

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05257

研究課題名（和文）広義のライオトロピック液晶性に基づいた高分子イオニクスの開拓

研究課題名（英文）Development of polymer Ionics based on extended lyotropic liquid crystalline property

研究代表者

長尾 祐樹 (Nagao, Yuki)

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：20431520

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スルホン化ポリイミド薄膜を主な対象に、広義のライオトロピック液晶性を得るための構造的要因を解明し、高分子イオンを拡張することを目指した。その結果、ライオトロピック液晶性による組織構造化に、側鎖のアルキルスルホン基が強く寄与することが明らかにされた。主鎖の剛直性・平面性については、脂環式骨格では組織構造化できなかったことから、それらも組織構造化に対して重要であることが確認された。一方脂環式骨格でも、分子量を向上させることで組織構造化できることも見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高プロトン伝導性の高分子には長距離秩序がないことから（アモルファスな構造）、マイクロナノ構造とマクロな物性であるプロトン伝導度の議論は距離的なスケールで直接的には十分に議論されていなかった。本研究成果は、広義のライオトロピック液晶性を用いた高分子の組織構造化を検討することで、構造とプロトン伝導の相関の議論を可能にした。また、従来とは全く異なる高プロトン伝導性高分子のための新しい分子設計指針を拓き、高分子イオニクスの学問分野が拡張された。

研究成果の概要（英文）：In this study, I aimed to extend the concept of a polymer Ionics using a lyotropic liquid crystal (LC) property in sulfonated polyimide thin films and other polymers by elucidating the structural factors. The alkyl-sulfonated group at the side chain strongly contributes to make an organized structure due to the lyotropic LC property. Regarding the rigidity and flatness of the main chain, it was confirmed that they are also important for organized structures because the alicyclic skeleton did not show the organized structure. On the other hand, it was also found that the alicyclic skeleton can be structurally organized by increasing the molecular weight.

研究分野：高分子化学

キーワード：燃料電池 リオトロピック液晶 組織構造 階層構造 プロトン伝導 界面 微小角入射X線小角散乱 赤外多角入射分解分光法

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。

1. 研究開始当初の背景

高分子におけるプロトン伝導は、酸発生基の pKa やその場観察 (in situ) での含有水分子の情報等の他に、主鎖および側鎖における親水・疎水制御による相分離構造によって議論されてきた (K. D. Kreuer *J. Membr. Sci.* **185**, 29 (2001), M. Rikukawa *et al. Prog. Polym. Sci.* **25**, 1463 (2000), M. A. Hickner *et al. Chem. Rev.* **104**, 4587 (2004)). 特に高プロトン伝導性の高分子には長距離秩序がないことから (アモルファス的な構造) ミクロなナノ構造とマクロな物性であるプロトン伝導度の議論は距離的なスケールで直接的には十分に議論されていなかった。この課題は、構造が明確でないことに起因している。一方、構造を組織化することでイオン伝導チャネルを作り込むアプローチはないわけではなく、Ikkala らの報告に始まり、例えば加藤らが取り組んできた (J. Ruokolainen *et al. Science* **280**, 557 (1998), T. Kato *et al. Nat. Rev. Mater.* **2**, 17001 (2017)). このような高分子イオニクスの背景の中で、研究代表者らは、剛直な主鎖が排除体積効果で配向するライオトロピック液晶性に着眼し、側鎖にスルホン基を有するスルホン化ポリイミドにおいて、組織構造 (ラメラ構造) を有し、室温で $10^{-1} \text{ S cm}^{-1}$ オーダーの高プロトン伝導性を発見した (*J. Mater. Chem. A* **2**, 6895 (2014)). この組織構造は水分子の含有で構造の規則性や周期性が可逆的に向上する広義のライオトロピック液晶性を示す特徴がある。また、偏光顕微鏡観察でマイクロメートルスケールの液晶性ドメインも観測されている。当時の課題は、ライオトロピック液晶性による組織構造化におけるプロトン伝導に強く寄与する構造的要因の洗い出しであった。ライオトロピック液晶性の性質から、剛直な主鎖が必須であると考えられたが、どの程度の剛直性が必要なのか、また、側鎖の役割も明らかにする必要があった。

2. 研究の目的

これまで研究代表者は、構造に長距離秩序性のない高分子を基板界面の相互作用を用いて配向させ、プロトン伝導性を向上させる研究を行ってきた (*Langmuir* **33**, 12547 (2017)). その研究の過程で、永野 (元 名古屋大学、現 立教大学) および原 (名古屋大学) らが温湿度可変の X 線解析技術を発展させ、任意の温湿度において、組織構造の同定を可能にしてきた (*J. Phys. Chem. C*, **119**, 21767 (2015)). これらの準備状況を踏まえ、スルホン化ポリイミド薄膜を対象に予備実験を行った結果、主鎖骨格および側鎖を変化させると、組織構造の構造周期性や規則性が大きく変化し、その構造変化によって、プロトン伝導性が変化することがわかってきた。そこで本研究では、スルホン化ポリイミド薄膜を主な対象に、側鎖長の長短や親疎水基、芳香族骨格や脂環式骨格の導入を系統的に行うことで、広義のライオトロピック液晶性を得るための構造的要因を解明し、高分子イオニクスを拡張することを目指した。

3. 研究の方法

スルホン化ポリイミドの骨格の検討は、主鎖は剛直性と平面性の変化の観点で、側鎖はアルキル鎖長の変化やスルホン基の一部を疎水基に置換する変化の観点で行った。具体的な検討は、

- (1) 主鎖骨格の剛直性・平面性の検討
- (2) 主鎖骨格の脂環式骨格の検討
- (3) 側鎖への疎水基導入の検討
- (4) 側鎖のアルキル鎖長の検討

をそれぞれ行った。

評価は湿度 (RH) 可変の微小角入射 X 線小角散乱 (GISAXS)、透過 IR、プロトン伝導度および高感度水晶振動子マイクロバランス法 (QCM) を in situ 測定で実施できるように必要に応じて改良を行った。GISAXS 測定は永野、原らに協力を頂いた。プロトン伝導度は基板表面に平行方向に測定した。高分子の主鎖の配向状態を知るために、赤外多角入射分解分光法 (pMAIRS) を用いた。基板は石英ガラスもしくはシリコンウエハを用いた。成膜はスピコート法を用いた。薄膜の厚さは約 500 nm で統一した。

4. 研究成果

- (1) 主鎖骨格の剛直性・平面性の検討

図 1 のような 4 種の主鎖骨格の平面性が異なるスルホン化ポリイミドを合成し、GISAXS や pMAIRS 等によって構造の検討を行った。その結果、主鎖骨格を屈曲させた高分子薄膜であっても、ラメラ構造が得られる意外な結果を得た。得られたラメラ構造のラメラ層間距離はいずれも 1.5 - 3.0 nm の間であり、側鎖長がラメラ層間に影響を与えていることが示唆された。またラメラ層間は含有水分子数に対して可逆的に変化する特徴があることを見出された。得られた結果から側鎖のアルキルスルホン基がライオトロピック液晶性をドライビングフォースとする組織構造化に対して重要な役割を果たしていることがわかった。偏光顕微鏡観察の結果から、いずれの薄膜に対しても複屈折が観測された。光学的ドメインサイズは骨格によって異なるものとなった。一方プロトン伝導性は、平面性が高い高分子薄膜で $2 \times 10^{-1} \text{ S cm}^{-1}$ 、主鎖骨格が屈曲した高分子薄膜で $3 - 8 \times 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ と 1 桁異なる結果を得た。これはわずかな主鎖骨格の歪がプロトン伝導度に強い影響を与えることを示唆している。光学的ドメインサイズとプロトン伝導性には直接的な相関は見られなかった。これは、ドメインサイズが十分に大きいため、プロ

トン伝導を測定した交流インピーダンス法の周波数ではドメイン内部のみが対象になり、ドメインの界面（端）の寄与を殆ど観測できなかったためであると考えられる。

結果をまとめると、側鎖のスルホン基がライオトロピック液晶性に強く寄与していることがわかり、主鎖骨格の平面性が多少屈曲していてもラメラ構造が得られることがわかった。ラメラ構造中の 1-2 nm 程度の水が基板面内方向につながることで、基板面内方向に高プロトン伝導性を発現していることを明らかにした。いずれのスルホン化ポリイミド薄膜においても組織構造が形成されたことは、研究開始当初に予想しておらず、当初予想していた以上に側鎖のスルホン基が自発的な組織構造化を支配していると考えられた。

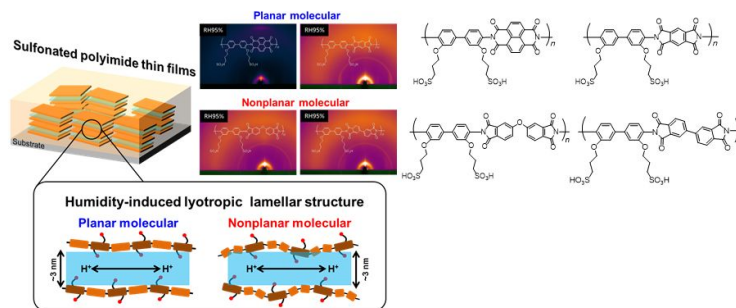


図 1 スルホン化ポリイミド薄膜における主鎖骨格の剛直性・平面性が組織構造とプロトン伝導性に与える影響の検討

(2) 主鎖骨格の脂環式骨格の検討

(1)の結果から、側鎖のアルキルスルホン基がライオトロピック液晶性に強く寄与していることが明らかになったため、主鎖骨格をさらに低い剛直性・平面性にした際の組織構造とプロトン伝導性の検討を行った。(1)では主鎖に芳香族系の骨格を導入したのに対して、(2)では図2の脂環式骨格を導入した。その結果、加湿下においても組織構造は得られず、側鎖のアルキルスルホン基のライオトロピック液晶性への寄与にも限界があることがわかった。

研究代表者らは、ポリマーの分子量が組織構造の構造規則性・周期性に影響を与えることを既に見出していた(*J. Phys. Chem. C*, **119**, 21767 (2015))。そこで、この知見を応用し、図2の脂環式スルホン化ポリイミドにおいて、分子量を向上させる検討を行った。分子量を 25000 から 40000 に増加させたスルホン化ポリイミド薄膜の GISAXS の結果から、加湿と共にラメラ構造が発現することを見出した。また、RH の増加と共に構造規則性・周期性が向上することも明らかになった。一方分子量を向上させても、500 nm の厚さの薄膜に対する偏光顕微鏡観察では、明確な光学的ドメインは観測されなかった。一方厚膜にすることで、複屈折を観測することができた。プロトン伝導度は分子量の向上と共に顕著に増加し、脂環式スルホン化ポリイミド薄膜においても、 $10^{-1} \text{ S cm}^{-1}$ (298 K) オーダーの高プロトン伝導性高分子薄膜を得ることができた。この結果は、ライオトロピック液晶性による組織構造は、主鎖が必ずしも剛直や平面である必要がなく、分子量が組織構造にとって重要なパラメータとなることを示している。これまで分子量はプロトン伝導性には影響しないと考えられてきたため、得られた成果は今後の高プロトン伝導性高分子の分子設計において重要な知見となった。なお、本研究成果は、*Polymer Journal* で雑誌カバーに選出された(図3、*Polym. J.* **51**, 31 (2019))。

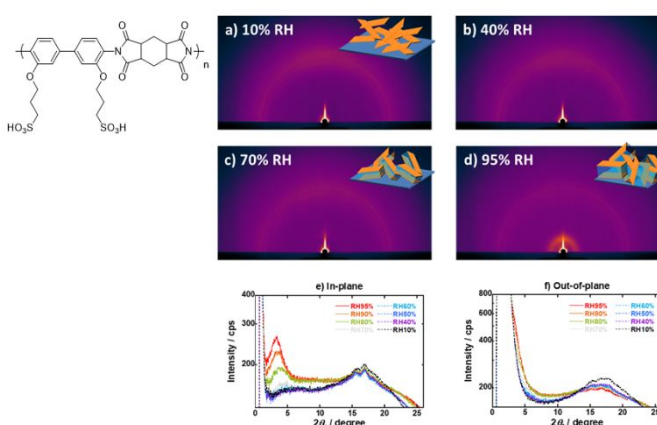


図 2 脂環式スルホン化ポリイミド骨格と RH in situ GISAXS の結果 (分子量 = 25000)



図 3 雑誌表紙に選出

(3) 側鎖への疎水基導入の検討

(1)と(2)の結果から、側鎖のアルキルスルホン基がライオトロピック液晶性の発現に強く寄与していると考えられた。そこで、側鎖のアルキルスルホン基の一部を疎水基に置換して、組織構造の検討を行った。図4に示す側鎖の 20%をメチル基に置換したスルホン化ポリイミドを合成した。GISAXS の結果から、加湿前からラメラ構造が観測され、RH の増加と共に構造規則性・周期性が向上した。また、面内方向に RH に依存しない高次の散乱が観測された。これはユニッ

ト鎖長に帰属される。これまでのスルホン化ポリイミド薄膜と比べて、面内方向の構造規則性・周期性が向上したことが示唆された。一方ラメラ層間距離は、短い側鎖に20%置換したにも関わらず、(1)と同様のラメラ層間(< 3.0 nm)を有することもわかった。これらの結果から総合的に考えると、側鎖のアルキルスルホン基は非常に強くライオトロピック液晶性に寄与しており、側鎖の親疎水性も組織構造の構造化に影響を与えることがわかった。プロトン伝導度はRH95%、298 Kにおいて、 $3.2 \times 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ であり、疎水基を導入した分低下した。このプロトン伝導度の低下は、キャリア濃度の低下分よりも著しいことから、プロトンの移動度が低下したと考えられる。

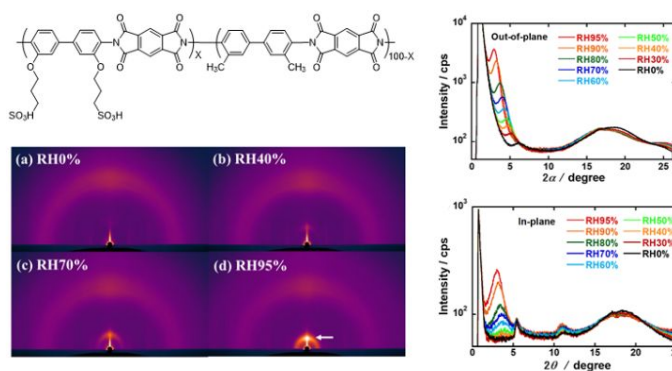


図4 スルホン化ポリイミド薄膜における側鎖の親疎水性が組織構造とプロトン伝導性に与える影響の検討

(4) 側鎖のアルキル鎖長の検討

(1)から(3)の結果を受けて、ラメラ構造のラメラ層間が側鎖長に依存していると仮説を立て、側鎖長に対する組織構造の検討を行った。図5のように4種の異なる側鎖長(炭素数 $X = 0, 3, 6, 10$)を有するスルホン化ポリイミドを合成した。モノマーの合成は文献を参考にした(T. Yasuda *et al.* *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.* **44**, 3995 (2006))。それぞれの薄膜に対するGISAXSの結果から、いずれの薄膜もラメラ構造を形成しており、RHの増加と共に構造規則性・周期性が向上することがわかった。RH in situ QCMの結果から、最大含有水分子数は $X=10$ 以外の薄膜でスルホン基1個当たり $15\text{H}_2\text{O}$ 、 $X=10$ の薄膜で約 $10\text{H}_2\text{O}$ まで低下することがわかった。含有水分子数の低下は疎水性の側鎖が寄与していると考えられる。図5下に示すように、側鎖のアルキル鎖の炭素数に応じて最大ラメラ層間が線形に増加することもわかった。このことから、含有水分子数ではなく、側鎖のアルキルスルホン基の長さがラメラ層間を支配していることがわかった。プロトン伝導度は、 $X = 0, 3, 6, 10$ のスルホン化ポリイミド薄膜で、RH95%、298 Kにおいて、それぞれ 7.5×10^{-2} 、 1.8×10^{-1} 、 9.6×10^{-2} 、 $3.4 \times 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ を示した。

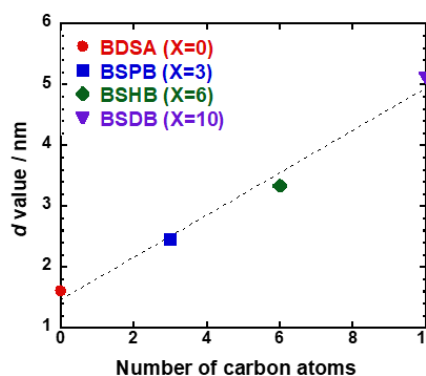
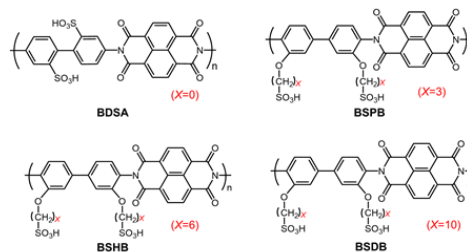


図5 スルホン化ポリイミド薄膜における側鎖長が組織構造とプロトン伝導性に与える影響の検討

最後に、側鎖により親水性の側鎖を導入することで、加湿下においてさらなる含水化を試み、組織構造に与える影響を調べた。GISAXSの結果から、組織構造はラメラ構造であるが、これまでのスルホン化ポリイミド薄膜と比較して散乱強度が相対的に向上した。これは薄膜への含水が促進され、ライオトロピック液晶性がより強く寄与したためと考えられる。課題であった高プロトン伝導性の起源の解明として、主鎖が二量化した状態のバレイヤー構造を示唆する - スタックに帰属される新たな散乱が面外方向に観測された。このことから、スルホン化ポリイミドの主鎖はラメラ構造の中で二本鎖で一組であり、側鎖のスルホン基は親水層に上下に伸びた構造をとっていることが予想された。主鎖がペアになることで、酸濃度は二倍になるため、高プロトン伝導性を説明することができる。この構造が高プロトン伝導性の起源に関係していると考えられる。

これらの知見に基づいてスルホン化ポリイミド以外的高分子において組織構造を示す材料探索を行ったが、明確な組織構造を示す高分子を見いだすことはできなかった。組織構造を発現するための剛直性と極性基の選択条件は、それほど広くはない感触を得るに留まった。

以上の成果をまとめると、スルホン化ポリイミド薄膜において、広義のライオトロピック液晶性による組織構造化への寄与は、側鎖のアルキルスルホン基の影響が非常に強いことが明らかにされた。主鎖の剛直性・平面性については、平面性が低い脂環式骨格では組織構造化できなかったことから、それらも組織構造化に対して重要であることが確認された。一方、分子量を向上させることで同一構造式からなる薄膜がラメラ構造に組織化できることもわかった。高分子の

分子量が組織構造化に加えプロトン伝導性にも強い影響を与えうる知見は、高プロトン伝導性高分子の新しい分子設計に応用可能であり、本研究によって高分子イオニクスの学問分野を拡張することができたと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 32件/うち国際共著 19件/うちオープンアクセス 32件）

1. 著者名 SUWANSOONTORN Athchaya, YAMAMOTO Katsuhiko, NAGANO Shusaku, MATSUI Jun, NAGAO Yuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Interfacial and Internal Proton Conduction of Weak-acid Functionalized Styrene-based Copolymer with Various Carboxylic Acid Concentrations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5796/electrochemistry.21-00042	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 Wang Fangfang, Wang Dongjin, Nagao Yuki	4. 巻 -
2. 論文標題 OH- Conductive Properties and Water Uptake of Anion Exchange Thin Films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ChemSusChem	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/cssc.202100711	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 R. Goto, Y. Ono, M. Hara, T. Seki, Y. Nagao, S. Nagano	4. 巻 -
2. 論文標題 Preparation and structural characterization of shear aligned films for a high proton conductive alkyl sulfonated polyimide with lyotropic liquid crystallinity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mol. Cryst. Liq. Cryst.	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Y. Nagao, K. Ohno, S. Tsuyuki, K. Suetsugu, M. Hara, S. Nagano	4. 巻 686
2. 論文標題 Effect of Molecular Orientation to Proton Conductivity in Sulfonated Polyimides with bent backbones	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mol. Cryst. Liq. Cryst.	6. 最初と最後の頁 84-91
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/15421406.2019.1648041	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 U. Salma, D. Zhang, Y. Nagao	4. 巻 5
2. 論文標題 Imidazolium Functionalized Fluorene Based Anion Exchange Membrane (AEM) for Fuel Cell Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ChemistrySelect	6. 最初と最後の頁 1255-1263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/slct.201903246	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 該当する

1. 著者名 Y. Nagao	4. 巻 21
2. 論文標題 Progress on highly proton-conductive polymer thin films with organized structure and molecularly oriented structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sci. Tech. Adv. Mater (STAM)	6. 最初と最後の頁 79-91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14686996.2020.1722740	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 Y. Ono, R. Goto, M. Hara, S. Nagano, T. Abe, Y. Nagao	4. 巻 51
2. 論文標題 High proton conduction of organized sulfonated polyimide thin films with planar and bent backbones	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 3351 - 3359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.8b00301	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 長尾祐樹	4. 巻 75
2. 論文標題 分子配向と組織構造を利用した高プロトン伝導性高分子薄膜の研究 (Review)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 高分子論文集	6. 最初と最後の頁 576 - 587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1295/koron.2018-0012	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 K. Takakura, Y. Ono, K. Suetsugu, M. Hara, S. Nagano, T. Abe, Y. Nagao	4. 巻 51
2. 論文標題 Lyotropic ordering for high proton conductivity in sulfonated semialiphatic polyimide thin films (Selected as Cover Picture)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 31 - 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-018-0111-1	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 Y. Nagao, A. Enta, A. Suwansoontorn, Y. Ono	4. 巻 88
2. 論文標題 Proton Conductivity and Oriented Structure of Nafion Thin Films on the Au-deposited Surface and MgO Substrate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ECS Trans.	6. 最初と最後の頁 249 - 258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7454/mst.v22i3.3638	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 Y. Nagao, T. Tanaka, Y. Ono, K. Suetsugu, M. Hara, G. Wang, S. Nagano, T. Abe	4. 巻 300
2. 論文標題 Introducing planar hydrophobic groups into an alkyl-sulfonated rigid polyimide and how this affects morphology and proton conductivity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electrochim. Acta	6. 最初と最後の頁 333 - 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.electacta.2019.01.118	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 該当する

〔学会発表〕 計46件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Progress on highly proton-conductive polymer thin films with organized structure and molecularly oriented structure
3. 学会等名 2nd POSTGRADUATE SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長尾祐樹
2. 発表標題 ソフトマターにおける階層構造制御と電子・イオンのダイナミック制御 (チュートリアル講演)
3. 学会等名 第69回高分子討論会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長尾祐樹
2. 発表標題 組織構造を有する高分子薄膜の構造と高プロトン伝導性
3. 学会等名 第23回液晶化学研究会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yao, H. Watanabe, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao
2. 発表標題 高プロトン伝導性半脂環式スルホン化ポリイミド薄膜におけるリोटロピック液晶性と組織構造
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 Y. Yao, H. Watanabe, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao
2. 発表標題 Lyotropic liquid crystal property and organized structure in high proton-conductive semi-alicyclic sulfonated polyimide thin films
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 Y. Nagao, T. Honbo, Y. Ono, M. Hara, S. Nagano
2 . 発表標題 Organized structure and high proton conduction in sulfonated polyimide thin films
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 U. Salma, Y. Nagao
2 . 発表標題 A polyfluorene polymer containing imidazolium cationic groups for anion exchange membrane fuel cells
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 Y. Nagao
2 . 発表標題 High Proton Conduction and Organized Structure in Polymer Thin Films
3 . 学会等名 2019 International Conference on Nanospace Materials (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Yao, H. Watanabe, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao
2 . 発表標題 Lyotropic liquid crystal property and organized structure in high proton-conductive semi-alicyclic sulfonated polyimide thin films
3 . 学会等名 International Student Workshop on Aromatic Functional Polymers (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yao, H. Watanabe, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao
2. 発表標題 Semi-alicyclic sulfonated polyimide thin film with organized structure for high proton conductive electrolyte
3. 学会等名 第27回 日本ポリイミド・芳香族系高分子会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nagao, Y. Yao, H. Watanabe, M. Hara, S. Nagano
2. 発表標題 High proton conduction in sulfonated semialiphatic polyimide thin films
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 U. Salma, Y. Nagao
2. 発表標題 Hydroxide ion conducting fluorene based polymers for fuel cell applications
3. 学会等名 2019年度北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yao, H. Watanabe, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao
2. 発表標題 High proton-conductive semi-alicyclic sulfonated polyimide thin film with organized structure
3. 学会等名 2019年度北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Wang, Y. Nagao
2. 発表標題 Study on fluorene-based polymer thin film for high anion conduction
3. 学会等名 2019年度北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Proton Conductivity Enhancement in Polymer Thin Films by Molecular Orientation and Organized Structure
3. 学会等名 16th International Symposium on Polymer Electrolytes (ISPE-16) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Proton Conductivity Enhancement in Polymer Thin Films by Organized Structure
3. 学会等名 2018 Fuel Cells Gordon Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Proton Conductivity Enhancement in Polymer Thin Films by Molecular Orientation and Organized Structure
3. 学会等名 First International Conference on 4D Materials and Systems (4DMS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 高プロトン伝導性スルホン化ポリイミド薄膜の研究における液晶性との出会い
3. 学会等名 2018年日本液晶学会討論会・液晶交流会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Study on molecular orientation in polymer electrolyte thin films by IR pMAIRS
3. 学会等名 2018 KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEF 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾祐樹, 高倉健作, 小野祐太郎, 後藤峻介, 末次輝太, 原光生, 永野修作, 安部隆
2. 発表標題 スルホン化ポリイミド薄膜における主鎖剛直性とプロトン伝導
3. 学会等名 第67回高分子討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾祐樹, 小野祐太郎, 高倉健作, 後藤峻介, 末次輝太, 原光生, 永野修作, 安部隆
2. 発表標題 高プロトン伝導性スルホン化ポリイミド薄膜における構造規則性と分子量の相関
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末次輝太, 後藤峻介, 長尾祐樹, 原光生, 永野修作, 関隆広
2. 発表標題 光応答性液晶基とアクリル酸のランダム共重合体が形成するスメクチック相の配向制御とプロトン伝導度
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本保徹也, 小野祐太郎, 長尾祐樹
2. 発表標題 スルホン化ポリイミド薄膜における側鎖長変化によるプロトン輸送特性への影響
3. 学会等名 第26回日本ポリイミド・芳香族系高分子会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本保徹也, 小野祐太郎, 長尾祐樹
2. 発表標題 アルキル側鎖長の異なるスルホン化ポリイミド薄膜のプロトン輸送特性
3. 学会等名 平成30年度北陸地区高分子若手研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本保徹也, 小野祐太郎, 長尾祐樹
2. 発表標題 アルキル側鎖長の異なるスルホン化ポリイミド薄膜のプロトン輸送特性
3. 学会等名 平成30年度高分子学会北陸支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Proton Conductivity Enhancement in Polymer Thin Films by Molecular Orientation and Organized Structure
3. 学会等名 The 6th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals & Environment (RAMM) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本保徹也, 小野祐太郎, 長尾祐樹
2. 発表標題 スルホン化ポリイミド薄膜における側鎖の組織構造およびプロトン輸送特性への影響
3. 学会等名 平成30年度 北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Honbo, Y. Ono, Y. Nagao
2. 発表標題 Effect of alkyl chain lengths on high proton conductive polyimide thin films
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 Y. Nagao
2. 発表標題 界面を用いた高分子の高プロトン伝導化
3. 学会等名 表面技術協会関東支部95回講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Proton conductivity and oriented structure of polymer thin films on substrates
3. 学会等名 International Intercollegiate Workshop on Advanced Chemical Science and Engineering 2019 (Taiwan) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 組織構造を有する高分子薄膜の構造と高プロトン伝導性
3. 学会等名 18-2 高分子学会 超分子研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Recent progress of researches on proton conductive polymer thin films
3. 学会等名 The 4th Malaysia-Japan Joint Symposium on Nanoelectronics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Honbo, K. Suetsugu, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao
2. 発表標題 Influence of alkyl side chain lengths on organized structure and proton conductivity in sulfonated polyimide thin films
3. 学会等名 JAIST Japan-India Symposium on Advanced Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yao, Y. Nagao
2. 発表標題 Characterization of high proton-conductive semi-alicyclic sulfonated polyimide thin films
3. 学会等名 JAIST Japan-India Symposium on Advanced Science 2020 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nagao, T. Tanaka, K. Suetsugu, M. Hara, S. Nagano
2. 発表標題 Influence of organized structure and high proton conduction by hydrophobic group introduction in sulfonated polyimide thin films
3. 学会等名 The 99th CSJ Annual Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Honbo, Y. Ono, K. Suetsugu, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao
2. 発表標題 Effect of alkyl side chain lengths on organized structure and proton transport in sulfonated polyimide thin films
3. 学会等名 The 99th CSJ Annual Meeting 2020
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Gaining more control over fuel cell membranes https://www.asiaresearchnews.com/content/gaining-more-control-over-fuel-cell-membranes 固体高分子形燃料電池の効率向上を目指す https://e-materials.net/stam/pickuppaper/detail.html?pp_id=84 次世代燃料電池のアニオン交換薄膜において水酸化物イオン伝導度の評価法を確立 https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/press/2021/05/07-1.html 高分子薄膜における水素イオンの界面輸送で新知見 https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/press/2021/05/28-1.html</p>

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
研究協力者	永野 修作 (Nagano Shusaku)		
研究協力者	原 光生 (Hara Mitsuo)		
研究協力者	山本 勝宏 (Yamamoto Katsuhiro)		
研究協力者	鳥飼 直也 (Torikai Naoya)		

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		
マレーシア	Universiti Malaysia Pahang	Centre for Ionics University of Malaya	
中国	Chinese Academy of Sciences		
バングラデシュ	Shahjalal Univ. of Sci. and Tech.		
タイ	Chulalongkorn University		
カナダ	University of Calgary	Canadian Nuclear Laboratories	
マレーシア	Universiti Malaysia Pahang		
中国	Harbin Institute of Technology		

共同研究相手国	相手方研究機関			
シンガポール	シンガポール国立大学			