

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21350063

研究課題名（和文）ブロック共重合体ダイナミクスに対する熱力学的拘束と空間的拘束の効果

研究課題名（英文）Effects of thermodynamic and spatial constraints on dynamics of block copolymers

研究代表者

渡辺 宏 (WATANABE HIROSHI)

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：90167164

研究成果の概要（和文）：ポリイソプレン (I) とポリスチレン (S) より成るブロック共重合体ドメイン系について、A 型双極子を持つ I の運動を反映する誘電緩和を検討した。SIS トリブロック系中のゲスト I 鎖の緩和挙動から、ドメイン内の鎖運動は密度揺らぎを抑える熱力学的拘束に支配されて自己相似的となること、双極子反転型 SIIS トリブロック系と SI ジブロック系の挙動から、トリブロック系の球状/シリンダー状ドメイン中で I ブロックは末端間距離に応じてループ型、擬ブリッジ型のいずれの運動も示すことなどが見出された。

研究成果の概要（英文）：Dielectric relaxation was examined for microdomain-forming block copolymer systems composed of polystyrene (S) and polyisoprene (I), the latter having the type-A dipoles parallel along the chain backbone. The slow relaxation behavior detected end-to-end fluctuation of the I chains. The behavior of guest homo-PI chains mixed in I domains of the SIS triblock copolymer indicated that the chain dynamics is governed by the osmotic constraint (allowing no density fluctuation) to become self-similar. The behavior of dipole-inverted SIIS triblock and its precursor SI diblock copolymers suggested that the I block of SIS in spherical/cylindrical I domains exhibits either loop-type or pseudo-bridge-type dynamics according to its end-to-end distance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011 年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・高分子化学

キーワード：ブロック共重合体、ダイナミクス、熱力学的拘束、空間的拘束

1. 研究開始当初の背景

一般に、ブロック共重合体は、構成ブロック鎖同士の反発によってマイクロ相分離を起こし、種々の形態のマイクロドメインを形成する。自己無撞着場理論などに基づいて、マイクロドメインの平衡構造が、ブロック鎖の形態エントロピーを増加させようとする熱力学的駆動力、異種ブロック間の接触を減少させようとする熱力学的駆動力、および、マイクロ

ドメイン内のセグメント密度を一定に保つ熱力学的駆動力の拮抗によって決定されることが明らかになっている。従って、ブロック鎖のダイナミクスに対しても、これらの熱力学的駆動力による拘束と、各マイクロドメイン内への空間的拘束が大きな影響を与えることは疑いようがない。特に、一定密度を保つ熱力学的駆動力は、隣接ブロック鎖が協同的に運動することを要請し、この運動を遅延

させ、そのモード分布をブロードにすると考えられる。しかし、従来の研究では、少数の例外（たとえば本研究の代表者の研究）を除いて、これらの熱力学的拘束と空間的拘束がブロック鎖のダイナミクスに与える影響には注意が払われず、そのため、ブロック鎖ダイナミクスとそれに対応する動的物性についての分子論的な理解は、極めて不十分なまま残されてきた。

2. 研究の目的

上記の背景を鑑み、本研究は、熱力学的拘束と空間的拘束がブロック鎖ダイナミクスに与える影響を実験的に分離・評価して精密に理解することを主目的とする。

また、ABA 型トリブロック共重合体が A/B ラメラ構造を形成する場合、中央 B ブロックの形態は、両端が同一 A ドメインに固定されたループ、両端が異なる A ドメインに固定されたブリッジという 2 つの形態に分類され、これらの形態の B ブロックは異なるダイナミクスを示すことが知られている。一方、B ブロックが球状およびシリンダー状のドメインを形成する場合、B ブロックの両端は常に同一 A ドメインに固定されるので、全ての B ブロックは静的にはループ形態をとる。このような B ブロックが、動的にもループ型ブロックとして振る舞うかどうかは学術的に興味深いのが、これについての知見はこれまで皆無であった。この動的挙動を明らかにすることも、本研究の目的である。

3. 研究の方法

ポリイソプレン (I) が主鎖に平行な電気双極子 (A 型双極子) を持ち、ポリスチレン (S) がこの双極子を持たないことに着目し、本研究では、I と S より成るブロック共重合体系に対して、S がガラス状、I がゴム状となる 0°C において誘電緩和測定を行った。ガラス状の S は誘電不活性であり、また、ゴム状の I のセグメント運動は非常に速いため、実験で検出される遅い誘電緩和は、A 型双極子の揺らぎを誘起する I 鎖の大規模運動に帰属される。また、この運動に影響を与える I ドメインの形状は、電子顕微鏡観察および小角 X 線散乱測定で確認した。

上記の実験に用いる SI ジブロックおよび SIS トリブロック共重合体、ホモ I 直鎖は、逐次型リビングアニオン重合で合成した。また、I ブロックの両端がガラス状 S ドメインに固定された場合でも I ブロックの運動を誘電緩和として検出できるように、SI⁻アニオン・プレカーサーのカップリング反応によって、対称反転型の A 型双極子を有する SIIS トリブロック共重合体も合成した。試料の分子特性は、示差屈折計と紫外吸光計を併設した GPC によって決定した。

4. 研究成果

(1) 熱力学的拘束と空間的拘束がブロック鎖ダイナミクスに与える影響

図 1 は SIS 131-57-133 トリブロック共重合体 (試料コード番号は各ブロックの分子量 M を千単位で表す)、および、この共重合体とゲスト I9 直鎖 ($M_I = 9$ 千)、S11 直鎖 ($M_S = 1.1$ 万) のブレンド系の 0°C における誘電損失 ϵ'' の角度周波数 (ω) 依存性を示す。系内には球状 I ドメインが形成されていること、ブレンド系のゲスト I9 は球状ドメイン内に混合されていることが、電子顕微鏡観察および小角 X 線散乱測定から確認されている。0°C では S がガラス状であるため、図 1 で観察される遅い誘電緩和は系内の I 成分の大規模運動 (末端間揺らぎ) を反映している。

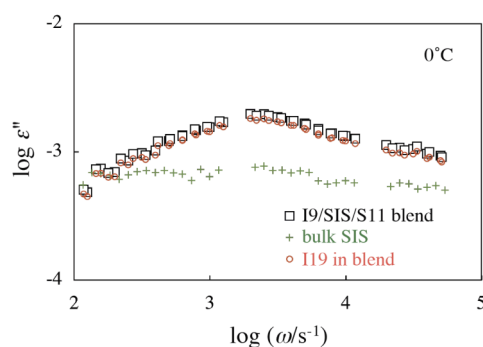


図 1. SIS 131-57-133 バルク系および I9/SIS 131-57-133/S11 ブレンド系の損失誘電率。

図 1 から、SIS バルク系 (+) は、その I ブロックの両端がガラス状の S マトリクスに固定されているため、誘電緩和を示さないことがわかる。一方、ブレンド系 (□) では、系内に少量だけ含まれているゲスト I9 直鎖 (体積分率 $v_I = 0.056$) の末端間揺らぎを反映する誘電緩和が明確に観察される。S が誘電損失を示さないため、ブレンド系のデータを Maxwell-Wager 解析して得た I 成分の誘電損失 ϵ''_I (○) は、ブレンド系全体の ϵ'' (□) に非常に近い。

図 2 は種々の分子量のゲスト I 鎖 (試料コード番号は分子量を千単位で表す) を体積分率 $v_I = 0.056$ だけ含む SIS 131-57-133 および SIS 35-13-36 ブレンド系の ϵ'' データを、各ゲスト鎖のバルク系の ϵ'' データと比較する。上記のように、ブレンド系のデータはゲスト I 鎖の末端間揺らぎを反映する。また、全ブレンド系について、球状 I ドメインが形成されていること、ゲスト I 鎖はこのドメイン中に混合されていることが、電子顕微鏡観察および小角 X 線散乱測定から確認された。図 3 は、ゲスト I 鎖のバルク状態における非摂動末端間距離 R_{PI} と球状ドメインの半径 d_{PI} の比をゲスト鎖分子量 M_{g-PI} に対してプロットした結果を示す。

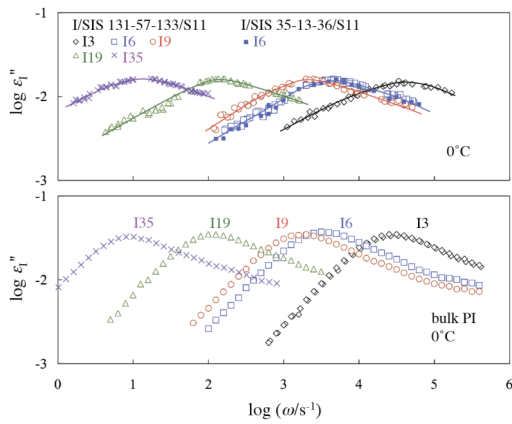


図 2. I/SIS/S11 ブレンド系とゲスト I 鎖バルク系の ϵ_1'' データ。

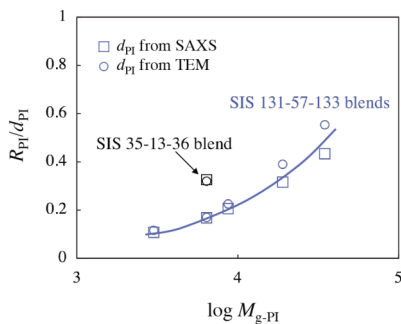


図 3. I/SIS/S11 ブレンド系中のゲスト I 鎖の非摂動末端間距離とドメイン半径の比。

図 2 が示すように、ブレンド系、バルク系とも、ゲスト I 鎖の分子量増加と共に誘電緩和が低周波数側に移行している。このことから、I 鎖の末端間揺らぎが誘電緩和として検出されていることが確認される。さらに、ブレンド系とバルク系のデータの比較から、ゲスト I 鎖の ϵ_1'' 極大周波数 ω_{peak} は両系でほぼ同じであることがわかる。しかし、バルク系では、 ω_{peak} より低周波数側で鎖の緩和完了を意味する $\epsilon_1'' \propto \omega$ という比例性が観察されるのに対し、ブレンド系では ϵ_1'' の ω 依存性が弱く（この比例性が観察されず）、測定周波数域では緩和が完了していない。この結果から、球状 I ドメイン中のゲスト I 鎖の末端間揺らぎは、ゲスト鎖バルク系中に比べて、著しく遅延され、モード分布もブロードになっていることが結論される。

この遅延とブロードニングは、球状 I ドメイン中のセグメント密度を一定に保つことを要請する熱力学的拘束と、ゲスト I 鎖が球状 I ドメインから脱出できないという空間的拘束に由来する。図 3 の R_{PI}/d_{PI} 比が示すように、ゲスト I 鎖の分子量 M_{g-PI} が増加するにつれて空間的拘束は著しく強くなる（ゲスト鎖が取り得る形態が制限される）。しかし、図 4 に示すように、ゲスト鎖の体積分率で規格化した誘電損失 ϵ_1''/v_1 の規格化周波数

ω/ω_{peak} に対する依存性は、 M_{g-PI} が増加してもほとんど変化しない。この結果から、一定密度を保つ熱力学的拘束が球状 I ドメイン中のゲスト I 鎖の大規模運動を支配し、空間的拘束は副次的効果しか示さないことが結論される。さらに、 $R_{PI} (\propto M_{g-PI})$ が異なるゲスト鎖について、同一のべき乗型の $\epsilon_1'' (\propto \omega^{1/2})$ が観察されることから、熱力学的に拘束された鎖の運動が空間スケールに対して自己相似性を持つことが示唆される。これらの知見は、従来の研究では全く得られていなかったものであり、ブロック共重合体のマイクロドメイン中の熱力学的拘束に対する基礎的理解をもたらす。

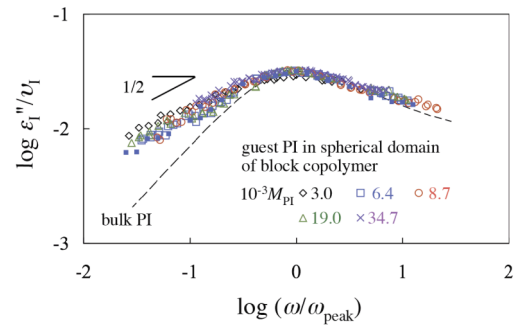


図 4. I/SIS/S11 ブレンド系中のゲスト I 鎖の規格化誘電損失。

上記の熱力学的拘束についての理解をさらに精密化するため、SI ジブロック共重合体系についても、誘電緩和と挙動を検討した。図 5 はラメラ (La) 状の I ドメインを形成する SI 12-12 共重合体、シリンダー (Cyl) 状の I ドメインを形成する SI 48-13 共重合体、球状 (Sph) の I ドメインを形成する SI 48-13/S11 ブレンド系の 0°C における規格化誘電損失 ϵ_1''/v_1 を比較する。これらの系の誘電緩和は、一端がガラス状 S ドメインに固定された I ブロックの自由端の運動（末端間揺らぎ）を反映する。I 鎖バルク系（点線）と比べて、緩和モード分布は La (\blacklozenge)、Cyl (\blacktriangle)、Sph (\circ) の順にブロードとなり、また緩和強度もこの順番で低下している。この結果は、一定セグメント密度を保つ熱力学的拘束が I ブロックの運動に与える効果が、この順番で強くなっていることを示唆する。

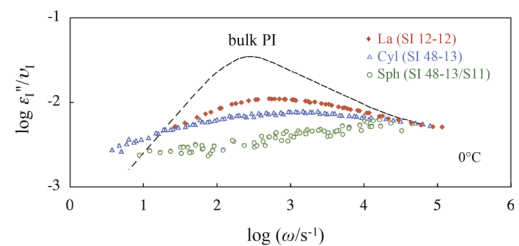


図 5. SI ジブロック共重合体系の中の I ブロックの規格化誘電損失。

熱力学的拘束が I ブロックの運動に与える効果の強さの順番は、I ドメインの連続性と良く対応する。すなわち、La ドメインは La 面に平行な 2 方向に対して連続的であり、この方向の I ブロックの運動は、一定密度を保つ熱力学的拘束の下でもかなり自由に起こる。この運動は La 面に平行な方向にセグメントを移送するので、La 面に垂直な方向の運動で生じるセグメント密度の揺らぎを補償する。このため、面に垂直な方向の運動にも自由度が生じ、I ブロックの協同運動性が低下すると考えられる。一方、Cyl ドメイン中では、このセグメント移送が 1 方向(Cyl 軸方向)に限定され、さらに、Sph ドメイン中では、自由なセグメント移送が起こり得ない。このため、熱力学的拘束が I ブロックの運動に与える遅延効果は、図 5 で観察されたように、La、Cyl、Sph の順に強くなると考えられる。この知見は、従来の研究では全く得られていない新規な知見であり、熱力学的拘束を精密に理解することを可能とする。

(2) トリブロック共重合体の中央ブロックのループ/ブリッジ分布

「研究の目的」の項で述べたように、トリブロック共重合体が La ドメインを形成する場合、図 6a に示すように、中央ブロックの形態はループとブリッジという 2 つの形態に分類される。一方、中央ブロックが Cyl、Sph ドメインを形成する場合、このブロックの形態は、静的にはループ型 (図 6b) のみとなる。

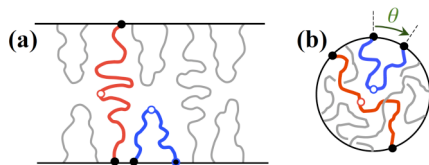


図 6. トリブロック共重合体の中央ブロックのループ/ブリッジ形態。

上記の中央ブロックの運動を検討するため、双極子反転型の II ブロックを中央ブロックとする SIIS トリブロック共重合体と、これを中央で切断した形の SI ジブロック・プレカーサーの ϵ'' データを比較した。その結果を図 7 に示す。(試料コード番号はブロック分子量を千単位で表す。)SIIS 系の ϵ'' は II ブロックの中心の運動を、SI 系の ϵ'' は I ブロックの自由端の運動を反映する。

図 7a に示す La 系では、低周波数域において SIIS 系と SI 系の ϵ'' データの周波数依存性は同一となるが、 ϵ'' の値は前者の方が小さい ($\epsilon_{SIIS}'' \approx 0.6\epsilon_{SI}''$)。この結果は、SIIS のループ型 II ブロックと SI のテール型 I ブロックの運動の類似性、ブリッジ型 II ブロックとテール型 I ブロックの運動の差を反映する。すなわち、ループ型 II ブロックの中

点は、その左右の部分ブロックによって同一方向に引っ張られるが、各部分ブロックの張力はテール型 I ブロックの張力に等しい。また、各部分ブロックの摩擦もテール型 I ブロックの摩擦に等しい。従って、一定密度を保つ熱力学的拘束の下でも、ループ型 II ブロックの中心の運動は、テール型 I ブロックの自由端の運動と類似となる。一方、ブリッジ型 II ブロックでは、中心は部分ブロックによって逆方向に引っ張られるので、熱力学的拘束の下では、中心がラメラ中央付近に局在化される。従って、ブリッジ型 II ブロックの中心の運動は、テール型 I ブロックの自由端の運動より速く、また、振幅も小さくなると考えられる。この分子描像から、SIIS 系の低周波数域の ϵ_{SIIS}'' はループ型 II ブロックの運動を反映し、実験的に観察された $\epsilon_{SIIS}'' \approx 0.6\epsilon_{SI}''$ という関係は、ループ型 II ブロックの割合が $\phi_{loop} \approx \epsilon_{SIIS}''/\epsilon_{SI}'' \approx 0.6$ 、ブリッジ型 II ブロックの割合が $\phi_{bridge} \approx 0.4$ であることを示唆する。これらの ϕ 値は自己無撞着場理論の予言と良く一致する。

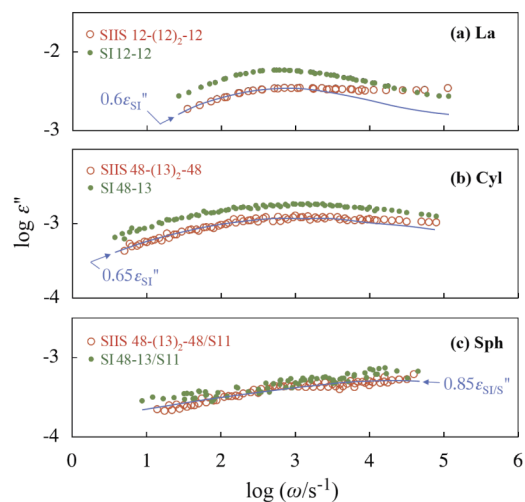


図 7. SI ジブロック共重合体系と SIIS トリブロック共重合体系の誘電損失の比較。

Sph、Cyl ドメイン中の II ブロックについて、静的な意味でのループ型、ブリッジ型の差はない。しかし、これらのドメイン系でも ϵ_{SIIS}'' データと ϵ_{SI}'' データの差が観察され (図 7b、7c)、一部の II ブロックが動的意味において擬ブリッジ型として振る舞うことが示唆される。これに対応して、低周波数域では ϵ_{SIIS}'' と ϵ_{SI}'' の周波数依存性が一致し (図 7b、7c)、擬ブリッジ型 II ブロックの分率が $\phi_{bridge}^* \approx 1 - \epsilon_{SIIS}''/\epsilon_{SI}'' \approx 0.35$ (Cyl 系)、 ≈ 0.15 (Sph 系) と推定される。この擬ブリッジ型の挙動を見出し、その割合を指定した研究は、本研究が世界で初めてである。

上記の ϕ_{bridge}^* 値は、II ブロックの中心がその左右の部分ブロックによって同一方向

に引っ張られるか (動的なループ型挙動)、逆方向に引っ張られるか (動的な擬ブリッジ型挙動) の境界に対応すると考えられる。この考えを検証するため、Sph ドメイン中の II ブロックが Gauss 型の弾性エネルギーを持つと近似して、その両端がなす角度 θ (図 6b 参照) の分布関数を定式化し、 $\phi_{\text{bridge}}^* = 0.15$ に対応する θ の臨界値を算出した。その結果、臨界値は $\theta^* \cong 1.8 \text{ rad} \cong \pi/2$ となった。この θ^* に対して $f_1 \cdot f_2 \sim \cos \theta^* \cong 0$ (f_i は 2 つの部分ブロックの張力ベクトル) となることから、 θ^* を与える ϕ_{bridge}^* が左右の部分ブロックによる引っぱり方向の反転の境界に対応することが確認された。シリンダー状ドメインについても、同様の結果が得られた。

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 35 件)

1. Q. Chen, Y. Matsumiya, T. Iwamoto, K. Nishida, T. Kanaya, H. Watanabe, A. Takano, K. Matsuoka, and Y. Matsushita, "Dielectric Behavior of Guest cis-Polyisoprene Confined in Spherical Microdomain of Triblock Copolymer", *Macromolecules*, 査読有, vol.45, 2012, 2809–2819. DOI: 10.1021/ma3001687
2. T. Yaoita, T. Isaki, Y. Masubuchi, H. Watanabe, G. Ianniruberto, and G. Marrucci, "Primitive Chain Network Simulation of Elongational Flows of Entangled Linear Chains: Stretch/Orientation-induced Reduction of Monomeric Friction", *Macromolecules*, 査読有, vol.45, 2012, 2773–2782. DOI: 10.1021/ma202525v
3. E. van Ruymbeke, Y. Masubuchi, and H. Watanabe, "Effective Value of the Dynamic Dilution Exponent in Bidisperse Linear Polymers: from 1 to 4/3", *Macromolecules*, 査読有, vol.45, 2012, 2085-2098. DOI: 10.1021/ma202167q
4. Y. Masubuchi, Y. Matsumiya, H. Watanabe, S. Shiromoto, M. Tsutsubuchi, and Y. Togawa, "Primitive chain network simulations for comb-branched polymer under step shear deformations", *Rheol. Acta*, 査読有, vol.51, 2012, 193-200. DOI: 10.1007/s00397-011-0574-x
5. S. Suzuki, T. Uneyama, T. Inoue, and H. Watanabe, "Nonlinear Rheology of Telechelic Associative Polymer Networks: Shear Thickening and Thinning Behavior of Hydrophobically Modified Ethoxylated Urethane (HEUR) in Aqueous Solution", *Macromolecules*, 査読有, vol.45, 2012, 888-898. DOI: 10.1021/ma202050x
6. Q. Chen, Y. Matsumiya, and H. Watanabe, "Dynamics in Miscible Blends of Polyisoprene and Poly(p-tert-butyl styrene): Thermo-Rheological Behavior of Components", *Polymer J.*, 査読有, vol.44, 2012, 102-114. DOI:10.1038/pj.2011.33
7. T. Yaoita, T. Isaki, Y. Masubuchi, H. Watanabe, G. Ianniruberto, and G. Marrucci, "Primitive Chain Network Simulation of Elongational Flows of Entangled Linear Chains: 1. Role of Finite Chain Extensibility", *Macromolecules*, 査読有, vol.44, 2011, 9675-9682. DOI: 10.1021/ma202166y
8. C. Chung, T. Uneyama, Y. Masubuchi, and H. Watanabe, "Numerical study of chain conformation on shear banding using diffusive Rolie-Poly model", *Rheol. Acta*, 査読有, vol.50, 2011, 753-766. DOI:10.1007/s00397-011-0554-1
9. T. Uneyama, K. Horio, and H. Watanabe, "Anisotropic Mobility Model for Polymers under Shear and its Linear Response Functions", *Phys. Rev. E*, 査読有, vol.83, 2011, [061802] 1-15. DOI: 10.1103/PhysRevE.83.061802
10. Y. Masubuchi, T. Yaoita, Y. Matsumiya, and H. Watanabe, "Primitive Chain Network Simulations for Asymmetric Star Polymers", *J. Chem. Phys.*, 査読有, vol.134, 2011, [194905]1-7. DOI: 10.1063/1.3590276
11. Y. Matsumiya, A. Uno, H. Watanabe, T. Inoue, and O. Urakawa, "Dielectric and Viscoelastic Investigation of Segmental Dynamics of Polystyrene above Glass Transition Temperature: Cooperative Sequence Length and Relaxation Mode Distribution", *Macromolecules*, 査読有, vol.44, 2011, 4355–4365. DOI: 10.1021/ma200631p
12. Q. Chen, Y. Matsumiya, Y. Masubuchi, H. Watanabe, and T. Inoue, "Dynamics of Polyisoprene-Poly(p-tert-butyl styrene) Diblock Copolymer in Disordered State", *Macromolecules*, 査読有, vol.44, 2011, 1585-1602. DOI: 10.1021/ma102595f
13. H. Watanabe, Q. Chen, Y. Kawasaki, Y. Matsumiya, T. Inoue, and O. Urakawa, "Entanglement Dynamics in Miscible Polyisoprene/Poly(p-tert-butyl styrene) Blends", *Macromolecules*, 査読有, vol.44, 2011, 1570-1584. DOI: 10.1021/ma102596b
14. K. Furuichi, C. Nonomura, Y. Masubuchi, and H. Watanabe, "Chain contraction and nonlinear stress damping in primitive chain network simulations", *J. Chem. Phys.*, 査読有, vol.133, 2010, [174902]1-10. DOI: 10.1063/1.3502681

15. Y. Masubuchi, T. Uneyama, H. Watanabe, G. Ianniruberto, F. Greco, and G. Marrucci. "Structure of entangled polymer network from primitive chain network simulations", *J. Chem. Phys.*, 査読有, vol.132, 2010, [134902]1-8. DOI: 10.1063/1.3370346
16. A. Uno, Y. Matsumiya, Y. Masubuchi, and H. Watanabe, "Rheological and Dielectric Behavior of Polyisoprene under Pressurized Carbon Dioxide", *J. Soc. Rheol. Japan*, 査読有, vol.38, 2010, 117-123. https://www.jstage.jst.go.jp/article/rheology/38/3/38_3_117/article/-char/ja/
17. H. Watanabe, "Slow Dynamics in Homopolymer Liquids", *Polymer J.*, 査読有, vol.41, 2009, 929-950. DOI:10.1295/polymj.PJ2009148
18. Y. Matsumiya, T. Inoue, T. Iwashige, and H. Watanabe, "Dielectric Relaxation of Polymer/Carbon Dioxide Systems", *Macromolecules*, 査読有, vol.42, 2009, 4712-4718. DOI: 10.1021/ma900004d
19. T. Uneyama, Y. Masubuchi, K. Horio, Y. Matsumiya, H. Watanabe, J. A. Pathak, and C. M. Roland, "A Theoretical Analysis of Rheodielectric Response of Type-A Polymer Chains", *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, 査読有, vol.47, 2009, 1039-1057. DOI: 10.1002/polb.21708

[学会発表] (計 75 件)

1. H. Watanabe, "Conformational Change of Bead-Spring Chain During Creep Process: Interplay of Eigenmodes" (**invited lecture**), *2011 AIChE Annual Meeting*, 2011/10/17, Minneapolis, MN, USA.
2. H. Watanabe, "Entanglement Relaxation in Miscible Polymer Blends" (contributed talk), *The Society of Rheology 83rd Annual Meeting*, 2011/10/11, Cleveland, OH, USA.
3. H. Watanabe, "Combining Dielectric Spectroscopy and Rheology to Study Polymer Dynamics" (**invited lecture**), *Dynacop Summer School "Understanding polymer dynamics: state of the art and challenges"*, 2011/6/20, Capri, Italy.
4. H. Watanabe, "Component Dynamics in Miscible Blends" (**plenary lecture**), *7th Annual European Rheology Conference*, 2011/5/13, Suzdal, Russia.
5. H. Watanabe, "Entanglement dynamics in miscible polyisoprene/poly(p-tert-butylstyrene) blends" (contributed talk), *2011APS March Meeting*, 2011/3/24, Dallas, TX, USA.
6. H. Watanabe, "Entanglement Dynamics in Homopolymers" (**invited lecture**), *The second International Soft Matter Conference*,

2010/7/8, Granada, Spain.

7. H. Watanabe, "Dielectric Tutorial" (**invited lecture**), *FIRST LABORATORY COURSE ON DIELECTRIC SPECTROSCOPY*, 2010/6/14, San Sebastian, Spain.
8. H. Watanabe, "Entanglement dynamics in miscible polymer blends" (**invited lecture**), *International Symposium on Polymer Physics*, 2010/6/7, Xi'nan, China.
9. H. Watanabe, "Rheo-dielectric behavior of cispolyisoprene under steady shear and LAOS" (contributed talk), *2010 Annual European Rheology Conference*, 2010/4/8, Göteborg, Sweden.
10. H. Watanabe, "Component Dynamics in Miscible Blends" (**invited lecture**), *20th Anniversary Symposium of the Korean Society of Rheology*, 2009/8/20, Seoul, Korea.

[図書] (計 2 件)

1. H. Watanabe, Y. Matsumiya, K. Horio, Y. Masubuchi, and T. Uneyama, World Scientific (Singapore), "Rheo-Dielectric Behavior of Soft Matters", in *Non-Equilibrium Soft Matter Physics*, vol.4, edited by S. Komura and T. Ohta, 2012, Chapter 2 (pp 37-87).
2. H. Watanabe and O. Urakawa, Taylor and Francis (CRC Press), "Component dynamics in miscible polymer blends", in *Functional Polymer Blends: Synthesis, Properties and Performance*, edited by V. Mittal, 2012, Chapter 3 (pp 53-126).

[その他]

ホームページ等

<http://rheology.minority.jp/jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

渡辺 宏 (WATANABE HIROSHI)

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：90167164

(2)研究分担者

増渕 雄一 (MASUBUCHI YUICHI)

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：40291281

松宮 由実 (MATSUMIYA YUMI)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：00378853

畝山 多加志 (UNEYAMA TAKASHI)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：10524720

(3)連携研究者: 該当なし