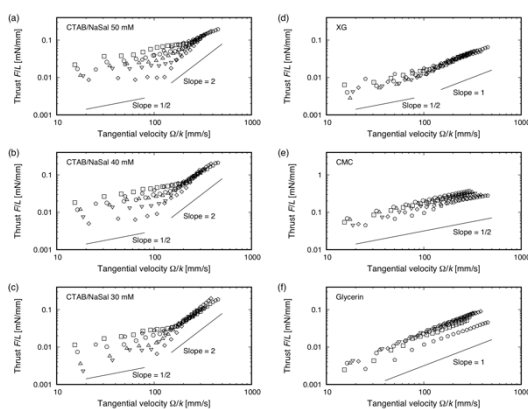


図9 各種粘弾性流体中での螺旋模型の推力特性 (a) 50 mM CTAB/NaSal 水溶液, (b) 40 mM CTAB/NaSal 水溶液, (c) 30 mM CTAB/NaSal 水溶液, (d) 0.5 wt% キサンタンガム水溶液, (e) 3 wt% CMC 水溶液, (f) グリセリン

図10に、鞭毛螺旋模型の回転軸をとる断面内の速度場を示す。螺旋波の位相速度を基準とする粘弾性マッハ数 M_x に着目すると、 $M_x < 1$ の亜臨界流れと $M_x > 1$ の超臨界流れでは、流れパターンに違いが見られた。このことから、 $M_x = 1$ に相当する角速度を臨界値とする推力増加率の急変は、亜臨界流れから超臨界流れへの変化に関係すると考えられる。

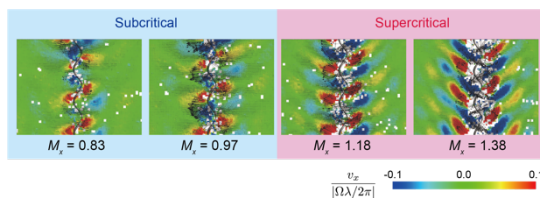


図10 螺旋模型まわりの流れ場 (30 mM CTAB/NaSal 水溶液、対イオンモル比4、Model-E、等高線は回転軸方向の速度成分を示す)

以上の結果から、波動伝播が顕著に見られる流体中では、粘弾性マッハ数が1を境に物体が受ける流体力の速度依存性が急変し、粘弾性マッハ数が1を超えると過剰な流体力はたらくようになることがわかった。このこ

とは、粘弾性流体中の波動現象が物体にはたらく流体力にも大きな影響を及ぼしており、粘弾性マッハ数が重要なパラメータとなることを示している。

(4) 急縮小部へ流入する流れ

図 11 は、送液開始 2 秒後におけるスリットに流入する流れのようすを示したものである。等高線は流速の大きさを表している。断面平均流速から算出した基本流の平面ポアズイユ流れの最大速度を用いて粘弾性マッハ数 M を定義した。粘弾性マッハ数 $M=6.5$ の場合は、周囲の流体よりも速度の大きい幅の狭い流れの領域が、スリット部から上流に向かって 2 本対称に伸びており、その後の時刻でも現れ続けた。一方、 $M=0.65$ の場合には、スリットのかなり近傍まで平面ポアズイユ流れの速度分布となっており、スリット部の影響はほとんど上流部には及んでいない。

図 12 は、図 11 に示した流れ場にそれぞれ対応する渦度分布である。赤色の領域が反時計回り、青色の領域が時計回りの渦度を表しており、基本流の渦度分布は相対的に小さく白い領域で表されている。 $M=6.5$ の場合は、赤と青の反対回りの渦層の対でできた筋がスリット部から 2 本対称的に伸びており、こ

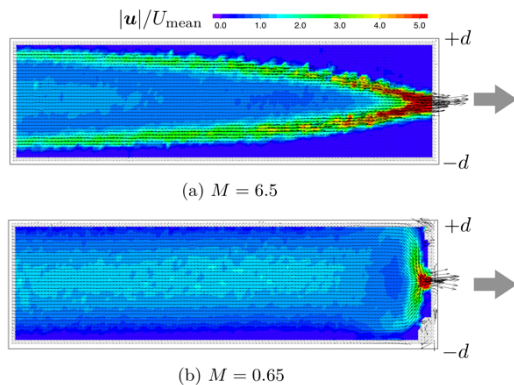


図 11 スリット上流部の流れの速度分布
(5 mM CTAB/NaSal 水溶液, 対イオンモル比 2, 送液開始後 2.0 秒, 流路幅 10 mm, スリット幅 2 mm)

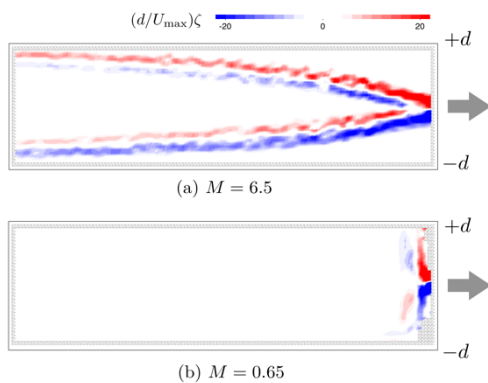


図 12 スリット上流部の流れの渦度分布
(5 mM CTAB/NaSal 水溶液, 対イオンモル比 2, 送液開始後 2.0 秒, 流路幅 10 mm, スリット幅 2 mm)

のようすは図 13 に示す基本流の特性曲線の形状とよく一致している。これは、基本流の粘弾性マッハ数によって支配方程式が双曲型となる領域では、スリット部から伸びる 2 本の特性曲線に沿ってスリット部の渦度の擾乱が上流に伝播し、2 本の筋を形成すると説明できる。

図 14 は、 $M=3.9$ の流れにおいて見られた流速の大きな筋状の領域が折れ曲がるようすである。このような現象は、特性曲線を使って波の反射を考えなければ説明が難しい。

このような特異な流れの発生は、基本流の支配方程式が双曲型となる領域があるかどうかに基づいて予測できる。

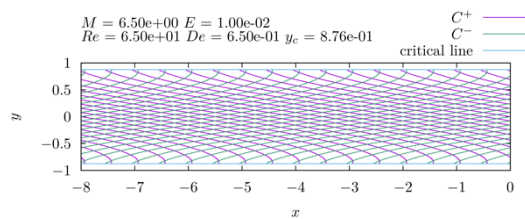


図 13 基本流の平面ポアズイユ流れの特性曲線
($M=6.5, E=0.01$)

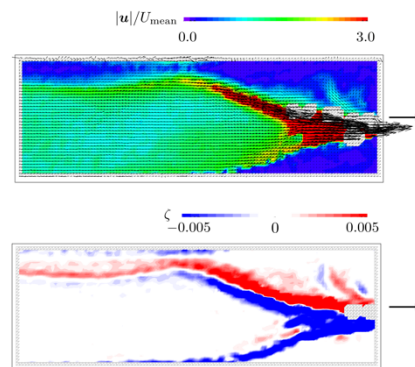


図 14 壁面近傍での流速の大きな流れの反射
(5 mM CTAB/NaSal 水溶液, 対イオンモル比 2, $M=3.9$, 上:速度場, 下:渦度場)

<引用文献>

- ① Joseph, D. D., Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids, Springer (1990)
- ② Tanner, R. I., Engineering Rheology, 2nd ed., Oxford University Press (2000)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 田島 和哉, 三神 史彦, 粘弾性流体中における鞭毛螺旋模型の推進力特性に与える粘弾性マッハ数の影響, 日本機械学会流体工学部門ニューズレター 流れ, 査読無, 2018 年 3 月号, http://www.jsme-fed.org/newsletters/2018_3/no5.html#ctop

- ② 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, 査読有, JAXA-SP-16-007, 2016, pp. 161-166,
<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/577451>

[学会発表] (計 14 件)

- ① 田島 和哉, 三神 史彦, 粘弾性を持つ各種流体中における鞭毛螺旋模型の推進力特性, 日本機械学会第 30 回バイオエンジニアリング講演会, 講演論文集 p. 193, 2017 年 12 月, 京都大学・百周年時計台記念館 (京都市)
- ② Tajima, K., Mikami, F., Effect of viscoelastic Mach numbers on propulsive forces of a model helical flagellum in a viscoelastic fluid, The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9), TFEC9-1077 (5pp), Oct., 2017, Okinawa Convention Center (Okinawa, Japan)
- ③ 不破 宏樹, 三神 史彦, 希薄な粘弾性流体中におけるせん断波パルスの伝播速度と減衰比, 第 65 回レオロジー討論会, 講演要旨集 pp. 82-83, 2017 年 10 月, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター (新潟市)
- ④ 三神 史彦, 杉谷 俊洋, 井上 壮彌, 急縮小部を有する流路内における粘弾性流体の高速流れ, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 講演論文集 S0510104 (5pp), 2017 年 9 月, 埼玉大学 (さいたま市)
- ⑤ 三神 史彦, 八木 良明, 粘弾性流体中を落下する球まわりの流れ, 日本流体力学会 年会 2017, 講演論文集 (4pp), 2017 年 8 月, 東京理科大学 葛飾キャンパス (東京都葛飾区)
- ⑥ 三神 史彦, 杉谷 俊洋, 井上 壮彌, 粘弾性流体の平行平板間流れにおけるスリット部擾乱の上流伝播, 第 49 回流体力学講演会/第 35 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 講演論文 JSASS-2017-2069-F/A (6pp), 2017 年 6 月, 国立オリンピック記念青少年総合センター センター棟 (東京都渋谷区)
- ⑦ 三神 史彦, 田島 和哉, 粘弾性流体中における鞭毛螺旋模型の推進力特性, 日本機械学会 第 29 回バイオエンジニアリング講演会, 講演論文集 2F33 (2pp), 2017 年 1 月, ウィンクあいち (名古屋市)
- ⑧ 三神 史彦, 八木 良明, 粘弾性流体中を沈降する剛体球の速度と球体積の関係,

日本機械学会第 94 期流体力学部門講演会, 講演論文集 0404 (2pp), 2016 年 11 月, 山口大学工学部 (宇部市)

- ⑨ 三神 史彦, 平板のインパルス駆動によって励起される粘弾性流体中のせん断波の伝播, 日本流体力学会 年会 2016, 講演論文集 (6pp), 2016 年 9 月, 名古屋工業大学 御器所キャンパス (名古屋市)
- ⑩ 三神 史彦, 不破 宏樹, ひも状ミセル水溶液中でのせん断波の伝播速度と減衰特性 (溶液濃度および対イオンモル比の影響), 日本機械学会 2016 年度年次大会, 講演論文集 S0510101 (5pp), 2016 年 9 月, 九州大学伊都キャンパス (福岡市)
- ⑪ Mikami, F., Yagi, Y., Mach cones in a viscoelastic fluid, 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2016), Book of Papers pp. 1272-1273, Aug. 2016, Montreal's Convention Center (Montreal, Canada)
- ⑫ 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, 第 48 回流体力学講演会/第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 講演論文 JSASS-2016-2052 (4pp), 2016 年 7 月, 金沢歌劇座 (金沢市)
- ⑬ 八木 良明, 三神 史彦, ひも状ミセル希薄溶液中を落下する球まわり流れの可視化計測, 日本機械学会第 93 期流体力学部門講演会, 講演論文集 0108 (2pp), 2015 年 11 月, 東京理科大学 葛飾キャンパス (東京都葛飾区)
- ⑭ 三神 史彦, スリット部を通過する粘弾性流体の選択取水流れ, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 講演論文集 S0520203 (5pp), 2015 年 9 月, 北海道大学 工学部 (札幌市)

[その他]
ホームページ等
<http://fluid.tm.chiba-u.jp/>

6. 研究組織

- (1) 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
- (2) 研究分担者 なし
- (3) 連携研究者 なし
- (4) 研究協力者 なし