

令和 4 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14672

研究課題名（和文）ソフトマターの亀裂進展における速度ジャンプのメカニズムの解明

研究課題名（英文）Mechanism of velocity jump of crack propagation in various soft matters

研究代表者

作道 直幸（Sakumichi, Naoyuki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任講師

研究者番号：50635555

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ソフトマターの破壊において、亀裂進展の速度が急激に高速化する相転移現象「速度ジャンプ」の物理を調査した。様々な合成ゴムを用いた実験および連続体力学に基づく数値シミュレーションによって、ゴムにおける速度ジャンプは「亀裂先端部の動的なガラス化」により発生するという仮説の妥当性を実証した。また、本研究を粘弾性シートにおける亀裂進展の問題に一般化し、化学架橋された高分子ゲルや再生医療に用いられる細胞シートにおける亀裂進展の物理を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

速度ジャンプは、ゴム、ゲル、樹脂、多孔質材料、生体細胞、地震など、多くのソフトマターで起こる普遍的な現象である。本研究により、ゴムにおいて速度ジャンプが起こるための最小限の要件が明らかになり、ゴム以外の材料における亀裂進展の物理の理解も進んだ。従来の破壊力学は、ハードマターを主な対象としてきたが、本研究はソフトマターを対象とする新しい破壊力学の構築につながる。

研究成果の概要（英文）：We investigated the physics of velocity jumps, i.e., the propagation velocity changes abruptly in a narrow range of the applied load, in the fracture of soft matters. Experiments using various synthetic rubbers and numerical simulations based on continuum mechanics demonstrated the validity of the hypothesis that the velocity jump in rubbers is caused by dynamic glass transition at the crack tip. We also generalized this study to the problem of crack propagation in various viscoelastic sheets and clarified the physics of crack propagation in chemically cross-linked polymer gels and cell sheets used in regenerative medicine.

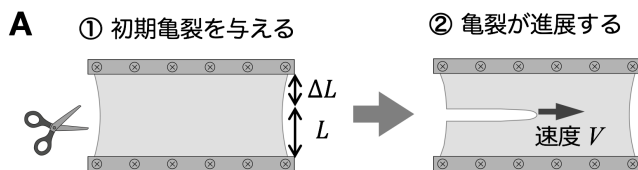
研究分野：高分子物理学

キーワード：亀裂進展速度ジャンプ 破壊力学 可解モデル

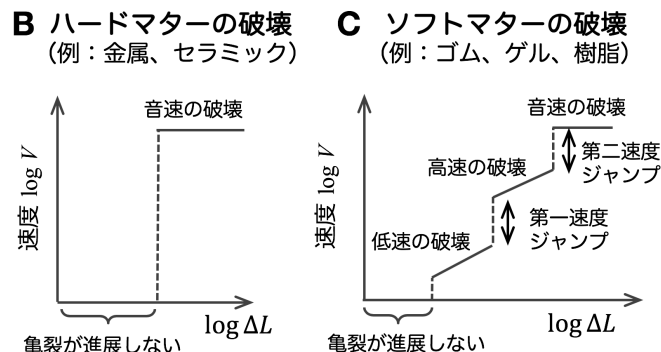
## 1. 研究開始当初の背景

スーパーのポリ袋を破ってみる。このとき、初めはゆっくりと亀裂（破れ）が広がるが、あるところで一気に裂けて全体が破れる。これは、亀裂進展（破壊）速度が低速から高速へと一気に切り替わる相転移とみなすことができ、「速度ジャンプ」と呼ばれる。

速度ジャンプを定量的に調べるには、右図Aのような実験を行う。自然長  $L$  のサンプルシートを  $\Delta L$  引っ張って固定し、初期亀裂を与えて亀裂が進展していくときに、 $\Delta L$  と亀裂進展の速度  $V$  の関係を調べる。

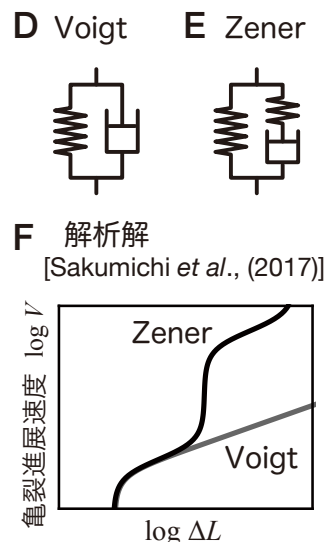


このような実験を行うと、従来の破壊力学が対象としてきたハードマター（金属、セラミックなど）では、上図Bのようになる。つまり、ある  $\Delta L$  以上で系が不安定化し、亀裂進展の速度は一気に上限である音速（横波弾性波速度）付近まで加速する。そのため、従来の破壊力学では、そのため、従来の破壊力学では、亀裂が進展するかどうかの境目（上図Bの縦の点線）の解析が主眼であった。



ところが、ゴムなどのソフトマターで同じ実験を行うと、結果は上図Cのようになる。つまり、ハードマターでは見られない、1mm/sec 未満の安定的な「低速破壊」と 103~104mm/sec の安定的な「高速破壊」が新しく出現し、それらの間を隔てる最大二つの「速度ジャンプ」が現れる。ゴムの速度ジャンプは1950年代に発見され [Greensmith, J. Polym. Sci. **21**, 175 (1956)]、条件によっては速度ジャンプが二段階で起こること（図C）が、最近報告された [Morishita et al. Polymer **108**, 230 (2017)]。

速度ジャンプは物理として面白いだけでなく、その臨界値を大きくすることが耐久性・耐摩耗性の向上したゴム材料の開発につながる工業的にも重要な問題として知られている。しかし、速度ジャンプの物理的起源は明らかにされておらず、臨界値を大きくする方法も経験則でしかない。そこで、我々は、速度ジャンプを物理的に理解するために、速度ジャンプを起こすシンプルな理論モデルの構築を試みた。結果として、速度ジャンプを起こす厳密に解ける理論モデルの構築に成功した [N. Sakumichi et al., Sci. Rep. **7**, 8065 (2017)]。このモデルは、材料シートを格子化して、格子の頂点と頂点を結ぶ辺の部分に粘弾性模型を置いたものである。粘弾性模型として最も単純な Voigt 要素（右図D）を考えると速度ジャンプは起きず、これにもう一本のバネを加えた三要素 Zener 要素（右図E）では、右図Fのようにジャンプを示す。我々はこのモデルに基づいて、ゴムの速度ジャンプの起源が亀裂先端のガラス転移であることを明らかにした。さらに、速度ジャンプの臨界値を求めることでゴム材料のタフ化への指針を与えた。



## 2. 研究の目的

本研究野目的は、ソフトマターの破壊における「速度ジャンプ」の物理の解明である。速度ジャンプは、ゴム、ゲル、樹脂、多孔質材料、生体細胞、地震など、多くのソフトマターで起こる普遍的な現象であるが、その原理は未解明である。上記で説明した通り、我々は最近、速度ジャンプを起こすシンプルな可解モデルの構築に成功し、数学的な解析解に基づいて、ゴムにおいて速度ジャンプが起こるための最小限の要件を明らかにした。本研究では、この可解モデルを拡張・改良することにより、化学架橋された高分子ゲルなどのゴム以外の物質や様々な破壊モードも含めて速度ジャンプを系統的に解析し、実験や数値計算と比較することで物理を解明する。

### 3. 研究の方法

本研究では、研究開始当初の背景で述べた我々の構築した可解モデルを拡張・改良することにより、化学架橋された高分子ゲルなどのゴム以外の物質や様々な破壊モードも含めて速度ジャンプを系統的に解析し、実験や数値計算と比較することで物理を調査した。特に高分子ゲルについては、均一で制御可能な網目構造を持つ「テトラゲル」における亀裂進展の実験を実施することで、網目構造と亀裂進展挙動の関係を調査した。この実験研究を進める上で、高分子ゲルそのものの基本的な物性である弾性率、浸透圧、拡散係数などもあわせて調査し、亀裂伸展開始時のエネルギー開放率（破断強度）も調査した。

### 4. 研究成果

#### (1) ゴムの亀裂進展における速度ジャンプのメカニズムの解明

研究開始当初の背景で述べた通り、我々はゴムにおける速度ジャンプの起源が「亀裂先端部の動的なガラス転移」であることを理論的に予測していた。今回、フィラー（ゴムを補強するためのカーボンブラックやシリカなどの混ぜ物）無しの合成ゴムを用いた系統的な実験によりこの仮説の妥当性が検証された。また、理論モデルにおける大幅な単純化が、連続体力学に基づく有限要素法(FEM)のモデルにおける結果との整合性により正当化できることもわかった。本研究結果は、ゴム以外のゲルや樹脂など、様々な粘弾性固体において速度ジャンプが生じることを示唆しており、高分子材料のような粘弾性固体全般の耐久性向上につながる可能性がある。以上の研究成果について、米国物理学会の学術誌から原著論文を公表し[1]、本成果を中心とした最近の亀裂進展速度ジャンプの研究に関して、招待総説[2]および書籍の一節[3]を単著で執筆した。本成果についてプレスリリースを実施し、AAAS（米国学術誌 Science の発行元）の EurekAlert! など国際的な科学ニュースサイト等で広く紹介された。また、本成果に関して、2022年5月に一般社団法人日本ゴム協会から「第13回ブリヂストンソフトマテリアルフロンティア賞」を受賞した。国際会議[4]や国内会議において多数の招待講演を行った。

- [1] A. Kubo, N. Sakumichi (共同筆頭著者), et al, “Dynamic glass transition dramatically accelerates crack propagation in rubberlike solids”, *Physical Review Materials* **5**, 073608 (2021). (査読有)
- [2] N. Sakumichi, “Velocity jump of crack propagation in viscoelastic solids”, *J. Soc. Rheol. Jpn.* **50**, 99 (2022). (査読有, 招待有)
- [3] 作道直幸, 『ゴム材料の速度ジャンプ機構と耐久性、耐摩耗性向上』 書籍「高分子材料のトライボロジー制御」、株式会社技術情報協会（2020年1月発刊）、第1章、第8節（招待有）
- [4] N. Sakumichi, “Velocity jump of crack propagation in rubber-like materials”, A virtual IUTAM symposium, *Mechanics of Smart and Tough Gels*, オンライン開催（米国テキサスで開催予定が変更）、（2021年5月29日）. (招待有)

#### (2) 均一な網目構造を持つ高分子ゲルにおける亀裂進展の研究

高分子ゲルは、ゼリーなどの食品や、ソフトコンタクトレンズ・紙オムツの吸湿剤などの医用材料として、我々の生活に欠かせないソフトマターである。高分子ゲルの亀裂進展の課題の一部であった、三分岐と四分岐の網目構造を持つ高分子ゲルの破壊挙動の違いに関する研究成果について、原著論文を *Science Advance* 誌に発表した[5]。この成果についてプレスリリースを実施し、webメディア等で広く紹介された。特に、テレビ東京の「テレ東BIZ」で研究成果が取り上げられ、Youtubeで5万回以上再生された[6]。

高分子ゲルの亀裂進展挙動について、偏光高速度カメラを用いた破壊挙動解析を行い、網目の均一性が極めて高い高分子ゲルにおいては、線形弾性破壊力学の予測と非常に良くあう理想的な破壊挙動を見ることがわかった。結果は、日本物理学会等で発表した。今後、原著論文を執筆予定である。

- [5] T. Fujiyabu, N. Sakumichi, T. Katashima, C. Liu, K. Mayumi, U. Chung, and T. Sakai\*, “Tri-branched gels: Rubbery materials with the lowest branching factor approach the ideal elastic limit”, *Science Advances* **8**, eabk0010 (2022). (査読有)
- [6] 「もはや測定不能 30倍以上伸びるゲルを開発 東大の研究チーム」テレビ東京、テレ東BIZ 【橋本幸治の理系通信】 2022年4月14日

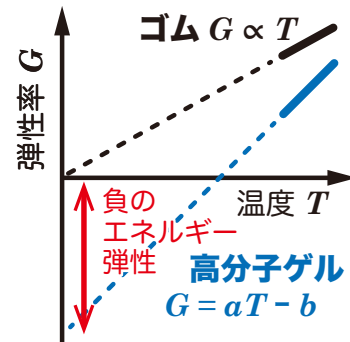
### (3) ゴム・高分子ゲル以外の亀裂進展に関する研究

再生医療に用いられる細胞シートにおける亀裂進展 [A. R. Harris et al., PNAS 109, 16449 (2012)] について、我々の構築した理論モデル [N. Sakumichi et al., Sci. Rep. 7, 8065 (2017)] を拡張した理論研究を他大学と共同で行った。結果について原著論文を執筆中である。粘着テープの剥離と粘弾性体の亀裂進展速度における速度ジャンプの関連を示唆する結果を得た。結果の一部は、高分子学会が主催する招待講演にて発表した。

また、(1)~(3)に述べたソフトマター以外の亀裂進展について現状と展望を招待総説 [2] で解説した。

### (4) 高分子ゲルにおける「負のエネルギー弾性」の発見

鎖状高分子の三次元網目構造からなるソフトマターの内、大量の溶媒を含むものがゲル、含まないものがゴムである。ゲルとゴムの弾性率（かたさ、やわらかさ）は、高分子鎖の熱ゆらぎに由来する「エントロピー弾性」で概ね説明できると長年信じられてきた。我々はゲルにおいてこの長年の定説が誤りであることを発見した [7]。ゲルに外力を加えて変形すると、元の形に戻ろうとするエントロピー弾性  $GS=aT$  と同時に、それと反対向きの「負のエネルギー弾性」 $GE=-b$  が生じて、この合計  $G=GS+GE$  でゲルの弾性率が決まる。負のエネルギー弾性  $GE=-b$  の絶対値  $b$  は、最大で  $G$  の約2倍という非常に大きな効果を持つ。負のエネルギー弾性は、これまでのゴム弾性の知見とも整合的である。なぜなら、ゲルの含む溶媒を減らす（ゴムに近づけると、 $GE$  はゼロに近づくからである。逆に言えば、溶媒に由来する「負のエネルギー弾性」が、ゴム弾性とゲル弾性の本質的な違いを与えることが明らかとなった。



本研究成果は、東京大学工学部、公式ホームページのトップページ最上段「Spotlights」に応募者の名前入りで取り上げられた（2021年3月）。また、多数のメディアに紹介され、高分子学会で招待講演も行った。その一環で依頼により、一般市民向けの解説記事を執筆した [8]。

さらに、Nature Publishing Group の専門誌から招待を受け、負のエネルギー弾性の観点からゲルの弾性率の既往研究を整理した査読付き総説を筆頭著者として発表した [9]。加えて、ゲルの弾性率について Bethe 近似による計算と実験を比較した論文が、英国王立化学会 (RSC) の学術誌 Soft Matter のバックカバーに選ばれた [10]。さらに、高分子ゲルが溶媒中で膨潤する速度についても、負のエネルギー弾性と同様の法則が存在することを発見し、原著論文を出版した [11]。この成果についてもプレスリリースを実施し、web メディア等で広く紹介された。

- [7] Y. Yoshikawa, **N. Sakumichi** (共同筆頭著者、責任著者), U. Chung, and T. Sakai, “Negative energy elasticity in a rubberlike gel”, Physical Review X **11**, 011045 (2021). (査読有)
- [8] 吉川祐紀、**作道直幸**、酒井崇匡, 『ゲルのやわらかさを決める『負のエネルギー弾性』を発見!100年近く信じられた定説を覆す成果』, 雑誌「化学」、株式会社化学同人 (2021年7月号). (招待有)
- [9] **N. Sakumichi**, Yuki Yoshikawa, and Takamasa Sakai, “Linear elasticity of polymer gels in terms of negative energy elasticity”, Polymer Journal **53**, 1293 (2021) (査読有)
- [10] Y. Yoshikawa, **N. Sakumichi**, U. Chung, and T. Sakai, “Connectivity dependence of gelation and elasticity in AB-type polymerization: An experimental comparison of dynamic process and stoichiometrically imbalanced mixing”, Soft Matter **15**, 5017 (2019). (査読有)
- [11] T. Fujiyabu, T. Sakai, R. Kudo, Y. Yoshikawa, T. Katashima, U. Chung, and **N. Sakumichi**, “Temperature Dependence of Polymer Network Diffusion”, Physical Review Letters **127**, 237801 (2021). (査読有)

### (5) ゲル化過程における浸透圧の普遍法則の発見

良溶媒中の直鎖高分子溶液の浸透圧は、高分子鎖や溶媒の種類によらず、ある普遍関数  $f$  を用いて  $Z=f(n/n^*)$  となる。ここで、 $n/n^*$  は、高分子の数濃度  $n$  を重なり濃度  $n^*$  で規格化した無次元量であり、 $Z = \Pi/nk_B T$  は、浸透圧  $\Pi$  を、ボルツマン定数  $k_B$ 、絶対温度  $T$  で規格化した無次元量である。この普遍性の起源は、高分子鎖が非常に長く、隣接するモノマー間距離などのミクロなスケールが熱力学量に効かないためである。この事情は、スピン系 (イジング, XY, ハイ

ゼンベルグ模型)の臨界現象と同じであり、ドジャン博士(この成果によりノーベル物理学賞を受賞)によって高分子系はスピンの成分がゼロ極限に対応することが指摘された。特に、準希薄と呼ばれる領域( $n/n^* \gg 1$ )において、スケーリング則  $f(n/n^*) \sim (n/n^*)^{1/(3\nu-1)}$  を満たす。ここで、 $\nu \doteq 0.588$  は普遍的な臨界指数であり、 $1/(3\nu-1) \doteq 1.31$  である。

我々は、ゾル状態とゲル状態を含むゲル化過程の全領域について、直鎖高分子溶液の普遍的状態方程式  $Z=f(n/n^*)$  が、高分子ゲルやゲル化過程の浸透圧についてもよく成り立つことを発見した [12]。まず、四分岐の星状高分子(ポリエチレングリコール)溶液が普遍関数  $f$  とよく合うことを確認した。次に、同じ四分岐状高分子をプリカーサーとして末端結合性の AB 型重縮合によるゲル化過程およびゲル化後における浸透圧を測定した。ゲル化過程における浸透圧は、 $Z=f(c/c^*)$  を準希薄領域に向かって登って行き、ゲル化後の浸透圧は重なり合い濃度以上の準希薄領域となる。

今回、ゲル化過程の浸透圧の普遍法則が解明されたことにより、新規ゲル材料開発において、浸透圧に対応する保水力をコントロールするための材料設計指針が得られたことになる。これは、超高齢化社会で求められる新規医用材料の開発からトライアルアンドエラーを減らし、開発を促進することにつながる。本成果については依頼により日本物理学会誌および学術系 web メディア「Academist Journal」に解説記事を寄稿した [13, 14]。

その他、高分子ゲルの高分子網目の拡散係数に対する混合と弾性の効果を明らかにした成果が、英国王立化学会 (RSC) の学術誌 *Macromolecules* 誌に採択・出版され、雑誌の Supplementary Journal Cover に選ばれた [15]。

- [12] T. Yasuda, **N. Sakumichi** (共同筆頭著者、責任著者), U. Chung, and T. Sakai, “Universal equation of state describes osmotic pressure throughout gelation process”, *Physical Review Letters* **125**, 267801 (2020). (査読有)
- [13] **作道直幸**、酒井崇匡, 『ゲル化における浸透圧のユニバーサリティ』, 日本物理学会誌 (2022 年) in press. (招待有)
- [14] 安田傑、**作道直幸**、酒井崇匡, 『ゼリーとヨーグルトに共通の法則とは? - ゲルの浸透圧を数学的に表現する』, 学術系 Web メディア「Academist Journal」研究コラム (2021 年 5 月 11 日). (招待有) <https://academist-cf.com/journal/?p=15968>
- [15] J. Kim, T. Fujiyabu, **N. Sakumichi** (責任著者), T. Katashima, Y. Yoshikawa, U. Chung, and T. Sakai, “Mixing and Elastic Contributions to the Diffusion Coefficient of Polymer Networks”, *Macromolecules* **53**, 7717 (2020). (査読有)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Takeshi Fujiyabu, Naoyuki Sakumichi, Takuya Katashima, Chang Liu, Koichi Mayumi, Ung-il Chung, Takamasa Sakai	4. 巻 8
2. 論文標題 Tri-branched gels: Rubbery materials with the lowest branching factor approach the ideal elastic limit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabk0010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.abk0010	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, Takamasa Sakai, Ryota Kudo, Yuki Yoshikawa, Takuya Katashima, Ung-il Chung, Naoyuki Sakumichi	4. 巻 127
2. 論文標題 Temperature Dependence of Polymer Network Diffusion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 237801
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.127.237801	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 Atsushi Kubo, Naoyuki Sakumichi, Yoshihiro Morishita, Ko Okumura, Katsuhiko Tsunoda, Kenji Urayama, Yoshitaka Umeno	4. 巻 5
2. 論文標題 Dynamic glass transition dramatically accelerates crack propagation in rubberlike solids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 73608
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.5.073608	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 Naoyuki Sakumichi, Yuki Yoshikawa, and Takamasa Sakai	4. 巻 53
2. 論文標題 Linear elasticity of polymer gels in terms of negative energy elasticity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 1293-1303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41428-021-00529-4	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 Jian Tang, Takuya Katashima, Caidric Indaya Gupit, Xiang Li, Yoshiro Mitsukami, Yuki Yokoyama, Naoyuki Sakumichi, Ung-il Chung, Mitsuhiro Shibayama, Takamasa Sakai	4. 巻 250
2. 論文標題 Non-swellability of polyelectrolyte gel in divalent salt solution due to aggregation formation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 124894
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2022.124894	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 Naoyuki Sakumichi	4. 巻 50
2. 論文標題 Velocity jump of crack propagation in viscoelastic solids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi (J. Soc. Rheol. Jpn.)	6. 最初と最後の頁 99-105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.50.99	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 Nobu C. Shirai, Naoyuki Sakumichi	4. 巻 2202
2. 論文標題 Negative Energetic Elasticity of Lattice Polymer Chain in Solvent	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv:2202.12483	6. 最初と最後の頁 12483
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2202.12483	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 Shohei Ishikawa, Yasuhide Iwanaga, Takashi Uneyama, Xiang Li, Hironori Hojo, Ikuo Fujinaga, Takuya Katashima, Taku Saito, Ungil Chung, Naoyuki Sakumichi, Takamasa Sakai	4. 巻 2202
2. 論文標題 Percolation induced gel-gel phase separation in a dilute polymer network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv:2202.09754	6. 最初と最後の頁 9754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2202.09754	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 Rubberlike 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 Takashi Yasuda, Naoyuki Sakumichi, Ung-il Chung, and Takamasa Sakai	4. 巻 125
2. 論文標題 Universal Equation of State of Osmotic Pressure in Gelation Process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 267801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.267801	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 Jian Tang, Takuya Katashima, Xiang Li, Yoshiro Mitsukami, Yuki Yokoyama, Naoyuki Sakumichi, Ung-il Chung, Mitsuhiro Shibayama, and Takamasa Sakai	4. 巻 53
2. 論文標題 Swelling Behaviors of Hydrogels with Alternating Neutral/Highly Charged Sequences	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 8244-8254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.0c01221	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 Junhyuk Kim, Takeshi Fujiyabu, Naoyuki Sakumichi, Takuya Katashima, Yuki Yoshikawa, Ung-il Chung, and Takamasa Sakai	4. 巻 53
2. 論文標題 Mixing and Elastic Contributions to the Diffusion Coefficient of Polymer Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 7717-7725
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.0c01427	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 Takeshi Fujiyabu, Yuki Yoshikawa, Junhyuk Kim, Naoyuki Sakumichi, Ung-il Chung, and Takamasa Sakai	4. 巻 52
2. 論文標題 Shear Modulus Dependence of the Diffusion Coefficient of the 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 -

〔学会発表〕 計48件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 2件)

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 日本ゴム協会2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長原 颯大、作道 直幸、久保 淳、梅野 宜崇、酒井 崇匡
2. 発表標題 粗視化分子動力学法による水中 Poly(ethylene glycol) 一本鎖の弾性の解析
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 作道直幸
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70回高分子学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安田 傑, 作道 直幸, 酒井 崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルの平衡膨潤を予測する浸透圧の準希薄スケーリング則
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 作道直幸
2. 発表標題 Velocity jump of crack propagation in rubber-like materials
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Gels (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道直幸
2. 発表標題 高分子ゲルにおける準希薄スケーリング原理
3. 学会等名 2021年度高分子化学構造・物性相関研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道 直幸, 白井伸宙
2. 発表標題 高分子ゲル弾性の統計力学モデル
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 安田 傑, 作道 直幸, 酒井 崇匡
2. 発表標題 星型分岐性高分子溶液から見る 高分子ゲルの浸透圧の普遍性
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 早川 愛璃彩, 齊藤千晶, 作道 直幸, 酒井 崇匡
2. 発表標題 均一な三分岐網目を有する高分子ゲルのき裂進展挙動
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 作道直幸、吉川 祐紀、酒井崇匡
2. 発表標題 様々な分岐構造を持つ高分子ゲルにおける負のエネルギー弾性
3. 学会等名 物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道 直幸, 白井伸宙
2. 発表標題 高分子ゲル弾性の統計力学モデル
3. 学会等名 第69回レオロジー討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長原 颯大、作道 直幸、久保 淳、梅野 宜崇、酒井 崇匡
2. 発表標題 粗視化分子動力学による水中 Poly(ethylene glycol) 一本鎖の弾性の解析
3. 学会等名 第69回レオロジー討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道直幸
2. 発表標題 粘弾性固体における亀裂進展速度ジャンプ
3. 学会等名 粘着研究会第179回(11月度)例会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道直幸、大友元奎、吉川 祐紀、酒井崇匡
2. 発表標題 ゲルの弾性率において網目のトポロジーに依存する因子と独立な因子の特定
3. 学会等名 2021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 2021年

1. 発表者名 長原 颯大、作道 直幸、酒井 崇匡、久保 淳、梅野 宜崇
2. 発表標題 粗視化モデルによる水中における Poly(ethylene glycol)一本鎖の弾性の解析
3. 学会等名 2021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 2021年

1. 発表者名 作道直幸
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 レオロジー講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yoshikawa, N. Sakumichi, T. Sakai
2. 発表標題 Negative energy elasticity in a rubber-like gel
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道直幸
2. 発表標題 高分子ゲルの熱力学：準希薄スケーリング原理と負のエネルギー弾性
3. 学会等名 駒場物性セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田 傑, 作道 直幸, 酒井 崇匡
2. 発表標題 de Gennes の $c^*$ 定理を否定する 高分子ゲルの準希薄スケーリング則
3. 学会等名 第33回高分子ゲル研究討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川 祐紀, 大友元奎, 作道直幸, 酒井崇匡
2. 発表標題 負のエネルギー弾性の観点から見た高分子ゲルの線形弾性
3. 学会等名 第33回高分子ゲル研究討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早川 愛璃彩, 齊藤千晶, 作道直幸, 酒井崇匡
2. 発表標題 均一な三分岐網目を有する高分子ゲルのき裂進展挙動
3. 学会等名 関東修論レオロジー発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 作道直幸
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 統計物理学懇談会 (第 9 回) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 作道直幸、齊藤千晶、早川愛璃彩、酒井崇匡
2. 発表標題 均一な高分子ゲルの示す線形破壊力学的な亀裂進展挙動
3. 学会等名 物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 作道直幸
2. 発表標題 高分子材料における亀裂進展速度ジャンプ
3. 学会等名 高分子学会講演会「高分子材料による接着とその破壊」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道直幸、吉川 祐紀、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルのやわらかさを決める方程式
3. 学会等名 第69回高分子討論会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤千晶, 作道直幸, 酒井崇匡
2. 発表標題 均一網目構造を有する高分子ゲルにおける破壊挙動
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉川 祐紀、尼川真衣、片島拓弥、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルの弾性におけるゲスト鎖添加による負の補強効果
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 作道直幸
2. 発表標題 高分子ゲルの普遍的熱力学
3. 学会等名 関東高分子若手会サマーキャンプ 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 作道直幸
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21回IPBセミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤千晶, 作道直幸, 酒井崇匡
2. 発表標題 均一網目構造を有する高分子ゲルにおけるき裂進展挙動
3. 学会等名 第 60 回関東地区レオロジー研究会
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 高分子ゲルの弾性率の支配方程式
3. 学会等名 第32回高分子ゲル研究討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道直幸、梁曉斌、塩見滉平、中嶋健、吉川 祐紀、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルおよび高分子一本鎖における負のエネルギー弾性
3. 学会等名 MRM Forum 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 作道直幸、安田傑、酒井崇匡
2. 発表標題 ゲル化過程における浸透圧の普遍的状態方程式
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 作道直幸、安田傑、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルの膨潤過程の浸透圧
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉川 祐紀、尼川真衣、片島拓弥、作道直幸、酒井崇匡
2. 発表標題 高分子ゲルへのゲスト鎖添加による弾性率の「補弱」効果
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道直幸
2. 発表標題 高分子ゲルにおける浸透圧の準希薄スケーリング則
3. 学会等名 第19回関東ソフトマター研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 作道直幸
2. 発表標題 高分子ゲルの平衡膨潤方程式
3. 学会等名 オンライン高分子化学構造・物性相関研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 作道直幸
2. 発表標題 ゴム・ゲルの物理に関する最近の話題
3. 学会等名 量子と古典の物理と幾何 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 作道直幸
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 CREST- さきがけ連携公開型ワークショップ 「高分子弾性のトポロジーと革新的理論の構築に向けて」(招待講演)
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
2. 発表標題 ゴムの亀裂進展速度ジャンプの機構：動的ガラス化による説明
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 作道直幸
2. 発表標題 ゴムの亀裂進展において速度ジャンプが生じるメカニズム
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 作道直幸
2. 発表標題 二次元正方格子構造における応力集中と破壊の開始条件
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 作道直幸
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 第二回高分子化学構造・物性相関研究会
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 作道直幸 et al. (全58名)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 株式会社技術情報協会	5. 総ページ数 550
3. 書名 高分子材料のトライボロジー制御	

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

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