

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540475

研究課題名(和文) 相境界面の運動に着目した異方性ゲル形成の統計力学の構築とその応用

研究課題名(英文) Statistical-mechanical study on anisotropic gel formation process based on motion of the phase boundary and its application

研究代表者

山本 隆夫 (YAMAMOTO, TAKAO)

群馬大学・理工学研究院・教授

研究者番号：80200814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：透析や乾燥による高分子溶液の異方性ゲル化を、ゾル・ゲル境界面に着目して調べた。ゾル・ゲル境界面における熱力学的不安定化が異方性ゲル化を引き起こすことがわかった。熱力学的不安定状態での高分子鎖の配向ダイナミクスを構築した。一般化されたmoving boundary描像を完成させ、4回対称または一軸性のゲル形成過程を解析した。この結果より、異方性ゲル化を制御する方法を考案した。乾燥によるゲル化は界面律速で透析によるゲル化は拡散律速であるが、熱力学不安定化の速度に注目することで、この2つのゲル化ダイナミクスを統一的に理解できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We studied the processes of the anisotropic gelation of the polymer solutions by drying and dialysis, focusing attention on motion of the sol-gel phase boundary. It was found that thermodynamic instability at the phase boundary induces the anisotropic gelation. The orientation dynamics of the polymers in the thermodynamically-unstable state was constructed. The generalized moving boundary (GMB) picture expressing the gelation process induced by both the inflow and the outflow ions was constructed and a new method for controlling the gelation process on the basis of the GMB picture was developed. We developed an idea giving a unified understanding of the two types of the gelation dynamics, the diffusion limited dynamics for dialysis gelation and the interface energy limited dynamics for drying gelation on the basis of the rate of the thermodynamic destabilization.

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：異方性ゲル 熱力学的不安定性 moving boundary描像 拡散律速 界面律速 乾燥 透析 マイクロレオロジー

1. 研究開始当初の背景

-1,3-グルカン構造をもつ多糖類であるカードラン(Curdlan)を NaOH 水溶液に溶解させた濃厚溶液を円筒状透析チューブに封入し CaCl₂ 水溶液に浸漬する(すなわち透析することによって、ゲルでありながらそれを構成している高分子鎖が配向している異方性ゲルになることが申請者らのグループによって発見された。

カードラン以外に、DNA、キトサンなど種々の高分子鎖から異方性ゲルが作製できる。Narita らはカラギーナンの異方性ゲル化に成功している。架橋剤も、各種の金属イオン以外にグルタルアルデヒドなどの非金属的な架橋剤でも異方性ゲルが形成可能であることがわかり、異方性ゲル形成は普遍的な統一原理が存在するという認識にいたった。

円形ガラス板で挟んだ高分子溶液を浸漬する方法の考案によりゲル相とゾル相の境界面の運動が観察可能になった。透析によるゲル化では、境界面の運動、即ち異方性ゲル化のダイナミクスは各種イオン(架橋剤)の拡散過程を律速段階とする moving boundary picture(MB 描像)で定量的に記述できる。この描像では、拡散現象のもつスケーリング則で特徴付けられる普遍性と拡散物の個性を表現するパラメータである多様性因子の切り分けが明確で、そのため異方性ゲル化の解析が大きく前進した。

架橋剤拡散律速である透析による異方性ゲル化ダイナミクスにおいては、高分子鎖の配向・架橋のメカニズムは多様性因子で記述される。一方、DNA 溶液の乾燥による異方性ゲル化では、配向・架橋のメカニズムがダイナミクスを支配していると考えられる。この場合、すでに架橋剤は十分に供給されており、ゲル相と異方性ゲル相の境界面自由エネルギー、すなわち、高分子鎖の配向・架橋に必要なエネルギー障壁が律速因子となる界面(カイネティクス)律速な現象と考えられる。

上述のように異方性ゲル化現象の解析では、高分子鎖の自己組織的配向、スケーリング則、普遍構造と多様性の切り分け、といった系の詳細によらない概念が主役となっている。さらに、透析から乾燥へと広がりを見せていることより、背後に大きな広がりをもつ体系の存在が期待され大変興味深い。その体系の一部は、律速過程である拡散現象のスケーリング則を軸にして構築された MB 描像により明らかにされてきた。一方、新たな乾燥による異方性ゲル化では、界面カイネティクスが律速である。異方性ゲル化のもつ大きな体系を理解する第一歩としてこの二つの律速過程を包含した理論体系の構築が必要であると考え本申請課題の着想に至った。

2. 研究の目的

透析による高分子鎖の異方性ゲル形成過程が moving boundary(MB)描像でよく記述さ

れる理由は、それが拡散現象により律速されていたからである。一方、乾燥を用いても異方性ゲル化が可能であることがわかった。乾燥法では、異方性ゲル相と等方相(ゾル相)の界面カイネティクスが律速である。本研究課題では、境界面における高分子鎖のマイクロレオロジーに基づく界面カイネティクスと流入拡散場と流出拡散場双方を考慮した一般化された MB 描像を統合することで透析および乾燥によるゲル化過程を統一的に記述できる統計力学描像を構築すると共にそれを応用して異方性ゲル製造および構造制御方法の探索をおこなう。

最終目的を以下の 4 つの小目的にわけて、それぞれを達成する。

目的 1 : 界面カイネティクスの微視的理解 : 境界面での高分子鎖の運動の統計力学描像の構築

目的 2 : 複合した輸送現象の理解 : 流入拡散場、流出拡散場の双方を考慮した一般化された MB 描像の構築

目的 3 : 界面カイネティクスを含む統合 MB 描像の構築

目的 4 : 統合 MB 描像に基づく異方性ゲル製造および構造制御方法の提案

3. 研究の方法

異方性ゲル化過程を、異方性ゲル相と等方相(透析内・外液)の境界面に注目し、非平衡性を駆動力とした界面カイネティクスと等方相と境界面間の物質輸送との直列過程ととらえる。界面カイネティクスの統計力学的描像を、3つのアイデア、**(a)**相境界の S 字型ポテンシャル描像、**(b)**相境界面での競合するマイクロレオロジー、**(c)**エネルギー関数に基づくマイクロレオロジー、に基づき計算機シミュレーションと実験のサポートで構築する。流入・流出という並列する二種類の物質輸送を取り入れた一般化された moving boundary(MB)描像を、境界条件をかえた異方性ゲル化実験を解析することで構築する。S 字型ポテンシャルを拡散場・高分子密度場で記述することで、輸送と界面カイネティクスの直列過程を記述できる統合化された MB 描像を構築し、それを用いて高分子の配向制御、新しい異方性ゲルの製造法の探索をおこなう。

4. 研究成果

(1) 高分子鎖の配向メカニズムの検討

異方性ゲルが形成されるためには、ゲル化に際してゾル層中では等方的であった高分子鎖が何らかの原因で配向して異方的になる必要がある。この異方性の生じる原因は、高分子溶液の熱力学的不安定性に起因すると結論づけ、簡単な配向ダイナミクスを考案した。これにより、目的 1 がほぼ達成できたと考える。ここでは、熱力学的不安定性を原因と考えるに至った実験とその理論的解釈を示すとともに、構築した配向ダイナミクスについて述べる。

DNA 水溶液の乾燥による異方性ゲル形成 [学会発表]
 サケ白子由来の DNA を 20mM 四ホウ酸 Na 水溶液に溶解し、10wt%DNA 水溶液とした。直径(=2R=10mm、12mm、15mm、18mm、22mm)のカバーガラスに厚み 1.13mm になるように DNA 水溶液をはさみ、試料とした。実験は温度と湿度を制御したグローブボックス内で行なった。試料を一定時間ごとにクロスニコル下で撮影し(図 1)、画像解析により配向層のフロントラインの位置の時間変化を測定した。

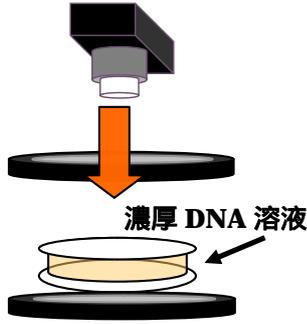


図1:クロスニコル下での撮影

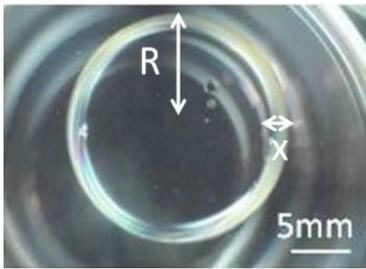


図2:DNAゲルのクロスニコル下での写真

カバーガラスの縁から複屈折をもつゲル(異方性ゲル)が生成していくことがわかった。撮影写真の1つを図2に示す。ゲル層の厚さを x 、経過時間を t として、ゲル層の厚さの時間変化をスケールされたゲル層の厚さ $\tilde{x} = x/R$ の関数 $\tilde{x} - \tilde{x}^2/2$ と経過時間 $\tilde{t} = t/R^2$ でプロットしたものを図3に示す。 $\tilde{x} - \tilde{x}^2/2$ と \tilde{t} の比例関係がよく分かる。

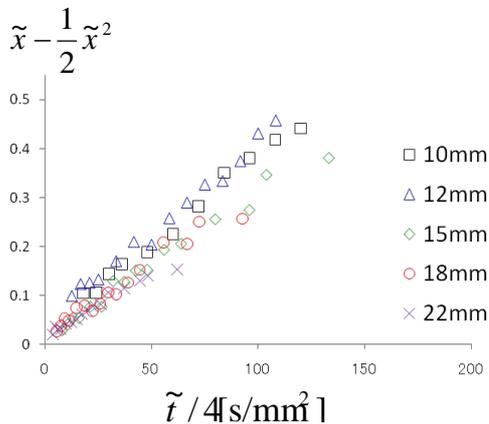


図3:ゲル層の厚さの時間変化

この比例関係は、ゲル化度 ψ ($\psi = 0$ のときゾル、 $\psi > 0$ のとき異方性ゲル)という概念を導入し、乾燥過程で異方性ゲルが形成される際の溶液の局所自由エネルギーが、double-well 型、たとえば、 $\varepsilon > 0$ として $f(\psi) = \varepsilon\psi^2(1-\psi)^2$ のようになっているとするとよく説明できることがわかった。まず、カバーガラスの縁に $\psi = 1$ の領域、すなわち異方性ゲルが生成し、 $\psi = 0$ であるゾル相と境界層を挟んで共存する。境界層が生じることで自由エネルギーが増加し(界面自由エネルギーの生成)界面自由エネルギーを少なくするように異方性ゲルが成長する、すなわち、界面律速な成長ダイナミクスとなる。

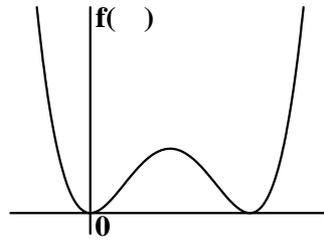


図4:不安定領域をもつ局所自由エネルギー

f の特徴は、図4に示すように $\psi = 0$ と $\psi = 1$ の間に上に凸、すなわち熱力学的に不安定な領域が存在することである。界面ではこのような不安定な熱力学的状態となる。界面で高分子鎖配向が起こるはずだから、この熱力学的不安定性が配向の原因と考えることには妥当性がある。

リン酸溶液に浸漬したコラーゲン溶液の異方性ゲル化形成 [雑誌論文]

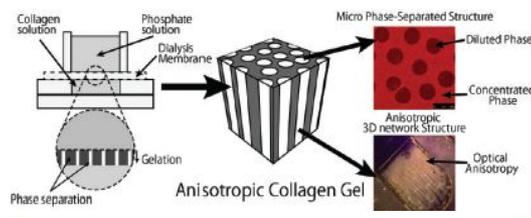


図5:コラーゲン異方性ゲルの形成

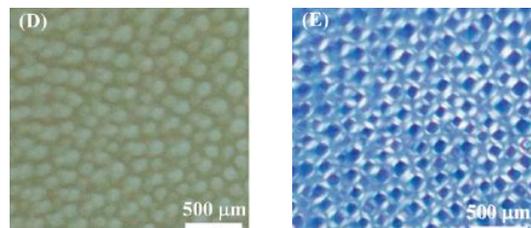


図6:成長方向に垂直な断面から見た異方性ゲル(左は自然光下、右はクロスニコル下)

温度 25 で、濃度 5mg/mL のコラーゲン水溶液をイオン強度 256mM、pH7.1 のリン酸溶液に浸漬することでゲルの成長方向平行な濁

った細孔をもつ異方性ゲルが作製できた(図5)。クロスニコル下で成長方向に対して垂直な方向から生成したゲルを見た写真図6より、懸濁した希薄相である細孔を取り囲む濃厚相において複屈折が観測された。この細孔構造はコラーゲン溶液の相分離過程で形成されたと考えられた。

ゾル-ゲル境界面における高分子鎖配向の理論[学会発表]

1本の高分子鎖に注目する。粗視化された高分子鎖の形状を $r = r(s)$ とかく。 s はセグメントの番号で、粗視化されているため $0 \leq s \leq L$ (L は鎖長)の範囲の実数値をとる。高分子鎖のエントロピー弾性係数 κ と高分子鎖セグメントの化学ポテンシャル $\mu(r)$ を導入して、簡単なモデルHamiltonianとして、

$$H = H_0 + H_1$$

$$H_0 = \frac{1}{2} \kappa \int_0^L (dr/ds)^2 ds$$

$$H_1 = \int_0^L \mu(r(s)) ds$$

を考え、高分子鎖のマイクロレオロジーをRouseダイナミクスに基づくLangevin方程式

$$\frac{\partial r}{\partial t} = -\Gamma \frac{\delta H}{\delta r} + \eta$$

で記述する。ここで、 Γ はKinetic係数、 η は熱雑音で成分 $\eta_j(s, t)$ ($j = x, y, z$)に対して $\langle \dots \rangle$ で表記する熱平均が温度 T のとき $\langle \eta_j(s, t) \rangle = 0$

$\langle \eta_i(s, t) \eta_j(s', t') \rangle = 2\Gamma k_B T \delta_{ij} \delta(s' - s) \delta(t' - t)$ を満たす。ここで、 k_B はボルツマン定数。

高分子鎖の運動を重心 r_G と重心に対する相対運動 $u = r - r_G$ とに分けて考える。ゲルの成長方向を z 軸方向に選ぶ。高分子鎖の配向現象は慣性半径の z 成分

$$R_z^2(t) = \frac{1}{L} \int_0^L [u_z(s, t)]^2 ds$$

を計算しその変化で評価する。

高分子鎖のレオロジーは重心の運動を支配する力 $P = -\partial \mu(r_G) / \partial z_G$ (z_G は重心の z 座標)と高分子鎖を z 軸方向に伸長・圧縮する潮汐力 $Q = \partial^2 \mu(r_G) / \partial z_G^2$ で記述されることが分かった。重心の運動は

$$dz_G(t) / dt = \Gamma P$$

で、力 P の方向に運動する。 $Q < 0$ のとき、高分子鎖は z 軸方向に伸長し棒状の形状となり、 $Q > 0$ ときパンケーキ状に圧縮される事が分かる。圧縮されたときの熱平衡値は高分子鎖長 L によらないことも分かった。

Q が生じる原因は高分子鎖および架橋剤の空間的不均一性にある。およびの実験結果より境界面における熱力学的不安定性が重要であり、その中でも、高分子セグメント濃度起因の不安定性が重要と考えて P および Q を、

$$P = -(\partial^2 f / \partial \phi^2)(\partial \phi / \partial z_G)$$

$$Q = (\partial^3 f / \partial \phi^3)(\partial \phi / \partial z_G)$$

とすることができた。ここで、 f は高分子溶液の単位体積あたりの自由エネルギーで ϕ は高分子セグメントの体積分率。この表式より次のことが分かった。

(i)熱力学的安定領域では高分子鎖は凝縮せず伸長・圧縮現象すなわち高分子鎖配向は起こりにくい。

(ii)熱力学的不安定領域では高分子鎖は凝縮しそれに伴い伸長・圧縮現象すなわち高分子配向がおこる。伸長・圧縮は臨界体積分率 ϕ_C を境に入れ替わることが分かる。低濃度側 $\phi < \phi_C$ では伸長し高濃度側 $\phi > \phi_C$ では圧縮される。

の図6で示される実験結果は、細孔部分は低濃度側のダイナミクスで引き延ばされた高分子鎖がリン酸イオンでランダムに架橋されたため懸濁層となり、そのまわりの部分は高濃度側のダイナミクスで秩序正しく圧縮・濃縮されたため異方性が現れたと考えることができる。

上述のLangevin方程式を1本鎖のまわりの他の鎖の存在(高分子鎖の環境の効果)を考慮したものにするために、高濃度高分子鎖の緩和のシミュレーションをおこなった。シミュレーションデータから高分子鎖の環境の効果は近似的にエントロピー弾性係数 κ の緩和挙動として導入できることが分かった。すなわち、Hamiltonian H_0 に、

$$H_0 = \frac{1}{2} \int_0^L [\kappa_x \left(\frac{dx}{ds}\right)^2 + \kappa_y \left(\frac{dy}{ds}\right)^2 + \kappa_z \left(\frac{dz}{ds}\right)^2] ds$$

$$d\kappa_i / dt = \Gamma_\kappa (\kappa_\infty - \kappa_i)$$

で緩和する(Γ_κ はKinetic係数、 κ_∞ は最終平衡値)弾性係数 κ_i ($i = x, y, z$)を導入してとすればよいことが分かった。

架橋剤の配向に与える影響を考察するため、配向した多層脂質二重膜系(雑誌論文学会発表)および高分子ブラシ系をモデル系としてシミュレーションを行った。脂質二重膜系では、架橋剤に相当する膜と親和性の高い低分子により配向性が不安定化することが分かった。一方、高分子ブラシ系では低濃度の場合は揺らぎが増大し配向性が下がるが高濃度になると配向性が安定化することが分かった。架橋剤による配向への寄与は複雑であることが推察された。多くの高分子鎖で透析を用いて容易に異方性ゲルが作成可能であることより、架橋剤はそれ自身が配向に寄与するというより、架橋剤の流入による高分子溶液の熱力学的不安定化を通して間接的に配向に寄与していると考えの方が妥当であると結論づけた。

(2)イオンの流入・流出双方を考慮した異方性ゲル化ダイナミクスとゲル化の制御

[雑誌論文、学会発表]

透析外液からのイオンの流入および透析内液からのイオンの流出の双方がゲル化に寄与する場合としてキトサンのゲル化をカバーガラスの形状を変えて行った。2枚のガラ

ス板に酢酸水溶液にキトサンを溶解させた溶液を NaOH 水溶液に浸漬することでキトサンの異方性ゲルが生成することが分かっている。円形カバーガラスによるゲル形成ダイナミクスは NaOH の流入と酢酸の流出という双方の輸送現象をとりいれた一般化された moving boundary (GMB) 描像で次のように記述できる。

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{x}}{d\tilde{t}} = \frac{K_0}{C(\tilde{t})} \frac{1}{(1-\tilde{x}) \ln \frac{1}{1-\tilde{x}}} \\ \frac{dC(\tilde{t})}{d\tilde{t}} = -\frac{2\beta C(\tilde{t})}{(1-\tilde{x})^2 \ln \frac{1}{1-\tilde{x}}} \end{cases}$$

ここで、 $\tilde{x} = x/R$ 、 $\tilde{t} = t/R^2$ で、 R 、 x 、 t はそれぞれガラス板の半径、ゲル層の厚さ、経過時間である。 $C(\tilde{t})$ は透析内液中の酢酸濃度、 β と K_0 は溶液の調製で決まるパラメータである。GMB 描像の境界条件への依存性と境界条件によらない普遍性を 4 回対称である正方形カバーガラスおよび一軸成長をするセルを用いて実験を行った。

正方形カバーガラスの場合は円形カバーガラスの場合に比べて対称性が低いいため初期状態を除いて GMB 描像からダイナミクスの理論式を求めることができていない。しかし、スケージング則(上記 R をカバーガラスの一辺の長さ L で置き換えた $\tilde{x} = x/L$ (x : カバーガラスの縁から測った異方性ゲル層の厚さ)と $\tilde{t} = t/L^2$ に対する普遍性)と初期における関係式 $\tilde{t} \propto \tilde{x}^2$ が成り立つことは示すことができる。実験結果からスケージング則と比例関係 $\tilde{t} \propto \tilde{x}^2$ を示すことができた。また、この比例関係式の係数からパラメータ K_0 を求めることができ、そ

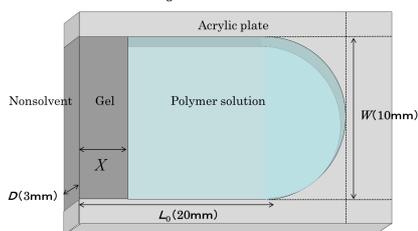


図 7 : 一軸性ゲル形成用セル

の値は円形カバーガラスの場合と一致し、GMB 描像の正しさが補強された。

一軸性の異方性ゲル形成実験は図 7 で示すセルを用いて行った。水色の部分が透析内液が入っている領域で、形成された異方性ゲルは濃い灰色で示されている。このセルでは U 字型の溶液のために透析内液が入っている。ゲルの厚さ X の時間変化は GMB 描像を用いて正確に計算でき、計算結果と実験結果はよく一致した。また、溶液だめの形状から特徴的な長さを定義でき、その長さに基づくスケージング則を見つけることができた。さらに、溶液だめの終端部分(図 7 の右側の部分)の

形状を変化させることで、酢酸濃度の減少速度を制御できることが分かった。ゲルの形成速度は酢酸濃度の減少速度の単調増加関数なので、溶液だめの形状によりゲル化速度が制御できることになる。ゲルの異方性、すなわち、高分子鎖の配向性の程度はゲル化の速度で制御できるので、この方法は、配向性の制御にも使えることが分かる。

以上より、目的 2 および目的 4 の一部が達成できたと考える。

(3)ゲル化ダイナミクス遷移と統合 MB 描像 [学会発表]

NaOH 水溶液に溶解させたカードランを平行な円形アクリル板間に透析膜を用いて封入し HCl 溶液に浸漬してゲルを作製することができた。HCl 溶液の pH を変えていくと図 8 に示すようにダイナミクスが変化していくことが分かった。

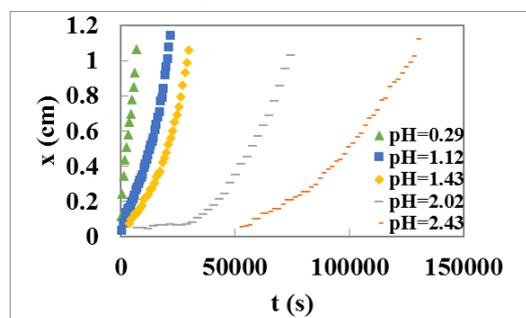


図 8 : HCl に浸漬したカードラン NaOH 溶液のダイナミクス

低 pH(図 8 中の pH=0.29, 1.12, 1.43)ではラグタイム無しにゲル化が起こる。この測定データは GBM 描像で定量的に説明できることが分かった。この場合、HCl の透析内液への流入と NaOH の流出という輸送過程(拡散過程)が律速であることが分かる。高 pH(pH=2.02, 2.43)ではラグタイムが生じ、ダイナミクスは(1) で論じた界面律速なダイナミクスで定量的に説明できることが分かった。

つまり、透析外液の pH の増大に伴い拡散律速なゲル化から界面律速なゲル化へと、ダイナミクスが遷移することが分かる。高 pH ではイオン流入はゆっくりで透析内液の自由エネルギーは図 4 のような形になるまで変化していき、透析外液の接触部位から弱い熱力学的不安定性を駆動力としたゲル化が起こる。低 pH ではイオンの流入が速く、ゲル相の自由エネルギーが急激に下がるので熱力学的不安定性が強く、それによる駆動力も強くなる。そのため、即時にゲル化が起こり、拡散律速な振る舞いをすると考えられる。このように、透析内液の自由エネルギー形状変化の速度という視点を取り入れることで、MB 描像に界面カイネティクスを接続させることができたので、統合 MB 描像の構築という目的 3 もほぼ達成できたと考えられる。定式化と目的 4 の一部である統合 MB 描像を用いたゲル化制御法の構築は今後の課題である。

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6件)

K. Shimoda and T. Yamamoto, Effect of Concentration Fluctuation of Solution to Membrane Fluctuation in Multi Lipid-bilayer Membrane System, AIP Conference Proceedings Vol.1518, 2013, pp.440-443. DOI: 10.1063/1.4794611 査読有り

T. Yamamoto, K. Shimoda and Y. Iwamoto, Free-Energy Increment of Multilayer Membrane System due to Membrane-Membrane Interaction Potentials: Analysis based on the Intermembrane Distance Distribution Function, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.82, 2013, pp.24602-1-7 <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.024602> 査読有り

I. Rokugawa, N. Tomita, T. Dobashi and T. Yamamoto, One-dimensional growth of hydrogel by a contact of chitosan solution with high-pH solution, Soft Materials, Vol.12, 2013, pp.36-41. DOI: 10.1080/1539445X.2012.735316 査読有り

K. Furusawa, S. Sato, J. Masumoto, Y. Hanazaki, Y. Maki, T. Dobashi, T. Yamamoto, A. Fukui and N. Sasaki, Studies on the Formation Mechanism and the Structure of the Anisotropic Collagen Gel Prepared by Dialysis-Induced Anisotropic Gelation, Biomacromolecules, Vol.13, 2012, pp.29-39. DOI: 10.1021/bm200869p 査読有り

Y. Maki, K. Ito, N. Hosoya, C. Yoneyama, K. Furusawa, T. Yamamoto, T. Dobashi, Y. Sugimoto and K. Wakabayashi, Anisotropic Structure of Calcium-Induced Alginate Gels by Optical and Small-Angle X-ray Scattering Measurements, Biomacromolecules, Vol.12, 2011, pp.2145-2152. DOI: 10.1021/bm200223p 査読有り

N. Tomita, I. Rokugawa, H. Toyama, T. Yamamoto and T. Dobashi, Anisotropic hydrogel formation: Effect of boundary condition, Material Science Forum, Vol.687, 2011, pp.567-570. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.687.567 査読有り

(学会発表)(計14件)

山本隆夫, 岡村英希, 土橋敏明, 透析によるゲル化のダイナミクス遷移, 日本物理学会第69回年次大会, 2014.3.27, 東海大学(神奈川県)

山本隆夫, 環境変化によって引き起こされる異方性ゲル形成ダイナミクス, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013.9.27, 徳島大学(徳島県)

山本隆夫, 異方性ゲル形成と熱力学的不安定状態における高分子鎖のレオロジー, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013.9.27, 徳島

大学(徳島県)

富田奈緒子, 六川勇, 岡村英希, 榎靖幸, 山本隆夫, 土橋敏明, 透析によって誘起されるゲル界面の移動とレオロジー, 第61回レオロジー討論会, 2013.9.26, 山形大学(山形県)

岡村英希, 佐野浩亮, 富田奈緒子, 榎靖幸, 山本隆夫, 土橋敏明, 拡散律速型のゲル化とエネルギー律速型のゲル化のクロスオーバー, 第61回レオロジー討論会, 2013.9.25, 山形大学(山形県)

細谷亮馬, 六川勇, 土橋敏明, 山本隆夫, カラーゲルと塩化カルキウム水溶液の接触による配向のダイナミクス, 日本高分子学会第28回群馬・栃木講演会, 2013.3.7, 群馬大学(群馬県)

K. Shimoda and T. Yamamoto, Effect of Concentration Fluctuation of Solution to membrane Fluctuation in Multi Lipid-bilayer Membrane System, The 4-th international Symposium on Slow Dynamics, 2012.12.2, 東北大学(宮城県)

六川勇, 富田奈緒子, 岡村英希, 細谷亮馬, 山本隆夫, 土橋敏明, 透析による配向ゲルの一次元成長ダイナミクス, 第60回レオロジー討論会, 2012.9.26, 名古屋大学(愛知県)

山本隆夫, ゾル-異方性ゲル境界近傍の高分子鎖のレオロジー, 日本物理学会第67回年次大会, 2012.3.24, 関西学院大学(兵庫県)

外山裕美, 猪狩徹平, 榎靖幸, 土橋敏明, 山本隆夫, サンドイッチ法によるDNA水溶液の乾燥及び配向ダイナミクスの境界条件依存性, 第59回レオロジー討論会, 2011.10.6, 桐生市市民会館(群馬県)

岡村英希, 六川勇, 滝澤晋平, 斉藤梨絵, 榎靖幸, 山本隆夫, 土橋敏明, カードラン水溶液の透析によるゲル化のダイナミクス, 第59回レオロジー討論会, 2011.10.6, 桐生市市民会館(群馬県)

六川勇, 富田奈緒子, 山本隆夫, 土橋敏明, キトサン溶液のゲル形成のダイナミクスに対する境界条件の影響, 第59回レオロジー討論会, 2011.10.6, 桐生市市民会館(群馬県)

猪狩徹平, 土橋敏明, 山本隆夫, DNA水溶液の乾燥過程と配向過程におけるスケールリング, 第59回レオロジー討論会, 2011.10.6, 桐生市市民会館(群馬県)

山本隆夫, ゾル-異方性ゲル界面における高分子鎖のレオロジー, 第59回レオロジー討論会, 2011.10.6, 桐生市市民会館(群馬県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

山本隆夫 (YAMAMOTO TAKAO)
群馬大学・理工学研究院・教授
研究者番号: 80200814

(2)研究分担者

土橋敏明 (DOBASHI TOSHIAKI)
群馬大学・理工学研究院・教授
研究者番号: 30155626