

# 柔軟物における視覚的質感から触覚的質感の再現に向けて

田中士郎<sup>†1</sup> 田中宥輝<sup>†1</sup> 田中弘美<sup>†1</sup>

**概要:** 人間は指先で触れるような低荷重の触察等によって、対象の触覚的質感を知覚する。このような知覚の経験も含め、さらに人間は対象の視覚情報から、触り心地や摩擦感などの触覚的質感を想像することができる。つまり、素材の視覚情報から触覚情報のある程度推測することが可能であると考えられる。対象が柔軟物の場合、接触と滑り状態における微小な接触面の変形によって指腹より知覚される触覚的質感が複雑であることが考えられる。本研究では、内部構造が均一な柔軟物の反射特性による視覚情報から摩擦感による触覚的質感の再現の可能性について検証する。まず、両面の表面粗さと硬度が異なる9種類のシリコンゴムに対し、1画素10 $\mu\text{m}$ の高分解能多方向照明画像計測を行う。取得した多方向照明HDR画像よりゴム表面に付着しているホコリや広範囲の曲面形状を除いた微小面の粗さ領域を抽出し、その反射特性からTorrance-sparrowモデルによるフィッティングを行い、ゴムの表面粗さを抽出する。次にゴムの摩擦係数をKES (Kawabata Evaluation System)を用いて計測する。これらの実測データを用いて、トライボロジーの研究分野で提案されているPerssonの接触理論に基づいて、硬度と接触による表面粗さの変化の関係を物理的に解析し、柔軟物における視覚的質感から触覚的質感の再現の可能性について考察する。

**キーワード:** 質感, 表面粗さ, 摩擦係数, 摩擦感, 硬さ

## 1. はじめに

近年、質感認知に関する研究が国際的に注目されており、国内においても、工学、心理学、脳科学の研究分野において、質感認知メカニズムの解明の研究が進められている。

人間は様々な質感を知覚することで、対象の素材や状態などの情報を得ている。過去の知覚の経験も含め、さらに人間は対象に直接触れずに見るだけで、手触りや摩擦感といった触覚的な質感を想像することができる。このような視覚的な触覚的研究も進められており、対象の表面テクスチャなどの視覚情報による主観評価実験や光学情報の解析より、触覚的質感との関連についての知見が報告されている[10,11,12]。しかし、視覚的質感情報から触覚的質感情報を抽出、提示するまでには至っていない。

我々は指先による低荷重な触察によって知覚される摩擦感が、光学情報による視覚情報のみでどこまで推定可能かを目的とした研究を進めている。事前実験として多方向照明によって観測された様々な材質(織物・紙・樹脂・革・金属・木)の微小構造における表面粗さと摩擦係数の推定を行った。その結果、接触時に表面が変形する柔らかいゴム・織物の材質では、摩擦係数の推定は表面粗さのみでは難しく、硬さによる影響が大きいことが問題とされた。摩擦係数に影響を与える表面粗さと硬さを定量的に取得する必要がある。

そのため、本研究では、柔軟物の視覚的質感から触覚的質感の再現に向けて、内部構造が均一な粘弾性物体であるゴムの表面粗さと硬度の摩擦係数への影響と、柔軟物の接触理論に基づく摩擦係数の推定を行い、摩擦係数に影響する物理的な変化の解析より、光学情報からの摩擦係数の推定の可能性を考察する。

まず、両面の表面粗さと硬度が異なる9種類のシリコンゴムを対象に、1画素10 $\mu\text{m}$ の高分解能多方向照明画像計測を行う。取得した多方向照明HDR画像から反射特性を取得し、Torrance-sparrowモデル[8]によるフィッティングを行い、ゴムの表面粗さを抽出する。また、KES (Kawabata Evaluation System)を用いてゴムの摩擦係数を計測する。各硬度のゴムにおける表面粗さと摩擦係数の相関より、表面粗さおよび硬度の摩擦係数への影響を解析する。次に、この影響変化の信頼性評価と、ゴムの表面粗さと硬度の違いによって生じる摩擦係数の変化を物理的に解析するため、トライボロジー分野で提案されているYoungとPerssonの接触理論[3,4,9]に基づいて、真実接触面積とせん断応力を推定する。

実験結果より、表面粗さによる摩擦係数へ影響において、ゴムに触れる側であるKESのセンサーのヤング率2.36N/mm<sup>2</sup>付近を基準として、ゴムのヤング率が増加するほど、表面粗さの影響は増加するが、その増加量は減少傾向となった。一方、ゴムのヤング率が減少するほど、表面粗さの影響はより減少する傾向にあり、硬さによる影響が増加していることが確認された。

また、せん断応力推定に基づく物理的な解析より、ヤング率とせん断応力は正の相関関係であるが、センサーのヤング率から遠ざかるほど、せん断応力の変化量は減少する結果を示した。せん断ひずみを算出すると、ヤング率が大きいほどひずみにくい傾向となり、せん断応力の変化が正しい傾向であることが確認された。一方、真実接触面積はヤング率が増加するほど非線形な減少が確認された。

指先の硬度に近い柔軟物では、摩擦係数の推定にはヤング率が必要である。ゴムのヤング率に対するブラスト面の表面粗さの変化に相関があることが確認された。ゴムの成

<sup>†1</sup> 立命館大学 情報理工学部  
School of Information Science, Ritsumeikan University

分と性質に基づく考察より、広い範囲での表面粗さ（マクロ粗さ）の必要性と、対象の材質がゴムであることが既知であれば、異なる空間周波数での表面粗さから、硬さが推測可能ではないかとの結論に至った。

## 2. 関連研究

工学的に触覚的質感を表現するために、永野らは材質感の研究例を調査し、Fine Roughness（ファイン粗さ）、Macro Roughness（マクロ粗さ）、Friction（摩擦）、Hardness（硬さ）、Warmness（温かさ）の5つの共通の次元構成を見出した[1]。材質感次元のうち、触察時のなぞり操作に関わりの深いものはファイン粗さと摩擦の二つである。ファイン粗さはなぞり操作によって知覚可能な表面粗さで、指紋の間隔（数百 $\mu\text{m}$ ）より小さい材質感次元表面特徴と定義されている。

対象に直接触れずに見たときに感じる視覚的な触覚感の研究では、様々な材質を対象とした主観評価実験より、視覚からの質感認知による材質の識別と、材質の質感に関する記憶による双方向の影響により、ある程度正確な触覚認知が可能であることが報告されている[10]。

硬度の異なるシリコンゴムを対象とした視覚情報から硬さの印象による主観評価実験では、対象の厚みが薄いものほど柔らかい傾向があり、また色に関しては、色は直接硬さに影響されず、透明度によって感じる質感の違いに影響されることが報告されている[11]。さらに、テクスチャ画像の触覚的印象に対して、触覚オノマトペを用いる評価実験より、オノマトペは質感の詳細を表現するのに適していることが報告されている[12]。

しかし、多様な材質や多様な素材の糸からなる織物のように、複雑な3次元表面微小構造と、同時に複雑な光学特性と変形特性をもつ物体の視覚的かつ触覚的な質感を再現し提示するには至っていない。視覚的質感情報のみから触覚的質感情報を抽出する方法の報告はない。

我々は先行実験において、多方向照明によって観測された様々な素材の物体（織物・紙・樹脂・革・金属・木）の微小構造の反射解析より抽出された鏡面反射の強さと分布、硬さの実測値から摩擦係数の推定法を提案し、その有効性を確認した。その結果、触察時の垂直荷重（押圧力）50gfによる接触において、表面が変形しない硬い金属や樹脂（プラスチック）では摩擦係数の推定精度が高く、表面が変形する柔らかいゴム・織物では推定精度が低いことが確認された。摩擦力の大きさは2物体間の真実接触面積とせん断力に依存され、柔軟物体では図1に示すように接触時に表面の微小な突起が弾性変形による真実接触面積の増加が生じる。そのため、非接触において計測された表面粗さのみでは摩擦係数の推定は難しく、硬さによる影響が大きいことが問題とされ、摩擦力に影響を与える表面粗さと硬さを定量的に取得する必要がある。

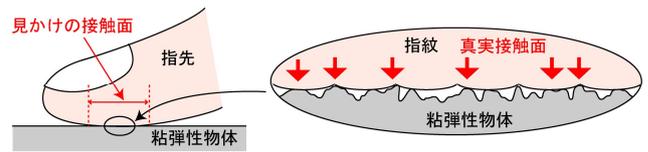


図1 触察時における指腹と柔軟物体の接触

## 3. 提案手法

本研究では、柔軟物の視覚的質感となる光学情報から摩擦感による触覚的質感の再現に向けて、両面の表面粗さと硬度が異なる9種類のシリコンゴムを用いて、各硬度の表面粗さの摩擦係数への影響を解析する。次に、ゴムに生じる摩擦力の影響を物理的に解析するため、YoungとPerssonの接触理論に基づく真実接触面積とせん断応力の推定法について述べる。

### 3.1 シリコンゴムサンプル

図2に、計測対象として用いた硬度が異なる9種類のシリコンゴム（共和工業（株））を示す。ゴムのサイズは $65 \times 55 \text{ mm}^2$ 、厚さは3mmである。図中の数値は、デュロメータタイプAで計測された硬度を示す。

ゴムの両面は滑らかな磨き面と粗いブラスト面の2種類の異なる表面粗さを持つ。ゴムの磨き面とブラスト面はそれぞれ硬度に関係なく同一の金型を用いて作成されるため、製造上では表面粗さは一定と定義される。しかし、ブラスト面を目視すると硬度によって鏡面反射の強さの違いが確認され、表面粗さが一致していないと推測される。



図2 シリコンゴム（9種類）

### 3.2 硬度の違いによる表面粗さの摩擦係数への影響解析

硬度の違いによる表面粗さの摩擦係数への影響を解析するため、ゴムの表面粗さと摩擦係数の取得方法について述べる。

#### 3.2.1 多方向照明によるシリコンゴムの観測

本研究では、図3（左）に示す全方位光学異方性反射計測装置（OGM-3）を用いて、多方向照明画像計測を行う。対象の微小領域の反射率の変化を捉えるために、1画素 $10\mu\text{m}$ の分解能で、図3（右）に示すようにゴムの表面に対して観測角を $20^\circ$ で固定し、光源は正反射条件となる入射角 $20^\circ$ を中心として $\pm 30^\circ$ の範囲（ $-10^\circ \sim 50^\circ$ ）を、 $1^\circ$

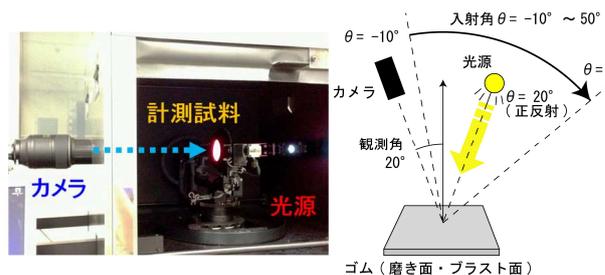


図3 OGM3による多方向照明画像計測

刻みで変化させて観測を行う。各入射角において観測された HDR 画像を、入射角  $0^\circ$  で観測された標準白色板 (拡散反射板) の観測画像の平均 RGB 値で正規化する。

### 3.2.2 反射率データの取得

観測 HDR 画像よりゴムの微小面を確認すると、傷やチリ、広範囲な曲面形状などによる表面粗さと無関係な反射特性が一部存在する。そのため、それらを取り除き、ゴム本来の微小な表面粗さを抽出する必要がある。人の指紋の間隔は  $0.3\text{mm}\sim 0.5\text{mm}$  とされており、本研究では観測画像を  $40\times 40$  画素 ( $0.4\text{mm}$  角) の領域に分割し (図 4 左)、各領域の平均反射率を算出し、反射率が最大となる入射角のヒストグラムを生成する (図 4 中央)。ヒストグラムより入射角の数が最も多い領域における平均反射率データを算出する (図 4 右)。

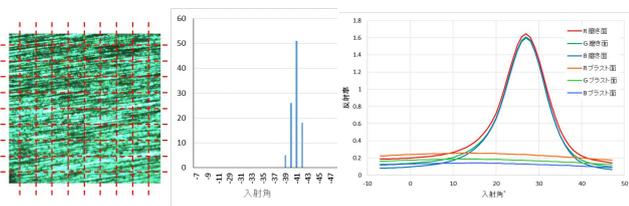


図 4 反射率データの生成の概要

### 3.2.3 表面粗さの抽出

前節より得られた反射率データよりゴムの表面粗さを抽出する。本研究では次式の微小面の粗さを考慮した Torrance-sparrow モデル[8]を用いる。

$$i_\theta = s_d K_d \cos \theta + s_s K_s e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$\sigma$  は表面粗さ、 $\alpha$  は微小面の法線とハーフベクトルのなす角、 $s_d K_d$  は拡散反射率、 $s_s K_s$  は鏡面反射率を示す。 $K_d, K_s$  は RGB 値の和が 1 となる。1つのゴムから磨き面とプラスト面の 2種類の反射率データが生成される。そこで、鏡面反射と拡散反射がそれぞれ顕著に観測される磨き面の表面粗さを先に推定する。図 4 (右) の入射角に対する反射率データに対し、Levenberg-Marquardt 法を用いて式 (1) の表面粗さ  $\sigma, s_d, K_d, s_s, K_s, \alpha$  を推定する。同じ硬度のプラスト面に対して、磨き面で推定された  $K_d, K_s$  を初期値とする同様のフィッティングを行うことによって、表面粗さ  $\sigma$  を推定する。

### 3.2.4 摩擦係数の計測

本研究では風合い計測装置 KES (Kawabata Evaluation System) を用いてゴムの摩擦係数 (MIU) を計測する。図 5 に示すように、重りを使ってセンサーに一定の垂直荷重を与え、計測対象の表面上を矢印の方向に等速で滑らせて摩擦係数を計測する。得られた時系列の摩擦係数の平均値を取得する。

前節において抽出された表面粗さは、入射角の変化に沿った方向の数値を示す。そのため、抽出した表面粗さと同じ方向になるように向きを調整して計測を行う。

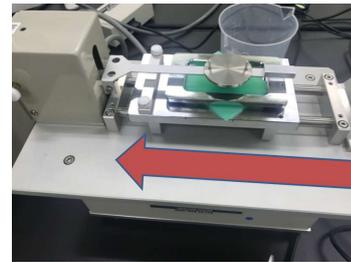


図 5 KES-SE によるシリコンゴムの摩擦係数の計測

## 3.3 Young と Persson の接触理論に基づくせん断応力推定

3.2 節における表面粗さの摩擦係数への影響度に関して、接触理論の観点から解析を行う。そのため、本研究ではトライボロジーの分野で提案された Young と Persson の接触理論[3,9]に基づいて、9種類の硬度のゴムの摩擦係数に影響を与える真実接触面積とせん断応力を推定する。

### 3.3.1 ゴムの摩擦力

ゴムのような粘弾性物体で生じる摩擦力は、凝着摩擦  $F_{ad}$ 、流体摩擦  $F_{fluid}$ 、ヒステリシス摩擦  $F_{hys}$ 、掘り起こし摩擦  $F_{plough}$  による 4種類の摩擦係数に影響される[7]。

$$F = F_{ad} + F_{fluid} + F_{hys} + F_{plough} \quad (2)$$

乾燥摩擦環境において指先で触れるような低荷重で低速度な接触では、 $F_{fluid}, F_{hys}$  による摩擦の影響を受けないとされる。また、計測対象であるシリコンゴム (平板) の表面粗さは微小であるため、 $F_{plough}$  による摩擦の影響も受けない。そのため、凝着摩擦  $F_{ad}$  (2物体の接触面) による影響が最も大きく、これに基づくと摩擦係数は次式で示される。

$$F = As \quad (3)$$

$A$  は 2物体間の真実接触面積、 $s$  はせん断応力を示し、これらを導く必要がある。指先でゴムのような粘弾性物体に触れた場合では、指紋、あるいはゴム表面の微小な突起先端の弾性変形によって真実接触面が生成される。本研究では、この弾性接触理論に基づいて真実接触面積を推定し、3.2 節で取得した表面粗さ、摩擦係数を用いてせん断応力を推定する。

### 3.3.2 Young と Persson の接触理論に基づく真実接触面積の推定

柔軟物体における 2物体の接触や摩擦に関する研究は、19世紀の Hertz の弾性接触理論から進められている。近年ではトライボロジーの分野において、微小な表面粗さを持つ柔軟物体の接触理論が提案されている[2,3,6]。本研究では、Young と Persson の接触理論に基づき、見かけの接触圧力から真実接触面積の推定を行う。

見かけの接触面積を  $A_0$ 、見かけの接触圧力を  $p$  とすると真実接触面積は次式で示される。

$$A = \frac{A_0}{(\pi G)^{1/2}} \int_0^p d\sigma e^{-\sigma^2/4G} = A_0 \text{erf}\left(\frac{p}{2G^{1/2}}\right) \quad (4)$$

$$G = \frac{1}{8} \left( \frac{E}{1-\nu^2} \right)^2 \kappa^2 \quad (5)$$

$$\frac{1-\nu^2}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (6)$$

式 (5) の  $E$  はヤング率,  $\nu$  はポアソン比を示し, 2つの物体のヤング率  $E_1, E_2$  とポアソン比  $\nu_1, \nu_2$  を用いると式 (6) より算出される.  $\kappa$  は表面粗さを示し, 式 (7) に表面粗さがフラクタル構造を持つと仮定した近似式を示す[4].

$$\kappa = q_0 h_{rms} \left( \frac{H}{1-H} \right)^{1/2} \left( \frac{q_1}{q_0} \right)^{1-H} \quad (7)$$

$q_0$  と  $q_1$  は, 表面粗さとして扱う最小と最大の空間周波数を示す.  $H$  はハースト指数と呼ばれる表面の粗さを示すパラメータの1つで, 一定の空間周波数範囲における表面粗さのパワースペクトルを線形近似したときの傾きの値を示す. また,  $h_{rms}$  は高さ標準偏差を示し, 次式で示される.

$$h_{rms}^2 = 2\pi \int_{q_0}^{q_1} dq q C(q) \quad (8)$$

$C(q)$  は空間周波数  $q$  におけるパワースペクトルを示す. 式 (7), 式 (8) は  $q_0, q_1$  を含むことから, 表面粗さは観測環境における空間分解能に依存する.

真実接触面積  $A$  を推定するためには, 事前に表面粗さ  $\kappa$ , 見かけの接触面積  $A_0$ , 見かけの接触圧力  $p$  を算出する必要がある. これらの算出法を以降の節で述べる.

### 3.3.3 表面粗さについて

式 (7) より表面粗さ  $\kappa$  を算出するためには,  $q_0, q_1, H, h_{rms}$  が必要となる. また, 式 (1) で扱われる表面粗さ  $\sigma$  は微小面の傾きの標準偏差を示し, 高さ標準偏差  $h_{rms}$  と異なる. 表面粗さが小さい条件において,  $h_{rms}$  と  $\sigma$  の関係は次式で近似可能であることが報告されている[5].

$$h_{rms} = \frac{\Delta x}{\sqrt{2}} \sigma \quad (9)$$

$\Delta x$  は空間分解能を示し, 観測環境に依存される. 同様に, 式 (7) の  $q_0, q_1$  も観測環境に依存されるため,  $\Delta x$  を含むこれらのパラメータは対象物体に関係なく一定となる. ハースト指数  $H$  については, 本研究の画像計測法および表面粗さの推定法では得ることができない. そのため, 本研究では  $H$  を用いない, つまり硬度に依存しない定数として扱う. これらの前提条件より, 式 (7) は次式に近似される.

$$\kappa = k\sigma \quad (10)$$

$k$  はゴムの硬度に依存しない定数を示す. これにより, 式 (5) は次式に変換される.

$$G = \frac{1}{8} \left( \frac{E}{1-\nu^2} \right)^2 (k\sigma)^2 \quad (11)$$

### 3.3.4 見かけの接触面積と圧力の算出

見かけの接触面積  $A_0$  と圧力  $p$  を算出するために, 本研究ではセンサーの近似モデルを定義する. KES で使用されるシリコンセンサーの表面は, 図 6 (左) に示すように指紋

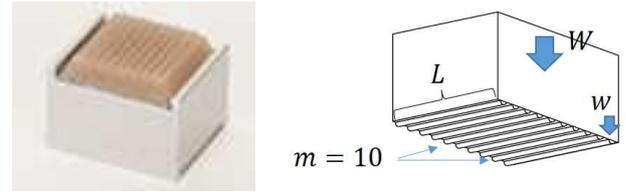


図 6 KES-SE で用いられるシリコンセンサーと近似モデル

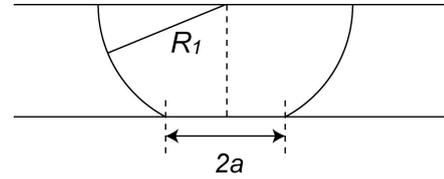


図 7 センサーの突起と平面との接触

を模倣した微小な突起が均等に 10 列並んだ形状をしている. このシリコンセンサーのセンサー領域サイズ (10mm×10mm), 突起の直径 (0.5mm) と個数 (10) より, 図 6 (右) に示すような, センサーの突起を半円柱で近似したモデルを定義する. 本研究ではセンサーの突起表面の微小な粗さを考慮しない.

また, 図 7 にセンサーの突起と平面との弾性接触の概要図を示す. 図 6 および図 7 より, 見かけの接触面積  $A_0$  は次式で示される.

$$A_0 = 2aLm \quad (12)$$

$a$  は突起と対象表面 (平面) との接触半径,  $L$  はセンサーの突起を近似した半円柱の長さ,  $m$  は突起の本数を示す.  $a$  は円柱と平面における Hertz 接触理論に基づき, 次式より算出される.

$$a = 2 \sqrt{\frac{wR}{\pi LE}} \quad (13)$$

$w$  はセンサーの突起 1 つにかかる荷重を示す. 本研究では全体の荷重  $W$  に対して均等にかかることを前提として,  $w$  と  $W$  には次式の関係が成り立つものとする.

$$w = \frac{W}{m} \quad (14)$$

式 (13) の  $E$  は等価ヤング率を示し, 2つの物体のヤング率  $E_1, E_2$  とポアソン比  $\nu_1, \nu_2$  を用いて次式より算出される.

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (15)$$

式 (13) の  $R$  は等価半径を示し, センサーの突起の半径  $R_1$  より算出される.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} \quad (16)$$

以上より, 式 (12) の見かけの接触面積を算出する.

次に見かけの接触圧力を算出する. 突起の接触領域によって見かけの接触圧力は変化する. しかし, センサーの突起 1 つ分 (指紋幅) の接触面積は微小であるため, その領域内の圧力分布の影響は小さく, 同じ領域である人の指紋

からも分布による違いが感じられないと考えられる。そのため、本研究では突起の接触領域における圧力分布は一定とみなし、次式より算出する。

$$p = W/A_0 \quad (17)$$

### 3.3.5 各ゴムのせん断応力および摩擦係数の推定

ゴムの摩擦力を算出するためには、式 (3) に示す真実接触面積とせん断応力が必要となる。前節に基づき、式 (4) より算出した真実接触面積を用いて、次式に示す評価式が最小となる各ゴムのせん断応力を推定する。

$$\operatorname{argmin} \sum_i^m \sum_j^n (F_{ij} - \widehat{F}_{ij})^2 \quad (18)$$

$m$ はゴムの硬度の種類 ( $m = 9$ )、 $n$ はゴム表面の種類 ( $n = 2$ ) を示す。実測の摩擦力  $F_{ij}$  は、実測した摩擦係数を用いて次式のクーロンの第 1 法則より算出する。

$$F_{ij} = \mu_{ij}W \quad (19)$$

推定摩擦力  $\widehat{F}_{ij}$  は、式 (4)、(11) を元に示した次式より算出する。

$$\widehat{F}_{ij} = A_{0ij} \operatorname{erf} \left( \frac{p_{ij}}{2G_{ij}^{1/2}} \right) s_i \quad (20)$$

$$G_{ij} = \frac{1}{8} \left( \frac{E_i}{1 - \nu_i^2} \right)^2 (k\sigma_{ij})^2 \quad (21)$$

実測と推定摩擦力が最小となるパラメータ  $k$  と、各硬度のゴムのせん断応力  $s_i$  を推定する。

### 3.3.6 ヤング率に関して

Young と Persson の接触理論ではヤング率を必要とするため、現状の手法では視覚的な触質感までに至らない。この点に関しては、4.4 節で述べる。

## 4. 実験

### 4.1 実験環境

図 2 に示す 9 種類の硬度が異なるシリコンゴムを用いて、磨き面とブラスト面の多方向照明画像計測と KES を用いた摩擦係数の計測を行った。OGM3 による多方向照明画像計測では、観測用のカメラは Nikon D3x、レンズは AF-S Micro-Nikkor 105mm f/2.8G を使い、8 種類の露光時間による多重露光撮影を行った。KES-SE による摩擦係数の計測では、指先を模倣したシリコンセンサー (硬度 42, ヤング率  $2.36 \text{ N/mm}^2$ ) を用いて  $50 \text{ gf}$  ( $= 0.49 \text{ N}$ ) の垂直荷重をかけ、滑り速度を  $1 \text{ mm/s}$  に設定して 6 回の計測を行った。取り付け誤差等も含め初回の計測値は不安定なことがあるため、初回を除いた 5 回分の計測における摩擦係数の平均値を算出した。また、ゴムの硬度からヤング率への変換は日本ゴム協会指定の式を用いた。

### 4.2 表面粗さと摩擦係数への影響度の結果

図 8 に横軸をヤング率とした 9 種類のシリコンゴムにおける推定表面粗さと実測摩擦係数のグラフを示す。

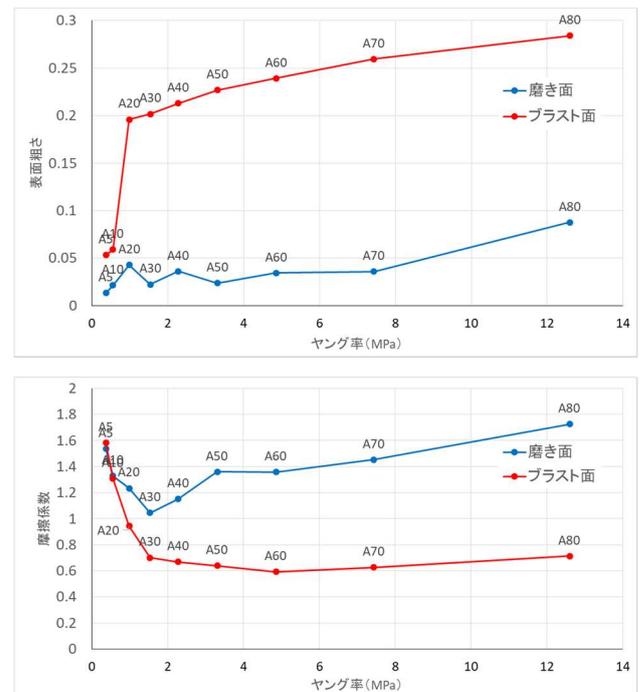


図 8 ヤング率に対する表面粗さ (上) と摩擦係数 (下)

表面粗さに関しては、ブラスト面ではゴムの硬度を示すヤング率が減少するほど表面粗さが減少する傾向を示すことが確認された。また、磨き面ではブラスト面と同様の傾向と、磨き方向にも影響されていることが確認された。観測時の入射角が 1 方向に沿っているため、観測画像に対して磨き方向が垂直方向に近いほど表面粗さが小さいことが確認された。いくつかのゴムで目視により表面粗さの違いが確認されていたが、本手法より表面粗さの違いが明確に確認された。

摩擦係数に関しては、それぞれのグラフから、以下の特徴が確認される。

- 1) 硬度にかかわらず、摩擦係数は磨き面の方が高い。
- 2) A60~80 の硬いゴムでは粗さの違いによる摩擦係数の差が大きく、A5, A10 ではその差が小さい。
- 3) 中間の硬度において、共通して摩擦係数が一旦減少する。

1) については、滑らかな面による真実接触面積の増加によって摩擦係数が大きくなることを示される。これはゴムより硬い塑性物体に近い傾向を示し、多方向照明による画像計測から推測することが可能であることが確認される。

2), 3) に関しては、ゴムの硬度の違いによる接触時の真実接触面積の変化とせん断力に影響されるものであると考えられる。

次にゴム硬度における表面粗さの摩擦係数への影響度を確認する。図 9 に示すように、横軸を表面粗さ、縦軸を摩擦係数とする 2 次元座標空間に各データをプロットし、同じ硬度のゴムの磨き面とブラスト面の座標を直線で結んだ。

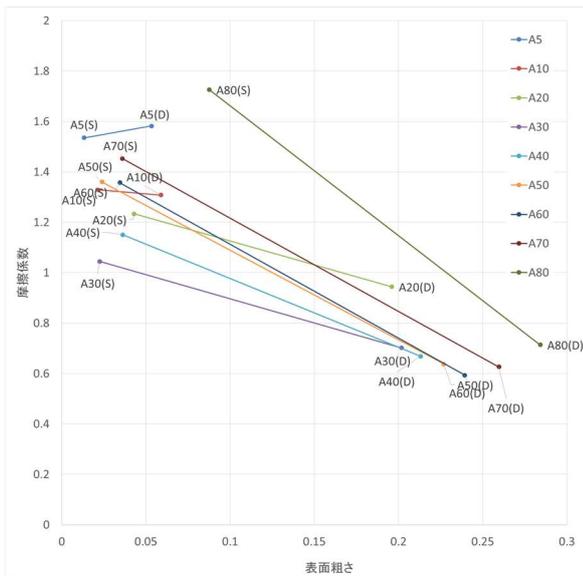


図 9 表面粗さの摩擦係数の相関解析

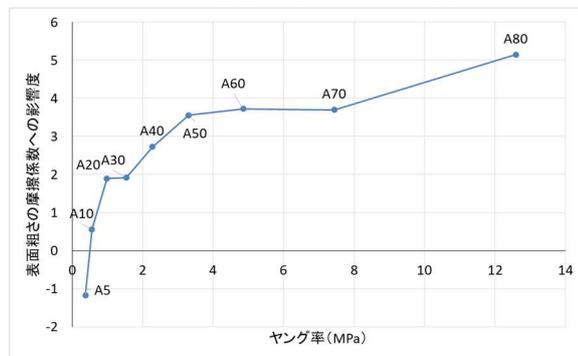


図 10 表面粗さの摩擦係数への影響度 (図 9 の傾き)

直線の傾きはその硬度における表面粗さの摩擦係数への影響度を示し、図 10 に横軸をヤング率とした表面粗さの摩擦係数への影響度の結果を示す。各硬度のゴムでの表面粗さと摩擦係数は線形関係ではないが、特徴的な変化の傾向が確認された。センサーのヤング率  $2.36 \text{ N/mm}^2$  付近を基準にゴムのヤング率が減少するほど、表面粗さの影響はより減少する傾向にあり、硬さによる影響が増加していることが確認される。一方、ゴムのヤング率が増加するほど、表面粗さの影響は増加するが、その増加量は減少傾向であることから、硬さによる影響が減少していることが確認された。また、A20 は磨き面の摩擦係数が正確に計測できていないとされる。

#### 4.3 セン断応力と摩擦係数の推定結果

式 (18) による評価式が最小になる、式 (21) の  $k$  と 9 種類のゴムのせん断応力を推定した。その結果、推定誤差標準偏差  $RMSE = 0.00949$ ,  $k = 0.5836$  を示した。推定パラメータを用いて式 (22) より、各ゴムの磨き面とブラスト面における摩擦係数を算出した。

$$\mu = As/W \quad (22)$$

図 11 に横軸をヤング率とした、各ゴムの摩擦係数の推定値と実測値の比較結果を示す。

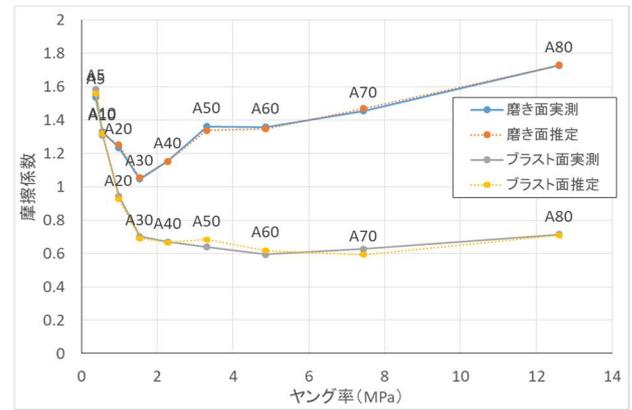


図 11 摩擦係数の推定結果

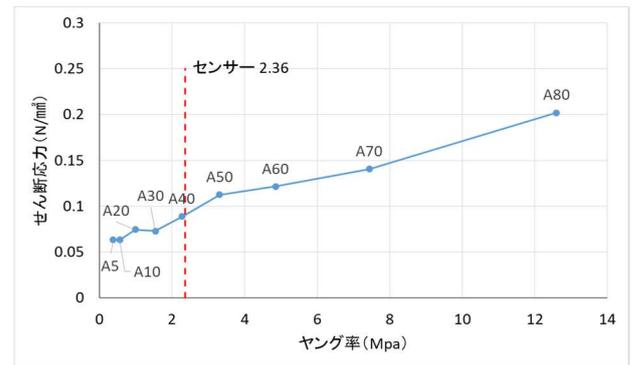


図 12 セン断応力の推定結果

各硬度における磨き面とブラスト面の推定摩擦力と実測の誤差をパーセンテージで示すと、最大で 7.05% となり、推定精度が高いことが示された。しかし、式 (18) において、 $k$  には硬度に依存しない拘束があるが、せん断応力  $s_i$  にはそのような拘束がない。そのため、ヤング率に対するせん断応力の変化が正しい傾向を示すことを確認する必要がある。

図 12 にヤング率に対する推定せん断応力の結果を示す。ヤング率とせん断応力には正の相関があるが、センサーのヤング率から遠ざかるほど、せん断応力の変化量は減少する結果を示した。また、せん断応力は次式のようにせん断弾性係数  $G$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の積で示される。

$$s = G\gamma \quad (23)$$

せん断応力からせん断ひずみを算出し、その変化を確認する。図 13 にせん断ひずみの結果を示す。ヤング率が増加するほどせん断ひずみは減少傾向であることが示されており、硬いほどひずみにくい傾向と一致した。ヤング率に対する  $G$  と  $\gamma$  の変化を確認することで、せん断応力の変化に特別な矛盾はなく、正しい傾向であることが確認された。

次に、式 (22) に基づき、摩擦係数が影響される真実接触面積を確認する。図 14 に磨き面とブラスト面の真実接触面積の結果を示す。真実接触面積はヤング率が増加するほど減少し、正しい傾向を示すことが確認された。

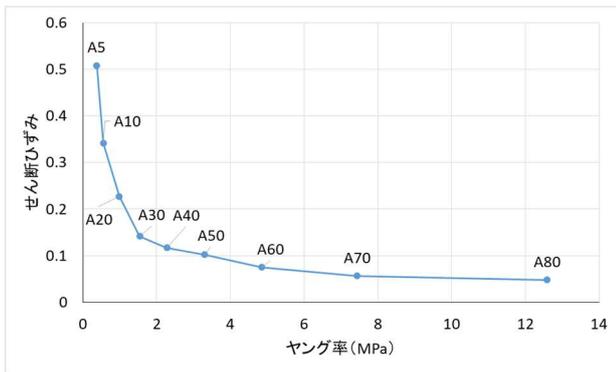


図 13 せん断ひずみ

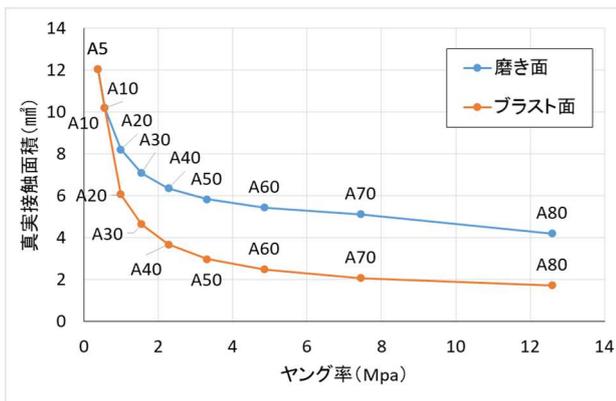


図 14 真実接触面積

摩擦係数に影響を与える真実接触面積とせん断応力の変化の傾向を確認した. 式 (18) による評価式の RMSE も十分に小さいことから, 低次元で示されるによる表面粗さの摩擦係数への影響度に信頼性があることが確認された. しかし, ヤング率が必要であるという課題が残る.

#### 4.4 表面粗さと硬度に関する考察

一般的にヤング率が増加するほど素材表面の微小な突起の接触は, ゴムで生じる弾性変形から金属等の硬い材質で生じる塑性変形による接触へと変化し, より表面粗さが摩擦係数に影響する. 図 15 に, ゴムより非常に硬い素材の表面粗さと摩擦係数の 2 次元プロット結果と, 近似直線を示す. 図に示すように, これらの素材のヤング率はゴムより非常に高く, それぞれ大きく異なる. 表面粗さと摩擦係数は点線に示す線形に近い相関を示しているため, 硬さによる摩擦係数への影響は極めて小さいと考察される. 図 10 からもヤング率が増加するほど, 硬さよりも表面粗さの影響による摩擦係数の増加が確認されているため, 図 15 の傾き, または, 図 10 による影響度にヤング率の上限値を与えることで, 表面粗さから摩擦係数の推定は可能であると考えられる. しかし, その判定と柔らかいゴムの摩擦係数の推定ではヤング率が必要であることが残る.

シリコンゴムの成分と硬度に着目すると, シリコンゴムは分子同士の結びつきがなく極めて柔軟に変形する生ゴムと, 分子同士の結びつきを作って硬化させるための加硫剤から成る. 柔らかいゴムほど生ゴムの割合が多く自由に変

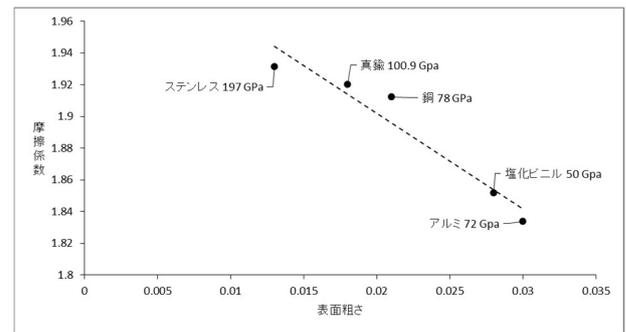


図 15 ゴムより硬い材質の表面粗さと摩擦係数の相関

形するため, 観測画像における微小領域において鋭利な形状を維持することができないと考えられる. また, 成形後には温度が常温に下がり, 柔らかいゴムほど収縮される. そのため, 同じ表面粗さの金型で作成されたゴムであったとしても硬度によって表面粗さが異なり, 柔らかいほど表面が滑らかになると考えられる. のプラスト面の表面粗さを再度確認すると, ヤング率が低いほど表面粗さが減少しており, 相関があることが確認できる. このことから, 微小面の空間周波数範囲の表面粗さ (ファイン粗さ) では, ゴムの表面粗さによる光学情報よりヤング率の推定の可能性があると考えられる. ただし, これは柔らかいゴムでの表面粗さに上限があることしか示せず, 硬いゴムでも滑らかな表面粗さを示すことができることが推測されるため, ファイン粗さのみでは, 表面粗さから少なくとも任意の硬度以上であるしか推定できないと考えられる.

実際に人が対象に触れることが可能な距離 (25cm) での視界は観測 HDR 画像の範囲よりも十分に広い. 人は広範囲での表面の粗さ (マクロ粗さ) も同時に確認することが可能である. ゴムは柔らかいほど微小面が滑らかになる反面, 広範囲において平面性を維持することが困難とされ. マクロ粗さは硬い方が小さくなるのではないかと考えられる. そのため, ファイン粗さだけでなくマクロ粗さも取得する必要がある.

マクロ粗さやファイン粗さによる異なる空間周波数範囲での表面粗さとヤング率に相関があれば, 光学情報より柔軟物の触覚的質感の再現が可能であると考察される.

人が対象を見たときに想像する硬さや摩擦感, 対象の材質等の過去の様々な質感認知の経験に基づくと考えられるが, その質感認知に必要な視覚情報として, マクロ粗さやファイン粗さのような様々な空間周波数における表面粗さがあると考察される.

#### 5. おわりに

硬度が異なるゴムを用いた表面粗さの摩擦係数へ影響と, 柔軟物の接触理論に基づくせん断応力の推定より摩擦係数が推定可能なことを示した. しかし, 指先の硬度に近いゴムでは摩擦係数の推定には対象の硬度が必要であり, ゴムの成分に基づく性質より, マクロ粗さの計測の必要性を述

べた.

今後の課題として、複数の空間周波数での表面粗さを用いて摩擦感の推定の可能性を解析する。また、人が実際に感じる摩擦感と物理量である摩擦係数との関連を定量的に示す必要がある。

## 参考文献

- [1] S. Okamoto, H. Nagano, and Y. Yamada, "Psychophysical dimensions of tactile perception of textures," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, issue 1, pp. 81-93, 2013.
- [2] J. A. Greenwood and J. B. P. Williamson, "Contact of Nominally Flat Surfaces", *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, pp. 295~300, 1966.
- [3] C. Yang and B. N. J. Persson, "Contact mechanics: contact area and interfacial separation from small contact to full contact", *Journal of Physics*, Vol.20, No.21, pp. 1-13, 2008.
- [4] B.N.J. Persson, "On the fractal dimension of rough surfaces", *Tribology Letters*, Vol.54, No.1, pp.99-106, 2014 .
- [5] 原田博之, 樋口 朗, 山口晃生, 野田敦彦, "研磨ロボット用光学的表面粗さセンサの研究(第1報)-Torrance-Sparrow モデルに基づく表面粗さの測定原理", *精密工学会誌*, Vol.65, No.12, pp.1785-1790, 1999.
- [6] K. L. Johnson, K. Kendall and A. D. Roberts, "Surface Energy and the Contact of Elastic Solids", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 324, No. 1558, pp. 301-313, 1971.
- [7] 桃園 聡, "エラストマーの凝着を伴う摩擦の発生機構", *日本ゴム協会誌*, Vol. 88, No. 2, pp. 48-54, 2015.
- [8] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 57, Issue 9, pp. 1105-1114, 1967.
- [9] B. N. J. Persson, "Theory of rubber friction and contact mechanics", *J. Chem. Phys.* Vol.115, No. 8, pp. 3840-3860, 2001.
- [10] R. W. Fleming, C. Wiebel, and K. Gegenfurtner, "Perceptual qualities and material classes", *Journal of Vision*, Vol. 13, No.8, pp. 1-20, 2013.
- [11] 栢割隆之, 張 ジョ, 管村 昇, "シリコンゴムの硬さの違いによる感性評価傾向", *日本感性工学会論文誌*, Vol. 15, No. 1, pp. 193-202, 2016.
- [12] 岩佐和典, 小松孝徳, "視覚的な触質感認知と不快感に対する命名の影響", *人工知能学会論文誌*, Vol. 20, No. 1, pp. 265-273, 2015.