

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20340111

研究課題名 (和文) 分岐高分子の新規分子モデル

研究課題名 (英文) Molecular modeling of dynamics of entangled branch polymers

研究代表者

増淵 雄一 (MASUBUCHI YUICHI)

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：40291281

研究成果の概要 (和文)：

分岐高分子のダイナミクスは高分子科学の基礎的な興味の対象であるだけでなく、高分子材料の成形加工性を支配する工学的にも重要な課題である。本研究では我々独自の高速粗視化分子シミュレーションを分岐高分子に対して適用し、モデルの妥当性の検証と、分岐点のダイナミクスの検討を行った。その結果我々のシミュレーションは実験で得られる粘弾性を定量的に予測することが示された。また分岐点近傍における動的管膨張の重要性を示した。

研究成果の概要 (英文)：

Dynamics of branch polymers is an important subject not only in polymer science but also in industry to design processability of materials. In this study we applied our coarse-grained molecular simulation to branch polymers to evaluate the model and to investigate the dynamics around branch point. The simulation realized quantitative predictions on linear and non-linear viscoelasticity of branch polymers and showed significance of dynamic tube dilation around branch point.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：物理学 生物物理・化学物理

キーワード：ソフトマターの物理, シミュレーション, 高分子

1. 研究開始当初の背景

分岐高分子のからみあいダイナミクスの予測は重要である。高分子の運動はレオロジーに直接関係し、プラスチックの成形加工などにおいて工業的にも重要なため古くから研究されてきている。ごくわずかでも長鎖の分岐がある場合には分子運動が変質し、レオロジ

一の劇的な変化として現れる。この変化は成形加工性に大きな影響を及ぼし極めて重要である (Sugimoto et al., 1999)。

しかしこのような分岐の効果は従来の理論では定量記述できていない。多数の分子鎖によるからみあいを管状の束縛で平均的に置換える土井-Edwards理論(1986)を端緒として

線状高分子を記述する理論はほぼ完成している。例えばOCTAプロジェクト（土井（東大）ら）に含まれるPASTAシミュレーター（滝本ら, 2001）は分子量分布を含む直鎖高分子系のダイナミクスを定量予測する。一方、分岐高分子では一定の評価を確立している理論（Milner-McLeish 1997,1998; Larson 2001; McLeish-Larson 1998）でも、予測の定量性や誘電緩和や非線形レオロジーに対する予測の破綻など問題があることが示されている（例えばMcLeishによる総説 ADVANCES IN PHYSICS 51 (6): 1379-1527 SEP 2002）

このようなレオロジーにおける分岐構造の影響は、通常の分子シミュレーションでは計算不能である。複雑な形をした多数の分子の運動を解明するには分子シミュレーションは有力な方法である。しかしからみあった高分子は分子量が数万から数百万と高く、分子運動の特徴的時間が数秒から数百秒に及び非常に遅いため、通常の分子シミュレーションでは実用上計算不能である。いわゆる粗視化分子動力学（Kremer and Grest, 1991）でも計算できない時間領域であり、散逸粒子動力学（Groot and Warren, 1997）では原理的に分子間のからみあいを扱えない。

そこで分子構造がレオロジーに与える影響を予測するため、増潤はからみあった高分子の多体運動をあらわに計算するプリミティブチェーンネットワークモデルの開発を行ってきた（Y. Masubuchi et al. *J Chem. Phys.* 2001, 115, 4387）。これまでに直鎖高分子への適用性を示し、ブレンドと共重合体への拡張理論を行ってきた。このモデルの分岐高分子への適用性を検証し、また計算結果から分岐点周りのダイナミクスを明らかにすることが本研究の主題である。

2. 研究の目的

本研究では粗視化シミュレーションの実験的検証を行う。応募者の増潤はこれまでに星型とH型高分子への拡張理論の提案を行っており、星形高分子の線形粘弾性と拡散の定量的再現、H型高分子の拡散と応力緩和の計算妥当性、について示した。しかし実験データとの定量的な検証は不十分である。その理由は検証用の実験データにある。分岐構造が制御された分岐高分子を得ることは難しく、近年ようやく物性の報告がなされるようになってきたが数が極めて少ない。そこで本研究では、共同研究者の渡辺と松宮の精密重合技術（H. Watanabe, et al., *Macromolecules* 1993, 26, 6338 他）により、構造の整った星型高分子やH型高分子における実験を研究グループの内部で実

施することを目論んだ。また、粗視化シミュレーションで得られた分子と分岐点の運動に基づいて、従来の粗視化理論の検証を行った。

3. 研究の方法

1) 理論モデル検討

本研究の第一の目標は、分岐高分子における分岐点近傍でのからみあいトポロジーの組換え手法を確立することである。これによりスリップリンクモデルの枠内で分岐高分子のダイナミクスを記述する方法が示せる。

本研究のシーズである高分子ダイナミクス粗視化シミュレーション法では、からみあった高分子系のネットワークのダイナミクスをスリップリンクモデルで考える（Y. Masubuchi et al. *J Chem. Phys.* 2001, 115, 4387）。高分子をからみあいに注目したプリミティブチェーンで粗視化し、かつ従来の分子シミュレーションと同様に空間に配置して動かす。プリミティブチェーンを構成する各セグメントは他のセグメントと一対一でからみあいを形成し、スリップリンクでつながれていると仮定する。系の状態変数は、スリップリンクの位置 $\{\mathbf{R}\}$ と、からみあいセグメントに割り振られているモノマー数 $\{n\}$ 、および各分子がもつからみあい数 $\{Z\}$ である。 $\{\mathbf{R}\}$ と $\{n\}$ の時間発展は以下のように書けるとする。

$$2\zeta\left(\frac{d\mathbf{R}}{dt} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{R}\right) = \frac{3kT}{b^2} \sum_i \frac{\mathbf{r}_i}{n_i} - 2n_0 \nabla \mu + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\frac{\zeta}{\rho} \frac{dn}{dt} = \frac{3kT}{b^2} \left(\frac{r_i}{n_i} - \frac{r_{i-1}}{n_{i-1}} \right) - n_0 \nabla \mu + f \quad (2)$$

どちらの式も考えられている物理化学は同じである。左辺は摩擦力であり、 ζ はセグメント一つあたりの抵抗、 \mathbf{k} は変形速度テンソル、 ρ はセグメントにおける局所的モノマー濃度である。右辺第1項は部分鎖の張力の和であり、からみあいにおける局所的な力学的バランスを表している。 b は高分子を構成するモノマーの長さ、 n はセグメントに含まれるモノマー数、 \mathbf{r} はセグメントボンドベクトルである。右辺第2項は分子間相互作用による熱力学的力で μ は化学ポテンシャル、 n_0 は n の平衡値である。最後に右辺第3項は揺動散逸定理を満たす熱揺動力である。

分岐高分子においては運動方程式に加えて、からみあいトポロジーの組み替えアルゴリズムが重要である。応募者は既にスリップリンクモデルの枠内で分岐高分子が扱える可能性を持つ、現在世界で唯一のモデルを示した（Y. Masubuchi et al. *Rheo. Acta*, 2006, 46, 297）。

{Z}の変化は、末端と分岐点近傍でのトポロジーの組換えによりなされる。直鎖高分子と星型高分子の場合は末端部のモノマー数 n によるスリッリンクの生成消滅で十分記述できる。一方H型や楕形等分子内に複数の分岐を持つ高分子の場合には、主鎖どうしのかみあいを外さないと分子が拡散できないため、分岐点とスリッリンクの間でトポロジーの組み替えが必要である (McLeishの階層理論における分岐点のレプテーション運動に相当する)。そこでエントロピー的な効果でトポロジー交換が起きるとするモデルを提案した。しかし現行の分岐点近傍でのトポロジー組み替えモデルは、定量的な評価が実施されておらず、モデルの妥当性は証明されていない。

モデルの検証は、まず直鎖高分子における基礎的パラメーターの特定から行った。モデルパラメーターはモデルの単位長さ $a=bn_0$ と単位時間 $\tau=\xi a^2/6kT$ である。単位長さ a は単位分子量 M_0 に置き換えた方が実験との比較では便利である。また M_0 は単位弾性率 G_0 と $M_0=\rho RT/G_0$ の関係にある。これらのパラメーターは分子量、分子量分布、分岐構造によらない。

次に動的管膨張理論と本研究におけるモデルとの整合性を議論するため、二様分布をもつ直鎖高分子 (短鎖と長鎖のブレンド系) における計算を行った。あわせて他のモデルとの比較も実施した。さらに大変形下や高速流動下での束縛解放および分子の形態ダイナミクスを調べた。

これらの直鎖高分子における検討をふまえて、非対称星形高分子で検討を行った。非対称星形高分子とは、星形分岐高分子のうち、長さの異なる分岐鎖をもつものをいう。本研究では3分岐星形高分子の分岐鎖のうち、1本のみの長さが異なる分子を考えた。まず粘弾性が直鎖高分子および対象星形高分子と矛盾なく表されるかどうかを議論した。次に束縛解放の様子と分岐点の運動の関係、および分岐点の運動が粘弾性緩和に及ぼす影響を議論した。さらに楕形高分子の線形、非線形粘弾性を検討し、分岐鎖の緩和と主鎖の束縛解放を議論した。

2) 合成と粘弾性および誘電緩和測定:

モデルの妥当性を検証するレオロジー実験のために、アニオン重合により構造の制御された分岐高分子の合成を試みた。末端修飾リビングアニオンの選択的カップリング反応 (H. Watanabe et al., *Macromolecules* 1993, 26, 6338) を利用し、非対称分岐を有する単分散星形ポリイソプレン (PI) を合成した。ベンゼン

(Bz) 中 s -ブチルリチウム (s -BuLi) で重合した長枝 PI アニオンの末端をジフェニルエチレン (DPE) で修飾し(1,2-ジブromoエチル)ピリジン (Br₂EtPy) でカップリングすることにより、対称な長枝 2 本より成る幹部分を合成した。この幹部分を真空中でアセトンに沈殿させ、カップリングで生じた塩 (LiBr) を除去した後に THF に再溶解し、別途 Bz 中 s -BuLi で重合した短枝 PI アニオンとの反応を行った。末端非修飾の短枝アニオンはPy 基へのグラフト反応を起こし (H. Watanabe, et al., *Macromolecules* 1994, 27, 2336)2本の長枝と1本の短枝より成る非対称単分散星形 PI が合成される。この星形 PI アニオンをメタノールで停止し目的とする試料を得た。同一の長枝 ($M_{\text{長枝}} = 5$ 万) を持ち短枝の分子量が異なる一連の非対称星形 PI 試料 ($M_{\text{短枝}} = 0.5$ 万~4万 < $M_{\text{長枝}}$) の合成を試みた。また比較のため長枝および短枝のプレポリマーアニオンを、それぞれトリクロロメチルシラン (3官能性カップラー) と反応させることにより、非対称星形試料の各枝に対応する対称星形 PI 試料も合成した。

合成により得られた試料の誘電緩和緩和測定および粘弾性緩和測定を試みた。本研究で扱う分岐高分子は重合で得られる量も希少であり、かつ非常にブロードな粘弾性モード分布を持つと予想される。その終端緩和を精度良く検出するためには、低トルク域でも十分に高い位相分解能を有するレオメータ ($10^2 \sim 10^4$ の範囲の損失正接を測定可能なレオメータ) が必要となる。この要求をみたく低トルク制御型レオメータ (AR-G2; TA Instruments 製) を本研究で購入し粘弾性測定に用いようと思論したが、予算が削減されたため既存の装置での測定を試みた。しかし十分な信号強度が得られず、以下で報告する多くの場合はやむを得ず最近の文献で報告された実験データによりモデルの検証を行った。

4. 研究成果

種々の一次構造をもつ高分子での基礎的パラメーターを、直鎖高分子の線形粘弾性に対する計算で特定した。(Y. Masubuchi et al, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 149(1-3), 87-92 (2008)).

次に本研究のモデルにおける束縛解放ダイナミクスを確認するため、二様分布系における検討を行った。(Y. Masubuchi et al, *Macromolecules* 41 (21), 8275-8280 (2008)) 図1に分子量が294kと83kのPSを、長鎖の体積分率が0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0となるように

混合したときの線形粘弾性予測である。単分散の場合と同じパラメータにより矛盾なく予測できていることから、モデルが束縛解放を妥当に取り入れていることが示された。また動的管膨張の様子をスリップリンクの生存確率から調べたところ、二様分布系においては束縛解放による運動単位の粗大化に鎖の局所運動が追いつかない、いわゆる部分的動的管膨張が起きていることも確認された。

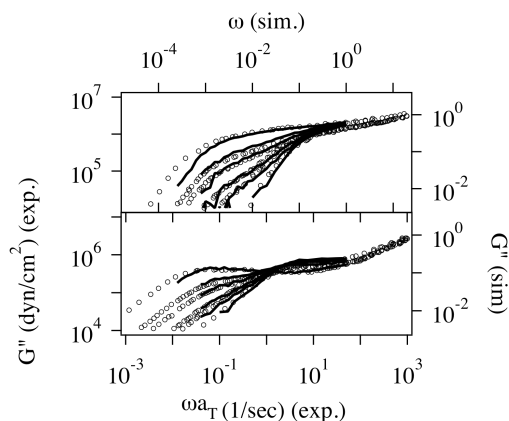


図1 二様分布直鎖高分子の粘弾性予測

モデルにおける束縛の粗大化をさらに検証するため、濃厚溶液における結果も検討した。(Y. Masubuchi et al, J. Chem. Phys. 131, 114906 (2009)). 束縛の粗大化関係式 ($G_0 \propto \rho^d$, $\tau \propto \rho^{2-2d}$) によりパラメータの濃度依存性を決めたところ、実験をよく再現することが示された。

上記のように、本研究で用いているモデルは直鎖高分子に対しては動的管膨張理論および濃度に対する粗大化理論のいずれにも矛盾のない結果を与えることが確認された。また実験結果に対する定量予測性が改めて確認された。

直鎖高分子で得られたパラメーターを用い、対称および非対称星形高分子に対する検討を行った (Y. Masubuchi et al, J. Chem. Phys, in print.) 検討したのはポリイソプレンの濃厚溶液で、直鎖 (分子量 257k: 試料コード N250K60), 3分岐対称星形 (分岐鎖分子量 101k: 試料コード S101K60), 非対称星形 1 (長鎖分岐鎖分子量 73k, 短鎖分岐鎖分子量 33k: 試料コード A2B73K60), 非対称星形 2 (長鎖分岐鎖分子量 182k, 短鎖鎖分子量 33k: 試料コード A2B182K60) である。基本パラメーターは直鎖ポリイソプレンのメルトで得られたものから計算して求めた。線形粘弾性の予測結果を図2に示す。

次に分岐点周囲でのダイナミクスの影響を見るために、分岐点のブラウン運動を止めた場合、および分岐点周囲でのトポロジーの

組み換え (分岐点の主鎖に沿ったレプテーション運動) を止めた場合でも粘弾性を計算した。その結果、対称星形 (S101K60) ではいずれのダイナミクスも粘弾性緩和に全く影響しなかった。これは分岐点周囲でのダイナミクスを考慮しない従来の動的管膨張理論でも対称星形高分子の粘弾性を再現できることと整合する。一方、非対称星形はいずれの場合も分岐点のブラウン運動を止めると緩和が遅くなった。次に分岐点まわりのトポロジーの組み換えにおいては、長鎖分岐の分子量が短鎖分岐の分子量に対して大きい A2B182K60 では緩和が遅くなったが、長鎖分岐の分子量が小さい A2B73K60 では影響がなかった。これは後者においては動的管膨張だけで緩和が説明できることを意味している。これらの結果から非対称星形高分子の緩和においては動的管膨張が重要であるが、従来の理論で無視されている分岐点の (膨張管内での) 拡散による緩和を考慮する必要があることが示された。

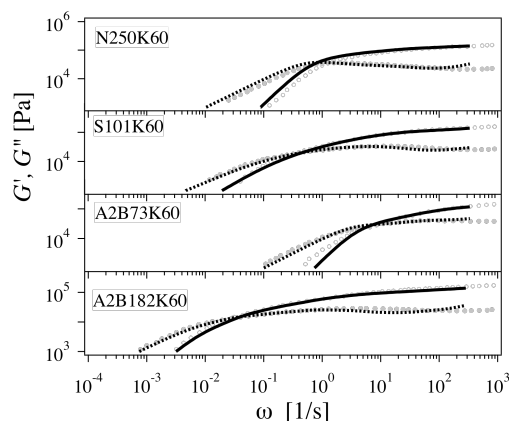


図2 直鎖, 対称/非対称星形 PI 溶液の粘弾性予測

実験においては Cayley-Tree 分岐構造をもつポリイソプレンも検討した (H. Watanabe et al, Macromolecules 41, 6110-6124 (2008)). ここでは分岐点間に挟まれたセクションが管膨張を阻害するために、分岐点の拡散運動による効果は大きくないと考えられる。

線形粘弾性域における結果を踏まえて、非線形粘弾性域における検討も行った。

まず直鎖高分子において大変形下での束縛解放を検討した (K. Furuichi et al, J Chem Phys, 133, [174902]1-10 (2010); K. Furuichi et al, Rheologica Acta, 47(5-6), 591-599 (2008)). その結果、流動束縛解放の効果で大変形下では分子間のからみあいが増加し、それによって部分鎖の張力が低下して分子の伸縮運動に遅れが出るということがわかった。それによって定常

せん断流動下および伸長流動下でも精度よく実験結果を再現できることがわかった (T. Yaoita et al, J. Chem. Phys. 128, 154901 (2008); Y. Masubuchi et al, J. Chem. Phys. 131, 114906 (2009)).

次に楕形高分子で検討を行った。まず我々のモデルが楕形高分子でも線形/非線形粘弾性を定量予測できることを確認した。図5に線形粘弾性と非線形粘弾性の予測結果を示す。試料はポリイソブレンであり、分岐鎖の分子量が 10.2k, 主鎖分子量が 85.1k, 分岐鎖数は 4.6 である。(計算では分岐鎖数を 5 とした)。この結果を踏まえて束縛解放の様子を調べたところ、楕形高分子においてはまず分岐鎖の流動束縛解放が起きる。しかし流動束縛解放の効果は直鎖や星形分岐鎖に比べて限定的であり、かつ主鎖の緩和が起きる前に流動束縛解放による束縛消失の加速効果がなくなることがわかった。これは主鎖間の長寿命の束縛によって分岐鎖の束縛解放が制限されてしまうためである。すなわち、大変形下において、主鎖に加わる流動束縛解放の効果は小さい。従来分岐高分子の緩和理論において流動束縛解放は無視されてきたが、はからずもその仮定が妥当であることが示された。

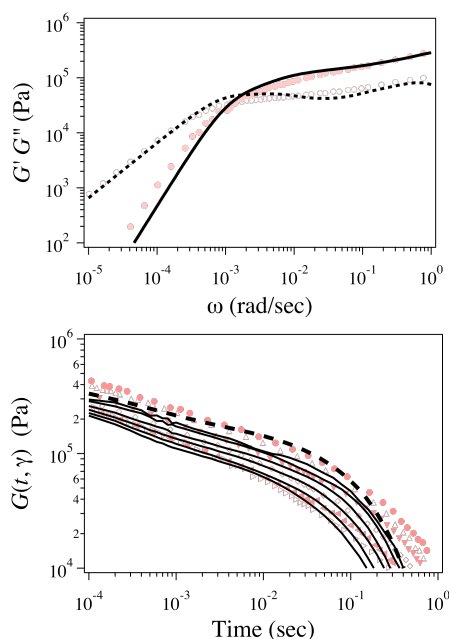


図5 楕形PIの線形/非線形粘弾性予測

以上の結果から、本研究で目的とした、分岐高分子に対する我々の粗視化シミュレーションの定量的検証は十分に実施され、星形、非対称星形、楕形に対して(直鎖高分子で得られたパラメータにより)粘弾性の定量予測が可能であることが確認された。

また動的管膨張に対する粗視化理論の検討の結果、従来無視されている分岐点の膨張管内のブラウン運動による緩和の促進効果が、非対称星形高分子においては重要であることが示唆された。しかし楕形鎖や Cayley-Tree 分岐鎖では無視できる。また楕形高分子においては流動束縛解放の効果も小さい。このようなことから(結果的にではあるが)従来の理論において無視されている緩和機構は、複数の分岐点をもつ分子においては、それほど大きな役割を果たしていないことが示唆された。結論として、現時点では従来の動的管膨張理論を大きく改変する必要があるような緩和機構は見つからなかった。

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 24 件)

- 1) Y. Masubuchi, T. Yaoita, Y. Matsumiya, H. Watanabe, Primitive Chain Network Simulations for Asymmetric Star Polymers, J. Chem. Phys, in print (2011) 査読有
- 2) Y. Masubuchi, Y. Matsumiya, H. Watanabe, S. Shiromoto, M. Tsutsubuchi, Y. Togawa, Primitive Chain Network Simulations for Comb-Branched Polymer under Step Shear Deformations, Rheo. Acta, in print (2011) 査読有
- 3) K. Furuichi, C. Nonomura, Y. Masubuchi and H. Watanabe, Chain contraction and nonlinear stress damping in primitive chain network simulations, J Chem Phys, 133, [174902]1-10 (2010) 査読有
- 4) Y. Masubuchi, K. Furuichi, K. Horio, T. Uneyama, H. Watanabe, G. Ianniruberto, F. Greco, and G. Marrucci, Primitive chain network simulations for entangled DNA solutions, J. Chem. Phys. 131, 114906 (2009). 査読有 <http://hdl.handle.net/2433/109329>
- 5) Y. Masubuchi, G. Ianniruberto, F. Greco and G. Marrucci, Quantitative comparison of primitive chain network simulations with literature data of linear viscoelasticity for polymer melts, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 149(1-3), 87-92 (2008) 査読有
- 6) Y. Masubuchi, H. Watanabe, G. Ianniruberto, F. Greco and G. Marrucci, Comparison among Slip-Link Simulations of Bidisperse Linear Polymer Melts, Macromolecules 41 (21), 8275-8280 (2008) 査読有 <http://hdl.handle.net/2433/78937>
- 7) H. Watanabe, Y. Matsumiya, E. van Ruymbeke, D. Vlassopoulos and N.

Hadjichristidis, Viscoelastic and Dielectric Relaxation of a Cayley-Tree-Type Polyisoprene: Test of Molecular Picture of Dynamic Tube Dilation, *Macromolecules* 41, 6110-6124 (2008) 査読有

- 8) Y. Masubuchi, G. Ianniruberto, F. Greco and G. Marrucci, Primitive Chain Network Simulations for Bidisperse Linear Polymers *Int. J. Nano Adv. Eng. Mat., Part A.* 1(1), 35-40 (2008) 査読有

[学会発表] (計 31 件)

- 1) 増渕雄一, 高分子の熔融状態におけるからみあいと粘弾性物性, 第 18 回日本ポリイミド・芳香族系高分子研究会, 2010 年 11 月 26 日, 東京工科大学 (東京) (招待講演)
- 2) 増渕雄一, 粗視化シミュレーションにおける分岐高分子の緩和と分岐点の運動, 第 59 回高分子討論会, 2010 年 9 月 15 日, 北海道大学 (札幌)
- 3) 増渕雄一, 分子シミュレーションによる高分子の熔融物性予測, 化学工学会 第 42 回秋季大会, 2010 年 9 月 7 日, 同志社大学 (京都) (招待講演)
- 4) Y. Masubuchi, T. Uneyama and H. Watanabe, Chain Dynamics in a Modified Primitive Chain Network Model with Uncoupled Sliplinks, 5th Pacific Rim Conference on Rheology, 2010/8/3 - Sapporo, Japan.
- 5) Y. Masubuchi, Multi-scale simulations for entangled polymers utilizing primitive chain network simulations, MACRO2010 43rd IUPAC World Polymer Congress, July 15, 2010/7/15 - Glasgow, UK.
- 6) Y. Masubuchi, Multi-scale simulations with primitive chain network model for entangled polymers, SCHOOL AND CONFERENCE ON MULTISCALE MODELING AND SIMULATIONS OF HARD AND SOFT MATERIALS, 2009/12/17- Bangalore, India. (招待講演)
- 7) 増渕雄一, 高分子液体の高速分子シミュレーション法, 第 23 回分子シミュレーション討論会, 2009 年 12 月 1 日, 吹上ホール (名古屋) (招待講演)
- 8) 増渕雄一, からみあい高分子ダイナミクスのシミュレーション, 第 24 回中国四国地区高分子若手研究会, 2009 年 11 月 13 日, あわぎんホール (徳島) (招待講演)
- 9) Y. Masubuchi, Primitive Chain Network Simulations for Entangled Polymer Dynamics, 3rd NU-UM Joint Symposium on Supramacromolecular

Material Science and Engineering in the 21st Century, 2009/11/12- Nagoya, Japan (招待講演)

- 10) 増渕雄一, 粗視化分子シミュレーションによる高分子の長時間ダイナミクスの可視化, 化学工学会第 41 回秋季大会, 2009 年 21 年 9 月 18 日, 広島大学 (広島) (招待講演)
- 11) 増渕雄一, 高分子の運動とレオロジー, 第 19 回東海ミニシンポジウム, 2009 年 9 月 7 日, 豊田中央研究所 (長久手町) (招待講演)
- 12) 増渕雄一, からみあい高分子のシミュレーション, 第 47 回高分子材料自由討論会, 2009 年 7 月 6 日, ホテル竹島 (蒲郡) (招待講演)
- 13) Y. Masubuchi, Molecular Simulations for Entangled Polymer Dynamics, The 3rd International Symposium on Polymer Science, Nagoya Univ., 2008/11/10 - Nagoya, Japan (招待講演)
- 14) Y. Masubuchi, Molecular simulations of polymers with primitive chain network model, MSSMBS2008, 2008/9/12 - Dubna, Russia (招待講演)
- 15) Y. Masubuchi, A Model for Molecular Simulations of Entangled Polymer Systems, ATEMA-AES 2008, 2008/9/2 - Cesena, Italy (招待講演)

[図書] (計 1 件)

増渕雄一, おもしろレオロジー, 技術評論社 (2010) 239 ページ

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増渕 雄一 (MASUBUCHI YUICHI)
京都大学・化学研究所・准教授
研究者番号: 4 0 2 9 1 2 8 1

(2) 研究分担者

渡辺 宏 (WATANABE HIROSHI)
京都大学・化学研究所・教授
研究者番号: 9 0 1 6 7 1 6 4
松宮 由実 (MATSUMIYA YUMI)
京都大学・化学研究所・助教
研究者番号: 0 0 3 7 8 8 5 3

(3) 連携研究者

該当なし