

超高強度ゲル

軟骨に匹敵する高強度・低摩擦ゲルの大荷重下での摩擦・潤滑挙動

1) 北大院理 LSW 2) 理研 ○黒川孝幸¹、古川英光¹、龔劍萍¹、長田義仁²

[1PC02]

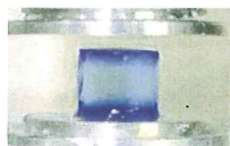
(Tel: 011-706-4994, taya@sci.hokudai.ac.jp)

ゲル（ハイドロゲル）とは高分子の三次元網目の中に多くの水を保持したものであり、物質透過性を有した開放系の物質である。そのため、高吸水性材料やソフトコンタクトレンズなどに利用されている。また、熱や pH、光、電場などへの刺激応答性を有し、アクチュエーターやセンサーといった機能性材料を目指した研究も盛んである。生体の筋肉や軟骨も水を多く含むゲル状物質からなり、これらの持つ働きは金属・プラスチックでは実現できない。これらより、ゲルは人類が用いてきた材料にない、新たな性質を秘めた材料であると考えられ、機能性を持った膜としての幅広い応用が期待される材料でもある。

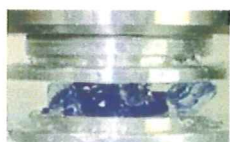
しかし、魅力的な材料であるゲルには、決定的な弱点があった。それは、乏しい力学強度である。ゲル、特に電解質ゲルは指で触るだけでたやすく壊れてしまうほど脆く、負荷がかかる応用には全く使用できない。つまり、人類が生まれた時から有している、膝軟骨ほどの強度を持ったゲルは、現在的人类でも成し得ていなかったのである。

ゲルの機械的強度の低さは、その不均一な網目構造に起因する。外部から加わった応力が少数の高分子鎖に集中し、そこから破壊が起こるのである。これまで、ゲルの強度を克服するためゲルの構造を均一にしようと多くの研究がおこなわれてきた。しかし、筆者らは構造を均一にするのではなく、起こり始めた破壊を伝播させないという全く新しい視点で高強度化に取り組んだ。そこで注目したのが生体軟骨の持つ複合構造である。生体軟骨は三次元的に張り巡らされた硬いコラーゲン繊維と、その隙間にあるブラシのようなプロテオグリカン集合体によって構成されている。生体軟骨のような複合構造をゲルに導入し、生体軟骨に匹敵するほどの耐荷重性や生体適合性を有した超高強度ゲルの創製に成功した。筆者らはこの超高強度ゲルを、その構造からダブルネットワーク (DN) ゲルと名付けた。DN ゲルは、硬くて脆い強電解質性のポリ[2-アクリルアミド-2-メチルプロパンスルホン酸] (PAMPS) ゲルと、柔軟に変形でき中性のポリアクリルアミド (PAAm) ゲルの組み合わせによってたがいに独立な 2 種の高分子網目構造を持つゲルである。DN ゲルの原料となる 1 種のみの高分子網目構造をもったゲルの圧縮破断強度が 0.4MPa (約 4kgf/cm²) であるのに対し、DN ゲルのそれは 20MPa (約 200kgf/cm²) と約 50 倍以上に増加する。さらにゲルの組成を変えることによって、40MPa (約 400kgf/cm²) の大荷重にも耐えることができる。生体関節軟骨にかかる応力がおよそ 3~18MPa であることを考えれば、DN ゲルの持つ優れた強度はそれに匹敵する値である。また、硬くて脆い強電解質ゲルの破断ひずみ率が約 40%であるのに対し、DN ゲルでは 90%以上と非常に高い値を示しており、激しい変形にも耐えることができる。

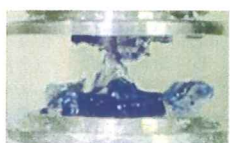
普通のゲル



40%の圧縮で
壊れてしまう



4kg/cm²まで
耐えられる



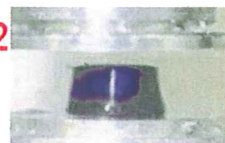
DNゲル



90%の圧縮に
耐える



200kg/cm²
まで耐えられる



また、ゲルには固体では実現できない低摩擦性・低摩耗性があり、条件によって摩擦係数を 10^{-4} まで下げることができる。つまり、この超高強度ゲルは 1cm^2 のシートに 400kg の荷物を載せても壊れず、横から数 10gf の力で滑らすことができる。

また実際にウサギを用いたゲルの皮下埋植試験を行い、その生体適合性を調べた。すると、生体適合性や生体内劣化に関して良好な結果が得られた。さらにウサギの膝関節を対象とした人工半月板を作成し移植試験を行った結果、短期間ではあるが良好な結果が得られた。このように現時点では動物実験であるものの、ゲルを人工関節代替素材として用いることの可能性が示唆されてきており、将来的に人間への応用も可能であると考えている。

超高強度 DN ゲルの可能性は人工軟骨や半月板としての応用だけではない。例えば、臓器や人工血管、眼球等の生体代替材料への応用にも用いることができる。現にゲル上に血管内皮細胞を培養し、人工血管とする研究も行っている。さらに、ゲルには昆布などの海洋付着生物の発芽抑制効果を示すものがあり、こういったゲルを高強度化し、船底に施すこともできる。さらに言えばゲルは固体より流体抵抗が小さいために、より燃費よく船を進ませることも可能となるであろう。

なにより原料の 90%が水という非常に環境にやさしい材料であることも忘れてはならない。

【適用分野】 組織培養担体・人工軟骨・人工臓器・ロボット工学・電解質保持担体・船底塗料・魚網