

## 小形2ストロークエンジンにおける燃焼室デポジットのピストン上 たい積特性\*

伊斯拉海提 阿不力孜\*<sup>1</sup>, 藤田 尚 毅\*<sup>2</sup>  
北野 三千雄\*<sup>2</sup>, 吉田 宏\*<sup>3</sup>

### The Combustion Chamber Deposit Formation on a Piston Crown of a Small Two-Stroke Cycle Engine

Islahat ABLIZ\*<sup>4</sup>, Naotake FUJITA,  
Michio KITANO and Hiroshi YOSHIDA

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

We studied the influence of fuel and lubricant oil on the combustion chamber deposit (CCD) formation using an autoclave and a small two-stroke engine. The autoclave results showed that there were some temperature and pressure region that made a maximum deposit formation. On the other hand, the CCD weight on the piston crown surface of a utility two-stroke cycle spark ignition engine was measured, and the relative contribution of fuel and lubricant oil to the CCD formation was discussed. The engine was operated with gasoline as a fuel and with commercial oil for two-stroke and base oil without any additives as lubricant oil. As a result, most CCD was formed from lubricant oils, especially oil additives. Furthermore, we measured the temperature profiles on a piston crown surface using many fusible plugs that had specific melting points, for considering the relation between the engine CCD and the autoclave results.

**Key Words:** Two-Stroke Cycle Engine, Combustion Chamber Deposit, Oil Additive, Autoclave, Piston, Temperature, Fusible Plugs

#### 1. 緒 論

小形2ストロークエンジンは、簡便性にすぐれ比出力が大きいことから、小形船舶の船外機や農業用あるいははん用原動機として広く用いられている。この機関は構造上、燃料と潤滑油を混合してシリンダ内で燃焼させるために、燃焼室デポジット(CCD)が4ストローク機関に比べて非常に多く生成され、また機関から排出される潤滑油成分や微粒子も多い<sup>(1)(2)</sup>。2ストロークエンジン用潤滑油には、シリンダとピストンのしゅう動面を正常に保つために清浄剤や分散剤が添加剤として加えられており、ピストンシリンダの汚損やこ着を抑える働きをしている。しかし、これらが燃焼室面で燃焼ガスにさらされることにより4ストロークエンジンに比べて多量の CCD を生成する要因の一つにもなっている。しかし、エンジンにとってはリングこ着による焼付きのほうが決定的なダメージとなるために、ピストンリングまわりの清浄性を優先させ、

CCD たい積は仕方のないものとして妥協していたのが現在までの状況である。ここで、CCD の過剰なたい積は、要求オクタン価の増加<sup>(3)</sup> や排ガス中の NO<sub>x</sub> 増大を招いたり、あるいは、スキッシュエリアへのたい積によりピストンとシリンダヘッドの干渉を起こすなど、運転性への悪影響をきたすことが知られている。また、排気規制<sup>(4)</sup> が小排気量エンジンにも適用され、強化されてきている中で、小形2ストロークエンジンの排気煙や微粒子排出も早急に解決されなければならない問題となっている。

実際のエンジン内での CCD 生成現象は非常に複雑であるので、オートクレーブを用いて高温・高圧場における現象を単純化して再現し、デポジットを静的状態で模擬的に生成させ、その生成機構を解明するための基礎的な研究<sup>(5)-(7)</sup> も行われている。しかし、実機エンジンの CCD に関する研究の多くは4ストロークエンジンについてのものがほとんどであり、潤滑油から多量の CCD を生成する2ストロークエンジンに関しては少ないのが現状である。

そこで、本報告では、オートクレーブを用い、2ストロークエンジン用潤滑油について、それを構成している潤滑油成分および主添加剤である清浄分散剤からのデポジット生成傾向を静的試験により調査し、デポジ

\* 原稿受付 2004年7月20日。

\*<sup>1</sup> 正員, 岩手大学大学院機械工学科(〒020-8551 盛岡市上田4-3-5)。

\*<sup>2</sup> 正員, 岩手大学工学部。

\*<sup>3</sup> 岩手大学工学部。

E-mail: t5203001@iwate-u.ac.jp

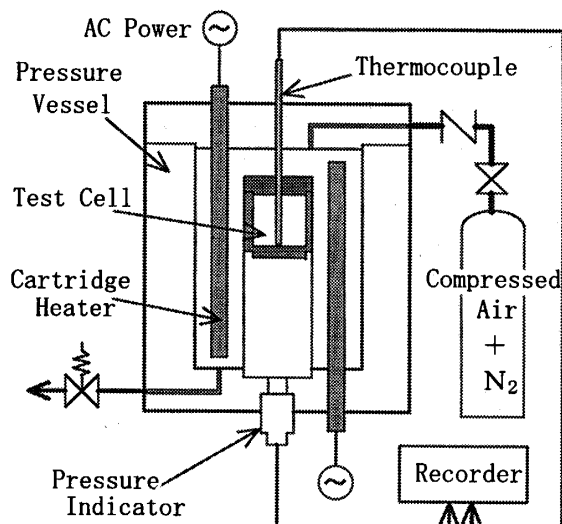


Fig. 1 Schematic diagram of the autoclave system

ット生成に及ぼす個々の成分の寄与について調べた。さらに、はん用2ストロークエンジンによる運転を行い、ピストンクラウン上にたい積するCCD重量を調べ、燃料および潤滑油または潤滑油添加剤のCCD生成に及ぼす影響を調べた。また、ピストンクラウン部の温度をフェージブルプラグを用いて測定し、実機運転と静的試験結果との関係について考察した。

## 2. オートクレーブを用いたデポジットの生成

**2.1 実験装置および方法** 図1に潤滑油等の加圧、加熱試験に用いたオートクレーブの略図を示す。オートクレーブは内径66 mm、外径120 mmのステンレス製厚肉円筒形で上下からボルト締めによるふたをしてある。加圧には空気または窒素ポンペの圧力を利用し、加熱はオートクレーブ内に挿入した150 Wのカートリッジヒータ6本に可変変圧器で電力を供給して行った。また、試料を入れるセルの温度はKタイプシース熱電対をセル上部から気密封入ソケットを介して挿入し、計測した。オートクレーブ内の圧力計測はひずみゲージ式圧力変換器を用いて行い、それぞれの出力はペンレコーダによって記録した。加圧・加熱試験時の圧力・温度経過の例を図2に示す。試験は、オートクレーブ内に試料100 mgを入れたセルを置き、初期設定圧力まで加圧し、その後設定温度まで加熱していくことにより、必要な温度・圧力状態を得て、定常状態とする。所要の時間保持した後に急冷・減圧をした。試験後のセル内試料は、揮発分が蒸発し、残りが熱変性した粘度の大きい液状として残る。これをガソリンおよびアセトンで洗浄すると、洗い落とされなかった固形物がセル底面にデポジットとして付着

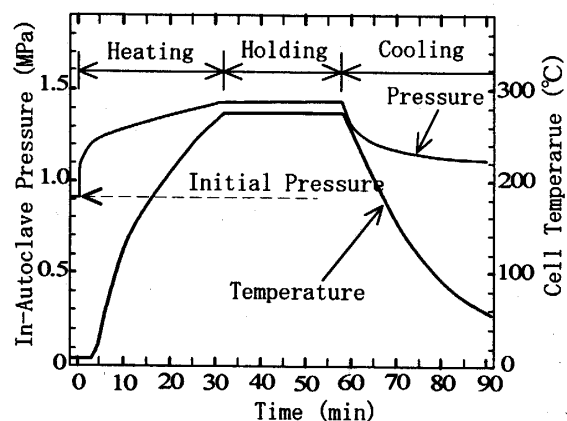


Fig. 2 Typical chart of in-autoclave pressure and temperature

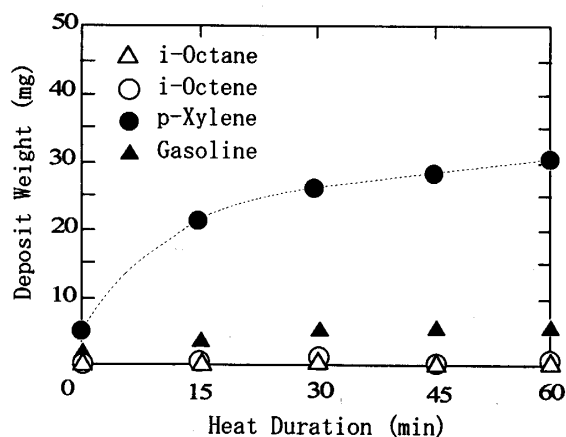


Fig. 3 Comparison among the deposit formation from hydrocarbons

し残る。試験前のセル重量と、試験終了後に洗浄した後のセル重量を測定し、その重量差からデポジット生成量を求めた。

**2.2 実験結果および考察** オートクレーブの試験において、炭化水素の構造によるデポジット生成量の違いを調べるために、鎖式飽和炭化水素燃料としてイソオクタン、鎖式不飽和炭化水素としてイソオクテン、環式不飽和炭化水素としてパラキシレンおよび市販のレギュラガソリンを試料に用いた実験を行った。その結果を図3に示す。オートクレーブへの加圧は空気のみで行い、セル内温度  $t_c=275^\circ\text{C}$ 、雰囲気圧力  $p_a=1.5\text{ MPa}$  の条件で、加熱保持時間  $t_h$  を0~60 minとした。 $t_c=275^\circ\text{C}$ とした理由は、予備実験において、この温度でのデポジット生成が最も多かったからである。図3において、加熱保持時間に関係なくパラキシレンが最も多くのデポジットを生成している。一般に、飽和よりも不飽和の炭化水素のほうが、デポジット生成量が多く、さらに環式不飽和炭化水素からの生

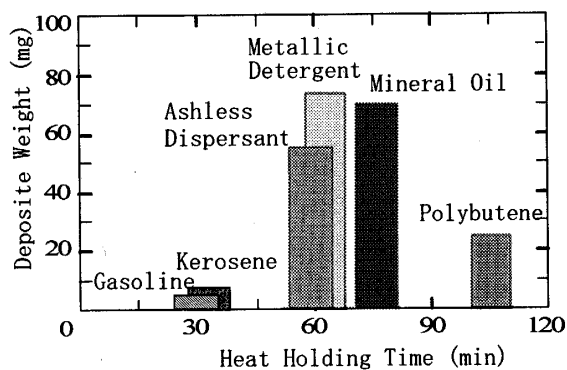


Fig. 4 The relation between holding time and deposit weight from oil components and additives

成量は非常に多いとの報告<sup>(6)</sup>もあり、ここでのオートクレーブ試験でも同様の傾向を示す結果が得られた。ガソリンからのデポジット生成量はパラキシレンと比較して15~20%程度となっている。一般にガソリン中の芳香族分(環式炭化水素)は20~40%で、その他は飽和分やオレフィン分がほとんどであることから、ガソリンから生じるデポジットもまた、含有される芳香族炭化水素からの生成が大半を占めているものとみなすことができる。炭化水素からのデポジット生成は高温・高圧下で芳香族炭化水素が酸化・縮合重合して生成された高分子化合物であると考えられている<sup>(6)</sup>。その生成量は加熱開始後に急激に増加し、徐々に増加量が減少して一定量に漸近していく。図3においてはパラキシレンは60 min加熱後もデポジット生成量は微増しているが、ガソリンの場合は30 minの加熱でほぼ平衡に達しているようすが見て取れる。

図4には、潤滑油を構成する各成分および添加剤について、圧力1.5 MPa・温度275°Cの下で、デポジット生成量が平衡に達するまでの加熱保持時間と、生成量の関係を示す。本研究に用いた2ストロークエンジン用潤滑油は鉱物油25 wt%、合成油(ポリブデン)41%および灯油成分27%から構成され、それに石油系添加剤として金属系清浄剤と無灰形分散剤が合せて7%加えられている。デポジット生成が平衡に達する時間は、ポリブデンが約100 minと長く、金属系清浄剤、無灰形分散剤および鉱物油が60~80 minで、デポジット生成量も70 mg程度に達する。いずれにしても、オートクレーブ試験では燃料よりも潤滑油成分のほうがデポジットを大量に生成する性質を有していることがわかる。

デポジットの生成は酸化過程を経ていることをKelemenら<sup>(6)</sup>は示しているが、酸素濃度の影響を明らかにするまでには至っていない。ここではオートク

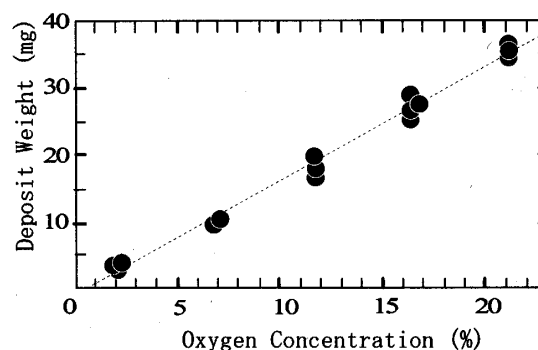


Fig. 5 Influence of oxygen concentration on the deposit formation ( $t_c=275^\circ\text{C}$ ,  $P_a=1.5\text{ MPa}$ ,  $t_h=30\text{ min}$ )

レーブ内の酸素濃度を変化させて、デポジット生成に及ぼすその影響を調べた。図5にセル内酸素濃度とデポジット生成量との関係を示す。試料として、芳香族炭化水素のパラキシレンを用い、容器内圧力1.5 MPa、温度275°C、保持時間30 minとして行ったものである。酸素濃度は、あらかじめ大気圧状態の拡散用ポンペに任意の分圧で酸素と窒素を充てんし、自然拡散により濃度を均一にしてから、その混合気によってオートクレーブ内を加圧した。図5から見て取れるように、酸素濃度の低下に伴ってデポジット生成量も直線的に減少しており、無酸素の状態ではデポジットが生成されないことがわかる。また、オートクレーブによってパラキシレンから生成したデポジットの化学構造を検討するために、フーリエ変換赤外分光分析に供試し、透過法(臭化カリウム錠剤法)により測定を行い、有機化合物のスペクトルデータと照合した。その結果、パラキシレンでは存在しないC=OやC-Oによるものと考えられる赤外スペクトル吸収のピークが見られ、明らかにデポジットには酸素を取り込んだ化合物が存在していることが認められた。

オートクレーブによる炭化水素からのデポジット生成に及ぼす圧力と温度の影響について図6および図7に示す。図6ではガソリンと潤滑油について雰囲気圧力が1.5 MPaと0.5 MPaの場合を示した。ここで、市販の2ストローク用潤滑油をOil Aとし、Oil BはOil Aにおいて清浄分散剤の添加剤を含まないものである。加熱保持時間はガソリンについては30 min、潤滑油については90 minで行った。加熱温度が低い場合は、デポジットの生成が見られず、高温になるにつれて生成量は増加し、ある温度領域で最大の生成量を示す。さらに高い温度領域では生成量は減少に転じている。ガソリンでのデポジット生成温度の上限は約350°Cであるが、潤滑油では同じ温度においても圧力1.5 MPaでは15 mgの生成が見られる。生成したデ

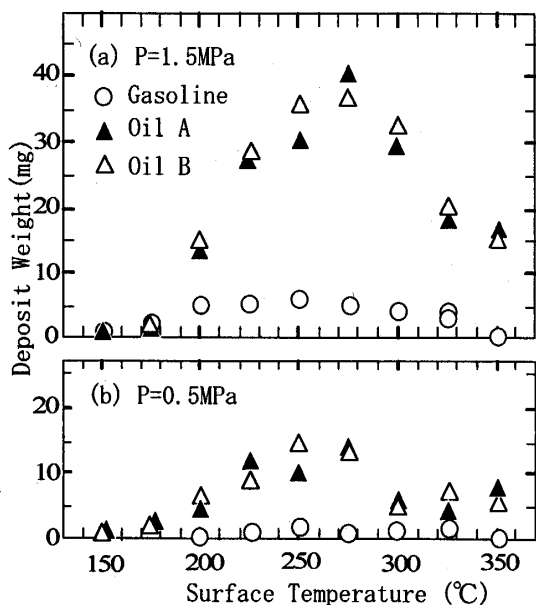


Fig. 6 Influence of temperature on deposit formation from gasoline and oils

デポジットを熱重量分析器に入れて、その重量変化を観察すると、250~300 $^{\circ}\text{C}$ 以上では急激な重量減少を示す。したがって、高温でのデポジット生成の減少傾向は、生成したデポジットが熱分解をしているものと考えられる。潤滑油とガソリンを比較すると、圧力が1.5 MPaにおいて、ガソリンの場合はセル温度が250 $^{\circ}\text{C}$ で、5 mg程度のデポジット生成量を示しているのに対し、潤滑油はOil A, Bともに275 $^{\circ}\text{C}$ 付近で35~40 mgと、約8倍の生成量となっている。圧力0.5 MPaにおいては、デポジットを最大生成する温度はほぼ同じであるが、生成量は1.5 MPaのときの35%程度となり、生成量は圧力が低いほど少なくなることが理解される。また、生成下限温度はガソリンにおいては1.5 MPaのときは約150 $^{\circ}\text{C}$ であるのに対し、0.5 MPaにおいては200 $^{\circ}\text{C}$ と、高くなっており、生成温度範囲が狭くなっている。

図7は潤滑油に添加されている金属系清浄剤(カルシウムスルフォネート系)と無灰形分散剤(コハク酸イミド系)について、高圧(1.5 MPa)と低圧(0.5 MPa)において、デポジット生成量と温度の関係を示したものである。これら添加剤からのデポジット生成量は、潤滑油と比べて2倍近くになっていて、金属系清浄剤のほうが無灰形分散剤より、いくぶん多い生成量を示す。デポジットを最大に生成する温度は275 $^{\circ}\text{C}$ 付近で、潤滑油の場合とほぼ同じであるが、生成下限温度は1.5 MPaで、200 $^{\circ}\text{C}$ となり、潤滑油より高いほうにシフトしている。燃料や潤滑油の蒸留温度が高いと、高

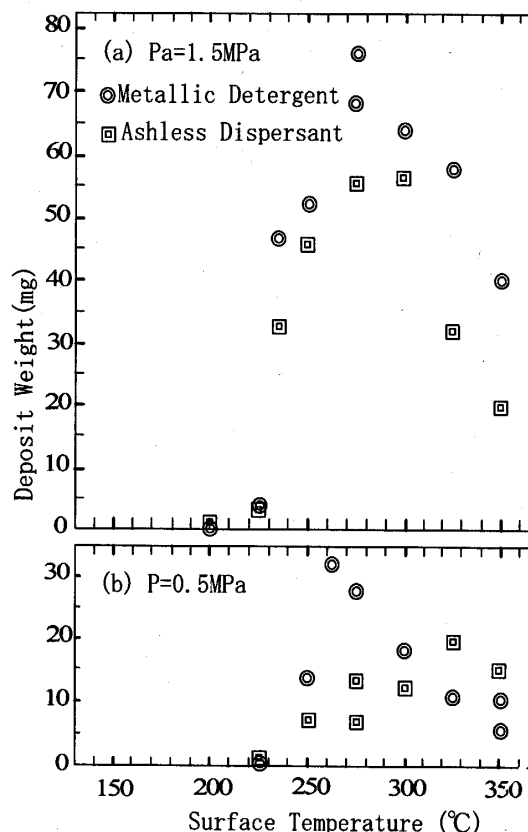


Fig. 7 Influence of temperature on deposit formation from oil additives

温においても蒸発することなく壁面にとどまる量が多くなるために、酸素の存在下で熱変性を受けてデポジット化しやすくなるものと考えられる。

### 3. 実機運転による燃焼室デポジットのたい積

**3.1 実験装置および方法** 実際の燃焼室デポジット(CCD)たい積を検証するために用いた機関は排気量175  $\text{cm}^3$ 、圧縮比7.1のシュニューレ掃気形空冷単気筒2ストローク火花点火エンジンである。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任意に行うために、気化器のメインジェットにニードルスクリューを製作して取付け、その挿入量を任意に変えることにより空燃比調整を行った。

図8にCCDたい積量の重量を測定するために用いたピストン概略図を示す。図8のようにピストン本体とクラウン部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25 gであり、6本のビスによって本体の上面に固定される。CCDたい積の実験は、始動時と停止時のアイドル15 minを含んで、2 h 30 minの運転を2回繰返し、計5 hとした。運転終了後に分割ピストンのクラウン部を取り外して洗浄

Table 1 Components of test lubricating oils (wt%)

Components	Oil A	Oil B	Oil C	Oil D
Paraffins	47	51	47	47
Olefins	41	44	41	41
Aromatics	5	5	5	5
Metallic Detergent	7	0	7	0
Ashless Dispersant			0	7

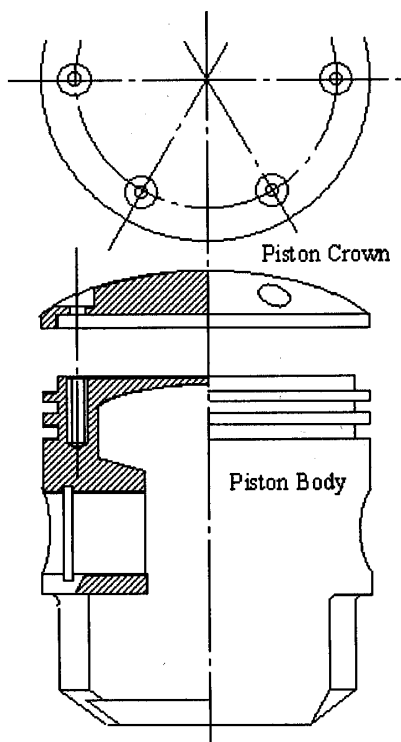


Fig. 8 Schematic diagram of separated piston

を施し、十分に乾燥させた後、電子てんびん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 CCD たい積量を求めた。供試潤滑油は市販の2ストロークエンジン用潤滑油(Oil A)と添加剤を加えていない潤滑油(Oil B)を用いた。また添加剤の個々の影響を調べるために、Oil Bにカルシウムスルフォネート系清浄剤を7wt%加えたもの(Oil C)およびOil Bにこはく酸イミド系分散剤を同じく7wt%加えたもの(Oil D)も用いた。これら潤滑油の構成を表1に示す。また、潤滑油の供給は分離給油方式とし、モータ駆動式のオイルポンプを用いて吸気口の直前に滴下した。供給量は $0.95 \text{ cm}^3/\text{min}$ 一定として行ったが、これは高負荷条件 Run H(後述)の運転時において燃料：潤滑油の混合比で40：1に相当する供給量である。

**3.2 実験結果および考察** 図9に供試潤滑油と機関負荷条件が CCD たい積に及ぼす影響を示す。図

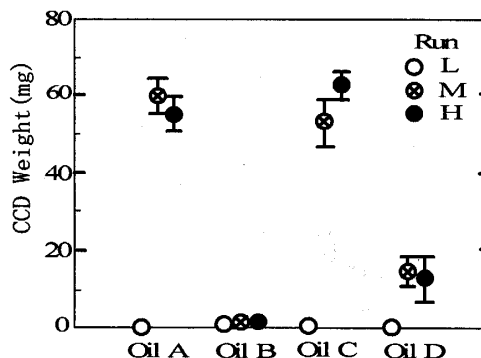


Fig. 9 Comparison of the CCD formation among the test load and the additives

9に示す負荷条件は低回転低負荷( $1400 \text{ min}^{-1}$ , 給気比 $DR=0.2$ , Run L), 中回転中負荷( $2200 \text{ min}^{-1}$ ,  $DR=0.4$ , Run M), 高回転高負荷( $3000 \text{ min}^{-1}$ ,  $DR=0.6$ , Run H)である。図9において、いずれの運転条件でも、添加剤を含まないOil Bに起因する CCD のたい積は見られない。また低負荷条件の Run L においては、いずれの潤滑油においても CCD のたい積は見られない。負荷および回転数を増加した Run M や Run H では、清浄分散剤を含む Oil A や、金属系清浄剤を添加した Oil C は $50\sim 70 \text{ mg}$ ほどの CCD たい積が見られるのに対し、無灰形分散剤を添加した Oil D は $10\sim 20 \text{ mg}$ 程度しかたい積しない。このように、CCD のたい積に対する添加剤の影響は無灰形分散剤を含む潤滑油よりも、金属系清浄剤を含む潤滑油のほうが大きく現れている。たい積した CCD を回収して電子線マイクロアナライザ(EPMA)で分析すると、Oil A および Oil C を用いたときの CCD から硫黄とカルシウムが検出されるが、Oil B および Oil D から検出されない。このことにより Oil A および Oil C に含まれている清浄剤の成分が CCD たい積増加のおもな原因になっているものとみなすことができる。

図10には、オートクレーブ試験により得られた各潤滑油成分からのデポジットと、実機試験により得られた CCD を、熱重量分析試験した結果を示す。潤滑油を構成するおもな成分である鉱物油やポリブデン、および無灰形分散剤は約 $500^\circ\text{C}$ 以上で完全に熱分解してしまうのに対し、金属系分散剤およびその灰分が含まれている CCD では、 $500^\circ\text{C}$ 以上では分解が進行せずに一定の値を示す。実機試験で熱負荷の大きい Run H のほうが残留率が大きく、灰分の含有率が大きくなっていることがわかる。

**3.3 フェージブルプラグによるピストン表面温度の測定** オートクレーブ試験と実機運転の関連を検

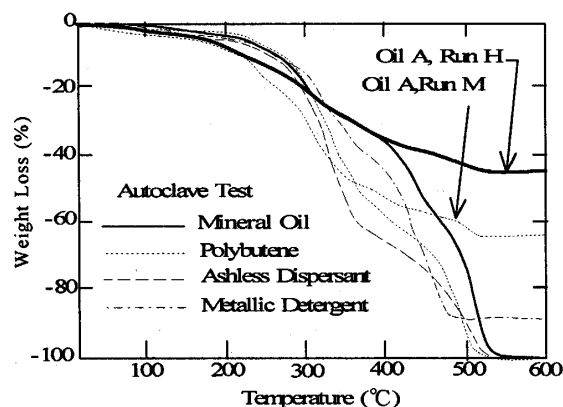


Fig. 10 The thermogravimetry analysis of the deposits and CCD

討するために、融点温度が定められているフェージブルプラグ(FP)を数種類用い、これをピストンヘッド表面に埋め込み、ピストンヘッド面の温度分布を推定した。

あらかじめ市販のフェージブルプラグの融点温度を確かめるために測定を行った。1 cm<sup>3</sup>のアルミニウムブロックにK-タイプ熱電対をFPでしめて取付け、融点温度と指示温度との関係を、マッフル炉中で検定した。その結果を図11に表す。静的熔融試験では呼び温度と実測温度との差は±3°C以下であった。

FPによるピストン上面温度分布の測定<sup>(11)</sup>のために、最初は予測した概略の温度に相当するFPをピストンクラウン上に埋め込んで運転する、目的運転条件に達するまで、アイドル運転から、エンジン回転数と負荷を徐々に増加させていく。目的の条件に達したところで、15 min だけ定常運転を維持する。テスト終了後、回転数・負荷を最初のアイドル状態になるまで徐々に減少していく。測定箇所付近に埋め込まれた3~4点のFPの溶失状態(完全溶失、部分溶失、健全)より概略の温度を推定し、温度範囲を絞り込んだFPを埋め直して、再度同様の運転を繰り返すことによりピストンクラウン上面の温度分布を推定した。測定した運転条件は、低負荷低回転として給気比  $DR=0.2$ 、エンジン回転数  $n=1400$  rpm、中負荷中回転として、 $DR=0.4$ 、 $n=2200$  rpm について調べた。いずれの運転条件においても空気過剰率  $\lambda=1.0$ 、潤滑油供給量  $Q_L=0.95$  cm<sup>3</sup>/min と一定として行った。

図12は低負荷低回転時のピストンクラウンの温度分布である。図12で表したようにピストン中心部から排気孔のほうにかけて温度が高く、200°Cを示している。ピストン中心部から吸気孔の方向に向かって温度が200~165°Cまで徐々に下がっている。この運転条件ではピストンクラウン全体にはデポジットが付着

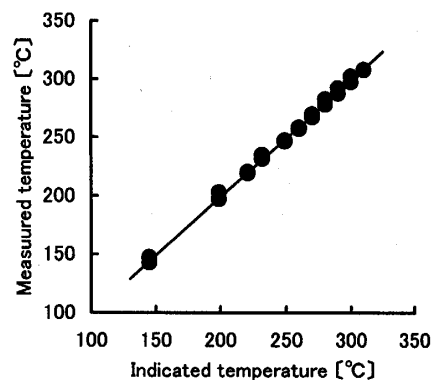


Fig. 11 The relation between the indicated FP Temperature and the measured temperature by the thermocouple

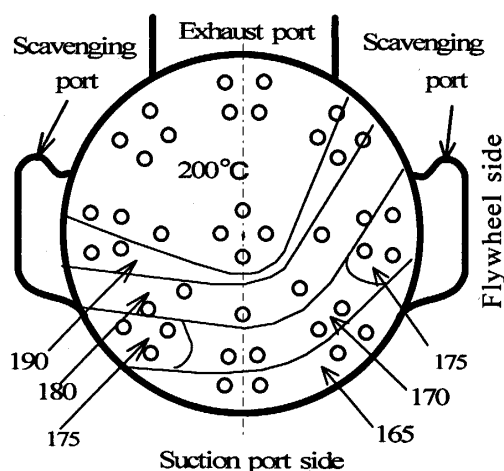


Fig. 12 Temperature profile on the piston crown (Low load)

していない。これはオートクレーブ実験でも明らかになったように、ピストンクラウンの温度が低くてデポジット生成温度に達していないためと考えられる。

図13はFPによって中負荷中回転時に得られたピストンクラウンの温度分布である。図14は温度測定運転後の写真例である。回転数・負荷を徐々に上げていく暖機運転と定常運転を含め、約1hの運転である。図13で表したようにピストン中心部の温度が高く、330°Cを示している。ピストン中心部のまわりとそこから排気孔のほうにかけて320°Cから310°Cを示している。これは高い温度の燃焼ガスがピストン中心部から排気口方面に向かって流れ、ピストン表面に接触しているためと考えられる。反対にピストン中心部から給気孔側に向かっては、温度が280°Cまで徐々に低下している分布となっている。等温線が右上がりになっているのは、冷却ファンが右側にあり、その側がより冷却されている効果が現れたものとみなされている。図14に表しているようにデポジットの付着状況も、ピストン頂部の290~300°Cの範囲で現れ、若干右

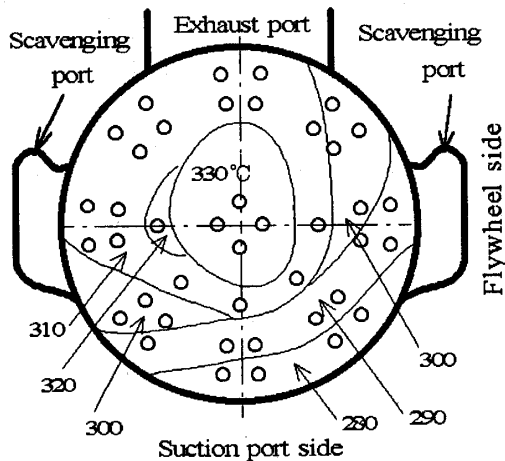


Fig. 13 Temperature profile on the piston crown (Middle load)

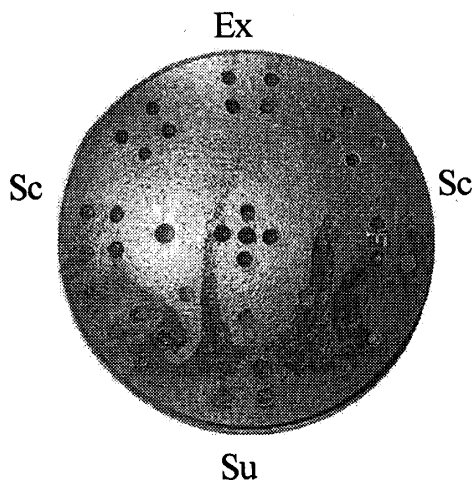


Fig. 14 CCD distribution on the piston crown (Middle load)

寄りとなっていることから、CCDたい積は温度の影響を受けていることがわかる。

#### 4. 結 言

小形2ストロークエンジンに特有な燃焼室デポジットたい積特性を調べる目的で、オートクレーブによる

静的な加熱・加圧試験と実機エンジンを用いて運転を行った。潤滑油に添加されている清浄分散剤の影響を特に明らかにするために、構成成分ごとの検討を行った結果、以下の知見を得た。

(1) ガソリンに比べ、潤滑油のほうがデポジット化する時間は長く、デポジットの生成量も潤滑油のほうが多い。

(2) デポジットが生成する温度には下限が存在し、雰囲気圧力によりその温度は変化する。また、最大にデポジットを生成する温度があり、それよりも高温ではデポジットの生成量は減少する。

(3) CCDのたい積はほとんどが潤滑油の添加剤から生成しており、特に金属系清浄剤が大きい影響を及ぼす。

(4) ピストン表面の温度が290~300°Cの付近でCCDたい積がなされ、これはオートクレーブ試験で最もデポジットが生成される温度領域と一致する。

最後に本研究を行うにあたり、当時大学院生の岩渕力也氏、福井雅人氏、佐藤唯史氏のご助力を得、富士ロビン(株)および出光興産(株)より試料のご提供を受けた。ここに付記し感謝の意を表する。

また本研究の一部は平成15年度日本学術振興会科学補助金、基盤研究(C)(2)の援助を受けて行われたことを記し、関係各位に謝意を表する。

#### 文 献

- (1) Patschull, J. and Roth, P., *SAE Paper*, 941683 (1994).
- (2) 佐藤運男, 陸内誌, No. 465 (2001), 17-29.
- (3) Price, R. J., ほか2名, *SAE Paper*, 971668 (1997).
- (4) 陸内協, *News Release*, 16 (2000).
- (5) Price, R. J., ほか2名, *SAE Trans*, 160-4 (1997), 612-628.
- (6) Kelemen, S. R., ほか4名, *SAE Paper*, 982715 (1998).
- (7) Fukui, M., ほか3名, *JSAE Rev.*, 22 (2001), 281-285.
- (8) 長尾正基・ほか6名, 自技誌, 50-5 (1996), 78-83.
- (9) 小西誠一・上田 亨, 潤滑油の基礎と応用, (1992), 40, コロナ社.
- (10) 佐藤唯史・ほか4名, 機論, 67-658, B (2001), 282-286.
- (11) 日本機械学会基準, エンジンの温度測定, S 007 (1986), 26-28.