

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540426
 研究課題名（和文） 一軸性架橋剤流場による形状環境依存性高分子鎖の液晶ゲル形成機構の統計力学的解明
 研究課題名（英文） Statistical-mechanical approach to uniaxial cross-linking agent flow induced liquid-crystalline-gelation of solvent-condition-dependent polymer chain
 研究代表者
 山本 隆夫（YAMAMOTO TAKAO）
 群馬大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：80200814

研究成果の概要（和文）：カードランどりの高分子鎖の濃厚溶液をカチオン水溶液に透析することで、ゲルでありながら複屈折性をもつ液晶ゲルが形成されることが知られている。この液晶ゲル化過程は、次のように理解できることがわかった。[1]透析外液が透析内液と混合する際に、熱力学的性質が大きく変わる境界面が生じる。[2]この境界面では高分子鎖に“潮汐力”が働きその潮汐力により高分子鎖は伸長される。[3]透析外液により凝集・沈殿環境へと高分子溶媒が変化した結果、伸長高分子がゲル化する。この液晶ゲル化の多様性と普遍性を記述する巨視的な描像（generalized moving boundary 描像）と微視的な統計力学的モデルを構築した。

研究成果の概要（英文）：It is known that the liquid-crystalline gel is formed from concentrated solutions of polymers such as Curdlan by dialysis process. The mechanism of the liquid-crystalline gelation was understood as follows. [1] Mixing of extra dialysis solution and intra dialysis solution makes an interface where thermodynamic condition is changed extremely. [2] “The tidal force” induced by the extreme thermodynamic-condition change at the interface elongates the polymer chains. [3] The elongated polymer chains aggregate and form the liquid crystalline gel structures. The macroscopic model called the generalized moving boundary picture and a microscopic statistical mechanical model were developed to study diversity and universality of the liquid-crystalline gelation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：統計物理学

科研費の分科・細目：物理学・生物物理・化学物理

キーワード：液晶ゲル、透析、moving boundary 描像、潮汐力、不均一化学ポテンシャル、境界面、非平衡熱力学、高分子鎖の伸長

1. 研究開始当初の背景

β-1,3-グルカン構造をもつ多糖類であるカード

ラン(Curdlan)は、水には不溶であるが、NaOH水溶液には溶解し、Ca²⁺の添加により架橋する。ま

た、NaOH濃度が高い時ランダムコイル、低くなると三重螺旋構造をとる。我々はカードランをNaOH水溶液に溶かしたものを透析チューブに封入し、それをCaCl₂水溶液に浸漬する(つまり透析をおこなう)とゲル化することを発見した。このゲルをチューブに垂直な二平面で切断して切断面に垂直な方向から観測すると

[1]クロスニコル下で黒い十字とスペクトル分解した透過光が見える。

[2]ゲル外形と同心円状の濁ったリング(アモルファス層)が生成していてその半径は透析チューブの大きさでスケールできる。

という際だった特徴を持っている。[1]よりゲルは配向していて液晶的な性質を持つこと(液晶ゲル)、[2]より透析によるゲル形成にはサイズについてのスケーリング則が成り立っていることがわかる。さらに、二枚の透明円盤間にカードラン溶液を封入して透析することにより液晶ゲル層と透析内液(ゾル相)の境界面のダイナミクスを測定した。その結果、経過時間を円盤の半径の2乗で、液晶ゲル層厚を半径でスケールすることで異なる円盤半径での実験データがすべて同一曲線上にのることがわかった。

これらのスケーリング則は透析外液からのCa²⁺が液晶ゲル生成の重要な因子であることを示している。Ca²⁺の流れが主要因と考えると、Ca²⁺流が分子形状の対称性を破り高分子鎖を配向させ、Ca²⁺によりその配向した分子同士が架橋されることで液晶ゲルが生成されるとシナリオが成立するカードランの透析による液晶ゲル形成はカチオンとしてCa²⁺以外に、Al³⁺、Co²⁺、Fe²⁺等二価以上の多くのイオンで可能である。また、ゲルを形成する高分子も、カードラン以外に、DNA等の高分子でもよい。これらのことは、カチオン流による分子配向とカチオン架橋による液晶ゲル形成という現象が広く普遍的に起こりうることを示している。

透析による液晶ゲル形成は、非平衡現象であり、考慮の必要な要素も、高分子鎖、架橋剤、溶媒および高分子鎖というように多数であるが、普遍性の高い現象である。この普遍性は、複雑な見かけの背後に隠れた現象本質の対称性の良さ、単純さを示している。この本質の単純性から、液晶ゲル化現象を統計力学のレベルで理解できることが期待できると共に液晶ゲル化現象を雛形として新しい非平衡の統計力学的手法が構築可能ではないかと考え本研究課題を着想するに至った。

2. 研究の目的

透析による液晶ゲル化現象を、スケーリング則などの普遍性を担う極小描像と、カードランの場合のアモルファス層の形成といった多様性を表現する多様化要素とに次のように切り分けて描写する。

極小描像: 架橋剤が一軸的に拡散流動している場中の高分子鎖集団の凝集挙動

多様化要素: 溶媒成分の変化に伴う高分子鎖の統計的形狀変化

このような切り分けにより液晶ゲル化への統計力学的アプローチを可能にする。この切り分けに基づき、具体的な研究目的を次のように設定する。

目的1: 透析による液晶ゲル化の統計力学的モデルの構築

目的2: 熱平衡では発現困難な液晶性とゲル性の共存する構造が「透析」という非平衡過程で形成可能な理由の解明

目的3: 多様化要素により引き出し可能な液晶ゲルの多様性の導出、分類および実験による確認

3. 研究の方法

(1) 微視的モデルの構築

液晶ゲル化の微視的なメカニズムを仮定した統計力学的なモデルを構築し、実験データと照合しながらモデルの改善をおこなう。初期設定モデルとして次の二つから開始した。

モデルI: バネビーズ描像

高分子鎖をバネビーズモデルで記述する。溶媒中の水およびアニオンを背景場としてあつかい、架橋剤であるカチオンの運動のみに注目。計算機シミュレーション用モデルとして考案。

モデルII: 実効型配向紐描像

高分子鎖の配向部分のみを抽出し、それ以外を背景場とし、配向した紐系として液晶ゲルをモデル化する。理論解析、X線散乱・回折実験データの解析用模型として考案。

(2) 実験的方法

液晶ゲル化する高分子鎖として、カードランおよびDNAを選ぶ。カードランは環境(溶媒中のNaOH濃度)によってランダムコイルから三重螺旋に形状が変化するため、多様性の検討に適している。DNAは、形状変化はないが、ゲルと溶液(ゾル状態)とで濃度が大きく異なるため、生成停止、液晶ゲルの収縮といった面での多様性が期待できる。この二分子の液晶ゲル化を対比しながら測定し、共通項を選出し、極小描像を完成させる。液晶ゲルのクロスニコル下での画像観察、構成成分比分布の測定が主である。分子配向を調べるためX線による小角および広角の散乱・回折実験をおこなう。

(3) 研究遂行にともなった研究方法の変更
透析により液晶ゲル化可能な高分子鎖が多数見つかるに至り、液晶ゲル化のダイナミクスの解析手法の確立が急務になった。そのため、基礎の明確な巨視的な液晶ゲル化モデルの構築が必要となった。巨視モデルとしてmoving boundary描像を拡張・普遍化したモデルIII: generalized moving boundary (GMB) 描像

を構築することを優先した。
 GMB 描像による実験データの解析等により、
 あらたな微視的なモデル
 モデルIV：不均一化学ポテンシャルにより伸
 長される高分子鎖描像
 の構築をめざした。バネービーズモデルをベ
 ースにしたシミュレーションモデルのモデル
 I も不適當であったので、あらたなシミュ
 レーション用のモデル
 モデルV：Solid-on-Solid 型高分子鎖モデル
 を作成した。

4. 研究成果

研究開始当初、液晶ゲルの形成ダイナミクス（動的性質）と形成された液晶ゲルの構造解析（静的性質）の2系統から平行して研究をすすめが、静的性質に比べ動的性質から液晶ゲル化機構についての豊富な知見が得られることがわかり、研究遂行手段を動的性質に絞っていった。静的研究からも多くの成果が得られたが、研究目的に直結した成果は動的性質の解析からであったので、以下の成果報告では動的性質に絞る。

(1) 液晶ゲル化ダイナミクスの測定 I

カードラン、DNA、アルギン酸、CMC (carboxymethylcellulose)、キトサン等種々の高分子鎖の濃厚溶液を透析することで液晶ゲルを形成できることを示した。透析方法は、[1]透析チューブを用いた透析、[2]透析外液への滴下による透析、[3]円形ガラス版に挟んだ状態での浸漬による透析、の3種類を用途に応じて使用した。[1]および[2]は液晶ゲル形成を目的にした実験に適しており[3]は液晶ゲル形成過程をその場観察するのに適している。

[3]の手法で透析外液に浸漬した円形ガラス版で挟んだ高分子溶液をクロスニコル下で観察することで液晶ゲル層と透析内液（ゾル相）の境界面の運動を測定できる。液晶層の厚さを x 、円形ガラスの半径を R とすると（図1 参照）、もっともシンプルな moving boundary (MB) 描像によると、スケールされたゲル厚 $\tilde{x} = x/R$ の時間変化は

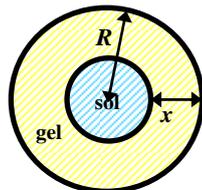


図1.変数設定

$$\tilde{y}(\tilde{x}) = \frac{1}{2}(1-\tilde{x})^2 \ln(1-\tilde{x}) - \frac{1}{4}\tilde{x}^2 + \frac{1}{2}\tilde{x} \quad (1)$$

という普遍関数を用いて、スケールされた時間 $\tilde{t} = t/R^2$ との比例関係

$$\tilde{y} = K\tilde{t} \quad (2)$$

で記述される。種々の高分子の液晶ゲル化過程を、図2、3、4にそれぞれDNAをCoCl₂水溶

液で透析したもの（論文⑨）、DNAをAlCl₃水溶液で透析したもの（論文③）、アルギン酸をCaCl₂水溶液で透析したもの（論文④）を示す。これらは(2)式で示されるような原点を通る

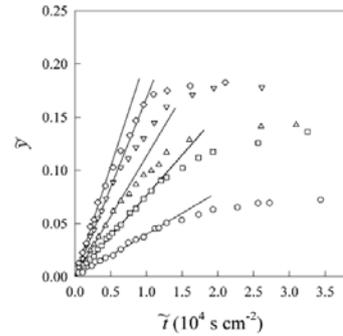


図2.CoCl₂水溶液（透析外液）のCo²⁺濃度を変えたDNA液晶ゲルのダイナミクス

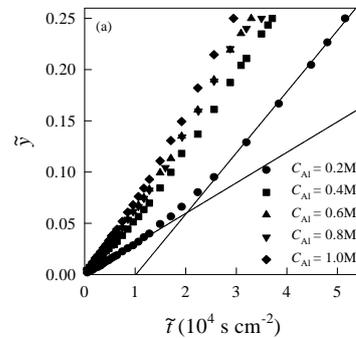


図3.AlCl₃水溶液（透析外液）のAl³⁺濃度を変えたDNA液晶ゲルのダイナミクス

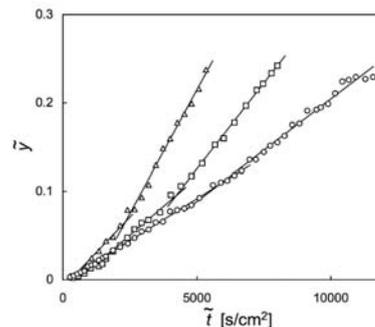


図4.透析内液のアルギン酸濃度を変えたアルギン酸液晶ゲルのダイナミクス

直線ではなく、折れ線グラフとなっている。すなわち、クロスオーバー時間 \tilde{t}_c を境にして、

$$\begin{cases} \tilde{y} = K_1\tilde{t} & \tilde{t} < \tilde{t}_c \\ \tilde{y} = K_2\tilde{t} + (K_1 - K_2)\tilde{t}_c & \tilde{t} \geq \tilde{t}_c \end{cases} \quad (3)$$

と表現できることを示している。これらより、

特徴Ⅰ：スケーリング $\tilde{x} = x/R$ 、 $\tilde{t} = t/R^2$ はつねになりたつ。

特徴Ⅱ：普遍関数(1)はダイナミクスに共通な特徴を示している。

特徴Ⅲ：係数 K_1 、 K_2 はゲル化する高分子鎖およびその溶媒、透析外液に依存する。

特徴Ⅰは、ダイナミクスは拡散現象に支配されていることを示している。特徴ⅡはMB描像が普遍描像となっていることを、そのパラメータである係数がゲル化の多様性因子であることを示している。その係数がクロスオーバー時間を境に変化するということは、この時間を境に高分子鎖のゲル化の性質が変化したことを示す。

(2) generalized moving boundary 描像

MB描像の基本的な考え方は、次の二つの仮定より構成される。

仮定Ⅰ（架橋剤流についての仮定）：高分子鎖を架橋する架橋剤は、透析外液から液晶ゲル層を通過して液晶ゲル層で捕獲されることなくゾル層（透析内液）に到達する。そして、この架橋剤流は定常流と見なすことができる。

仮定Ⅱ（液晶ゲル化についての仮定）：ゾル層に到達した架橋剤は、すべて液晶ゲル層近傍のゾル層内の高分子鎖の液晶ゲル化に使用される。使用される量は高分子鎖の状態に依存する。

液晶ゲル層内の位置 \vec{r} での架橋剤の密度を $\rho(\vec{r})$ 、化学ポテンシャルを $\mu(\vec{r})$ とすると、架橋剤流密度ベクトルは、

$$\vec{j}(\vec{r}) = -k\rho(\vec{r})\text{grad}\mu(\vec{r}) \quad (4)$$

$$\text{div}\vec{j} = 0 \quad (5)$$

図1に示すような円筒対称な系では、(5)式の解は、

$$\begin{cases} \vec{j} = -j\vec{e} \\ j = \frac{A}{\ln \frac{1}{1-\tilde{x}}} \frac{1}{|\vec{r}|} \\ A = k(g_s - g_0) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 \vec{e} は道径方向の単位ベクトル。 g_s および g_0 は、それぞれゲル中の透析外液近傍およびゾル層近傍の単位体積あたりの大きな熱ポテンシャルで、この熱ポテンシャルは架橋剤による圧力に相当する。

仮定Ⅱより、スケールされたゲル厚 \tilde{x} のダイナミクスは

$$2\pi(1-\tilde{x})d\tilde{x} = 2\pi\rho_G j d\tilde{t} \quad (7)$$

で示される。ここで、 ρ_G は単位体積の液晶ゲルが生成するのに必要な架橋剤の量。(7)式の定式化に幾何学的な対称性である円筒対称性を使用した。

ρ_G がクロスオーバー時間 \tilde{t}_c を境にして変化すると考えることで(3)式を導き出すこと

ができる。このことと(6)式、(7)式をまとめ上げると、スケールされたゲル厚 \tilde{x} についての時間発展方程式は、以前の狭い意味でのMB描像を拡張して考えることで(generalized moving boundary (GMB) 描像)

$$\frac{d\tilde{y}}{d\tilde{t}} = \frac{A}{\rho_G} \quad (8)$$

とまとめることができる。右辺の A はゲル中の架橋剤の輸送現象を特徴付け、 ρ_G が液晶ゲル化過程を特徴付けている。それぞれ、液晶ゲル層の構造の変化を記述するダイナミクス、ゾル層の環境変化とそれによる高分子鎖の性質の変化を記述するダイナミクスを別途導入することで決定される量である。また、関数 \tilde{y} はスケールされたゲル厚の関数で円筒対称の場合は(1)式であるが、そのほかの幾何学的対称性に対してはその対称性を反映した関数となっている。つまり、(8)式は極めて単純な方程式にもかかわらず、特徴Ⅰと特徴Ⅱを左辺で示し特徴Ⅲを右辺で示すというように液晶ゲル化のダイナミクスを一般的に記述した方程式となっている。(モデルⅢの完成)

液晶ゲル化の多様性を実験的に示すことになる係数 K_1 、 K_2 の性質は、 A と ρ_G の性質に還元させることができる。多様性で重要なことは、ゲル化する高分子の性質が大きく反映される特徴的な現象を発見することである。このような現象として、係数 K_1 、 K_2 の高分子濃度依存性をあげることができる。係数値と高分子濃度の関数関係は DNA、アルギン酸、CMC でことなる特徴的な関係となっていることを発見した。 A は透析外液の架橋剤濃度に敏感であるがゾル層の高分子濃度には鈍感であるので、この多様性は ρ_G の高分子濃度依存性と考えることができる。この濃度依存性は高分子鎖と架橋剤の関係、すなわち、液晶ゲル化の際の架橋の様子と強く関連する。また、係数値の K_1 から K_2 への変化は、高分子鎖を取り巻く環境（ゾル層の溶媒の性質）の変化を表している。つまり、ゲル化の環境依存性の現れである。この環境変化はゾル層溶媒と透析外液との混合による平衡化で生じる現象であるから、この平衡化過程（緩和過程）が予測できれば、環境の変化が予測できることになり、液晶ゲル化の詳細にたどり着けることになる。この段階で、液晶ゲルの成長ダイナミクスという視点からでは、研究目的3は達成された。

研究目的1および2を達成するためには、微視的な視点から ρ_G の環境依存性を予言できる系での測定実験が必要である。しかし、DNA、アルギン酸、CMC とともに架橋剤との結合状況の詳細に不明点が多いので、 ρ_G の環境依存性の微視的な導出は難しい。そこで、結合状況が非常に単純な場合、たとえば、ゾル層溶媒を特徴づける物質の濃度に ρ_G が比例

する場合について考えることにした。

実験データの解析のために、GMB 描像(8)式を用いて成長ダイナミックスの表式を構築する。幾何学的な特徴としては円筒対称なものを選ぶと、ゲル厚 \tilde{x} のダイナミックスは(1)式の \tilde{y} を用いて、

$$\frac{d\tilde{y}}{dt} = K - 2\beta \ln(1 - \tilde{x}) \quad (9)$$

となる。ここで、 K と β は高分子濃度に依存しない定数である。

(3) 液晶ゲル化ダイナミックスの測定 II

液晶ゲル化ダイナミックスが(9)式で記述できると考えられる透析系として、酢酸水溶液に溶かしたキトサンの NaOH 水溶液への透析を選んだ。この系では透析外液の NaOH がゾル溶液に流入し、ゾル溶液が中和され pH があがることでキトサン分子間の静電斥力が消失しゲル化すると予想される。キトサン分子には特別な反応部位はなくゲル化に特別な架橋剤を必要としない。溶媒の環変化のみでゲル化する系で、(9)式でダイナミックスが示される理想系となっている。

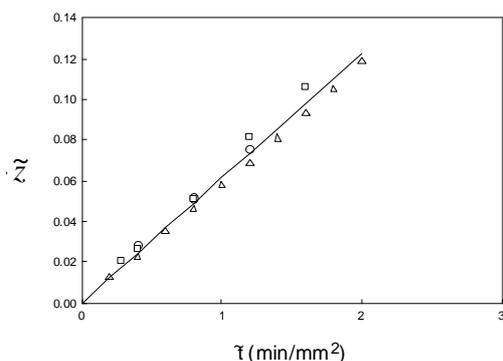


図5. 透析内液のキトサン濃度を変えたキトサン液晶ゲルのダイナミックス (○: キトサン濃度 0.5wt%, □: 1.0wt%, △: 2.0wt%)

実験結果を図5に示す(論文①)。縦軸の \tilde{x} は(9)式を積分したもので、直線は理論曲線を示し、理論と実験がよくあっていることを示している。この実験より

結論 i: 液晶ゲル化における高分子の配向は架橋剤流で生じるのではなく高分子環境の急激な変化(境界面の存在)で生じる。

結論 ii: 液晶ゲル化におけるゲル化は高分子の凝集過程ととらえられる。

という二つの考え方に到達した。架橋剤の流入は高分子環境の変化する境界面を作る一手法にすぎない。環境境界面で高分子鎖は配向されそののち熱力学的環境が凝集沈殿する環境に変化するためゲル化し液晶ゲルが形成されると考えられる。(目的2の達成)

(4) 新しい微視的モデルの構築

結論 i および結論 ii より当初考えていた微視的モデルモデル I は不相当であること

が分かったので新しいモデルとしてモデル IV を構築した。環境境界面では、液晶ゲル化する高分子鎖の化学ポテンシャルに急激な空間変化が生じ、そのため、変化の激しい凸領域、凹領域が現れる。この領域で高分子鎖は“潮汐力”をうけて引き延ばされ配向すると考える。高分子鎖の形状を重心からみた位置ベクトル $\vec{u}(s)$ ($0 \leq s \leq L$: s はセグメントを示す) で表し、化学ポテンシャルの変化方向を z 軸に選ぶと高分子鎖の Hamiltonian は、

$$\begin{cases} H = \frac{1}{2} \kappa \int_0^L \left[\frac{d\vec{u}}{ds} \right]^2 ds + \frac{1}{2} Q \int_0^L u_z^2(s) ds \\ Q = \partial^2 \mu_z(\vec{r}_G) / \partial z^2 \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 \vec{r}_G は高分子鎖の重心、 u_z は \vec{u} の z 成分、 μ_s は化学ポテンシャル、 κ は高分子鎖の剛性、そして、 Q は潮汐力の強さを示す。化学ポテンシャルを Flory-Huggins 理論で算出し(10)を用いた Langevin 方程式で配向現象を解析すると、結論 i を支持する結果を得られた(口頭発表①)。この段階ではほぼ研究目的1を達成できたと考えられるが、巨視的描像である GMB 描像との定量的な接続をするための解析が今後の課題となっている。そのためには、計算機シミュレーションを進めなければならない。モデル I にかわってモデル V をつけたシミュレーションを展開中である(口頭発表②)。

(5) DNA 液晶ゲルによる発がん物質の吸着挙動および液晶ゲルの崩壊

CoCl₂ 溶液で作成した DNA 液晶ゲルビーズを発がん物質の代表物質であるアクリジンオレンジ(AO)の水溶液中に浸漬し AO のゲルへの吸着挙動をしらべた。また、吸着挙動を説明する理論を MB 描像に基づき構築した。(論文⑧)

CoCl₂ 溶液で作成した DNA 液晶ゲルを EDTA 溶液に浸漬すると、液晶ゲルが崩壊していくことを発見した。この崩壊過程のダイナミックスの理論を構築した。(口頭発表③)

DNA 液晶ゲルによる AO 吸着および DNA 液晶ゲルの崩壊はともに液晶ゲル形成過程の逆過程と考えることができる。これらの現象を詳細に解析すると、液晶ゲル化の統計力学をより普遍的なものに高めることができると期待される。

(6) 液晶ゲルの構造

カードランの液晶ゲルについて、X 線散乱によるミクロな構造測定をすると共に散乱振幅を Fermion 描像(モデル II)に基づき構築した。(口頭発表⑧) 現状では構造測定と理論式ともに、液晶ゲルの普遍的な性質についてはとらえることができてはいるが多様性については不十分である。このような静的な性質からは液晶ゲル化の多様性を解析するのは難しいと考えられるので、普遍性の解析に集中する予定である。

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9件)

- ① N.Tomita, T.Yamamoto and T.Dobashi, Theoretical analysis for dialysis-induced chitosan gelation, *Tran.MRS-J*, 査読有, in press
- ② S. C.Lin, Y. Minamisawa, K. Furusawa, Y. Maki, H. Takeno, T. Yamamoto and T. Dobashi, Phase relationship and dynamics of anisotropic gelation of carboxymethylcellulose aqueous solution, *Colloid Polym. Sci.*, 査読有, Vol.288, 2010, pp.696-701
- ③ K.Furusawa, Y.Minamisawa, T. Dobashi and T.Yamamoto, Aluminium Ion-Induced Anisotropic Gelation of DNA, *Soft Materials*, 査読有, Vol.7, 2009, pp.132-154
- ④ Y.Maki, M.Wakamatsu, K.Ito, K.Furusawa, T.Yamamoto and T. Dobashi, Optical Anisotropy of Calcium-Induced Alginate Gels, *Journal of Biorheology*, 査読有, Vol.23, 2009, pp.24-28
- ⑤ T.Dobashi, K.Ohbuchi, Y.Maki and T. Yamamoto, Osmotic effect on hematocrit under hypertonic condition, *Journal of Biorheology*, 査読有, Vol.23, 2009, pp.72-76.
- ⑥ T.Dobashi, M.Koike, K.Kobayashi, Y.Maki, T.Yamamoto and S.Tanaka, An Application of Microcapsules Having Enzyme-degradable Gel Membrane to Cell Culture, *Progr. Colloid Polym. Sci.*, 査読有, Vol.136, 2009, pp.149-154
- ⑦ K.Furusawa, H.Saito, A.Tsugueda, Y.Narazaki, T.Yamamoto and T.Dobashi, Liquid Crystalline Gelation of Aqueous Solutions of Structure Proteins, *Tran. MRS-J*, 査読有, Vol.33, 2008, pp.476-469
- ⑧ K.Furusawa, M. Wakamatsu, T. Dobashi and T. Yamamoto, Adsorption Kinetics of Carcinogens to DNA Liquid Crystalline Gel, 査読有, *Langmuir*, Vol.23, 2007, pp.10081-10087
- ⑨ K.Furusawa, Y.Minamisawa, T.Dobashi and T.Yamamoto, Dynamics of Liquid Crystalline Gelation of DNA, 査読有, *J.Phys.Chem.B*, Vol.111, 2007, pp.14423-14430

[学会発表] (計17件)

- ① 山本隆夫, 液晶ゲル形成過程における高分子鎖のマイクロレオロジー, 日本物理学会第65回年会, 2010. 3. 23, 岡山大学(岡山県)
- ② 百田裕祐, 山本隆夫, 二成分溶液中の配向した高分子鎖の揺らぎ, 日本物理学会第65回年会, 2010. 3. 23, 岡山大学(岡山県)
- ③ 内藤大輔, 真野美幸, 榎靖幸, 山本隆夫,

土橋敏明, 中村邦男, 不溶化反応法により作製されるカプセルの形成と崩壊, 19th Academic Symposium of MRS-Japan, 2009. 12. 7, 横浜市開港記念館(神奈川県)

- ④ N.Tomita, Y.Maki, T.Yamamoto and T.Dobashi, Dynamics in the process of formation of anisotropic chitosan hydrogel with birefringence, 19th Academic Symposium of MRS-Japan, 2009. 12. 7, 横浜市開港記念館(神奈川県)
- ⑤ 内藤大輔, 真野美幸, 榎靖幸, 山本隆夫, 土橋敏明, 中村邦男, 配向DNAゲルの崩壊過程, 第32回日本バイオレオロジー学会年会, 2009. 6. 4, 桐生市市民会館(群馬県)
- ⑥ 奈良崎羊子, 古澤和也, 榎靖幸, 山本隆夫, 土橋敏明, 配向DNA形成のダイナミクス, 2009. 6. 4, 桐生市市民会館(群馬県)
- ⑦ 古澤和也, 榎靖幸, 武野宏之, 山本隆夫, 土橋敏明, 佐々木直樹, 透析によって調整される異方性ゲルのレオロジー, 第56回レオロジー討論会, 2008. 10. 8, 新潟コンベンションセンター(新潟県)
- ⑧ 山本隆夫, Fermion描像を用いた液晶ゲル構造の解析, 日本物理学会2008年秋季大会, 2008. 9. 22, 岩手大学(岩手県)
- ⑨ 山本隆夫, 古澤和也, 土橋敏明, 透析によるDNA液晶ゲル形成過程における普遍性と非普遍性, 日本物理学会第62回年会, 2007. 9. 23, 北海道大学(北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 隆夫 (YAMAMOTO TAKAO)
群馬大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80200814

(2) 研究分担者

土橋 敏明 (DOBASHI TOSHIKI)
群馬大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 301555626