

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02797

研究課題名（和文）一次元膨潤・収縮材料の開発

研究課題名（英文）Development of one-dimensional swelling/shrinking materials

研究代表者

宇山 浩（UYAMA, HIROSHI）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70203594

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではバクテリアセルロース（BC）の特異な層状構造に着目し、層間に親水性ポリマー（ポリビニルアルコールやセルロース誘導体）、導電性ポリマー（Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)）、温度応答性ポリマー（ポリ(N-イソプロピルアクリルアミド)）を挿入することで新規な刺激応答性複合材料を創製した。特異なBCの特徴を活かして、刺激応答機能分子を凝集させることなく均一にBCゲル層間に挿入することで水分や熱に応答する一次元的な形状変化、構造異方性の機能を搭載した材料を開発した。また、BCにポリマーを複合化することによる複合ゲルの機械的性質を向上させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開放系でゲルの膨潤・収縮の方向性を完全に規定するものは皆無に近く、収縮状態から材料が溶媒を吸収して膨潤する方向を厳密に限定させる材料設計には、材料中の分子鎖の配向や膨潤による配向の乱れ抑制など既存手法では困難な点が多いため、本研究の成果である一次元膨潤・収縮の機能材料開発の学術的意義は高い。一次元膨潤・収縮材料には多様な応用が想定されるが、本研究の成果である導電性の構造異方性発現はアクチュエータ開発に有用であり、社会的に開発が求められているウェアラブルデバイスの発展に資することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the unique layered structure of bacterial cellulose (BC) and created novel stimulus-responsive composites by inserting hydrophilic polymers (poly(vinyl alcohol) and cellulose derivatives), a conductive polymer (poly(3,4-ethylenedioxythiophene)), and a temperature-responsive polymer (poly(N-isopropylacrylamide)). Taking advantage of the unique properties of BC, we developed materials with functions of one-dimensional shape change and structural anisotropy in response to moisture and heat by uniformly inserting stimuli-responsive functional molecules between BC gel layers without aggregation. In addition, the mechanical properties of the composite gel were improved by incorporating the polymer into the BC.

研究分野：高分子材料化学

キーワード：バクテリアセルロース 導電性高分子 複合材料 温度応答性高分子

1. 研究開始当初の背景

セルロースはポリマー鎖間に強固な水素結合を有するため、高い結晶性や機械的強度を有する半面、溶解性、加工性に課題がある。セルロースナノファイバー (CNF) を代表とするナノセルロース材料は大きく CNF、ナノクリスタルセルロース、BC に分類される。ナノセルロース材料の代表的な作製法として解繊法、酸加水分解法、TEMPO 酸化法、発酵法が挙げられる。セルロースの高強度、軽量、低熱膨張率等の優れた性質とセルロースをナノ化することで発現する特性が融合したナノセルロースは、次世代材料として有望である。自然界に最も多く存在するセルロース利用の社会的意義も相まって、幅広い分野での用途開発が活発に研究されてきた。しかし、セルロースは親水性が高く、加工性も悪いため、複合材料の実用的な観点での高性能化は進んでいない。

地球上のほとんどのセルロースは植物が産出しているが、BC は酢酸菌が産出するセルロースであり、東南アジアではココナツウォーターを原料として安価に製造され、デザート (ナタデココ) として食される。BC はハイドロゲルとして得られ、その重量の 99% 以上が水である。BC ゲルはバクテリアの体内から排出されたセルロースがフィブリル化し、50~100 nm 幅のリボン状 BC ナノファイバーが三次元ネットワーク構造を形成したものである。一般に BC は液体培地中での静置培養により合成され、BC ゲルは培養液/空気界面から培養液内へ成長するため、BC ゲルは面方向においては均一なナノサイズのネットワーク構造を有するが、厚み方向にはミクロンサイズの層状構造をもつという異方性を有する。この異方性という特徴は他の高分子ゲルには見られないが、特徴的な層状構造に着目した機能材料開発はほとんど行われていない。BC は発酵生産時にゲル化するため、強固な物理的相互作用に基づく形状保持能の高いゲルを形成し、セルロースの溶解あるいは化学修飾を経るゲルと差別化され、他のセルロースゲルに見られない特徴的な性質を示すため、機能材料の出発原料として有望である。

2. 研究の目的

本研究は BC の特異な構造・性質を元に我々独自の発想に基づき、新規な機能材料を創出する。具体的には BC の層間に刺激応答分子を挿入・固定化することにより、外部刺激に応答して一次的に膨潤・収縮する材料を開発する。ハイドロゲル (ゲル) は一般的に水中で等方的に膨潤し、乾燥により同じく等方的に収縮する。すなわち、膨潤・収縮の方向を厳密に制御して、一次的あるいは二次的に膨潤・収縮させることは極めて困難である。報告者らは高吸水性材料である架橋ポリアクリル酸ナトリウム塩を BC 層間に複合化することにより合成されるコンポジットシートが乾燥により BC 層に垂直な方向に大きく収縮し、水への浸漬により垂直方向に大きく膨潤することを見出した。膨潤・収縮サイクルは繰り返し可能であり、4 サイクル後も初期とほぼ同じ膨潤度 (~700%) と形状変化を示した。このような一次的な膨潤・収縮は BC の層状構造に基づくものであり、他の材料では成しえない。一方、BC ゲルのみを加熱乾燥するとシート化し、このシートは水に浸漬しても二度と膨潤しない。

本研究は一次元膨潤・収縮材料をはじめとする外部刺激に応答する異方な形状・機能の変化・制御における我々独自の材料設計の普遍化に向けて、様々な機能材料を BC 層間に挿入する。具体的には、親水性ポリマーの層間挿入に一次元膨潤・収縮機能の拡張、温度応答性ポリマーの挿入による水分と温度の二つの刺激に応答する機能搭載、導電性ポリマーの挿入による導電機能の構造異方性を検討する。

3. 研究の方法

BC ゲルの精製 : BC は食品用産業資材 (ナタデココ缶詰) を用いた。シロップ漬けのナタデココを脱イオン水を添加および攪拌を繰り返し行い、最後に 0.2 M 水酸化ナトリウムを添加し加熱攪拌することで、シロップを完全に除去した。その後、ナタデココの pH が中性になるまで脱イオン水により洗浄することで BC ゲルを得た。

BC ゲルへの BC ゲルへのアクリロイル基の導入 : BC ゲルを DMF に添加し、BC 内の水を DMF に溶媒置換した。次に、トリエチルアミン (TEA) を添加し、十分に攪拌した後、塩化アクリロイルを氷浴下でゆっくり滴下した。滴下が終了してから 2 時間後、氷浴から外し、室温で 24 時間反応させた。その後、脱イオン水で十分に洗浄することでアクリロイル基導入 BC (AcBC) ゲルを作製した。

BC ゲルへの PSS のグラフト化 : AcBC ゲルを 6 粒 (乾燥重量:約 0.15 g) とり、AcBC ゲル内存在下、1.0 mol% 過硫酸アンモニウム (APS) を含む 1.0 M p-スチレンスルホン酸ナトリウム (NaSS) 水溶液を 70°C で 24 時間反応させた。反応終了後、脱イオン水で十分に洗浄し、PSS グラフト化 BC (BC-g-PSS) ゲルを得た。

BC-g-PSS ゲル内での 3,4-エチレンジオキシチオフェン (EDOT) の酸化重合 : BC-g-PSS ゲル内の水を水-DMF (1:1) 混合溶液に溶媒置換した。次に EDOT を 0.5 M となるよう分散させた水-DMF (1:1) 混合溶液を調製し、BC-g-PSS を添加し、続いて、酸化剤として APS を EDOT:APS = 1 : 1.3 のモル比となるように添加し、25°C で 48 時間重合した。反応終了後、脱イオン水で十分

に洗浄し、導電性ハイドロゲル BC-g-PSS/PEDOT を作製した。

4. 研究成果

乾燥時に BC のセルロース鎖と多糖類・ポリビニルアルコール (PVA) の強い相互作用を発現させる材料設計により、非架橋で複合化した多糖類・PVA 鎖のゲル中での動きを抑制せず、材料特性に応じた吸水能を獲得した。水溶性多糖類水溶液に BC を浸漬し、乾燥するという極めて簡単な手法でシート状複合材料が得られる。多糖類としてカルボキシメチルセルロース (CMC) を使用した場合、BC ゲルを CMC 水溶液中、60°C、5 時間、浸漬し、その後ゲルを取り出して 105°C で 1 時間乾燥すると厚み方向に収縮したシートが得られた。これを水に膨潤すると一次的に膨潤した。この膨潤・収縮は 3 回可能であったことから、CMC は BC 層間に挿入され、吸水後もゲル中に保持されていると考えられる。膨潤率は最大約 100 倍に達した。また、BC に CMC を複合化すると圧縮強度が著しく向上した。フィラーを添加することでゲルの強度を向上する試みが多いが、CNF で構成される BC ゲルに CMC を添加することで著しい強度向上が見出されたことは興味深い。PVA を複合化することで膨潤度は低下するが一次元膨潤・収縮性は保持し、さらに得られた複合ゲルシートは折り曲げても割れない柔軟性が発現した。

BC ゲルのヒドロキシ基と塩化アクリロイルの DMF 中での縮合反応により、AcBC ゲルを得た。さらに、モノマーに NaSS、開始剤に APS、溶媒に水を用いたフリーラジカル重合により BC-g-PSS ゲルを得た。ハイドロゲルの表面および内部の構造を FT-IR スペクトルで確認した。BC ゲルでは確認されなかったアクリロイル基由来のエステル基の C=O 伸縮振動のピークが 1730 cm^{-1} 付近に出現したことから、BC ゲルにアクリロイル基が導入されたと判断した。また、ゲル表面および内部においても同様の結果が得られた。さらに、フリーラジカル重合を行ったところ、重合前には確認されなかった PSS のスルホ基由来の S=O 伸縮振動のピークが 1200 cm^{-1} 付近に、S-O 変角振動のピークが 834 cm^{-1} 付近に出現したことから、BC ゲルに PSS がグラフト化されたと判断した。また、ゲル表面および内部においても同様の結果が得られた。SEM による内部構造の観察によりゲル内部のモルフォロジーを確認した。BC ゲルでは非常に細かい CNF のネットワークが確認され、アクリロイル基修飾後も同様のモルフォロジーを維持していたが、BC-g-PSS ゲルでは CNF 直径の増加が認められた。このことから、CNF 表面を PSS でグラフト化することでファイバー表面が絡み合った PSS により被覆されていると考えられる。

PSS のグラフト化および PEDOT の導入を検討するため、EDX 測定を行った。BC ゲルでは、セルロース骨格由来の炭素および酸素のピークのみ検出され、アクリロイル基が導入されても原子数濃度に変化はなかった。さらには、BC-g-PSS ゲルでは PSS に由来するナトリウムと硫黄のピークが出現した。また、原子数濃度は炭素では高くなり、酸素では減少しており PSS の導入によるものと考えられる。さらに、BC-g-PSS/PEDOT ゲルでは、ナトリウムのピークが減少し、硫黄のピークが大きくなった。このことから、グラフト化した PSS が EDOT の酸化重合の際のテンプレートとして機能していることが示唆され、CNF 表面が PEDOT/PSS 層によって被覆されたと判断した。

ハイドロゲルの導電性評価を 4 端子法により行った。BC ゲルは含水率が 99.5% と高い値であったが、導電率は $4.69 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$ と非常に低い値であった。しかし、BC-g-PSS/PEDOT ゲルは含水率が 93.5% 以上と高い値を維持しながら、導電率は $2.43 \times 10^{-1} \text{ S/cm}$ と非常に高い値が得られた。また、CNF 表面に PSS をグラフト化しなかった BC-PEDOT/PSS ゲルと比較したところ、含水率が 98% 以上と高い値であったが、導電率は $1.47 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ と十分な値は得られなかった。十分な量の PEDOT/PSS をゲル内に導入できず、CNF 表面への PEDOT/PSS 層の被覆が形成されなかったため、CNF 表面への PSS のグラフト化がハイドロゲルの高導電率につながったと考えられる。さらに、BC-g-PSS/PEDOT ゲルを 1.0 M の NaCl 水溶液に 24 時間浸透した後、導電率を測定したところ、脱イオン水中では $2.70 \times 10^{-1} \text{ S/cm}$ であったが、NaCl 水溶液中では $2.48 \times 10^{-1} \text{ S/cm}$ とほぼ同程度の導電率を示した。この結果から、BC-g-PSS/PEDOT ゲルは電解質である NaCl のイオン伝導の影響はなく、PEDOT/PSS による導電性高分子ネットワークの電気伝導のみを発現していると考えられる。続いて、各ハイドロゲルを白金電極で挟み込み、直流回路を組み立てて 3.0 V の電圧を印加し LED ランプの点灯試験を行った。BC ゲルおよび BC-PEDOT/PSS ゲルでは、LED ランプは点灯しなかったが、BC-g-PSS/PEDOT ゲルは点灯した。これは、前述の導電率測定からも明らかである。

一方で、BC-CTA-PSS/PEDOT ゲルは含水率が 95% 以上と高い値を維持しながら、導電率は $4.13 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ と高い値が得られた。また、CNF 表面に PSS をグラフト化しなかった BC-PEDOT ゲルと比較したところ、含水率が 95% 以上と高い値であったが、導電率は $2.71 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ と十分な値は得られなかった。同程度の PEDOT の導入量が得られており、導電率の差が約 100 倍あることから、CNF 表面にグラフト化した PSS がドーパントとして機能していることを示唆している。BC-g-PSS/PEDOT ゲルよりも低い値となったのはグラフト化した PSS の量が少なかったことが考えられる。

圧縮試験により得られたハイドロゲルの強度評価を行った。BC ゲルは圧縮すると水を放出しながら収縮し、圧縮歪み 90% まで圧縮できたが、最大応力は 0.09 MPa と非常に小さい値であった。また、BC-g-PSS ゲルはヤング率が高くなり、最大応力は 0.68 MPa と高強度化した。しかし、BC ゲルとは異なり、圧縮歪みが約 60% において破断することがわかった。これは、一般的に PSS は脱イオン水中で完全にイオン化される傾向があり、ゲルが脱イオン水中にあるとグラフト化

した PSS の対イオンの一部が水中に拡散する。そして PSS が負に帯電し、静電気力によって互いに反発し PSS 鎖は堅固な伸張構造をとることでゲルの浸透圧が高くなり、圧縮の反発力として作用したと考えられる。続いて、BC-g-PSS ゲルに PEDOT を導入すると圧縮歪み 90%まで圧縮でき、BC ゲルと比較してヤング率が高くなった。これは、PEDOT の導入により PSS の負の静電気力が PEDOT のドーパントとして機能し、静電気力が解消されたことや、PEDOT の剛直性が影響している。一般的にゲルの密度が高くなるとヤング率や応力は高くなる傾向にあるが、BC-g-PSS ゲルから低強度となったのは静電的な要素がハイドロゲルの強度に影響しているためであると考えられる。

BC ゲルは CNF の積層体から構成されるハイドロゲルであり、この積層構造に由来する導電率の面依存性を検討した。キューブ状に成形された BC-g-PSS/PEDOT ゲルを白金電極で挟み込み、二端子法により抵抗値を測定し導電率を算出した。この測定をゲル各面において行った。導電率はキューブ状ゲルの 3 面のうち 2 面は同程度であったのに対し、もう 1 面は導電率がその他 2 つと比較して小さいことがわかった。積層方向に対して平行な面 (以後、層方向) では、導電率は $6.62 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ であったのに対し、積層方向に対して垂直な面 (以後、面方向) では、導電率は $1.61 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ と約 4 倍の差があることがわかった。また、ハイドロゲルを白金電極で挟み込み、直流回路を組み立てて 2.5 V の電圧を印加し LED ランプの点灯試験を行った。層方向では LED ランプは点灯する一方で、面方向では点灯するが光度が小さいことがわかった。この導電率の面依存性は、層方向では CNF のネットワークが伸展している方向のため、電流が流れやすいのに対し、面方向では CNF のネットワークが断線している部分がより多く存在するため、電気的な接点が少なく電流が流れにくくなったと考えられる。

この導電率の面依存性を詳細に検討するため、圧縮後の導電率の測定を行った。圧縮は層方向および面方向に対して行い、圧縮歪みは 0、30、60、80%としたときの導電率を測定した。層方向に圧縮した際には、わずかに導電率が高くなる傾向がみられたのに対し、面方向に圧縮した際には、その導電率の上昇率が層方向よりも大きいことがわかった。層方向に圧縮した際には CNF 同士の電気的な接点がわずかに増えて、若干の導電率が高くなるが、面方向に圧縮した際には、CNF の積層構造の隙間が埋められ、電気的な接点の増加が層方向よりも多くなり、導電率の上昇率がより高くなったと考えられる。また、SEM 観察による面方向圧縮前後のハイドロゲルの断面の様子を観察した。圧縮前には断面が粗く、多くの空隙もみられたが、圧縮後には断面がより密になり CNF 同士の接触が顕著になっており、電気的な接点の増加を示唆している。

以上から、BC ゲルの CNF 表面を PSS に修飾し、ゲル内での EDOT の酸化重合を行うことで、CNF 表面を PEDOT/PSS 層により被覆することができた。作製した導電性ハイドロゲルは、93%以上の含水率を維持しているながら、高い導電率を得ることができ、既存の導電性ハイドロゲルに存在したトレードオフの関係を解消した。さらに、BC ゲルの CNF の積層構造に由来する導電率の面依存性も確認され、CNF の積層方向に対して平行方向の方が垂直方向と比較して導電率が高いことがわかった。以上の結果から、高含水率・高導電性・高強度・異方性といったユニークな特徴を有したハイドロゲル電極の作製を達成した。

BC を基盤とする導電性ハイドロゲルに温度応答性を付与した。PSS をグラフト化した BC ゲルに PEDOT を複合化したハイドロゲル (BC-g-PSS/PEDOT) 中で N-イソプロピルアクリルアミド (NIPAM) と N,N'-メチレンビスアクリルアミドを重合した。この複合ゲルは LCST 以上の温度の水 (50°C) に浸漬すると約 200 秒で一軸方向に収縮し、約 35%の収縮率であり、その他の方向への収縮率は 5%程度であった。BC-g-PSS/PEDOT ゲルでは、PNIPAM 由来のネットワークは面方向に膨潤することができたが、層方向では BC 層の強固な結合により膨潤は制限されたと考えられる。この間の重量減少は約 30%であり、20°Cに戻すと重量がほぼ 100%に戻り、可逆性を示した。温度変化による抵抗値を二端子法により測定したところ、面方向では LCST より高い温度になると抵抗値が小さくなる一方で、層方向では抵抗値はほぼ一定であった。繰り返し 20°Cと 50°Cのスイッチングを行うと抵抗変化が面方向の方が大きく、層方向ではより小さいことがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Pedige Madhurangika Panchabashini Horathal, Asoh Taka-Aki, Hsu Yu-I, Uyama Hiroshi	4. 巻 278
2. 論文標題 Stimuli-responsive composite hydrogels with three-dimensional stability prepared using oxidized cellulose nanofibers and chitosan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Carbohydrate Polymers	6. 最初と最後の頁 118907 ~ 118907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbpol.2021.118907	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Pedige Madhurangika Panchabashini Horathal, Asoh Taka-Aki, Hsu Yu-I, Uyama Hiroshi	4. 巻 278
2. 論文標題 Stimuli-responsive composite hydrogels with three-dimensional stability prepared using oxidized cellulose nanofibers and chitosan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Carbohydrate Polymers	6. 最初と最後の頁 118907 ~ 118907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbpol.2021.118907	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wei Meng, Inoue Tomonori, Hsu Yu-I, Sung Moon-Hee, Fukuoka Tokuma, Kobayashi Shiro, Uyama Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Preparation of pH-Responsive Poly(-glutamic acid) Hydrogels by Enzymatic Cross-Linking	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Biomaterials Science & Engineering	6. 最初と最後の頁 551 ~ 559
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsbmaterials.1c01378	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhang Luwei, Wang Yan, Zhang Wanjun, Hsu Yu-I, Asoh Taka-Aki, Qi Baoyun, Uyama Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Robust Dual-Biomimetic Titanium Dioxide-Cellulose Monolith for Enrichment of Phosphopeptides	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Biomaterials Science & Engineering	6. 最初と最後の頁 2676 ~ 2683
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsbmaterials.2c00385	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Soni Raghav, Asoh Taka-Aki, Hsu Yu-I, Uyama Hiroshi	4. 巻 29
2. 論文標題 Freshwater-durable and marine-degradable cellulose nanofiber reinforced starch film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cellulose	6. 最初と最後の頁 1667 ~ 1678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10570-021-04410-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takawa Shun, Sugawara Akihideo, Asoh Taka-Aki, Nandi Mahasweta, Uyama Hiroshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Composite hydrogels of bacterial cellulose and an ethylene-vinyl alcohol copolymer with tunable morphological anisotropy and mechanical properties	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Advances	6. 最初と最後の頁 5138 ~ 5150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2MA00204C	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xie Zhengtian, Li Linxuan, Hsu Yu I, Asoh Taka Aki, Uyama Hiroshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Citric acid functionalized cellulose monolith for continuous flow removal of cationic dye in water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Select	6. 最初と最後の頁 930 ~ 938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nano.202100185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugawara Akihideo, Asoh Taka-Aki, Takashima Yoshinori, Harada Akira, Uyama Hiroshi	4. 巻 51
2. 論文標題 Thermoresponsive Hydrogels Reinforced with Supramolecular Cellulose Filler	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 145 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.210658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cui Xinnan, Hiraoka Takeshi, Honda Toshiki, Hsu Yu-I, Asoh Taka-Aki, Uyama Hiroshi	4. 巻 202
2. 論文標題 Oligoether grafting on cellulose microfibers for dispersion in poly(propylene glycol) and fabrication of reinforced polyurethane composite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Science and Technology	6. 最初と最後の頁 108595 ~ 108595
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compscitech.2020.108595	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lyu Yanting, Asoh Taka-Aki, Uyama Hiroshi	4. 巻 177
2. 論文標題 Hierarchical silica monolith prepared using cellulose monolith as template	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer Degradation and Stability	6. 最初と最後の頁 109164 ~ 109164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polyimdegradstab.2020.109164	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chashiro Kenta, Iwasaki Satoshi, Hasegawa Takahiro, Maruyama Jun, Maruyama Shohei, Pal Ananya, Nandi Mahasweta, Uyama Hiroshi	4. 巻 323
2. 論文標題 Integrating polyacrylonitrile (PAN) nanoparticles with porous bacterial cellulose hydrogel to produce activated carbon electrodes for electric double-layer capacitors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microporous and Mesoporous Materials	6. 最初と最後の頁 111209 ~ 111209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.micromeso.2021.111209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wei Meng, Hsu Yu-I, Asoh Taka-Aki, Sung Moon-Hee, Uyama Hiroshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Injectable poly(-glutamic acid)-based biodegradable hydrogels with tunable gelation rate and mechanical strength	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry B	6. 最初と最後の頁 3584 ~ 3594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1TB00412C	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugawara Akihide, Asoh Taka-Aki, Takashima Yoshinori, Harada Akira, Uyama Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Mechano-Responsive Hydrogels Driven by the Dissociation of a Host-Guest Complex	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 971 ~ 977
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.1c00357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Du Peng, Wang Juan, Hsu Yu-I, Uyama Hiroshi	4. 巻 36
2. 論文標題 Hydrophobic Association Hydrogel Enabled by Multiple Noncovalent Interactions for Wearable Bioelectronics in Amphibious Environments	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 1318 ~ 1332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.3c02454	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Juan, Du Peng, Hsu Yu-I, Uyama Hiroshi	4. 巻 480
2. 論文標題 Rapid preparation of dynamic-crosslinked nanocomposite hydrogel sensors with efficiency self-healing and adhesion properties for elderly health and sleep management	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 148324 ~ 148324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2023.148324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Juan, Du Peng, Hsu Yu-I, Uyama Hiroshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Cellulose Luminescent Hydrogels Loaded with Stable Carbon Dots for Duplicable Information Encryption and Anti-counterfeiting	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chemistry & Engineering	6. 最初と最後の頁 10061 ~ 10073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.3c01838	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Haji Abdul Hamid Izzah Durrati, Soni Raghav, Hsu Yu-I., Uyama Hiroshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Effect of pH on water durability of cellulose nanofiber-reinforced starch film	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Material Cycles and Waste Management	6. 最初と最後の頁 723 ~ 730
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10163-023-01828-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jia Yuxiang, Hsu Yu-I., Uyama Hiroshi	4. 巻 299
2. 論文標題 A starch-based, crosslinked blend film with seawater-specific dissolution characteristics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Carbohydrate Polymers	6. 最初と最後の頁 120181 ~ 120181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbpol.2022.120181	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 高性能多糖類複合材料の創製と生分解性材料開発への展開
3. 学会等名 関西若手高分子セミナー@阪大 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Uyama
2. 発表標題 Plant-based Bioplastics for Sustainable Development: Recent Progress and Advancement
3. 学会等名 Pacific Polymer Conference 2022 (PPC-17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 バイオプラスチック導入における高分子科学からの課題
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会 春の研究討論会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 持続可能な社会の実現にはプラスチック問題解決が不可欠
3. 学会等名 第11回化学フェスタ（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Uyama
2. 発表標題 Plant-based Bioplastics for Sustainable Development: Recent Progress and Advancement
3. 学会等名 POLYSOLVAT-13（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 バイオ由来機能性高分子材料の開発
3. 学会等名 高分子学会 高分子同友会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 今、プラスチックに求められること ~プラスチックリサイクル、バイオプラスチック、海洋プラスチックごみ問題~
3. 学会等名 プラスチック問題講座(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 バイオベース ソフトマテリアル
3. 学会等名 粘着研究会第171回例会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 セルロース修飾法としての クエン酸変性の魅力と可能性
3. 学会等名 関西接着ワークショップ2020年度第1回研究会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Uyama
2. 発表標題 Plant-based Bioplastics for Sustainable Development: Recent Progress and Advancement
3. 学会等名 Sino-Japan Medical Textiles Forum(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Uyama
2. 発表標題 Bio-based Polyurethanes for Sustainable Development
3. 学会等名 The 5th International PU Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 多糖類を基盤とする 海洋生分解性プラスチック
3. 学会等名 第201回ファイラー研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 プラスチックとの共生
3. 学会等名 西日本プラスチック製品工業協会 定時総会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇山 浩
2. 発表標題 バイオベース透明材料の創製と環境対応応用
3. 学会等名 高分子学会 23-1フォトニクスポリマー研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Uyama
2. 発表標題 Environmentally Friendly Materials Using Biomass Resources
3. 学会等名 80th Anniversary Symposium of the Tohoku Branch Chemical Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	徐 于懿 (HSU YU-1) (10757678)	大阪大学・工学研究科・准教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------