



N. Moronuki

自己整列微粒子を用いた摩擦パターンニング

諸貫 信行 *

1. まえがき

塑性加工における金型と被加工材の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へ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。

機構のしゅう動部にオイルポケットを設けて潤滑性を良好にするという要求もあれば、逆に摩擦係数を上げたいという要求もある。著者らはこれまで風呂床に凹凸構造を設けることで摩擦係数を増し、濡れてもすべりにくい安全な床を検討し⁴⁾、また、マイクロ溝を設けることで1:2程度の摩擦方向性を付与できることを示してきた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。鉄道の車輪とレールの間に砂粒を介在させて摩擦を調整するのと同様に、接触する2面の状態は元のままで摩擦係数を調整したり方向性を付与したりすることができれば、塑性加工等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、摩擦係数を変化させる。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。

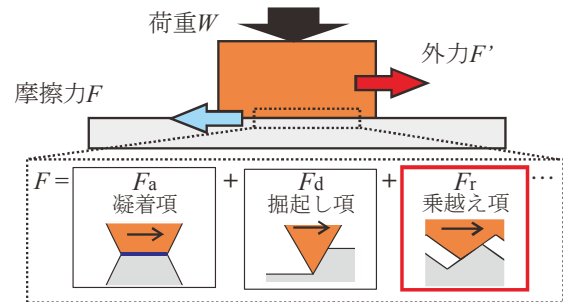


図1 摩擦のメカニズム

2. 力学モデル

図2のような球と弾性材が接触する状態のモデルにより、球と平面における乗越え説による摩擦の変化を検討する。乗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。

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

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

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, n : 全体にかかる荷重, n : 鋼球の個数とする。

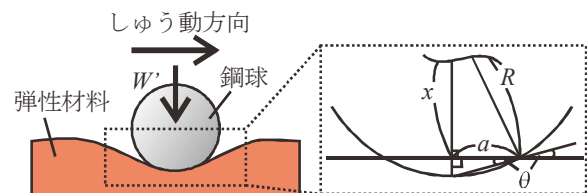


図2 乗り越え説モデル

* 首都大学東京 システムデザイン学部 教授

乗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。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それぞれ式(3)(4)に示す。 n は微小球の個数を表す。図3(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個目の球周辺の変形とは異なるため、乗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個目の球が乗越える角度を θ 、2個目以降の球が乗越える角度を θ' とおく。 θ は式(1)をもとに算出した。また、垂直方向に乘越える角度は θ で一定とした(図3(a))。

異方性比は垂直方向の摩擦係数 $\mu_{\perp}$ を平行方向の摩擦係数 $\mu_{\parallel}$ 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予測し、実験により異方性が最も発生しやすい条件を見出すとともに、実験結果と解析結果の比較を行った。

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

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

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

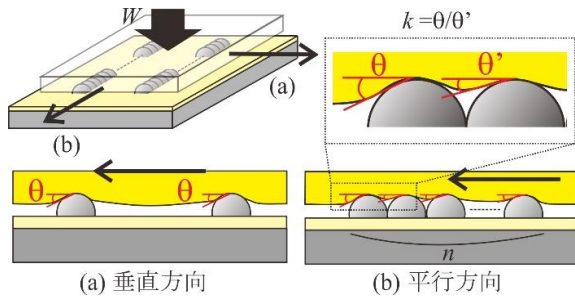


図3 摩擦異方性の付与

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力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、圧電式の力センサを2つ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するようにし、押付け力と摩擦力を同時に測定した。試料板とゴム板が平行に位置し、一様な接触状態になるように角度調節機構を用いて調整した。その結果は感圧紙で確認し、試料と平面材が片当たりしないように配慮した。

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、想定した通りの接触状態であることが端面の格子模様の変形から推定できる。

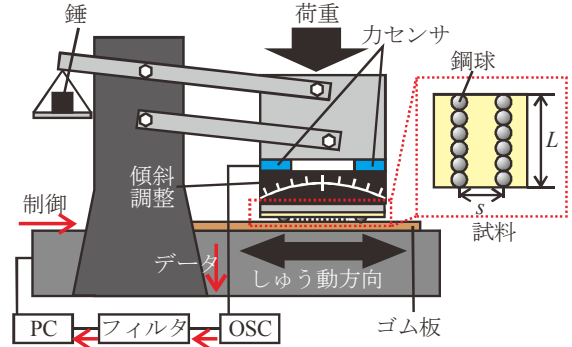


図4 摩擦異方性の付与

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

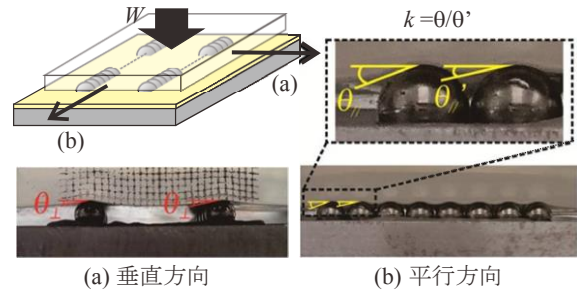


図5 接触状態の観察(方向性)

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(a)は直径10mmの鋼球の接触部を示し、等しい大きさの接触領域が2列に並んでいる様子が良くわかる。試料に描かれた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。直径5mmの場合の接触面積は直径1mm強であった(同図(b))。

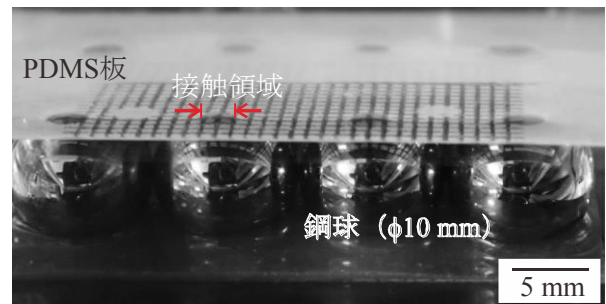


図6(a) φ10 mm の場合の接触状態

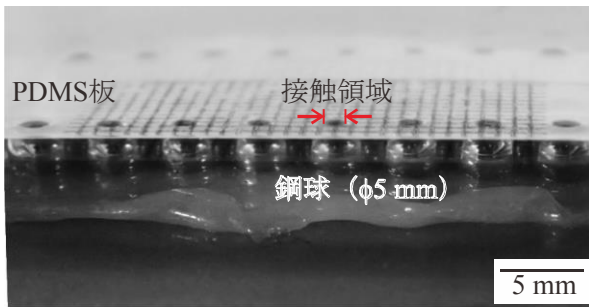


図 6(b) $\phi 5$ mm の場合の接触状態 (続き)

4. 実験結果

図 7 は測定した摩擦力の生データを示し、駆動開始後の摩擦力の時間的な変動を示したものである。測定開始 3 秒後の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、約 6 秒後のステージ停止に伴って摩擦力は小さくなった。しゅう動開始時のピークは静摩擦に相当するものであり、また、停止後にゆっくりと摩擦力が小さくなる理由は駆動部の弾性変形がゆっくりと回復するためと考えられる。このようなデータの変動と定常摩擦力の値を以降で議論する。

摩擦力を押付け力で割った摩擦係数で以降の議論を進めるが、図 7 のような変動を想定すると変動の大きさを指標の一つとして考える必要がある。そこで図 8 中に示すような式で求められる摩擦係数の変化率 D に着目し、種々の因子によってどのように変化するかを調べ、乗越し項を始めとする摩擦メカニズムに関する議論を進めることとする。

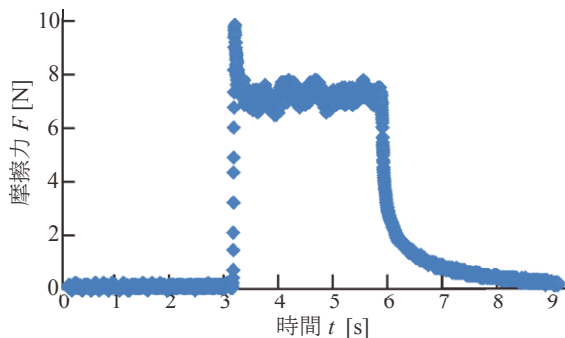


図 7 摩擦力の測定例

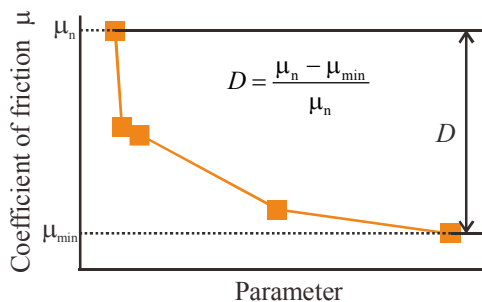


図 8 摩擦係数の変動例

4.1 負荷荷重が摩擦係数に及ぼす影響

図 9 に荷重の変化が摩擦係数の変動 D に及ぼす影響を示す。図中には実験結果とモデルの解析結果と併せて示す。荷重が 10 N 以上の場合には荷重とともに変動 D が増加する傾向がみられ、解析結果と定性的に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大きく異なった。例えば雰囲気中の水分が凝集して液架橋力を作用させ、摩擦係数が大きくなるなどの報告もあり、乗越し説以外の摩擦要因の影響が大きくなったと考えられる。

4.2 曲率半径が摩擦係数に及ぼす影響

図 10 は接触部の曲率半径が摩擦係数の変動 D に及ぼす影響を示す。図中には実験結果とモデルの解析結果を併せて示す。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、実験結果では 5 N のときのみ解析結果と同じ傾向の結果が得られ、それ以外のときはあまり良い一致を見なかった。この理由として、粒径が小さいほど介在するゴミ等の影響を受けやすく、接触状態が理想とは異なる結果となったと考えられる。

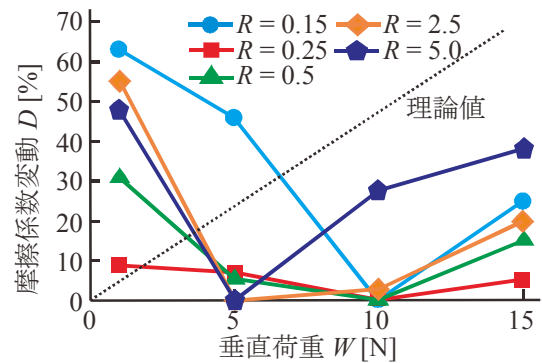


図 9 荷重と摩擦係数変動の関係

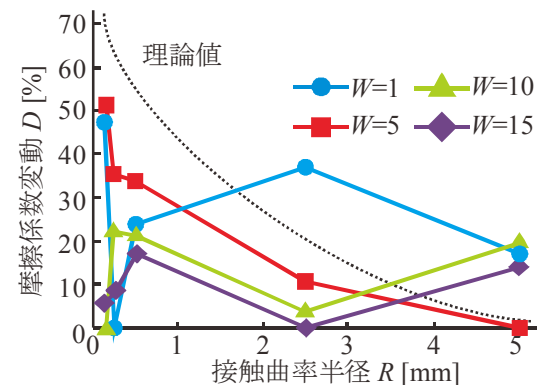


図 10 接触曲率半径と摩擦係数変動の関係

4.3 異方性の評価

図 11 には、主題となっている摩擦異方性に接触部の曲率半径が及ぼす影響を示す。解析では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がわかっている。実験結果では 5 N のときに解析結果と同じ傾向が得られ、荷重が異なる場合は、接触状態が異なってしまったと考えられる。すなわち、荷重が 10, 15 N の時はゴムへの食い込みが大きすぎて異方性が得られず、また、1 N の時は荷重が

小さく接触面積の変化があまりないことで異方性が得られにくい結果になったと考えられる。結果的に、今回の条件で調整可能な摩擦異方性の範囲は 0.2 程度に留まることになった。

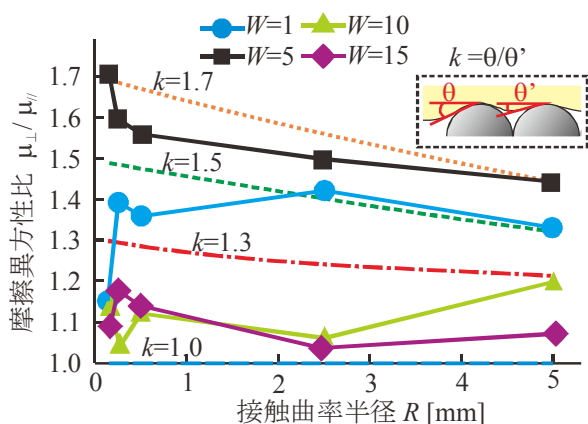


図 11 接触曲率半径と摩擦異方性

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、鋼球よりもむしろシリカ等の微粒子が入りやすい。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、摩擦の任意のパターニングが可能になる。以下ではこれまでの研究成果を参照しつつ、摩擦パターニングの今後の発展性を議論する。

直径 1 μm 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。

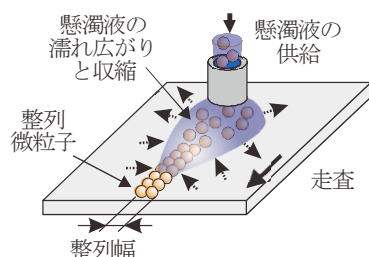


図 12 ディスペンサを用いたパターン化自己整列

図 13 は自己整列結果の例を示し、直径 100 μm 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 μm 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。

ここでは脆性材料であるシリコン基板上に微粒子構造を設けたため摩擦を受けるような場面にそのまま適用できないが、金型表面等への適用が今後考えられる。

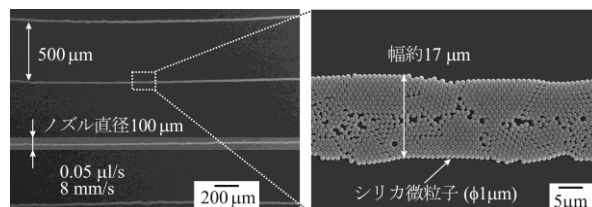


図 13 ディスペンサを用いたパターン化自己整列

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一方で、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を蒸発させて粘度を高めた状態にしておく。これらの基板を接触させて圧力を加え、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。

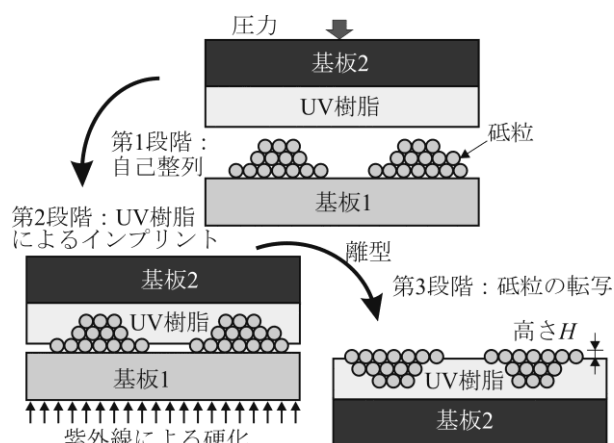


図 14 微粒子の転写・固定法

図 15 には転写を行った結果を示す。UV 樹脂に埋没した微粒子は場所によって単層の場合と多層の場合が含まれているが、樹脂の上面をみると広い面積にわたって様な高さや構造の表面が見えていることがわかる。このような手法により、例えば金型表面に微粒子を配置するとともに、脱落しないようにすることができると考えられる。

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。

文献 6) 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、回転精密研磨工具として用いることを検討した。プログラムさえあ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⁷⁾、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し、摩擦特性を調整することが可能と考えられる。

微粒子のパターンニングと固定化について幾つかの例を示したもののこれらの摩擦特性評価は行えていない。今後これらを進める必要がある。

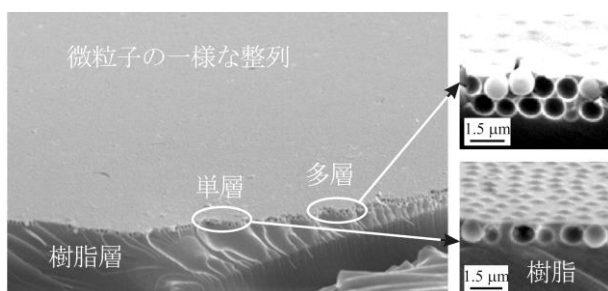


図 15 転写・固定した微粒子構造

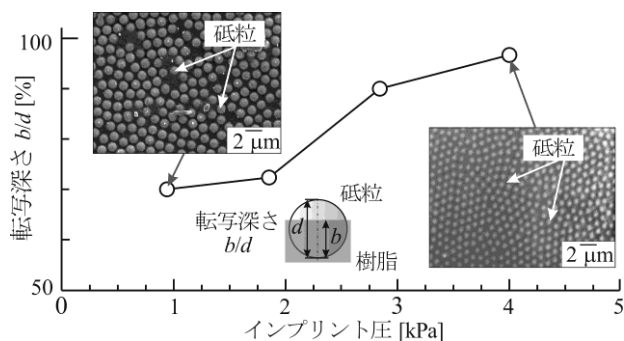


図 16 インプリント圧による転写深さの違い

6. まとめ

球と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。さらに、微粒子を用いた摩擦パターンニングの可能性を示した。

ピッチや列の数を変化させたときの異方性の変化や微粒子を適用した場合の検証を今後進める必要がある。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

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，61，10（2011）525.
- 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）64，624（1998）3209.
- 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) 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，77，11（2011）1044.
- 5) 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 69，11（2003）1631.
- 6) 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，79，808（2013）4564.
- 7) 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，80，810（2014）.

