

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 —

針 谷 安 男
糀 谷 隆 雄

宇都宮大学教育学部紀要
第61号 第2部 別刷
平成23年(2011)3月

Study on Lubricating Oil Evaporation on Cylinder Liner
Wall of an Engine: Effect of Heat Transfer Coefficient
in Combustion Chamber

HARIGAYA Yasuo, KOUJIYA Takao

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 －

Study on Lubricating Oil Evaporation on Cylinder Liner Wall of an Engine:
Effect of Heat Transfer Coefficient in Combustion Chamber

針谷 安男*¹, 糀谷 隆雄*²
HARIGAYA Yasuo, KOUJIYA Takao

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 effect of the heat transfer coefficient in combustion chamber on oil evaporation by using the developed evaporation model was examined. Results are as follows. The evaporative oil was affected by the heat transfer coefficient in combustion chamber. These values increase with increase of heat transfer coefficient. Specially, during the expansion stroke, as the surface temperature of oil adhered to the liner rises with the increase of heat transfer, the evaporative oil increases.

Key words: Oil Evaporation, Oil Consumption, Liner, Heat Transfer Coefficient, SI Engine

1. まえがき

地球環境・エネルギーの有効利用に関して、その対策は緊急の課題である。動力源としてのエンジンにおいては、その解決策が種々採られてきている。その一つである摩擦損失の低減手法は、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潤滑油の使用である。その結果、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、環境への影響が懸念され、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。特にエンジンオイル消費量の低減は、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。さらに排気後処理装置を用いて燃焼により生成した粒子状物質の低減を図っているが、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⁽¹⁻⁹⁾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、蒸発するオイル消費に関して、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、熱流体潤滑理論モデルを構築⁽¹⁰⁻¹¹⁾した。さらに、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^{(12), (13)}。また、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

*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

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消費の予想が可能になった⁽¹⁴⁾。

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、本報では、オイル蒸発の予測モデルで重要な因子である、燃焼室内熱伝達率に注目し、そ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

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⁽¹⁴⁾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オイル温度 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。

$$x = X_0 \quad -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} = q_1 - q_2 \quad (3)$$

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

燃焼ガスから対流によりオイルに流入する熱流束 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 $T_{x=X_0}$ との温度差と燃焼室内熱伝達率 h_g の積で求められる。

$$q_1 = h_g (T_g - T_{x=X_0}) \quad (5)$$

また、オイル表面から蒸発する熱流束 q_2 は式(6)に示す蒸発熱 Lv とオイルの蒸発速度 dm/dt の積から算出する。

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

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オイルを対象とすると、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オイル成分の質量分率を $Y_\infty = 0$ と仮定すると、蒸発速度 dm/dt は

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

$$Y_s = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{p_g}{p_{ls}} \right) \frac{W_{gas}}{W_{ls}}} \quad (8)$$

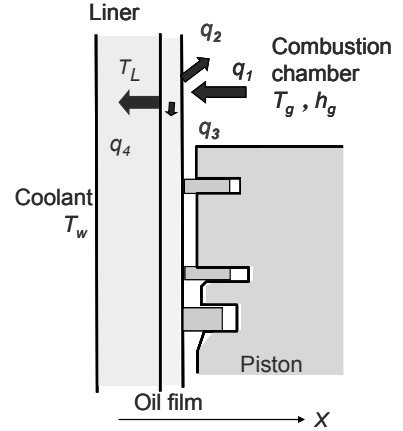


Fig. 1 Evaporation model of oil film on the liner wall

となる。ここで、 h_g :熱伝達率、 C_p :雰囲気ガスの比熱、 Y_s :界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、火花点火エンジン（内径×行程=89×80.3 mm）⁽¹³⁾を対象に、オイル粘度グレード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。

蒸発に関する物性値は文献⁽²⁾⁽⁸⁾⁽¹⁵⁾を参考にした。蒸発速度に影響を与える雰囲気ガスの比熱 C_p は式(9)、(10)を用いて算出し、その温度と比熱の関係を図2に示す。

$$C_p = (3.653 - 1.337e-3 \times T_g + 3.294e-6 \times T_g^2 - 1.911e-9 \times T_g^3 + 0.275e-12 \times T_g^4) * R_g \quad 300 \text{ K} < T_g < 1000 \text{ K} \quad (9)$$

$$C_p = (3.044 + 1.338e-3 \times T_g - 0.488e-6 \times T_g^2 + 0.085e-9 \times T_g^3 - 0.0057e-12 \times T_g^4) * R_g \quad 1000 \text{ K} < T_g < 3000 \text{ K} \quad (10)$$

比熱は雰囲気ガス温度 T_g が300Kで約1000 J/(kg K)、1000Kで約1150 J/(kg K)、2000Kで1250 J/(kg K)と温度の上昇に伴い増加する傾向を示す。エンジン燃焼室内は吸入行程では、室温に近い温度であり、燃焼時には2500 Kにまで上昇する。このためサイクル中変化する比熱変化もオイルの蒸発速度に大きく影響を与えることが予想される。

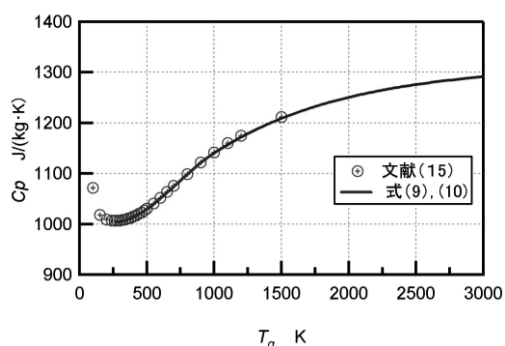


Fig 2 Relationship between specific heat and temperature

3. 解析結果と考察

3.1 蒸発速度に及ぼす飽和蒸気圧の影響

オイルの蒸発速度は式(7)、(8)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り、オイル蒸発速度を算出する式の中の変数との関係も調べておく必要がある。図3は飽和蒸気圧をパラメータにした蒸発速度と雰囲気圧力($h_g/C_p = 2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)との関係を示し、雰囲気圧力が増すに従い、蒸発速度は低下傾向を示す。また、オイルの飽和蒸気圧が上昇すると、すなわち、オイルの温度が上昇すると蒸発速度は増加することがわかる。

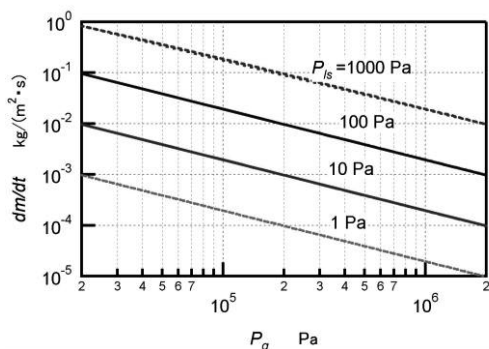


Fig 3 Relationship between dm/dt and P_g (Effect of P_{ls})

3.2 蒸発速度のサイクル変化

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、燃焼室内の熱伝達率はサイクル中大きく変化することが指摘されている。その結果、熱伝達率の推定方法によりオイル蒸発量の予測に影響が生じることが予想される。

まず、オイル蒸発速度に関する燃焼室圧力、燃焼室内ガス温度、熱伝達率、燃焼室ガス比熱のサ

イクル変化を求め、それらを図4～7に示す。燃焼室圧力は測定値を用い、燃焼室ガス温度は状態方程式から算出した。熱伝達率はWoschniが提案した式(11)を用いて算出した。

$$h_g = 0.456 D_i^{(-0.2)} P_g^{0.8} W^{0.8} T_g^{(-0.53)} \quad (11)$$

ここで W は燃焼室内ガス流動の効果を示し、 C_m は平均ピストン速度、 V_S は行程容積を示す。

サイクル中、燃焼室圧力は0.1から4.5 MPaと、ガス温度は100から2500℃と変化する。熱伝達率は100から1600 W/(m²·K)と、比熱は1000から1300 W/(kg·m²·K)と変化する。また、熱伝達率と比熱の比 hg/C_p は図8に示すよう吸入行程では0.1～0.15 kg/(m²·s)、圧縮行程では0.1～0.7 kg/(m²·s)、膨張行程では0.2～1.6 kg/(m²·s)、排気行程では0.1～0.3 kg/(m²·s)と変化する。このように、オイルの蒸発に関係する諸因子はサイクル中変化する。これらをすべて考慮してオイル蒸発を予測する必要がある。

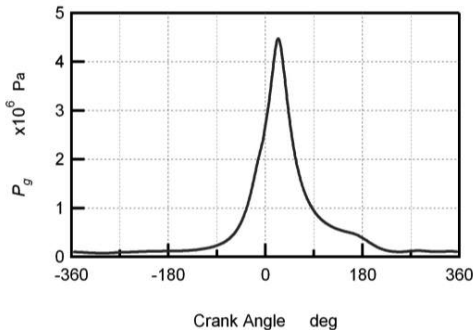


Fig. 4 Pressure in combustion chamber

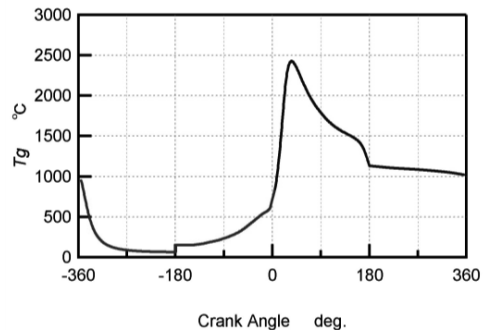


Fig. 5 Gas temperature in combustion chamber

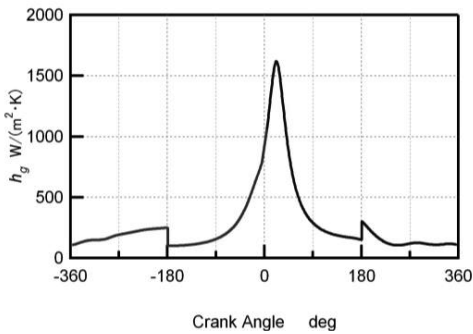


Fig. 6 Heat Transfer coefficient

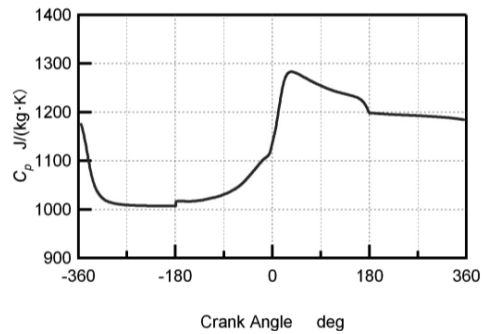


Fig. 7 Specific heat

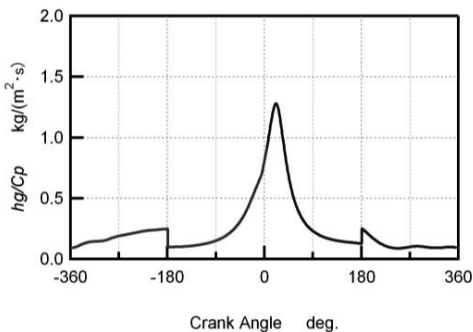


Fig. 8 hg/C_p

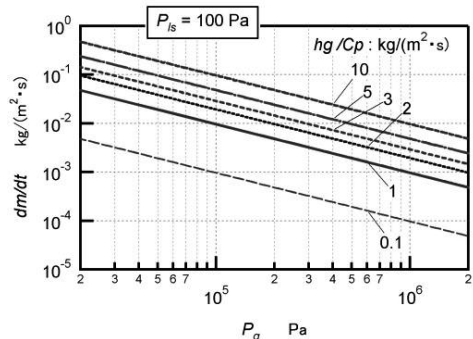


Fig. 9 Relationship between dm/dt and P_g (Effect of hg/C_p)

ここでは、これらの値を参考に、熱伝達率と比熱との比 hg/Cp をパラメータにした蒸発速度と燃焼室圧力(雰囲気圧力)との関係を図9に示す。オイルの飽和蒸気圧 $P_s = 100 \text{ Pa}$ はオイル $10W30$ の場合、油温 120°C 相当する。雰囲気圧力が増すに従い、蒸発速度は低下傾向を示す。また、 hg/Cp が上昇すると蒸発速度は増加することがわかる。なお、ここでは熱伝達率の変化に対して油膜温度が変化することは考慮していない。このことについては、3.2節で検討する。

3.2 蒸発に及ぼす熱伝達率の影響

燃焼室内熱伝達率は図6に示すようにサイクル中大きく変化する。また、その値も提案している式により異なることが知られている。ここではWoschniの式の係数を変えることでその影響を調べた。すなわち、式(11)の係数に0.5, 1, 2, 3倍とすることでその影響を調べた。計算条件は3000rpm, 全負荷である。その結果図10に示すように、熱伝達率は50から5000 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ と変化する。オイル表面温度(図11)は熱伝達率が増すに従い、大きく変化する。特に圧縮行程後半から膨張行程前半において、熱伝達率の増加に従い表面温度が 111°C から 121°C と上昇する。

図12に熱伝達率の変化が蒸発速度への影響を示したものである。サイクル中変化する蒸発速度はこれまでの傾向と同様であり、吸入行程はほぼ一定で、圧縮行程はクランク角が進むに従い減少傾向を示す。燃焼時に蒸発速度は若干上昇するが、膨張行程後半では低い値である。排気行程では、膨張行程後半の値より上昇するが、吸入行程中の値の約50%でほぼ一定である。熱伝達率の係数が0.5, 1, 2, 3と増すにすると従い、蒸発速度が全体的に上昇する方向にシフトする。圧縮行程後半から膨張行程前半の期間に表面温度変化が上昇する影響は、膨張行程初期にわずかに見られるだけで、サイクル中全体への影響は少ないことがわかる。

以上のように、燃焼室内熱伝達率がオイル蒸発速度への影響を調べ、熱伝達率の値はサイクル全般に影響を与えることがわかった。また、熱伝達率の変化は燃焼時にオイル表面温度への影響を与えるが、オイル表面温度変化が見られる期間は全行程に比べると1/10の期間であり、オイル表面温度変化は今回の条件では約 10°C であるため、オイル蒸発量への影響は少なくなる。

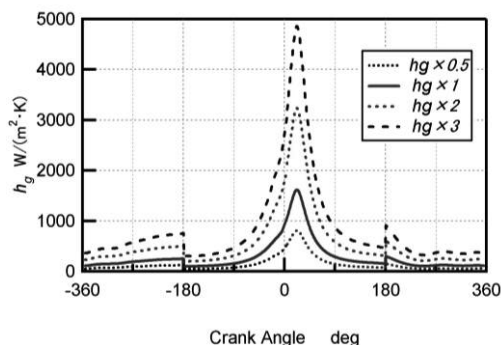


Fig. 10 Heat transfer coefficient

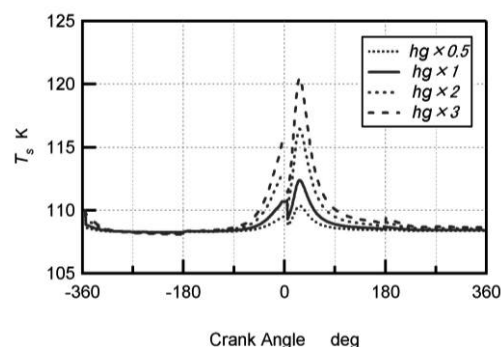


Fig. 11 Oil surface temperature

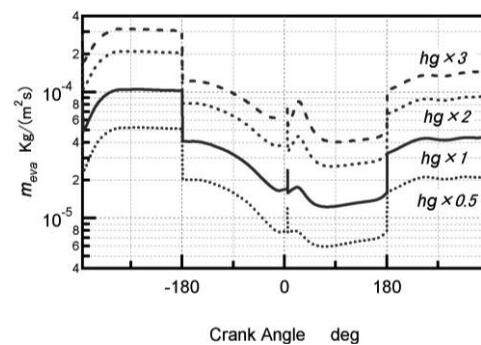


Fig. 12 Mass flux of oil evaporation

4. まとめ

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、オイル蒸発の予測モデルで重要な因子である、燃焼室内熱伝達率に注目し、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) 熱伝達率と比熱との比 hg/Cp をパラメータにした蒸発速度と雰囲気圧力 ($P_b = 100 \text{ Pa}$, オイル $10W30$ の場合, 油温 120°C 相当) との関係は、雰囲気圧力が増すに従い、蒸発速度は低下傾向を示す。また、 hg/Cp が上昇すると蒸発速度は増加する。
- (2) 燃焼室内熱伝達率はサイクル中大きく変化し、オイル蒸発速度に大きく影響を与える。
- (3) 燃焼室内熱伝達率の係数を変化させ、オイル蒸発速度への影響を調べたところ、圧縮行程後半から膨張行程前半ではオイル表面温度への影響が見られ、蒸発速度も影響を受ける。熱伝達率の係数変更の影響はサイクル全体への影響が大きく、燃焼時の蒸発速度の変化はわずかである。
- (4) 雰囲気圧力が増すに従い、蒸発速度は低下傾向を示す。また、オイルの飽和蒸気圧が上昇すると、すなわち、オイルの温度が上昇すると蒸発速度は増加することがわかる。

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) 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)
- (11) 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)

- (12) 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)
- (13) 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)
- (14) 針谷安男, 山菅和良, 梶谷隆雄, 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)
- (15) 片山功蔵, ほか, 伝熱工学資料改訂第4版, 日本機械学会, 丸善 (1986)