

令和 3 年 5 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04891

研究課題名（和文）ゲル力学挙動の精密解析による単一高分子鎖の伸長・破断挙動の実験的決定

研究課題名（英文）Experimental investigation of single polymer chain mechanics via analysis of mechanical analysis of gels

研究代表者

中島 祐 (NAKAJIMA, TASUKU)

北海道大学・先端生命科学研究院・准教授

研究者番号：80574350

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,900,000円

研究成果の概要（和文）：高分子材料の力学的性質（強さ、伸びなど）は、その構成単位である高分子鎖の力学的性質によって決まるため、高分子鎖の力学的性質を実験的に測定することが望まれている。しかし、高分子鎖はナノスケールの分子であり、その力学的性質を実験的に測定する技術は発展途上である。本研究では、マクロスケール材料である高分子ゲルの延伸・膨潤試験の解析により、高分子鎖1本の、特にその破断直前の力学的性質を抽出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高分子材料は、ゴム・プラスチック・ハイドロゲルなどとして社会で幅広く使われており、高分子材料なくして現代科学技術は成り立たない。本研究では、高分子材料の構成単位である高分子1本鎖の（特に極限伸長状態における）力学的性質を、ゲルの力学的性質の解析から抽出することに成功した。こうして得られた情報は、高分子材料の力学的性質（強さ、伸びなど）を理解するために極めて重要となると期待される。

研究成果の概要（英文）：Mechanical properties of polymeric materials are mainly determined by mechanical properties of polymer chains inside. Thus, experimental determination of mechanical properties of single polymer chain is important for widespread applications of polymeric materials. However, experimental techniques to measure the properties of single polymer chain have been still in development. In this study, we succeeded in extracting the mechanical properties of single polymer chain, especially its extremely stretched state, by analyzing the stretching and swelling tests of the macroscale polymer gels.

研究分野：高分子科学

キーワード：高分子科学 ゲル 単一高分子鎖 力学特性 破断特性 膨潤

1. 研究開始当初の背景

高分子材料は、日用品、タイヤ、飛行機の翼などあらゆるものに使用され、高分子材料なくして我々の生活は成り立たない。図1に模式的に示すように、高分子材料は高分子鎖の集合体であり、その力学・破壊特性は構成単位である単一高分子鎖のそれを色濃く反映している。従って、これら高分子材料のマクロな力学・破壊特性を考える際には、その構成要素である単一高分子鎖のミクロな力学・破壊特性を知ることが極めて重要である。現在のところ、単一高分子鎖の力学挙動を実測する唯一の手法は、原子間力顕微鏡 (AFM) などを用いた直接延伸試験である。AFM法では、基板と探針の間に高分子鎖を物理的・化学的に吸着させて延伸することで、その力学挙動を測定する。しかしAFM法では、探針-高分子鎖間の結合が高分子鎖の破断強度よりも一般に弱く、測定中、高分子鎖が破断に先立って探針から外れてしまう。そのため、単一高分子鎖の破壊挙動 (破断強度、最大伸びなど) は、その重要性にもかかわらず実験的に測定できていない。一方で理論的アプローチとして、様々な統計学的高分子鎖モデルが提案されている。各モデルに基づく単一高分子鎖の理論的な力-変位曲線は、低伸長域においてAFM法による実験値に概ね一致している。しかし、これら物理的なモデルでは伸び切り長で力が無限大に発散し、鎖の破断点の記述は出来ていない。また計算科学的アプローチとして、高分子延伸過程のシミュレーションも行われている。しかし、本計算結果は計算に選んだポテンシャルに依存するため、計算値の信頼性には疑問が残る。また高分子鎖は巨大分子であり、周囲の溶媒なども考慮に入ると系の原子数が膨大となり、現実的な時間スケールでの計算は難しい。

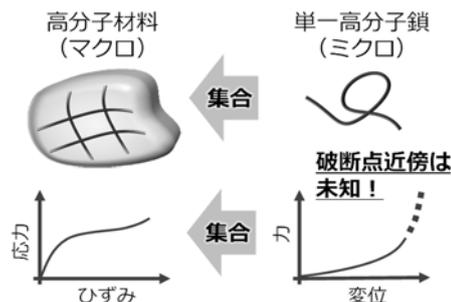


図1：高分子材料の力学物性は、単一高分子鎖の力学物性を強く反映しているが、後者の実験的な測定は未だ不完全である。

以上より、単一高分子鎖の力学物性、特に破断強度や最大延伸度の実験的決定は、幅広いタイプの高分子材料の力学・破断特性の理解に必要不可欠であり、実現が強く望まれている。この困難な課題を実現するため、申請者はゲル、特にダブルネットワーク(DN)ゲルに注目した。DNゲルは、脆い網目と柔軟な網目からなる2重網目ゲルである。DNゲルを延伸すると、図に示すように最初に脆い成分に応力が集中し、脆い網目が広範囲に破壊される (内部破壊)。次いで柔軟な網目が伸び切って破断し、最終的にゲル全体が破壊される。この脆い網目の内部破壊現象を反映して、DNゲルの延伸時には不可逆な力学的ヒステリシスロスやネッキング現象が生じる。このようなDNゲルの破壊プロセスを考えると、DNゲルの応力-歪曲線には、脆い網目中の数多の高分子鎖が延伸され、破断するという力学情報が必ず含まれていると言える (図2)。この力学情報こそ我々が求めているものであり、もしDNゲルから何らかの方法で本情報を抽出できれば、単一高分子鎖の力学物性、特に破断点の情報を実験的に得ることが出来るはずである。

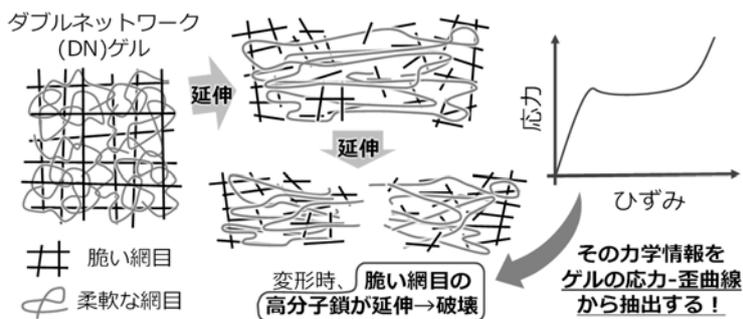


図2：ダブルネットワークゲルの力学物性には、単一高分子鎖の延伸-破断の情報が原理上含まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ゲル力学物性の新しい解析法により、単一高分子鎖の力学特性、特に破断力や最大延伸度を実験的に求めることである。具体的には、第1に、上に述べたDNゲルの力学試験結果の解析により、単一高分子鎖の張力-変位曲線を抽出する。特に、これまで実験的に不可能であった、破断点近傍 (高伸長域) の高分子鎖の力学特性を明らかにする。第2に、ゲルの膨潤度を収縮状態から極限膨潤状態まで変化させたときの弾性率解析から、低伸長域の力学特性を解明する。並行して、従来のAFM法による単一高分子鎖の延伸測定も行う。様々な高分子に対して上記3種の実験を行い、結果を統合することで、様々な化学種の高分子鎖について、破断までの力-変位曲線を系統的に明らかにし、高分子主鎖の化学構造、結合解離エネルギーなどが高分子の破断挙動に与える影響を考察した。

3. 研究の方法

A. DN ゲルの延伸試験の解析

当初に想定した方法とは異なるが、以下の方法により、DN ゲルの力学試験結果から単一高分子鎖の力-変位曲線を抽出した。

ポリエチレングリコール (PEG)、ポリ (2-アクリルアミド-2-メチルプロパンスルホン酸) (PAMPS)、プルランの 3 種の高分子からなる第 1 網目ゲルをそれぞれ合成した。これらのゲルに柔軟なポリアクリルアミドゲルを複合させ、2 重の網目を有する DN ゲルを得た。次いで、得られた DN ゲルを所定の歪まで一軸延伸した後に除荷する試験を行い、DN ゲルのサイクル応力-歪曲線を得た。最後に、本曲線からポリアクリルアミドの応力寄与分を差し引くことにより、DN ゲルの第一網目由来のサイクル応力-歪曲線を得た。今後の解析では、このようにして得られた第一網目由来の応力-歪曲線のうち、除荷過程の曲線のみを使用した。以後、これを除荷曲線と呼ぶ。

続いて、いくつかの仮定のもとでゴム弾性理論を適用することにより、一本鎖の張力-変位曲線とゲルの応力-歪曲線とを相互に変換するモデルを作成した。本モデルを用い、AFM 法によって得られた張力-歪曲線から除荷曲線を計算した。逆に、実験的に得られた DN ゲルの除荷曲線から 1 本鎖の張力-変位曲線を計算した。

B. ゲルの膨潤試験の解析

PEG および PAMPS によるネットワークを有するゲルを調製した。続いて、ゲルを様々な体積まで膨潤させた。ゲルを膨潤させることは、ゲル内の網目鎖を延伸させていることに対応する。ゲルを幅広い膨潤率 Q (=膨潤時体積/調製時体積) まで膨潤させるため、例えば PEG ゲルを用いた際は、ゲル内部に強電解質高分子 PAMPS を様々な濃度で導入し、またこれらゲルを 0~33wt% の PEG 水溶液に浸漬した。強電解質高分子の添加は、浸透圧の増大により Q を増大させる効果、PEG 水溶液への浸漬は、外部溶液の浸透圧増大により Q を減少させる効果がある。これらの手法により得られた多様な膨潤率 Q を有するゲルに対して押し込み試験を行い、ずり弾性率 G を測定した。得られたずり弾性率は、ゲル内部の網目鎖が有する弾性エネルギーの総和に対応するので、ずり弾性率をゲル内の高分子鎖の数密度で割ることで、1 本鎖あたりの弾性エネルギーを得た。得られた弾性エネルギーを、ゲル内部の網目鎖の伸長率 $Q^{1/3}$ に対してプロットすることで、高分子 1 本鎖の弾性エネルギー E_n と伸長率との関係を得た。本関係を得ることは、高分子鎖の張力-変位曲線を得ることにほぼ相当する。

4. 研究成果

A. DN ゲルの延伸試験の解析

まず、原子間力顕微鏡で観測された高分子鎖の張力-伸長曲線から、ゲルの応力-歪曲線を理論的に導いた。図 3 に、PEG 鎖の張力曲線から理論的に導いた応力-歪曲線 (黒鎖線) と、PEG を第 1 網目とした DN ゲル (PEG-DN ゲル) の除荷曲線 (赤実線) との比較を示す。用いた理論に含まれるパラメーターは、歪と応力のスケール因子のみである。これら二つの因子を調整するだけで、両者は非常によく一致することが分かった。他の高分子種を用いた場合でも、同様に両者はよく一致した。ここから、DN ゲルの応力-歪曲線を、一本鎖の張力曲線から一般的に再現可能であることが分かった。

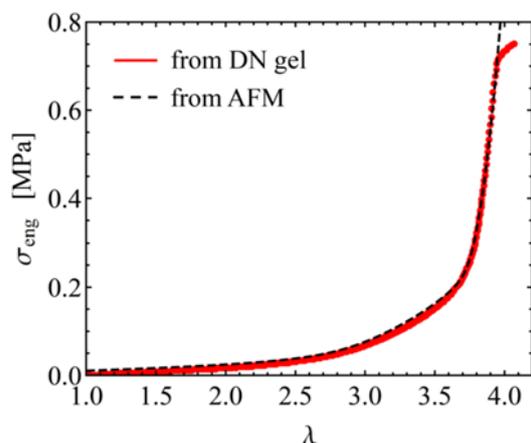


図 3 : PEG-DN ゲルの除荷曲線。赤実線は実測値、黒鎖線は PEG の張力-変位曲線からの計算値。

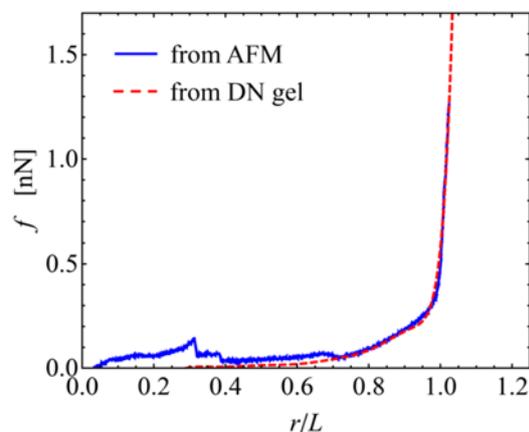


図 4 : PEG 鎖の張力-変位曲線。青実線は実測値、赤点線は DN ゲル力学測定から得られた除荷曲線からの計算値。

続いて逆に、DN ゲルの除荷曲線から、高分子鎖の張力-伸長曲線を理論的に導出した。図4は、AFM で得られた PEG 1 本鎖の張力と、PEG-DN ゲルの除荷曲線の解析によって得られた PEG 鎖の張力との比較である（理論中のパラメーターは図1 で用いたものと同じである）。横軸の r/L は、高分子鎖の輪郭長 L に対する現在の両末端間距離 r の大きさ、つまり鎖の伸長度を示している。高伸長領域で、実験値と計算値は非常によく一致した。また、他の高分子種を用いた場合や、第1 網目のランダム性を変化させた場合でも結果は同様であった。本結果は、DN ゲルの除荷曲線のゴム弾性理論に基づく解析から、高分子鎖の張力-伸長曲線が一般的に計算出来ることを示すものである。

本法の利点は、測定可能な張力の最大値が大きいことである。図4のグラフではカットしてあるが、DN ゲル力学測定から抽出された張力の最大値は 3 nN を超えており、AFM で測った張力の最大値よりも2倍以上大きい。すなわち、AFM よりも広い範囲の張力・伸長曲線が得られる。このことは、DN ゲルを使った方法が極限伸長域の高分子鎖の張力-歪関係を解析するために有効であることを示している。

なお本法は、力学的に脆弱な一般的ゲルには適用出来ない。一般的ゲルは欠陥感受性が高く、その軸延伸時、内部の網目が大きく伸長する前にゲル全体が破断してしまう。従って、その力学物性には高伸長域における高分子鎖の力学情報はほとんど含まれておらず、それを取り出すことは出来ない。一方で高強度 DN ゲルの延伸過程には、背景で述べたように高分子鎖が高伸長する力学情報が含まれているので、その力学物性から高分子1本鎖の張力曲線を抽出することが可能なのである。

B. ゲルの膨潤試験の解析

先に示した方法により、PEG ゲルの膨潤率 Q を 0.18 から 300 まで制御することに成功した。今回達成された最大膨潤率 300 は、本ゲルの理論上の最大膨潤率のおよそ 1/4 にまで達する。図5に、ゲル内部の PEG 鎖の伸長率 $Q^{1/3}$ に対し、PEG 1 本鎖の弾性エネルギー E_n をプロットした結果を示す。全てのデータは、ゲル内部に含まれる直鎖高分子電解質の濃度や浸漬させた PEG 溶液の濃度によらずマスターカーブに乗ったことから、PEG 1 本鎖の弾性エネルギーはそのネットワーク構造のみで決まることが示された。 $Q^{1/3}$ が十分小さい低膨潤度域においては、鎖を線形バネとして取り扱う線形弾性論が予測する冪乗則である $E_n \propto Q^{2/3}$ が成立した。一方で Q が大きい高膨潤度域では、有限伸び切り長（非線形性）の効果により本則からの解離が見られた。これらは、高分子鎖が示す一般的な特性であり、このような特性が得られたことは、本測定の原理的正しさを示唆するものである。

続いて、この非線形振る舞いを説明するモデルを検討した。本ゲルを理想化した、架橋点がダイヤモンド格子の格子点に配置された PEG ゲルを考えると、ゲル調製条件から $Q=1$ （ゲル調製直後）における両末端間距離 r は 8.1 nm、輪郭長 L は 82 nm と求まる。またアフィン変形を仮定すると、任意の Q における両末端間距離 r は $8.1 \times Q^{1/3}$ nm となる。これらの値から、様々な統計力学的モデルを用いて PEG ゲル内の網目鎖1本の弾性エネルギーの Q 依存性を計算した。結果、いずれのモデルを用いた場合でも、計算値については実験値からの解離が見られ、モデルの修正が必要であることが示唆された。修正に際し、PEG は水中で水素結合を形成し trans-trans-gauche (TTG)コンフォメーションを取ることに着目した。PEG 鎖が TTG コンフォメーションを取るとすると、その伸び切り長は 64 nm となる。実際に $L=61$ nm としてみみず鎖モデルから弾性エネルギーを計算すると、実験値を良く再現出来ることが分かった。

上記の結果は、AFM による PEG 鎖の測定結果の低伸長域と定性的に一致する。AFM 測定によれば、PEG 鎖は、低伸長域においては TTG コンフォメーションを保ったまま伸長する。伸長度が極めて大きくなると、TTG から all-trans へのコンフォメーション変化が起こり、やがて鎖の破断に至る。今回得られたゲルの Q と E_n との関係は、このコンフォメーション変化が起こる前の PEG 鎖の力学特性に対応するものと考えられる。

以上のように、ゲルの力学・膨潤特性の解析から、高分子1本鎖の力学情報を取り出すことに成功した。今後本方法を発展させ、広く使われる技術にすることを目指す。

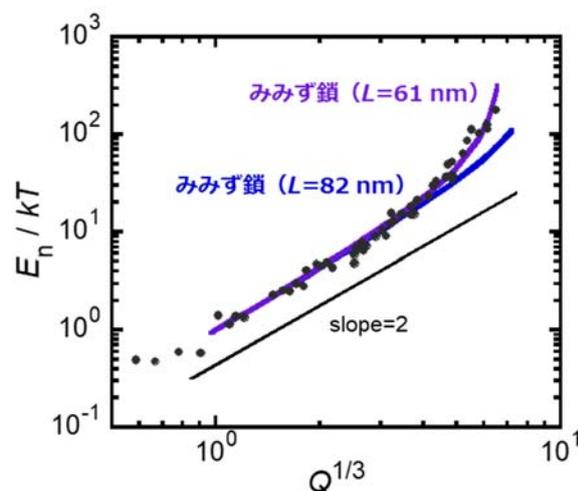


図5：PEG-DN ゲルの除荷曲線。赤実線は実験値、黒鎖線は PEG の張力-変位曲線からの計算値。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Zhang Hui Jie, Luo Feng, Ye Yanan, Sun Tao Lin, Nonoyama Takayuki, Kurokawa Takayuki, Nakajima Tasuku	4. 巻 1
2. 論文標題 Tough Triblock Copolymer Hydrogels with Different Micromorphologies for Medical and Sensory Materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Polymer Materials	6. 最初と最後の頁 1948 ~ 1953
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsapm.9b00395	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 Murai Joji, Nakajima Tasuku, Matsuda Takahiro, Tsunoda Katsuhiko, Nonoyama Takayuki, Kurokawa Takayuki, Gong Jian Ping	4. 巻 178
2. 論文標題 Tough double network elastomers reinforced by the amorphous cellulose network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 121686 ~ 121686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2019.121686	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 Nakajima Tasuku, Ozaki Yuhei, Namba Ryo, Ota Kumi, Maida Yuki, Matsuda Takahiro, Kurokawa Takayuki, Gong Jian Ping	4. 巻 8
2. 論文標題 Tough Double-Network Gels and Elastomers from the Nonprestretched First Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 1407 ~ 1412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.9b00679	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 Ye Ya Nan, Frauenlob Martin, Wang Lei, Tsuda Masumi, Sun Tao Lin, Cui Kunpeng, Takahashi Riku, Zhang Hui Jie, Nakajima Tasuku, Nonoyama Takayuki, Kurokawa Takayuki, Tanaka Shinya, Gong Jian Ping	4. 巻 28
2. 論文標題 Tough and Self-Recoverable Thin Hydrogel Membranes for Biological Applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 1801489 ~ 1801489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.201801489	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 Hoshino Ken-ichi, Nakajima Tasuku, Matsuda Takahiro, Sakai Takamasa, Gong Jian Ping	4. 巻 14
2. 論文標題 Network elasticity of a model hydrogel as a function of swelling ratio: from shrinking to extreme swelling states	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 9693 ~ 9701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8SM01854E	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 Matsuda Takahiro, Kawakami Runa, Namba Ryo, Nakajima Tasuku, Gong Jian Ping	4. 巻 363
2. 論文標題 Mechanoresponsive self-growing hydrogels inspired by muscle training	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 504 ~ 508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aau9533	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 Nakajima Tasuku, Hoshino Ken-ichi, Guo Honglei, Kurokawa Takayuki, Gong Jian Ping	4. 巻 7
2. 論文標題 Experimental Verification of the Balance between Elastic Pressure and Ionic Osmotic Pressure of Highly Swollen Charged Gels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Gels	6. 最初と最後の頁 39 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/gels7020039	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 Nakajima Tasuku, Kurokawa Takayuki, Furukawa Hidemitsu, Gong Jian Ping	4. 巻 16
2. 論文標題 Effect of the constituent networks of double-network gels on their mechanical properties and energy dissipation process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 8618 ~ 8627
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SM01057J	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 Nakajima Tasuku, Chida Takaharu, Mito Kei, Kurokawa Takayuki, Gong Jian Ping	4. 巻 16
2. 論文標題 Double-network gels as polyelectrolyte gels with salt-insensitive swelling properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 5487 ~ 5496
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SM00605J	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32件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Takahiro Matsuda, Tasuku Nakajima, Jian Ping Gong
2. 発表標題 Self-Growing Hydrogels by Mechanical Training
3. 学会等名 7th Asian Symposium on Advanced Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tasuku Nakajima
2. 発表標題 Self-growong gels inspired by metabolism
3. 学会等名 第68回高分子討論会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tasuku Nakajima
2. 発表標題 Self-Growing Hydrogels Inspired by Biological Metabolism
3. 学会等名 2020 Gordon Research Conference on Multifunctional Materials and Structures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tasuku Nakajima, Takahiro Matsuda, Jian Ping Gong
2. 発表標題 Self-growing hydrogels through a metabolic-like mechanochemical process
3. 学会等名 The 2nd Conference on Multiscale Mechanochemistry and Mechanobiology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Matsuda, Runa Kawakami, Ryo Namba, Tasuku Nakajima, Jian Ping Gong
2. 発表標題 Mechano-induced network remodeling of a hydrogel via mechanoradical polymerization
3. 学会等名 The 2nd Conference on Multiscale Mechanochemistry and Mechanobiology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoko Yamazaki, Takahiro Matsuda, Tasuku Nakajima, Jian Ping Gong
2. 発表標題 3D Transformation of Double Network Hydrogels via Origami
3. 学会等名 The 2nd Conference on Multiscale Mechanochemistry and Mechanobiology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tasuku Nakajima, Yukiko Takahashi, Takahiro Matsuda, Jian Ping Gong
2. 発表標題 Stress Responsive Disulfide Bond Reduction in Tough Double Network Hydrogels
3. 学会等名 2nd ICRéDD International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田昂大、中島祐、難波遼、グン剣萍
2. 発表標題 筋肉のように力学負荷によって成長するダブルネットワークゲルの創製
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 山崎友子、難波遼、松田昂大、中島祐、グン剣萍
2. 発表標題 DNハイドロゲル折り紙
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 印出井努、松田昂大、高橋由葵子、中島祐、グン剣萍
2. 発表標題 高分子鎖一本の張力・伸長関係を、高分子ゲルの応力・歪み曲線から抽出する
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 中島祐、Guo Hui、黒川孝幸、グン剣萍
2. 発表標題 塩水から選択的に水だけを吸収する、疎水性高膨潤ハイドロゲル
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 今岡千歌、中島祐、岩田昌也、松田昂大、勝山吉徳、グン剣萍
2. 発表標題 網目の伸びきりによるDNゲルのエネルギー弾性の発現
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 高橋由葵子、松田昂大、中島祐、印出井努、グン剣萍
2. 発表標題 DN ゲル中の強延伸高分子鎖が発現する特異的化學変化
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 高橋由葵子、松田昂大、中島祐、印出井努、グン剣萍
2. 発表標題 力学負荷が加速する化学反応：DNゲル中のジスルフィド結合の還元
3. 学会等名 第54回高分子学会北海道支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken-ichi Hoshino, Tasuku Nakajima, Takahiro Matsuda, Honglei Guo, Takamasa Sakai, Jian Ping Gong
2. 発表標題 Effect of Swelling on Network Elasticity of Hydrogel: from Shrinking State to Highly Swollen State
3. 学会等名 The 13th International Symposium on Polymer Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Namba, Takahiro Matsuda, Tasuku Nakajima, Takayuki Nonoyama, Takayuki Kurokawa, Jian Ping Gong
2. 発表標題 Self-toughening of DN Gels Induced by Mechanical Stimulation
3. 学会等名 Japan-Korea Joint Symposium on Polymer Science 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今岡千歌、中島祐、岩田昌也、難波遼、松田昂大、勝山吉徳、グン剣萍
2. 発表標題 延伸されたDNゲル内における1stネットワークの伸びきり挙動の解析
3. 学会等名 2018年度北海道高分子若手研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田昂大、中島祐、難波遼、グン剣萍
2. 発表標題 変形誘起ラジカル重合による「鍛えると強くなる」ダブルネットワークゲルの創製
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 印出井努、松田昂大、高橋由葵子、中島祐、グン剣萍
2. 発表標題 大変形下での高分子鎖の切断を考慮した、ゴム弾性の分子モデル - ダブルネットワークゲルの解析 -
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 高橋由葵子、松田昂大、中島祐、印出井努、野々山貴行、黒川孝幸、グン剣萍
2. 発表標題 DNゲルのヒステリシス解析による単一高分子鎖の挙動抽出
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 Yong Zheng, Takahiro Matsuda, Tasuku Nakajima, Jian Ping Gong
2. 発表標題 Effect of Solvent on Deformation and Fracture Behaviors of DN Gels
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 中島祐、松田昂大、難波遼、グン剣萍
2. 発表標題 変形誘起重合反応による「鍛えると成長する」ダブルネットワークゲル
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 中島祐、松田昂大、印出井努、高橋由葵子、黒川孝幸、グン剣萍
2. 発表標題 ゲル各種力学測定による極高伸長域に至る単一高分子鎖の力学物性解析
3. 学会等名 第66回レオロジー討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tasuku Nakajima
2. 発表標題 Toughening of Soft Materials Based on Sacrificial Bond Principle
3. 学会等名 Japan-Taiwan Bilateral Symposium on Polymeric Materials for Future Vehicles (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tasuku Nakajima, Kei Mito, Md. Anamul Haque, Takayuki Kurokawa, Jian Ping Gong
2. 発表標題 Hydrogels with Multi-Cylindrical Lamellar Bilayers: Swelling-Induced Contraction and Anisotropic Molecular Diffusion
3. 学会等名 The 2nd International Symposium for Advanced Gel Materials & Soft Matters (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島祐、Md. Tariful Islam Mredha、黒川孝幸、野々山貴行、グン剣萍
2. 発表標題 人工腱を目指した強配向・高強度生体高分子ゲルの創製
3. 学会等名 第66回高分子年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島祐、星野顕一、酒井崇匡、グン剣萍
2. 発表標題 極めて大きく膨潤するゲルの膨潤理論
3. 学会等名 第29回高分子ゲル研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島祐、松田昂大、並木昇太郎、グン剣萍
2. 発表標題 破断誘起ラジカル重合によって強靱化・機能化するゲル
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 今岡千歌、中島祐、グン剣萍
2. 発表標題 鎖の極限伸長がもたらす、ダブルネットワークゲルの伸長誘起「脱膨潤」挙動
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 中島祐、今岡千歌、グン剣萍
2. 発表標題 強く伸長された網目鎖を有するゲルにおける力学 - 膨潤カップリングの逆転
3. 学会等名 第68回レオロジー討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 印出井努、松田昂大、中島祐、高橋由葵子、Tatiana B. Kouznetsova、Michael Rubinstein、Stephen L. Craig、グン剣萍
2. 発表標題 Extraction of polymer chain's force-extension relation from stress-strain relation of polymer network
3. 学会等名 第68回レオロジー討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島祐
2. 発表標題 まるで生き物！高機能複合ゲルの世界
3. 学会等名 第176回東海高分子研究会講演会（国際学会）
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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