

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04812

研究課題名（和文）無機ネットワーク制御によるイオン液体ゲルの超高強度化と高速CO₂透過膜への展開研究課題名（英文）Development of highly tough double-network ion gel by tuning its inorganic network and its application to the material of high performance CO₂ separation membrane

研究代表者

神尾 英治 (Kamio, Elji)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30382237

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）：イオン液体含有無機/有機ダブルネットワークゲル（DNイオンゲル）の強度発現に及ぼす無機ネットワークの役割に関する検討を行った。シリカナノ粒子を原料とする無機ネットワーク形成法を確立し、強度発現のための無機ネットワークの破断とそれに伴うエネルギー散逸に及ぼすシリカ粒子径やネットワーク間相互作用の影響を明らかにした。

また、CO₂分離膜材料としてのDNイオンゲルの有用性を検証するため、無機/有機ネットワーク組成の制御による機械的強度の最適化と、最適条件における高イオン液体含有DNイオンゲル膜の調製と評価を行い、DNイオンゲルが高性能CO₂分離膜材料として高いポテンシャルを有することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、無機/有機DNイオンゲルの高強度発現に寄与する無機ネットワークの構造や物性とゲル強度の関係性を明らかにした。これは無機/有機DNイオンゲルの強度発現の起源に迫るものであり、学術的に大きな意義がある。また、その強度発現メカニズムを解明するとともに、高強度発現のための無機ネットワーク設計指針を提案した。さらに、高イオン液体含有量と強度を兼ね備えたDNイオンゲル膜を創製し、そのCO₂分離膜材料としての高いポテンシャルを明らかにした。これは高性能CO₂分離膜の開発につながる成果であり、地球温暖化等の課題の解決に貢献する。

研究成果の概要（英文）：The role of the inorganic network on the high mechanical strength of the inorganic/organic double-network gel containing an ionic liquid (DN ion gel) was investigated. We established a method for forming the inorganic network using silica nanoparticles as a raw material, and clarified the effects of the silica particle size and the interaction between networks on the mechanical strength, which was dominated by the fracture of the inorganic network and the energy dissipation.

In addition, the potential of the DN ion gel as a material of CO₂ separation membrane was confirmed by using the DN ion gel membrane with high ionic liquid content, which was prepared by the optimization of the mechanical strength by controlling the inorganic/organic network composition. The DN ion gel membrane had 1380 barrer of the CO₂ permeability, which was 67% of the theoretical maximum permeability of the ionic liquid membrane.

研究分野：膜工学、化学工学、分離工学

キーワード：高強度ゲル イオン液体 ダブルネットワーク CO₂分離膜

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

イオンゲル膜はイオン液体を含有するゲル膜である。優れた CO₂ 選択透過性を有し、実用化の可能性が見込まれる。しかし、既往のイオンゲル膜は脆い。そのため、イオン液体含有率を大きくできず、イオン液体のポテンシャルを最大限引き出すことができていない。申請者らは、高強度ハイドロゲルとして知られるダブルネットワークゲル(DNゲル)に学び、無機/有機 DN イオンゲルを創製した。そのイオンゲルは無機ネットワークの破断に伴うエネルギー散逸により高強度を発現する。圧縮破断応力は 25 MPa 以上であり、既往のイオンゲルの実に 10 倍以上の強度を有する。また、約 80 wt% がイオン液体であり、ゲル内溶質拡散性に優れる。そのため、圧力場での長期安定性と高速 CO₂ 透過性(含浸液膜の 1.5 倍)を有する。本研究では、その CO₂ 透過速度をさらに上げるために、イオン液体含有量の増大を目指す。高イオン液体含有量で高強度を発現するためには、強度発現の本質である無機ネットワークの最適設計が必要である。

2. 研究の目的

申請者らが創製した高強度イオンゲルは、世界で唯一、犠牲的結合として無機ネットワークを有する DNゲルである。その無機ネットワークはシリカナノ粒子が数珠状に連なったシリカ粒子ネットワークである。本研究では、無機ネットワークの構造とシリカ粒子間相互作用の観点から、無機ネットワーク構造、シリカ粒子径、シリカ粒子表面性状が無機/有機 DN イオンゲルの機械的強度に及ぼす影響を各々評価し、無機/有機 DN イオンゲルの高強度発現に寄与する無機ネットワークの構造や物性とゲル強度(Young率、破断エネルギーおよび散逸エネルギー)の関係を明らかにすることを第一の目的とした。さらに、機械的強度に関して得られた知見に基づき、90 wt%イオン液体含有イオンゲル膜を調製し、その CO₂ 分離膜材料としてのポテンシャルを示すことを第二の目的とした。

3. 研究の方法

無機/有機 DN イオンゲルの機械的強度に及ぼすシリカ粒子ネットワーク構造およびシリカ粒子径の影響の検討では、イオン液体として 1-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide ([C₄mim][Tf₂N]) を用いた。一方、機械的強度に及ぼすシリカ粒子間相互作用の検討では、異なる水素結合受容性および水素結合供与性を有するイオン液体([C₄mim][Tf₂N], 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ([C₄mim][BF₄]), 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ([C₄mim][PF₆]), 1-butyl-3-methylimidazolium dicyanamide ([C₄mim][N(CN)₂]), 1-butyl-2,3-dimethylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide ([C₄dmim][Tf₂N]) および、水素結合性水酸基を有するジェミニ型イオン液体である [C_n(C₂OHim)₂][Tf₂N]₂ を用いた。シリカ粒子ネットワークは、イオン液体中における tetraethyl orthosilicate (TEOS) のゾル-ゲル反応、または、種々粒径の異なるシリカナノ粒子(Aerosil 300, 200, 130, 90G, 50, 0X50) および表面疎水化シリカナノ粒子(Aerosil R976S) の自己凝集により形成した。有機ネットワークはイオン液体中における N,N-dimethylacrylamide のフリーラジカル重合、または、あらかじめ可逆的付加-開裂連鎖移動(RAFT)重合により合成した poly(N,N-dimethylacrylamide-co-N-succinimidy acrylate) (poly(DMAAm-co-NSA)) のジアミンによる架橋により形成した。

調製した無機/有機 DN イオンゲルの力学特性は万能試験機による一軸延伸試験およびサイクル延伸試験により評価した。また、高強度発現に及ぼす無機ネットワークの役割に関する検討は、延伸試験中の無機ネットワーク構造を Spring-8 のビームライン(BL45XU)による少角 X 線散乱(SAXS)測定により評価した。一方、調製した DN イオンゲル膜の CO₂ 透過性能は、CO₂/N₂ = 50/50 mol/mol の CO₂/N₂ 混合ガスを用い、大気圧下、30 °C での CO₂ および N₂ 透過係数をスイープ法により評価した。

4. 研究成果

無機/有機 DN イオンゲルは、イオン液体中にシリカナノ粒子がネットワーク状に凝集した無機ネットワークを形成後、有機ネットワークである高分子ネットワークを形成することにより得られる。これまでの研究から、ネットワーク形成時の温度制御により、無機ネットワーク形成速度と有機ネットワーク形成速度を制御することで、力学特性の異なるイオンゲルが調製できることがわかってきた。そこで、種々温度により調製した DN イオンゲルの無機ネットワークを透過型電子顕微鏡で観察することで、無機ネットワークの構造と DN イオンゲルの機械的強度の関連性について検討した。その結果、低温で調製した DN イオンゲルは、高温で調製した場合に比べ、破断応力、Young率、破壊エネルギー、およびサイクル延伸時におけるエネルギー散逸量が有意に大きく(図 1) また、形成されたシリカ粒子ネットワークが高度に発達していることがわかった(図 2)。これらの結果は、イオンゲルへの外力の印加によりイオンゲル中に高度に発達したシリカ粒子ネットワークが破壊され、その破壊に伴うエネルギー散逸が DN イオンゲルの機械的強度増大の主要原因であることを示唆する。このシリカ粒子ネットワークの破壊に伴うエネルギー散逸による高強度発現機構を実験的に明らかにするために、延伸試験中の無機ネットワーク構造を SAXS により測定した。その結果、DN イオンゲル中に形成されたシリカ粒子由来の構造体のサイズがゲルの延伸に伴い小さくなること、すなわち、外力の印加によりシリカ粒子ネットワークがゲル内部で破壊されることを示唆する結果を得た(図 3)。この結果より、シリ

カ粒子ネットワークの内部破壊に伴い印加エネルギーが散逸された結果、DN イオンゲルが高強度を発現することを明らかにした。

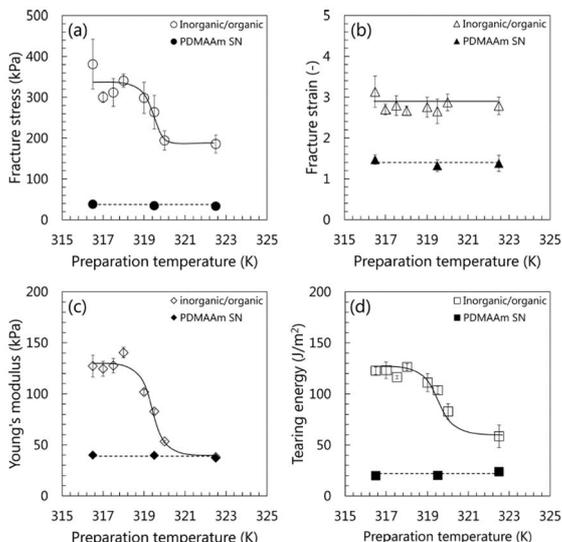


図 1 無機/有機 DN イオンゲルの機械的強度と調製温度の関係。イオン液体：[C₄mim][Tf₂N]，イオン液体含有率：80 wt%。

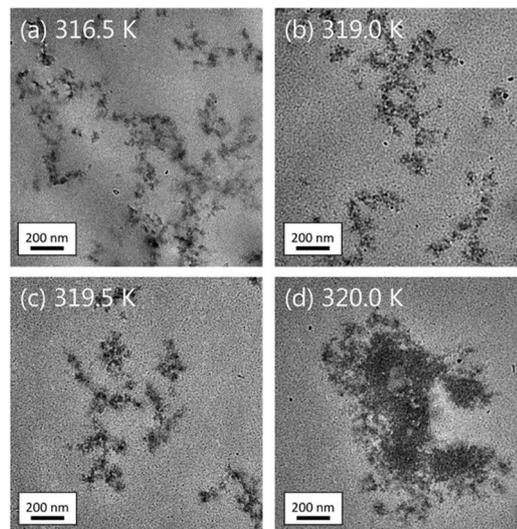


図 2 種々温度で調製した無機/有機 DN イオンゲル中に形成された無機ネットワークの SEM 写真

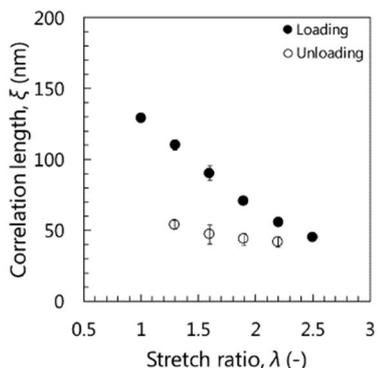


図 3 延伸状態の DN イオンゲルの SAXS 測定より得られた無機粒子凝集体の相関長と延伸率の関係

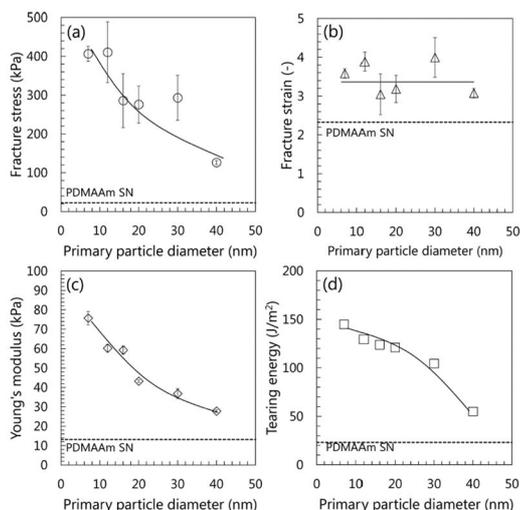


図 4 種々粒径のシリカナノ粒子を用いて調製した DN イオンゲルの力学特性とシリカナノ粒子径の関係

さらに、DN イオンゲルの機械的強度に及ぼすシリカ粒子径の影響について検討するため、シリカナノ粒子を無機ネットワーク原料とする DN イオンゲルの調製法を確立した。いくつかのイオン液体中において、シリカナノ粒子は凝集し、イオン液体をゲル化することがわかっている。また、そのシリカ粒子の凝集は、イオン液体中にシリカナノ粒子の分散安定剤として作用するエタノールを添加することにより制御できる。そこで、イオン液体に所定量のエタノールとシリカナノ粒子、および有機ネットワーク原料である DMAAm とその架橋剤および光誘起ラジカル重合開始剤を添加し、よく混合することで DN イオンゲルの前駆体溶液を調製、それを密閉モールド内に注入した後、365 nm の紫外光を 12 時間照射することにより DMAAm のラジカル重合による有機ネットワークの形成を行い、最後にエタノールを蒸発除去することで DN イオンゲルを調製した。確立した DN イオンゲル調製法により、種々粒径のシリカナノ粒子を無機ネットワーク原料とする DN イオンゲルを調製し、その機械的強度とシリカ粒子径の関係を検討した。その結果、DN イオンゲルの力学特性（破断応力、Young 率、破壊エネルギー、およびサイクル延伸時におけるエネルギー散逸量）は、シリカナノ粒子の粒径が小さいほど大きくなることを明らかにした（図 4）。これはシリカ粒子径が小さいほどシリカ粒子の比表面積が大きくなった結果、無機ネットワークを形成するシリカ粒子間の相互作用が大きくなり、無機ネットワークの破壊に必要な

なエネルギーが大きくなったことが原因であると考えられる。すなわち、DN イオンゲルの機械的強度に及ぼすシリカ粒子径の影響からも、DN イオンゲルの高強度発現には無機ネットワークの内部破壊に伴うエネルギー散逸が大きな影響を及ぼしていることを明らかとした。

一方、ネットワーク間に働く相互作用と DN イオンゲルの力学特性の関係についても検討を行った。本検討では、親水性表面を有するシリカナノ粒子および疎水性表面を有するシリカナノ粒子を用い、水素結合受容性および水素結合供与性が各々異なるイオン液体を DN ゲル化し、その力学特性の評価を行った。その結果、得られた DN イオンゲルの力学特性 (Young 率、破断歪み、散逸エネルギー) はシリカナノ粒子の表面性状には依存せず、イオン液体の水素結合受容性に強く依存することが明らかとなった (図 5)。特に、水素結合受容性が小さいイオン液体を含有する DN イオンゲルは、その Young 率と破断エネルギーは大きく、破断歪みは小さいことがわかった。また、DN イオンゲルの力学特性に及ぼすイオン液体の水素結合受容性の影響はシリカナノ粒子の表面性状に依らず、メチル化された疎水性表面を有するシリカナノ粒子を用いて作製した DN イオンゲルも親水性シラノール基を有するシリカナノ粒子を用いて作製した DN イオンゲルと同様の依存性を示すことを明らかにした。これらの結果から、DN イオンゲルの力学特性にはイオン液体が関与していること、つまり、イオン液体がネットワーク間の相互作用に影響していることを明らかにした。そこで、イオン液体のゲルネットワークへの相互作用を利用した DN イオンゲルの高強度化について検討した。本検討ではイオン液体として、水素結合性官能基である水酸基をカチオン内に 2 つ有するジェミニ型イオン液体である $[C_n(C_2OHim)_2][Tf_2N]_2$ を合成して用いた。 $[C_n(C_2OHim)_2][Tf_2N]_2$ は親水性シリカナノ粒子に吸着することを吸着試験により確認し、また、 $[C_n(C_2OHim)_2][Tf_2N]_2$ は PDMAAm ネットワークのカルボニル基に強く相互作用することを作製した DN イオンゲルの赤外吸収スペクトル分析より確かめた。そのようなシリカナノ粒子とも PDMAAm とも水素結合を形成する $[C_n(C_2OHim)_2][Tf_2N]_2$ を含有する DN イオンゲルでは、 $[C_n(C_2OHim)_2][Tf_2N]_2$ によるシリカナノ粒子と PDMAAm 間の水素結合による架橋が起こり、DN イオンゲルの力学特性、特に破断歪みが増大することを明らかにした (図 6)。また、その Young 率は、 $[C_n(C_2OHim)_2][Tf_2N]_2$ のイミダゾリウム基間の炭化水素鎖が短いほど大きく、長いほど小さくなることを明らかにした (図 7)。これは、2 官能水素結合性の $[C_n(C_2OHim)_2][Tf_2N]_2$ がネットワークの架橋剤として働いたことを示唆する結果である。このようなシリカ粒子 - ポリマーネットワーク間の相互作用によるイオンゲルの高強度化はこれまでに報告例が無く、本検討で見出したイオンゲルの新しい高強度化法である。

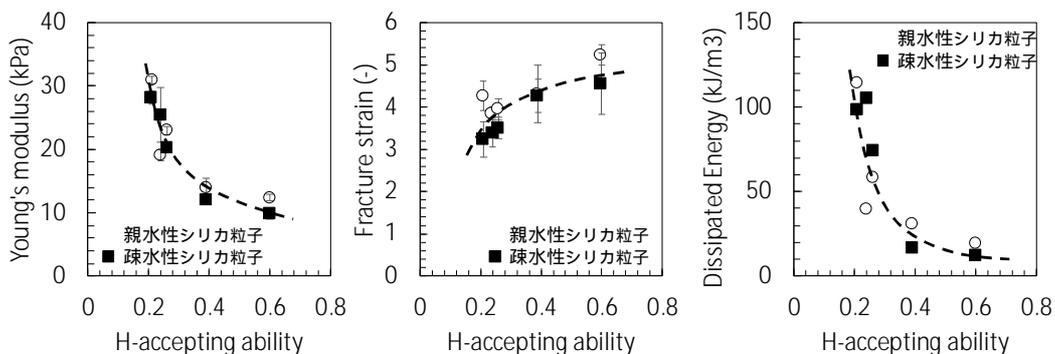


図 5 親水性および疎水性シリカナノ粒子を用いて調製した種々イオン液体含有 DN イオンゲルの力学特性とイオン液体の水素結合受容性の関係

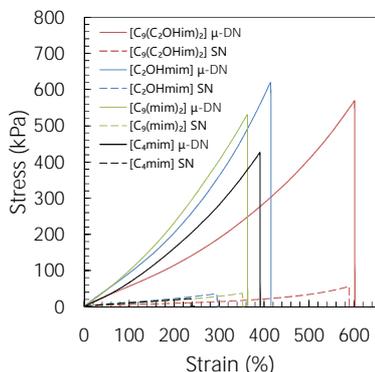


図 6 水酸基を有するイオン液体を含有する DN イオンゲルの一軸延伸試験結果

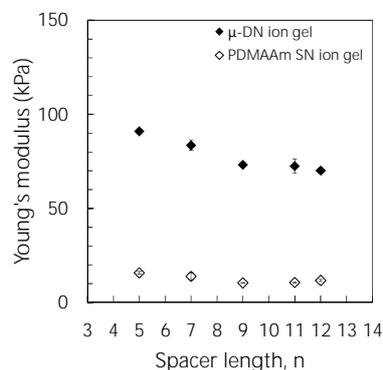


図 7 水酸基を有するジェミニ型イオン液体のイミダゾリウム基間炭化水素鎖の炭素数とそのイオン液体を含有する DN イオンゲルの Young 率の関係

無機/有機 DN イオンゲル膜の CO₂ 選択透過性能については、無機ネットワークと有機ネットワークの組成を最適化することで機械的強度を最適化した DN イオンゲルについて、イオン液体 ([C₄mim][Tf₂N]) 含有率の異なる DN イオンゲル膜を作製し、その CO₂ 透過係数を評価した。ネットワークの最適化により、DN イオンゲル膜のイオン液体含有率を最大 95 wt%まで増大させることに成功した。また、DN イオンゲル膜の CO₂ 透過係数とイオン液体含有率の関係について検討したところ、その CO₂ 透過係数はイオン液体含有率の増大に伴い指数関数的に増大し、イオン液体含有率が 95 wt%の DN イオンゲル膜は理論限界 CO₂ 透過係数の 67%の CO₂ 透過係数(1380 barrer)を有することを明らかにした(図8)。この結果より、DN イオンゲル膜はその優れた機械的強度のため高イオン液体含有率でも CO₂ 分離膜として使用可能であること、また、高イオン液体含有率のためゲル内 CO₂ 拡散性が高く、高 CO₂ 透過係数を有する有望な CO₂ 分離膜材料であることが示された。

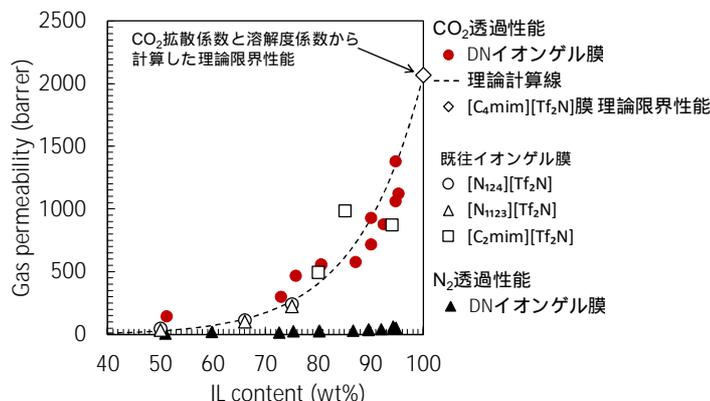


図8 DN イオンゲル膜のイオン液体含有率と CO₂ 透過係数の関係．イオン液体：[C₄mim][Tf₂N]．

また、無機/有機 DN イオンゲル膜の薄膜化を可能とするための要素技術の確立についても検討を行った。無機/有機 DN イオンゲル膜の薄膜化には、既往の薄膜課手法であるキャスト法やスピンコーティング法、ディップコーティング法等を用いる必要がある。しかしながら、それら薄膜課手法は開放系で行う必要があるため、既往の DN イオンゲル調製法では揮発性ネットワーク原料である DMAAm がゲル薄層形成時に蒸発損失してしまい、DN 構造を形成できないという課題があった。そこで、この課題を解決するために、本研究では不揮発性ネットワーク原料による DN イオンゲル調製法を確立した。不揮発性無機ネットワーク原料にはシリカナノ粒子、不揮発性有機ネットワーク原料には RAFT 法で合成した架橋性高分子である poly(DMAAm-co-NSA)を用いた。無機ネットワークはイオン液体中でのシリカナノ粒子の自己凝集により形成し、有機ネットワークはジアミン化合物により poly(DMAAm-co-NSA)を架橋することで形成した。不揮発性ネットワーク原料により調製した DN イオンゲルの力学特性は poly(DMAAm-co-NSA)の架橋性部位である NSA 基導入率で制御することが可能であり、NSA 基導入率が小さく、有機ネットワークの架橋度が小さい DN イオンゲルほど、その機械的強度(破断エネルギー)が大きいことを明らかにした(図9)。

以上より、本研究を通じて、DN イオンゲルの高強度発現に及ぼす無機ネットワークの役割を明らかにした。また、DN イオンゲルの機械的強度を増大するためのネットワーク設計指針を提案した。さらに、DN イオンゲル膜のイオン液体含有率を最大化することによりその CO₂ 分離膜材料としての優れたポテンシャルを示すとともに、不揮発性ネットワーク原料を用いることで将来的な DN イオンゲル薄膜調製の指針を得ることができた。

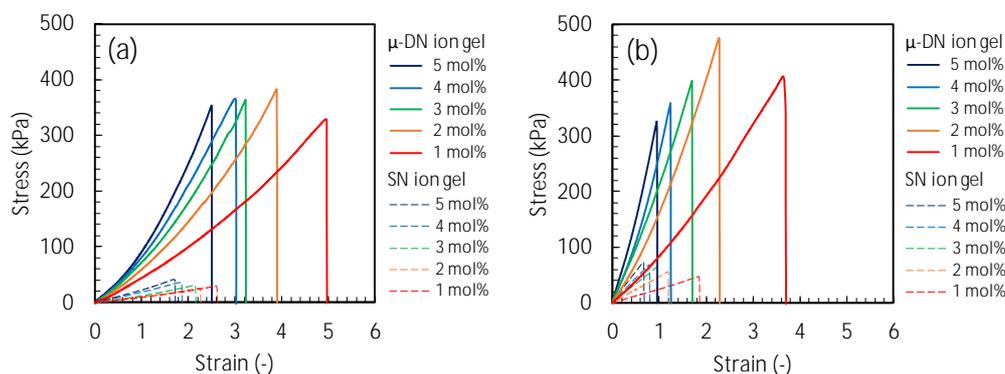


図9 不揮発性有機ネットワーク原料である架橋性高分子を用いて調製した DN イオンゲル膜の一軸延伸試験結果．イオン液体：[C₄mim][Tf₂N]．DN イオンゲルは不揮発性無機ネットワーク原料としてシリカナノ粒子を用いて調製した．(a) 密閉モールド内で調製，(b) 開放系にて調製．凡例のモル分率は架橋性高分子内の架橋性セグメント導入率．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tomoki Yasui, Eiji Kamio, and Hideto Matsuyama	4. 巻 34
2. 論文標題 Inorganic/Organic Double-Network Ion Gels with Partially Developed Silica-Particle Network	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 10622-10633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.8b01930	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 Tomoki Yasui, Eiji Kamio, Hideto Matsuyama	4. 巻 9
2. 論文標題 Tough and Stretchable Inorganic/Organic Double Network Ion Gel Containing Gemini-Type Ionic Liquid as Multiple Hydrogen Bond Cross-Linker	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 11870-11876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9ra01790a	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 Tomoki Yasui, So Fujinami, Taiki Hoshino, Eiji Kamio, Hideto Matsuyama	4. 巻 16
2. 論文標題 Energy Dissipation via the Internal Fracture of the Silica Particle Network in Inorganic/Organic Double Network Ion Gels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 2363-2370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9sm02174d	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 神尾英治、松山秀人	4. 巻 50
2. 論文標題 イオン液体を分離媒体とするCO2分離膜	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 分離技術	6. 最初と最後の頁 8-14
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 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 Yasui Tomoki, Kamio Eiji, Matsuyama Hideto	4. 巻 10
2. 論文標題 Inorganic/organic nanocomposite ion gels with well dispersed secondary silica nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 14451-14457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0RA02478C	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 Kamio Eiji, Kinoshita Masayuki, Yasui Tomoki, Lodge Timothy P., Matsuyama Hideto	4. 巻 53
2. 論文標題 Preparation of Inorganic/Organic Double-Network Ion Gels Using a Cross-Linkable Polymer in an Open System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 8529-8538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.0c01488	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 Kamio Eiji, Minakata Masayuki, Iida Yu, Yasui Tomoki, Matsuoka Atsushi, Matsuyama Hideto	4. 巻 53
2. 論文標題 Inorganic/organic double-network ion gel membrane with a high ionic liquid content for CO2 separation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 137-147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-020-0393-y	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30件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Eiji KAMIO, Fatemeh RANJBARAN, Yu IIDA, Tomoki YASUI, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Double-network ion gel membrane with tunable inorganic/organic network for CO2 separation
3. 学会等名 The 11th conference of the Aseanian Membrane Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoki YASUI, Eiji KAMIO, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Development of tough inorganic/organic double network ion gels for CO2 separation membranes
3. 学会等名 The 11th conference of the Aseanian Membrane Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Eiji KAMIO, Tomoki YASUI, Yu IIDA, Jian Ping GONG, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 HIGH-STRENGTH GELS COMPOSED OF AN IONIC LIQUID AND INORGANIC/ORGANIC HYBRID NETWORKS FORMED VIA ONE-POT/ONE-STEP PROCESS
3. 学会等名 The 82nd Prague Meeting on Macromolecules - Polymer Networks and Gels 2018 and 24th meeting of the international Polymer Networks Group (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoki YASUI, Eiji KAMIO, Yu IIDA, Jian Ping GONG, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 IONIC LIQUID-BASED GELS WITH SPECIFIC INORGANIC/ORGANIC DOUBLE NETWORK
3. 学会等名 The 82nd Prague Meeting on Macromolecules - Polymer Networks and Gels 2018 and 24th meeting of the international Polymer Networks Group (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井知己, 神尾英治, 飯田祐, 松山秀人
2. 発表標題 部分的に発達したシリカ粒子ネットワークを有するイオン液体含有高強度無機/有機ハイブリッドネットワークゲル
3. 学会等名 第69回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井知己, 神尾英治, 飯田祐, 松山秀人
2. 発表標題 シリカ粒子ネットワーククラスターを犠牲的結合として用いたイオン液体含有高強度無機/有機ハイブリッドネットワークゲル
3. 学会等名 第64回高分子研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井知己, 神尾英治, 飯田祐, 松山秀人
2. 発表標題 シリカ粒子ナノクラスターを犠牲的結合とするイオン液体含有高強度無機/有機ハイブリッドネットワークゲルの開発
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 安井知己, 神尾英治, 松山秀人
2. 発表標題 部分発達シリカ粒子ネットワークを有するイオン液体含有高強度ゲルフィルムのネットワーク構造と力学的特性
3. 学会等名 膜シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井知己, 神尾英治, 松山秀人
2. 発表標題 ジェミニ型イオン液体を水素結合性架橋剤とする無機/有機ダブルネットワークイオンゲル
3. 学会等名 第68回高分子学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木ノ下雅之, 安井知己, 神尾英治, 松山秀人
2. 発表標題 架橋性高分子を用いた無機/有機ダブルネットワークイオンゲルの開発
3. 学会等名 第68回高分子学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiji KAMIO, Fatemeh Ranjbaran, Hideto Matsuyama
2. 発表標題 Double network ion gel membrane with CO ₂ -philic ionic liquid as the CO ₂ separation medium
3. 学会等名 12th conference of the Aseanian Membrane Society (AMS12) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安井知己, 星野大樹, 藤波 想, 神尾英治, 松山秀人
2. 発表標題 無機/有機ダブルネットワークイオンゲルの高強度発現機構の解明
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 木ノ下雅之, 安井知己, 神尾英治, 松山秀人
2. 発表標題 イオンゲル薄膜の開発を目指した不揮発性原料による無機/有機ダブルネットワークの形成
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 Eiji KAMIO, Tomoki YASUI, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Inorganic/organic Double-Network Ion Gel Membrane for CO2 Separation
3. 学会等名 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCChE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安井知己, 神尾英治, 松山秀人
2. 発表標題 選択的に作製できる3種類の高強度無機/有機ハイブリッドネットワークイオンゲル
3. 学会等名 第10回イオン液体討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神尾英治, 木ノ下雅之, 安井知己, 松山秀人
2. 発表標題 高強度ダブルネットワークイオンゲル薄膜創製のための要素技術の確立
3. 学会等名 第10回イオン液体討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神尾英治, 木ノ下雅之, 安井知己, 松山秀人
2. 発表標題 CO2分離膜への応用を目指した高強度イオンゲル薄膜形成のための要素技術の確立
3. 学会等名 膜シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiji Kamio
2. 発表標題 Ionic liquid-based gel membrane for CO2 separation
3. 学会等名 I2CNER International Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南方雅之, 安井知己, 松岡 淳, 神尾英治, 松山秀人
2. 発表標題 高イオン液体含有量の無機/有機ダブルネットワークゲル膜の創製
3. 学会等名 第22回化学工学会学生発表会(岡山大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬川純平, 木ノ下雅之, 神尾英治, 松山秀人
2. 発表標題 架橋性高分子による無機/有機ダブルネットワークイオンゲルの作製
3. 学会等名 第22回化学工学会学生発表会(岡山大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神尾英治, 安井知己, 南方雅之, 飯田 祐, 松山秀人
2. 発表標題 大量のイオン液体を含有する高強度ゲル膜の創製とそのCO2選択透過性能に関する検討
3. 学会等名 化学工学会第85年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神尾 英治, 木ノ下 雅之, 安井 知己, 松岡 淳, 松山 秀人
2. 発表標題 無機/有機ダブルネットワークイオンゲル薄膜の創製とそのCO ₂ 透過性能評価
3. 学会等名 日本膜学会第42年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神尾 英治, 木ノ下 雅之, 安井 知己, 松岡 淳, 松山 秀人
2. 発表標題 無機/有機ダブルネットワークイオンゲルの有機ネットワーク架橋度と機械的強度の関係
3. 学会等名 第69回高分子学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神尾 英治, 木ノ下 雅之, 安井 知己, 松岡 淳, 松山 秀人
2. 発表標題 無機/有機ダブルネットワークイオンゲル薄膜の創製
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 Zhang JINHUI, Eiji KAMIO, Masayuki KINOSHITA, Tomoki YASUI, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Development of double-network ion gel-based CO ₂ separation membrane from non-volatile network precursors
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhang JINHUI, Eiji KAMIO, Atsushi MATSUOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 Double-network ion gel membrane fabricated by non-volatile network materials with enhanced mechanical strength and CO2 separation performance
3. 学会等名 膜シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南方 雅之, 安井 知己, 松岡 淳, 神尾 英治, 松山 秀人
2. 発表標題 高イオン液体含有無機/有機ダブルネットワークイオンゲルの創製とそのCO2透過性能
3. 学会等名 膜シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Eiji KAMIO, Tomoki Yasui, Masayuki Minakata, Yu IIDA, Keizo NAKAGAWA, Tomohisa YOSHIOKA, Hideto MATSUYAMA
2. 発表標題 CO2 permeation performance of inorganic/organic double-network gel membrane containing a large amount of ionic liquid
3. 学会等名 International Congress on Membranes & Membrane Processes 2020 (ICOM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久高 陸, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 無機/有機ダブルネットワークイオンゲル薄膜調製のための前駆体溶液組成の最適化
3. 学会等名 第23回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森平 健太, 神尾 英治, 松岡 淳, 中川 敬三, 吉岡 朋久, 松山 秀人
2. 発表標題 無機/有機複合ネットワークイオンゲルの機械的強度に及ぼすイオン液体種の影響
3. 学会等名 第23回化学工学会学生発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 イオン性液体含有構造体の製造方法及びイオン性液体含有構造体	発明者 神尾英治, 松山秀人, 木ノ下雅之, 安井知己, 他3名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-157339	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 イオン性液体含有構造体の製造方法及びイオン性液体含有構造体	発明者 神尾英治, 松山秀人, 木ノ下雅之, 安井知己, 他3名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/034024	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 イオン性液体含有構造体の製造方法及びイオン性液体含有構造体	発明者 木村直道, 神尾英治, 木ノ下雅之, 安井知己, 他3名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-160832	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

イオン液体型ガス分離膜の開発 http://www2.kobe-u.ac.jp/~matuyama/cx14HP/research/research-summary-gas-sep-i.html 膜工学グループ, 研究関連 / Publications http://www2.kobe-u.ac.jp/~matuyama/cx14HP/research-publications-papers-jap-2018.html 神戸大学学術成果リポジトリ http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/90005304 http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/90005997 http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/90006958 http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/90007085

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			
米国	University of Minnesota			