

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820029

研究課題名(和文)機能性トライボテクスチャ設計のための確率過程モデリングに関する研究

研究課題名(英文)Research on statistical modeling of surface texture for optimum tribo-surface

## 研究代表者

内館 道正(Uchidate, Michimasa)

岩手大学・工学部・助教

研究者番号：30422067

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：表面のテクスチャ(粗さ, うねり)は, 摩擦摩耗などのトライボロジー特性, ぬれ性など多くの現象に影響を及ぼすことが知られており, テクスチャリングに関する研究が多く行われている。しかしながら, 最適なトライボテクスチャの理論的根拠はほとんど得られていない。そこで, ランダムな三次元テクスチャの確率過程モデリング, 及び, データベース化, 接触解析による影響の検討を行った。本研究により, 表面テクスチャの波長の混合度合い(自己相関係数のべき乗係数)がテクスチャの創成法によって異なり, 接触状態を左右することが示された。

研究成果の概要(英文)：It is well known that the surface texture (roughness and waviness) plays an important role in tribology (friction, wear and lubrication), wettability etc. Therefore, there are many researches on surface texturing. However, there are few theoretical background on optimum surface texture. In order to change this situation, we studied the modeling and simulation of three dimensional surface texture. We found that the mixture of short-wavelength component and long one (power index in auto-correlation function) depends on fabrication method on surface texture and affects contact conditions of surfaces.

研究分野：工学

キーワード：表面性状 表面粗さ トライボロジー テクスチャリング 接触 設計

1. 研究開始当初の背景

表面のテクスチャ(粗さ, うねり)は, 摩擦摩耗などのトライボロジー特性, ぬれ性, 接着強度, 光の散乱特性など多くの現象に影響を及ぼすことが知られており, テクスチャを制御して機能性表面を創製するテクスチャリングに関する研究が多く行われている. これまで Ra などのパラメータに基づくテクスチャの評価が行われてきたが, 最適なトライボテクスチャの理論的根拠はほとんど得られていない. そこで, 数種類のテクスチャを加工し, 模擬試験から試行錯誤的に最良の表面を探索しているのが現状である. これは, 表面に関する現象が複雑で容易に解析できないことに加えて, テクスチャが高さだけでなく空間的な波長の情報も含むランダム過程であるため, Ra などの高さ情報のみではその特徴を十分に記述できないことや, 種々の波長帯域を含むことなどが原因である.

2. 研究の目的

本研究ではテクスチャの機能の予測を可能とするため, ランダムな三次元テクスチャの確率過程モデリング, 及び, データベース化, 接触解析による影響の検討を行った. この研究により, 将来的にテクスチャの最適設計につなげることをねらいとした.

3. 研究の方法

三次元表面テクスチャのモデルとして, 非因果的二次元自己回帰モデルを用いた(図1). このモデルでは, 以下の式によって面領域(三次元)テクスチャデータ  $z(x, y)$  が記述される.

$$z(x, y) = \sum_{(i,j) \in D} \phi_{ij} z(x - \Delta \cdot i, y - \Delta \cdot j) + a(x, y)$$

$$D = \{(i, j) | (-m \leq i \leq m, -n \leq j \leq n), (i, j) \neq (0, 0)\}$$

ここで,  $\phi_{ij}$  は AR パラメータ,  $i, j$  は整数,  $\Delta$  は  $x, y$  方向のデータ間隔,  $a(x, y)$  は表面の不規則性を表すノイズ成分,  $m, n$  は  $x, y$  方向のモデル次数である. 生成されるデータの特性は, 示される自己相関係数と高さ分布(粗さの標準偏差  $\sigma =$  二乗平均平方根粗さ  $Sq$ , スキューネス  $Ssk$ , クルトシス  $Sku$ ) によって決定される. 自己相関係数は, 相関距離  $\beta_x$  と  $\beta_y$  べき乗係数  $\omega$  によって規定される(図2).

$$C(\tau_x, \tau_y) = \exp \left[ - \left\{ \left( \frac{\tau_x}{\beta_x} \right)^2 + \left( \frac{\tau_y}{\beta_y} \right)^2 \right\}^\omega \right]$$

本研究では, 等方性表面を取り扱い,  $\beta = \beta_x = \beta_y$  とし, その値をデータ間隔の 1, 2, 3, ..., 10 倍に変化させた. また, べき乗係数  $\omega$

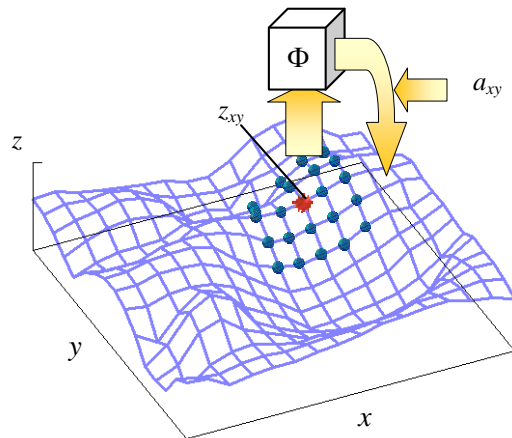


図1 非因果的二次元自己回帰モデル

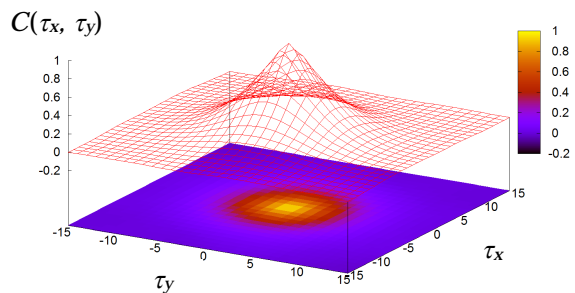


図2 自己相関係数のモデル

を 0.5 ~ 0.9 の間で 0.1 きざみで変化させた. なお, 実表面としてショットピーニング仕上げ面, 研削面, フライス加工面, 旋削面, レーザー微細凹凸面など, 種々の表面性状を測定し, その特徴量を検討し, データ生成の参考とした. なお, 測定には触針式表面粗さ測定機と原子間力顕微鏡を用いた.

生成されたテクスチャデータを用い, 接触状態のシミュレーションを実施した. シミュレーションには影響係数法による直接シミュレーションを用い, 接触状態を推定した. 計算では以下の Bousinesq の式に基づいて, 変位  $w(x, y)$  と接触荷重  $P_z$  の関係を求めた.

$$w(x, y) = C_w(x, y) \cdot P_z$$

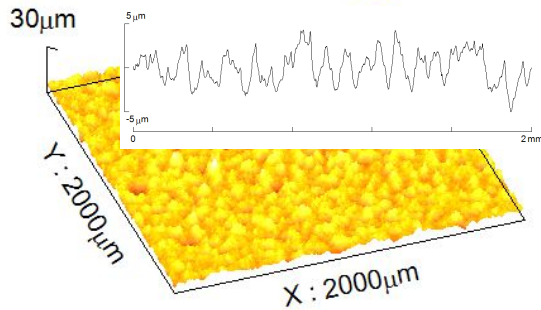
$$C_w(x, y) = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1 \sqrt{x^2 + y^2}}$$

ここで,  $E_1$  と  $\nu_1$  は, それぞれヤング率とポアソン比である.

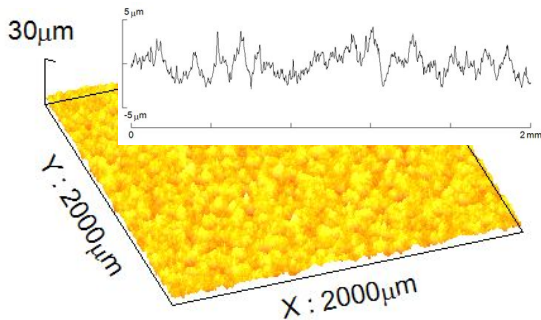
4. 研究成果

測定されたデータの一例として, ショットピーニング加工による表面の例を図3に示す. 凹凸の周期としてはほぼ同様であるが, これは同じ 50μm の砥粒を用いているためと思

れる．ただし，局所的な凹凸を見ると，アル



(a) ガラスビーズ投射



(b) アルミナ砥粒投射

図3 ショットピーニング加工面

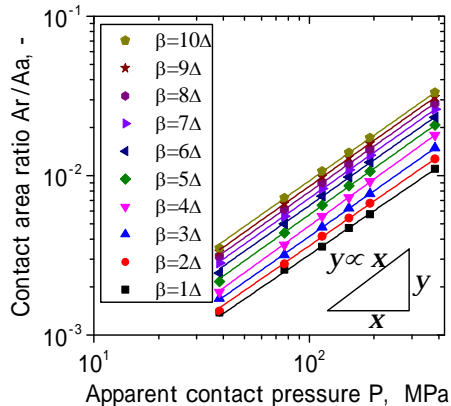


図4 接触面積率と面圧の関係

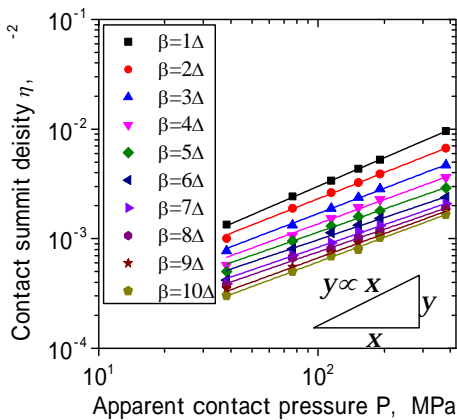


図5 接触突起密度と面圧の関係

ミナ砥粒の方が微小な凹凸が重畳している．相関距離 $\beta$ を計算すると，ガラスビーズが $26\mu\text{m}$ ，アルミナ砥粒では $23\mu\text{m}$ とほぼ近い値となった(差異約 10%)．一方で，べき乗係数 $\omega$ は，それぞれ0.96と0.70と，比較的差が大きい(差異約 27%)．過去の研究で行われて来たような相関距離だけを用いる方法によると，両方の面の微細な凹凸による差異が表現できないが，本研究で用いたべき乗係数も用いた手法では，その差異を明らかにすることができ，表面性状のデータベース化に有用である．また，これまでのデータ生成では相関距離 $\beta$ を変えて影響を見るにとどまっていたが，短波長・長波長の混合度合いを示す，べき乗係数 $\omega$ にも着目すべきであると言える．

図4に確率過程モデルを用いて生成された表面を用いた直接シミュレーションによる，みかけの接触圧力と接触面積率との関係を示す． $\beta$ が大きいほど接触面積率が増加して

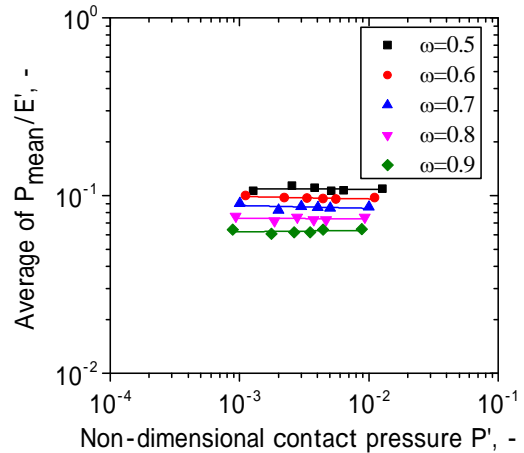


図6 無次元接触圧力と無次元突起接触平均圧力の関係

おり，いずれのテクスチャでも接触面積率は面圧にほぼ比例している．また，図5に接触突起の密度と面圧の関係を示す．この場合は $\beta$ が小さいほど大きな値となり，面圧の0.79乗から0.88乗の値となった．図6には，局所的な接触圧の平均値に及ぼす $\omega$ の影響を示す．局部接触圧力の平均値は面圧に影響されないが， $\omega$ の影響を強く受けることがわかる．これらの接触面積率や接触突起密度の傾向は，GWモデル等の統計的な確率理論による結果と定性的に一致している．確率モデルを用いて生成された表面を用いることで，実表面の欠陥や測定による影響に影響されず，体系的な結果を得ることができた．また，本実験で適用した直接シミュレーションの妥当性を確かめることもできた．

研究で得られた知見を実表面の摩擦の理解へ適用するため，本研究ではCVT表面の摩擦とテクスチャとの関係を検討した．テクスチャの種類はショットブラスト，ハードターニング，研磨面等である．これらの表面と実験による摩擦係数は，一般的に用いられる算

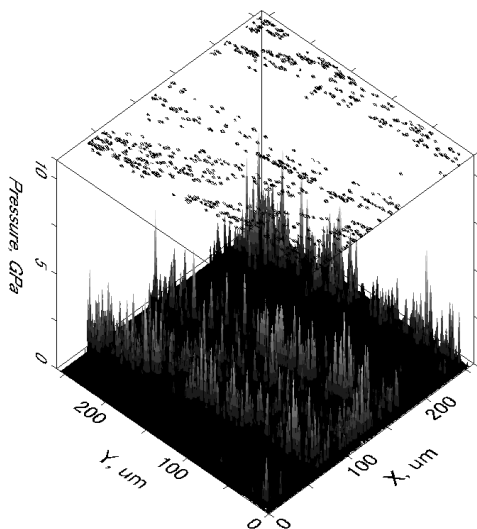


図7 テクスチャを考慮した接触状態の例

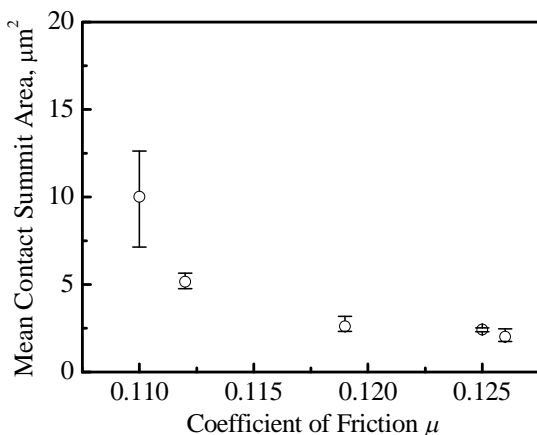


図8 接触突起の平均面積と摩擦係数の関係

術平均粗さ Ra で十分に説明できなかった。

図7に、ラッピングにより微細なテクスチャを考慮した表面に対する接触解析結果(圧力)を示す。真実接触部は、ごく一部であることと、うねりにも影響されていることがわかる。

図8に、前述のテクスチャに対する接触解析結果より算出された接触突起の平均面積と実験により得られた摩擦係数の関係を示す。摩擦係数は、接触突起密度と明瞭な相関を有していることがわかる。これは微小な突起が多く存在している方が、摩擦係数が高くてできることを意味している。接触突起を用いた評価手法では、通常の粗さパラメータよりも現象との相関が明確にできるという利点がある。このような知見は、トライボロジー表面の設計や現象の理解に役立つであろう。今後の課題としては、この手法を発展させ、より簡便に評価出来るようにすること、流体潤滑等のシミュレーションと連成させ、より多くの因子の影響を取り込むことが挙げら

れる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- 1) 内館道正, 三次元表面粗さパラメータの動向, トライボロジスト, 60, 1(2014)15-22 (査読なし).  
URL: [https://www.tribology.jp/dissertation/detail.php?id=11116&sort=vol\\_num\\_reverse](https://www.tribology.jp/dissertation/detail.php?id=11116&sort=vol_num_reverse)

〔学会発表〕(計6件)

- 1) M. Uchidate et al., Tribocorrosion Characteristics of Co-Cr-Mo Alloy in Decomposed Gases from Molten Plastics for Injection Molding Application, International Tribology Conference (ITC) Tokyo 2015, Tokyo, Japan (P1062-1063). 2015年9月17日.
- 2) 内館道正, 自己相関係数のべき乗係数が表面性状と接触状態に及ぼす影響, 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議 2015 春 姫路 (2015) G15(P520-521). 2015年5月29日.
- 3) 内館道正, 呉松竹, 鈴木映一, 内藤智之, 細貝拓也, 叶榮彬, 八代仁 Sn/Ag 系多層めっきの表面性状評価, トライボロジー会議 2014 春 東京 (2014)B14(p107-108). 2014年5月19日.
- 4) 内館道正・猪股雄太・清水友治・岩淵明, 直接シミュレーションを用いた等方性・正規分布テクスチャが接触状態に与える影響の検討, トライボロジー会議 2013 秋福岡(2013)F22. 2013年10月25日.
- 5) M. Uchidate, A. Iwabuchi, T. Shimizu, Study on Rough Surface Contact Using a Direct Simulation with Computer Generated Surfaces, World Tribology Congress 2013, Torino, Italy. 2013年9月12日.
- 6) M. Uchidate, A. Iwabuchi, T. Shimizu, Evaluation of 3-D Surface Texture based on Contact Asperities, 14th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Taipei, Taiwan, 2013年6月20日.

〔その他〕

研究紹介ホームページの URL : <http://www13.plala.or.jp/Uchi/field01.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

内館 道正 (UCHIDATE, Michimasa)  
岩手大学・工学部・助教  
研究者番号: 30422067