

汎用レーザーを用いた微細周期構造の創成と摺動面への応用

金沢大学 理工研究域機械工学系

准教授 古本達明

(平成 22 年度一般研究開発助成 AF-2010208)

キーワード: Nd:YAG レーザ, Er:YAG レーザ, マイクロレンズ, 表面周期構造

1. 緒言

材料表面にマイクロオーダーの加工を行う時、フォトリソグラフィやレーザーなどを用いた各種工法が提案されている。対象とする材料がシリコンなど半導体基板の場合、フォトリソグラムの溶液を基板上に塗布してマスクングを行い、露光・現像した後にエッチングを施して微細なパターンニングが行われている¹⁾。一方、セラミックスや金属表面に対する微細加工では、レーザーが一般的に用いられている²⁾。材料に対するレーザーの吸収・透過特性や材料物性などを考慮し、波長、発振形態、出力の異なる様々なレーザーが適用されている。近年、フェムト秒やピコ秒といった極短パルスレーザーが普及してきたことで、これらを用いて加工表面の熱影響を抑えた方法が多く提案されている³⁾。しかしながら、極短パルスレーザーの適用は装置の大型化、加工量の制限、エネルギー変換効率が低いことなど課題も有している。

本研究では、汎用的に用いられているレーザー発振器を用いてアクリル樹脂表面に簡易型のマイクロレンズを製作し、このレンズを集光系として用いたレーザー加工を行い、金属試料表面に微細溝を加工する手法を検討する。また、マイクロオーダーで製作されたヘリンボーン型の周期構造が摺動面の動摩擦力を低減させる効果について、自作した摩擦試験機を用いて検討を行ったので、以下に報告する。

2. アクリル基板上へのマイクロレンズ作製

2.1 Er:YAG レーザ

アクリル基板上へのマイクロレンズ作製は、波長が 2940 nm である Er:YAG (日本赤外線工業(株)製: NE-1010) レーザを用いた。発振されたレーザープロファイルを測定するため、光電変換素子を用いてプロファイルの測定を行った。実験に用いた素子は、Er:YAG レーザの波長が受光可能な PbSe 素子(浜松ホトニクス(株)製: P791-02)である。素子の受光面上に直径が 10 μm のピンホール(シグマ光機(株)製: PA-25HEL)を設置し、ピンホールを通過したレーザーを素子で受光して、得られた電気信号をオシロスコープで記録した。そして、レーザー照射領域内でこの素子を 25 μm 間隔で 2 次元走査し、各位置で得られた出力と別途測定したレーザーエネルギーの値からプロファイルを算出した。焦点距離が 100 mm であるレンズを介して集光させたレーザーについて、ピンホールや素子の損傷を防ぐため焦点位置から 11.3mm の位置でプロファイルを測定した。

測定したビームプロファイルを図 1 に示す⁴⁾。図から、発振されたレーザーは中心付近の出力が大きく、中心から離れるにつれて

出力が弱くなるガウス状の分布を呈していることがわかる。得られた結果から、焦点位置でピーク出力に対して $1/e^2$ の強度を有するビーム径を算出すると 220 μm であった。

2.2 マイクロレンズの作製方法

実験に使用するのは、厚みが 3 mm のアクリル板(三菱レイヨン(株)製: アクリライト EX)である。アクリル板の分光透過特性を図 2 に示す。Er:YAG レーザの発振波長である 2940nm では透過率が 5%程度であることから、照射されたレーザーはアクリル表面でほとんどが吸収されることがわかる。レーザーが吸収されると照射部近傍は加熱され、アクリルの温度がガラス転移温度に達するとガラス状態からゴム弾性状態へと変化する。このとき、アクリル内分子の熱運動が活発となって体積変化が生じ、力学的に安定になった結果として凸型の半球形状が得られる。レーザースポットが熱源となるため局所的な加熱が可能で、フレキシブルにレンズを作製できる特長を有している。

マイクロレンズの作製方法概略を図 3 に、実験条件を表 1 に示す。実験に使用するのは、厚みが 3 mm のアクリル板である。XY ステージ上にアクリル板を固定してレーザー照射を行った。レーザーのスポット径やステージの移動速度によって照射されるエネルギー密度を変えながら、様々な条件でマイクロレンズを作製した⁵⁾。得られたマイクロレンズは、実体顕微鏡(ニコン製: SMZ1500)で観察すると共に、3 次元粗さ測定器(東京精密(株)製: SURFCOM 2000DX2)で形状測定を行った。

2.3 マイクロレンズの作製実験結果および考察

作製した棒状マイクロレンズを実体顕微鏡および 3 次元粗さ測定器で観察した結果を図 4 に示す。レーザー照射に起因したア

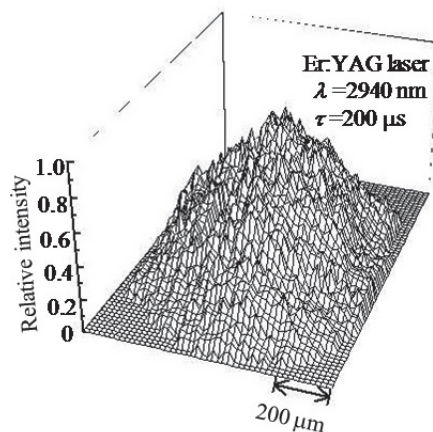
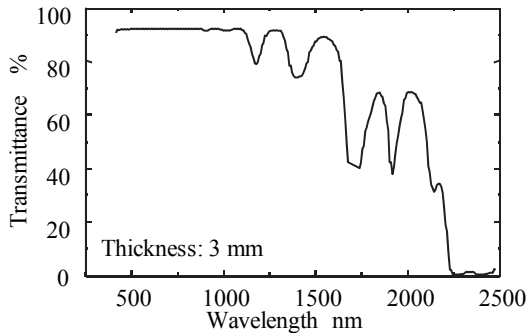
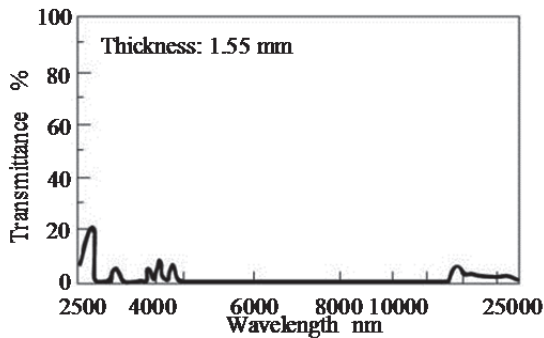


図 1 Er:YAG レーザのプロファイル測定結果



(a) 波長域: 400-2500 nm



(b) 波長域: 2500-25000 nm

図2 アクリルの分光透過特性

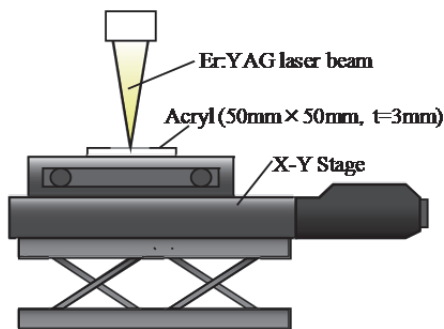


図3 マイクロレンズ作製方法概略

クリル表面の熱膨張により、半円状のマイクロレンズが作製されていることがわかる。

図5は照射したレーザービーム径がマイクロレンズの曲率半径に及ぼす影響を調べた結果である。マイクロレンズの曲率半径は、ビーム径が大きくなるにつれて直線的に大きくなった。照射されたレーザー光のエネルギー密度に起因して、アクリル板表面の膨張量が増加したためと考えられ、本実験よりレーザー条件を検討することで曲率半径が140 - 290 μm の範囲で可変できることがわかった。

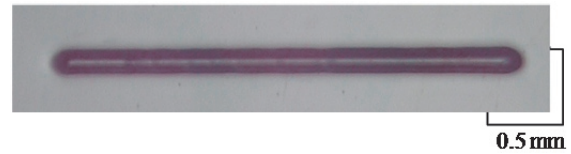
3. マイクロレンズを用いたステンレス板の溝加工特性

3.1 Nd:YAG レーザ

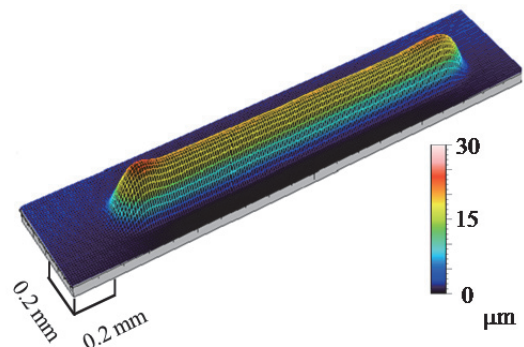
前節で作製した棒状マイクロレンズを用いて、ステンレス板表面に対する溝加工実験を行った。溝加工実験に用いるのは、波

表1 マイクロレンズ作製条件

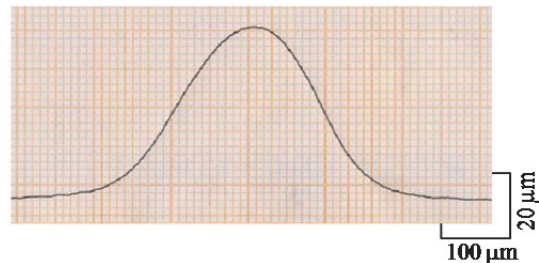
| Er:YAG (PW) | |
|-------------------------------|----------------|
| Laser | Er:YAG (PW) |
| Wavelength [nm] | λ 2940 |
| Energy [mJ/pulse] | E 32 |
| Pulse width [μs] | τ 200 |
| Frequency [Hz] | f 4 |



(a) マイクロレンズの光学顕微鏡写真



(b) マイクロレンズの3次元形状



(c) 中心付近の2次元プロファイル

図4 作製した棒状マイクロレンズ

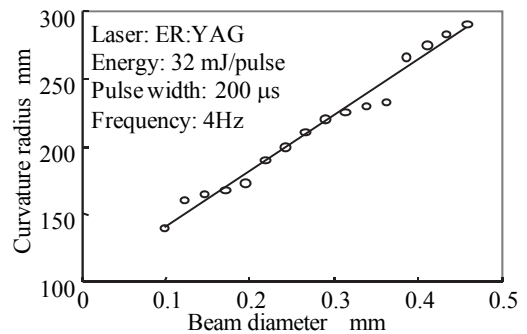


図5 レーザ径がマイクロレンズの曲率半径に及ぼす影響

長が 532 nm のパルス型 Nd:YAG レーザ (SHG) (Continuum 製: Surelite) である。図2に示したように、本レーザーのアクリル板

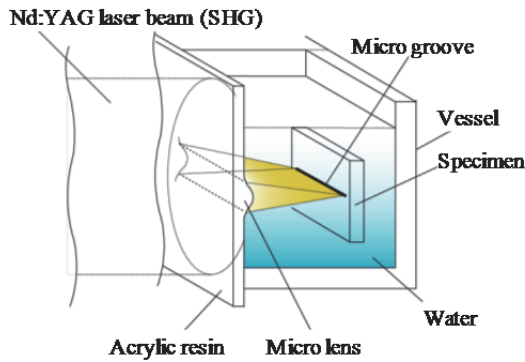


図6 微細溝加工実験方法の概略

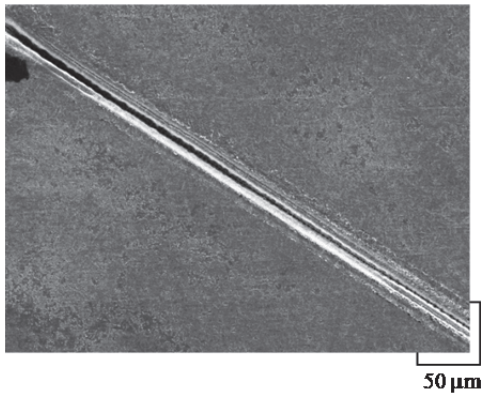


図7 加工溝の電子顕微鏡観察

に対する透過率は90%程度であり、ほとんど全てのレーザーがアクリル板を透過し、マイクロレンズによって集光させることができる。

3.2 微細溝の加工実験方法

レーザー照射時のマイクロレンズ近傍概略図を図6に示す。発振されたレーザーは、アクリル板の裏面から入射し加工材料に対向するマイクロレンズによって集光され、試料表面に焦点を結ぶように導かれる。加工時に生じる加工くずが試料表面に付着することを防ぐため、蒸留水内で加工を行った。試料にはSUS304ステンレス鋼を用い、レーザーの吸収特性を考慮して表面粗さは $R_a=0.06 \mu\text{m}$ で統一させて実験を行った。得られた加工溝は電子顕微鏡(日本電子(株)製: VSM-6290LVU)で観察すると共に、各種条件と溝幅との関係を調べた。

3.3 微細溝の加工実験結果および考察

マイクロレンズを用いて加工された溝を電子顕微鏡で観察した結果を図7に示す。図に示すように、エッジ近傍に熱影響層が残存しているが、マイクロレンズを用いることで均一な加工溝が得られた。また、溝の周囲にはレーザー照射に起因した熱損傷が無かった。レーザーを集光させることでエネルギー密度が大きくなり、集光部では材料を溶融・除去するために十分なエネルギー密度に達したが、集光されていない周辺では材料表面が変質するまでのエネルギーが与えられなかったためと考えられる。

単位面積あたりに照射されるレーザーエネルギーと溝幅との関係

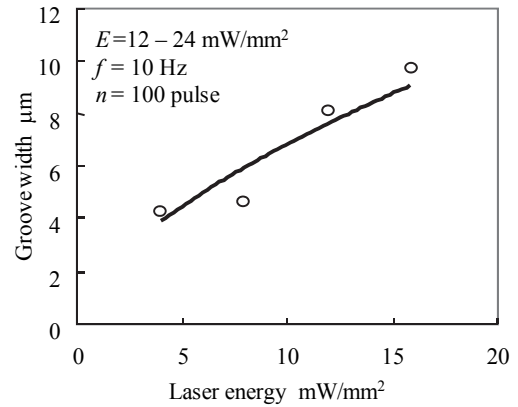


図8 単位面積あたりのレーザーエネルギーと溝幅の関係

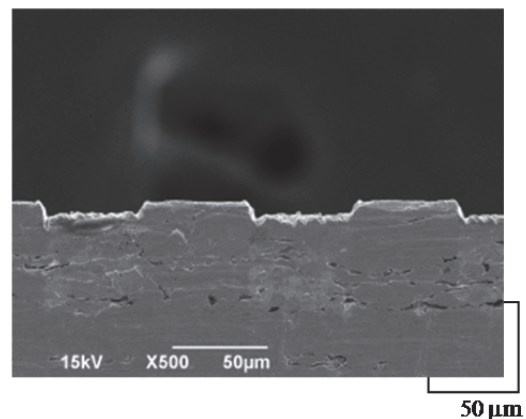


図9 オーバーラップしながら加工された溝断面

を図8に示す。図から、単位面積あたりのエネルギーが増加するにつれて溝幅が広がっていることがわかる。エネルギーの増加に伴って試料内部に入熱する熱量が増加し、溶融・蒸発する領域が広がったためと考えられる。その他、照射パルス数による溝幅の変化について調べたが、同様の傾向が得られた。本実験では、5-10 μm の範囲で溝幅を変化させることがわかった。この範囲を超える溝は、加工後に加工物に対して一定の送りを与える工程を繰り返すことで作製した。このようにして得られた加工溝の断面を観察した結果を図9に示す。加工物に送りを与えることで、幅の広い加工溝が得られている。

4. 表面周期構造の創成による摺動面の摩擦特性改善

4.1 摺動面周期構造の設計

マイクロレンズを用いて作製した溝形状を摺動面に適用し、摩擦特性の改善効果について調べた。摺動面に周期構造を創成することで摩擦特性が改善されるという手法は以前から知られており、単純なくぼみから平行溝、スパイラル形状、ヘリンボーン形状など種々提案されている。その中でも複雑形状で加工が難しく、また、油膜剛性が大きくキャビテーションの発生を防ぎ高い運動安定性が得られるヘリンボーン形状を選択した⁶⁾。

ヘリンボーン溝の形状は、Fleming と Hamrock が行った動的安定性の最適化解析手法を用い⁷⁾、軸受負荷、軸角速度、許容偏心

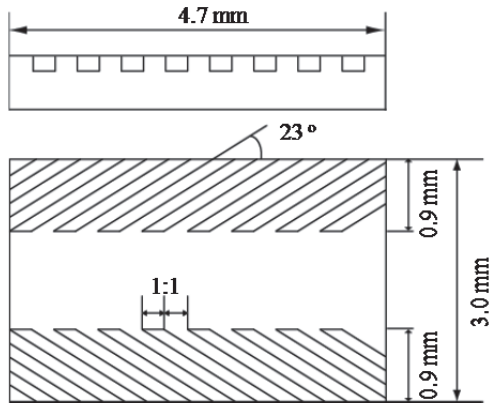
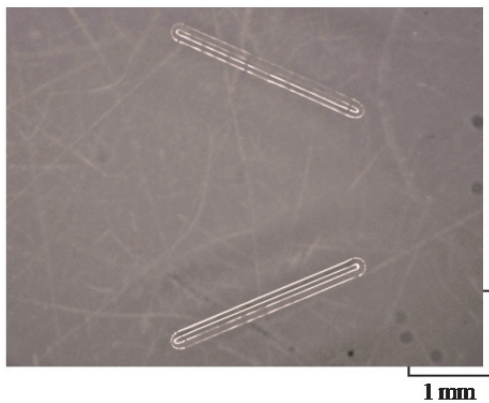
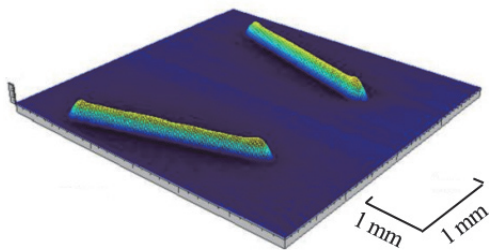


図10 設計した摺動面のヘリンボーン形状



(a) 光学顕微鏡



(b) 3次元プロファイル

図11 ヘリンボーン溝加工に用いたマイクロレンズ

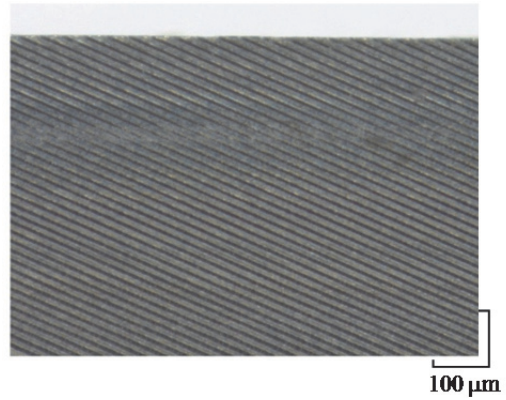
率，周囲圧力など摺動面の使用環境なども考慮しながら設計した．設計した摺動面のヘリンボーン形状を図10に示す．摩擦試験時の状況を考慮し， 4.7×3.0 mmのステンレス板上に進行方向に対して対称となるようにヘリンボーン溝形状を付加した．また，ヘリンボーン部の溝幅および溝間隔の比は1:1で統一されており，溝幅が摩擦特性に及ぼす影響についても併せて検討を行った．

4.2 摺動面周期構造の作製

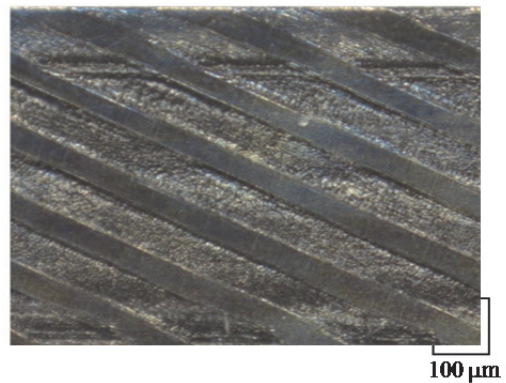
周期構造を加工するときに使用するマイクロレンズを図11に，周期構造の加工条件を表2に示す．マイクロレンズは，設計した周期構造の間隔や角度に合わせ，向かい合う2本を作製した．そして，ステンレス板表面が焦点位置となるようにレーザー照射

表2 周期構造の作製条件

| Laser | | Nd:YAG (SHG) | |
|---------------------|-----------|--------------|--|
| Wavelength [nm] | λ | 532 | |
| Energy [mJ/pulse] | E | 200 | |
| Pulse width [ns] | τ | 5 | |
| Frequency [Hz] | f | 10 | |



(a) 溝幅：5 μm



(a) 溝幅：50 μm

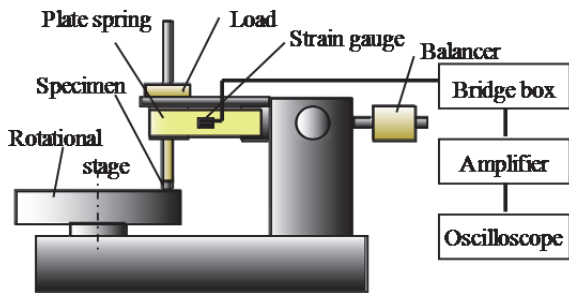
図12 加工されたステンレス表面の観察

を行い，レーザー照射と試料の移動を繰り返しながら周期構造を加工した．溝幅および溝間隔が5 μm および10 μm のとき，同一箇所に100パルスのレーザー照射を行って周期構造を作製した．また，溝幅および溝間隔が50 μm および100 μm のときは，レーザー照射時にワークを1.2 $\mu\text{m/s}$ の速度で移動させながらレーザー照射を行って周期構造を作製した．

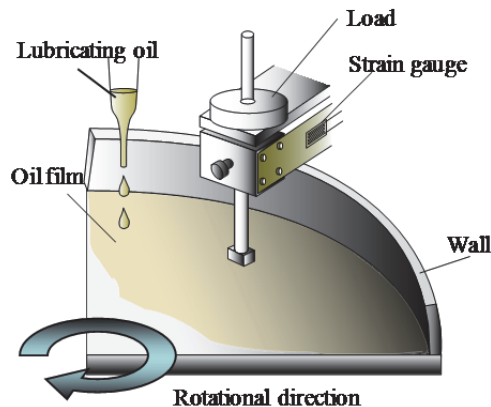
図12は，加工された周期構造の表面を光学顕微鏡で観察した結果である．図から，マイクロレンズの形状にしたがってそれぞれの溝幅を有する周期構造が作製されていることがわかる．それぞれの加工された溝深さは10 μm であった．

4.3 摩擦試験

摩擦試験に用いる装置の概略を図13に示す．治具に取り付けられた試料は，おもりをを用いて垂直荷重を与えられながら回転円盤に押し付けられる．このとき作用する摩擦力は，板ばねに取り付けたひずみゲージを用いて測定し，電気信号を増幅した後にオシロスコープに出力して記録する．板ばねに生じるひず



(a) 全体



(a) 摺動部拡大

図13 摩擦試験装置

表3 摩擦試験条件

| | |
|---------------------------|----------------------|
| Groove width | 5, 10, 50, 100, None |
| Specimen | SUS304 |
| Rotational substrate | FC250 |
| Rotational speed [mm/s] | 40 |
| Load [gf] | 25 - 275 |
| Lubricant | Vg100 |

みは試料で生じた摩擦力によって一意的に決まるため、板ばねからの出力を測定することで、別途測定した校正曲線から摩擦力を求めることができる。摩擦試験条件を表3に示す。周期構造を創成した試料はステンレス板で、試料を押し付ける回転板はねずみ鋳鉄 FC250 である。試験は、一定速度で回転された基板上に潤滑油を滴下しながら行った。なお、比較のため周期構造の無い試料を用いて同様の試験を行い、周期構造の有無による摩擦力低減効果についても検討した。

摩擦試験を行って荷重と摩擦力との関係を調べた結果を図14に、それぞれの溝幅での摩擦係数を算出した結果を表4に示す。摩擦力は、いずれの条件でも垂直荷重が大きくなるにつれて直線的に大きくなった。また、表面周期構造の無い試料の摩擦力は、周期構造を有している試料と比較して大きくなった。このことから、表面周期構造の付加による摩擦力低減効果が確認できた。しかしながら、溝幅の違いによる摩擦力の変化はほとんど無かった。摩擦時に生じる金属の摩耗粒子の排出が溝間隔の

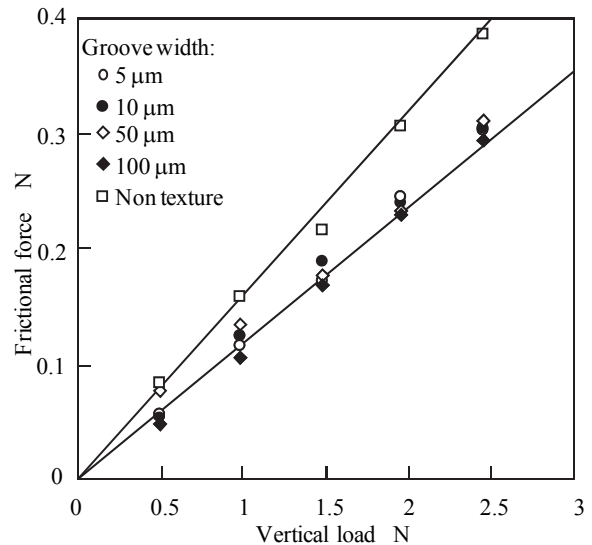


図14 荷重の違いによる摩擦力の変化

表4 溝幅の違いによる摩擦係数の変化

| | | | | | |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| Groove width μm | 5 | 10 | 50 | 100 | Non |
| Frictional coefficient | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.15 |

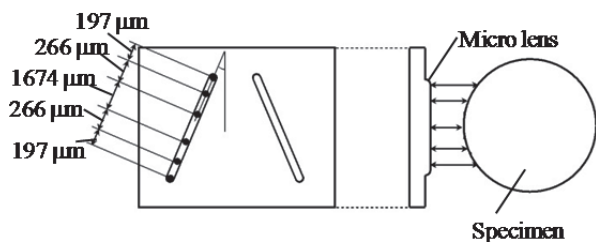


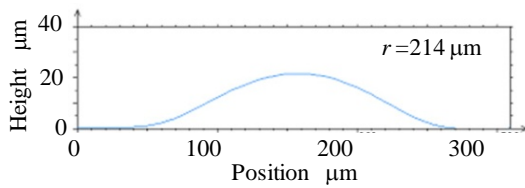
図15 円柱試料加工用マイクロレンズ

小さい試料の方が良好であることが考えられ、さらに微細な加工ができれば摩擦力の低減効果が向上すると考えられる。このほか、乾式での摩擦試験も実施したが、本実験と同様の結果が得られた。

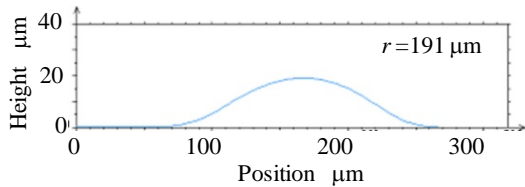
4.4 円柱軸への微細溝加工の適用

本手法による表面周期構造の創成によって摩擦力低減効果があることが明らかとなったため、同手法を円柱軸に適用した。円柱試料加工用のマイクロレンズを図15に示す。図に示すように、マイクロレンズの位置によって加工する試料までの焦点距離が異なる。そこで、レンズ径と焦点距離との関係からレーザ照射条件や走査速度を検討して、場所によってレンズ径が異なる棒状マイクロレンズを作製した。焦点距離の短い中央付近ではレンズ径を小さくし、焦点距離が長くなるレンズ端部につれてレンズ径を大きくした。

このようにして得られた曲率半径可変レンズについて、端部と中央部でプロファイルを測定した結果を図16に示す。端部での曲率が214 μm 、中央部での曲率が191 μm となり、それぞれほぼ設計通りのレンズを作製することができた。



(a) レンズ端部のプロファイル



(b) レンズ中央部のプロファイル

図 16 径可変レンズの形状評価

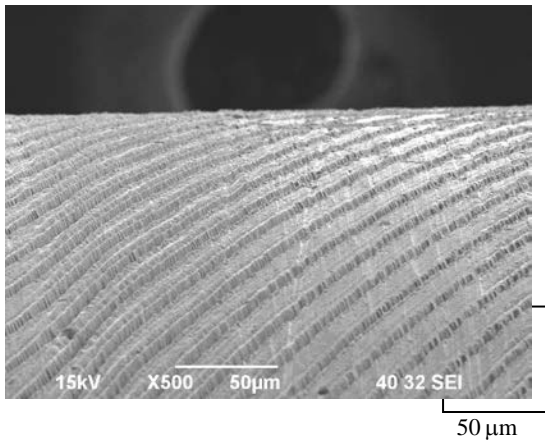


図 17 円柱試料上に加工された溝

図 17 は、曲率半径可変レンズを用いて円柱上に溝加工を行った結果である。直径が 4 mm の SUS304 棒の表面に対して、線幅の等しい加工溝が作製できた。

5. 結 言

本研究では、汎用的に用いられているレーザー発振器を用いてアクリル樹脂表面に簡易型のマイクロレンズを製作し、このレンズを集光系として用いたレーザー加工を行い、金属試料表面に微細溝を加工する手法を提案した。また、ヘリンボーン型の周期構造物を作製し、摺動面の動摩擦力を低減させる効果について評価した。得られた成果は、以下の通りである。

(1) Er:YAG レーザはアクリルに対する吸収特性に優れ、照射レーザーのほとんどが表面で吸収される。そのため、レーザー照射に起因した材料表面の局所的な加熱によって十分な熱変形が

得られ、その変形部をレンズとして適用できた。また、マイクロレンズの曲率半径は、レーザー照射条件を検討することで、140 - 290 μm の範囲で可変できた。

- (2) 作製したマイクロレンズを Nd:YAG レーザ (SHG) の集光系に用いて加工した結果、幅が 5 - 10 μm の範囲で溝形状が加工できた。また、幅が 10 μm を超える溝は、加工後に加工物に対して一定の送りを与える工程を繰り返すことで作製できた。
- (3) Fleming と Hamrock による動的安定性の最適化解析手法を用いてヘリンボーン溝の形状設計を行い、表面周期構造の摩擦特性を調べた結果、表面周期構造の創成による摩擦抵抗の低減効果が確認された。
- (4) 棒状レンズの曲率を順次変更した曲率可変レンズを作製して円柱状試料表面に溝加工を行った結果、線幅の等しい加工溝が作製できた。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2010208) によって行われたことを付記すると共に、記して深甚なる謝意を表す。また、実験に協力頂いた生産加工システム講座の桑畑俊也君、加藤宏明君に感謝する。

参考文献

- 1) 村岡茂信, 矢野満明, 喜田義宏, 市川耕造: フォトリソグラフィと微細レーザー加工による高速応答サーモパイルの作製, 材料, 56, 3 (2007), 272-277.
- 2) 坂谷勝明, 舟田義則, 古本達明: セラミックスの 3 次元微細加工技術, セラミックス, 39, 12 (2004), 994-997.
- 3) 沢田博司: フェムト秒レーザーによる機能表面形成, 日本機械学会誌, 110, 1068 (2007), 850-852.
- 4) T. Furumoto, T. Ueda, A. Kasai and A. Hosokawa: Surface Temperature during Cavity Preparation on Human Tooth by Er:YAG Laser Irradiation, CIRP Annals, Manufacturing Technology, 60, 1 (2011), 555-558.
- 5) 山田啓司, Hery Mochtady, 平出寛明, 細川晃, 上田隆司: レーザ誘起熱変形によるプラスチック・マイクロレンズの作製, 精密工学会誌, 69, 10 (2003), 1487-1491.
- 6) NTN 株式会社編集チーム: ベアリングがわかる本, (2007), 159-163, 工業調査会.
- 7) D. P. Fleming and B. J. Hamrock: Optimization of Self-acting Herringbone Journal Bearings for Maximum Stability, In: 6th International Gas Bearing Symposium, Southampton, England (1974), C1, 1-12.