

# 希薄燃焼ならびに水素混入時の エンジン性能に関する研究(その3)\*

Studies on the Engine Performance at Lean Mixture  
Combustions and the Effect of mixing Hydrogen  
(3rd Report)

永田 勝<sup>1)</sup>  
Masaru NAGATA

豊田 綱二<sup>2)</sup>  
Kōji TOYOTA

太田 豊幸<sup>3)</sup>  
Toyoyuki OOTA

大瀬戸 善典<sup>4)</sup>  
Yoshinori OOSETO

Hydrogen-mixed gasoline was investigated as a means of extending lean operating limits of gasoline engines for low fuel consumptions and low harmful exhaust emissions at the minimum advance for best torque.

In this report, any kinds of optimum ignition timing (I. T.) were investigated for various parameters of air ratio, weight proportion of mixing hydrogen and engine conditions. The engine performance tests with small additions of hydrogen to gasoline resulted in advance of I. T. for leaner mixture combustion and retard of I. T. for more addition of hydrogen. And then, it was found that three kinds of optimum I. T. were not necessarily the same with maximum pressure ( $P_{max.}$ ) within a cycle, horsepower and thermal efficiency.

In conclusion, two kinds of optimum I. T. for horsepower and thermal efficiency are very important in engine performance. And when crank angle after top dead center obtained  $P_{max.}$  becomes from 10 and to 20 degrees, the I. T. is best.

## 1. 結 言

ガソリンエンジンの燃料消費ならびに有害排気ガスの低減対策の実用化のため、希薄混合気燃焼(E. G. R.を含む)がとりあげられている。しかし、燃焼の悪化等により性能の急激な低下および有害排気ガスの増加が生じる。その悪化の要因の一つに燃焼速度の低下があるが、その対策として、①火炎伝ば速度を増大する方法(混合気に乱れやスワールを与え、乱流燃焼化する方法等)や②火炎伝ば距離を短かくする方法(2プラグエンジン等)が検討され、実用化もすすんでいる<sup>1)</sup>。一方、燃料の性状の検討から、あるいは、今後のエネルギー源の確保から、燃料の適性の検討より、水素の有意性ならびに実用性が確認され、期待が高まっている<sup>2), 3), 4), 5), 6)</sup>。

本研究では、始めに、希薄混合気燃焼の可能性とその限界を求め、ガソリン単一燃料では滑らかな運

\*昭和56年2月19日 原稿受理

1), 2), 3), 4) 大阪産業大学工学部交通機械工学科

転範囲の狭いことと、運転限界の小さいことを実験的に把握し、その主たる原因に、発生熱量の低下にあることを報告した<sup>7)</sup>。続いて、今後のエネルギー源の対策も含め、各種燃料の定性的把握より、量論(理論)燃焼計算による検討を行ない、希薄時に発生熱量がガソリンより高くなる燃料としては水素しかないことを確認し、さらに、水素の活用が積極的に実用化されつつある現況を踏まえ、水素を混入した場合のガソリンエンジンの性能について実験的に調査し、希薄時の性能の低下を抑えるとともに、燃料消費の面では非常に有効であることを見出した<sup>8)</sup>。

本報告では、上記の確認に加え、燃焼の最適化を把握するため、その最適化の一方法である、点火時期の影響について検討したのでその結果を、エンジン性能の面からと、インジェクタ解析による面とから、報告する。

その結果として、最適点火時期(M. B. T.)における性能を求めたところ、希薄を深めてガソリンのみの希薄限界の空気比にて1.4~1.5(混合比にて21.0~22.5)以上にしても、水素を(重量割合で最大10%)混入すると、出力で、量論値(空気比1.0)よりの低下が少なく、また、燃料消費率では、量論値より改善され、より低い値となる結果を得た。また、点火時期については、希薄するほど、すすめる必要があるが、水素を混入すると、混入割合を高めるほど、単なる希薄よりも遅くなる結果を得た。また、最適点火時期は、シリンダ内圧力を最大とする場合、出力を最大とする場合、熱効率を最大とする場合等で異なり、エンジンへの要求が、最大出力と最高熱効率であることより、この2要求のどちらかもしくはその間の最適値に制御する必要があることが見い出された。その原因としては、当然ながらサイクルの最適化にあることが推測される。なお、点火時期の最適範囲は希薄するほど狭く、水素混入割合を高めると広くなった。特に、1サイクルの最大圧力が上死点后10~20度にて得られるように、点火時期を選ぶと最も効果的である。

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置ならびに方法について、性能関係の測定についてはすでに報告<sup>7)</sup>したが、今回改良した事項ならびに新たな事項を中心に要点を述べると、実験の測定のプロフローチャートを Fig.1 に示し、エンジンの諸元を Table.1 に示す。空気比を設定するため、ガソリンの供給を制御する方法として、フロー室とメインジェットの間燃料調整用ジェットを取付け調節した。その取付方法を Fig.2 に示し

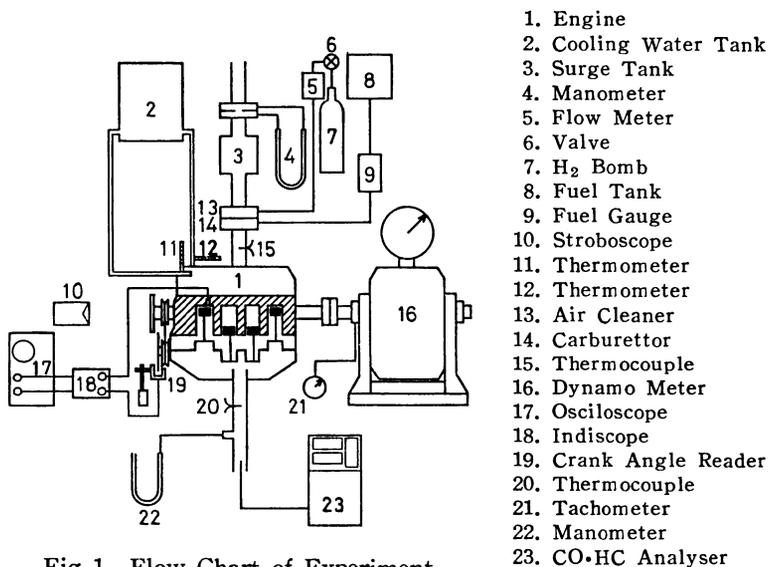


Fig.1 Flow Chart of Experiment

|                         |                   |
|-------------------------|-------------------|
| Type                    | G                 |
| Type of Cooling         | Water Circulation |
| Number of Cylinders     | 4                 |
| Number of Cycles        | 4                 |
| Combustion Chamber Type | Wedge             |
| Total Displacement      | 1,488(1)          |
| Maximum Power           | 71PS/5000rpm      |
| Maximum Torque          | 14.5m·kg/3200rpm  |
| Arrangement of Valves   | OHV               |
| Compression Ratio       | 8.0               |
| Bore×Stroke             | 80×75(mm×mm)      |
| Piston Type             | Auto Thermic      |

Table 1 Engine Data

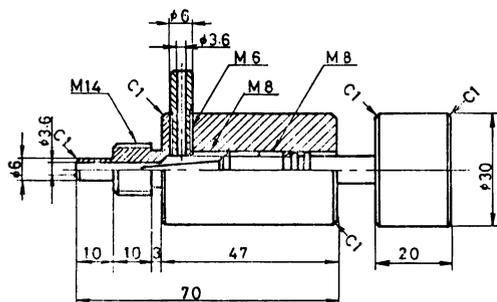


Fig. 3 Detail of a new jet

インジケータ線図については、各実験条件ごとに求めたが、それは、圧力 (P) - クランク角度 ( $\theta$ ) 線図を求め、それより解析した。その場合の圧力測定としては、燃焼室内に影響を及ぼさない方法として、点火プラグの取付部にワッシャタイプの指圧計を取付ける方法 (Fig. 4) を採用した。その際、直接の燃焼圧力でないことより、圧力波形が厳密に再現性のあることを確認し、実験に用いるとともに、解析を行なった。また、クランク角度は Fig. 5 に示すクランク角度検出用円板 (2 度間隔目盛付) を用い、2 度間隔の目盛を検出した。その結果をブラウン管オシロスコープにて写真撮影

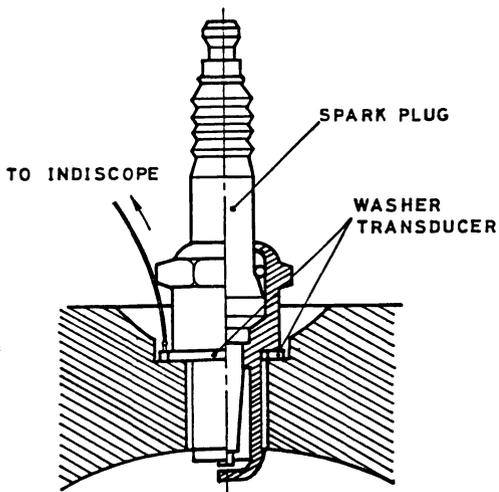
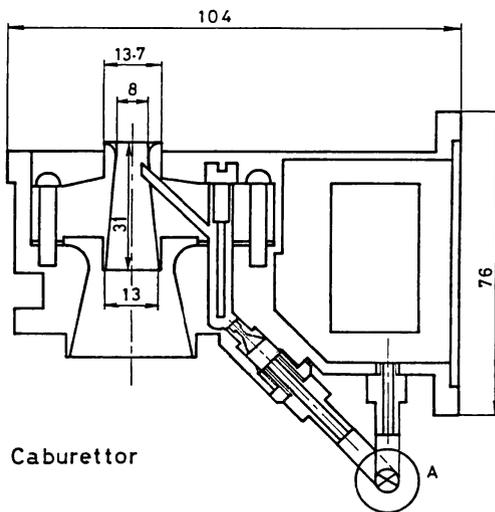


Fig. 4 Pressure Sensing Spark Plug



Carburettor

Fig. 2 Carburettor with a new jet

その詳細を Fig. 3 に示す。水素の供給は水素の高圧ポンベより減圧し、流量計を介して、キャブレタ手前に供給し、ガソリンならびに空気との混合を十分に行なうようにした。

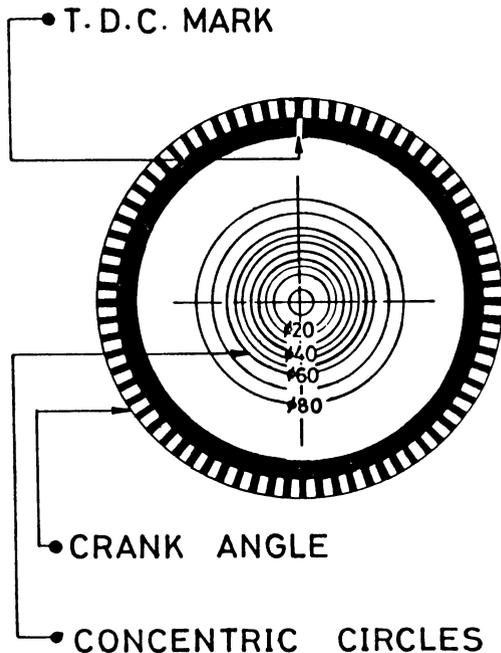


Fig. 5 Crank Angle Reader

し、それより、コンピュータ処理をして、解析した。

なお、点火時期については、その調整を手動にて行なえるようにするとともに、タイミングライトを用いて、目測をして確認した。

以上より、混合比は量論混合比の空気比 1.0 より、エンジンの駆動限界まで希薄し、水素の混入については燃料総重量に対する水素重量割合の水素混入割合を最大 10% まで供給して実験を行なった。実験は暖気運転後、スロットル開度、エンジン回転数、空気比、水素混入割合を設定条件に調整し、その後、点火時期を上死点前 (B. T. D. C.) 5 度から 55 度まで 5 度間隔にて変化させ、その際、設定条件のずれを再度調整して、測定を行なった。

今回、各温度測定には、研究所より特別研究費として補助のあった、デジタル温度記録計にて自動記録した。ここに、研究所の補助に感謝の意を表す。

### 3. 実験結果ならびに考察

#### 3-1 エンジン性能と空気比について

エンジン回転数を 2000rpm、絞り弁開度を 0.4 と設定した場合のエンジン性能に及ぼす空気比 (供給燃料に対する実供給空気重量と量論空気重量との比) ならびに水素混入割合 (総燃料重量に対する水素重量%) の影響について、最適点火時期 (M. B. T. の場合) の結果を求めたが、軸出力を Fig. 6、に軸トルクを Fig. 7 に、熱効率を Fig. 8 に、そして、燃料消費率を Fig. 9 に示した。軸出力と軸トルクについては、空気比を大きくし、希薄するとともに急激に低下するが、水素の混入割合を増すとその低下が相当改善され、水素を 10% 混入す

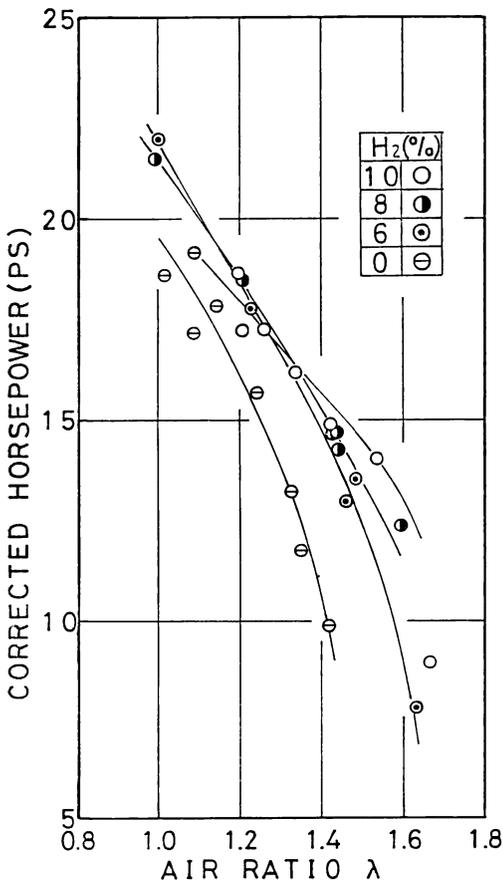


Fig. 6 Effects of Air Ratio for Horsepower at M. B. T.

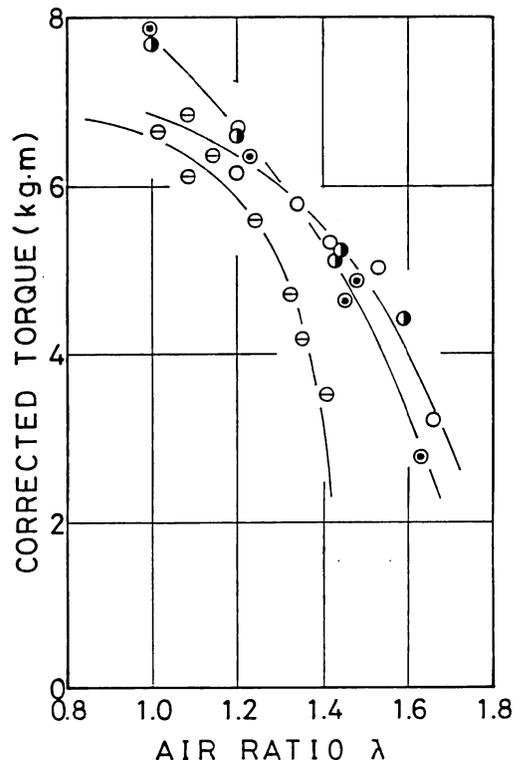


Fig. 7 Effects of Air Ratio for Torque at M. B. T.

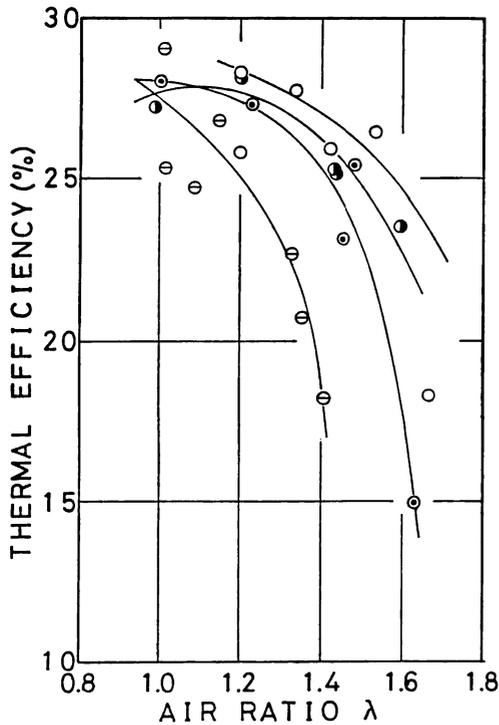


Fig. 8 Effects of Air Ratio for Thermal Efficiency at M. B. T.

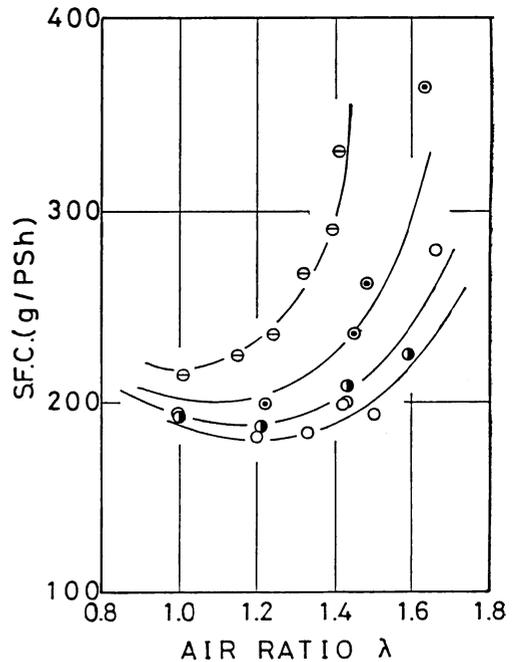
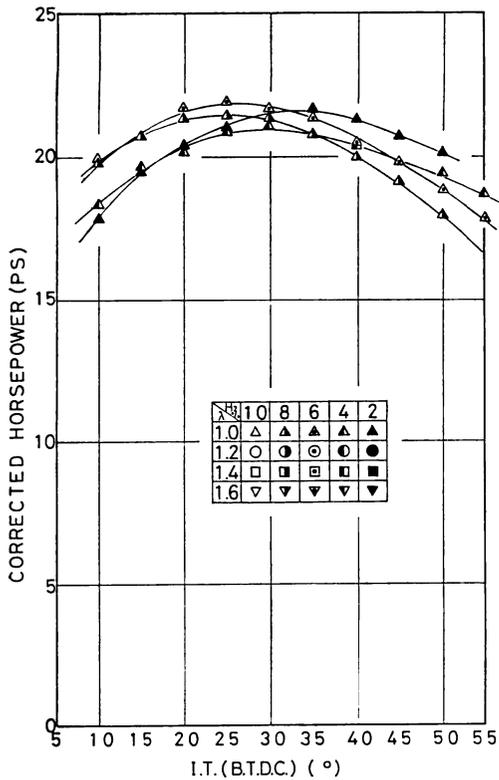


Fig. 9 Effects of Air Ratio for Specific Fuel Consumption at M. B. T.

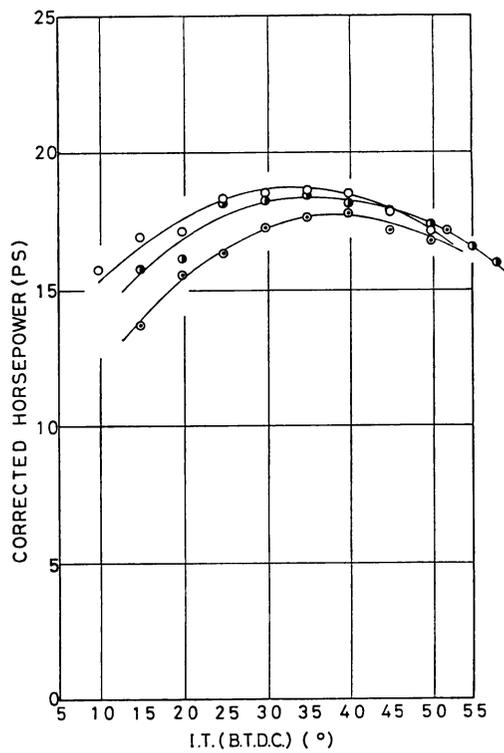
ると、空気比1.6のガソリンのみでは運転不可能域でも、量論空気比の場合の3割減程度となるものの十分運転が可能となる結果を得た。次に、熱効率については全体に空気比で1.0~1.2の希薄の低い範囲で最適となり、それ以上希薄すると急激に低下する傾向を示す。しかし、水素の混入割合を増すと、特に、10%に達すると空気比を1.6まで希薄しても、25%以上の熱効率を維持する効果があった。さらに、燃料消費率の場合には、ガソリンのみであれば、空気比1.0附近を最小にして、希薄するほど悪化するが、水素混入割合を増すと最小値はより希薄側に移り、しかも、最小となる範囲が広がる。水素混入割合を10%とすると空気比を1.0から1.5までの広範囲に渡り、燃料消費率が(200g/PSH)以下となる好結果が得られた。しかし、それ以上希薄すると急激に悪化した。この燃料消費率の結果は水素混入により、軸出力が改善されるとともに、その際の、燃料の消費の低下が少ないことにあると推測される。なお、空気比を大きくし希薄すると軸出力が急激に低下する原因は、発生熱量の低下にあることを前報にて報告した。そして、水素混入の効果は希薄時に発生熱量の低下割合が最も低く、水素の燃焼性の長所とも合わせて、希薄時に効果のあることが確認された。

### 3-2 エンジン性能に及ぼす点火時期の影響について

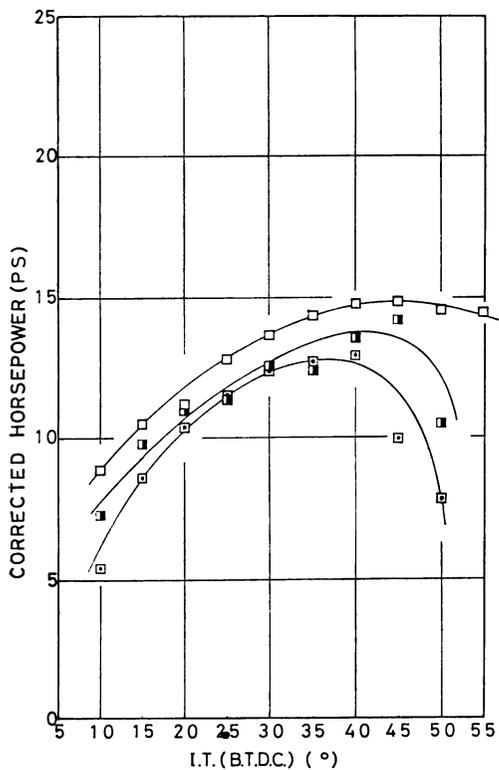
軸出力と点火時期(I. T.)(上死点前(B. T. D. C.)のクランク角度にて表示)との関係をFig. 10(a~d)に示す。空気比が1の量論混合比附近では最適点火時期は上死点前30度附近であり、水素混入の効果はほとんど現われていないが、希薄を深めるほど、点火時期もすすめる必要があり、空気比が1.6の場合には最適点火時期は40度から50度となる。しかも、水素混入の効果も明確に現われ、空気比が1.6では水素を混入しなければ運転不可能であり、水素を10%混入すると量論混合比附近の場合の30~35%減程度となるものの十分運転が可能となり、また、水素混入割合を増すほど点火時期は遅くする



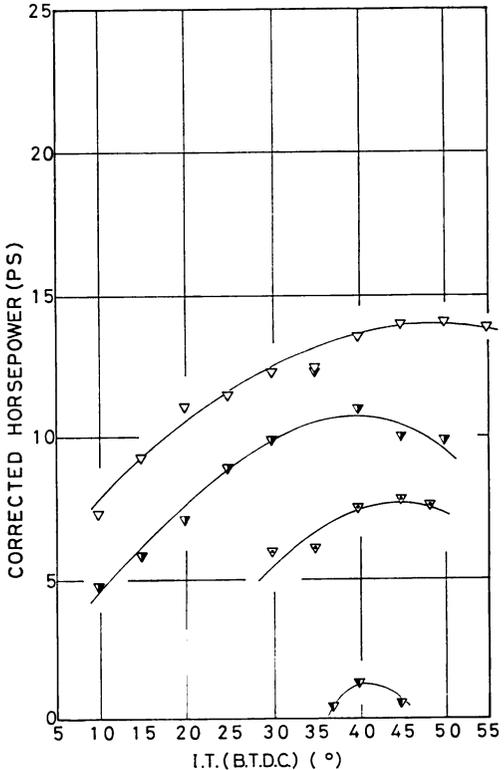
(a) Air Ratio 1.0



(b) Air Ratio 1.2



(c) Air Ratio 1.4



(d) Air Ratio 1.6

Fig.10 Effects of Ignition Timing (B. T. D. C.) for Horsepower

必要のある傾向を示した。これは、水素の燃焼性の影響によると考えられる。なお、希薄を深めるほど、最適点火時期以外の出力低下が甚しく、いわゆる安定領域が狭くなる。

熱効率については Fig.11(a~d) に示すが、出力の場合と同様の傾向を示す。ただし、希薄するほど、最適点火時期をはずすと急激に低下し、安定領域が狭くなる。特に、空気比を1.4以上の希薄時には、水素を10%混入すると最適点火時期附近では25%以上の値が得られ、実用が期待されるが、最適点火時期をはずれると、また、水素混入割合が低いと期待できない。

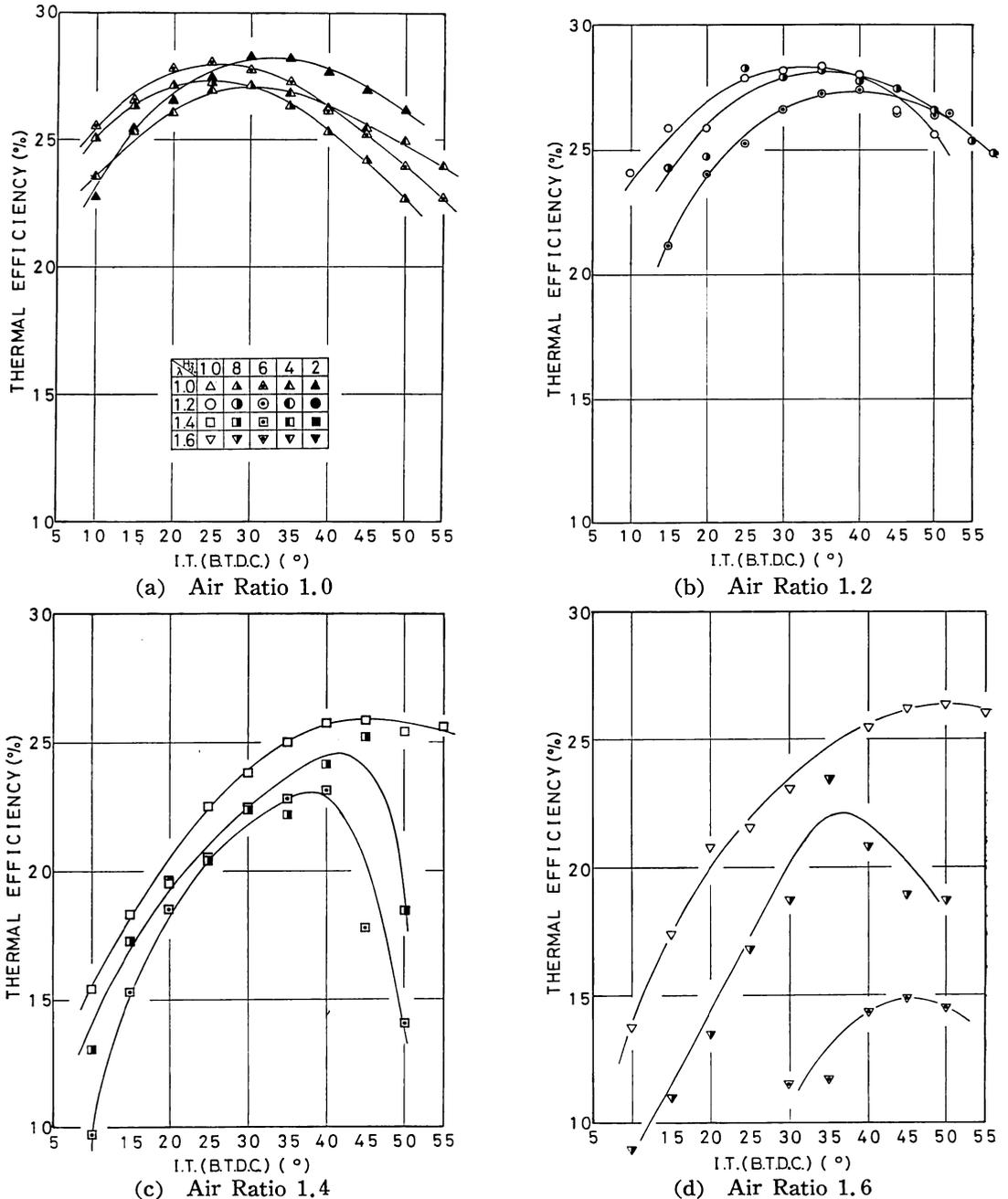
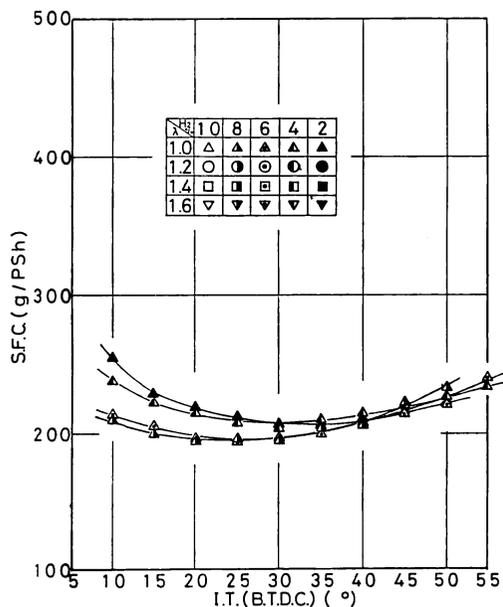
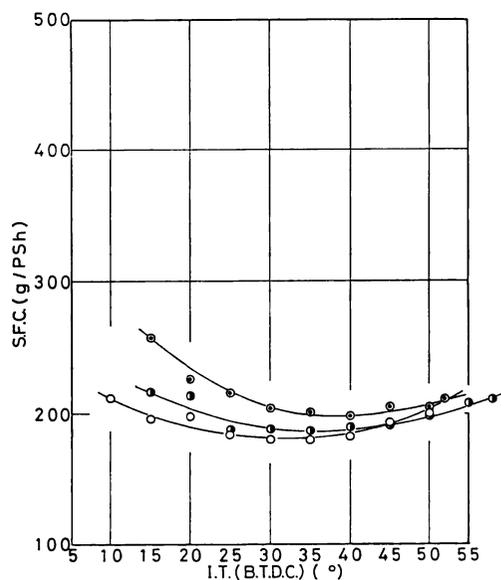


Fig. 11 Effects of Ignition Timing (B. T. D. C.) for Thermal Efficiency

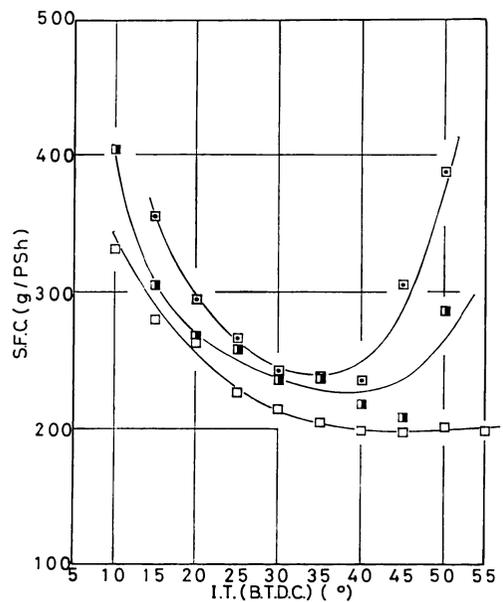
さらに、燃料消費率について検討すると、Fig.12(a~d)に示すが、空気比に対して、最適点火時期は $\lambda=1.0$ で上死点前30度附近、 $\lambda=1.2$ で同じく35~40度、 $\lambda=1.4$ で同じく、40度附近、 $\lambda=1.6$ で、同じく45度附近と希薄するとすすめる必要があることを示した。次に、水素混入の効果は希薄の少ない空気比で1.0~1.2では明確に現われていないが、希薄を深めて空気比で1.4以上にすると、10%混入にて、最適点火時期附近で200(g/PSh)の良い値が得られた。それに反し、最適点火時期をはずすと悪化が激しく、また、水素混入割合が少ないほど最適点火時期が狭く、その時期をはずすと急激に悪



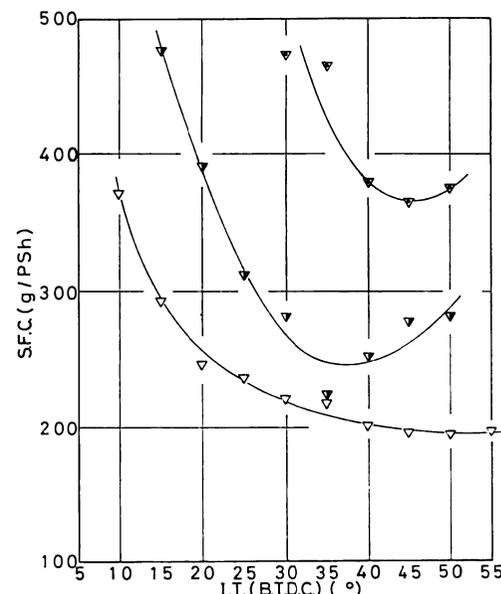
(a) Air Ratio 1.0



(b) Air Ratio 1.2



(c) Air Ratio 1.4



(d) Air Ratio 1.6

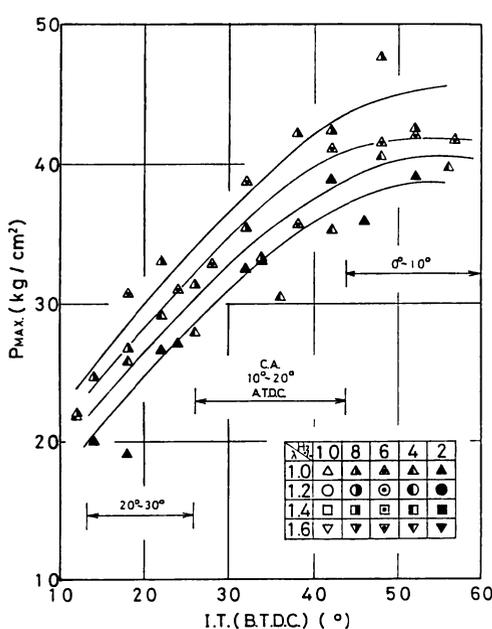
Fig.12 Effects of Igniton Timing (B. T. D. C.) for Specific Fuel Consumption

化する傾向を得た。

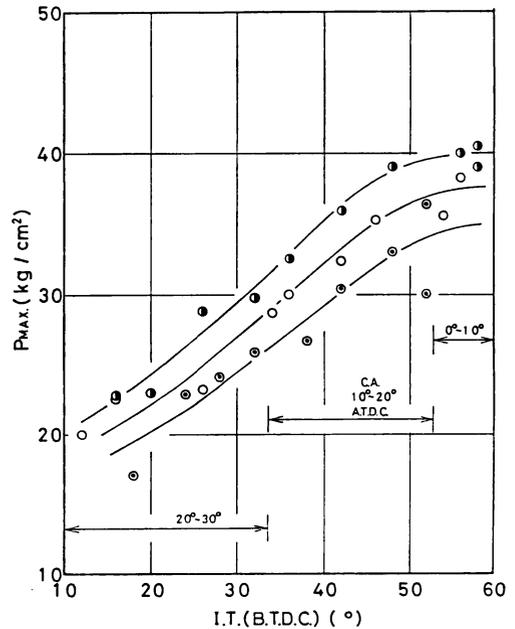
なお、出力の場合の最適点火時期とこの燃料消費率の場合とでは幾分ずれがあることが見出された。

### 3-3 インジケータ線図よりの考察

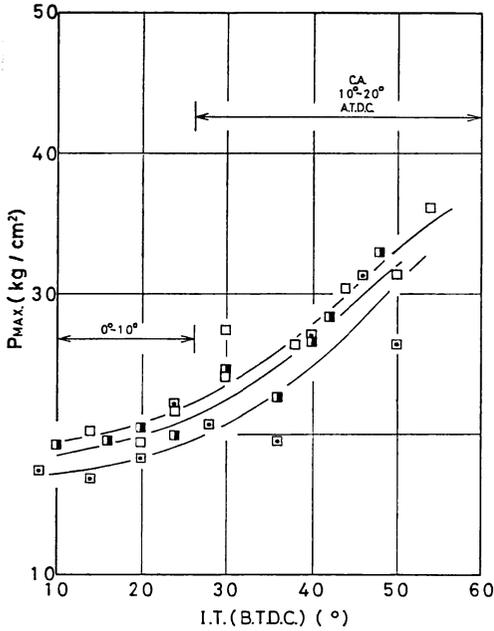
実験では、圧力 (P) - クランク角度 ( $\theta$ ) 線図を求め、それより、P-V線図に変換すると同時に、図示出力、機械効率、圧縮側ならびに膨脹側のポリトロープ指数等を求めたが、その一例として、最大圧力と点火時期の関係を Fig. 13(a~d) に示す。空気比が1.0の量論混合比では、点火時期をすすめるほどそのサイクルの最高圧力は上昇し、実験範囲の限界の50~55度(上死点前)で上昇は緩やかとなる結果を得た。すなわち、最高圧力の最適点火時期は上死点前50~55度といえる。次に、空気比を1.2と希薄した場合も、空気比1.0と同様の傾向を示し、このことは、空気比をより大きくとり1.4~1.6と希薄しても同様のことがいえる。それで、出力(トルク)や熱効率(燃料消費率)の最適となる点火時期とは何によって規定されるのかを検討するため、各サイクルの最高圧力となる上死点後のクランク角度(C.A. 度A.T.D.C.)を求め、概略の範囲を表示したのが、各図の中の範囲表示とクランク角度(A.T.D.C.)である。この場合、空気比で1.0~1.2では点火時期をすすめると、最高圧力が上死点後のクランク角度で0~10度の範囲になり、しかも最も高くなり、逆に、点火時期を遅らせ、5~30度(上死点前)とすると最高圧力がクランク角度で20~30度(A.T.D.C.)となり、しかも最も低くなる。一方、空気比を1.4以上に希薄するとそれが逆転し、点火時期を遅くすると最高圧力が上死点後のクランク角度で0~10度となり、しかも、最高圧力が低くなる。さらに、点火時期をすすめるとクランク角度で10~20度A.T.D.C.となり、しかも、最高圧力が上昇する結果を得た。この逆転する理由は、実験のパラツキによるとも考えられるが、燃焼波の進み方すなわちクランク角度あたりの発生熱量の変化の仕方にあるとも考えられ、今後検討してみたい。



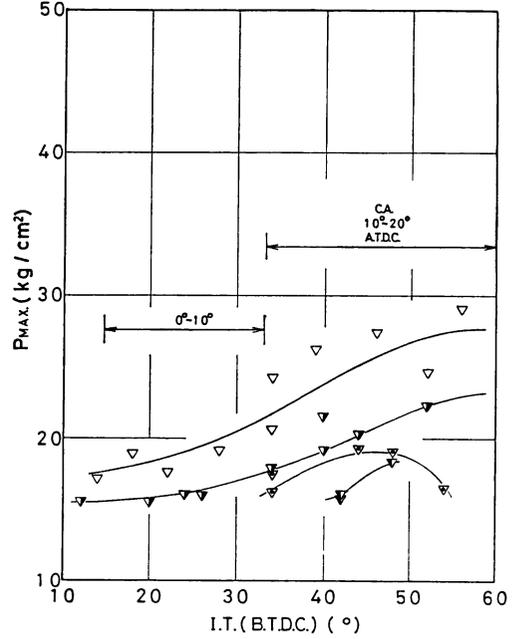
(a) Air Ratio 1.0



(b) Air Ratio 1.2



(c) Air Ratio 1.4



(d) Air Ratio 1.6

Fig. 13 Effects of Ignition Timing (B. T. D. C.) for Pmax. and Range of Crank Angle (A. T. D. C.)

それでは、出力や燃費を最適とする場合はどのような場合かとみると、Fig.10 よりクランク角度で10～20度A. T. D. C.となる場合で、これは、空気比に関係なく得られた。このことは、サイクル線図を考えれば、その囲まれる面積が最大となる場合に仕事は最大となり、供給熱量を仕事に変換する割合の高い場合が熱効率が高くなることは自明であれば、最高圧力の大小に関係なく、サイクル線図が最高になる場合が最適といえる。すなわち、クランク角度にて10～20度A. T. D. C.に最高圧力が来るサイクルを描く場合に、出力や燃料消費率が最適となることが確認された。以上より、エンジン制御の一方法として、圧力とクランク角度を検出し、最高圧力が上死点后10～20度のクランク角度となるように制御することによりエンジンの最適駆動が可能となると考えられ、今後実用化を検討してみることも大切といえる。

今一度、最適点火時期と空気比との関係を求め、最高圧力となる場合を Fig.14 に、最大出力となる場合を Fig.15 に、最大熱効率となる場合を Fig.16 に、それぞれ示したが、出力と熱効率については、空気比を大きくし、希薄するほど点火時期をすすめる必要のあることが確認され、また、出力の最適点

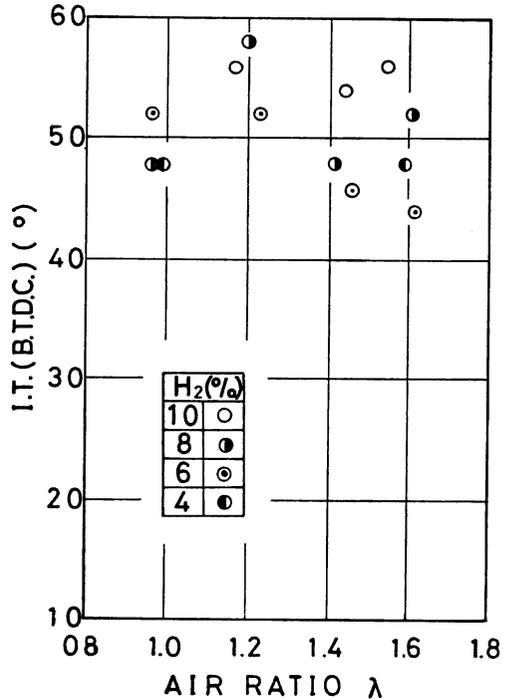


Fig. 14 Relation I. T. and Air Ratio for Pmax.

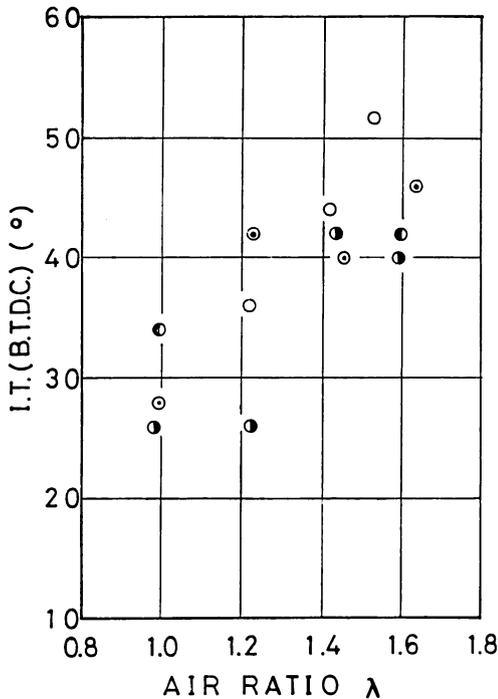


Fig. 15 Relation I. T. and Air Ratio for Horsepower

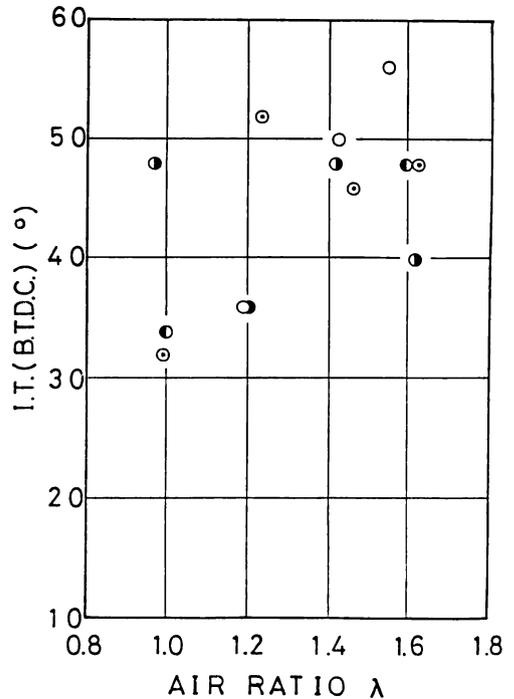


Fig. 16 Relation I. T. and Air Ratio for Thermal Efficiency

火時期の方が相対的に高い値(すすめた値)となり、熱効率の場合は低く(遅らせた値と)なる結果を得た。最高圧力を得るだけならば空気比に関係なく、約60度B. T. D. C.となった。

なお、インジケータ線図の結果は、各条件にて1サイクルのデータより、ある程度のバラツキが予測されたが、バラツキの範囲は予想より少なく、それぞれの条件の傾向を良く示していた。しかし、今後は少なくとも数10サイクル以上の平均値にて整理することが望ましいことを付しておく。

#### 4. 結 言

1. ガソリンエンジンの希薄時の性能を、最適点火時期(M. B. T.の場合)について、エンジン回転数 2000rpm, 絞り弁開度 0.4に限定して、検討したが、空気比ならびに水素混入割合の影響は前報に一致した。そして、最も大きな効果は空気比にて1.4以上に希薄した場合に、水素を混入すると、出力、燃料消費率とも、大巾に回復し、十分実用が可能となることである。なお、その要因としては、前報にて指適した、発生熱量の低下の少ないこと等の効果であることが挙げられる。

2. 点火時期の影響については、空気比に対しては希薄するほど点火時期を早める必要があり、このことは、希薄すると燃焼速度が低下することによると推測される。一方、水素を混入すると燃焼速度が早いいためか、ガソリンのみの場合より遅らすと、最適となる傾向を示した。なお、性能の最適となる点火時期は水素混入割合が高いほど範囲が広がった。

3. インジケータ線図より、最適点火時期は、最高圧力が上死点後10~20度となる場合で、これは、エンジンの性能には最も基本的な条件であることを改めて確認した。このことより、圧力とクランク角度を検出し、諸条件における最適点火時期を求め、その最適値に追従させて、エンジンを最適駆動させる方法の開発が望まれる。

終りに、本研究をすすめるにあたり、本学産業研究所より特別研究助成を受け、また、昭和55年度卒

業研究として取り組んだ、植田基予美、小峯龍一、西脇秀晃の諸君の協力によるもので、合わせて、ここに、謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) 野平他「自動車機関の排気規制下の熱料消費率低減の手法について」日本機械学会誌, Vol. 83, No. 744, P. 1405 (S.55)
- 2) 「自動車用水素エンジン調査研究報告書」JARI Technical Report No. 38 (S. 51)
- 3) 古浜「水素エンジンの現状と将来性」自動車技術 Vol. 34, No. 4, ('80) P. 310
- 4) 土井「将来の自動車用燃料とエンジン」自動車技術 Vol. 34, No. 4 ('80) P. 321
- 5) J. G. Finegold "Hydrogen : Primary or Supplementary Fuel for Automotive Engines" Int. J. of Hydrogen Energy Vol. 3, P. 83 ('78)
- 6) J. F. Cassidy "Emission and Total Energy Consumption of a multicylinder Piston Engine running on Gasoline and a Hydrogen-Gasoline Mixture" Nasa-Langley ('77)
- 7) 永田, 豊田, 太田「希薄燃焼ならびに水素混入時のエンジン性能に関する研究」大阪産業大学論集自然科学編55号 ('78)
- 8) 永田, 豊田, 太田, 大瀬戸「希薄燃焼ならびに水素混入時のエンジン性能に関する研究(その2)」大阪産業大学論集自然科学編57・58合併号 ('79)
- 9) 小橋, 河瀬「エンジン運転条件と最適点火時期」トヨタ技術 Vol. 27, No. 3 (S. 52)