

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05241

研究課題名(和文) 新規な相転移ダイナミックスの統計力学の構築による異方性ゲル化の解明とその応用

研究課題名(英文) Understanding the anisotropic gelation mechanism by constructing the statistical mechanics for the novel phase-transition dynamics and application of the statistical mechanics

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：透析のような液-液接触による異方性ゲル化現象を、ゾルゲル境界面近傍のゾル溶液(境界ゾル溶液)の性質に着目して研究した。Monte-Carloシミュレーションから、化学ポテンシャル傾斜とゾルゲル境界面の高分子鎖の運動制限により異方化が生じることが分かった。Allen-Cahn型の相転移ダイナミックスをベースにして、境界ゾル溶液からのゲル化ダイナミックスの理論を構築した。このダイナミックスとMoving-Boundary描像を用いて各種の(異方性)ゲル化現象を解析するとともに血液凝固現象を液-液接触によるゲル化現象として考察した。

研究成果の概要(英文)：We studied anisotropic gelation phenomena by the liquid-liquid contact such as dialysis by paying attention to the thermo-statistical-mechanical properties of the sol solution near the sol-gel interface (sol solution on the interface). The Monte-Carlo simulation we performed shows that the anisotropy of the gel is induced by the chemical potential gradient and the constraint imposed on the polymer chain motion by the sol-gel interface. We constructed the dynamics changing from the sol solution on the interface to the anisotropic gel based on the Allen-Cahn-type phase-transition dynamics. By means of the newly-derived dynamics and the moving-boundary picture, we analyzed several anisotropic gelation phenomena and considered blood coagulation from a view point of the gelation phenomena induced by the liquid-liquid contact.

研究分野：統計物理学

キーワード：異方性ゲル 高分子鎖の配向 Moving-Boundary 描像 ゲル化ダイナミックス Allen-Cahn型相転移ダイナミックス 血漿 トランスグルタミナーゼ

## 1. 研究開始当初の背景

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は、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 CaCl<sub>2</sub> 水溶液に浸漬する(すなわち透析する)ことで作製できることが申請者らのグループによって発見された [T.Dobashi et.al, Langmuir **20** 6530-6534 (2004)]. また工業的有用性から特許(特許 4110255 号等)が認められている。カードラン以外に、DNA、カラギーナンなど種々の高分子で作製できることが分かり、さらに、金属イオンという架橋剤を使わなくても pH 変化でも異方性ゲルが作製できることが、キトサン高分子によって発見され、これら多くの事例の発見を検討することより、

[性質 1]透析によるゲル化には程度の差はあるが高分子鎖の配向(異方化)が伴う。

[性質 2]異方性ゲル化する高分子は透析外液に不溶で、透析外液の溶液中では析出する。

[性質 3]高分子鎖の配向は境界面で生じる。という一般的な性質があることがわかった。

相境界面の運動を異方性ゲル化過程と関連付ける理論描像、Moving Boundary(MB)描像によって、種々の異方性ゲル化過程を観測することで、上記カードラン溶液のゲル化ダイナミクスを代表とする拡散律速型のダイナミクスと、DNA 溶液の乾燥によるゲル化でみられるような界面張力律速型のダイナミクスがあり、条件によって、ダイナミクスがこの二つのタイプを移り変わる場合があることも発見された。

以上のことより、異方性ゲル化ダイナミクスについて

[仮説 1] 外部環境により引き起こされるゾル-ゲル境界面の運動により境界面近傍に熱力学的に不安定なゾル溶液部分(以後、境界ゾル溶液と呼ぶ)が(緩和的でなく)定常的に生じる。

[仮説 2] 境界ゾル溶液は非一様で、非一様性は動的に安定化されている。

[仮説 3] 高分子鎖の配向は境界ゾル溶液の非一様性に起因する。

という 3 つの仮説を立てるに至った。

## 2. 研究の目的

透析による高分子溶液の異方性ゲル化で最も謎な部分は、ゲル化における異方化(高分子の配向現象)である。その解明のためには、熱力学的に不安定なゾル-ゲル境界面近傍のゾル溶液(境界ゾル溶液)の性質の解明とそこでの高分子鎖の運動の理解が必要である。透析外液の pH 変化によってダイナミクスが拡散律速から界面張力律速に変わるダイナミクス遷移を調べることで境界ゾル溶液の性質を解明する。加えて、高分子鎖のマイクロレオロジーを用いて境界ゾル溶液中の高分子

鎖の運動を解析することで、異方性ゲル化の統計力学描像を構築する。この異方性ゲル化ダイナミクスを、相転移経路として動的に安定化した非一様状態を経由する相転移ダイナミクスとして一般化し、それを用いて新しい異方性ゲル化手法を構築する。具体的な目的は次のようである。

目的 1: 非一様な溶液中での異方化のミクロな描像の構築

目的 2: 実験データに基づく境界ゾル溶液の非一様性の解明方法の確立

目的 3: 境界ゾル溶液からの異方性ゲル化描像の確立と、それを一般化した、相転移経路として動的に安定化した非一様状態を経由する相転移ダイナミクスの統計力学の構築

目的 4: この新しい相転移ダイナミクスの統計力学に基づく新しい異方性ゲル化法の構築

## 3. 研究の方法

境界ゾル溶液の簡単なモデルとして、非一様な化学ポテンシャル  $\mu(\mathbf{r})$  を持つ系を考え、この中の高分子鎖の挙動をシミュレーションとマイクロレオロジーで調べ、ミクロな配向描像を確立する。ダイナミクス遷移をする異方性ゲル化ダイナミクスの測定データから  $\mu(\mathbf{r})$  を求める方法を確立し、境界ゾル溶液の動的に安定化した非一様溶液描像の妥当性を検討する。実験データを蓄積し、そのデータに即した境界ゾル溶液モデルを構築し、異方性ゲル化の特徴をマイクロレオロジーで抽出しシミュレーションで確認する。それに基づき、境界ゾル溶液から異方性ゲルへの相転移ダイナミクスの統計力学を構築する。さらに、それを、相転移経路として動的に安定化した非一様状態を経由する相転移ダイナミクスの統計力学として一般化する。一般化した理論に基づき新規な異方性ゲル化手法を考案し、異方性ゲル作製を試みる。

## 4. 研究成果

(1) モンテカルロシミュレーションによる高分子鎖の配向機構の解明

① 動的な配向機構の発見

z 軸方に傾斜を持つ化学ポテンシャル中の濃厚高分子溶液のモンテカルロシミュレーションを行った。z 軸方に傾斜の大きさが空間依存性を持たない単純な構造の  $\mu(\mathbf{r})$  の場合でも、傾斜方向に高分子鎖は配向することが分かった。配向方向はこの配向は、熱平衡状態としての配向ではなく、高分子の流れを伴う定常状態における配向である。

配向方向を詳細に調べると、殆どの高分子鎖は傾斜方向に平行に配向するが一部は垂直に配向することが分かった。それぞれの方向に配向した高分子鎖の移動の速さを調べると、平行には移行した高分子鎖の移動速度は垂直に配向下ものに比べて、きわめて遅いことが分かった。このことから、(a) 化学ポテンシ

ル勾配により空間対称性が破れ、高分子鎖は傾斜に平行な方向または垂直の方向に配向する、(b) 平行に配向する高分子鎖の運動速度は速いためゲル表面に早く到達、その後、ゲル化し、架橋剤分子流れに垂直方向に配向した異方性ゲルが構築される、という動的な配向機構が存在することを発見した。

ただし、このシミュレーションでは、配向が生じる化学ポテンシャル傾斜の傾斜が非現実的なほど大きい、シミュレーションはz方向に周期境界条件を課してゾル-ゲル境界面の存在が考慮されていない、という問題点が残った。

#### ②境界面の存在による配向機構の発見

上記の二つ目の問題点を解決するためにゲル表面を高分子鎖が侵入できない境界面と考え、z方向に垂直な面で挟まれた高分子濃厚溶液に、z軸方向に傾斜した化学ポテンシャルを導入したシミュレーションを行った。2つの境界面のうち化学ポテンシャルが低い方のものがゾル-ゲル境界面であり、もう一つは体積分率を一定にするために導入した人工的なものである。z方向の長さを十分取りこちらの境界面の効果が出ないようにする必要がある。

シミュレーション結果より、ゲル境界面近くで高分子鎖は境界面に平行に配向し、化学ポテンシャル傾斜はこの配向を促進し、勾配が大きいほど配向度も大きくなることが分かった。配向に必要な化学ポテンシャル傾斜は境界面のない場合の1/10程度以下でよいことがわかり、境界面の導入が高分子の配向に本質的であることが分かった。高分子鎖の運動という視点からすると、境界面の存在は運動領域の制限と理解出来る。

#### ③ゲル界面にトラップされる効果による配向

高分子鎖の運動という視点からすると、ゲル化とは高分子の運動領域が大きく制限されることを示す。ゲル化過程で1本の高分子鎖の一部がゲルに取り込まれトラップされる。それにより、残りの部分の運動状況が大きく変化する。この運動状況の変化を取り入れたシミュレーションを行った。ゲル壁面を一定の速度で移動させゲル内に取り込まれた高分子鎖の運動を停止させるというアルゴリズムを用いた。シミュレーション結果は、トラップにより高分子鎖は境界面に平行に配向する事が分かった。ただし、壁面移動速度(ゲル化速度)が遅いほど配向が強いという実験結果に矛盾する結論となった。

#### ④異方化のミクロな描像

③の矛盾は化学ポテンシャル傾斜を入れることで解消させる。結局、(i) 架橋剤の定常的な流入(化学ポテンシャルの傾斜で表現)、(ii) ゲル界面の存在による高分子の運動領域の制限、(iii) 高分子鎖のゲル界面での部分的なトラップによる運動の制限、の3つの効果により形成ゲルは異方化していることが分かった。この知見が得られたことより、目的Iはおおむね達成できたと考えた。(i)、(ii)、(iii)を取り入れた数理モデルの構築とそれ

ぞれの効果の理解を深めることが今後の課題である。

#### (2) ダイナミクス遷移について

##### ①実験と実験結果

NaOH 水溶液に溶解させたカードランを、透析膜を巻き付けた2枚のアクリル円板で作られた容器内に封入し、HCl 水溶液に浸漬させると、透析膜近傍からカードラン溶液がゲル化していく。このゲル化のダイナミクスを測定すると、透析外液である HCl 水溶液の pH が低い時は拡散律速、高くなると界面張力律速と考えられるダイナミクスが観測される。

##### ②理論構築

ゲル化の駆動力はゲル相と境界部分の溶液(境界ゾル溶液)の不安定化により引き起こされると考えた。境界ゾル溶液の体積あたりの局所自由エネルギーを、ゲル化度 $\psi$ 秩序変数( $\psi > 0$ ならゲル、 $\psi = 0$ ならゾル)、pHの程度を表す量 $\rho$ をパラメータとして、

$$f(\psi, \rho) = \psi^2(\psi_c - \psi)^2 + \alpha(\rho)\psi^4 \quad [1]$$

$$\alpha(\rho) = a(\rho_0 - \rho) \quad [2]$$

とする。 $f$ の最小値を与える $\psi$ の値によって高分子溶液(カードラン溶液)の状態が決定される。このことより、高分子溶液の状態は次の3つに分類される。

状態Ⅰ： $\rho < \rho_0$ の場合。ゾル状態が安定

状態Ⅱ： $\rho_0 < \rho < \rho_0 + \psi_c^2/a$ の場合。

ゾル状態は準安定

状態Ⅲ： $\rho_0 + \psi_c^2/a < \rho$ の場合。

ゲル状態が安定

ゲル化のダイナミクスを記述する全自由エネルギー汎関数は、

$$F = \int [C \left( \frac{d\psi}{dr} \right)^2 + f(\psi, \rho)] dr \quad [3]$$

と書くことができる。ここで、 $C$ は小さな正の定数で、 $r$ は、アクリル円盤の道経方向を示す。

状態Ⅰでは高分子溶液はゾルのままで透析外液からのイオンの流入で状態Ⅱになって初めてゲル化が開始する。状態Ⅱでは、平衡状態をしめす $\delta F/\delta \psi = 0$ の解としてキंक状のものが存在する。つまり、ゾル層とゲル層が共存できて、共存している場合キंक構造に起因する界面張力が発生する。状態Ⅲではゾル状態は不安定で高分子溶液は直ちにゲルに変化する。状態Ⅰではゲル化は起こらないから、ゲル化が起こる状態は、状態Ⅱが状態Ⅲとなる。

ゲル化する高分子溶液が状態Ⅱにある場合は、Allen-Cahn型の相転移ダイナミクスとなる。ゲル化の駆動力は界面張力で、界面張力律速のダイナミクスとなる。一方、状態Ⅲにある場合は、即座にゲル化が起こる。つまり、pHを変化させるイオンの流入が律速(イオンの拡散が律速)となるダイナミクスが現れることになる。

上記の考察より、透析外液のpHとダイナミクスの関係を次のように分類することができる。

どちらのダイナミクスが表れるかは、おおよそに言って、熱平衡における高分子溶液の pH、すなわち、熱平衡における  $\rho$  の値  $\rho_{eq}$  によるであろう。つまり、 $\rho_0 < \rho_{eq} < \rho_0 + \psi_G^2/a$  の場合、界面張力律速、 $\rho_0 + \psi_G^2/a < \rho_{eq}$  の場合拡散律速であることが分かる。

### ③境界ゲル溶液の性質の解明

ダイナミクスを支配する高分子溶液の局所自由エネルギー  $f(\psi, \rho_{eq})$  は境界ゾル溶液の自由エネルギーと考えてよい。そして、ダイナミクス遷移を調べることで境界ゾル溶液の自由エネルギーの特徴、すなわち、境界ゾル溶液の性質を解明できることが分かった。このことにより、目的 2 はほぼ達成できたといつてよい。

### (3)配向のダイナミクス: 酵素によるタンパク質のゲル化

#### ①実験

高分子の架橋剤として、ゲル化により消費されることのない酵素を選び、タンパク質であるゼラチンの水溶液のゲル化ダイナミクスを測定した。図 1 に示すように試験管下部にゼラチン水溶液を入れ、その上部にゼラチンを架橋する酵素であるトランスグルタミナーゼの水溶液をのせる。ゼラチン水溶液は、トランスグルタミナーゼ水溶液とゼラチン水溶液の境界面から等方ゲルとなっていく(図 1(a): 自然光下の写真で白濁層が等方ゲル)その後、配向が起こって異方的になること(図 1(b): クロスニコル下の写真で光が透過していることより複屈折を持つことが分かる)が観測された。

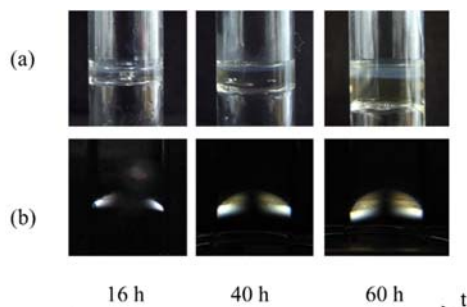


図 1

#### ②理論構築

MB 描像に基づいた理論を構築し、ゲル化部分の厚さは経過時間  $t$  の  $1/2$  乗に比例しその振る舞いは、酵素濃度 ( $Ct$ )、ゼラチン濃度 ( $Cg$ ) に依存しない普遍性があることを得た。

図 2 に実験より求めた等方ゲル層の厚さ  $X_1$  の 2 乗  $X_1^2$  と経過時間の関係を示す。プロット点の違いは  $Ct$ 、 $Cg$  の違いを示す。すべてのデータが原点を通る同一直線

$$X_1^2(t) = Kt \quad [4]$$

( $K$  は酵素濃度によらない正定数)にのっており理論が正しいことを示している。

#### ③異方化のダイナミクス

図 1(b) に示される異方性ゲル層の厚さ  $X_2$  の時間変化は、 $K$  より小さい酵素濃度に依存する正の値  $K'$  とラグタイム  $\tau$  を用いて

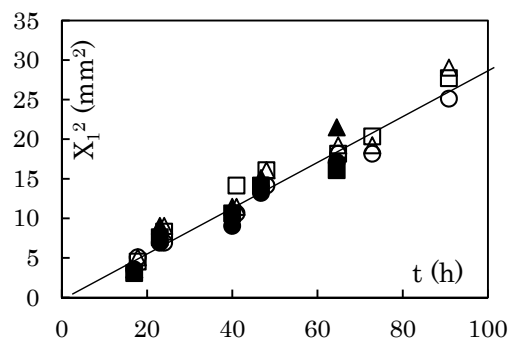


図 2  
 $Ct=0.25wt\%$ :  $Cg=10wt\%$ (□),  $5wt\%$ (△),  $25wt\%$ (○)  
 $Cg=20wt\%$ :  $Ct=0.05wt\%$ (■),  $0.1wt\%$ (▲),  $0.25wt\%$ (●)

図 2

$$X_1^2(t) = K'(t + \tau) \quad [5]$$

と書くことができることが分かった。この実験でゲル化と異方化の間のタイムラグが初めて見つかった。このタイムラグを説明するために、等方-異方転移を時間依存 Ginzburg-Landau (GL) 理論

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\Gamma \frac{\partial f}{\partial \phi} \quad [6]$$

に基づき、緩和過程として捉える理論を構築した。ここで、 $\Gamma$  はカイネティック係数、 $\phi$  は異方性の程度を示す秩序変数でゼロなら等方相、有限なら異方相を示す。 $f = f(\phi)$  は GL 自由エネルギーである。

最も簡単な自由エネルギー、

$$f(\phi) = f_0 + A(\phi - \phi_{eq})^2 \quad [7]$$

( $A$ 、 $\phi_{eq}$  は正定数、 $f_0$  は定数)に基づき、ラグタイムは  $\phi$  が 0 から  $\phi_{eq}$  に緩和するための緩和時間であることを示した。加えて、 $K > K'$  でなければならないことも示した。

等方ゲル層内ある点  $x$  での時刻  $t$  における酵素濃度を、 $\rho(x, t)$  とする。(3)の②の議論と同様に、GL 自由エネルギー  $f$  を拡張し酵素濃度  $\rho$  の関数、 $f = f(\phi, \rho(x, t))$  とすることで酵素の流入の効果を記述できるようにした。特別な場合として [7] 式を含む妥当な関数形として、を得た。

$$f(\phi, \rho) = f_0 + a(\rho)\phi - b\phi^2 + c\phi^3 \quad [8]$$

ここで、 $b$ 、 $c$  は正の定数。 $a(\rho)$  は、[2] 式のようにある  $\rho$  の値を境に正負が変化する関数である。

#### ④異方性ゲル化ダイナミクスの一般描像

(2)②および、(3)③で論じたダイナミクスの統一を試みた。透析内液である高分子溶液

$$F = \int dx \left[ \kappa_\rho \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right)^2 + \kappa_\psi \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \kappa_\phi \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + f(\rho, \frac{\partial \rho}{\partial x}, \psi, \phi) \right] \quad [9]$$

の自由エネルギー汎関数を局所的な、ゲル化度  $\psi$ 、異方化度  $\phi$  および架橋剤密度  $\rho$  を用いて、とし、 $\psi$ 、 $\phi$  には [6] 式と同様な緩和型のダイナミクス、 $\rho$  には保存則を満たすようにした緩

和型のダイナミクスを導入することで、統一的に記述する方法を提案した(簡単のため、空間を $x$ 軸のみで示している)。ここで、 $\kappa_\alpha$  ( $\alpha = \rho, \psi, \phi$ ) は正の定数で $f$ は境界ゲル溶液の局所自由エネルギーで、(1)で論じた化学ポテンシャル傾斜の効果を $\partial\rho/\partial x$ で取り入れている。この提案で目的3を部分的に達成した。 $f$ の具体的な形を決め実験と比較可能にすること、(1)で見つけたマイクロな描像との関連を明確にしていくことが今後の課題である。

#### (4) 血漿のゲル化

血栓は、何らかの原因で血液から形成されたゲル塊である。透析によるゲル化ダイナミクスの考え方を血栓形成過程に応用することを試みた。血栓形成にはいろいろな機構があるが、血漿(主成分はフィブリン溶液)がCaイオンでゲル化する機構を抜き出し、そのダイナミクスを解析した。

##### ① 実験

購入したウシおよびウマ由来の血液を希釈し、それから無血小板血漿(PFP)を分画しアクリル製のセルに封入する。封入したセルを様々なCaイオン濃度 $[Ca^{2+}]$ の $CaCl_2$ 水溶液に浸漬させセル内の様子を監察する。(図3)

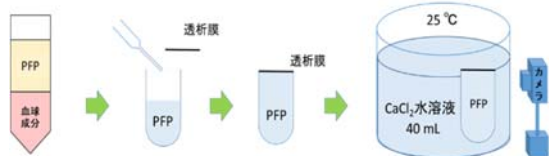


図3

血漿は塩化カルシウム溶液に接しているセル上部からゲル化していく(図4)。ゲル層の厚さ $X$ の時間変化を計測する。

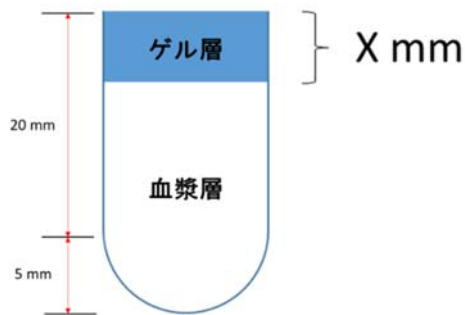


図4

実験結果で特徴的であったことは、ゲル層形成までにラグタイムがあったことである。ラグタイム後しばらくは、ゲル層厚は経過時間 $t$ の1/2乗に比例して増加していった。すなわち、ゲル成長は拡散律速(おそらくCaイオン)であるのにもかかわらず、界面張力律の特徴であるラグタイムが生じている。

##### ② 理論構築と解析

Caイオンによる血漿のゲル化で忘れてはいけないのは抗凝固作用のあるクエン酸が血漿中に混入されていることである。クエン酸はCaイオンをキレートし凝固能力を失わせるの

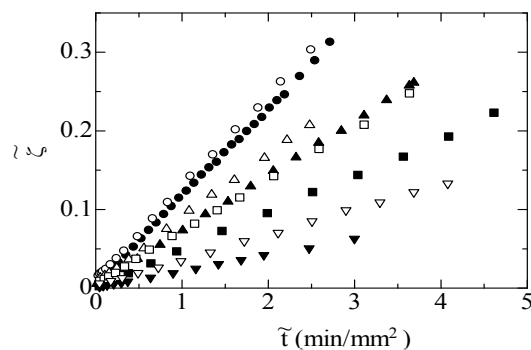
である。拡散律速で理論を構築すると、考慮するプロセスは(i)Caイオンの流入、(ii)クエン酸の流出、(iii)クエン酸によるCaイオンの捕獲、(iv)Caイオンによるフィブリンのゲル化、の4つである。(iv)を除くとpH変化型のゲル化と同じダイナミクスとなる。ゲル

$$\zeta\left(\tilde{X}, \frac{\beta}{K_{in}}\right) = \int_0^{\tilde{X}} \frac{udu}{1 - \frac{\beta}{K_{in}} \ln(1-u)} \quad [7]$$

$$\zeta\left(\tilde{X}, \frac{\beta}{K_{in}}\right) = K_{in} \tilde{t} \quad [8]$$

化に必要なCaイオンは少量であるとして、MB描像に基づき理論式、

を得た。ここで、 $\tilde{X} = X/L$ 、 $\tilde{t} = t/L^2$ 、 $L$ はセルの実効的な長さである。 $\beta$ および $K_{in}$ をフィティングパラメータとして測定データをフィットするしたものを図5に示す。直線に良くのっており[7]式が実験をよく説明していることが分かる。また、ウマとウシ異なる動物種においても[7]式が良く合うことより、ヒトにおいてもダイナミクスが[7]式で記述出来る事が期待される。



ウシ:  $[Ca^{2+}] = 10 \text{ mM}(\nabla), 30 \text{ mM}(\blacksquare), 50 \text{ mM}(\blacktriangle), 100 \text{ mM}(\bullet)$   
ウマ:  $[Ca^{2+}] = 10 \text{ mM}(\nabla), 30 \text{ mM}(\square), 50 \text{ mM}(\triangle), 100 \text{ mM}(\circ)$

図5

##### ⑤ 赤血球表面からのゲル化

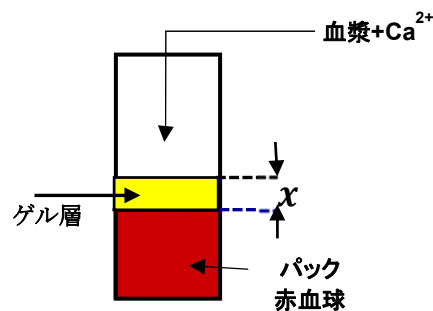


図6

(2)、(3)で構築された理論では、ゲル状態が自由エネルギーの最小状態であっても、ゾル溶液が準安定状態にあるとき、ゲル化は開始しないことを示している。血漿のゲル化において生じたラグタイムは、おそらくこの準安定状態を壊す時間と考えられる。

一方で、理論では、ゾル溶液の境界に準安定状態を壊す要因を入れることでゲル化が開始することが示される。血液凝固は血管また

は赤血球表面から開始されると考えられている。この赤血球表面からの血液凝固を、赤血球表面の存在が準安定状態を壊す役割を果たすと考えて、「新規なゲル化手法」として実験をおこなった。理論では、ゲル厚は経過時間の一次関数になることが予想される。図 6 に示すように、パック赤血球上に Ca イオンの入った血漿を重層すると、赤血球層の表面から

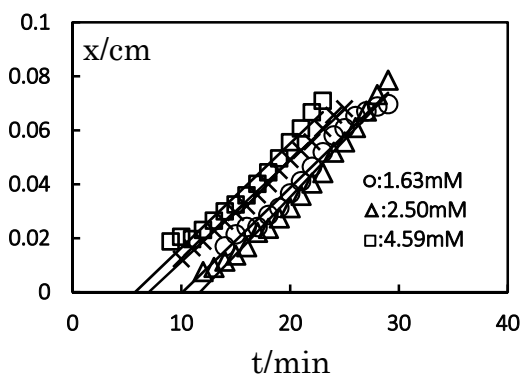


図 7

血漿がゲル化する。ゲル化のラグタイムは赤血球がない場合より短くなる。ゲル厚 $x$ の時間変化を図 7 に示す。プロットの違いは血漿中の Ca イオンの濃度の違いを示す。理論の予測どおり時間の一次関数になっている。この研究成果より目的 4 はおおむね達成されたと考えられる。

## 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 4 件)

①S. Ryouyuke, G. Yamaguchi, D. Nagai, Y. Maki, K. Yoshiba, T. Yamamoto, B. Chu and T. Dobashi, Adsorption dynamics of tannin on deacetylated electrospun Konjac glucomannan fabric, *Soft Matter* Vol.14, 2018, pp. 2712-2713. DOI: 10.1039/C8SM0013E 査読有

②Y. Takagi, S. Tanaka, S. Tomita, S. Akiyama, Y. Maki, T. Yamamoto, M. Uehara and T. Dobashi, Preparation of gelation scaffold and fibroblast cell culture, *J. Biorheol.* Vol.31, 2017, pp. 2-5. DOI: 10.17106/jbr.31.2 査読有

③N. Shida, R. Kurasawa, Y. Maki, Y. Toyama, T. Dobashi and T. Yamamoto, Study of plasma coagulation induced by contact with calcium chloride solution, *Soft Matter*, Vol.12, 2017, pp. 9471-9476. DOI: 10.1039/c6sm01926a 査読有

④Y. Toyama, H. Yoshida, T. Yamamoto and T. Dobashi, Erythrocyte aggregation under high pressure studied by laserphotometry and mathematical analysis, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Vol.140, 2016, pp. 189-195. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2015.1.038 査読有

〔学会発表〕(計 20 件)

①山本隆夫, ゼラチンゲルの配向ダイナミクス, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年

②宮下嶺, 山本隆夫, 平行平板に挟まれた高分子溶液, 第 65 回レオロジー討論会, 2017 年

③大津響希, 山本隆夫, 化学ポテンシャル傾斜により引き起こされる高分子濃厚溶液の異方性, 第 65 回レオロジー討論会, 2017 年

④工藤雄貴, 山本隆夫, 枯渇相互作用による凝集現象の Monte-Carlo Simulation, 第 65 回レオロジー討論会, 2017 年

⑤倉沢隆太, 青柳貴彦, 川端彬嗣, 外山吉治, 榎靖幸, 山本隆夫, 土橋敏明, 血漿と血液凝固トリガーとの接触界面からのゲル生成ダイナミクス, 第 65 回レオロジー討論会, 2017 年

⑥佐藤良祐, 山口岳, 永井大介, 榎靖幸, 山本隆夫, 土橋敏明, コンニャクグルコマンナン不織布の吸着挙動, 第 65 回レオロジー討論会, 2017 年

⑦土橋敏明, 倉沢隆太, 榎靖幸, 外山吉治, 山本隆夫, 溶液接触・架橋過程としての血液の凝固, 第 40 回バイオレオロジー学会, 2017 年

⑧大津響希, 山本隆夫, 化学ポテンシャル傾斜により引き起こされる高分子濃厚溶液の異方性, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年

⑨宮下嶺, 山本隆夫, 平行平板に挟まれた高分子溶液, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年

⑩工藤雄貴, 山本隆夫, 格子モデルを用いた枯渇相互作用による凝集現象の研究, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年

⑪山本隆夫, 柿木澄香, 榎靖幸, 土橋敏明, 酵素水溶液によるタンパク質水溶液のゲル化と配向のダイナミクス, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年

⑫山脇悠里, 山本隆夫, 化学ポテンシャル勾配により誘導されるポリマー溶液の異方性, 第 25 回日本 MRS 年次大会, 2015 年

⑬山本隆夫, 透析によるゲル化ダイナミクス: 拡散律速と界面張力律速, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年

⑭山本隆夫, 透析によるゲル化ダイナミクス II: 境界溶液の自由エネルギー, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年

⑮志田奈津実, 倉沢隆太, 外山吉治, 榎靖幸, 山本隆夫, 土橋敏明, 血漿と塩化カルシウム水溶液接触によるゲル形成過程, 第 38 回日本バイオレオロジー学会, 2015 年

## 6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

土橋 敏明 (DOBASHI TOSHIAKI)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号: 30155626