

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

Study on Lubricating Oil Evaporation on Cylinder Liner Wall of an Engine

針谷 安男^{*1}・鈴木 道義^{*1}・山菅 和良^{*2}

HARIGAYA Yasuo, SUZUKI Michiyoshi and YAMASUGA Kazuyoshi

As a solution of energy and environment problem, the reduction of the lubrication oil consumption (LOC) and the friction work at ring of the internal combustion engine are extremely important. In this paper, the effect of the lubricating oil viscosity grade on LOC was estimated by using an developed lubricating oil evaporation model. Also, the calculated result and the measured value for LOC were compared. As a result, the evaporated oil was affected by the oil viscosity grade, and it's value increases with decreasing oil viscosity. The calculated values was almost corresponding to measurements of LOC on the low load conditions.

Key words: Oil Evaporation, Oil Film Thickness, Cylinder Liner, 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対策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方策は、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、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（LOC）の増大や焼付き等の問題が生じ、二次的な問題が発生してきている。そのため、その原因究明と解決法が要求されてきている。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⁽¹⁻⁷⁾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、実験及び解析の両面から研究⁽⁶⁾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。

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、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構築し、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⁽⁸⁻¹⁰⁾した。さらに文献⁽¹¹⁾では、

^{*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

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予測モデルを構築し、蒸発量とライナ壁温度等との関係を明らかにした。

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、潤滑油の蒸発予測モデルを用い、実機運転条件への適用を検討するため、潤滑油粘度グレード油が蒸発量に及ぼす影響、及び火花点火エンジンで測定されたLOCの値と検討した結果について述べる。

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⁽¹⁾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。

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を用いて解析する。油膜からの蒸発熱量 Q_2 は式(2)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。

$$Q_2 = L_v \, dm/dt \quad (2)$$

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

$$dm/dt = \frac{h_g}{C_g} \ln \left(1 - \frac{Y_s}{Y_s - 1} \right) \quad (3)$$

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。

蒸発速度にライナ各位置における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、火花点火エンジン（内径×行程=89×80.3mm）を対象に、潤滑油粘度グレードSAE#30と10W30を用いた。運転条件は回転数4000rpm、4/4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_1 は熱伝達のみと仮定し、熱伝達率はWoschniの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

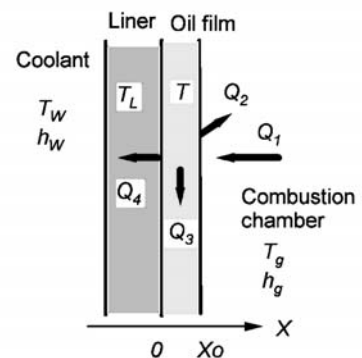


Fig. 1 Evaporation model of oil film on the liner wall

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⁾⁽⁵⁾を参考にした。

3. 解析結果と考察

3.1 蒸発量と粘度グレードの関係

まず、蒸発に影響を与える各潤滑油の粘度グレード、シングルグレード油#30、マルチグレード油10W30の飽和蒸気圧と温度の関係を図2に示す。図にはパラフィン系炭化水素の飽和蒸気圧も併記してある。シングルグレード#30とマルチグレード10W30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が、後者の蒸気圧は前者に比べ約20倍高い値である。また、炭化水素系の飽和蒸気圧と比較すると温度上昇に対する増加率は低めである。潤滑油の低粘度化は軽質成分の割合が高いことがわかる。

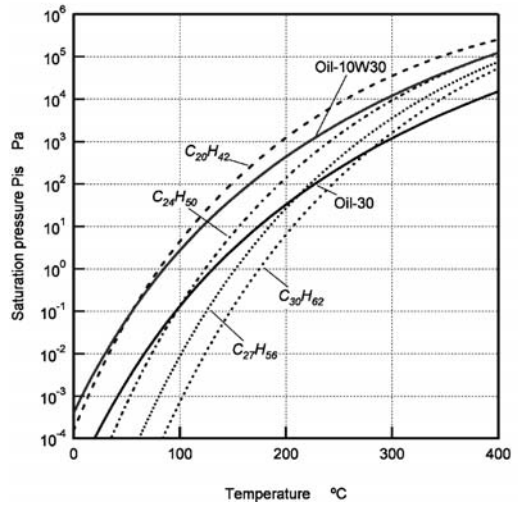


Fig. 2 Between Saturation pressure and temperature

この飽和蒸気圧の蒸発性に対する影響について、サイクル中ライナ温度 T_L 100°C、油膜厚さ h 2 μm 一定の条件で蒸発量を求めた。図3(a)にサイクル中変化する蒸発速度 dm/dt を示す。 dm/dt は吸入行程中はほぼ一定値であり、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、膨張行程後半ではほぼ一定値を示す。排気行程では、 dm/dt は膨張行程後半より高い値であるがほぼ一定である。潤滑油の飽和蒸気圧が上昇すると、すなわち粘度が低下すると、サイクル中蒸発速度は全体的に増加する側にシフトする。

図3(b)は dm/dt の値に燃焼室ガスに接する表面積を乗算した1サイクル中変化する蒸発量を示す。

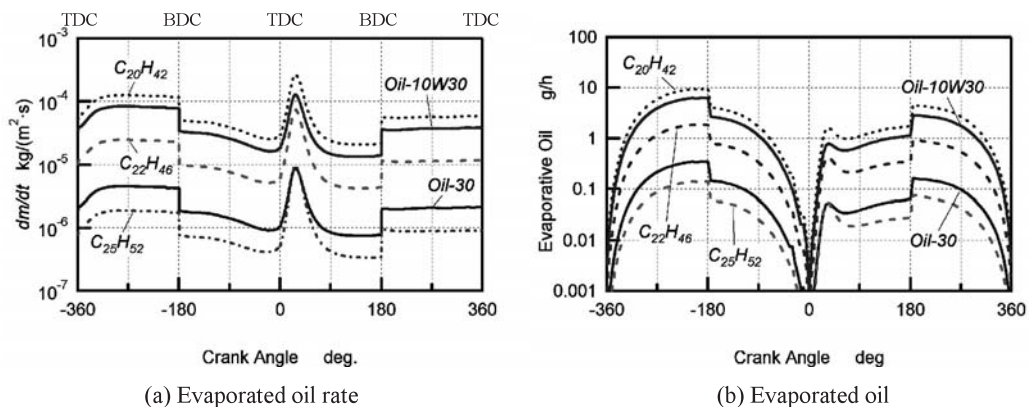


Fig. 3 Evaporated oil (effect of oil film thickness: 2 μm , T_L : 100°C)

これらはサイクル中、燃焼室ガスに接するライナ表面積に対応して変化する。 dm/dt が高くなる膨張行程初期では、ピストンの移動が少ないため、燃焼室ガスと接する表面積が少なく蒸発量への影響が小さい。得られた総蒸発量と飽和蒸発圧 P_{ls} との関係を図4に示す。総蒸発量は P_{ls} の増加とともに増加し、低粘度マルチグレード潤滑油10W30の蒸発量はシングルグレード潤滑油#30の値に比べ約18倍増加する。摩擦損失低減のため低粘度潤滑油を用いることは、解析により蒸発量が増加することが確認された。

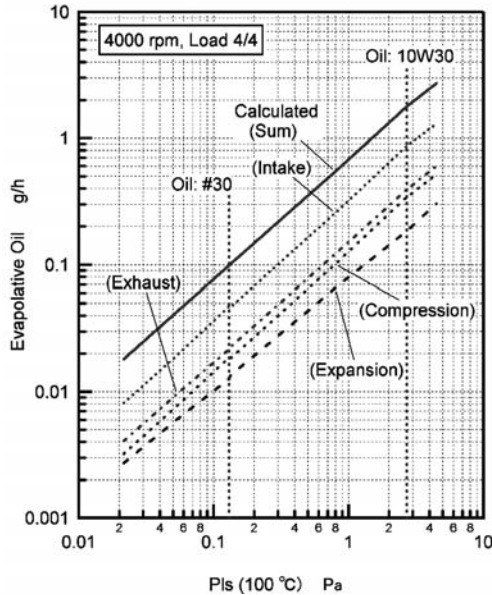


Fig. 4 Relation between evaporated oil and oil film thickness

(Oil : 10W30, T_L : 100°C)

3.2 蒸発量と油膜厚さの関係

図5(a)にライナ温度 T_L 100°C、潤滑油10W30の場合でライナ壁面上に付着している油膜厚さ h が変化したときの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、燃焼室圧力が増加する影響を受け、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、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、蒸発速度は膨張行程後半より高い値であるが、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。ライナへ付着する油膜厚さが厚くなると、吸入、圧縮行程ではその影響はほとんど見られないが、膨張行程において、油膜厚さが増すほど蒸発速度が急激に上昇する。1サイクル中の油膜蒸発量はこの蒸発速度に燃焼室ガスに接するライナ壁の面積をもとに算出し、図5(b)にサイクル中変化する蒸発量を示す。

蒸発量は吸入・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。

図6に総蒸発量と油膜厚さの関係を示す。総蒸発量は油膜厚さの増加とともに上昇する。総蒸発量に対する各行程の蒸発量の割合は、油膜厚さ $2\mu\text{m}$ の場合、吸入行程が約50%、圧縮行程で約18%、膨張行程で約10%、排気行程で約22%である。油膜厚さが厚くなるほど、油膜表面温度が上昇するため膨張行程の蒸発量は急激に増加する。油膜厚さ $10\mu\text{m}$ では、総蒸発量は約3倍増加し、その割合は吸入行程が約14%、圧縮行程で約6%、膨張行程で約66%、排気行程で約14%となる。

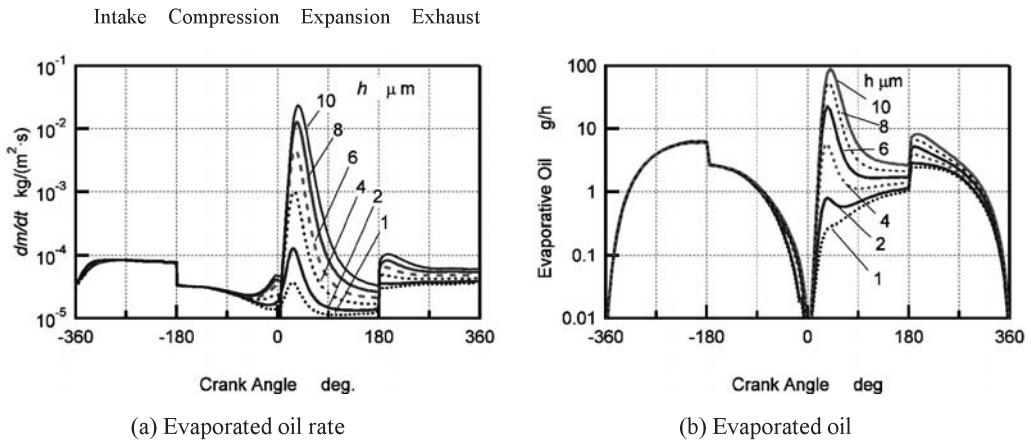


Fig. 5 Evaporated oil (effect of oil film thickness, Oil:10W30, T_L :100°C)

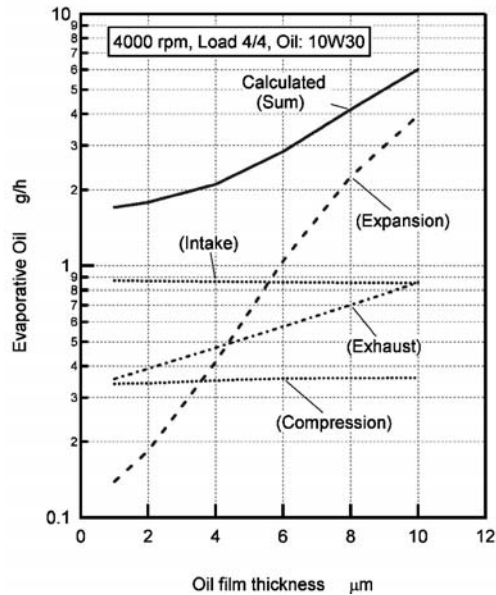


Fig. 6 Relation between evaporated oil and oil film thickness

(Oil : 10W30, T_L : 100°C)

3.3 蒸発量の実測値と計算値の比較

次に、Sトレス法による潤滑油消費測定値⁽¹²⁾と計算値の比較を行うため、4000rpm、全負荷運転における実測されたピストン温度、ライナ温度、燃焼圧力等を用いて蒸発量を求めた。油膜厚さと油膜温度は、熱流体潤滑モデル⁽⁸⁾により算出した値を図7に示す。蒸発に関する油膜厚さは、吸入行程中で $2\sim 7\mu\text{m}$ 、膨張行程では $0.5\sim 4\mu\text{m}$ である。また、ライナ温度は、この運転条件では、ライナのリング滑り方向に温度分布が見られ、 $107\sim 97^\circ\text{C}$ とリングの下降とともに低下する。このため先にサイクル中、油膜厚さ、ライナ温度一定で解析した結果と異なることが予想される。

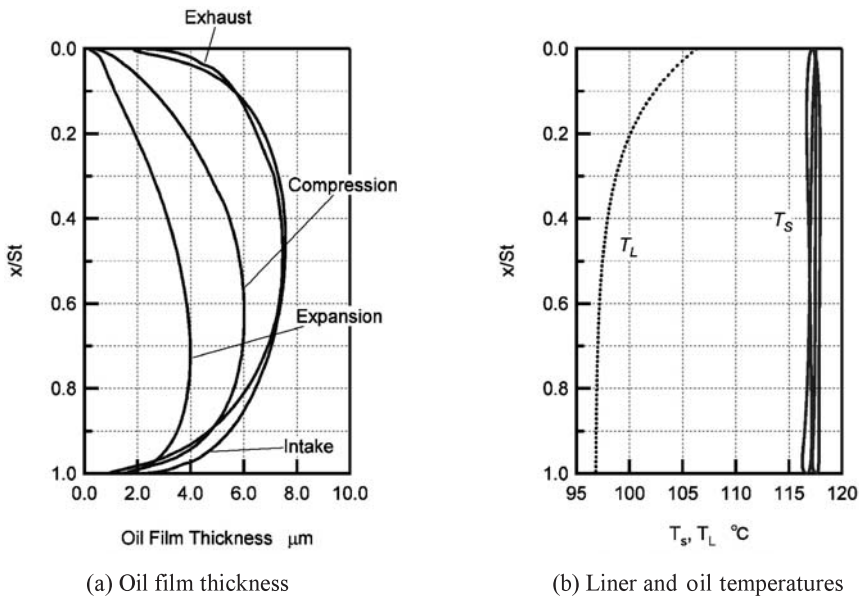


Fig. 7 Relation between oil film thickness, liner temperature and liner position

(Oil : 10W30, 4000 rpm, Full load)

1サイクル中の潤滑油蒸発量の変化を図8に示す。これより1サイクル中の潤滑油蒸発量は、吸排気行程中の蒸発量の方がガス温度の高い圧縮膨張行程中より多いことが分かる。また図9は1サイクル中の総蒸発量とエンジン負荷との関係である。計算された潤滑油蒸発量は負荷の増加とともに増加傾向を示す。この値と測定結果を比較すると、3/4負荷までは両者は近い値を示すが、4/4負荷においては測定結果の方が急激に増加している。

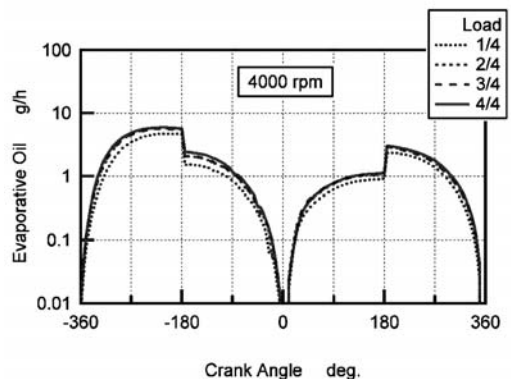


Fig. 8 Evaporated oil (effect of load)

以上のように低負荷領域では、潤滑油消費量の多くは潤滑油蒸発量が占めている。高負荷領域では、潤滑油消費量は増加するが、シリンダ変形によるオイル上がり量が増し、油膜厚さが厚くなる等の要因が考えられる。

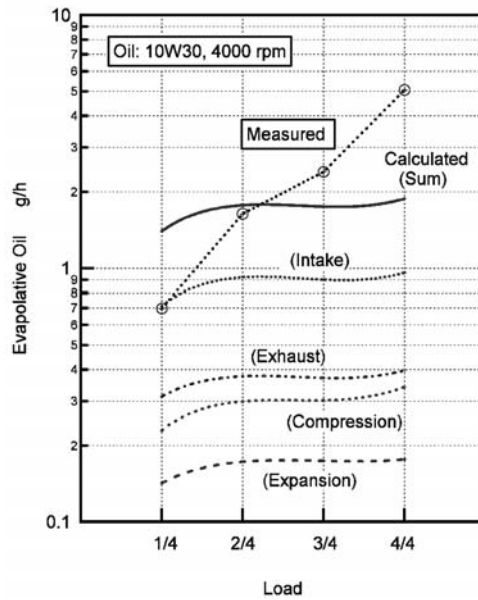


Fig. 9 Relation between evaporated oil and load

4. まとめ

- (1) エンジン燃焼室壁面に付着した潤滑油膜の蒸発予測モデルを用いて、蒸発量と潤滑油粘度グレード及び油膜厚さとの関係を明らかにした。
- (2) 潤滑油膜の蒸発は、潤滑油の熱的特性、特に飽和蒸気圧（温度）に大きく影響を受ける。潤滑油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。
- (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、その変化量は大きくなる。
- (4) 油膜厚さが $1\sim 4\mu\text{m}$ では、ライナ壁面に付着した潤滑油膜の蒸発量はわずかに増加するが、油膜厚さが $4\mu\text{m}$ 以上の厚さでは、蒸発量は急激に増加する。
- (5) 蒸発予測モデルを用いて得られた蒸発量は実機により実測された潤滑油消費量とほぼ一致した。

参考文献

- (1) 川本淳一，山本匡吾，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) 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)
- (8) Harigaya, Y., et al., Analysis of Oil Film Thickness on a Piston Ring of Diesel Engine: Effect of Oil Film Temperature, Transactions of The ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 125, Issue 2, pp. 596-603 (2003)
- (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—すべり面形状の影響—, 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—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)
- (12) 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)