

## 2ストローク機関の希薄燃焼における燃焼室デポジットの生成\*

### (第1報, 燃料と潤滑油の寄与)

佐藤唯史<sup>\*1</sup>, 岩渕力也<sup>\*2</sup>, 福井雅人<sup>\*2</sup>  
藤田尚毅<sup>\*3</sup>, 北野三千雄<sup>\*3</sup>

## Combustion Chamber Deposit Formation in the Lean Burn for a Two-Stroke Cycle Engine (1st Report, Contribution of Fuel and Lubricant Oil)

Tadafumi SATO, Rikiya IWABUCHI, Masato FUKUI,  
Naotake FUJITA<sup>\*4</sup> and Michio KITANO

<sup>\*4</sup> Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka-shi, Iwate, 020-8551 Japan

The aim of this study is to investigate the influence of lean combustion on the formation of combustion chamber deposit in a two-stroke cycle engine. The contribution of fuel and lubricant oil to the deposit formation was discussed in this paper. The results obtained were as follows: (1) With making the mixture lean from the rich side, the weight of combustion chamber deposit derived from the lubricant oil was increased, but that derived from gasoline was decreased. (2) The contribution ratio of gasoline to the total weight of deposit was below 5% in the lean side, however, that was 10 to 30% in the rich side. (3) Most of the combustion chamber deposit derived from the lubricant oil was formed from the detergent dispersant added to the lubricant oil, and the metallic detergent formed a larger amount of combustion chamber deposit than the ashless dispersant.

**Key Words:** Internal Combustion Engine, Combustion, Combustion Products, Combustion Chamber Deposit, Two-Stroke Cycle, Lean Burn, Lubricant Oil, Detergent Dispersant

### 1. ま え が き

2ストローク機関は比出力・簡便性に優れ, 小排気量の二輪車や汎用機・ハンドヘルド製品において, 一定の市場を確立しているが, 一方で多量の燃焼室デポジットを生成する問題を抱えている. 一般に, 燃焼室デポジットは排気特性の悪化<sup>(1)</sup>や要求オクタン価の増大<sup>(2)</sup>・スキッシュエリアへの堆積によるピストンクラウンとシリンダヘッドの干渉<sup>(3)</sup>などの問題を引き起こすことが報告されている. また, 燃焼室表面から剥離したデポジットが, ピストンとシリンダライナの摺動面に入り込むことによる潤滑状態の悪化や摩耗の増大も懸念される<sup>(4)(5)</sup>. 従って, 燃焼室デポジットの生成は出力性能や信頼性・保守性を悪化させ, 排気規制が二輪車や汎用機にも適用される<sup>(6-8)</sup>中で不利となる. 故に, 2ストローク機関の特長を活用する上で, 燃焼

室デポジットの生成を抑制することは重要な研究課題である.

これまでの研究では, 燃料中の芳香族炭化水素や, ポリエーテルアミン(PEA)系およびポリオレフィンアミン(POA)系などの吸気系清浄剤が, 燃焼室デポジットの生成に寄与することなどが報告されている<sup>(9-12)</sup>. 一方, 近年になって燃焼室デポジットの生成機構を解明する試みが行われつつあり, 燃焼室デポジットは芳香族炭化水素が酸化・縮合重合したポリマであること<sup>(13-15)</sup>や, 高沸点の炭化水素ほどデポジット化しやすいこと<sup>(16)(17)</sup>が報告されている. しかし, 潤滑油が燃料と共にシリンダへ流入する特有の機構を持つ2ストローク機関については, 添加剤や基油の影響を調べた報告例<sup>(18)(19)</sup>がある程度で, 省資源化や低公害化から希薄燃焼が要求される状況で, デポジットの堆積状況を調べた研究は余り見当たらない. 従って, このような状況において, 2ストローク機関の燃焼室デポジット生成を抑制するためには, 従来の過濃混合気での燃焼と希薄燃焼における堆積重量や, その生成に及ぼす燃料と潤滑油の寄与を明らかにする必要がある.

\* 原稿受付 2000年3月22日.

<sup>\*1</sup> 岩手県立産業技術短期大学校(☎028-3615 紫波郡矢巾町南矢幅10-3-1).

<sup>\*2</sup> 学生員, 岩手大学大学院(☎020-8551 盛岡市上田4-3-5).

<sup>\*3</sup> 正員, 岩手大学工学部.

E-mail: nfujita@iwate-u.ac.jp

本報では、汎用の2ストローク機関を用いて、ピストンクラウン表面に堆積したデポジットの重量を調べ、燃料組成や潤滑油に含まれる清浄分散剤の影響を踏まえた上で、燃料と潤滑油の寄与に及ぼす空気過剰率の影響を評価する。

## 2. 実験装置および方法

本研究の供試機関は、空冷単気筒2ストローク火花点火機関であり、表1にその主要諸元を示す。動力吸収および回転数制御には、交流式電気動力計を用い、空気過剰率の設定を行うために、気化器のメインジェットに挿入量を任意に変えられるニードルスクリューを製作して取り付け付けた。また、ピストンクラウンに堆積した燃焼室デポジットの重量を測定するため、図1のようにクラウン部と本体から構成される分割ピストンを製作した。クラウン部の重量は約25gであり、6本の締付けネジを用いて本体の上面に固定される。

供試燃料は、市販レギュラーガソリンと、ガソリンに含まれる不飽和炭化水素の影響だけを除く目的でi-オクタンを用いた。また、燃料組成の影響を調べる目的で、i-オクタンにi-オクテンを10wt%添加した燃料Aと、p-キシレンを10wt%添加した燃料Bも用いた。一方、供試潤滑油には、市販の2ストローク機関用潤滑油A、清浄分散剤を含まない潤滑油B、カルシウムスルフォネート系清浄剤を潤滑油Bに7wt%添加した潤滑油C、同様にコハク酸イミド系分散剤を添加した潤滑油Dを用いた。潤滑油Aおよび潤滑油Bの性状を表2に示す。なお、潤滑油供給量を任意に設定するため、潤滑油の供給は分離潤滑方式とし、モータポンプを用いて吸気孔の直前に滴下した。

運転条件は表3に示すように、回転数や給気比などの条件を一定とし、空気過剰率の影響だけに注目した。実験は、始動時と停止時の15分間ずつのアイドリングを含む2時間半の運転を2回繰り返した。運転条件を表3に示す。運転終了毎に、分割ピストンのクラウン部を取り外して、ガソリン洗浄とアセトン洗浄を行い、十分に乾燥させた後、電子天秤によりクラウン部の重量を測定し、運転前後の重量差からデポジット重量を求めた。また、電子プローブX線マイクロアナライザ(EPMA)により、回収したデポジットの元素分析を行った。

## 3. 結果および考察

**3.1 燃料と潤滑油の寄与** 燃料にi-オクタンを用い、供試潤滑油A~Dを供給した場合の燃焼室デポジット(CCD)の堆積重量を図2に示す。また、潤滑油A・潤滑油C・潤滑油Dに起因する燃焼室デポジットの元素分析を図3に示す。なお、図中で金の検出が見られるのは、分析

Table 1 Engine Specifications

Form	Air-Cooling Piston Valve Type Two-Stroke Cycle
Scavenging Form	Schnürle Type
Fuel Supply	Carburetor
Bore×Stroke	62 × 58 [mm]
Displacement	175 [cm <sup>3</sup> ]
Compression Ratio	7.1
Ignition Timing	22 [degCA, BTDC]

Table 2 Properties of Test Lubricant Oils

	Lubricant Oil A	Lubricant Oil B
Specific Gravity	0.858	0.855
Kinematic Viscosity [mm <sup>2</sup> /s]		
@ 40 °C	41.0	36.0
@ 100 °C	7.53	7.35
Viscosity Index	153	175
Flash Point [°C]	98	100
Pour Point [°C]	-30	-30
Total Base Number [mgKOH/g]	2.4	0
Components [wt%]: Paraffins	47	51
: Olefins	41	44
: Aromatics	5	5
: Additives	7	0

Table 3 Test Conditions

Engine Speed	2200 [min <sup>-1</sup> ]
Delivery Ratio	0.4
Excess Air Ratio	0.8 ~ 1.6
Ignition Timing	22 [degCA, BTDC]
Oil Supply Method	Separate Supply
Oil Supply Rate	0.95 [cm <sup>3</sup> /min]

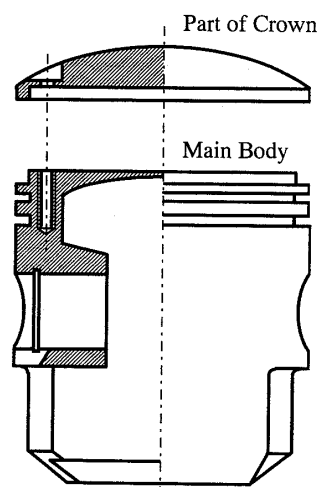


Fig.1 Schematic Diagram of Separate Piston

の前処理で金蒸着を行ったためである。

図2より、清浄分散剤を含まない潤滑油Bのデポジット堆積重量は1mg程度であり、他の潤滑油と比較して非常に少なく、運転終了後の燃焼室を観察しても汚損はほとんど確認できない。一方、清浄分散剤の影響を見てみると、潤滑油Cに起因するデポジット堆積重量は約80mgであり、潤滑油Aの場合と比べて2倍強に達するが、潤滑油Dに起因する堆積重量は約15mgで、潤滑油Aの半分弱に留まる。よって、燃焼室デポジットの堆積に及ぼす影響は、コハク酸イミド系分散剤よりも、カルシウムスルフォネート系清浄剤の方が強く現れる。また、図3を見ると、潤滑油Aと潤滑油Cに起因するデポジットからは、硫黄とカルシウムが検出されるが、潤滑油Dに起因するデポジットからは検出されない。従って、潤滑油Aから生成したデポジットに含まれる硫黄とカルシウムは、カルシウムスルフォネート系清浄剤に起因する。以上より、潤滑油に起因するデポジットは、そのほとんどが清浄分散剤から生成し、特に金属系清浄剤の影響は無灰型分散剤と比較して顕著である。これは、金属系添加剤がピストンクラウンへのデポジット堆積重量を増加させる藤本ら<sup>(18)</sup>の結果とも一致する傾向を示す。

次に、ガソリン・i-オクタン・燃料A・燃料Bを用いた場合の燃焼室デポジットの堆積重量を図4に示す。なお、上述の結果から、潤滑油はデポジット生成にほぼ影響を及ぼさない潤滑油Bを用いた。この図より、何れの燃料を用いてもデポジット堆積重量は数mgであり、清浄分散剤の影響と比較すると有意な差異は確認できない。2ストローク機関を用いた杉浦の報告<sup>(20)</sup>では、ガソリン中の含鉛量と共にデポジット堆積は増加するが、芳香族炭化水素はデポジット生成に大きく影響しないことから、不飽和炭化水素を含むガソリンや燃料A・燃料Bと、i-オクタンとで堆積重量がほぼ同じであるのは妥当である。一方で、江崎ら<sup>(13)</sup>は、4ストローク機関を用いた試験において、燃料中の芳香族炭化水素がデポジットの生成に寄与する結果を得ている。従って、燃料の不飽和炭化水素がデポジット生成に大きな影響を及ぼさないのは、2ストローク機関特有の傾向と考えられる。

**3.2 空気過剰率の影響** 燃焼室デポジットの堆積重量に及ぼす空気過剰率の影響を図5に示す。燃料にはガソリンを用い、潤滑油Aおよび潤滑油Bを供給した。また、図6および図7は、それぞれ潤滑油Aおよび潤滑油Bを供給した運転でのピストンクラウン表面の写真であり、空気過剰率(EAR)が(a)0.8・(b)1.0・(c)1.2の場合を示す。

図5より、潤滑油Aを用いた場合、空気過剰率1.3付近までは、混合気が過濃から希薄になると共に、燃焼

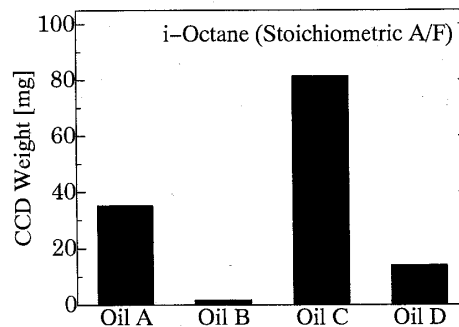


Fig.2 Influence of Detergent Dispersant on Combustion Chamber Deposit Formation

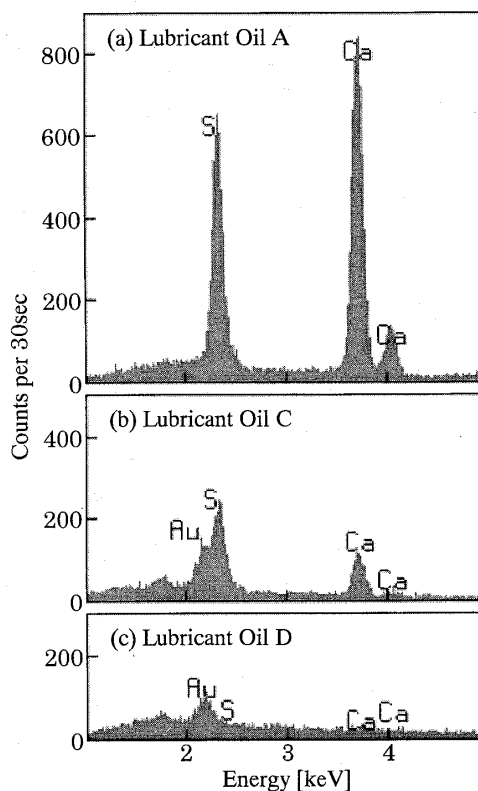


Fig.3 Elemental Analysis of Combustion Chamber Deposit Using EPMA

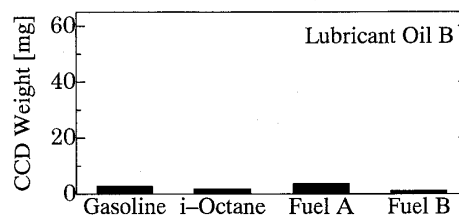


Fig.4 Influence of Fuel Component on Combustion Chamber Deposit Formation for Stoichiometric A/F

室デポジットの堆積重量は増加するが、さらに希薄になると減少に転じる。また、図6を見ると、空気過剰率0.8では堆積が見られないクラウン中央部も、空気過剰率1.0や1.2では堆積が確認でき、掃気孔から排気孔に

かけての周辺部も、空気過剰率が增加するにつれて堆積範囲は拡大する。一方、潤滑油Bを用いた場合、デポジット堆積重量は混合気の希薄化に伴って減少するのに加え、潤滑油Aを用いた場合に比べて非常に少なく、過濃側でも約10mgが最大であり、希薄側では数mg程度にしか達しない。図7を見ても、空気過剰率0.8で排気孔側に薄く堆積する程度であり、理論空燃比では堆積範囲が大幅に縮小し、空気過剰率1.2になるとほとんど堆積しない。

前節でも述べたように、清浄分散剤を含まない潤滑油Bはデポジット生成にほぼ影響を及ぼさないため、この潤滑油を用いた場合の生成はガソリンのみに起因すると見なせる。よって、過濃側から希薄側にかけてデポジット堆積重量が減少するのは、生成に起因するガソリンの供給量が減少するためである。燃焼室壁面近傍の消炎領域を模擬した装置を用いて、芳香族炭化水素など不飽和炭化水素の単位時間当たりの供給量が多いほど、デポジットが生成することを示したPriceらの報告<sup>(16)</sup>は、この結果を裏付けている。

一方、潤滑油Aを供給した場合のデポジット堆積重量は、ガソリンと潤滑油Aの両方に起因するが、上述したように、ガソリンに起因する堆積重量は混合気の希薄化と共に減少する。よって、空気過剰率と共に堆積重量が増加するのは、潤滑油Aに起因する堆積重量

が増加したためである。以前、著者らはp-キシレンを用いたデポジットの模擬生成で、雰囲気中の酸素濃度が生成重量に影響を及ぼすことや、生成したデポジットの赤外吸収スペクトルから、カルボキシル基やアルデヒド基が存在することを明らかにした<sup>(21)</sup>。故に、デポジットが生成する上で、酸化過程は必要であることから、混合気の希薄化に伴って、燃焼に関わらない余剰酸素が増加するため、潤滑油供給量が一定でも、堆積重量は増加すると考えられる。なお、空気過剰率1.3付近より希薄側で、堆積重量は減少に転じるが、この点についての議論は続報に譲る。

さて、図5で潤滑油Aを用いた場合のデポジット堆積

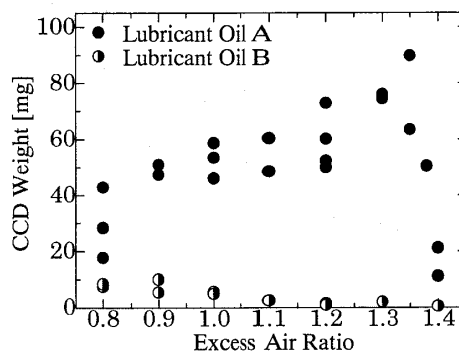


Fig.5 Influence of Excess Air Ratio on Combustion Chamber Deposit Formation for Operation with Gasoline

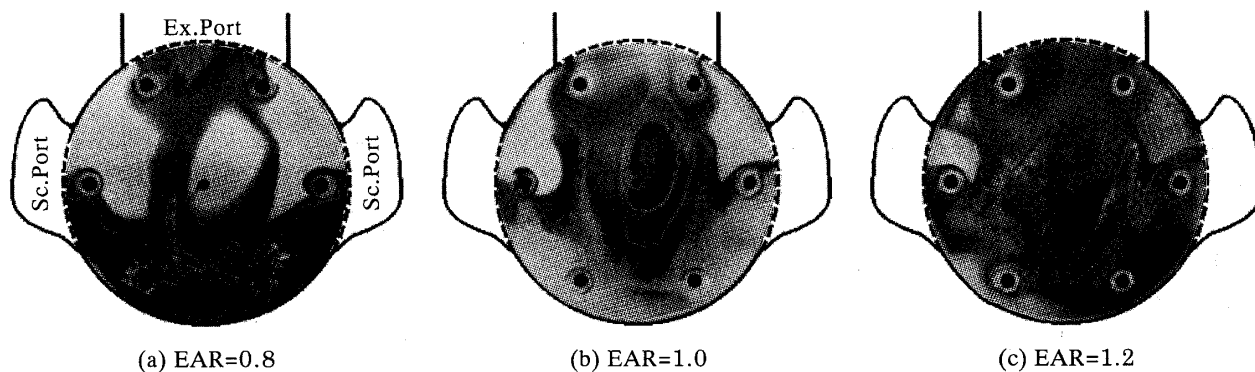


Fig.6 Photograph of Piston Crown Surface after Operation with Gasoline and Lubricant Oil A

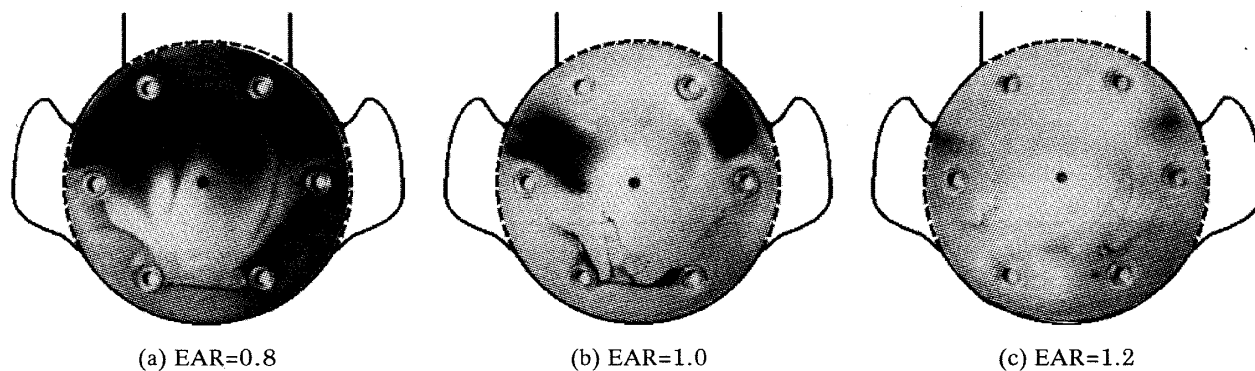


Fig.7 Photograph of Piston Crown Surface after Operation with Gasoline and Lubricant Oil B

重量をガソリンと潤滑油から生成した全重量 $M_{CCD}$ とし、潤滑油Bを用いた場合をガソリンのみに起因する重量 $M_{CCD,G}$ と見なして、式(1)で定義したデポジット堆積重量におけるガソリンの寄与率 $R_{Cont,G}$ に及ぼす空気過剰率の影響を図8に示す。尚、 $M_{CCD}$ と $M_{CCD,G}$ は、空気過剰率毎の平均値を用いた。

$$R_{Cont,G} = \frac{M_{CCD,G}}{M_{CCD}} \dots\dots\dots (1)$$

この図より、デポジット堆積重量におけるガソリンの寄与率は、理論空燃比から過濃側にかけて10~30%を示すが、希薄側では約5%以下と非常に低い。これは、混合気の希薄化に伴って、ガソリンに起因する堆積重量は減少するが、潤滑油に起因する堆積重量は増加するためである。2ストローク機関の低公害化や高効率化を図る上で、希薄混合気での燃焼安定性を改善することは重要な課題であるが、上述のように、混合気を希薄にするほど余剰酸素が増加し、潤滑油に起因するデポジットの堆積を促進しやすい雰囲気になる。従って、燃焼室デポジットの堆積を抑制する対策も同時に必要であり、デポジット生成の少ない金属系清浄剤や耐熱性のある無灰型分散剤の開発、あるいは焼付きを考慮しながら潤滑油供給量を極限まで低減することなどが望まれる。

#### 4. む す び

汎用の空冷単気筒2ストローク火花点火機関を用い、回転数 $2200\text{min}^{-1}$ ・給気比0.4の運転条件において、燃焼室デポジットの生成に及ぼす燃料や潤滑油の影響を検討した結果、次の知見を得た。

(1) 混合気の希薄化に伴って、ガソリンに起因する燃焼室デポジットの堆積重量は減少するが、清浄分散剤を含んだ潤滑油に起因する堆積重量は増加する。

(2) 清浄分散剤が7wt%含まれる潤滑油を供給する場合、デポジット堆積重量におけるガソリンの寄与率は、理論空燃比から過濃側にかけて10~30%を示すが、希薄側では約5%以下である。

(3) 潤滑油に起因するデポジットは、ほとんどが清浄分散剤から生成しており、特に金属系清浄剤の影響は無灰型分散剤と比較して顕著である。

最後に、本研究にあたり、富士重工(株)・丸加幸男氏および出光興産(株)・志渡誠一氏よりご援助をいただいた。また、実験遂行にあたり、岩手県工業技術センター・桑嶋孝幸氏、岩手大学工学部技官・吉田宏氏、および学生・碓井覚、小瀬川正尚の各氏のご助力を得た。ここに付記し、それぞれ謝意を表す。

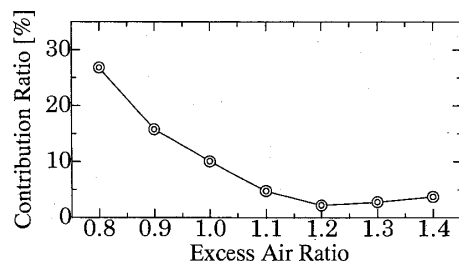


Fig.8 Influence of Excess Air Ratio on Contribution Ratio of Combustion Chamber Deposit Produced by Gasoline for Lubricant Oil A

#### 文 献

- (1) Omata, T. ・ほか4名, *SAE Paper*, 971721 (1997).
- (2) Price, R. J. ・ほか2名, *SAE Trans.*, 106-4, (1997), 612-624.
- (3) Moore, S. M., *SAE Trans.*, 103-4, (1994), 81-94.
- (4) 斎藤正, 潤滑, 27-5, (1982), 392-394.
- (5) 藤田尚毅 ・ほか3名, 機論, 60-571, C (1994), 299-304.
- (6) 環境庁, 平成9年3月31日付報道発表資料, (1997).
- (7) California Code of Regulations, Title13, Section2403.
- (8) Federal Register, 64-144, (1999), 40940-40972.
- (9) Takei, Y. ・ほか3名, *SAE Trans.*, 103-4, (1994), 954-967.
- (10) Crema, S. ・ほか2名, *SAE Paper*, 961097 (1996).
- (11) Kalghatgi, G. T., *SAE Paper*, 972841 (1997).
- (12) Kelemen, S. R. ・ほか5名, *SAE Paper*, 982716 (1998).
- (13) 江崎泰雄 ・ほか4名, 自技前刷集, 964, (1996), 169-172.
- (14) 上原隆史 ・ほか6名, 自技前刷集, 964, (1996), 173-176.
- (15) Uehara, T. ・ほか5名, *SAE Trans.*, 106-4, (1997), 741-759.
- (16) Price, R. J. ・ほか3名, *SAE Trans.*, 104-4, (1995), 1364-1379.
- (17) Price, R. J. ・ほか2名, *SAE Trans.*, 106-4, (1997), 846-862.
- (18) 藤本義雄 ・ほか2名, 潤滑, 14-4, (1969), 173-179.
- (19) 小松源一 ・泥谷義直, 潤滑, 15-12, (1970), 825-830.
- (20) 杉浦健介, *JPI Symposium*, (1971), 167.
- (21) 福井雅人 ・ほか3名, 自技前刷集, 96-99, (1999), 5-8.