

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01997

研究課題名（和文）階層的構造を利用したイオン伝導の力学応答機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the mechanical response mechanism of ion conduction using a hierarchical structure

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・教授

研究者番号：20431520

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）：本研究では、リオトロピック液晶性によって組織化するスルホン化ポリイミド膜が膜面に対して垂直方向に加えた機械的負荷で、イオン伝導性の応答の有無およびそのメカニズムを検討した。開発した測定装置を用いて、プロトン伝導の抵抗が圧力とともに線形に増加することを確認し、特に従来の材料より一桁高い感度 $24 \text{ MPa}^{-1}$ を示す膜を見出した。スルホン化ポリイミドの構造や側鎖のイオン種によって応答が異なることがわかった含水下での組織化の構造周期性の向上や修復性がイオン伝導度の感度と応答性を高めた結果であり、リオトロピック液晶性を活用した新たなセンサ材料の開発が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、スルホン化ポリイミド膜のイオン伝導性が機械的負荷に応答することについて、リオトロピック液晶性を用いた分子組織化を用いた、生体に近い触力覚センシング技術を切り開いた点で学術的意義を持つ。特に、高次構造の周期性がイオン伝導性の抵抗変化や感度に影響を与えることを見出した知見はインパクトがある。社会的には、この知見はより生体に近いメカニズムを有する触力覚センサなどのウェアラブルデバイスやヘルスケアアプリケーション、人間の皮膚のような高感度かつ自己修復可能なセンシング材料の実現が期待され、未来のロボティクスや医療技術に革新をもたらすことが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we examined the responsiveness of ion conductivity to mechanical loads applied perpendicular to the surface of sulfonated polyimide membranes organized by lyotropic liquid crystallinity. Using a developed measurement apparatus, we confirmed that the resistance of proton conductivity increased linearly with pressure, particularly identifying membranes that exhibited a sensitivity of  $24 \text{ MPa}^{-1}$ , an order of magnitude higher than conventional materials. We found that the response varied depending on the structure of sulfonated polyimide and the ion species in the side chains. The enhancement of structural periodicity and reparability of organization under hydration increased the sensitivity and responsiveness of ion conductivity. This outcome enabled the development of novel sensor materials utilizing lyotropic liquid crystallinity.

研究分野：高分子

キーワード：触力覚センサ材料 生体模倣 機械的負荷応答 圧力依存性 リオトロピック液晶性 イオン伝導 高次構造 分子組織化

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

動物やヒトが外界を感知するための五感、感覚機能として生活に欠かせないものである。触力覚は物に触れその質感を感じることや、物を掴んで操る動作において重要な役割を担う。現在の触力覚の人工的なセンシング技術は、視覚や聴覚の分野と比較して研究の発展の余地がまだ大きく、生体を実現する低消費電力での高度なセンシング技術への到達は、今後の研究において重要な目標である。その背景には、触力覚のセンシングには電子輸送を用いた半導体材料が主に用いられてきたことが挙げられる (例えば、e-skin で有名な Someya *et al. Nature* **499**, 458 (2013))。現在も、機械的負荷を定量的に検出するロボット用の触力覚センサは、省電力化、軽量・小型化や再現性が課題である。

生体系の触力覚センシングでは、ソフトマターの協同性により、機械的刺激を受けたタンパク質等の高次階層構造が変化することでイオンチャネルが制御され、感覚神経へ伝達される機構が見事に実現されている。これに対して、人工的な触力覚センシングは、イオン伝導性ソフトマター分野においても分子構造の設計指針すら確立していない未知の分野であった。

イオン伝導性ソフトマター分野の現状は、電子やイオンの相互作用や液晶性を用いた分子や高分子の精密な集積化に基づいたイオン輸送の制御が始まっている (Kato *et al. Nat. Rev. Mater.* **2**, 17001 (2017))。研究代表者も、これまでに、イオン伝導性ソフトマターにおいて、分子配向や階層的構造の長距離秩序性がイオン輸送にとって重要であることを、3報の Review 論文を含め 30 報近く報告してきた (Nagao *Langmuir* **33**, 12547 (2017), Nagao *Sci. Tech. Adv. Mater. (STAM)*, **21**, 79 (2020) など)。例えば、溶媒下の排除体積効果を利用して高分子鎖を集積することが可能なりオトロピック液晶性を用いることで、剛直な主鎖を有するスルホン化ポリイミド膜で、階層的構造の1つであるラメラ構造化に成功した。このラメラ構造は、水のナノチャネルが自発的に形成され、 $10^{-1} \text{ S cm}^{-1}$  レベルの高いプロトン伝導性や 5 桁の伝導異方性を示した。研究開始当初において、研究代表者は、階層的構造を構築することで高速なイオン輸送を制御できることを示し、生体系を模倣したイオン輸送デバイスへの応用の可能性を示した。

イオンを用いた触力覚センサの研究は、その高い伸縮性や自己修復性から、人工的な皮膚の模倣が期待されており、研究例が増えてきた (Matsuhisa *et al. Chem. Soc. Rev.*, **48**, 2946 (2019), Kim *et al. Adv. Funct. Mater.* **30**, 1904532 (2020) など)。この材料には、伸縮性の誘電体にイオン液体を埋め込んだものやイオン性の塩を含浸させたイオンゲルやハイドロゲルが用いられていた。その優れた伸縮性の特徴から、膜表面に垂直方向の圧縮ではなく平行方向の伸縮をセンシングするセンサ素子がほとんどであった。これらのセンシングには、材料のマクロな変形に関連した弾性体のポアソン比やヤング率等を用いて記述が可能な静電容量変化が用いられることが多く、本研究のような分子レベルでの組織構造変化は用いられていなかった。

研究代表者は次の研究ステップとして、階層的構造と高いイオン伝導性の特徴を活かした、生体系に通じる新たなイオン輸送デバイスへの展開を考えた。現在の触力覚センシングの動作原理が生体のそれとは未だかけ離れていることから、機械的負荷による階層的構造の変化を介して、イオンの移動度や濃度を変調することで、生体に通じる新たな触力覚センシング材料を実現できるのでは？という着想に至った。そこで研究代表者は、2名の研究分担者ととともに、図1のように含水により組織化されるスルホン化ポリイミド膜面に対して垂直方向に機械的負荷を与えることで、イオンチャネルであるラメラ層間が変化させ、イオン伝導度を変化させることを狙い、研究を開始した。

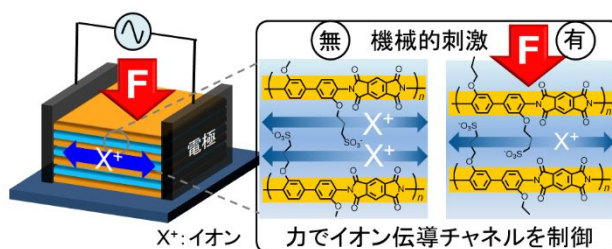


図1 機械的負荷に対するイオン伝導度の変化

### 2. 研究の目的

本研究の主目的は、機械的負荷が階層的構造を持つスルホン化ポリイミド膜のイオン伝導性にどのような変化を引き起こすかを明らかにし、その変化の原因を探索した。この目的を達成するために、以下の3つの具体的な研究項目に焦点を当てた。

1. 機械的負荷を伴うイオン伝導度測定装置の開発と改良：この装置により、実際の負荷が膜に与える影響を正確に測定できるようになった。
2. 機械的負荷によるイオン伝導性の変化の詳細な調査：機械的負荷がイオン伝導度にも与える影響を調べた。

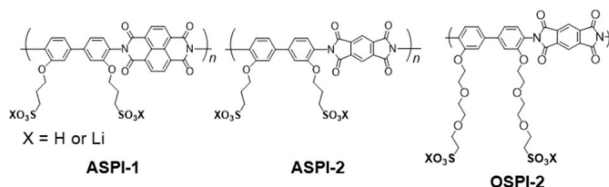


図2 種々のスルホン化ポリイミドの骨格例

### 3. 構造的特徴の探索：スルホン化ポリイミド膜の主鎖構造およびイオン種の影響を調べた（図2）。

これらの研究を通じて、スルホン化ポリイミド膜が機械的負荷にどのように反応するかを理解し、この知見を基に新たな触力覚センサ材料の開発に貢献することを目指した。

### 3. 研究の方法

本研究では、スルホン化ポリイミド膜の構造とイオン伝導性の変化を機械的負荷下で評価するために、以下の方法を採用した。

#### 1. イオン伝導度測定装置の開発と構造変化の調査:

- 測定装置: 圧力負荷を調整可能なサンプルホルダーを開発し改良を重ね、実験中の湿度を制御し、イオン伝導度の再現性の高いデータを取得した。
- 斜入射 X 線散乱(GIXRS)と中性子反射率測定: 含水による膜の構造変化や組織化および膜厚や深さ方向の膜密度を精密に同定した。これにより、ラメラ構造のラメラ層間変化を詳細に観察し、構造的特徴とイオン伝導性の関連を調べた。

#### 2. 機械的負荷によるイオン伝導性の変化の探索:

インピーダンス測定: 膜面に対して垂直方向の一軸圧力下でのイオン伝導度を測定し、圧力条件下での応答を分析した。圧力範囲は膜が塑性変形しないように 0.1-0.2 MPa 前後で検討した。

#### 3. 分子設計および構造的特徴の探索:

分子構造の影響の調査: 主鎖構造及びイオン種がスルホン化ポリイミド膜の階層的構造と機械的負荷に及ぼす影響を検討した。

これらの方法により、機械的負荷がスルホン化ポリイミド膜のイオン伝導性に及ぼす影響を理解し、触力覚センサ材料としての応用可能性を探った。

### 4. 研究成果

本研究では、スルホン化ポリイミド膜における機械的負荷とイオン伝導性の関係について詳細な調査を行った。以下の3つの主要な項目に沿った研究成果を述べる。

#### (1) イオン伝導度測定装置の開発と構造変化の調査

図3に示す新たに開発および改良されたイオン伝導度測定装置を用いて、スルホン化ポリイミド膜の機械的負荷下でのイオン伝導度の変化を正確に計測した。特にASPI-2膜が高湿度(RH)条件下での応答が顕著であり、圧力が加わると初期の抵抗値の最大約2倍まで抵抗が増加し、圧力が取り除かれると抵抗値が初期値に戻ることが確認された(図4、5)。この現象は、ASPI-2が可能性のある圧力感応材料であることを示しており、また、GIXRSから含水すると組織化が進み、ラメラ構造の構造周期性が向上した。RHが高い環境では、イオン伝導度が機械的負荷に応答することから、ラメラ構造の長距離秩序性が感度に関係することが予測された。これらのことをまとめると、その圧力応答の再現性、感度はRHが高い条件で特に優れていることからリオトロピック液晶性が影響していると考えられた。

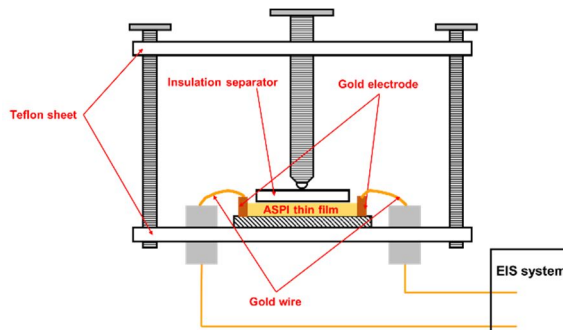


図3 機械的負荷を伴うイオン伝導度測定装置

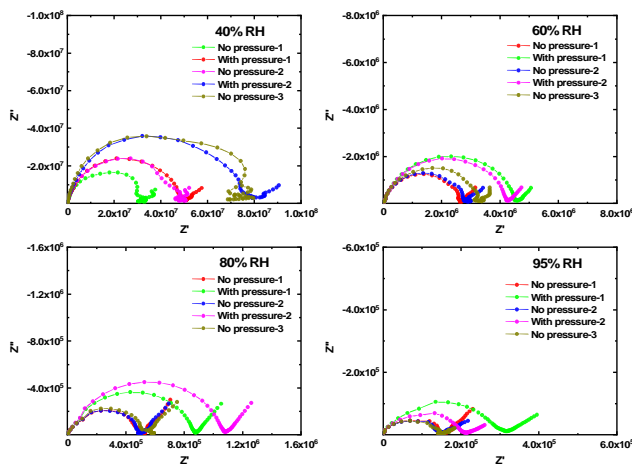


図4 厚さ約 500 nm の ASPI-2 薄膜の各相対湿度(RH)における 0.19 MPa の圧力に対するインピーダンスプロットの応答

#### (2) 機械的負荷によるイオン伝導性の変化の調査

ASPI-2の圧力応答をさらに深掘りするために、60%及び80%相対湿度での抵抗変化を詳細に分析した。60% RHでの実験結果では、抵抗値が圧力と共に線形に増加し、感度は $24 \text{ MPa}^{-1}$ と計算され、これは以前報告された材料と比較して一桁高い感度を示すことがわかった(図6)。一度抵抗が高くなってしまった膜でも、80% RHにさらしておく、抵抗値が圧力除去後に初期値に

戻ることから、ASPI-2 の復元性も確認された(図7)。この結果は、ASPI-2 が機械的負荷に対して高い感度と優れた復元性を持つ圧力感応材料としての潜在的な応用可能性を示している。

### (3) 構造的特徴の探索

スルホン化ポリイミド膜の分子構造がイオン伝導性に及ぼす影響についての調査では、特に ASPI-2 が示した圧力に対する高い応答が注目された。応答性は ASPI-2、OSPI-2、ASPI-1 の順に悪くなり、いずれも含水下でラメラ構造を示したが、主鎖構造や側鎖構造によってイオン伝導性の圧力応答は異なることがわかった。湿度の変化と共に抵抗値の変化を示すこの材料は、湿度が増加すると抵抗変化の再現性が向上することが確認され、特に高湿度環境下では圧力応答が顕著になる傾向が得られた。

以上の研究成果から、スルホン化ポリイミド膜は機械的負荷に対して高い感度を示し、特に ASPI-2 は湿度が高い環境下で優れた圧力応答を持つことが確認された。この知見は、将来のウェアラブルデバイスやヘルスケアアプリケーションへの応用に大きな可能性を持っている。

### (4) 研究開始当初に予期していなかった発見

本研究の進行中に、いくつかの予期しない発見があった。特に、リチウムイオンに置換したスルホン化ポリイミド薄膜が示した圧力応答は、研究開始時には予想もしていなかった重要な成果となった。当初は、側鎖のスルホン酸基がプロトンとリチウムのイオン伝導度は伝導度自体の大きさは異なるものの、両方が類似する圧力応答を示すと考えていた。しかし、実際には機械的負荷に対してイオン伝導度の応答が全く異なることがわかった。側鎖の末端をプロトンからリチウムイオンに置換した ASPI-1 および ASPI-2 のスルホン化ポリイミド薄膜(ASPI-1-Li および ASPI-2-Li) を合成して検討した結果、298K、相対湿度 80% 以上の高湿度領域でのみリチウムイオン伝導度が圧力によって変化した。また、その他にもプロトン体と異なる変化を示したので、以下にいくつかの特徴をまとめた。

1. ASPI-1-Li では 0.2 MPa の圧力をかけるとイオン伝導の抵抗が最大で 230% も増加した。
2. リチウム体では圧力を開放すると抵抗が元の状態よりも低下する傾向が目立った。プロトン体とリチウム体では圧力に対して異なるメカニズムでイオン伝導度が変化していると考えられた。
3. 主鎖にナフチル基を含むプロトン体(ASPI-1)の薄膜は、イオン伝導度に対して顕著な圧力応答を示さなかったが、リチウム体(ASPI-1-Li)では、イオン伝導度は圧力に応答した。このことから機械的負荷に対するイオン伝導度の変化にはキャリア依存性があることが示唆された。

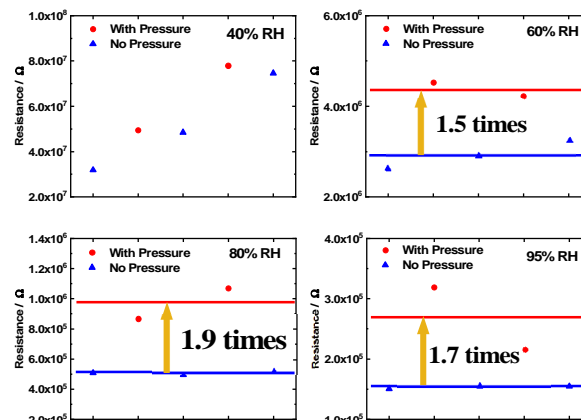


図5 厚さ約 500 nm の ASPI-2 薄膜の各相対湿度(RH)における 0.19 MPa の圧力に対するプロトン伝導の抵抗変化

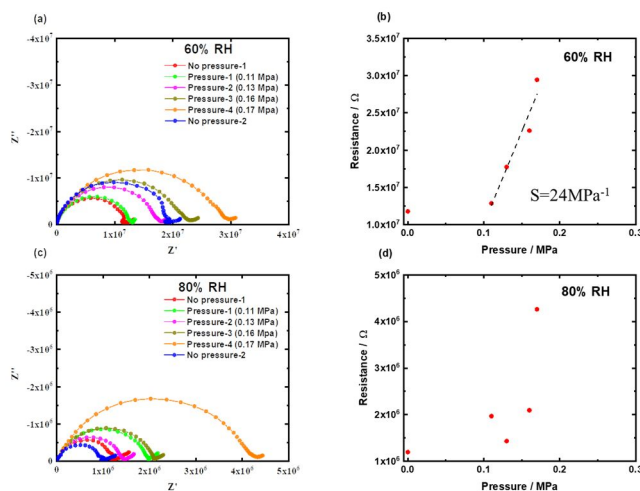


図6 厚さ約 500 nm の ASPI-2 薄膜の RH=60% 及び 80% におけるプロトン伝導抵抗の圧力依存性

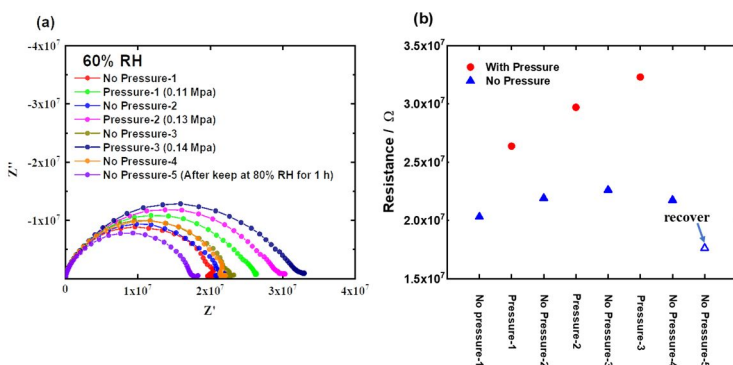


図7 厚さ約 500 nm の ASPI-2 薄膜における RH=80% 雰囲気アニールによるプロトン伝導抵抗の復元性

組織構造は、リチウムイオンに置換したスルホン化ポリイミド薄膜においても、プロトン体薄膜と同様に含水とともにラメラ構造が得られた。一方でラメラ間隔は各相対湿度において、リチウム体の方が狭い傾向があることがわかった。水晶振動子による湿度 in situ 測定で、含水量を検討した結果、プロトン体もリチウム体も各 RH で高分子ユニット当たりほぼ同数であることも明らかにした。本研究を通してスルホン化ポリイミドを用いた場合、イオン伝導度が圧力に影響しやすい構造やキャリア種があることがわかった。

#### (5) まとめ

ASPI-2 は、検討したスルホン化ポリイミドの中でも圧力に対するプロトン伝導度の変化の再現性が高く、抵抗値が圧力に連動して線形に増加した。これにより、従来の材料と比較して感度が一桁高い  $24 \text{ MPa}^{-1}$  が実現された。研究開始時には予期しなかった発見として、プロトン体とリチウム体では圧力に対するイオン伝導性の応答が異なることが確認され、この現象は圧力によるイオン伝導度の変化がイオンキャリアの種類に依存することを示した。さらに、プロトン体はより広い RH 範囲での応答を示し、リチウム体は高 RH 条件下でのみ圧力に応答して膜抵抗が大幅に増加する現象が観察された。これらの結果から、スルホン化ポリイミドの組織化がリオトロピック液晶性に基づくものであり、含水下での組織化の構造周期性の向上が、高い感度と応答性のイオン伝導度を可能にしたと考えられる。この研究により、リオトロピック液晶性を利用した新しい研究分野が開拓された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Nagao Yuki	4. 巻 44
2. 論文標題 Advancing sustainable energy: Structurally organized proton and hydroxide ion-conductive polymers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Current Opinion in Electrochemistry	6. 最初と最後の頁 101464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coelec.2024.101464	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 Nagao Yuki	4. 巻 NA
2. 論文標題 Proton Conducting Polymers: Key to Next Generation Fuel Cells, Electrolyzers, Batteries, Actuators, and Sensors	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ChemElectroChem	6. 最初と最後の頁 e202300846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/celec.202300846	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 F. Wang, S. Nagano, M. Hara, Y. Nagao	4. 巻 4
2. 論文標題 Hydration and OH-/Br- Conduction Properties of Fluorene-Thiophene-Based Anion Exchange Thin Films Tethered with Different Cations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Appl. Polym. Mater.	6. 最初と最後の頁 5965 - 5974
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsapm.2c00811	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. Yao, H. Watanabe, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao	4. 巻 8
2. 論文標題 Lyotropic Liquid Crystalline Property and Organized Structure in High Proton-Conductive Sulfonated Semi-Alicyclic Oligoimide Thin Films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 7470 - 7478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.2c06398	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 Zhang Yuwei, Li Chunzhi, Liu Zhaohan, Yao Yuze, Hasan Md. Mahmudul, Liu Qianyu, Wan Jieqiong, Li Zhongping, Li He, Nagao Yuki	4. 巻 23
2. 論文標題 Intrinsic proton conduction in 2D sulfonated covalent organic frameworks through a post-synthetic strategy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CrystEngComm	6. 最初と最後の頁 6234 ~ 6238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CE00957E	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 Zhai Lipeng, Yao Yuze, Ma Baiwei, Hasan Md. Mahmudul, Han Yuxi, Mi Liwei, Nagao Yuki, Li Zhongping	4. 巻 43
2. 論文標題 Accumulation of Sulfonic Acid Groups Anchored in Covalent Organic Frameworks as an Intrinsic Proton Conducting Electrolyte	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecular Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 2100590 ~ 2100590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/marc.202100590	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 Kobayashi Atsushi, Imada Shin-ichiro, Yao Yuze, Nagao Yuki, Kubota Yuto, Yoshida Masaki, Kato Masako	4. 巻 94
2. 論文標題 Halide Replacement Effect on Proton Conductivity and Vapochromic Luminescence of Pt(II) Complexes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 2466 ~ 2473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210279	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 14
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 2694 ~ 2697
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 SUWANSOONTORN Athchaya, YAMAMOTO Katsuhiko, NAGANO Shusaku, MATSUI Jun, NAGAO Yuki	4. 巻 89
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 401 ~ 408
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 -

〔学会発表〕 計56件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 22件)

1. 発表者名 長尾祐樹, Athchaya Suwansoontorn, ??健太郎, 松井淳
2. 発表標題 電界効果を利用した電解質薄膜の移動度
3. 学会等名 第72回高分子学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Highly Proton-conductive and Pressure Sensitive Sulfonated Polyimides with Organized Lamellar Structure
3. 学会等名 STEP112 - Polyimides & High Performance Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nagao, F. Wang
2. 発表標題 Br-/OH- transport and hydration properties of anion exchange thin films
3. 学会等名 13th International Congress on Membranes and Membrane Processes (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Y. Inukai, Y. Ono, K. Aoki, Y. Nagao
2. 発表標題 Evaluation of the environment of water molecules in lyotropic liquid crystalline polymer electrolytes
3. 学会等名 13th International Congress on Membranes and Membrane Processes (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Suwansoontorn, K. Aoki, J. Matsui, Y. Nagao
2. 発表標題 Protonic field-effect transistor with electrochemical impedance spectroscopy reveals proton transport mobility in thin film
3. 学会等名 13th SPSJ International Polymer Conference (IPC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nagao, F. Wang
2. 発表標題 OH <sup>-</sup> transport and hydration properties of anion exchange thin films
3. 学会等名 13th SPSJ International Polymer Conference (IPC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Inukai, Y. Ono, K. Aoki, Y. Nagao
2. 発表標題 Evaluation of the environment of water molecules in lyotropic liquid crystalline polymer electrolytes
3. 学会等名 13th SPSJ International Polymer Conference (IPC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長尾祐樹
2. 発表標題 高分子電解質薄膜の配向および組織構造と高プロトン伝導性
3. 学会等名 M&BE新分野開拓研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長尾祐樹
2. 発表標題 ラメラ構造を利用した高プロトン伝導と輸送制御
3. 学会等名 第72回高分子討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長尾祐樹, F. Wang
2. 発表標題 フルオレンとチオフェン骨格を含むアニオン交換薄膜の含水とイオン伝導性
3. 学会等名 第73回高分子討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Building a Smarter Energy Landscape: Materials Development and Interfacial Ion Transport in Fuel Cells and Lithium-ion Batteries
3. 学会等名 Smasys2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 The Organized Structure of Polymer Electrolytes: Paving a New Path to Energy Storage and Tactile Technology
3. 学会等名 CONCEPT2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Tian, 青木健太郎, 生田聖也, 長尾祐樹
2. 発表標題 リチウム伝導性脂環式スルホン化ポリイミドの合成と物性
3. 学会等名 2023年度北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口祐樹, 青木健太郎, 生田聖也, 長尾祐樹
2. 発表標題 ナフタレンテトラカルボン酸無水物の位置異性体を用いたスルホン化ポリイミドの合成
3. 学会等名 2023年度北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口祐樹, 青木健太郎, 生田聖也, 是津信行, 長尾祐樹
2. 発表標題 ナフタレンテトラカルボン酸無水物の位置異性体を用いたリチウムイオン伝導性スルホン化ポリイミドの合成と物性
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会(2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長尾祐樹, 青木健太郎, 生田聖也, 宮崎司, 宮田登, 青木裕之, Attila Taborosi, 古山通久, 永野修作, 山本勝宏
2. 発表標題 中性子反射率法を用いたスルホン化ポリイミド薄膜の界面構造
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会(2025)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長尾祐樹, 青木健太郎, Athchaya Suwansontorn, 原光生, 生田聖也, 宮崎司, 宮田登, 青木裕之, Attila Taborosi, 古山通久, 永野修作, 山本勝宏
2. 発表標題 スルホン化ポリイミドのリチウムイオン伝導性と界面構造
3. 学会等名 第71回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 OH- Conductivity and Water Uptake of Anion Exchange Thin Films Under Humidity Control
3. 学会等名 241st ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nagao, F. Wang, D. Wang
2. 発表標題 OH- Conductivity and Water Uptake of Anion Exchange Thin Films
3. 学会等名 23rd International Conference on Solid State Ionics (SSI 23) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 INTERFACIAL H <sup>+</sup> /OH <sup>-</sup> TRANSPORT IN POLYMER ELECTROLYTE THIN FILMS
3. 学会等名 7th Virtual International Conference on Functional Materials and Devices 2022 (ICFMD2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nagao, F. Wang
2. 発表標題 高分子電解質薄膜におけるプロトン伝導とアニオン伝導の類似点と相違点
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 F. Wang, Y. Nagao, S. Nagano, M. Hara
2. 発表標題 Hydration and Anion Conductive Properties of Fluorene-Thiophene-Based Anion Exchange Thin Films
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 A. Suwansontorn, R. Bhardwaj, D. Hirose, Y. Takamura, Y. Nagao
2. 発表標題 Protonic Field-Effect Transistors (H <sup>+</sup> -FETs) Measurement of Weak-acid Polymer Thin Film Through Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), 第83回応用物理学会秋季学術講演会, 2022, 2022, ,
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 犬飼 裕也, Yuze Yao, 小野 祐太郎, Agman Gupta, Rahul Bhardwaj, 青木 健太郎, 長尾 祐樹
2. 発表標題 リオトロピック液晶性高分子電解質における含水量の評価
3. 学会等名 2022年度 北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前原日和, Yuze Yao, 長尾祐樹
2. 発表標題 リオトロピック液晶性高分子におけるプロトン伝導度の圧力依存性
3. 学会等名 2022年度 北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Suwansoontorn, K. Aoki, J. Matsui, Y. Nagao
2. 発表標題 Protonic field-effect transistor confirmed by EIS measurement of weak-acid polymer thin film
3. 学会等名 第48回 固体イオニクス討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Suwansoontorn, K. Aoki, J. Matsui, Y. Nagao
2. 発表標題 Investigation of carboxylic acid deprotonation in electrolyte thin film through protonic field-effect transistor
3. 学会等名 第70回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Pressure sensitive lyotropic liquid crystal
3. 学会等名 International Symposium on Advanced Biomaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 生田聖也, 原光生, 青木健太郎, 前原日和, 長尾祐樹
2. 発表標題 リチウム置換したリオトロピック液晶性高分子電解質薄膜のイオン伝導度および構造
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会(2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 犬飼裕也, 小野祐太郎, 青木健太郎, 長尾祐樹
2. 発表標題 リオトロピック液晶性高分子電解質における含有水分子の環境の評価
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会(2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前原日和, Yuze Yao, 青木健太郎, 長尾祐樹
2. 発表標題 リオトロピック液晶性高分子におけるプロトン伝導度の圧力依存性
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会(2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nagao, A. Suwansoontorn, K. Aoki, J. Matsui
2. 発表標題 Mobility of proton conduction in thin films using the electric field effect
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会(2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上 南, Liu Miaomiao, 長尾 祐樹, 源明 誠, 宮下 徳治, 三ツ石 方也, 松井 淳
2. 発表標題 高分子ナノシート積層体層間が形成する高速プロトン輸送チャネルの構造解析
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 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 4th International Conference on Science & Engineering of Materials (ICSEM-2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yao, M. Liu, H. Watanabe, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao
2. 発表標題 Influence on hydrophilic side chains of sulfonated polyimide thin film on proton conductivity
3. 学会等名 The 3rd Symposium on Industrial Science and Technology (SISTEC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 F. Wang, D. Wang, Y. Nagao
2. 発表標題 Relations of OH- Conductivity and Water Uptake of Anion Exchange Membrane in Thin Film Form
3. 学会等名 The 3rd Symposium on Industrial Science and Technology (SISTEC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Wang, D. Wang, Y. Nagao
2. 発表標題 OH- Conduction and Hydration Properties of Anion Exchange Ionomer
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 K. Hirata, K. Suetsugu, F. Wang, Y. Nagao, T. Seki, S. Nagano
2. 発表標題 プロトン伝導性液晶高分子を志向したアゾベンゼンメソゲン-アクリル酸共重合体の液晶構造
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 M. Inoue, M. Liu, Y. Nagao, M. Gemmei, T. Miyashita, M. Mitsuishi, J. Matsui
2. 発表標題 Proton conductive mechanism at the interlayer of polymer nanosheet film
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 長尾祐樹, 高倉健作, 小野祐太郎, 末次輝太, 原光生, 永野修作
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半脂環式主鎖と組織構造の検討
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 姚禹澤, LIU Miaomiao, 渡邊隼人, 原光生, 永野修作, 長尾祐樹
2. 発表標題 オリゴオキシエチレン側鎖を有するスルホン化ポリイミド薄膜におけるリオトロピック液晶性とプロトン伝導
3. 学会等名 2021年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平田和也, WANG Fangfang, 長尾祐樹, 関隆広, 永野修作
2. 発表標題 サーモトロピック液晶性とプロトン伝導性を両立するアゾベンゼン高分子の調製と光配向
3. 学会等名 2021年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nagao, M. Hara, S. Nagano
2. 発表標題 High Proton Conductivity in Organized Polymer Structure
3. 学会等名 Solid State Proton Conductors (SSPC-20) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Wang, D. Wang, Y. Nagao
2. 発表標題 Relations of OH- Conductivity and Water Uptake of Anion Exchange Ionomer
3. 学会等名 Solid State Proton Conductors (SSPC-20) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長尾祐樹
2. 発表標題 分子配向と高分子組織化を基盤とした高イオン伝導材料の開発
3. 学会等名 21-2水素・燃料電池材料研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Highly proton-conductive polymer thin films with organized structure and molecularly oriented structure
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Wang, D. Wang, Y. Nagao
2. 発表標題 OH- Conductivity and Water Uptake of Anion Exchange Ionomer
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yao, M. Liu, H. Watanabe, M. Hara, S. Nagano, Y. Nagao
2. 発表標題 Lyotropic liquid crystal property and organized structure in sulfonated polyimide thin films with oligooxyethylene side chains
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Hirata, W. Fangfang, Y. Nagao, T. Seki, S. Nagano
2. 発表標題 Proton conductive side-chain liquid crystalline polymer system and photoalignment
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Suwansoontorn, Y. Nagao, K. Yamamoto, S. Nagano, J. Matsui
2. 発表標題 The influence of functionalized carboxylic acid on proton transport pathways in styrene-based polymer thin films
3. 学会等名 2021年度 北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Suwansoontorn, Y. Nagao, K. Yamamoto, S. Nagano, J. Matsui
2. 発表標題 The weak-acid concentration dependence of proton conduction pathways in styrene-based polymer thin films
3. 学会等名 第70回高分子学会北陸支部 研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nagao
2. 発表標題 Interfacial Proton Conductivity and Structure in Polymer Electrolyte Thin Films
3. 学会等名 Material Research Meeting 2021 (MRM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Suwansontorn, Y. Nagao, K. Yamamoto, S. Nagano, J. Matsui
2. 発表標題 Proton conduction route of carboxylic acid functionalized polymer thin films
3. 学会等名 第21回 日本表面真空学会中部支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Suwansontorn, Y. Nagao, K. Yamamoto, S. Nagano, J. Matsui
2. 発表標題 Internal and interfacial proton transport of polymer thin film modulated by carboxylic acid functional group concentration
3. 学会等名 電気化学会第89回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nagao, F. Wang, D. Wang
2. 発表標題 アニオン交換薄膜における加湿制御下の水酸化物イオン伝導性の評価
3. 学会等名 電気化学会第89回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Suwansontorn, Y. Nagao, K. Yamamoto, S. Nagano, J. Matsui
2. 発表標題 The dependence of proton transport route on carboxylic acid density in polymer thin films
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>長尾准教授らの論文が国際学術誌ChemSusChem誌のThe Cover Featureに採択  <a href="https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/info/2021/06/22.html">https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/info/2021/06/22.html</a>          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  <a href="https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/press/2021/05/07-1.html">https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/press/2021/05/07-1.html</a>          高分子薄膜における水素イオンの界面輸送で新知見  <a href="https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/press/2021/05/28-1.html">https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/press/2021/05/28-1.html</a>          Macromolecular Rapid Communications誌の表紙に採択  <a href="https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/info/2022/01/12-1.html">https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/info/2022/01/12-1.html</a>          CrystEngCommでHot Articlesに選出  <a href="https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/award/2021/11/04-1.html">https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/award/2021/11/04-1.html</a></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
研究分担者	原 光生  (HARA Mitsuo)  (10631971)	名古屋大学・工学研究科・助教    (13901)	
研究分担者	山本 勝宏  (YAMAMOTO Katsuhiko)  (30314082)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授    (13903)	

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			
その他の国・地域	国立台湾科技大学			
マレーシア	Universiti Malaysia Pahang	Centre for Ionics University of Malaya		
中国	Chinese Academy of Sciences	Jilin Normal University	Shanghai University of Eng. Sci.	他2機関