

509 PAMPS-PDMAAm DN ゲルの In vitro 摩擦摩耗特性

Friction and Wear Characteristics of PAMPS-PDMAAm DN Gel in the In Vitro Experimentation

○ 学 小山 裕示 (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)

Yuji KOYAMA, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran, Hokkaido
Hiroyuki FUJIKI, Muroran Institute of Technology
Masashi DAIMARUYA, Muroran Institute of Technology
Osamu SIOZAKI, Muroran Institute of Technology

Keywords : Friction, Wear, In vitro, PAMPS-PDMAAm DN gel, UHMWPE

1. 緒言

現在、膝関節疾患の患者には人工膝関節置換術が数多く行われている。しかし、セラミックスと超高分子ポリエチレン(以下 UHMWPE)からなる人工膝関節にはいくつかの問題点が指摘されている。その中で最も深刻な問題は、人工膝関節と生体組織の間に緩みが生じることである。そのため、術後十数年経過すると再置換が必要となり、患者への肉体的・精神的負担となっている。

この問題の解決には、低弾性率を持つ材料を摩擦面に用い、人工関節の潤滑性能を向上させ、摩耗を引き起こす固体間接触を防ぐことが望ましい。これを実現するためには、摩擦面の材質として、生体軟骨に類似した含水性・多孔質性を有する人工軟骨が考えられており、各種ゲルが実用化を目指して検討されている。近年、PAMPS-PDMAAm ダブルネットワーク(以下 DN)ゲルが生体内劣化特性¹⁾、耐摩耗特性²⁾から人工軟骨として期待できる材料であることが知られ、現在、PAMPS-PDMAAm DN ゲルを臨床応用するため様々な研究が行われている。

本研究では、生体内での摩擦を生体外(In vitro)で再現し摩擦摩耗試験を行い、摩擦係数、生体軟骨の損傷を評価することで、DN ゲルが生体軟骨に与える損傷の程度を明らかにすることを目的としている。

2. 摩擦摩耗試験

2.1 試験装置

Fig.1 に本研究で使用する摩擦摩耗試験機の概略図を示す。回転アームの自重により下部試験片に垂直荷重がかかる。この状態で下部試験片を往復動させることで摺動し、発生する摩擦力をひずみゲージで測定する。

雑菌による軟骨細胞への影響を除去するために、試験に使用する器具を滅菌し使用する。また、蒸発防止カバーで密閉することで、培養潤滑液の蒸発防止および雑菌の混入を防ぎ、無菌環境を維持している。

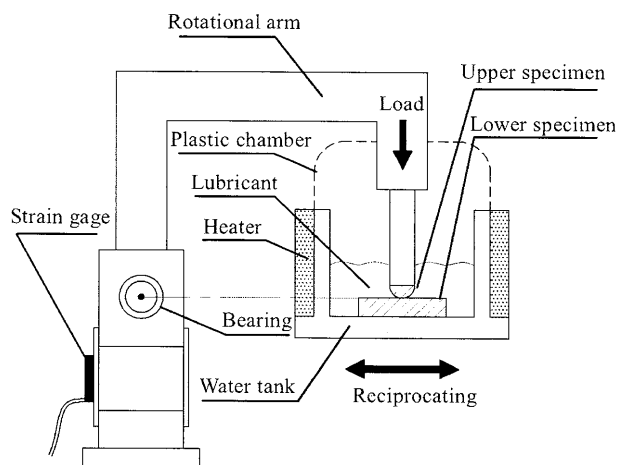


Fig.1 Friction and wear experimentation machine

2.2 供試材

本研究では、生体軟骨として日本白色家兔の後肢膝関節を採取し、大腿骨内顆(か)を上部試験片として使用する。また、脛骨内顆, UHMWPE, PAMPS-PDMAAm DN ゲルの3種類を下部試験片として使用する。

2.3 試験条件

摩擦摩耗試験は生体内で膝関節が摩擦している状況を再現するように試験条件を設定した。試験条件を以下に示す。

- ・ 荷重：約 4.5[N](兎の体重約 3.7[kgf]の 1/8)
- ・ ストローク：5[mm](往復 10[mm])
- ・ 平均摺動速度：10[mm/s]
- ・ 摺動回数：50 万回[cycle]
- ・ 培養潤滑液：DMEM 培地
- ・ 培養潤滑液温度：37.0±1.0[°C]

2.4 上部試験片摩擦位置の変更

本研究では、試験後の上部試験片の組織標本を作製し、生体軟骨の損傷を確認する。組織標本は軟骨細胞が作り出すプロテオグリカンに赤く染色するサフラニン O 染色を行う。Fig.2 にサフラニン O 染色を行った大腿骨内顆の組織標本を示す。

当初、取り付け方が容易であるため摩擦位置 1 で試験を行っていた。しかし、上部試験片の組織標本で確認したところ軟骨の端で摩擦していたため、軟骨の中央位置である摩擦位置 2 で試験を行った。その後、兎の膝関節軟骨で最も負荷がかかり、軟骨が最も厚くなっている位置である摩擦位置 3 が最も適切であると考え、摩擦位置 1, 2 に加え、摩擦位置 3 でも試験を行うこととした。

本研究では生体を試験片として使用しているため、生体の個体差があると考えられ、検体数を増やして評価する必要がある。摩擦位置を変更することにより、本来ならデータをはじめから取り直す必要があるが、本研究では試験準備時間を含め 1 回の試験で多くの時間が必要である。そこで、摩擦位置の違いによる影響を評価し、影響がなければ摩擦位置 1, 2 のデータも検体数として扱うこととした。よって、本研究では摩擦位置の違いによる影響を評価する。

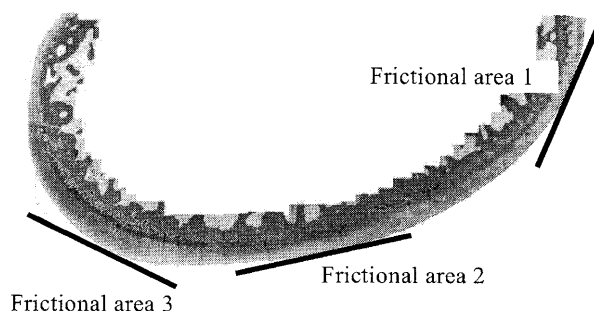


Fig.2 Frictional areas in femoral cartilage

3. 試験結果

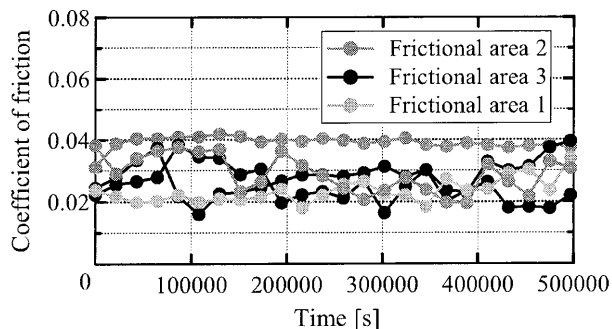
3.1 摩擦係数

Fig.3 に各試験で測定された摩擦力から算出した摩擦係数の変動を示す。(a)の対生体軟骨の摩擦係数は0.02~0.04, (b)の対 PAMPS-PDMAAm DN ゲルの摩擦係数は0.06~0.14, (c)の対 UHMWPE の摩擦係数は0.13~0.53 程度の値を示した。なお、対 PAMPS-PDMAAm DN ゲルの摩擦位置3のデータは試験途中で腐食が見られたため、腐食が見られなかったデータを n1, 腐食が見られたデータを n2 とした。n2 のデータは約 20 万サイクルまでを有効なデータとして評価した。

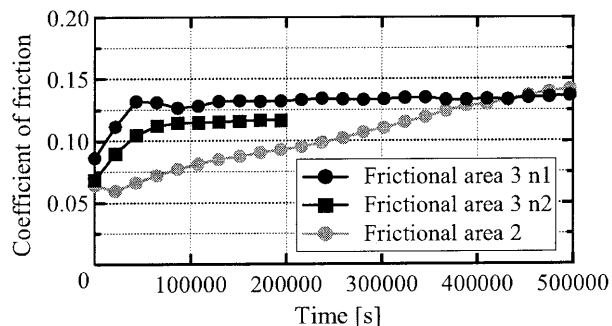
3.2 上部試験片の損傷

軟骨は表面から輝板, 表層, 中間層, 深層, 石灰化層の 5 層構造となっており, 本研究では上部試験片である大腿骨軟骨が試験後どの層まで摩耗が進行したかで評価した。Fig.4 に各試験片の摩耗進行度を示す。なお, grade は損傷が見られない場合を 1, その後, 輝板から深層までの摩耗を 2~5 とした。

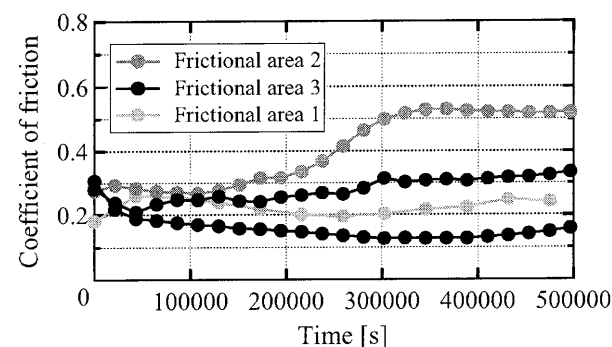
Fig.4 より対生体軟骨, 対 PAMPS-PDMAAm DN ゲルは損傷がほとんど見られないか, もしくは輝板までの損傷が見られた。対 UHMWPE は中間層もしくは深層まで損傷が見られた。



(a) Natural cartilage vs. natural cartilage



(b) Natural cartilage vs. PAMPS-PDMAAm DN gel



(c) Natural cartilage vs. UHMWPE

Fig.3 Coefficient of friction for each specimen

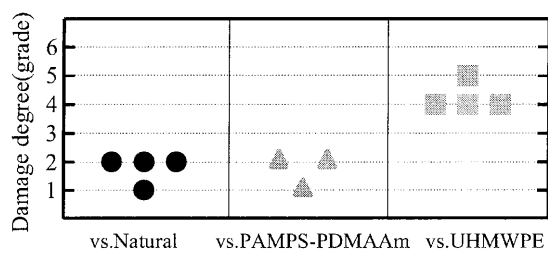


Fig.4 Damage degree of upper specimen

4. 考察

4.1 摩擦位置の違いによる影響

Fig.3(a)より, 全ての摩擦係数が 0.02~0.04 程度である。また, 摩擦位置 2, 3 における同じ位置での 2 つの摩擦係数は, 共に変動幅が最大で 0.02 となっている。よって摩擦位置の違いにより, 値, 変動幅に差異が見られないため, 摩擦位置の違いによる影響はないと考えられる。

Fig.3(b)より, 摩擦位置 3 の 2 つの摩擦係数は約 5 万サイクルまで上昇し, その後ほぼ一定の値を示している。一方, 摩擦位置 2 は 50 万サイクルまで上昇しており, 摩擦位置の違いによる影響があると考えられる。

Fig.3(c)では, 摩擦位置の違いにより値に大きな差がある。よって摩擦位置の違いによる影響があると考えられるが, 摩擦位置 3 の 2 つの摩擦係数を比較すると個体差も大きく, 摩擦位置の違いによる影響のみであるかどうかは判断できない。

4.2 摩擦係数による DN ゲルの評価

Fig.3 より, 対生体軟骨は値, 変動ともに小さい。一方, 対 PAMPS-PDMAAm DN ゲルにおいて値は対生体軟骨よりも大きい, 変動が小さく安定している。対 UHMWPE は値, 変動ともに最も大きい。このことから摩擦係数において PAMPS-PDMAAm DN ゲルは UHMWPE よりも人工軟骨の材料として優れており, 生体軟骨に近い材料であるといえる。

4.3 生体軟骨の損傷による DN ゲルの評価

Fig.4 より, 対生体軟骨, 対 PAMPS-PDMAAm DN ゲルはほとんど損傷がなく, 差は見られなかった。対 UHMWPE は肉眼で確認できるほどの損傷が見られ, 他の 2 つ比較し, 厳しい摩擦環境が予想される, よって摩擦係数による DN ゲルの評価と同様, PAMPS-PDMAAm DN ゲルは UHMWPE よりも優れた材料であるといえる。

5. 結言

本研究では, 3 種類の試験片を使用し摩擦摩耗試験を行い, 以下の結言が得られた。

- 1) 対 PAMPS-PDMAAm DN ゲルに関しては摩擦位置の影響があると考えられる。
- 2) 対 UHMWPE の摩擦係数にはばらつきがあり, 摩擦位置の違いによる影響とは断言できないため, 試験数を増やし, さらなる検討が必要である。
- 3) PAMPS-PDMAAm DN ゲルは UHMWPE より人工軟骨材料として優れており, 生体軟骨に近い材料である。

参考文献

- 1) 東千夏 他, 4 種類の高強度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, 日本臨床バイオメカニクス学会誌 26(2005), 197-204.
- 2) Yasuda K, et al. Biomechanical properties of high-toughness double network hydrogels. Biomaterials, 26, 4468-75, (2005).