

メタノール小形2サイクル火花点火エンジンのトライボロジー*
(ガソリンおよびガス燃料とのシリンダ摩耗の比較)藤田 尚 毅*¹, 小野寺 英 輝*²
伊 藤 光 博*¹, 岩 渕 明*¹Tribology of Small Two-Stroke Cycle Spark Ignition Engine
Fueled by Methanol
(Comparison of Cylinder Wear by Methanol, Gasoline and Gas Fuel)Naotake FUJITA, Hideki ONODERA,
Mitsuhiro ITO and Akira IWABUCHI

This study deals with the tribology of small two-stroke cycle spark ignition engines fueled by methanol, gasoline and gas fuel. During the experiments, lubrication oil is supplied to the intake manifold separated from the fuels, by a carburetor. The degree of wear of each part of the cylinders was represented by the decrease in surface roughness along the sliding direction. Much decrease in surface roughness of each part of the cylinders is observed 10 hours after the start of running. It is shown that a part of a second ring of the cylinder at the top dead center shows a larger degree of wear than the other parts. The degree of wear of each part is dependent on the kind of fuel.

Key Words: Two-stroke cycle Engine, Tribology, Alternative Fuel, Methanol, Surface Roughness

1. 緒 言

メタノールは、CNGや改質ガソリンと並ぶ有力なエンジン用クリーン代替燃料として検討が行われてきている⁽¹⁾。また2サイクルエンジンの再評価⁽²⁾とともに2サイクル火花点火エンジンにメタノールなどの代替燃料を用いた研究も行われるようになってきた。2サイクルエンジンではシリンダ壁面に排気ポートを有するために、潤滑的には4サイクルエンジンよりも厳しい状況に置かれており、ガソリンを用いてシリンダやピストンの形状変化、あるいは焼付きについて実験を行うなど、以前から潤滑や摩耗に関する研究が行われてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。しかしメタノールを燃料とした2サイクルエンジンに関する研究では、そのほとんどが出力性能や排気特性を取り扱ったもの⁽⁵⁾⁽⁶⁾である。トライボロジー的取扱いも重要な事項であり、解決すべき問題が多々あるといわれている⁽⁷⁾にもかかわらず、Guptaらが数種類のエンジン油を用いてリングの摩耗やスティック等を調べた研究⁽⁸⁾などわずかの報告

があるだけで、いまだに少ないのが現状である。最近自動車技術会においても2サイクル油規格⁽⁹⁾が制定されるなどエンジン油の規格の確立や試験法の制定などの積極的な取組みがなされているが、代替燃料を用いる場合についてまでは言及していない。一方、メタノール用のエンジン油に対する課題を取扱ったもの⁽¹⁰⁾でも、2サイクルエンジンの場合までは考慮していない。メタノールはガソリンと任意の割合で混合するが、これに潤滑油や水分が混入すると分離するので⁽¹¹⁾、はん用2サイクルエンジンに用いられているような混合潤滑法での使用はできない。そこで、著者らは以前に小形2サイクル火花点火エンジンにメタノール(M85)とガソリンを燃料として用い分離潤滑法により運転を行い、両者を比較する形でシリンダ上部壁面の摩耗について調べた⁽¹²⁾。その結果ピストン上死点におけるセカンドリング位置での摩耗量が最も大きくなったが、ガソリンとの比較ではむしろメタノールのほうが小さい摩耗量を示し、分離潤滑運転でのメタノールの可能性を示した。しかし、ピストンリングの上死点位置で摩耗量が最大にはなるものの、エンジンの運転に大きな障害となるスカuffingや焼付きはこの個所で発生することはまれであり、このことからシリンダ全体の摩耗状況についても明らかにしておく

* 1996年8月9日 第13回内燃機関シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 1996年7月22日。

*¹ 正員, 岩手大学工学部(〒020 盛岡市上田4-3-5)。

*² 正員, 岩手大学地域共同研究センター。

必要がある。

そこで、本研究では同じはん用小形2サイクル火花点火エンジンのシリンダしゅう動方向について、新品初期状態からの摩耗の進行状況を明らかにすることを目的に分離潤滑法で運転を行った。メタノール(M85)の場合と比較するためにガソリンとプロパンガスをも用いて運転を行った。ガソリンはエンジンオイルと完全に相溶し希釈されてシリンダに供給されるのに対し、プロパンガスはオイルと完全に分離して単独の形で供給されるので、メタノールの場合、この両者の中間的關係に位置づけられると考えたからである。

2. 実験装置および方法

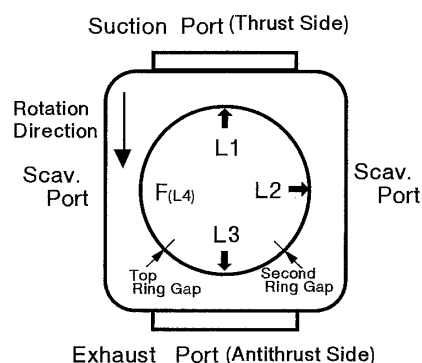
供試エンジンは空冷2サイクル立形ピストンバルブ式火花点火エンジン〔富士重工業(株)ロビン EC-17D型〕で単気筒、排気量 175 cc、行程圧縮比 7.1 である。供試燃料としてガソリン、メタノール(M85；メタノール 85%、ガソリン 15%の混合燃料)および市販プロパンガスの3種類を用いた。ガソリンおよびメタノールは同一の気化器により供給した。この場合メタノールの理論空燃比はガソリンの半分以下であるので、空気過剰率の調整はメインジェットにテーパ付きのニードルバルブを組込んで、これを出し入れすることにより行った。プロパンガスは減圧弁を通し、ほぼ大気圧まで減圧した後に、ニードルバルブ式パージ流量計でガス流量を制御して、気化器と吸気孔の中間に供給し、空気量は気化器のバタフライバルブで調整を行い、所要の空気過剰率と給気比を得た。今回の実験では3種類の燃料に対し、エンジン回転数 $N=2000$ rpm、給気比 $DR=0.4$ 、空気過剰率 $EAR=1$ および出力 $W=1.46$ kW 一定の条件で運転を行った。なお本エンジンシステムの 2000 rpm における WOT 出力は 2.2 kW である。

供試オイルは市販2サイクルガソリンエンジン用エンジンオイル(出光アポロイル 2T)を用いた。エンジンへのオイル供給は2サイクルエンジン用オイルポンプ〔(株)ミクニアデック製〕をシンクロナスモータにより一定回転で駆動し、吸気孔上流 20 mm の位置に滴下させた。オイルの供給量はオイルポンプのスロットルバルブにより開度を調整し 16.12 g/kW・h と 5.04 g/kW・h の二通りの量を供給した。前者はガソリンの場合で 25:1、後者は 80:1 に相当し、それぞれの供給量を記号 R と L で表すことにする。摩耗台上実験をするにあたり、燃料としてガソリン(G)、M85(M)およびプロパンガス(P)の3種類を用い、それぞれに R と L の量でオイルを供給したので、こ

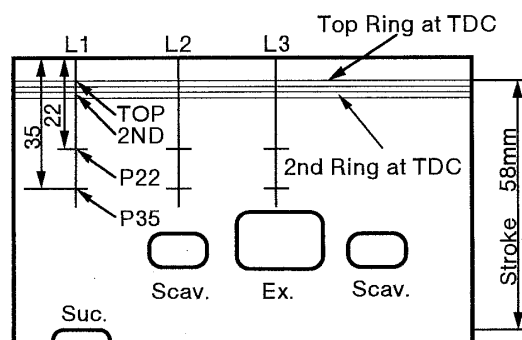
では合計6組のシリンダとピストンの組合せを用いて運転を行った。

シリンダの内面はホーニング仕上げした加工面になっている。新品のシリンダから運転を続けると、ピストンやピストンリングとの摩擦によりシリンダ内面が摩耗し、表面粗さが減少していく。ここではシリンダのしゅう動方向の算術平均粗さ Ra_x について、その時間的変化を調べることにより、燃料の違いによる初期摩耗の進行状況を比較検討した。表面粗さ測定にはランク・テラー・ホブソン(株)製の表面粗さ計(フォームタリサーフ S3)を用いた。

図1に、表面粗さ計で測定した個所を示す。しゅう動方向に吸気孔(L1)、掃気孔(L2)および排気孔(L3)位置の3本のラインについて計測し、各ラインにおいて上死点におけるピストントップリングの位置(TOP)、セカンドリングの位置(2ND)、シリンダ上面から 22 mm の位置(P22)およびトップリングが行程の中間に位置する、すなわちピストン速度がほぼ最大となる 35 mm の位置(P35)の4箇所について、粗さの評価として最もよく使われている算術平均粗さ Ra を計測した。各位置での表面粗さ計測条件は、駆動長さ 2 mm、カットオフ長さ 0.25 mm、評価長さを 1.5~1.75 mm として求めた。なお、ピストンリング



(a) Top view of cylinder



(b) Extended side view

Fig.1 Measuring line on cylinder inner surface

の合い口はトップリングがL3とL4の中間に、セカンドリングがL2とL3の中間にある。また図1(a)においてFマークがフライホイール側で、クランクシャフトの回転方向は下向きになっている。

3. 実験結果および考察

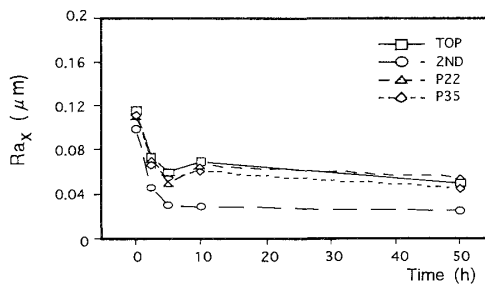
実験に用いたシリンダおよびピストンリングはともに片状黒鉛鋳鉄で、その硬度はHRBで前者は92~103、後者は95~107で、ピストンリングの方が若干硬くなっている⁽¹³⁾。シリンダ表面はホーニング仕上げのみで特に表面処理は施されていない。ピストンリングにおいては、トップリングには硬質クロムメツ

キ処理とパーカライジング処理が施されており、セカンドリングはパーカライジング処理のみである。

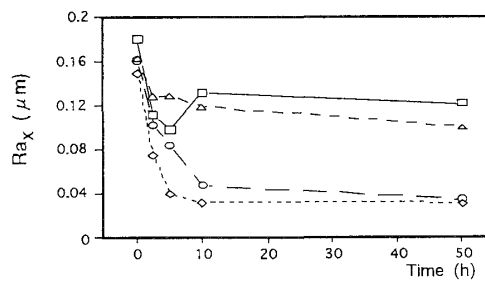
燃料と潤滑油供給量の異なった6組のシリンダとピストンの組合せで、新品状態(零時間)から50時間の運転を行い、各位置におけるしゅう動方向シリンダ内面算術平均粗さ Ra_x の時間的変化を調べた。表1に零時間における各シリンダの Ra_x の平均値を示す。各シリンダの Ra_x はおよそ0.12~0.13であるが、MRに用いたものが大きい Ra_x を示し、PLに用いたものは他よりも小さい Ra_x を示していた。しかし、シリンダ別では粗さの差があるものの、同一のシリンダでは比較的粗さが均一にそろっていた。図2にオイル供給量 R での各燃料によるラインL1における Ra_x の時間的変化を示す。運転時間の経過につれて粗さ Ra_x は減少する傾向を示しているが、ほぼ最初の10時間で定常に落ちついている。GRでは、2ND位置が最も Ra_x の減少が大きいがその他の位置での減少の傾向は類似している。これに対しMRやPR

Table 1 Mean Ra_x of new cylinders

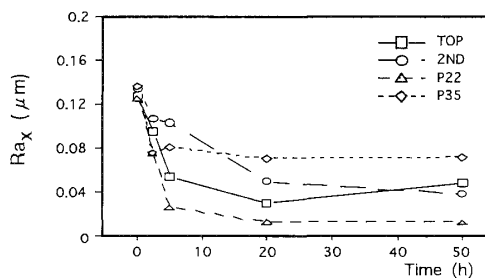
	Mean Ra_x		Mean Ra_x
GR	0.133	GL	0.121
MR	0.163	ML	0.127
PR	0.130	PL	0.072



(a) Gasoline (GR)

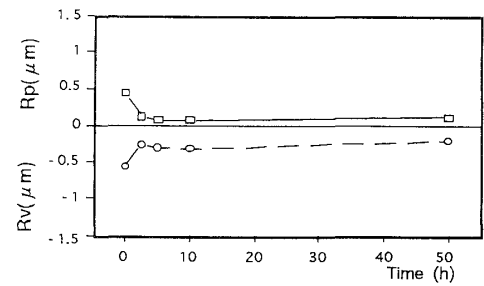


(b) Methanol (MR)

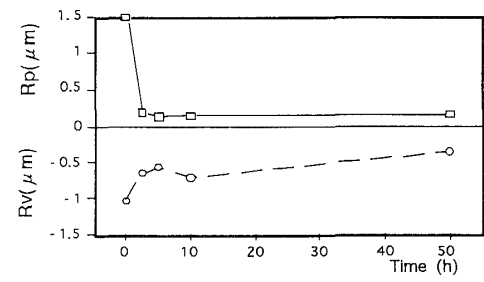


(c) LPG (PR)

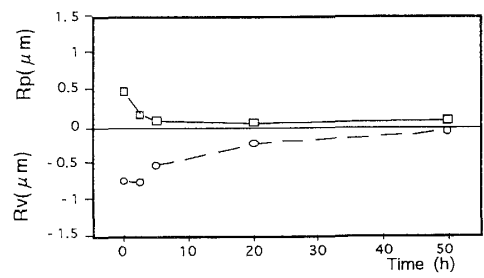
Fig. 2 Change of Ra_x as time proceeds (at L1)



(a) Gasoline (GR)



(b) Methanol (MR)



(c) LPG (PR)

Fig. 3 Change of Rv and Rp (at L1, 2ND)

では位置によって、減少の仕方が異なっている。MRでは2NDとP35の位置が最も減少が多く、TOPとP22の位置では減少が少なく2.5時間程度から緩やかな減少になっている。PRでは他では少なかったP22が最も多い Ra_x の減少を示し、MRで多い減少を示したP35が逆に最も少ない減少となった。L2やL3の他のラインでもL1とほぼ同様の減少傾向が出ており、シリンダ表面の初期摩耗は Ra_x の減少となって現れているとみなせる。ガソリンの場合は、潤滑油がガソリンと完全に混合し、希釈されてシリンダ内に拡散するために、摩耗も各所で一様に進行しているものと考えられる。これに対し、メタノールやプロパンガスでは、燃料とオイルが分離した状態でシリンダ内に供給され、オイルの効果が部分的に多く現れることにより、摩耗進行の少ない部分が出てきたものと考えられる。

次に、評価長さ内で平均線から最深谷までの値 Rv と平均線から最高山までの値 Rp に関する時間的変化を、GRやMRで Ra_x の減少が最も大きかったL1の2ND位置について図3に示す。新品時に最も粗さ Ra_x が大きかったメタノールの場合がやはり Rp 、 Rv ともに零時間で大きい値を示しているが、いずれも Rp の側が最初の2.5時間までに摩耗して減少し、その後一定値を維持するような形になっている。また Rv のほうは時間につれて減少しているの、表面が摩耗することによって平均線の位置が移動し Rv の減少となって現れ、その結果、全体として算術平均粗さが減少したとみなすことができる。

図4に、シリンダ内面のSEM写真を示す。この写真はメタノール(MR)で50時間運転後のL3のラインの各位置について示したものであり、しゅう動方向は写真の上下方向とほぼ一致している。図4(a)はトップリングが上死点に位置する所のもので、しゅう動による縦方向の擦過こみが写真上方から下方に向かってスタートしているのが観察される。写真上端1/4付近より上は、ピストンリングの到達しない部分なので、縦傷が存在せずホーニング加工によるクロスハッチこみの初期の状態がはっきりと残っている。また、トップリングの位置する中央部分では、摩耗のためにクロスハッチこみの底がいくぶん浅くなっているようすが伺われる。

図4(b)はセカンドリングが上死点に位置する所のもので、摩耗の進行によりクロスハッチこみが写真上方で残っているものの、中央から下側にかけては完全に消失している。この部分では、しゅう動面が研磨されたときのように、材料に含まれている黒鉛が表面に

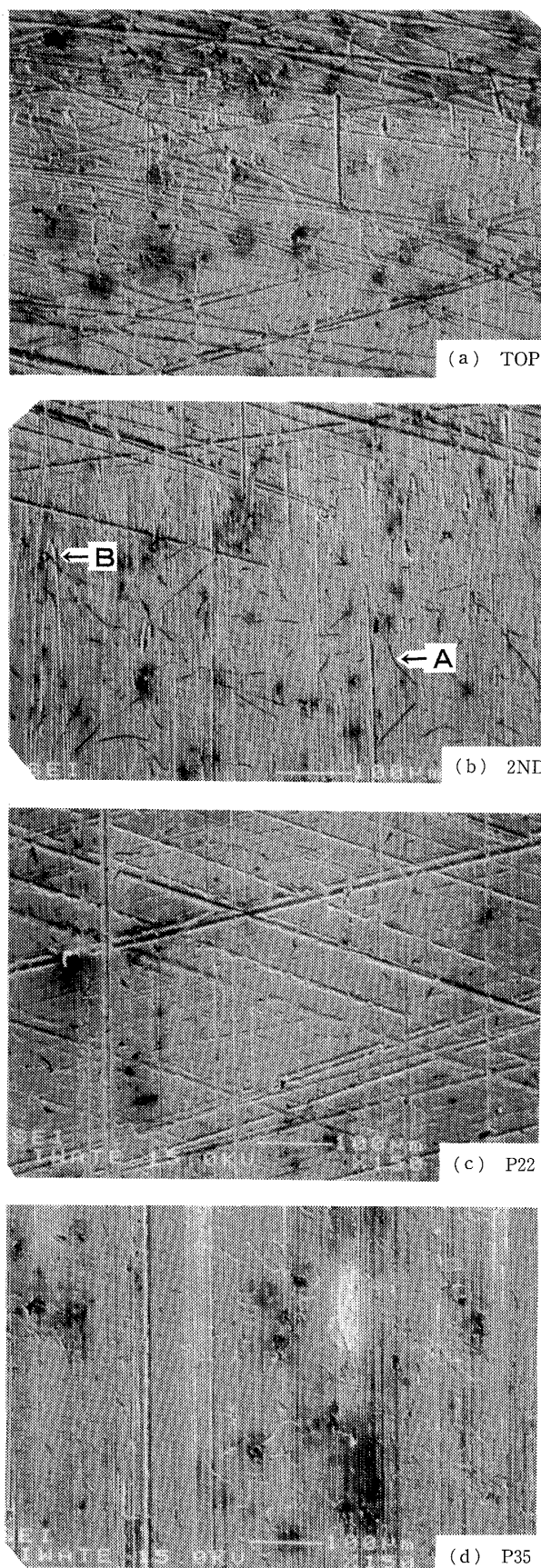


Fig. 4 SEM photographs from cylinder surface (at L3, MR)

露出してきており、はっきりと確認できる(矢印 A)。また、セカンドリング位置の上端からスタートしている傷も観察され、一部は往復の位置が異なる上方に凸の形状をした U ターン状の条こん(矢印 B)となっている。これらの条こんは燃料を変えて運転したシリンダでも同様に観察される。またこの条こんは L3 の 2ND 部分にだけ見られ、同じ 2ND 位置にあっても反対側の L1 ではしゅう動こんは上方から下方までの連続した直線だけであり、U ターンこんはほとんど観察されない。

図 4(c) はシリンダ上端から 22 mm の位置である。ここではホーニングこんははっきりと残っている。斜めに走っているホーニングこんを詳細に観察すると、しゅう動面素地の流動によってあとがつぶされている部分が見られる。また、上方から引きずってきたと思われる傷が垂直に走っているが、これらの傷はホーニングこんよりも大きくはない。

図 4(d) はシリンダ上端から 35 mm の位置であり、ピストン速度が最大になる位置に相当する。ここではクロスハッチこんは完全に消滅し、あとの太きよりも細かい無数の縦傷のみが観察される。2ND と P35 の位置ではともにホーニングこんが消滅するほどの摩耗を示しているが、摩耗形態は異なっているものと考えられる。2ND の位置ではピストン速度がほとんど零になり、かつトップリングも低速で通過するのに対し、P35 ではピストン速度が最も早くなる時点でのしゅう動になる。2ND では黒鉛が表面に露出していたのに対し P35 の位置で表面を素地が流動して覆ってしまい、黒鉛は見られず、繰返し荷重を受けて表面がうろこ状の様子が観察される。

以上、縦方向の位置の違いによる摩耗状況の変化を表面状態の観察により示したが、他のガソリンやプロパンを燃料とした場合でも同様な傾向を示し、燃料の違いや潤滑油供給量の違いによる摩耗の差は、目視だけでははっきり識別できない。そこで 50 時間後の粗さ $Ra_x(50)$ と新品のときのシリンダの粗さ $Ra_x(0)$ との比 $\lambda [=Ra_x(50)/Ra_x(0)]$ を用いて摩耗の進行度合いを摩耗ランクとして $L_f=1\sim 3$ に分類して比較したものを表 2 に示す。ここで摩耗の目安として用いた摩耗ランク L_f は、初期粗さから Ra_x が半分になったもの ($\lambda \geq 0.5$) までを $L_f=1$ 、さらにその半分になったもの ($0.5 > \lambda \geq 0.25$) を $L_f=2$ 、それ以下 ($0.25 > \lambda$) を $L_f=3$ として表した。燃料や潤滑油の量の差を無視してシリンダの各ライン位置だけで合計したものを表の右端欄に示す。シリンダ全周に渡って 2ND の位置が Ra_x の減少が大きい、L3(排気孔側、反スラスト側)と L1

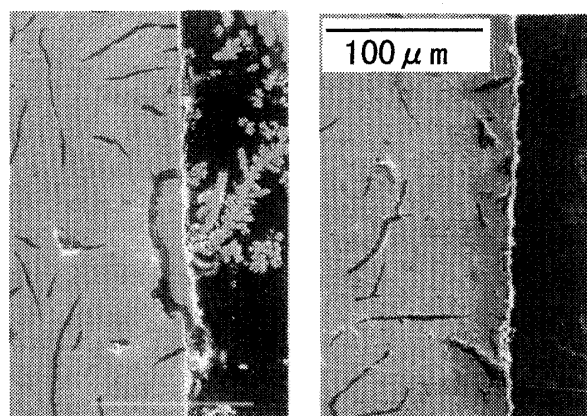
(吸気孔側)では P35 でも Ra_x の減少が大きくなっていることがわかる。実際に別のエンジンで運転中に焼付きが発生した場合のシリンダを見ると、スカuffィングが発生した場所と L1 と L3 の P35 の摩耗が大きく現れている付近とが対応している。また、ホーニングこんが残っている TOP 部分や P22 部分は L_f が小さく、逆に 2ND や P35 のホーニングこんが消滅した部分は L_f が大きくなっている。また前回の結果で⁽¹²⁾ 2ND のガソリンでの摩耗がメタノールの場合よりも大きくなっていたが、この表からも同様の結果を読みとることができる。このように摩耗ランク L_f はシリンダ内各位置の摩耗状況をある程度表しているとみなすことができる。

次に燃料の違いによるシリンダ別の摩耗ランク合計についてみる。ライン全体の合計についてはメタノールの場合がガソリンとプロパンガスの中間に位置するような値にはなっている。ただし潤滑油量の多いほうではプロパンガス(PR)のほうが摩耗ランクの合計は多く、逆に潤滑油量の少ないほうではガソリン(GL)のほうが多い結果となった。また PL では、潤滑油量が少ないにもかかわらず PR よりも摩耗ランク合計が小さくなった。これは初期粗さの違いによるものと思われる。摩耗が進行していくと図 2 に見られるように Ra_x が減少し、ある程度の値に漸近していく形になる。PL に用いたシリンダは表 1 に示されるように他のシリンダよりも初期の Ra_x が小さく、漸近するまでの量が少ないために合計値が小さくなったものと思

Table 2 Wear estimation from wear ranking

Position	GR	GL	MR	ML	PR	PL	Total
L1 TOP	1	2	1	2	1	1	8
2ND	3	3	3	2	3	3	17
P22	1	2	1	2	2	2	10
P35	2	3	3	3	2	2	15
L1 total	7	10	8	9	8	8	50
L2 TOP	1	2	1	2	2	2	10
2ND	3	2	3	2	3	2	15
P22	1	1	2	1	2	1	8
P35	1	1	2	2	2	1	9
L2 total	6	6	8	7	9	6	42
L3 TOP	1	2	2	2	2	1	10
2ND	3	2	2	2	3	2	14
P22	1	2	1	1	2	1	8
P35	3	3	3	3	2	2	16
L3 total	8	9	8	8	9	6	48
Total	21	25	24	24	26	20	

little decrease of $Ra_x \rightarrow 1$, much decrease of $Ra_x \rightarrow 3$



(a) GR

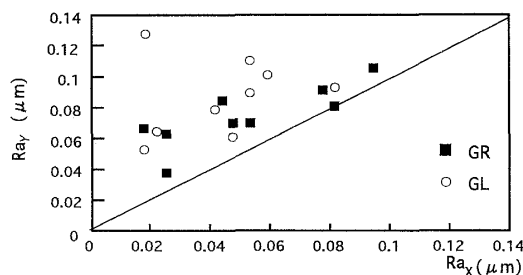
(b) MR

Fig. 5 SEM photo from cross section of cylinder surface (at L3)

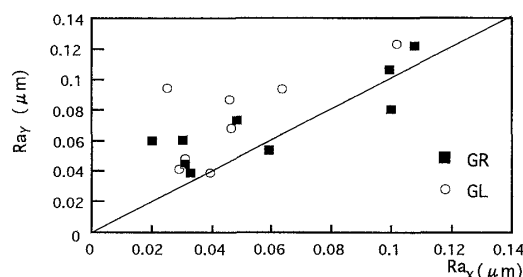
われる。各ラインごとの合計についてみると、メタノールの L_f の合計は7~9で摩耗ランクの分布が平均的なのに対し、プロパンガスの場合は6~9、ガソリンでは6~10と、摩耗ランク合計が小さいところもあるが、メタノールよりも著しい粗さの減少を示し、摩耗程度の分布に大きな幅があることがわかる。

図5(a), (b)に、それぞれガソリン(GR)とメタノール(MR)の場合のシリンダ面に垂直方向断面のSEM写真の例を示す。両者のシリンダとも50時間運転後のものでL3におけるTOP~2ND付近の位置である。中央の縦方向の境界がシリンダ表面で、左側がシリンダである。GRの面は表面が滑らかであり所々に、表面が黒鉛の部分境界にしてはがれかけている部分や、素地と同一組織をしている付着物が表面に観察される。MRのほうは、ここでは図4(c)P22の面に見られるようなホーニングこんがまだいくらか残存している部分があるために、表面がGRよりも粗くなっているのがわかる。またGRで見られたような付着物は、この部分ではほとんど観察されず、燃料の違いにより摩耗機構に差があるように見受けられる。

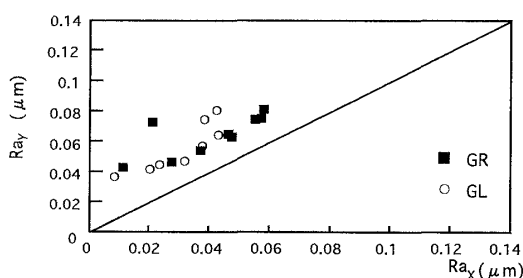
シリンダの形状と粗さ測定器構造の関係上、時間経過による表面粗さの変化は、ピストンのしゅう動方向にしか測定できない。しかし、シリンダとピストンのしゅう動による摩耗は縦方向の擦過こんを形成する。縦方向こんの粗さを調べるためには、シリンダの周に沿った方向の粗さを測定しなくてはならない。そこで50時間運転後のシリンダを縦方向にL1, L2およびL3の各部分を分割し、周方向の算術平均粗さ Ra_y を測定した。同一場所におけるしゅう動方向の粗さ Ra_x と比較したものを図6に示す。図6中の実線は $Ra_x = Ra_y$ を表している。 Ra_x より Ra_y のほうがい



(a) Gasoline(GR)



(b) Methanol(MR)



(c) LPG(PR)

Fig. 6 Relation between Ra_x and Ra_y

く分大きくなっているのは、シリンダの曲率やしゅう動方向の縦傷が影響しているためとみなせる。メタノールとガソリンでは分布に大きな差が見られず、プロパンは粗さの小さいほうに偏っているが、その分布の仕方は比較的実線に平行な形になっており、 Ra_x と Ra_y との間にはある程度の相関が見られる。燃料の違いによる Ra_x と Ra_y の差はメタノールとガソリンでははっきりと出てはいないが、潤滑油量の多少で見るとMLよりもMRが、GLよりもGRが比較的実線に近いところに存在している。すなわち、潤滑油の多いほうが Ra_y が小さくなっており、しゅう動方向の擦過こんが少なく潤滑油量の効果が現れたものと思われる。

4. 結 言

小形2サイクルエンジンに燃料としてガソリン、メタノールおよびプロパンガスを用いて分離潤滑方法で運転を行い、シリンダの摩耗状況を算術平均粗さの交

化を調べることにより比較した。その結果を以下に示す。

(1) 初期摩耗の状況はしゅう動方向の表面粗さの減少量を用いて表すことができる。特に最初の10時間までの減少量が大きい。

(2) 燃料の違いによる摩耗進行状況については、ガソリンでは場所によらず一様に摩耗が進行するのに対し、メタノールやプロパンガスでは進行状況が異なる。

(3) シリンダのしゅう動方向での摩耗は、各燃料ともに上死点におけるセカンドリング位置が最も大きい。次いで大きいのが、ピストンの最大速度になるスラスト側と反スラスト側であるが、ここの摩耗の形態はセカンドリング位置での摩耗形態と異なっている。

(4) 潤滑油供給量の多少は、しゅう動方向の擦過こんに影響を与え、供給量の少ないほうが周方向の粗さが大きくなる傾向がある。

最後に本研究の遂行に際し、当時岩手大学大学院生今西宏文君ならびに岩手県工業技術センター和合健氏のご協力を得、また日本機械学会 RC120 研究分科会

(主査：染谷常雄武蔵工大教授)ならびに富士重工業(株)丸加幸男氏よりご援助いただいたことを記して謝意を表す。

文 献

- (1) 遠藤拓也・ほか3名, 新エネルギー自動車, (1995), 60, 山海堂.
- (2) 古浜庄一, 内燃機関, **29**-366 (1990), 9.
- (3) 富塚清, ニサイクル機関の研究, (1966), 249, 養賢堂.
- (4) 平綿勝彦・田辺明, トライボロジスト, **39**-2 (1994), 145-152.
- (5) 藤田尚毅・ほか3名, 機論, **61**-585, B(1995), 1942-1947.
- (6) 澤則弘・ほか3名, 機論, **56**-530, B(1990), 3187-3192.
- (7) 自技会編, 自動車のトライボロジ, (1994), 103, 養賢堂.
- (8) Gupta, M., ほか3名, *Rep. 7th Int. Symp. Alcohol Fuel Tech.*, (1986), 364-369.
- (9) 野田憲一, トライボロジスト, **39**-10 (1994), 839-844.
- (10) 細野恭司・ほか2名, トライボロジスト, **36**-11 (1991), 873-876.
- (11) Nakayama, M., *Mot. Veh. Technol. Mobil Prosperity*, No. 852200(1985), 185-191.
- (12) 藤田尚毅・ほか3名, 機論, **60**-571, C(1994), 1027-1032.
- (13) 富士重工業(株)技術資料, ピストン及びリング材質, (1992).