

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H02027

研究課題名(和文)ゲル弾性におけるエネルギー弾性の寄与の解明

研究課題名(英文)Contribution of Energy Elasticity in Gel Elasticity

研究代表者

酒井 崇匡 (Sakai, Takamasa)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：70456151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：ゲルは、ゼリー、豆腐などの食品や、ソフトコンタクトレンズ、止血剤など医療に活用される、ウェットでやわらかい物質である。本研究では、ゲルのやわらかさが熱力学第二法則(エントロピー増大の法則)に基づくエントロピー弾性でおおむね説明できるという100年近く信じられてきた定説を覆し、ゲルは大きな負のエネルギー弾性を持つことを示した。その結果を元に、負のエネルギー弾性は、ゲルの本質である溶媒と高分子の共存に由来していることを示し、ゲル弾性はゴム弾性とは異な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

高分子網目の示す弾性率と温度の関係性については、ゴム弾性においてはエネルギー項の割合が小さく、その起源はエントロピー弾性であると結論付けられた。これ以降、全ての理論モデルはエネルギー項を無視し、エントロピー項のみに着目をして構築されてきた。高分子ゲルに関しても、ゴム弾性の理論がそのまま適用された。本研究は、これまでに疑われることのなかった領域にメスを入れる研究であり、ゲルとゴムの本質的な違いを明らかにし、ゲルを独立な物質として再定義する学術的に意義のある研究である。本研究により、高分子ゲルの弾性について理解が深まったことで、新しい高分子ゲル材料の設計指針が得られる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Gels are wet and soft substances used in foods such as jelly and tofu, and in medicine such as soft contact lenses and hemostatic agents. In this study, we have shown that gels have a large negative energy elasticity, overturning the commonly held belief for nearly 100 years that the softness of gels can be largely explained by entropy elasticity based on the second law of thermodynamics (law of increasing entropy). Based on the results, we have revealed that the negative energy elasticity originates from the coexistence of solvent and polymer, which is the essence of gel, and that gel elasticity is different from rubber elasticity.

研究分野：高分子物理、バイオマテリアル

キーワード：ハイドロゲル エントロピー弾性 負のエネルギー弾性 ゴム弾性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高分子ゲルは、高分子の三次元網目が最大で 99% 以上の溶媒を含んで膨潤した物質である。溶媒として水を用いたものは高分子ヒドロゲルと呼ばれ、生体組織類似の組成に由来した生体適合性を持つ。そのバイオマテリアルとしての応用例はソフトコンタクトレンズ (SCL) であり、近年では、細胞足場材料や組織代替材料など広く応用研究がなされている。しかしながら一方で、現在においても SCL と同等に普及しているヒドロゲル製のバイオマテリアルは存在しない。つまり、SCL が開発された 1970 年代から SCL を超えるキラーアプリケーションが開発されていないと言い換えることもできる。

申請者は、その理由が高分子ゲルの材料としての理解が十分ではなく、実用において求められる多くの特性を同時に満たすことが困難であるためであると考えた。ヒドロゲルをバイオマテリアルとして用いる場合には、ゲル化や、力学特性、薬物放出特性、分解特性などを適切に制御する必要があり、その同時・独立制御は困難を極める。実際に、申請者が研究を始めた当時、ゲルの骨格である三次元高分子網目は本質的に不均一であることが知られており、構造の精密制御や構造・物性相関の理解は未だなされていなかった。

### 2. 研究の目的

これまでに、申請者は、均一な高分子ゲルを目指し、四分岐のポリエチレングリコールから高分子ヒドロゲル (TetraPEG ゲル) を開発した。これまでの研究により、TetraPEG ゲルは、均一で制御された高分子網目を持つことや、その構造・物性相関が分子論的モデルによって記述されることが明らかになりつつある。また、得られた知見を生かして、実用に向けたいくつかの新しいゲルも開発している。なかでも、Oligo-TetraPEG ゲルは人工硝子体としての実用化に向け、眼科医、企業と共同で研究を進めているところである。

しかしながら、最近のプレリミナリーな実験により、これまでに解析の基礎としてきた高分子ゲルのセントラルドグマとも言える「エントロピー弾性」を覆す結果が得られた。一般に、高分子鎖は、主鎖原子間の結合距離や結合角を変えずに、結合の立体配座を変えるだけで、変形することが可能である。すなわち、変形の際には、結合距離や結合角に由来するエネルギー変化は小さく、立体配座の場合の数に由来するエントロピー変化が大きいと考えられる。これが、高分子ゲルやエラストマーなどの高分子網目からなる材料が軟らかく、よく伸びる要因である。この弾性様式はエントロピー弾性と呼ばれ、弾性率 ( $G$ ) と温度 ( $T$ ) の正比例関係 ( $G \sim T$ ) を予測する。しかしながら、我々の最近の実験により、TetraPEG ゲルの  $G$  と  $T$  は正比例関係になく、正比例からのずれは高分子濃度が低いときに顕著であることが示された (図 2)。これらの結果は、溶媒による希釈がエネルギー弾性を増大させていることを強く示唆している。溶媒による希釈は、高分子ゲルの本質であるために、古典的な「ゴム弾性」と「ゲル弾性」は本質的に異なる可能性がある。すなわち、本課題の核心をなす学問的問いは、「ゲル弾性の本質は何か？」である。

### 3. 研究の方法

応力に占めるエントロピーとエネルギーの寄与は、応力の温度依存性を測定することにより分離することが可能である。すなわち、ある一定の歪みを加えた状態で、温度を変化させた際の応力の変化を測定すれば、両者を分離できる。本課題では、微小変形領域と大変形領域の 2 領域に分けて実験を行い、それぞれに対して、エントロピー弾性とエネルギー弾性を評価した。微小変形領域については共軸二重円筒を用いて、大変形領域については巻き取り型のジグを用いて、い

ずれも歪み制御型レオメーター（Anton Paar 社製）を用いて測定を行った。サンプルとしては、TetraPEG ゲルを用いて系統的な実験を行うと同時に、ラジカル重合や末端架橋法により得られる他のゲルに対しても実験を行い、可能な限り一般的な理解が得られるよう努めた。

#### A. 初期網目濃度・架橋点間分子量・結合率の影響

初期網目濃度・架橋点間分子量・結合率は、それぞれ反応に用いるプレポリマーの濃度・分子量・混合比率により独立に制御可能である。プレポリマー濃度を 1-12w%程度、分子量を 5k、10k、20k、40k g/mol の範囲で変化させた。また、反応に用いる 2 種のプレポリマーを非化学両論比で混合することにより、結合率を変化させた。混合比率と紫外分光光度計(UV)によって測定した反応率より、結合率を算出した。プレポリマーの濃度・分子量・結合率から、樹状構造理論を用いて、有効網目密度、架橋密度などを求め、これらのパラメーターを系統的に変化させ、モデルを用いて弾性率や応力-延伸曲線予測し、実測された弾性率や応力-延伸曲線との比較を行った。

#### B. 主鎖と溶媒の相互作用の影響

Tetra-PEG ゲルは通常、水を溶媒としたヒドロゲルであるが、その溶媒をより親溶媒なアセトニトリルに変えることで、高分子鎖は伸びたコンフォメーションをとる。逆に、溶媒をより貧溶媒なエタノールに変えることで、高分子鎖は縮んだコンフォメーションをとる。ゲルを作製する溶媒を変化させることで、溶液中における高分子のコンフォメーションの変化が、エントロピー弾性とエネルギー弾性に及ぼす影響を調べた。

#### C. 作製後の膨潤・収縮の影響

高分子ゲルの物性は作製時の濃度だけでなく、作製後の濃度変化によっても変化する。作製後の濃度変化は、高分子濃度を変化させるだけでなく、膨潤・収縮により網目に変形を加えるという副次的な効果も与えることが知られている。

作製後、膨潤・収縮させた Tetra-PEG ゲルを用いることにより、初期濃度と最終濃度が及ぼす影響について調べる。また、ここでは、溶媒として水だけでなく、イオン液体 (BmimBF<sub>4</sub>) を用いることにより、溶媒の蒸発の効果を除いて、高温下での実験を行った。水の場合には、ゲルを様々な濃度の PEG 水溶液に浸すことにより、浸透圧差を利用して、ゲルの膨潤・収縮を制御した。イオン液体の場合には、アセトンとイオン液体を任意の割合で混合した溶媒中でゲルを膨潤させ、その後アセトンのみを蒸発させることにより、膨潤・収縮させた。

#### D. ゲル化反応機構の影響

A~C によって、末端反応によって得られる PEG を主鎖とする高分子ゲルについてある程度の理解が得られると予想する。ここでは、さらに PEG 以外の主鎖を持つゲルや、別の作製方法（ラジカル反応）で作製したゲルについて調査し、同様に理解できるかどうかについて検討した。具体的には、アクリルアミドのラジカル重合により直接得られたゲルと、アクリルアミドの RAFT 重合により両末端に官能基を持つポリアクリルアミドを合成した後、末端架橋により得られたゲルを比較した。これらの結果を、TetraPEG ゲルの結果と比較し、ゲル化反応機構の影響や主鎖を変えたことによる影響について調査した。

## 4. 研究成果

ゲルは、ゼリー、豆腐などの食品や、ソフトコンタクトレンズ、止血剤など医療に活用される、ウェットでやわらかい物質であり、ゲルから水を蒸発させたものがゴムである。ゲルとゴムのやわらかさは熱力学第二法則(エントロピー増大の法則)に基づくエントロピー弾性でおおむね説明できるというのが、100年近く信じられてきた定説であった。それは、同様に三次元網目状の高分子からなるゴムに対する一連の研究によって、エントロピー弾性がゴムの弾性を記述できたと言う実験に基づく。すなわち、ゲルの弾性はゴムの弾性と類似であり、どちらもエントロピー弾性で記述できると言うのが一般的な理解とされてきた。

しかしながら、我々は、汎用的な高分子であるポリエチレングリコール(PEG)と水からなるゲルにおいて、 $G$  と  $T$  は正比例関係になく、正比例からのずれは高分子濃度が低いときに顕著であることを明らかにした。また、見かけ上弾性が消失する温度(消失温度)が存在し、消失温度は高分子濃度の低下に伴い高温側にシフトすることが明らかになった。一方で、濃厚な極限においては、消失温度は絶対零度に漸近し、純エントロピー弾性的に振る舞うことが示された。これらの結果は、溶媒による希釈がゲルにおけるエネルギー弾性の起源であることを強く示唆している。

さらに、系統的に構造の異なるゲルを調整し、詳細な実験を行うことで、従来の仮説を覆し、ゲルは大きな負のエネルギー弾性を持つことを示した。その結果を元に、高分子ゲルの弾性を熱力学に立ち戻って理解した。その結果、負のエネルギー弾性は、ゲルの本質である溶媒と高分子の共存に由来していることを示した。すなわち、ゲル弾性はゴム弾性とは異なり、ゲルだけが持つユニークな特性であることを明らかにした。一連の成果を、学会などで発表するとともに、論文として出版した。そのうちでも代表的なものは、2021年に *Physical Review X* に発表された論文であり、各種メディアでも紹介された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Takeshi Fujiyabu, Yuki Yoshikawa, Ung-il Chung, Takamasa Sakai	4. 巻 20
2. 論文標題 Structure-property relationship of a model network containing solvent	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science and Technology of Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 608-621
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/14686996.2019.1618685	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 Takeshi Fujiyabu, Yuki Yoshikawa, Junhyuk Kim, Naoyuki Sakumichi, Ung-il Chung, Takamasa Sakai	4. 巻 52
2. 論文標題 Shear Modulus Dependence of the Diffusion Coefficient of a Polymer Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 9613-9619
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.macromol.9b01654	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 Yuki Yoshikawa, Naoyuki Sakumichi, Ung-il Chung, and Takamasa Sakai	4. 巻 15
2. 論文標題 Connectivity dependence of gelation and elasticity in AB-type polymerization: An experimental comparison of dynamic process and stoichiometrically imbalanced mixing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 5017-5025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/C9SM00696F	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 Takuya Katashima, Ung-il Chung, Takamasa Sakai	4. 巻 51
2. 論文標題 Mechanical properties of doubly crosslinked gels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 851-859
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41428-019-0203-6	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 Takuya Katashima, Hayato Sakurai, Ung-il Chung, Takamasa Sakai	4. 巻 47
2. 論文標題 Dilution Effect on the Cluster Growth near the Gelation Threshold	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 NIHON REOROJI GAKKAISHI	6. 最初と最後の頁 61-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.47.61	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 酒井崇匡、藤敷岳志	4. 巻 34
2. 論文標題 生体内における膨潤挙動が制御可能なインジェクタブルハイドロゲル	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Drug Delivery System	6. 最初と最後の頁 186-200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2745/dds.34.186	査読の有無 無
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 Yuki Yoshikawa, Naoyuki Sakumichi, Ung-il Chung, and Takamasa Sakai	4. 巻 11
2. 論文標題 Negative energy elasticity in a rubber-like gel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 11045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.11.011045	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 Youngjae Ryu, Takahiro Maekawa, DaisukeYoshino, Naoyoshi Sakitani, Atsushi Takashima, Takenobu Inoue, Jun Suzurikawa, Jun Toyohara, Tetsuro Tago, Michiru Makuuchi, Naoki Fujita, Keisuke Sawada, Shuhei Murase, Masashi Watanave, Hirokazu Hirai, Takamasa Sakai, Yuki Yoshikawa, Toru Ogata, Yasuhiro Sawada	4. 巻 23
2. 論文標題 Mechanical Regulation Underlies Effects of Exercise on Serotonin-Induced Signaling in the Prefrontal Cortex Neurons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 iScience	6. 最初と最後の頁 100874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isci.2020.100874	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 Ikuo Fujinaga, Takashi Yasuda, Makoto Asai, Ung-il Chung, Takuya Katashima, Takamasa Sakai	4. 巻 52
2. 論文標題 Cluster growth from a dilute system in a percolation process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 289-297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-019-0279-z	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 Hayato Mizuno, Eiki Tan, Yasutaka Anraku, Takamasa Sakai, Ichiro Sakuma, Yuki Akagi	4. 巻 36
2. 論文標題 Relationship between Bulk Physicochemical Properties and Surface Wettability of Hydrogels with Homogeneous Network Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 5554-5562
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.0c00694	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 T. Katashima, U. Chung, T. Sakai	4. 巻 -
2. 論文標題 Mechanical properties of Doubly Crosslinked Gels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymer Journal	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 T. Katashima, H. Sakurai, U. Chung, T. Sakai	4. 巻 -
2. 論文標題 Dilution effect on the cluster growth near the gelation threshold	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi	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37件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 酒井 崇匡
2. 発表標題 構造明確な高分子ゲルのゲル化過程と力学特性の解明に関する研究
3. 学会等名 日本レオロジー学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井 崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルの精密設計とその医用応用
3. 学会等名 バイオ・マイクロナノテク研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井 崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルの精密設計とその医用応用
3. 学会等名 化学・材料インキュベーション研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takamasa Sakai
2. 発表標題 Anomalous expansion of clusters in percolation process in diluted system
3. 学会等名 ISAGMSM（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Takamasa Sakai
2. 発表標題 Anomalous expansion of clusters in percolation process in diluted system
3. 学会等名 MechanoChemBio 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takamasa Sakai
2. 発表標題 Hydrogel Science for biomedical applications
3. 学会等名 National Polymer Congress of Chana (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takamasa Sakai
2. 発表標題 Cluster growth in percolation process from diluted system
3. 学会等名 PPC2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 作道直幸、安田傑、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルの浸透圧における普遍的状态方程式
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会：領域12
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 作道直幸、吉川祐紀、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルにおける負のエネルギー弾性
3. 学会等名 2019年度高分子基礎物性研究会・高分子計算機科学研究会合同討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 作道直幸、吉川祐紀、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲル弾性の普遍的熱力学関数
3. 学会等名 第9回ソフトマター研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 樹木近似によるAB型重縮合の理論解析: ゲル化条件と構造パラメータ
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 作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 AB型重縮合におけるゲル化条件と構造パラメータ
3. 学会等名 日本ゴム協会2019年年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤敷岳志、金俊赫、吉川祐紀、鄭雄一、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子網目の協同拡散現象に及ぼす弾性圧の影響
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 藤敷岳志、金俊赫、吉川祐紀、鄭雄一、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子網目の協同拡散現象に及ぼす弾性圧の影響
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 藤敷岳志、金俊赫、吉川祐紀、作道直幸、鄭雄一、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子網目の協同拡散現象に及ぼす弾性率の影響
3. 学会等名 第67回レオロジー討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤敷岳志、吉川祐紀、金俊赫、作道直幸、鄭雄一、酒井崇匡
2. 発表標題 動的光散乱法により測定した高分子網目の拡散係数の弾性率依存性
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 藤藪岳志、吉川祐紀、金俊赫、作道直幸、鄭雄一、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子網目の協同拡散係数のせん断弾性率依存性
3. 学会等名 第31回高分子ゲル研究討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金俊赫、藤藪岳志、鄭雄一、酒井崇匡
2. 発表標題 作製状態と平衡膨潤状態における高分子網目の協同拡散現象の比較
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 金俊赫、藤藪岳志、鄭雄一、酒井崇匡
2. 発表標題 膨潤方程式に基づく高分子網目の協同拡散現象の本質的理解
3. 学会等名 第67回レオロジー討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川 祐紀、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 AB型重合によるゲル化過程に及ぼす結合率の影響と平均場近似の適用可能性
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 吉川 祐紀、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 理想網目構造を持つ高分子ゲルを用いたゴム弾性の熱力学的解析
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会：領域12
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川 祐紀、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 溶媒を含むゴムにおける負のエネルギー弾性
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会：領域11
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川 祐紀、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルにおける負のエネルギー弾性
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 吉川 祐紀、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルにおける負のエネルギー弾性
3. 学会等名 第67回レオロジー討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川 祐紀、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 溶媒を含むゴムにおける負のエネルギー弾性
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 吉川 祐紀、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルにおける負のエネルギー弾性
3. 学会等名 第31回 高分子ゲル研究討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉川 祐紀、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルのエネルギー弾性を支配する普遍関数
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会：領域12
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野将英、鄭雄一、酒井崇匡
2. 発表標題 少量の固定電荷を有するゲルの膨潤挙動の解析
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 佐野将英、酒井崇匡
2. 発表標題 希薄な固定電荷を有するゲルの膨潤挙動の系統的解析
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 石原岳、片島拓弥、内藤瑞、宮田完次郎、鄭雄一、酒井崇匡
2. 発表標題 クロスリンクカップリング反応によって得られる一時網目の線形粘弾性
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 Jian Tang, C. I. Gupit, Xiang Li, Takuya Katashima, Takamasa Sakai
2. 発表標題 Swelling behaviors of polyelectrolyte gel based on Tetra-arm homopolymers
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 Takamasa Sakai
2. 発表標題 Instantly formative hydrogels with super-low polymeric component
3. 学会等名 2018 Material Research Society Spring Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takamasa Sakai
2. 発表標題 Instantly formative hydrogels with super-low polymeric component
3. 学会等名 SPSI-MACRO-2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takamasa Sakai
2. 発表標題 Design of hydrogels for biomedical applications
3. 学会等名 The 12th SPSJ International Polymer Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Yoshikawa, Takamasa Sakai
2. 発表標題 Thermodynamic analysis of polymer gel elasticity
3. 学会等名 The 12th SPSJ International Polymer Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Yoshikawa, Takamasa Sakai
2. 発表標題 Thermodynamic analysis of polymer gel elasticity
3. 学会等名 First International Conference on 4D Materials and Systems "Gel Symposium 2018",
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 酒井崇匡
2. 発表標題 精密な網目構造を持つ高分子ゲルの構造・物性相関
3. 学会等名 第68回ネットワークポリマー公演討論会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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	片島 拓弥 (Katashima Takuya)  (20759188)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任研究員  (12601)	
研究分担者	赤木 友紀 (Akagi Yuki)  (40782751)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・講師  (12601)	

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
---------	---------