

令和元年5月28日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06740

研究課題名(和文) 高表面摩擦性を実現するナノ多孔を有する超極細複合繊維構造の創製

研究課題名(英文) Fabrication of ultra-fine composite fiber structures with nanopores to realize high surface friction

研究代表者

伊藤 浩志 (Ito, Hiroshi)

山形大学・大学院有機材料システム研究科・教授

研究者番号：20259807

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高い表面摩擦特性を有する新たなナノ繊維材料の構造制御およびその構造を有するフィルムの作製を目的とした。ここでは、垂直配向複合ナノ構造(VACNs)と垂直配向多孔質ナノ構造(VAPNs)を示す一次元高分子ナノ構造の作製を行う為、陽極アルミニウム酸化法によるナノ多孔自己組織化膜(AAO)を用いて、熱可塑性ポリマーおよびそのナノ複合材料による熱ナノインプリントを利用することで高精度・微細転写プロセスを提案した。さらに、得られたVACNsおよびVAPNsのナノ構造の形成機構および表面の機械特性について詳細に解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

蓮の葉、ヤモリの足や蝉の羽等の生体模倣技術と生体表面機能性をきっかけとし、ナノ制御された表面加工プロセスが提案されており、一次元(1D)ナノ構造を様々な高分子フィルム上に複製している。これらの一次元ナノ構造は、疎水性、表面摩擦および接着性などの多機能特性を示し、生物医学的な用途、ナノセンシング材料、生体足場と結合した触媒、およびエネルギー貯蔵において応用展開が期待されている。本研究では、表面摩擦特性を向上させることができる垂直配向複合ナノ構造(VACNs)および垂直配向多孔質ナノ構造(VAPNs)を実現する材料創製と構造制御について検討した。

研究成果の概要(英文)：Enhancement of surface friction coefficient is mainly depended on materials used properties and surface roughness of surfaced structures. The materials and structural development for fabricating one-dimensional nanostructures need to be clarified by using thermal nanoimprint process with AAO templates. In this study, materials development of polystyrene/graphene nanoplatelets was used to fabricate nanostructures. The result reveal that this composite nanostructures with diameter 100 nm and length of 10-70 μm can be fabricated. The maximum friction coefficient of this composite nanostructure up to 0.61 can be achieved. The structural development of one-dimensional nanostructure as preparing mesoscale pore one-dimensional nanostructure have been also investigated. Higher friction coefficient of porous nanostructures compared with non-porous nanostructure due to the increase of surface roughness at nanoscale also caused by pore formation.

研究分野：工学

キーワード：一次元ナノ構造 ナノインプリント ナノ複合材料 多孔質ナノ構造 表面摩擦

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) ヤモリの足の性質をきっかけとした一次元 (1D) ナノ構造は、自己洗浄、乾式接着剤、ならびに熱および電気伝導性材料など、様々な用途展開が期待され、特に注目を集めている [1, 2]。さらに、最近のナノ材料は高分子ナノ工学技術により作製される構造を介した表面性を基としている。例えば、セミの羽の疎水性表面は垂直に整列したナノ構造体 (VANs) で覆われており、これが接着後数分以内に緑膿菌を殺す [3]。バクテリアを殺す性能を向上させるためには、(1) 疎水性、(2) 表面積、(3) バクテリア付着性、および (4) サーマルローカリゼーションを含む、VANs の特性および表面特性 (例えば表面摩擦および表面弾性率) を改善する必要がある。本研究では高分子フィルムの表面摩擦を高めるため、一次元ナノ構造作製のための材料開発とその構造制御について焦点を絞り取り組んだ。

(2) 材料開発では、炭素材料強化複合材料において、様々なカーボンナノ充填材料を使用して研究開発が報告され、その結果、熱的、電氣的、機械的、および化学的耐性を含む優れた特性を示すことが知られている [4]。熱伝導および電気伝導は、1D ナノ構造に基づくフィラー配向および高分子鎖配向の制御によって改善させることができる。これにより、垂直に整列した複合ナノ構造体 (VACNs) がここで大きな注目を集めている。ナノインプリントプロセスで高分子ナノ複合材料を使用して、J. J. Hernández は、機械的性能と導電性の向上とともに超疎水性と自己洗浄性を有する 1D 微細構造表面 (直径 2.0 μm) を複製するインプリンティング法を報告した [5]。しかし、VACNs としてのポリマー複合材料のためのナノスケールでのインプリント技術は、再現性や均一性転写性など依然として大きな課題を抱えている。

(3) ナノ構造制御では、ナノスケールでのその多孔性および表面粗さから、垂直配向多孔質ナノ構造 (VAPNs) に着目した。疎水性、超高表面積、およびより高い摩擦特性という優れた特性で大きな注目を集めている。特に、VAPNs は湿度条件を制御することによって、剥離・接着面制御として認められている [6]。さらに、高付加価値の VAPNs は、エネルギー貯蔵、超分子膜、およびナノセンシング材料の分野において適用されてきた。これらの理由から、VAPNs が産業界および学術界の両方にとって、新規のナノ材料として重要である。VAPNs を製造するための汎用技術には、thermal melt wetting 法および solvent wetting 法の浸透性を組み合わせた AAO ナノ多孔質を使用する鋳型法である。AAO 細孔中の表面誘起相分離挙動の制御はこれらの技術にとって最も重要である。そのため、これらの方法がより速く、より安価に、より高精度に、より毒性が少なく、そしてより汎用的になるように改良しようとする多くの研究が試みられてきた [7, 8]。高分子工学技術によるポリマー熱ナノインプリント法では、迅速であり、溶媒を必要とせず、高精度および再現性を有する高い複製能力を理由に、VAPNs を複製するための代替方法として注目される。例えば、様々な長さ、直径、アスペクト比、およびパターンを有する一次元高分子ナノファイバーアレイは、AAO テンプレートを使用するナノインプリント法によって作製可能である。しかしながら、AAO テンプレートによるナノインプリント法を用いた VAPNs の直接製造についての報告は未だ少ない。したがって、AAO テンプレート中のポリマーの相分離制御と熱ナノインプリントプロセスを融合することは大きな課題である。

2. 研究の目的

(1) この研究は主に、アルミニウム陽極酸化 (AAO) テンプレートを用いた熱ナノインプリント法を用いて、VACNs および VAPNs の精密制御に焦点を当てる。VACNs の場合、モデル複合材料ポリスチレン (PS) / グラフェンプレート (GNPs) を用いた。VAPNs については、AAO に閉じ込められたポリマーブレンドの超臨界二酸化炭素 (scCO₂) を用いた相分離、変態挙動、および発泡過程を調べた。使用される材料は PS/ポリビニルアルコール (PVA)、高密度ポリエチレン

(HDPE) / PVA および HDPE/PVA-グリセロールブレンドである。本研究では、PVA セグメントの超微細分散溶融体を効果的に作製する為に高せん断加工機を使用し、高度な溶融混合プロセスによって調製されたポリマーブレンドを作製した。さらに、湿潤性、摩擦係数、表面耐久性、表面弾性率、および表面硬度からなるいくつかの表面特性を実験的に評価した。

3. 研究の方法

(1) 材料

市販グレード PS (ガラス転移温度 (T_g) = 87°C、メルトフローレート (MFR) = 18.0g/10 分、200°C、GPPS 679; PS ジャパン株式会社)、PVA (T_g = 26°C、溶融温度 (T_m) = 161°C、CP-1210; (株) クラレ) および GNP (厚さ 6~8nm、G0499; 東京化成工業) を用いた。

(2) AAO の調製

高純度アルミニウム (Al) シート (99.99%) をアセトン中で脱脂した。次いで、それらを HClO₄:H₂O:EtOH (10.0:7.0:83.0 wt%) の混合溶液中で研磨した。電解研磨されたアルミニウムシートは、二段階陽極酸化法によってアルミニウム多孔膜を作製した。陽極酸化は、0.3 M シュウ酸中、60 V の定電圧で、5 °C の定温度で個別に行った。1 回目の陽極酸化処理が終了した後、多孔質アルミナを 60 °C で H₃PO₄ と H₂CrO₄ を含む溶液に溶解させた。その後、2 回目の陽極酸化処理を行った。2 回目の陽極酸化が行われた側で 40 °C、5.0 wt% の H₃PO₄ 溶液に浸漬することによってナノ細孔を作製した。

(3) 高分子ナノ複合材料の調製

本研究では、PS - GNP_s 複合材料を調製するために溶液混合法を選択した。最初に、GNP_s を 100nm の孔径を有するポリカーボネート (PC) 膜によって濾過した。PS ペレットをジメチルホルムアミド (DMF) 溶媒に 300rpm で 2 時間攪拌しながら溶解した。超音波処理 (Branson 1200; ヤマト科学) を使用して、必要な量の濾過した GNP_s を DMF 溶液 (0.1 g の GNP_s/100 mL の DMF) に分散させた。GNP_s/DMF 溶液を 1.5 時間超音波処理した。処理した GNP_s/DMF 溶液を次に PS/DMF 溶液に添加し、次いで 300rpm で 2 時間攪拌した。PS-GNP_s-DMF 溶液を大量のメタノール中に滴下して PS/GNP 複合体を凝固させた。得られた PS-GNP_s 複合材料を濾過し、オープン中 70 °C で 24 時間乾燥した。この研究では、PS - GNP_s 1.0~5.0 wt% を調製した。

(4) ポリマーブレンドの調整

ブレンドプロセスのために、樹脂ペレットを高剪断加工機 (NHSS2-28、新潟マシンテクノ) に導入した。PS/PVA ブレンド (90/10 および 70/30 wt%) の場合、180°C で 10 秒間、500rpm の回転速度で混ぜ合わせた。HDPE/PVA および HDPE/PVA-グリセロールブレンド (90/10 および 80/20 wt%) の場合、180°C で 10 秒間、1000rpm の回転速度で混ぜ合わせた。得られたポリマーブレンドを粉砕機でペレット化した。

(5) ポリマーフィルム調製の調整

ポリマーナノコンポジットおよびポリマーブレンドペレットを加熱真空プレス機 (IMC-11FA; 井元製作所) によって 200°C で 5 分間 500 μ m の厚さに溶融し、10MPa で圧縮した。溶融フィルムをコールドプレス機 (IMC-181B; 井元製作所) に 3 分間挿入した。

(6) 熱ナノインプリントによるナノ構造の作製

1D ポリマーナノ構造アレイは、AAO テンプレートを使用して熱ナノインプリント機 (和泉テック) によって製造された。実験手順を図 1 に示す (ポリマーブレンド系の例)。ポリマーフィルムを AAO テンプレート上に置き、熱ナノインプリント機に挿入した。インプリント条件を表 1 に示す。インプリント後、AAO テンプレートを 4.0 M の NaOH 溶液に 24 時間溶解することによって除去し、続いて水で洗浄して乾燥させた。

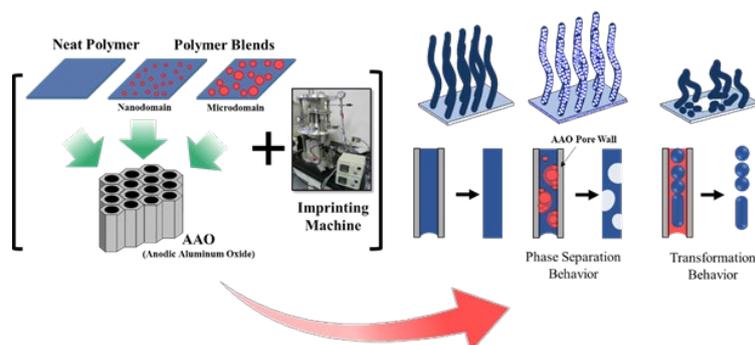


図 1 熱ナノインプリントプロセスを使用したナノ構造の作製

表 1 インプリント条件

材料	温度(°C)+溶融(5 min)	圧力(MPa)	プレス時間(min)
PS	120-180	5.0	30
PS-GNP _s コンポジット	120-180	5.0	30
PS/PVA ブレンド	120-180	5.0	15-120

(7) 超臨界二酸化炭素を用いた発泡プロセス

AAO テンプレート内に閉じ込められたポリマーブレンドのインプリント成形品を高圧容器に導入し、続いて CO₂ を導入した。この実験では、CO₂ 浸漬時間を 2 時間に固定した。scCO₂ 条件下での発泡プロセスを実施した。PS/PVA ブレンドでは、温度: 40~100°C、圧力: 40~100°C、0~10.0MPa、減圧速度: 1.0~3.0MPa/分、で行った。

(8) 特性評価

AAO テンプレートおよび高分子ナノ構造の表面形態は、走査型電子顕微鏡 (SEM、JSM-6510; JEOL Corp.) および電界放出走査電子顕微鏡 (FE-SEM、SU-8000; 日立ハイテクノロジーズ) を用いて評価した。市販の接触角計 (DM500; 協和界面科学株式会社) を用いて、溶融ポリマー/AAO 表面と水滴/ポリマー表面との間の表面相互作用を測定した。高分子および高分子ナノコンポジットフィルムの表面化学的性質は、減衰全反射 (ATR)、IR affinity-1s および自動赤外顕微鏡 (AIM-8800; 島津製作所) を用いて分析した。インプリントされたナノ構造中の GNP_s の質量比およびそれらの熱安定性は、熱重量分析 (TGA、TGA Q50; TA Instruments Inc.) によって評価された。摩擦係数は、摩擦摩耗試験機 (EFM-III-F; オリエンテック社製) を用いて評価した。使用された摩擦試験条件は、30 秒間 10rpm の回転速度で 21~40N の荷重で行った。全ての試験

は周囲条件下 (25°C、相対湿度 35%) で行われた。ナノスケールでの表面の機械的特性解析は、Agilent ナノインデント (G200; Agilent Technologies Inc.) を用いて評価した。高分子および高分子ナノ複合材料の T_g の変化は、変調示差走査熱量測定法 (M - DSC, DSC Q200; TA Instruments Inc.) を用いて分析した。

4. 研究成果

(1) 垂直配向複合ナノ構造 (VAPNs)

PS-GNPs の VACNs は、熱ナノインプリントに作製された。その結果、AAO テンプレート中のポリマーの固有粘度および表面エネルギーの減少により、インプリント温度を上昇させることによって高分子および高分子複合材料の流動性が向上することを明らかにした。しかしながら、流動性は、GNPs の質量比の増加と共に減少した。GNPs の質量比の増加は、GNPs と PS との間の充填材とマトリックスポリマーとの相互作用のために、AAO ナノチャネルにおける PS の流動抵抗を誘発した。流動抵抗におけるさらなる要因は、ナノ小板の形状および分散によって引き起こされる。本研究では、インプリンティング条件に応じて、直径 100 nm、長さ 10~70 μm の PS-GNPs (1.0~5.0 wt%) の VACNs を作製した。

図2(左)は材料表面の摩擦係数を示している。平坦な表面は、PS 単体については 0.24~0.27、PS - GNPs (5.0 wt%) については 0.38~0.47 の比較的低い摩擦係数であった。一方、ナノテクスチャー表面は、PS 単体については 0.28~0.35、PS - GNPs (5.0 wt%) については 0.48~0.61、とそれぞれの平坦なフィルムよりも高い値を示した。これらの結果は、材料表面上のナノ構造が物理的粗さを高め、その結果表面の摩擦係数が増加することを明らかにしている。複製されたナノ構造は、分子エネルギー散逸の向上を可能にし、摩擦係数の増加を引き起こした。さらに、摩擦係数の増加は、GNPs の添加量に強く依存している。GNPs による補強は、材料の剛性を高め、その結果、表面の機械的抵抗 (複合材料と摩擦試験材料との間の抗力) が増加する。さらに、表面間の接着は、PS 表面上に GNPs を添加することによるナノスケールの粗さの増加と共に増強される。摩擦試験 (40 N) 後の表面耐久性を SEM により評価した。図2 (右) は、摩擦試験前後の PS および PS - GNPs (5.0 wt%) のナノ構造表面の SEM 画像 (上面図) を示す。摩擦試験後の PS 単体のナノ構造の破壊が見られた。摩擦試験中に加えられた力により、PS 単体の垂直に整列したナノ構造は水平方向にランダム化された。対照的に、PS-GNPs のナノ構造は、強化材料からのポリマーの機械的抵抗の改善のために依然として垂直配向を示した。しかしながら、複合材料の脆性破壊のために、いくつかの壊れたナノ構造が見られた (5%未満)。

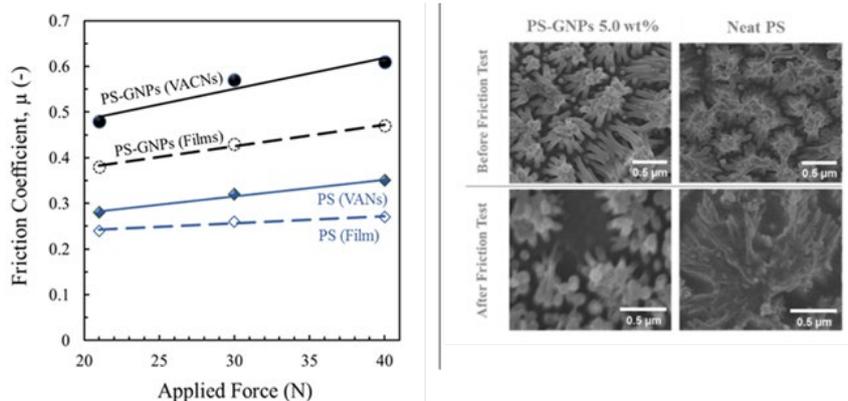


図2 表面摩擦係数 (左) とナノ構造の表面耐久性 (右)

表面硬度試験により、ナノ構造の弾性率および硬度を評価した結果を図3に示す。GNPs の質量比と表面の機械的性質との間の関係を示す。ナノ構造の弾性率および硬度は、5.0 wt% の GNPs の添加により、それぞれ 11 倍および 4 倍まで増加した。これらの結果は、上記の表面耐久性の結果とよく一致している。

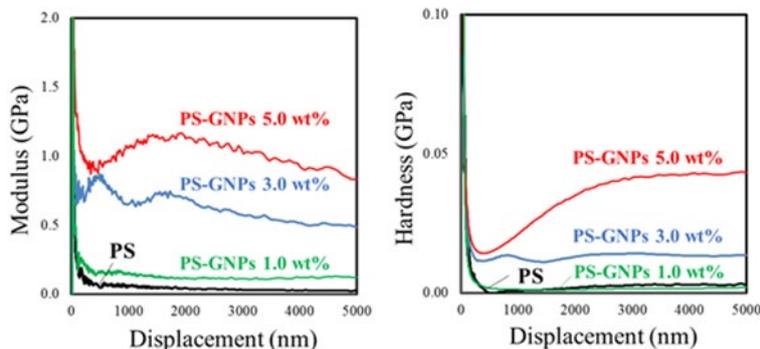


図3 一次元ナノ構造の表面弾性率および硬度測定

さらに、VACNsはフラットフィルムの水接触角を $87\pm 3^\circ$ から $132\pm 2^\circ$ に増加させた。PS-GNPs ナノ構造の T_g は、AAOテンプレート内に閉じ込められ、PSとGNPsの間の表面界面相互作用効果により高分子鎖が固定化されているため、バルク複合材料と比較して約 $1\sim 4^\circ\text{C}$ 上昇した。さらに、TGA結果はPS-GNPsナノ構造がPSナノ構造より高い熱安定性を示した。

(2) 垂直配向多孔質ナノ構造

AAOナノチャンネル内に閉じ込められたPS/PVAブレンドの相分離および構造変態挙動を実験的に調べた。特に、得られたPSナノ構造の形態に影響を与えるAAOテンプレートに限定される特徴的な挙動を明らかにするために、ドメインサイズおよびPS/PVAブレンドの質量比の影響を調べた。図4(A)は、熱ナノインプリントプロセスによって製造されたPS-VANsの表面形態の平面図画像である。図4(a)は、PS単体フィルム前駆体を用いて得られたPS-VANsの平滑面を示す。PS-VAPNsは、図4(B, b)に示すように、PS/PVA(90/10 wt%)前駆体フィルムを使用し、PVAセグメントを選択的に除去することによって製造することができる。PVAがマイクロドメインの場合、ナノロッドとナノスフィアで構成されるナノレベルの脚のような構造を有するPS-VANsが作製された。(図4(C, c)参照)インプリントフィルム表面の微小な孔は、PVAセグメントの除去により観察された。PSナノ構造のナノカラムからナノロッドおよびナノスフィアへの変換はPSとPVAの界面相互作用によるRayleigh不安定性によって引き起こされる。1Dから0Dへの次元数の減少は、系の表面エネルギーを減少させる意図である。この実験では、インプリント条件(温度および時間)の影響を調べて、AAOテンプレートに閉じ込められた高分子ナノ構造の相分離および構造変態挙動を検証した。

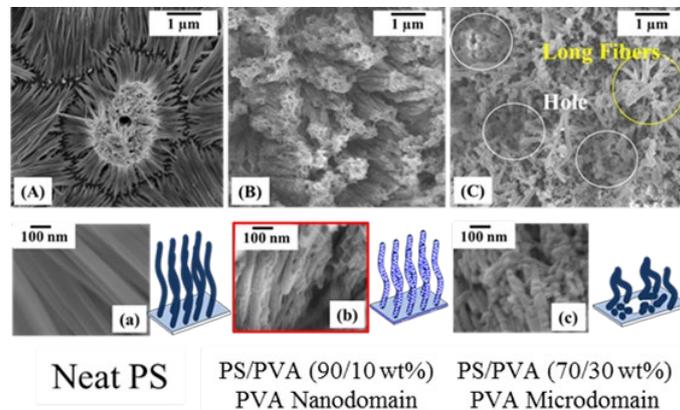


図4 (A, a) PS-VAN (B, b) PS-VAPN および (C, c) PS nano-peapods の表面形態

PSナノ構造表面またはPS-VAPNs上への多孔質の構造は、AAOテンプレート中のPS/PVA(90/10 wt%)ブレンドの表面誘起相分離によって作製することができた。可視多孔質体は 180°C のインプリント温度で画像形成することができた。この温度では、ナノ細孔の形成は以下によって引き起こされた。(1) 熔融状態($T_m = 161^\circ\text{C}$)でのPVAの流動性(2)水素結合の親和性による表面誘起相分離 PVA-AAO間の界面相互作用は、水素結合のために粗粒化挙動を促進する。したがって、PSマトリックス中のPVA液滴は、AAOテンプレートの細孔壁上に形成された。さらに、インプリント温度の上昇に伴うPS粘度の低下は、表面誘起相分離を促進する可能性がある。

粗粒化挙動によれば、粗粒化温度(粘度および表面張力の関数を伴う)および粗粒化時間の影響は、多孔質ナノ構造の形成にとって重要なパラメータである。インプリント時間15~120分から得られたPSナノ構造の表面外観を示す。約90~120分の長いインプリンティング時間により、粗粒化挙動の間および後にPVA液滴の凝集が起き、PSナノカラムが崩壊することでナノフラグメントに変換されることを見出した。PVA液滴の凝集は、PVAの拡散および物質移動の時間に依存する。

インプリントプロセスとして、 180°C より低いインプリント温度を実行することは、ナノ構造の相分離を促進することはできない。したがって、多孔質構造を持たないポリマーブレンドのインプリント製品を選択して、 scCO_2 発泡プロセスを実施した。結果はメソスケール細孔一次元ナノ構造を得ることができることを明らかにした。多孔質ナノ構造の形成に対する scCO_2 の効果は、浸漬時間中のアニーリング工程および減圧中の発泡工程によって引き起こされた。図5は、PS-VAPNsの scCO_2 発泡成形品を示す。さらに、測定された摩擦係数を図6にまとめた。PS-VAPNs表面は、PS-VANs表面(~ 0.41)と比較してより高い摩擦係数(~ 0.53)を示す。この結果は、ナノスケールでの粗さがマクロスケールでの表面摩擦の変化に影響を与えることを示している。興味深いことに、PS-VAPNsの摩擦係数は、それが湿潤状態に切り替え可能であったときに高めることができる。水架橋を介した接触形成によるこの結果は、接触要素とPS-VAPNsの多孔質表面との間の固体-固体接触を誘発した。表面硬度試験により、PS-VAPNsは、PVAセグメントの除去後の材料構造の縮小またはサイズ縮小効果のために、PS-VANsと比較して表面硬度および表面弾性率がやや低いことを示す。したがって、サイズを小さくすると、エネルギー吸収能力が低下し、ナノ構造の主導破壊がより容易になる。PS-VAPNsおよびPS-VANsの表

面硬度 0.6 および 0.8MPa、ならびに表面弾性率 0.03 および 0.08GPa は、それぞれ押し込み試験を用いて得ることができる。

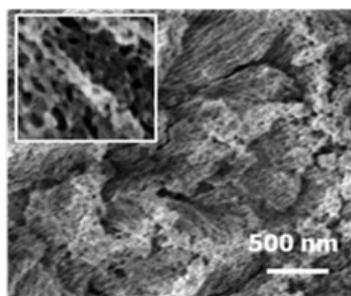


図 5 PS-VAPNs 発泡製品

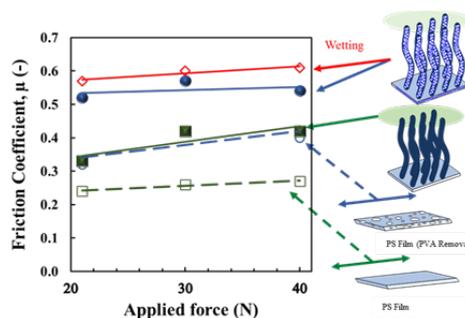


図 6 ポリマー表面の摩擦係数

<引用文献>

1. S. Hu, Z. Xia, Rational Design and Nanofabrication of Gecko-Inspired Fibrillar Adhesives, *Small*, 8, 2012, 2464-2468
2. C. Mijangos, R. Hernández, J. Martín, A Review on the Progress of Polymer Nanostructures with Modulated Morphologies and Properties, Using Nanoporous AAO Templates, *Progress in Polymer Science*, 54-55, 2016, 148-182
3. X. Li, G. S. Cheung, G. S. Watson, J. A. Watson, S. Lin, L. Schwarzkopf, D. W. Green, The Nanotipped Hairs of Gecko Skin and Biotemplated Replicas Impair and/or Kill Pathogenic Bacteria with High Efficiency, *Nanoscale*, 8, 2016, 18860-18869
4. S. K. Kumar, Macromolecules, 50th Anniversary Perspective: Are Polymer Nanocomposites Practical for Applications, *Macromolecules*, 50, 2017, 714-731
5. J. J. Hernández, M. A. Monclús, I. Navarro-Baena, F. Viela, J. M. Molina-Aldareguia, I. Rodríguez, Multifunctional Nano-engineered Polymer Surfaces with Enhanced Mechanical Resistance and Superhydrophobicity, *Scientific Reports*, 7, 2017, 1-10
6. L. Xue, A. Kovalev, A. Eichler-Volf, M. Steinhart, S. N. Gorb, Humidity-Enhanced Wet Adhesion on Insect-Inspired Fibrillar Adhesive Pads. *Nature Communications*, 6, 2015, 1-9
7. L.-B. Huang, Y. Zhou, S.-T. Han, Y. Yan, L. Zhou, V. A. L. Roy, The Role of Nanoparticle Monolayer on the Flowing Behaviour of Polymer Melts in Nanochannels, *Nanoscale*, 6, 2014, 11013-11018
8. T.-H. Wei, M.-H. Chi, C.-C. Tsai, H.-W. Ko, J.-T. Chen, Porous Polymer Nanostructures Fabricated by the Surface-Induced Phase Separation of Polymer Solutions in Anodic Aluminum Oxide Templates, *Langmuir*, 29, 2013, 9972-9978

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① P. Muanchan, S. Suzuki, T. Kyotani, H. Ito, One-dimensional Polymer Nanofiber Arrays with High Aspect Ratio Obtained by Thermal Nanoimprint Method, *Polymer Engineering and Science*, 57, 2017, 214-223 (査読有)
- ② P. Muanchan, H. Ito, Nano cellular foams confined within PS microfibers obtained by CO2 batch foaming process, *Polymer Engineering and Science*, 24, 2018, 655-662 (査読有)

[学会発表] (計 22 件)

- ① H. Ito. et al, Replication of Mesoscale Pore One-dimensional Nanostructures Obtained by Thermal Nanoimprint Process, The 35th Annual Meeting of The Polymer Processing Society (PPS-35), 2019
- ② H. Ito. et al, Fabrication of Mesoscale Pore One-Dimensional Nanostructures by Nanoimprint Lithography, Asia-Pacific Conference on Engineering and Natural Sciences (APICENS), 2019
- ③ H. Ito. et al, Formation of Porous Polymer Nanostructures by Imprinting Process: Phase Separation and Foaming of PS/PVA Blend at the Nanoscale, 10th International Conference on Materials Science and Technology (MSAT-10), 2018
- ④ H. Ito. et al, Vertically Aligned Composite Nanostructures Obtained by Nanoimprint Process, Recent Progress in Graphene & 2D Materials Research 2017 (RPGR), 2017

[図書] (計 2 件)

- ① P. Muanchan, H. Ito, Replication of Micro-/Nanostructures, *Micro and Nano Fabrication Technology*, J. Yan (Editor), Springer Nature, Chapter 19, 2018, 607-634

[その他]

ホームページ等 <http://pep.yz.yamagata-u.ac.jp/>

6. 研究組織

研究代表者のみ