

機関番号：51303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20510081

研究課題名（和文）

レーザー援用による摺動部材の境界潤滑性能の改善と低燃費化技術の開発研究

研究課題名（英文）

Study on improving friction and abrasion properties under the boundary lubrication for sliding surfaces of engine components and low fuel consumption by means of laser processing

研究代表者

柴田 公博 (SHIBATA KIMUHIRO)

仙台高等専門学校・専攻科・特任教授

研究者番号：80413722

研究成果の概要（和文）：エンジン材料として用いられる種々の金属材料表面にパルスレーザーを照射し、材料表面に微細な溝を形成すると同時に、発生するプラズマの衝撃波を利用して、潤滑性能や耐摩耗性に優れた硫化物やケイ化物などの物質を溝に打ち込むことができた。パルスレーザー照射により発生するプラズマ圧力は数 GPa に達し、アルミニウム合金では表面より深さ 400 μ m 以上の残留圧縮応力を発生させた。レーザー照射したアルミニウム表面の無潤滑下での摩擦摩耗特性は、未処理の材料に比べて格段に性能が向上した。

研究成果の概要（英文）：Pulse laser was irradiated on the surfaces of various metallic materials applied to engine components. A fine groove is formed on the surfaces and substances such as sulfide and/or silicide of excellent friction and wear properties are imbedded into the groove due to the shock wave generated. Plasma pressure generated by pulsed laser irradiation reached several GPa to cause the residual compressive stress in the depth of more than 400 μ m of aluminum surface. Unlubricated friction and wear tests of aluminum surface treated by laser irradiation showed that the performance is improved significantly compared to the untreated aluminum.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境技術・環境材料

キーワード：省エネルギー技術、レーザー加工、境界潤滑

1. 研究開始当初の背景

石油資源の枯渇や地球温暖化を初めとする環境エネルギー問題から、自動車などの輸送機関の低燃費化や排ガス浄化が厳しく要求されている。自動車の熱損失以外の燃費損失に占める割合の最も大きいのはエンジン内のフ

リクションと加速抵抗（主に車両質量）であることから、この2つ要因を低減する事が輸送機関の低燃費化、即ち燃費の向上にもっとも効果的である。車両重量の低減に関しては、従来より用いられてきた鋼や鋳鉄材料をアル

ミニウムや樹脂などの軽量材料で代替することにより軽量化が図られている。しかしながら、エンジン内のフリクションに関しては、よい解決策がないのが現状である。

エンジン内に発生するフリクションはエンジンの回転数により異なるが、動弁系、ピストン・ピストンリングで7割合以上を占めている。これらの部位は高温で混合潤滑から境界潤滑状態の範囲にあるため、材料的には大変厳しい環境に置かれている。新規な材料あるいは表面改質技術が開発され、これらの部位に適用することで、エンジンフリクションを50%低減することができると、車両燃費は約5%の改善が想定できる。この数値は京都議定書で定められたガソリン自動車の燃費目標の1/4を解決するに相当する効果をもたらすことから、新規な材料表面改質技術の開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、混合潤滑下あるいは境界潤滑環境下においても、摩擦係数が低く、焼付きの危険性が少ない潤滑性能に優れた表面を付与する表面改質技術を開発し、自動車のエンジンなどの機械運動部品の摺動部に適用することにより、摩擦損失を低減させ、今日、環境問題となっている炭酸ガスの排出量の削減に貢献しようとするものである。そこで、パルスレーザを金属材料表面に照射することにより、極表層部のみを部分熔融させることによって、摺動部表面に微細な溝を形成すると同時に、発生する衝撃波を利用して、潤滑性能や耐摩耗性に優れた硫化物やケイ化物などの物質を材料表面に打ち込むことにより、摺動性能に優れた表面を形成する技術を研究開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の着想点は、ナノ秒パルスのレーザを用いて、材料表面に衝撃波を与え、さらには極表層部のみを熔融させることによって、摺動部表面に微細な溝を形成すると同時に、潤滑性能に優れた硫化物や耐摩耗性に優れたケイ化物やホウ化物を材料表面に打ち込むことにより、摺動部位に摺動性能に優れた新しい特性の表面を形成する技術である。アルミニウムのような軟質材料でも、また鋳鉄のような硬質材料でも本技術の適用が可能であり、その対象とする機械構造部材はエンジン部品にとどまらず、広範囲に及ぶと考えた。

そこで、以下に示す研究方法を用いた。

(1) 平成20年度の目標

エンジンに用いられる各種金属材料の微細加工性に及ぼすナノ秒パルスレ

ーザの加工条件因子の影響を明らかにする。

(2) 平成21年度の目標

レーザ照射により発生するプラズマ圧力の測定と、潤滑物質である二硫化モリブデン粉末の金属表面への埋め込み条件を明らかにする。

(3) 平成22年度の目標

摩擦摩耗試験機を試作・改良し、レーザ照射により表面改質された試料の摩擦摩耗特性を評価し、本技術の効果を明らかにする。

4. 研究成果

(1) エンジンに用いられる各種金属材料のレーザによるディンプル成形性について (平成20年度の成果)

波長 1064nm、定格出力30W、Qスイッチ0-50KHz (東芝製LAY-618C) および定格出力100W、Qスイッチ0-65KHz (Rofin製RSM100D) のNd:YAGパルスレーザを用いて、自動車用エンジンを構成する主要金属材料であるAl合金(5000系)、Cu、鋳鉄(FC450)、鉄(SUY)、鋼(S50C)、黒鉛にパルスレーザを種々の条件で照射した。実験は大気中で行った。

材料表面に形成されたディンプルの形状を光学顕微鏡、電子顕微鏡、レーザ顕微鏡で観察し、ディンプルの深さ、幅、除去された体積を計測し、ディンプル成形性に及ぼすパルス数の影響、投入エネルギーの影響、材質による違いについて調べ、以下の結果を得た。

①全ての材質において、パルス数の増加とともに深さが増大した。また幅についてはパルス数が少ない場合に不鮮明であるが、パルス数の増加と共に形状が鮮明になった。

②図1は代表的なレーザ加工面を示す。黒鉛以外の金属材料では加工面は溶融を伴い、周辺にデブリが発生した。デブリの付着状態や加工表面の形態観察からSUY、Cu、Alのデブリは細かく、一方S50C、SKD61はデブリが粗く、大きく発達していた。これらの結果から、固液共存範囲の大きさや、液相の粘性がデブリの発達と加工面形態に影響することが推察された。

③図2は加工溝(ディンプル)の深さとレーザ照射パルス数(レーザの投入エネルギー)の関係を示す。同一投入エネルギーに対するディンプル深さは、Al>>S50C>黒鉛>Cu>SKD61>SUYの順位で

深くなっており、Al合金が一番加工されやすいことが分かった。Al合金はレーザーの反射率がもっとも高いにもかかわらず加工されやすいことから、加工性に金属の融点が大きく影響していると考えられた。

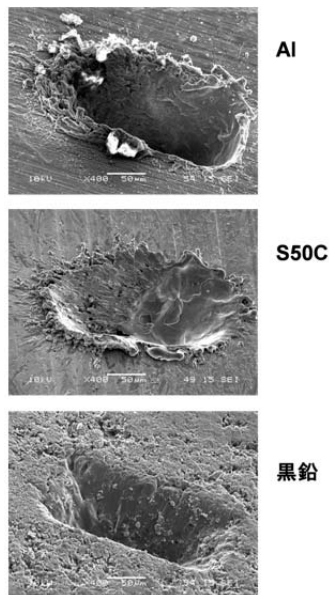


図1 大気中でレーザー加工された代表的なディンプル

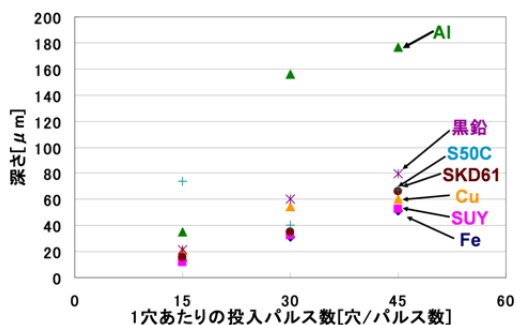


図2 投入エネルギーに対するディンプル深さ

(2) レーザ照射により発生するプラズマ圧力の測定と潤滑物質の埋め込み条件について (平成21年度の成果)

アルミニウム合金と潤滑物質として二硫化モリブデン粉末を供試材とした。レーザーは定格出力20W、波長532nm、ビーム径400μmのQ-switch Nd:YAGパルスレーザー (THALES LASER製 SAGA) を使用した。

① レーザ照射部の裏側にひずみゲージを貼ったアルミニウム薄板 (10mm×60mm×0.2mm) およびSUS304薄板試料を水中に設置し、レーザーを照射することにより試料表面に発生するプラズマの圧力を、反力として歪ゲージにより測定を行った。図3にその結果を

示す。

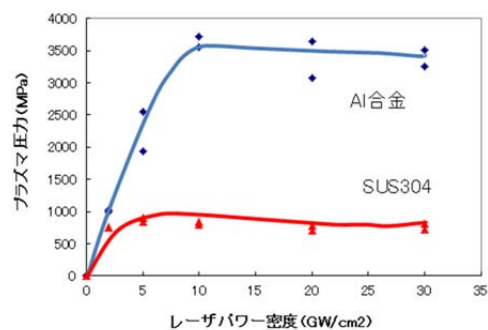


図3 発生するプラズマ圧力

発生するプラズマ反力は、照射するレーザーのパワー密度と共に増加し、レーザーパワー密度10GW/cm²で最大になり、アルミニウムで約3.7GPa、SUS304で約1GPaに達した。また、レーザーパワー密度10GW/cm²以上では、その圧力が飽和し、ほぼ一定になることがわかった。この圧力は、5000系アルミニウム合金の一般的な降伏応力である200MPaをはるかに超えるものであった。

② 微粉末のMoS₂を100μmの厚さで塗布したアルミニウム合金試料を水中に置き、直接レーザーを照射したところ、粉末が飛散し、当初想定したとおりには埋め込むことができなかった。そこで、粉末の飛散を防ぐため、板厚30μmのステンレス板を保護フィルムとして貼りレーザー照射した。パワー密度を10GW/cm²は固定し、照射回数および照射位置を様々に変え、照射した。レーザー照射後の試料表面をSEMで観察、EDSによる元素分析、レーザー顕微鏡による形状観察を行った。図4にレーザー照射によりできたアルミニウム表面のディンプルとその溝形状を示す。

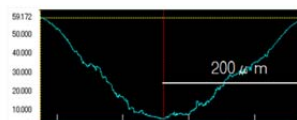
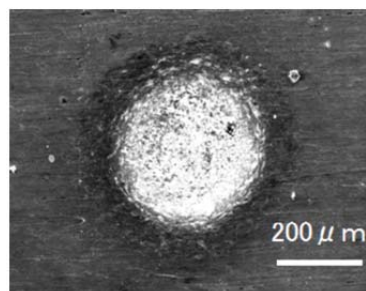


図4 レーザ照射により形成されたアルミニウム表面のディンプルとその溝形状

③ レーザ照射により形成された微細なディンプルには図5に示すように、ディンプル底部に二硫化モリブデンが埋め込まれていることが確認され、本研究の着想の具体的結果の一部が明らかとなった。

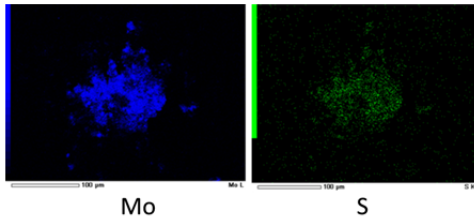


図5 EPMAによる元素分析結果

(3) レーザ表面改質層の摩擦摩耗特性の評価（平成22年度の成果）

摩擦摩耗試験機の試作を行い、レーザにより改質された表面層の摩擦摩耗特性を評価した。耐摩耗性の評価には市販のスタグ摩耗試験機を、また摩擦係数の測定には試作した試験機を用いた。実施した項目と得られた結果は以下のとおりである。

①加工条件の最適化およびプラズマ反力と残留応力の測定：

a) 種々の条件下でレーザを照射することにより生ずる表面改質層をSEM、EPMAおよびレーザ顕微鏡により観察し、潤滑物質の表面打ち込みのための適正な加工条件を明らかにした。図6に示すようにビームの重なりを変化させた照射パターンを用いて比較した結果、摩擦特性の評価には、ディンプルを独立して形成できるパターンBを用いた。

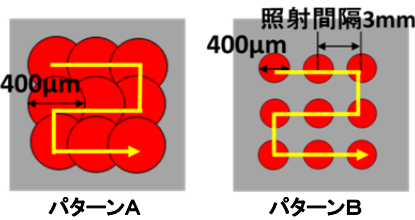


図6 照射パターン

b) 潤滑物質の飛散防止用のSUS304フィルムを用いた場合でも最大1 GPaのプラズマ反力が発生し、図4に示すように、アルミニウム合金の表面にMoS₂を埋め込むことができた。

c) レーザ照射したアルミニウム合金には図7に示すように表面より深さ400 μm以上にわたり残留圧縮応力が存在した。その最大値は140~160MPaで、深さ180 μmで得られた。

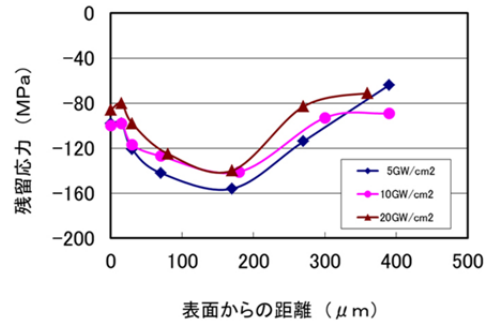


図7 レーザ照射したアルミニウム合金表面の残留応力分布

②摩擦・摩耗試験によるフリクション係数の測定および耐摩耗特性の評価：

摩擦・摩耗試験は無潤滑で行い、鋳鉄を相手材としてアルミニウム合金の摩擦摩耗特性を評価した。図8は試作した摩擦係数計試験機の概略図を示す。図9は摩擦係数の測定結果を示す。また図10は耐摩耗特性の測定結果を示す。摩擦係数および耐摩耗特性のいずれも、レーザ照射を行うことにより、大幅に改善されることが明らかとなった。しかし、レーザ照射した試料において、MoS₂の有無は特性値に大きな差を与えなかった。

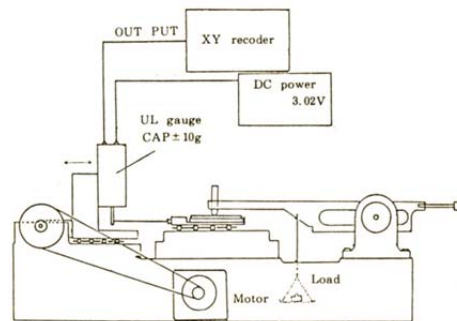


図8 摩擦係数測定試験機

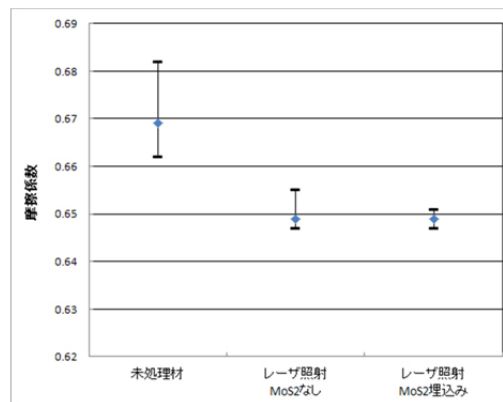


図9 摩擦係数

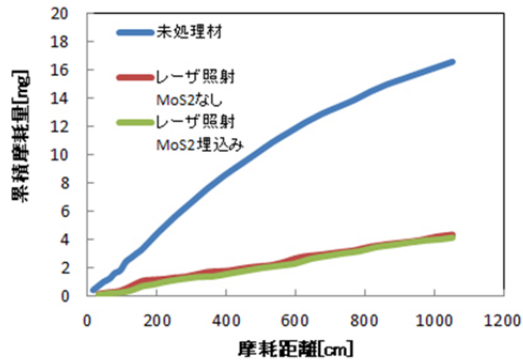


図10 摩耗試験結果

この原因としては、摩耗実験の終了時点における表面のSEM写真(図11)が示すように、レーザー照射により埋め込まれたMoS₂が摩耗実験終了時点の試料の摩擦面表面より下に存在していることから、実施した摩擦・摩耗特性の評価実験では、埋め込まれたMoS₂が摩擦摩耗特性に直接関与できる条件下で行えなかった可能性が高いと考えられる。

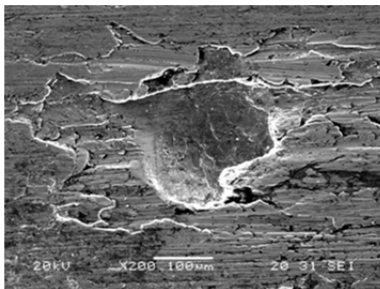


図11 摩擦試験終了後の表面

実施した摩擦摩耗実験では、二硫化モリブデンの効果を明らかにする実験条件を選択できなかったが、二硫化モリブデンは潤滑性能を改善する物質として認められていることから、本技術が、混合潤滑下あるいは境界潤滑環境下において、摩擦係数が低く、焼付きの危険性が少ない潤滑性能に優れた表面を付与する表面改質技術として、有望であるといえる。

この摩擦摩耗試験は、二硫化モリブデンが摩擦面に現れる条件で、引き続き継続して実施する予定である。

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)

[学会発表] (計2件)

①大友麻紀、阿部翼、熊谷進、柴田公博、レーザーピーニングされたAl合金の表面改質層と摩擦摩耗特性に関する研究、第16回高専シンポジウム、2011年1月22日、米子市

②阿部翼、柴田公博、パルスレーザー照射によるAl合金表面へのMoS₂埋め込み技術の研究、溶接学会東北支部第22回溶接・接合研究会、2010年7月23日、八戸市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 公博 (SHIBATA KIMIHIRO)
 仙台高等専門学校・専攻科・特任教授
 研究者番号：80413722

(2) 研究分担者

熊谷 進 (KUMAGAI SUSUMU)
 仙台高等専門学校・マテリアル環境工学科・准教授
 研究者番号：30390389
 鈴木 勝彦 (SUZUKI KATSUHIKO)
 仙台高等専門学校・専攻科・教授
 研究者番号：80187715

(3) 研究協力者

松山 秀信 (MATSUYAMA HIDENOBU)
 日産自動車株式会社・パワートレーン生産技術本部・主管