

機関番号：11501

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18068003

研究課題名（和文）

ソフトマターにおける連鎖構造・ネットワーク構造のダイナミクスとレオロジー

研究課題名（英文）

Dynamics and Rheology of chain-like and network structures in soft matters

研究代表者

瀧本 淳一 (TAKIMOTO JUN-ICHI)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50261714

研究成果の概要(和文):

ソフトマター中に存在する種々の 1 次元連鎖構造・ネットワーク構造が示す物性として、環動ゲルの非線形弾性、会合性高分子が作る一時的ネットワークの線形粘弾性、平板状低分子が積層して作る連鎖構造と液晶相および流動による変化、などをシミュレーションする手法の開発と適用を行った。また、会合性低分子が作る 2 次元構造である脂質 2 重膜について、膜上相分離と膜の形態変化が結合した現象のメカニズムを理論・シミュレーションにより解明した。

研究成果の概要(英文):

Various properties of chain-like and network structures in soft matters are studied by developing new simulation methods. Examples include nonlinear elasticity of slid-ring gels, linear viscoelasticity of associating polymers, and the chain-like structure formed by stacking of plate-like molecules. Also clarified the mechanism of the deformation of two-component lipid membranes coupled with the lateral phase separation.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	11,900,000	0	11,900,000
2007 年度	7,700,000	0	7,700,000
2008 年度	7,700,000	0	7,700,000
2009 年度	7,400,000	0	7,400,000
2010 年度	6,800,000	0	6,800,000
総計	41,500,000	0	41,500,000

研究分野:レオロジー、高分子物理

科研費の分科・細目:生物物理・化学物理 ソフトマターの物理

キーワード:絡み合い、会合性高分子、環動ゲル、モンテカルロ法、カラム型液晶相、脂質 2 重膜、膜上相分離

1. 研究開始当初の背景

(1) 多くのソフトマテリアル中には、高分子鎖など永続的な連鎖構造、あるいは会合性分子などが作る一時的な(生成・消滅を繰り返す)連鎖構造があり、それらはゲルなどの永続的なネットワーク構造や、絡み合いなどの一時的なネットワーク構造を形成する。これらは個々に研究が進められていたが、相互の関連はあまり議論されて来なかった。また、環動ゲルなどのような新しいネットワークを持つ物質も生まれつつあった。

(2) 平板状低分子の溶液では、斥力のみ系においても、平板が局所的に積み重なった比較的短いカラム状連鎖構造が存在することが、シミュレーションにより分かっていた。このような異方性の高い分子が形成する平衡下での構造と、流動から受ける影響を明らかにすることは、液晶の応用上も重要である。

(3) 平板低分子が引力相互作用で積層した会合体からなる会合性液晶は、光学的異方性を有

する薄膜材料への応用が考えられているが、光学的な異方性を発現させるには会合体の配向を制御する必要があり、主にずりによる流動配向の方法が用いられていた。

(4) 当初の計画ではこれらの1次元連鎖構造を対象にしていたが、会合性分子が作る2次元構造である脂質二重膜も対象に加えた。A02:今井グループにおいて膜の局所組成などの膜面内部の自由度が膜変形に及ぼす影響が実験的に明らかにされて来ていたので、今井グループと共同研究を進めた。

2. 研究の目的

(1) 絡み合い高分子、会合性高分子、環動ゲルなどのダイナミクスとレオロジーをシミュレーションする手法を開発し、適用することで、種々のネットワーク構造の統一的理解をめざす。

(2) 斥力相互作用する平板低分子が平衡状態において示すカラム状連鎖構造と液晶相、および流動によるその変化を、棒状等の他の形態の分子との違いを含めて明らかにするため、シミュレーション手法を開発し、適用する。

(3) 会合性液晶において本質的に重要な会合体の多分散性まで考慮し、ずり流動を印加した時の配向挙動および流動挙動をシミュレーションする手法を開発し、適用する。

(4) 2成分脂質二重膜については、2成分の膜上相分離と膜の変形が結合した問題について、理論・シミュレーションによりメカニズムの解明を目指す。

3. 研究の方法

(1) 絡み合い高分子に対して我々が開発してきた仮想空間スリップリンクモデル(多数の鎖を考慮するが、それぞれほとんど独立に運動し、鎖間相互作用は絡み合いを通してのみ考慮される)を改良するとともに、環動ゲルなどへも拡張する。また、会合性高分子については、他の分子の影響を平均的に取り扱う一本鎖モデルを開発する。必要に応じてより正確な(計算時間を必要とする)分子動力学シミュレーションを行って検証する。

(2) 斥力のみを有する平板分子系については、モンテカルロシミュレーションを用い、自由エネルギー評価の手法、ずり流動の効果を取り入れられる手法を新たに開発する。

(3) 引力をもつ会合性液晶については、会合体のサイズと配向の分布関数に対する自己無撞着方程式を数値的に解く。

(4) 2成分脂質二重膜については、膜上相分離と膜変形が、成分比の変化による膜弾性の変化を通じて結合する理論モデルを定式化し、数値計算する。

4. 研究成果

(1) ①2次元高分子:絡み合いが存在しない2次元高分子を分子動力学シミュレーションで調べ、静的な構造、線形粘弾性および非線形粘弾性を明らかにした。その結果、個々の分子鎖はディスク状にまとまった状態を取り分子鎖間の相互滲入は少ないことがわかった。従ってガウス鎖とは全く異なるが、そのダイナミクスは3次元で絡み合いのない(比較的分子量の)系を記述するラウスモデルを拡張することで良く記述出来ることを見いだした。

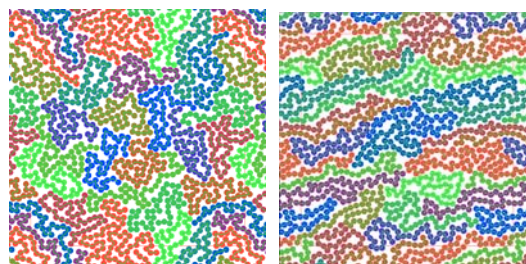


図 1. 2次元高分子の平衡(左)およびずり流動下(右)での典型的な形態

②絡み合い高分子:絡み合い高分子系に対して我々が開発してきた仮想空間スリップリンクモデルを改良し、絡み合い点間に存在するセグメント数の揺らぎを考慮すると、高速流動下での実験との不一致(応力の過大評価)が改善することを示した。

③環動ゲル:永続的なネットワークの例として、A01 伊藤らにより開発された新しいゲルである環動ゲルを取り上げた。このゲルは、架橋点において分子鎖が自分自身に沿って移動出来ることを特徴とする(すなわち高分子の絡み合い相互作用と似た架橋を持つ)。変形下で分子鎖の張力の不均衡が生じて、分子鎖が自身に沿って移動することで応力が均一化する「滑車効果」があるとされ、優れた力学物性(例えば高い最大伸長度)の原因と考えられている。A01 浦山らは環動ゲルの非線形応力を種々の変形下で測定し、化学ゲル(滑車効果の無い従来のゲル)のモデルである neo-Hookean モデルで良く表されるという結果を得ている。そこで滑車効果の影響を明らかにするため、絡み合い高分子に対する仮想空間スリップリンクモデルを拡張し、スリップリンク(架橋)における力学平衡まで考慮して、環動ゲルの非線形応力を計算した。その結果、neo-Hookean モデルと比べ、非等方性の強い変形(一軸伸長など)での応力が低下することが滑車効果の特徴であることを明らかにした(仮想空間ではなく実空間に分子鎖を配置するモデ

ルでも計算したが、結果はほとんど同じであった。これは絡み合い高分子系における仮想空間モデルの使用を正当化する結果である)。この結果は、浦山らの実験とは一致しない。

環動ゲルは、高分子鎖が多数の環状低分子を貫いたポリロタキサンにおいて、2つの環状分子を架橋することで得られるが、実際のゲル中には未架橋の環状分子が多数存在する。この自由環状分子が分子鎖に沿って並進運動するエントロピーが重要ではないか、という示唆が伊藤らによってなされたので、その効果を取り入れたモデルを作成したところ、自由環状分子数が多いと neo-Hookean モデルの結果に近づくと、いう結果を得た。

④会合性高分子の作る一時的ネットワーク: 分子鎖の両末端に会合基をもつテレケリック高分子については研究例が多いが、分子鎖中に多数の会合基を持つ場合(実用的には広く用いられている)については基礎的研究がほとんど無い。そこで、このような系の線形粘弾性を、一本鎖モデルの範囲で厳密に計算する手法を開発し、適用した。その結果、分子鎖中で会合している基の数 n が少ない場合は、テレケリック高分子と同様に単一の緩和時間を持つが、 n が大きい場合はラウス型の広い緩和時間分布を持つことが明らかになった。後者のラウス型緩和は、絡み合い高分子系において低分子量マトリックス中で高分子量成分が示す緩和と同様のものであり、一時的ネットワーク構造が局所的な束縛解放により緩和する場合に広く観測されるものと考えられる。

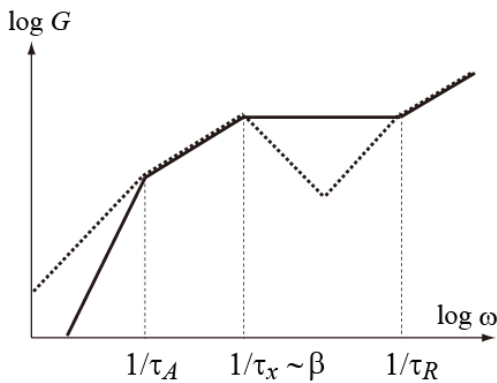


図2. 会合性高分子の線形粘弾性の模式図。分子内の会合基数が多い場合、会合基の寿命 τ_x と最長緩和時間 τ_A の間に第二のラウス型緩和が現れる。

(2)斥力のみを平板分子系: ①理想気体と剛体斥力分子系の内挿により、モンテカルロシミュレーションから自由エネルギーを求める新しい方法を提案した。そのために、系内の分子の重なり数 $w(\cdot)$ をパラメーターとして導入した。理想気体ではどのような重なりも許され、剛体斥力分子系では $w(\cdot)=0$ となる微視状態のみが許される。ある $w(\cdot)$ を満足する微視状態の数 $w(\cdot)$ を見積もり、自由エネルギー F は $F/(k_B T) = -\ln w(0)$ から評

価する。この手法により、厚みのない正方形の平板分子モデルが示すネマチック相では、自由エネルギー評価が可能で、等方-ネマチック相転移の評価が可能である事を示した。

②モンテカルロ法で剪断流動を考慮するために、剪断変形を行う仕事を外から与えるための剪断ポテンシャル場を導入した。このポテンシャルから計算されるボルツマン因子と分子間の剛体的斥力に則って微視状態を生成する汎用のプログラムを作成し、平板および棒状分子に適用した。

その結果、厚みのある円板状分子の系では、円板状分子の局所的なカラム構造によって形成されるキュバティックという構造から、カラムナー構造への構造相転移を説明できることが分かった。棒状分子の系では、流動に誘起された等方-ネマチック相転移を説明できることが分かった。また、流動配向角を計算し、剪断応力やひずみ速度に流動配向角が依存しない場合があることが説明できた。

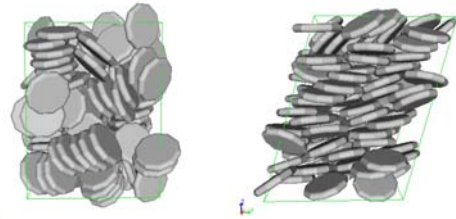


図3. ずり流動を考慮したモンテカルロ法により求めた平板分子系の構造。左: 平衡下、右: ずり流動下。

③円板状分子の特徴の一つは、配向した上で、カラム状の構造を作ろうとすることである。この特徴を議論するため、平行に並んだ剛体円柱のモンテカルロシミュレーションを行い、得られる構造を解析した。円柱は、直径と長さの比によって平板状にも棒状にもなることができる。平行に並べることで、相図としては棒状分子系の相図に近いものが現れる事が知られている。この研究では、平行に並んだ剛体円柱のシミュレーションの結果から、2体の分布関数を求め、その特徴を調べた。

成果として、2体の分布関数の近似形を、枯湯効果の理論から求めた。また、シミュレーション結果と比較することで、この近似系の適用範囲を評価した。このシミュレーションの結果は、分子の層が形成されているスメクチック-A の構造においても、層間の分子対のカラム的な構造が生成・消滅を繰り返していることを示唆していた。すなわち、スメクチックの層内を分子がある程度自由に拡散しているとはいっても、層間の分子同士で相互作用し、カラム状の対が形成されるということである。

④液晶の実験的研究として、ネマチック液晶として良く知られている 5CB に、電子吸引性の非液晶分子 TCNE を添加し、誘電率の測定と、電場

に対する液晶の応答性を評価した。5CB に TCNE を添加すると、誘電率の異方性と平均値が著しく上昇することが分かった。また、電界の下で測定した値は、TCNE の濃度 1mol% の付近で異常を示す。その結果から、5CB と TCNE について、おおよその相互作用半径を見積もった。

(3)会合性液晶: 自己無撞着方程式を数値的に解くことで、既に報告がある単分散の棒状液晶分子の I-N 相転移を再現し、ずり流動下での分子の動的挙動の転移 Tumbling \leftrightarrow Wagging \leftrightarrow Aligning を捉えることができた。また、液晶分子の長さが 2 様分布である場合を考えた。長い会合体が微量の場合には、ずり流動場下で短い会合体が Wagging を、長い会合体が Tumbling を示す動的状態が共存する領域が存在することが分かった。更に、長い会合体の量を増加すると、短い会合体の運動様式に引き込まれることが分かった。

(4)2成分脂質 2 重膜: ①浸透圧を変化させベシクルを様々な形へ変形させ、その後更に温度を制御することで起こる膜上相分離と、それに伴って生じる多様な膜変形現象。膜内の内部自由度(各成分の濃度)と膜のダイナミクスが互いに結合した現象を記述する理論モデルを構築し、数値計算を行うことで、実験で観測された膜変形現象の起源の解明に取り組んだ。数値計算の結果、浸透圧差をある臨界値より大きく印加した場合、赤血球に似た形と繭の形に似た形が安定状態として得られた。

更に、一相状態で得られた(1)赤血球形と(2)繭形のベシクルを初期状態として、相分離が起こる温度に急冷した後の数値計算の結果は実験結果を再現し、このような変形の起源として「脂質自身が有する硬さが膜の形状を介して相分離と結合し、形状に由来する異方的な相分離が引き起こされること」が分かった。本研究の成果の一部は、*Physical Review Letters* **100**, 148102-1 - 148102-4 (2008)に掲載され、3 年間で 26 回も引用されるなど、世界的にも注目されている。
②DHPC と DPPC の二成分ベシクル系において、一相状態から温度を下げて相分離を起させると膜に pore(穴)が形成され、pore 周辺の膜が roll 状に変形する現象のメカニズム。数値計算の結果から、「pore の周辺部の膜の縁を通した内外膜間の DHPC 分子の輸送と pore の縁周辺部の内外膜の局所組成差により生じる自発曲率が、roll 状構造の起源であること」を明らかにした。その成果は、*Biophysical Journal*, **99**, 472-479 (2010)に掲載されている。

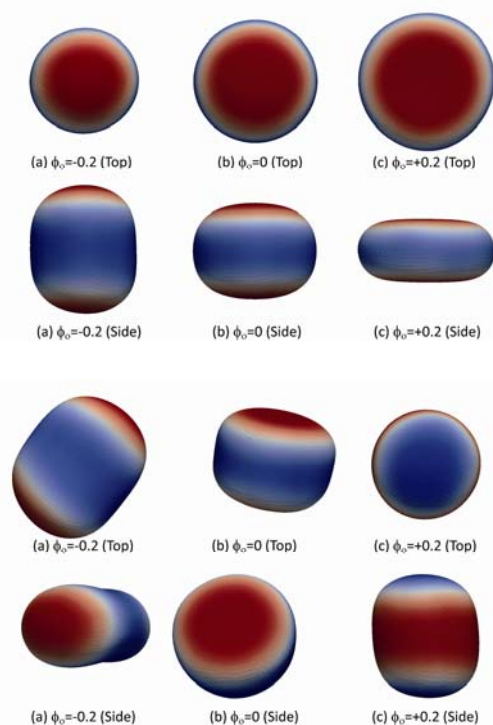


図4 異なる初期状態からの冷却で得られたベシクルの形態 (A[赤色]:硬い脂質膜、B[青色]:軟らかい脂質膜に対応)。上2段:一相状態の赤血球形ベシクルを初期状態、下2段:一相状態の繭形ベシクルを初期状態とする。それぞれ上段が top view、下段が side view で、左から脂質 A の組成分率が(a) $\phi = 0.4$, (b) $\phi = 0.5$, (c) $\phi = 0.6$ の場合。

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 32 件)

- ① Y. Sakuma, N. Urakami, T. Taniguchi and M. Imai, "Asymmetric distribution of cone-shaped lipids in a highly curved bilayer revealed by a small angle neutron scattering technique", *J. Phys. Cond. Matt.* Accepted. (査読あり)
- ② T. Taniguchi, M. Yanagisawa and M. Imai, "Numerical investigations of the dynamics of two-component vesicles", *J. Phys. Cond. Matt.* Accepted. (査読あり)
- ③ Akihiro Nishioka, Yuji Aoki, Takaya Suzuki, Akira Ishigami, Tomohiro Endo, Tomonori Koda, and Kiyohito Koyama, "Dynamic Mechanical Properties of Polystyrene-block-poly[ethylene-co-(ethylene-propylene)]-block-polystyrene Triblock Copolymer/hydrocarbon Oil Blends", *J. Appl. Polym. Sci.*, **121**, in press (2011) (査読あり)
- ④ Tsutomu Indei and Jun-ichi Takimoto,

- “Linear Viscoelastic Properties of Transient Network Formed by Associating Polymers with Multiple Stickers”, *J. Chem. Phys.*, **133**, 194902-1 – 194902-13 (2010) (査読あり)
- ⑤ M. Yanagisawa, M. Imai, and T. Taniguchi, “Periodic Modulation of Tubular Vesicles Induced by Phase Separation”, *Phys. Rev. E*, **82**, 051928-1 – 051928-9 (2010). (査読あり)
- ⑥ S. Nishitsuji, M. Takenaka, and T. Taniguchi, “Computer Simulation Study On The Shear-Induced Phase Separation In Semi-Dilute Polymer Solution By Using Ianniruberto- Marrucci Model”, *Polymer*, **51**, 1853-1860 (2010). (査読あり)
- ⑦ Y. Sakuma, T. Taniguchi, and M. Imai, “Binary Giant Vesicles with Pore Opening and Closing Ability”, *Biophysical Journal*, **99**, 472-479 (2010). (査読あり)
- ⑧ Tomonori Koda, Toshihiro Mitsuyoshi, Akihiko Kanazawa, Akihiro Nishioka, Ken Miyata, Go Murasawa, Susumu Ikeda, Takeshi Miura, and Yasuyuki Kimura, “Effect of Charge Transfer Complex on Electrical Properties of 4-Cyano-40-pentylbiphenyl”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**, 121404-1 – 121404-5 (2009) (査読あり)
- ⑨ T. Taniguchi, “Self-Consistent Field Theory and Density Functional Theory for Self-Organization in Polymeric Systems”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **78**, 041009-1 – 041009-11 (2009). (査読あり)
- ⑩ M. Yanagisawa, M. Imai, and T. Taniguchi, “Shape Deformation of Vesicles Coupled with Phase Separation”, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, **175**, 71-80 (2008). (査読あり)
- ⑪ M. Yanagisawa, M. Imai, and T. Taniguchi, “Shape Deformation of Ternary Vesicles Coupled with Phase Separation”, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 148102-1 – 148102-4 (2008). (査読あり)
- ⑫ R. Tuinier, J. K. G. Dhont, T. Taniguchi, and T.-H. Fan, “Nanoparticle Retardation in Semidilute Polymer Solutions”, *AIP Conference Proceedings*, **982**, 326-330 (2008). (査読あり)
- ⑬ M. Imai, M. Yanagisawa, and T. Taniguchi, “Shape Deformation of Ternary Vesicles Coupled with Phase Separation”, *AIP Conference Proceeding*, **982**, 667-671 (2008). (査読あり)
- ⑭ Tetsu Mitsumata*, Hiroyuki Kawada, and Jun-ichi Takimoto, “Thermosensitive Solutions and Gels Consisting of Poly(vinyl alcohol) and Sodium Silicate”, *Materials Letters*, **61**, 3878-3881 (2007) (査読あり)
- ⑮ Eiji Yamada, Akihiro Nishioka, Hideshige Suzuki, Tomonori Koda, and Susumu Ikeda, “Test of Ferroelectricity in Non-stretched Poly(vinylidene fluoride)/ Clay Nanocomposites”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, 7371-7374 (2007) (査読あり)
- ⑯ Daisuke Fukuzawa, Akihiro Nishioka, Tomonori Koda, and Susumu Ikeda, “Monte Carlo Simulation of a Model System for Ferroelectric Phase Transition in Polymers”, *Polym. J.*, **39**, 259-266 (2007) (査読あり)
- ⑰ T. Mitsumata, M. Nagata, T. Taniguchi, and S. Kawaguchi, “Storage Modulus of Poly(vinyl alcohol) Gels Loaded with Polyelectrolyte Particles”, *e-Polymer*, **56**, 1-8 (2007). (査読あり)
- ⑱ Akihiro Nishioka*, Akinari Minegishi, Tomonori Koda, Yuichi Masubuchi, Jun-ichi Takimoto, and Kiyohito Koyama, “The Influence of Heat Treatment on Uniaxial Elongational Flow behavior of PS/SBS Blends”, *NIHON REOROJI GAKKAISHI*, **34**, 189-197 (2006) (査読あり)
- ⑲ Tetsu Mitsumata*, Kazuki Sakai, and Jun-ichi Takimoto, “Giant Reduction in Dynamic Modulus of κ -Carrageenan Magnetic Gels”, *J. Phys. Chem. B*, **110**, 20217-20223 (2006) (査読あり)
- ⑳ M. Takenaka, S. Nishitsuji, T. Taniguchi, M. Yamaguchi, Koichi Tada, and T. Hashimoto, “Computer Simulation Study on the Shear-induced Phase Separation in Semidilute Polymer Solutions in 3-dimensional Space”, *Polymer*, **47**, 7846-7852 (2006). (査読あり)
- [学会発表] (計 23 件)
- ① T. Taniguchi, Miho Yanagisawa, and Masayuki Imai, “Numerical Investigation on Dynamics of Two Component Vesicle”, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010 (Aug. 25-29, 2010), Nara, Japan. (招待講演)
- ② Jun-ichi Takimoto, “Simulation Study of Nonlinear Elasticity of Model Sliding Gels”, 5th Pacific Rim Conference on Rheology (Aug 1-6, 2010), Sapporo, Japan
- ③ Shogo Fujimori, Tomonori Koda, Akihiro Nishioka, Ken Miyata, and Go Murasawa, “Hard Spherocylinders in a Shear Field”, 5th Pacific Rim Conference on Rheology (Aug. 1-6, 2010), Sapporo, Japan
- ④ T. Taniguchi, “Binary Blend of Rod like Molecules under Shear Flow”, 5th Pacific

- Rim Conference on Rheology (PRCR-5) (Aug. 1-6, 2010), Sapporo, Japan.
- ⑤ Tsutomu Idei and Jun-ichi Takimoto, “Viscoelastic Properties of Associating Polymers having Multiple Associative Groups”, The Society of Rheology, 81st Annual Meeting (Oct. 18-22, 2009), Madison, USA
- ⑥ T. Taniguchi, M. Yanagisawa, and M. Imai, “Shape Deformation of a Mixed Vesicle with a Composition Dependent Bending Rigidity”, 13th International Association of Colloid and Interface Scientists Conference on Surface and Colloid Science, and 83rd ACS Colloid and Surface Science Symposium (Jun. 14-19, 2009), New York, U. S. A.
- ⑦ T. Taniguchi, M. Sugimoto, and K. Koyama, “Dynamics of Block Copolymer under an Electric Field”, IUMRS-ICA2008, The International Union of Material Research Societies (IUMRS) International Conference in Asia (ICA) (Dec. 9-13, 2008), Nagoya, Japan. (招待講演)
- ⑧ T. Taniguchi, R. Uchino, M. Sugimoto, and K. Koyama, “Numerical Studies on Alignment Dynamics of Lamellae of Block Copolymer under an Electric Field”, The 5th workshop on Complex System (Sep. 25-28, 2008), Sendai, Japan.
- ⑨ T. Taniguchi, “Shape Deformation and Phase Separation Dynamics of Two Component Vesicle”, Non-equilibrium soft matter physics International Workshop on Physical Phenomena in Multi-Component Membranes (Mar. 17-19, 2008), Tokyo, Japan(招待講演)
- ⑩ Tomonori Koda, Akihiro Nishioka, Ken Miyata, and Go Murasawa, “Materials Science Based on Simulation of Repulsive Hard Particles”, The 8th International Symposium on “Global Renaissance by Green Energy Revolution” (Jan. 22-23, 2008), Nagaoka, Japan
- ⑪ T. Koda, A. Nishioka, K. Miyata, and G. Murasawa, “Estimation of Free Energy for System of Hard Spheres”, Symposium on the 50th Anniversary of the Alder Transition (Nov. 29-30, 2007), Kanazawa, Japan
- ⑫ T. Taniguchi, Ryoichi Uchino, M. Sugimoto, and K. Koyama, “Orientation Dynamics of Block Copolymer under an Electric Field”, AES - ATEMA'2007 International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications (Aug. 6-10, 2007), Montreal, Canada(招待講演)
- ⑬ T. Taniguchi, Ryoichi Uchino, M. Sugimoto, and K. Koyama, “Orientation Dynamics of Lamellae of Block Copolymer under an Electric Field”, Institute for Chemical Research International Symposium (ICRIS) 2007-The Science and Technology of Well-Controlled Polymer Assemblies-(Jun. 11-13, 2007), Kyoto, Japan. (招待講演)
- ⑭ Jun-ichi Takimoto, Yuko Ogawa, and Tetsu Mitsumata, “Statics and Dynamics of 2-dimensional Polymers -- a Simulation Study”, 8th International Symposium on Applied Rheology (ISAR8) (May 17, 2007), Seoul, Korea (招待講演)
- ⑮ Jun-ichi Takimoto, Masataka Sugimoto, Takashi Taniguchi, and Kiyohito Koyama, “Prediction of Elongational Viscosities of Polymeric Liquids By Stochastic Simulation”, 22nd Annual Meeting of the Polymer Processing Society (Jul. 2-6, 2006), Yamagata, Japan

6. 研究組織

(1)研究代表者

瀧本 淳一 (TAKIMOTO JUN-ICHI)
山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号:50261714

(2)研究分担者

香田 智則 (KODA TOMONORI)
山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号:60261715

谷口 貴志 (TANIGUCHI TAKASHI)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号:60293669