

令和 3 年 5 月 23 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03556

研究課題名(和文)異方性ゲル化高分子鎖の普遍描像に基づく異方性ゲル化ダイナミックスの統計力学の構築

研究課題名(英文)Statistical-mechanical study on anisotropic-gel formation dynamics on the basis of a universal picture of polymer chains forming anisotropic-gel

研究代表者

山本 隆夫 (Yamamoto, Takao)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：80200814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：架橋因子溶液と液液接触する高分子溶液のゲル化過程のMonte Carloシミュレーションを構築した。拡散による架橋因子の流入、架橋因子と高分子鎖の化学量論的な反応式に基づく高分子鎖の架橋、高分子セグメントの運動の停止によるゲル化の記述、という3つのプロセスを考慮した。異方性の発現は高分子鎖の運動が部分的に凍結されることにより引き起こされることが分かった。架橋速度が遅いとゲル厚が時間に比例するゲル成長から時間のルートに比例するゲル成長へ変化する(クロスオーバーと呼ぶ)ことが分かった。クロスオーバーを概観する現象論を作成した。血漿の凝固過程の観察においてこのクロスオーバー現象を発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液液接触によるゲル化過程は光学異方性の発現とゾル-ゲル境界面の移動ダイナミックスを特徴とする非平衡状態を提供する。本研究で、光学異方性発現のキーとなるプロセスおよび境界面移動ダイナミックスとゲル化の素過程の関係が明らかになった。これは非平衡熱統計力学の新しい知見である。血栓形成など血液の凝固過程は液液接触によるゲル化過程であることより、本研究成果は血栓形成過程の基礎的知見となりその研究の発展に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：We constructed a Monte Carlo simulation expressing the anisotropic gelation process by contacting polymer solution with cross-linking factor solution. Inflow of cross-linking factor by diffusion, polymer cross-linking whose dynamics is expressed by stoichiometric equation, the sol-gel change expressed by freezing polymer segment motion are taken into account. The simulation shows that the anisotropy of the gel appears because motion of polymer chain is partly frozen. The simulation predicts appearance of the cross-over showing that the gel growth behavior proportional to elapsed time is changed to that to square-root of elapsed time. A phenomenological theory expressing the cross-over was constructed. Experimentally, the cross-over behavior was found in the plasma gel growth.

研究分野：統計物理学

キーワード：異方性ゲル化 液液接触 Moving Boundary 描像 Monte Carlo シミュレーション Ginzburg-Landau方程式 拡散律速とエネルギー律速 クロスオーバー 血液凝固

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

異方性ゲルの形成過程は高分子溶液をガラス板にはさみ透析外液につけそれをクロスニコル状態にすることで観測できる。経過時間とゲル部分の厚さの関係は、透析外液からの不溶化要因となる物質の拡散過程を律速とする Moving Boundary(MB)描像で定量的によく説明できる。MB描像では異方性ゲル形成の素過程を際立って単純化しているため、必要とするパラメータは時定数関係では、不溶化要因の拡散係数 D 、物質質量としては高分子溶液単位体積あたりをゲル化するのに必要な不溶化要因の量 ρ_G の二つだけである。観測結果と理論をあわせる際のパラメータも1つ2つ程度であり、このような少数なパラメータにもかかわらず多様な透析外液と高分子溶液の組み合わせに対して理論式と実験データがよくあうことから、MB描像は異方性ゲル形成過程の本質を表現しているものと考えられる。

高分子もより複雑なもの、たとえばゼラチンのようなタンパク質や血液成分である血漿のようなものでも異方性ゲル化し、その形成ダイナミクスはMB描像で解析できることが分かってきた。しかし、複雑な高分子ではフィッティングによって得られたパラメータの数値の意味を D と ρ_G の2つに押し込むには無理があるという問題も露わになってきた。すなわち、異方性ゲル化の詳細なミクロなメカニズムの知見が必要になってきたのである。複雑な高分子のゲル化も説明できるミクロなメカニズムを解明するのはきわめて困難であるので、あきらめざるを得ない状況であったが、意外なところからその糸口を見つけることができた。それは、異方性ゲル化に対する抜本的な「問い」で、「異方性ゲル化における『不溶化』の機序は何か」という問いである。不溶化を単に溶解度の低下と考えてはいけぬ。溶解度の低下では、境界面からのゲル化および境界面での高分子鎖の配向が説明できないのである。一方、カードランゲルに代表される多価イオンによる架橋に起因する不溶化という考え方も、異方性ゲル形成の一面しか表していないことがわかってきた。

2. 研究の目的

金属イオン溶液等に高分子水溶液を浸漬(透析)することでゲルでありながらその構成高分子鎖が配向している異方性ゲルを作ることができる。異方性ゲル化する高分子鎖とゲル化剤である透析外液の持つ共通の特徴(異方性ゲル化高分子鎖の普遍描像)を、●高分子鎖には、荷電部位のように鎖間に斥力を引き起す斥力因子と水素結合部位のような鎖間を結合させる結合因子をもつ●ゲル化のための透析外液には斥力因子の阻害剤が入っている、と見え、異方性ゲル化の根幹的な機序を「流入した斥力因子阻害剤による斥力因子の無効化」と捉える。この考え方に基づき、現象論的なモデルをMonte Carloシミュレーションで補強し、かつ、必要な実験系を構築して実験的確認を行うことで、異方性ゲル形成のダイナミクスの統計力学を構築し、高分子鎖配向のメカニズムを解明すると共に異方性ゲルの形成過程の観測から異方性ゲル化高分子の性質を解明する方法を確立する。

3. 研究の方法

[1] 不溶化過程を考慮したMoving Boundary (MB)描像の構築：MB描像の統計力学の構築

異方性ゲル化過程は、(P1)透析外液からの斥力因子阻害剤の流入、(P2)流入した斥力因子阻害剤による高分子鎖の斥力因子の無効化、(P3)結合因子による高分子鎖間結合とゲル構造形成、(P4)斥力因子阻害剤の流入・結合因子の結合による高分子鎖の配向、という4つのミクロなプロセスより構成されると考える。このミクロなプロセスに対応した現象論的時間発展方程式から出発して、異方性ゲル化のマクロなダイナミクス(異方性ゲルの厚さと経過時間の関係)を導出し、そのダイナミクスからミクロなゲル化因子を突き止める方法を確立する。MB描像で記述できる場合、すなわちゾル-ゲル境界面が明瞭となる場合の時間発展方程式中のパラメータの条件を焙りだし、その場合のパラメータを高分子鎖および透析外液の性質と関連付けるとともに、タンパク質等の複雑な系に対する実験結果と比較検討することで、マクロなダイナミクスから異方性ゲル化高分子の性質を推察する方法を確立する。

[2] 高分子鎖配向過程の解明：配向の統計力学の構築

斥力因子と結合因子を持つ格子高分子鎖モデルを用いて、熱平衡のMonte Carloシミュレーションを行い、その結果に基づき[1]の現象論で用いる自由エネルギー汎関数の形状を決定する。また、動的Monte Carloシミュレーションによって、配向の有無およびその程度と、斥力因子・結合因子の強さやそれらの密度との関係を解明する。熱平衡のシミュレーションで決定された自由エネルギー汎関数に基づく現象論的時間発展方程式から求めた配向ダイナミクスと動的シミュレーションから得たダイナミクスを比較することで、ミクロなプロセスである(P3)と(P4)を[1]で構築した現象論的時間発展方程式で記述することの妥当性とその限界を調べる。こ

れによりMB画像のミクロな解釈の精度を上げるとともにその限界をも調べる。

[3] 異方性ゲル化過程の統一描像の確立

ゾル-ゲル境界面が明瞭でない場合を含めた異方性ゲル化ダイナミクスを構築し、異方性ゲル化高分子溶液のもつ特徴を解明する。斥力因子阻害剤の投入方法、高分子濃度等に依存して、異方性ゲル化する高分子は異方性ゲルのような凝集構造以外にもいろいろな「構造」をとると考えられる。シミュレーションと解析計算とで取り得る様相を調べる。

4. 研究成果

研究を進めるに従って研究当初注目していた斥力因子阻害剤という見方が配向の機序を理解するのに有効でないことが判明してきた。ミクロなプロセスとして配向を考える「3. 研究方法」の[1]の(P4)には無理があるという考えに至り、微視的な詳細な視点よりも巨視的な視点に立ち返る必要を感じた。結果、透析外液との接触で高分子溶液のどのような対称性が破れるかという視点で異方性ゲル化を考え直した。そして、3つのタイプの破れ、①架橋因子の流入方向という特別な方位の存在、②ゾル・ゲル境界面による方位の分離と並進対称性の喪失、③ゲル化における高分子鎖セグメントの運動の凍結による運動状態の制限、に思い至った。斥力因子阻害剤も、架橋を促す因子、架橋因の一種として捉え直した。そして、ミクロなプロセスを、(nP1)架橋因子の流入、(nP2)架橋因子と高分子鎖との化学量論的な反応式に基づく高分子鎖の架橋、(nP3)高分子セグメントの運動の停止による高分子鎖のゲル化の記述という3つのプロセスに変更した。

以下、研究成果の説明では、図1に示すような系のゲル成長を題材にすることにする。図1では、矩形のセルに高分子溶液を封入し x - y 平面において架橋因子溶液と液液接触している。ゲルは z 軸方向に成長して行きある時刻 t のときのゲル厚を $X(t)$ とする。

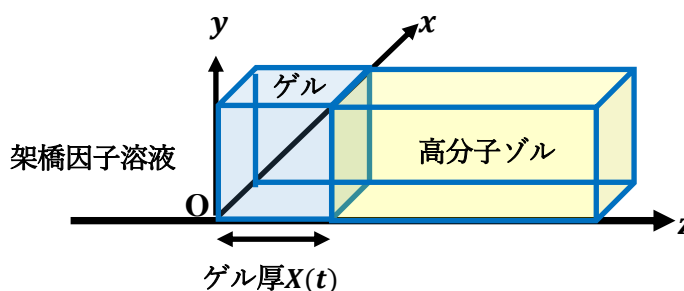


図1

<1>ゲル化における異方性発現の機序の解明

異方性、すなわち配向の原因の解明は、Monte Carlo シミュレーションを主力として行った。高分子鎖の配向すなわち高分子の広がり非等方性という異方性と高分子セグメントの配向という異方性が異なるものであることが分かった。実験で測定している異方性は複屈折であるのでセグメントの配向について注目すべきであることが分かった。対称性の破れ①～③の効果を個別に考慮した Monte Carlo シミュレーション(シミュレーション I)を行いそれぞれが配向にどのように寄与するかを調べた。①における架橋因子流入の効果は高分子セグメントの化学ポテンシャルの z 軸方向への勾配で表現した。結果、①により、高分子鎖は概ね z に垂直に配向し¹⁾(以後「垂直配向」と呼ぶ)、セグメントは z 軸に平行に配向する(以後「平行配向」と呼ぶ)ことが、②、③によりセグメントは垂直配向することがわかった²⁾。①～③を個別に取り入れたシミュレーションを比較した結果、セグメントの配向に大きな寄与があるのは③のセグメントの運動の停止であることが分かった。ゲル化に際しては、高分子の一部の運動の制限を受け残りが自由に運動できるという部分的な運動の停止状態が生じる。このとき自由に動ける部分がゲル表面に密着する確率が高くなる。それゆえセグメントがゲル表面に平行すなわち垂直配向する。作製された異方性ゲルのセグメントの配向は、垂直配向が多く見られているが平行配向しているのが無いわけではない。①と③は競合するものであると予想される。

次に①～③のすべてを考慮するとともに、ミクロなプロセス(nP1)～(nP3)を導入したシミュレーション(シミュレーション II)を行った³⁾。格子に曲げ剛性 K を持つ Solid-on-Solid 型の高分子鎖²⁾のせ、Heat Bath 型の Monte Carlo (MC) 法で運動させ、経過時間 t を Monte Carlo Step 数で計測する。格子に架橋因子密度変数を拡散場としてのせ、その時間発展は x - y 平面内で平均化し z 方向の変化のみを考慮した場合 $\rho(z, t)$ の拡散方程式で記述し、数値計算する。高分子セグメントの架橋は化学量論的な反応式より導き出した架橋確率 $P_{lnk} = k_G \rho \phi$ で架橋すると

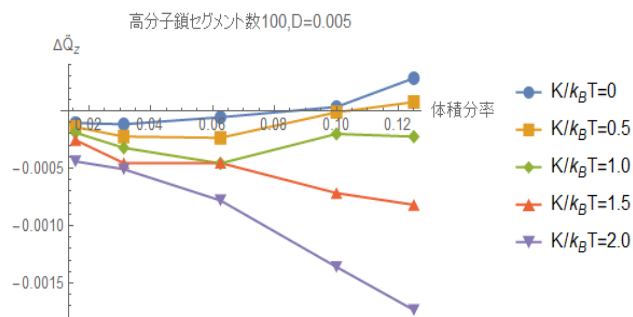


図2

する。ここで、 ϕ はセグメント密度で k_G は反応速度定数。架橋したセグメントはゲルの構成要素になったとし、MC法による運動から外し運動を凍結させる。また、セグメントの化学ポテンシャルは $\rho(z, t)$ の一次関数とした。

図2は、シミュレーションで求めたゲル化終了後の単位体積当たりのセグメントの配向度 $\Delta\bar{Q}_z$ と高分子鎖の平均体積分率の関係である。 $\Delta\bar{Q}_z$ はプラスの場合平行配向、マイナスの場合垂直配向を示す。 D は適当な単位で計った拡散定数、 k_B はボルツマン定数、 T は温度である。剛性が高い場合は高分子体積分率が增加するほど垂直配向が強くなるが剛性が小さい場合は逆の傾向が現れる。この異なる傾向が①と③の競合の結果と考え、体積分率の増加、すなわち、排除体積効果の増大が①の効果を増加させ③の効果を減少させると考えることができる。実際、体積分率の増加とともにセグメント1つあたりの配向度の大きさは減少することも分かっている。

<2>液液接触によるゲル化ダイナミクスの統一描像の構築

シミュレーションIIでゲル厚の時間変化の2乗 $X^2(t)$ を計算した結果の一つを図3に示す。ゲル化開始初期はMB描像に基づく拡散律速過程 $X^2(t) \sim t$ からずれていてエネルギー律速過程 $X(t) \sim t$ に近い振る舞いをする。その後、直線によくのようになり、 $X^2(t)$ は t の一次式

$$X^2(t) = At + B \quad (1)$$

によくのようになる。定数 B が負であることから(1)式は

$$X^2(t) = A(t - t_0) \quad (2)$$

と書き直すことができ、ラグタイム t_0 が存在するかのように振る舞う。ラグタイムの長短がMB描像からのずれの程度を表していると考えられる。シミュレーションIIでセル内の未架橋な架橋因子とセグメントの架橋状態を調べた結果、 t_0 が大きいときは未架橋のセグメントと未架橋の架橋因子が共存する領域が広いことが分かった。架橋反応が弱い場合つまり k_G が小さい場合MB描像からずれるゲル化初期においてはエネルギー律速のゲル化が生じることがわかる。従来のMB描像にラグタイムを導入することで架橋反応が弱い場合を含めた液液接触によるゲル化ダイナミクスの解析が可能になる。

ラグタイムの存在は、架橋因子の架橋反応とゲル化ダイナミクスを分離したGinzburg-Landau(GL)方程式で自然に導出できる。架橋因子の流入を拡散方程式で架橋過程を化学量論的な反応式で記述し架橋点濃度 ρ_A の時間変化で表現し、ゲル化度を ψ ($\psi = 0$:ゾル、 $\psi > 0$:ゲル)、 g を正の定数、 $a = a(\rho_A)$ を ρ_A に依存するパラメータとして局所自由エネルギーを

$$f(\rho_A, \psi) = g\psi^2(\psi - 1)^2 + a(\rho_A)\psi^2 \quad (3)$$

と書く。 κ をゲル化度の空間不均質性の効果を示す小さな正定数、自由エネルギー汎関数を

$$F = \int \left[\frac{1}{2}\kappa \left(\frac{d\psi}{dz} \right)^2 + f(\rho, \psi) \right] dz \quad (4)$$

Kinetic係数を Γ として、GL方程式は

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\Gamma \frac{\delta F}{\delta \psi} \quad (5)$$

で与えられる。(5)式の近似的な解として、 ψ が有限値からゼロへと急激に変化するキंक部分を持つ解が得られ、ゲル化のダイナミクスは、キंक部分、すなわち、ゲル相とゾル相を分ける境界面の位置 $z = X(t)$ のダイナミクスで記述できる。得られた境界面の運動 $z = X(t)$ より、ダイナミクスは、ゲル化初期のエネルギー律速型 $X(t) \sim t$ から後期の拡散律速型 $X^2(t) \sim t$ へと遷移していくこと(クロスオーバー)が示される⁴⁾。遷移の様子は ρ_A の時間発展と関連付けることができる。言い換えると、この遷移過程から架橋因子による架橋過程が推測できることになる。さらに、シミュレーションIIの結果と照らし合わせることで、よりミクロなメカニズムが推測可能になった。

<3>MB描像を超えたゲル化ダイナミクスの測定

本研究において、MB描像からのずれの原因がミクロ(シミュレーションII)マクロ(現象論(5)式)双方から解明された。実験的にこのずれを表現する最も簡単な方法はラグタイムの導入である。さらにはエネルギー律速から拡散律速へのクロスオーバーである。MB描像からのずれについて、血漿のゲル化プロセス、すなわち、血液の凝固過程に注目した。血漿を組織因子に接触させ組織因子から放出される凝固因子によるゲル化を測定した⁴⁾。測定はトロンボダイナミクスアッセイキットを用いた。測定されたゲル厚の時間変化の一つのlog-logプロットを図4に示す。プロット点の違いはカルシウム濃度の違いを示す。青線は傾き1、赤線は傾き

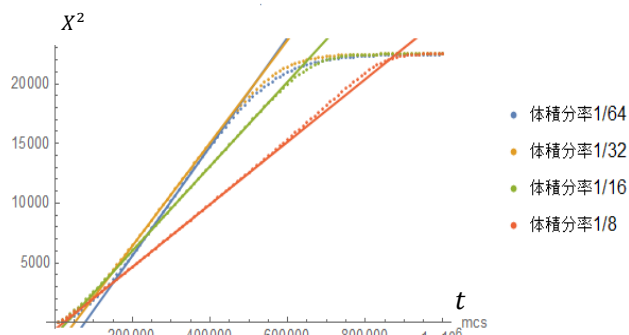


図3

1/2の直線。 $X(t) \sim t$ から
 $X(t) \sim t^{1/2}$ のクロスオーバ
 ーが見て取れる。このクロ
 スオーバーは凝固因子流入
 フロントとゲル化のフロ
 ントの競合により説明でき
 る。

カルシウム溶液と血漿
 を液液接触させゲル化ダイ
 ナミックスを測定した⁵⁾。
 ゲル化メカニズムを流入す
 るカルシウムにより凝固
 能阻害因子を無効化すると
 したMB描像でよく合う結
 果を得たが、ラグタイムが
 存在し、MB描像から外れ
 たダイナミックスを示した。

液液接触によるコンニャクグルコマンナンのゲル化を測定した。この系では、ゲル化剤がゲル層を拡散中に消費されてしまうが、その効果を考慮することで、MB描像に基づき実験結果を定量的に説明できた。

これらの結果より、MB描像からのずれの第一要因は架橋形成時間が有限であることであることが分かった。シミュレーションIIのパラメータでは反応速度定数 k_G の値がMB描像からのずれに大きく関与することになる。

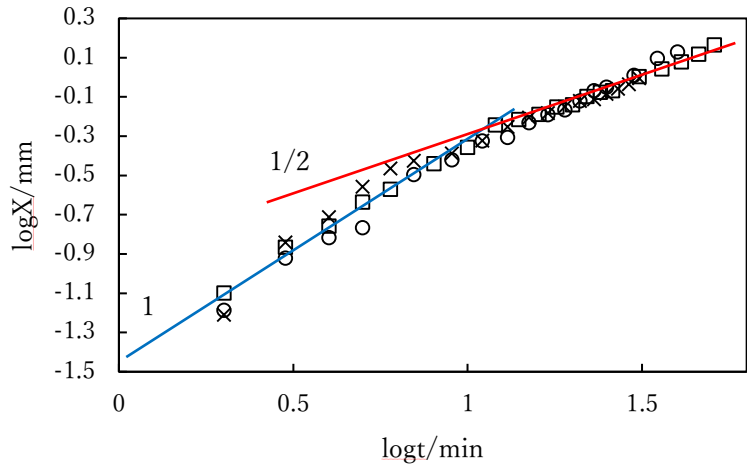


図 4

<4> 異方性ゲルの構造

シミュレーションIIでは、形成されたゲル中の構造を調べることができる。図5にセグメント1つあたりの配向度 ΔQ_z の空間分布を示す。配向度はある周期で振動しているように見える。セグメントの濃度分布にもよく似た振動が現れる。こうした振動現象は高分子セグメントの拡散挙動がおおきく関与していると考えられる。MB描像はもちろんのことGL理論(5)式にもセグメントの拡散は考慮されていない。今後の研究課題である。また、この振動現象は複屈折率の振動として観測されるはずであるから実験的に確認されることを期待したい。

$$\Delta Q_z \quad \frac{K}{k_B T} = 2.0, D = 0.05, \text{体積分率 } 0.0625$$

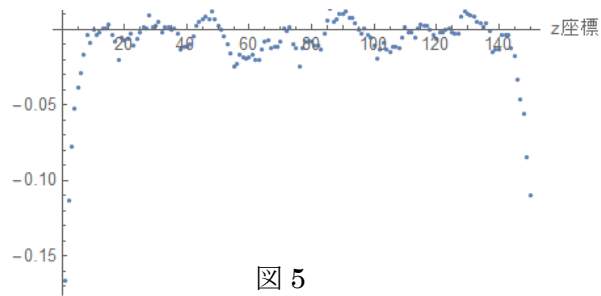


図 5

図6にシミュレーションIIで求めたゲルフロントの例を示す。縦軸 P_G はゲル化度を表し、0はゾル状態、1になるとその z の値を持つ面上のすべてのセグメントがゲルになっていることを示す。ゾル-ゲル境界面はセグメント50個分ほどの幅を持つことが分かる。マクロに見れば十分シャープである。また、体積分率が上がるに従って境界面はシャープになることがわかる。

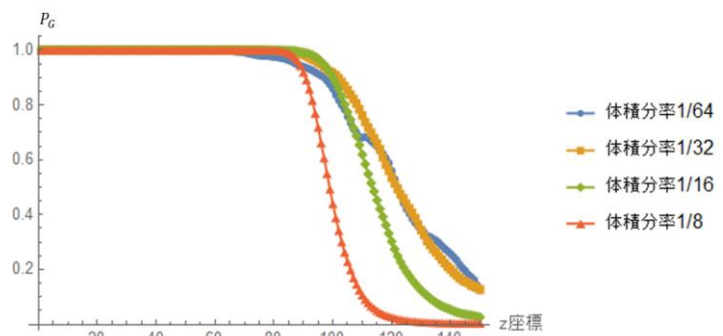


図 6

- (1) 小林大将, 山本隆夫 日本物理学会 2019 年秋季大会概要集 **2019** 12pPSB-45.
- (2) 小林大将, 山本隆夫 日本物理学会 2020 年秋季大会概要集 **2020** PSM-33.
- (3) 小林大将, 山本隆夫 日本物理学会 76 回年次大会概要集 **2021** PSM-41.
- (4) Kawabata,A.; Yamamoto,T.; Shinoda,H.; Yoshida,K.; Toyama,Y.; Tanaka,S.: Dobashi, T. Gels **2021** 7,11.
- (5) 川端彬嗣, 倉沢隆太, 青柳貴彦, 篠田啓貴, 外山吉治, 山本隆夫, 土橋敏明, 小川哲史 日本バイオレオロジー学会誌 **2018** 32 120.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamamoto Takao, Noguchi Motoki, Maki Yasuyuki, Dobashi Toshiaki	4. 巻 6
2. 論文標題 Gel Volume Near the Critical Point of Binary Mixture Isobutyric Acid?Water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Gels	6. 最初と最後の頁 30 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/gels6030030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Kazuto, Ujiie Ikumi, Yamamoto Takao, Dobashi Toshiaki	4. 巻 255
2. 論文標題 Gel growth of aqueous konjac glucomannan solution containing sodium trimetaphosphate dialyzed with dilute sodium hydroxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbohydrate Polymers	6. 最初と最後の頁 117329 ~ 117329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbpol.2020.117329	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawabata Akitsugu, Yamamoto Takao, Shinoda Hiroki, Yoshida Kazuto, Toyama Yoshiharu, Tanaka Susumu, Dobashi Toshiaki	4. 巻 7
2. 論文標題 Crossover of Rate-Limiting Process in Plasma Gel Growth by Contact with Source of Gelator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Gels	6. 最初と最後の頁 11 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/gels7010011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中野頌平, 山本隆夫
2. 発表標題 枯渇相互作用のポテンシャル
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 星野拓海, 山本隆夫
2. 発表標題 2成分分散媒中のゲルの膨潤
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林大将, 山本隆夫
2. 発表標題 液・液接触によるゲル形成における異方化
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西岡千波, 吉場一真, 土橋敏明, 山本隆夫
2. 発表標題 AI 3+ で架橋された DNA ゲル微粒子の溶出ダイナミクス
3. 学会等名 第68回レオロジー討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林大将, 山本隆夫
2. 発表標題 液液接触によるゲル形成のモンテカルロシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大澤悠人, 山本隆夫
2. 発表標題 二成分溶媒中の高分子ブラシ の膨潤挙動
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南 亮介, 山本隆夫
2. 発表標題 微細管中の剛直性高分子溶液
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林大将, 山本隆夫
2. 発表標題 傾斜化学ポテンシャル中の剛直高分子鎖溶液の異方化
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野頌平, 山本隆夫
2. 発表標題 分散媒の不均一性により生じるコロイド粒子間相互作用
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川端彬嗣, 篠田啓貴, 吉場一真, 外山吉治, 山本隆夫, 土橋敏明, 小川哲史, 田中進
2. 発表標題 組織因子との接触による血漿の凝固ダイナミクス
3. 学会等名 第42回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 入江昇陽, 吉場一真, 山本隆夫, 土橋敏明
2. 発表標題 分子量の異なる二つのDNA 溶液の接触による過渡的構造形成
3. 学会等名 第42回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川田早良, 吉場一真, 山本隆夫, 土橋敏明, 田中進
2. 発表標題 発ガン物質吸着材のインターカレーター吸着挙動
3. 学会等名 第42回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西岡千波, 吉場一真, 山本隆夫, 土橋敏明
2. 発表標題 DNA ゲル微粒子の溶解過程
3. 学会等名 第42回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 氏家郁美, 土橋敏明, 吉場一真, 山本隆夫
2. 発表標題 トリメタリン酸ナトリウムによるコンニャクグルコマンナンのゲル成長
3. 学会等名 第42回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠田啓貴, 川端彬嗣, 吉場一真, 外山吉治, 山本隆夫, 土橋敏明, 小川哲史, 田中 進
2. 発表標題 血液凝固因子との接触による血漿の凝固ダイナミクス
3. 学会等名 第67回レオロジー討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本隆夫
2. 発表標題 液液接触によるゲル形成 ダイナミックス の 遷移
3. 学会等名 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大澤悠人, 山本隆夫
2. 発表標題 二成分溶媒中の高分子ブラシ
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 南亮介, 山本隆夫
2. 発表標題 微細管中の高分子溶液
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川端彬嗣, 倉沢隆太, 青柳貴彦, 篠田啓貴, 外山吉治, 山本隆夫, 土橋敏明, 小川哲史
2. 発表標題 血液凝固モデルとしての血漿/塩化カルシウム水溶液接触系におけるゲル化ダイナミクス
3. 学会等名 第41回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠田啓貴, 倉沢隆太, 外山吉治, 山本隆夫, 土橋敏明, 小川哲史
2. 発表標題 パック赤血球/血漿接触系におけるゲル形成ダイナミクス
3. 学会等名 第41回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	土橋 敏明 (Dobashi Toshiaki) (30155626)	群馬大学・大学院理工学府・教授 (12301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------