

ボディシリンダのテクスチャリングによる 低フリクション化技術

Low friction technology using textured body cylinders

村瀬 雄太 伊東 明美

本稿は SETC2019 (Small Engine Technology Conference) および第30回内燃機関シンポジウムで発表された下記の論文を著作権者の許可を得て再編集したものです。

Murase, Y., Kumagai, H. "Friction Reduction of All-aluminum Cylinder for Motorcycles by a Mirror Finished bore with Dimples", SAE Technical Paper 2019-32-0530(2019).

小林大吾, 伊東明美, 村瀬雄太: エンジンの燃焼室壁面から蒸発する潤滑油消費に関する研究, 第30回内燃機関シンポジウム講演予稿集, 20194773(2019).

要旨

近年、小型エンジンの更なる競争力向上の為、燃費向上への要求が高まっている。

この問題の解決のため、特に燃費低減に対する寄与の大きいシリンダボアとピストン、ピストンリングとのフリクションロス低減を目的とした開発が盛んに行われている。本稿ではアルミ製シリンダボアのテクスチャに対するフリクションロスの影響に着目し、シリンダボアの鏡面化とディンプル付与の効果を浮動ライナ法により評価した。

評価の結果、従来のシリンダボア面にクロスハッチが付与された仕様(本稿では「プラトー仕様」と表す)に対し、鏡面化により摩擦平均有効圧力(Friction Mean Effective Pressure 以降、FMEP)が14.1%低減した。また、鏡面化とディンプル付与の組み合わせにより、プラトー仕様に対し、最大で FMEP が19.5%低減した。ディンプルを付与した仕様についてレーザー誘起蛍光法による油膜厚さ測定を行ったところ、プラトー仕様と比較して上死点から中央行程において油膜厚さの増加が顕著に見られ、ディンプル付与によりシリンダボア面への供給油量が増加したと推察された。

Abstract

In recent years, in order to further improve the competitiveness of small engines, there has been increasing demand for improved fuel efficiency.

To help solve this problem, development is being actively carried out with the aim of reducing friction loss between the cylinder bore, piston, and piston ring, which contributes to greater fuel efficiency. In this report, we focus on the effect of friction loss on the texture of aluminum cylinder bores and evaluate the effects of mirroring the cylinder bores and adding dimples using the floating liner method.

As a result of this evaluation, the friction mean effective pressure (FMEP) achieved was 14.1% due to the mirror surface, compared to the conventional specification with a crosshatch on the cylinder bore surface (referred to as "plateau specification" in this report). In addition, the combination of mirroring and dimples reduced FMEP by up to 19.5% compared to plateau specifications. When the oil film thickness is measured by the laser-induced fluorescence method for the specifications with dimples, a remarkable increase in the oil film thickness was observed from the top dead center to the center stroke compared to the plateau specifications, suggesting that the amount of oil supplied to the cylinder bore surface increased due to the addition of dimples.

1 はじめに

シリンダボアとピストン、ピストンリング間のフリクションロスはエンジン全体の損失中約35%を占める。ゆえにこれらのフリクションロスを低減することはエンジンの燃費や出力を向上させる上で重要である^[1]。過去、輸送機器メーカー各

社はシリンダボア表面のテクスチャがフリクションロスに及ぼす影響について、多くの研究を行ってきた。これらの研究の中で、フリクションロスを低減する方法は主に2つに大別できる。一つ目はシリンダボア表面の鏡面化である。これは固体同士の直接接触を回避し、安定した油膜の形成を狙ったものである^{[2][3]}。二つ目はディンプルの様な凹形状の付与である。これは

研究者らごとに様々な狙いがあり、代表的なものでは摺動面に供給する潤滑油量のコントロール、摺動面積低減によるオイルのせん断抵抗の低減、動圧効果によりオイルより浮上力を得ることなどが報告されている^{[4][5]}。しかしながら、モーターサイクルのエンジンに対する研究事例、特にシリンダボアの鏡面化やディンプル付与の複合的効果に関する研究事例は乏しい。よって、本稿ではオールアルミシリンダを採用する小型のモーターサイクル用エンジンをを用い、シリンダボアのテクスチャによるフリクションロス低減のメカニズムを考察する目的で、浮動ライナ法によるフリクションロスの評価と、レーザー誘起蛍光法による油膜厚さ測定を実施した事例について紹介する。

2 実験方法

2-1. フリクションロスの測定

ボディシリンダ周りのフリクションは浮動ライナ法を用いて測定し、得られたデータから FMEP を計算することでフリクションロスを評価した。浮動ライナ法による評価を行う利点は以下の2点である。

- 1) 実機の環境に近いファイアリングによる評価であること。
- 2) シリンダ周りのフリクションロスのみを測定するため、他部品の影響を受けにくく、測定結果の再現性が高いこと。

本実験に用いた浮動ライナ装置は単気筒のオールアルミシリンダ用に開発したものをを用いた^[6]。装置の構成を図1に示す。ボディシリンダがピストンやピストンリングから受ける摩擦抵抗をシリンダ下部に設置されたロードワッシャーにより計測する仕組みである。

また、評価に用いたエンジンの諸元を表1に示す。排気量115cm³クラスの小型スクーターの空冷単気筒エンジンである。

ボディシリンダ周辺の部品の仕様を表2に示す。ボディシリンダの材料はボディシリンダ専用^[7]に開発され、現在量産されている DiASil 材 (過共晶 Al-Si ダイカスト合金)^[8]を用いている。ピストンリングの仕様はアルミ製のシリンダとの耐焼き付き性を担保する目的で DLC コーティングが処理されている。

また、各リングの張力を表3に示す。

試験条件を表4に示す。フリクションの測定は燃費への寄与の大きいエンジン回転数から代表で3水準(4400rpm、4800rpm、5200rpm)を選択して行った。また、シリンダボアテクスチャのフリクションロスに対する寄与を正確に評価するために、図示平均有効圧力(Indicated Mean Effective Pressure)、シリンダ壁温、油温を各試験で統一した。

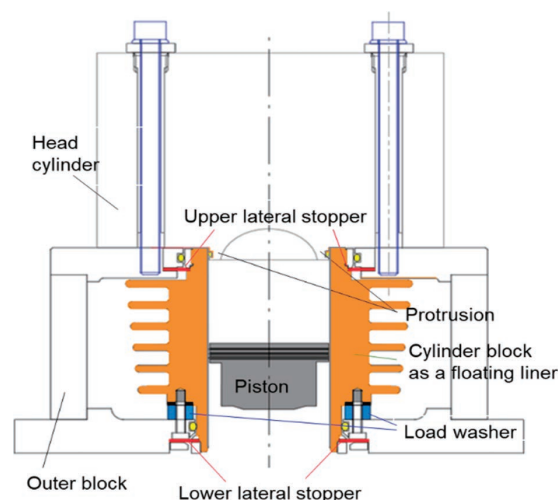


図1 浮動ライナ装置模式図

表1 試験エンジン諸元

Engine type	• Gasoline • Four stroke cycle • Air cooled single cylinder
Bore × Stroke (mm)	50.0 × 57.9
Displacement (L)	0.113
Connecting rod length (mm)	93.5
Reciprocating parts mass (kg)	0.136

表2 ボディシリンダ周辺の部品仕様

Parts	Material	Surface treatment
Piston	Aluminum (For forging)	Iron plating
Piston ring	Top Steel	DLC
	Second Cast iron	None
	Oil Steel	DLC
Body cylinder	Aluminum (For die casting)	None (Except texturing)

表3 ピストンリングの張力

	Tangential Force (N)	Unit pressure (kPa)
Top	3	171
Second	3	120
Oil	10	571

表4 試験条件

Oil viscosity	10W-40
Oil temperature	70℃ (at entrance of crankcase)
Body cylinder temperature	120 ~ 130℃ (at middle position of thrust side)
Engine rotation speed and IMEP	① 4400rpm, IMEP: 354kPa ② 4800rpm, IMEP: 412kPa ③ 5200rpm, IMEP: 494kPa

2-2. 油膜厚さの測定

油膜厚さの測定はレーザー誘起蛍光法(以降、LIF法)により行った。測定法の概略図を図2に示す。LIF法では光ファイバーをシリンダボア面に埋め込み、潤滑油に添加した蛍光剤が励起光の照射により蛍光を発する特性を利用する。発する蛍光の強度は油膜厚さに依存するため、光ファイバーを通して計測した

蛍光の強度を油膜厚さに換算して測定値とした。

LIF 法による油膜厚さの測定は本稿のように、シリンダボアのフリクションロスと潤滑状態の関係を考察する目的のみならず、燃焼室に浸入する油量を推定することでオイル上がりによる潤滑油消費との関係を議論する上でも有用である。

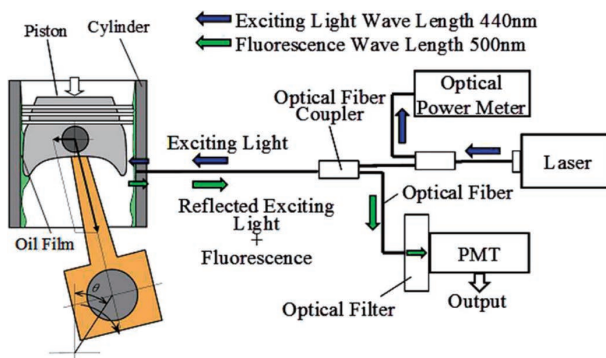


図2 レーザー誘起蛍光法 (LIF 法) による油膜測定の概略図

2-3. サンプル仕様

サンプルとして以下4種のシリンダを準備した。

- 1) プラトー仕様 2) 鏡面仕様 3) ディンプル仕様 A 4) ディンプル仕様 B

各仕様の概要を表5に示す。プラトー仕様はホーニング加工により、目の粗い砥石で谷部を、目の細かい砥石でプラトー部を形成した仕様である。また、鏡面仕様は目の細かい砥石のみを用いてホーニング加工を行い、凹凸の極めて小さい表面状態である。ディンプル仕様 A、ディンプル仕様 B は鏡面仕様をベースとして一部にディンプルが付与されている。

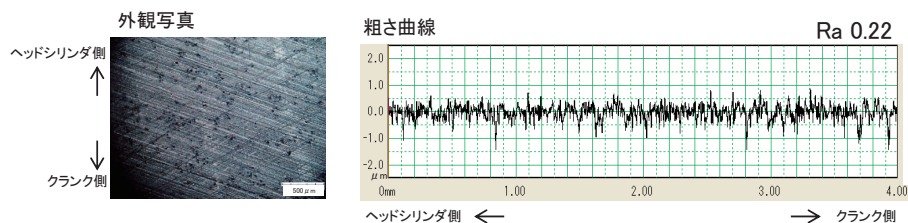
プラトー仕様と鏡面仕様の外観と粗さ曲線を図3に示す。プラトー仕様は深さ1~2 μm 程度の深溝が付与されている。対して鏡面仕様は1 μm を超えるような凹凸は見られない。両仕様をRaで比較するとプラトー仕様がRa0.2~0.3 μm 程度、鏡面仕様はRa0.03 μm 前後である。

ディンプル仕様 A、B について、ディンプルの形態と付与範囲の詳細を表6、図4に示す。本品におけるディンプル付与の目的は浦部らの研究^[4]で報告されている摺動面積の低減によるオイルのせん断抵抗の低減である。そのため、ディンプルはピストンが比較的高速で運動する行程中央部に付与した。また、ディンプル仕様 A は行程中央部の全周に付与されており、ディンプル仕様 B は膨張行程時に比較的大きなピストン側圧がかかる吸気側にのみ付与されている。

表5 各サンプルの概要

Cylinder type	Overview	Aim
Plateau	Having conventional cross-hatches	For comparison
Mirror	Having no cross-hatches and no irregular surface characteristics	Sliding loss reduction by reducing the frequency of direct contact between piston or piston ring and cylinder
Dimple A	Most of part is mirror finished but dimples are given at a limited part both of intake and exhaust side	Sliding area reduction of piston or piston ring and cylinder
Dimple B	Most of part is mirror finished but dimples are given at a limited part of only intake side	Sliding area reduction of piston or piston ring and cylinder

プラトー仕様



鏡面仕様

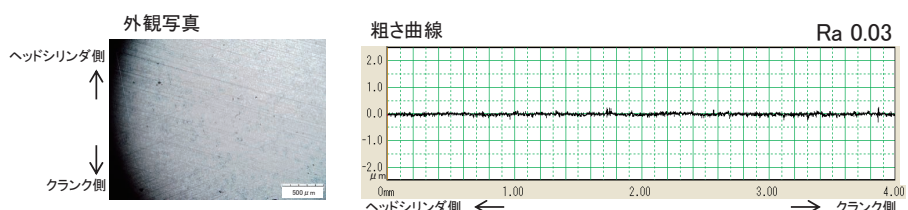


図3 シリンダボア面の外観写真と粗さ曲線（プラトー仕様、鏡面仕様）

表6 ディンプルの形態、付与範囲の詳細

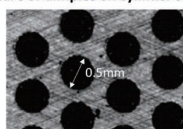
Area ratio		40%	
Shape		Circle	
Diameter		0.5mm	
Depth		About 7 μ m	
Application range	Axial direction	As shown in Figure 4	
	Radial direction	Dimple A	Both of intake side and exhaust side
		Dimple B	Intake side only

Axial direction

Dimple application range

- 20mm in the cylinder sliding direction between T.D.C. of piston skirt and T.B.C. of top ring
- 38mm below the head cylinder interface

Picture of dimples on cylinder surface



Radial direction

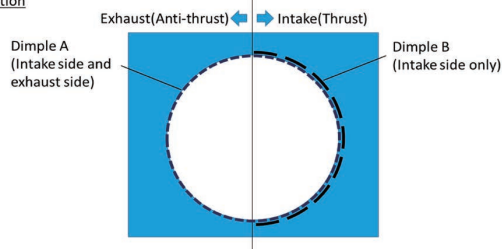


図4 ディンプル付与範囲の模式図

2-4. ディンプルの付与方法

ディンプル仕様 A、B はホーニング加工後、レーザー加工により付与した。レーザー加工の模式図を図5に示す。シリンダボア内に挿入された鏡でレーザー光を反射し、シリンダボアを回転移動、平行移動させることで狙いの位置に加工を行った。

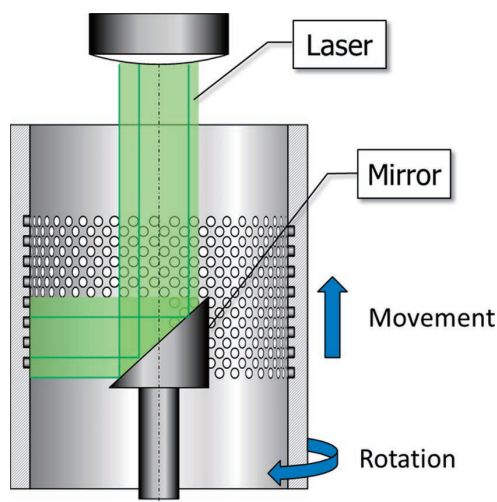
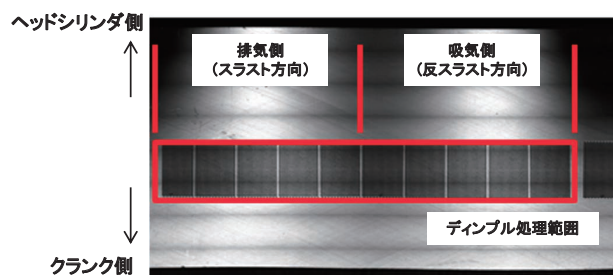


図5 レーザー加工の模式図

レーザー加工後のディンプル仕様 A、B のボア面の展開写真を図6に示す。加工範囲は四角に区切られており、同じ範囲で繰り返し加工を行うため、ディンプルの処理部にわずかに隙間が生じている。

ディンプル仕様A



ディンプル仕様B

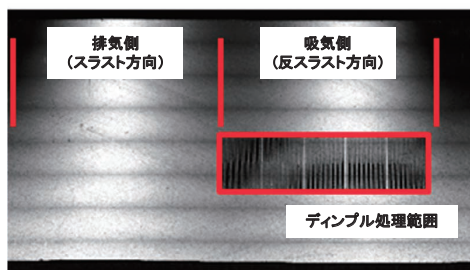


図6 シリンダボア表面の展開写真(ディンプル仕様 A,B)

また、レーザー加工によりシリンダの母材が蒸発する際、ディンプルの端部に微小突起が生じたため、再度ホーニング加工を行い除去した。仕上げホーニング前後のディンプル処理部の断面形状を図7に示す。微小突起は最大で5 μ m 程度の高さがあり、仕上げホーニング後は完全に除去されている。また、ボディシリンダの材料は母材中に初晶 Si や共晶 Si 等の晶出物が多量に存在しており、加工速度が場所により不均一である。そのため、ディンプル底部の形状は細かな凹凸を持っている。

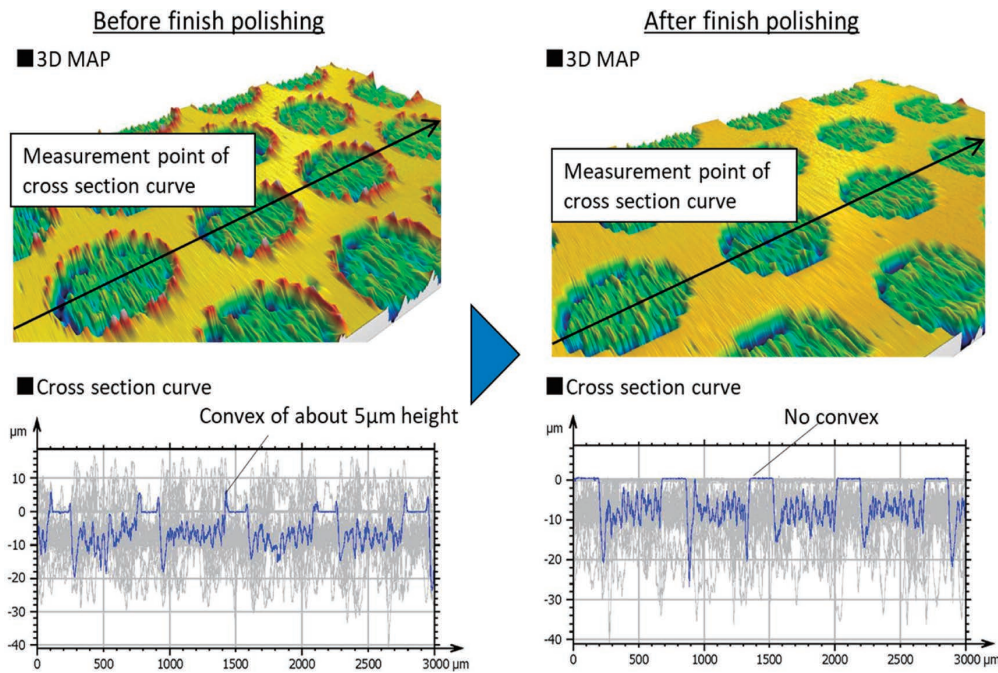


図7 ディンプル処理部の断面形状(仕上げホーニング前後)

3 結果と考察

3-1. FMEP 測定結果

エンジン回転数4400rpm、4800rpm、5200rpmで測定したFMEPの平均値を図8に示す。クランク角度0°~720°の合算値と、吸気行程(0°~180°)、圧縮行程(180°~360°)、膨張行程(360°~540°)、排気行程(540°~720°)の各行程に分割したFMEPがそれぞれ示されている。FMEPはプラトー仕様、鏡面仕様、ディンプル仕様A、ディンプル仕様Bの順で小さくなる。プラトー仕様に対するFMEPの低減率は鏡面仕様で14.1%、ディンプル仕様Aで17.3%、ディンプル仕様Bで19.5%である。膨張行程のFMEPはプラトー仕様、鏡面仕様、ディンプル仕様B、ディンプル仕様Aの順で小さくなり、他の行程(吸気、圧縮、排気)ではプラトー仕様、ディンプル仕様A、鏡面仕様、ディンプル仕様Bの順で小さくなる。

また、図9に摩擦波形の比較グラフを示す。横軸がクランク角度、縦軸が摩擦力を表す。摩擦力は正方向がシリンダボアをヘッドシリンダ側に押し上げる力、負方向がクランク方向に押し下げる力であり、絶対値が摩擦力の大きさである。図中矢印はディンプル処理位置直上を各部品が通過するクランク角度を表す。

3-2. 鏡面仕様のFMEPの低減効果について

図10にプラトー仕様と鏡面仕様の摩擦波形を示す。第二軸はピストンに働くスラスト力を表し、正の値が吸気側、負の値が

排気側へ働く力の大きさを表す。鏡面仕様はスラスト力の正負によらず、吸気、圧縮、膨張、排気の全行程においてプラトー仕様よりFMEPが小さくなった。シリンダボア鏡面化のリスクとして、表面に凹凸が無いことから、保油性が低下し油膜が形成されずに摺動抵抗が大きくなることが挙げられるが、今回の試験下では凸部が小さく、物体の直接接触を妨げて摺動抵抗を低減する効果が勝ったものと思われる。野口らの研究^[3]では鏡面化による保油量減少とそれに伴うフリクションロスの増大はエンジン始動直後にのみ見られ、エンジン始動の数10サイクル後には鏡面化した方が低フリクションであることが報告されている。

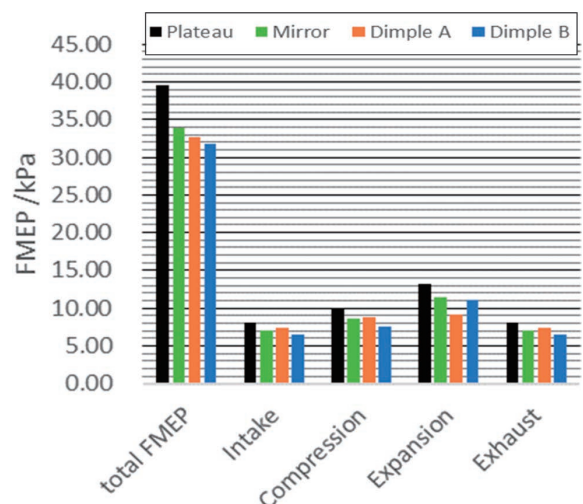


図8 各シリンダのFMEP(4400,4800,5200rpm 測定値平均)

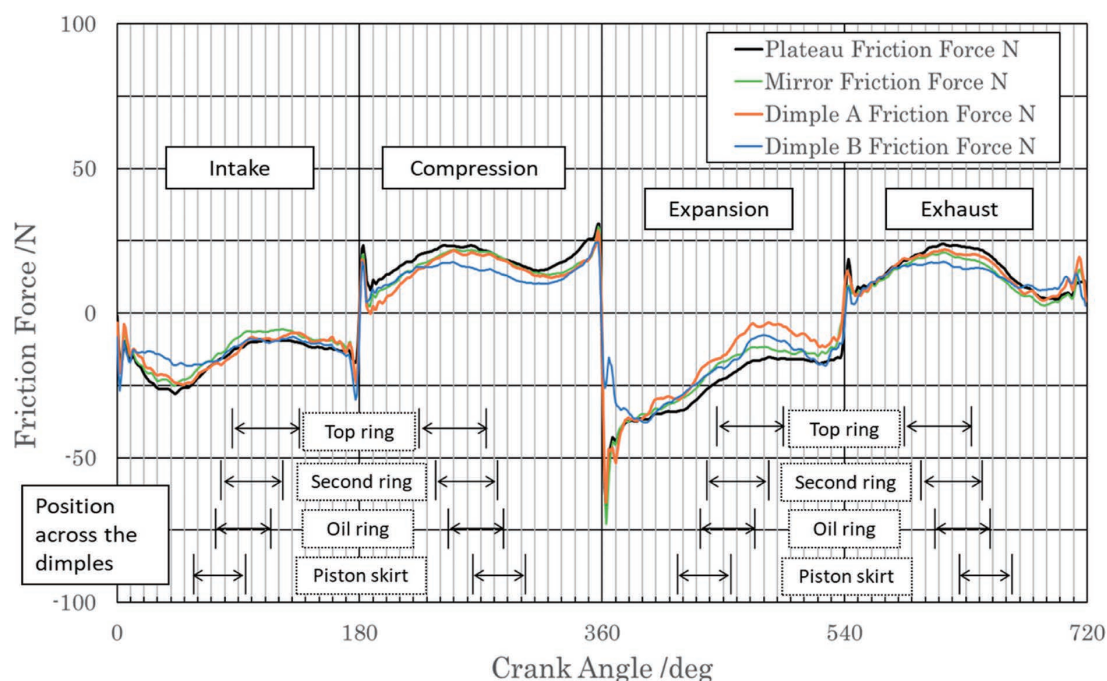


図9 各シリンダの摩擦波形データ(4800rpm 運転時)

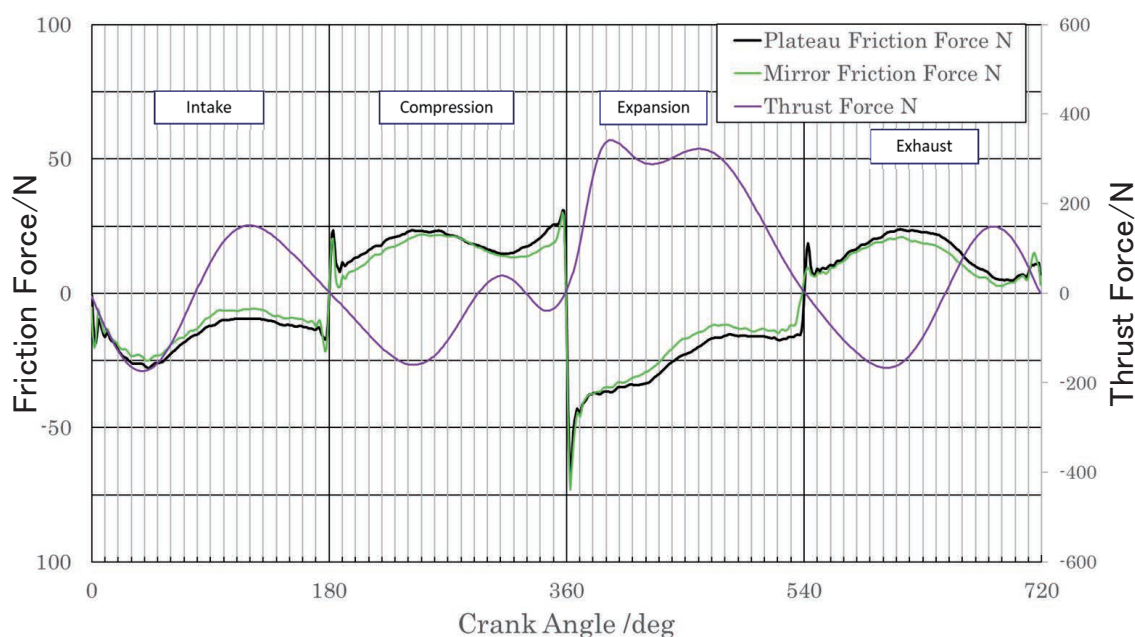


図10 プラトー仕様と鏡面仕様の摩擦波形データ(4800rpm 運転時)

3-3. ディンプル仕様 A、B の FMEP 低減効果について

ピストンスカート、各ピストンリングがディンプル上を通過している間の FMEP を比較すると、ディンプル仕様 A が最小となったのはトップリングに対してのみであり、他の部品に対してはディンプル仕様 B が最小である。図11に鏡面仕様とディンプル仕様 A、B の摩擦波形を示す。例えばクランク角度360°前後のディンプルが付与されていない範囲においても各仕様のフリ

クションに差が見られることから、行程中央部に付与されたディンプルがディンプル付与範囲外の潤滑状態に影響を与えていることが示唆される。また、ディンプル仕様 B (ディンプル仕様 A に対して付与範囲半分) が最もフリクションロスが小さかったことから、フリクション低減効果はディンプルの付与範囲に比例して得られるものではなく、最適な配置があると言える。

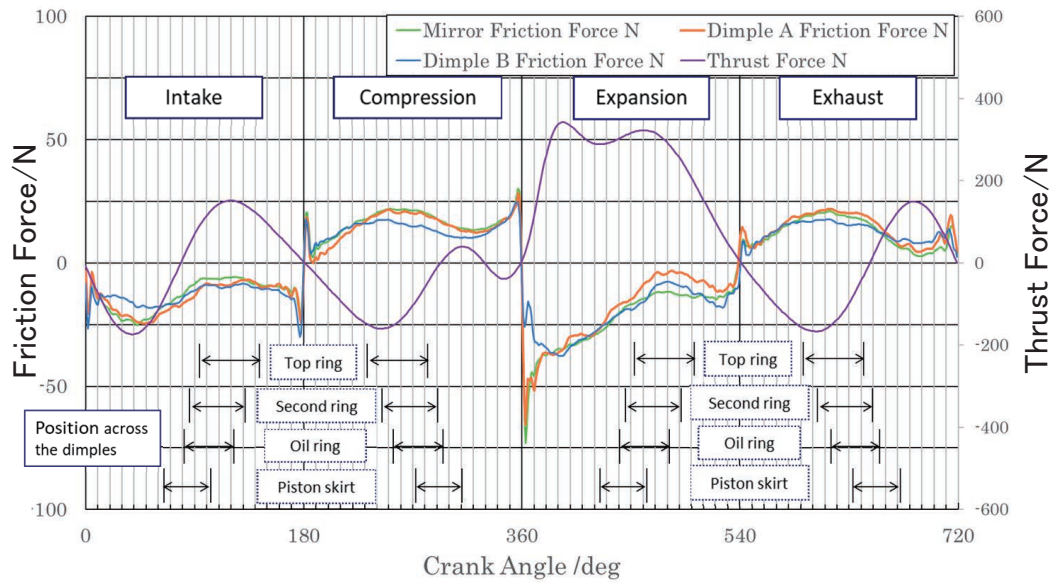
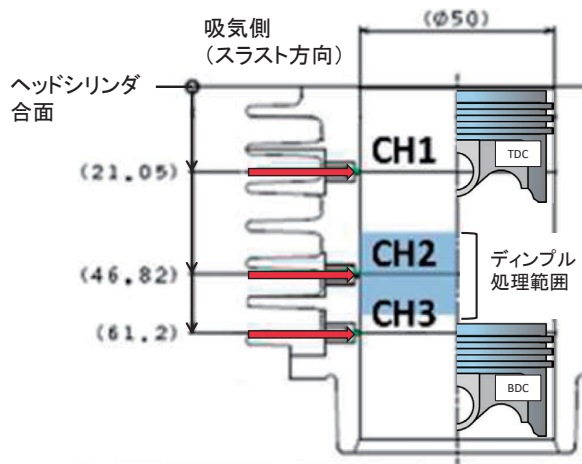


図11 鏡面仕様とディンプル仕様 A,B の摩擦波形データ (4800rpm 運転時)

3-4. 油膜厚さ測定結果

油膜厚さの測定は最も FMEP の低減効果の大きいディンプル仕様 B と、比較対象とするプラトー仕様 に対して行った。油膜厚さの測定位置、即ち光ファイバーの埋め込み位置は吸気側の 上死点付近、ディンプル処理位置、下死点付近の 3 か所とした(図12)。



- CH1・・・ピストンスカート上死点位置
- CH2・・・中央行程部、ディンプル処理範囲内
- CH3・・・トップリング下死点直上

図12 光ファイバーの埋め込み位置 (CH1,CH2,CH3) の模式図

エンジンの運転条件は浮動ライナ評価時と同様である。また、ディンプル仕様 B は圧縮行程 (180°～360°)、膨張行程 (360°～540°)において顕著な FMEP の低減効果が見られることから、これらの行程における測定結果について考察を行う。

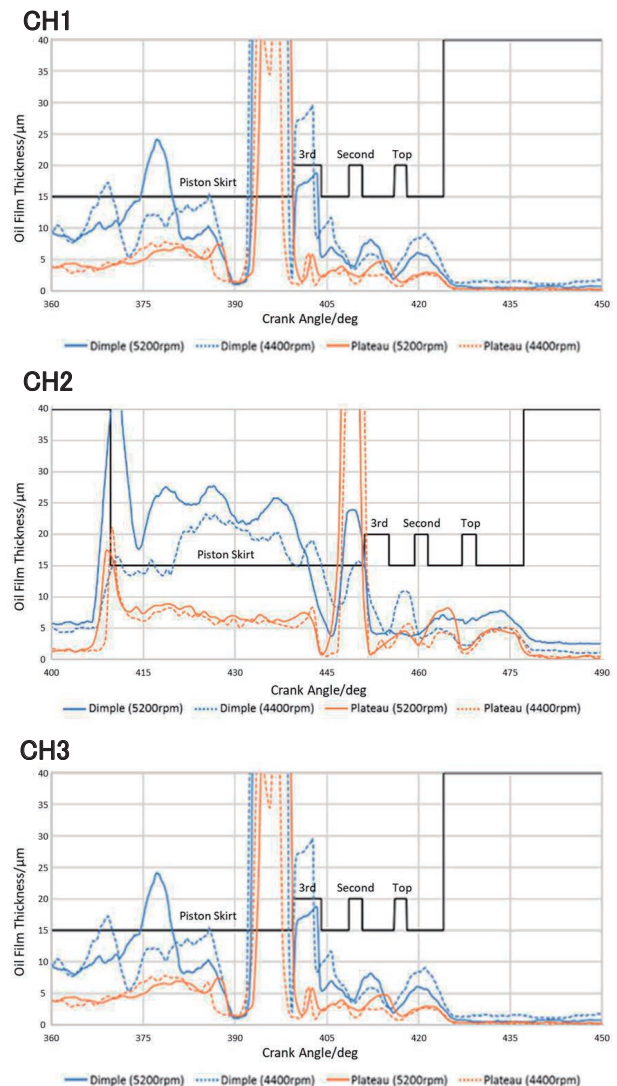
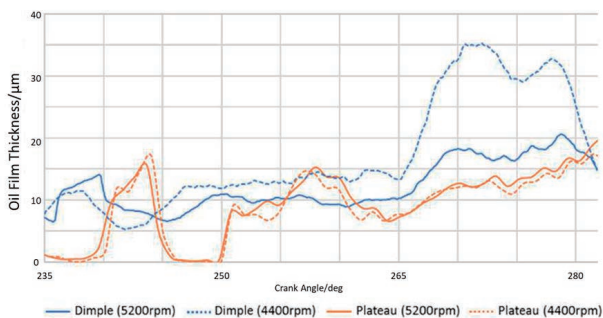


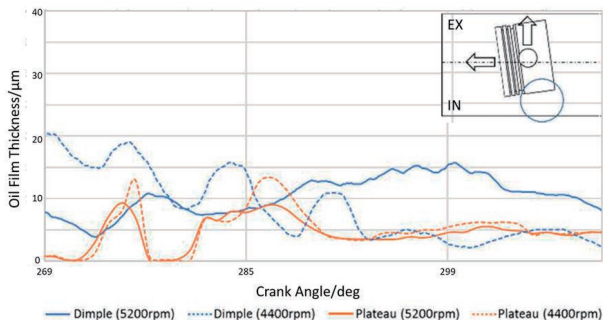
図13 膨張行程の油膜厚さ測定データ

図13に膨張行程における各測定チャンネルの油膜厚さの測定結果を示す。図中の黒色線はピストンの概略形状であり、油膜厚さの測定チャンネル直上を通過する際のクランク角度との関係を表す。上死点付近、ディンプル付与部(中央行程)において、ディンプル仕様 B はプラトー仕様と比較して厚い油膜厚さとなった。膨張行程ではピストンに対してシリンダの吸気側に強い側圧が加わり、潤滑状態は境界潤滑に近づくことが予想され、油膜が形成されることでフリクションロスは小さくなる。よって、測定結果はフリクションロスの測定結果と整合する。特にディンプル付与部のチャンネル2位置において両シリンダ仕様の油膜厚さの差異は大きくなっており、ディンプル付与によりシリンダ壁面への供給油量が増加し、油膜形成を促進したと推察する。

CH1



CH2



CH3

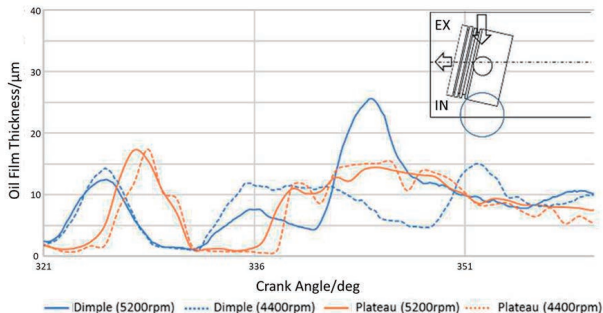


図14 圧縮行程の油膜厚さ測定データ

次に、図14に圧縮行程における各測定チャンネルの油膜厚さの測定結果を示す。ここではピストンスカートとの間の油膜厚

さが計測されるクランク角度の範囲を抽出して示した。図中に油膜厚さ測定時のピストン姿勢のイメージを併せて示す。圧縮行程においても、膨張行程と同様に油膜厚さはディンプル仕様 B の方が厚い傾向が見られる。また、形成される油膜厚さは膨張行程時と比較すると不連続であり、部分的な油膜の破断を伴いながらピストンが上死点方向に移動していることが示唆される。

圧縮行程は膨張行程に対して側圧が小さく、潤滑状態はより流体潤滑状態に近いと予想され、流体潤滑状態においては油膜厚さの増大はオイルに作用するせん断抵抗からフリクションロスを増大する要素になると考えられることから、ディンプル仕様の方が低フリクションであるという浮動ライナ法の測定結果とは矛盾する。この点については今回実施していない排気側の油膜厚さの測定を踏まえて考察を深める必要があると考える。

4 終わりに

テクスチャの異なるアルミ製シリンダを用いて浮動ライナ法による FMEP の測定を行い、下記の結果を得た。

- ・ シリンダ鏡面化により従来のプラトー仕様比で FMEP が 14.1% 低減した。
- ・ 行程中央部、特に吸気側に限定してディンプルを付与することで FMEP が大きく低減し、プラトー仕様比で 19.5% 低減した。

また、鏡面化とディンプル付与の複合した仕様の油膜厚さは、フリクションロス低減効果の大きい圧縮、膨張行程にてプラトー仕様比で増大する傾向が見られた。

参考文献

- [1] Suzuki, H., "Approach to the Piston Friction Reduction(2)," Journal of Japanese Society of Tribologists, 49(10), 763-768, 2004.
- [2] Yoshida, N., "Development of New I4 2.5L Gasoline Direct Injection Engine," doi: 10.4271/ SAE Technical Paper 2019-01-1199, 2019.
- [3] Noguchi, Y., Chihara, H., Ito, A., Matsumoto, G., Arake, S., "A Study on the Surface Texture of a Cylinder for low Friction and High Reliability," Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan 20174840, 1231-1236, 2017.
- [4] Urabe, M., Takakura, T., Metoki, S., Yanagisawa, M. et al., "Mechanism of and Fuel Efficiency Improvement by Dimple Texturing on Liner Surface for Reduction of Friction between Piston Rings and Cylinder Bore," doi:

10.4271/ SAE Technical Paper 2014-01-1661, 2014.

[5] Higuchi, T., Mabuchi, Y., Nakano, S., Mochida, H.,
“Friction influence of Surface micro texture and roughness
on cylinder bore,” Tribology Conference 2018 Spring in
Tokyo2018 manuscript (A9).

[6] Ito, A., Iwasaki, H., Kurita, H., Sato, T., “A Study on the
Measurement Method for Piston Friction Force of an Air-
cooled Gasoline Engine under High Engine Speed,”
Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan
20144651, 805-810, 2014.

[7] Kurita, H., Yamagata, H., Arai, H., Nakamura, T.,
“Hypereutectic Al-20%Si Alloy Engine Block Using High-
Pressure Die-Casting,” doi: 10.4271/ SAE Technical Paper
2004-01-1028, 2004.

[8] Uhara, T. and Kurita, H., “The Effect of Surface
Morphology of Cylinder Bore Surface on Anti-Scuffing
Property made by High Pressure Die-Casting Process
using Hyper-Eutectic Al-Si Alloy,” SAE International
Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 7, No. 1
(January 2014), pp. 207-216.

■ 著者



村瀬 雄太
Yuta Murase
生産技術本部
材料技術部



伊東 明美
Akemi Ito
東京都市大学
内燃機関工学研究室