

令和 6 年 6 月 30 日現在

機関番号：58001

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02060

研究課題名（和文）再生・修復機能を付与した低摩擦ソフトトライボロジー材料の開発

研究課題名（英文）Development of low-friction soft polymer materials with regeneration and restoration functions

研究代表者

佐藤 貴哉（SATO, TAKAYA）

沖縄工業高等専門学校・その他部局等・校長

研究者番号：30399258

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）：本研究では再生・修復機能を持つソフトマテリアルを開発し、交換不要の低摩擦摺動システムを開発した。まず親疎水性の差を利用し、基材内部からループ型ブラシが形成する材料表面を設計し、リビングアニオン重合の技術でABA型トリブロックポリマーを合成し、表面に親水性のループ状濃厚ポリマーブラシ表面を付与する方法を確立した。この表面が、 10^{-3} オーダーの低摩擦摺動システムとして機能することを見出した。また並行して、スライドリング架橋を導入したイオンゲル薄膜の合成条件を確立した。合成したポリマーブラシ及びゲルが再生・修復機能を有する低摩擦材料として機能することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の金属材料やダイヤモンドライクカーボンなどのハード材料における接触面積低減による摩擦低減に対し、ポリマーブラシやゲルなどの柔らかいソフト材料は相手材の凹凸にソフト変形し相手面を侵襲することなく低摩擦を保持できることを示した。これらの材料は自己修復機能をも有するので、特に交換に多大なコストがかかる宇宙空間やマイクロデバイスシステムの摩擦材料として大きなメリットがある。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a soft material with low-friction that have the regeneration and self-repair functions. The low-friction sliding system including our material could not require replacement of the friction surface. Synthesize ABA type tri-block polymer using living anion polymerization technology. We have established a technology that utilizes the difference in hydrophilic and hydrophobic properties to form a loop-shaped brush from within the base material. We found that this surface functions as a low friction sliding system on the order of 10^{-3} . In parallel, we established conditions for synthesizing ion gel thin films with slide ring crosslinks. It was confirmed that the synthesized polymer brush and gel function as low-friction materials with regeneration and repair functions.

研究分野：高分子材料化学

キーワード：ポリマーブラシ ゲル イオン液体 アニオン重合 リビングラジカル重合 自己修復 トライボロジー
— 低摩擦

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

物質同士の接触面で生じる摩擦や摩耗現象を私たちは知らず知らずのうちに利用している。しかしながら、摩擦によるエネルギーの損失は大きく、機械部品の故障原因の75%は摩擦による摩耗が原因だと考えられている。機械部品の信頼性向上と省エネルギーを達成するため、様々な潤滑方法や低摩擦材料が開発されてきた。今までの低摩擦材料は、金属材料やダイヤモンドライクカーボン(DLC)などのハード(硬い)材料を中心に開発されてきた。これは接触表面積を小さくして、摩擦係数を下げる開発戦略である。しかし、硬い表面間の摩擦は時として対向する相手面を傷つける。機器組付け時には、硬い材料に高精度な表面加工が必要である一方、遊び隙間の無い摺動面への衝撃や異物混入は材料表面を傷つけ、その寿命を短縮する。一方、柔らかなソフトマテリアルは、従来高い摩擦係数を持つと考えられていたが、ポリマーブラシやダブルネットワークゲルなど、しなやかで強靱な低摩擦ソフトマテリアルが見出された。ソフトな低摩擦材料は、対向摺動面の凹凸にソフトに変形して俵うために、相手面を侵襲することなく低摩擦を保持できる特徴がある。

申請者らは、イオン液体型濃厚ポリマーブラシ(Ionic Liquid Concentrated Polymer Brush; IL-CPB)と潤滑剤としてのイオン液体(IL)を組み合わせ、400MPa以上の耐荷重性能と 10^3 オーダーの極めて低い摩擦係数を高温(80°C)及び真空中でも維持できる高い実用性を有する低摩擦表面を開発した。また、最近申請者らは、IL型ポリマーの三次元ネットワークとポリメチルメタクリレート(PMMA)のネットワークを組み合わせ、膨潤剤にILを適用したダブルネットワークイオンゲル(DN-ionGEL)も $\mu < 10^{-2}$ の低い摩擦係数を有することを明らかとした。ゲルの低摩擦は従来から知られていたが、水の蒸発などの影響でその応用分野は限られていた。ILの適用により、広い温度範囲で、減圧下でもゲルの低摩擦特性を利用することが可能となった。このようにILと組み合わせたソフトマテリアルは、その優れた耐熱性、不揮発性、潤滑特性から、過酷な環境条件下で使用される宇宙利用のトライボロジー材料としての応用が期待できる。

宇宙や減圧下などの厳しい条件下で使用される摺動システムでは潤滑油の揮発が問題となる為、摺動材の多くは固体潤滑特性を有するハード材料である。摩擦運動中の摩擦面損傷に加えて、種々のアクシデントによる衝撃で摩擦面が傷つくことも多いと聞く。特に宇宙空間やMEMSで用いられる部品は交換に多大なコストがかかる為、アクシデント発生時に備えた「自己修復機能」を組み込むことが重要であると考えられている。そこで申請者らは、真空、高温、低温などの過酷な環境下で低摩擦特性を示すことのできるイオン液体を組み込んだソフトマテリアルにアクシデント発生時に「自己再生・修復」により低摩擦特性を発現し続ける機能を付与することを企画した。直線状の濃厚ポリマーブラシより、より低い摩擦係数を持つ濃厚ループ型ポリマーブラシと強靱な機械特性と低摩擦特性を両立できるイオン液体ダブルネットワークゲルの簡便な合成経路の確立、低摩擦特性と再生修復機能の実証を本研究で実施する。いずれも世界で初めての新材料の科学と技術の創製を目指す。

濃厚ポリマーブラシの新しい機能の探索、その応用に係る研究は大きく進展しているが、その合成は殆んど全てSILRPで行われており、他の方法は開発されていない。そこで申請者らは、ブロックポリマーの相分離を利用したポリマーブラシ表面の新しい合成法の確立とその機能特性の解明を本研究の一つ目のターゲットとした。この方法は、ポリマーの混ざり難さを利用した方法で、Aセグメント(ゴム系基材A'と高い相溶性を有するセグメント)とBイオン液体型ポリマーセグメント(ゴム系基材A'と非相溶性のセグメント)を有するABA型トリブロックコポリマーを合成し、このブロックコポリマーをゴム基材と混合した後、基材表面にイオン液体(潤滑剤)を展開し、BのILポリマーセグメントを基材内部から界面偏析させて、ブラシ形成を行うものである(Inverted-grafting-to法と言う)。たとえば、ブラシが抜け落ちて、新たなBセグメントがループ状に出現する再生・修復機能を有すると考えられる。コンピュータシミュレーション研究により直鎖ブラシよりループブラシが、より低い摩擦係数と高い耐久性を示すことが予測されているが、実際にループ型濃厚ポリマーブラシを合成した例は無く、その摩擦特性も再生機能も実証されていない。しかしながら、我々はポリエチレングリコール(PEG)のBセグメントを有するポリマーを用いて水潤滑の予備試験を行い、この設計思想による低摩擦システムが機能することを確認した。『イオン液体型ポリマーブラシと超平滑シリカ面が厳しい条件下でも世界ト

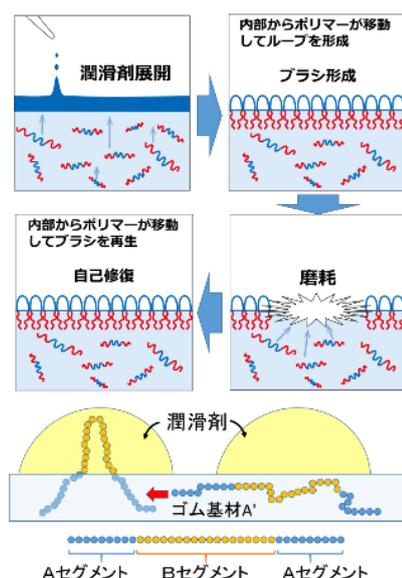


図1 トリブロックコポリマーの自己偏析によるループ型ブラシ形成と自己修復機構

ップレベルの極めて低い摩擦係数を示す』という事実は、申請者らによって世界で初めて見出され（特許出願済）、その高い荷重及びサイクル耐久性も確認された。本研究はポリマーブラシの社会実装を見据えて、簡便な形成法の確立と再生・修復機能を同時に達成しうる科学技術として学術的独自性が高いと考えている。

二つ目のターゲットも申請者らが開発したゲル系摩擦材料であるイオンゲルに再生・修復機能とゲル薄膜化の新しい手法を確立するものである。産業界では DN-ionGEL 薄膜の開発が待たれているので、実用上でも学術的にも追究すべき価値が高い研究テーマと考えている。本研究は低摩擦特性を有するソフトマテリアルの宇宙利用を見据えて、簡便な合成法、薄膜化技術、生・修復機能の創製とその機能特性解明をめざすものであり、極限環境でのソフトトライボロジーの一端を切り拓くと同時に省エネルギー技術開発として、地球環境保全にも大きな貢献が可能であると考えている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、再生・修復機能を持つソフトマテリアルを開発し、宇宙空間など厳しい環境下で使用する機械部品や MEMS 部品の摺動部材として、交換不要の低摩擦摺動システムを世界に先駆けて創製することにある。具体的には、(1)ABA 型トリブロックポリマーの表面偏析を利用したループ型ポリマーブラシおよび(2)イオン液体型高強度ゲル薄膜の、設計と合成経路の確立、構造確認（形態、密度、長さ）とトライボロジー特性評価と低摩擦性能に及ぼす対抗面の影響、耐久性評価を目的とした。

3. 研究の方法

(1) ポリマー構造体の合成

基材親和性 A ポリマーとしてポリジメチルシロキサン(PDMS)、水潤滑性ポリマーとしてポリエチレングリコール(PEG)を有する ABA 型トリブロックコポリマー PDMS-PEG-PDMS または AB 型ジブロックポリマーPDMS-PEG を合成し、二液混合型シリコーンゴム KE109E に混合した。得られた前駆体液を 100°C、1h 加熱することで PDMS 基板を得た。得られた基板の摩擦試験として摩擦試験機(Tribogear type-14)により表面特性を評価した。摩擦試験では対抗面に平滑ガラスシートを貼り付けた平滑ガラスディスク(SGD)を適用した。グリセロール 90wt%を滴下して SGD とサンプル界面における摩擦試験を行うことで表面の潤滑性を評価した。また、界面構造を評価するため J-PARC において ABA 型および AB 型ブロックコポリマーの中性子反射測定を行った。重水界面におけるサンプル基板の中性子反射プロファイルから各層の膜厚をモデルフィッティングにより算出し、界面構造を検証した。

また高強度イオンゲル薄膜の合成にあたりダブルネットワーク構造およびスライドリング架橋構造に着目したゲル合成を行った。ダブルネットワーク構造を有するイオンゲル薄膜合成にあたっては、従来の DN ゲル合成法である逐次ラジカル重合では合成過程で生じる脆いゲル構造が薄膜化に耐えられないため、加水分解と熱ラジカル重合を複合したワンポット合成法を適用した。具体的には、モノマーとしてテトラエトキシシラン(TEOS)とメチルメタクリレート(MMA)、熱重合開始剤として 2,2'-azobis(isobutyronitrile)、重合溶媒として *N*-(2-methoxyethyl)-*N*-methylpyrrolidinium (MEMP-TFSI)、架橋剤として triethyleneglycol を混合し、得られた前駆体液を Ar 雰囲気下で 2mm 厚の鋳型セルに送液して 80°C、18h 加熱することによりダブルネットワーク構造を有するイオンゲル(DN イオンゲル)を合成した(図 2)。薄膜作製にあたっては先の前駆体液を 0.2mm 厚の鋳型セルに送液することで作製した。またスライドリング構造を有するイオンゲル合成ではイオン液体モノマーとして *N,N*-diethyl-*N*-(2-methacryloylethyl)-*N*-methylammonium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide (DEMM-TFSI)、スライドリング架橋剤 SM1305P(軸分子量 1.1 万、全体重量平均分子量 20 万)、重合溶媒 1-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluorosulfonylimide) および AIBN を混合し、上記と同様の手法でスライドリングイオンゲル(SR イオンゲル)を合成した。

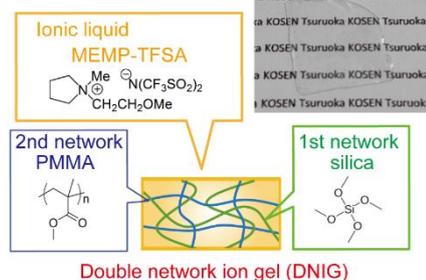


図 2 DN イオンゲルの化学構造

(2) ポリマー構造体の物性評価

得られたマルチブロックポリマーを導入した inverted ブラシ基板の界面構造評価にあたり、グリセロール 90wt%水溶液の接触角経時変化から界面におけるブラシ形成挙動を評価した。また、重水界面における中性子反射測定を行い、inverted ブラシ基板の界面構造を解析した。また各基板について摩擦試験機(Tribogear type-14)により摩擦試験を行った。摩擦試験における対抗面は円筒型ガラスディスク(接触半径 20 mm)にエポキシ樹脂を介して平滑ガラスシートを貼り付けた平滑ガラスディスク(SGD)を適用した。SGD とサンプル基板界面(SGD/サンプル)に潤滑液としてグリセロール 90wt%水溶液を添加し、任意の荷重・すべり速度で摩擦試験を行うことで、inverted ブラシ基板の潤滑特性評価を行った。

得られた高強度イオンゲルの機械的特性評価にあたり、万能試験機 Instron 3342(Instron)による圧縮および引張試験により破断強度や破断伸びを検証した。得られたゲルの潤滑特性評価は対

抗面に 10mmφ球、潤滑液として MEMP-TFSI を添加し、任意の荷重・すべり速度で摩擦試験を行った。

4. 研究成果

(1) ループ型濃厚ポリマーブラシの形成と界面特性解析

ループ型濃厚ポリマーブラシの合成にあたり、疎水性の A ポリマーとして PDMS、親水性の B ポリマーとして PEG を適用した ABA 型トリブロックポリマー PDMS-PEG-PDMS および AB 型ブロックポリマー PEG-PDMS を導入した PDMS ゴムサンプルを合成した。はじめに PDMS-PEG-PDMS の合成にあたり、HO-PEG(4000)-OH の両末端を原子移動ラジカル重合(ATRP)開始剤で修飾したのち PDMS メタクリレートを伸長させることで、櫛型の PDMS 構造を有する cPDMS-PEG-cPDMS を合成したところ GPC 測定から cPDMS(1.6k)-PEG(4k)-cPDMS(1.6k)の合成を確認した。ここでカッコ内の数値はそれぞれのポリマーブロックの数平均分子量を示す。また、比較解析としてリビングアニオン重合開始基で修飾したのちシルセスキオキサンを伸長することで同様に合成を行い、直鎖型の PDMS(0.9k)-PEG(4k)-PDMS(0.9k)および PDMS(5k)-PEG(20k)-PDMS(5k)をそれぞれ合成した。

inverted ブラシ基板においてグリセロール 90wt%水溶液を 2 μL 滴下し、接触角の経時変化を検証した(図 2)。PDMS 単体に比べ、PDMS(1000)-PEG(2.1k)の 180min 後の接触角は $\theta=39^\circ$ だったのに対し、PDMS(0.9k)-PEG(4k)-PDMS(0.9k)および PDMS(5k)-PEG(20k)-PDMS(5k)はそれぞれ $\theta=87^\circ, 71^\circ$ であった。このような値の変化の要因として PDMS(0.9k)-PEG(4k)-PDMS(0.9k)は PDMS への分散性が悪く、PDMS 内の拡散が阻害されたためと考えられる。一方、櫛型 PDMS 側鎖を有する cPDMS(1.6k)-PEG(4k)-cPDMS(1.6k)についてはグリセロール 90wt%水溶液滴下後 1 分で接触角が 90° まで低減したものの、その後の変化は緩やかであった。滴下直後の接触角低減および表面分析の結果から、cPDMS(1.6k)-PEG(4k)-cPDMS(1.6k)は PDMS 内部から拡散したのではなく、滴下前から PDMS 表面に析出していたことが示唆され、PDMS 側鎖構造の違いが界面偏析挙動に影響することが分かった。

次に重水界面における中性子反射測定を行い、トリブロックポリマーにより形成されるポリマーブラシの界面構造を検証した(図 3)。得られたスペクトルのフィッティング結果から PDMS(5k)-PEG(2.1k)、PDMS(1k)-PEG(2.1k)の PEG 膜厚はそれぞれ 11 nm および 12 nm と算出され、分子量 2.1k の PEG 伸びきり鎖長(17 nm)の 6-7 割程度まで伸長していることを確認した。一方 PDMS(0.9k)-PEG(4k)-PDMS(0.9k)および PDMS(5k)-PEG(20k)-PDMS(5k)の PEG 膜厚は 5 nm および 50 nm となった。ここで PDMS-PEG-PDMS の PEG 伸び切り鎖長が相補的な PDMS-PEG の半分と仮定した場合、2 種のトリブロックコポリマーそれぞれの膜厚は伸びきり鎖長(17 nm および 80 nm)に比べ 3 割および 6 割の膜厚に達することが判明した。この結果は、いずれの系においても界面で濃厚ブラシ構造を形成する濃度領域にあることを示している。PDMS(0.9k)-PEG(4k)-PDMS(0.9k)において比較的低膜厚となったのは PDMS 鎖長が短く PEG ブラシが重水界面に安定的に存在できないためと考えられる。

一方、PDMS(5k)-PEG(20k)-PDMS(5k)については直鎖状ブラシとほぼ同程度の膨潤度と算出されており、従来直鎖状ブラシに比べ熱力学的断面積が大きいループ型ブラシにおいて、このような高伸長・高密度を示したことは興味深い。

続いて負荷 0.98N の条件下で SGD/inverted ブラシ基板についてグリセロール 90wt%水溶液中で摩擦試験を行い、摩擦係数のすべり速度依存性を検証した(図 4) PDMS 単体に比べ、PDMS(0.9k)-PEG(4k)-PDMS(0.9k) および PDMS(5k)-PEG(20k)-PDMS(5k)はいずれもすべり速度の低減に伴い摩擦係数が減少し、 10^{-3} オーダーの低摩擦を示したことから、本系が流体潤滑領域に属することが示唆される。この結果は、親水性 PEG がグリセロール水溶液の液膜を界面に安定的に保持していることを示唆している。一方、cPDMS(1.6k)-PEG(4k)-cPDMS(1.6k)の摩擦係数は速度変化によらず 0.02 程度であり、直鎖状の ABA 型トリブロックポリマーに比べ低速でより高い摩擦係数を示した。こ

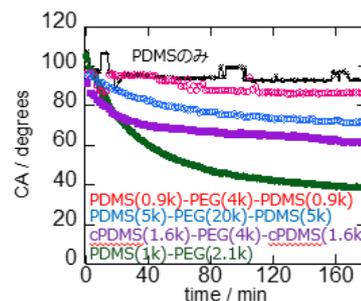


図 3 ループ型 inverted ブラシ基板の glycerol90wt%水溶液の接触角経時変化

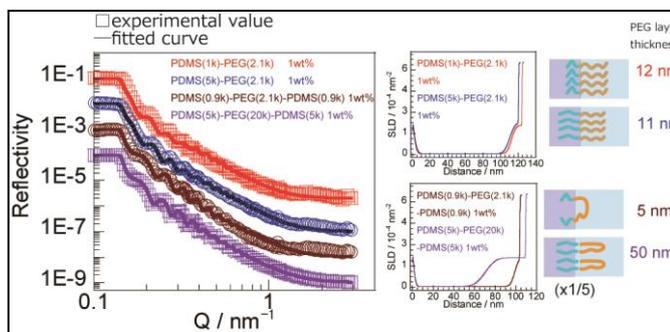


図 3 inverted ブラシ基板の中性子反射スペクトル解析

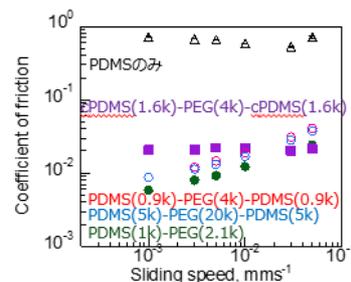


図 4 各 inverted ブラシ基板における摩擦係数のすべり速度依存性

の結果は、cPDMS(1.6k)-PEG(4k)-cPDMS(1.6k)がグリセロール水溶液を摩擦界面に保持できず、高摩擦につながったものと考えられる。また、inverted ブラシ基板の自己修復性について検証するため、0.35N で剪断力で摩擦処理を加えたところ、負荷 0.98N、すべり速度 1.0mm/s で摩擦係数が 0.011 から 0.11 に増大したのに対し、グリセロール 90wt%水溶液中で静置したところ、120min 後の摩擦係数は 0.033 まで低減した。この結果は表面損傷後に 78%の特性回復が得られたことを意味している。

(2) 高強度イオンゲルの合成と機械的特性解析

TEOS および MMA からなる DN イオンゲルの機械的特性評価にあたり、10%strain/min で圧縮測定を行った(図 5) 構成ポリマーのシングルネットワークゲルである TEOS および PMMA の破断強度は 0.04 および 10MPa なのに対し、DN イオンゲルの破断強度は 41MPa であり、高い機械的強度を有していることを確認した。また 0.2mm および 2mm 厚の DN イオンゲルについて 100%strain/min で引張試験を行ったところ、いずれのゲルも破断強度は 2.2 MPa であり、同等の機械的強度を維持していることを確認した。以上の結果から、得られたゲルが高強度イオンゲル薄膜として機能することを見出した。

続いて得られたゲルについて対抗面を負荷 0.98N で摩擦試験を行った(図 6) ガラス対抗面においてはすべり速度 50~10mm/s ではすべり速度の減少に伴い摩擦係数が減少する一方、10mm/s 以下では摩擦係数が増大していったことから、本系は流体~混合潤滑域に属するものと考えられる。一方、ガラス対抗面に比べ SUS304 を対抗面に用いた場合には 5 mm/s 以下の低速域で摩擦係数が減少した。これは DN イオンゲルの 1st ネットワークに TEOS を使用したため、ガラス対抗面では同一材料での焼き付きが生じるのに対し、SUS304 では生じなかったためと考えられる。一方テフロン対抗面の場合にはすべり速度によらず摩擦係数 0.15 程度の値を示した。テフロン表面における MEMP-TFSI 接触角が高かったことから、摩擦界面において MEMP-TFSI の潤滑液膜が形成されず、テフロンとゲルとの接触により境界潤滑に属するものと考えられる。

また、スライドリング構造を有するイオンゲルの引張試験を行った(図 7)。添加量を 0.10g から 1.0g まで増大するにつれ、破断応力は 1.0~1.2MPa と大きく変化しないのに対し、伸びは 14 から 1.7 まで低減した。一方、比較解析として架橋点が固定された triethylene glycol を 0.37g 添加して作製したところ、破断強度および破断伸びはそれぞれ 0.74 MPa および 0.34 であった。以上の結果から、SR 架橋剤を用いることで固定架橋型のゲルに比べ伸張性が高い高強度ゲルとして活用可能であることを見出した。また得られたゲルは DN イオンゲル同様に 0.2mm 厚のスペーサーまたはスピンドットによる薄膜作製が可能であり、得られた薄膜が同等の機械的強度特性を示したことから、DN イオンゲルと同様に高強度イオンゲル薄膜として機能することを見出した。

以上、ABA 型トリブロックポリマーを用いたループ型 inverted ブラシおよび架橋構造に着目した高強度イオンゲル薄膜の合成・界面構造・表面特性について検証した。その結果、ループ型形状にもかかわらず inverted ブラシが想定される PEG 鎖長の 6 割程度まで伸長した濃厚ブラシ構造の形成や自己修復特性、DN または SR 構造を有するイオンゲル薄膜の合成プロセスと高強度を見出した。今後はこれらのポリマー構造体の複合により、低摩擦性と迅速な自己修復性を兼ね備えた強靱なポリマー潤滑剤の創製への展開が期待される。

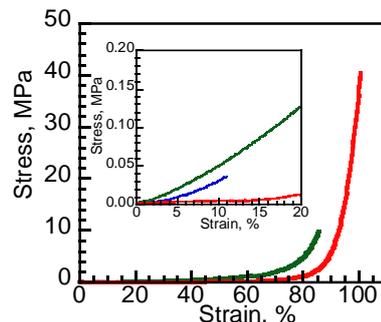


図 5 各イオンゲルの SS カーブ(緑: PMMA, 青:TEOS, 赤: DN イオンゲル)

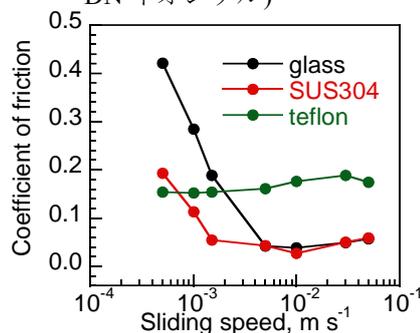


図 6 各対抗面における DN イオンゲルの摩擦係数のすべり速度依存性

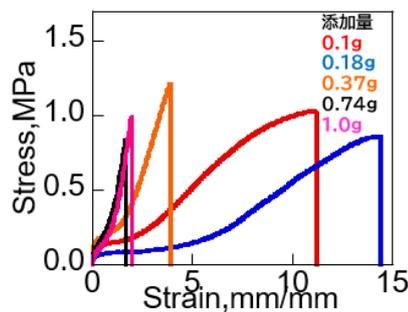


図 7 SR イオンゲルにおける SS カーブの架橋剤濃度依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 KAMIJO TOSHIO, SATO TAKAYA, WAKE HITOSHI, OBA MAMI, MIZUTANI TETSUYA	4. 巻 77
2. 論文標題 An Another Function of Polymer Brushes Toward the Development of Virus Inactivation Materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sen'i Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 P~278-P-282
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2115/fiber.77.P-278	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 Kentaro Yoshida, Akane Yamaguchi, Hiroki Midorikawa, Toshio Kamiyo, Tetsuya Ono, Takenori Dairaku, Takaya Sato, Tsutomu Fujimura, Yoshitomo Kashiwagi, Katsuhiko Sato	4. 巻 12
2. 論文標題 Adsorption and Release of Rose Bengal on Layer-by-Layer Films of Poly(Vinyl Alcohol) and Poly(Amidoamine) Dendrimers Bearing 4-Carboxyphenylboronic Acid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 POLYMERS	6. 最初と最後の頁 1854
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/polym12081854	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 Shigehiro Takahashi, Katsuhiko Sato, Riho Umeda, Misaki Nishizawa, Toshio Kamiyo, Takashi Morinaga, Iwao Suzuki, Takaya Sato	4. 巻 32
2. 論文標題 Enhancement of Hydrogen Peroxide Reduction Current by an Electrode Modified with Hybrid Polymer/Silica Particles and N,N-diethyl-N-(2-methoxy-ethyl)-N-methylammonium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ELECTROANALYSIS	6. 最初と最後の頁 2113-2117
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/elan.202060018	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 Ryo Satoh, Saika Honma, Hiroyuki Arafune, Ryo Shomura, Toshio Kamiyo, Takashi Morinaga and Takaya Sato	4. 巻 13
2. 論文標題 In Situ Surface-Initiated Atom-Transfer Radical Polymerization Utilizing the Nonvolatile Nature of Ionic Liquids: A First Attempt	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 61
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/polym13010061	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 Katsuhiko Sato , Fumiya Sato , Masakuki Kumano , Toshio Kamijo , Takaya Sato , Yuanshu Zhou , Yuri Korchev , Takeshi Fukuma , Tsutomu Fujimura , Yasufumi Takahashi	4. 巻 33
2. 論文標題 Electrochemical Quantitative Evaluation of the Surface Charge of a Poly(1 vinylimidazole) Multilayer Film and Application to Nanopore pH Sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electroanalysis	6. 最初と最後の頁 1633-1638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/elan.202100041	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 Ryo Shomura, Keita Sakakibara, Shoko Marukane, Kimiyo Nakamichi, Takashi Morinaga, Yoshinobu Tsujii, and Takaya Sato	4. 巻 94
2. 論文標題 Novel Use of a Pyridinium Salt to Form a Solid Electrolyte Interphase (SEI) on High Voltage Lithium-Excess Layered Positive Active Material	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bull. Chem. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 1594-1601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20200329	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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Hiroyuki ARAFUNE, Kazuma KOMTASU, Kyohei SHINTATE, Saika HONMA, Takashi MORINAGA, Toshio KAMIJO, Takaya SATO
2. 発表標題 Surface properties of polymer brushes formed on a silicone rubber by surface segregation
3. 学会等名 IUMRS-ICYRAM2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒船 博之, 小松 知真, 新館 京平, 本間 彩夏, 森永 隆志, 上條 利夫, 佐藤 貴哉
2. 発表標題 Analysis of formation dynamics and lubrication properties of polymer brushes formed by surface segregation
3. 学会等名 MRS-J 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒船 博之, 小松 知真, 新館 京平, 上條 利夫, 森永 隆志, 本間 彩夏, 佐藤 貴哉
2. 発表標題 表面偏析によるシリコンゴム上へのポリマーブラシ形成とその潤滑特性
3. 学会等名 日本機械学会第58期秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Arafune, Toshio Kamijo, Saika Honma, Takashi Morinaga and Takaya Sato
2. 発表標題 Soft & Resilient Tribo-materials (SRT materials) and their lubrication properties
3. 学会等名 化学系学協会東北大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Satoh, M. Konno, S. Honma, T. Morinaga, T. Kamijo, and T. Sato
2. 発表標題 Development of Biomass-based Plastics with Biodegradability and Thermoplasticity
3. 学会等名 14th International Symposium on Advances in Technology Education (ISATE 2021) in Finland (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上條 利夫, 荒船 博之, 本間 彩夏, 佐藤 涼, 森永 隆志, 佐藤 貴哉
2. 発表標題 Development of a super low friction sliding system based on ionic liquid type polymer brushes combined with molecularly smooth surface materials
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒船 博之, 上條 利夫, 森永 隆志, 渡会 祐馬, 土田 悠斗, 佐藤 貴哉
2. 発表標題 Characterization of mechanical and tribological properties of double network ion gels
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森永 隆志, 前田 奈央也, 本間 彩夏, 正村 亮, 佐藤 涼, 佐藤 貴哉
2. 発表標題 Synthesis and Characterization of Ionic Liquid-type Polyanions Containing Mobile Cations for Polymer Electrolyte
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Toshio Kamijo, Hiroyuki Arafune, Takashi Morinaga and Takaya Sato	4. 発行年 2022年
2. 出版社 IntechOpen Limited-Development of Low-Friction Ion Gels for Industrial Applications-	5. 総ページ数 -
3. 書名 Industrial Applications of Ionic Liquids	

〔産業財産権〕

〔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
研究 分担者	上條 利夫 (Kamijo Toshio) (00588337)	鶴岡工業高等専門学校・その他部局等・教授 (51501)	

6. 研究組織（つづき）

	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	荒船 博之 (Arafune Hiroyuki) (90707811)	鶴岡工業高等専門学校・その他部局等・准教授 (51501)	

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