

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月28日現在

機関番号：82718

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540425

研究課題名（和文） 固形粉体の破壊モルフォロジー転移とスローダイナミクスに関する研究

研究課題名（英文） Study on Relation between Morphological Change of Crack Pattern in Powder Solid and Slow Dynamics

研究代表者

津留崎 恭一（KYOICHI TSURUSAKI）

神奈川県産業技術センター

研究者番号：90426388

研究成果の概要（和文）：ランダムな粒径を持つ付着粉体を固めた擬固体（固形粉体）を剪断力で破壊した際の破壊モルフォロジーの変化を分子系、粉体系で知られているガラス転移及びジャミング転移と関連づけて調べた。破壊モルフォロジーが亀裂から粉砕に変わる転移点付近では、固形粉体の粉体の動的運動にガラス転移特有のスローダイナミクスが観測された。静的な詰まり方に関してはジャミング転移と類似したべき乗則を示したが、指数の値は異なることから直接的な関連性は見いだされなかった。

研究成果の概要（英文）：The morphological change of broken powder solids defined as fragile solid-like materials, in which a lot of adhesive powders with random sizes are glued each other, has been investigated according to analogies with two transitions in particle systems, the glass and jamming transitions. Concerning to a dynamical property of the adhesive powders, the slow dynamics, which is a typical phenomenon in glassy materials, is observed near the transition point of the morphological change from cracking to crumbling. On the other hand, concerning to a static property of the powder materials such as the mean contact number per a particle versus the volume fraction, the power law function is observed, but the value of the exponent differs from that of reported value near the jamming transition point which is considered to be a universal value as a scaling exponent. Thus, we suggest that the morphological change is not directly related to the jamming transition at least from the view point of the critical phenomena.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 700,000   | 210,000 | 910,000   |
| 2011年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 2012年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 1,900,000 | 570,000 | 2,470,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：固形粉体，破壊パターン，ガラス転移，ジャミング転移

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

## 1. 研究開始当初の背景

我々は、付着力を持つ粉体（以後、付着粉体）を圧縮して固めた擬固体（固形粉体）を剪断力で破壊したとき、固形粉体がどのような壊れ方をするか（破壊モルフロジー）を、シミュレーションを用いて検討してきた。粉体を特徴付けるパラメータとして、付着力  $\chi$  の他に粒径分布幅  $\sigma$  を考える。粒径はガウス分布に従うランダム変数とし、 $\sigma$  は粒径の標準偏差とした。ここで考えるシミュレーションの系は全て 2 次元とする。

これまで、粉体の  $\chi$  を一定にして  $\sigma$  を増やしたとき、剪断で生じる亀裂のフラクタル次元  $D$  は、特定の  $\sigma$  の値 ( $\sigma_g$ ) 以下ではほぼ一定の 1.3 付近であるが、 $\sigma_g$  以上から急激に増加し、2 に漸近することが分かった。これは、定性的には破壊モルフロジーが  $\sigma_g$  を境にして亀裂から粉砕に変化することを意味する。さらにこの変化を詳細に調べると、一種の転移現象と似た振る舞いをみせることが分かった。例えば、粉体の自由体積分率  $f$  の  $\sigma$  依存性が、非結晶性の粒子系にみられるガラス転移点近傍における  $f$  と温度  $T$  の関係に類似している。

この類似性に従うと、破壊パターンが変化する理由は、以下の様に考えることができる。 $\sigma_g$  以下の固形粉体はガラス状物質の固体状態に相当し、粒子同士が強く関連している（自由体積が小さい）ために剪断力で応力集中が生じて亀裂を発生させる。一方、 $\sigma_g$  以上は熔融状態に相当し、剪断に対して独立に運動できるだけの自由体積があるため、流動するように崩壊する。つまり、固形粉体の内部状態が一種の固-液転移に類似した変化を起こすためと理解できる。

以上の考察は、直感的には理解しやすいが、必ずしも固形粉体の  $\sigma$  がガラス状物質の  $T$  と同じ様な働きをすることは自明ではない。実際、これまでの統計物理において、粒子がランダムな粒径を持つ場合に、粒度分布の幅が粒子の運動性にどのような影響を与えるのかは、これまでほとんど言及されてこなかった。

また、 $f$  という巨視的な平均物理量のみで議論していることにも注意する必要がある。ここ 10 年程前からガラス転移の研究では、粒子サイズのスケールにおける転移メカニズムの理解が進んでいる。例えば、自己中間散乱関数 (Self intermediate scattering function: SISF) をパラメータにすれば、ガラス転移温度付近でダイナミクスが非常に遅くなる現象（スローダイナミクス）をみることが知られている。そこで、固形粉体において

も、 $\sigma_g$  の近傍における粉体のダイナミクスにも何か変化が見られるかを調べることは大変興味深い。

## 2. 研究の目的

本課題の目的は、固形粉体の亀裂パターン変化とガラス転移との類似性について、ミクロなダイナミクスの立場から検討することである。Mohr 応力円をはじめとした古典的な破壊力学に対して、ガラス転移の分野で研究されている粉体のスローダイナミクスと構造不均一性の有無について調べる。

また、反発力のみで付着力を持たない粉体（以後、斥力粉体）が外場によって運動している様な系では、密度や応力が高くなると流動性が失われるジャミング転移が知られている。ガラス転移とジャミング転移は類似点が多く、統一的理解への試みが近年盛んに行われている。そのため、ジャミング転移との類似性についても検討する。

最後に、本課題で得た知見を他の系（自由気体、交通流、両親媒性分子溶液）に応用することを試みる。

## 3. 研究の方法

粒度分布のある 2 次元の粉体シミュレーションを行う。シミュレーションの方法として、柔軟性がある粉体でよく行われている DEM (Direct Element Method) 法と完全剛体球の衝突イベントを解析解で厳密に計算する Event Driven 型 MD (EDMD) 法を用いる。

これまでの我々の研究では、DEM 法を用いていた。DEM 法は、粒子間にバネとダッシュポットがあることを想定して相互作用を計算する。我々は、バネの相互作用を工夫し、粉体が衝突したときに僅かに重なりを許すことによって付着力を付与する付着粉体モデルを提唱した。今回、DEM 法を用いて、固形粉体中の付着粉体のガラス転移及びジャミング転移との類似性を調べる。

さらに、衝突した際に僅かにでも変形をしない剛体粒子をシミュレーションするため、EDMD 法を用いる。当初、付着粉体のバネ定数を大きくすることで剛体粒子を表すことを試みたが、DEM 法では粒子同士の僅かな重なりでも相互作用が発散し、安定してプログラムを実行することができなかった。このため、完全剛体の衝突を厳密に扱うことができる EDMD 法を用いた。プログラムは、衝突イベントの並列リスト処理と空間を微小セルに分解する Fast Multipole Method (FMM 法) を組み合わせることで、高速化を図った。この EDMD 法プログラムによって、粒度分布を持つ剛体自由粒子の気体状態方程式を考える。

#### 4. 研究成果

##### (1) ガラス転移との類似性

固形粉体におけるスローダイナミクスの有無を調べるために、固形粉体に破壊に至らない程度の微小な振幅を持つ周期的剪断場を加えた。なお、紙面の都合上、本節では付着力が一定の値 ( $\chi=1.5$ ) の結果のみを示す。先の研究から、この時の  $\sigma_g$  の値は約 0.4 と見積もられている。

図 1 に、付着粉体の自己中間散乱関数 (SISF) の  $\sigma$  依存性を示す。ここで、 $F(kr_0, t_c)$  は平均粒径  $r_0$  の付着粉体を  $t_c$  回振動させたときの SISF の波数  $k$  成分である。図 1 より、 $\sigma=0.3$  ではほとんど緩和が起きていないが、 $\sigma \geq 1.7$  では緩和が起きている事が分かる。緩和曲線は、ガラス転移のスローダイナミクスの研究で良く用いられる Kohlroush-Williams-Watts (KWW) 式の拡張型指数関数で良く表されることが分かった。拡張型指数関数にフィッティングして得られる緩和時間  $\tau$  を  $\sigma$  毎にプロットすると、 $\sigma_g$  ( $\approx 0.4$ ) に近づくにつれて発散的に増加することが分かった (図 2)。図 2 の実線は、ガラス状物質が  $T_g$  付近で粘度が発散する様子を表す Vogel-Tammann-Fulcher 型関数でフィッティングした結果である。

以上の結果から、緩和過程に関する限り、固形粉体においても  $\sigma$  が  $\sigma_g$  に近づくにつれて緩和時間の発散が見られ、スローダイナミクスが存在することが分かる。但し、SISF の緩和が、ガラス状物質では  $\alpha$  過程と  $\beta$  過程の 2 段階で起こるのに対して、固形粉体では 1 段階である点が異なる。ガラス転移現象では、一般的に、粒子が局所的なケージから逃れる過程とケージから逃れた粒子が遠くまで移動する過程があるため、2 段階緩和が起こるとされている。固形粉体の場合には、付着粉体が遠方までは移動しないため、緩和が 1 段階で終了することは整合性があると言える。

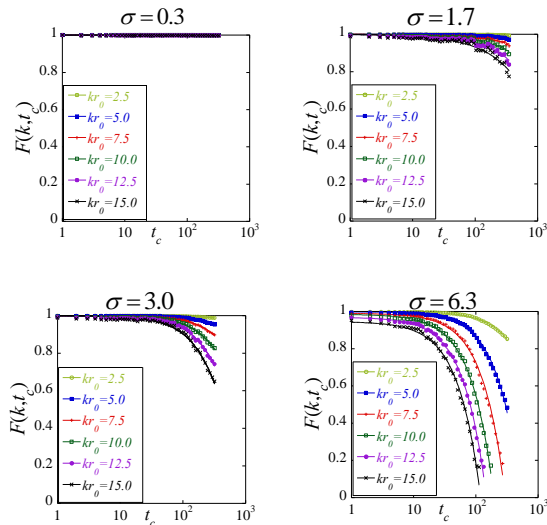


図 1 固形粉体の SISF の緩和曲線。

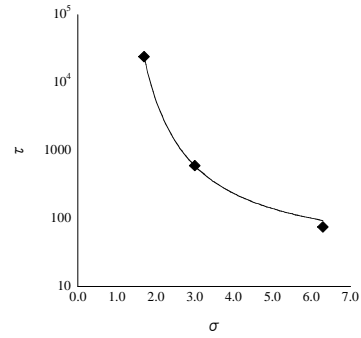


図 2 緩和時間  $\tau$  の  $\sigma$  依存性。

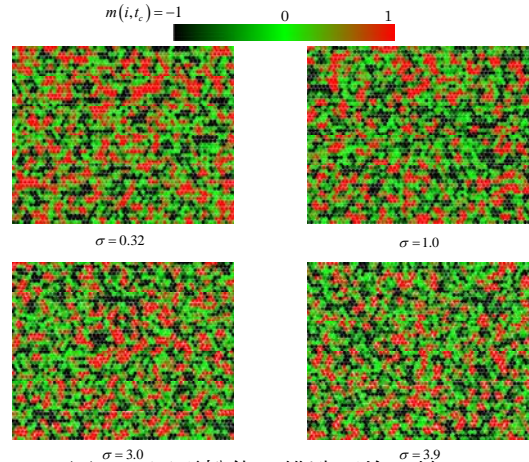


図 3 固形粉体の構造不均一性。

次に、緩和を局所的にみる構造不均一性を調べた。構造不均一性の可視化は、近年、 $T_g$  付近のガラス状物質の動きをシミュレーションで調べる際の常套手段とも呼べる研究手法である。

ガラス転移の研究では、結晶構造のオーダーパラメタの時間揺らぎを、構造不均一性をみる指標として用いることが多い。しかし、ランダムな粒径を持つ固形粉体の場合には元々結晶構造が乱れているために、別の指標を用いる必要がある。そこで我々は、固形粉体を微小剪断振動させたときの  $f$  の空間平均値からの時間揺らぎを指標とした。

図 3 は、振動回数  $T_c$  を 450 としたときの  $f$  の揺らぎ  $m$  を、値の大きさによって色分けしたものである。黒もしくは赤に近い粉体は揺らぎが大きく、緑に近い粉体は揺らぎが小さいことを表している。

今回用いた指標では、 $\sigma$  の値に依らず、明確な構造不均一性は観測されなかった。これは、付着粉体は遠方への移動ができないため、ランダムに配置された初期構造から動的に違いのある構造 (クラスター) を形成することが難しいためと思われる。しかしながら、別の指標を用いれば、何らかの不均一性が見られる可能性は残っている。

(2) ジャミング転移との類似性

ジャミング転移の研究により、斥力粉体を閉じた空間に押し込めていくと、体積分率  $\phi$  と平均近接粒子接触数  $Z$  がべき乗則

$$Z - Z_c \propto (\phi - \phi_c)^\beta \quad (1)$$

に従うことが知られている。ここで、2次元の斥力粉体では、 $Z_c$  と  $\phi_c$  の値は  $Z_c \sim 4$ ,  $\phi_c \sim 0.84$  と見積もられている。 $\beta$  は、普遍的な値で約 0.5 と考えられている。

我々は、ランダムな粒径を持つ付着粉体を一定の圧力で押し固めたときに、(1)式と類似した何らかのスケーリング則が成り立つかを調べた(図4)。斥力粉体との大きな違いは、付着粉体は粒子同士の重なりを許すことと、 $\phi$  を変えるのに系の圧力ではなく  $\sigma$  を変えている点である。付着粉体は、数密度が一定であっても、 $\sigma$  が大きくなると固形粉体中の隙間が大きくなるため、 $\phi$  は小さくなる。

図4により、 $Z$  と  $\phi$  を(1)式で表すと、 $\beta$  の値が  $\chi$  に依存することが分かる。この理由の一つは、 $\chi$  の値によって粉体の重なり度合いが異なるためである。 $\chi$  が大きくなると重なり度合いも大きくなる。

$\chi$  依存性を消すために、次の体積圧縮率  $\kappa$  という量を導入する。

$$\kappa = V(\chi, \sigma) / (\chi V(0, \sigma)) \quad (2)$$

$V(\chi, \sigma)$  は、 $\chi$ ,  $\sigma$  を持つ付着粉体を固めたときの体積である。 $V(\chi, \sigma)$  は、 $\chi$  に比例して小さくなるため、 $\kappa$  は  $\sigma$  のみで決まる。

我々は、 $Z$  に対して  $\kappa\phi$  でプロットすると、次式のべき乗則で表されることを見いだした(図5)。

$$Z - Z_c^* \propto (\kappa\phi - \phi_c^*)^{\beta^*} \quad (3)$$

図5の実線は、(3)式の最適曲線である。この時のフィッティングパラメータ  $Z_c^*$ ,  $\phi_c^*$ ,  $\beta^*$  の値を表1にまとめる。

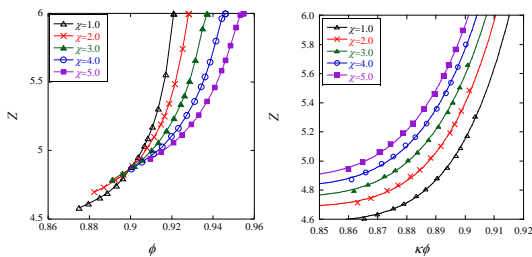


図4 平均接触数  $Z$  の体積分率  $\phi$  依存性。 $\chi$  は付着力を表す。右図は付着力によって付着粉体の重なり度合いが異なる影響を、体積圧縮率  $\kappa$  によって補正している。

表1 図5の曲線に(3)式をあてはめて最小二乗法でもとめた  $Z_c^*$ ,  $\phi_c^*$ ,  $\beta^*$  の値。

| $\chi$ | $Z_c^*$ | $\phi_c^*$ | $\beta^*$ |
|--------|---------|------------|-----------|
| 1.0    | 4.58    | 0.81       | 5.89      |
| 2.0    | 4.69    | 0.80       | 5.87      |
| 3.0    | 4.75    | 0.80       | 5.55      |
| 4.0    | 4.82    | 0.80       | 5.52      |
| 5.0    | 4.88    | 0.79       | 5.51      |

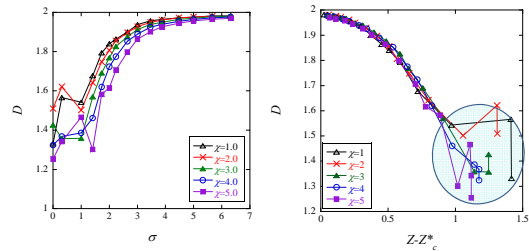


図5 付着力毎の亀裂のフラクタル次元  $D$  の  $\sigma$  依存性(左図)と  $Z - Z_c^*$  依存性。

表1において、 $\phi_c^*$  は  $\chi$  に寄らずほぼ一定である。従って、 $\phi_c^*$  は付着粉体が塊として存在する最低密度と考えられる。これに対して  $Z_c^*$  は、 $\chi$  に依存し、 $Z_c$  よりも大きい値になっている。これは、付着粉体は粒子同士が重なるのを許すためである。 $\chi \rightarrow 0$  の極限においては  $Z_c^*$  は  $Z_c$  に近づくと考えられる。

$Z_c^*$  の物理的意味を調べるために、図5に固形粉体を破壊したときの亀裂のフラクタル次元  $D$  を、 $\sigma$  と  $Z - Z_c^*$  でプロットした結果を示す。 $Z - Z_c^*$  をスケーリングパラメータにとると、 $D$  は一本の曲線(マスターカーブ)に乗ることが分かる。 $Z_c^* \sim 1$  を境にして、破壊パターンが亀裂部(図5右の丸で囲まれた部分)と粉砕部(マスターカーブ)に明確に分かれる。このことから、 $Z_c^*$  は固形粉体の破壊状態を決めるパラメータであることが分かる。

一方、 $\beta^*$  は  $\beta$  と大きく異なる。 $\beta$  はユニバーサルな指数と考えられていることから、この値が異なるということは破壊パターン変化とジャミング転移は本質的には別の物理現象を表していることを示唆している。

実際、(1)式と(3)式では、 $\phi$  を変化させる方法が全く異なっている。前者は、 $\phi_c$  (斥力粉体が自由に動けなくなるジャミング密度) から始めて、内部圧力  $P$  を上げて  $\phi$  を上げる。後者は、粒径が均一の最密充填構造から始めて、粒度分布を大きくして  $\phi$  を下げる。

上記を模式的に表したのが、図6である。図6の左図は、ジャミング転移直上の粉体に対して外部圧力  $P$  を上げていく状況、右図は粒径が均一な結晶構造から始めて粒度分布を増やしていく状況を表している。両者は、 $\phi - Z$  平面に射影すると類似したスケーリング則となる(図6左右における点線)が、全く異なる物理的变化であることから指数の値が違うことは十分にあり得る。

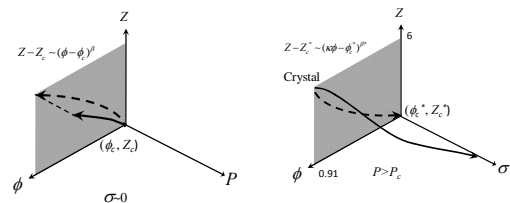


図6 粉体のつまり方に関するスケーリング則を表す模式図。

(3) 応用

① 粒度分布のある自由気体の状態方程式

これまでの研究で、 $T$  と  $\sigma$  に類似した効果があることが示唆された。しかし、粉体は質量が大きく温度の影響を受けないため、この類似性を直接みることはできない。

そこで、仮想的な系として、ランダムな粒径を持つ気体粒子を考える。古典的な気体の分子運動論において、粒子の大きさが状態方程式に現れる影響は Von der Waals (VW) 式で良く現されるとされてきた。

$$P = nRT / (V - nb) \quad (4)$$

ここで、 $P, V, n, R$  はそれぞれ系の圧力、体積、粒子数、気体常数である。 $b$  は粒子の半径だが、VW 式では全て同じ値と仮定している。

通常、VW 式には粒子間引力を考慮した第 2 項が存在するが、ここでは議論を簡単にするため、粒子は接触による反発以外の相互作用は働かず形も変わらない(完全剛体)として、状態方程式は(4)式のみで考える。

今、 $T$  が一定で粒径分布幅  $\sigma$  を変えたときに、VW 式のレベルで何らかの影響が現れるかを考える。粒径分布幅以外の影響を完全に除くために、完全剛体球を考える。ランダムな粒径を持つ完全剛体を扱うため、EDMD 法のプログラムを新たに自作した。

研究の結果、 $V$  と  $T$  を一定にして  $\sigma$  を大きくすると  $P$  が高くなることが分かった(図 7)。VW 式からの  $P$  のずれは  $T$  の代わりに  $\sigma$  に比例する項を加えた温度  $T_{eff}$  を導入することによって上手く補正することができる(図 8)。

$$P = nRT_{eff} / (V - nb) \quad (5)$$

$$T_{eff} = T + \Delta T(\delta) \quad (6)$$

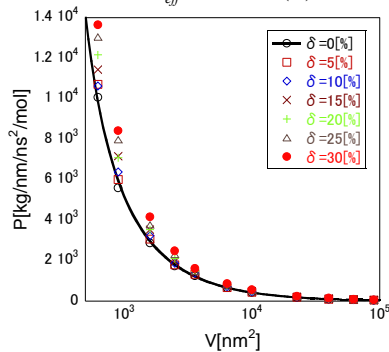


図 7 圧力  $P$  の  $\sigma$  依存性。

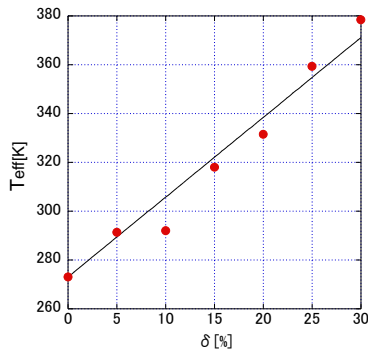
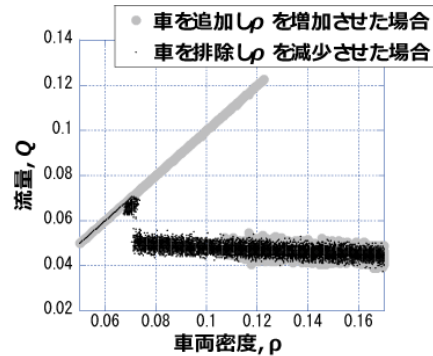


図 8 補正された温度と  $\sigma$  の関係。

以上のことから、気体粒子の運動性が粒径の平均値のみならず標準偏差にも影響されることが分かる。このことは、気体の分子運動論からみても自明ではない。 $\sigma$  を大きくしたときの VW 式からのずれは、 $T$  の項に  $\sigma$  に比例する項を加えることによって上手く補正できる。つまり、VW 式で議論する限り、 $T$  を高くすること  $\sigma$  を高くすることは同等であり、これは先の予想と一致する。

② 交通流

詰まった粉体を交通渋滞に見立てたモデル (Stochastic Optimal Velocity : SOV モデル) を使って、自由走行相から渋滞相への転移現象を調べた。従来の研究により、車の密度と流量の関係を示す基本図が“自由走行相”“渋滞相”“準安定相”の 3 つの領域に分けられることが示されているが、本研究では、準安定相において、まず準安定走行の時間経過による状態変化を調べ、ほとんど自由走行に近い状態からも渋滞への移行が起こること確認した。一方、準安定相における安定解を調べたところ、初期条件により自由走行解と渋滞解のいずれもが実現可能であることが示され、準安定相では、準安定状態、自由走行状態、渋滞状態の 3 状態が共存する“共存相”であることが明らかになった。また、自然渋滞現象がヒステリシスを持つ 1 次相転移の性質を持つことも示すことに成功した。



③ 両親媒性分子溶液

両親媒性分子溶液では、ミセルの高次構造形成により自己組織化現象が起こることが知られている。本研究では、双頭型両親媒性分子溶液の自己組織化現象を、散逸粒子力学シミュレーション法によって数値的に調べた。分子の屈曲に対する復元力が非常に弱い場合は、通常の両親媒性分子の場合と同様、ヘキサゴナル等のミセルの高次構造が現れるが、復元力のある程度強くすると、ヘキサゴナル構造が消え、ネットワーク構造やラメラ構造が現れるようになる。以上のように、双頭型両親媒性分子溶液では溶液中での分子の形状が自己組織化構造に影響を与えていることが示された。

## 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 7 件)

(1) T. Matsui, K. Tsurusaki, R. Shirasaki, Introduction of adhesive force to DEM simulation and application to fracture of fragile powder materials, Plasma and Fusion Res., 査読有, 5 巻, 2010, S2116-S2121 DOI : 10.1585/pfr.5.S2116.

(2) 津留崎恭一, 松井俊樹, 白崎良演, 粒度分布のある付着性粉体の詰まり方に関するスケーリング則, 神奈川県産業技術センター研究報告, 査読無, 16 巻, 2010, 26-30.

J-GLOBAL ID : 201102206866527064

(3) 平山尚美, 津留崎恭一, 出口哲生, 環状ポリスチレン溶液の第 2 ビリアル係数の理論的予想と実験との直接比較, 高分子論文集, 査読有, 68 巻, 2011, 804-810.

DOI : 10.1295/koron.68.804

(4) 津留崎恭一, 武田理香, ゴム材料の粘弾性特性のキャラクタリゼーション, 制振工学会, 査読無, 6 巻, 2011, 2-11.

<http://www.sdt-jp.com/publishing/publishing.htm>

(5) R. Shirasaki, Y. Yoshikai, H. Qian, S. Fujiwara, Y. Tamura, H. Nakamura, Dissipative Particle Dynamics Simulation of Phase Behavior in Bolaamphiphilic Solution, Plasma and Fusion Research: Regular Articles, 査読有, 6 巻, 2011, 2401116-2401119.

DOI : 10.1585/pfr.6.2401116

(7) T. Deguchi, K. Tsurusaki, Topological effects on the statistical and dynamical properties of ring polymers in solution, Topological Polymer Chemistry, Progress of Cyclic Polymers in Syntheses, Properties and Functions: edited by Yasuyuki Tezuka, World Scientific, 査読有, 2013, 221-264. ISBN:978-981-4401-27-2

[学会発表] (計 11 件)

(1) K. Tsurusaki, Scaling of fracture morphology of powder material, International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010, 平成 22 年 8 月 17 日, Nara Prefectural New Public Hall (Nara, Japan).

(2) 津留崎恭一, 松井俊樹, 白崎良演, 固形粉体の破壊パターンに関するスケーリング則, 日本物理学会秋季大会平成 22 年 9 月 24 日 大阪府立大学.

(3) 津留崎恭一, 松井俊樹, 白崎良演, 固形粉体の破壊パターン変化とガラス転移との類似性について, 東京大学物性研究所短期研

究会「ガラス物理の諸問題\_実験と理論の接点」, 平成 22 年 12 月 1 日, 東京大学物性研究所

(4) 山下彰, 白崎良演, SOV モデルに表れる自由走行状態と渋滞状態の転移について, 日本物理学会春季大会, 平成 23 年 3 月 28 日, 新潟大学 (中止), WEB 公開.

(5) 津留崎恭一, 松井俊樹, 白崎良演, ガウス分布に従う粒度分布をもつ粉体系のスケーリング則, 日本物理学会春季大会, 平成 23 年 3 月 24 日, 新潟大学 (中止), WEB 公開.

(6) R. Shirasaki, H. Qian, S. Fujiwara, H. Nakamura, Investigation of phase behavior of bolaamphiphilic solution using dissipative particle dynamics simulation, 30th JSST Annual Conference (JSST 2011) International Conference on Modeling and Simulation Technology, 2011 年 10 月 23 日, 東海大学高輪キャンパス.

(7) 白崎良演, フウジュン・ジャン, 藤原進, 中村浩章, 双頭型両親媒性分子溶液の相構造の散逸粒子動力学シミュレーション, 第 25 回分子シミュレーション討論会, 2011 年 12 月 5 日, 東京工業大学.

(8) 白崎良演, 中村浩明, 散逸粒子動力学法による両親媒性分子溶液のシミュレーション, シンポジウム「自然科学における階層と全体」国立天文台, 分子科学研究所, 核融合科学研究所共催 2012 年 2 月 10 日, 安保ホール.

(9) 津留崎恭一, 藤本阿佑美, 白崎良演, 粒度分布をもつ 2 次元剛体粒子系における気体状態方程式, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 19 日, 横浜国立大学常盤台キャンパス.

(10) 白崎良演, 山下彰, 自動車渋滞現象の SOV モデルによる数値解析, 2012 年度プラズマ-壁相互作用シミュレーション解析に関する研究会, 2013 年 3 月 15 日, 核融合科学研究所.

(11) R. Shirasaki, H. Qian, S. Fujiwara, H. Nakamura, Dissipative particle dynamics simulation of phase behavior and molecule bending in bolaamphiphilic solution, International Association of Colloid and Interface Scientists, 2012 年 5 月 16 日, 仙台国際センター.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

津留崎 恭一 (KYOICHI TSURUSAKI)  
神奈川県産業技術センター・化学技術部・主任研究員  
研究者番号 : 90426388

### (2) 研究分担者

白崎 良演 (SHIRASAKI RYOEN)  
横浜国立大学・工学研究院・准教授  
研究者番号 : 90251751