

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03064

研究課題名(和文) 無水プロトン伝導性液晶高分子膜の創製と燃料電池への応用

研究課題名(英文) Development of Anhydrous Proton-Conducting Liquid-Crystalline Polymer Membranes and Their Application in Fuel Cells

研究代表者

吉尾 正史 (YOSHIO, Masafumi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・独立研究者

研究者番号：60345098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：光重合性双性イオン分子とベンゼンスルホン酸やプロトン性イオン液体などの酸性分子との二成分複合系において、ヘキサゴナルカラムナー液晶性を発現させ、液晶場光重合を行うことで自立性を有する高プロトン伝導性高分子フィルムを構築することに成功した。液晶ナノ構造フィルムは非晶性フィルムよりも低い活性化エネルギーで高プロトン伝導が実現できることを実証した。

さらに、長鎖アルキルを有する塩基性イミダゾール誘導体とベンゼンスルホン酸などの酸性分子とのブレンステッド酸塩基対について、複合比率を変えるだけでカラムナー相、双連続キュービック相、スメクチック相の発現を制御できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、高分子型燃料電池に資する新規のプロトン伝導ナノチャンネル構造を有する高分子フィルム材料の開発に成功し、ナノ構造の形成が伝導性を高めるという新現象を見出した。また、ブレンステッド酸塩基対形成を液晶材料設計に導入する学術的に新しいアプローチによって、従来設計では困難な双連続キュービック液晶構造を容易に構築することが可能になった。本研究で開発したイオン活性液晶は、燃料電池応用だけでなく、触媒膜、ガス分離膜、水处理膜、アクチュエータなど最先端材料・素子に展開できるため、社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)： Two-component self-assembly of photopolymerizable zwitterionic molecule and acids such as benzenesulfonic acid and protic ionic liquids provided the hexagonal columnar liquid-crystalline phases. In-situ photopolymerization allowed for the construction of self-standing high-proton conductive polymer films. We revealed that the LC nanostructured films exhibited higher proton conduction with lower activation energy than those of amorphous films.

In addition, we demonstrated that the Bronsted base/acid complexes consisting of imidazole derivative with long alkyl chains and various acids such as benzenesulfonic acid formed the columnar, bicontinuous cubic, and smectic LC phases by simply changing the mixing ratio.

研究分野：有機高分子材料

キーワード：液晶 自己組織化 ナノ相分離形成 プロトン伝導 燃料電池 双連続キュービック相 ブレンステッド酸塩基対 高分子電解質

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

固体高分子型燃料電池は、水素エネルギー社会の実現に向けて中核をなす発電デバイスとして期待されている。燃料電池の本格普及に要求される高効率化を実現するための要素技術として、電解質膜の無水プロトン伝導化及び秩序化したプロトン輸送チャンネル構造の構築が重要な課題の一つである。電解質膜のベンチマークである Nafion 膜 (パーフルオロスルホン酸系ビニルポリマー) では、スルホン酸基周りの水分子を介して高速プロトン伝導 ( $10^{-1} \text{ S cm}^{-1}$ ) が実現される。しかし、 $100^\circ\text{C}$  以上の高温作動では、水分子が蒸発するため伝導度が約 2 桁低下してしまう (Review: *J. Membr. Sci.*, **2016**, 504, 1-9.)。水チャンネル構造に関しては、Nafion 膜の延伸によって逆ミセル型チャンネル構造が部分配向することでプロトン輸送の効率化につながる事が指摘されている (米国バージニア工科大の Madson et al., *Nature Mater.*, **2011**, 10, 507-511)。さらに最先端研究では、ミクロ相分離構造を形成する芳香族系高分子膜における水チャンネル構造の構築や水分子を閉じ込める分子設計により燃料電池の高性能化が達成されている (山梨大の宮武ら, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2010**, 49, 317-320、JSR 株の後藤ら, *Polym. J.*, **2009**, 41, 95-104)。もし、高分子電解質膜の内部に電極間を橋渡しする長距離の配列した無水イオンチャンネル構造を構築することができれば、破格に高効率なプロトン輸送が期待できる。

親/疎水性部位やイオン/非イオン性部位からなる両親媒性液晶は、他に類を見ないナノ構造多様性と長距離分子配向性を示す。このような液晶の特性を生かしてプロトンの無水チャンネル輸送を達成することができれば、従来材料の問題点をブレイクスルーした次世代電解質膜としての展開が期待される。研究代表者は液晶構造を活用するイオン輸送材料 (図 1)・電池デバイスの構築において、世界への先駆的な情報発信を行ってきている (Reviews: *Handbook of Liquid Crystals 2nd Edition*, Wiley-VCH, **2014**, Vol. 8, p.727-749; *Chem. Commun.*, **2009**, 729-739; 原著論文 *J. Am. Chem. Soc.*, 10 報; *Adv. Mater.*, 2 報など)。例えば、環状カーボネート部位を二次元平面に配列した液晶材料によるリチウムイオン輸送や  $\Gamma/\Gamma_3$ -レドックス対を持つイオン液体の輸送により、世界で初めての液晶リチウムイオン電池

(*Adv. Funct. Mater.*, **2015**, 25, 1206-1212, Frontispiece に採用) や高温安定作動の色素増感太陽電池 (*Chem. Mater.*, **2016**, 28, 6493-6500) を構築することに成功した。さらに、研究代表者らは、双性イオン構造を有する液晶分子とベンゼンスルホン酸を複合化する革新的アプローチにより、無水の 3 次元プロトンチャンネル構造を有するジャイロイド型双連続キュービク液晶を世界で初めて開発した (*J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, 135, 15286-15289)。また、

水酸基を有する両親媒性分子とプロトン性塩の組織化により、新規カラムナー・スメクチック液晶を構築し、プロトン伝導の高速化 (プロトン性塩単独よりも 4 桁向上、無水条件下  $100^\circ\text{C}$  で  $10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ ) に成功した。しかし、まだ主としてプロトンを単純に低次元輸送することに成功したことにとどまっており、双性イオンと複合化する酸性分子の最適化などは十分に検討できていない。また、応用という観点からもプロトン伝導度の更なる向上 ( $10^{-1} \text{ S cm}^{-1}$  レベル) と機械的に安定な高分子フィルム化が重要である。液晶性イオン伝導材料の開発は、米国の V. Percec、T. Swager、農工大の大野・一川ら、中国の Wu、韓国の B.-Ki. Cho らが精力的に研究を推進してきている。しかし、申請者らが開発してきた液晶電解質を超える伝導性や異方性、スイッチング性を発現する材料の開発には至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、双性イオン/酸性分子の 2 分子複合液晶アセンブリー法の先鋭化と高分子フィルム化、また新たにプレnstेटド酸塩基対の形成を基軸とする分子間相互作用・分子形状・液晶ナノ構造の精密制御により、革新的な無水プロトン伝導性液晶高分子膜を創製し、高性能燃料電池の構築へと展開することである。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の 2 つの液晶性分子集合体を対象として、それらの液晶構造とイオン伝導性を評価した。液晶構造の解析は、偏光顕微鏡観察、示差走査熱量測定、X 線回折測定からおこなった。イオン伝導度は、温度可変交流インピーダンス法により得られたデータ解析から評価した。測定セルには、楕形金電極蒸着ガラスセルおよび ITO 蒸着ガラスセルを用いた。

(1) 光重合性双性分子と酸性分子の 2 分子複合液晶アセンブリーの構築、液晶構造の光重合固定化による無水プロトン伝導性高分子フィルムの作製、複合化する酸性分子の種類および量比が液晶性とイオン伝導性へ及ぼす効果の解明

(2) 長鎖アルキルを有する塩基性または酸性分子と酸性または塩基性小分子からなるプレnstेटド酸塩基対型の無水プロトン伝導性液晶材料の構築

液晶ナノ構造を活用するイオン輸送 ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\Gamma/\Gamma_3^-$ )

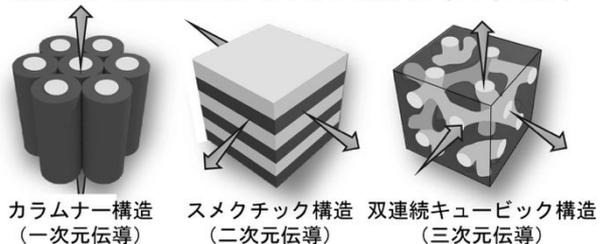


図 1. イオンチャンネルを有するナノ構造液晶

4. 研究成果

(1) 光重合性双性分子と酸性分子の2分子複合液晶アセムブリーによる高分子フィルム構築

イミダゾリウムスルホベタイン構造を有する扇型重合性分子1と2(図2)を合成した。化合物1は、4~150 °Cでヘキサゴナルカラムナー液晶相を示すのに対し、化合物2は90 °Cに融点を示す結晶でサーモトロピック液晶性を示さなかった。化合物1とベンゼンスルホン酸、硫酸、リン酸との等モル複合体を調製し、それらの液晶性を評価した。いずれも複合体も室温でヘキサゴナルカラムナー液晶相を発現することを見出した。これらの液晶を二枚のガラス基板にはさみ、キセノンランプを用いて室温にて紫外線を照射(30mW/cm<sup>2</sup>, 30 min)したところ、カラムナー液晶秩序構造を保持した自立性を有する透明な高分子フィルムを得ることに成功した。交流インピーダンス法によりプロトン伝導度の温度依存性を測定した(図3)。双性イオン液晶単独の重合フィルムでは10<sup>-9</sup> S cm<sup>-1</sup>と極めて低い伝導性を示すのに対し、硫酸と双性イオン液晶からなる等モル複合体を重合したフィルムは、10<sup>-5</sup>~10<sup>-4</sup> S cm<sup>-1</sup>の高プロトン伝導性を発現した。この結果は、添加した酸が解離して双性イオン部位とイオン対を形成し、無水条件下においてもプロトンが効率よく伝導することを示している。

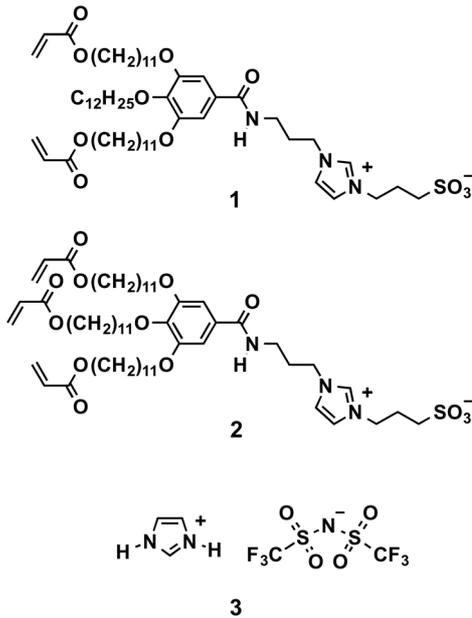


図2. 重合性双性イオンとプロトン性イオン液体の分子構造

プロトン伝導度の向上を目指して、サーモトロピック液晶性を示さない三つの重合基を有する化合物2に関して、プロトン性イオン液体3(化合物2に対して40~60 mol%)、15wt%の水分子を複合化した。その結果、いずれの複合体(2/3(x), x=0.4~0.6, 複合体中の化合物3のモル分率)も室温~100 °Cでヘキサゴナルカラムナー液晶性を発現することを見出した。液晶状態で紫外線照射を行うと、液晶構造と配向が固定化された自立性高分子フィルムが得られた。一方、加熱して等方性液体状態で紫外線重合を行うと、複屈折を示さない非晶性高分子フィルムを作製することができた。プロトン性イオン液体の複合化比率が異なる液晶性と非晶性高分子フィルムについて、イオン伝導性の評価を行った(図4)。

液晶性高分子フィルムは、非晶性高分子フィルムよりも高プロトン伝導性を示し、活性化エネルギーも小さいことが明らかとなった。この結果は、効率的なプロトン伝導を実現するために、一次元的なプロトンチャンネル構造の形成が重要であることを示している。プロトン性イオン液体の複合化比率がイオン伝導性に及ぼす効果に関しては、プロトンキャリア数が高いほど高イオン伝導性となることがわかった。しかし、双性イオン分子よりも少ないモル比でプロト

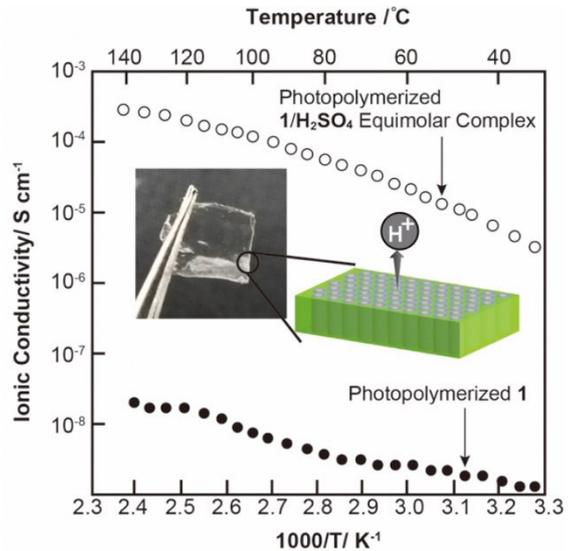


図3. 双性イオン1および硫酸複合体のカラムナー液晶構造を重合固定化した高分子フィルムのイオン伝導性

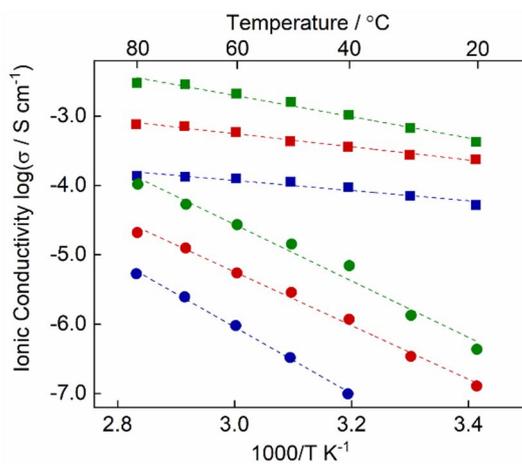


図4. 高分子フィルムのイオン伝導度の温度依存性(2/3(0.4)(青), 2/3(0.5)(赤), 2/3(0.6)(緑)、液晶高分子、非晶性高分子)

ン性イオン液体が組織化された場合には、伝導に必要な活性化エネルギーが小さくなることが示唆された。高効率なプロトンキャリア伝導においては、スルホネート基からなる適度な空サイトの形成が重要となると考えられる。

## (2) プレンステッド酸塩基対型の無水プロトン伝導性液晶材料の構築

プレnstेटド酸とプレnstेटド塩基から構成されるプロトン性イオン液体が新しいタイプの燃料電池電解質として期待されている。本研究では、プレnstेटド塩基部位としてイミダゾール基を有する扇状分子 4, 5 (図 5) を設計し、プレnstेटド酸性分子であるベンゼンスルホン酸 6 と複合化することにより、無水プロトン伝導チャンネルを構築することを目指した。三本のドデシル鎖を有する化合物 4 および二本のドデシル鎖をもつ化合物 5 は、共に液晶性を示さなかった。しかし、ベンゼンスルホン酸との二成分複合体は、サーモトロピック液晶相を発現することを見出した。

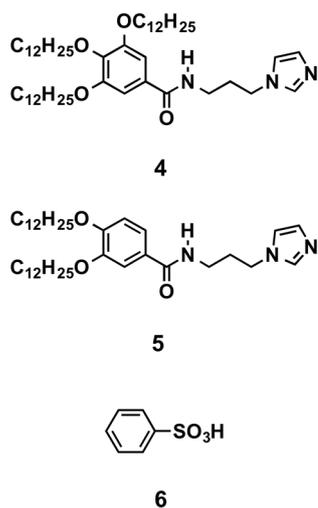


図 5. 扇型イミダゾール誘導体およびベンゼンスルホン酸の化学構造

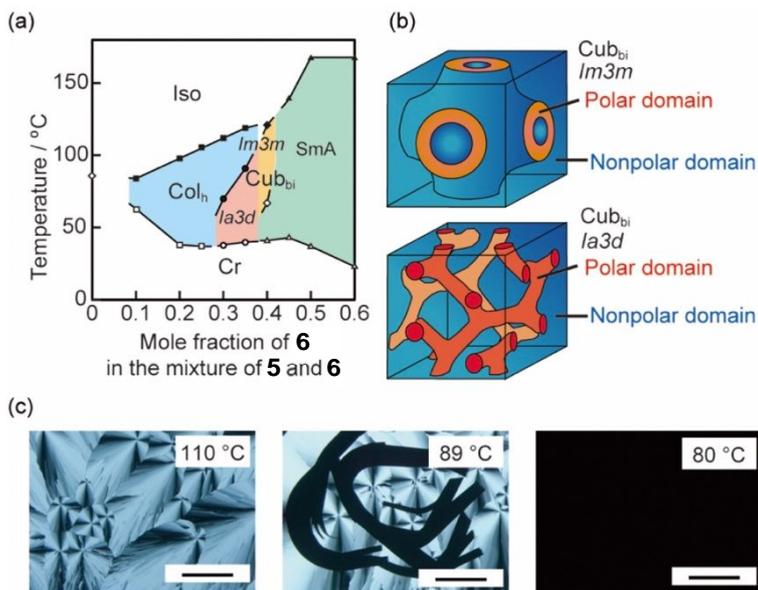


図 6. (a) 化合物 5 と 6 からなる複合体の液晶相転移挙動、(b)  $Im3m$  および  $Ia3d$  対称性の双連続キュービック液晶構造のイラスト、(c) ヘキサゴナルカラムナー液晶相/ $Ia3d$  キュービック液晶相転移における偏光顕微鏡像

化合物 4 と 6 の複合体 ( $4/6(x)$ ,  $x$  は複合体中の化合物 6 のモル分率) では、 $x = 0.2$  以上でヘキサゴナルカラムナー液晶相が形成され、ベンゼンスルホン酸の割合が増加するにつれて液晶相発現温度が広がることが明らかとなった。等モル複合体の溶液  $^1H$ NMR 測定から、化合物 4 のイミダゾール基がプロトン化されていること、化合物 6 のスルホネートアニオンが化合物 4 のアミド基と水素結合を形成していることが示唆された。複合体  $4/6(x)$  における液晶相の熱安定化は、イオン部位の静電相互作用および水素結合が寄与していると考えられる。一方、化合物 5 と 6 の複合化においては、複合化比率を変えることで、多様なナノ相分離液晶構造が発現することを見出した (図 6a)。

複合体 4/6 と同様に、複合体 5/6 においてもプレnstेटド酸の増加につれて液晶相を形成する温度範囲が広がり、熱的安定化が見られた。また、親水部の体積が増加するにつれて、ヘキサゴナルカラムナー液晶相から  $Ia3d$  および  $Im3m$  対称性の双連続キュービック液晶相 (図 6b) スメクチック液晶相へと発現する液晶相が劇的に変化した。さらに、大変興味深いことに、5/6(0.35)では、温度上昇に伴って、三次元チャンネル構造のジャイロイドキュービック液晶相から一次元チャンネル構造をもつヘキサゴナルカラムナー相へ相転移することがわかった。偏光顕微鏡観察では、カラムナー相に

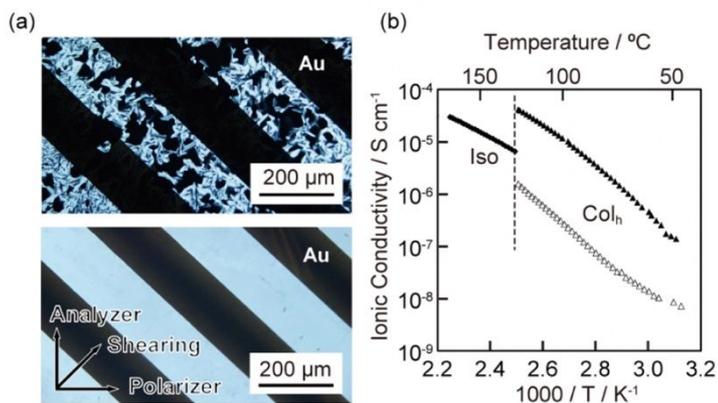


図 7. (a) 櫛形金電極セル中の複合体 4/6(0.4) のポリドメイン構造を有するカラムナー液晶相およびせん断後の水平一軸配向を示す偏光顕微鏡像、(b) 複合体 4/6(0.4) の異方的プロトン伝導性の温度依存性

おけるファン組織からキュービック相の暗視野像へと変化する様子が見られた(図 6c)。

これらの複合体を楕形金電極付きガラスセルに封入し、交流インピーダンス法によりプロトン伝導度を評価した。一例として、ヘキサゴナルカラムナー液晶相を形成する複合体 4/6(0.4)について、楕形金電極セル中の分子配向(図 7a)およびプロトン伝導性の温度依存性を示す(図 7b)。複合体 5/6(0.4)は、等方性液体から冷却してカラムナー液晶相になると、楕形電極間でカラム軸がランダムに配向したポリドメイン構造を形成する(図 7a 上側)。一方、ポリドメイン構造に機械的なせん断応力を加えると、基板表面上でカラム軸がせん断応力方向に水平に並んだモノドメインが得られることがわかった(図 7a 下側)。金電極に対して、垂直方向および平行方向にせん断を印加してカラム軸を水平一軸配向させることにより、それぞれカラム軸に沿った方向のプロトン伝導度およびカラム軸を横切る方向のプロトン伝導度を測定することが可能となった。図 7b に示すように、水平一軸配向したカラムナー液晶は、異方的イオン伝導性を示し、カラム軸に沿った方向のプロトン伝導度は、軸に垂直方向よりも約 10 倍高いことが明らかとなった。また、複合体 5/6(0.4)では、100 °C の  $Im3m$  型双連続キュービック液晶相において  $10^{-4}$  S  $cm^{-1}$  の無水プロトン伝導性を示し、ヘキサゴナルカラムナー液晶相よりも高プロトン伝導性を示すことが明らかとなった。

以上、本研究では、光重合性双性イオン分子/酸性分子およびプロトン性イオン液体の自己組織化により、カラムナー液晶ナノ構造を有する高プロトン伝導性高分子フィルムの構築、および長鎖アルキルを有する塩基性分子/塩基性小分子などからなるブレンステッド酸塩基対型のプロトン伝導性液晶材料の開発に成功した。これらの材料設計は、研究代表者らによる世界に先駆けた独創的なものである。本研究成果(2)のブレンステッド酸塩基の二成分複合アセンブリー法では、簡単に混合比を変えるだけで多様な液晶ナノ構造の発現が達成でき、一成分では設計が困難なキュービック液晶の構築を実現することができた。これらのイオン活性液晶の自発的な分子集合能、配向性、構造相転移を活用することで、高効率なプロトン輸送による燃料電池開発ばかりでなく、触媒膜、ガス分離膜、水処理膜、アクチュエータなどの最先端分野で活躍する機能性ナノ材料としての展開が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Taira Onuma, Masafumi Yoshio, Masaki Obi, Kimiaki Kashiwagi, Shinya Tahara, Takashi Kato	4. 巻 50
2. 論文標題 Liquid-crystalline behavior and ion transport properties of block-structured molecules containing a perfluorinated ethylene oxide moiety complexed with a lithium salt	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 889-898
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41428-018-0051-9	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 Saki Fujiwara, Hiroyuki Ohno, Masafumi Yoshio, Takashi Kato, Takahiro Ichikawa	4. 巻 91
2. 論文標題 Design of Dication-Type Amino Acid Ionic Liquids and Their Application to Self-Assembly Media of Amphiphiles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1246/bcsj.20170276	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 Taira Onuma, Eiji Hosono, Motokuni Takenouchi, Junji Sakuda, Satoshi Kajiyama, Masafumi Yoshio, Takashi Kato	4. 巻 3
2. 論文標題 Noncovalent Approach to Liquid-Crystalline Ion Conductors: High-Rate Performances and Room-Temperature Operation for Li-Ion Batteries	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 159-166
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsomega.7b01503	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 Takeshi Sakamoto, Takafumi Ogawa, Hiroki Nada, Koji Nakatsuji, Masato Mitani, Bartolome Soberats, Ken Kawata, Masafumi Yoshio, Hiroki Tomioka, Takao Sasaki, Masahiro Kimura, Masahiro Henmi, Takashi Kato	4. 巻 5
2. 論文標題 Development of Nanostructured Water Treatment Membranes Based on Thermotropic Liquid Crystals: Molecular Design of Sub-Nanoporous Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 1700405 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/advs.201700405	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 Sakamoto Takeshi, Ogawa Takafumi, Nada Hiroki, Nakatsuji Koji, Mitani Masato, Soberats Bartolome, Kawata Ken, Yoshio Masafumi, Tomioka Hiroki, Sasaki Takao, Kimura Masahiro, Henmi Masahiro, Kato Takashi	4. 巻 5
2. 論文標題 Development of Nanostructured Water Treatment Membranes Based on Thermotropic Liquid Crystals: Molecular Design of Sub-Nanoporous Materials	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 1700405 ~ 1700405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/advs.201700405	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 -

1. 著者名 Hogberg Daniel, Soberats Bartolome, Yoshio Masafumi, Mizumura Yurika, Uchida Satoshi, Kloo Lars, Segawa Hiroshi, Kato Takashi	4. 巻 82
2. 論文標題 Self-Assembled Liquid-Crystalline Ion Conductors in Dye-Sensitized Solar Cells: Effects of Molecular Sensitizers on Their Performance	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ChemPlusChem	6. 最初と最後の頁 834 ~ 840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cplu.201700099	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 該当する

1. 著者名 Kato Takashi, Yoshio Masafumi, Ichikawa Takahiro, Soberats Bartolome, Ohno Hiroyuki, Funahashi Masahiro	4. 巻 2
2. 論文標題 Transport of ions and electrons in nanostructured liquid crystals	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Reviews Materials	6. 最初と最後の頁 17001 ~ 17001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/natrevmats.2017.1	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 Uchida Junya, Yoshio Masafumi, Sato Sota, Yokoyama Hiroyuki, Fujita Makoto, Kato Takashi	4. 巻 56
2. 論文標題 Self-Assembly of Giant Spherical Liquid-Crystalline Complexes and Formation of Nanostructured Dynamic Gels that Exhibit Self-Healing Properties	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 14085 ~ 14089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201707740	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 Mitani Masato, Yoshio Masafumi, Kato Takashi	4. 巻 5
2. 論文標題 Tuning of luminescence color of -conjugated liquid crystals through co-assembly with ionic liquids	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 9972 ~ 9978
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7tc02767b	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 吉尾正史、加藤隆史	4. 巻 21
2. 論文標題 超分子液晶の新しい分子設計と機能化への展開.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 液晶	6. 最初と最後の頁 179 ~ 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Gan Kian Ping, Yoshio Masafumi, Sugihara Yuki, Kato Takashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Guanine-oligothiophene conjugates: liquid-crystalline properties, photoconductivities and ion-responsive emission of their nanoscale assemblies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 576 ~ 585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7sc03764c	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 -

1. 著者名 Onuma Taira, Hosono Eiji, Takenouchi Motokuni, Sakuda Junji, Kajiyama Satoshi, Yoshio Masafumi, Kato Takashi	4. 巻 3
2. 論文標題 Noncovalent Approach to Liquid-Crystalline Ion Conductors: High-Rate Performances and Room-Temperature Operation for Li-Ion Batteries	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 159 ~ 166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.7b01503	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 Siyu Cao, Masafumi Yoshio, Atsushi Seki	4. 巻 10
2. 論文標題 Ion-Conductive Nanostructured Polymer Films Formed by Photopolymerization of Lyotropic Columnar Liquid-Crystalline Monomers, Composed of a Zwitterionic Compound and a Protic Ionic Liquid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 276 ~ 284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst10040276	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 -

1. 著者名 Monika Gupta, Yuto Suzuki, Takeshi Sakamoto, Masafumi Yoshio, Shotaro Torii, Hiroyuki Katayama, Takashi Kato	4. 巻 8
2. 論文標題 Polymerizable Photocleavable Columnar Liquid Crystals for Nanoporous Water Treatment Membranes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 1303 ~ 1308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.9b00513	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 Daniel Kuo, Bartolome Soberats, K. R. S. Kumar, Masafumi Yoshio, Takahiro Ichikawa, Hiroyuki Ohno, Xiangbing Zeng, Goran Ungar, Takashi Kato	4. 巻 4
2. 論文標題 Switching of Ionic Conductivities in Columnar Liquid-Crystalline Anilinium Salts: Effects of Alkyl Chains, Ammonium Cations and Counter Anions on Thermal Properties and Switching Temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Molecular Systems Design & Engineering	6. 最初と最後の頁 342 ~ 347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c8me00099a	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 Kazuma Hamaguchi, Daniel Kuo, Miaomiao Liu, Takeshi Sakamoto, Masafumi Yoshio, Hiroyuki Katayama, Takashi Kato	4. 巻 8
2. 論文標題 Nanostructured Virus Filtration Membranes Based on Two-Component Columnar Liquid Crystals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 24 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.8b00821	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 8件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 イオン-双極子相互作用に基づく液晶性集合体のデザイン
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masafumi Yoshio
2. 発表標題 Supramolecular Liquid-Crystalline Materials for Mass Transport and Stimuli-Responsive Emission
3. 学会等名 The 14th Hokkaido University-Nanjing University-NIMS/MANA Joint Symposium Program (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 液晶分子自己組織化によるイオンチャンネル材料の構築
3. 学会等名 RIKEN-NIMS 第2回 マテリアルズイノベーションコア Workshop
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 液晶分子自己組織化による機能材料開発.
3. 学会等名 埼玉工業大学生命環境化学ゼミ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 架橋液晶ナノ構造を有するイオン伝導性高分子フィルムの開発
3. 学会等名 2018年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masafumi Yoshio
2. 発表標題 Lithium Salt Complexes of Phosphate Ester-Based Liquid Crystals
3. 学会等名 27th International Liquid Crystal Conference (ILCC2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kyoya Adachi, Takeshi Sakamoto, Ruka Matsubara, YOSHIO, Masafumi, Takashi Kato
2. 発表標題 双性イオン部位を有する液晶ナノ構造膜の作製と機能化
3. 学会等名 第67回高分子学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 イオン輸送のための液晶性リン酸エステルの開発.
3. 学会等名 第67回高分子学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kyoya Adachi, Takeshi Sakamoto, Ruka Matsubara, YOSHIO, Masafumi, Takashi Kato
2. 発表標題 双性イオン部位を有する液晶ナノ構造膜の構築と応用
3. 学会等名 第22回液晶化学研究会シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 イオン伝導性リン酸エステル液晶の開発
3. 学会等名 第22回液晶化学研究会シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masafumi Yoshio
2. 発表標題 Supramolecular Liquid-Crystalline Materials for Ion and Electron Transport and Stimuli-Responsive Emission
3. 学会等名 International Congress on Pure & Applied Chemistry (ICPAC) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 イオン液体とベンゾニトリル誘導体の二成分系ナノ相分離構造液晶
3. 学会等名 第21回液晶化学研究会シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉原由季、顔健彬、吉尾正史、加藤隆史
2. 発表標題 グアニン部位を有するイオン応答性分子集合体の構築
3. 学会等名 第21回液晶化学研究会シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 液晶ナノ構造を活用する機能性材料の開発
3. 学会等名 公益財団法人野口研究所講演会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小沼平、佐久田淳司、竹内基邦、細野英司、吉尾 正史、周豪慎、加藤 隆史
2. 発表標題 液晶ナノ構造を有するリチウムイオン電池電解質の開発
3. 学会等名 第66回高分子学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junya Uchida, YOSHIO Masafumi, Sota Sato, Hiroyuki Yokoyama, Makoto Fujita, Takashi Kato
2. 発表標題 Giant and Spherical Self-Assembly of Liquid-Crystalline Metal-Organic Complexes
3. 学会等名 17th International Symposium on Novel Aromatic Compounds (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daniel Hogberg、Bartolome Soberats、Yoshio、Masafumi、Satoshi Uchida、Lars Kloo、Hiroshi Segawa、Takashi Kato
2. 発表標題 Self-Assemblies of Liquid Crystals and Ionic Liquids: Design of Nanostructured Electrolytes for Application in Dye-Sensitized Solar Cells
3. 学会等名 IUMRS-ICAM2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉原由季、顔健彬、吉尾 正史、加藤隆史
2. 発表標題 グアニン部位を有するイオン応答性分子集合体の設計および構築
3. 学会等名 2017年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 濱口和馬、吉尾 正史、坂本健、加藤隆史
2. 発表標題 液晶ナノ構造分離膜の構築と構造制御
3. 学会等名 2017年日本液晶液晶学会討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 濱口和馬、吉尾 正史、坂本健、加藤隆史
2. 発表標題 液晶ナノ構造膜の構築と分離特性
3. 学会等名 第66回高分子討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内田淳也、吉尾正史、佐藤宗太、Hiroyuki Yokoyama、藤田誠、加藤隆史
2. 発表標題 液晶ナノ構造を形成する自己組織化巨大球状体
3. 学会等名 IUPAC-FAPS 2017 Polymer Congress
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉原由季、顔健彬、吉尾正史、加藤隆史
2. 発表標題 グアニン部位を有するイオン応答性分子集合体の構築
3. 学会等名 第7回CSJ化学フェスタ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 濱口和馬、吉尾正史、坂本健、加藤隆史
2. 発表標題 液晶ナノ構造を有する分離膜の開発
3. 学会等名 第7回CSJ化学フェスタ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masafumi Yoshio
2. 発表標題 Supramolecular Liquid-Crystalline Materials for Ion and Electron Transport and Stimuli-Responsive Emission
3. 学会等名 International Congress on Pure & Applied Chemistry (ICPAC) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 液晶性電解質の設計とイオン伝導度測定
3. 学会等名 日本液晶学会全フォーラム合同基礎講座2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Siyu Cao, Masafumi Yoshio
2. 発表標題 Ion-Conductive Nanostructured Polymer Films Formed by Photopolymerization of Liquid-Crystalline Monomers
3. 学会等名 2019年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 プレnstेटド酸塩基対に基づく無水プロトン伝導性液晶
3. 学会等名 2019年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Monika Gupta, Yuto Suzuki, Takeshi Sakamoto, Masafumi Yoshio, Miaomiao Liu, Shotaro Torii, Hiroyuki Katayama, Takashi Kato
2. 発表標題 Development of Water Treatment Membranes from Polymerizable Photocleavable Columnar Liquid Crystals
3. 学会等名 第23回液晶化学研究会シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masafumi Yoshio
2. 発表標題 Liquid-Crystalline Assemblies Forming Nanochannels
3. 学会等名 1st SAINT-GOBAIN_ICC-LINK Workshop (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富田 恭平, 河野 慎一郎, 吉尾 正史, 田中 健太郎
2. 発表標題 異方的リチウムイオン伝導場を目指したカラムナー液晶性大環状化合物の創製
3. 学会等名 日本化学会第99春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉尾正史
2. 発表標題 液晶自己組織化を活用するイオンのナノ配列制御と機能開拓
3. 学会等名 超分子研究会2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 吉尾正史	4. 発行年 2018年
2. 出版社 株式会社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 15
3. 書名 高速イオン伝導体の開発ーポストリチウムに向けた革新的二次電池の材料開発	

〔産業財産権〕

[その他]

<https://www.nims.go.jp/research/group/molecular-mechatronics/index.html>

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