

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14280

研究課題名(和文) イオン液体中で発現する超分子結合を利用した自己修復性ソフトマテリアル

研究課題名(英文) Self-healing soft materials based on supramolecular interactions in ionic liquids

研究代表者

玉手 亮多 (TAMATE, Ryota)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究拠点・独立研究者

研究者番号：70812759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：イオン液体中において高分子鎖間で発現する水素結合を可逆な超分子結合として利用した、自己修復機能を持つイオンゲルを見出した。更に水素結合性ブロックとイオン液体に不溶なブロックからなるジブロック共重合体をイオン液体と複合化することで、ジャミングしたミセル間の水素結合により形成されるミセル型イオンゲルを創製した。このイオンゲルは室温での迅速な自己修復性に加え高い自己支持性・破断強度を示した。またイオン液体・高分子構造が力学特性に与える影響を詳細に検討し、イオン液体のカチオン・アニオンと高分子鎖間に生じる競合的な水素結合の制御が自己修復イオンゲルの力学特性の発現に重要であ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

カチオン・アニオンのみからなる常温溶融塩であるイオン液体を溶媒とするゲル(イオンゲル)は安全性・安定性の高いソフトな固体電解質であり、次世代電気化学デバイスへの応用が検討されている。本研究ではイオン液体中における高分子間の可逆相互作用とナノ相分離構造を利用することで、高強度かつ自己修復性を持つイオンゲルを初めて創製した。イオンゲルに自己修復性を付与することで伸縮や曲げに対する耐久性を大きく向上できると期待される。IoT時代においてウェアラブル・ストレッチャブル技術への需要は高まっており、本研究の成果は安心・安全で高耐久なゲル電解質としてウェアラブル機器への応用などが大きく期待される。

研究成果の概要(英文)：We fabricated a self-healable ion gel by utilizing the hydrogen bonding between polymer chains in ionic liquids (ILs) as reversible crosslinking points. Furthermore, a new class of self-healing micellar ion gel composed of a diblock copolymer and an IL was presented. The diblock copolymer has an IL-phobic block and a hydrogen-bonding block. By combining the IL and the diblock copolymer, micellar ion gels were prepared in which the IL phobic blocks formed a jammed micelle core, whereas coronal chains interacted with each other via multiple hydrogen bonds. These hydrogen bonds between the coronal chains endowed the ion gel with a high level of mechanical strength as well as rapid self-healing. In addition, the effect of IL structures on the microstructures and viscoelastic properties of the micellar ion gel was investigated. It was clarified that competition among cations, anions, and polymer chains for hydrogen bonding significantly affected the viscoelastic behavior of the ion gel.

研究分野：機能性高分子材料

キーワード：イオン液体 イオンゲル 自己修復 超分子相互作用 ブロック共重合体 水素結合 ナノ相分離

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

イオン液体はカチオン・アニオンのみから構成され、常温で液体となる塩である。イオン液体は通常分子性液体と異なり高いイオン伝導性、不揮発性、難燃性などの優れた特性を示し、水、有機溶媒に次ぐ第3の溶媒として注目されている。イオン液体をデバイス応用するためにはその固体化が望まれ、イオン液体を溶媒とするコロイドゲル、高分子ゲルなどのソフトマテリアル「イオンゲル」が研究されてきた[1]。イオンゲルは揮発に伴う物性変化がない安全性・安定性の高いソフトな固体電解質であり、フレキシブル・ウェアラブルデバイスなどの次世代電気化学デバイスへの応用が大きく期待される。

イオンゲルは従来のハイドロゲルなど溶媒を内包したソフトマテリアルの欠点である溶媒揮発という問題を克服したが、機械的入力に対して脆く、安全性・信頼性が低いというゲル共通の欠点は未解決である。ハイドロゲル系においては様々な戦略を用いた高強度化、自己修復性の付与により機械強度・信頼性を改善する試みが検討されてきた[2,3]。これらの研究においては、可逆的な超分子結合の導入や結合エネルギーの異なる架橋点の導入により、結合点の再形成による自己修復機能の発現・選択的な結合開裂に伴うエネルギー散逸を利用した高強度化が進められてきた。一方、イオンゲルにおいて機械的強度・信頼性を高める試みは少ない。この根底には、イオンゲル研究が開始されたのが最近であることに加え、イオンゲルはイオン液体のカチオン・アニオン間の相互作用に加え、高分子とカチオン、アニオンとの相互作用が競合する複雑系であり、イオン液体中での高分子の相互作用の解明が難しいという理由が存在する。特にイオン液体中で発現する高分子の水素結合・イオン結合といった超分子結合の支配因子は未解明であった。

2. 研究の目的

本研究ではイオン液体中において高分子鎖間で発現する水素結合などの超分子結合の結合力を調べ、可逆な超分子結合を利用した自己修復機能を持つイオンゲルを創製する。更に、自己修復性と高強度性・自己支持性などデバイス応用に求められる性能を高度に両立するため、ブロック共重合体による機能分担の概念を用いたイオンゲルを創製し、電気化学デバイスへの適用可能性を立証する。

3. 研究の方法

水素結合ドナー・アクセプター性モノマーを様々な比率で共重合した水素結合性高分子を合成し、イオン液体との複合化によりイオンゲルを創製し、その力学特性に関して評価した。また、水素結合性ブロックとイオン液体不溶性ブロックからなるブロック共重合体を精密リビングラジカル重合の一種である可逆的付加開裂連鎖移動(RAFT)重合により合成した。ブロック共重合体とイオン液体を複合化することでミセル型イオンゲルを創製し、引張試験・粘弾性試験を用いた力学特性評価、サイクリックボルタンメトリー・インピーダンス試験による電気化学特性評価、および示差走査熱量計(DSC)、フーリエ変換赤外分光法(FT-IR)、小角X線散乱(SAXS)などを用いたイオンゲルのマイクロ構造評価を実施した。また、イオン液体のカチオン・アニオン構造の違いが自己修復イオンゲルの物理特性に与える影響に関して詳細な検討を実施した。

4. 研究成果

水素結合のアクセプター及びドナーとなる官能基、*N,N*-dimethylacrylamide (DMAAm)と acrylic acid (AAc)を様々な比率で共重合した高分子 P(DMAAm-*r*-AAc)をイオン液体 1-ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl)amide ([C₂mim][NTf₂])と複合化した(Fig. 1a, b)。PDMAAmは[C₂mim][NTf₂]と相溶するが、DMAAmにAAcを共重合することでDMAAm-AAc間に水素結合が形成され、[DMAAm]:[AAc]=9:1, 8:2で透明なイオンゲルが形成された。一方、P(DMAAm-*r*-AAc)におけるAAcの共重合比率を増やしていくと、高分子間の水素結合が非常に強く働くため、イオン液体から高分子がマクロに相分離する。そのため、[DMAAm]:[AAc]=7:3以上のAAc比率では白濁した脆いゲルが得られた。この結果から高分子間の水素結合の強さを適切に制御することで、マクロな相分離を起こすことなく高分子間に可逆な物理架橋点を形成できることが示された。更に、[DMAAm]:[AAc]=8:2となるイオンゲルを切断して切断面を圧着して放置すると、可逆な架橋点の組み換えに起因した自己修復性を発現することが分かった(Fig. 1c)。しかし、水素結合のみを物理架橋点として用いたイオンゲルは長時間スケールで液體的な振る舞いを示す。このため、DMAAm-AAc間の水素結合を可逆架橋点とするP(DMAAm-*r*-AAc)/[C₂mim][NTf₂]イオンゲルは室温で流動変形を示し、自己支持性が低いことが分かった(Fig. 1d)。

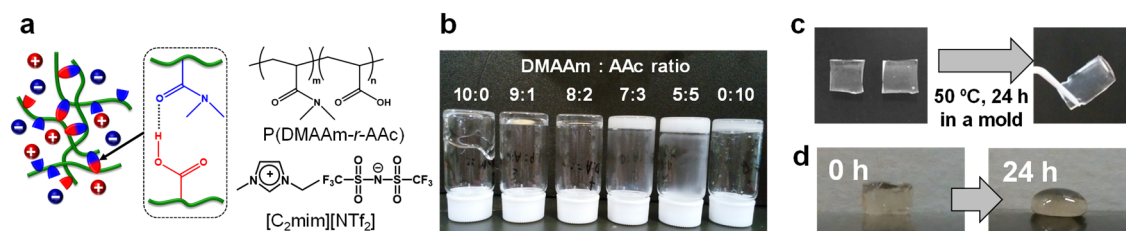


Fig. 1 (a)イオン液体[C₂mim][NTf₂]と水素結合性高分子 P(DMAAm-*r*-AAc)により構成されるイオンゲルの概念図および化学構造。(b)P(DMAAm-*r*-AAc)における[DMAAm]:[AAc]比を変化させたときのイオンゲルの写真([C₂mim][NTf₂])中の高分子濃度=30 wt%)。(c, d) P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルの自己修復挙動(c)および室温での自己支持性(d)。

ブロック共重合体のナノ相分離構造をイオンゲルに導入することで、自己支持性と室温での自己修復性を両立するイオンゲルを創製した[4]。RAFT 重合を用い、イオン液体に非相溶性 polystyrene (PS)ブロックと水素結合性を示す P(DMAAm-*r*-AAc)ブロックからなるジブロック共重合体 PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)を合成した。共溶媒を用いてジブロック共重合体とイオン液体 [C₂mim][NTf₂]を複合化することで、ブロック共重合体ミセルの自己集合と水素結合からなるイオンゲルを創製した(Fig. 2a)。得られたイオンゲルは、ミセルが混み合ったジャミング構造を取ることによって水素結合の解離に伴う末端緩和が抑制され、自己支持性が大きく改善する。時間-温度換算則により得られた G' 、 G'' のマスターカーブより、P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルに比べ、PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルは全周波数領域でゲル状態($G' > G''$)を維持し、末端緩和が大きく低周波数側にシフトしていることが分かった(Fig. 2b)。その結果、PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルは長時間での流動変形が抑制され、高い自己支持性を示した(Fig. 2c)。また、ミセル構造を導入することで水素結合の解離に起因すると推測されるネッキング変形が大きく抑制され、PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルは P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルと比較して高い破断強度を示した(Fig. 2d)。これらの結果より、水素結合に加えて高分子ミセルが形成するジャミング構造を導入することで、イオンゲルの自己支持性・引張特性が大きく向上することが示唆された。

PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルを切断し、切断面を圧着して室温・乾燥下で 3 時間放置したところ、自発的な切断面の修復が確認された(Fig. 2e)。これはイオンゲルの切断面においてブロック共重合体ミセル間の水素結合が優先的に解離し、切断面を圧着することで界面におけるミセル間の水素結合が再び形成されたためと推測される。イオンゲルの自己修復性能を定量的に評価するために、イオンゲルシートを切断して圧着した後に、異なる修復時間においてイオンゲルの引張試験を実施した(Fig. 2f)。イオンゲルの応力-歪み曲線は修復時間の増加に伴い切断前の応力-歪み曲線に近づき、3 時間後の応力-歪み曲線は切断前とほぼ同等の破断強度および破断伸びを示している。以上より、PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルは外部刺激を必要とせず、室温で迅速な自己修復性を示すことが分かった。次に、自己修復イオンゲルの電気化学的特性に関して述べる。PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルは 70 wt% のイオン液体([C₂mim][NTf₂])を含有し、30 °C において 1.2 mS cm⁻¹ という、poly(ethylene oxide)等の典型的な高分子固体電解質が示すイオン伝導率(室温で 10⁻² mS cm⁻¹ 程度)に比べて非常に高いイオン伝導率を示した。またイオンゲルの自己修復前後の電気化学特性を調べるため、未切断のイオンゲルおよび切断して自己修復したイオンゲルのサイクリックボルタンメトリー測定を行ったところ、自己修復前後において、同等の電流-電圧曲線が得られた。電圧掃引速度を変化させることでイオンゲルの静電容量を計算したところ、自己修復前後ともに約 2 μF cm⁻² という高い静電容量を持つことが分かった。このことからイオンゲルは自己修復前後において、力学特性のみならず電気化学特性もほぼ同等の性能を維持することが示された。

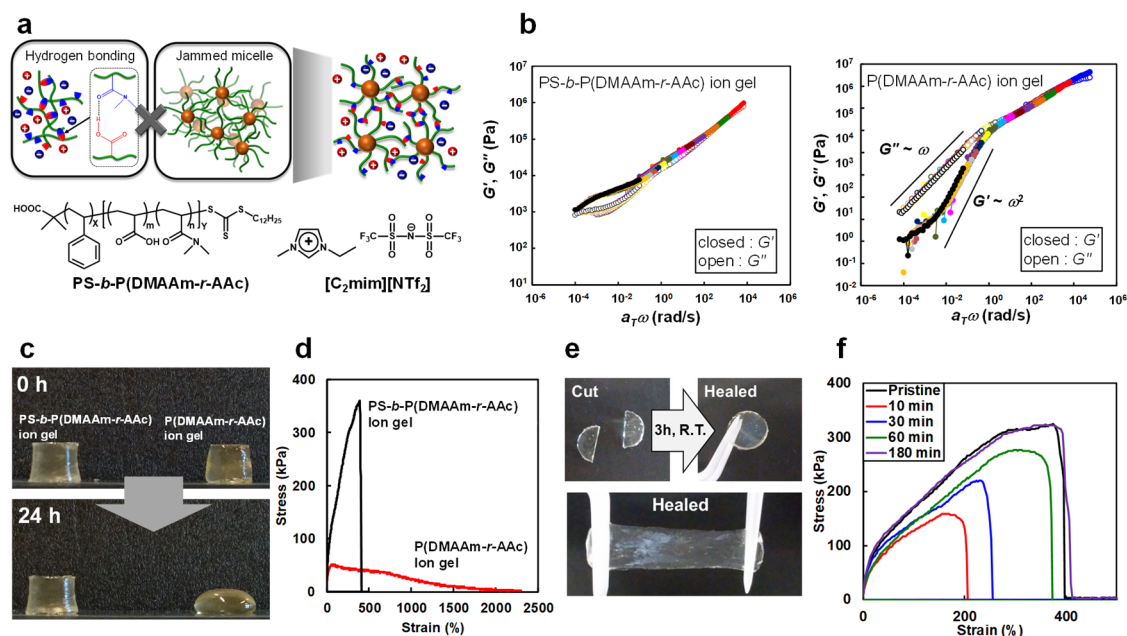


Fig. 2 (a)イオン液体中で発現する高分子鎖間の水素結合とジャミングミセル構造を利用した自己修復性イオンゲルの概念図、およびブロック共重合体・イオン液体の化学構造。(b)時間-温度換算則により得られたPS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲル(左)および P(DMAAm-*r*-AA)イオンゲル(右)のマスターカーブ(リファレンス温度 = 40 °C)。(c, d) PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルおよび P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルの室温における自己支持性(c)および応力-歪み曲線(d)の比較。(e)PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルの自己修復挙動。(f)異なる修復時間における PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルの応力-歪み曲線。

イオン液体中の高分子の相互作用にはカチオン-高分子、アニオン-高分子間の相互作用が競合するため、イオンゲルの物理特性は高分子のみならずイオン液体のカチオン・アニオン構造にも大きく依存する。イオン液体の構造が自己修復イオンゲルの力学特性へ与える影響を調べるため、**Fig. 3a**に示す5つのイオン液体とPS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)ジブロック共重合体を複合化してイオンゲルを創製し、イオンゲルのマイクロ構造および粘弾性特性に与えるイオン液体構造の影響について調べた[5]。まず[C_nmim][NTf₂] (n = 2, 4, 6)を含むイオンゲルの温度分散測定の結果から、カチオンのアルキル鎖長が力学特性へ与える影響は少ないことが分かった。一方、水素結合ドナー性の強いC2位のプロトンをメチル基に置換した[C₂dmim]カチオンを用いた場合、イオンゲルは白濁・脆化して弾性率が大きく上昇した(**Fig. 3b**)。そのため、PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)/[C₂dmim][NTf₂]イオンゲルは自己修復性を発現しない。[C₂dmim]カチオンに比べて水素結合ドナー性が低い[C₂dmim]カチオンは高分子との水素結合力が小さく、高分子間に非常に強い水素結合が形成された結果、高分子のマクロな相分離が起こり白濁・脆化が起こったと考えられる。一方、水素結合アクセプター性が非常に強い[MP]アニオンを用いた場合、イオンゲルの貯蔵弾性率は大きく低下した。FT-IRの結果から、[MP]アニオンを用いた場合DMAAmとAAc間の水素結合に起因したカルボニル基の伸縮振動のピークシフトが消失していることが分かった。このことから[MP]アニオンとAAcとの水素結合が支配的になるため、高分子間の水素結合が弱まりイオンゲルの弾性率が低下したと考えられる。更に温度-時間換算則によるマスターカーブ作成時のシフトファクターの温度依存性から、各イオンゲルの見かけの活性化エネルギーを算出した結果を**Fig. 3c**に示す。アルキル鎖長の異なる[C_nmim][NTf₂] (n = 2, 4, 6)を含むイオンゲルの活性化エネルギーはほぼ同等であるのに対し、[C₂dmim][NTf₂]を含むイオンゲルの活性化エネルギーは大きく増加し、[C₂dmim][MP]を含むイオンゲルの活性化エネルギーは大きく低下する。以上の結果から、イオン液体のカチオン・アニオン構造に依存してイオンゲル中で発現する競合的な水素結合力の大きさが変化し、イオンゲルの力学特性を決定づけていることが明らかとなった。

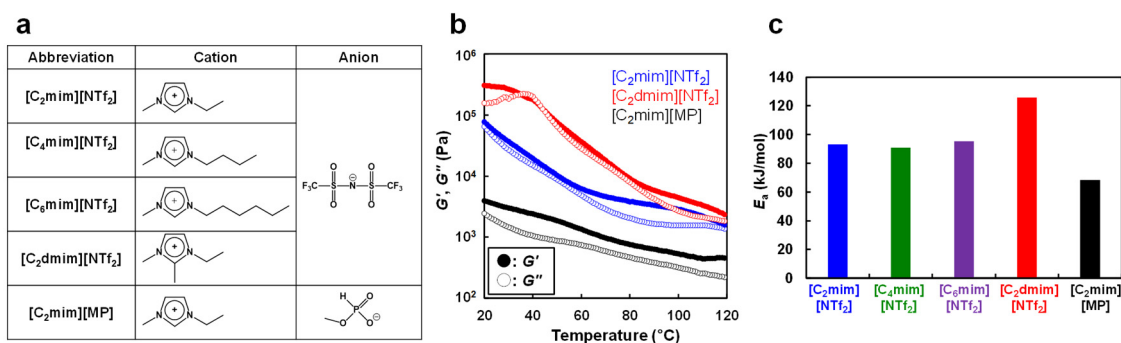


Fig. 3 (a)PS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)との複合化に用いたイオン液体の一覧。(b)異なるイオン液体と複合化したPS-*b*-P(DMAAm-*r*-AAc)イオンゲルの温度分散測定。(b)温度-時間換算則のシフトファクターより求めた各イオンゲルの見かけの活性化エネルギー。

本研究は高強度で室温での迅速な自己修復性を発現するイオンゲルを創製した初めての報告であり、自己支持性と自己修復性を両立する揮発性のないイオン伝導材料として、ウェアラブルデバイス等の電気化学デバイスへの応用が期待される。現状の自己修復イオンゲルの問題として、水分の影響が大きく高湿度で力学特性が劣化する点、持続応力の下でクリープ変形が発生する点が挙げられる。これらの問題は、可逆な結合を利用した高分子に一般的に存在する問題点でもある。今後はイオン液体中で発現する高分子の超分子相互作用とナノ相分離構造を最適化することで、上記の問題を克服した自己修復イオンゲルの創製が求められる。

<引用文献>

[1] T. Ueki and M. Watanabe, *Macromolecules*, 2008, **41**, 3739–3749.
 [2] C. W. Peak, J. J. Wilker and G. Schmidt, *Colloid Polym. Sci.*, 2013, **291**, 2031–2047.
 [3] C. Creton, *Macromolecules*, 2017, **50**, 8297–8316.
 [4] R. Tamate, K. Hashimoto, T. Horii, M. Hirasawa, X. Li, M. Shibayama and M. Watanabe, *Adv. Mater.*, 2018, **30**, 1802792.
 [5] R. Tamate, K. Hashimoto, X. Li, M. Shibayama and M. Watanabe, *Polymer*, 2019, **178**, 121694.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 14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 Akimoto Jun, Tamate Ryota, Okazawa Shingo, Akimoto Aya M., Onoda Michika, Yoshida Ryo, Ito Yoshihiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Reactivity Control of Polymer Functional Groups by Altering the Structure of Thermoresponsive Triblock Copolymers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 16344 ~ 16351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.9b01816	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 Tamate Ryota, Hashimoto Kei, Li Xiang, Shibayama Mitsuhiro, Watanabe Masayoshi	4. 巻 178
2. 論文標題 Effect of ionic liquid structure on viscoelastic behavior of hydrogen-bonded micellar ion gels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 121694 ~ 121694
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2019.121694	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 Hashimoto Kei, Hirasawa Manabu, Kokubo Hisashi, Tamate Ryota, Li Xiang, Shibayama Mitsuhiro, Watanabe Masayoshi	4. 巻 52
2. 論文標題 Transport and Mechanical Properties of ABA-type Triblock Copolymer Ion Gels Correlated with Their Microstructures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 8430 ~ 8439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.9b01907	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 Tamate Ryota, Saruwatari Aya, Nakanishi Azusa, Matsumae Yoshiharu, Ueno Kazuhide, Dokko Kaoru, Watanabe Masayoshi	4. 巻 109
2. 論文標題 Excellent dispersibility of single-walled carbon nanotubes in highly concentrated electrolytes and application to gel electrode for Li-S batteries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electrochemistry Communications	6. 最初と最後の頁 106598 ~ 106598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elecom.2019.106598	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 Saito Satoshi, Tamate Ryota, Miwa Kazumoto, Shimizu Sunao, Horii Tatsuhiro, Ueno Kazunori, Ono Shimpei, Watanabe Masayoshi	4. 巻 59
2. 論文標題 High performance electric double layer transistors using solvate ionic liquids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 030901 ~ 030901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab71d3	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 Yoshizawa Toshiki, Onoda Michika, Ueki Takeshi, Tamate Ryota, Akimoto Aya Mizutani, Yoshida Ryo	4. 巻 59
2. 論文標題 Fabrication of Self Oscillating Micelles with a Built In Oxidizing Agent	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 3871 ~ 3875
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201913264	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 Onoda Michika, Ueki Takeshi, Tamate Ryota, Akimoto Aya M., Hall Cecilia C., Lodge Timothy P., Yoshida Ryo	4. 巻 7
2. 論文標題 Precisely Tunable Sol-Gel Transition Temperature by Blending Thermoresponsive ABC Triblock Terpolymers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 950 ~ 955
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.8b00477	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 Tamate Ryota, Hashimoto Kei, Horii Tatsuhiro, Hirasawa Manabu, Li Xiang, Shibayama Mitsuhiro, Watanabe Masayoshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Self-Healing Micellar Ion Gels Based on Multiple Hydrogen Bonding	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 1802792 ~ 1802792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201802792	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 Tamate Ryota, Hashimoto Kei, Ueki Takeshi, Watanabe Masayoshi	4. 巻 20
2. 論文標題 Block copolymer self-assembly in ionic liquids	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 25123 ~ 25139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CP04173C	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 Tamate Ryota, Usui Ryoji, Hashimoto Kei, Kitazawa Yuzo, Kokubo Hisashi, Watanabe Masayoshi	4. 巻 14
2. 論文標題 Photo/thermoreponsive ABC triblock copolymer-based ion gels: photoinduced structural transitions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 9088 ~ 9095
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8SM01578C	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 Saruwatari Aya, Tamate Ryota, Kokubo Hisashi, Watanabe Masayoshi	4. 巻 54
2. 論文標題 Photohealable ion gels based on the reversible dimerisation of anthracene	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 13371 ~ 13374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CC07775D	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 Masuda Tsukuru, Ueki Takeshi, Tamate Ryota, Matsukawa Ko, Yoshida Ryo	4. 巻 57
2. 論文標題 Chemomechanical Motion of a Self-Oscillating Gel in a Protic Ionic Liquid	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 16693 ~ 16697
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201809413	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 Saruwatari Aya, Hashimoto Kei, Tamate Ryota, Usui Ryoji, Kokubo Hisashi, Watanabe Masayoshi	4. 巻 72
2. 論文標題 Cluster-Micelle Transition of a Thermo- and Photoresponsive ABC Triblock Copolymer in an Ionic Liquid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Australian Journal of Chemistry	6. 最初と最後の頁 155 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1071/CH18349	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 Caihong, Hashimoto Kei, Tamate Ryota, Kokubo Hisashi, Morishima Ken, Li Xiang, Shibayama Mitsuhiro, Lu Fengniu, Nakanishi Takashi, Watanabe Masayoshi	4. 巻 55
2. 論文標題 Viscoelastic change of block copolymer ion gels in a photo-switchable azobenzene ionic liquid triggered by light	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 1710 ~ 1713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CC08203K	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 玉手亮多	4. 巻 49
2. 論文標題 光二量化反応を利用した光応答性高分子ゲル	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 光化学	6. 最初と最後の頁 167 ~ 170
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 玉手亮多, 上木岳士, 秋元文, 吉田亮	4. 巻 18
2. 論文標題 動的ハイドロゲルの創製と三次元細胞培養への応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 MATERIAL STAGE	6. 最初と最後の頁 501 ~ 506
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 玉手亮多、橋本慧、堀井辰衛、渡邊正義	4. 巻 43
2. 論文標題 イオン液体とイオン伝導性高分子膜	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 膜	6. 最初と最後の頁 93~100
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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 玉手亮多
2. 発表標題 イオン液体中で発現する可逆結合を利用した自己修復性ソフトマテリアル
3. 学会等名 19-1水素・燃料電池材料研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玉手亮多、猿渡彩、仲西梓、松前義治、上野和英、獨古薫、渡邊正義
2. 発表標題 高分子を用いた正極および電解質設計によるリチウム-硫黄電池のポリマー電池化
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 玉手亮多、橋本慧、Xiang Li、柴山充弘、渡邊正義
2. 発表標題 多点水素結合を利用した自己修復イオンゲルの創製
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Tamate, Kei Hashimoto, Tatsuhiro Horii, Xiang Li, Masayoshi Watanabe
2. 発表標題 Self-Healing Micellar Ion Gels Based on Multiple Hydrogen Bonding
3. 学会等名 7th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Tamate, Kei Hashimoto, Tatsuhiro Horii, Masayoshi Watanabe
2. 発表標題 Self-healing micellar ion gels via multiple hydrogen bonding
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 玉手亮多、橋本慧、堀井辰衛、Xiang Li、柴山充弘、渡邊正義
2. 発表標題 水素結合を利用した自己修復性ミセル型イオンゲルの創製と高分子ゲル電解質への応用
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 玉手亮多、橋本慧、堀井辰衛、Xiang Li、柴山充弘、渡邊正義
2. 発表標題 水素結合を利用した自己修復性ミセル型イオンゲルの創製と高分子ゲル電解質への応用
3. 学会等名 第30回高分子ゲル研究討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Tamate, Kei Hashimoto, Tatsuhiro Horii, Masayoshi Watanabe
2. 発表標題 Self-healing polymer electrolytes containing ionic liquid via multiple hydrogen bonding
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 Ryota Tamate, Kei Hashimoto, Tatsuhiro Horii, Manabu Hirasawa, Xiang Li, Mitsuhiro Shibayama, Masayoshi Watanabe
2. 発表標題 Self-Healing Micellar Ion Gels Based on Multiple Hydrogen Bonding
3. 学会等名 12th SPSJ International Polymer Conference (IPC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 玉手亮多	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 7
3. 書名 自己修復材料、自己組織化、形状記憶材料の開発と応用事例「イオン液体中で発現する超分子結合を利用した自己修復性ソフトマテリアル」	

1. 著者名 上木岳士、小野田実真、玉手亮多、吉田亮	4. 発行年 2018年
2. 出版社 株式会社シーエムシー出版	5. 総ページ数 9
3. 書名 ブロック共重合体の構造設計と応用展開 「第16章 ブロック共重合体の時空間構造化によるバイオミメティクス材料」	

1. 著者名 橋本慧, 玉手亮多, 渡邊正義	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 7
3. 書名 刺激応答性高分子ハンドブック 応用編 第1章 第2節 イオン液体を溶媒とする温度 / 光応答性高分子材料	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 リチウム硫黄電池、および、リチウム硫黄電池の製造方法	発明者 渡邊正義、猿渡彩、 玉手亮多、上野和 英、獨古薫	権利者 横浜国立大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-034605	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----