

4 ストローク小排気量空冷エンジンの オイル消費に関する考察

Study of Oil Consumption in Small-displacement 4-stroke Air-cooled Engines

澤 海 嘉司弘*

Kazuhiro SAWAUMI

直 井 康 夫*

Yasuo NAOI

要 旨

高温となる4ストローク小排気量空冷エンジンにおけるオイル消費の要因解析を実施した。オイル消費の多くはオイル上がりによるものであり、シリンダ壁面温度がオイル消費率に影響をおよぼしている。その温度を低減させることでオイル消費率を抑制できることが明らかとなった。また、シリンダの変形に対し、オイルリングの組み合わせ幅寸法の縮小および追従性係数の向上、ピストンの首振り現象の緩和は、オイル消費率を低減する有効な手段であることが確認できた。さらに、エンジン各部の温度が高い空冷エンジンではオイルのNOACK蒸発量がオイル消費に大きく影響を及ぼすことが確認できた。

ABSTRACT

A causal analysis of oil consumption was conducted for 4-stroke small-displacement air-cooled engines, which experience high temperature operations. The majority of oil consumption occurs as a result of oil loss that goes up into the combustion chamber, and the temperature of the cylinder walls affects the oil consumption rate. Results indicated that it was possible to control the oil consumption rate by reducing the cylinder wall temperature. It was also shown that the reduction of the width of the oil ring assembly and the increase of its coefficient of flexibility, in addition to the alleviation of the piston slap, were effective means to reduce the oil consumption rate. It was further demonstrated that the NOACK volatility of the oil has a significant effect on oil consumption in an air-cooled engine, in every part of which the temperature gets high.

1. まえがき

オイル消費は、4ストロークエンジンにおいても不経済であるばかりでなく、燃焼室内でのオイル炭化量増加による機能障害の発生原因となる。これらの対策としてオイル消費を解析した研究⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾は多くみられる。

二輪車で多用される空冷エンジンは、水冷エンジンと比較しエンジン温度が高いという特徴がある。特に小排気量エンジンでは高負荷、高エンジン回転数の使用頻度が高

いため、高温の状況下で運転される。また、シリンダボア径の小さい小排気量エンジンにおいては、ピストン、ピストンリングなどの製造公差を、ボア径に対して比例縮小できないため、精度確保が相対的に不利となる。これらの特徴に着目したオイル消費の研究事例は少ないため、本稿では、国内向けスクータに採用されている排気量49 cm³の空冷エンジンを用いて、オイル消費の改善を目的とした要因解析を実施した。その結果について報告する。

*二輪 R&D センター

Table 1 Specifications of test engine

Engine type	4-stroke, SI engine
Cooling system	Forced air-cooling
Bore x Stroke	37.8 x 44.0 mm
Number of cylinders	1
Displacement	49 cm ³
Compression ratio	10.1
Valve drive system	OHC
Maximum output	3.0 kW / 8250 r/min
Cylinder	Cast-iron sleeve
Oil ring	Multi-piece steel rail ring (2.0 mm width)

2. 試験方法

2.1. オイル消費測定法

オイル消費率を測定する方法としては、エンジン運転前後のオイル容積の差から消費率を直接測定する容積法がある。これは簡便かつ高い精度でオイル消費を測定する方法であるが、長時間の試験を要し、一定の運転条件を維持した場合に限られ、過渡運転時の瞬時のオイル消費率を測定することはできない。一方、オイルに硫黄を添加し、排ガス中の硫黄濃度からオイル消費率を測定する硫黄トレース法⁽¹⁰⁾ (以下Sトレース法と示す)がある。これは過渡的な運転条件でも、短時間で瞬時のオイル消費率を測定できる。

本研究では、これらの測定方法を使い分けて試験をおこなっており、詳細な測定条件や方法は各項目にて記述する。なお、オイルはSAE粘度10W-30を使用し、Sトレース法の計測器は、堀場社製自動車排ガス硫黄成分測定装置MEXA-1170SXを用いた。

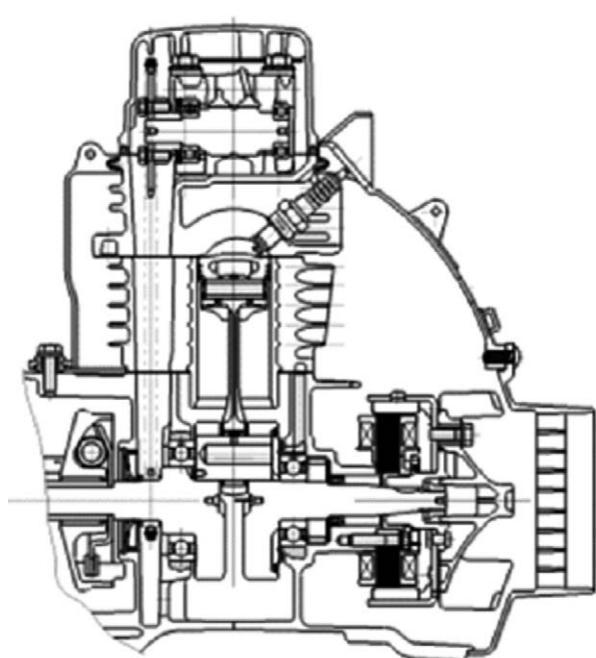


Fig. 1 Layout of test engine

2.2. 供試エンジン

試験に用いたスクータ用小排気量強制空冷エンジンの諸元をTable 1に、レイアウトをFig. 1に示す。

3. オイル消費の要因解析

3.1. 小排気量空冷エンジンのオイル消費

オイル消費をマクロ的に捉えるため、小排気量空冷エンジンの温度条件や運転条件とオイル消費率の関係をSトレース法にて測定した。車速50 km/h(エンジン回転数8000 r/min, スロットル開度52%)一定速にて、冷機状態より実走行時の最高温度まで油温を上昇させながらオイル消費率の測定をおこなった。結果をFig. 2に示す。この図より、オイル消費率は油温の上昇に伴い増加する傾向にあり、高温時には値が安定しないことがわかった。

つぎに、エンジン回転数および負荷条件を変え、定常運転にて油温がサチュレートした時のオイル消費率を測定した結果をFig. 3に示す。この図より、高負荷、高エンジン回転数になるにつれてオイル消費率が増加する傾向にある。

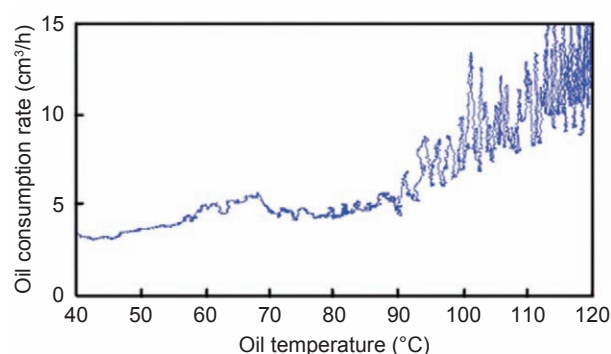


Fig. 2 Relation between consumption rate and temperature of engine oil

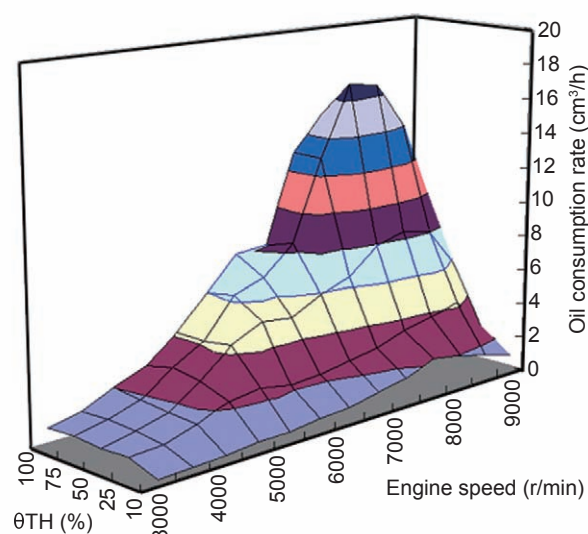


Fig. 3 3D-map of engine oil consumption rate

ことがわかった。また、Fig. 4 ではそのときの油温を縦軸に示している。この図より、油温もオイル消費率と同様に高負荷、高エンジン回転数になるにつれて増加傾向にあることがわかった。また、Honda の二輪車において、冷却方式の異なるエンジンの油温を調査した結果を Fig. 5 に示す。この図は、実走行時における最高油温を示しており、空冷エンジンは水冷エンジンに対し油温が高い傾向にあることがわかる。すなわち、高負荷、高エンジン回転数の使用頻度の高い小排気量かつ油温の高い空冷エンジンはオイル消費に不利であるといえる。

3.2. オイル消費に影響をおよぼす温度因子

3.1. 節で述べた結果より、オイル消費率は温度に依存していることがわかったが、支配的な温度因子は明確となっていない。そこで、オイル消費に影響が大きいと考えられる油温（オイルパン内油温）、点火プラグ座面温度およびシ

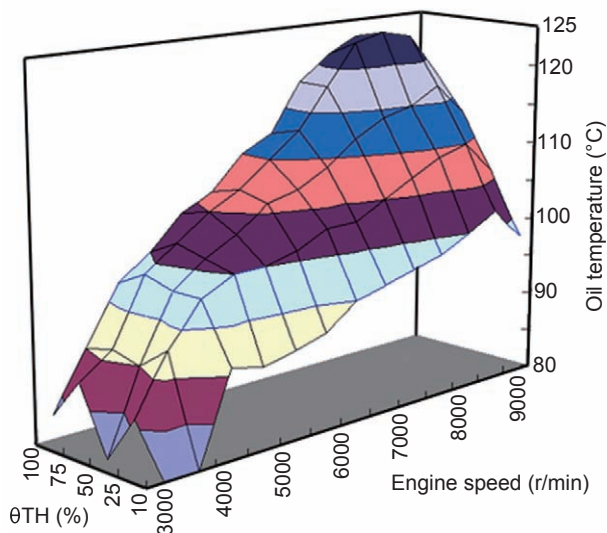


Fig. 4 3D-map of engine oil temperature

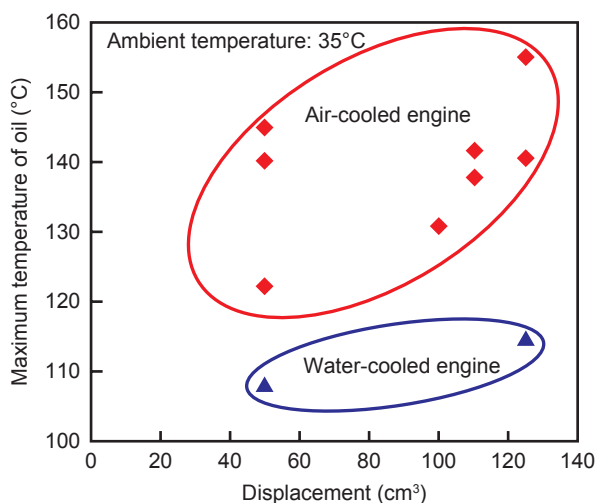


Fig. 5 Difference of oil temperature by cooling system and engine displacement

リンダ壁面温度を測定した。シリンダ壁面温度の測定部位については Fig. 6 に示す。なお、本研究では IN ポート側のシリンダ壁面温度を代表値としている。上記温度因子のオイル消費への影響を調べるため、定常運転時にエンジンへの冷却風量により上記 3 箇所の温度を変化させたときのオイル消費率を S トレース法にて測定した。測定結果を Fig. 7 に示す。この図より、オイル消費率はシリンダ壁面

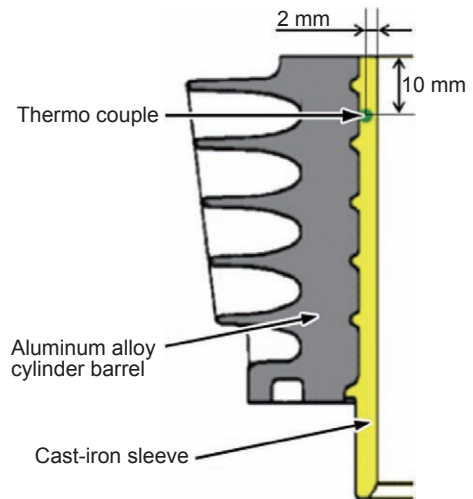


Fig. 6 Measurement point of cylinder wall temperature

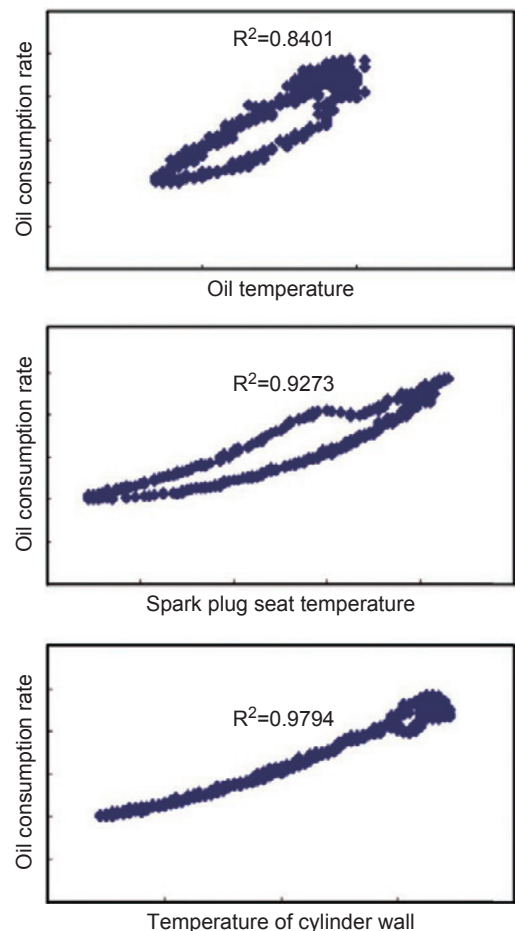


Fig. 7 Relation between oil consumption rate and temperature in each part of engine

温度に最も相関があることがわかった。以後、本研究ではシリンダ壁面温度を管理ポイントとすることにした。

3.3. オイル流失経路

オイルの流失経路は、以下に大別される。

- (1) ブローパイガスと共にクランクケース外に放出されるもの
- (2) オイル上がり (ピストン、ピストンリング、シリンダ相互の隙間から燃焼室へ流失するもの)
- (3) オイル下がり (バルブとバルブステムシールおよびバルブガイドの隙間からポート内へ流失するもの)

(1)については、通常ブローパイガスは吸気系に還流しているが、吸気系に導入せず大気放出させた場合でもオイル消費率に差がみられなかった。これより、(1)は極微量であることがわかった。(2)および(3)については、それぞれの割合を確認する手法として Fig. 8 に示す特殊構造のエンジンを用いた。これは、エンジン内部のオイル潤滑領域を二分化し、オイル上がりが生じる部位を含む領域 (以下エリア a と示す) およびオイル下がりが生じる部位を含む領域 (以下エリア b と示す) を分離した構造としている。測定手法は S ストレース法で、使用するオイルは硫黄入りおよび硫黄無しを用いた。

運転条件は車速 50 km/h (エンジン回転数 8000 r/min・スロットル開度 52%) 一定速とし、冷機状態よりシリンダ

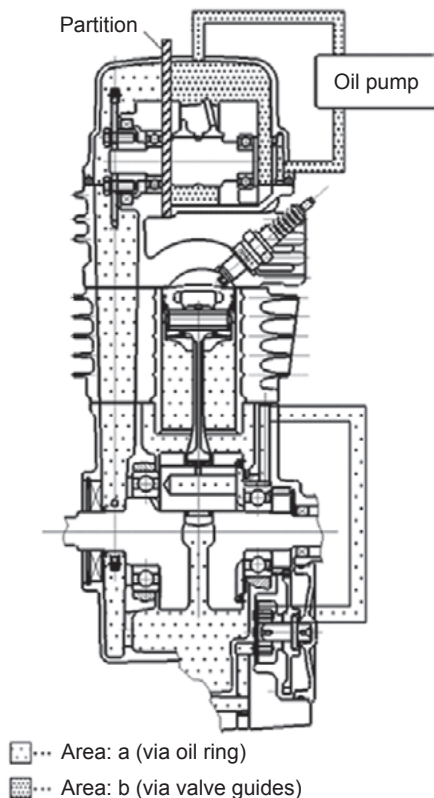


Fig. 8 Isolated structure of lubrication area for analyzing inflow path to combustion chamber

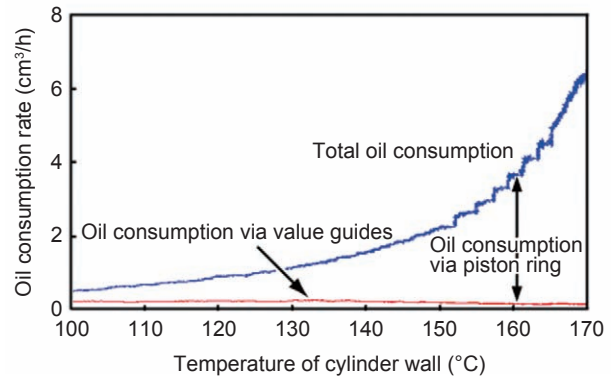


Fig. 9 Analysis of inflow path to combustion chamber

壁面温度を上昇させながらオイル消費率を測定した。測定の第一段階として、エリア a およびエリア b の両方に硫黄入りオイルを使用し、全体のオイル消費率を測定した。次に、エリア a に硫黄無しオイル、エリア b に硫黄入りオイルを使用して、オイル下がりだけのオイル消費率を測定した。これらの結果を Fig. 9 に示す。この図は全体のオイル消費率とオイル下がりによる消費率を示し、その差分がオイル上がりによる消費率である。これより、シリンダ壁面温度が高くなるにつれて、オイル上がりによる消費比率が急激に上昇して大半を占め、また、オイル下がりによる消費率については、温度による影響がほとんどないことがわかった。

4. オイル消費率の低減手法

4.1. ピストンリングによるオイル消費率低減手法

3.1. 節にて確認した Fig. 2 の結果より、高温時にオイル消費率が安定しないという事実に対し、シリンダの変形の影響に着目した。本研究の供試エンジンでは、Fig. 6 で示す鋳鉄スリーブ鋳込みアルミニウムシリンダを採用している。当該のシリンダを規定トルクにて締付け、160 °C に加熱した時のシリンダの内径変化量を Fig. 10 に、真円度を

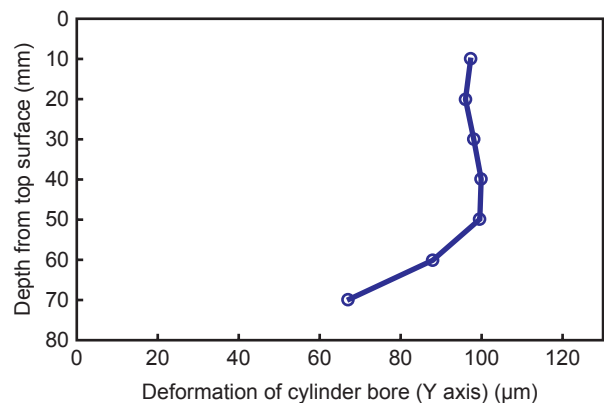


Fig. 10 Deformation of cast-iron sleeve type cylinder bore at 160°C

Fig. 11 に示す. このシリンダの変形に対し, オイルリングの性能向上によるオイル消費改善を検討した. 本研究の供試エンジンでは, Fig. 12 に示す 3 ピースタイプのオイルリングを使用しており, このようなオイルリングでは, ピストンが首振り現象を起こしたとき, 表中に示すオイルリングの組合せ幅 h_1 が短いほどシリンダ壁面より離れる距離が少ないためオイル消費率が少ない⁽¹¹⁾といわれている. また, シリンダの径方向の変形に対するオイルリングの追従性の指標として追従性係数⁽¹¹⁾がある. 追従性係数 (k) の定義を式 (1) に示す. k の値が大きいほど追従性が高い.

$$k = \frac{3 \cdot Ft \cdot d_1^2}{E \cdot h_2 \cdot a_1^3} \quad (1)$$

k : 追従性係数

Ft : 張力 (N)

d_1 : シリンダ径 (mm)

E : リング材弾性率 (MPa)

h_2 : サイドレール幅 (mm)

a_1 : サイドレール厚さ (mm)

これらを踏まえ, h_1 , h_2 , a_1 寸法を標準品 (オイルリング a) に対し縮小したオイルリング b を試作した. これらの諸元を Table 2 に示す. オイルリング b を用いて, 車速 50 km/h (エンジン回転数 8000 r/min・スロットル開度 52%) 一定速にて, 冷機状態よりシリンダ壁面温度を上昇

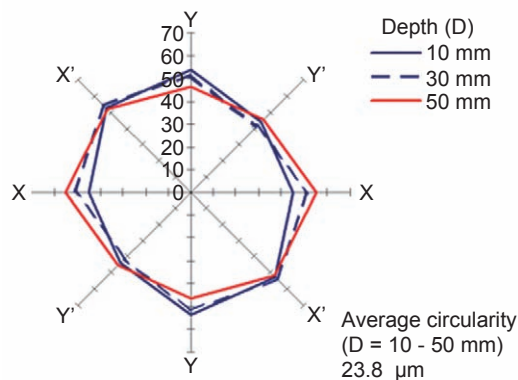


Fig. 11 Circularity of cast-iron sleeve cylinder bore at 160°C

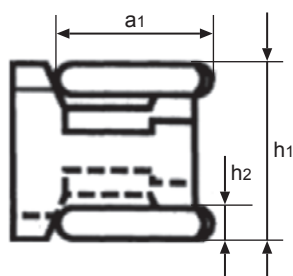


Fig. 12 Structure of oil ring

Table 2 Specifications of oil ring

	a(Standard)	b(Modified)
h_1 (mm)	2.0	1.5
h_2 (mm)	0.35	0.3
a_1 (mm)	1.7	1.1
Piston ring closed gap (mm)	0.45	0.35
Tension(N)	11.7	13.2
Coefficient of flexibility: k	0.15	0.72

させながらオイル消費率を S トレース法で測定をおこなった. その結果を Fig. 13 (テスト B) に示す. なお, 図中のテスト A は Fig. 2 に示すテスト結果の横軸を油温と同時に計測したシリンダ壁面温度に置き換えたものである. オイルリングを a から b に変更することにより, シリンダ壁面温度 170 °C でのオイル消費率は約 15 cm³/h から 8 cm³/h となり, 約 45% 低減することができた. 同時に高温域での変動も無くなった. これは, ピストンの首振り現象およびシリンダの変形に対するオイルリングの追従性が向上したためと考えられる. これより, シリンダボア径が小さい小排気量エンジンにおいても, 当該寸法を縮小することは, オイル消費率低減に有効な手段であることが確認できた.

4.2. シリンダ壁面温度の低減

シリンダ壁面温度の低減手法としては, 放熱フィン, クーリングファンの改良による冷却性能向上なども考えられるが, 本研究では一般的に放熱性に優れ, 熱変形にも有利といわれているアルミニウム一体シリンダを採用し, オイル消費率低減効果の確認をおこなった. シリンダの外観形状, 壁面粗度, 単品時の内径精度は鋳鉄スリーブ鋳込みアルミニウムシリンダと同等とし, ピストンリングは, 4.1. 節でオイル消費率の低減効果が確認できたオイルリング b を用いた. Fig. 14 は, 車速に対するシリンダ壁面最高温度を示す. 鋳鉄スリーブ鋳込みアルミニウムシリンダに対し, 全体にアルミニウム一体シリンダのほうが温度は低く, 最高温度においては約 15 °C の差がある.

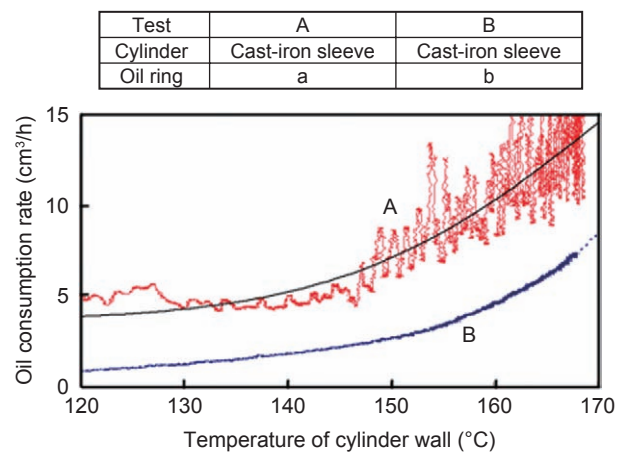


Fig. 13 Effect of modified oil ring for oil consumption rate

次に、アルミニウム一体シリンダを規定トルクにて締付け、160℃に加熱した時のシリンダの内径変化量を Fig. 15 に、真円度を Fig. 16 に示す。鋳鉄スリーブ鋳込みアルミニウムシリンダの変形量と比較し、真円度は小さくなっているが、熱膨張による内径変化量は大きいという違いがわかる。

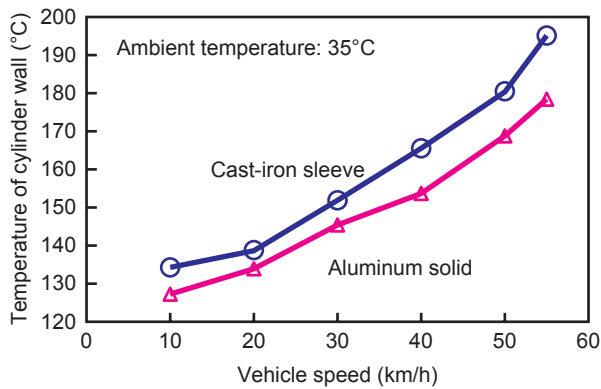


Fig. 14 Comparison of cylinder wall temperatures by difference of material

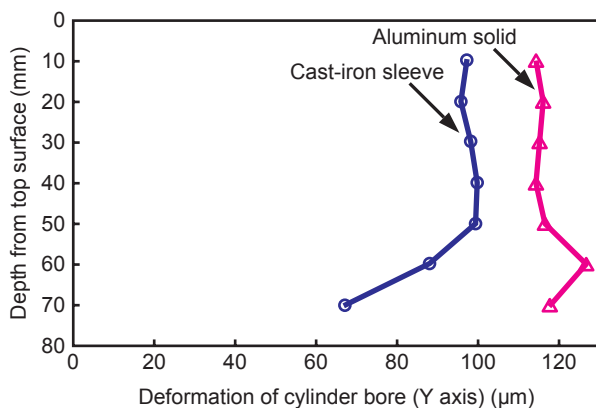


Fig. 15 Deformation of aluminum solid cylinder bore at 160°C

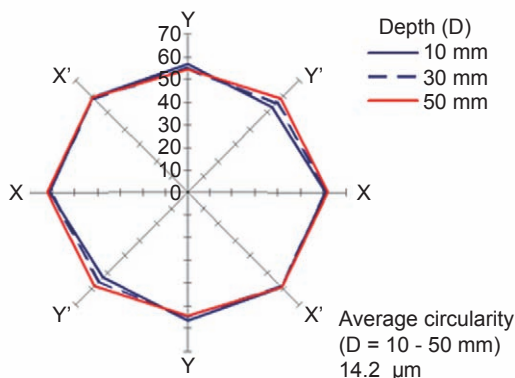


Fig. 16 Circularity of aluminum solid cylinder bore at 160°C

オイル消費率の測定はSトレース法にておこない、車速 50 km/h (エンジン回転数 8000 r/min, スロットル開度 52%) 一定速とし、冷機状態よりシリンダ壁面温度を上昇させながら比較した。その結果を Fig. 17 (テスト C) に示す。アルミニウム一体シリンダは、同一シリンダ壁面温度下でわずかながらオイル消費率が多く高温域の変動も大きいことがわかった。これは、アルミニウム一体シリンダの真円度は向上しているものの、シリンダ内径変化量の増加によりピストンの首振り現象が大きくなったためと考えられる。

そこで、ピストン首振り現象を緩和させるため、Top および 2nd ランド径を 50 μm 拡大したピストンを用い、運転条件は上記と同一とし、その効果を確認した。結果を Fig. 17 (テスト D) に示す。ランド径を拡大することでオイル消費率が減少していることがわかる。また、その値がテスト B (Fig. 13 より) のオイル消費率を下回り、高温域の変動も無くなったことからその効果が確認できた。

以上より、Fig. 14 に示すシリンダ壁面最高温度が低減する結果と合わせると、大幅なオイル消費率の低減が期待できる。鋳鉄スリーブ鋳込みアルミニウムシリンダの壁面温度 170℃とし、同一条件でのアルミニウム一体シリンダの壁面温度を 158℃ (Fig. 14 車速 50 km/h 時における温度差より) と仮定したときのオイル消費率を比較した場合、アルミ一体シリンダとピストン首振り対策ピストンを組み合わせてのオイル消費率は約 8 cm³/h から 3.2 cm³/h へと減少し、約 60% 低減する。供試エンジンの標準状態と比較すると、約 15 cm³/h から 3.2 cm³/h へと減少し、約 80% のオイル消費率の低減効果がある。

4.3. NOACK 蒸発量によるオイル消費への影響

小排気量空冷エンジンは、シリンダ壁面温度が高温となるため、オイル上がりによるオイル消費の中に、オイル

Test	B	C	D
Cylinder	Cast-iron sleeve	Aluminum solid	Aluminum solid
Oil ring	b	b	b
Piston	Standard	Standard	Top/2nd land+ 50 μm

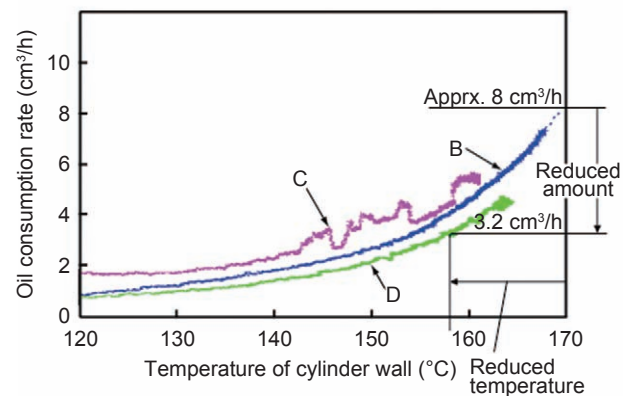


Fig. 17 Effect of aluminum solid cylinder with modified piston for oil consumption rate

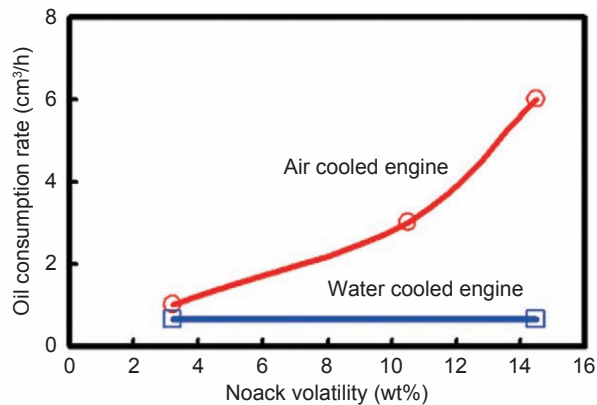


Fig. 18 Influence of NOACK volatility for oil consumption rate

の蒸発による消費が多く含まれていると考えられる。一般にオイルの蒸発量を示す指標としては、NOACK 蒸発量 (250 °C 真空状態で 1 時間維持した時の蒸発量) がある。これまでに記述した試験に使用したオイルは、NOACK 蒸発量 14.5% である。これに対し、NOACK 蒸発量 10.5%、3.2% のオイルを試作し比較をおこなった。蒸発によるオイル消費率の測定には一定の運転条件を維持する必要があると考えられるため、車速 55 km/h (エンジン回転数 8800 r/min, スロットル開度 100%) 一定速で実走行時の最高油温を保持し、20 時間の連続運転後、容積法にて測定した。ここでは、供試エンジンと共に、同一排気量の水冷エンジンでも同様の測定をおこなった。その結果を Fig. 18 に示す。空冷エンジンでは、NOACK 蒸発量を下げることによってオイル消費率低減に効果がある。一方、水冷エンジンにおいてはオイル消費率に変化がほとんどない。よって、NOACK 蒸発量を下げるとは高温となる小排気量空冷エンジンには有効なオイル消費率低減手法であるといえる。

5. まとめ

4 ストローク小排気量空冷エンジンにおいて、オイル消費を支配する要因とそれを低減させる手法について検討した。その結果を以下に述べる。

- (1) オイル消費率は、温度上昇に伴い増加してゆく傾向にあることが確認できた。また、最も相関がある温度因子はシリンダ壁面温度である。
- (2) オイル流失経路としては、ピストン、ピストンリング、シリンダ相互の隙間から燃焼室へ流失するオイル上がりによる消費が高温域において大半を占める。
- (3) 小排気量空冷エンジンにおいて効果的なオイル消費率低減手法を以下に記す。
 - ・シリンダ壁面温度を下げることで、オイル消費率を低減できる。

- ・シリンダの変形およびピストンの首振り現象に対するオイルリングの追従性向上とピストンの首振り現象の緩和は、ピストン、ピストンリングなどの精度確保が相対的に不利となる小排気量空冷エンジンにおいても、オイル消費率を低減する有効な手段となる。
- ・供試エンジンの標準仕様における消費率 (シリンダ壁面温度 170 °C) に対し、上記二つの低減手法を採用した場合、オイル消費率は約 80% 低減できる見通しを得た。
- ・NOACK 蒸発量の低いオイルを使用することでオイル消費率を低減させることができる。水冷エンジンに比べ高温で運転される小排気量空冷エンジンはその効果が大きい。

参考文献

- (1) 中村望, 平石文昭, 村上信明, 星川淳, 東博文: 過給ガソリンエンジンにおけるエンジンオイル消費要因分析, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.82-10, p.23-28(2010)
- (2) 吉田秀樹, 小林弘幸, 佐藤彰: ピストンのセカンドランド容量と形状によるオイル消費の低減, 自動車技術会論文集, Vol.27, No.4, p.53-58(1996)
- (3) 吉田秀樹, 小林弘幸, 山田武志, 瀧口雅章, 桑田一宏: 3 ピースオイルリングの薄幅・低張力化によるオイル消費への影響, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.90-98, p1-4(1998)
- (4) 大隅康之, 熊切渡南: SO₂ 法によるガソリンエンジンのオイル消費測定, SUZUKI TECHNICAL REVIEW Vol.19, p.82-87(1993)
- (5) 立石幸男, 藤村和浩, 新啓一郎: 潤滑油消費量低減法の研究, 自動車技術会論文集, Vol.27, No.1, p.58-62(1996)
- (6) 飯島直樹, 桜井武雄, 瀧口雅章, 針谷安男, 山田武志, 吉田秀樹: ガソリンエンジンにおけるエンジン実働中のシリンダー変形とオイル消費の関係, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.5, p.1217-1222(2009)
- (7) 小林弘幸, 吉田秀樹, 山田正樹, 鈴木孝男: 薄幅超低張力オイルリングの開発, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.54-01, p.7-10(2001)
- (8) 稲垣英人, 許斐敏明: エンジン高回転時のオイル消費要因解析, 自動車技術会論文集, Vol.36, No.4, p.113-118(2005)
- (9) 飯島直樹, 青木秀馬, 今村淳一, 瀧口雅章: 低張力リングのピストン摩擦力とオイル消費への影響について, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.71-09, p.5-10(2009)

- (10) 村上慎一:自動車排ガス硫黄成分測定装置 MEXA-1170SX, HORIBA Technical Reports, No.34, p.66-71(2009)
- (11) 自動車用ピストンリング編集委員会:自動車用ピストンリング, 山海堂, p.30-33(1997)

■ 著 者 ■



澤海嘉司弘



直井康夫