

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760609

研究課題名(和文)テーラードテクスチャリングによるマイクロ精密異形プレス加工のメゾトライボ特性制御

研究課題名(英文) Mesoscopic tribological control in microforming by tailored surface texturing

研究代表者

清水 徹英 (Shimizu, Tetsuhide)

首都大学東京・システムデザイン学部・助教

研究者番号：70614543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、マイクロ精密プレス成形における金型の複雑な接触状態に対して、最適な微細テクスチャ形状を配置することで、トライボロジー特性の最適化を図るものである。特に「マイクロプレス加工特有」の接触環境下における、微細テクスチャ形状・寸法と摩擦・摩耗特性との関連性を明らかにすることを研究目的とした。本研究を通して、乾燥摩擦下におけるテクスチャリングの効果として、摩耗粉の排出の促進が大きな役割を果たすことを示した。これに基づき、精密プレス加工中における接触面積(摺動長さ)および接触面圧に応じてこれらテクスチャの構造寸法および構造間隔の設計が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：To realize the optimization of tribological properties in microforming by designing the surface texture on microforming die, which is under the complex contact conditions, the present study aims to clarify the relevance between the dimensions of micro surface texture and friction and wear properties under the specific contact condition in microforming. Through the investigation, it was found that the main contribution of the surface texturing under dry sliding friction were the enhancement of the wear debris ejection. Based on this result, it was demonstrated that the surface texturing dimensions of its gaps and width could be designed corresponding to the variation of contact length and surface pressure during the microforming process.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：精密プレス加工 トライボロジー 表面テクスチャリング ダイヤモンド状炭素膜 マイクロ金型 その場観察 摩耗粉 表面設計

## 1. 研究開始当初の背景

デバイスの小型化、多機能集積化への要求に対し、優れた生産性を特徴とするマイクロ精密プレス加工技術が、 $\mu\text{m}$ ～サブ mm オーダーの部品生産における低コスト化に貢献してきている。特にマイクロ精密プレス加工では、寸法の微小化に伴い、体積に対する表面積の相対比が増大するため、摩擦・摩耗特性等の界面挙動が、顕著に成形限界および製品精度に影響を及ぼす。

特に寸法の微小化に伴う潤滑効果の低下、材料のハンドリング性の悪化、製品清浄度等の観点から、ドライ加工への要求が高まっている。ドライ加工のような無潤滑接触下では、金型-被加工材間の表面凹凸の直接接触挙動が支配的となるため、①表面材料構造と②表面凹凸等の幾何学的因子に起因して摩擦挙動が大きく変化する。

これに対し、表面幾何学的形状をアクティブに制御する「表面テクスチャリング技術」は近年のレーザー加工等の加工技術の精度向上により、他の技術分野において数多くの研究が報告されている一方で、当該金属成形分野に応用した研究例は極めて少ない。特に複雑形状を一度にニアネットシェイプ成形するマイクロ精密異形プレス加工において、金型の複雑な接触状態に対し、最適な微細テクスチャ形状を配置することが可能となれば、材料流動の均一化が図られると共にさらなる成形限界の向上が期待される。

## 2. 研究の目的

上記背景に基づき、本研究ではマイクロ精密プレス加工における金型の複雑な接触状態に対して、最適な微細テクスチャ形状を配置することで、トライボロジー特性の最適化を行うことを大きな研究目標とした。これを「テーラードテクスチャリング」と称し、今後のマイクロ金型の表面設計における新たな開発指針の構築を目指した。特に以下の検討課題の解明に取り組んだ。

- (1)表面テクスチャ形状・寸法が乾燥摩擦下のトライボロジー特性に及ぼす影響
- (2)マイクロプレス実加工接触条件下におけるテクスチャリングの効果
- (3) マイクロプレス成形の実接触条件に対応した最適なトライボ表面設計

## 3. 研究の方法

上記3点の検討課題に対し、下記の通り研究を遂行した。

- (1) DLC 薄膜を用いたテクスチャの創製とボールオンディスク摩擦摩耗試験による基礎的トライボロジー特性評価

テクスチャ形状・寸法の決定に対して、Bhushan の寸法効果モデルを導入し、精密プレス加工における面圧領域(100MPa~1GPa)

での、「乾燥摩擦の寸法効果」が発現しうる接触長さを算出した。テクスチャ構造の作製方法として、基板表面にメタルマスクを固定し、その上から DLC 膜を成膜する手法を採用した。作製した各種テクスチャ構造寸法を持つ DLC 膜に対して、被摺動材の塑性変形を含まない基礎的な摩擦試験として、ボールオンディスク型摩擦摩耗試験を行った。摩擦係数の推移の傾向及び摺動面観察より、テクスチャ寸法(構造幅・構造間隔)が摩擦・摩耗特性に及ぼす影響について検証した。

- (2) マイクロ塑性加工用摩擦試験による乾燥摩擦下のテクスチャリング効果の検証

金属箔材の塑性曲げ変形を考慮した“プロセス”トライボロジーをより忠実に再現するため、順送型のマイクロハット曲げ試験機を新たに設計した。曲げ金型の曲面形状に DLC テクスチャを付与するため、上記同様、メタルマスクを用いて DLC テクスチャ構造を作製した。テクスチャリングの効果을明らかにするため、金型にサファイア工具を用いたその場観察システムを構築し、摺動中の界面接触状態を観察した。特にテクスチャを施していない非テクスチャ金型との比較により、テクスチャ付与による効果を検証した。

- (3) マイクロプレス成形の有限要素解析に基づいたテクスチャ寸法設計

テクスチャリング形状および寸法の金型曲面における配置を設計するため、1 プロセスにおけるマイクロ金型の摺動長さおよび見かけの接触面圧の推移を有限要素解析により検証した。対象加工法として、より実加工に近い三次元形状成形法として、深絞り加工を対象に解析を行った。(1)および(2)項における基礎的知見に基づいて、金型各部位におけるテクスチャ寸法配置に関する提案を行った。

## 4. 研究成果

- (1) テクスチャ構造を有する DLC 薄膜の創製

テクスチャの形状として、接触面積の算出が容易な矩形形状を採用し、DLC 薄膜を対象に、相手材として鋼材および純チタン材の機械的特性を用いて算出した結果、構造幅約  $150\mu\text{m}$  以下および構造間隔約  $100\mu\text{m}$  以下を対象寸法とする事とした。

DLC 膜の成膜にはイオン化蒸着法を採用した。原料ガスにはベンゼン( $\text{C}_6\text{H}_6$ )を用いた。また基板バイアス電圧には、ボールオンディスク試験において低い摩擦係数が得られた基板バイアス-1.0kV で成膜を行った。表 1 にその成膜条件を示す。メタルマスクには上記テクスチャ寸法に対応する各種ワイヤ径、メッシュ間隔を有するステンレス製のメタルメッシュを用いた。

作製したテクスチャ構造の非接触三次元測定機による測定事例を図1に示す。テクスチャの高さは約700nm、幅140 $\mu$ mで構造間隔は約60 $\mu$ mとなり、メタルマスクの形状に沿ったテクスチャ構造を有するDLC膜を作製することに成功した。成膜後のDLC薄膜の機械的特性をナノインデンテーション法により測定した結果、ヤング率287.3 $\pm$ 9.5GPa、硬さ27.8 $\pm$ 1.1GPaが得られた。また、図2に示す通り、ラマン分光分析による結果においても、DLC薄膜に典型的なブロードピークが得られた。

表1 DLC成膜条件

基板前処理	Ar イオン照射 1.5kV-30min
ガス種	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
ガス流量 /sccm	1.52
プロセス圧力/Pa	2.4 $\times$ 10 <sup>-1</sup>
バイアス電圧/kV	-1.0
フィラメント電流/A	30
アノード電圧/V	30
成膜温度/℃	200
成膜時間/min	270

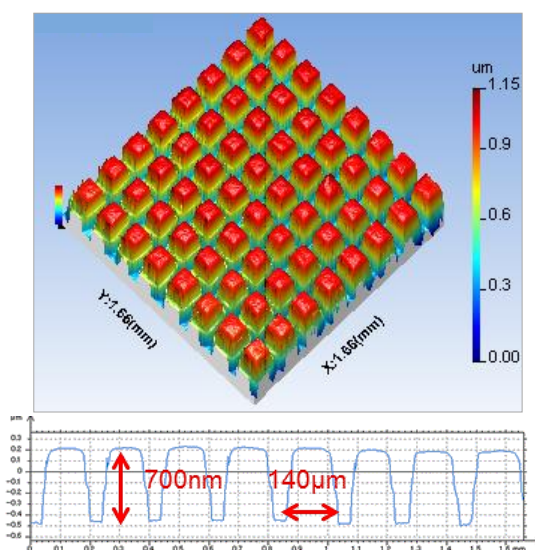


図1 作製したDLCテクスチャ構造の非接触三次元測定機による測定事例

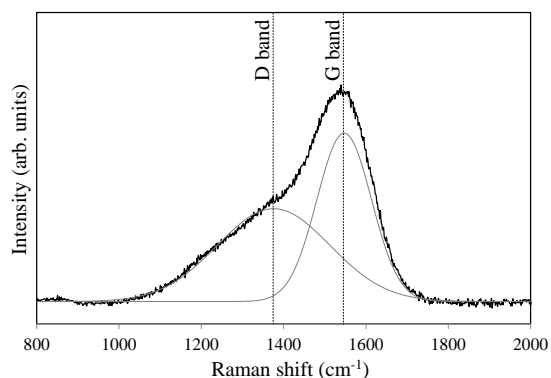


図2 作製したDLCテクスチャ構造のラマン分光分析スペクトル

(2) テクスチャ構造間隔および構造幅が摩擦摩耗特性に及ぼす影響の解明

上記作製したテクスチャ構造DLCを用いて、表2に示す条件で無潤滑下でのボールオンディスク試験を行った。マイクロ金型では10万ショット以上の耐久性が求められるため、10万回ボールが基板を摺動したときを終了条件とした。また、荷重による摩擦・摩耗挙動の変化を確認するために、5N、10Nの2種類の荷重を用いて試験を行った。本負荷荷重に対するヘルツの最大接触圧力は5Nで1100MPa、10Nで1400MPaであり、マイクロ塑性加工下で負荷される面圧に対し、厳しいトライボロジー条件での試験となる。

表2 ボールオンディスク摩擦試験条件

回転半径/mm	3
摺動速度/cm $\cdot$ s <sup>-1</sup>	10
垂直荷重/N	5,10
回転終了条件/lap	100000
ボール材質	SUJ2
ボール直径/mm	6

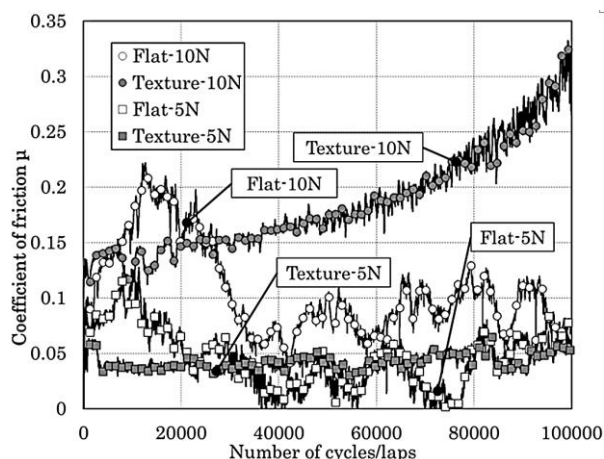


図3 ボールオンディスク摩擦試験におけるテクスチャ構造DLCおよび非テクスチャDLC表面の各垂直荷重下の摩擦係数の推移

図3に摩擦係数の変化を示す。平坦なDLC膜の摩擦係数はどちらの負荷荷重においても大きな変動を示した。これに対しテクスチャ構造を有するDLC膜では、負荷荷重5Nにおける摩擦係数の変動は小さく、一定の値を保つことが示された。一方負荷荷重10Nでは、摺動回数3万回まで平坦な膜より摩擦係数は低い値を示したが、10万回摺動後には、 $\mu=0.3$ まで上昇した。

これらの要因分析のため、摺動面観察を行った。その結果、テクスチャのない平坦膜では発生する摩耗粉が摺動面から排出されにくく、その堆積と脱離によって、摩擦係数が大きく変動したことが明らかとなった。一方、テクスチャ構造では摩耗粉が摺動面から容易に排出されるため、粗大な摩耗粉の形成が阻害され、摩擦の掘り起こし項の増大が抑制されたことが、摩擦の安定化と低減化に寄与

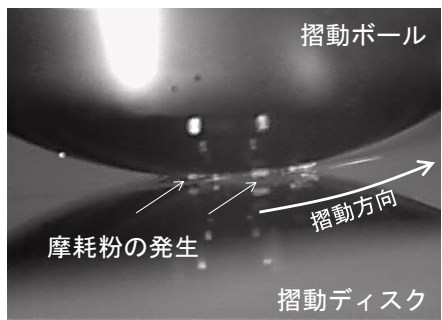
したことが明らかとなった。一方、10N 負荷時のテスチャ構造を有する DLC 膜の摩擦係数の上昇は、テスチャ構造の摩耗に大きく起因していることが示された。

上記の基礎的検討を踏まえた上で、テスチャ構造間隔および構造幅が及ぼす影響を検証した。構造間隔の狭小化に伴う摩擦摩耗特性への影響を検証するため、異なる構造間隔を有するテスチャ表面のボールオンディスク型摩擦試験を行った。摩耗粉の排出状況を観察するため、ハイスピードカメラを用いて摺動面のその場観察を行った(図4)。その結果、構造間隔 50 $\mu\text{m}$  テスチャでは  $\mu=0.15$  の安定した摩擦係数を示す一方で、構造間隔 100 $\mu\text{m}$  テスチャでは  $\mu=0.15$  から 0.25 へ上昇する傾向が観察された。特に図4に示す通り、界面から生ずる摩耗粉の発生量に明確な違いが観察されたことから、有限要素解析による応力分布の解析結果との整合検証より、これらの要因が構造間隔の増大に伴うテスチャ構造への面圧負荷増大が大きく影響し、テスチャ構造の摩耗を促進していることを明らかにした。

一方構造幅の影響を検証するため、1GPa レベルの面圧に対するヘルツの接触半径を基準に、テスチャ構造幅(40 $\mu\text{m}$  および 80 $\mu\text{m}$ )を決定し、そのトライボロジー特性をボールオンディスク試験により評価した。その結果、接触半径内に複数のテスチャ形状を配置することで、摩耗粉排出効果が促進され摩擦の掘り起し項を低減し、摩擦係数の低減が図られることを明らかにした。



(a) 構造間隔 50  $\mu\text{m}$  テスチャ



(b) 構造間隔 100  $\mu\text{m}$  テスチャ

図4ハイスピードカメラによる摺動面その場観察、テスチャ構造間隔の違いによる 40000 回摺動後のボールーディスク界面画像

### (3)その場観察型マイクロハット曲げ試験機の開発とテスチャリング効果の解明

図5に開発したその場観察型順送マイクロハット曲げ試験機の概要図を示す。本装置を用いることで順送マイクロプレス加工における連続的な摺動条件下におけるテスチャリングの効果を検証可能となった。特にサファイア工具を活用することにより、加工回数の増加に伴う被加工材および金型界面におけるその場観察が可能となった。テスチャリングによる実加工接触下の効果を検証するため、非テスチャ金型とテスチャ金型を用いて連続 100 回の加工試験を行い、その界面挙動の違いを評価した。その結果、金型ダイ肩 R の出口部付近における高面圧部位における摩耗粉の堆積から脱離した大粒径の摩耗粉が DLC 膜を掘り起こす様子がその場観察で明らかになった(図6)。特にテスチャを施していない非テスチャ金型において、その傾向が顕著になることを示した。このように実加工接触下においても、ボールオンディスク試験と同様、テスチャリングによる摩耗粉排出効果を実証した。

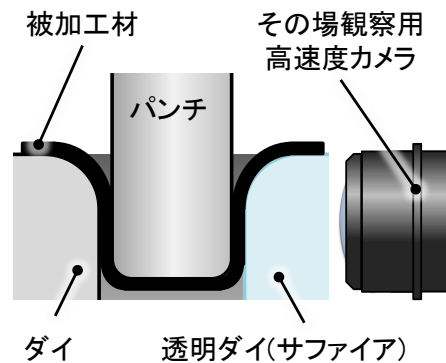
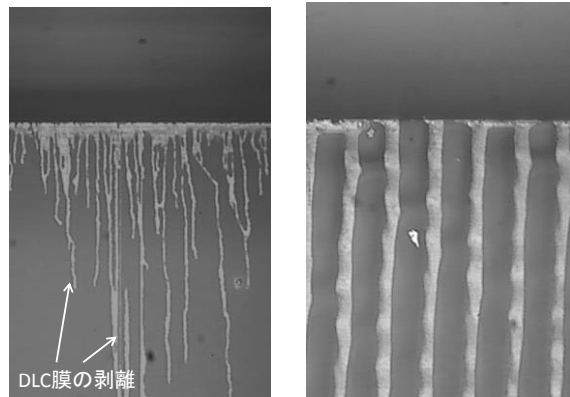


図5 その場観察型マイクロハット曲げ試験機概要



(a) 非テスチャ金型 (b) テスチャ金型

図6 マイクロハット曲げ成形100回後の摺動面画像

### (4) 有限要素解析によるマイクロ円筒絞り過程の接触面積・面圧分布推移の検証とテーラードテスチャリングの提案

上記基礎的検討に基づき、1 プロセスにおけるマイクロ金型の摺動長さおよび見かけの接触面圧の推移を有限要素法により解析した。図7にマイクロ深絞り加工中における

金型表面における面圧分布の推移を示す。本解析結果より、円筒深絞りにおける接触状態(主に接触長さ及接触面圧)として、大きく以下の4パターン(a, b, c, d)に区別することが可能であることを示した。

- a : 接触長さ 40-60 $\mu\text{m}$ , 接触面圧 : 250MPa
- b : 接触長さ 100-120 $\mu\text{m}$ , 接触面圧 : 150MPa
- c : 接触長さ 150-200 $\mu\text{m}$ , 接触面圧 : 100MPa
- d : 接触長さ 70-100 $\mu\text{m}$ , 接触面圧 : 200MPa

これら各接触状態に応じて、金型部位におけるテクスチャパターンの配置を提案した。特にダイランド部、ダイ肩入口部、ダイ肩R、ダイ肩出口付近に区別して、接触長さを元にそれぞれ接触面積内に9つのテクスチャが配置可能な寸法を設計した。また接触面圧を元に構造間隔を変更し、耐摩耗性を考慮に入れて決定した。

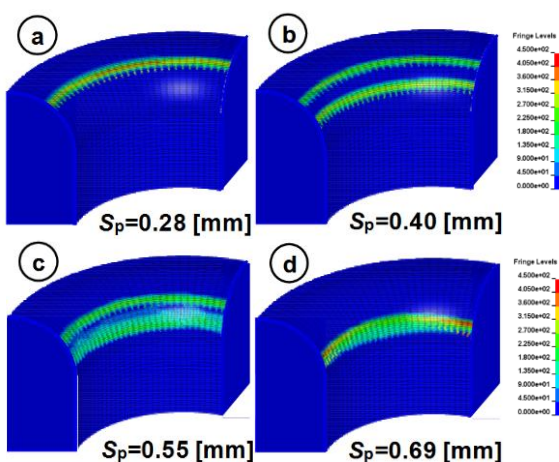


図 7 マイクロ深絞り成形(絞り比:1.9, ブランク径 1.6mm)中における摺動面圧分布の推移( $S_p$ :パンチストローク)

#### (5) まとめ

本研究では、マイクロ精密プレス成形における金型の複雑な接触状態に対して、最適な微細テクスチャ形状を配置することで、トライボロジー特性の最適化を行うことを最終目標として、「マイクロプレス加工特有」の接触環境下における、微細テクスチャ形状・寸法と摩擦摩耗特性との関連性を明らかにした。特に乾燥摩擦下におけるテクスチャリングの効果として、摩耗粉の排出の促進が大きな役割を果たすことを示し、接触面積(摺動長さ)および接触面圧に応じてこれらテクスチャの構造寸法および構造間隔の設計が可能であることを示した。本研究成果は、今後「テーラードテクスチャリング」による新たな表面設計の開発指針の礎を築き、今後高付加価値化技術として日本の製造技術を世界的にリードさせる上で、重要な位置づけである。今後は、当初の研究目標である「異形」プレス加工という難度の高い成形技術に対し検討し、さらなる適用範囲の拡大を図っていく。

#### 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)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Tetsuhide Shimizu, Yushiro Murashige, Syuhei Iwaoka, Ming Yang and Ken-ichi Manabe, Scale Dependence of Adhesion Behaviour under Dry Friction in Progressive Micro Deep Drawing, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.7, No.2, 2013, 査読有(DOI: 10.1299/jmmp.7.251)

[学会発表] (計 7 件)

① 清水徹英、楊明、真鍋健一、「医療用純チタン箔材のマイクロ精密プレス成形におけるトライボロジー特性」、平成 24 年度 東京都立産業技術研究センター研究成果発表会、2012 年 6 月 14 日

② Tetsuhide Shimizu, Ming Yang, Ken-ichi Manabe, Development of Scaled Strip Drawing Friction Tester for Micro-Sheet Metal Forming, 5th Asian Workshop on Micro/Nano Forming Technology (AWMNF), August 2012

③ Tetsuhide Shimizu, Yushiro Murashige, Syuhei Iwaoka, Ming Yang, Ken-ichi Manabe, Scale Dependence of Adhesion Behaviour under Dry Friction in Progressive Micro Deep Drawing, 3rd Asian Symposium on Materials and Processing (ASMP), August 2012

④ Tetsuhide Shimizu, Syuhei Iwaoka, Ken-ichi Manabe, Yoshikazu Teranishi, Kazuo Morikawa, Tribological Properties of Anodized Pure Titanium Foils in Micro-Deep Drawing with Ironing, 15th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT), September 2012

⑤ 清水 徹英、楊 明、真鍋 健一、極薄金属箔材のドライ摩擦摺動特性に対する金型表面特性の影響、平成 25 年度塑性加工春季講演会、2013 年 6 月

⑥ 清水 徹英、掛川 泰、楊 明、マイクロテクスチャ構造を有する DLC 薄膜のドライ摩擦・摩耗特性評価、平成 25 年度塑性加工春季講演会、2013 年 6 月

⑦ 清水 徹英、楊 明、真鍋 健一、極薄金属箔材のドライ摩擦摺動特性に及ぼす被加工材質の影響、第 64 回塑性加工連合講演会、2013 年 11 月

[図書] (計 1 件)

Tetsuhide Shimizu, Ming Yang, Ken-ichi Manabe, Metal Forming-Process, Tools, Design, Chapter 5- Impact of Surface Topography of Tools and Materials in Micro Sheet Metal Forming, INTECH, October 7th, 2012

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.comp.sd.tmu.ac.jp/yanglab/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

清水 徹英 (SHIMIZU TETSUHIDE)

首都大学東京 システムデザイン学部・助教

研究者番号：70614543

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし