

# 感圧紙を用いた超高分子量ポリエチレン/軸受鋼表面間の 接触面圧計測

Measurement of contact pressure between surfaces of ultra-high molecular weight polyethylene and SUJ2  
using a pressure-sensitive paper

松原 一喜\*\*, 平木 克裕\*\*, 大塚 宏一\*\*  
Kazuki MATSUBARA, Katsuhiko HIRAGI, Koichi OTSUKA

## 概要

本研究では感圧紙を用いて超高分子量ポリエチレン/軸受鋼表面間の接触面圧について計測を行った。また、計測した値とヘルツ接触理論より算出した値とを比較して接触面圧の新たな推定法の必要性を検討した。感圧紙による接触面圧の計測では平均接触面圧を圧痕の輪郭形状から求めることができた。最大接触面圧および接触面圧分布については圧痕の濃淡に明確な差が見られなかったため求めることができなかった。感圧紙によって計測した値（平均接触面圧）はヘルツ接触理論により求めた値よりも相対的に小さくなることが示され、超高分子量ポリエチレン（樹脂材料）へのヘルツ接触理論の適用に検討の余地が残った。新たな接触面圧の数値解析法を検討した結果、感圧紙によって計測した値と強い相関があることがわかった。

## 1. はじめに

歯車や軸受、はめ合い構造など工学分野では複数の部材が接触することによって力の伝達または支持がされており、その部材間に生ずる接触面圧を明らかにするため多くの研究が行なわれている<sup>[1][2]</sup>。接触面圧を算出する理論としてはヘルツ接触理論がよく用いられている。この理論にはいくつかの前提条件があり、例えば接触域には垂直に荷重が作用すること、接触域は固体表面積に比べて極めて小さいこと、接触域では摩擦がないことなどが挙げられている<sup>[3][4]</sup>。金属材料同士の接触においてヘルツ接触理論による値は計測値に近いことが示されている<sup>[5]</sup>。しかしながら、樹脂材料と金属材料の接触問題では弾性変形が大きくなることから、接触域が極めて小さいとは言い難く、ヘルツ接触理論の適用に疑問が残る。また、接触面圧を推定する別の方法として有限要素解析などもあるが、専門的な知識・技術を要するため専門家以外に簡単に利用できないのが現状であると思われる。このため、実用レベルにおいて問題のない程度に簡単に接触面圧を推定できる方法が望まれる。

超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）は摺動性、耐摩耗性に優れた材料として機器の摺動部や人工関節などに用いられている。一般的に相手面には金属材料などを用いることが多く、UHMWPE 側の摩耗や損傷が問題と

なっている<sup>[6]</sup>。このような摺動部の形状設計において接触面圧の推定は耐久性を予測する上で重要であると考えられる。そこで、本研究では超高分子量ポリエチレン/軸受鋼表面間の接触面圧を推定するための数値解析法を検討する前段階として、感圧紙による接触面圧の計測を行った。また、計測した値とヘルツ接触理論により算出した値とを比較し新たな推定法の必要性などについて確認した。

## 2. 実験方法

超高分子量ポリエチレン/軸受鋼表面間の接触面圧計測に用いた圧縮試験装置を図 1 に示す。圧縮試験装置は荷重を検出するための力センサ、駆動用ステッピング

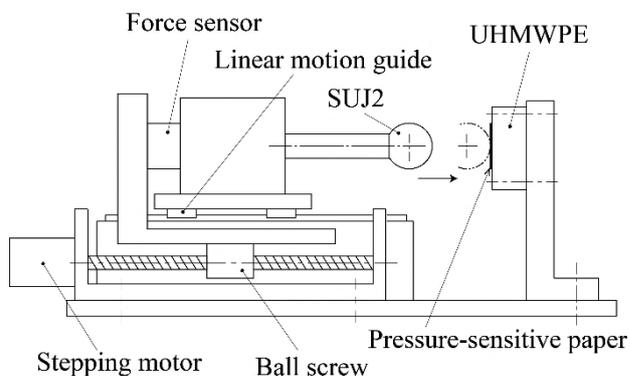


図 1 圧縮試験装置の概略図

\* 原稿受理 平成 26 年 12 月 5 日

\*\* 機械工学科

モータ、リニアガイドなどで構成されている。試験片には工業用 UHMWPE (平均分子量約 550 万, 板厚  $t = 5$  mm, 10mm) の平板と軸受鋼 SUJ2 の鋼球 ( $S \phi 19.05$  mm,  $Ra \approx 0.02 \mu\text{m}$ ) を用いた。UHMWPE 平板は  $20 \times 20$  mm に加工したあと、ステンレス鋼製の土台に固定している。接触面には  $10 \times 10$  mm に切った感圧紙を貼り付け圧痕の採取を行なった。感圧紙については低圧用および中圧用を用いている。その他の試験条件は圧縮荷重を UHMWPE の降伏応力を考慮して 1, 5, 10, 15 kgf に、負荷時間を感圧紙の反応時間をもとに 5 秒間に設定した。試験は各条件において 5 回とし、クリープ変形を考慮して同一箇所を避けて行なった。

圧縮試験より採取した感圧紙の圧痕は光学顕微鏡により撮影しラベリング画像処理を施して接触面積の算出に用いた。本実験は球面と平面の接触問題であるため圧痕の輪郭形状を円と仮定して接触面積から円相当径を計算し平均接触面圧を求めた。ラベリング画像処理を行なうにあたってはスケール合わせのためピクセル数の調整と二値化処理 (50% を基準に 2 値化) を事前に行なっている。また、撮影画像から圧痕の境界付近が図 2 のように波形になることが示されている。実際の接触域は圧痕輪郭形状の外接円に相当すると考えられるため、ラベリング画像処理から求めた円相当径  $d_s$  と実際の圧痕の外接円直径  $D$  の 2 つの値をもとに次式のように補正係数を求めた。

$$X = \frac{D}{d_s}$$

この補正係数によってラベリング画像処理より求めた圧痕の円相当径  $d_s$  から機械的に外接円直径  $D$  を求めることができる。図 3 に補正係数の値を示す。補正係数は圧縮荷重が増加するにつれて対数的に減少し、また UHMWPE の厚みの違いによっても異なることが示された。接触面圧は相対的に UHMWPE の厚みが薄い方が大きくなると考えられる。また圧縮荷重も同様に接触面圧に関係があることから、補正係数の値には平均接触面圧の大きさが関与していると考えられる。

平均接触面圧の値は鋼球の半径  $R_1$  と弾性接近量  $\delta$  から計算し求めた。SUJ2 は UHMWPE に比べてヤング率が非常に大きい剛体とみなすと、弾性接近量  $\delta$  は鋼球が平板に押し込まれた量、すなわち幾何学的に鋼球の半径  $R_1$  と圧痕の外接円半径  $R$  から次式のように与えられる。

$$\delta = R_1 - \sqrt{R_1^2 - R^2}$$

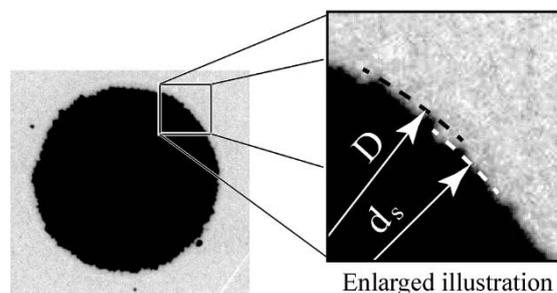


図 2 圧縮試験後の圧痕形状 (グレースケール画像)

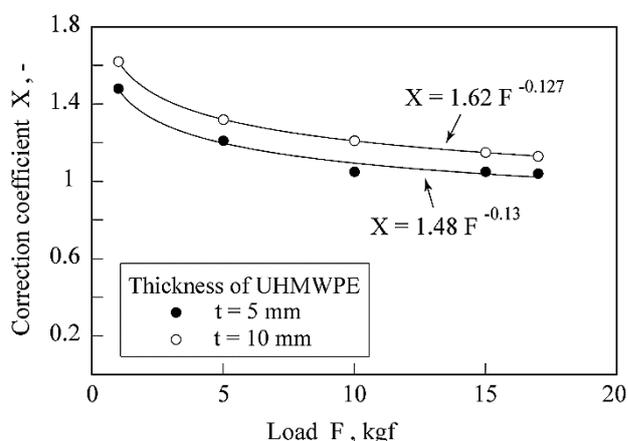


図 3 圧痕の外接円直径算出時の補正係数と圧縮荷重との関係

このため、平均接触面圧  $P$  は次式のようにになる。

$$P = \frac{Mg}{2\pi R_1 \delta}$$

ここで、 $M$  は圧縮荷重、 $g$  は重力加速度で、分母は接触面の表面積を表す。なお、最大接触面圧および接触面圧分布については圧痕の濃淡に明確な差が見られなかったため、本実験条件において求めることができなかった。

また比較・検討のため、ヘルツ接触理論による平均接触面圧の算出を行なった<sup>[3][4]</sup>。工業用 UHMWPE と SUJ2 の物性は文献値を参考にヤング率をそれぞれ 1.2 GPa と 207 GPa、ポアソン比を 0.46, 0.3 とした<sup>[1][7]</sup>。なお、UHMWPE のヤング率はダイナミック超微小硬度計 (DUH - 211, 試験荷重: 500 mN) で計測した値を用いている。

### 3. 実験結果および考察

感圧紙を用いた超高分子量ポリエチレン/軸受鋼表面間の平均接触面圧の計測結果を図 4 に示す。UHMWPE の板厚が 5 mm の場合、平均接触面圧は圧縮荷重の増加と

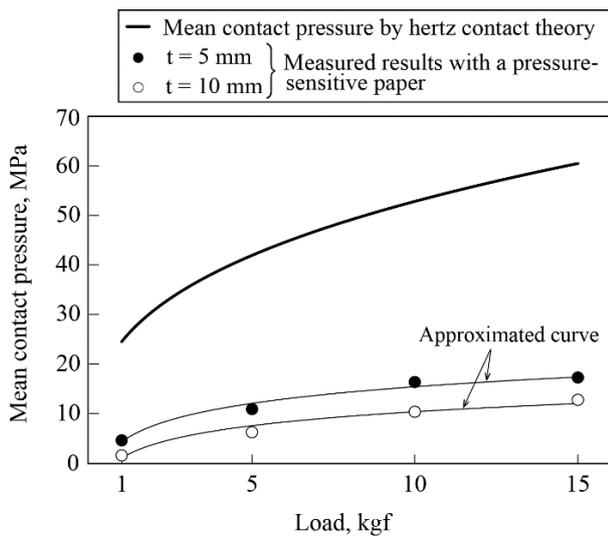


図4 平均接触面圧の計測結果

ともに対数的に増大し、15 kgfにおいて17.3 MPaの値が示された。板厚10mmの場合においても同様に対数的な増加傾向が見られ、相対的に板厚5mmの場合よりも低い値となることが示されている。ヘルツ接触理論による平均接触面圧の値（太い実線）は感圧紙によって計測した値よりも遥かに大きな値となった。この値はUHMWPEの降伏応力を超えており、圧縮荷重15 kgfにおいて60.5 MPaが示されている<sup>[6]</sup>。目視観察では接触面に大きな塑性変形は見られていないため、UHMWPE/軸受鋼表面間へのヘルツ接触理論の適用に検討の余地が残った。

次に接触面圧を簡単に推定するための方法を検討したので報告する。今回は接触モデルを用いてばね定数による反力の釣合い式をもとに接触面圧の解析を行なった。本数値解析は積分方程式などを用いておらず、簡単に扱えるプログラムとなっている。また、どのような自由曲面の接触モデルでも解析結果を検討できるのが特徴である。図5に数値解析に用いた接触モデルを示す。今回の接触モデルではヤング率の大きさから軸受鋼を剛体の球面とみなし、またUHMWPE平板を等質等方線形弾性体として各座標点の弾性接近量に相当する値（平面に押し込まれた量： $h$ ）を与え、ばね定数により反力を算出した。この反力の総和が圧縮荷重よりも小さい場合には接触モデルの球面を $\mu\text{m}$ 単位で平面側へと変位させ繰り返し反力の計算を行なう。反力の総和が圧縮荷重と等しくなった時点で、メッシュ間隔 $0.05 \times 0.05 \text{ mm}$ において各座標点の圧力を微小面積 $0.0025 \text{ mm}^2$ より算出し、接触域におけるすべての座標点の平均値を平均接触面圧とした。この解析方法についてはばね定数を用いているため弾性接触範囲内においてのみ計測結果と比較を行なうものと

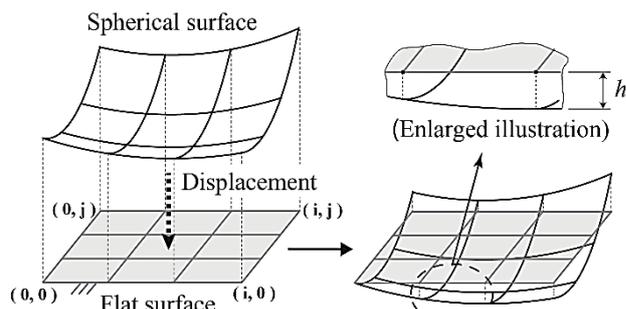


図5 数値解析の接触モデル

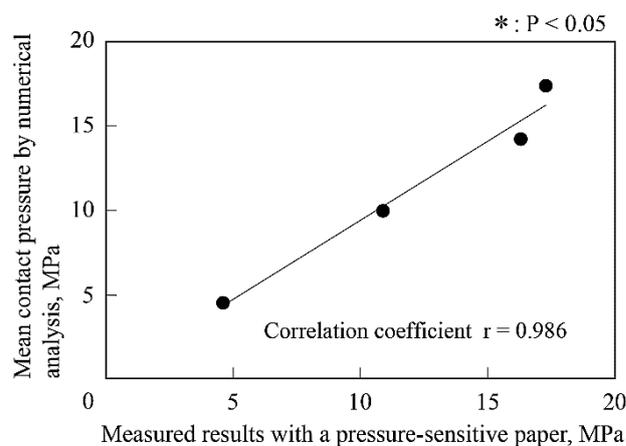


図6 計測結果と数値解析結果の比較 (t=5mmの場合)

する。また、本数値解析では接触面圧は荷重方向変位のみ支配されると仮定している。これはJl. A. ガーリンの記した弾性接触論における弾性接触問題の基本的境界条件であるIV型（剛体の圧力が加わる弾性体表面の部分上に摩擦が存在しない場合）を参考にした<sup>[2]</sup>。この場合は接触面圧が接触域に垂直な方向の変位のみ支配されるとされている。この考え方を基本に、材料の一方を剛体として数値解析を行なった。なお、メッシュ間隔については表面粗さやうねりの影響などを考慮して $0.05 \times 0.05 \text{ mm}$ 間隔としている。

図6に解析結果を示す。横軸には感圧紙によって計測した平均接触面圧を、縦軸には接触モデルを用いて反力の釣合い式をもとに解析した結果を示す。数値解析の結果は感圧紙より求めた平均接触面圧とよく一致していることがわかった。また、相関係数を調べたところ、 $r = 0.986$ と強い相関があることが示された。今後についてはメッシュ間隔を細かくするなどの検討を進めると共に、UHMWPEの厚みを変更して解析を行なう予定である。加えて、今回は材料の一方を剛体と仮定し解析を行なっているため、この点についても改良を進める考えである。

## 4. まとめ

本研究では超高分子量ポリエチレン/軸受鋼 SUJ2 表面間の接触面圧について感圧紙を用い計測を行なった。また、計測した値とヘルツ接触理論により算出した値とを比較して接触面圧の推定法について検討した。その主な結果を以下に示す。

- (1) 感圧紙を用いた超高分子量ポリエチレン/軸受鋼表面間の接触面圧計測では UHMWPE の板厚が 5mm の場合、平均接触面圧は圧縮荷重が増加するにつれて対数的に増大することが示された。圧縮荷重 15 kgf においては 17.3 MPa の値が示されている。また板厚 10mm の場合においても同様に対数的な増加傾向が見られ、相対的に板厚 5mm の場合よりも低い値となることが示された。
- (2) ヘルツ接触理論より求めた平均接触面圧の値は感圧紙を用いて計測した値よりも遥かに大きな値となった。また、ヘルツ接触理論は材料の厚みが計算結果に反映されないなど、計測値との違いが見られた。
- (3) 接触モデルを用いて反力の釣合い式をもとに接触面圧を解析した。その結果は感圧紙によって求めた計測値とよく一致しており、強い相関があることが示された。

- [1] 今戸啓二, 宮川浩臣, “人工股関節の骨頭とカップの接触圧力分布の一計算法”, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, Vol.25, 2004, pp.345-350.
- [2] 佐藤常三 (訳), JI. A. ガーリン, “弾性接触論”, 現代工学社, 1997, pp.28-30.
- [3] 岡本純三, 中山景次, 佐藤昌夫, “トライボロジー入門 摩擦・摩耗・潤滑の基礎”, 幸書房, 2006, pp. 134-140.
- [4] 佐々木信也, 志摩政幸, 野口昭治 他, “はじめてのトライボロジー”, 講談社, 2013, pp. 18-22.
- [5] 三原雄司, 本木豪一, 染谷常雄, “薄膜センサによる 2 円筒転がり接触圧力計測の研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.761, 2010, pp.201-206.
- [6] Steven M.K., The UHMWPE handbook, Elsevier Academic Press, 2004, pp.29-30, 160-172.
- [7] 小俣弘樹, 山辺純一郎, 松永久生 他, “軸受鋼 SUJ2 の転がり疲労強度に及ぼす微小欠陥の寸法と深さの影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.803, 2010, pp.37-51.