ガスエンジンの出力限界に及ぼすガス組成の影響*

(第1報, ガス組成をパラメータとした実験的研究)

左近司 樹生^{*1}, 庄司 不二雄^{*2}, 池田 克巳^{*3}
古島 潔^{*3}, 辻 充^{*4}, 大聖 泰弘^{*5}

The Effect of Gas Composition on Gas Engine Rating

(1st Report, Experimental Study on Gas Engine Rating with Gas Composition)

Tatsuo SAKONJI, Fujio SHOJI, Katsumi IKEDA,
Kiyoshi FURUSHIMA, Mitsuru TSUJI and Yasuhiro DAISHO

In this study, the effect of town gas composition on gas engine rating is evaluated. Engine test work was carried out using a range of gases to characterize the tendency for knocking combustion to occur under stoichiometric and lean conditions. A matrix of 133 gases at a stoichiometric mixture ratio and that of 100 gases under a lean condition were used to allow in the statistical analysis of test results. Analyzing the test results, it is identified that efficacy on gas engine rating is $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$, $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$, C_3H_8 , C_2H_6 and H_2 in a descending order. It is also clarified that the hydrocarbons have almost the same effect on gas engine rating under stoichiometric and lean conditions, whereas hydrogen greatly affects the rating under the lean condition.

Key Words: Internal Combustion Engine, Gaseous Fuel, Detonation, Knocking

1. 緒 言

省エネルギーや地球環境問題の高まりを背景にガスコージェネレーションは、順調に普及を続けている。ガスコージェネレーションの原動機の一つであるガスエンジンのニーズは、今後さらに増大し、地域的にも広範囲に拡がると予想される。それに伴い、様々な組成の燃料ガスが供給されることが予想される。

また、低燃費、高出力の要求に応えるため、ガスエンジンにおいても高圧縮比化、高過給化が進められて

いる。これにより、耐ノッキング性の高い天然ガスを主成分とする都市ガスを使用しているガスエンジンにおいても、ノッキングの発生が問題となっており^①、ガス燃料の耐ノッキング性を示す実用的な指標が求められている。

火花点火式機関用の燃料の耐ノッキング性を表す指標としては、現在最も一般的に用いられているのが、オクタン価である。しかし、都市ガスの主成分であるメタンが、オクタン価の上限よりも高い耐ノッキング性を示すため、ガス燃料への適用が難しく、またその精度もあまり高いとはいえなかった。そのため、ガス燃料用の耐ノッキング指標として、Leiker. M. らがメタン価^②を、Schaub. F. S. らが n -ブタン価^③を提案した。これらの指標は、作成された欧米でのガスの供給形態を反映して、ほぼ全量がメタンのガスから LPG までの広い範囲での適用を目的としたものであり、傾向的にはよく合うが、日本における同一ガス群のようなガスの組成があまり変わらない場合の微少な耐ノッキング性の違いを表現するのには、あまり適していない。

そこで本研究では、ガスの組成を国内で供給されて

* 原稿受付 平成6年7月20日。

^{*1} 正員, 東京ガス(株)エネルギー技術研究所 (〒105 東京都港区芝浦 1-16-25)。

^{*2} 東京ガス(株)エネルギー技術研究所。

^{*3} 東京ガス(株) (〒160 東京都新宿区西新宿 3-7-1)

^{*4} (社)陸用内燃機関協会 (〒162 東京都新宿区市谷砂土原町 1-2)。

^{*5} 正員, 早稲田大学理工学部 (〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1)。

いる範囲に限定し、微少な耐ノッキング性の変化を表しうる耐ノッキング性指標を作成することを目的としている。今報では、都市ガスを燃料とする4サイクル単気筒機関において、燃料の組成を系統的に変化させ、燃料に含まれるノンメタンガスがノッキングの発生による機関の出力限界にどの程度の影響を及ぼすかを、理論空気比と希薄域 ($\lambda=1.5$) の2条件について実験的に調べた。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置 実験装置の概略を図1に示す。また、表1に供試機関の諸元を示す。供試機関は単気筒機関であるため、実機と同じような吸排気特性を持たせるために、コンプレッサー・エアによる外部過給、吸気加熱装置、吸排気サージタンクを備えている。

供試燃料は、理論空気比133種、希薄域100種とした。メタンをベースに、水素、エタン、プロパン、 n -、 i -ブタンを任意の割合で混ぜられるよう、マスフローコントローラで流量を調整し、機関の入口近傍で高速度応答型ガスクロマトグラフィーにより組成を確

認した。これらの燃料は、時間・空間的均一性を得るために、マスフローコントローラ後流でスタティックミキサを介し、燃料用サージタンクで滞留させた後、ミキサにより新気と混合し、機関に送るようにした。

また、空気比を正確に合わせるため、排気ガス組成をサージタンクの後流において計測している。

2.2 実験方法

2.2.1 ノッキングの検知方法 シリンダ内の圧力変化は、燃焼室壁にフラッシュマウントされた圧電式圧力変換器を用いて測定した。本研究では、ノッキングを3 kHz以上の高周波圧力振動とした。図2に代表的指圧線図と帯域フィルタ通過後の波形を示す。各サイクルのノッキング強さは、帯域フィルタ(3~10 kHz)通過後の振動波形の最大全幅値とした。ノッキングの発生と強さを連続的に検出するために、帯域フィルタ、ピークホールド、及びサンプルホールドからなる回路を構成し、その出力をデジタルオシログラフに記録した。

2.2.2 ノッキング判定基準 ほとんどのエンジンメーカーにおいて、ノッキングが発生しているかどうかの基準は、担当試験員の耳によりノッキング音(オーディブルノック)が聴取できるかどうかによっている。そのため、各社毎、また各エンジン毎に違っており、圧力振動レベルは異なるものと予想され、定量的な基準が存在しない。そこで、供試機関において、従来の聴覚試験とそのときのノッキング強さとの関係を機関の負荷をあげることによりノッキングを発生させて調査した。実験結果を図3に示す。試験条件は、 $\lambda=1.0$ 、点火時期は 30° btdcである。ノッキングは、平均ノッキング強さ50 kPaからかすかに聞こえ始め、75 kPa程度で頻発するようになる。そこで、平均ノッキング強さ75 kPaとなる負荷を供試ガスの耐ノッキン

図1 実験装置図

表1 供試機関主要諸元

Type	Spark - ignited Four stroke cycle Single cylinder
Bore X Stroke	125 X 130 mm
Swept volume	1595 cc
Compression ratio	11:1
Combustion chamber	Central vertical - sided heron - type

図2 ノッキング時の圧力線図の代表例

図3 図示平均有効圧力とノッキング強さ

グ性を代表するものとした。しかし、聴覚上でノッキングが頻発しているときでもノッキング強さの小さいサイクルも存在する。また、ノッキングを発生していない条件でも各サイクルのノッキング強さは0ではない。上述したような全サイクルの平均ノッキング強さを基準とした場合、このようなノッキングを発生していないサイクルのノッキング強さをも加味してしまうことになる。そこで、この点を考慮して、圧力計測を連続的に行っている350サイクルの平均ノッキング強さ75 kPaに相当する、各サイクルのノッキング強さの上位30%が90 kPaとなる負荷をその供試ガスにおける出力限界負荷と定義し、この出力限界負荷をそのガスの耐ノッキング性を代表するものとした。

この、ノッキング強さ90 kPaは、藤本らの定義によるノック質量燃焼割合 M_f ⁽⁴⁾では約20%に相当し、ノッキングの基準として妥当性があるものと判断した。また、各サイクルのノッキング強さは志賀らの報告⁽⁵⁾にもあるように、ノッキングによる燃焼室量割合に強く依存し、本実験範囲内では、ノッキング強さとノッキングによる燃焼室量割合とほぼ比例関係にあり、上記の手法により、耐ノッキング性を評価することが妥当であるものと判断した。

表2 機関の運転条件

Engine speed	1500 rpm
λ	1.0, 1.5
Ignition timing	25 BTDC ($\lambda=1.0$) 35 BTDC ($\lambda=1.5$)
Mixture temp.	50 °C ($\lambda=1.0$) 60 °C ($\lambda=1.5$)
Cooling water temp.	80 °C (Engine outlet)
Lubricating oil temp.	85 °C

2・2・3 実験条件 機関の運転は、表2に示すような条件で行った。通常、コージェネレーション原動機に用いられるガスエンジンは、点火時期が全ての運転条件において固定されているため、点火時期は典型的な都市ガス(メタン90%, プロパン10%)を燃料とした場合のMBTとした。希薄域においては、ノッキングしにくい一部の燃料で運転した場合、筒内最高圧力が機関の許容値を越えてしまうため、許容値内に抑えることができる条件を給気温度を上昇させて調べたところ、60 °Cが適当であった。そこで、希薄域においては吸気温度を変更して実験を行った。

2・2・4 実験方法 ノッキングの研究においては、点火時期を進角させてノッキングを発生させる手法が一般的である。しかし、前述したように、コージェネレーション原動機に用いられるガスエンジンでは、点火時期固定で使われるケースが多い。そこで、本研究においては、前記の実験条件、所定の供給ガス組成において、吸気圧力を高め、負荷を上げることによりノッキングを発生させる手法をとることとし、基準のノッキング強さを呈するまで、負荷を上昇させて、実験を行うものとした。

3. 実験結果

実験を行ったガス種は、 $\lambda=1.0$ で133種、 $\lambda=1.5$ で100種である。なお、希薄域条件で実験を行ったガスは、理論空気比条件でも、すべて実験を行っている。この中にはノンメタンガスの影響を個別に調べるためのメタンとノンメタンガスの2成分ガスも含まれている。

メタンに各ガス1種類を混入した場合のその割合と出力限界負荷の関係を $\lambda=1.0$ と $\lambda=1.5$ について求めた結果をそれぞれ図4、5に示す。図中の実線は、後述するすべての条件を含めた実験結果より求めた回帰曲線であり、プロットは実測値である。国内で供給されるガスの範囲を逸脱するプロットも存在するが、これらは既存の指標と対比させるためのものである。

図4の理論空気比条件と図5の希薄域条件を比較すると、メタン100%で運転した場合の出力限界負荷が大きく異なっており、希薄域で耐ノッキング性が高いことが分かる。

炭化水素系の燃料は、炭素数が大きくなるほどノッキングしやすくなっている。また、炭素原子数の同じn-ブタンとi-ブタンを比較すると、混入割合が少ない場合では、ほぼ同等の耐ノッキング性を示すが、混入割合が増すと、i-ブタンの方がノッキングしづらくなっている。

図4 各ノンメタンガスの混入割合と出力限界平均有効圧力 (理論空気比条件)

図5 各ノンメタンガスの混入割合と出力限界平均有効圧力 (希薄域条件)

また、各ガスの混入割合と負荷の関係を見ると、耐ノッキング性の低いガスほど、少量の混入により大きく出力限界負荷が低下し、出力限界負荷が低いところでは、その混入割合が多少増えても、あまり低下せずに飽和するような減少の傾向を示す。一方、水素の混入割合に対する出力限界負荷の減少は一次関数的である。

4. 解析結果

すべてのガス種の実験結果より、各ガスのノッキングへの寄与度を定量化するため、出力限界負荷を予測する回帰式を作成した。なお、回帰式は表3に示すとおりである。メタン100%での出力限界平均有効圧力である切片 a_0 から、各ノンメタンガスの成分割合の1乗, 2乗で作用する a 項, b 項と補正項として作用する交互作用項である c 項からなっている。

表4に上記のデータをもとに求めた回帰係数値を示す。水素は希薄域においては、ノッキングに及ぼす影響度が、5割ほど増加している。炭化水素系の燃料も一次係数は、2~3割程度増加している。一方, inter-

表4 回帰係数値

	Stoich. condition BMEP [kPa]	lean condition BMEP [kPa]
Intercept (a_0)	1440	1820
H_2	-16.81	-25.61
C_2H_6	-28.30	-35.36
C_3H_8	-53.90	-74.12
$n-C_4H_{10}$	-101.5	-132.5
$i-C_4H_{10}$	-110.2	-125.7
$H_2 \times H_2$	0.047	0.044
$C_2H_6 \times C_2H_6$	0.384	0.450
$C_3H_8 \times C_3H_8$	1.045	1.673
$n-C_4H_{10} \times n-C_4H_{10}$	2.939	3.905
$i-C_4H_{10} \times i-C_4H_{10}$	7.183	7.656
$H_2 \times C_2H_6$	0.233	0.431
$H_2 \times C_3H_8$	0.370	1.103
$H_2 \times n-C_4H_{10}$	0.643	1.926
$H_2 \times i-C_4H_{10}$	1.608	0.497
$C_2H_6 \times C_3H_8$	0.926	1.594
$C_2H_6 \times n-C_4H_{10}$	1.586	2.590
$C_2H_6 \times i-C_4H_{10}$	2.990	3.521
$C_3H_8 \times n-C_4H_{10}$	3.096	4.930
$C_3H_8 \times i-C_4H_{10}$	3.121	4.682
$n-C_4H_{10} \times i-C_4H_{10}$	4.885	8.587
R-square	0.9728	0.9665

表3 回帰式

Predicted BMEP [kPa]
$a_0 + a_1 \times [H_2] + a_2 \times [C_2H_6] + a_3 \times [C_3H_8] + a_4 \times [n-C_4H_{10}] + a_5 \times [i-C_4H_{10}]$ $+ b_1 \times [H_2]^2 + b_2 \times [C_2H_6]^2 + b_3 \times [C_3H_8]^2 + b_4 \times [n-C_4H_{10}]^2 + b_5 \times [i-C_4H_{10}]^2$ $+ c_1 \times [H_2] \times [C_2H_6] + c_2 \times [H_2] \times [C_3H_8] + c_3 \times [H_2] \times [n-C_4H_{10}] + c_4 \times [H_2] \times [i-C_4H_{10}]$ $+ c_5 \times [C_2H_6] \times [C_3H_8] + c_6 \times [C_2H_6] \times [n-C_4H_{10}] + c_7 \times [C_2H_6] \times [i-C_4H_{10}]$ $+ c_8 \times [C_3H_8] \times [n-C_4H_{10}] + c_9 \times [C_3H_8] \times [i-C_4H_{10}] + c_{10} \times [n-C_4H_{10}] \times [i-C_4H_{10}]$
Chemical formula in brackets denotes volume % of non-methane gas

表5 各ガスの混入による燃焼期間の変化

Compound		Intercept	H ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	n-C ₄ H ₁₀	i-C ₄ H ₁₀
X0-X50 Burning angle CA deg.	$\lambda=1.0$	33.71	-0.09	-0.09	-0.10	-0.23	-0.22
	$\lambda=1.5$	47.23	-0.18	-0.12	-0.03	-0.07	0.02

cept が3割ほど増加しているの、負荷低減率という観点から見ると、炭化水素系の燃料のノッキングに及ぼす影響度合は空気比によらず、ほぼ同じと見ることが出来る。M. Leiker らの研究⁽²⁾においても、炭化水素系の燃料は理論空気比よりやや過濃側において最もノッキングしやすく、希薄になるに従い急激にノッキングしにくくなるが、水素は理論空気比において最もノッキングを発生しやすく、希薄になってもそれほど耐ノッキング性が向上しないことが報告されている。このことは、筆者らの実験結果とよく符合している。

水素だけは理論空気比と希薄域とで値が異なるが、これは理論空気比と希薄域における水素の燃焼速度に与える影響が異なることに起因するものと考えられる。そこで、燃焼解析より求めた理論空気比と希薄域において、点火時期から質量燃焼割合50%に達するまでの燃焼期間が、各成分の1%の混入によりどのように変化するかを解析した結果を表5に示す。この表から分かるように理論空気比では水素が混入しても燃焼期間はあまり変わらないが、希薄域では燃焼期間が短くなり、実質的に点火進角したことと同じになり、ノッキングしやすくなっているものと考えられる。

5. 既存の指標との比較

従来から用いられている火花点火機関燃料を対象とする代表的な耐ノッキング性指標としては、ガス燃料を対象とするメタン価⁽²⁾、n-ブタン価⁽³⁾、液体燃料を主

として対象とするオクタン価が存在する。

メタン価はアンチノック成分としてメタン、プロノック成分として水素を選択し、耐ノッキング性を表わす指数として、サンプルガスと同等の耐ノッキング性を表わすガスのメタンの含有率により表わすものである。

また、n-ブタン価はアンチノック成分としてメタン、プロノック成分としてn-ブタンを選択し、耐ノッキング性を表わす指数として、サンプルガスと同等の耐ノッキング性を表わすガスのn-ブタンの含有率により表わすものである。

一方、オクタン価はガソリン燃料の耐ノッキング性を表わす指標として、ごく一般的に使用されているが、天然ガスが自動車用の燃料としても注目されているため、実験結果と比較してみることにした。

図6、7にメタン価、図8、9にn-ブタン価、図10、11にモーターオクタン価と実験結果とを、それぞれ $\lambda=1.0$ 、 $\lambda=1.5$ について比較したものを示す。

メタン価はその実験条件を理論空気比に限定しており、理論空気比での適用を前提としている。そのため、希薄域において、適用できないのではないかとはいわれていた。結果を見ると、希薄域でも傾向的な一致が見られるが、メタン-水素の2成分ガスが大きく他のプロットと異なる傾向が見られる。希薄になると、水素がノッキングしやすくなることが、大きく影響しているものと考えられる。また、メタン価の作成に際してはオクタン価の評価に用いられているCFR機関で運転中に連続的に圧縮比を変更して実験を行っている。そのため、圧縮比を変更させてノッキングを発生させることと過給圧を高めてノッキングを発生させることでは、圧縮上死点の温度が変わってくるため、ここでの実験結果と一次関数的な関係にならないのでは

図6 実験結果とメタン価の比較 (理論空気比条件)

図7 実験結果とメタン価の比較 (希薄域条件)

図8 実験結果とn-ブタン価の比較 (理論空気比条件)

図9 実験結果とn-ブタン価の比較 (希薄域条件)

図10 実験結果とオクタン価の比較 (理論空気比条件)

図11 実験結果とオクタン価の比較 (希薄域条件)

ないかと考えられたが、結果的にはかなりよく一致する。

n-ブタン価は、数種の実機を希薄域において、実験した結果から指標をまとめている。そのため、希薄域における一致度はかなり高い。しかし、理論空気比においては、水素の影響を過度に評価しており、水素を含んだ混合気の一致度がよくない。これは、我々の実験において見られた理論混合比と希薄域での水素の影響度合の違いと符合しており、水素に関しては、指標として評価して行く際に、そのノッキングへの影響度合には、空気比をパラメータとして考慮すべきことが示唆される。

オクタン価は、メタン価と同じ機関を用い、最もノッキングを起こしやすい理論空気比よりもやや過濃な領域において実験を行っている。そのため、我々の実験結果との一致度は低い。特に、水素はブタンまでの飽和炭化水素と比較すると、純ガスとしては最もノッキングしやすい燃料であるが、少量の混入であればその影響はさほど大きくないため、その影響が過大

に評価されており、我々の実験結果との一致度が高くないものと考えられる。

6. 結 論

ガスエンジンにおける燃料の組成をパラメータとして、変化させた場合の出力限界負荷が、どのように変化するかを、理論空気比、希薄域において実験した。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) ノッキングに及ぼすノンメタンガスの影響度合は、小さい方から、水素、エタン、プロパン、i-ブタン、n-ブタンの順である。この順は、今回実験した条件下では不変である。
- 2) 炭化水素系の燃料は、その混入割合が増加すると、出力限界負荷が、混入割合が少量の場合は大きく減少し、混入割合が多い場合には比較的減少幅が少ない飽和するような傾向を示すが、水素はほぼ1次的に減少する。
- 3) 炭化水素系の燃料の出力限界負荷の減少に及ぼす影響は、理論空気比においても希薄域においても同

程度である。水素は希薄になると、ノッキングへの影響度合が大きくなる。

- 4) 回帰分析を行うことにより、実験結果をよく表わすことができるノッキング発生負荷の予測式を作成することができた。
- 5) 既存の指標であるメタン価、n-ブタン価、オクタン価と実験結果を比較すると、理論空気比、希薄域共に一致度が高い指標は存在しなかった。

文 献

- (1) 例えば、後藤・伊藤・佐藤，合同シンボ予講集，(平5)，585.
 - (2) Leiker, M., ほか2名，*ASME Paper 72-DGP-4* (1972).
 - (3) Schaub, F.S., ほか1名，*ASME Paper 85-DGP-5* (1985).
 - (4) 藤本・千田ほか3名，合同シンボ予講集，(平3)，51.
 - (5) 志賀・河野・飯沼，機論，51-465，B (昭60)，1582.
-