

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560153

研究課題名(和文)粗面の接触モデルに基づくすき間内流動特性の解明

研究課題名(英文) Leak flow analysis and contact mechanics between rough surfaces

研究代表者

京極 啓史 (Kyogoku, Keiji)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70153236

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：独立した粗さ突起部の変形を統計的に重ねあわせた従来の混合潤滑理論は、荷重増加等により実現象と乖離することが課題となっている。そこで本研究では高接触率条件での粗面接触問題とすき間内流れの解明を目的とし、実粗さに近い非ガウスランダム粗面の接触に対し、解析的にはランダム粗さの非線形接触構造解析とすき間内流れの潤滑流れ解析を、実験的には全反射法による接触率測定・色素濃度法によるすき間測定および流量測定を行った。その結果、非ガウス粗面の高さ分布パラメータのスキューネスが、接触部の干渉による接触部合一や隙間流れの流量に影響し、突起部が摩耗した状態に相当する負の値では流量が大きく減少すること等が判明した。

研究成果の概要(英文)：As contact area increase, real contact and lubrication flow deviate from mixed lubrication theory based on the independent asperity contact hypothesis. In this project, contact mechanics and lubricant flow between contacting rough surfaces under high contact ratio condition have been addressed.

Contact analysis for non-Gaussian distributed rough surfaces have been performed by nonlinear finite element structural analysis, and flow between contacting rough surfaces have been calculated numerically for Reynolds equation problem. Contact area, interspace, and flow rate for 3D fabricated rough surfaces have been measured by total reflection method, contrasting density of dye, and gravimetric technique, respectively. As a result, skewness, which is a parameter for non-Gaussian distribution, have a significant influence on the conflation of contact area and leak flow rate. Low flow rate measured and calculate for negative value of skewness which is observed for truncated rough surfaces.

研究分野：機械要素・トライボロジー

キーワード：粗面 接触 すき間 流量係数

1. 研究開始当初の背景

中高面圧下での接触・しゅう動部では、粗面がつぶされることにより接触部の隙間形状が変化し、潤滑油などの液体の流動状態に大きな影響を及ぼす。特に混合潤滑において、この流動状態によって流体圧力が決まり、しゅう動部における流体潤滑と固体接触における負荷分担が決定されるため、摩擦特性にも重大な影響を及ぼす。しかし高い接触率の条件では、次のような問題がある。

[1]変形により粗さ突起先端だけでなく、突起周辺まで変形し、粗面の統計分布も変化する。
[2]様々な周波数の粗さが存在し(マルチスケール性)、接触過程の各条件で主に変形する粗さスケールが異なる。

従来の統計的接触モデルでは、粗さの突起が、独立し、主に正規分布に代表される統計分布に従って存在するものと仮定しているため、[1][2]とも考慮することが困難である。

一方、直接接触シミュレーションを用いた解析が近年盛んになっているが、直接シミュレーションの解析結果を粗さの諸パラメータと結び付けて定量化し、一般化する試みはほとんど手をつけられていないため、あくまで特定条件のシミュレーションに留まっているのが現状である。なお、わが国においてはこの分野の研究は見受けられない。

2. 研究の目的

以上のような状況を鑑み、表面粗さを特徴付けるパラメータを任意に与えて生成した粗面に対し、接触点の合一が生じるような高接触率条件での接触状態の観察と流動状態の測定を行い、その結果を接触状態・流動状態を数値シミュレーションと比較する。このことにより、スキューネス・クルトシスなどの粗さパラメータを有する非正規分布をもった粗面と接触・潤滑状態の関係を求める手法の確立を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 数値解析

弾性粗面と剛体平面との間の接触問題を、市販の構造解析ソフトウェア (MSC. Marc 2012) を用いて解いた。非 Gauss 粗面は、乱数によって正規分布を生成し、Johnson 変換によって高さ方向の縮尺を変え任意の分布とした。粗面のパラメータとして、正規分布からの分布の偏りを示すスキューネス 3 種 (-0.75, 0, 0.75) と、分布の中央値への集中度を表すクルトシス 3 種 (3.0, 5.0, 7.0) の計 9 通りを選び、各組み合わせを 5 パターンずつ生成した。いずれも弾性体素片 (1mm 立方体) の上面に粗面の RMS 値が $10\ \mu\text{m}$ となるように生成し、素片を $31 \times 31 \times 15$ のメッシュに分割した。そこに剛体平滑面を押し当て、準静的に $30 \sim 70\ \mu\text{m}$ 押し込む過程を計算し、生じるすき間形状、接触状態 (接触点形状・大きさ)、押付力をモニターした。なお、粗面は完全弾性体であり、縦弾性率 E が 3MPa 、

ポアソン比は 0.48 とした。

また、接触解析した粗面をガスケットとみなし、すき間を流れる流体の漏れ特性を解析するため、乾燥状態の接触解析で得られたすき間に Reynolds 方程式を適用して求めた。液体は水 (粘性係数 $1.0\ \text{mPa}\cdot\text{s}$) で、表面張力の影響は無視した。境界条件は、接触部 (すき間 = 0) および流体の閉じ込め部で流体の流れや圧力発生がないものとし、一方向のみ $1.0\ \text{kPa/m}$ の圧力勾配があるとした。得られた流量は、標準偏差の 4 倍の平滑平行平板のすき間を同じ圧力勾配で流れる流量で正規化した。

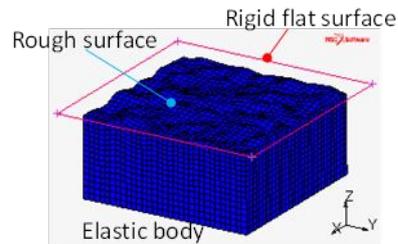


図 1 解析モデル

(2) 接触・漏れ特性実験

実験では、柔らかい粗面と平板 (ガラス板) の間の隙間の測定およびその隙間を流れる液体の流量の測定を行った。任意の表面粗さを生成するため、3D プリンタ (Keyence 社 AGILISTA-3100) で表面粗さを模したテクスチャーを作成し、それを雌型としてシリコン樹脂であるポリジメチルシロキサン (PDMS) をドーナツ状の円盤試験片に転写した。この試験片はチタンホワイトによって白色に着色されている。

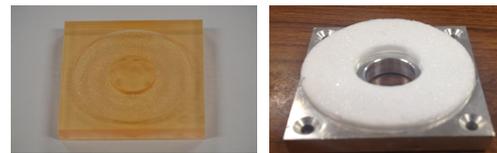


図 2 試験片

この試験片を、平板に押し付け、全反射法によって接触面積を、隙間に存在する着色液体の濃度によって隙間の厚さを測定し、同時に円板の内側から外側へ円環状の接触部から漏れ出る液体の流量を測定した。

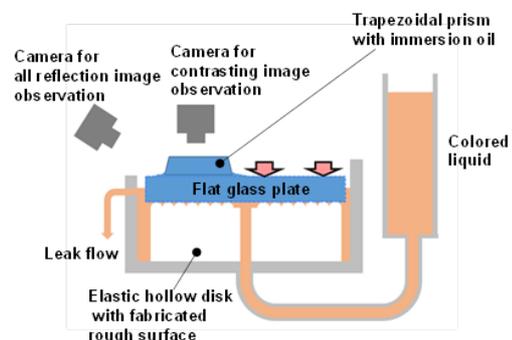


図 2 実験装置模式図

4. 研究成果

(1) 接触解析

接触面圧と接触面積（割合）の関係を図3に示す．どのクルトシスの値でも定性的には大きな違いは見られない．しかし，クルトシスが3（正規分布のクルトシスと同じ値）と比較的小さな場合にスキューネスの影響が見られ，スキューネスが負の場合，比較的低い荷重で接触率が大きくなる傾向がみられる．

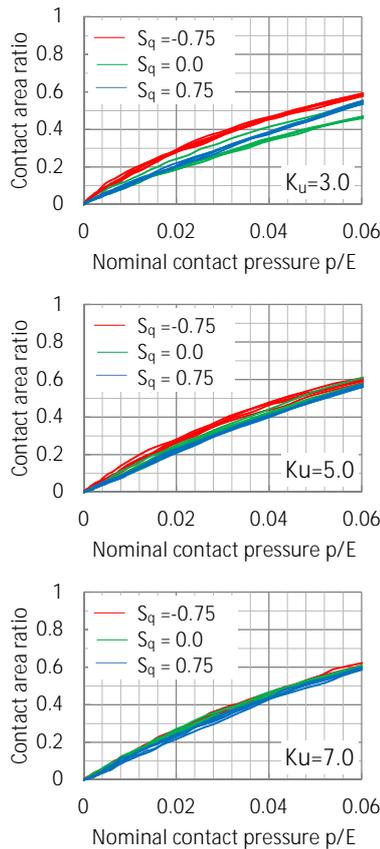
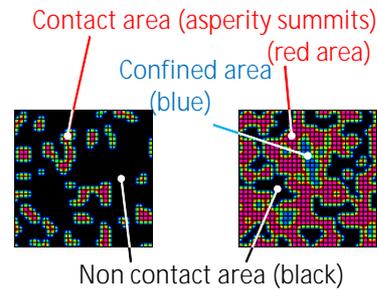


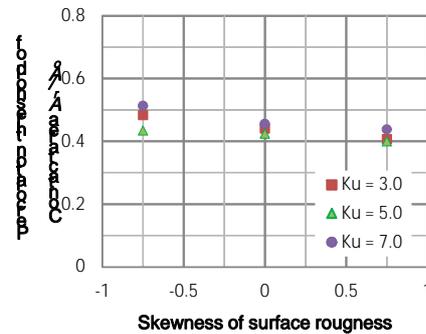
図3 接触面圧と接触面積割合の関係

この傾向を，接触部が合一し，その接触部がつながっていく様子から考えることにする．接触によって，孤立していた近隣の接触部と合一し，接触部が大きくなり，ある範囲を超えると，逆に非接触部が孤立してしまうようになる．この状態は，浸透理論でいうパーコレーションに相当する．そこで，計算された接触状態を元にセルオートマトン解析によってパーコレーションの発生を判別し，そのときの接触割合をパーコレーション閾値と定義した．この方法により求めたスキューネスとパーコレーション閾値の関係を図4に示す．これによるとスキューネスが小さい場合に，パーコレーション閾値が大きくなる傾向が見られた．一方同じ面圧で接触面積率を比較した場合，スキューネスが小さい方が大きな値を示すことを考えると，スキューネスが小さい方が粗さの合一が速く進むが，谷部が閉じるまでには却って大きな接触率を必要とする可能性がある．



No occurrence of percolation ($A_c/A_0 = 0.16$) Occurrence of Percolation ($A_c/A_0 = 0.54$)

(a) 接触状態の可視化（荷重による接触面積割合の変化とパーコレーション発生）



(b) スキューネスとパーコレーション閾値の関係

図4 接触面のパーコレーション

このように部分的に接触した粗面（ガスケット）の接触状態は同じ粗さでもスキューネスの影響を強く受けることは判明したが，それが隙間内の液体の流れに対してどのように影響するのかわかりませんが，粗さの合一状況や隙間の状況に依存するため，隙間内の流れを Reynolds 方程式に従うものとして流れ流量の計算を行い考察した．それぞれの条件で流れ流量を計算した結果を図5に示す．接触面積割合と同様にスキューネスの影響を受け，スキューネスが負すなわちトランケートされた方が流量は少なくなる傾向にあり，しかも接触面積割合よりその影響は大きく受けることもわかった．これは隙間の粘性抵抗が隙間の3乗に比例して大きくなることから定性的に説明可能である．よって，スキューネスが小さくなるとパーコレーション閾値が上がるが，隙間流量（流れ流量）には大きな影響を受けることが予想される．これらを総合的に考えるとスキューネスが小さい方が粗面をガスケットとして利用するには低面圧で密閉できることを示している．これは摩耗などで高い粗さ突起がトランケートを起こした場合などに相当し，少ない押し込み量でも接触面積が増加したことを示しているといえる．しかし，より極端なスキューネスを与えた場合や，周波数の異なる粗さ突起が生じた場合では．例えば，空間分解能の高い粗さが存在すると谷部の細か

な粗さの状況が変化するため、ここでパーコレーション閾値が変化する可能性もある。また、粗さ高さに対し相関長が長くなると、突起間が広がるため、パーコレーションが発生する条件が変化する可能性がある。よって、今後は、より多くの周波数の粗さを含む表面を考慮した解析が必要になる。

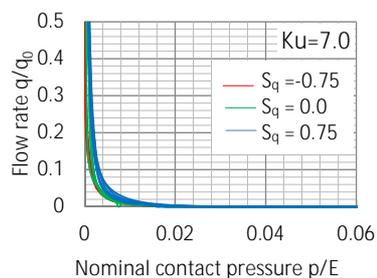
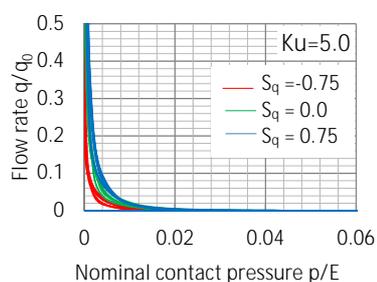
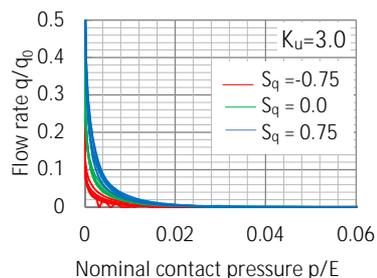
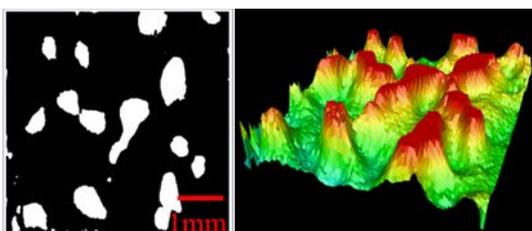


図5 接触面圧とすき間流量の関係

(2) 接触面の観察および流量測定

この傾向を確認するため、実験による接触状態の観察と流量の測定を行った。図6左は全反射法により接触部を特定したもので、白い部分が接触部、黒い部分が非接触部を表している。また、図6右は平板ガラスに押し付けられた表面の粗さ形状を、すき間に侵入させた着色液体の濃度から測定したものであり、山部が粗さの突起部、谷部が粗さの谷に相当する。



接触部 すき間形状

図6 接触状態とすき間分布

粗面のすき間を通じて流れる流量（すき間流量・漏れ流量）を測定した結果の例を図7に示す。測定された流量をみると、スキューネスが負の場合にすき間を流れる流量は他の粗さに比べ著しく小さいことが分かる。

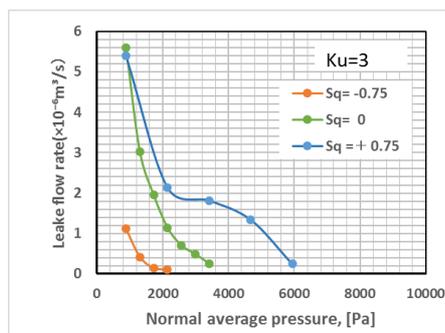


図7 接触面圧とすき間流量の関係

(3) まとめ

表面粗さを任意に生成し、荷重による接触状態の変化を接触面積およびパーコレーション閾値などによって整理し、接触部の隙間流量と比較し、スキューネスの影響が大きいことがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 1件)

小林 泰明・桃園 聡・中村 研八・京極 啓史：非ガウシアンランダム粗面の接触解析，トライボロジー会議 2014 春東京 (2014.5.21)，国立オリンピック記念青少年総合センター（東京都渋谷区）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

京極 啓史 (Keiji Kyogoku)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：70153236

(2) 研究分担者

桃園 聡 (Satoshi Momozono)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：70262300

(3) 連携研究者

なし