

下村 政嗣

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構・教授

階層的に構造化されたバイオミメティック・ナノ表面創製技術の開発

1. 研究実施の概要

ハスの葉や蛾の目の表面構造が持つ優れた超撥水性や無反射性を模倣して材料設計を行う「バイオミメティクス」の研究が世界的に注目されている。生物の持つ表面は多くの場合、ナノからマイクロにいたる階層的に構造化されており、人工的にそれらの構造を模倣しようとする新しい研究の潮流が始まっている。

本研究の目標は、散逸構造のように無秩序から規則構造が形成される「**物理的プロセスとしての自己組織化**」と、無電解メッキなどの「**化学プロセスによる構造形成**」を組み合わせることにより、ナノからミクロンにいたるスケールにおいて**階層的な三次元構造を有する有機・無機ハイブリッド材料**を作製し、それらが有する構造化された表面に基づく特異な機能発現（超撥水や超親水などの特異な濡れ性、構造色や無反射などの光学特性、吸着や摩擦特性など）を実現するとともに、Electro Dewetting Devices や Digital Microfluidics Devices などを構成する新しい素材としても応用可能な、階層的構造化を可能とする表面加工技術の確立を図ることにある。

さらに本研究のねらいは、生物に見られる自己集合・自己組織化による階層的構造化とそれに基づく機能発現を模倣することで、リソグラフィーを主軸とするトップダウン型生産技術に替わるボトムアップ型生産技術としての「**バイオミメティック・エンジニアリング**」を体系化するものであり、エネルギー消費と設備投資の少ない材料・デバイス製造プロセスを確立することで生産技術のイノベーションに大きく貢献するものである。

今年度は、

(1) 物理プロセスによるハニカム構造フィルムをベースにした多様な構造体の作製

①多様な構造の作製

剥離、機械的延伸、熱的収縮、鋳型化とネガコピー作製、などの単位操作を組み合わせることで多様な構造を作製する。

②自己組織化過程の解明

細孔配列は過渡的な鋳型である結露水滴の成長と相互配列によって決定されるので、

結露プロセスのその場観察のための装置を構築する。

(2) 化学プロセスによる有機・無機ハイブリッド構造体の作製

①ハイブリッドの多様化

無電解メッキなどのウェットプロセスや蒸着などのドライプロセスにより、Ni, Ag, Au と高分子のハイブリッド複合体を作製する。

②構造体の選択的ハイブリッド化

高撥水・強吸着表面の作製に焦点を絞り、空孔部分メッキの制御を行う。

(3) 多様な構造体をマスクとする半導体・金属表面のパターン化

①表面構造化技術の開発

ハニカム構造体ならびにその二次加工によって作製した多様な構造体をマスクとして、シリコンなどの半導体ならびに鉄の表面をエッチング等によってパターン化する。

(4) 階層性を有する構造化された表面を用いた機能デバイスの開発

①新規細胞培養基材の開発

構造化された基材表面での細胞接着挙動を原子間力顕微鏡や共焦点顕微鏡を用いて観察し、構造との相関性を見出す。

②バイオミメティック・エンジニアリングの確立

生物学的な視点からのマテリアル・デザインならびに生産技術の革新的なパラダイムシフトをもたらすと期待される「バイオミメティック・エンジニアリング」の確立を図るために、生物学者と材料科学者の異分野交流を図る。具体的には、キックオフミーティングとして国際ワークショップを開催する。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

(1) 物理プロセスによるハニカム構造フィルムをベースとした多様な構造体の作製

① 多様な構造の作製

自己組織化により形成されるハニカム構造フィルムの二次加工についての原理的な検証を行った。ハニカム構造フィルムを鋳型としてポリジメチルシロキサン(PDMS)のネガコピーを作製し、マイクロレンズアレイ状の構造が形成されることを見いだした(図.1(a))。また、ポリブタジエン(PB)などのゴム材料からハニカム構造フィルムを作製し、熱収縮フィルムを基板とする熱収縮(図 1(b))や、機械的延伸(図 1(c))により、細孔の形状を矩形に変化させることが出来た。また、細孔の形状は収縮や延伸の方向・変形率に応じて多様に制御することが出来た。さらに、ポリスチレン(PS)ハニカム構造フィルムの表面を粘着テープで剥離することで、周期的なスパイク構造を持つフィルムが作製される(図 1(d))。スパイク構造は熱応答性高分子からも形成された¹⁾。

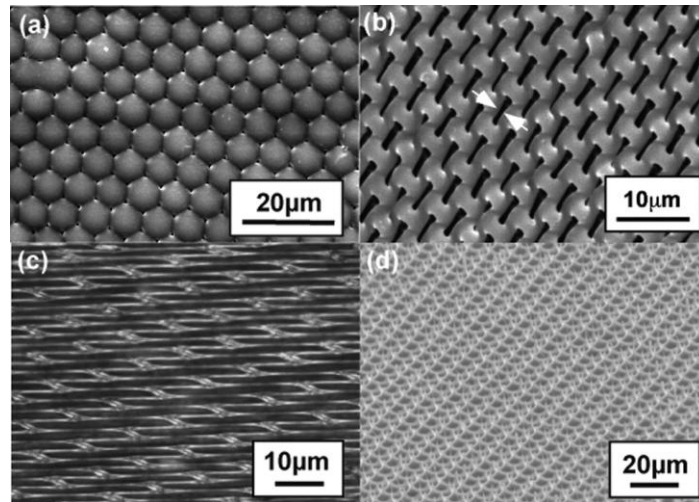


図.1(a)ハニカム構造フィルムのネガコピーにより作製したマイクロレンズアレイ構造の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像。(b)熱収縮フィルム基板上で収縮させた PB ハニカム構造フィルムの SEM 像。(c)延伸によって変形された PB ハニカムの光学顕微鏡像。(d)表面を剥離することで得られた PS スパイク構造の SEM 像。

② 自己組織化過程の解明

本年度は結露プロセスを観察するために、精密に湿度を制御できる製膜チャンバーを作製し、チャンバー内で 5cm×5cm 程度のサイズでハニカム構造フィルムが再現良く作製できることを見いだした。

(2) 化学プロセスによる有機・無機ハイブリッド構造体の作製

① ハイブリッドの多様化

ポリスチレンのハニカム状多孔質フィルムを鋳型とし、無電解めっきによりニッケル被覆ハニカムフィルム(図 2a)、蒸着により銀被覆ハニカムフィルム(図 2b)を作製した。ハニカム状多孔質フィルムの上面剥離により得られたピラーフィルムについても同様にニッケル被覆ピラーフィルム(図 2c)や銀被覆ピラーフィルム(図 2d)が得られた。ニッケル被覆高分子フィルムの金置換めっきにより、金被覆高分子フィルムを作製することが出来た。

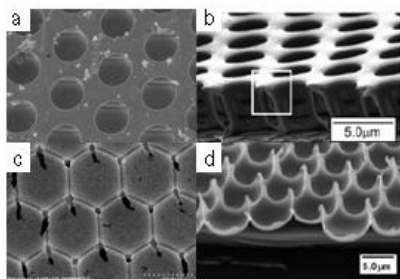


図 2 a)ニッケル被覆ハニカムフィルム、b)銀被覆ハニカムフィルム、c)ニッケル被覆ピラーフィルム、d)銀被覆ピラーフィルムの SEM 像

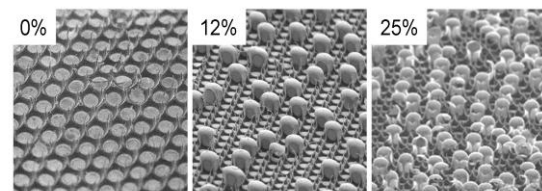


図 3 金属ドメイン密度の異なる金属-高分子ハイブリッドフィルムの SEM 像

②構造体の選択的ハイブリッド化

無電解ニッケルめっきの触媒液に水溶性高分子希薄溶液を混合し加熱することで、ハニカム状多孔質フィルムの空孔部分への金属析出割合を制御することができた。金属析出割合の制御されたニッケル被覆ハニカムフィルムの表面剥離により、金属ドメイン密度の異なる金属－高分子ハイブリッドフィルムが得られた(図 3)。部分的に化学メッキしたハニカム構造フィルムは、吸着力と撥水性の両方をあわせ持つバイオミメティクス有機・無機ハイブリッド構造である²⁾。

(3) 多様な構造体をマスクとする半導体・金属表面のパターン化

①表面構造化技術の開発

ハニカム構造体をマスクとして金属や半導体表面のマイクロ加工を行った。

(4)階層性を有する構造化された表面を用いた機能デバイスの開発

①新規細胞培養基材の開発

本年度は培養基材表面構造と細胞機能との相関性に関する知見の集積を目的にして、ポリスチレンハニカム状多孔質フィルムの表面上でのラット骨髄間葉系幹細胞の接着形態、増殖性、分裂過程、未分化性保持について調べた。コントロールの平膜上では細胞はフラットな伸展形態を示すのに対し、ハニカム状多孔質フィルム上では、細孔径に依存して孔径 1 ミクロンでは球状、孔径 5 ミクロンではフラットな接着形態をとることがわかった(図 4)。

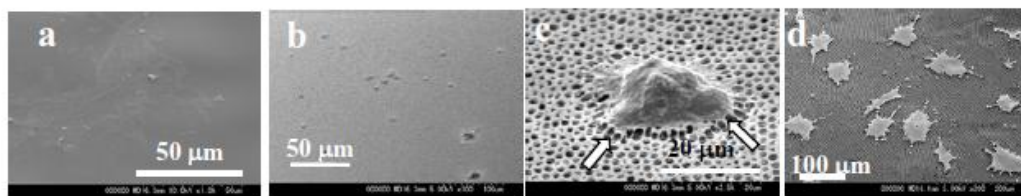


図 4 ラット骨髄間葉系幹細胞の接着形態を示す SEM 像 a)平膜、b)孔径 1 μ m のハニカム状多孔性フィルム、c)b)の拡大像、細胞がフィルムを引張っている様子をとらえていて、細胞とフィルムの強い相互作用が窺える、d)孔径 5 μ m のハニカム状多孔性フィルム

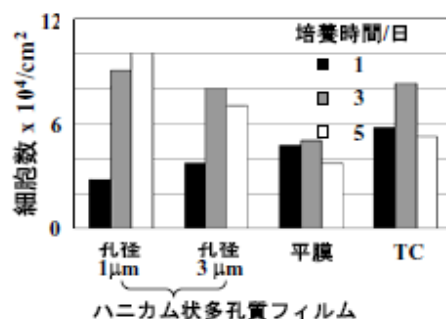


図 5 ラット骨髄間葉系幹細胞の増殖性に及ぼす表面構造の影響。平膜や市販培養容器(TC)上に比べハニカム状多孔質フィルム上で増殖性が高い

コントロールに比べ、ハニカム状多孔質フィルム上で増殖性が高まること、市販ポリスチレン培養容器(TC)上の増殖性より高いことがわかった(図5)。CD73、CD105を用いた抗体染色により、培養した間葉系幹細胞は未分化性を保持していることがわかった。コントロール上では、一旦伸展した細胞が分裂直前に球状に収縮した後分裂し、再度広がるという伸展収縮を繰り返して分裂しているのに対し、増殖性の高い孔径1ミクロンのハニカム状多孔質フィルムでは分裂前後の伸展収縮はなく、球状あるいは紡錘形の接着形態から直接分裂することがわかった。以上、ハニカム状多孔質フィルムの表面形状によって接着形態や分裂過程が制御され、増殖性が誘導されることを明らかにした。

② バイオメテック・エンジニアリングの確立

生物学的な視点からのマテリアル・デザインならびに生産技術の革新的なパラダイムシフトをもたらすと期待される「バイオメテック・エンジニアリング」の確立を図るために、バイオメテックス研究の世界的リーダーである英国バース大学 Julian Vincent 教授を招聘し、12月12日に国際ワークショップを開催した。

今後は、生物学者との連携をより一層深めることで、生物にみられる階層的に構造化された表面の形成機構、階層的構造化に伴う機能発現の仕組み、などを生物学的手法のみならず、物理学的な手法を駆使して明らかにする必要がある、それに対応出来る研究チーム構成を考えることとした。また、バイオメテックス、マテリアル・デザインを行うためには、ハニカム構造フィルムに限らず、広く自己集合化や自己組織化現象に着目した材料・加工技術の開発も求められる。

以上の観点から、材料研究と生物学研究の異分野連携を深めるための仕組み作りの一環として、定期的な国際会議を開催することとした。

3. 研究実施体制

(1)「化学プロセス」グループ

①研究分担グループ長: 下村 政嗣(東北大学 教授)

②研究項目

化学プロセスによるハイブリッド化と構造形成

(2)「物理プロセス」グループ

①研究分担グループ長: 田中 賢(東北大学 准教授)

②研究項目

ハニカム構造体の作製と物理的二次加工ならびにデバイス化

(3)「バイオプロセス」グループ

①研究分担グループ長: 山本 貞明(北海道大学 特任教授)

②研究項目

表面解析ならびに細胞培養基材設計

(4)「転写プロセス」グループ

①研究分担グループ長:居城 邦治(北海道大学 教授)

②研究項目

金属・半導体の表面加工とバイオメテック・エンジニアリング

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. H. Yabu, Y. Hirai, M. Kojima and M. Shimomura “Simple Fabrication of Honeycomb- and Pincushion-Structured Films Containing Thermoresponsive Polymers and Their Surface Wettability”, *Chemistry of Materials*, in press
2. D. Ishii, H. Yabu and M. Shimomura “A Novel Biomimetic Surface Based on a Self-Organized Metal-Polymer Hybrid Structure”, *Chemistry of Materials*, accepted

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)