

### 3 研 究 論 文

#### 酸素富化空気供給によるLNG機関の開発研究

鈴木自動車工業株式会社

清水義明 蜂須賀弘 前田忠政

#### 1 ま え が き

石油ショック以来、石油代替の開発研究が進められて来たが、最近石油価格の低落で石油代替燃料への関心が薄れているように感じる。しかしその埋蔵量を考えると、石油代替料の実用化研究を怠ることは出来ない。

吾々は昭和61年度より通産省の補助金を受けて「石油代替燃料(LNG)を利用したARE(ADVANCED RECIPROCATING ENGINE)自動車の実用化開発」を行っている。この研究の一環として、4サイクルガソリン機関にLNGを供給し、さらに酸素富化空気を吸気させた場合の機関性能について報告する。

#### 2 LNG機関について

LNGは自動車用石油代替燃料として、資源面、供給面のみでなく価格や安全面等でも優れ、しかもガソリン機関を特別な改造なしに使用出来て排出ガスはクリーンである。

問題はLNGの貯蔵、運搬法と出力の低下が大きいことである。

図1の結果は表1の諸元である  
エンジンをベースとしてガソリンと出力比較を行ったものである。  
供試燃料の性状は表2に示す。  
ガソリンと比べ約20%も出力低下している。

出力低下の原因は次の3項が考えられる。

- (1) LNGは気化するとガソリンと比べ密度が極めて小さく、このために行程体積中の燃料の占める割合が大きく、吸入空気量

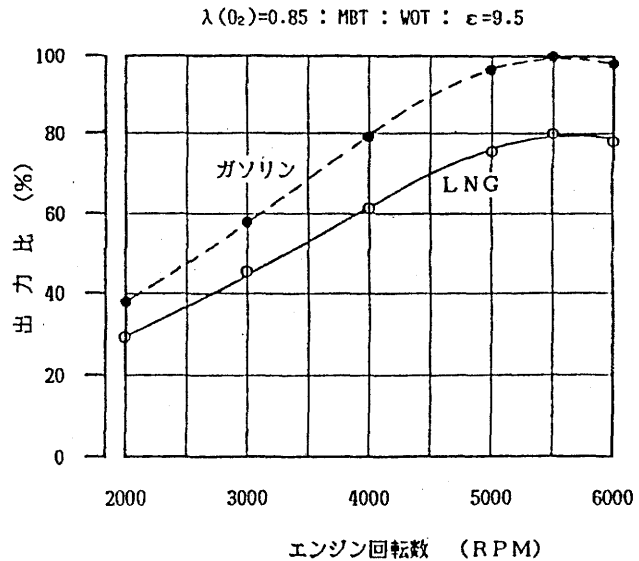


図 1 ベースエンジンでの全開出力比較

種 類	ガソリン・4サイクル		
シリンダ数及び配置	直 3 縦 置		
弁 機 構	OHC・ベルト駆動		
内径 × 行程 (mm)	62.0×60.0		
圧 縮 比	9.5		
圧 縮 圧 力 (Kg/cm <sup>2</sup> -rpm)	13.0-400		
寸法(長さ×幅×高さ)(mm)	540×534×424		
重 量 (整備) (Kg)	72		
弁 開 閉 時 期	吸 気	開 き	12° BTDC
		閉 じ	36° ABDC
	排 気	開 き	46° BBDC
		閉 じ	10° ATDC

表 1 エンジン主要諸元

			LNG(伊予初産)	ガソリン(無鉛ハイオク)
組成	CH <sub>4</sub>	VOL/%	85.8	
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		8.6	
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>		4.0	
	その他		1.6	
比重	(液)	kg/l	0.663	0.740
	(気体)	g/l	0.813	(5.8)
着火温度		℃	540	450
発熱量		kcal/kg	11720	11186
沸点		℃	-162	128
オクタン価 (RON)			127	99
エネルギー貯蔵密度		Kcal/Kg	4300	9500
理論混合比			16.7	14.8

(2)

表 2 供試燃料性状比較

が低下するためである。

(2) LNGはガソリンのように燃焼後のモル数の増加がないので気筒内圧が低い。

(3) LNGは火炎伝播スピードが遅く、最高出力を得る空気過剰率が0.95であるが、この比較テストではガソリン機関のまゝの諸元であった点も不利であった。

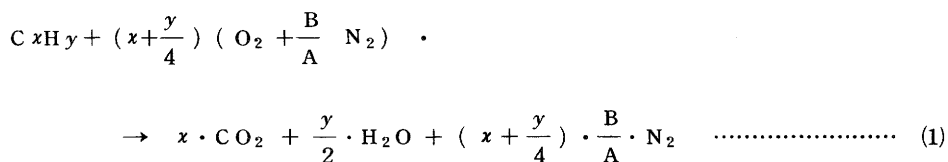
(1)と(2)に関しては出力に対する寄与率が高く、しかもLNG性状の根本問題であるからその対策が必要となる。

### 3 高出力化対策（酸素富化空気の供給）

石油代替燃料を理由に自動車性能の低下は顧客から受け入れられない。

そこで近年急速に開発が進められている酸素富化膜<sup>(1)</sup>を利用し、安価な酸素富化空気をエンジンに供給し、ガソリンと同等もしくは、それ以上の性能を目標として開発研究を行ったので、その結果を報告する。

一般に炭化水素の理論混合気での燃焼は次の反応をする。



A：空気中の酸素濃度（vol %）

B：空気中の窒素濃度

上式より吸入空気量が減少しても、その分酸素濃度を高くすれば、窒素濃度が減少し、燃焼ガス温度が上り、高出力で高効率のエンジンが出来ると判断した。

そして次式が成立すると仮定した。

$$\frac{P}{V \cdot N_e} \propto \eta_i \times \eta_m \times \eta_v \times \left(\frac{A_i}{A_o}\right) \quad (2)$$

A<sub>o</sub>：自然空気の酸素濃度

A<sub>i</sub>：酸素富化空気の酸素濃度

P：正味出力

V：排気量

N<sub>e</sub>：エンジン回転数

η<sub>i</sub>：熱効率

η<sub>m</sub>：機械効率

η<sub>v</sub>：吸入効率

#### 4 実験方法

実験装置の概要は図2に示す。

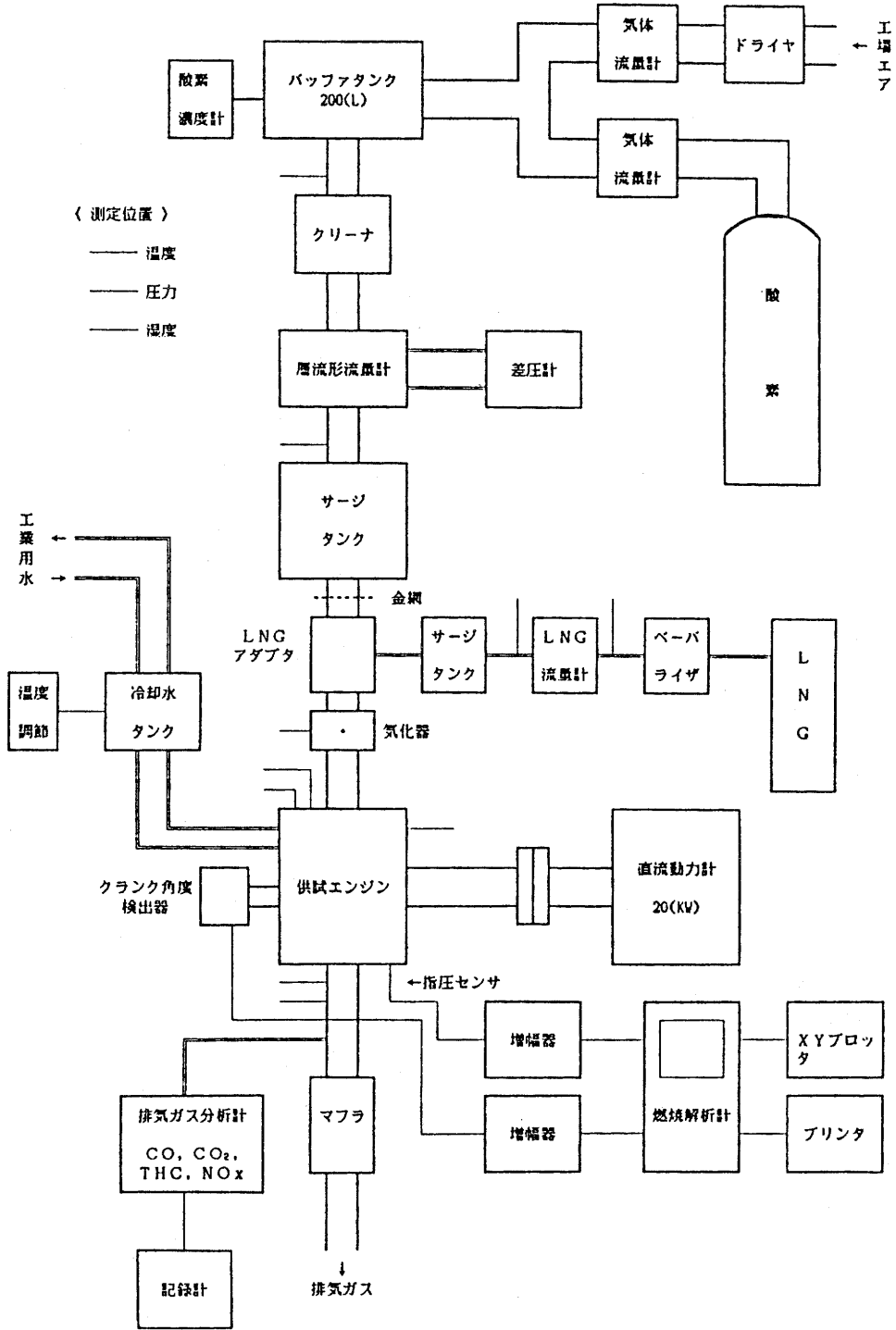


図2. 実験装置系統図

酸素富化空気は酸素ポンプと工場エア-をそれぞれ流量を制御して、酸素濃度を管理して供給される。

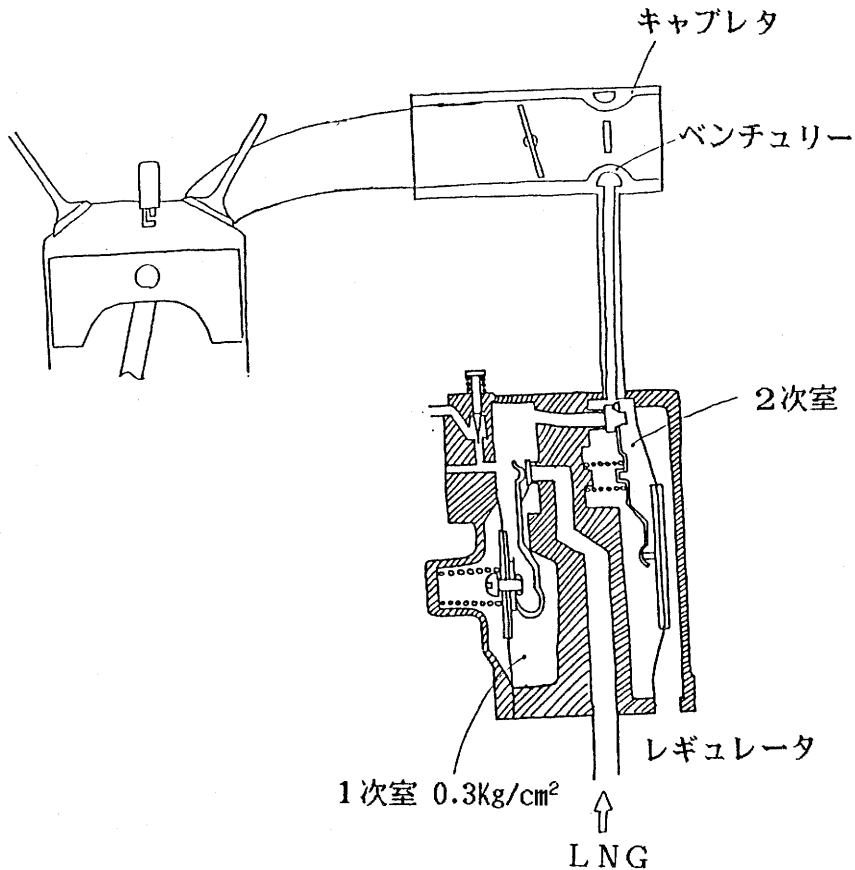


図 3 燃料供給系

燃料は図3に示す通りLPG用レギュレータを使用し、これを介して供給した。

尚、本実験中で筒内圧力の測定及びイオンギャップ法による火炎スピードや波形解析を行っているがこれ等は200サイクルのデータをサンプリングして平均値処理したものである。動力測定はトランスミッション、プロペラシャフトを介して、JISに準じて実験した。

## 5 実験結果

### 5-1 酸素濃度と燃焼速度について

LNGを燃料とした場合、そのMBT(MINIMUM ADVANCE FOR THE BEST TORQUE)はガソリンより早める必要があり、スロットル全開で空気過剰率0.85では約5°が要求さ

れる。

しかし酸素濃度を高めるに従って、遅角する必要が出て来る。その様子を見るためにイオンギャップ法で観測した。結果を第4図に示す。これから酸素濃度の増加に従ってイオン電流は大きくなり、燃焼時間が短くなって行く様子が分る。

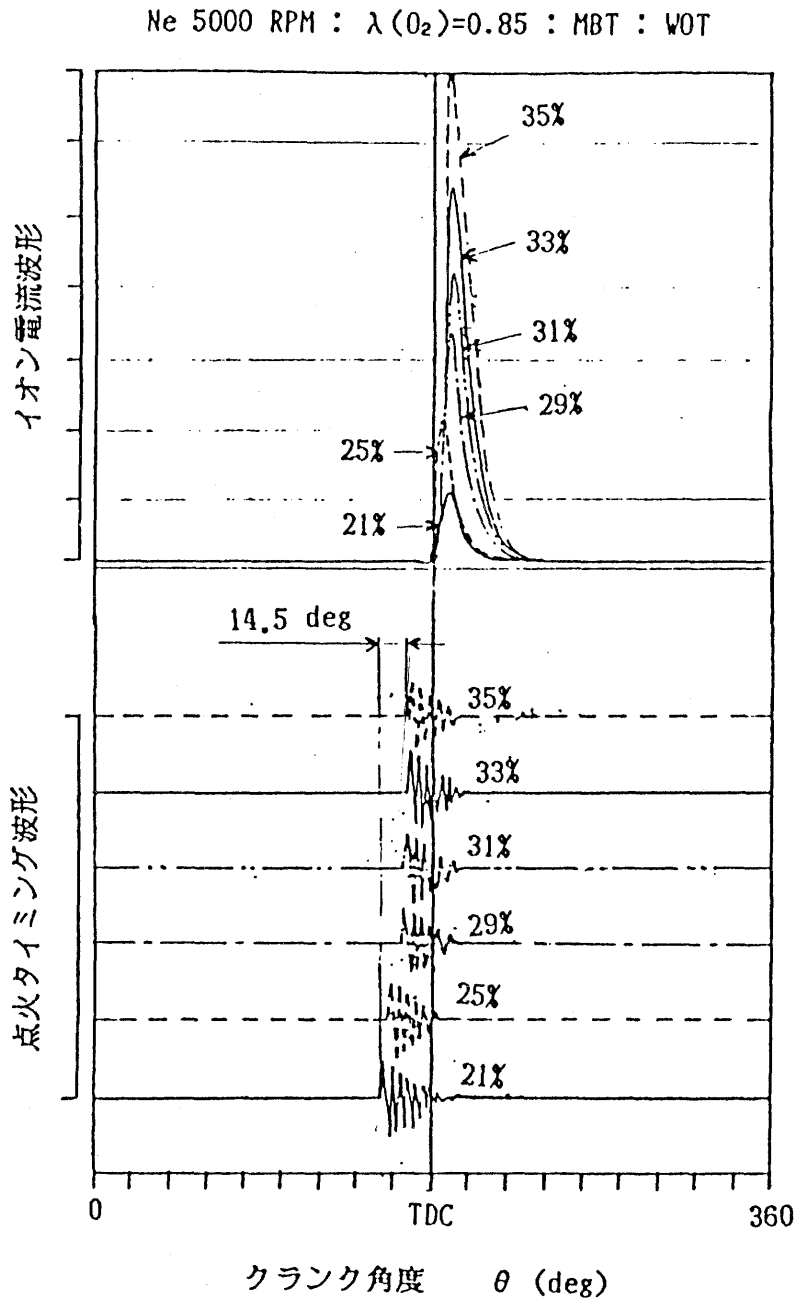


図 4 イオン電流波形及び点火タイミング波形

飯沼教授の研究<sup>(3)</sup>によれば「イオン電流の大きさは燃焼条件が苛酷になるほど、即ち燃焼反応が激しくなるほど大きく、又燃焼時間は短くなる。」と報告されている。

第4図の結果はまさしく、この研究の通りで、酸素濃度の増加と共に燃焼反応が激しくなることが裏づけられる。

第5図には酸素濃度をパラメーターとして図示平均有効圧力の最大となる点火時期を示す。(この結果は後述する動力計実験結果と無論良く一致している。)

即ち酸素濃度の増加と共に燃焼速度が上り結果としてMBTは遅角し、平均有効圧力は増大する。

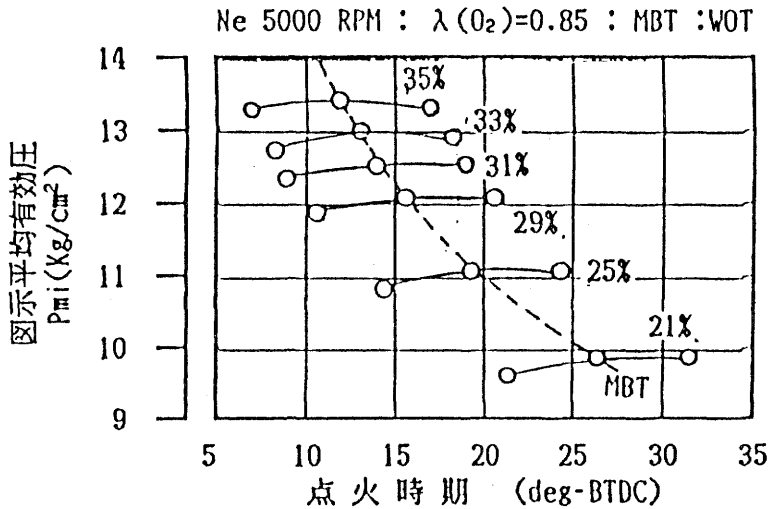


図 5 酸素濃度と図示平均有効圧

### 5-2 酸素濃度が出力に及ぼす影響

LNG はガソリンと比べ燃焼速度が遅く、圧力上昇率も小さいが酸素富化空気を供給することにより燃焼速度が増し、圧力上昇率も急増する。第6図にはガソリンとLNGを燃料とした場合と更にLNGで35%濃度の酸素富化空気を供給した場合の燃焼波形を図示した。これから酸素富化空気の供給は出力の増大に有効な手段であることが証明された。

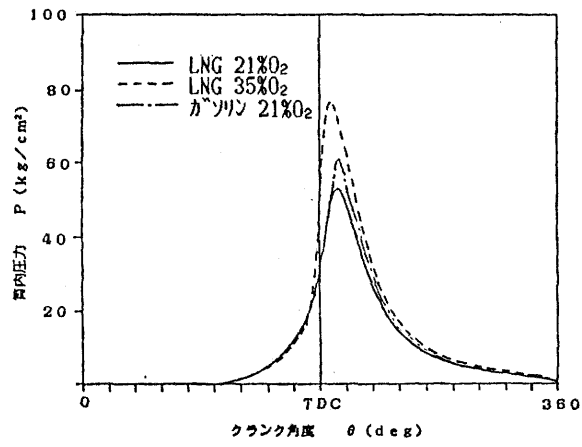
第7図には動力計実験で得られたデータを示す。これからガソリン機関をベースとしてLNGを供給した場合、ガソリンと比べ約20%の出力低下を招いることが分る。

この原因は冒頭で述べた通り体積効率が13%も落ちていることに起因する。これはLNGが気化してシリンダー容積に占める割合が大きいためである。即ち酸素濃度21%の条件下でガソリンとLNGの体積効率を比較するとガソリンが85%であるのに対しLNGでは75%以下になってしまう。

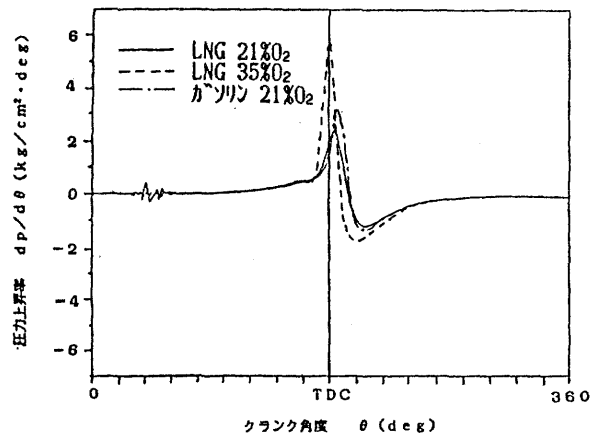
一方、酸素富化空気を供給した場合、酸素濃度によらず比例して出力が増加するが、LNGの場合はガ

Ne 5000 RPM :  $\lambda(O_2)=0.85$  : MBT : WOT :  $\varepsilon=9.5$

P- $\theta$



$dp/d\theta - \theta$



P-V

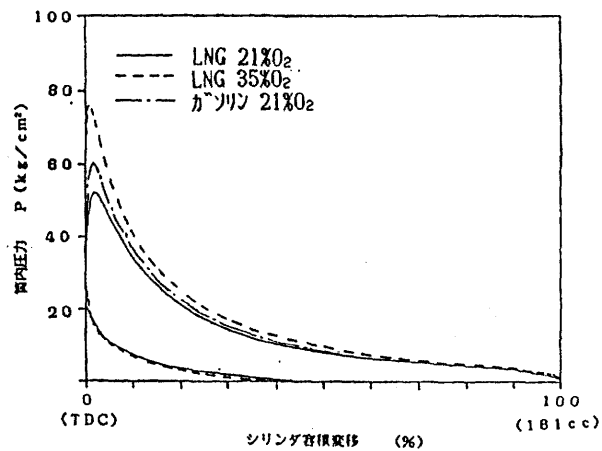


図 6 酸素濃度の燃焼特性への影響



Ne 5000 RPM :  $\lambda(O_2)=0.85$  : MBT : WOT :  $\epsilon=9.5$

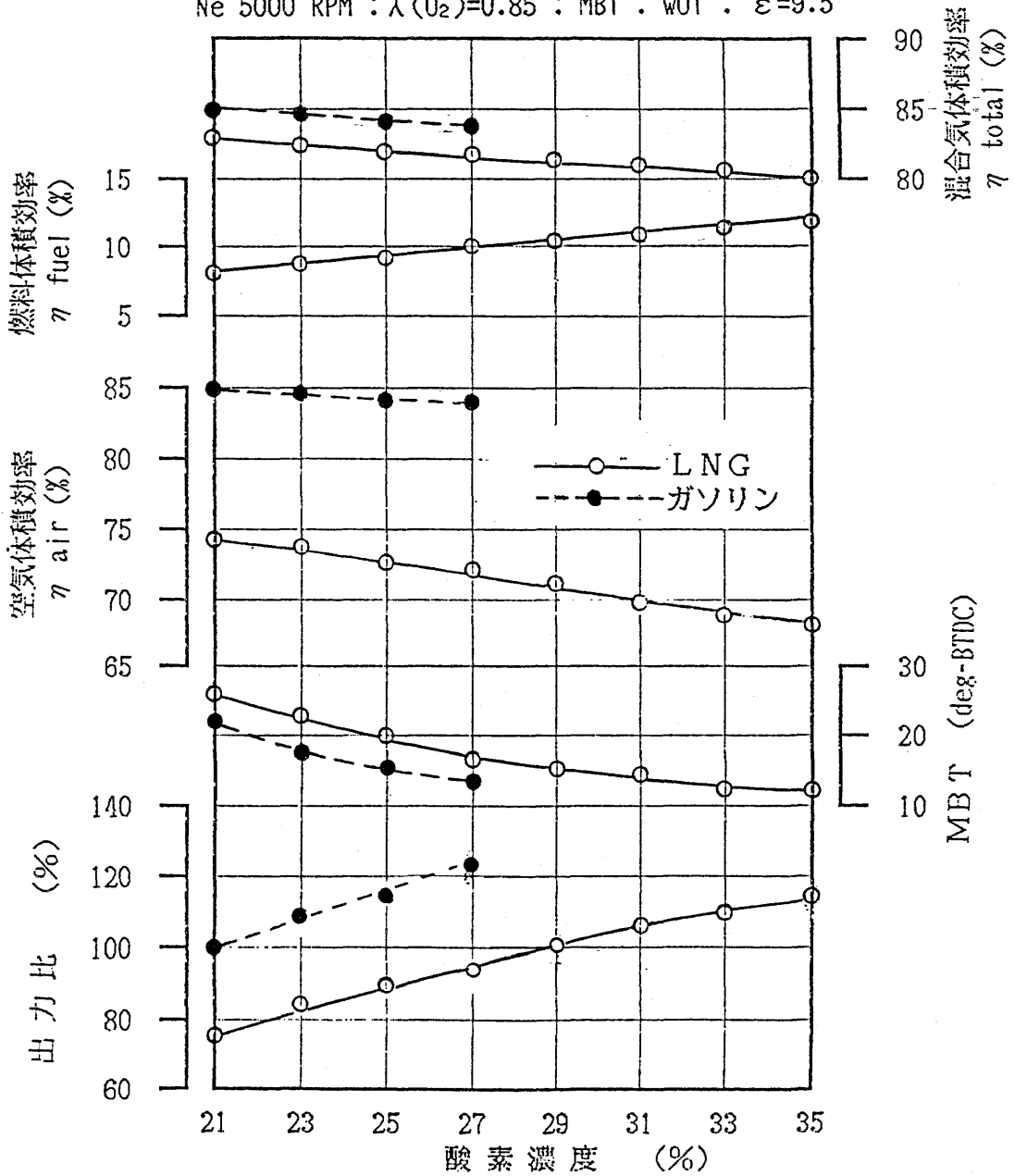


図 7 燃料による出力及びエンジン諸性能の違い

ソリンに比べて酸素濃度による出力増加率が小さい。これも酸素濃度の増大に対しガソリンの体積効率が無視し得るほど小さいのに、LNGの場合はその濃度と共に体積効率が減少するため酸素富化の効果が少ない。第7図を純粋酸素量で整理しなおすと、出力増加率はガソリンもLNGもほぼ同一とな

る。即ち「出力は純粋酸素量に比例する。」と云える。(2)式中の  $\eta_v \times \frac{A_i}{A_o}$  はまさしくこれを意味する。  
 燃焼前後のモル教の変化もガソリンの場合は酸素濃度と共に増加していくのに、LNGは変化しない点も出力増加率が低い理由である。

しかしガソリンより約20%も低い出力のLNGの場合でも29%濃度の空気を供給すれば、ほぼ同一の出力が得られることが分った。

### 5-3 酸素濃度と燃費率について

酸素過剰率を一定にしての実験であるから酸素濃度が高くなった分だけ燃費の増加は当然であるが、酸素富化空気の場合は窒素濃度が減少するからその分熱損失が減少し、燃焼ガス温度も上り、熱効率も向上するものと推定した。しかし図8の通り酸素濃度による燃費率の改良は期待出来ない。これは図9

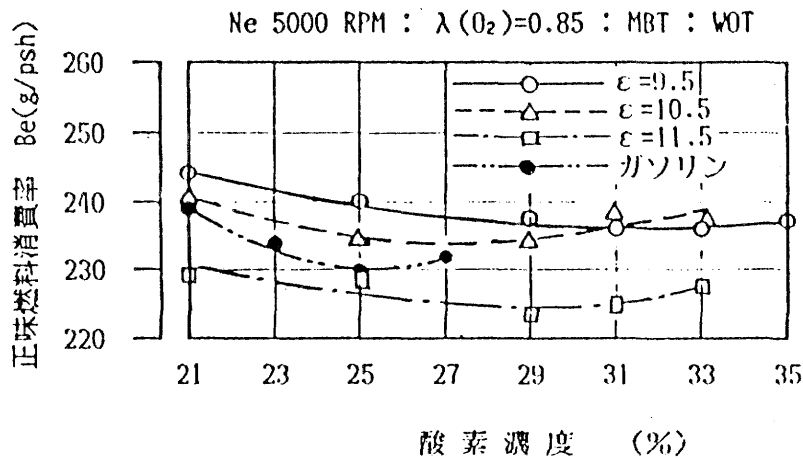


図 8 酸素濃度と燃料消費率

に示す通り、酸素濃度を増すに従って中心電極温度、排気温度、ともに上昇している。このことは燃焼温度は上がるが、排気損失も増加して熱効率は改善されないものと考ええる。

### 5-4 燃費率の改善

燃費率の改善には定石として高圧縮比化と希薄燃焼が考えられる。LNGはオクタン価が127と高く、耐ノック性に優れているので圧縮比を上げることが可能で、出力の向上と共に燃費率の向上が期待出来る。そこで圧縮比( $\epsilon$ )を9.5 10.5 11.5 と変えて実験した。

その結果を図8に示す。

ガソリン諸元のまゝではLNGの燃費率はガソリンの場合より悪かったが $\epsilon=11.5$ にすることによりこれを上廻ることが出来た。

しかし $\epsilon=11.5$ で酸素濃度を31%以上にするとノッキングを発生するようになる。

Ne 5000 RPM :  $\lambda(O_2)=0.85$  : MBT : WOT

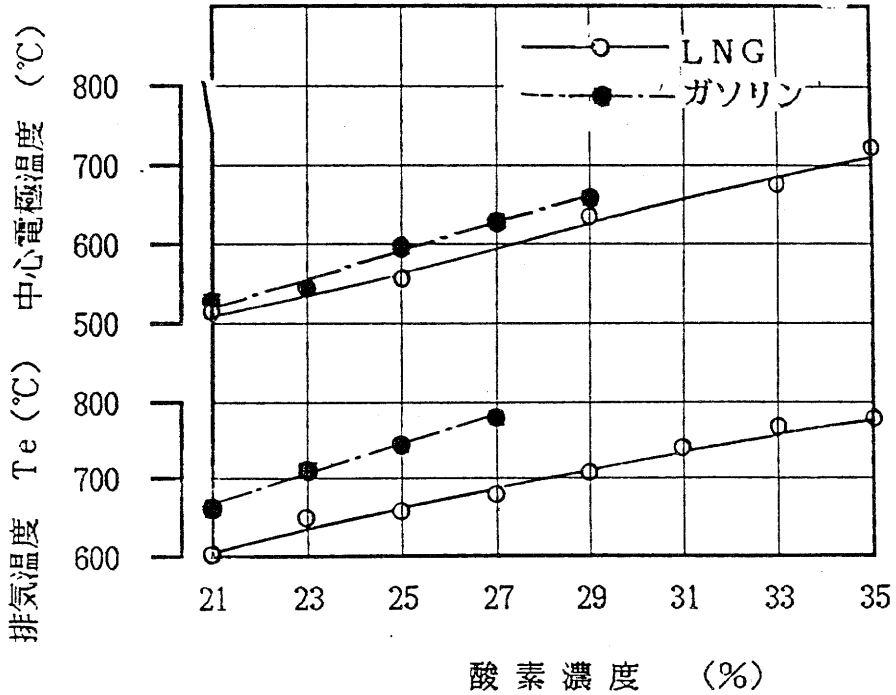


図 9 酸素濃度と中心電極・排気温度特性

対策として冷却水温の低下，2プラグ方式，空気過剰率の低下，圧縮比の低下，EGR，吸気冷却，水噴射，等々が考えられるが，この一部を試みたが，性能の悪化なしに効果のあったのは，LNGの冷熱を利用して，吸気冷却したことである。

詳細は後に譲る。次にLNGに対する空気過剰率について記述する。図10に示す通り，いずれの酸素濃度の場合でも空気過剰率が大きくなるに従って，燃料消費量は減少し，体積効率は増加している。最高出力空気過剰率は0.95であることが分る。

即ち圧縮比1.5，空気過剰率0.95がLNG燃料に対する，出力を中心とした最良諸元である。

#### 5-5 酸素濃度と排気エミッション

LNGはガソリンと比べクリーンなエネルギーであると云われている。確かに第11図に示す通りHCもNoxも低い値であるが，供給空気の酸素濃度が高くなるに従ってNoxは増加する。しかもNoxは空気過剰率の影響が大きく，空気過剰率が大きいと酸素濃度と相乗して著しく増加することが分る。

これらのことは前述のイオン電流やインジケータ線図から予知された問題である。

Noxの低減にはEGRをはじめとしたノッキング防止策と同じで，出力の犠牲なしに良い対策はない。結局は空気過剰率を0.95とし，酸素濃度も29%を限度として還元触媒で後処理を考えている。

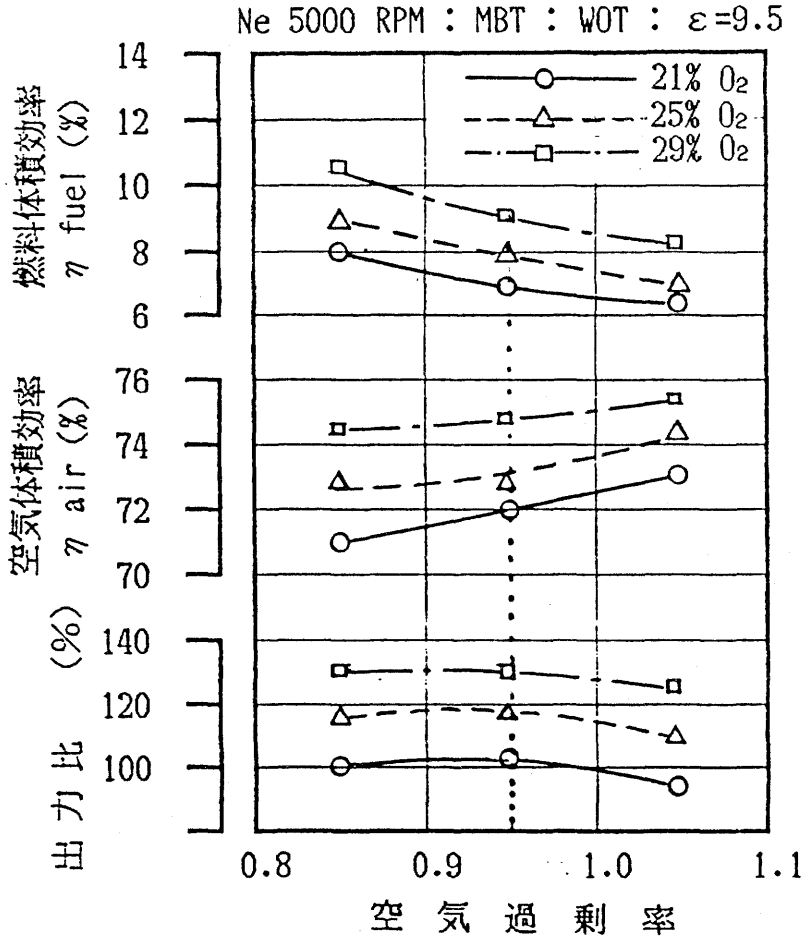


図 10 空気過剰率とエンジン性能

これも今後の課題として追求する。圧縮比の影響は無視し得るので今後とも 1.1.5 を更に高める工夫をする。

THC に関しては酸素濃度と共に減少するので特に問題なく、増々クリーンの方向となる。

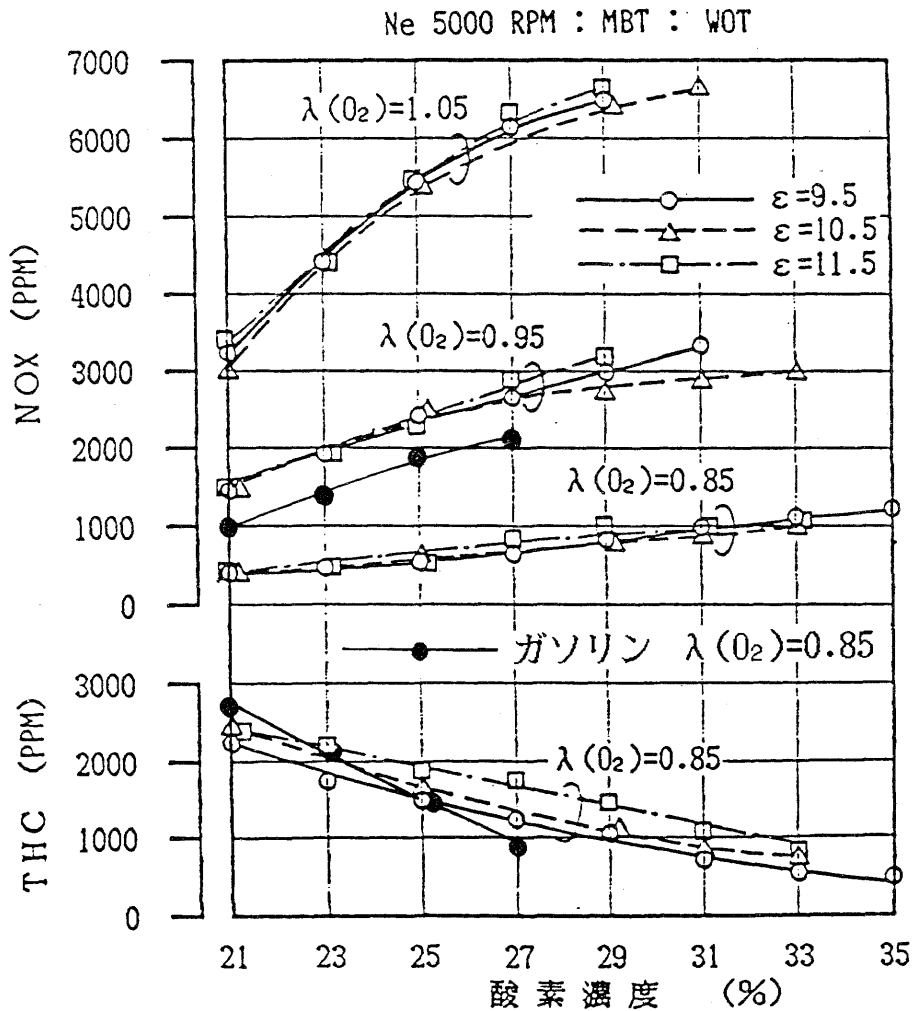


図 1 1 圧縮比及び空気過剰率による排気特性

## 6 ま と め

- (1) ガソリン機関のまま LNG 燃料を使用すると約 20% も出力が低下する。
- (2) しかし、酸素富化空気を供給することにより、逆にガソリンも 11% も出力向上する。
- (3) 燃費率に関しても LNG の性状を活かし高圧縮比化、燃料の希薄化によりガソリンの場合より 16% も向上出来た。
- (4) LNG はクリーンなエネルギーでガソリンより低い排ガス値であるが、酸素富化や燃料の希薄化により Nox が増加する。Nox 対策は今後の課題である。
- (5) 実用化を考慮した LNG 機関の諸元とその場合の性能を表 3 に示す。

Ne 5000 RPM : MBT : WOT

エンジン諸元		ガソリン	L N G	
	圧縮比 ( $\epsilon$ )	9.5	9.5	11.5
酸素濃度 (%)	21	21	29	
MBT(deg-BTDC)	22	26	12	
$\lambda$	0.85	0.85	0.95	
性能	正味馬力 (PS)	28	22	31
	正味燃料消費率 (g/psH)	240	244	202

表 3 酸素富化LNGエンジンの諸元と性能

## 7 将来展望

- (1) LNGは従来の機関に特別な改造なしに使えるし、LNGの冷熱利用や酸素富化燃焼による排気熱の利用で更に高効率が期待出来る。
- (2) 酸素富化燃焼技術はLNGのみでなく他の機関にも広く利用出来て、小容量で高出力性能を有する機関が期待出来る。
- (3) LNGはクリーンであり、しかも最近問題となっている炭酸ガスの排出に関しても少く、価格、供給面でも安く、安定しているので石油代替燃料として将来有望である。
- (4) しかしLNGも有限の燃料であり、将来は水素を燃料としたエンジンの実用化開発も急がねばならない。

## 8 参考文献

- (1) 通産省基礎産業局  
「酸素富化膜の開発とその燃焼システムへの応用」
- (2) 蓮池宏「天然ガス自動車国内外の開発普及状況」 エネルギー総合工学 Vol 10. №3
- (3) 飯沼一男「法政大学工学部研究報告」 第3号
- (4) 清水他3名 「酸素富化空気の供給によるエンジン性能」

スバキ技報 Vol 14 №1