フェムト秒レーザーによる金属ナノ周期構造の形成と摩擦低減加工機への応用

加藤 貴行¹, 阿部 信行²

¹エンシュウ(株) (〒432-8522 静岡県浜松市南区高塚町4888)

²大阪大学 接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)

Formation of Metallic Nano Periodic Structures by Femto-Second Laser and Its Application to Low Friction Parts Machining System

Takayuki KATOU¹ and Nobuyuki ABE²

¹ENSHU Limited, 4888 Takatsuka-Cho, Minami-Ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8522

²Joining and Welding Research Institute, Osaka University, 11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

(Received January 29, 2009)

Femto-second laser can form metallic nano periodic structures on metal parts near there ablation threshold flunce. These nano periodic structures are thought to be one of the method to decrease the friction coefficient of metallic surface. We have developed a femto-second laser machining system for lowering friction on mechanical parts. This system consists of a femto-second laser, an optical beam shaper, and a five axes mechanical stage. The optical beam shaper can change a profile to be effective for the periodic structure formation using a phase plate. With this system, various pattern of periodic structure was formed even on curved surfaces of parts such as ball bearings and inner surfaces of engine cylinder. We investigated the effect of friction reduction by the nano periodic structures.

Key Words: Femto-second laser, Nano periodic structures, Low friction mechanical parts

1. はじめに

フェムト秒レーザー装置の技術開発は年々進み、それに伴いフェムト秒レーザーの特徴を生かした加工技術も発展してきた。フェムト秒レーザーによる加工は、熱拡散による素材への影響が少ないことから、精密な微細加工や、非線形効果による局所的な加工や改質を、3次元加工で行うなど様々な特徴的な加工を行う事ができ注目されている。特に、微細加工の分野では金属、非金属、又は生体関連材料など、様々な分野での発展が目覚ましく、周期的なナノメートルオーダーの溝加工が簡易に加工できるのが特徴である¹⁻³⁾。

筆者らはこのフェムト秒レーザーを使った加工が、自動車エンジン等の摺動部品を持つ駆動系の省エネルギー化に活用できるのではないかと考え、産業応用として取り組み、『平成17・18年度地域新生コンソーシアム研究開発事業』にて、『フェムト秒レーザーを使った省エネルギー・長寿命部品加工機の開発』を行い、形成される構造が摺動部の摩擦低減に効果があることについて実証した。本稿ではその内容とこれからの展望について紹介する。

2. ナノ周期構造の形成と応用について

フェムト秒レーザーによる特徴的な加工のひとつに、ナノ周期構造を形成する方法が報告されている¹⁻³⁾。直線偏光のフェムト秒レーザーを、加工対象となる物質のアブレーションしきい値近傍のフルーエンスで照射すると、物質表面に周期的な溝形状(以下、ナノ周期構造)を形成する事が出来る。このナノ周期構造は照射したレーザースポット内に自己組織的に形成されるものであり、この時、ナノ周期構造は照射したレーザーの偏光方向に直交した方向に形成される。ナノ周期構造の大きさは溝幅(ピッチ)、溝深さが数百nm程度であり、照射したレーザーの波長サイズの周期的な溝形状が形成される。このナノ周期構造の形状は、レーザーの照射条件により変化させる事が可能である。例えば、照射角度を変更する事でナノ周期構造のピッチを変化させる事が出来る⁴⁻⁶⁾。ナノ周期構造の加工は、金属や半導体などの非鉄金属など、様々な対象物へ加工する事が出来る。ナノ周期構造加工の研究は数多く行われ、加工原理、条件などについて研究が進んでいる。最近ではナノ周期構造を実用展開する為のアプリケーションの開発について取り組まれはじめた。例えば金属表面に機能性セラミックスやDLC等をコーティングする際、密着性を向上させるために、微

細構造を形成させると有効である事や⁷⁾、ナノレベルの凹凸形状が細胞感受性に影響を与える事が出来るため、人工関節などに使用されるチタンを加工する事で人体親和性の低下を抑制する効果など⁸⁾、ナノ周期構造の機能性について研究報告がされ始めている。筆者らはナノ周期構造が作る微細な凹部が、摺動面に使用される潤滑油の保持能力を向上させることにより、摩擦係数の低減効果から省エネルギー化を図れることを期待して研究を進めた。

3. ナノ周期構造の金属摺動部品への応用

地球を取り巻く環境は年々悪化しており、フロン等によるオゾン層破壊、大気中の温室効果ガスの増加による地球温暖化や、それに伴うモントリオール議定書、京都議定書など環境改善の取り組みは世界規模で行われてきた。国内でも経済産業省等により、エネルギー・環境技術分野の技術開発が国の支援により積極的に行われてきた。そして近年ではその取り組み意識、活動は国から企業へと移り、地球環境問題は企業の責任であると同時に、非常に大きな市場規模を持つビジネスのひとつになっている。環境問題の改善方法のひとつに省エネルギー化の取り組みがあり、そのうちのひとつに摺動部品の摩擦抵抗を減らす為に、トライボロジーの研究が取り組まれ、実用品への展開が進められている。例えばレーザーでエンジンシリンダを加工し、省エネルギー化に取り組んだ研究が行われた。シリンダブロックの摺動部分に数 μm の深さの溝を、数百 μm の間隔で加工することで、長期間の摺動実験において、従来に比べて潤滑油の使用量が15~30%減り、粉塵量も40~60%削減することが報告された。この溝の加工は、1本毎にレーザーを収束し加工する方法で製作されており、フェムト秒レーザーはナノ秒レーザーより溝の形状が精密に加工できることから、レーザー加工後の処理が不要になり、効果的であるが、フェムト秒レーザーでの加工時間は非常に長く、フルエンス5 J/cm²、パルス幅120 fsにおいて、加工速度が0.6 mm/min程度であった。その為、一般的な産業用に使用されるにはコスト、生産能力の面において課題が改善できず、実用的では無いと報告されている⁹⁾。

しかし、先に述べたフェムト秒レーザーを使用したナノ周期構造の形成による溝加工ならば、照射スポット内に溝形状が同時に複数加工できるため、加工時間は従来の方法に比べて非常に短く、生産能力の面で大きく改善され、産業用としての摩擦の低減効果に活用できると考えられる。この微細なナノメートルオーダーの溝構造が摩擦低減の効果があるかを検証し、最終的な目標として実用品への加工、エンジンシリンダ内面へ加工が行えるシステム開発の研究を行った。

4. ナノ周期構造の摩擦係数低減効果

フェムト秒レーザーによる金属表面へのナノ周期構造形成や、加工したナノ周期構造の摩擦係数への影響につ

いて研究を行った¹⁰⁾。ピンオンディスク摩擦試験で摩擦係数の測定を行った。用いた摩擦試験機(CSM社製 TRIBOMETER)において、試料としてSCM415(合金鋼)を使用し、S45C(鋼材)との間の摩擦係数を測定した。試料の表面に周期構造を加工した場合と未処理の場合との比較計測を行った。SCM415の試料に加工速度5 mm/sec、フルエンス0.5 J/cm²で周期構造を加工した。試料上での溝の加工状態と拡大写真をFig. 1に示す。溝の方向は図中の点線に沿うように中心から弧を描いて外側に向かう形状をしている。

摺動試験条件は負荷加重1.27 N/cm²、摺動速度0.5 cm/sec、金属間には潤滑油(タービン専用オイル：大澤ワックス(株)製、TA-1K)を浸した。Fig. 2に摩擦係数測定結果を示す。周期構造なしの摩擦係数は0.08、標準偏差は0.020に対して、周期構造を加工した金属間の摩擦係数は0.06未満、標準偏差は0.006となった。二つの摩擦係数を比較すると、ナノ周期構造を付加する事で摩擦係数が約25%程度低減している事が分かる。25%の摩擦係数の軽減は、例えば自動車のエンジンシリンダについて考えてみると、エンジン内のエネルギー配分は、エンジン出力に使用されるのが約30%であり、残りは排気損失が約30%、冷却損失が約30%、摩擦損失が約10%となると言われている¹¹⁾。この摩擦損失の部分が軽減される事で、全体として2~3%程度の省エネルギー化になると考えられる。

また周期構造を付加しない試料は、摩擦係数が変動する幅が広い事が分かる。これはスティックスリップ現象と言われるもので、静摩擦係数と動摩擦係数が原因で、引っ掛かりと急激な滑りの減少が交互に起きる事で発生するとされている¹²⁾。スティックスリップ現象は製品の寿命劣化などに影響するため、この減少を抑えることも

Fig. 1 A typical sample with nano periodic structures for friction test. Nano periodic structures were formed in a radial pattern as shown by dotted lines.

Fig. 2 The comparison of the friction coefficient on the samples between with and without nano periodic structures.

摺動部品には非常に重要であり、この面においてもナノ周期構造は効果的であると考えられる。

実用化を考慮した場合、このナノ周期構造の耐久性が問題となる。ナノ周期構造の大きさは溝幅500 nm～600 nm、溝深さ200 nm～400 nmと非常に小さな構造である。この周期構造が摩擦により摩耗を抑える事が重要になる。ボールオンオンディスクによる摺動試験において寿命の検証を行った。前試験と同じSCM415材料の表面に周期構造を加工した物と、表面研磨だけの物を比較した。摺動させる相手材料はSUJ2(軸受鋼)、 $\phi 3.2$ mmのボールを使用した。負荷加重 1.27 N/cm^2 、摺動速度は 3 m/min 、接触面には前試験と同様に潤滑油を浸して行った。円形試料の半径 4.53 mm の位置で接触させている為、試験時間の20時間の間に約12.7万回同一箇所接触している事になる。試料の表面SEM像をFig. 3に、摩擦係数の測定結果をFig. 4に示す。表面研磨のみの試料は、初期に少し摩擦係数が変動しているものの、後半には初期値とほぼ同じ高い摩擦係数を示していた。それに対し、周期構造を付加した試料は、時間の経過と共に摺動表面のナノ周期構造が徐々に無くなっていく事が分かる。Fig. 3 (a)～(d)より判断すると摩擦抵抗は元の未処理の状態に近づくように思われるが、摩擦係数の測定結果をみると周期構造が減少するのに反して、摩擦係数は減少し安定していくことが分かる。表面粗さの突起が大きい部分は接触圧が大きい為、摩耗が促進され、初めの早い段階において初期摩耗として周期構造がなくなると

(I) With nano periodic structures.

(II) Without nano periodic structures.

Fig. 3 SEM pictures of sample surface before (a) and after (b)–(e) the friction test. (I) with nano periodic structures, and (II) without nano periodic structures.

Fig. 4 Dependence of friction coefficient on testing time.

考えられる。しかし、突出した突起部分が無くなり、定常摩耗状態に近づくにつれ、潤滑効果が現れ、摩耗の促進を抑えているものと筆者らは推察している。

5. 省エネルギー・長寿命部品加工機の開発

開発機のシステムは大きく分けて3つの構成(レーザー発振部、レーザー整形部、ステージ部)にて成り立っている。概観、構成図をFig. 5に、レーザーと加工機の仕様をTable 1に示す。動作軸はワーク等を保持するステージ部の直線3軸(X, Y, Z)、回転1軸(C)と、レーザー光を360度回転させる回転1軸(L)の構成になっている。

まず産業用装置として様々なワークに加工できるよう自由度がある事を前提とした。特に今回の装置ではエンジンシリンダを想定し、円筒内面加工において自由度をもたせた。円筒内面に対して水平に照射されるレーザーを、ミラーを使い照射方向を曲げ、レーザーを円筒内面に当てるようにした。通常この状態でワーク側を回転させれば円筒内面を加工することは可能である。しかし、エンジンシリンダなど、産業用に使用される部品には大型のワークも多く、大型のワークを回転させる為には大きな力を必要とし、必然的に装置自体も大型になってしまう。その為、ミラーを保持している軸を回転させる事を可能な構成にし、大型ワークでもコンパクトな装置で加工できる様なシステムとした。またナノ周期構造の形成はレーザーの偏光方向に依存することから、 $\lambda/2$ 板を使用した偏光制御軸を付加することで、照射面に任意の偏光方向で照射できるようにしたため、例えば水平、垂直、交互など様々なパターンを加工することが可能になっている。上記回転2軸に、直線XYZの3軸のステージを使用することで複雑な形状を有する部品への加工を可能にした。

また加工効率を上げるために、ビーム整形部には位相板によってプロファイル形状を変更する機構を設けている。通常のガウシアン分布のプロファイルをトップハット型に整形することにより、有効にナノ周期構造を均一に加工できる範囲を広げて、加工効率を上げる事が可能となる。またこの機構はスロット交換式になっており、ガウシアン型、トップハット型、ガウシアン分布の多点分岐が変更可能になっており、それぞれのニーズに対して適したビーム形状を選んで加工する事が可能である。

6. 実用部品の加工事例

本加工機は、広いフルエンス範囲を瞬時に制御できるため、数cmの高低差があるような形状の摺動部品に対して、その表面にナノ周期構造を安定に形成することを可能にしている。たとえば段差のあるレール表面に加工する場合でも、その段差毎に加工するのではなく、段差を含んだ面を一度に全面加工することも可能になる。本加工機は4軸+1軸の構成でレーザーの照射方向に自由度をもたせることで様々な部品への加工を可能にしている。

燃費改善の取り組みで一番注目されている分野の一つが自動車業界である。はじめにその業界の部品を加工して検証することにした。摺動は大きく分けて滑りと転がりがあり、滑りは主に平面、転がりは球面での摺動になる。どちらの摺動部品にも摩擦低減の需要は多く存在する。今回は滑り平面としてエンジンシリンダの内面、転がり平面としてベアリングに使用されるローラーの表面

(I) General view of system.

(II) Block diagram of the system.

(III) Optical beam shaper.

Fig. 5 (I) Photograph of general view of system. (II) Schematic of femto-second laser machining system for nano periodic structures processing. (III) Optical beam shaper can change a profile to be efficient for the nano periodic structures processing by using a phase plate.

Table 1 Specifications of femto-second laser machine system with a 5-axes stage.

Femto-second laser system		5-axes stage		
Wavelength	780 nm	Axis	Stroke	Max speed
Repetition rate	2 kHz	X	500 mm	10 m/min
Pulse width	150 fs	Y	100 mm	6 m/min
Average power	2.0 W	Z	300 mm	10 m/min
Beam diameter	4.51 mm	C	360 °	8.3 r.p.m.
		L	360 °	250 r.p.m.

への加工を行った。Fig. 6に加工結果を示す。

Fig. 6 (a)は $\phi 80$ mmシリンダ円筒内面への周期構造加工である。様々なパターンで周期構造を加工できるようになっており、例えば全面均一、螺旋状、市松模様など用途、効率に応じた加工が可能である。

Fig. 6 (b)は $\phi 60$ mmのベアリングの円筒コロの表面に加工を施したものである。本加工機を使用することで、円筒内面、外面ともに自由に加工する事が出来る。また摺動面によく使用される、鋼球ボール表面のような3次元形状表面にも周期構造を加工する事が可能である。

周期構造のパターン選択や、複雑な表面への加工が可能になった事で産業応用加工機としての応用範囲が拡大されたと考えている。今後はその用途に応じ、適切な加工を行える研究を行っていく予定である。

7. おわりに

フェムト秒レーザーによるナノ周期構造の加工は、ナノ秒レーザー加工装置などと比較すると容易であり、滑り摺動での摩擦係数の低減効果も確認する事ができた。また、摩擦低減効果の寿命についても初期摩耗により、ナノ周期構造は若干磨耗するものの、潤滑効果により摩擦係数の低減効果が維持される事も分かった。

今後の課題としては摺動の形態により、摩擦係数の低減効果がどの程度まで現れるのか調べていく予定である。摺動の形態は多様であり、負荷過重、滑り、転がり、直線運動、往復運動、潤滑油の種類、潤滑油の供給方法、摺動速度、摺動物質の種類、形状、状態等の因子が複雑にからまっており、ここにナノ周期構造を使用したとき、摺動方向に対する周期構造の方向や、深さ、間

Fig. 6 Samples of 3D processing (a) inside of the $\phi 80$ mm engine cylinder and (b) the surface of the $\phi 60$ mm roller bearing.

隔等が、どの様に影響するのかを調べる必要がある。

市販のフェムト秒レーザー装置は初期導入コストがまだ高価であることに加えて課題となるのは加工速度と考えられる。自動車部品などの加工においては、ひとつの行程を加工するのに数十秒ほどで行う必要がある。現状のフェムト秒レーザーの能力では使用環境の制限や、平均出力が低い為加工効率が低く、一般の加工生産ラインに組み込む事は難しい。しかしながらフェムト秒レーザーの開発も日進月歩であり、能力向上も著しいものがある。CO₂やYAGレーザー、半導体レーザーの様に、一般の生産ラインに組み込まれるのも遠い未来の話ではないだろう。

参考文献

- 1) P. E. Dyer and R. J. Farley: Appl. Phys. Lett. **57** (1999) 765.
- 2) H. Hiraoka and M. Sendova: Appl. Phys. Lett. **64** (1994) 563.
- 3) M. Bolle and S. Lazare: Appl. Phys. Lett. **60** (1992) 674.
- 4) W. Demtroeder: *Laser Spectroscopy, Basic Concepts and Instrumentation* (Springer 1996) 114.
- 5) 澤田 博司：精密工学会誌 **69** (2003) 554.
- 6) 藤田 雅之：ILT2005年報 (2005) 23.
- 7) 山本 智志, 篠永 東吾, 中野 人志, 塚本 雅裕, 柴柳 俊哉, 阿部 信行, 本田 博史, 藤田 雅之, 王 新敏, 和田 武, 吉村 昌弘：レーザー加工学会講演論文集 **71** (2008) 181.
- 8) 川原 公介, 沢田 博司, 武田 昭二, 甲藤 正人：電気学会研究会資料 OQD-06-1 (2006) 1.
- 9) M. Weikert, C. Fohl, F. Dausinger, and T. Abeln: Proc. SPIE **5063** (2003) 208.
- 10) 加藤 貴行, 阿部 信行, 山中 正宣, 松本 康太郎：レーザー研究 **36** (2008) 144.
- 11) 村木 正芳：トライボロジー 摩擦の科学と潤滑技術 (日刊工業新聞社, 2007) 4.
- 12) 村木 正芳：トライボロジー 摩擦の科学と潤滑技術 (日刊工業新聞社, 2007) 46.