

自己整列微粒子を用いた摩擦パターンニング

首都大学東京 システムデザイン学部

教授 諸貫信行

(平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012006)

キーワード：摩擦，微粒子，方向性

1. 背景と目的

塑性加工における金型と被加工材間の摩擦は歩留りや仕上げ品質に関わる重要な要素であり，例えば深絞り加工ではしわ押さえの摩擦力を部位毎に変えたり [1]，制御を加えたりする試みがなされ [2]，さらにプレス金型の一部分に微細な加工を作製し，摩擦係数を変化させることで鋼板の変形を制御する方法が考えられた[3]．ますます多様化する要求に応えるため，摩擦制御の多様な選択肢を用意することは重要と考えられる．

著者らはこれまで，ナノ・マイクロ周期構造による摩擦機能を検討してきており [4]，例えば適切な凹凸構造を設けることで浴室床のすべりを減少させることもできている [5]，一方で微粒子を自己整列させて転写・固定化する方法も検討してきており，これらを組合せることで摩擦の方向性付与を含むパターンニングが可能になると考えられる．これらの知見は塑性加工における摩擦パターン作製にも適用できると考えられる．

2 平面間の固体摩擦力は凝着，掘起こし，凹凸の乗り越えなど複数のメカニズムの成分の和によって表される (図 1)．凝着は高い接触面圧によって 2 面が一体化してしまう現象であり，これをせん断破壊する際の仕事が摩擦仕事と捉えられる．掘起こしは片方の材質が他方より硬い場合に柔らかい材料を plowing (鋤く) する際に起こるもので，塑性変形分が摩擦仕事となる．乗り越えとは粗さを有する表面がすべる際に粗さを乗り越えるために必要な仕事が摩擦仕事となる．微小球と平面の接触状態は面圧で変化し，摩擦力を変化させる．微小球の集合構造と平面の摩擦はそのパターンの影響を強く受けると考えられるものの，そのモデル化と方向性付与はこれまで十分に検討されていない．

そこで，本研究では，(1) 乗り越え摩擦のみに着目したモデル化を行うとともに，(2) その検証と方向性付与の検討を行うことを目的とする．

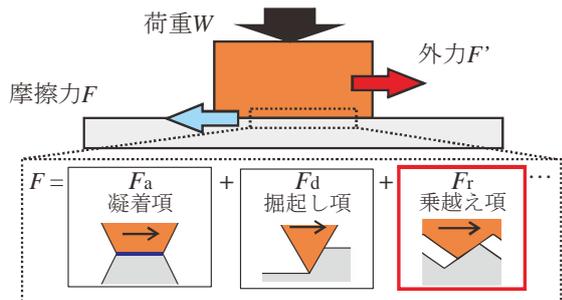


図1 摩擦のメカニズム

2. 力学モデル

図 2 のような球と弾性材の乗り越え説のモデルを考える．球と平面における乗り越え説による摩擦の変化の定量化を検討する．乗り越え項を他の因子よりも支配的にするため，ヤング率が大きく異なる組合せの接触を想定し，微小球を鋼球，弾性材をゴムとした．乗り越え説では局所的な接触角度が摩擦係数に影響し，式(1)のようなモデル式を考える．このとき，接触半径 a は式(2)に示す Hertz の接触理論をもとに求める．

$$\mu_r = \tan \theta = \frac{R - \sqrt{R^2 - a^2}}{a} \quad (1)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3W'R}{2E}} = \sqrt[3]{\frac{3R}{2} \cdot \frac{W}{n} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (2)$$

ここで，鋼球のヤング率： $E_1=210$ GPa，鋼球のポアソン比： $\nu_1=0.3$ ，ゴムのヤング率： $E_2=10$ MPa，ゴムのポアソン比： $\nu_2=0.5$ ， W' ：鋼球 1 個当たりにかかる荷重， W ：全体にかかる荷重， n ：鋼球の個数．

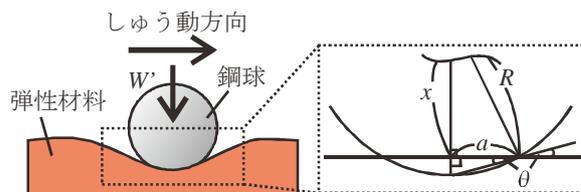


図2 乗り越え説モデル

乗り越え説のモデルをもとに，図 3 のような異方性のモデルを考えた．このときのしゅう動方向に対して，垂直方向と平行方向における摩擦係数のモデル式を式(3)(4)に示す． n は微小球の個数を表す．図 3 の(b)のように，平行方向にしゅう動するとき，球は一列に並んでおり，2 個目以降の球は弾性材の変形は周囲の変形の影響を受けるため 1 個目の球周辺の变形とは異なるため，乗り越える角度が異なると仮定した．従って，2 個目以降の球に作用する乗り越え摩擦は 1 個目のそれよりも小さくなる．これが摩擦に方向性を付与するための原理である．なお，1 個目の球が乗り越える角度を θ ，2 個目以降の球が乗り越える角度を θ' とおく． θ は式(1)をもとに算出した．また，垂直方向に乗り越える角度も θ とする．

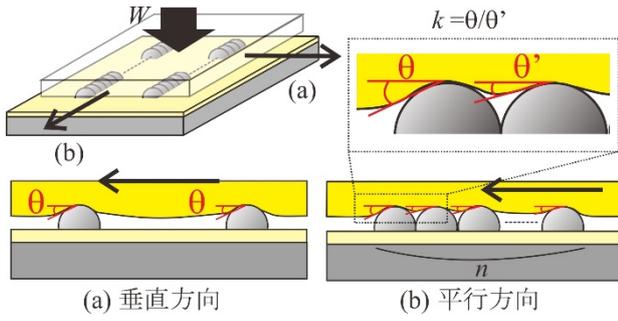


図3 摩擦異方性のメカニズム

異方性比は垂直方向の摩擦係数 μ_{\perp} を平行方向の摩擦係数 μ_{\parallel} で割ったものとする。異方性比を式(5)に示す。このとき、 $k = \theta/\theta'$ とおき、 k のパラメータを振って解析を行った。

このモデルから、粒径と荷重が変化することによって摩擦係数にどのような影響を及ぼすかを検証する。そこで、実験により異方性が最も発生しやすい条件を示唆し、実験結果と解析結果の比較を行う。

$$\mu_{\perp} = 2n \cdot \tan \theta \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mu_{\parallel} &= 2\{\tan \theta + (n-1)\tan \theta'\} \\ &= 2\{\tan \theta + (n-1)\tan(\theta/k)\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{異方性比 } \mu_{\perp} / \mu_{\parallel} \quad (5)$$

3. 実験装置及び方法

図4に実験装置を示す。鋼球を固定化した試料板を上方から所定の手で押付けながらゴム板を貼った電動ステージを往復させたときの摩擦力を測定した。圧電式のカセンサで押付け力と摩擦力の両方を測定したが、1つではモーメントの影響を受けて正しく測れない場合がある。そこで、2つを組合せて各センサに作用するモーメントの悪影響をキャンセルし、押付け力と摩擦力を同時に測定できるようにした。試料板とゴム板が平行になるように角度調節機構を用いて調整した。その結果は感圧紙を用いて試料と平面材の一般的な接触を確認した。

実験条件は表1に示したとおりであり、寸法の異なる鋼球をライン状に並べた試料を作製した。異方性を検証しつつ安定した接触を実現するためにラインは2列とした。図5は図3と同様な姿勢で鋼球とシリコンゴム (PDMS; polydimethylsiloxane) 板を接触させた状態を観察した結果であり、想定したとおりの接触状態であることがわかった。

シリコンゴム (PDMS) は無色透明であり、背面からこれを観察することで鋼球との接触状態を直接観察することができる (図6)。図6上は直径10mmの鋼球の接触部を示し、等しい大きさの接触点が2列に並んでいる様子が良くわかる。試料に書かれた1mm方眼のパターンより、接触領域の大きさは直径2mm程度であることがわかる。また、図6下は直径5mmの場合の結果を示し、個々の接触面積は直径1mm強になっていることがわかる。

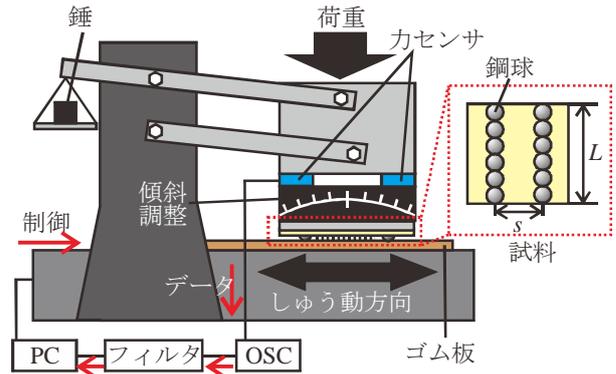


図4 実験装置と試料

表1 実験条件

鋼球直径 [mm]	0.3, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0
長さ L [mm]	40
間隔 s [mm]	20

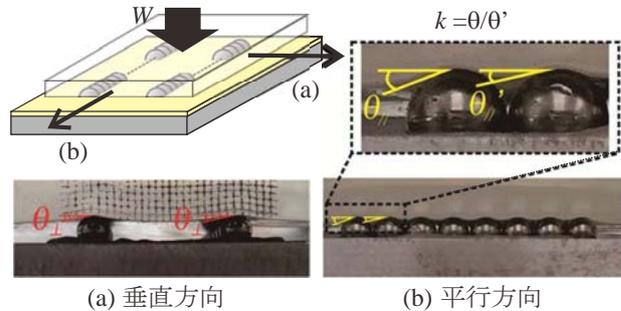


図5 接触状態の観察 (方向性)
(格子模様の間隔1mmで、変形の様子を見ることができる)

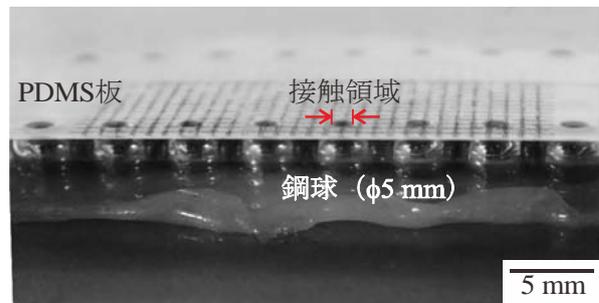
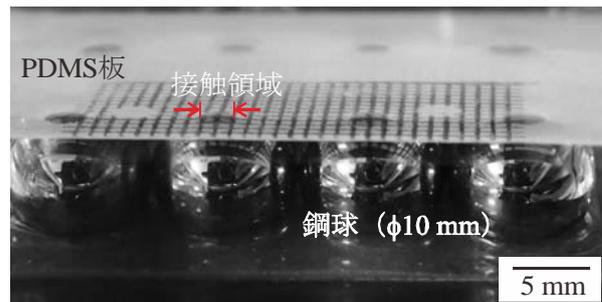


図6 接触状態の観察 (均一性)
(格子模様の間隔1mmで、接触域を見ることができる)

4. 実験結果

図7は測定した摩擦力の生データを示す。しゅう動開始とともに摩擦力は上昇し、ピークを過ぎた後はほぼ一定の値を保った後、ステージの停止に伴って摩擦力は小さくなる。これら一連のデータのうち、定常摩擦のデータを以降の処理に用いた。

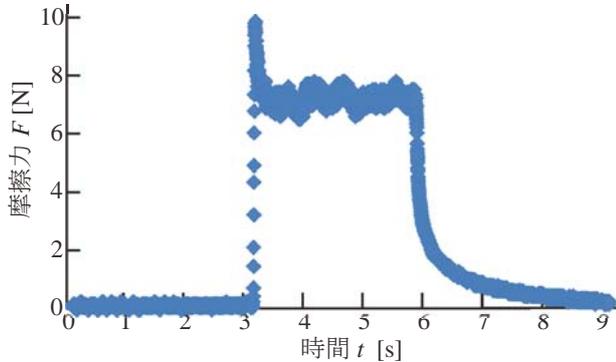


図7 摩擦力の測定例

測定される摩擦力には乗越え項の他の影響を含めた形になっているためか、実験条件を変えたときのバラツキが大きくなった。しかし、接触部の曲率以外の材質などは変えておらず、乗越え項以外の摩擦の要因となる因子は変わってないと考え、実験条件が変わった際の摩擦係数の変化率 D で傾向を評価することとした。図8は接触部の曲率半径の影響を調べた結果(図9の $W=5$ の結果)を示し、摩擦係数の絶対値ではなく、変動分だけに着目した。

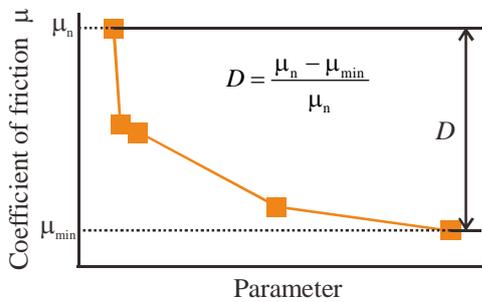


図8 摩擦係数の変動例

4.1 負荷荷重が摩擦係数に及ぼす影響

横軸を荷重、縦軸を摩擦係数の変化率 D とした実験結果とモデルの解析結果と併せて図9に示す。荷重が10N以上の場合には荷重とともに摩擦力が増加する傾向がみられ、モデルと対応することがわかる。その一方で、荷重が小さい場合は傾向が異なった。特に荷重が小さい条件では接触状態が種々の要因で変動しやすいと考えられる。図6に示した接触状態の確認は、弾性率の低いPDMSで調べた結果であり、実験に用いたゴム材の弾性率は高いものであった。さらに、今回のモデルで考慮していない他の因子が強く影響したと考えられる。JKR理論でも強い引力を想定しており[6]、例えば雰囲気中の水分が凝集した液架橋力により摩擦力が増大するという報告もある。

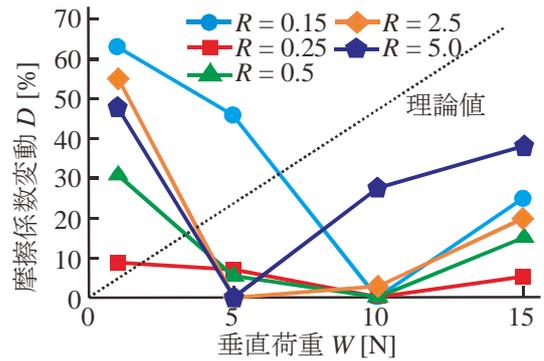


図9 荷重と摩擦係数変動の関係

4.2 曲率半径が摩擦係数に及ぼす影響

横軸を接触部の曲率半径、縦軸を摩擦係数の変化率 D とした実験結果とモデルの解析結果を図10に示す。解析結果では荷重にかかわらず粒径が小さくなるにつれて摩擦係数が大きくなっていったが、実験結果だと5Nのように荷重が小さい場合に解析結果と同様の傾向が得られ、それ以外のときは得られなかった。やはり、荷重の大小によって接触状態が異なった可能性が考えられる。特に粒径が小さい場合は局所的な接触角が大きく異なる可能性があり、乗越え項の変動が大きくなることが考えられ、実験結果がばらついたことも当然と考えられる。さらに、接触部に入り込んだゴミの影響も受けやすく、想定外の因子の影響が強くなったとも考えられる。

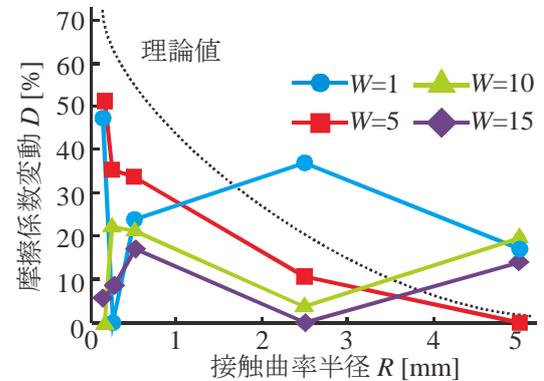


図10 接触曲率半径と摩擦係数変動の関係

4.3 異方性の評価

実験結果を解析結果と併せて図11に示す。解析結果によると粒径が小さくなるにつれ異方性比の値が大きくなる傾向であり、一部のデータを除けば定性的に類似の傾向と捉えることができる。特に5Nのときの実験結果は解析結果と同じく、摩擦係数の強い方向性が得られた。荷重が10および15Nで曲率半径が小さい場合にモデルと実験結果が大きく異なる点があるが、やはり接触状態が想定と異なるかあるいは、一様ではなかった可能性がある。変動 D が小さいということは条件に寄らず摩擦係数に変動がなかったということであり、他の摩擦因子が支配的になったと考えられる。

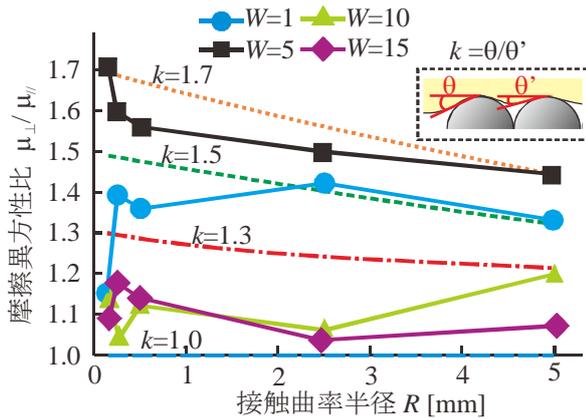


図 11 接触曲率半径と摩擦異方性

5. 今後の発展の方向性

上記の結果より、曲率半径が小さく比較的軽荷重の場合に摩擦係数の方向性が増すことがわかった。曲率半径をさらに小さくするためには、銅球よりもむしろシリカ等の微粒子が入手しやすい。自由なパターンに沿って微粒子を整列・固定化する方法があれば、摩擦の任意なパターン化が可能になる。以下ではこれまでの研究成果を参照しつつ、摩擦パターン化の今後の発展性を議論する。

直径 $1\ \mu\text{m}$ のシリカ微粒子を水に分散させ、この懸濁液を平面上に吐出・乾燥させることで、微粒子の自己整列構造を得ることができる。図 12 にはその概念図を示し、ディスペンサから懸濁液を一定速度で吐出しながら基板との間の相対運動を与える。基板上に濡れ広がった懸濁液は、水の乾燥に伴って収縮し、最後には微粒子間に作用する液架橋力によってお互いを引き付けあうため最密構造を形成する。条件を整えると単層の六方最密構造を得ることができる。

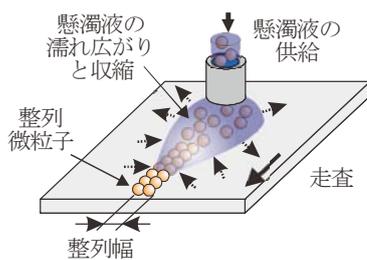


図 12 ディスペンサを用いたパターン化自己整列

図 13 は自己整列結果の例を示し、直径 $100\ \mu\text{m}$ のノズルからシリコン基板上に吐出した結果として幅約 $17\ \text{mm}$ のライン状構造が得られている。構造は単層であり、若干の欠陥部はあるものの最密構造に近いものが得られたことがわかる。電動ステージの精度を考えると微粒子直線パターンの真直度はもっと高精度になるべきであるが、懸濁液の濡れ広がりが必ずしも一様でなかった可能性がある。精度向上の余地は残っている。

また、シリカ微粒子の整列構造をシリコン基板上に設けても、摩擦を受けるような場面にはそのまま適用できない。

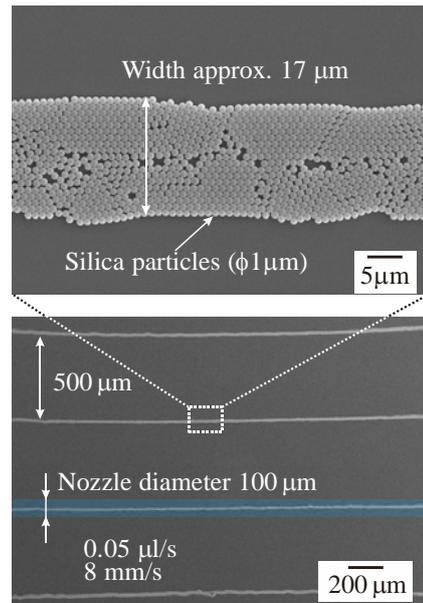


図 13 ディスペンサを用いたパターン化自己整列

図 14 は微粒子の固定法を提案したものである。基板 1 に微粒子を整列させるのに合わせて、別基板 2 に UV 樹脂をコーティングしておく。この時、UV 樹脂は紫外線に暴露しない状態で溶剤だけを飛ばして粘度を高めた状態にしておく。これらの基板を対抗させて圧力を加え、未硬化の樹脂の中に微粒子構造を埋没させる。この状態で紫外線を当てて樹脂を硬化した後に離型を行うと、微粒子構造が樹脂層に反転転写された形で固定化される。この時、微粒子の高さは基板 1 の平面度が転写される形になり、例えば鏡面仕上げしたシリコン基板を用いれば良好な平面度を得ることができると期待できる。

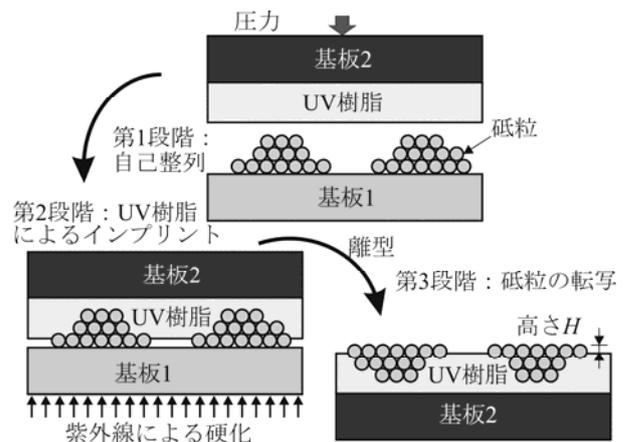


図 14 微粒子の転写・固定法

図 15 には転写を行った結果を示す。構造を破断した部分を含めて観察しているため、転写面に加えて断面を観察することができ、UV 樹脂に埋没した微粒子は単層の場合と多層の場合が含まれていることがわかる。しかし、樹脂の上面をみると広い面積にわたって一樣な高さで構造の表面が見えており、図 14 に示すような転写が行えたことがわかる。

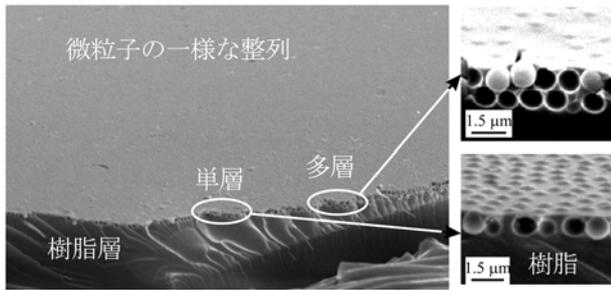


図 15 転写・固定した微粒子構造

図 16 は、微粒子を転写する際の圧力を変えることで埋没深さを変えることができることを示している。図中に示す表面観察写真を見ると転写圧によって粒径が異なるように見えるが、実験に用いた微粒子は直径 $1\ \mu\text{m}$ のシリカ微粒子であり、転写圧力によって転写深さが異なることを示したものである。

樹脂の種類を変えることも可能であり、紫外線硬化樹脂の代わりに熱可塑性樹脂を用いることも可能である。さらに、樹脂と微粒子親和性が異なるものを用いると、構造上に微粒子を固定化するのではなく、微粒子によるへこみ（形状）のみを転写することも可能となる。摩擦の方向性のみならず、表面材質の調整も可能になることから、多様な応用可能性を秘めていると考えられる。

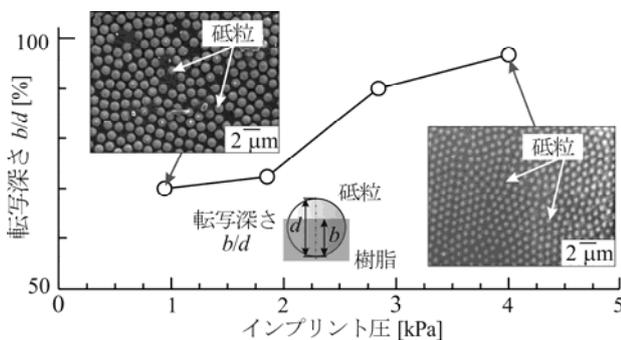


図 16 インプリント圧による転写深さの違い

文献[7]に示す研究では、スパイラル状に配置したシリカ微粒子を転写し、研磨液の流動性に配慮した回転研磨工具として用いることを検討した。ディスペンサによる微粒子整列の際に動作させるプログラムを工夫すれば、スパイラル以外の自由なパターンに微粒子を配置することができる。

さらに、三次元曲面上への微粒子整列も可能になっているため、例えば金型のような複雑形状に対しても表面にパターンニングを施すことは可能と考えられる [8].

6. まとめ

鋼球とゴム平面の滑り摩擦において、乗越え説が 1 つの要因であることを示すことができた。また、曲率半径の違いによって乗越える角度が変わる、つまり 1 列に並べたとき弾性材の変形量に違いが生じ、異方性に影響を与えることが分かった。

しかし、検討したモデルの推定精度は十分とは言えず、今後引き続き複雑な過程を含めたモデルの検討を加えるとともに、ピッチや列の数を変化させたときの異方性の変化を検証していく必要がある。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 AF-2012006 を受けて行われました。ここに謝意を表します。また、実験を遂行した研究室の学生諸氏に感謝します。

参考文献

- [1] 畑中伸夫ら, 八分割しわ抑え板を用いたアルミニウム板の摩擦援用深絞り加工, 軽金属, 61 巻, 10 号 (2011), pp.525-531.
- [2] 吉原正一郎ら, ファジイ適応制御を用いた可変しわ抑え力円筒深絞り加工, 日本機械学会論文集 (C 編) 64 巻, 624 号 (1998), pp.3209-3215.
- [3] 古口日出男ら, 表面微細パターンを有する半無限異方性弾性体の摩擦を考慮した接触解析, 日本機械学会[No. 0137-1], (2013).
- [4] 諸貫信行, 大和 朗, テクスチャの摩擦方向性を利用した微小しゅう動体の運動拘束, 精密工学会誌 69 巻, 11 号 (2003), pp.1631-1635.
- [5] 金子 新ら, 微細構造化による安全安心な表面設計—手足に触れる人工物表面の摩擦制御と滑り防止—, 精密工学会誌, 77 巻, 11 号 (2011), pp.1044-1049.
- [6] Etienne Barthel, Adhesive elastic contacts – JKR and more, J. Phys. D: Appl. Phys. (2008), Vol. 41, p.163001.
- [7] 諸貫信行ら, 微粒子のパターン化自己整列と転写を用いた粒子構造製作と研磨工具への適用検討, 日本機械学会論文集 C 編, 79 巻, 808 号 (2013), pp.4564-4571.
- [8] 西尾 学ら, 微粒子整列技術の三次元曲面上への拡張, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 810 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014mn0031.