高分子ゲルによる摩擦挙動

Friction Behavior of Polymer Gels

和田 真人

山形大学大学院 理工学研究科
機械システム工学専攻技術専門職員
ソフト&ウェットマター工学研究室
〒992-8510
山形県米沢市城南 4-3-16

Masato WADA
Soft and Wet matter Engineering
Laboratory (SWEL), Department of
Mechanical Systems Engineering,
Graduate School of Science and
Engineering, Yamagata University
4-3-16, Jonan, Yonezawa, Yamagata,
992-8510, Japan

古川 英光

山形大学大学院 理工学研究科
機械システム工学専攻教授
ソフト&ウェットマター工学研究室
〒992-8510
山形県米沢市城南 4-3-16

Hidemitsu FURUKAWA
Soft and Wet matter Engineering
Laboratory (SWEL), Department of
Mechanical Systems Engineering,
Graduate School of Science and
Engineering, Yamagata University
4-3-16, Jonan, Yonezawa, Yamagata,
992-8510, Japan

宮 瑾

山形大学大学院 理工学研究科
機械システム工学専攻助教
ソフト&ウェットマター工学研究室
〒992-8510
山形県米沢市城南 4-3-16

Jin GONG
Soft and Wet matter Engineering
Laboratory (SWEL), Department of
Mechanical Systems Engineering,
Graduate School of Science and
Engineering, Yamagata University
4-3-16, Jonan, Yonezawa, Yamagata,
992-8510, Japan

論文要旨：高分子ゲルの摩擦挙動においては、未だ測定・評価法が確立されておらず、機械材料や医療用材料への応用の観点から早急な評価法の確立が求められている。そのためには、様々な高機能高分子ゲルの摩擦データを取得し、個々のデータに関して議論することが必要である。そこで、本稿では我々が取り組んでいる機能性高分子ゲルの摩擦測定・評価法、および機械・医療システムへの応用展開の可能性について述べる。

Abstract: The friction measurement and evaluation of macromolecule gels has not been established yet. However for the application of the gels as industrial and medical materials, it should be established immediately. It is necessary to discuss the acquisition of frictional data of various high-performance macromolecule gels. Here we review our recent progress and mention its applicability to mechanical and medical systems.

Key words: friction, high strength gels, ball on disk measurement, shape memory, soft and wet material, hydrogel

1 はじめに

化学結合による3次元網目構造を持った高分子骨格と多量の液体成分(溶媒)から構成される高分子ゲルは、

連絡者：和田 真人
E-mail：m.w@yz.yamagata-u.ac.jp

プラスチックやゴムなど他の高分子と比べ、低強度・低弾性率で、しかも脆性的な材料である場合が多かった。このことは、例えば身近な高分子ゲルである、こんにゃく、寒天、ゼリーや豆腐をイメージすると理解しやすい。高分子ゲルは、温度、圧力、水素イオン指数(pH値)、光や電場等の外部刺激によって膨潤度が変わり、体積が

変化する。この特徴に注目し、機能材料・インテリジェント材料として、センサーやアクチュエータ等への応用が研究・実用化されている。

また近年、ダブルネットワークゲル（以後、DNゲルと記す）やナノコンポジットゲルと呼ばれる高強度ゲルやトポロジカルゲルと呼ばれる高靱性ゲルなどが開発され、脆さに起因する取り扱い性の悪さの点が改善されてきたことから、工業用途での利用の広がりが期待される。一方、高分子ゲルは固体でありながら主成分が液体であるため、著しく低い摩擦係数とユニークな摩擦挙動を示すことが知られており、その独特の摩擦機構も明らかにされつつある。よって、高機能かつ高強度なゲルを新規材料として産業界に送るためには、新規材料としてゲルの摩擦を定量的に評価する必要がある。

本研究では、世界最高強度を誇るDNゲルと、形状記憶ゲル（以後、SMGと記す）を供試材として使用した。DNゲルの高強度化メカニズムは、従来の弾性のみを考慮した破壊モデルでは説明できないことから、各材料の機械的特性ではなく、硬いゲル、軟らかいゲルからなる特徴的な組織構造に由来するものと考えられている。

2 ゲルについて

新版高分子辞典¹⁾によると、ゲルは「あらゆる溶媒に不溶の3次元網目構造をもつ高分子およびその膨潤体」と定義されている。ゲルは多数の高分子が化学・物理的な架橋によって3次元的な網目を構成し、その網目が水などの溶液を吸って膨潤したものである。このようなものは我々の身近に数多く存在している。こんにゃくやゼリーなどの食品や、ポリビニルアルコール（PVA）からなるソフトコンタクトレンズ、高吸収性を用いた紙おむつなどがあげられる。さらに、生体も歯や骨、髪などを除けばほとんどの体を構成するパーツはゲルであるといえる。つまり、私たちは最もゲルと身近な存在である²⁾。

また、線状あるいは分岐高分子を良溶媒中に入れると、しだいに溶媒を吸収して膨潤し、ついには個々の高分子が完全に溶媒中に分散した溶解状態に達するのに対し、3次元網目構造を持つ架橋高分子では、溶媒との相互作用によってある程度までは膨潤するものの、架橋構造をもつため有限の膨潤性を示す。前述した紙おむつに使われている高吸収性ゲルはゲル網目を構成する高分子と溶媒が分子レベルで強固に相互作用しているので、引っ張ったり、潰したりしても吸収された溶媒がしみだしてくることはない。

2・1 ゲルの特性^{3, 4)}

生体において、硬組織である骨などを除くと、大部分

を構成しているのがゲルである。構成物質はタンパク質と多糖類であり、特に結合組織は主にコラーゲンとプロテオグリカンから成る。眼球内の角膜・硝子体は主にコラーゲンと酸性ムコ多糖類により構成され、水を大量に含んだゲル状態である。

また、粘弾性以外にもゲル特有の性質は多い。その生体材料のような柔軟性と水を保持する性質からソフトコンタクトレンズが開発され、自重の数百倍もの水を吸収できる高吸水性ゲルは生理用品やオムツなどに使用されている。

ゲルの重要な特徴として、ゲル自身が非平衡状態にある開放系物質であることがあげられる。ゲルは構成する高分子の種類によって導電性を示したり、構造規則性を持ったり、pH、熱、光、電場などの外部刺激に応答するなどの機能を有することが知られている。

さらに、金属材料や一般的な高分子材料は、体内での親和性が低く少なからず拒否反応・炎症反応が起こることが多いが、ゲルに関しては、動物実験において生体親和性が確認されているものもある⁵⁾（Fig. 1）。

ゲルに含まれている溶媒の中には通常の液体とは異なった状態で存在しているものもある。水の場合は網目近傍に存在して網目路強く相互作用しているため、低温でも凍結しない結合水や、不透水より離れてはいるが配向により $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$ まで凍らない束縛水、相互作用が弱く自由水として存在するものもある。植物の種子が極低温でも生存していることの1つの要因として植物に含まれる溶媒が網目との相互作用により結合水になり、凍結しないためだと考えられている。

2・2 ゲルの種類

通常、ゲルは溶媒によって膨潤しており、その媒体が水か有機溶媒かで大別できる。ほとんどのゲルは、天然高分子・合成高分子を問わず水を内包しているため、一般的にゲルといえば水媒体のハイドロゲルを指す。一方、シリコーンオイルなどの油性媒体の場合にはオルガノゲルと呼び、スポーツシューズや防震台などの衝撃吸収材として用いられている。空気を媒体とするものはエアロゲル、またはキセロゲルと呼ばれる。

構成成分という点からみると、生体高分子ゲルはタンパク質や多糖類でできており、こんにゃくや豆腐などの食品は生体から抽出した天然物で再構成された天然高分子ゲルである。

一方、合成高分子ゲルは日常的に用いられている高吸水性オムツのポリアクリル酸ナトリウム（PNaAA）、ソフトコンタクトレンズなどのポリビニルアルコール（PVA）やポリヒドロキシエチルメタクリレート（PHEMA）、シリコーンハイドロゲルなどの、水溶性の合成

Fig. 1 The characteristics of gels: Gels have superior properties such as high water content, material permeability, especially low friction and biocompatibility, which are not found in hard and dry materials.

高分子由来のゲルを指す。

3次元網目構造を形成する架橋方法において、化学反応によって架橋・形成する化学ゲルと、水素結合やイオン結合による凝集や高分子鎖の絡み合いにより形成される物理ゲルとに大別できる。天然ものの多くは物理ゲルであり、物理ゲルは温度、溶媒、pH、などの変化によってゾルゲルの2形態での転移を可逆的に起こすが、化学ゲルは共有結合で架橋されたゲルであり、鎖の分子運動によってその結合が切れることなく、再度溶解することがない不可逆ゲルである。そのため、化学ゲルの3次元ネットワーク構造はゲルが形成された時点の構造がそのまま固定される。

2・3 3次元網目架橋構造

ゲルは、高分子の分子間相互架橋構造（ポリマーネットワーク）を持つことが必要である。ここで、3次元架橋構造（ゲル）の機能について述べる。

ゲルのもつ網目サイズは 10^{-9} m $\sim$ 10^{-6} mと極めて微細なポリマーネットワークとして形成されている。そのサイズは、 10^9 倍することにより実感できてくる。例えば、直径1.2 cmのビー玉があるとすると。このビー玉を 10^9 倍拡大するとちょうど地球サイズになる。また、 10^9 倍縮小すると、ビーチボールの詰まった体育館は、水分子が詰まったイオン交換樹脂、高吸水性樹脂（電解質ゲル）の網目サイズになり、ビーチボールの入った浴槽は、電気泳動ゲル（中性ゲル）の網目サイズとなる。このときの水分子の大きさは約0.3 nm、対してビーチボールは約30 cmとゲルの網目サイズの微細さがわかる（Fig. 2）。

ゲルの網目は、微小空間を形成して特別な環境を創成

Fig. 2 The schematic of Double Network (DN) gel: DN gels has inter penetrate networks that is made with rigid-brittle 1st gels and ductile-soft 2nd gels.

する。そこでは、篩機能や物質移動、ゲルを構成する高分子と包括された溶質や溶液との原子・分子オーダーの相互作用など、ゲルの原点でもある生体組織に似た機能が発現される。

ゲルの3次元架橋構造の中は、極めて接近した高分子鎖と溶媒が溶質と共存する微小環境系が構築される。50 $\sim$ 70%といった高分子密度の高い系は、高重合度高分子を溶解した濃厚溶液系ではとてもつくことはできな

い。しかし、ゲルではこのような高密度系での高分子鎖と溶質や溶媒の相関を知ることができ、液体と固体の中間の状態という特徴が生かされる。特に、生体系では組織自身の中で生体高分子の合成と架橋・ゲル化が同時に行われるので、精微な構造を形成し、高い機能を発現する。

3 ゲル供試材について

3・1 ゲルの合成

化学架橋ゲルの調整において、ビニルモノマーとジビニルモノマー（架橋剤）のラジカル共重合反応は頻繁に用いられる重合法である。モノマー、架橋剤、及び開始剤を溶媒にとかし、熱または紫外線の刺激により開始剤がラジカル化し、モノマーおよび架橋剤の成長反応が起こり、最終的には3次元網目を形成し高分子ハイドロゲルとなる。

3・2 Double Network (DN) ゲルについて^{6, 7)}

Double Network (DN) ゲルは、2003年に龔らにより創製され、合成高分子ゲルとしては異常ともいえる強靱性を有するゲルである。高強度な生体軟組織である生体軟骨は、剛直なコラーゲン繊維の3次元ネットワークの内部にブラシのような構造を持つ柔軟なプロテオグリカン集合体が存在する。つまり、「剛」と「柔」の要素を併せ持つ複合材料であるといえる。この構造を模倣して作られたものがDNゲルである。通常のDNゲルは強電解質で剛直なpoly(2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid) gel (PAMPSゲル)を1st network、中性で柔軟なpolyacrylamide (PAAm)を2nd networkとして相互侵入網目ゲル(IPNゲル)を合成、Double Networkゲル(DNゲル)となづけられた^{6, 8, 9)}(Fig. 3)。特殊な組織構造を持つDNゲルは、10~40 MPa程度の圧縮強度を有し、表面の摩擦係数は約0.01と非常に低い値を示している^{10, 11)}。この強度は生体軟骨が日常的に受ける圧力3~18 MPaを上回り、高分子ゲルがもつ表面の低摩擦性や多量の水分保持機能能力による物質透過性なども保持していることから、人工関節への応用が期待されている。また、DNゲルがもつ圧縮強度はDNゲルを構成する個々のゲルと比べると10~100倍の値となる¹²⁾。また、90%程度圧縮しても破壊することなく、荷重を除去すればゴムのように元の形に復元する。

DNゲルの高強度化メカニズムは、従来の弾性のみを考慮した破壊モデルでは説明できないことから、各材料の機械的特性ではなく、硬いゲル、軟らかいゲルからなる特徴的な組織構造に由来するものと考えている⁸⁾。

DNゲルは使用するモノマーによって特性を変えることが可能であり、非常に伸びに強いものや、非常に透明

Fig. 3 Comparison between three-dimensional network of the gels¹⁹⁾.

な物、さらには表面摩擦係数が非常に小さいものなどを合成することが可能である。

本実験では、1stゲルにはモノマーとして硫酸基をもつPAMPS (2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic Acid)、架橋剤としてMBAA (*N,N'*-methylene bisacrylamide)、UV開始剤として α -keto(α -ketoglutaric acid)を用いた。その濃度と比率は1 M, 4 mol%, 0.1 mol%とした。2ndゲルにはモノマーとして中性のPDMAAm (*N,N*-dimethyl acrylamide)、架橋剤としてMBAA、UV開始剤として α -ketoを用いた。その濃度と比率は2 M, 0.02 mol%, 0.1 mol%とした。

初めに1stゲルのモノマー、及び架橋剤、開始剤、溶媒を量りスターラーで量に応じて時間を調節し撹拌させる。次に溶液中の酸素を除去するため、窒素置換（バブリング）を約20分行う。これは、溶液に含まれる酸素が光開始剤の発生させたラジカルを吸収してしまうためゲル化が阻害されるのを防ぐためである。バブリング後、UV（紫外線）照射によってゲル化を開始させる。ゲル化の際容器の形に硬化するので、本実験では厚さ2 mmのコの字スパーサーを硝子板に挟んだもので約8時間UV照射を行った。UV照射中に2nd溶液を同様に用意し、バブリング終了後できた1stゲルを溶液の中に浸し2日間膨潤させる。膨潤させた1stゲルを適当な大きさに切り、硝子板に挟んで約8時間UV照射を行い、DNゲルを製作した。この過程で製作した板状DNゲルから引張試験及び圧縮試験における試験片を型抜き機によって製作する。

3・3 形状記憶ゲル (SMG) について¹³⁻¹⁶⁾

合金に形状記憶効果の生じることが見いだされたの

は、1951年、米国での金-カドミウム合金を用いた研究が最初のものとされており、現在実用化されているチタン-ニッケル合金は、1964年頃、米国の海軍兵器研究所でチタンとニッケルの原子比が1:1のものだけに形状記憶効果の発生することを偶然発見したのがその名前の起源とされている¹⁷⁾。

多くの高分子材料はいわゆる粘弾性体であり、ゴム弾性のように、外力による変形の関係が時間に依存するため、その形状が前に受けた力学的影響を受ける。高分子の形状記憶にはポリマーのガラス転移を利用したものや、結晶成分を利用したもの、化学的および物理的刺激を利用したものがあるが、本論文では結晶成分を利用した形状記憶ゲルを用いることとする。

SMGは興味深い性質をもつ機能性材料である。所定の温度以上で弾性率が急激に減少するため、変形が容易に可能となる。また変形状態のまま冷却させていくと外力を取り除いても変形状態を維持できるようになり、さらに再び加熱するとゲルはもとの状態に戻る。アクリル酸ステアリル(SA)を用いることにより、室温にてSAのアルキル側鎖の結晶化による秩序構造を持つことで硬いが、温度を高くしていくと結晶の融解が起こり容易に変形可能となる(Fig. 4)。

当研究室では透明形状記憶ゲル(T-SMG)の開発に成功した。通常ゲルを合成するにあたり溶媒を必要とするが、この溶媒の役割をモノマーで代用することによる無水合成法が考案され、疎水性であるSAと親水性であるPDMAAmの共重合化が可能となった。合成されたT-SMGはSMGと同様に結晶-アモルファス転移を示

し形状記憶特性を持ちながらも、常温で非常に透明である。また、融点が0℃とSAよりも低い、結晶性モノマーであるラウリルアクリレート(LA)も使用した。

本実験では、形状記憶ゲルにはモノマーとしてSAとPDMAAmを用いた¹⁸⁾。架橋剤にはMBAAm、反応開始剤にはベンゾフェノンを用いた。これらの薬品は全て未精製で使用した。また、融点が0℃とSAよりも低い、結晶性モノマーであるLAも使用した。PDMAAmが3 mol/Lに対しMBAAが1 mol/L、またこれらのモノマーに対してMBAAが0.2 mol%, ベンゾフェノンが0.4 mol%の配分で合成した。

4 ゲルの摩擦測定

4・1 研究の背景と目的

先に述べたように、高機能を有するゲルが次々に開発され、そのゲルを用いた研究も盛んに行われている。高分子ゲルは固体でありながら主成分が液体であるため、著しく低い摩擦係数とユニークな摩擦挙動を示すことが知られており、その独特の摩擦機構¹²⁾も明らかにされつつある。機械部品間で発生する摩擦損失の低減や、医療用材料への応用を目的に、高分子ゲルの優れた低摩擦特性を利用することを考えた場合、ゲルの摩擦を定量的に評価する必要がある。そのため、DNゲルの低摩擦性の解明を目的に、測定方法の確立、測定値の評価など最適な摩擦試験方法の提案を目指し、本報では、DNゲルとSMG¹⁸⁾について、さまざまな条件でのガラス球(ソーダガラス)に対する摩擦特性を報告する。

Fig. 4 The schematic of Shape Memory Gel (SMG): The main chain of SMG is made by flexible and crystalline monomer. The property of crystalline monomer is depending on temperature, that is, it can be flexible by heating and it can keep the shape by cooling.

4・2 摩擦測定装置

摩擦試験機は、速度変動摩擦測定機 $\mu V1000$ (株式会社トリニティーラボ製) を用いた。一連動作で $0.1 \sim 100 \text{ mm/s}$ まで $1000:1$ の可変速度範囲で、最大7段階の速度で摩擦データを一度に収集することが可能である。この機能を用いず速度一定での測定も可能である。摩擦試験方法の概要を Fig. 5 に示す。図中のテーブル上にある保持具内の板状の試験片がゲルであり、ボール部が接触相手材である。今回、接触相手材としてソーダガラスを用いた。接触相手材側に荷重を負荷し、試験片を固定しているテーブルを動かして摩擦試験を行った。摩擦係数は、ロードセルにより検出した摩擦力を試験荷重で除することで算出した。試験条件を Table 1 に示す。

4・3 ゲル保持具

ゲルは金属とは違い、粘弾性体であり低摩擦な特性を

Fig. 5 Detailed drawing of the measurement part of the friction measuring machine.

もっているため固定が容易ではない。ゲルの固定法については低摩擦材料ゆえに、物理固定か化学接着かで現在議論されているところである。我々は化学接着の研究も行っているが、現在の固定方法は物理固定を採用している。ゲル側面と上面からの押付固定し、押付板、保持具本体には高摩擦処理を施している。また、温度変化に伴う摩擦係数を測定するため水槽型の加温ゲル保持具を製作した (Fig. 6, 7)。

5 実験結果

5・1 力学的性質の比較

ゲルの力学的強度の測定にはシングルコラム型引張圧縮試験機 (A&D 社, STA-1150) (Fig. 8) を用いた。シングルコラム型引張圧縮試験機は本体と計測制御部、及びデータ処理用 PC で構成されている。本体は固定クロスヘッド (引張試験時)、移動クロスヘッド、及びロードセルで構成されている。データは計測制御部から付属の PC にリアルタイムで転送、記録される。圧縮試験の際は圧縮試験用クロスヘッドを用いて圧縮測定を行った。

5・1・1 サンプルの形状と設置法

圧縮試験用サンプルはシート状サンプルから、コルクボウラーを用いて $\phi 5.5 \text{ mm}$ 切り出したものを用いた。引張試験器の治具を備え付けの圧縮試験機用のものに取り換えを行った。

Fig. 6 Fixture of gels.

Table 1 Conditions of Seven-step Continuous Friction Measurement.

Step	1	2	3	4	5	6	7
Speed (mm/s)	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0	50.0	100.0
Distance (mm)	1.0	2.0	2.0	5.0	5.0	10.0	25.0

Fig. 7 High friction surface fabrication fixture of gels and Temperature controller.

Fig. 8 Single column model tension and compression fatigue tester STA-1150.

5・1・2 測定方法

圧縮試験機では試験速度 50 mm/min で行った。得られた応力-ひずみ曲線から破断応力 σ 、破断ひずみ ε を決定した。DN ゲルと SMG の圧縮試験での S-S 曲線を Fig. 9 に示す。図に示すように DN ゲルの、圧縮破断応力は、10 MPa 以上だった。一方、SMG は、乾燥状態と濡れ状態によって違いが現れる。また、温度変化によっても支配される特性がある。さらに、60℃における S-S 曲線は J 型の曲線を示す。これは、SMG がゴムのようにふるまうことを意味している。

5・2 速度変動摩擦測定

DN ゲルと SMG の動摩擦係数を測定した値を Fig. 10 に示す。DN ゲルと SMG の動摩擦係数は、ステップ 2 からステップ 7 の範囲で、低い値に落ち着くことが見てとれる。摩擦速度が 1.0 mm/s 以上では低い摩擦係数を示し、SMG に関しては荷重が大きいほど低摩擦な挙動を示している。

5・3 温度可変摩擦測定

現在の研究において、LA-SMG の摩擦の係数の温度依存は、我々が知る限り初めて測定された。温調可能バスタブ型ゲル固定具を作製し、温度を変化させながら

Fig. 9 Compression test results for the DN-gels and SMG²⁰⁾. Fig. 10 Relations of a dynamical friction coefficient and the sliding velocity of the DN-gels and the SMG at room temperature²⁰⁾.

LA-SMGの表面摩擦測定を行った。垂直荷重 100 gf 一定下でのすべり速度に関する結果、すべり速度 1 mm/s 一定下での垂直荷重に関する結果をそれぞれ Fig. 11, Fig. 12 に示す。尚、測定値は 5 回測定の前平均を用いた。

Fig. 11 で示すように、速度が高速域になるにつれ温度変化に関係なく、動摩擦係数は減少する傾向がある。温度が 30℃ から 35℃ まで上がると、全体の動摩擦係数が増加している。また、温度が 40℃ になると、動摩擦係数のカーブの様子が単調減少のカーブから非単調カーブに変化している。それは、おそらく温められたことによる LA-SMG の表面上の特性の変化に関連があると考えられる。さらには、40℃ あたりの転移温度を上回ると、

Fig. 11 Relations of the fitted dynamical friction coefficient and the sliding velocity of the LA-SMG with the temperature change²¹⁾. Fig. 12 Relations of the fitted dynamical friction coefficient and the normal load of the LA-SMG with the temperature change at 1 mm/s²¹⁾.

表面はより柔らかくてより粘着性が増す。我々は、粘着性がおそらく摩擦の増加を誘発すると考える。Fig. 12 は、係数の垂直荷重依存性を表している。それは、動摩擦係数が垂直荷重 100 gf 周辺において、極小点を持つことを意味する。おそらく温度が増加したことによりゲル表面が柔らかくなるのが影響している。

6 結論

摩擦速度の高速領域での摩擦の低減がみられることより、低速領域では固体潤滑状態であり、高速領域では流体潤滑状態にあると考える。一般的な材料はこのような荷重・速度条件下では流体潤滑になり得ない。したがって、DNゲルは従来の常識からは考えられない領域から流体潤滑による低摩擦摺動が可能で、かつゲル材料としても従来にない高強度を持ち合わせた、非常にユニークな材料であると考ええる。SMGに関しては似たような摩擦挙動を示すが、緩和近似後の動摩擦係数をみるかぎり高速領域にて流体潤滑状態であるとは言い難い。また温度変化による摩擦係数の増加が確認できた。また、機器やプログラムでは低摩擦なゲルを固定できるゲル保持具や温度可変ゲル保持具を作製した。粘弾性体の摩擦測定ができるようゲル専用の測定プログラムへと変更した。さらに、実際にゲルの摩擦界面を観察できるよう、偏光顕微摩擦測定装置の共同開発を行った。

しかし、ゲルのような粘弾性特性をもった材料には接触面積によるエネルギー損失などの摩擦に関する影響因子がたくさんある。ゲルを新規材料として定量的な評価を行う必要があり、さらに丁寧な測定・評価が必要である。

文 献

- 1) 高分子学会編, 「新版高分子辞典」, 朝倉書店, (1998).
- 2) Osada, Y.; Kajiwar, K. "Gels Handbook", Academic Press, Vol. 1-4 (2003).
- 3) 長田義仁, 萩野一善, 伏見隆夫, 山内愛造, 「ゲル」, 産業図書, (1991).
- 4) 高分子学会編集, 吉田亮, 「高分子ゲル」, 共立出版, (2004).
- 5) Yasuda, K.; Kitamura, N.; Gong, J. P.; Arakaki, K.; Kwon, H. J.; Onodera, S.; Chen, Y. M.; Kurokawa, T.; Kanaya, F.; Ohmiya, Y.; Osada, Y. *Macromol. Biosci.* **9**, 307 (2009).
- 6) Gong, J. P.; Katsuyama, Y.; Kurokawa, T.; Osada, Y. "Double Network Hydrogels with Extremely High Mechanical Strength", *Advanced Materials*, Vol. 15 No. 14, pp. 1155-1158 (2003).
- 7) Huang, M.; Furukawa, H.; Tanaka, Y.; Nakajima, T.; Osada, Y.; Gong, J. P. "Importance of Entanglement between First and Second Components in High-Strength Double Network Gels" *Macromolecules*, Vol.40, No.18, pp. 6658-6664 (2007).
- 8) Gong, J. P. "Double Network Hydrogel with High Modulus and Toughness: A Novel Material for Load-Bearing Soft Tissues", *Kobunshi High Polymer*, **58**(5), 321 (2009).
- 9) Furukawa, H.; Gong, J. P. "Tough Hydrogel-Learn from Nature", *Advances in Science and Technology*, **61**, 40-45 (2008).
- 10) Gong, J. P. *Soft matter*, **2**, 544-552 (2006).
- 11) Kamada, K.; Furukawa, H.; Kurokawa, T.; Tada, T.; Tominaga, T.; Nakano, Y.; Gong, J. P. *Journal of Physics, Condensed Matter*, **23**, 284107 (7pp) (2011).
- 12) Gong, J. P.; Kagata, G.; Iwasaki, Y.; Osada, Y. "Surface friction of polymer gels 1. Effect of interfacial interaction", *Wear*, **251**, 1183-1187 (2001).
- 13) 日出間るり, 吉沢泰介, Khairi Bin NASARUDDIN, 古川英光, "形状記憶ゲルの繊維強化による自己修復材の創製", 日本機械学会論文集 (A編), Vol.77, No. 777, pp. 764-768 (2011).
- 14) Yokoo, T.; Hidema, R.; Furukawa, H. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, **5** (12), 1015-1021 (2011).
- 15) Amano, Y.; Hidema, R.; Gong, J.; Furukawa, H. *Chemistry Letters*, **41** (10), 1029-1031 (2012).
- 16) Harada, S.; Hidema, R.; Gong, J.; Furukawa, H. *Chemistry Letters*, **41** (10), 1047-1049 (2012).
- 17) 清水謙一ほか, 「記憶と材料」, 共立出版, (1986).
- 18) Osada, Y.; Matsuda, A. "Shape memory in hydrogels", *Nature*, Vol.376, No.6537, pp. 219 (1995).
- 19) 日出間るり, 古川英光, *工業材料*, **4**, 69-73 (2011).
- 20) Wada, M.; Hidema, R.; Chiba, T.; Yamada, K.; Yamada, N.; Gong, J.; Furukawa, H. Surface and Bulk Mechanical Properties of Soft and Wet Materials. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, **7** (2), 228-234 (2013).
- 21) Wada, M.; Gong, J.; Makino, M.; Kabir, M. H.; Furukawa, H. Surface friction of double network gels and shape memory gels. *Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference JPS Conf. Proc.* 012042(2014).