

## 109 人工関節軟骨の動的変形挙動

## Dynamic Deformation Behavior of GELs for Artificial Articular Cartilage

○ 清水 大輔 (室蘭工大院)      正 藤木 裕行 (室蘭工大)  
 正 臺丸谷 政志 (室蘭工大)      塩崎 修 (室蘭工大)

Daisuke SHIMIZU, Muroran Institute of Technology, Mizumoto-cho 27-1, Muroran-shi, Hokkaido  
 Hiroyuki FUJIKI, Muroran Institute of Technology  
 Masashi DAIMARUYA, Muroran Institute of Technology  
 Osamu SHIOZAKI, Muroran Institute of Technology

**Key words:** Impact, Articular cartilage, Artificial cartilage, Double network gel, Strain rate dependency

## 1. 緒言

高齢化の進む現在, 変形性膝関節症や慢性リウマチなど関節軟骨に疾患を持つ患者が増加傾向にあり, この治療法として人工関節置換術が広く行われている。しかし耐食性金属やセラミックス, 超高分子量ポリエチレンの組み合わせからなる人工関節は摩耗による緩みなどから多くの問題が発生し, 術後 10 年程度で再置換手術が必要となるケースが多い。この問題の解決策として関節軟骨の病変部位のみを人工関節軟骨に置換する治療法が検討されている。その有力な材料が近年開発されつつあるが, 関節軟骨の複雑な機能や構造などを考えると, 同等の機能を有する人工関節軟骨の開発は難しく, 未だに実用化には至っていない。

関節軟骨の主な機能として, 円滑な関節の可動を補助するための潤滑機能, 段差を飛び降りたときなどに生じる衝撃を緩和するための衝撃吸収機能(圧縮変形特性)がある。よって, 人工関節軟骨を利用するために関節軟骨の機械的特性, 特に報告の少ない衝撃荷重負荷時の挙動を明らかにすることは重要である。

本研究では, 生体関節軟骨および人工関節軟骨としての応用が考えられている高強度ゲル<sup>(1)</sup>であるダブルネットワークゲル(DNゲル)に関して衝撃圧縮試験ならびに静的圧縮試験を実施し, 動的機械的特性の比較を行った。

## 2. 静的圧縮試験

万能材料試験機(INSTRON5566)を使用し静的圧縮試験を行った。試験片は生体関節軟骨として豚膝蓋軟骨, DNゲルとして PAMPS-PAAm, PAMPS-PDMAAm, Cellulose-PDMAAm, Cellulose-Gelatin の 4 種類<sup>(1)</sup>を用いた。以後, それぞれのゲルは P-PA, P-PD, C-PD, C-G と表記する。また DNゲルが開発される前に人工関節軟骨としての利用が期待されていた PVA ハイドロゲルも試験片として用いた。試験条件は全試験片についてひずみ速度  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  と  $10^0 \text{ s}^{-1}$  の 2 種類である。

Fig. 1 に得られた応力-ひずみ線図を示す。各 DNゲルは生体関節軟骨より大きな変形を示した。生体関節軟骨ならびに C-PD, C-G はひずみ速度の増加によって応力値が大きくなっており, ひずみ速度依存性がみられる。しかしその影響は生体関節軟骨と比較し DNゲルのそれは非常に小さいものであった。また P-PA と P-PD はこの速度領域ではひずみ速度依存性はほとんどみられなかった。PVAゲルに関しては生体関節軟骨からもっとも遠い機械的特性を示した。

## 3. 衝撃圧縮試験

3.1 スプリット・ホプキンソン棒法の測定原理 Fig. 2 にスプリット・ホプキンソン棒法の概略図を示す。入出力

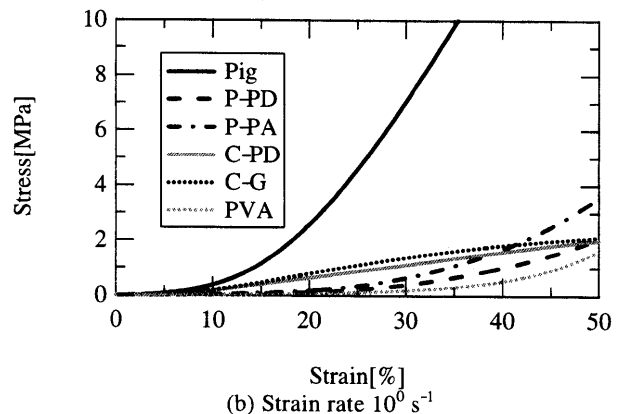
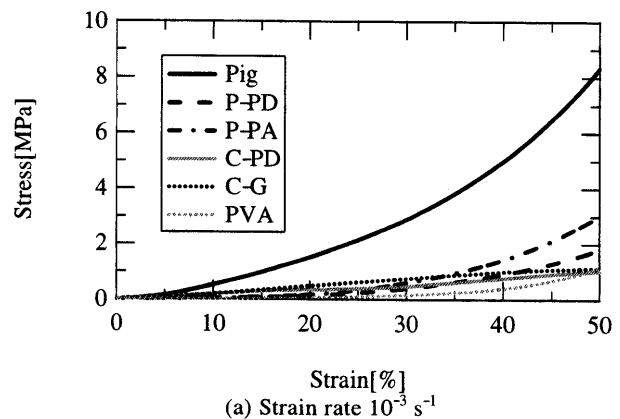


Fig. 1 Stress-Strain curves of specimens in static loading

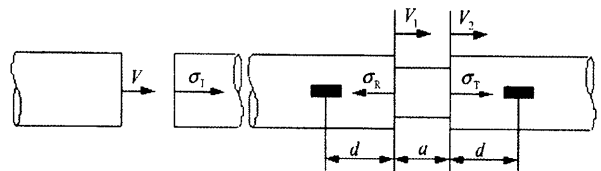


Fig. 2 Schematic diagram of split Hopkinson presser bar

伝達棒の質量密度, 縦弾性係数, 弾性波伝播速度をそれぞれ  $\rho$ ,  $E$ ,  $c$ , 試験片の長さを  $a$  とする。

衝撃棒と入力伝達棒の衝突で生じた入射圧縮応力波  $\sigma_1$  は入力伝達棒内を右方へ伝播し試験片との接触面に達する。ここで  $\sigma_1$  は試験片に伝わる透過応力波と入力伝達棒に反射する反射引張応力波  $\sigma_R$  とに分かれる。また試験片内に伝わった応力波は出力伝達棒との接触面に達し, ここでさらに試験片内に反射する応力波と出力伝達棒に透過する透過応力波  $\sigma_T$  とに分かれる。今, 入力伝達棒と出力伝達棒の試験

片接触面におけるそれぞれの速度  $V_1, V_2$  と応力との関係を考慮すると、試験片のひずみ  $\varepsilon$  は

$$\varepsilon = \frac{1}{\rho c a} \int (\sigma_1 + \sigma_R - \sigma_T) dt$$

となり、またひずみ速度  $\dot{\varepsilon}$  は次のように与えられる。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\rho c a} (\sigma_1 + \sigma_R - \sigma_T)$$

なお、試験片内の応力  $\sigma$  は両端面の応力値の平均で与えられるとし、棒および試験片の断面積をそれぞれ  $A, A_0$  とすると、

$$\sigma = \frac{A}{A_0} \frac{\sigma_1 - \sigma_R + \sigma_T}{2}$$

となる。以上のように入力および出力伝達棒を伝播する応力波  $\sigma_1, \sigma_R, \sigma_T$  を知るにより、試験片のひずみ  $\varepsilon$ 、ひずみ速度  $\dot{\varepsilon}$ 、および応力  $\sigma$  の関係を知ることができる。

**3.2 衝撃圧縮試験装置** Fig. 3 に衝撃試験で使したスプリット・ホプキンソン棒法を応用した衝撃圧縮試験装置の概略図を示す。生体関節軟骨、DNゲルの低強度、大変形特性を考慮して、衝撃棒、入・出力伝達棒には直径 20mm、長さ 1000mm の PMMA (Poly methyl methacrylate) 製丸棒を使用した。入力伝達棒には試験片との接触面から 700mm と 200mm の位置に、出力伝達棒にも同様に試験片との接触面から 200mm の位置にひずみゲージをそれぞれ 2 枚ずつ軸対称に計 6 枚貼付して、衝撃応力の時間変化についての挙動を測定し、試験片の応力、ひずみ、ひずみ速度を算出した。衝撃棒は衝突速度約 5m/s とし、コンプレッサーを使用し打ち出している。

**3.3 試験結果および考察** Fig. 4 に得られた応力-ひずみ線図を示す。静的試験と同様、各 DNゲルは生体関節軟骨よりも大きな変形を示した。

Fig. 5 に、生体関節軟骨ならびに P-PD の静的試験と衝撃試験の結果を併せた、ひずみ速度依存性についてのグラフを示す。これらは各ひずみ量に対する応力値をひずみ速度の関数で表したものである。生体関節軟骨は本実験の全ひずみ速度範囲にわたってひずみ速度依存性がみられる。特に衝撃荷重下であるひずみ速度  $10^3 \text{ s}^{-1}$  あたりではひずみ速度の増加に伴い、応力値が著しく増大しており、大きなひずみ速度依存性を示している。P-PD はひずみ速度  $10^0 \text{ s}^{-1}$  あたりまで応力値にほぼ変化がみられないが、ひずみ速度  $10^3 \text{ s}^{-1}$  あたりでは僅かな依存性を示している。また P-PA は P-PD と同様の傾向がみられ、C-PD と C-G は全ひずみ速度範囲にわたって依存性を示した。このことから DNゲルは種類によ

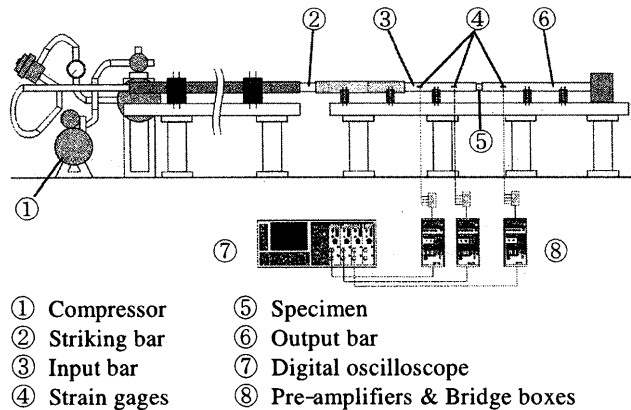


Fig. 3 Experimental setup for impact compressive test by split Hopkinson bar test

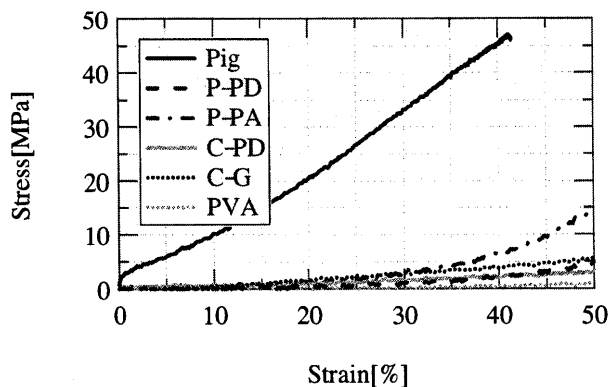
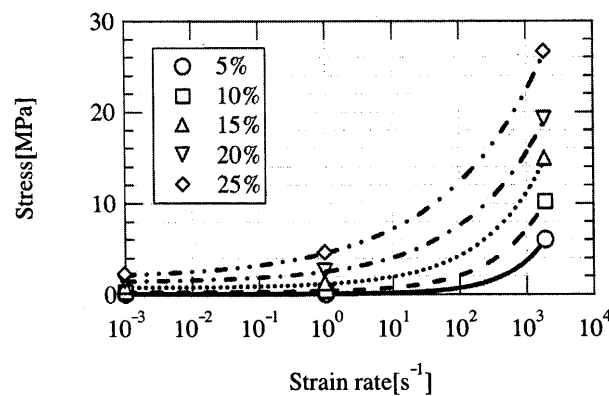
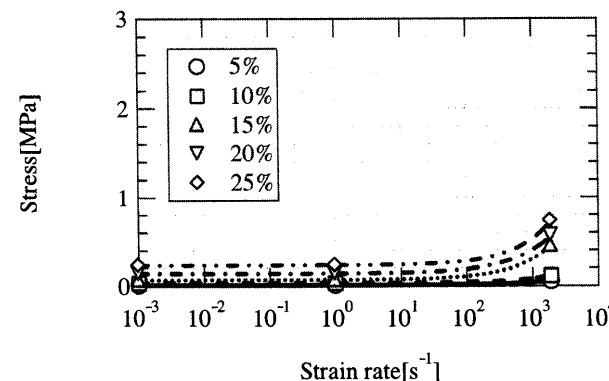


Fig. 4 Stress-Strain curves of specimens in impact loading



(a) Articular Cartilage (Pig)



(b) PAMPS-PDMAAm (P-PD)

Fig. 5 Stress-Strain rate curves of specimens

て依存性のある速度領域が異なることがわかった。

#### 4. 結 言

本研究では、豚膝蓋軟骨と人工関節軟骨としての応用が考えられている 4 種類の DNゲルに対して静的圧縮試験ならびにスプリット・ホプキンソン棒法を応用した試験装置を用いて衝撃圧縮試験を行い、以下の結言を得た。

- 1) 静的圧縮試験ならびに衝撃圧縮試験の結果より、DNゲルは生体関節軟骨と比較して大きな変形を示す。
- 2) 生体関節軟骨、DNゲル共にひずみ速度依存性がみられた。その程度については、DNゲルは生体関節軟骨と比較して小さく、またその種類によってひずみ速度依存性のある速度範囲が異なる。

#### 参考文献

- (1) 東 千夏 他：4 種類の高強度超低摩擦ダブルネットワークハイドロゲルの生体内劣化特性の生体工学的評価。日本バイオメカニクス学会誌 26(2005), 197-204