

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13893

研究課題名（和文）絡み合った会合性高分子のダイナミクス予測のための新規分子モデルの構築

研究課題名（英文）Development of Coarse-Grained Molecular Model for Predicting Dynamics of Entangled Associating Polymers

研究代表者

佐藤 健（SATO, Takeshi）

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：70883536

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：動的な結合を持つ絡み合った会合性高分子のレオロジー挙動は、絡み合い運動と会合・解離の競合によって現れる。このような高分子の長時間ダイナミクスに対する重要な運動機構を議論するために、粗視化モデルを用いた数値計算が有効である。本研究では、絡み合い・会合性高分子系およびこの系と類似の機構を持つ紐状ミセル溶液系に対する粗視化モデルを構築することを目指した。主要な成果として、実験検証が比較的容易な後者の系に対して、実験のレオロジー挙動を再現する粗視化モデルを提示できた。さらに、非絡み合い/絡み合い高分子系に対するモデルを拡張することで、会合性高分子系のモデルを高精度化するための基盤を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常の絡み合い高分子系に対しては、粗視化モデルの構築を含めて精力的な理論研究が行われてきた。一方で、絡み合いによる束縛に加えて、会合・解離（または結合・分裂）、すなわち分子間の「反応」を持つ高分子類に対する知見は未だに乏しく、実用的なモデルはこれまでに提案されていなかった。本研究では、そのような機構を持つ高分子類のレオロジー挙動を予測する粗視化モデルの1例を提示できた。構築した粗視化モデルをさらに発展させれば、レオロジー実験と同程度の精度の数値実験を行うことができる。このようなモデルから生成される質の高いデータは、データ駆動の手法を用いた物性予測の加速に資するという意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Associative polymers in an entangled state show characteristic rheological behaviors due to the competition between entangled polymer dynamics and association/dissociation processes. To deepen our understanding of the long-term dynamics of such polymers, one of the promising methods is numerical simulations using mesoscopic coarse-grained models. In this study, we aimed to develop coarse-grained models for entangled associative polymers and entangled thread-like micellar solution systems with mechanisms similar to associative polymers. As our significant achievements, we presented a coarse-grained model that successfully reproduces the experimental linear and nonlinear rheological behaviors for the latter system. Additionally, we extended coarse-grained models for unentangled and entangled non-associative polymers, which are expected to serve as bases for improving the accuracy of models of associative polymers.

研究分野：複雑流体のレオロジー

キーワード：会合性高分子 紐状ミセル溶液 絡み合い状態 レオロジー ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

非共有結合に由来する動的な結合を持つ会合性高分子は超分子の一種であり、自己修復材料などの用途として注目されている。会合性高分子を用いて新たな材料を設計するために、マクロな力学特性 (=レオロジー) の背後にある分子運動を理解することが鍵である。

本研究で対象とする絡み合った会合性高分子のレオロジー挙動は、絡み合い運動と会合・解離の競合によって現れる。膨大な研究に立脚した「通常の」絡み合い高分子のダイナミクスの理解と比較すると、会合性高分子のダイナミクスの理解は限定的である。例えば、微少歪みに対する応答、すなわち線形レオロジー挙動は、絡み合い束縛下における高分子の緩和の時定数と会合・解離の時定数の対比の観点から整理されている。絡み合い緩和の時定数と会合・解離の時定数が分離している場合、遅い機構の時定数を用いて線形レオロジーが記述できる。一方で、絡み合い緩和の時定数が会合・解離の時定数と競合する場合、線形レオロジーの分子論の全容は明らかにされていない。また、流動下の非線形レオロジーに関して、実験研究が盛んに行われている一方で、流動に誘起されるミクロな分子状態の変化とマクロなレオロジーの関係についての理論的な研究は不十分であった。

高分子の長時間ダイナミクスを研究するために、粗視化モデルを用いたシミュレーションによるアプローチが有効である。粗視化モデルを用いると、高分子の絡み合いに由来する長時間域のダイナミクスを効率的に計算できる [Masubuchi, *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, **5**, 11 (2014)]. 粗視化モデルとして例えば、Slip-Spring モデル [Likhtman, *Macromolecules*, **38**, 6128 (2005)] では、バネ・ビーズ模型で表現された高分子鎖上に絡み合いを表現するバネによる束縛を課すことで、絡み合い運動がモデル化される。このモデルを用いると、絡み合い高分子の線形および (部分的には) 非線形レオロジーを高い精度で表現できる。このように、通常の絡み合い高分子の運動を表現するモデルの開発・高精度化は進んでいるものの、絡み合った会合性高分子のレオロジーを表現する実用的なモデルは開発されていなかった。

研究を開始する前段階で、会合性高分子と類似の対象である紐状ミセル溶液系 (擬似高分子系) について、Slip-Spring モデルに基づく粗視化モデルを研究代表者らが提案した [Sato *et al.*, *J. Rheol.*, **64**, 1045 (2020)]. 界面活性剤溶液が形成する自己組織化構造である紐状ミセル溶液系では、疑似高分子としての絡み合い運動に加え、ミセルの結合・分裂を考慮することが重要である [Cates, *Macromolecules*, **20**, 2289 (1987)]. この運動様式は、会合性高分子における絡み合い運動と会合・解離の競合と非常に類似している。ここでの知見に基づいて、絡み合い・会合性高分子の粗視化シミュレーションモデルを構築することを着想した。

2. 研究の目的

以上の背景から、通常高分子系で有効な手法を基に、絡み合った会合性高分子のダイナミクスを表現するモデルを構築できるのではないかと考え、本研究の目的を「実験および計算科学的な技術を駆使することで、絡み合った会合性高分子のダイナミクスを高精度かつ高効率で予測できる粗視化モデルの開発し、ダイナミクスに対する理解を深めること」とした。特に、実験による先行研究 [Watanabe *et al.*, *Macromolecules*, **53**, 1070 (2020)] で線形レオロジーの測定結果が報告されている分子鎖の片方の末端に会合基 (カルボキシル基) が導入された絡み合い線状ポリイソプレン (PI-COOH) 融液をモデル系として選定した。この系は単量体/二量体の 2 つの形態をとり、温度に応じて組成が異なる平衡状態にある。この系について、線形・非線形レオロジー挙動を再現する粗視化モデルの構築を目指した。

上述の内容を当初の目的としたが、研究実施中に、PI-COOH のサンプル量の制約から、十分な非線形レオロジー測定を行うことができないことを認識した。合成の作業コストや技術的な理由から、新たに合成を行う目処が立たなかったため、類似の系であり、かつサンプルの作成が容易な紐状ミセル系の非線形レオロジーモデルの構築と実証を目的とした研究も行った。

3. 研究の方法

粗視化モデルとしては、絡み合い高分子のレオロジーを高精度に記述する Slip-Spring (SS) モデルに着目した。図 1 に示すように、SS モデルにおける高分子は、バネ・ビーズ模型で表される主鎖と、絡み合いによる拘束 (SS) を表現するバネで表現される。主鎖ビードおよび SS の時間発展は、それぞれ Langevin 方程式を用いて計算する。会合・解離などがない通常の線状高分子系に対しては、SS モデルがレオロジー実験のデータを良好に再現することが分かっている。

本研究では、上述の SS モデルに会合・解離 (または結合・分裂) の機構を組み込むことを試みた。まず、PI-COOH 系については、単量体が会合して二量体となる、また二量体が解離して単量体になるという機構を記述

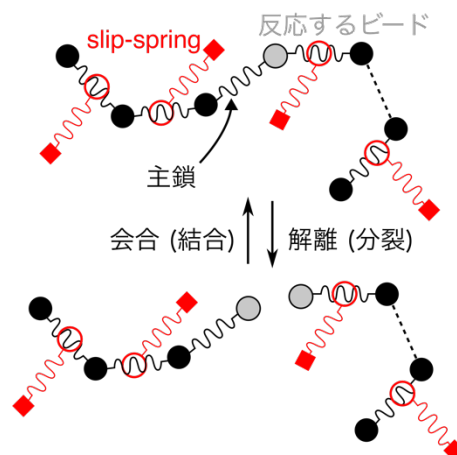


図 1: 粗視化モデルの概要。

する反応速度式を組み込むことで拡張した。また、紐状ミセル系については、自己組織化構造 (=ミセル) を表す主鎖上の任意のビード位置が分裂点になること、および系内の任意の主鎖末端が結合点になること、の2点を仮定し、ランダムに分裂と結合が繰り返されることとした。流動下ではミセルの伸長が想定されることから、バネのポテンシャルとしてバネの伸び切り効果を考慮したポテンシャルを導入した。さらに、上述の分裂機構に加えて、ひずみ速度の大きい伸長流動下では、ミセルの伸長によって分裂の速度が大きくなることが想定される。このことを表現する流動誘起のミセルの分裂機構 (Stress-Induced Micelle Breakage; SIMB) をモデル化した。ここでは、ミセルの伸長応力に依存する分裂の特徴時間を定義し、その特徴時間に応じた確率で分裂が起こるものとした。このようにして構築された粗視化モデルは、重要な運動の機構をあらかじめ仮定したものであり、より詳細な分子モデルや実験との比較によって妥当性を確認する必要がある。

研究目的に示したように、紐状ミセル溶液に対する非線形レオロジー実験も行った。サンプルとしては、先行研究で頻繁に用いられている臭化セチルトリメチルアンモニウム (CTAB) または塩化セチルピリジニウム (CPyCl) およびサリチル酸ナトリウム (NaSal) の混合系を対象とし、NaSal 濃度を変更した溶液を数種類調製した。ここで、NaSal 濃度を変更することは、ミセルの長さを変更することに対応し、せん断レオロジー特性にどのような変化があるのか調べた。

以上の会合性高分子系または紐状ミセル溶液系の検討に加えて、これらの系をモデル化する基盤となる通常の高分子系のダイナミクスの検討も並行して行った。

4. 研究成果

(1) 絡み合い会合性高分子の粗視化モデル

会合・解離の反応速度式を用いて拡張した粗視化モデルによって、線形レオロジー特性 (貯蔵弾性率および損失弾性率) を数値計算し、Watanabe らによる先行研究における実験データとの比較を行った。Watanabe らによる先行研究では、フーリエ変換赤外分光 (FTIR) 測定から会合性試料中の単量体/二量体分率が決定されており、粗視化モデルにおける反応速度パラメータを推定するためにその分率値を利用した。会合・解離を組み合わせた粗視化モデルが予測する緩和は、対応する (会合・解離のない) 2成分ブレンドにおける緩和よりも速くなり、実験データと定性的に一致した。しかし、会合性高分子系のレオロジーの完全な記述には至らなかった。

また、上述のように、構築した粗視化モデルでは、速度定数を決定するためのパラメータを外部から与える必要があった。以上の基礎的な検討から、モデルパラメータの決定を合理的に行うことが課題として残った。この課題に対して、マイクロな分子シミュレーションを援用してパラメータを決定することにより、モデルの高精度化に繋がると考えている。

(2) 絡み合い紐状ミセル溶液の粗視化モデル

構築した紐状ミセル溶液の粗視化モデルの性能を確認するために、まず、主鎖1本あたりの平均絡み合いの数に5程度の場合を想定し、異なる分裂の特徴時間に対する緩和弾性率 $G(t)$ を計算した。 $G(t)$ は、線形レオロジー挙動を特徴付ける量である。ここで、横軸、縦軸はそれぞれ SS モデルの単位時間、応力を用いて無次元化されている。図中の ζ は、分裂の特徴時間を絡み合い緩和の特徴時間で規格化した値を示す。図2から、分裂の特徴時間が小さくなるほど緩和が加速することを確認できた。

次に、図3に、図2と同じ平均絡み合い数に対する (a) せん断粘度および (b) 伸長粘度の時間発展の計算結果を示す。まず、図3(a)のせん断粘度について、せん断速度を大きくするに従って、絡み合いの束縛に由来する粘度のオーバーシュートと定常粘度の低下が見られた。これらは、高分子溶液および紐状ミセル溶液に共通する性質であり、SS モデルを採用することによって自然に再現された。さらにせん断速度を大きくすると (図3(a)のオレンジのプロットに対応)、通常の高分子溶液では見られない粘度の増加 (ひずみ硬化) が見られた。これは、ミセルの伸長と対応しており、伸び切りポテンシャルを用いたことによる帰結

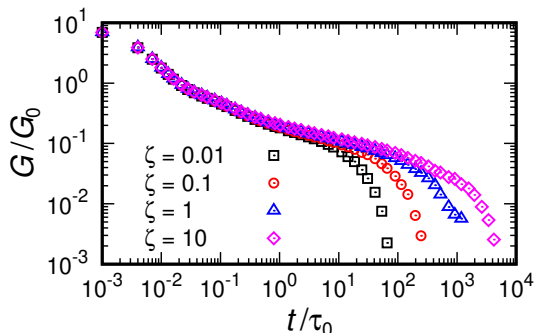


図2：紐状ミセル溶液の緩和弾性率。

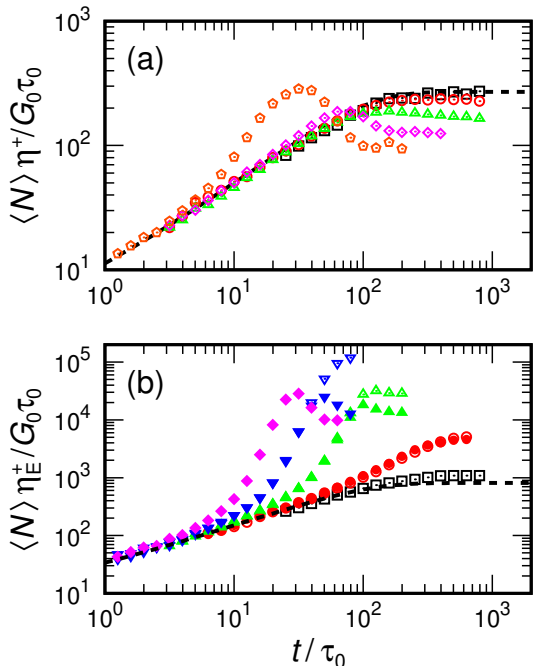


図3：(a) せん断粘度および (b) 伸長粘度の計算結果。点線は線形粘度成長関数を示す。また、(b) のシンボルの塗り潰しの有無は、それぞれ SIMB 機構の有無を示す。

と考えられる。ここで、類似の高速せん断特性は Inoue らによる実験 [Langmuir, 21, 1201 (2005)] でも見られている。このことから、このモデルは紐状ミセル溶液のレオロジーを良好に再現すると考えられる。次に、図 3(b)の伸長粘度について、SIMB を考慮しない数値計算結果では、定常伸長粘度は単調に増加することが分かる。これは、バネ・ビーズモデルにおける計算で典型的に見られる挙動である。一方で、SIMB を考慮した計算では、定常粘度が増加の後減少に転じる。この挙動は実験結果と定性的に一致する。

(3) 紐状ミセル系の非線形レオロジー実験

粗視化モデルの妥当性を検証するため、および非線形レオロジー挙動のモデル化に対する知見を得るために、CTAB/NaSal 溶液系や CPyCl/NaSal 溶液系に関する線形／非線形レオロジー実験を行った。例として、CPyCl/NaSal 溶液系について、2 種類の NaSal 濃度条件に対する定常せん断粘度のせん断速度依存性を図 4 に示す。この図から、NaSal 濃度が大きいと低せん断速度領域における粘度の値が大きくなっており、ミセルが成長していることが分かる。一方、高せん断速度領域では、NaSal の濃度が小さい場合と大きい場合の粘度が一致する挙動が見られた。これは、高いせん断速度流動に誘起されたミセルの分裂が示唆される結果である。この実験結果から、粗視化モデルの更なる拡張に向けた知見を獲得できた。

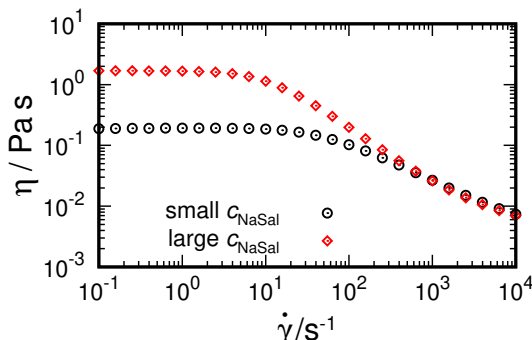


図 4 : CPyCl/NaSal 溶液系の定常せん断粘度のせん断速度依存性。

会合性高分子や紐状ミセル系のモデルを発展させるために、基盤となる通常の高分子系の高度なモデルが必要である。以下では、通常の高分子ダイナミクスを記述するモデルの検討を行った。

(4) 非絡み合い線状高分子の粗視化モデル

非絡み合い高分子融液の標準バネ・ビーズモデルを用いて、非線形レオロジー挙動を高精度に記述するための検討を行った。バネの伸び切り効果、鎖の配向によるビードに対する摩擦低減、熱揺動力の強度の変化という流動下のダイナミクスを記述するための基礎となる 3 つの機構をモデルに組み込み、流動下のレオロジー量および分子状態を表現する量を定式化した。この研究により、非絡み合い高分子の非線形レオロジーを記述する枠組みを提示した。

(5) 絡み合い線状高分子・絡み合い星型高分子系に対する粗視化モデルの予測精度の検証

本研究で基盤モデルとした SS モデルは、上述の通り線状高分子のレオロジー予測に成功している。ここで、線状鎖での成功と比較して、分岐鎖に対する検討は行われていない。高分子に分岐を持たせることによってレオロジー挙動を改質する試みが行われており、分岐鎖の検討は実用的にも重要である。本研究期間の後半で、線状鎖に加えて、モデル分岐鎖と考えられる星型高分子鎖の運動を SS モデルによって捉えることができるか検証した。特に、星型高分子における分岐点の運動の有無が緩和挙動に与える影響に着目して、粗視化モデルの拡張を行った。

図 5 に、絡み合い星型高分子融液に対する線形粘弾性の実験データ (シンボル) と粗視化モデルによるデータ (実線：分岐点の運動無し、点線：分岐点の運動有り) を示す。SS モデルの単位時間および単位応力は、線状鎖のレオロジーデータとの比較により決定した。分岐点の運動を考慮しない場合に比較して、(僅かではあるものの) 分岐点の運動を考慮すると実験のレオロジー挙動を高精度で再現することが分かった。加えて、分岐点の運動をあらわに扱うことで、星型鎖の拡散挙動など、これまでの研究で理論的に調べられてこなかった量を計算できるようになった。

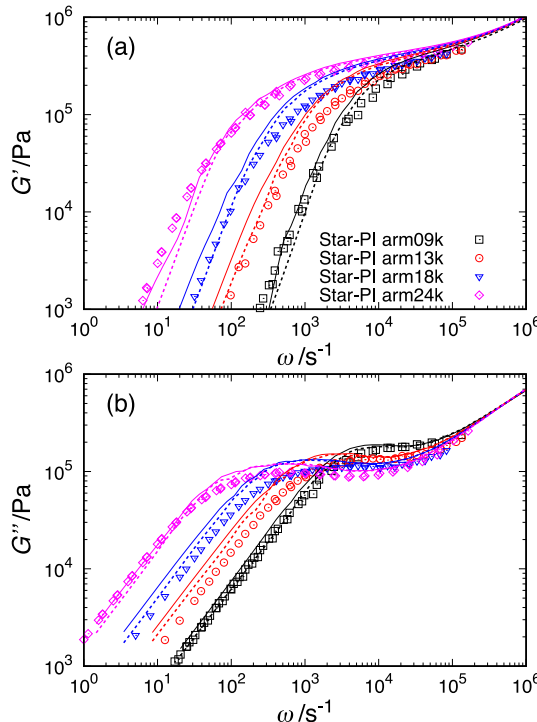


図 5 : 星型高分子鎖に対する (a) 貯蔵弾性率と (b) 損失弾性率の予測。

以上をまとめると、会合・解離 (または分裂・結合) および絡み合い高分子に特徴的な運動様式が共存する系における数値的および実験的な基礎検討を行い、粗視化モデルの更なる高精密度に繋がる知見を得ることができた。特に紐状ミセル溶液系について、非線形レオロジーに対する粗視化モデルを初めて提示できた。今後は、粗視化モデルよりも詳細な分子シミュレーションを併用することで、ミクロな機構とマクロな物性を繋ぐことが課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sato Takeshi, Gong Yanan, Larson Ronald G.	4. 巻 56
2. 論文標題 Testing the Ability of the Slip-Spring Model to Describe Constraint Release Effects Using Experimental Linear and Nonlinear Rheology	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 8116 ~ 8132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.3c00820	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsumiya Yumi, Sato Takeshi, Chen Quan, Watanabe Hiroshi	4. 巻 56
2. 論文標題 Rouse Analysis of Nonlinear Rheology of Unentangled Polymer Melts under Fast Shear: Viscoelastic Response to Superposed Oscillatory Strain	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 2930 ~ 2938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.3c00005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Miyamoto Souta, Sato Takeshi, Taniguchi Takashi	4. 巻 62
2. 論文標題 Stretch-orientation-induced reduction of friction in well-entangled bidisperse blends: a dual slip-link simulation study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Rheologica Acta	6. 最初と最後の頁 57 ~ 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00397-022-01378-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Matsumiya Yumi, Sato Takeshi, Chen Quan, Watanabe Hiroshi	4. 巻 50
2. 論文標題 Rheo-Dielectric Behavior of Unentangled Poly(butylene oxide) under Steady Shear: Preliminary Evaluation of Non-Equilibrium Parameters at the Onset of Nonlinearity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 371 ~ 385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.50.371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato Takeshi, Matsumiya Yumi, Watanabe Hiroshi	4. 巻 157
2. 論文標題 Experimental study of phase separation in dynamically asymmetric unentangled polymer blend	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 224908 ~ 224908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0124087	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeshi Sato, Youngdon Kwon, Yumi Matsumiya, and Hiroshi Watanabe	4. 巻 33
2. 論文標題 A constitutive equation for Rouse model modified for variations of spring stiffness, bead friction, and Brownian force intensity under flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 63106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0055559	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takeshi Sato	4. 巻 50
2. 論文標題 Modeling Techniques for the Rheology of Wormlike Micellar Solutions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi (J. Soc. Rheol. Jpn.)	6. 最初と最後の頁 9-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.50.9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takeshi Sato, Yumi Matsumiya, and Hiroshi Watanabe	4. 巻 50
2. 論文標題 Rheo-Dielectrics and Diffusion of Type-A Rouse Chain under Fast Shear Flow: Method of Evaluation of Non-Equilibrium Parameters for FENE, Friction-Reduction, and Brownian Force Intensity Variation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi (J. Soc. Rheol. Jpn.)	6. 最初と最後の頁 253-268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.50.253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sato Takeshi, Larson Ronald G.	4. 巻 66
2. 論文標題 Nonlinear rheology of entangled wormlike micellar solutions predicted by a micelle-slip-spring model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Rheology	6. 最初と最後の頁 639 ~ 656
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1122/8.0000426	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Takeshi Sato, Yumi Matsumiya, and Hiroshi Watanabe
2. 発表標題 EXPERIMENTAL STUDY ON PHASE SEPARATION DYNAMICS OF UNENTANGLED POLYMER BLEND WITH DYNAMIC ASYMMETRY
3. 学会等名 8th Pacific Rim Conference on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeshi Sato, Yumi Matsumiya, and Hiroshi Watanabe
2. 発表標題 Phase separation dynamics of unentangled polymer blend with dynamic asymmetry: An experimental test
3. 学会等名 XIXth International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤健, Ronald G. Larson
2. 発表標題 粗視化モデルによる絡み合いひも状ミセル溶液の非線形レオロジー予測
3. 学会等名 日本レオロジー学会第49年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤健
2. 発表標題 メソスケールモデルによるひも状ミセル溶液のレオロジー予測
3. 学会等名 第19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 Takeshi Sato and Ronald G. Larson
2. 発表標題 A Mesoscopic Model for Nonlinear Rheology of Entangled Wormlike Micellar Solutions
3. 学会等名 93rd Annual Meeting Society of Rheology（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yumi Matsumiya, Takeshi Sato, Quan Chen, and Hiroshi Watanabe
2. 発表標題 Rheo-dielectrics of type-A Rouse chain under fast shear flow: Method of evaluating non-equilibrium parameters for FENE, friction-reduction, and Brownian force intensity variation
3. 学会等名 93rd Annual Meeting Society of Rheology（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤健, 松宮由実, 渡辺宏
2. 発表標題 動的な非対称性を有する非絡み合い高分子ブレンドにおける相分離挙動
3. 学会等名 第10回ソフトマター研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤健, 松宮由実, 渡辺宏
2. 発表標題 動的な非対称性を有する非絡み合い高分子ブレンドの相分離挙動の研究
3. 学会等名 2022年度高分子基礎物性研究会・高分子計算機科学研究会・高分子ナノテクノロジー研究会合同討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeshi Sato, Yumi Matsumiya, Hiroshi Watanabe
2. 発表標題 Phase separation in dynamically asymmetric unentangled polymer blend: An experimental study
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (Virtual) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤健, 松宮由実, 渡辺宏
2. 発表標題 動的に非対称な非絡み合い高分子ブレンドにおける相分離過程の実験的検討
3. 学会等名 日本レオロジー学会第48年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤健, Youngdon Kwon, 松宮由実, 渡辺宏
2. 発表標題 流動下における修正Rouseモデルの構成方程式
3. 学会等名 第69回レオロジー討論会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 化学工学会 粒子・流体プロセス部会	4. 発行年 2024年
2. 出版社 化学工学会 関東支部（編）	5. 総ページ数 228
3. 書名 化学工学系流体シミュレーションの最前線 - 基礎・実践・将来展望 - , 第4章「階層連携シミュレーションによるソフトマターの流動解析」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人HP https://tsmss-rheology.com/index.html 個人ページ https://tsmss-rheology.com/index.html

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		
米国	Department of Chemical Engineering	University of Michigan	
中国	Changchun Institute of Applied Chemistry	Chinese Academy of Sciences	
韓国	School of Chemical Engineering	Sungkyunkwan University	