

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02785

研究課題名（和文）クリック反応によるブロック共重合体体積分率の精密制御と3次元共連続ナノ構造の創成

研究課題名（英文）Precise Control of Block Copolymer Volume Fraction and Creation of 3D Bicontinuous Nanostructures by through Click Reactions

研究代表者

早川 晃鏡 (Hayakawa, Teruaki)

東京工業大学・物質理工学院・教授

研究者番号：60357803

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：高分子における3次元共連続ナノ構造の高信頼性創成技術の開拓を目的に、クリック反応によるブロック共重合体の精密な体積分率制御を軸にした物質創成技術の確立に成功し、未だ解明されていない基礎的な課題を解決するとともに幅広い発展が望めるナノ構造材料に展開するための研究基盤づくりにも道筋を立てることができた。特に、本合成技術の確立が従来の研究で再現性に乏しかったジャイロイド界面に代表される3次元共連続構造の形成を確実なものにできたことは大きな成果であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、クリック反応による化学組成制御を基にブロック共重合体の体積分率を精密に制御し、多様な3次元共連続ナノ構造の創製に成功した。特に、ジャイロイドやFdddの3次元共連続構造形態を高い再現性で形成できる物質創成技術を新しく確立することができたことは、学術研究の基盤づくりにも大きな貢献を果たしたと言える。これはナノ材料の創製技術における重要な進展であり、学術的には高分子の一次構造から高次構造に至る精密制御と多様性の実現について理解を深めることができ、また社会的には新たなナノ材料の開発や既存の材料性能の改善に資する可能性を示すことに繋がったと言える。

研究成果の概要（英文）：With the aim of pioneering highly reliable technology for creating three-dimensional co-continuous nanostructures in polymers, we succeeded in establishing a material creation technology based on precise volume fraction control of block copolymers by the click reaction, thereby solving fundamental issues that have not yet been clarified and creating a research foundation for developing nanostructured materials that have broad potential for development. The establishment of this synthesis technology was particularly important for the development of nanostructured polymer materials. In particular, it was a significant achievement that the establishment of this technology ensured the formation of three-dimensional co-continuous structures, such as gyroid interfaces, which had been difficult to reproduce in previous research.

研究分野：高分子化学

キーワード：ブロック共重合体 クリック反応 体積分率 3次元共連続ナノ構造 ミクロ相分離 ジャイロイド 精密構造制御

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3次元共連続ナノ構造は、ソフトマテリアル(例えば、高分子ブロック共重合体や液晶分子)の自己集合により形成される独特な特性を有している。そのナノメートル単位の精密さと3次元的な広がりを持つ共連続構造は、物質輸送を必要とする電池や海水淡水化フィルタといった最先端デバイス材料への応用が長年期待されてきた。しかしながら、これらの構造の潜在的な可能性があるにもかかわらず、積極的に材料創成に利用された例はなかった。その主な理由として、例えば、特定のブロック共重合体に限定されること、ジャイロイド界面を有する3次元共連続ナノ構造の形成において再現性に乏しいことなどが挙げられる。すなわち、材料展開に向けた精密構造制御および創成技術における十分な研究基盤が確立されていないことが背景にあった。また、パーフォレーテッドラメラ構造、ダブルダイヤモンド構造、Fddd構造等の他の多様な3次元共連続ナノ構造形態についても、それらの学術的研究は初期段階に留まっており、機能材料創成への道は未だ開拓されていない状況にあった。

3次元共連続ナノ構造を形成する条件は、非常に狭い範囲で許容される組成比率が必要とされる。そのため、精密重合法、ポリマーブレンド法、溶媒アニリング法など、様々な手法を用いても、これらの要件を高い再現性をもって満たすことは困難であった。すなわち、本研究領域の課題は、3次元共連続ナノ構造を形成するための物質創成および構造制御技術における研究基盤が十分に確立されていないことにあり、ソフトマテリアルによる潜在的な機能が利用できる新たな材料開発に繋がっていないことにある。それゆえに、申請者は、これらの課題を克服し未開拓であった3次元共連続ナノ構造の高信頼性創成技術の開拓を目標に掲げ、共連続構造の特徴を活かすことのできる新たなナノ構造材料研究に繋がる研究基盤の構築を期待し、本研究を開始した。

2. 研究の目的

高分子や液晶分子に代表されるソフトマテリアルの自己集合とそれを利用する構造形成はボトムアッププロセスの基盤であり、この技術の発展は精微な物性機能の発現において欠かせない。本研究では、クリック反応によるブロック共重合体の精密な体積分率制御を軸にした3次元共連続ナノ構造の高信頼性創成技術の開拓に取り組み、合成技術の確立と未だ解明されていない基礎的な課題を解決し、幅広い発展が望めるナノ構造材料に展開するための研究基盤を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究計画を遂行するために、クリック反応によるブロック共重合体の精密な体積分率制御を軸とした3次元共連続ナノ構造の高信頼性創成技術の開発に取り組んだ。主に、以下の4つの項目を目標に掲げ、年度毎に段階的に実施した。

- (1) クリック反応による多様な官能基導入の探索と反応条件の最適化
- (2) 側鎖導入量/体積分率/構造形態の相関解明
- (3) 薄膜の表面・断面構造解析によるナノ構造形成メカニズムの解明
- (4) ジャイロイド構造以外の多様な3次元共連続ナノ構造の創出

- (1) クリック反応による多様な官能基導入の探索と反応条件の最適化

クリック反応による多様な官能基導入の探索と反応条件の最適化を行った。具体的には、申請者らがこれまでブロック共重合体リソグラフィ研究で培ってきたチオール-エン反応やチオール-エポキシ反応を基に、更なる精密な側鎖導入率の制御を追求し、反応条件の最適化を実施した。

- (2) 側鎖導入量/体積分率/構造形態の相関解明

側鎖導入量/体積分率/構造形態の相関の解明に取り組んだ。得られたポリマーの核磁気共鳴スペクトルによる構造解析から側鎖導入量の算出を行った。側鎖導入量の異なる各々のホモポリマーの密度を算出し、その結果を基に導入量と密度の関係式を明らかにした。さらに、得られたブロック共重合体の希薄溶液から時間をかけて溶媒を揮発させることによりバルクサンプルの調製を図り、小角X線散乱(SAXS)および透過型電子顕微鏡(TEM)に基づく構造解析から3次元共連続ナノ構造形態を同定した。

- (3) 薄膜の表面・断面構造解析によるナノ構造形成メカニズムの解明

薄膜の表面・断面構造解析によるナノ構造形成メカニズムの解明を行った。具体的には、薄膜の熱処理過程における 3 次元共連続ナノ構造の相分離構造の解析を基に形成メカニズムについて考察した。

(4) ジャイロイド構造以外の多様な 3 次元共連続ナノ構造の創出

多様な 3 次元共連続ナノ構造の創出に焦点を当て、ジャイロイド以外のナノ構造形成について、先の実験で最適化を行ったクリック反応の精密な反応条件下にて、側鎖導入量を制御することで行った。

4. 研究成果

本研究では高信頼性マイクロ相分離構造創出法の開拓を目指し、ブロック共重合体 (BCP) の一成分であるポリ (メチルビニルシロキサン) (PMVS) への精密な化学修飾を通じた構造形態の創出と精密制御を目的とした。図 1 に示すように、化学修飾反応は定量的な進行で知られる thiol-ene 反応に着目し行った。反応温度、反応溶液濃度、反応時間に焦点を当て、最適化条件の検討を行った後、化学修飾率の精微な制御を実施した。

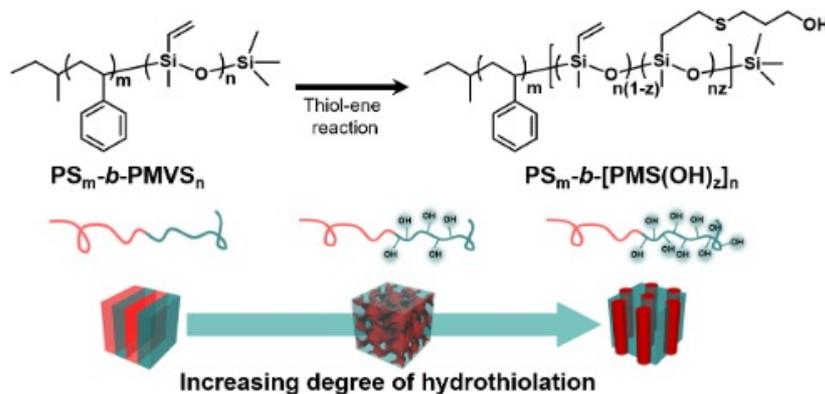


図 1. クリック反応 (thiol-ene 反応) による化学修飾率および体積分率の精密制御によるダブルジャイロイド構造の創成

基本骨格となるポリスチレン (PS) とシリコン含有 PMVS の組み合わせである BCP (PS-*b*-PMVS) は、相当するモノマーのリビングアニオン重合により合成した。得られた BCP から組成比の異なる 3 つの PS-*b*-PMVS を取り上げ、側鎖への化学修飾率が異なる BCP (PS_m-*b*-[PMS(OH)_z]_n) を得た。化学修飾率の精密制御は、反応時間を精微に調整することによって達成された。

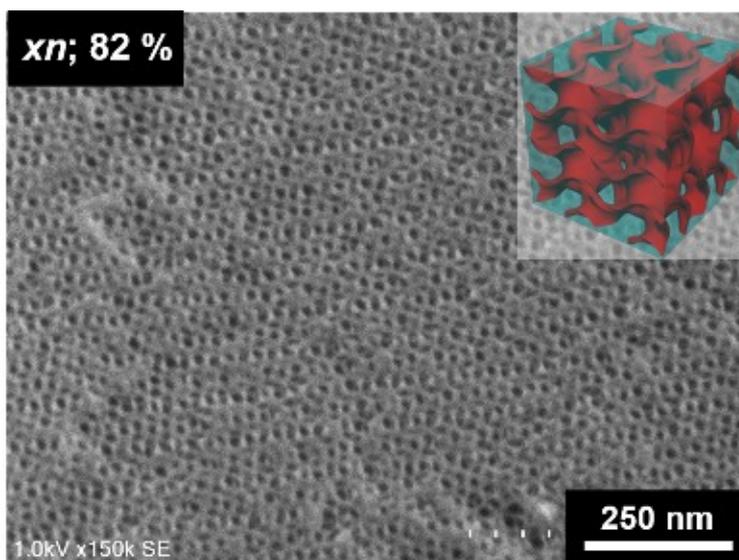


図 2. PS_m-*b*-[PMS(OH)_z]_n から得られたダブルジャイロイド構造

得られた BCP を小角 X 線散乱, 透過型電子顕微鏡, 走査型電子顕微鏡, および電子線トモグラフィを用いて構造解析を行った結果, 最も高分子量体のサンプルでは, 化学修飾率の増加に伴い, ラメラ構造からシリンダーとラメラの共存構造に構造形態が変化したことが明らかとな

った (order-to-order). また, より低分子量体のサンプルでは, 化学修飾率の増加に伴い, 秩序性が見られない disorder 状態から順にシリンダー構造, ダブルジャイロイド構造, およびシリンダーとラメラの共存構造へ構造形態が変化したことが明らかとなった (disorder-to-order). すなわち, 化学修飾率の精密な制御によって, 体積分率の微小な変化をもたらすことができたことから特殊構造形態の一つであるダブルジャイロイド構造の創出が達成されたことが示された (Figure2). また, この手法を基に同様の実験を繰り返し行っても, 高次構造に高い再現性でダブルジャイロイド構造形態が形成された. このことは, クリック反応による精密な官能基導入とそれに基づく体積分率の精密制御が3次元共連続ナノ構造の形成を確実にもたらすことを示しており, 従来のブレンド法や溶媒アニール法などに代わる新しい手法として確立することができた.

ジブロック共重合体は化学構造の異なる二種類のポリマーで構成されている. 本研究では, 両成分それぞれに対する選択的な化学修飾および架橋反応 (化学選択的デュアル修飾) を施し, 体積分率の精密制御と共に, 3次元共連続ナノ構造の創成およびその構造安定化が可能であるかを試みた. 化学的架橋はポリマーの絡み合いを化学的に固定化することから構造の固定化やそれに伴う力学物性の向上に寄与することが期待される. 本取り組みでは, a) 架橋反応に伴う体積分率の変化に着目した構造制御, b) 得られる特殊構造の固定化を目的した. 化学選択的デュアル修飾を可能とするジブロック共重合体には, ポリイソプレン (PI) とポリメタクリル酸グリシジル (PGMA) で構成された PI-*b*-PGMA を取り上げ, リビングアニオン重合を通して合成し用いた.

PGMA セグメントに対しては, thiol-epoxy 反応によりトルエンチオールを導入し, 反応時間に伴う導入率の制御に取り組んだ. その結果, 特殊構造の一つであるヘキサゴナルパックスドラメラ (HPL) 構造の創出に成功した.

a) の架橋反応に伴う体積分率の変化に着目した構造制御では, PGMA セグメントに対し液状の酸発生剤を用いることで架橋反応後に構造欠陥のない均一なシリンダー構造を得ることに成功した. b) 得られる特殊構造の固定化では, 官能基導入によって形成された特殊構造に対して, 光重合開始剤を用いることで PI セグメントの架橋を行ったところ, HPL 構造の固定化に成功した.

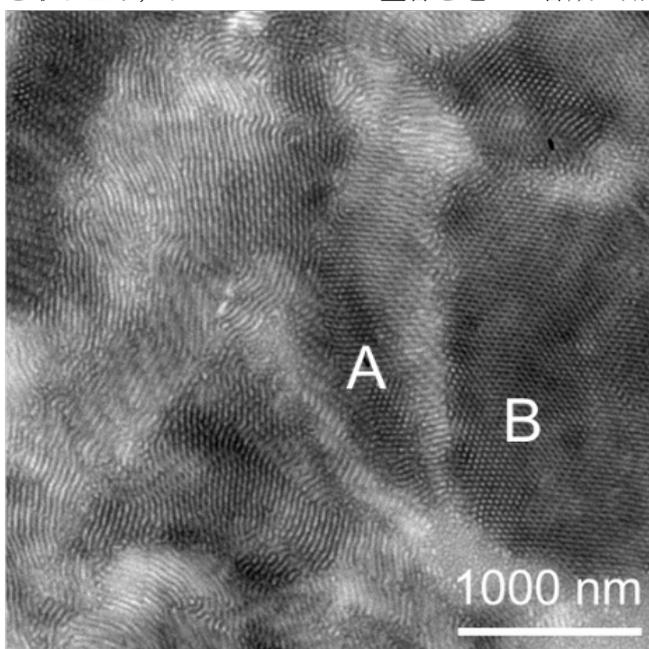
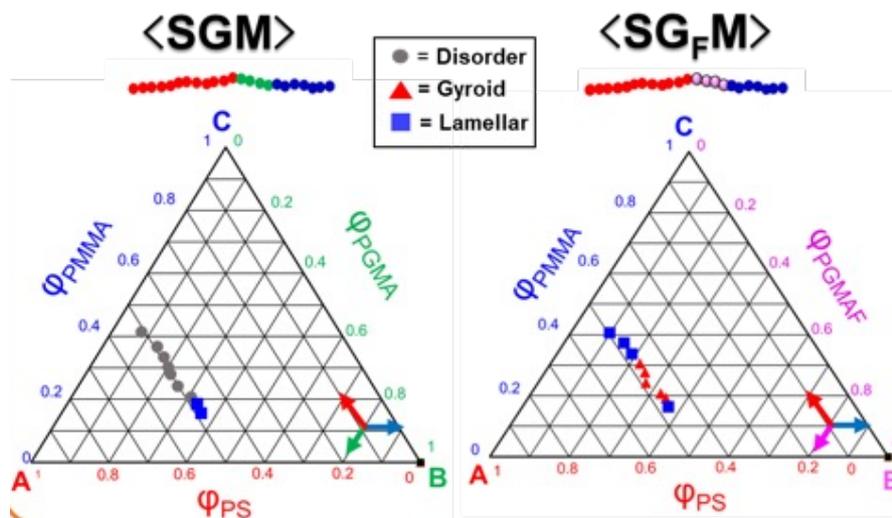
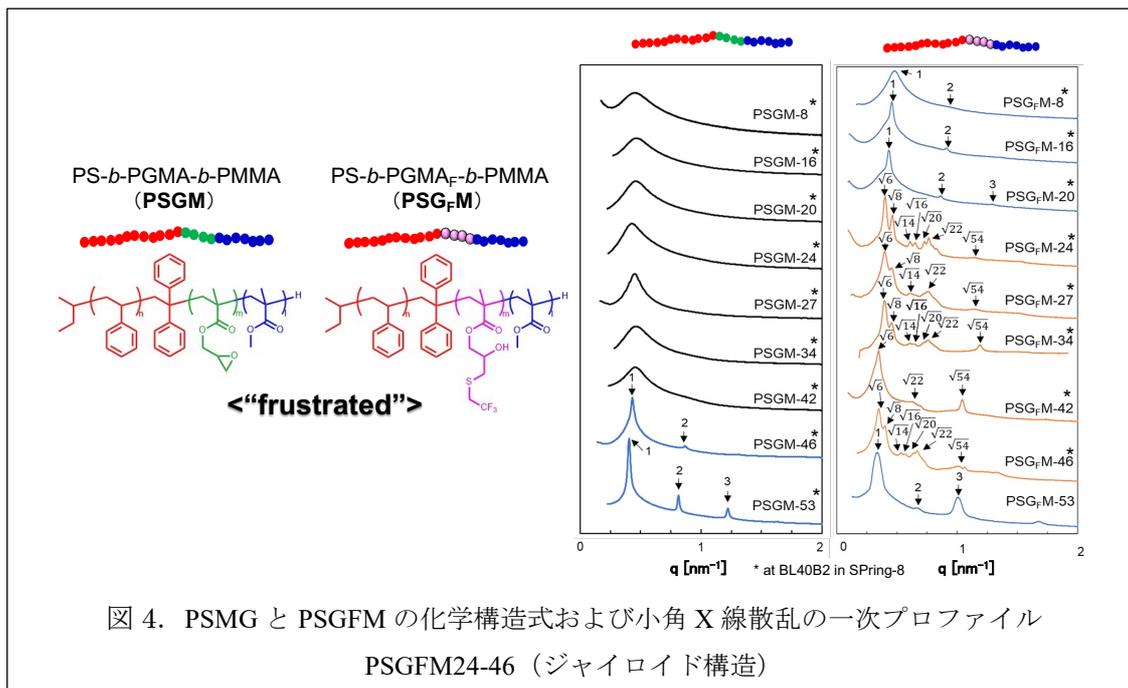


図3. 化学選択的デュアル修飾により形成された HPL 構造

トリブロック共重合体は, ジブロック共重合体よりも構成成分が一つ多く3次元共連続ナノ構造が形成される組成領域が広いことで知られる. トリブロック共重合体の一次構造は, 構成成分間の χ 値の大小関係に基づいて, 両末端成分間の χ 値が他成分間の χ 値と比較して最大である non-frustrated 構造と, 最大でない frustrated 構造の二種類に分類される. しかしながら, トリブロック共重合体の精密合成は難しく, これまでの研究の多くはシミュレーションに基づいて行われてきたため, 一次構造と高次構造形態の相関を実験研究によって明らかにした例は少ない. 本取り組みでは, これまでに蓄積してきた精密重合技術に基づき, polystyrene (PS), polymethyl methacrylate (PMMA), polyglycidyl methacrylate (PGMA), および 2,2,2-trifluoroethanethiol によって側鎖修飾された poly(glycidyl methacrylate) (PGMAF) の構成成分を有するトリブロック共重合体として, frustrated 構造に相当する PS-*b*-PGMA-*b*-PMMA (PSGM) と PS-*b*-PGFMA-*b*-PMMA (PSGFM) を取り上げて合成を行い, 3次元共連続ナノ構造の形成を試みた (図4).

トリブロック共重合体における PGMA の組成比は, ポリメタクリル酸エステル (PMMA-*b*-PGMA あるいは PGMA-*b*-PMMA) 中において, およそ 10~50 mol% に調製した. 得られたトリブロック共重合体の三角相図を図5に示す. PSGM と PSGFM を比較すると, 化学修飾を行った PSGFM の方がより広い組成範囲でジャイロイド構造が形成されることがわかった. これは, 2,2,2-trifluoroethyl 基が導入によって PSGFM の体積分率が精密に制御されるだけでなく, PSGFM が, 中央 (GF 成分) と両末端間 (S および M 成分) の χ 値に大きな差が生じていることで, 高

分子鎖が屈曲した相分離界面が形成されやすく、ジャイロイド曲面を有する 3 次元共連続ナノ構造の形成に至ったことが考えられる。



本研究の試みの一環として、PSMG と配列順序が異なり non-frustrated 構造に相当する PS-*b*-PMMA-*b*-PGMA (PSMG) のマイクロ相分離構造についても調べたところ、ジャイロイド構造の他に、Fddd 構造の形成も見出された。詳細な構造解析を必要とする段階ではあるが、本手法のクリック反応によるブロック共重合体の精密な体積分率制御に加え、ブロック共重合体を構成する配列順序の違いも 3 次元共連続ナノ構造の形成に有効であることが明らかになりつつある。これらを組み合わせた高信頼性創成技術をより確実なものにすることで、これまで再現性に乏しかった 3 次元共連続ナノ構造の創成および共連続構造の特徴を活かすことのできる新たなナノ構造材料の開発を強く推進することができると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kurimoto Sho, Tong Liang, Maeda Hayato, Nabae Yuta, Hayakawa Teruaki	4. 巻 222
2. 論文標題 Long Range Ordered Double Gyroid Structures via Solution Casting from Poly(2,2,2-trifluoroethyl methacrylate) <i>poly(2-vinyl pyridine)</i>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecular Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 2100272 ~ 2100272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/macp.202100272	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 Maeda Hayato, Nabae Yuta, Hayakawa Teruaki	4. 巻 34
2. 論文標題 Orientation Control of the Microphase-separated Nanostructures of Block Copolymers on Polyimide Substrates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 439 ~ 448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.34.439	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 Komamura Takahiro, Nabae Yuta, Hayakawa Teruaki	4. 巻 34
2. 論文標題 Self-assembly of Crosslinked Polyimides Templated by Block Copolymers for Fabrication of Porous Films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 431 ~ 437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.34.431	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 Manabe Kei, Tsai Sung-Yu, Kuretani Satoshi, Kometani Satoshi, Ando Katsuyuki, Agata Yoshihiro, Ohta Noboru, Chiang Yeo-Wan, Lin I-Ming, Fujii Syuji, Nakamura Yoshinobu, Chang Yu-Ning, Nabae Yuta, Hayakawa Teruaki, Wang Chien-Lung, Li Ming-Chia, Hirai Tomoyasu	4. 巻 1
2. 論文標題 Chiral Silica with Preferred-Handed Helical Structure via Chiral Transfer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JACS Au	6. 最初と最後の頁 375 ~ 379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacsau.1c00098	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 Yoshimura Tomoka, Morishita Tomofumi, Agata Yoshihiro, Nagashima Kodai, Wylie Kevin, Nabaе Yuta, Hayakawa Teruaki, Ouchi Makoto	4. 巻 55
2. 論文標題 Long-Range Ordered Lamellar Formation with Lower Molecular Weight PS-PMMA Block Copolymers: Significant Effects of Discrete Oligopeptides at the Junction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 2148 ~ 2159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.1c02569	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 Yoshida Erina, Nabaе Yuta, Hayakawa Teruaki	4. 巻 35
2. 論文標題 Synthesis and Higher-order Structural Characterization of Polyimides Containing Chain-length-controlled Polysiloxanes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 265 ~ 270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.35.265	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 Lin Zhengdan, Nabaе Yuta, Hayakawa Teruaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Control of microphase-separated structures by tuning the functional groups and the degree of modification for a single block copolymer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Polymer Chemistry	6. 最初と最後の頁 2045 ~ 2053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2PY01435A	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 Tong Liang, Nabaе Yuta, Hirai Tomoyasu, Yabu Hiroshi, Hayakawa Teruaki	4. 巻 224
2. 論文標題 Creation of Thermal Response Ordered Mesostructure Polymer Particles Using Diblock Copolymers via 3D Confined Self Assembly	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Macromolecular Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 22004021-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/macp.202200402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計41件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 16件）

1. 発表者名 前川伸祐, Dong Lei, 太宰尚宏, 宮城賢, 森貴敬, 佐藤和史, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 化学修飾型PS-b-PMMA誘導体の合成と薄膜構造制御
3. 学会等名 第70回 高分子年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原仁美, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 RAFT重合によるポリ(4-ビニルピリジン)-b-ポリ(メタクリル酸2,2,2-トリフルオロエチル)の合成と高次構造解析
3. 学会等名 第70回 高分子学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原仁美, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 階層的多孔構造形成を指向したポリ(4-ビニルピリジン)-b-ポリ(メタクリル酸 2,2,2-トリフルオロエチル)の合成と自己組織化構造解析
3. 学会等名 第70回 高分子討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原仁美, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 階層的ナノ構造形成を目指したポリ(4-ビニルピリジン)-b-ポリ(メタクリル酸2,2,2-トリフルオロエチル)の合成と性質
3. 学会等名 第31回 日本MRS年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Post-functionalizing Block Copolymers For Creating and Controlling Precise Morphologies
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Chemically Tailored Block Copolymers For Patternable Nanostructured Materials
3. 学会等名 MNC 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Designed Functional Block Copolymers as a Versatile Platform For Nanoscale Periodic Structured Materials
3. 学会等名 Future of Polymer Chemistry, KAIST Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Post-functionalization of Block Copolymers as a Versatile Platform of Functional Materials
3. 学会等名 The 48th World Polymer Conference, IUPAC-MACRO+ (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Lei Dong, Kevin Wylie, Ryuichi Nakatani, Yuta Nabae, Teruaki Hayakawa, Takahiro Dazai, Ken Miyagi, Takayoshi Mori, Daisuke Kawana
2. 発表標題 Downsizing the Thin Film Domain of Poly(styrene-block-methyl methacrylate) by Introducing Fluorine to Randomly Pre-polymerized Functional Units
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永島功大, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 ジブロック共重合体の化学選択的デュアル修飾を利用する高次構造制御
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安形佳宏, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 一分子のセミフルオロアルカンを化学結合点に有するブロック共重合体の合成と ミクロ相分離構造
3. 学会等名 第69回高分子年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永島功大, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 化学選択的デュアル修飾を可能とするブロック共重合体の創成
3. 学会等名 第69回高分子年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前川伸祐, 瀬下武広, 太宰尚宏, 佐藤和史, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 強偏析性PS-b-PMMA誘導体の精密合成と誘導自己組織化による長距離ドメイン配列制御
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinsuke Maekawa, Takehiro Seshimo, Takahiro Dazai, Kazufumi Sato, Yuta Nabee, Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Synthesis of Chemically Tailored PS-b-PMMA Derivatives for Directed Self-Assembly
3. 学会等名 The 6th 2022 DSA Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Hayakawa, Shinsuke Maekawa, Yuta Nabee, Takehiro Seshimo, Takahiro Dazai, Kazufumi Sato
2. 発表標題 Chemically Tailored Block Copolymers For Directed Self-Assembly
3. 学会等名 The 6th 2022 DSA Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永島功大, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 Control of Higher-Order Structures of Diblock Copolymers by Modification of Side Chain Functional Groups
3. 学会等名 第71回高分子年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kodai Nagashima, Yuta Nabaе, Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Dual Modification of a Diblock Copolymer for Structural Tuning and Cross-linking to Obtain Immobilized Perforated Lamella
3. 学会等名 The 6th 2022 DSA Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Erina Yoshida, Yuta Nabaе, Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Synthesis and Higher-order Structural Characterization of Polyimides Containing Chain-length-controlled Polysiloxanes
3. 学会等名 The 39th International Conference of Photopolymer Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田絵里菜, 前田颯, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 鎖長制御されたポリシロキサン含有ポリイミドの合成および高次構造解析
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Erina Yoshida, Hayato Maeda, Yuta Nabaе, Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Synthesis and Higher-order Structural Characterization of Polyimides Containing Polysiloxane with Controlled Chain Lengths
3. 学会等名 Polycondensation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田絵里菜, 前田颯, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 鎖長を制御したポリシロキサン含有ポリイミドの合成と高次構造解析
3. 学会等名 日本化学会秋季事業 第12回 CSJ化学フェスタ2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田絵里菜, 前田颯, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 鎖長を制御したポリシロキサンを含むポリイミドの合成および高次構造解析
3. 学会等名 第30回日本ポリイミド・芳香族系高分子会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhengdan Lin, Yuta Nabae, Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Post-Functionalization of Block Copolymers via Click Chemistry for Controlling the Microphase-Separated Structures
3. 学会等名 The 16th International Conference & Expo on UV/EV Curing in Asia (RadTech Asia 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhengdan Lin, Yuta Nabae, Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Synthesis of Side-Chain Type Block Copolymers via Click Chemistry and Control of Microphase-Separated Structural Morphology
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前田颯, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 ブロック鎖長に分布をもたないブロック共重合型ポリイミドの創成
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hayato Maeda, Yuta Nabae, Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Synthesis of Block-Copolymerized Polyimide with No Distribution of Block-Chain Lengths
3. 学会等名 Polycondensation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前田颯, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 ブロック鎖長に分布をもたない剛直・柔軟マルチブロックポリイミドの創成
3. 学会等名 第30回日本ポリイミド・芳香族系高分子会議 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早川晃鏡
2. 発表標題 Directed Self-Assembly (DSA) 技術の基礎と新規ブロック共重合体材料の開発
3. 学会等名 新化学技術推進協会 電子情報技術部会 ナノフォトニクスエレクトロニクス交流会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinsuke Maekawa, Lei Dong, Takehiro Seshimo, Takahiro Dazai, Kazufumi Sato, Yuta Nabee, Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Strongly-segregating Chemically Tailored Block Copolymers For Perpendicularly Oriented and Long-range Ordered Nanostructures in Thin Films
3. 学会等名 The 17th Pacific Polymer Conference (PPC17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Hayakawa
2. 発表標題 Strongly-segregating Chemically Tailored Block Copolymers For sub-10 nm Patterning
3. 学会等名 The 16th International Conference & Expo on UV/EV Curing in Asia (RadTech Asia 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早川晃鏡
2. 発表標題 Directed Self-Assembly (DSA) 技術の基礎と高分子材料開発
3. 学会等名 第52回UV/EB表面加工入門講座実践編 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Hayakawa, Shinsuke Maekawa, Yuta Nabee, Takehiro Seshimo, Takahiro Dazai, Kazufumi Sato
2. 発表標題 Directed Self-Assembly Materials by Strongly Segregating PS-b-PMMA Derivatives
3. 学会等名 15th Japan-Belgium Symposium on Polymer Science 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Hayakawa, Shinsuke Maekawa, Yuta Nabae, Takehiro Seshimo, Takahiro Dazai, Kazufumi Sato
2. 発表標題 Chemically Tailored Block Copolymers Based on Polystyrene-b-Polymethacrylates For DSA Patterning
3. 学会等名 SPIE. Advanced Lithography+Patterning (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田絵里菜, 前田颯, 難波江裕太, 早川 晃鏡
2. 発表標題 機能分離型ポリシロキサン含有ポリイミドの合成および高次構造解析
3. 学会等名 第72回高分子年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮森雄大, 難波江裕太, 早川 晃鏡
2. 発表標題 ポリ(2,2,2-トリフルオロエチルメタクリレート-b-スチレン-b-4-ビニルピリジン)の合成とマイクロ相分離構造の形成
3. 学会等名 第72回高分子年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上原綾太, 前川伸祐, 瀬下武広, 太宰尚宏, 佐藤和史, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 リビングアニオン重合によるポリスチレンおよびポリメタクリレートに基づくABC/ACBトリブロック共重合体の合成と高次構造解析
3. 学会等名 第72回高分子年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前川伸祐, 瀬下武広, 太宰尚宏, 佐藤和史, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 強偏析性PS-b-PMMA誘導体の誘導自己組織化による線幅10 nm以下のラインパターンの創製
3. 学会等名 第72回高分子年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Lei Dong, Kevin Wylie, Ryuichi Nakatani, Yuta Nabae, Teruaki Hayakawa, Takahiro Dazai, Ken Miyagi, Takayoshi Mori, Daisuke Kawana
2. 発表標題 Downsizing the Thin Film Domain of Poly(styrene-block-methyl methacrylate) by Introducing Fluorine to Randomly Pre-polymerized Functional Units
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永島功大, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 ジブロック共重合体の化学選択的デュアル修飾を利用する高次構造制御
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安形佳宏, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 一分子のセミフルオロアルカンを化学結合点に有するブロック共重合体の合成とマイクロ相分離構造
3. 学会等名 第69回高分子年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永島功大, 難波江裕太, 早川晃鏡
2. 発表標題 化学選択的デュアル修飾を可能とするブロック共重合体の創成
3. 学会等名 第69回高分子年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 METHOD OF PRODUCING BLOCK COPOLYMER CAPABLE OF CREATING SPECIFIC STRUCTURE PATTERN	発明者 Teruaki HAYAKAWA et al.	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、20200262960	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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

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