

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 —オイル性状の影響—

Study on Lubricating Oil Evaporation on Cylinder Liner Wall of an Engine
— Effect of Lubricant Properties —

針谷 安男^{*1}, 鈴木 研二^{*2}
HARIGAYA Yasuo, SUZUKI Kenji

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 propose the improvement of energy conservation and the environmental. In this paper the effect of the lubricant properties, i.e. saturation vapor pressure and viscosity of lubricant, on oil evaporation by using the developed evaporation model was examined. Results are as follows. The evaporative oil was affected by the lubricant vapor pressure and viscosity. The evaporative oil values increase with increase of vapor pressure. Also, these values increase with increase of the liner surface temperature. Therefore, as decreasing lubricating oil consumption, development of lower vapor pressure and viscous lubricant, and engine operation of lower liner temperature conditions are important.

Key words: Oil Evaporation, Oil Consumption, Lubricant, Viscosity, Vapor Pressure, SI Engine

1. まえがき

エンジンから排出されるガス成分にオイルに起因する成分の割合が多くなってきている。これは摩擦損失の対策として採用された、リングの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オイルに起因することが指摘されている。これらの対策は省エネルギーとして有効であるが、オイル消費量(OC)、ブローバイガスの増大を招き、大気環境への影響など、二次的な問題が発生している。

OCのメカニズムに関する研究は従来から多くの研究⁽¹⁻⁹⁾が報告されている。そのうちオイル上がりしたオイルが燃焼室壁面に付着して燃焼ガス等に接し、蒸発するオイル消費に関しても、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解明されていない。最近では排気ガス成分の詳細な測定が行われ、オイルの成分との関係⁽¹⁰⁾が明らかになりつつある。

一方著者は、これまでに開発した熱流体潤滑理論モデルを用いたオイル膜温度算出法⁽¹¹⁻¹²⁾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オイル膜が蒸発することを予測できるモデルを構築した⁽¹³⁾。そのモデルを用いて、オイル蒸発に影響を与えるライナ壁温度、オイル膜厚さ、運転条件(回転数、負荷)、燃焼室内熱伝達率について明らかにしてきた⁽¹³⁻¹⁵⁾。また、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⁽¹⁶⁾。さらに、シリンダ変形に伴うシリンダ周方向のオイル膜厚さの分布、及びライナ温度分布を考慮した解析を行い、高速、高負荷条件でのオイル蒸発の予

*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

想が可能になった⁽¹⁷⁾。オイル粘度グレードや飽和蒸気圧の影響についても、ライナ温度、オイル膜厚さ一定の条件のもとでの解析を行い、オイル蒸発はオイル粘度グレードが低粘度化するほど、飽和蒸気圧が上昇するため蒸発量は増加することを明らかにした⁽¹⁴⁾が、より実機条件（ライナ温度、オイル膜厚さ）を考慮した解析が必要となっている。

本研究は、オイル消費量に及ぼすエンジンシリンダ壁面に付着したオイル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ている。本報では、オイル蒸発の予測モデルで重要な因子である、オイル性状（蒸気圧、粘度）に注目し、実機運転条件での解析を行いその影響について検討した結果を述べる。

2. オイル膜蒸発量の解析

ピストンの下降に伴いライナ表面に付着したオイルの蒸発モデル⁽¹⁵⁾を図1に示す。本解析では、より精度の高いオイル消費の予測を可能にするため、次のような仮定を設けた。

- (1) 対象とするオイルは単一成分として取り扱い、オイル中の添加剤は無視する。
- (2) ライナ表面上のオイル内の熱移動はライナ面垂直方向のみとする。
- (3) ライナ表面温度はサイクル中一定とする。

ライナ壁面に付着したオイル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 ：オイル膜蒸発熱流束、 q_3 ：オイル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オイル温度 T は、燃焼ガスからオイル膜、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を用いて解析する。燃焼ガスから対流によりオイルに流入する熱流束 q_1 は式(2)に示すように、燃焼室内のガス温度 T_g とオイル膜表面温度 $T_{x=x_0}$ との温度差と燃焼室内熱伝達率 h_g の積で求められる。

$$q_1 = h_g (T_g - T_{x=x_0}) \quad (2)$$

また、オイル表面から蒸発する熱流束 q_2 は式(3)に示す蒸発熱 Lv とオイルの蒸発速度 dm/dt の積から算出される。

$$q_2 = Lv \, dm/dt \quad (3)$$

蒸発熱 Lv はオイル表面温度やオイルの臨界温度の関数で表される。蒸発速度 dm/dt は燃焼室内を乱流場とし、燃焼室内のオイル成分の質量分率を $Y_\infty = 0$ と仮定すると、 dm/dt は式(4)で示される。

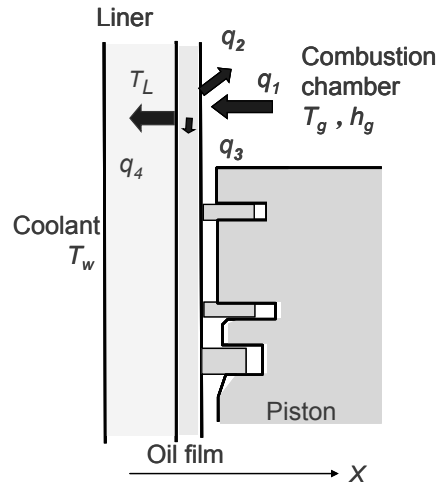


Figure 1 Evaporation model of oil film on the liner wall

$$dm/dt = \frac{h_g}{C_p} \ln \left(1 - \frac{Y_s}{Y_s - 1} \right) \quad (4)$$

また、式(4)中の質量分率 Y_s は式(5)で算出する。

$$Y_s = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{P_g}{P_{ls}} \right) \frac{W_{gas}}{W_{ls}}} \quad (5)$$

ここで、 h_g ：熱伝達率、 C_p ：雰囲気ガスの比熱、 Y_s ：オイル表面における質量分率、 P_g ：雰囲気圧力、 P_{ls} ：オイルの飽和蒸気圧、 W_{gas} ：雰囲気ガスの分子量、 W_{ls} ：オイルの分子量である。

本報では、オイル粘度グレードSAE 30、とSAE 10W30を用いた。さらに、オイルの飽和蒸気圧が異なるパラフィン系炭化水素 $C_{20}H_{42}$ 、 $C_{24}H_{50}$ 、 $C_{27}H_{56}$ 、 $C_{30}H_{62}$ も比較のため解析を行った。これらのオイルの飽和蒸気圧と温度の関係を図2に示す。これらの飽和蒸気圧は温度の上昇に伴い指数関数的に増加する。オイルSAE 30とSAE 10W30では、その飽和蒸気圧は低粘度オイルであるSAE10W30のオイルが約20倍高い値である。また、パラフィン系炭化水素は炭素数が増すに従い低下し、炭素数20と30では、100℃で1/3,000倍、200℃で1/100倍と炭素数30の蒸気圧が低い値である。

解析の対象とする火花点火エンジンは4気筒(内径×行程=89×80.3 mm)⁽¹⁶⁾である。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(図3)⁽¹⁷⁾を採用した。また、燃焼ガスからのオイル表面への熱伝達量 q_l はWoschniが提案している熱伝達率式を用いて算出した。

計算は吸入開始時にオイル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。計算条件は、条件1としてライナ温度TL 2のもとオイルの蒸気圧を変化させた場合、条件2としてライナ温度TL 1, TL 2, TL 3, TL 4のもと、オイルの粘度を変化させた場合について解析した。なお、オイル膜厚さはTHLモデルで算出した値を用いた。

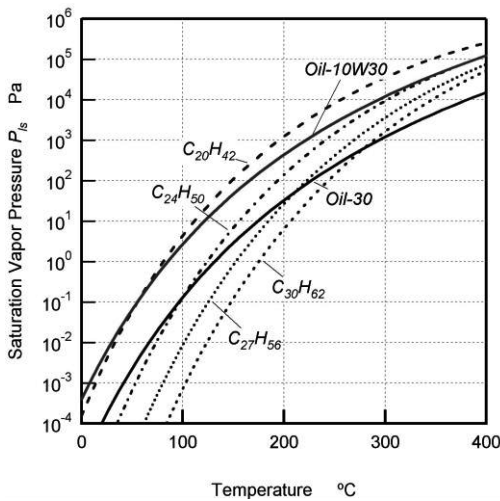


Figure 2 Relationship between saturation vapor pressure P_{ls} and temperature

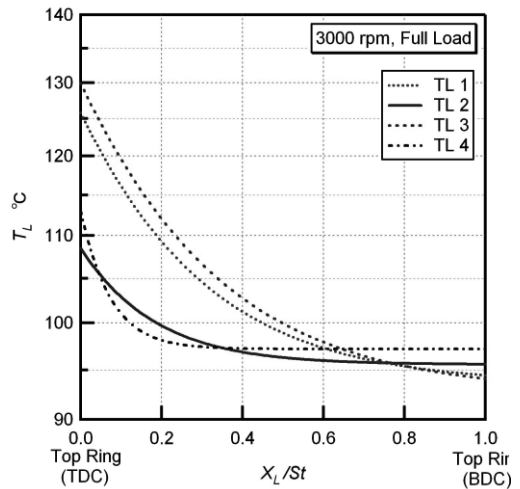


Figure 3 Liner temperature distribution

3. 解析結果と考察

3.1 飽和蒸気圧の影響(条件1)

オイルの蒸発速度は式(4), (5)に示すように, 熱伝達率, 比熱, 雰囲気圧力, オイルの飽和蒸気圧, 雰囲気ガスの分子量, オイルの分子量の関数である. 文献(14)ではオイル膜厚さ, ライナ温度がサイクル中一定のもとにそれらの影響を検討している. ここでは, 測定した燃焼圧力, ライナ温度, 解析されたライナ壁面に付着したオイルの厚さをもとにオイル飽和蒸気圧がオイル蒸発速度, オイル蒸発量に及ぼす影響を求めた.

図4は, トップリングが上死点位置に相当する $Xp=X_L/St=0.002$ における蒸発速度 dm/dt のサイクル変化を示す. 各オイルとも吸気行程 (CA=-360deg ~ -180deg) では, dm/dt はほぼ一定であり, 圧縮行程 (CA=-180deg ~ 0deg) では, クランク角が進むに従い低下する傾向を示す. 膨張行程 (CA=0deg ~ 180deg) では, dm/dt は燃焼時に一時上昇するが, さらに低下する. 排気行程では (CA=180deg ~ 360deg) では, dm/dt は上昇し, 行程中ほぼ一定である. これらの値は飽和蒸気圧が低下するに従い, 減少する方向にシフトする. オイル SAE 30 と SAE 10W30 では, 低粘度オイル SAE10W30 の方が蒸発速度は各行程とも約15倍高く, オイル蒸発量が増大している. また, パラフィン系炭化水素では, 炭素数20と30では, 約2,000倍と炭素数20の蒸発量が大きい.

図5はリング摺動方向の各位置における蒸発速度に円周方向の表面積を乗じて得られたクランク角に対するオイル蒸発量を示す. 各オイルのこれらの蒸発量の変化は, ライナ表面積が燃焼室ガスに接する面積に対応するように変化し, その蒸発量は吸気行程, 排気行程, 圧縮行程, 膨張行程と順に低下する. 図6はそれらのサイクル総量と飽和蒸気圧の関係を示す. 図中には4000rpm, 全負荷の値⁽¹⁴⁾も併記している. 全オイル蒸発量は飽和蒸気圧の増加とともに指数関数的に増加している. また, 4000rpmにおける蒸発量も同様な傾向を示しているが, 3000rpmにおける値の約1.3倍高い値である.

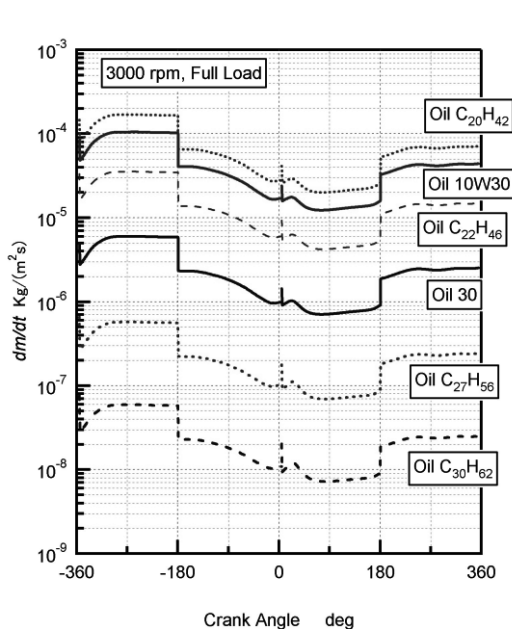


Figure 4 Mass flux of oil evaporation

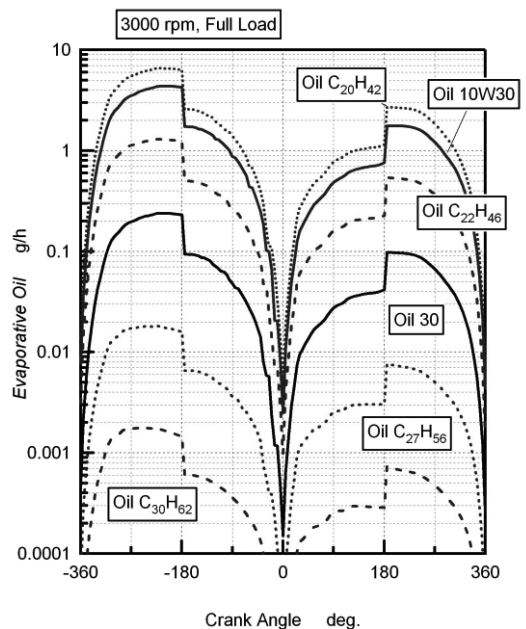


Figure 5 Evaporative oil

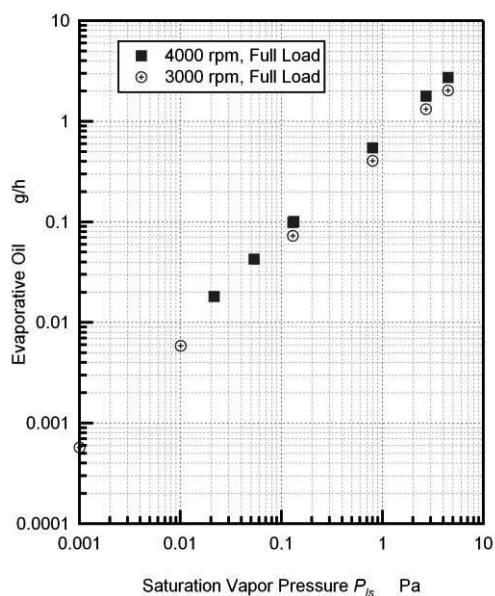


Figure 6 Relationship between evaporative oil and saturation vapor pressure

3.2 ライナ温度とオイル厚さの影響(条件2)

次に各ライナ円周方向の温度分布とオイル膜厚さ分布を考慮し、ライナ温度、オイル膜厚さの組み合わせでオイル蒸発量に与える影響について検討した。オイル蒸発に直接的に影響を与えるオイル表面温度のサイクル変化を図7に示す。図は各円周方向(フロント側, スラスト側, リア側, 反スラスト側)のトップリングの上死点位置に相当する $Xp=0.002$ の値である。オイル表面温度は円周方向の位置によりその絶対値は異なるが、吸入行程では、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。圧縮行程後半からオイル表面温度は上昇を開始し、これらの温度はオイル膜厚さの影響を受け、その最大値はライナ位置により異なる。オイル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。

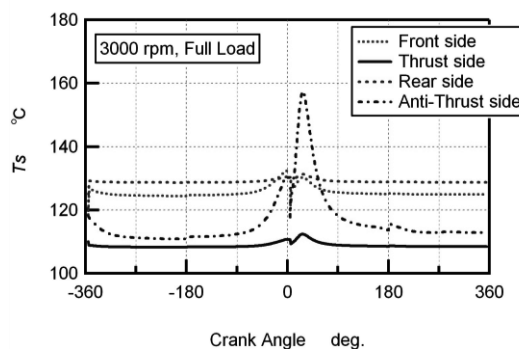
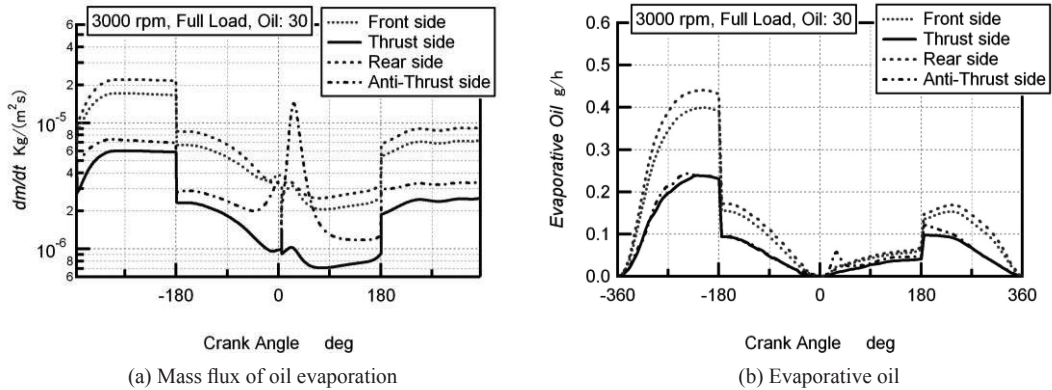


Figure 7 Oil surface temperature (Oil SAE 30)

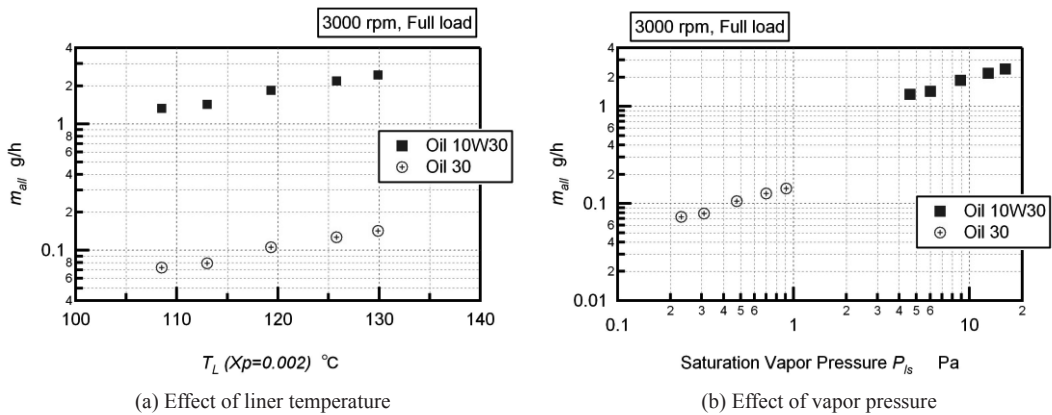
図8(a)に周方向各面のトップリングが上死点位置に相当する $Xp=0.002$ における1サイクル中のオイル蒸発速度を示す。吸入、圧縮行程ではライナ温度、オイル膜厚さが異なるが、オイル蒸発速度はほぼ等しく同様な変化を示す。これらの値は圧縮上死点直前付近から、燃焼による温度上昇の影響を受け急激に上昇するがそれぞれの位置では異なる変化を示す。上死点後の極大値を比較すると、反スラスト側の値が高く、リア、フロント、スラスト側の順に低くなる。膨張行程後半から排気行程中の各位置のオイル蒸発速度はリア、フロント、反スラスト、スラスト側の順に低くなるが、同様な変化を示す。上死点直後のオイル蒸発速度はオイル膜厚さが厚い反スラスト側が高く、オイル表面温度が高



(a) Mass flux of oil evaporation

(b) Evaporative oil

Figure 8 Mass flux of oil evaporation and Evaporative oil (Oil : SAE 30, XL/St = 0.002)



(a) Effect of liner temperature

(b) Effect of vapor pressure

Figure 9 Effect of liner temperature and vapor pressure on evaporative oil

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オイル表面温度の高低に対応して順に低下する。

図8(b)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サイクル中のオイル蒸発量を示す。フロント、リア側のオイル蒸発量がスラスト、反スラスト側に比べ約1.8倍大きいことがわかる。この要因としてオイル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考えられる。

図9(a)はオイル蒸発量の総量 m とトップリングの上死点位置におけるライナ温度 T_L との関係を示す。図には、粘度グレードの異なるSAE30とSAE10W30を併せて示している。ライナ温度の上昇に伴い、オイル蒸発量は増加する。オイルSAE30の場合、スラスト側のライナ温度 108.5°C で蒸発量は $0.0731\text{g}/\text{h}$ であるが、リア側のライナ温度 129.9°C では蒸発量は $0.143\text{g}/\text{h}$ となり、約2.0倍増加する。粘度グレードを比較すると、低粘度オイルであるSAE10W30を用いた場合、ライナ温度 108.5°C では蒸発量が約18.2倍、ライナ温度 129.9°C では、17.1倍大きい。これら粘度グレードによる蒸発量の傾向は文献(8)と同様である。さらに局所の蒸発量とオイルの飽和蒸気圧との関係(図9(b))を見ると、オイルSAE30及びSAE10W30とも飽和蒸気圧の増加に伴い蒸発量は増加する傾向を示す。

4. まとめ

本研究は、オイル消費量に及ぼすオイル性状(蒸気圧, 粘度)に注目し、そ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) 運転条件(3000rpm, 全負荷)一定の条件で、オイルの飽和蒸気圧を変化させたところ、オイル全蒸発量は飽和蒸気圧の増加とともに指数関数的に増加する。
- (2) ライナ温度とオイル膜厚さを組み合わせてオイル蒸発量を算出したところ、オイルの粘度グレードに関係なく、ライナ温度が20℃上昇すると蒸発量は約2倍増加する。また、オイルSAE10W30を用いると蒸発量はオイルSAE30の約18倍に増加する。
- (3) 低粘度マルチグレードオイルの使用は飽和蒸気圧が高いためオイル蒸発量が増大することを解析より明らかにした。このためオイル消費量低減のためには、低粘度で蒸気圧の低い性状のオイルを開発するとともに、エンジン側ではライナ表面温度をより低い状態に保つことが重要である。

参考文献

- (1) 川本淳一, 山本匡吾, 伊藤明生, 花岡正紀, 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, pp.705-712 (1977)
- (2) Petris, C.D., Giglio, V., Police, G., 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, H.M., Priebson, H.H., Simulation of Piston Ring Dynamics and Their Effect on Oil Consumption, SAE Paper No. 2000-01-0919, pp.862-873 (2000)
- (4) 稲垣英人, 許斐敏明, 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, 吉田秀樹, 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, 白川晴久, 中村正明, 吉田和義, 秋山九, 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., Smith, E.H., Sherrington, I., Wakuri, Y., A Review of Solutions for the Mechanism of Oil Consumption in Internal Combustion Engines, SAE Fuel and Lubrication Meeting, JSAE 2007716, SAE 2007-01-1973, pp. 1610-1617 (2007)
- (9) 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, pp. 23-28 (2010)
- (10) Krause, S., Massenspektrometrisches Verfahren zur Charakterisierung der Ölverdampfung im Brennraum von Ottomotoren, Technische Universität Hamburg-Harburg, (2009)
- (11) Shimada, A., Harigaya, Y., Suzuki, M., Takiguchi, M., 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)
- (12) 針谷安男, 石島隆志, 嶋田彰子, 戸田富士夫, 鈴木道義, ピストンリング部における潤滑特性の解析 – すべり面形状の影響 –, 宇都宮大学教育学部紀要, Vol. 57-2, pp. 55-63 (2007)
- (13) 針谷安男, 古平真一郎, 鈴木道義, エンジン燃焼室壁面における潤滑油蒸発量の予測 – 油膜温度

- とライナ壁温度の影響－，宇都宮大学教育学部紀要， Vol. 58-2, pp. 31-40 (2008)
- (14) 針谷安男，鈴木道義，山菅和良，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)
- (15) 針谷安男，糀谷隆雄，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－燃焼室内熱伝達率の影響－，宇都宮大学教育学部紀要， Vol. 61-2, pp. 29-35 (2011)
- (16) 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変形とオイル消費の関係，自動車技術会論文集， Vol. 40, No.5, pp. 1217-1222 (2009)
- (17) 針谷安男，山菅和良，糀谷隆雄，飯島直樹，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－，宇都宮大学教育学部紀要， Vol. 60-2, pp. 35-42 (2010)