

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－

Estimation of Evaporative Oil on Combustion Chamber Wall of an IC Engine:
Effects of Oil Film Thickness and Liner Wall Temperature

針谷 安男*¹・古平 真一郎*²・鈴木 道義*¹
HARIGAYA Yasuo, KODAIRA Shinichiro, and SUZUKI Michiyoshi

For solution of energy and environment, the reduction of lubrication oil consumption (LOC) and friction work at ring of internal combustion engines is very important. In this paper, effects of oil film thickness and liner temperature on lubrication oil consumption were estimated by using an unsteady and one-dimensional thermal conduction equation. The results are as follows: The evaporation oil was affected by thermal property of lubrication oil, in specially the saturated vapor pressure as a function of temperature. The evaporation oil on the liner wall changes more greatly during the combustion and expansion strokes. The evaporated oil per one cycle increases with increasing oil film thickness and with higher liner temperature.

1. まえがき

エンジンの省エネルギー・環境対策のための摩擦損失の低減方策は、リング本数の低減、薄幅化など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を用いる傾向にある。その結果、ブローバイガス、潤滑油消費量の増大や焼付き等の問題が生じ、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の消費（LOC）は排気中の粒子状物質低減に関して必要とされてきているが、さらに粒子状物質低減に使用される排気後処理装置の装着に伴い、それらの性能維持の目的でより一層のLOC低減要求が高まっている。

LOCのメカニズムに関する研究は従来から多くの研究⁽¹⁻¹⁰⁾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、蒸発による潤滑油消費に関して、実験及び解析の両面から研究が文献（1-3,5,8,10）に見られる。

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、油膜の粘性発熱、

*1 宇都宮大学教育学部技術教育教室 *2 宇都宮大学大学院教育学研究科

リング及びライナ温度を考慮した熱流体潤滑理論モデルを用いて、リング部における油膜厚さ、油膜温度を算出するとともにリング・ライナ間の熱移動について報告⁽¹¹⁻¹³⁾した。

文献(14)ではライナ面に付着した油膜のサイクル変化する温度を検討した。油膜がライナ表面に付着した場合、その膜厚が増すに従い表面温度変化は大きくなり、最高温度は上昇する。このため、オイル上がり量が多く、ライナ壁に付着した油膜厚さが厚くなるほど潤滑油の蒸発量が増加すると予想された。

本報では、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、潤滑油蒸発量の予測モデルの構築とそれを用いたライナ表面に付着した潤滑油膜の蒸発量に及ぼす油膜厚さ、壁面温度の影響について述べる。

2. 油膜温度と蒸発量の解析

2.1 ライナ表面に付着した油膜温度と蒸発量

ライナ表面に付着した油膜の蒸発モデルを図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 ：燃焼ガスからの対流及びふく射による熱伝達量、 Q_2 ：油膜蒸発熱量、 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量、である。これまでの油膜温度解析では蒸発熱量 Q_2 を考慮していないが、今回はこの油膜の蒸発 Q_2 を考慮する。

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。

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

油膜表面における温度境界条件は油膜表面のエネルギーバランスから式(3)、(4)のように置く。

$$x = X_o \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = Q_1 - Q_2 \quad (3)$$

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

油膜からの蒸発熱量 Q_2 は式(5)に示す蒸発熱 L_v と油膜の蒸発速度 dm/dt の積から算出⁽²⁾する。

$$Q_2 = L_v \frac{dm}{dt} \quad (5)$$

また、蒸発熱 L_v は式(6)から求める。

$$L_v = \Delta h_{ev} \left[\left(1 - \frac{T_{ls}}{T_c} \right) / \left(1 - \frac{T_{bs}}{T_c} \right) \right]^{0.38} \quad (6)$$

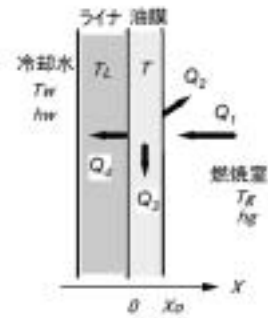


図1 蒸発モデル

ここで、 Δh_{ev} は沸点 T_{bs} における蒸発熱、 T_c は臨界温度でありそれぞれ式 (7)、(8) で求める。

$$\Delta h_{ev} = 72089.23335 - 1477.68785 T_{bs} + 1.09651 T_{bs}^2 \quad (7)$$

$$T_c = 26.7597 + 1.66105 T_{bs} - 0.00075 T_{bs}^2 \quad (8)$$

次に、蒸発速度 dm/dt を式 (9) から算出する。

$$dm/dt = \rho_{mix} D \frac{\ln(1+B)}{\delta_c} \quad (9)$$

ここで、 B は質量伝達数であり、式 (10) で表す。

$$B = \frac{Y_s - Y_\infty}{1 - Y_s} \quad (10)$$

また、プラントル数 Pr 、シュミット数 Sc 、ルイス数 Le をそれぞれ式 (11, 12, 13) で定義する。

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_g}{\kappa_g} \quad (11)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (12)$$

$$Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{Sc}{Pr} \quad (13)$$

ここで、 α は温度伝導率であり、式 (14) で定義する。

$$\alpha = \frac{\kappa_g}{\rho_{mix} C_g} \quad (14)$$

である。

潤滑油蒸発量の予測は燃焼室内のライナ壁面上の潤滑油を対象とする。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るため、

$$Pr \cong Sc \cong Le \cong 1$$

が成立し、蒸発速度は再整理すると式 (9) から式 (15) に書き表すことができる。

$$dm/dt = \frac{h_g}{C_g} \frac{\delta_i}{\delta_c} \ln(1+B) \quad (15)$$

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

$$dm/dt = \frac{h_g}{C_g} \ln\left(1 - \frac{Y_s}{Y_s - 1}\right) \quad (16)$$

また、 Y_s は界面における質量分率で、式 (17) で求める。

$$Y_s = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{p_{mix}}{p_{ls}}\right) \frac{W_{gas}}{W_{ls}}} \quad (17)$$

ここで、 p_{max} は雰囲気圧力、 W_{gas} 雰囲気ガスの分子量、 W_{ls} 潤滑油膜の分子量である。また、 P_{ls} は飽和蒸気圧を示し、式 (18) で算出する。

$$P_{ls} = P_{ls0} \exp\left[\frac{\Delta h_{ev}}{Rv} \left(\frac{1}{T_{bs}} - \frac{1}{T_{ls}}\right)\right] \quad (18)$$

$$T_{bs} = 84.03933 + 3.77462 W_{ls} - 0.0113 W_{ls}^2 + 2.17932 \cdot 10^{-5} W_{ls}^3 - 1.903979 \cdot 10^{-8} W_{ls}^4 \quad (19)$$

なお、 P_{ls0} は圧力 p_0 における潤滑油の飽和蒸気圧、 T_{bs} は圧力 p_0 における潤滑油の沸点である。

2.2 潤滑油の熱的特性と蒸発速度

本解析には、潤滑油の熱的特性値が必要になる。蒸発速度は、界面の温度における飽和蒸気圧力、蒸発熱、混合気体の全圧など複雑に影響を受ける。まず、これらが蒸発速度に及ぼす影響について、文献(2)のパラフィン系炭化水素の熱的物性値を参考に検討した。

パラフィン系炭化水素 C_nH_{2n+2} の大気圧力における沸点 T_{bs} は式(19)により求め、炭素数に対するその値を図2に示す。これらの値は、文献(15, 16)に示されている値とほぼ一致している。鉱油系潤滑油の炭化水素炭素数はおおむね $C_{15} \sim C_{50}$ 、分子量は200~700であり、沸点は250~600℃となる。

また、パラフィン系炭化水素 C_nH_{2n+2} の蒸発熱 L_v は式(6),(7)を用いて算出する。得られた蒸発熱は図3に示すように100~300℃の範囲で、 $380 \times 10^3 \sim 250 \times 10^3 \text{ J/kg}$ と、パラフィン系炭化水素の温度が上昇するとともに低下し、その炭素数が増すに従い増加する。飽和蒸気圧 P_{ls} は式(18)で算出した。図4に示すように P_{ls} は界面温度100~300℃の範囲では、炭素数 $n=20$ で $10^1 \sim 10^5 \text{ Pa}$ 、 $n=30$ で $10^{-3} \sim 10^3 \text{ Pa}$ の範囲の値であり、界面温度及び炭素数により大きく変化する。

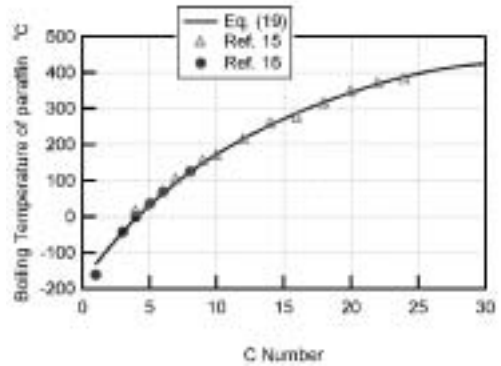


図2 パラフィン系炭化水素の沸点

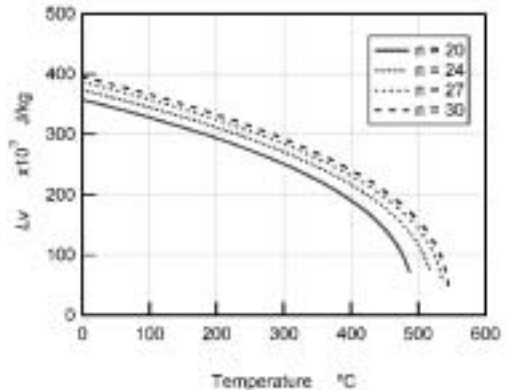


図3 パラフィン系炭化水素の蒸発熱

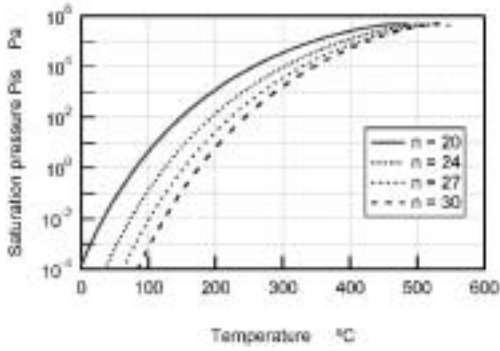


図4 パラフィン系炭化水素の飽和蒸気圧

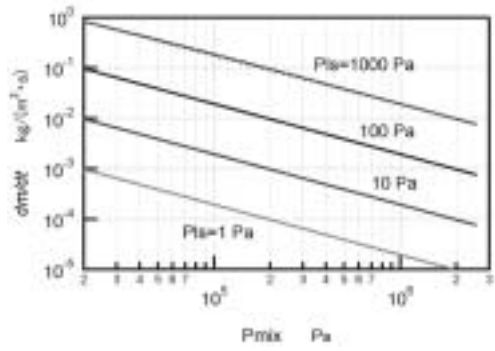


図5 潤滑油膜の蒸発速度 ($h_g/C_g=2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

これらの物性値をもとに、式 (16, 17) を用いて、混合気体の圧力 P_{mix} に対する油膜の蒸発速度 dm/dt を算出した結果を図5に示す。ここでは $h_g/C_g=2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の場合である。蒸発速度は混合気体の圧力上昇とともに減少し、また飽和蒸気圧が高くなると、すなわち油膜の温度が上昇すると増加する。

以上の結果、潤滑油膜の蒸発量を算出するためには、潤滑油の温度を正確に見積もることが重要になる。

3. 計算結果

3.1 ライナ表面に付着した油膜厚さと蒸発量の関係

本解析では、ディーゼルエンジン（内径×行程=110×125 mm）を対象に、回転数2400rpm, 1/4負荷の場合における、エンジンのシリンダライナ壁表面に付着した油膜がサイクル中変化する燃焼室圧力（図6）、ガス温度（図7）に接し、蒸発する場合について検討した。また、燃焼ガスからの油膜への熱伝達量 Q_f は熱伝達のみと仮定し、式 (20) で求める。

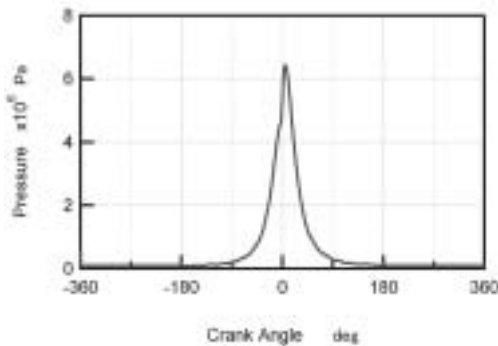


図6 燃焼室圧力

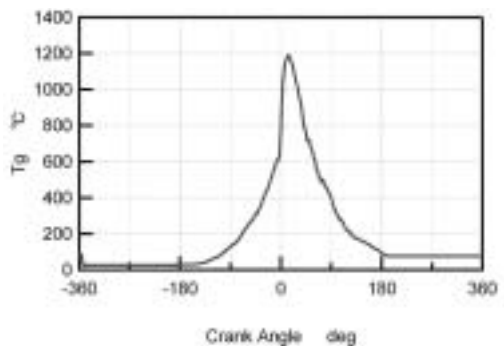


図7 燃焼室ガス温度

$$Q_1 = h_g (T_g - T) \quad (20)$$

燃焼室側熱伝達率 h_g はWoschniが提案した式 (21)を用いた.

$$h_g = 0.456 D_i^{(-0.2)} P_g^{0.8} W^{0.8} T_g^{(-0.53)} \quad (21)$$

ここで W は燃焼室内ガス流動の効果を示し

吸気行程

$$W = 2.28 \times 6.0 \times C_m$$

圧縮膨張行程

$$W = 2.28 \times 6.0 \times C_m + 0.00324 \times VS \times T_i / P_i / V_i * (P_g - P_o)$$

排気行程

$$W = 6.18 \times 6.0 \times C_m$$

で求め、得られた h_g を図8に示す。なお、 C_m は平均ピストン速度、 VS は行程容積を示す。

これらの燃焼室圧力、ガス温度、熱伝達率を用いて、潤滑油の蒸発量を算出した。ライナ表面に付着した油膜はパラフィン系炭化水素の単一成分として取り扱い、2.2で示した飽和蒸気圧、蒸発熱など物性値を用いた。また、燃焼室内の混合ガスは空気のみと仮定した。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。

蒸発を考慮した場合の油膜表面の温度変化 ($n=25$, $T_L=150^\circ\text{C}$) を図9に示す。表面温度は吸入、圧縮行程の前半まではほぼ一定の温度変化を示す。圧縮行程後半では、燃焼室圧力、ガス温度の上昇に伴い油膜表温度は上昇し、上死点直後に最高温度を示し、その後低下する。膨張行程後半から排気行程にかけて、油膜の表面温度はほぼ一定の温度変化である。

油膜厚さが増すと油膜表面温度は、吸入、排気行程では若干低くなるが、圧縮行程後半から、膨張行程前半にかけての温度変化は油膜厚さの増加とともに急激に上昇する。

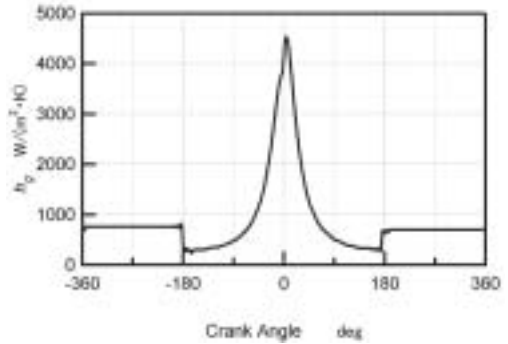


図8 燃焼室側熱伝達率

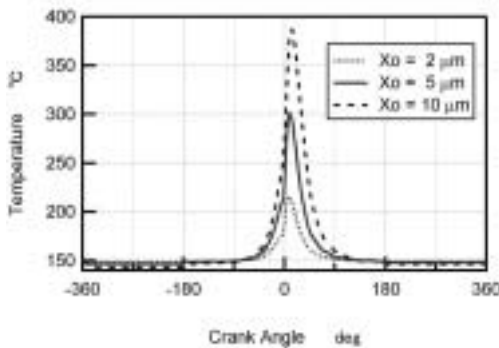


図9 油膜温度のサイクル変化

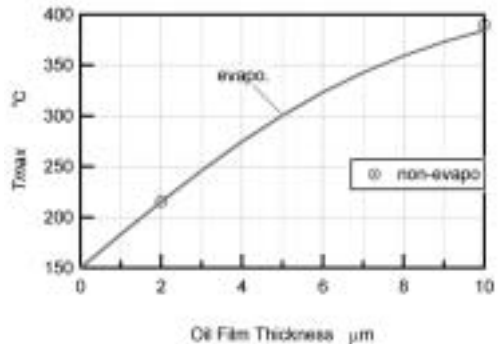


図10 油膜最高温度と油膜厚さの関係

油膜厚さと最高温度の関係は図10に示すように油膜厚さが増すと最高温度はほぼ一定の割合で上昇する。油膜の蒸発を無視した場合 ($Q_2 = 0$) の油膜最高温度と比較すると、油膜の蒸発熱による効果 (油膜厚さの減少) のため、蒸発を考慮した最高温度は若干低くなる。

油膜の蒸発熱はサイクル変化に伴い、図11に示すように変化し、油膜温度が上昇するに伴い低下し、最高温度で最小値を示している。油膜厚さが厚くなると、最高温度も高くなるため、蒸発熱は低下する。

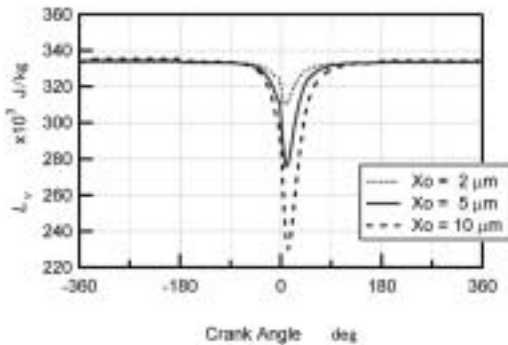


図 11 蒸発熱のサイクル変化

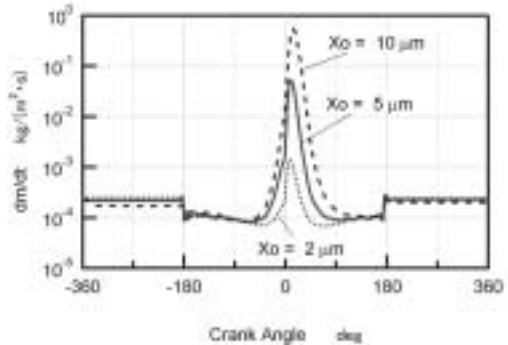


図 12 蒸発速度のサイクル変化

図12にサイクル中変化する蒸発速度 dm/dt を示す。蒸発速度は吸入行程中ほぼ一定値であり、圧縮行程では、油膜温度変化に加え、熱伝達率、燃焼室圧力の影響を受け、圧縮行程前半では減少傾向を示し上死点前では急激に上昇し、上死点直後に最大値を示す。その後、クランク角が進むに従い dm/dt は減少して極小値を示した後、膨張行程後半では若干増加傾向を示す。また、排気行程では油膜温度、熱伝達率、燃焼室圧力はほぼ一定であるため、蒸発速度もほぼ一定である。

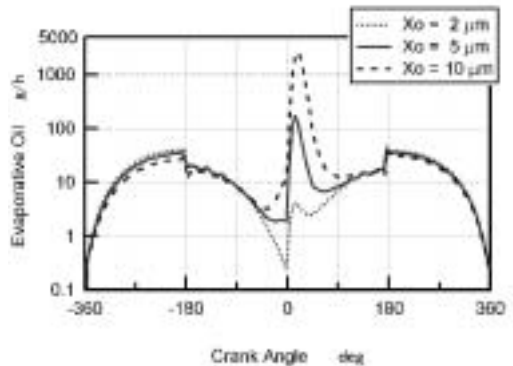


図 13 蒸発量のサイクル変化

油膜厚さが増すと、吸入、排気行程では油膜温度は低下するため蒸発速度は低くなるが、上死点前後では油膜温度の上昇に伴い蒸発速度は急激に増加する。蒸発速度の最大値は油膜厚さが $2\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ となると約40倍、 $10\mu\text{m}$ では約400倍増加する。

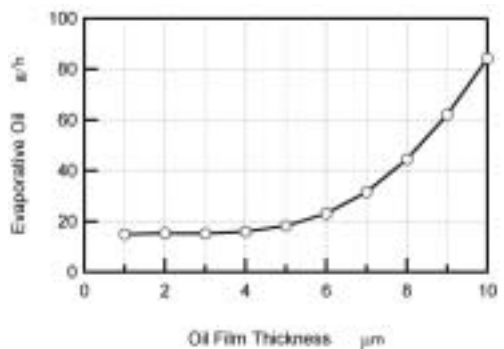


図 14 油膜厚さと油膜の蒸発量の関係

($n = 25$, $T_L = 150\text{ }^\circ\text{C}$)

1サイクル中の油膜蒸発量はこの蒸発速度に燃焼ガスに接するライナ壁の面積をもとに算出した。サイ

クル中変化する蒸発量は図13に示すように吸入・圧縮行程では燃焼ガスに接する表面積に比例するように変化する．燃焼が開始すると蒸発量は急激に増加する．油膜厚さの影響は燃焼時に見られ，油膜厚さが増すほど燃焼時の蒸発量が増加する．これらの蒸発量のサイクル変化から得られる1サイクル中の蒸発量の総和を図14に示す．油膜厚さが $1\sim 5\mu\text{m}$ では蒸発量はほぼ $14\sim 18\text{g/h}$ であるが，さらに油膜厚さが増すと急激に蒸発量が増加し，油膜厚さが $10\mu\text{m}$ では約 84g/h となる．この蒸発量は油膜の最高温度に対応し，油膜厚さが厚くなると油膜温度が上昇し油膜の最高温度が 300°C を超えると急激に増加している．なお，潤滑油蒸発量と油膜厚さとの関係は文献(8)の結果(潤滑油 $10\text{W-}30$ 相当)と比較すると，同様な傾向を示すが，本解析結果では1オーダー程度大きく，解析に必要な潤滑油の物性値を正確に把握することが必要である．

3.2 ライナ表面温度と蒸発量の関係

次に，パラフィン系炭化水素の炭素数 $n=25$ ，油膜厚さ $2\mu\text{m}$ の条件でライナ壁温の影響を見ると，図15に示すように油膜温度は同様なサイクル変化を示すが，壁温上昇に伴い温度変化幅は小さくなる．蒸発速度は図16に示すようにライナ壁温の上昇に伴いそのレベルが1~2オーダー上昇するが，吸入，排気行程中の蒸発速度はガス温度等の影響が減少する傾向にある．

蒸発速度に対するパラフィン系炭化水素の炭素数の影響については，図17(油膜厚さ $2\mu\text{m}$ ，ライナ壁温 $T_L=150^\circ\text{C}$)に示すように，炭素数が増すに従い蒸発速度は低下し，サイクル中に占める燃焼

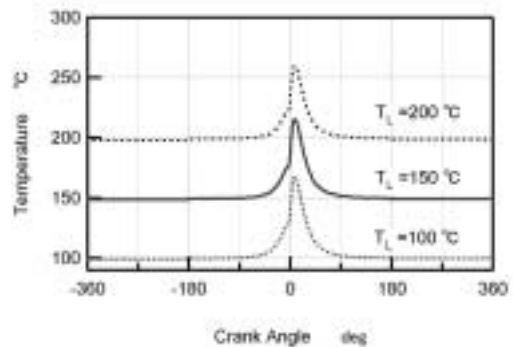


図15 油膜温度のサイクル変化
(ライナ温度の影響, $n = 25, X_o = 2\mu\text{m}$)

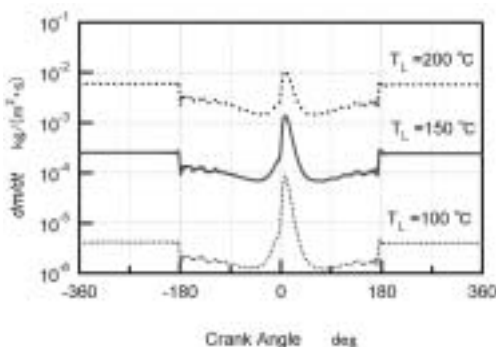


図16 油膜蒸発速度

(ライナ温度の影響, $n = 25, X_o = 2\mu\text{m}$)

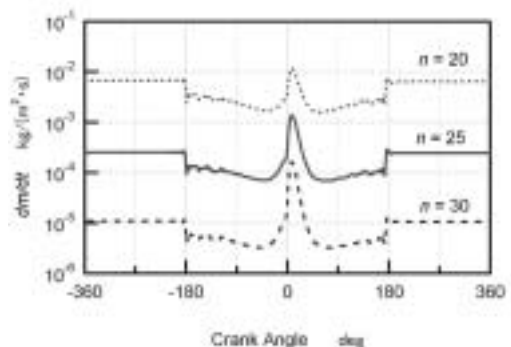


図17 油膜蒸発速度

(炭素数の影響, $T_L = 150^\circ\text{C}, X_o = 2\mu\text{m}$)

の影響が大きくなる。

以上の蒸発速度から1サイクルの蒸発量を算出し、ライナ壁温に対して整理すると図18, 19に示すようにライナ壁温が上昇すると蒸発量は増加する。油膜厚さにより壁面温度の影響は図18に示すように異なり、油膜厚さが薄い場合はライナ壁温の蒸発への影響が強いが、膜厚が厚くなると蒸発量の絶対量は高くなるが、ライナ壁温の蒸発への効果は小さくなる。また図19に示すように、炭素数が少ない軽質成分の潤滑油ほど壁温の影響を受け蒸発量が増加する。文献(2)の解析結果と比較すると、ライナ温度に対する蒸発量はほぼ同様な値であり、炭素数が減少するに従い蒸発量が低下する傾向が得られた。また、文献(4)の蒸発特性の高いオイルと低いオイルの実験結果と比較すると、本解析結果と同様な傾向を示し、定性的に本モデルによりシリンダ壁面に付着した潤滑油の蒸発量を予測することが可能であることを示唆している。なお、より正確な予測のためには、実際の使用油の蒸発特性に関係する物性値を必要とする。

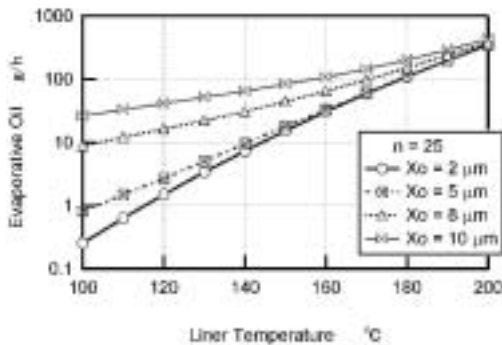


図18 ライナ壁温度と蒸発量の関係
(油膜厚さの影響, $n = 25$)

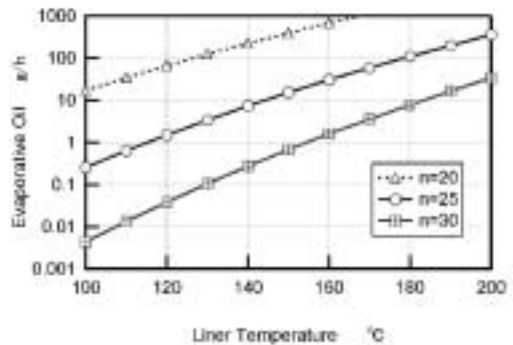


図19 油膜蒸発量とライナ温度の関係
(炭素数の影響, $X_o = 2\mu\text{m}$)

4. まとめ

- (1) エンジン燃焼室壁面に付着した潤滑油膜が蒸発する予測モデルを構築し、蒸発量とライナ壁温度、潤滑油温度、油膜の厚さとの関係を明らかにすることができた。
- (2) 潤滑油膜の蒸発量は、その熱的特性、特に飽和蒸気圧に大きく影響を受ける。飽和蒸気圧は温度の関数であり、油膜温度が高いほど蒸発量は指数関数的に上昇する。
- (3) ライナ壁面に付着した潤滑油膜の蒸発量は、サイクル中大きく変化する。この変化は燃焼・膨張行程前半で顕著に見られ、油膜厚さが厚いほど、潤滑油成分が軽質であるほど、その変化量は大きくなる。
- (4) 1サイクル当りの蒸発量は油膜厚さが増すほど、ライナ壁温が高くなるほど、炭素数が低下（軽質化）するほど増加する。

主な記号

C : 潤滑油膜の比熱	T_c : 臨界温度
C_g : 混合気体の比熱	t : 時間
D : 拡散係数	W_{gas} : 雰囲気ガスの分子量
D_i : シリンダ径	W_{ls} : 潤滑油の分子量
h_g : 熱伝達率	Y_s : 界面における質量分率
p_{ls} : 界面温度における飽和蒸気圧力	δ_i : 温度境界層厚さ
p_{ls0} : 界面圧力における飽和蒸気圧力	δ_c : 拡散境界層厚さ
p_{mix} : 蒸発ガスと雰囲気ガスの混合気体の全圧	Δh_{ev} : 大気圧, 沸点における蒸発熱
R_g : 一般ガス定数	κ : 潤滑油膜の熱伝導率
R_v : パラフィン蒸気 of ガス定数	ρ : 潤滑油膜の密度
T_{ls} : 潤滑油膜の温度	ρ_{mix} : 混合気体の密度
T_{bs} : 潤滑油膜の沸点	

参考文献

- (1) 川本淳一 他, 潤滑, 22-11 (1977)
- (2) Petris, C.D., 他, SAE Paper 972920, pp. 1-9 (1997)
- (3) Herbst, 他, SAE Paper No. 2000-01-0919 (2000)
- (4) 山本匡吾, エンジンテクノロジー, 4-5, pp. 84-89 (2002)
- (5) Yilmaz, E., 他, SAE Paper 2002-01-2684, (2002)
- (6) 瀧口雅章 他, トライボロジスト, 49-10, pp. 775-780 (2004)
- (7) 一杉英司 他, 自動車技術会講演前刷集, 20045147, pp. 9-12 (2004)
- (8) 稲垣英人 他, 日本機械学会論文集 (B編), 70-700, pp. 3251-3256 (2004)
- (9) 伊藤明美 他, 自動車技術会講演前刷集, 20055182, pp. 1-8 (2005)
- (10) Liu, L., 他, WTC 2005-63984 (2005)
- (11) 針谷安男, 日本機械学会RC191研究報告書, pp. 34-41 (2003)
- (12) Harigaya, Y., 他, Transactions of The ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 125, Issue 2, pp. 596-603 (2003)
- (13) Shimada, A., 他, SETC 2004 Proceedings, 2004-32-0024, pp. 1-9 (2004)
- (14) 針谷安男 他, 宇都宮大学教育学部紀要, Vol. 56-2, pp. 27-36 (2006)
- (15) Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988
- (16) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 1987