

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02759

研究課題名(和文)円偏光による結合回転制御に基づくキラル高分子構造の構築

研究課題名(英文)Construction of chiral macromolecular structure through controlled chemical bond rotation by circularly polarized light irradiation

研究代表者

中野 環 (Nakano, Tamaki)

北海道大学・触媒科学研究所・教授

研究者番号：40227856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：円偏光による不斉誘起を直鎖型高分子、規則的な分岐構造を有する有機構造体さらには機能性低分子に適用しらせん構造あるいはねじれ構造を誘起した。直鎖型高分子であるポリナフタレン誘導体への不斉誘起を検討し、基底状態での不斉重合と円偏光法では異なるキラル構造が誘起されることを見出した。また、ベンゼン環が規則正しく結合した有機構造体内部の単結合回りのねじれを円偏光法により一方向巻きに制御した。さらに、青色発光を示す低分子化合物への円偏光照射により高い効率で不斉誘起し、加えて、キラル化した化合物が高効率な円偏光発光体となり青色円偏光LEDの素材として有望であることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質のキラリティーは人の生活に極めて重要な役割を果たし、光学活性物質の合成手法開発は重要である。医薬品等を含む光学活性物質は、従来、基底状態での化学(主に不斉配位子等の不斉源とする合成および光学異性体の分割)により調製されてきたが、本研究では、光のキラリティー(円偏光)を用いる新手法を開発した。本手法はキラル源となる化学物質を必要とせず、副生成物もほぼ発生せず、光エネルギーと非対称性のみに基づいて光学活性物質の調製を可能にするものであり、持続可能な社会形成の観点から社会的な意義は大きい。加えて、従来の基底状態化学とは全く異なる原理による物質の構造制御を探求するものであり学術的意義も深い。

研究成果の概要(英文)：The chirality induction method based on chirality of circularly polarized light (CPL) was applied for linear polymers, covalent organic framework (COF) with regular, inner branching, and functional small molecules. A polynaphthalene derivative, a linear polymer, was found to be induced different types of chiral structure through the asymmetric polymerization method and through the CPL irradiation method. Also, the CPL irradiation method led COFs composed of benzene rings to optically active materials with preferred-handed twist around single bonds connecting benzene rings. Furthermore, a series of blue-light emitting small molecules were induced chirality at high efficiency through the CPL irradiation method, and the resulting optically active materials were found to emit circularly polarized luminescence at high anisotropy in blue color, which make them good candidates of blue-CPL-emitting OLED.

研究分野：高分子化学

キーワード：円偏光 らせん ねじれ構造 励起状態 有機構造体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高分子キラル構造の代表例はらせん構造であり、らせん型高分子は、分離、触媒、発光等の機能を示す重要な物質であるため、その合成法の開発は重要である。キラル高分子合成の主な手法は、キラルモノマーの重合、アキラルモノマーの不斉重合、および高分子鎖と外部分子の相互作用制御の3つであり、これらは、基底状態での物質構造の安定性にその基礎を置くものである。これに対して、本研究では、(a)高分子の基底状態および励起状態での安定構造、(b)基底状態から励起状態への遷移に基づく構造変化、および、(c)励起状態から基底状態への失活に伴う構造変化、の三要素を考慮して高分子を設計・合成する。さらに、合成した高分子にキラルな光である円偏光(Circularly Polarized Light, CPL)を照射してキラル構造を可逆に誘起する。

高分子設計の中核となるのは基底状態と励起状態で際立って異なる構造を持つ分子構造である。その代表がビフェニルに代表される Ar-Ar 型の構造である。ビフェニル型分子は基底状態ではねじれたキラル構造(軸不斉構造)を有するが、励起状態ではアキラルな共平面構造へと変わる(Hoffmann et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **1968**, *90*, 5739)(図 1A)。円偏光を用いて励起すると基底状態の左右のねじれの一方が優先的に励起

されて共平面へと変わり(光による選択的な結合の回転)(Twisted-Coplanar Transition (TCT))、これが基底状態へと失活する際には左右両方のねじれを作る。従って、優先的に励起されなかったねじれが増加し系全体が光学活性となる。失活の際に分子間相互作用を通じてキラル増幅機構が働き、ねじれの偏りはべき乗関数的に増加する。

我々は、円偏光(CPL)を用いてらせん構造を有する光学活

性なポリ(9,9-ジオクチルフルオレニル-2,7-ジイル)(PDOF)を得ることに成功した[Wang, Y.; Harada, T.; Phuong, L. Q.; Kanemitsu, Y.; Nakano, T. *Macromolecules* **2018**, *51*, 6865-6877; Wang, Y.; Sakamoto, T.; Nakano, T. *Chem. Commun.* **2012**, *48*, 1871-1873]。PDOF 主鎖を構成する軸不斉な芳香環-芳香環(Ar-Ar)結合の回転が円偏光励起により促進されることがらせん構造形成の原因である。等量の左右のねじれ構造が主鎖を構成する PDOF はランダムなコンホメーションを有するが、円偏光により一方のねじれが優先的に共平面構造へと転移し、共平面構造は左右のねじれ構造へと失活する。この過程を繰り返すことにより優先的に励起されなかったねじれの比率が増加し、偏ったらせん構造が形成する(図 1B)。

2. 研究の目的

本研究では、まず、円偏光法を高分子のキラル高次構造制御法として一般化することを目的として、これまでの適用対象がポリフルオレン類のみであったところ、他の化学構造を有する直鎖状共役高分としてのポリナフタレン、および、規則的な枝分かれ構造を有しベンゼン単位から成る高分子である有機構造体(Covalent Organic Framework: COF)へと拡張する。COF

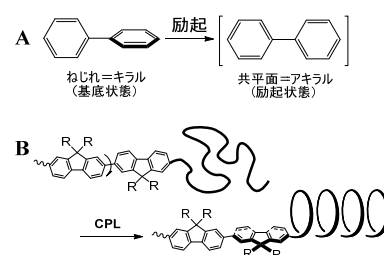


Fig. 1. TCT of biphenyl (A) and single-handed helix induction to linear polyfluorenes using CPL (B).

は触媒担体あるいは触媒として注目されている物質だが、固体高分子であり分析が困難であるため内部構造の立体制御についての研究例はほとんどない。この点について、本研究では固体核磁気共鳴スペクトル法により内部回転速度に関する情報を得、不斉誘起との関係を調べる。加えて、研究対象を高分子から低分子へと拡張する。一般に円偏光の結合回転の左右選択性は極めて低く、実用的なキラル構造誘起には分子間相互作用に基づくキラル増幅が必須であった。このため、円偏光法は結晶的ドメイン中で強い分子間相互作用を示す高分子量の直鎖試料に対してのみ主に有効であり、適用範囲は限定的であった。特に、高分子より以前から研究されている低分子化合物に対する円偏光の選択性は低く、効果的なキラル誘起例は極めて少ない(Soai K. *et al.*, *Nature* **1995**, 378, 767; *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, 127, 3274.)。本研究では、この点について分子会合を利用して解決を図る。

3. 研究の方法

研究対象となる高分子は以下に示す方法で合成しスペクトル法等により構造同定した。円偏光法による不斉誘起実験に用いる薄膜試料は溶液キャスト法により調製した。円偏光は500W Hg-Xe ランプ光源から得られる光を直線偏光素子およびフレネルロムを用いて変調することにより得た。薄膜のキラル構造に関しては、主に円偏光二色性(CD)スペクトルにより評価した。

4. 研究成果

まず、直鎖型高分子として1,4-ジブロモナフタレンのクロスカップリング重合反応によりポリ(ナフタレン-1,4-ジイル) を合成し不斉誘起を検討した。1,4-ジブロモナフタレンはNi(II)触媒を用いたKumadaカップリング重合により効率よく重合した(図2)。生成物は比較的低分子量(1000程度)の可溶性ポリ(ナフタレン-1,4-ジイル) とより高分子量の不溶性成分を含むものであった。可溶性ポリマーを溶液キャスト法により薄膜化し

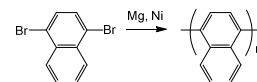


Fig. 2. Synthesis of poly(naphthalene-1,4-diyl).

てHg-Xeランプを光源として用いて円偏光照射したところ、薄膜はキラル構造に基づくCDスペクトルを示した。この結果より、円偏光による不斉誘起は従来検討してきたポリフルオレン類に限定されず、共役系高分子一般に適用できることが示唆された。次に、円偏光により誘起されたキラル構造の詳細について知見を得るため、基底状態での不斉重合反応により同じ化学構造を有する光学活性ポリナフタレンを標品として合成した。不斉重合により強いCDスペクトルを示すキラル高分子が得られたが、スペクトルパターンは円偏光を用いて調製した光学活性体とは異なっており、円偏光法および不斉重合法では異なるキラル構造が構築されている可能性が高い。二つの方法で発生する高次構造の詳細については検討中である。

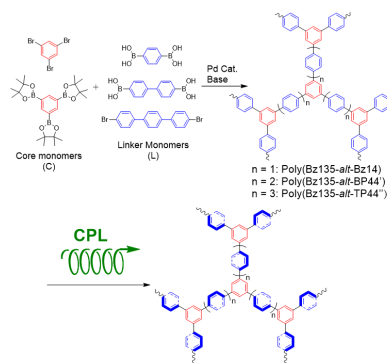


Fig. 3. Synthesis of COFs and HBP composed of benzene rings and chirality induction of them by CPL.

次に、枝分かれ構造を有する固体高分子に対する不斉誘起を検討した。従来、高分子構造の制御研究は主に直鎖状高分子に対して行われてきたが、近年、枝分かれ構造や架橋構造を有する固体高分子材料の機能が注目されていることに伴い、これらに対する構造制御法の開発が求められている。固体高分子の一つに周期的な枝分かれ構造を内部に有する有機構造体 (Covalent Organic Framework, COF)がある。COFには内部に空

孔を有するものもあり、触媒活性物質の担体等としての機能が期待されている。本研究では、COFの構造制御研究の一環として、COFへのキラル構造導入について検討した。まず、枝分かれコア部分の原料としての1,3,5-トリブロモベンゼンあるいは1,3,5-トリス(4,4,5,5-テトラメチル-1,3,2-ジオキサボロラン-2-イル)ベンゼンとコア部を連結するリンカー部分の原料としての1,4-ビス(ジヒドロキシボラニル)ベンゼン、4,4'-ビス(ジヒドロキシボラニル)-1,1'-ビフェニル、4,4'-ジプロモ-1,1':4',1''-テルフェニルとのPd触媒を用いた鈴木宮浦カップリング反応により3種のCOFを合成した (図3)。この合成反応においては溶媒に不溶なCOFに加えて、枝分かれ構造を有する可溶性高分子 (ハイパーブランチポリマー) が同時に得られた。3種のCOFはいずれもベンゼン-ベンゼン残基からなり、ベンゼン環とベンゼン環をつなぐ単結合回りの軸不斉

が可能である。この点に着目し、COFにキラル源としての円偏光(CPL)を照射して軸不斉構造を一方向に偏らせることにより光学活性COFの調製を試みた。この方法により、リンカー部としてテルフェニル残基を有するCOF(図2中の $n=3$ の構造)は光学活性へと変化し、その過程では不斉増幅が起きることが見出された (図4)。しかし、他の2種のCOF(図1中の $n=1$ および2の構造)は円偏光照射に反応を示さなかった。尚、可溶性ハイパーブランチポリマーは n 数に関わらず円偏光照射により容易に光学活性化した。これらの結果より、 $n=1$ および2のCOFが $n=3$ のCOFおよび可溶性のハイパーブランチポリマーと比べて高い剛直性を有することが円偏光に反応しない原因ではないかと考えられた。この点について定量的な情報を得ることを目的として3種のCOFの固体NMRスペクトル測定を行った (図5)。まず、CPMASNMRスペクトルによりCOFを構成する炭素の緩和時間を測定したところ、 $n=3$ のCOFはより短い緩和時間を示し他のCOFより剛直な構造を有することが示唆された。さらに、"center band only detection exchange" (CODEX)法を適用して、内部のベンゼン-ベンゼン単結合回りの運動に要する時間に関連する相関時間(t)を求めたところ、 $n=3$ のCOFに対して $t=11$ msecであったのに対し $n=1$ および2のCOFに対してはそれぞれ $t=126$ msecおよび119

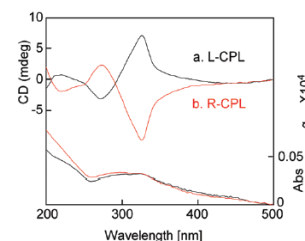


Fig. 4. CD-UV spectra of poly(Bz135-alt-TP44'') COF observed on L-CPL (a) and R-CPL (b) irradiation.

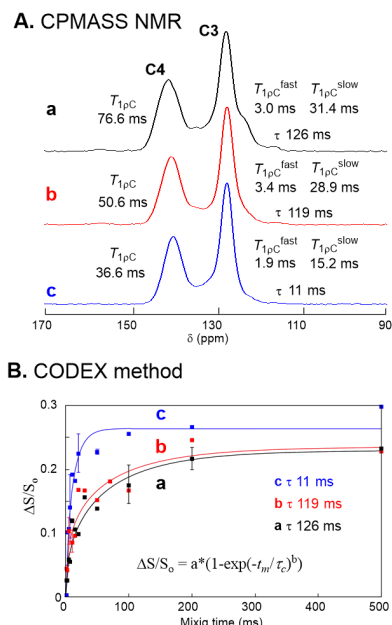


Fig. 5. ^{13}C CPMAS NMR spectra of poly(Bz135-alt-Bz14) COF (a), poly(Bz135-alt-BP44') COF (b), and poly(Bz135-alt-TP44'') COF [A] and normalized pure exchange CODEX intensity of the C3 signals as a function of mixing time for the three COF's [B].

msecであり、 $n=3$ のCOF内部での運動は他の2種に比べ10倍以上速いことが明らかになった。これらの結果より、円偏光の適用には物質内部での運動が十分に速いものである必要ことが判明し、今後、円偏光法をより幅広い物質に適用する上での重要な指針が得られた[Wang, Y.; Yazawa, K.; Wang, Q.; Harada, T.; Shimoda, S.; Song, Z.; Bando, M.; Naga, N.; Nakano, T. *Chem. Commun.*, **2021**, 57, 7681-7684.]. 尚、本研究はキラル置換基を有しないCOFを光を用いて光学活性化した最初の例である。

さらに、機能性有機分子（低分子）に対する不斉構造の誘起を研究した。周辺部（分子末端部）にカルバゾール基を有する有する星形分子 **S1-S3** は高効率な青色発光する分子として知られる（図6）。本研究では **S1-S3** を溶液キャストにより薄膜化し、円偏光を照射することにより光学活性化した。

S1-S3 には不斉中心は無いが、環構造間の単結合回りのねじれ構造は可能である。円偏光照射により薄膜化した **S1-S3** は強い CD スペクトルを示した。CD 信号が分子のねじれによるものであることは、DFT 計算による構造最適化と理論 CD スペクトル計算より確認した。加えて、より高い濃度の溶液からキャストした薄膜がより高い効率で不斉誘起される。これは濃厚溶液中では分子が π スタック型会合を形成し、会合は膜中で維持され、これがキラリティーを増幅するためと考えられる。この点に関し、クロロホルム溶液をモデル化した分子動力学計算においては、特に **S2,S3** が π スタック型の相互作用を顕著に示すのに対し **S1** は π スタック型会合を示さない（図7上）。さらに、吸収スペクトル測定においては、**S1** はテトラヒドロフラン(良溶媒)中およびテトラヒドロフラン-水(非溶媒)混合溶媒中でほぼ同様の吸収スペクトルを示したのに対し、**S2,S3** はテトラヒドロフラン-水中で顕著な淡色効果を示した（図7下）。これは、**S1** より **S2,S3** が π スタック型会合を形成しやすいこと支持する結果である。

最後に、円偏光により光学活性化した **S1-S3** が青色円偏光を示すことを見出した。**S1** の発光非対称性 (g_{lum}) は比較的小さく正負の符号が確認できる程度であったが、**S2** および **S3** はそれぞれ 10^{-2} および 10^{-3} オーダーの g_{lum} を示した。この大小関係は前述の π スタック型会合と相関するものと考えられ、薄膜中あるいは薄膜形成以前の溶液中での分子会合が、円偏光によるキラル構造誘起の過程、および、円偏光発光の原因である励起状態での非対称性の高いキラル構造の形成に重要な役割を果たすことを示している

[Zhang, Z.; Harada, T.; Pietropaolo, A.; Wang, Y.; Wang, Y.; Hu, X.; He, X.; Chen, H.; Song, Z.; Bando, M.; Nakano, T. *Chem. Commun.* **2021**, 57, 1794-1797.].

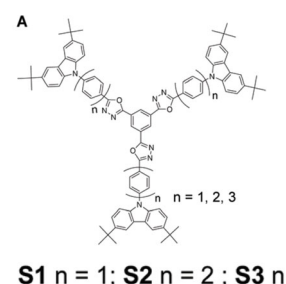


Fig. 6. Star-shaped, blue-light emitting molecules.

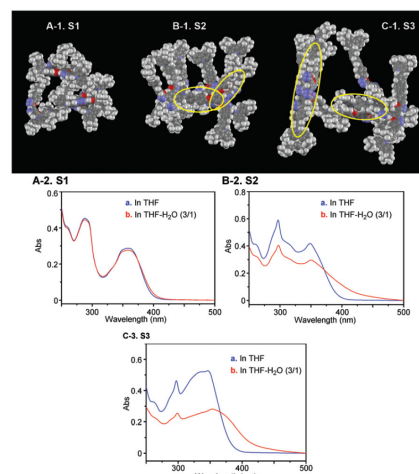


Fig. 7. Top: Aggregate structures of five molecules of **S1** [A-1], **S2** [B-1], and **S3** [C-1] observed through MD simulations in the presence of 1000 CHCl₃ molecules under an NPT ensemble. CHCl₃ molecules are omitted for clarity, and yellow ovals indicate π -stacked parts. Bottom: Absorbance spectra of **S1** [A-2], **S2** [B-2], and **S3** [C-2] THF-H₂O (3/1, v/v).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 11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 Naga Naofumi, Takenouchi Tomoya, Nakano Tamaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Ring-Opening Polymerization of Triaziridine Compounds in Water: An Extremely Facile Method to Synthesize a Porous Polymer through Polymerization-Induced Phase Separation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 603 ~ 607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.2c00110	査読の有無 無
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 Song Zhiyi, Sato Hiroyasu, Pietropaolo Adriana, Wang Qingyu, Shimoda Shuhei, Dai Heshuang, Imai Yoshitane, Toda Hayato, Harada Takunori, Shichibu Yukatsu, Konishi Katsuaki, Bando Masayoshi, Naga Naofumi, Nakano Tamaki	4. 巻 58
2. 論文標題 Aggregation-induced chirality amplification of optically active fluorescent polyurethane and a cyclic dimer in the ground and excited states	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 1029 ~ 1032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CC05633F	査読の有無 無
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 Naga Naofumi, Satoh Mitsusuke, Magara Tomoyuki, Ahmed Kumkum, Nakano Tamaki	4. 巻 162
2. 論文標題 Synthesis of porous polymers by means of Michael addition reaction of multifunctional acetoacetate and poly(ethylene glycol) diacrylate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 110901 ~ 110901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eurpolymj.2021.110901	査読の有無 無
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 Zhaoming, Harada Takunori, Pietropaolo Adriana, Wang Yuting, Wang Yue, Hu Xiao, He Xuehan, Chen Hui, Song Zhiyi, Bando Masayoshi, Nakano Tamaki	4. 巻 57
2. 論文標題 Blue circularly polarized luminescent amorphous molecules with single-handed propeller chirality induced by circularly polarized light irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 1794 ~ 1797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0cc07898k	査読の有無 無
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 Yuan Yuehui, Song Zhiyi, Bando Masayoshi, Nakano Tamaki	4. 巻 226
2. 論文標題 Unexpected structural defects in a main-chain conjugated polymer synthesized through Suzuki-Miyaura cross coupling polymerization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 123769 ~ 123769
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2021.123769	査読の有無 無
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 Yuting, Yazawa Koji, Wang Qingyu, Harada Takunori, Shimoda Shuhei, Song Zhiyi, Bando Masayoshi, Naga Naofumi, Nakano Tamaki	4. 巻 57
2. 論文標題 Optically active covalent organic frameworks and hyperbranched polymers with chirality induced by circularly polarized light	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 7681 ~ 7684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1cc02671b	査読の有無 無
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 Yuting, Maity Nabin, Zhao Liming, Kraemer Maximilian, Hasegawa Jun-ya, Shichibu Yukatsu, Konishi Katsuaki, Wang Xiaoyuan, Song Zhiyi, Bando Masayoshi, Nakano Tamaki	4. 巻 50
2. 論文標題 A Triad Fluorenone Derivative Bearing Two Imidazole Groups That Switches between Three States by Base and Acid Stimuli	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1363-1367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.210112	査読の有無 無
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 Qingyu, Pietropaolo Adriana, Fortino Mariagrazia, Song Zhiyi, Bando Masayoshi, Naga Naofumi, Nakano Tamaki	4. 巻 34
2. 論文標題 Photo racemization of 2,2 dihydroxy 1,1 binaphthyl derivatives	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chirality	6. 最初と最後の頁 317 ~ 324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chir.23400	査読の有無 無
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 Naga Naofumi, Yamada Kohei, Moriyama Kazumasa, Kudoh Shuntaro, Nagami Yosuke, Nageh Hassan, Nakano Tamaki	4. 巻 79
2. 論文標題 Synthesis of network polymers by photo-initiated thiol-ene reaction between multi-functional thiol and poly(ethylene glycol) diacrylate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer Bulletin	6. 最初と最後の頁 2411 ~ 2427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00289-021-03643-8	査読の有無 無
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 Naga Naofumi, Satoh Mitsusuke, Magara Tomoyuki, Ahmed Kumkum, Nakano Tamaki	4. 巻 59
2. 論文標題 Synthesis of gels by means of Michael addition reaction of multi functional acetoacetate and diacrylate compounds and their application to ionic conductive gels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Polymer Science	6. 最初と最後の頁 2129 ~ 2139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pol.20210388	査読の有無 無
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 Elbayoumy Elsayed, Wang Yuting, Rahman Jamil, Trombini Claudio, Bando Masayoshi, Song Zhiyi, Diab Mostafa A., Mohamed Farid S., Naga Naofumi, Nakano Tamaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Pd Nanoparticles-Loaded Vinyl Polymer Gels: Preparation, Structure and Catalysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Catalysts	6. 最初と最後の頁 137 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/catal11010137	査読の有無 無
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 Elbayoumy Elsayed, El-Ghamaz Nasser A., Mohamed Farid Sh., Diab Mostafa A., Nakano Tamaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Dielectric Permittivity, AC Electrical Conductivity and Conduction Mechanism of High Crosslinked-Vinyl Polymers and Their Pd(OAc) ₂ Composites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 3005 ~ 3005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym13173005	査読の有無 無
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 Dai Heshuang, Shichibu Yukatsu, Imai Yoshitane, Hara Nobuyuki, Konishi Katsuaki, Wang Yue, Song Zhiyi, Nakano Tamaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Synthesis and stereochemistry of helical polyurethanes based on 2,2 -dihydroxy-1,1 -binaphthyl and diisocyanatobenzenes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer Chemistry	6. 最初と最後の頁 1134 ~ 1144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9py01348b	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 Naga Naofumi, Fujioka Shun, Inose Daisuke, Ahmed Kumkum, Nageh Hassan, Nakano Tamaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Synthesis and properties of porous polymers synthesized by Michael addition reactions of multi-functional acrylate, diamine, and dithiol compounds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 60 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9ra09684a	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 Naga Naofumi, Miyanaga Tomoharu, Wang Yuting, Nakano Tamaki	4. 巻 58
2. 論文標題 Synthesis and properties of conjugated porous polymers obtained with Mizoroki-Heck reaction of tetra vinyl cyclic siloxane with dibromofluorene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Polymer Science	6. 最初と最後の頁 2301 ~ 2309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pol.20200268	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 Nakano Tamaki, Pietropaolo Adriana, Kamata Masahiro	4. 巻 3
2. 論文標題 Chirality analysis of helical polymers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Teacher International	6. 最初と最後の頁 67 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/cti-2020-0009	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 Pietro Paolo Adriana, Nakano Tamaki	4. 巻 32
2. 論文標題 Learning how planarization can affect dichroic patterns in polyfluorenes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chirality	6. 最初と最後の頁 661 ~ 666
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chir.23219	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 Vishwakarma Sambhav, Kumari Archana, Mitra Kheyath, Singh Shikha, Song Zhiyi, Bando Masayoshi, Nakano Tamaki, Gupta Susanta Kumar Sen, Ray Biswajit	4. 巻 26
2. 論文標題 Effect of L-menthol chain-end on the optical rotation, chirality, tacticity and thermal properties of polystyrene prepared by ATRP and polyvinylacetates prepared by RAFT polymerization: A molecular weight dependence study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Today Communications	6. 最初と最後の頁 101705 ~ 101705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtcomm.2020.101705	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 Yuting, Zavrashvili Nino, Wang Yue, Pietro Paolo Adriana, Song Zhiyi, Bando Masayoshi, Katsarava Ramaz, Nakano Tamaki	4. 巻 53
2. 論文標題 Optically Active Polymers with Cationic Units Connected through Neutral Spacers: Helical Conformation and Chirality Transfer to External Molecules	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 9916 ~ 9928
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.0c02199	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 Luo Jiyue, Wang Yue, Song Zhiyi, Nakano Tamaki	4. 巻 118
2. 論文標題 Synthesis and photo-induced stereomutation of helical, π -stacked copolymers of dibenzofulvene and menthyl methacrylate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 European Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 71 ~ 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eurpolymj.2019.05.035	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 Merlani Maia, Song Zhiyi, Wang Yuting, Yuan Yuehui, Luo Jiyue, Barbakadze Vakhtang, Chankvetadze Bezhn, Nakano Tamaki	4. 巻 220
2. 論文標題 Polymerization of Bulky Oxirane Monomers Leading to Polyethers Exhibiting Intramolecular Charge Transfer Interactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Macromolecular Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 1900331 ~ 1900331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/macp.201900331	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 Naga Naofumi, Hasegawa Kazuma, Nageh Hassan, Nakano Tamaki	4. 巻 77
2. 論文標題 Synthesis and properties of degradable gels and porous polymers including acetal group in the network structure by addition reaction of multi-functional phenols and divinyl ether compounds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymer Bulletin	6. 最初と最後の頁 5631 ~ 5645
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00289-019-03033-1	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 Naga Naofumi, Michida Ryo, Kudo Shuntaro, Nagami Yosuke, Moriyama Kazumasa, Nageh Hassan, Furukawa Hidemitsu, Nakano Tamaki	4. 巻 18
2. 論文標題 Synthesis of joint-linker type gels and porous polymers by addition reactions of multi-functional thiol and alkyl diacrylate, diisocyanate compounds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Today Communications	6. 最初と最後の頁 153 ~ 162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtcomm.2018.11.013	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31件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Tamaki Nakano
2. 発表標題 Construction of Chiral Conformation of Polymers and Small Molecules Using Circularly Polarized Light
3. 学会等名 Fourth JSPSAAA annual symposium Catalyzing Australia-Japan Science and Innovation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tamaki Nakano
2. 発表標題 Circularly Polarized Light (CPL)-driven Preparation of Chiral Polymers and Molecules That Emit CPL
3. 学会等名 ICCC-2022 (International CREST-CPL Conference 2022 in Awaji, JAPAN) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tamaki Nakano
2. 発表標題 Optically Active Polymers and Polymer-based Small-Molecular Systems for CPL Emission
3. 学会等名 Pacifichem 2021, #307 Recent Progress in Circularly Polarized Luminescence (CPL) and Related Phenomena: Synthesis and Photophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tamaki Nakano, Yuting Wang, Zhiyi Song, and Masayoshi Bando
2. 発表標題 Synthesis of Optically Active Polymer Systems Using Circularly Polarized Light (CPL) as the Source of Chirality
3. 学会等名 Pacifichem 2021, #274 Chirality of Polymers and Supramolecules "Optically active polymers and polymer-based small-molecular systems for CPL emission" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂東正佳、朱 文トウ、宋 志毅、西田 まゆみ、中野 環
2. 発表標題 触媒用高分子配位子としてのポリウレタン型有機構造体の合成と性質
3. 学会等名 第30回ポリマー材料フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Qingyu Wang, Zhiyi Song, Masayoshi Bando, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis and Structure of Optically Active Poly(benzene-1,4-diyl) Derivatives Bearing Bulky Side-chain Groups
3. 学会等名 Molecular Chirality 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Pengfei Wu, Zhiyi Song, Masayoshi Bando, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis and Structure of Optically Active Hyperbranched Poly(fluorenevinylene) Derivatives and Chirality Transfer from the Polymers to Small Molecules
3. 学会等名 Molecular Chirality 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宋 志毅、戴 河双、坂東正佳、中野 環
2. 発表標題 フルオレン残基を有する発光性キラルポリウレタンの合成と性質
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 Qingyu Wang, Zhiyi Song, Masayoshi Bando, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis and structure of optically active poly(benzene-1,4-diyl) derivatives bearing bulky side-chain groups
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 Pengfei Wu, Zhiyi Song, Masayoshi Bando, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis and Structural Isomerization of Hyperbranched Optically Active Poly(fluorenevinylene) Derivatives
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 Pengfei Wu, Zhiyi Song, Masayoshi Bando, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis and properties of optically active poly(fluorenevinylene) derivatives with linear and hyperbranched structures
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 Qingyu Wang, Zhiyi Song, Masayoshi Bando, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis and structure of poly(benzene-1,4-diyl) derivatives bearing bulky side-chain groups
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 宋 志毅、戴 河双、坂東正佳、中野 環
2. 発表標題 フルオレン残基を主鎖中に有する光学活性ポリウレタンの合成と性質
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 坂東正佳、宋 志毅、中野 環
2. 発表標題 ポリ(フェナントレン-9,10-ジイル)の合成と構造
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 葛西聡馬、宋 志毅、坂東正佳、中野 環
2. 発表標題 ポリ(ビニル-2,2'-ピピリジル)類の合成と触媒反応への応用
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 Jiyue Luo, Masayoshi Bando, Zhiyi Song, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis of polymers composed of 1,10-phenantroline-5,6-diyl and phnanthrene-5,6-diyl units and their application for catalysis
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 Yuting Wang, Masayoshi Bando, Zhiyi Song, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis of hyperbranched polyphenylene derivatives and chirality induction to the polymers using chiral additives and circularly polarized light
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 Yuehui Yuan, Masayoshi Bando, Zhiyi Song, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis of pi-stacked poly(4,5-diazadibenzofulvene) as macromolecular ligand and its application for catalytic reactions
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 宋 志毅、孫歌、板東正佳、中野 環
2. 発表標題 ポリ(ナフタレン-1,4-ジイル)の合成とその酸化反応によるグラフェンの調製
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 孫歌、宋 志毅、板東正佳、中野 環
2. 発表標題 ポリ(ナフタレン-1,4-ジイル)の合成と不斉構造に関する研究
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 Yuting Wang, Zhiyi Song, Masayoshi Bando, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis of and chirality induction to hyperbranched polymers based on poly(benzene-1,4-diyl) backbone
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 Yuehui Yuan, Masayoshi Bando, Zhiyi Song, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis of polymers composed of accumulated bidentate nitrogen ligands and their application for catalysis
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 Yuting Wang, Zhiyi Song, Masayoshi Bando, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis and Chirality of Polymeric Covalent Organic Frameworks Based on Benzene-1,3,5-triyl Junction and Liker Moieties
3. 学会等名 Molecular Chirality Asia 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuting Wang, Nino Zavrashvili, Yue Wang, Adriana Pietropaolo, Zhiyi Song, Masayoshi Bando, Ramaz Katsarava, Tamaki Nakano
2. 発表標題 Optically Active Polymers Composed of Chiral/Achiral Cationic Units Connected through Neutral Spacers: Helical Conformation and Chirality Transfer to External Molecule
3. 学会等名 Molecular Chirality Asia 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tamaki Nakano
2. 発表標題 Controlling Macromolecular Helix, pi-Stacking, and Aggregation: Toward Well-defined Polymeric Materials with Useful Properties
3. 学会等名 Special Lecture at National '111' Center for Cellular Regulation and Molecular Pharmaceutics of Hubei University of Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wang Yuting, Song Zhiyi, Nakano Tamaki
2. 発表標題 Synthesis and chirality of three-dimensional polyphenylene derivatives
3. 学会等名 第68回高分子討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宋 志毅、孫 歌、中野 環
2. 発表標題 ポリ(ナフタレン-1,4-ジイル)の合成と酸化によるグラフェン調製
3. 学会等名 第68回高分子討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuan Yuehui, Song Zhiyi, Nakano Tamaki
2. 発表標題 Synthesis and structure of polymer ligand through Suzuki-Miyaura coupling
3. 学会等名 第68回高分子討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tamaki Nakano, Yuting Wang, Zhiyi Song, Yue Wang, Adriana Pietropaolo
2. 発表標題 Chirality Induction to Aromatic Polymers and Oligomers Using Circularly Polarized Light
3. 学会等名 The 18th Asian Chemical Congress and The 20th General Assembly of the Federation of Asian Chemical Societies (ACC 2019), (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tamaki Nakano, Shunta Asada, Yue Wang, and Zhiyi Song
2. 発表標題 Synthesis and Structure of Poly(4-vinyldiphenylamine) as a Polymer Antioxidant
3. 学会等名 50th General Assembly and 47th IUPAC World Chemistry Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tamaki Nakano
2. 発表標題 Synthesis and Chiroptical Properties of Helical Polyurethanes
3. 学会等名 International Symposium on Circularly Polarized Luminescence and the Related Phenomena (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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	宋 志毅 (Song Zhiyi) (80600981)	北海道大学・触媒科学研究所・准教授 (10101)	

	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
研究協力者	アドリアナ ピエトロパオロ (Adriana Pietropaolo)		
研究協力者	坂東 正佳 (Bando Masayoshi)		

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
---------	---------