

エンジンのライナ壁面における潤滑油蒸発に関する研究 — シリンダ周方向の油膜厚さ分布の影響 —

Study on Lubricating Oil Evaporation on Cylinder Liner Wall of an Engine:
Effect of Oil Film Thickness around Cylinder Bore

針谷 安男^{*1}・山菅 和良^{*2}・糀谷 隆雄^{*2}・飯島 直樹^{*3}
HARIGAYA Yasuo, YAMASUGA Kazuyoshi, KOUJIYA Takao and IIJIMA Naoki

The present study aims to clarify various factors that influence the oil evaporation adhered to the cylinder liner wall on the oil consumption, and to show the improvement of energy conservation and the environmental. In this paper the influence of the distribution of liner temperature and oil film thickness by using this evaporation model were examined. Results are as follows. As using the improved oil evaporation model, the evaporative oil under the distribution of the cylinder temperature and the oil film thickness to the direction of the cylinder bore circular was able to be estimated. The evaporative oil was affected by the distribution of the temperature and the oil film thickness. These values are about 2.4 g/h at rear side, 2.2 g/h at front side, 1.4 g/h at anti-thrust side, and 1.3g/h at thrust side. The amount of evaporative oil obtained by using this model is about 0.33 times than the measured oil consumption. It is considered that the oil effused from the space between the piston and liner accompanying the cylinder deformation directly disperses in combustion gases and it evaporates.

Key words : Oil Evaporation, Oil Consumption, Cylinder Liner, Cylinder Deformation, SI Engine

1. まえがき

地球環境・エネルギーの問題解決は緊急の課題であり、動力源としてのエンジンにもその解決のための種々の対策が採られてきている。その一つである摩擦損失の低減手法は、薄幅化によるリング張力の低減や低粘度マルチグレード潤滑油の使用である。その結果、省エネルギーとしての効果が見られるが、ブローバイガス、潤滑油消費量（OC）の増大など、二次的な問題が発生している。そのため、その原因究明と解決法が求められている。特にエンジン潤滑油消費量の低減は、燃焼により生じる粒子状物質の低減とともに重要な問題である。さらに粒子状物質の低減に用いる排気後処理装置の装着に伴い、その性能維持のためより一層のOC低減が必要である。

OCのメカニズムに関する研究は従来から多くの研究⁽¹⁻⁸⁾が報告されている。そのうちオイル上がりした潤滑油が燃焼室壁面に付着して燃焼ガス等に接し、蒸発する潤滑油消費に関しても、実験及び解析の両面から研究^(1,2,4,7,8)が行われている。しかし、その詳細については十分に説明されていない。

一方著者らは、これまでピストンリング部における熱・潤滑特性を解明するため、熱流体潤滑理

^{*1} 宇都宮大学教育学部 ^{*2} 宇都宮大学大学院教育学研究科 ^{*3} 東京都市大学大学院

論モデルを構築⁽⁹⁻¹⁰⁾した。さらに文献(11)，(12)では，これまでに開発した油膜温度算出法に蒸発に関する関係式を組み込み，エンジン燃焼室壁面に付着した潤滑油膜が蒸発することを予測できるモデルを構築し，ライナ壁温度，油膜厚さ，及び潤滑油粘度グレード油が蒸発量に及ぼす影響，ガソリンエンジンで測定されたOCの値との関係を示した。蒸発予測モデルを用いて得られた蒸発量は，実機により測定された潤滑油消費量と比較すると低速，低負荷領域ではほぼ一致したが，高速，高負荷領域では低めの値であった。高速，高負荷運転時での差異の原因として，シリンダ変形に伴うシリンダ周方向の油膜厚さの分布，及びライナ温度分布を考慮することが指摘された。

本研究は，潤滑油消費量に及ぼすエンジンシリンダ壁面に付着した潤滑油蒸発に影響を与える諸因子を明らかにし，省エネルギー，環境改善の指針を示すことを目的とし，本報では，潤滑油蒸発量の予測モデルの改良を目指し，蒸発に影響を及ぼす因子，すなわち油膜厚さ，ライナ温度の円周方向の分布の影響について検討した結果を述べる。

2. 油膜蒸発量の解析

ライナ表面に付着した油膜の蒸発モデル⁽¹¹⁾を図1に示す。油膜表面におけるエネルギーバランスは

$$q_1 - q_2 = q_3 + q_4 \quad (1)$$

で表せる。ここで， q_1 ：燃焼ガスから対流による熱流束， q_2 ：油膜蒸発熱流束， q_3 ：油膜内部エネルギーの変化， q_4 ：ライナ壁に移動する熱流束である。

蒸発に直接影響を与えるライナ表面に付着した油膜温度 T は，燃焼ガスから油膜，ライナ壁を経て冷却水の熱移動を考え，非定常一次元熱伝導式(2)を用いて解析する。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

ここで，エネルギーバランスから温度境界条件として式(3)，(4)を設定する。

$$x = X_o \quad -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} = q_1 - q_2 \quad (3)$$

$$x = 0 \quad T = T_L \quad (4)$$

燃焼ガスから対流により油膜に流入する熱流束 q_1 は式(5)に示すように，燃焼室内のガス温度 T_g と油膜表面温度 $T_{x=X_o}$ との温度差と燃焼室内熱伝達率 h_g の積で求められる。

$$q_1 = h_g (T_g - T_{x=X_o}) \quad (5)$$

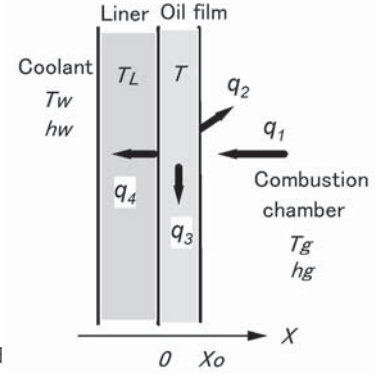


Fig.1 Evaporation model of oil film on the liner wall

また、油膜から蒸発する熱流束 q_2 は式 (6) に示す蒸発熱 L_v と油膜の蒸発速度 dm/dt の積から算出する。

$$q_2 = L_v dm/dt \quad (6)$$

蒸発熱 L_v は油膜温度や潤滑油の臨界温度の関数で表される。蒸発速度 dm/dt は質量伝達数、拡散係数、混合気体の密度、拡散境界層厚さの関数である。ここで、燃焼室内のライナ壁面上の潤滑油を対象とすると、燃焼室ガスと壁面間の流動状態は一般に乱流と仮定され、さらに、境界層外縁における燃焼室内の潤滑油成分の質量分率を $Y_\infty = 0$ と仮定すると、蒸発速度 dm/dt は

$$dm/dt = \frac{h_g}{C_g} \ln \left(1 - \frac{Y_s}{Y_s - 1} \right) \quad (7)$$

となる。ここで、 C_g : ガスの比熱, h_g : 熱伝達率, Y_s : 界面における質量分率である。

今回の解析では、より実機条件における潤滑油蒸発量の予測を可能にするため実測されたピストン、ライナ温度、燃焼圧力等を用いて蒸発量を求めた。シリンダ円周方向の油膜厚さはシリンダライナの変形を考慮して算出した。油膜温度は、この油膜厚さをもとに熱流体潤滑モデル^(9,10)により算出するが、円周方向への熱の流れは無視し、円周方向に1度ごと分割した微小長さごとに計算を行う。したがって、各位置において得られた蒸発速度に円周方向の表面積を乗算すると1サイクル中の潤滑油蒸発量が求まる。

本報では、図2に示す火花点火エンジン（内径×行程=89×80.3 mm）を対象に、潤滑油粘度グレード 10W30 を用いた。運転条件は回転数 3000rpm, 全負荷であり、測定された燃焼室圧力、ライナ温度を採用した。また、燃焼ガスからの油膜への熱伝達量 q_l は Woschni が提案している熱伝達率式を用いて算出した。今回は3番気筒におけるオイル蒸発量について検討した。フロント F 、リア R 、スラスト TH 、反スラスト ATH の4方向において潤滑油蒸発量を計算し、各々にシリンダ表面積の1/4を乗算し、その総和を1気筒当たりのオイル蒸発量とした。計算は吸入開始時に油膜がライナ壁の上部に付着している状態から開始し、1サイクルのみ行った。なお、蒸発特性に関する物性値などは文献⁽²⁾⁽⁸⁾を参考にした。

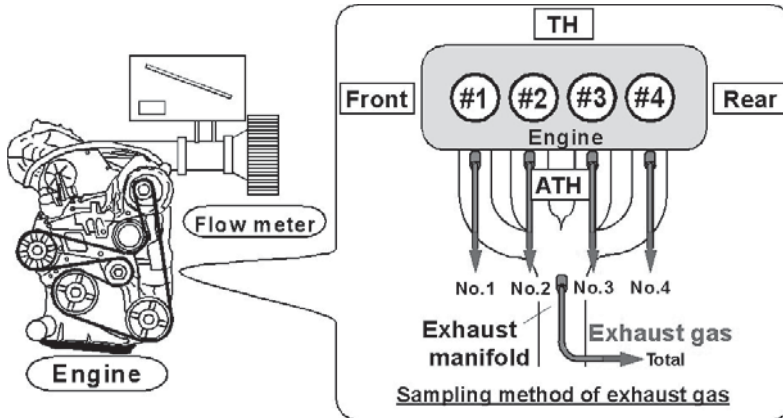


Fig. 2 Test engine and cylinder

3. 解析結果と考察

3.1 ライナ内径の形状測定

解析の対象としているガソリンエンジンは直列4気筒であり、シリンダブロックの冷却水の循環や周囲の放熱の違いによりシリンダ周方向の温度分布が異なることが指摘されている。その結果、シリンダブロックの熱変形が生じ、摺動方向でもその変形具合が異なることが予想される。

このため、エンジン実動時にインダクタンス式隙間センサを用いた回転ピストン法によりシリンダ周方向のピストンとライナの隙間を測定した。その結果⁽¹³⁾を図3に示す。図は3000rpmにおける無負荷と全負荷のシリンダ形状の測定結果（3番気筒）をシリンダ上部（UPR）、中央部（MID）、下部（LWR）について示す。無負荷ではシリンダの変形は少なく、摺動方向に対してほぼ同心円状であることがわかる。無負荷と全負荷の測定結果を比較すると、負荷の増加により変形が大きく現れ、シリンダ上部、中央部、下部と変形が異なり複雑な形状となっている。これらのシリンダ変形はシリンダブロック内の温度分布に起因し、熱膨張の差により変形が生じたと考えられる。特に3番気筒の変形は2次変形が大きく、スラスト（TH）-反スラスト（ATH）方向に楕円型に変形している。これは3番気筒が2番気筒と4番気筒に挟まれているため、フロント-リア方向への変形が抑制されるためと考えられる。

以上のように、解析の対象としているシリンダ形状はピストンの摺動方向各位置において、同心円ではなく、また負荷によりその変形量が異なり、変形することが明らかになった。

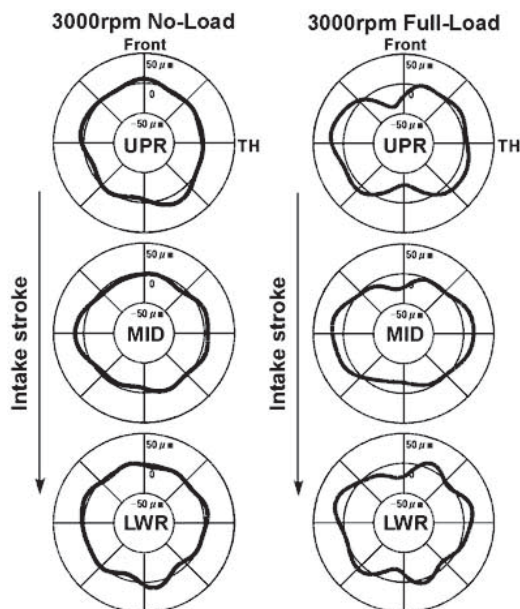


Fig. 3 Measured results of cylinder bore deformation

3.2 ピストンリング-シリンダ間の油膜厚さとライナ温度

図3に示したようにシリンダ形状は変形をしており、これを考慮したシリンダ周方向の油膜厚さを求める必要がある。変形したシリンダ内のリングの変形は、リングを真直梁と考えて360点の要素に分割し、各要素にリング張力、ガス圧力、および油膜圧力を作用させ、3連モーメント法⁽¹⁴⁾により求めた。またリングとシリンダの隙間を油膜厚さとし、各要素において流体潤滑モデルを適用し油膜圧力を求め、リングの張力とのつりあいのもと油膜厚さを求めた。ここでオイル流入側はオイルが十分にあるフルフラッド状態である。

本解析方法で得られた油膜厚さのサイクル変化を図4に示す。油膜厚さはフロント、リア側が薄く、スラスト（TH）、反スラスト（ATH）側が厚く、周方向で最大で約 $10\mu\text{m}$ と大きく異なる。この油膜厚さの違いはシリンダ変形に追従していることがわかる。また油膜厚さのこの差は、オイルの蒸発に大きく影響を及ぼすことは前報⁽¹²⁾の結果からも予想される。なお、これまでのTHLの方法により計算された油膜厚さ（図中 mean）は、これらのほぼ平均的な値である。

図5は周方向各面の摺動方向に対するライナの温度分布を示す。蒸発速度に影響を与えるライナ

温度はフロント、リア側が高く、スラスト、反スラスト側が低い。これらの温度差はトップリング位置で約 20℃，リング位置 $x/St = 0.2$ では約 12℃である。なお $x/St = 0.6$ 以上では各方向との温度差は 2～3℃である。

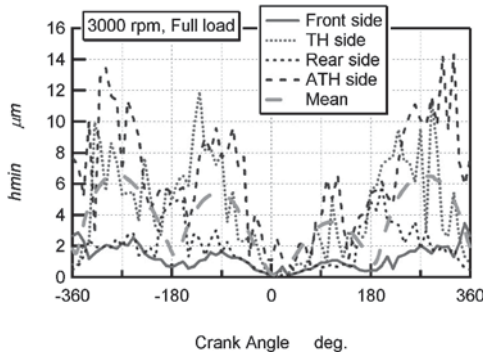


Fig. 4 Oil film thickness

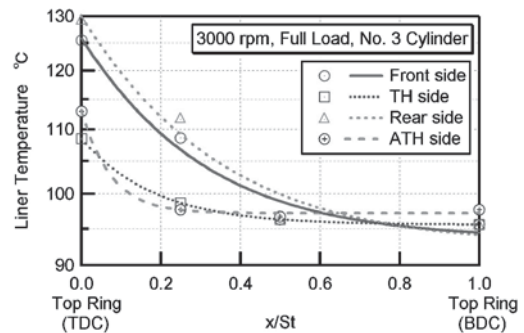


Fig. 5 Liner temperature distribution

3.3 油膜温度、蒸発速度と蒸発量

以上の計算により得られた油膜厚さと測定されたライナ温度をもとに各位置における油膜表面温度 T_s と油膜蒸発速度 dm/dt を算出した。図 6 はスラスト側の摺動方向各位置における油膜表面温度変化を示す。トップリングの上死点位置に相当する $Xp=0.002$ の油膜表面温度は、リングが通過し吸気ガスに接することにより低下し、吸気行程後半から圧縮行程前半はほぼ一定であるが、圧縮行程後半では温度が上昇し、リングに再び覆われる直前で 111℃に達する。膨張行程では燃焼による高温のガス温度に接するため上死点直後にわずかの温度上昇が見られるが、その後、排気行程中まではほぼ一定の温度である。ライナ位置が摺動方向に移るに従いライナ温度は低下するため油膜表面温度は低下する。なお、シリンダ下部付近では吸入圧縮行程中ガス温度が低いため油膜表面温度はほぼライナ温度の値と同じになる。

図 7 はスラスト側の摺動方向各位置における潤滑油蒸発速度変化を示す。各位置における蒸発速度は、油膜温度の変化に対応して摺動方向の上死点位置から離れるのに従い低下する。

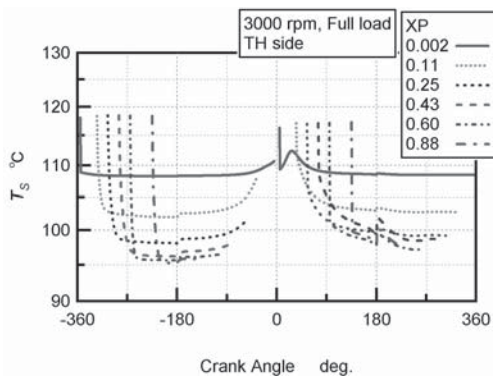


Fig. 6 Surface temperature of oil film on the liner

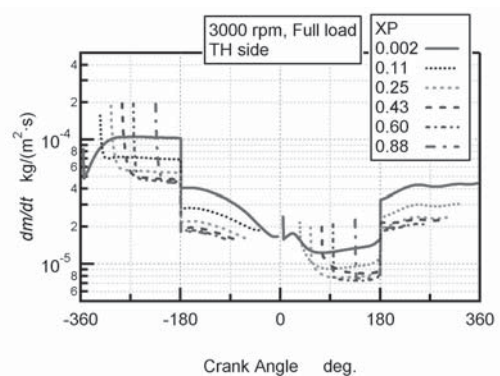


Fig. 7 Mass flux of evaporative oil

図 8 は周方向各面のトップリングが上死点位置に相当する $Xp=0.002$ における 1 サイクル中の油膜

表面温度を示す。吸入行程と圧縮行程前半では、油膜表面温度はライナの位置による影響を受けず、ほぼ一樣な変化を示す。圧縮行程後半から油膜温度は上昇を開始し、これらの温度は油膜厚さの影響を受け、ライナ位置により異なる。油膜厚さが厚い反スラスト側の温度変化は急激に上昇し、その最大値も高く約 158°C に達する。膨張行程では、急速に温度は低下し、ライナ温度に近い値で推移し、排気行程中もほぼ一定値を示す。

図 9 に周方向各面のトップリングが上死点位置に相当する $XP=0.002$ における 1 サイクル中の潤滑油蒸発速度を示す。吸入、圧縮行程ではライナ温度、油膜厚さが異なるが、潤滑油蒸発速度はほぼ等しく同様な変化を示す。これらの値は圧縮上死点直前付近から、燃焼による温度上昇の影響を受け急激に上昇するがそれぞれの位置では異なる変化を示す。上死点後の極大値を比較すると、反スラスト側の値が高く、リア、フロント、スラスト側の順に低くなる。膨張行程後半から排気行程中の各位置の潤滑油蒸発速度はリア、フロント、反スラスト、スラスト側の順に低くなるが、同様な変化を示す。上死点直後の潤滑油蒸発速度は油膜厚さが厚い反スラストが高く、油膜表面温度が高いことに起因している。膨張行程後半から排気行程での各位置でのこれらの値は油膜温度の高低に対応して順に低下する。

図 10 は各方向における蒸発速度をもとに摺動方向の表面積を乗じて求めた 1 サイクル中の潤滑油蒸発量を示す。フロント、リア側の潤滑油蒸発量がスラスト、反スラスト側に比べ約 1.8 倍大きい

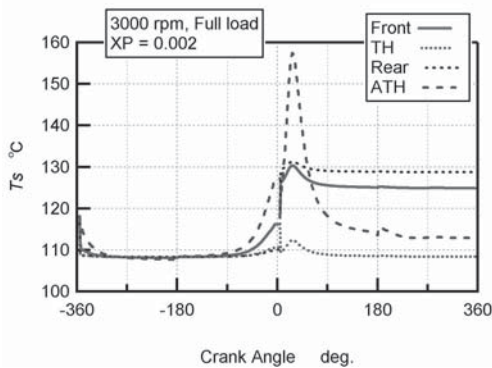


Fig. 8 Oil film surface temperature

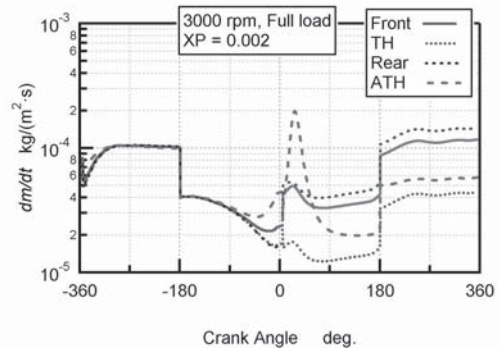


Fig. 9 Mass flux of evaporative oil

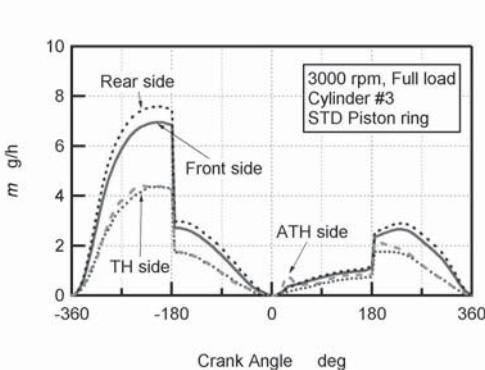


Fig. 10 Mass of evaporative oil

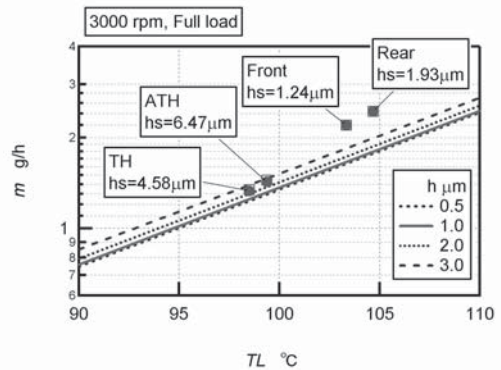


Fig. 11 Relation between evaporative oil and liner temperature

ことがわかる。この要因として油膜厚さとライナ温度が複雑に影響を及ぼしており、特にフロント、リア側のライナ温度が高いことが主要因と考えられる。

そこで、潤滑油蒸発量の総量 m とライナ温度の平均値 T_L との関係を図 11 に示す。図には、油膜厚さ一定のもとに求めた潤滑油蒸発量の総量も示してある。ライナ温度の上昇に伴い、潤滑油蒸発量は増加し、油膜厚さが厚くなるほどその値は増す。さらに局所の蒸発量はリア側で高い値を示し、油膜厚さが薄くても温度の影響が強く、特に上死点近傍のライナ温度の影響を強く受けて、蒸発量が上昇したことが裏づけられた。

また、各摺動方向を代表値として算出される総蒸発量はリア側が 2.4 g/h、フロント側 2.2g/h、反スラスト側が 1.4g/h、スラスト側が 1.3g/h である。この計算された蒸発量と測定された OC⁽¹³⁾ とを比較すると、リア側の値でも測定値の約 44% であり、シリンダ平均値で比較すると約 33% である。測定された OC はシリンダ壁に付着してから蒸発する過程を経るのではなく、シリンダ変形に伴い直接燃焼ガス中に飛散して蒸発していると考えられる。

4. まとめ

本研究は、潤滑油蒸発量の予測モデルの改良を目指し、蒸発に影響を及ぼす因子、すなわち油膜厚さ、ライナ温度の円周方向の分布の影響について検討した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 本潤滑油蒸発予測モデルはシリンダ周方向に油膜厚さ、温度分布を持つ場合でも解析可能で、周方向の蒸発量を予測することができる。
- (2) シリンダライナ周方向には油膜厚さ、温度とも分布があり、フロント、リア側とも油膜厚さは薄く、温度は高い。
- (3) シリンダライナ周方向の潤滑油蒸発は、油膜厚さ、温度分布の影響を受け、総蒸発量はリア側が 2.4 g/h、フロント側 2.2g/h、反スラスト側が 1.4g/h、スラスト側が 1.3g/h である。これらは油膜厚さとライナ温度の影響を受けるが、ライナ上部の温度の影響が強いことが明らかになった。
- (4) ラйна周方向のライナ温度分布を考慮した蒸発予測モデルを用いて得られた蒸発量は実機により測定された潤滑油消費量に比べ約 33% であり、シリンダ変形に伴いピストンとライナの隙間より燃焼室へ流れ出した潤滑油が直接燃焼ガス中に飛散して蒸発していると考えられる。

参考文献

- (1) 川本淳一, 他, エンジンの潤滑油消費機構の研究 (第 1 報) - 油膜からの油の蒸発 -, 潤滑, 22-11 (1977)
- (2) Petris, C.D., et al., A Mathematical Model of the Evaporation of the Oil Film Deposited on the Cylinder Surface of IC Engines, SAE Paper 972920, pp. 1-9 (1997)
- (3) Herbst, et al., Simulation of Piston Ring Dynamics and Their Effect on Oil Consumption, SAE Paper No. 2000-01-0919 (2000)
- (4) 稲垣英人, 他, 内燃機関のシリンダ壁面油膜がオイル消費に及ぼす影響, 日本機械学会論文集 (B 編), 70-700, pp. 3251-3256 (2004)
- (5) 瀧口雅章, 他, オイル消費低減技術の最近動向, トライボロジスト, 49-10, pp. 775-780 (2004)
- (6) 伊東明美, 他, ディーゼルエンジンのオイル消費メカニズムに関する研究 (第 1 報), 自動車技術会論文集, 36-3, pp. 63-68 (2005)

- (7) Liu, L., Tian, T., Yilmaz, E., Modeling Oil Evaporation from the Engine Cylinder Liner with Consideration of the Transport of Oil Species along the Liner, Proceedings of WTC 2005-63984, pp. 1-2(2005)
- (8) Soejima, M., et al., A Review of Solutions for the Mechanism of Oil Consumption in Internal Combustion Engines, SAE Fuel and Lubrication Meeting, JSAE 2007716, pp. 1610-1617 (2007)
- (9) Shimada, A., et al., An Analysis of Oil Film Temperature, Oil Film Thickness and Heat Transfer on a Piston Ring of Internal Combustion Engine: The Effect of Local Lubricant Viscosity, SETC 2004 Proceedings, 2004-32-0024, pp. 1-9 (2004)
- (10) 針谷安男, 他, ピストンリング部における潤滑特性の解析ーすべり面形状の影響ー, 宇都宮大学教育学部紀要, Vol. 57-2, pp. 27-36 (2007)
- (11) 針谷安男, 他, エンジン燃焼室壁面における潤滑油蒸発量の予測ー油膜温度とライナ壁温度の影響ー, 宇都宮大学教育学部紀要, Vol. 58-2, pp. 31-40 (2008)
- (12) 針谷安男, 他, エンジンのライナ壁面における潤滑油蒸発に関する研究, 宇都宮大学教育学部紀要, Vol. 59-2, pp. 57-64(2009)
- (13) 飯島直樹, 他, ガソリン機関におけるオイル消費とシリンダー壁面からのオイル蒸発の関係について, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No. 43-08, 205-20085255, pp. 5-8 (2008)
- (14) Yamada, T., et al.: Development of Technique to Predict Oil Consumption with Consideration for Cylinder Deformation, SAE paper 2003-01-0982 (2003)