

# ロータリ・エンジンの L. P. G. 駆動 (第 3 報)

## — 空燃比について —

広島自動車工業短期大学

西 田 祐 三

Rotary Engine Driven by Burning L.P.G. (3rd Report)

— Air-Fuel Ratio —

Hiroshima Junior College Automobile Engineering

Yuso Nishida

As one process of developing the Rotary engine with low fuel consumption, we made an experiment on the air-fuel ratio. And we tried to seek the air-fuel ratio for good fuel efficiency, for little dropping in torque and for good driveability without misfire at full load. The main results are as follows. For the fuel of Rotary engine, L. P. G. can be used in leaner air-fuel ratio than Gasoline. And Rotary engine using L. P. G. for fuel have better fuel consumption than using Gasoline. Especially, the consumption is best at low speed 2000~3000 r. p. m., and so L. P. G. is suitable fuel for Rotary engine at low speed.

### 1. ま え が き

始めに、今後のエネルギー問題は、毎年、先進国首脳会議でトップ議題としてあがり、昭和55年のベネチア・サミットでの代替エネルギー開発の利用宣言を受けて、代替エネルギーの増量が決まった。そこで通産省は、石油代替エネルギーの開発導入に当って、民間の活力を積極的に活用していくため、石油代替エネルギー関連の我が国の代表的企業 100 社以上を結集して新エネルギー振興財団を昭和55年9月中に発足させることを決めた。また、代替エネルギーの中核体となる通産省の特殊法人である、新エネルギー総合開発機構が昭和55年10月1日に発足することで、新エネルギー振興財団のスタートと合わせて官民一体の開発推進体制が整うことになった。全エネルギーの72% (昭和53年度) を石油に依存する我が国は、1990年には代替エネルギーを現在の石油換算日量 170 万バレルから 490 万バレルに増やすことがサミットにより決められている。そのため通産省は、昭和55年9月までに代替エネルギー源別に供給目標を定め、この目標の実現を目指して、新エネルギー総合開発機構に対して10年間で約3兆円を投入し、石炭液化や太陽熱利用、一般炭や地熱開発などを強力に推進する構えを取っている。そこで、これらの代替エネルギーからも総合プラントにより L. P. G. は容易に作り出さ

れるため今後のエネルギーとして非常に有望と考えられる。

次に、今後の内燃機関を論ずれば、省燃費およびそれに燃焼の上で相関する排気ガス対策の両者を満足すること、いいかえればその妥協点を探索する必要にせまられている。そして、この両者の問題を考える上で当然燃焼を研究し、従来以上に燃焼にメスを入れることにより両者の妥協点は見い出されると思われる。そこで、排気ガス対策の基本的な考え方は燃焼室より放出されるCO、HC、NO<sub>x</sub>を可能な限り少なくすることであり、そのために空燃比(A/F)、点火時期、燃焼室形状、EGR(Exhaust Gas Recirculation)、バルブ・タイミングなどを考える必要がある。特に、燃焼制御に大きく関与するものとして空燃比がある。この空燃比は特にCOに大きく影響し、理論空燃比より薄い(リーン)場合はほぼ一定の低濃度であり、それより濃く(リッチ)なると急激に増大する。一方、HCは理論空燃比附近でもっとも減少し、それよりリッチでもリーンでもHCは急増する。リーン側においてリーン限界の拡大によるHC低減対策を行なうには、混合気の乱れ、燃焼室形状、火花エネルギー等を考える必要がある。次にNO<sub>x</sub>はHCに反して理論空燃比附近で最大となり、それよりリッチでもリーンでも燃焼ガス温度が低下するためNO<sub>x</sub>は減少する。NO<sub>x</sub>の低減を図る場合、リーン化による方法はCOへの影響がそれほどなく、HCについても有利であるが燃焼変動が大きくなり、エンジンの安定が悪くなり、特にNO<sub>x</sub>低減効果はかなりリーン位置でないと得られない。しかし、リーン空燃比で安定した燃焼が要求され、この点ではHCと同じであり、そのため許容限界内での空燃比リーン化によりNO<sub>x</sub>の低減を図らねばならない。この場合には点火時期制御とEGRとを組み合わせる必要がある。以上のことから現在の排気ガス対策は空燃比のリーン化のもとで安定した燃焼を行なわせる制御を行ない、排気ガス対策と相関するものもっている省燃費もやはり空燃比リーン化し、安定した燃焼制御により行なっている。この安定した燃焼を得るには燃焼変動を小さくする必要がある。このように変動率、NO<sub>x</sub>、CO、HCを考える上でかせないものとして空燃比が考えられ、空燃比をリーンに移行して流速を速める改善が排気ガス対策と省燃費に考えられる。

また、近年のロータリ・エンジン(R. E.)の開発は、ロータリ・エンジンの特徴である排気ガス温度が高いことを利用して、空燃比をリッチ化し点火時期の遅角化の条件にサーマル・リアクタを加えて排気ガスの浄化を図ってきたが、省燃費の必要に迫られた現在は排気ガス規制との両者の混在の中で、今までとはまったく反対側であるリーン空燃比に移して対策が行なわれている。<sup>1) 第1報,<sup>2) 2報<sup>3)</sup></sup>で、L. P. G.によるロータリ・エンジンの点火時期の機関性能への影響およびガソリンとの比較を行ってきたが今回は、ロータリ・エンジンの空燃比について調べた結果が得られたので、ここに報告する。</sup>

## 2. 実験装置および方法

今回の実験装置の概略図を図1に示す。ガソリンの計量はビューレットにより行ない、L. P. G.はガスメータにより計量し、空気量はラミネー・フロー・メータにより計量を行ない、ガソリンの場合とL. P. G.の場合の空燃比を求めた。失火の判定のために、ロータリ・エンジンのリーディング側スパーク・プラグに圧力ピック・アップを取り付け、エンジン指圧をオシロスコープにより観

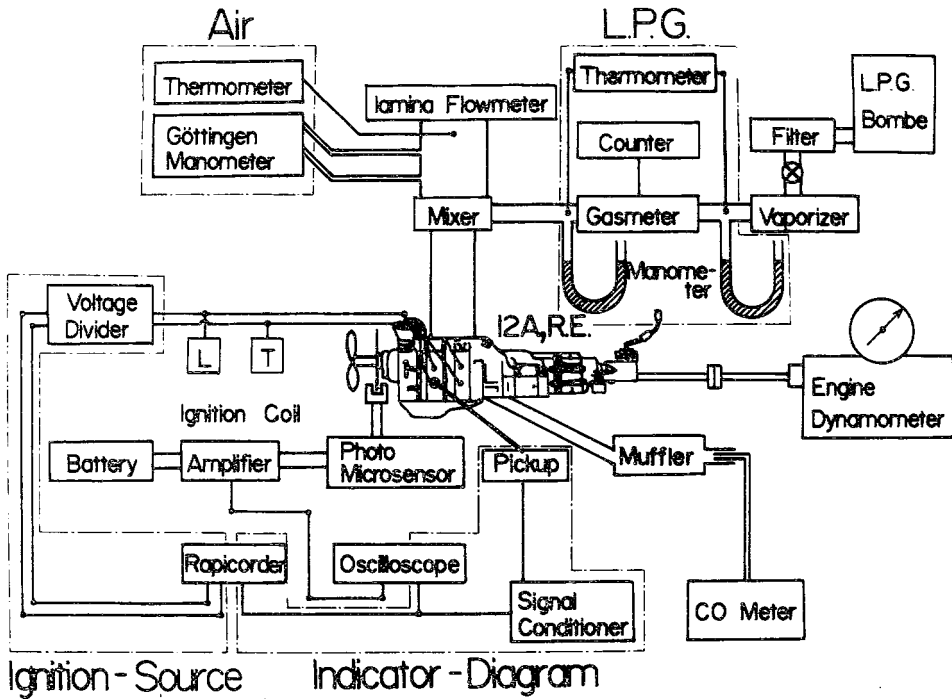


Fig. 1 Testing equipment

測すると同時にラピコダで記録した。また、上死点マークはエンジンのプリーに光セクターを取り付け、ホトカプラーにより信号を取り出しロータリ・エンジンの指圧と同調させてオシロスコープで観測した。次にスパーク・プラグの電圧を二次側のハイテンション・コードより取り出しロータリ・エンジンの指圧と共にラピコダに導き、スパーク・プラグのスパークを確認しながら失火の判定を行なった。失火の判定においてロータリ・エンジン構造の特殊性を生かした独特な手法をもちいた<sup>4)</sup>。この方法として、ロータリ・エンジンの作動はロータの回転により行なわれ、そのロータには作動室が3室ありその室の仕切りとしてアベックス・シールがある。そのアベックス・シールがリーディング・プラグ孔を通過すると燃焼室内の圧力をリーディング・プラグ孔より取り出すことになっているため、次の作動室の圧力が取り出され、これが連続して行なわれる。よって失火の判定は、作動室と作動室のエンジン指圧のつながり位置における指圧の高低において、失火の場合にはその位置の圧力が低く現われ、燃焼の場合にはその位置の圧力が高く現われる。このことにより失火および燃焼の判定を行なった。しかし、この失火にはスパーク・プラグのスパーク・ミスによる失火も考えられるからスパーク・プラグは確実にスパークしているかどうかという確認も同時に行なった。なお、供試機関として12A型ロータリ・エンジンを採用し、エンジン・ダイナモメータによりJIS・D-1003での負荷試験における全負荷試験で空燃比変化による各測定を行ない比較を行なった。その空燃比変化において、ガソリンを燃料とした場合はキャブレターのプライマリー、セカンダリーのおおののメイン・ジェット、メイン・エアー・ジェットの径を変えることにより室燃比を変化させた。一方、L.P.G.を燃料とする場合には、リッチ側空燃比の変化はべ

パーライザーのプレッシャー・アジャスト・スクリューにより行ない、リーン側空燃比の変化はミキサーのメイン・アジャスト・スクリューにより行なった。また、その他の装置および燃料は前報と同じである。<sup>3)</sup>

### 3. 結果および考察

一般内燃機関における火炎の広がりや左右するものとして回転数、混合気、圧縮比、ガス速度、点火栓、スパーク特性、温度などがあり、火花点火機関での燃焼は、第一段階で火炎核からの波紋が広がるように火炎が混合気中を伝わり広がって、ついに燃焼室全体の混合気が燃焼する。<sup>5)</sup> ロータリ・エンジンも同じで、さらに燃焼質量はロータとともに移動し、点火栓はハウジング側にあるから火炎核は原則として点火栓付近にとどまらず回転方向へ激しいガスの流れとともに移動する。そのため火炎前面はハウジングに対してもロータに対しても相対的に相当な速さで回転方向へ移動する。極端な場合反回転方向の火炎前面は静止するか、あるいは回転方向へ流動する場合もある。この二つの現象は往復エンジンと異なった火炎伝ばである。<sup>6)</sup> 今回は、供試機関である12A型ロータリ・エンジンによる。L. P. G.とガソリンを燃料したときの回転数と空燃比変化に対するトルク変化の相違と失火とを調べた（点火時期は最大トルク時の最適点火時期による）。<sup>2)</sup> 図2において、ガソリンを燃料とした時のトルクは空燃比14ぐらいでもっとも大きくなっている。これは空燃比が14ぐらいで第一段階の燃焼時間が短く、それより空燃比がリッチでもリーンでも燃焼時間は長く、空燃比14ぐらいで最小となる。そのため火炎の冷却が少なく熱効率が良くなりトルクが最大になったと考えられる。<sup>7)</sup> また、空燃比11~17ぐらいの範囲内では、第一段階の燃焼時間も火炎伝ば速度（定トルクの場合）も空燃比14の場合とあまり変わらない。<sup>7) 8) 9)</sup> しかし、それ以上に空燃比がリーンに位置すれば第一段階の燃焼時間が急激に長くなるため火炎のバラツキは大きくなる。このバラツキと混合気自体の燃焼のバラツキとが混在してトルクが低下する。一方、L. P. G.では空燃比15ぐらいで混合気の燃焼時間が短くトルクが最大となる。リーン空燃比に限って言えば、その最大トルク時の空燃比から空燃比19ぐらいの範囲ではトルク低下が少ない。このことは火炎伝ば速度が大きく変らないことによるものと推定できる。空燃比19よりリーンになると大きなトルク低下となる。これは火炎のバラツキが大きくなることによりこのような結果が得られたものと考えられる。この大きなトルク低下を起こす空燃比は、ガソリンの場合16~

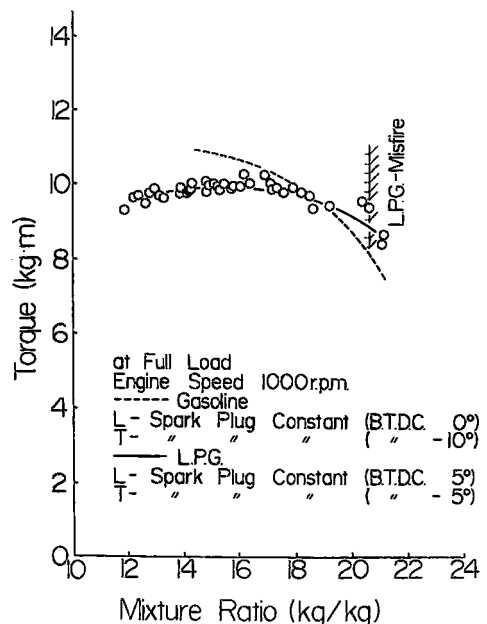


Fig. 2 Effect of air-fuel ratio on torque at full load and 1000 r.p.m.

17ぐらい、L. P. G. の場合19ぐらいでガソリンよりL. P. G. の方がリーン位置に存在する。このことは混合気自体の燃焼のパラッキが少ないためL. P. G. はガソリンより空燃比に対して鈍感であり、<sup>10)</sup> またL. P. G. の理論空燃比がガソリンの理論空燃比より大きいことが原因であると考えられる。図3は、エンジン回転数を2000 r.p.m に変えて前述と同じ実験を行なった結果である。回転数が大きくなるにつれて混合気自体の速度の増加のため回転方向への火炎伝ば速度が増加するが、1 サイクル当りの所要時間が短縮されるため火炎がばらつき、空燃比変化に対してトルク低下が大きくなる傾向にある。図4は、エンジン回転数3000 r.p.m の時である。空燃比変化によるトルク変化は、エンジン回転数2000 r.p.m 時と同じ傾向にある。失火限界空燃比は、回転数の増加とともにリーンに移動している。

次に、失火に関して一般内燃機関では、吸入管負圧（充てん効率）、空燃比、残留ガス（EGR）等が失火限界に大きく影響する。ロータリ・エンジンでは点火栓の位置、数およびEGRもまたこの失火限界に影響を与える。<sup>11)</sup> その上、さらに失火限界は燃焼室、ポート・タイミング、気化器特性、点火エネルギー、着火のプロバビリティ、ガス・シールからの漏れなどによってももちろん影響されるが、<sup>11)</sup> 今回は、空燃比を変化させることにより失火と失火限界を調べた。図5、6、7は、L. P. G. を燃料として空燃比を変化させ失火を測定した結果で、それぞれエンジン回転数が1000 r.p.m、2000 r.p.m、3000 r.p.m の場合である。図5において、失火限界空燃比は20.5 ぐらいである。それ以上リーンでは少しの空燃比変化でも失火が大きく現われトルクも急激に低下する。なお、失火限界は25秒に2回以上の失火をする場合と定義した。

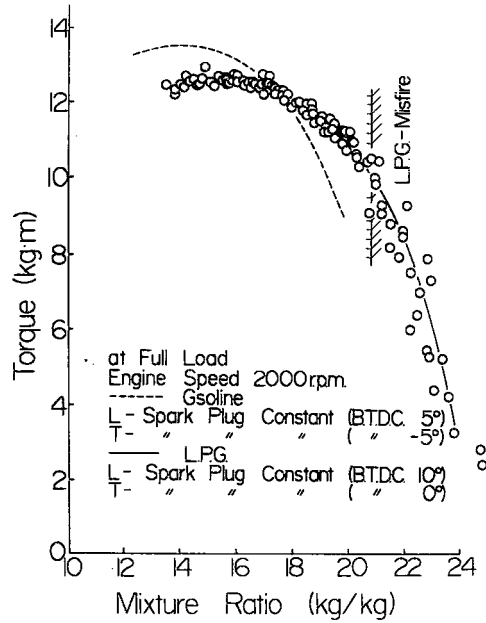


Fig. 3 At 2000 r.p.m.

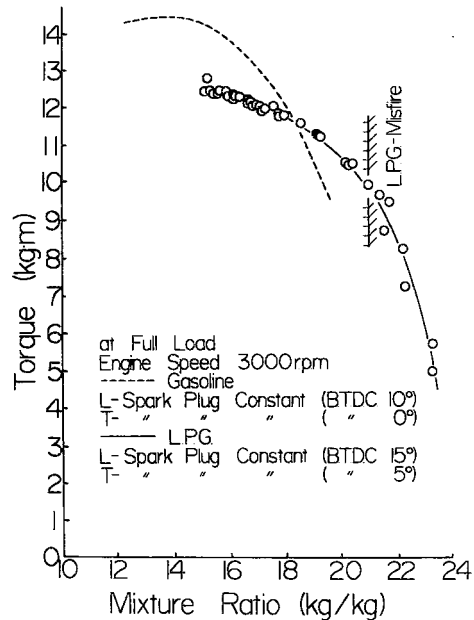


Fig. 4 At 3000 r.p.m.

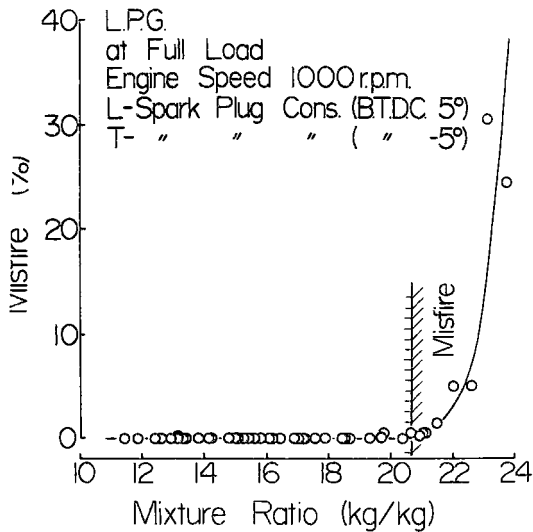


Fig. 5 Relation between air-fuel ratio and misfire at full load and 1000 r.p.m. when using L. P. G.

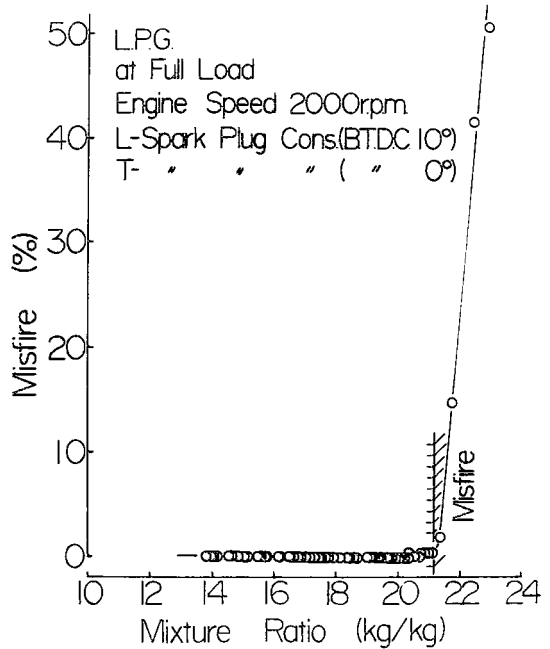


Fig. 6 At 2000 r.p.m.

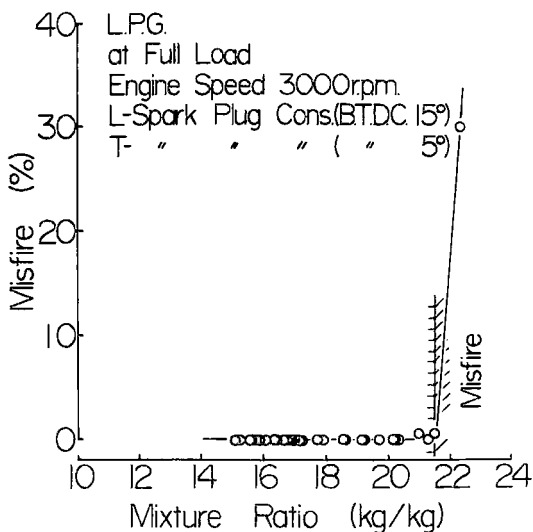


Fig. 7 At 3000 r.p.m.

図 6, 7 において, 失火限界空燃比は 1000 r.p.m とあまり大きくは変わらない。しかし, 最大トルク位置 (第二報でのエンジン回転数 2000, 3000 r.p.m) で失火限界空燃比は最もリーンになり, エンジン回転数 4000 r.p.m ではリッチ側へ移動する。このことは, 充てん効率が最大トルク位置でもっとも大きくなり, 失火しにくくなることが原因と考えられる。なお失火は点火栓のスパーク・ミスによる場合も考えられるが, スパークは確実に飛んでいることを確認している。

図 8, 9 は, 失火空燃比付近の非常に不安定な混合気 (空燃比) の場合のエンジンの指圧をラピコダで記録し, 失火パターンを観測した結果の一例である。図 8 は, エンジン回転数が 1000 r.p.m の時で空燃比 22.5 の失火を起している状態の指圧波形である。失火パターンをみると燃焼と失火が交互に現われ

る場合と3回連続して失火が現われる場合とがある。図9は、エンジン回転数が2000 r.p.m.、空燃比が22.5の時の失火状態を調べた指圧波形である。やはりエンジン回転数が1000 r.p.mの時と同じパターンで失火が現われている。この理由として隣接作動室の関係をみると、オーバー・ラップ時に回転の遅れ側の作動室が燃焼から排気に移っている。その燃焼ガスがEGRとなって進み側の作動室（吸入行程中）に多量に流れ込み、その作動室内の残留既燃ガスと新規の吸入混合気の三者が混り合う。そしてそのガスは薄められ着火限界濃度以下の場合に失火する。失火後の作動室内には未燃ガスが多く残留するために失火の次のサイクルにおいてはその燃焼室内の混合気は燃焼しやすく失火を起こさない。今回のようにリーン空燃比限界よりリーンの空燃比では、少しの条件変化によっても失火が起きやすくなり、ロータリ・エンジンの失火パターンは交互または3回連続の失火が現われたと考えられる。

次に、図10～15は、空燃比に対する燃料消費率（be）と平均有効圧力（PME）について、それぞれガソリンとL.P.G.とを燃料とし、エンジン回転数が2000、3000、4000 r.p.m.の場合の結果を示す。トルクのところで説明したように、ガソリンの場合空燃比16～17ぐらいよりリーンの空燃比では火炎核の発生時間が長いため、全体の混合気の燃焼時間が長くなり、火炎も冷却されやすくなり熱効率が低下し、平均有効圧力も大きく低下する。<sup>5)</sup> 一方、

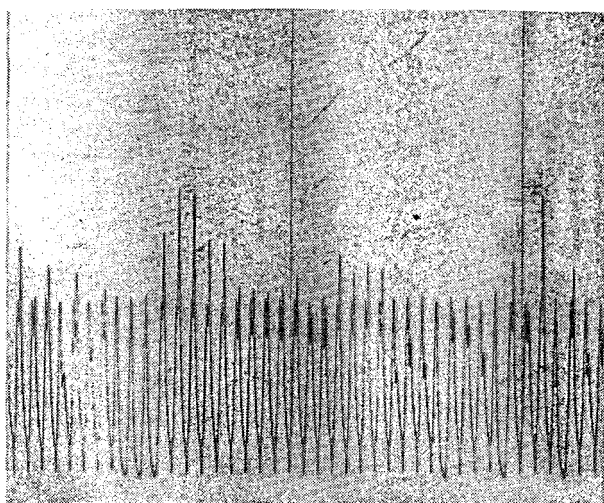


Fig. 8 Sample of a series of indicator diagrams at full load and 1000 r.p.m. with A/F 22.5 using L.P.G.

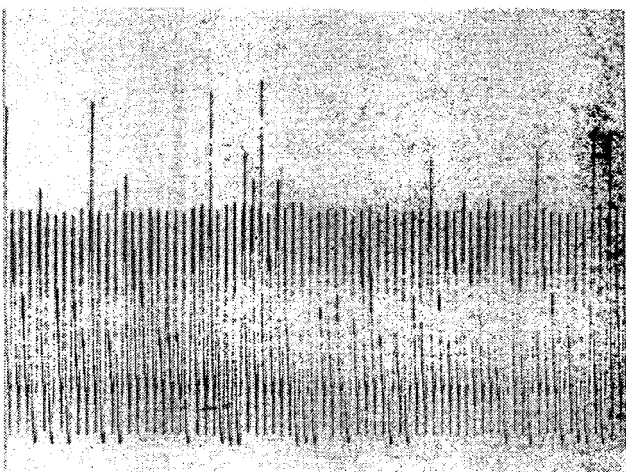


Fig. 9 At 2000 r.p.m. with A/F 22.5 using L.P.G.

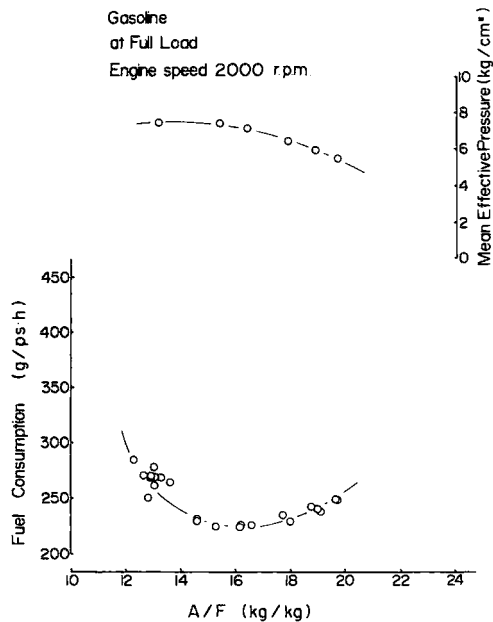


Fig. 10 Effect of air-fuel ratio on fuel consumption and mean effective pressure at full load and 2000 r.p.m. when using Gasoline for fuel

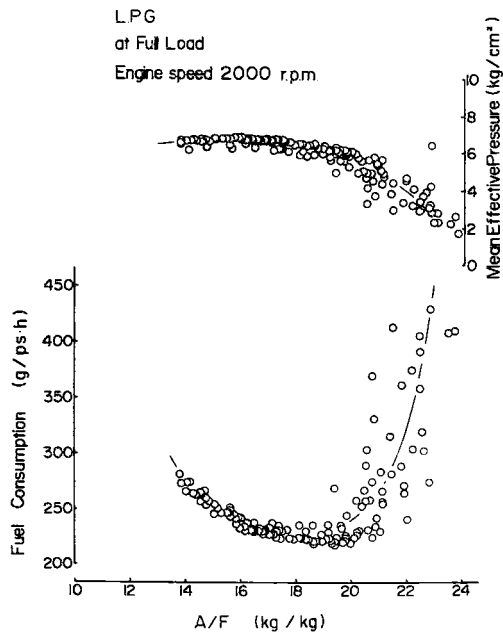


Fig. 11 At 2000 r.p.m. using L. P. G.

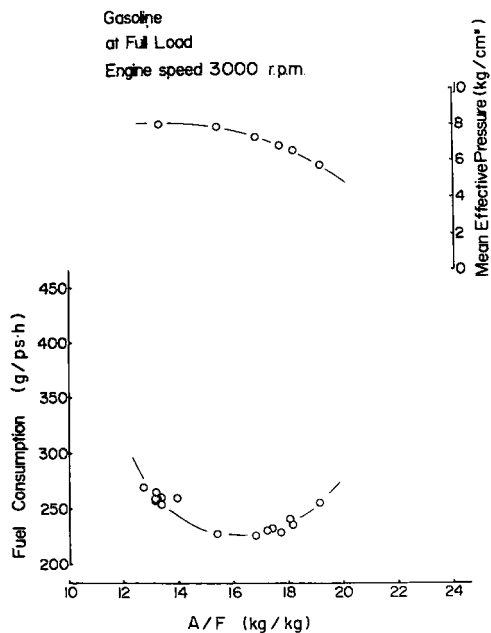


Fig. 12 At 3000 r.p.m. using Gasoline .

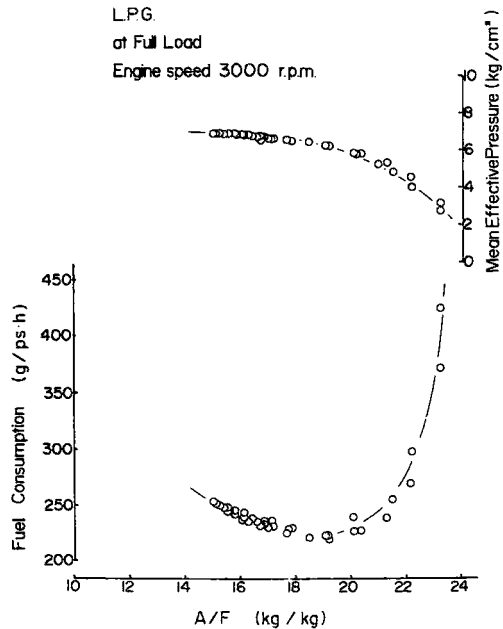


Fig. 13 At 3000 r.p.m. using L. P. G.



L. P. G.の場合、空燃比が19ぐらいよりリーンな状態では平均有効圧力が大きく低下する。結局、空気過剰率の大きいガソリンの場合では空燃比16~17、L. P. G.の場合では空燃比19ぐらいまでは混合気全体の燃焼時間が短かく、熱効率が良く、必然的に燃料消費率が最小となる。エンジン回転数が2000、3000、4000 r.p.m.のときも同じ結果が得られた。この両者の空燃比の差は、ガソリンとL. P. G.の理論空燃比の相違および混合気状態と混合気分布の違いによるものと考えられる。また燃料消費率の最小空燃比では2000~3000 r.p.m.の時に最も燃料消費率が小さくなる。これはこの回転数で充てん効率が良く平均有効圧力が最大になるためと考えられる。

#### 4. む す び

○ガソリンを燃料とするロータリ・エンジンは、空燃比が16~17ぐらいから大きなトルク低下を生じ、その直前において燃料消費率が最良となる。

○L. P. G.を燃料とする場合は、空燃比が19ぐらいで大きくトルク低下を生じ始め、その時に燃料消費率も最も良く、充てん効率の良いエンジン回転数2000~3000 r.p.m.で回転数に対する燃費が最良となる。次に失火限界空燃比は21ぐらいであり、失火パターンは交互または3回連続が多い。

おわりに、広島電機大学の梅田助教授の指導を受け同昭和54年度卒研究生の赤瀬・幾田・大前・岡本・越智・新倉の六君が実験に当たったことを報告いたします。

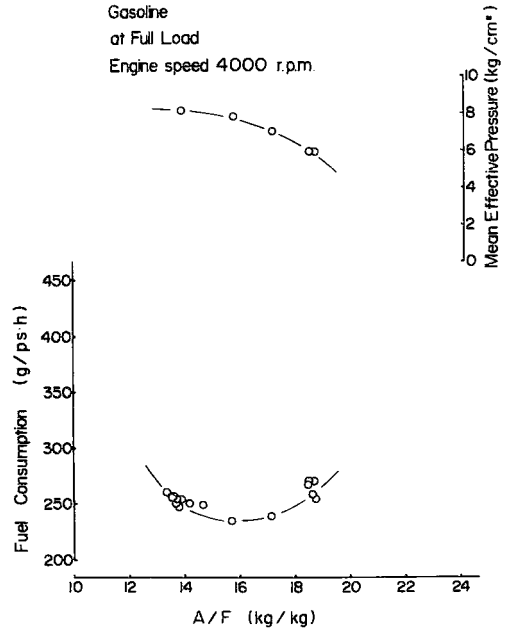


Fig. 14 At 4000 r.p.m. using Gasoline

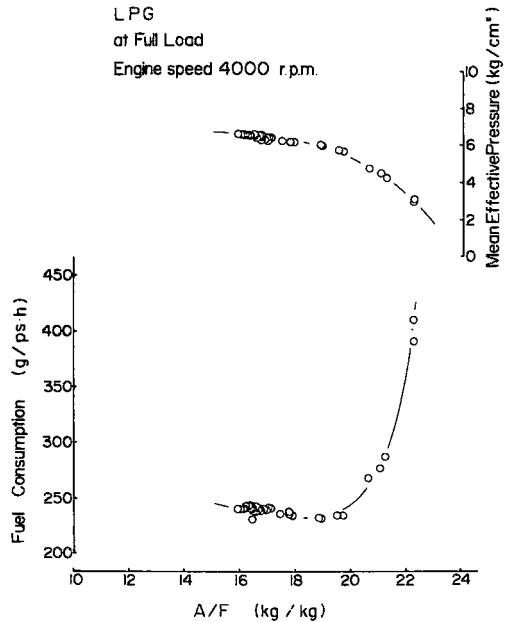


Fig. 15 At 4000 r.p.m. using L. P. G.

## 参 考 文 献

- 1) K. Yamamoto & T. Muroki ; SAE paper 780417
- 2) 西 田 祐 三 ; 全国自動車短大報告 第 7 号 (1978) p.56
- 3) 西 田 祐 三 ; 全国自動車短大報告 第 8 号 (1979) p.79
- 4) 伊 藤 亮 三 ほか 5 名 ; トヨタ技術 第27巻, 第 2 号 (1977) p.170
- 5) 浅 野 弥 祐 ; 内燃機関の燃焼 (内燃機関編集委員会編) 山海道, p.79
- 6) 山 本 健 一 ; 内燃機関 vol. 8 , No88 (1969 - 9)p.73
- 7) 山 本 健 一 ほか 3 名 ; Journal of the J. S. M. E., vol. 70, No 581 (1967) p.54
- 8) 下 司 正 春 ; 内燃機関 vol. 7 , No71 (1963— 5)p.11
- 9) 伊 藤 亮 三 ほか 3 名 ; トヨタ技術 vol. 27, No 2 (1977) p.19
- 10) 勝 呂 文 男 ; Journal of the J. S. M. E., vol. 67, No 545 (1964) p.67
- 11) 伊 藤 亮 三 ; トヨタ技術 vol. 27, No 2 (1977) p.34