

主軸の回転同期による高能率微細加工技術の開発 微細加工技術の開発と摩擦係数低減方法の検討

機械システム科 主任研究員 小 楠 進 一

固体表面に微細な凹凸を創成することで、固体表面に様々な機能（摩擦係数の低減、流体抵抗の低減、光の反射・回折の制御、熱伝達の向上）を付加することができる。本研究では、安定して微細加工を行う装置の開発と微細加工における加工時間の短縮方法を検討した。さらに、摺動面の摩擦係数の低減方法を検討した。これらの結果を報告する。

1. 緒 言

図1に示すように、固体表面に微細な凹凸を創成することで、固体表面に様々な機能（摩擦係数の低減、流体抵抗の低減、光の反射・回折の制御、熱伝達の向上）を付加することができる。

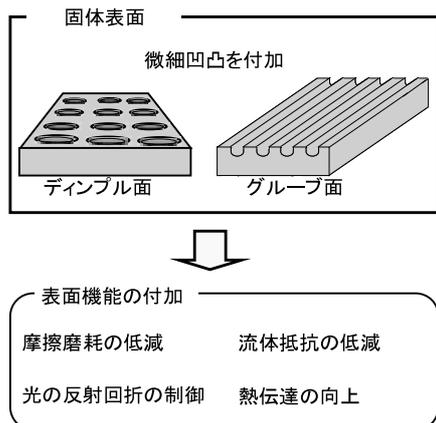


図1 微細加工による表面機能の付加

この技術の実用化のためには、以下の課題を解決する必要がある。

- 汎用的なマシニングセンタは、質量が大きなステージであるために、大きな慣性力を受ける。よって、精密な位置決めが必要な微細加工には不向きである。また、微細加工では小径エンドミルを使用する。よって、主軸の振れが大きいと小径エンドミルはチップングする。さらに、微細加工では精密な工作物の位置・姿勢の調整が必要なため、コンパクトで小回りのきく加工機のほうがよい。
- 微細なディンプル面を作成する際、加工時間が問題となる。そこで、平成19年度から平成21年度に開発した高速ディンプル創成法を微細加工に適用することにした。この高速ディンプル創成法は、

工具を傾斜させ、主軸の回転と工具の送りを同期させ、高速にディンプルを創成させる方法である（図2を参照）。この創成法では、切り込み深さが深い場合や、ディンプルの間隔が大きい場合、工具逃げ面と工作物が干渉する問題が残っていた。この干渉が小径エンドミルのチップングや精度低下の原因となる。

- 摺動面の摩擦係数を低減させる表面形状が明確でない。

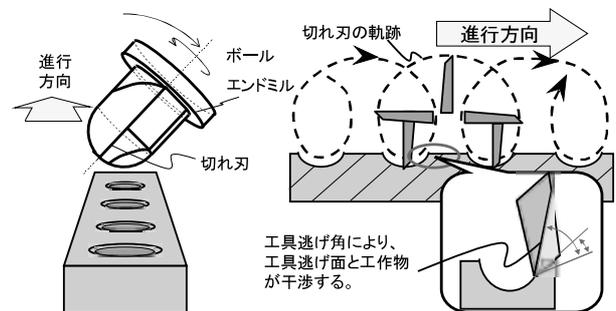


図2 高速ディンプル創成法の問題点

これらの課題を解決するために、本研究では、安定して微細加工を行う装置の開発を行った。また、高速ディンプル創成法における工具逃げ面と工作物の干渉を回避するため、最適な工具逃げ角の決定方法の開発を行った。さらに、摺動面による摩擦係数の低減方法を検討した。これらの結果を報告する。

2. 微細加工装置の開発

2.1 微細加工装置の開発方法

開発した微細加工装置を図3に示す。この微細加工装置の特徴は、小型でスピンドルを傾斜でき、安価に

作製できることである。表 1 に微細加工装置の仕様を示す。

精密位置決めのための工夫として、ブロックゲージなどの基準寸法の値から位置決め位置を補正できるようにした(図 4 上参照)。また、工作物の姿勢を調整するために、調整台を設けることにした(図 4 下参照)。

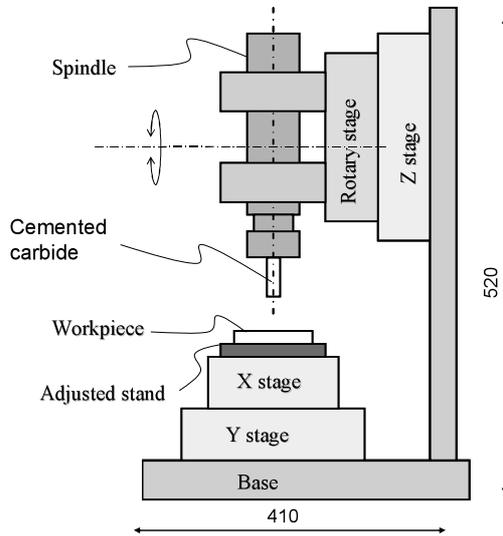


図 3 微細加工装置

表 1 微細加工装置の仕様

	Maximum displacement	Resolution
X and Y stage	100mm	1 μm
Z stage	100mm	0.02μm
Rotary stage	-	0.004°
	Maximum spindle speed	Spindle Accuracy
Spindle	60,000min ⁻¹	within 1 μm

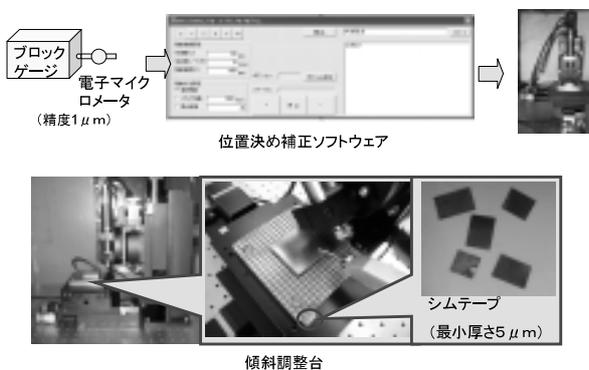


図 4 精密位置決めのための工夫

2.2 最適な工具逃げ角決定方法

最適な工具逃げ角決定方法を図 5 に示す。ディンブ

ルの間隔(1刃当たりの送りに相当する)ディンブの深さ(切り込み深さに相当する)切れ刃形状、工具逃げ角、逃げ面の長さを設定することにより、工具が回転移動したときの切れ刃上の点の位置や、工具逃げ面上の点の位置を、数式で表現できる。これを用いることで、工具逃げ面と工作物が干渉する位置を予測し、最適な工具逃げ角を決定する。

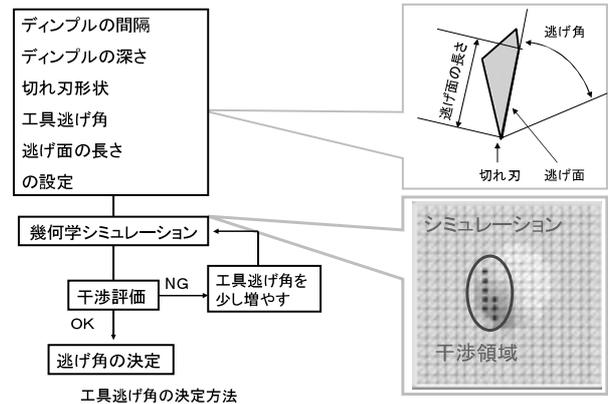


図 5 工具逃げ角の決定方法

2.3 微細加工装置の評価方法と評価結果

開発した微細加工装置の性能を評価するために、間隔500μm、深さ5、10、15μmのディンブを作製することを目標とし、工具を上下移動させてディンブを作製する実験を行った。切削方法を図 6 に、切削条件を表 2 に示す。このとき、切り込み速度5μm/s、逃げ速度5μm/s、送り速度500μm/sとした。また、回転速度30,000min⁻¹で回転しているR0.5mmの超硬ボールエンドミルを用いて、S45Cの金属プレートを切削することにした。

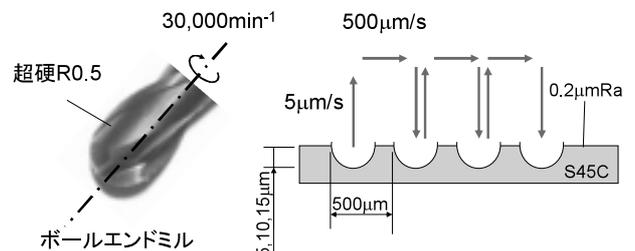


図 6 切削方法

表2 切削条件

直径 (mm)	工具材料	回転速度 (min ⁻¹)	切り込み速度 (μm/s)	送り速度 (μm/s)	目標深さ (μm)	目標間隔 (μm)
R0.5	超硬	30,000	5	500	5, 10, 15	500
工作物材料			S45C			
表面粗さ			Ra0.2μm			

切削実験を行った結果を図7に示す。深さの最大誤差は3.2μmであり、間隔の最大誤差は4.3μmであった。

この結果から、開発した微細加工装置は、実用上問題なくマイクロオーダーの微細加工が可能であると結論付けた。

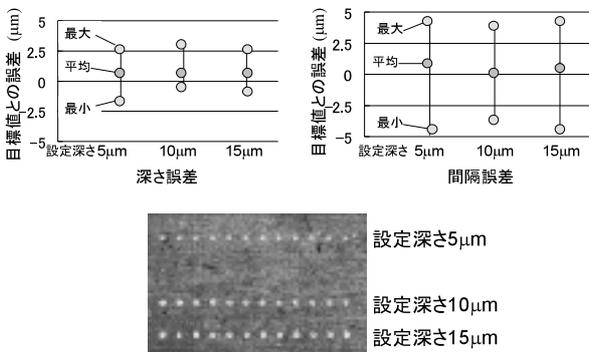


図7 微細加工装置の性能評価結果

2.4 工具逃げ角決定方法の評価方法と評価結果

間隔500μm、深さ15μmのディンプルを高速ディンプル創成法で作製することを前提とし、一般的な逃げ角15°のボールエンドミルと開発した逃げ角25°のボールエンドミル（工具逃げ角決定方法より逃げ角を決定した）を切削実験により比較した。

切削方法を図8に、切削条件を表3に示す。送り速度3.125mm/sとし、回転速度312.5min⁻¹で回転しているR0.5mmの超硬ボールエンドミルを用いて、S45Cの金属プレートを切削することにした。

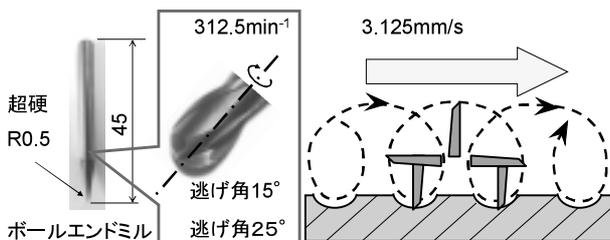


図8 加工方法

表3 切削条件

直径 (mm)	工具材料	回転速度 (min ⁻¹)	送り速度 (μm/s)	間隔 (μm)	切り込み (μm)
0.5	超硬	312.5	3125	500	15
工作物材料			S45C		
表面粗さ			Ra0.2μm		

切削実験を行った結果を図9に示す。切削実験の結果、逃げ角を最適化したボールエンドミルは、逃げ面と工作物が干渉せず、安定して高速ディンプル創成法を行うことができた。また、ディンプルを0.2s/個で作製することができた。

この結果から、開発した逃げ角の決定方法により、工具逃げ面と工作物の干渉回避が可能と結論付けた。

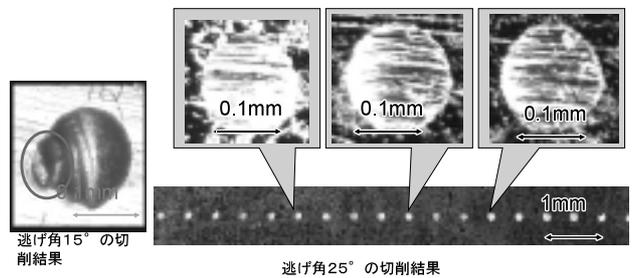


図9 工具逃げ角の決定方法の評価結果

3. 微細加工による摩擦係数の低減方法の検討

3.1 微細凹凸の効果

きさげ加工により摺動面に微細な凹凸を設けて、摺動面の摩擦係数を低減している。微細凹凸の効果は以下の通りである（図10参照）。

- 1) 摺動面同士のすり合わせにより、摩擦係数の増加の原因となる硬い磨耗粒子が生じる。この磨耗粒子の逃げ場所の確保を行っている。
- 2) 潤滑油が移動したとき、摺動面に凹凸があると、流路が狭まることによる圧力上昇と流路が広がることによる圧力下降が生じる。流路が広がるとき、気泡が発生するために、圧力下降は小さい。よって、全体を見れば、圧力上昇が生じていることになる。
- 3) 潤滑油を貯蔵する効果があり、油膜厚さが小さくなると、マイクロプール効果により、潤滑油の圧力が大きくなり、当たり面に潤滑油が流れ込む。

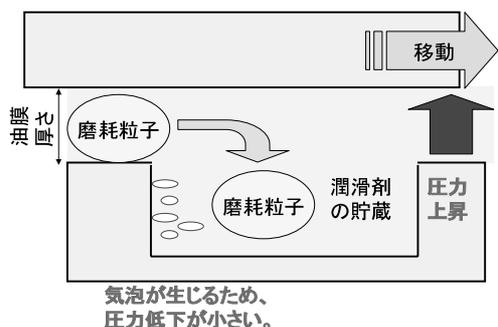


図10 摺動面上の微細凹凸の効果

潤滑状態から見た微細凹凸の効果を説明する。境界潤滑において、摩擦係数は金属接触点のせん断と薄い油膜のせん断に影響を受ける。流体潤滑において、摩擦係数は流体の粘性抵抗に影響を大きく受ける。よって、微細凹凸が上述の効果を持つならば、境界潤滑においてその効果を発揮する。今回の検討では、図11の波線のように、境界潤滑における摩擦係数が低減することを期待した。

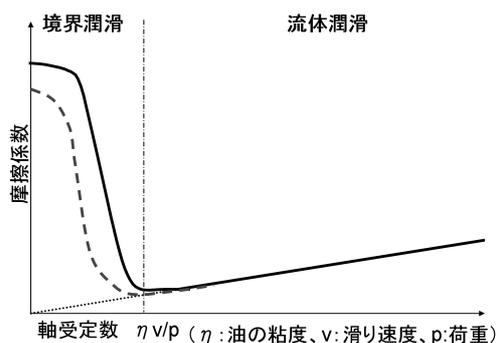


図11 微細凹凸による摩擦係数の低減の期待

3.2 摩擦試験装置と摩擦条件の決定方法

摩擦試験装置を図12に示す。ディスクは回転し、指示した荷重によりリングが押し込まれる。このとき、ロードセルにより、摩擦力は測定される (JIS K7218)。

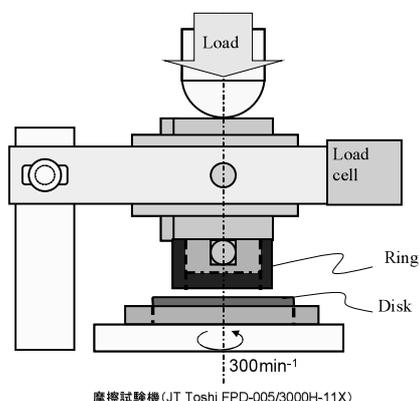


図12 摩擦試験装置

摩擦係数はいろんなパラメータの影響を受ける。正確に摩擦状態を把握するために、荷重の変化が支配的に油膜厚さを変化させ、摩擦係数を変化させる摩擦条件を導き出す必要がある。

まず、表4の摩擦条件で摩擦試験を行った。その結果、最小荷重200Nで、すでに摩擦係数0.2(境界潤滑)であった。最小荷重では、流体潤滑であってほしいので、潤滑状態を液滴供給からオイルバスに変更した。

次に、変更した摩擦条件で試験を行った結果、再現性がなかった。そこで、コンタミ、洗浄用エタノールがオイルバスに入り込まないように工夫した。

再試験を行った結果、潤滑油の温度上昇による潤滑油の粘性の低減が摩擦係数に大きく影響を与えていることが分かった。そこで、潤滑油の温度変化を小さくするべく、潤滑油の粘度を68番(摺動油)から32番(タービンオイル)に変更し、ディスクの回転速度を2000RPMから300RPMに変更することで、潤滑油のせん断熱の発生を抑えた。さらに、室温を25℃一定に調整した。

最終的に摩擦試験の条件は表5となり、図13が示す通り、荷重の変化が支配的に油膜厚さを変化させ、摩擦係数を変化させる摩擦条件となった。

表4 初期の摩擦条件

荷重	200N
回転速度	2000min ⁻¹
潤滑状態	液滴
オイルの粘度	68mm ² /s
室温	制御なし
摺動面の状態	0.2Raの平面

表5 最終的な摩擦条件

荷重	200N
回転速度	300min ⁻¹
潤滑状態	オイルバス
オイルの粘度	32mm ² /s
室温	25℃
摺動面の状態	0.2Raの平面

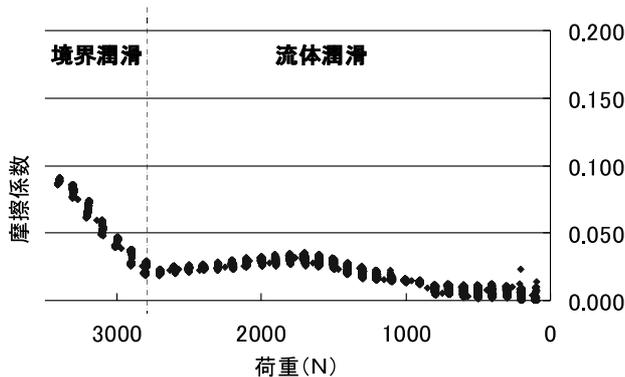


図13 最終的な摩擦条件における荷重と摩擦経緯数の関係

3.3 微細凹凸の影響の評価方法

前節で決定した摩擦条件を用いて、摺動面上の微細凹凸の影響を評価することにした。微細溝を付加した試験片の形状を図14に示す。微細溝の間隔、深さ、幅を表6に示す。ディスク側の摺動面に、溝幅0.1、0.2、1 mm、溝間隔1、2、4 mmを付加して、きさげ面に近似させた。当たり面は、三面摺りしたオイルストーンとダイヤモンドコンパウンドで仕上げ、Ra0.2μm以下とした。

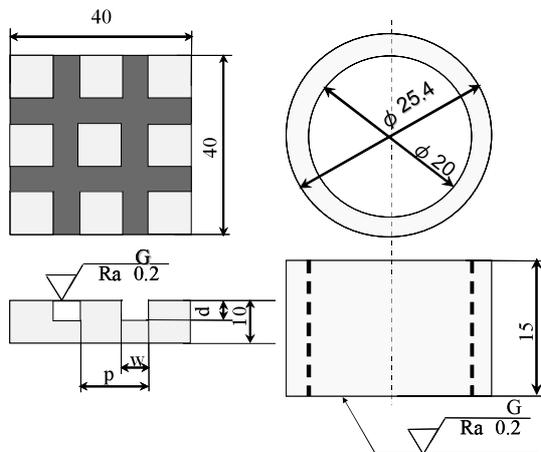


図14 微細溝を付加した試験片形状

表6 微細溝の間隔、深さ、幅

P (mm) W (mm) α (μm)	P (mm)			(None)
	1	2	4	
None	Plane	Plane	Plane	Plane
0.1 5				Plane
0.2 10				Plane
1 50				Plane

3.4 微細凹凸の影響の評価結果

図15に間隔の影響を、図16に幅の影響を示す。微細加工を行うと、低荷重で摩擦係数が大きくなっており、境界潤滑状態（油膜厚さが小さい状態）になっていると考えられる。同様に、幅を変えてみても、微細加工を行うと、低荷重で摩擦係数が大きくなっており、境界潤滑状態になっていると考えられる。

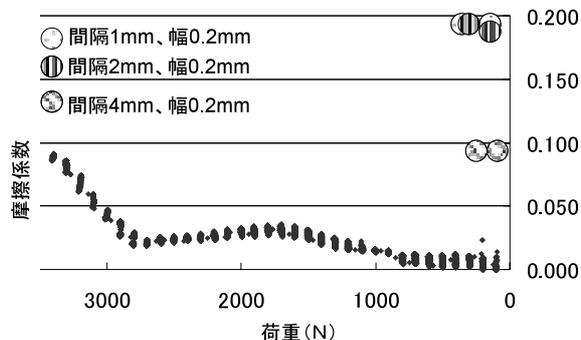


図15 改善前の摩擦条件

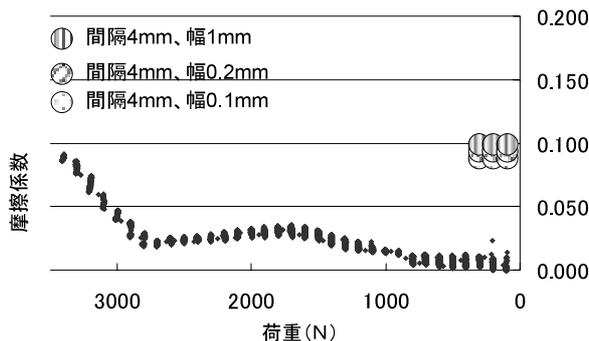


図16 改善前の摩擦条件

3.5 考察

期待とは異なり、微細溝を付加したほうが、低荷重で摩擦係数が大きくなる（境界潤滑状態になる）理由を考察する。3.1節で説明したとおり、微細溝を作成すると、潤滑油に動圧が生じる。ディスクの溝がマス目状であるため、摺動面間に生じる潤滑油の動圧は不規則に摺動面を押す。この試験では、リングを支えるジグは2点で支持されているために、リングに小さな振れが生じる。リングの振れが生じると、リングの外周部のみがディスクの凹凸と接触することになる（図17参照）。このとき、接触圧力が極大となるために、リングの外周部をディスクの凹凸部が削る状態になる。このため、摩擦係数が増加した（境界潤滑状態になった）と考えられる。

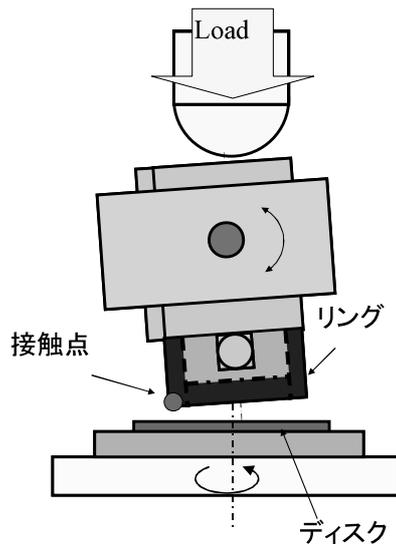


図17 リングの振れ

この考察を確認するために、試験片の摺動面の摩擦痕を測定した(図18参照)。その結果、図19の通り、リングのエッジ部ディスクの摩擦痕が一致することを確認できた。

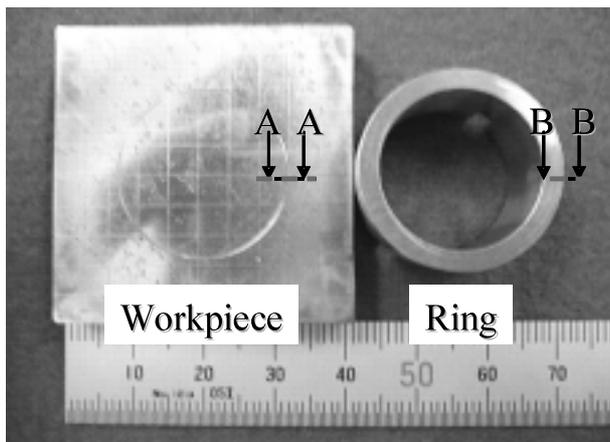


図18 改善前の摩擦条件

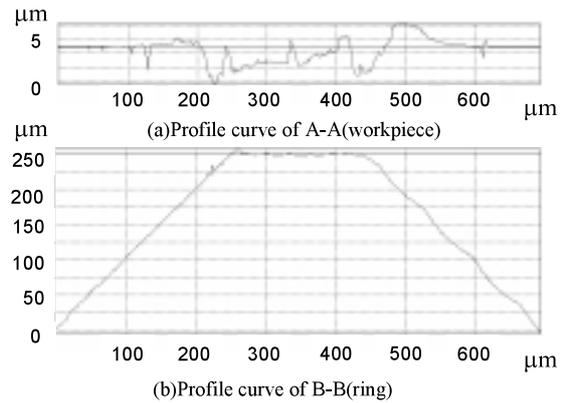


図19 改善前の摩擦条件

この結果から、スラスト荷重の摩擦を想定した場合、機構的に正確に水平を維持できなければ、微細凹凸により生じる潤滑油の動圧が摺動面同士の平行維持を邪魔し、エッジと微細凹凸の接触なり、摩擦係数が大きくなる(境界潤滑になる)ことが分かった。

4. 結 言

この報告でのまとめを以下に示す。

- 1) 開発した微細加工装置は、実用上問題なくマイクロオーダーの微細加工が可能である
- 2) 高速ディンプル創成法において、開発した逃げ角の決定方法により、工具逃げ面と工作物の干渉回避が可能である。
- 3) スラスト荷重の摩擦を想定した場合、機構的に正確に水平を維持できなければ、微細凹凸により生じる潤滑油の動圧が摺動面同士の平行維持を邪魔し、エッジと微細凹凸の接触なり、摩擦係数が大きくなる(境界潤滑境界になる)ことが分かった。