

超短パルスレーザーを用いたピストンスカートの低フリクション化技術

1. はじめに

近年の地球温暖化問題において、CO₂排出量の削減は重要な課題の一つとなっている。自動車用エンジンにおいても、各種新技術の導入による機械損失の低減により、大幅な燃費改善が図られてきた。なかでもピストンスカート部はエンジンの主要な摺動部であり、その部分での機械損失の低減は、エンジンの燃費改善に大きく寄与する。

ピストンスカートの表面粗さの平滑化は、シリンダーボアとの摺動の低フリクション化により、機械損失の低減に有効である^{1)3)~6)}。しかしながら、ピストンスカートの平滑化により耐スカッフ(焼き付き)性は悪化する。したがって、低フリクション性と耐スカッフ性を両立できる技術の開発が望まれていた。

この課題に対して、我々は鏡面化したピストンスカート面に超短パルスレーザーを用いて、スカートのアルミ素地部に油溜まり用の微細な溝(図1)を設けることで、摺動部の低フリクション性と耐スカッフ性を両立できる技術を開発したので報告する。

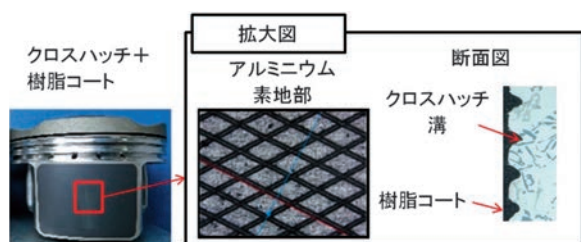


図1 スカートの微細溝のイメージ

2. スカート表面の面性状

ピストンスカートの表面は、保護用の樹脂コーティングが施されているが、エンジンの長期間の稼働後に摩滅する可能性がある。したがって、従来のピストンスカートでは、耐スカッフ性の確保のため、スカートのアルミ素地部に条痕形状等を採用している。これは、条痕の谷部に油溜まりを設けることを目的としているが、条痕の山部の形状によってはボアとの間の油膜を発生しづらいことから、固体接触となりフリクションは悪化する。

図2にピストンスカート部の表面粗さ(Ra)と摩擦平均有効圧力(Friction Mean Effective Pressure: 以下

FMEPと称す)の関係性の一例を示す。表面粗さを低減することで、FMEPが低減することがわかる。

そこで、我々は鏡面化された面に油溜まり用の微細な溝を設けて摺動部の油膜切れを防ぐことで、低フリクション性と耐スカッフ性を両立させることを検討した。

ピストンスカートの形状は、運転時のスカートの焼き付き・異音の防止等のため、上下方向にバレル形状、周方向に楕円形状のプロフィールが設けられている。このような複雑な形状を維持したまま、バリを発生させず微細な溝を形成する加工方法として、超短パルスレーザーによりアルミを昇華させて微細な溝を形成する方法を採用した。

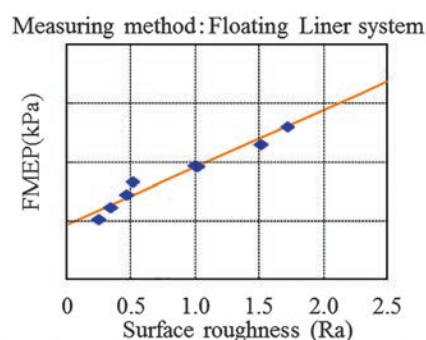


図2 スカートの表面粗さとFMEPの関係¹⁾

3. レーザ加工

3.1 超短パルスレーザー

一般にレーザーは、途切れなく連続的にレーザー光を出射する連続波(CW)レーザーと、一定の時間間隔でレーザー光を出射するパルスレーザーに大きく分類される。加工用レーザーにおいては、CWレーザーは溶接、溶断などの加工に多く用いられるのに対し、パルスレーザーは比較的微細な加工などに多く採用されている(図3)。さらにパルスレーザーの中でも、パルス幅が数ピコ秒からフェムト秒の時間オーダーのレーザーは、超短パルスレーザーと呼ばれる。

パルスレーザーの加工は、レーザー光のパルス幅によって加工品質、特徴が大きく異なる(図4)。パルス幅がナノ秒オーダーのレーザーにおいては、被加工物に対して熱影響が大きく、溝周辺部のバリ、および被加工物の堆積

物が発生しやすい。それに対して、超短パルスレーザーによるレーザー加工は、材料への熱伝導に要する時間(数ピコ秒程度)よりもパルス幅が短いため、被加工物に対して熱影響が小さく、より高い加工面性状品質が求められる加工などに利用されている。

我々は、この超短パルスレーザーの技術をピストンの加工に採用することで、シリンダーボアとの摺動に悪影響を及ぼすレーザー加工部周辺のバリ、被加工物の堆積を抑制して加工面性状品質を確保するとともに、他の工法では必要とされている加工後の洗浄・バリ取りなどの工程をなくせることでの製造コストの低減も期待できると考えた。

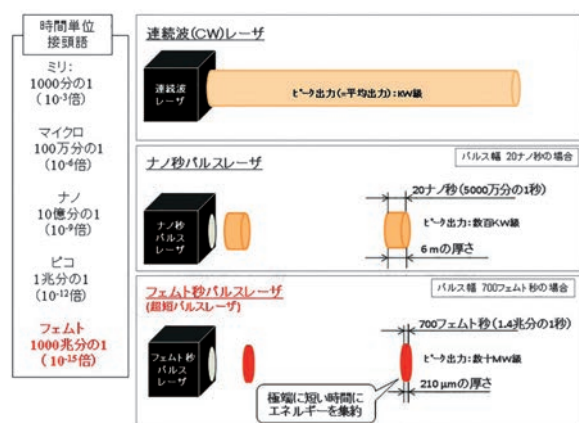


図3 各種レーザーの時間軸イメージ

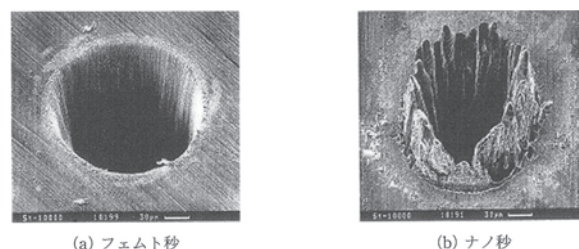


図4 レーザのパルス幅の違いによる加工品質の比較⁷⁾
(穴開け加工の例、直径約150μm)

3.2 レーザ加工方法

加工に使用したレーザーは、表1の仕様のIMRA America製のフェムト秒ファイバーレーザーである(図5)。このレーザーは2018年のノーベル物理学賞の受賞対象となったCPA(Chirped Pulse Amplification)技術を用いており、発振器、パルス伸長器、増幅器などのレーザーの主要部品を光ファイバーで構成することにより、高いビーム安定性と環境耐久性を有している。

図6にレーザー加工光学系の概要を示す。レーザー光源から出射したレーザービームは、中間光学系により適切なビーム調整を経て、集光レンズにより加工するピストンスカート部に照射される。そして、ガルバノスキャナによりレーザービームをピストンスカート面上で高速走査することで微細溝を形成した。

表1 レーザ仕様

中心波長	1040 nm
平均出力	> 30 W
パルス幅	700 fs
繰り返し周波数	1~5 MHz

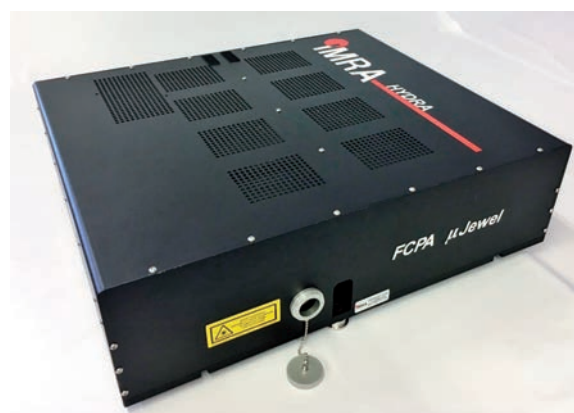


図5 使用したレーザー光源(IMRA America製)

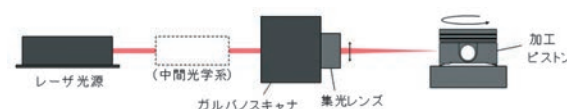


図6 レーザ加工光学系の概要

3.3 溝形状

スカート上に形成する溝形状は、上下左右から摺動面にオイルを供給するため、クロスハッチ状の溝を採用した。溝形状の拡大図、および仕様を図7に示す。溝深さは3μm、溝ピッチは45μm、クロスハッチ角度は30°である。図8に加工溝の断面形状の測定結果を示す。超短パルスレーザーによる加工の特徴が現れ、溝周辺に、バリ・盛り上がりがなく、平面部からきれいに切り下がっていることがわかる。

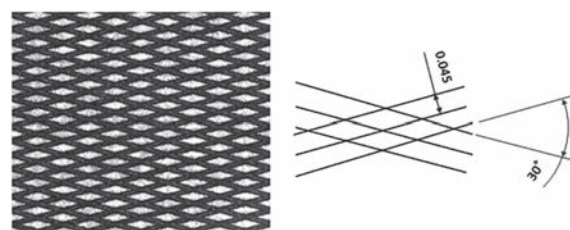


図7 溝形状の拡大図/仕様

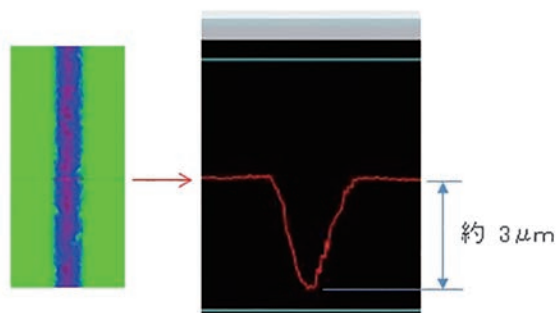


図8 溝の断面形状

4. 実機性能 評価結果

超短パルスレーザにより得られたクロスハッチ状の溝加工（以下、クロスハッチ）と従来工法による条痕の2種類の性能比較試験結果⁸⁾を以下に示す。

4.1 摩擦力測定

浮動ライナー方式により、実働時のピストンスカート部の摩擦力測定を実施した²⁾。表2に、本試験に供試したピストンのスカート表面性状を示す。

表2 テスト用ピストンスカートの表面性状

表面形状	拡大図	表面性状（樹脂コート後）
条痕 (Ra 2.4μm)		
クロスハッチ (レーザ) (Ra 0.5μm)		

スカートには加工後に樹脂コーティングを施した。スカート部の形状、ピストンクリアランス等は同一にし、表面粗さ以外の影響を極力排除した。

図9にFMEPを比較した結果を示す。クロスハッチは条痕と比較し測定全域でフリクションが低減しており、2000rpm中負荷ではFMEPが25%低減していることが判った。

図10は運転時に発生しているフリクション波形である。クロスハッチは条痕に対し上死点付近のフリクションが低減していることがわかる。クロスハッチは、鏡面化により貧潤滑な上死点付近においても油膜を維持することでフリクションが低減したと考えている。

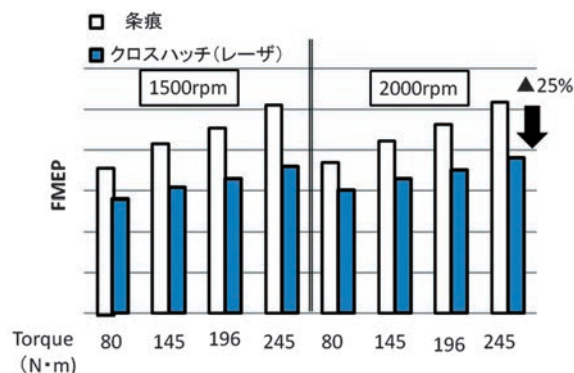


図9 実働時のピストンスカート部FMEPの比較

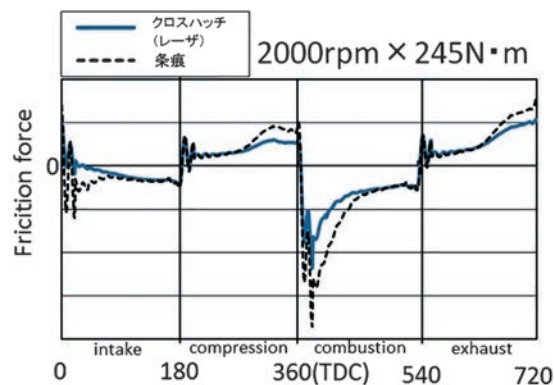


図10 運転時のフリクション波形

4.2 耐スカップ試験

図11にエンジンを使用して耐スカップ性を比較した試験結果を示す。

試験は、スカートプロフィールとピン穴オフセットを変更することで条痕がスカップする運転条件を事前に見出し、その条件で実施した。また、クロスハッチの耐スカップ性を確認するため、供試したピストンは樹脂コーティングを施さずに試験を実施した（比較用の条痕のピストンは樹脂コートあり）。スカートのアルミ素地仕様は、条痕とクロスハッチ共にフリクション評価品と同じ仕様である。

結果としては、条痕は試験開始3分後にスカップが発生したのに対し、クロスハッチは樹脂コートが無いにもかかわらず、80分間運転してもスカップは発生しなかった。条痕では山部の面圧が上昇し油膜を切断するのに対し、クロスハッチでは、スカートの鏡面化により面圧が低下するとともにクロスハッチの溝がオイルを保持していたと考えられる。



図11 試験後のピストンスカート部の外観

5. おわりに

鏡面化したピストンスカート上に超短パルスレーザによりクロスハッチ状の微細溝を形成することで、これまで課題とされていた低フリクション性と耐スカッフ性の両立を実現した。

超短パルスレーザによるピストンの加工では、シリンダーボアとの摺動に悪影響を及ぼす溝周辺部のバリ、被加工物の堆積を抑制でき、レーザ加工工程以降に洗浄、バリ取り等の工程が不要であるため、製造コストの低減も期待できる。

本技術は、ピストン以外の製品の機械摺動部に対しても、溝形状などをその製品に最適化することで適用できる可能性があるため、アイシンググループ内に展開していく予定である。

参考文献

- 1) 金井昌二 他：ピストンのフリクション低減技術について、自動車技術会 学術講演会前刷集, 20055041, (2005)
- 2) Shoich Furuhashi, et al. : Measurement of Piston Frictional Force in Actual Operation Diesel Engine, SAE Technical Paper Series, 790855, (1979)
- 3) 金澤裕一朗 他：ピストン用低フリクション樹脂コーティングの開発, 自動車技術会 学術講演会前刷集, 20166293, (2016)
- 4) 金井昌二 他：ガソリンエンジン用ピストンの摩擦低減技術, 自動車技術会2011年秋季大会学術講演会前刷集, 20115575, (2011)
- 5) 荻原秀実 他：表面改質によるエンジン摺動抵抗低減技術, HONDA R&D Technical Review, 12, 2, pp. 93 (2000)
- 6) 荻原秀実 他：内燃機関用ピストンスカート部への固体潤滑剤付与技術とその効果, HONDA R&D Technical Review, 14, 1, pp. 85 (2002)
- 7) 新井武二：レーザ加工の基礎工学, pp. 426, 丸善, (2007)
- 8) 國安篤史 他：クロスハッチ形状を用いたピストンスカート部低フリクション化技術の開発, 自動車技術会 学術講演会講演予稿集, no.92-18, (2018)

筆者



堀田 芳敬

IMRA America, Inc. 日本支店
フェムト秒ファイバーレーザを用いた
レーザ加工技術の開発に従事



國安 篤史

第二機関技術部 電動ポンプグループ
エンジン用ウォーターポンプの
開発設計に従事



岡崎 亮

Aisin Automotive Casting
Tennessee Inc.
ピストン製品の生産業務に従事



下川 渡

ユニット生技部
西尾機関生準グループ
ピストン製品の生産準備
および生産設備開発に従事



千野 大輔

アート金属工業株式会社
加工生技部
ピストン製品の生産技術開発に従事



新美 拓哉

アート金属工業株式会社
製品技術部 製品設計室
ピストン製品の設計に従事



岡本 明広

ユニット生技部
西尾機関生準グループ
ピストン製品の生産準備
および生産設備開発に従事



堀 喬 博士 (工学)

IMRA America, Inc. 日本支店
フェムト秒ファイバーレーザの
開発に従事

トピックス

超短パルスレーザを用いたピストンスカート部の低フリクション化技術