

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686109

研究課題名(和文) 移流自己組織化を用いたコロイドナノ粒子パターン構造制御手法の確立とその応用展開

研究課題名(英文) Controlled Fabrication and Application of Patterned Structures of Colloidal Nanoparticles through Convective Self-Assembly

研究代表者

渡邊 哲 (Watanabe, Satoshi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80402957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円、(間接経費) 3,930,000円

研究成果の概要(和文)：コロイドナノ粒子のパターン状規則配列構造は、透明導電材料、フォトニクス材料、触媒、バイオセンサーなど幅広い分野で多岐に渡る応用が盛んに研究されており、構造制御手法の確立が求められている。本研究では、粒子の自己組織化現象に立脚したストライプ構造および格子構造の周期性制御手法の確立に向けた検討を行った。その結果、液面操作式移流集積法という独自の手法開発に成功し、構造形成過程の直接観察と計算機シミュレーションによる検討を通して、形成メカニズムを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Patterned structures of colloidal nanoparticles are promising for various applications such as photonics, catalysis, biosensor, and transparent conductive materials, and a robust and scalable fabrication technique is missing and waits to be established. In the present study, we investigated the self-assembly process of particles into patterned structures via experiments and computer simulations. Our investigation demonstrated successful establishment of a pattern formation technique that can control the periodicity of striped and grid structures. Furthermore, direct observation and numerical simulations clarified the formation mechanism of stripe patterned structures of colloidal particles.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：プロセス工学・化工物性・移動操作・単位操作

キーワード：移流集積法 自己組織化 ネットワーク構造 透明導電膜 格子ボルツマン法 メニスカス 濡れ性

1. 研究開始当初の背景

コロイドナノ粒子のパターン状規則配列構造は、透明導電材料、フォトニクス材料、触媒、バイオセンサーなど幅広い分野で多岐に渡る応用が盛んに研究されており、その重要性はますます高まっている。しかし、こういった応用への高い期待に反して、パターン粒子膜の形成手法となると、心許ないのが現状である。汎用性があり、かつコストを抑えたパターン形成を目指すべく、自己組織化を活用した手法が数多く提案されてきたが、それらはそれぞれ一長一短あり、決定的な形成手法というのは確立されていない。「規則性の高い粒子膜を短時間で大面積にしかも安価に形成でき、さらにパターン形態や周期性を制御できること」—これこそが、今まさに確立が切望されている形成法である。

このような状況を受けて、研究代表者は、単一のプロセスによる微粒子集積構造の制御を目指し、移流集積法に着目し検討を進めてきた。移流集積法とは自己組織化を利用した粒子集積法で、粒子懸濁液に親水性基板を浸漬し、溶媒の蒸発によって誘起された溶媒の流れに乗せて粒子をメニスカス先端部近傍に集積し、横毛管力によって最密に配列する。金、銀、シリカ、ポリスチレンラテックスなど多様な粒子種に対して包括的にパターン構造を制御できる本法は、構造形成手法確立に向け、極めて有力な候補である。特に、金属ナノ粒子で構成される格子構造は、粒子細線が導電性を、細線間の空隙が透明性をもたらすため、透明導電材料としての応用が大いに期待できる。導電性と透明性を制御するためには、格子を構成する粒子細線の幅・厚みと線間隔を「自在」に制御することが要求されるが、これを実現するためには、本手法のさらなる改良・発展が不可欠である。

2. 研究の目的

この問題を解決するための、研究代表者のアイデアは、プログラム式の液面操作に基づくストライプ構造周期性の制御である。本研究では、ストライプ構造および格子構造の周期性制御手法の確立に向けて、まず、プログラム式の液吸引による構造制御が可能な範囲、すなわち吸引の時間間隔、吸引量、吸引速度と粒子細線の幅、厚み、細線間隔との関係を求める。そして、粒子膜形成過程の直接観察と計算機シミュレーションによる解析を通して構造形成メカニズムを明らかにする。その上で、その関係を定式化し、得られる構造を定量的に予測可能なモデル式を構築する。さらに、得られた格子構造の応用として、透明導電材に着目し、金属粒子で作製した格子構造の導電率、透過率を測定し、構造周期性との関係を明らかにする。すなわち、自己組織化的粒子集積法に立脚したマクロな操作因子による材料機能の制御が、本研究の最終目標である。

3. 研究の方法

3.1 液面操作式移流集積法

液面操作式移流集積法の概略図を図1に示す。表面を親水化処理したガラス基板をサスペンション(粒子濃度 ϕ [vol/vol])に浸して固定したものを、温度一定に保ったインキュベータ内で静置した。メニスカス先端部の蒸発に誘起された溶媒の対流によって粒子が運ばれるため、吸引操作を行うまでの時間に粒子膜が生成する。そして吸引操作で液面を瞬間的に降下させることで、粒子が付着しない非堆積部が形成され、ストライプ構造が生成する。ストライプ形成後、基板を90°回転させてもう一度ストライプを作製することにより、格子構造を作製した。粒子膜形成時間 t_p と液面降下距離 l_p を種々変化させ、作製した試料は、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM)、原子間力顕微鏡(AFM)で観察した。配列させる粒子には、シリカ粒子(120 nm)、金粒子(20 nm)、銀粒子(12 nm)を、分散媒には水を用いた。インキュベータ内の温度 T は50~80 °Cに設定した。

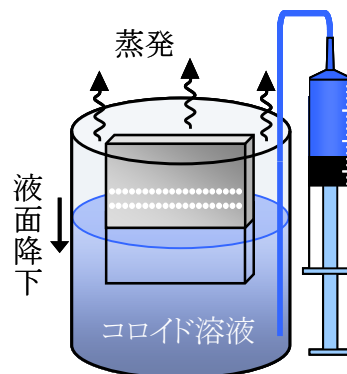


図1 液面操作式移流集積法

3.2 集積過程の直接観察

表面を親水化処理したシリコンウェハ基板を、60 °Cに加熱したコロイド溶液(粒子濃度 ϕ [vol/vol])に垂直に浸し、蒸発によって粒子が周期構造を形成していく様子を光学顕微鏡および高速度カメラを用いて撮影した。粒子は粒径270 nmのシリカ粒子を、溶媒には水を用いた。メニスカス形状の経時変化を追うため、本研究では光干渉法を利用し、光源には波長 $\lambda = 475 \pm 15$ nmの青色光を用いた。

3.3 格子ボルツマン法を用いたメニスカス形状解析

流体シミュレーション手法として格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, LBM)を採用した。LBMは流体をメソスケールの仮想的な粒子の集合体とみなし、粒子が繰り返す衝突と並進運動を通して巨視的な流動現象を表現する手法である。本研究では稲室らが開発した2次元9速度(2D9V)の気液二相系モデルを採用した。場を正方形の格子に分割し、各格子点に有限の速度 c_i を持った仮想粒子が存在すると考える。各格子点上で9種

類の速度を持った仮想粒子が存在しており、次の時間ステップにはそれぞれの速度方向の隣接する格子点へ移動する。本手法では界面の識別関数である *index function* の計算に速度分布関数 f_i を、流体の流速や圧力の計算に速度分布関数 g_i を用いた。この速度分布関数の和から密度 ρ 、流速 \mathbf{u} 、圧力 p などのマクロ量を計算した。

速度分布関数は移動先の格子点において粒子同士の衝突によりボルツマン分布に基づいて再分配される。分布関数の再分配はBGKモデルを用いて計算した。BGKモデルにより速度分布関数の時間発展式は次のようになる。

$$\begin{aligned} f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta x, t + \Delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) &= -\{f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)\} / \tau_f \\ g_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta x, t + \Delta t) - g_i(\mathbf{x}, t) &= -\{g_i(\mathbf{x}, t) - g_i^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)\} / \tau_g \end{aligned}$$

式中の i は粒子速度方向、 f_i^{eq} 、 g_i^{eq} はそれぞれ f_i と g_i の局所平衡分布関数、 \mathbf{x} は座標、 t は時刻、 Δx は格子間隔、 Δt は時間刻み、 τ_f 、 τ_g はそれぞれ f_i と g_i の緩和時間を表す。この時間発展方程式により速度分布関数が更新され、系全体の自由エネルギーが最小になるよう界面が自律変形する。

シミュレーションセルは、四方に固体壁面を設定し、固体と流体との親和性を考慮するため、固体表面の濡れ性を設定可能な境界条件を導入した。さらに、セル左上部に粒子膜を模した長方形の固体部を設定することで、粒子膜に保持されたメニスカスを表現した。初期配置から系を時間発展させ、メニスカス形状が十分に安定した点を平衡状態と見なした。

4. 研究成果

4.1 液レベル操作式移流集積法による構造制御

作製したストライプ構造の一例として、 $t_p = 7$ s、 $l_p = 107$ μm の操作条件下で得られた構造を図2に示す。白い細線が粒子堆積部で幅13 μm 、暗色帯は粒子が存在しない幅113 μm の非堆積部で、数 cm^2 の基板全域に渡って均一な構造が得られた。堆積部は粒子2層から成り、 t_p 、 l_p の異なる条件下でもその厚みに変化はなかった。液面降下距離 l_p と非堆積部幅の関係を検討したところ、非堆積部幅は液面降下距離 l_p とほぼ等しくなっており、本手法のコンセプト通り非堆積部幅は l_p により制御できることが分かった。図3には形成時間 t_p と

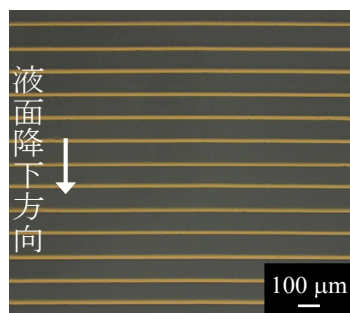


図2 金ナノ粒子ストライプ構造

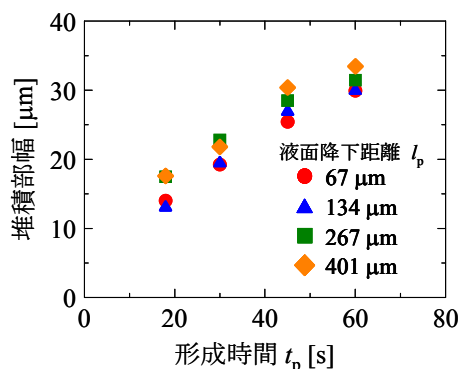


図3 形成時間と堆積部幅

堆積部幅の関係を示した。 t_p の増加に対してほぼ線形に堆積部幅が大きくなっていることがわかる。これは t_p が増加することでメニスカス先端部への粒子移流量が増加するためである。ここで、堆積部幅について、 t_p の依存性を定量的に考える。堆積部幅はメニスカス先端部への粒子の移流量から決まり、移流量は先端部の蒸発量から求められる。そこで、基板および空気からの伝熱と蒸発潜熱の関係に基づくモデルから、メニスカス先端部での湿球温度を求めることで先端部の蒸発量を計算して堆積部幅を求めたところ、実験値をおおよそ表現できることを確認した。すなわち、本手法を用いて、 l_p と t_p というマクロな操作因子から、堆積部幅と非堆積部幅というミクロな構造制御が可能である。

作製した構造の導電性を評価するため、280 $^{\circ}\text{C}$ で20分間焼成した後、ストライプ1本の抵抗を測定し、ストライプの体積抵抗率を求めた。その結果、ストライプの抵抗率はバルクのそれよりも1オーダー大きくなることが確認された。この抵抗率と、堆積部幅と非堆積部幅の割合から計算した透過率を基に、作製できる格子構造の透過率と表面抵抗の関係を調べた上で、一例として透過率70%、シート抵抗12 Ω/\square の性能を有する格子構造の作製を試みた。その結果、測定値は平均の透過率76%、シート抵抗41 Ω/\square となり、設計値と比べて抵抗がやや大きいものの、おおよそ近い性能を示す格子構造を作製できた。

作製した格子構造の抵抗値を小さくするには、堆積部の厚みを増加させることが必要になる。上記の検討では基板の濡れ性が極めて高いため、堆積部の厚みは粒子2層にとどまったが、基板の接触角を大きくすることで、堆積部の厚みが増加すると考えられる。接触角は、基板を親水処理した後の空気露出時間を変化させることで制御した。その結果、接触角が大きくなるほど堆積部の厚みは増加し、接触角が26 $^{\circ}$ で6層となることを確認した。すなわち、接触角で厚みの制御が可能であることを示した。

4.2 直接観察による集積過程でのストライプ構造形成メカニズムの解明

270 nm シリカサスペンション ($\phi = 1.0 \times 10^{-5}$) を用いて、ストライプ形成過程の直接観

察を行った。光源には青色光($\lambda = 475 \pm 15 \text{ nm}$)を用いた。各時間におけるスナップショットの干渉縞よりメニスカスの形状を求めた結果を図3に示す。粒子濃度が十分高く、均一膜を形成するときは、メニスカスの形状はほぼ変化しないまま下降していくのに対し、濃度が低い条件では、図のようにメニスカスは徐々に下に伸ばされていった($t = 0 \rightarrow 59 \text{ s}$)。これは、粒子濃度の減少により粒子膜の成長速度が遅くなったことで、蒸発の進行に伴って液面と粒子膜先端との距離が広がっていくためである。やがて、メニスカスがある限界まで伸びきった時($t = 59 \text{ s}$)に切断が起こった。接触線がその時の液面高さによって決まる安定な位置まで移動した後、次の粒子膜の形成が始まった($t = 61 \text{ s}$)。

同様の形状変化は、他の粒子膜層数条件下においても確認できた。しかし、層数が大きいほどメニスカスはより下方まで引き伸ばされ、その結果、ライン間隔は広がっていった。これらの結果はこれまでに得ている実験結果の傾向に一致していることより、ライン間隔を決定するのは、メニスカスが切断されるタイミングであり、さらにそのきっかけは粒子膜の厚さに強く依存していることが分かった。

メニスカス切断のきっかけを明らかにするため、フレームレートを 500 fps に上げ、切断される瞬間におけるメニスカス先端の様子を観察した。得られた動画のスナップショットを図4に示す。粒子膜の下に続く縞模様が光の干渉縞であり、これによってメニスカスの形状がわかる。干渉縞パターンより、粒子膜のすぐ下で液膜が最も薄くなっていることがわかる($t = 0, 4 \text{ ms}$)。6 ms 後、最薄部に穴が生じ、これがきっかけとなってメニスカスが横に破れていく (meniscus rupture)。

このようなメニスカスの切断挙動は、一般的に移流集積過程におけるストライプ構造の形成メカニズムと考えられている stick-slip 現象(メニスカスの先端が粒子膜から外れる)とは明らかに異なるものであり、ストライプ構造のライン間隔の粒子膜厚さ依存性を説明可能である。すなわち、粒子膜が厚いほど、液膜が限界の薄さに達するまでにメニスカスはより長く伸びられるためにライン間隔が大きくなる。また、本現象は stick-slip 現象

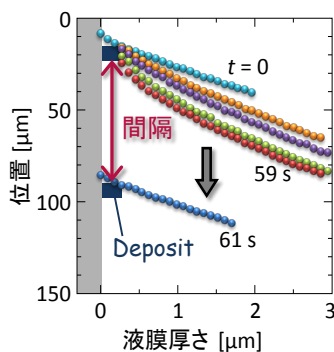


図3 メニスカスの形状変化

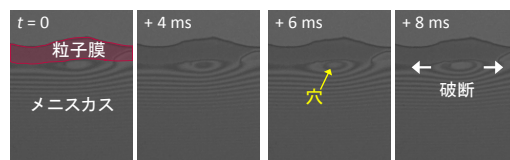


図4 メニスカス切断の瞬間(meniscus rupture)

に比べて安定したプロセスであり、そのため非常に規則的な周期性を有したストライプ構造の形成が可能であると考えられる。

4. 3 格子ボルツマン法によるメニスカス形状解析

メニスカス先端への移流がない準静的過程における液面高さの変化に伴うメニスカス形状変化を追跡した結果を図5に示す。本手法によって、粒子膜に保持されたメニスカスを良好に表現できていることが分かる。液面が下がる(メニスカス高さが大きくなる)と、メニスカスは基板方向へ凹んでいき、やがて破断した。いずれの結果におけるメニスカス形状も Young-Laplace (Y-L)式と概ね一致したことから、準静的な過程ではメニスカス形状は常に Y-L 式に従いながら変化し、破断に至ることを確認した。

しかし、実際の移流集積過程では、準静的過程ではなく、堆積部での蒸発に誘起される対流がメニスカスの動的挙動を誘発していることが考えられる。このことを検証するために、堆積部底辺において y 軸正方向の一樣流速条件を導入し、対流がメニスカス形状に与える寄与を検討した。図6には同条件で得られたメニスカス形状と Y-L 式ならびに対流なし条件での形状を比較したグラフを示す。対流あり条件では、メニスカス形状が Y-L 式から外れ、基板方向へ強く凹んでいることがわかる。先端へ向かう対流によりメニスカスが基板方向へ引き寄せられるため、メニスカス形状は Y-L 式から外れて凹むと考えられる。

図7には各メニスカス高さ条件における、流速に対する最小液膜厚みの変化を示す。縦軸の値が大きければ液膜は十分に厚く破断しておらず、そ

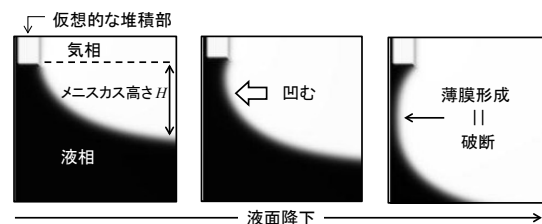


図5 メニスカス形状変化のスナップショット

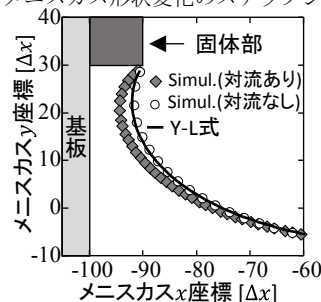


図6 メニスカス形状の比較

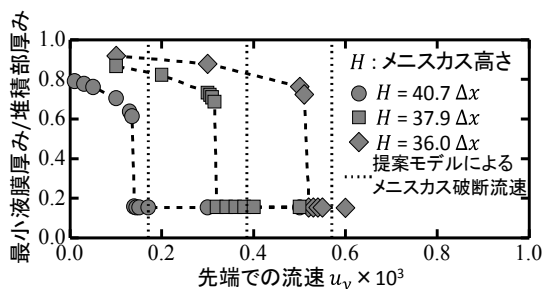


図7 流速に対する液膜厚みの変化とモデルによる破断流速

の一方、縦軸の値が小さければ基板上で薄膜が形成しており、メニスカスは破断している。メニスカス厚みはある流速でステップ状に減少しており、その臨界流速はメニスカス高さが大きいほど小さいことが分かる。これはメニスカスが引き伸ばされると液流路が狭まり、局部的に流速が大きくなるため、メニスカスを基板方向へ凹ませようとする力が大きくなる結果、破断に至りやすくなるためだと考えられる。これらの結果から、メニスカス形状が示す動的な挙動が先端へ向かう対流に起因することが明らかとなった。

それではメニスカスはなぜ、動的過程においてステップ状の液膜厚みの変化を経て破断に至るのであろうか。それは、液面降下に伴い粘性応力による寄与が大きくなると、曲率の絶対値が大きくなり、堆積部下端から液面へと続く界面を保持できなくなるためと考えられる。これを検証するため、以下では、メニスカス破断形状と流速の予測モデルの構築を行った。

いま、メニスカスの動的形状は、粘性応力項を加えた Y-L 式で表される。粘性項の算出が必要になるが、現実系においては、流体の速度勾配に起因する粘性応力を詳細に推算することは困難である。そこで本研究では、ある液膜厚みにおける y 軸正方向流速 v_y の x 軸方向分布が線形であるとしてメニスカス先端における流量との収支を取り、さらに $\mu_l(\partial v_y/\partial x)$ を界面に働く粘性応力の代表値として用いた (μ_l は液相の粘性係数)。また気体の粘性応力は無視小とした。このモデル式から構成したメニスカス形状が、シミュレーション結果と概ね一致したことから、モデル式の妥当性を確認した。さらに、構築したモデル式を用いて、種々の流速に対するメニスカスを描画したところ、ある流速で液面と滑らかにつながる幾何学的形状がとれなくなった。その流速を各液面高さに対して求めた結果を図7に示す。メニスカス高さが大きいほど幾何学的形状に基づいた臨界流速は小さく、シミュレーション結果と概ね同様な傾向を示していることが分かる。これより、メニスカスの破断は、堆積部下端から液面へと続く界面を保持できなくなるにより生じることが示された。

以上の結果に基づき、移流集積過程におけるメニスカス形状変化のメカニズムを提案する。液面降下の初期の段階では、液流路が十分に広く対流による寄与が小さいため、メニスカスは静的条件下での Y-L 式に概ね従った形状を取る。液面降下が進行すると、液流路が狭まり対流による寄与が大きくなるため、メニスカスは急激に基板方向へ凹んでいき、やがて、堆積部下端から液面へと界

面を保持できなくなり破断に至る。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① 渡邊 哲, 移流集積法を利用した多様な自己組織化粒子膜の発現とその構造制御, 粉体工学会誌, 査読無, Vol.48, 2011, pp.312-318
- ② Yasushi Mino, Satoshi Watanabe, Minoru T. Miyahara, Colloidal Stripe Pattern with Controlled Periodicity by Convective Self-Assembly with Liquid-Level Manipulation, ACS Appl. Mater. Interfaces, 査読有, Vol.4, 2012, pp.3184-3190
- ③ Satoshi Watanabe, Yasushi Mino, Yusuke Ichikawa, Minoru T. Miyahara, Spontaneous Formation of Cluster Array of Gold Particles by Convective Self-Assembly, Langmuir, 査読有, Vol.28, 2012, pp.12982-12988
- ④ 花房竜也, 三野泰志, 渡邊 哲, 宮原 稔, 液レベル制御式移流集積法を用いた金ナノ粒子自己集積膜の構造制御, 粉体工学会誌, 査読有, Vol.49, 2012, pp.356-361
- ⑤ Satoshi Watanabe, Minoru T. Miyahara, Particulate Pattern Formation and Its Morphology Control by Convective Self-Assembly, Adv. Powder Technol., 査読有, Vol.24, 2013, pp.897-907
- ⑥ Yufei Wang, Yasushi Mino, Satoshi Watanabe, Dan Li, Xuehua Zhang, Formation of Regular Stripes of Chemically Converted Graphene on Hydrophilic Substrates, ACS Appl. Mater. Interfaces, 査読有, Vol.5, 2013, pp.6176-6181
- ⑦ 三野泰志, 渡邊 哲, 宮原 稔, 移流集積過程における in-situ メニスカス形状観察を利用したストライプ状粒子膜形成機構の解明, 粉体工学会誌, 査読有, Vol.50, 2013, pp.332-341
- ⑧ Tatsuya Hanafusa, Yasushi Mino, Satoshi Watanabe, Minoru T. Miyahara, Controlling Self-Assembled Structure of Au Nanoparticles by Convective Self-Assembly with Liquid-Level Manipulation, Adv. Powder Technol., 査読有, Vol.25, 2014, pp.811-815
- ⑨ 渡邊 哲, 稲田洪太郎, 宮原 稔, 移流集積過程におけるメニスカス形状変化のシミュレーション解析, 粉体工学会誌, 査読有, Vol.51, 2014, pp.355-362

[学会発表] (計 23 件)

- ① 三野泰志, 渡邊 哲, 宮原 稔, プログラム式移流集積法を用いた粒子配列膜のパターン構造制御, 2011年度粉体工学会春期研究発表会, 2011.05.25, 総評会館(東京)
- ② Yasushi Mino, Satoshi Watanabe, Minoru T. Miyahara, Fabrication of Colloidal Grid Network by Two-Step Convective Self-Assembly, 6th China-Japan Symposium on Chemical Engineering, 2011.06.22, 武漢(中国)
- ③ Satoshi Watanabe, Yasushi Mino, Minoru T. Miyahara, Fabrication of Colloidal

- Grid-Pattern Network by Two-Step Convective Self-Assembly, UK Colloids 2011: An International Colloid and Surface Science Symposium, 2011.07.05, ロンドン (イギリス)
- ④ 渡邊 哲, 移流自己組織化を利用したコロイドナノ粒子パターン構造制御とその応用展開, 材料化学システム工学討論会 2011 (招待講演), 2011.08.19, 東京大学 (東京)
- ⑤ 三野泰志, 渡邊 哲, 宮原 稔, 2 ステップ移流集積法による格子ネットワーク状コロイド粒子配列, 第 63 回コロイドおよび界面化学討論会, 2011.09.08, 京都大学
- ⑥ Satoshi Watanabe, Yasushi Mino, Minoru T. Miyahara, Morphology Control of Self-Assembled Colloidal Pattern, 12th Australia-Japan Colloid and Interface Science Symposium, 2011.11.22, ケアンズ (オーストラリア)
- ⑦ Satoshi Watanabe, Tatsuya Hanafusa, Yasushi Mino, Minoru T. Miyahara, Controlling Self-Assembled Network of Au Nanoparticles for Transparent Conductive Films, International Association of Colloid and Interface Scientists (IASIS 2012), 2012.05.18, 仙台国際センター (宮城)
- ⑧ Yasushi Mino, Satoshi Watanabe, Minoru T. Miyahara, Direct Observation of Colloidal Stripe Formation in Convective Self-Assembly Process, International Association of Colloid and Interface Scientists (IASIS 2012), 2012.05.18, 仙台国際センター (宮城)
- ⑨ 三野泰志, 渡邊 哲, 宮原 稔, 移流集積法によるコロイド粒子パターン状配列過程の直接観察, 2012 年度粉体工学会春期研究発表会, 2012.05.22, 京都
- ⑩ Satoshi Watanabe, Yasushi Mino, Yusuke Ichikawa, Minoru T. Miyahara, Spontaneous Dot Array Formation of Gold Nanoparticles by Using Convective Self-Assembly, ACS Colloid and Surface Symposium, 2012.06.10, ボルチモア (アメリカ)
- ⑪ Yasushi Mino, Satoshi Watanabe, Minoru T. Miyahara, Direct Observation of Colloidal Pattern Formation in Convective Self-Assembly, ACS Colloid and Surface Symposium, 2012.06.10, ボルチモア (アメリカ)
- ⑫ 三野泰志, 渡邊 哲, 宮原 稔, 移流集積過程におけるコロイド粒子周期構造形成メカニズム, 化学工学会第 44 回秋季大会, 2012.09.19, 東北大学 (宮城)
- ⑬ Satoshi Watanabe, Tatsuya Hanafusa, Yasushi Mino, Minoru T. Miyahara, Fabrication of Au Network Structure by Convective Self-Assembly for Transparent Conductive Films, 2012 AIChE Annual Meeting, 2012.11.01, ピッツバーグ (アメリカ)
- ⑭ Satoshi Watanabe, Yasushi Mino, Minoru T. Miyahara, Fabrication of Colloidal Grid Network by Two-Step Convective Self-Assembly, 10th Japan-Korea Symposium on Materials & Interface, 2012.11.08, コープイン京都 (京都)
- ⑮ 渡邊 哲, 渡部純士, 三野泰志, 宮原 稔, 液レベル制御式移流集積法を用いた金属ナノ粒子導電ネットワーク構造の高速形成, 化学工学会第 78 年会, 2013.03.17, 大阪大学 (大阪)
- ⑯ Satoshi Watanabe, Junya Suzuki, Yuichiro Arai, Minoru T. Miyahara, Controlling the Morphology of Self-Assembled Colloidal Pattern by Ion Addition, 87th ACS Colloid and Surface Science Symposium, 2013.06.24, リバーサイド (アメリカ)
- ⑰ 渡邊 哲, 渡部純士, 三野泰志, 宮原 稔, 液レベル制御式移流集積法を用いた金属ナノ粒子導電ネットワーク構造の周期性制御, 粉体工学会第 49 回夏期シンポジウム, 2013.07.18, ホテルマウント富士 (山梨)
- ⑱ 渡邊 哲, 渡部純士, 三野泰志, 宮原 稔, 液レベル操作式移流集積法を用いた貴金属ナノ粒子ネットワーク構造の形成と周期性制御, 第 64 回コロイドおよび界面化学討論会, 2013.09.18, 名古屋工業大学
- ⑲ 渡邊 哲, 貴金属ナノ粒子導電ネットワーク構造の形成と周期性制御, 未来のコロイドおよび界面化学を創る若手討論会 (依頼講演), 2013.09.20, ウィルあいち
- ⑳ 稲田洪太郎, 渡邊 哲, 宮原 稔, 移流集積過程におけるメニスカス形状変化の動力学シミュレーション, 2013 年度粉体工学会秋期研究発表会, 2013.10.08, 大阪南港 ATC (大阪)
- 21 Satoshi Watanabe, Yasushi Mino, Minoru T. Miyahara, In-Situ Observation of Meniscus Tip Behavior during Stripe Pattern Formation in Vertical-Deposition Convective Self-Assembly, 2013 AIChE Annual Meeting, 2013.11.05, サンフランシスコ (アメリカ)
- 22 Kotaro Inada, Satoshi Watanabe, Minoru T. Miyahara, Lattice Boltzmann Simulation of the Meniscus Shape Evolution in Vertical-Deposition Convective Self-Assembly, 2013 AIChE Annual Meeting, 2013.11.04, サンフランシスコ (アメリカ)
- 23 松井 築, 渡邊 哲, 宮原 稔, 液レベル操作式移流集積法を用いた金ナノ粒子格子構造の形成と透明導電性評価, 第 16 回化学工学会学生発表会, 2014.03.01, 大阪府立大学 (大阪)

〔図書〕 (計 1 件)

監修 山口由紀夫, テクノシステム, 分散・塗布・乾燥の基礎と応用, 2013, 600 (356-360), 渡邊 哲 分担執筆)

〔その他〕 ホームページ等

京都大学化学工学専攻界面制御工学研究室
<http://www.cheme.kyoto-u.ac.jp/2koza/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 哲 (WATANABE, Satoshi)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号: 80402957