

## 超希薄水素エンジンの低公害性と熱効率向上の可能性検討

山根 公高、首藤 登志夫、中島 泰夫

武蔵工業大学 水素エネルギー研究センター

158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

A Feasibility Study on Lean-burn Hydrogen Fueled Engines  
with High Thermal Efficiency and Low Emission

Kimitaka YAMANE, Toshio SHUDO and Yasuo NAKAJIMA

Hydrogen Energy Research Center, Musashi Institute of Technology

1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557

A feasibility study on lean-burn hydrogen fueled engines with high thermal efficiency and low emission has been carried out to demonstrate the application to hybrid electric vehicles by reviewing two papers [1,2]. The following conclusions have been obtained. (1) High thermal efficiency and emissions as low as EZEV (Equivalent Zero Emission Vehicle) level can be attained by lean-burn hydrogen fueled engines with reasonable acceleration and hill climbing performance. (2) A simulation study has shown that a range of 508 km as long as for a conventional gasoline car can be also obtained by series hybrid electric vehicle with the hydrogen fueled engine on board while using only 5kg liquid hydrogen equivalent to about 19 liters gasoline. The engine, at the same time, can overcome the emission level of EZEV. (3) Even if the engine system is a conventional reciprocating lean-burn hydrogen fueled engine, it gives NOx emission as low as 1/7.5 of EZEV level of NOx. The range is as short as 330 km but acceptable. (4) Lean-burn hydrogen fueled engines also give basically the same benefits as a fuel cell, with well-known technology that can be applied immediately.

Key words: Hydrogen engine, Alternative fuel, Hybrid Electric Vehicle, EZEV

## 1. まえがき

内燃機関、特にレシプロ式内燃機関は、燃料電池システムに比べて、低コストでかつ高い信頼性のある動力源として長い間利用されてきた。問題は、その燃料に化石燃料を使う事と、自動車の運転時間で多くを占める低出力時、内燃機関の熱効率が燃料電池に比べてかなり低い事である。内燃機関は高負荷で運転すれば、燃料電池に匹敵する高い熱効率で運転できる(図1[3])。従って、水素を燃料とする水素エンジンをハイブリッド電気自動車用エンジンとして適用すれば燃料電池電気自動車に匹敵する高い熱効率と低公害性を実現できる可能性がある。特に、シリーズ型ハイブリッドシステムでは、エンジン回転数および出力を限定した運転が可能のため、各種条

件を最適化する事により著しい高い熱効率と低公害性が期待できる。かつ希薄混合気で運転するので、簡単な予混合運転でも水素エンジン特有の逆火現象を起こさない範囲の運転が可能となり、水素エンジンで唯一の公害排気物としての窒素酸化物(NOx)をEZEレベルにまで低

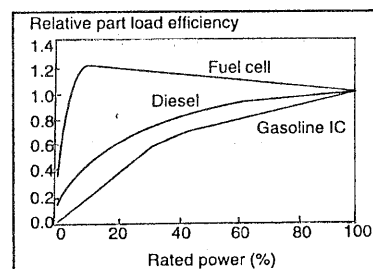


図1 各種原動機の熱効率比較

減できる可能性が考えられる。そこで、本報告では、市販の4気筒ガソリンエンジンを水素エンジン化し、上記についての実現性を実験的に検討した結果と、単筒エンジンを水素エンジン化して運転したデータを用いて、4気筒水素エンジンの計算モデルを作って、エンジン性能と排気性能マップを描き、その4気筒水素エンジンシステムとそのエンジンを積んだシリーズ型ハイブリッドシステムを計算上で作り上げ、計算シミュレーションによって都市型、ハイウェイ型、都市/ハイウェイ複合型の走行シミュレーション運転で得られた燃費、排気性能、一充填走行距離、加速性能および登坂性能を評価した報告について述べる。あわせ内燃機関水素自動車の将来展望を示す。

## 2 4気筒ガソリンエンジンの改造によるハイブリッド電気自動車用水素エンジンの例 [1]

水素エンジンに改造した4気筒ガソリンエンジンの機関仕様を表1に示す。

このエンジンを用いて高熱効率でかつ低公害であるシリーズ型ハイブリッド電気自動車用水素エンジンとしての可能性を見出すため、実験を行った。燃料供給は、各気筒の水素供給量を均等にするため、水素供給管の上流にサージングタンクを設け、かつ水素は外径約6mmの

表1 供試エンジン GA13DE の仕様

Engine	Nissan GA13DE
Cylinder	In-line 4 cyl.
Total Displacement(cc)	1295
Combustion Chamber	Pent roof
Valve Mechanism	16-valve DOHC
Bore x Stroke(mm)	71.0 x 81.8
Connecting Rod length(mm)	140.5
Piston Offset(mm)	1.0
Compression Ratio	9.5 or 12.0
Size[length x Width x Height](mm)	655 x 575 x 665
Valve I.V.O[ATDC]	4
Timing I.V.C[ABDC]	38
E.V.O[BBDC]	46
E.V.C[BTDC]	4

パイプを通し、吸入空気流れ方向に直角に2段90度おきにパイプに明けられた8個のφ1.1mmの穴から各気筒の吸気管へ連続噴射する方法でエンジンに供給した。空気と水素が燃焼する事で発生する排気中のNOx、エンジン潤滑油が燃焼して発生する全炭化水素(T.HC:メタン換算)、一酸化炭素(CO)は、低濃度で排出されるので、特別注文した水素エンジン用低濃度排気ガス分析装置(堀場:MEXA-9100LE)にて排気マニフォールド集合部より165mm下流に設けたサンプリング孔より採取計測した。エンジンの出力は、電気動力計(東京計器:EWS-250-L)、各気筒の筒内圧力計測は、ピエゾ式圧力計(AVL:GM12D)、空気過剰率λは、エンジン空気取り入れ口に設けた層流流量計(司測研:LFE-756,S/N80A-01)で計測した空気流量と水素供給ラインに設けた質量流量計(OVAL:F-113K-A-15-11N)で計測した水素流量から求めた。

### 2.1 目標性能

水素エンジン唯一の公害成分であるNOx排出濃度は、EZEVを満足する事、出力は総重量1トンの車両が平坦路面を時速100kmで定常走行できる事を念頭に置き、それぞれ10ppm、20kWの目標値を仮に設け、シリーズ型ハイブリッド電気自動車の運転特性を生かした各種条件を最適化する事により、熱効率の向上がどこまで可能かを実験的に調べた。

### 2.2 各種条件の熱効率および排気性能に与える影響

#### (1) 負荷制御方法の影響

予混合運転水素エンジンの過去の経験から逆火を抑え、低NOx化をはかるためには、空気過剰率λ=2~5の運転が望ましい。部分負荷領域では、混合気量あるいは混合気濃度による負荷調整が必要である。そこで吸入空気を絞り弁で絞り、空気過剰率λ=2.0、2.5、3.0一定になるように水素を供給する混合気量調整法と絞り弁を全開(WOT)にしたままで、水素流量のみを調整する混合気濃度調整法について、正味平均有効圧力(B.M.E.P: Brake Mean Effective Pressure、エンジン出力を圧力に換算)に対し正味熱効率η。(Brake Thermal Efficiency)とNOx排出量を調べてみた。その結果を図2に示す。図より混合気濃度調整法の方が絞り損失が小さいので正味熱効率が高く、部分負荷領域では、空気過剰率λ=2以上の大きい空気過剰率で運転可能なためNOx

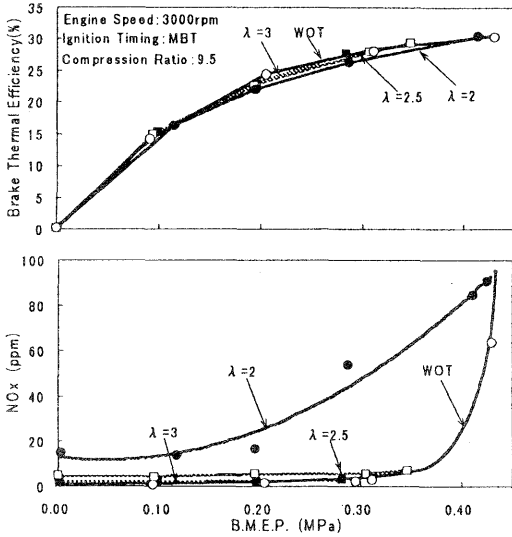


図2 正味熱効率およびNOx 排出濃度に対する負荷制御方法の影響

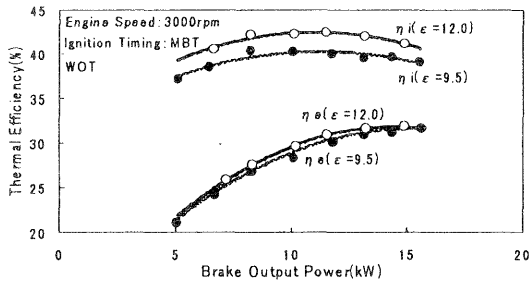


図3 圧縮比の影響

も小さく抑えて運転できる事が判った。以降の運転は、全て混合気濃度調整法で実施した。

(2) 圧縮比の影響

圧縮比が熱効率に及ぼす影響を調べるため圧縮比 9.5 と 12.0 の 2 通りの圧縮比について調べた。図 3 に結果を示す。圧縮比を 9.5 から 12.0 にする事によって、図示熱効率  $\eta_i$  (Indicated Thermal Efficiency) は、2.5% 程度向上しているが、正味熱効率  $\eta_b$  は、1% 弱程度向上するのみであった。この原因は筒内圧力の増加に伴い機械効率が低下したものと考えられる。

(3) 燃焼室内の空気流動による燃焼改善の試み

圧縮比 12 のままで各気筒に設けられた 2 弁の吸気バルブのうち 1 弁を閉じてスワール空気流動を激しくする事による燃焼改善を試みた。その結果を図 4 に示す。上

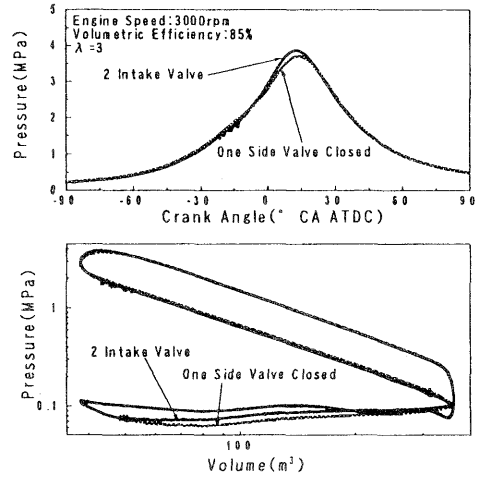


図4 吸気弁1弁を閉じてスワールを強化した効果

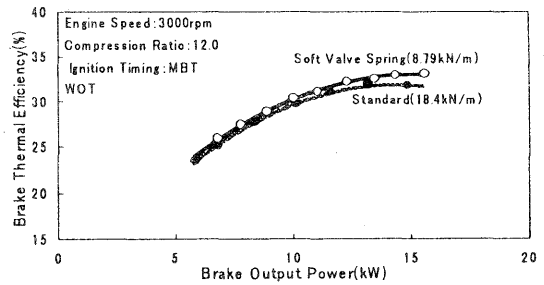


図5 バルブスプリングバネ定数半減の効果

図に示す燃焼圧力線図には大きな差は見られず、下図に示すように逆にポンプ損失が大きくなり熱効率は低下する結果となった。

(4) 機械効率の影響

エンジンの正味熱効率  $\eta_b$  の向上をはかるためには、燃焼状態の改善による図示熱効率  $\eta_i$  の向上と摩擦損失の低減による機械効率の向上がある。摩擦損失低減には以下のようなものがある。

- 1) 動弁系摩擦低減
- 2) 主軸、コンロッド軸受け等の摩擦低減
- 3) ピストン・シリンダライナ間摩擦低減

これらの摩擦低減は、シリーズ型ハイブリッド電気自動車用エンジンに限定すれば、4000rpm 以下の低回転で運転する事が可能となるので、一般自動車エンジンより更に摩擦低減が可能となる。

高速運転が必要でない事から、バルブスプリングのバネ

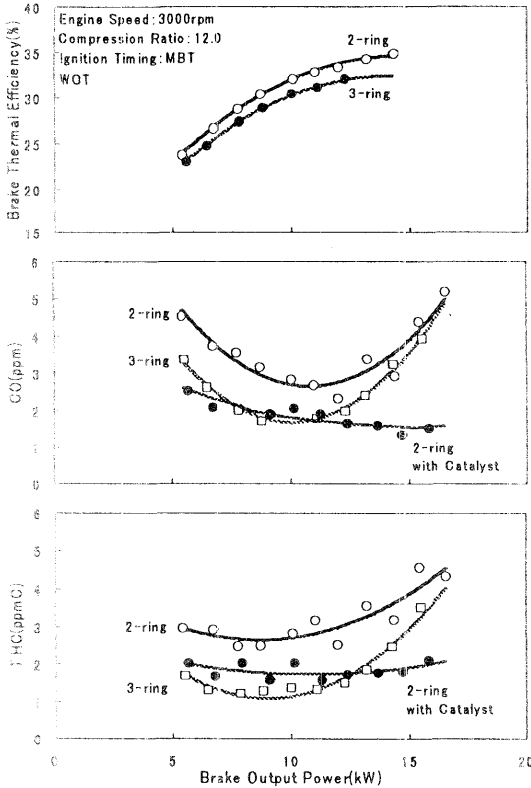


図6 2本リングの影響

定数をガソリンエンジンの約半分にして圧縮比 12、吸気弁を 1 弁から 2 弁に戻し、その効果を調べた。図 5 にその結果を示す。正味熱効率  $\eta_e$  で 1% 程度の向上が得られている。次に、ピストン・シリンダ間の摩擦低減をするために、3 本ピストンリングのうち 2 本ある圧縮リングを 1 本取り除き、リング 2 本で実験を行った。2 本リング化によるブローバイガスの増大を避けるために、リング合口隙間を 0.3mm から 0.1mm に縮小して実施を行った。図 6 にその結果を示す。正味熱効率で 3% 程度の向上が得られている。オイルが燃焼して排出される T.HC、CO については、2 本リング化により多少増加しているが、微小な値である。また、ピストンリングの薄幅化および張力の低減とにより更なる熱効率の向上が考えられる。

図 7 は、本研究で正味熱効率向上をもたらした混合気濃度調整法の採用、高圧縮比化、バルブスプリング定数の半減化、ピストンリング 2 本化全ての対策を盛り込んで運転し得られた NOx 排出濃度と正味熱効率を正味出力にて整理したものである。NOx 排出濃度の目標値は、10 ppm を満たすためには、エンジン回転数に係わらず

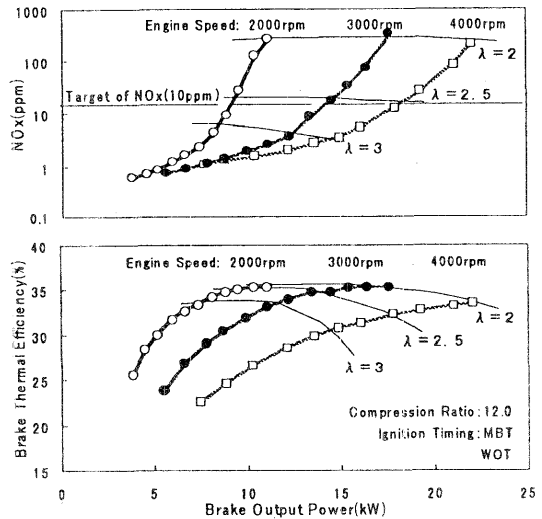


図7 各エンジン回転数に対する NOx 排気濃度と正味熱効率

空気過剰率  $\lambda=2.5$  以上での運転が必要であるが、空気過剰率  $\lambda=2.5$  以上では、出力目標 20kW に達する事が出来ない。その分エンジン排気量を増加する必要がある事が判った。

### 3. 運転シミュレーションによるシリーズ型ハイブリッド電気自動車用水素エンジンの評価

#### 3.1 単筒水素エンジンの実験結果を用いたシミュレーションモデルの一致性評価

表 2 に、供試単筒エンジンの仕様と運転条件を示す。超希薄混合気で熱効率向上と極低 NOx 排出量を実現するため、Smith, Olsson と Johansson らが開発した水素エンジンの燃焼室は、スキッシュ効果の無いピストン上面がフラットなピストンを用いた最も熱損失を小さくした燃焼室である。圧縮比 14、行程長 92mm と長く、低回転用にして、機械損失を低減したエンジンである。比出力向上の為、機械過給またはターボ過給どちらも利用できるようなっている。実際に本エンジンを運転して得たエンジンおよび排気データをベースに 0 次元、時間関数燃焼モデルを作り、エンジン燃焼圧力のシミュレーションを行った。その結果燃焼圧力の相対誤差は 0.5% 程度であり、全使用エンジン回転範囲、全使用当量比範囲および全使用吸入圧力範囲での全体の最大誤差は 1% である事が判った。熱損失計算の為の熱伝達率は、

表2 供試エンジンの仕様と運転条件

Bore x Stroke (mm)	82.55 x 92.08
Displacement(cc)	493.0
Compression Ratio	14.0
Experimental Range for Equivalent Ratio	0.2-0.5
Experimental Range for Engine Speed(rpm)	1200-1800
Experimental Range for Volumetric Efficiency	90-215%

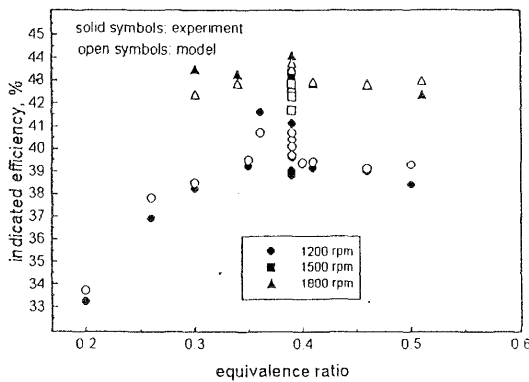


図8 燃焼シミュレーション計算値と実験地の図示熱効率比較

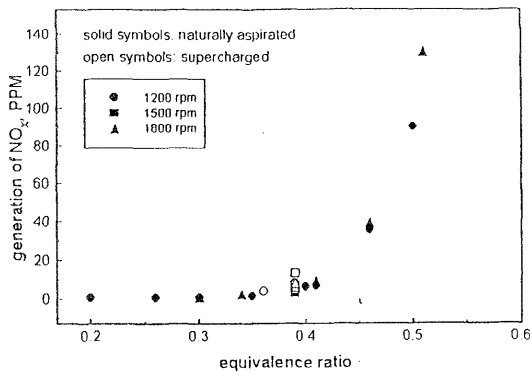


図9 実験で求められたNOx排出濃度と当量比の関係

Woschni's の式を利用して計算した。しかし、実際の水素エンジンの運転では熱伝達による熱損失が計算値より約1.8倍大きい事が判明したので、計算式の係数を1.8倍としシミュレーション計算に用いた。正味熱効率を予測するため、本シミュレーションモデルには、

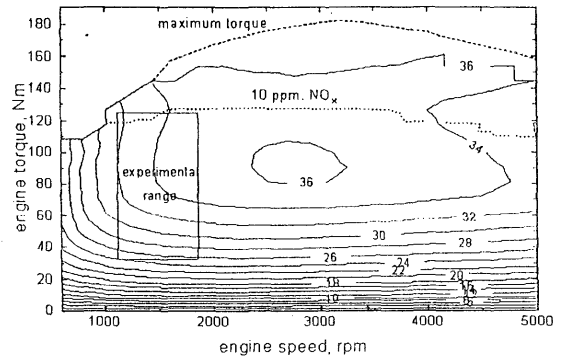


図10 シミュレーション計算による正味熱効率マップ

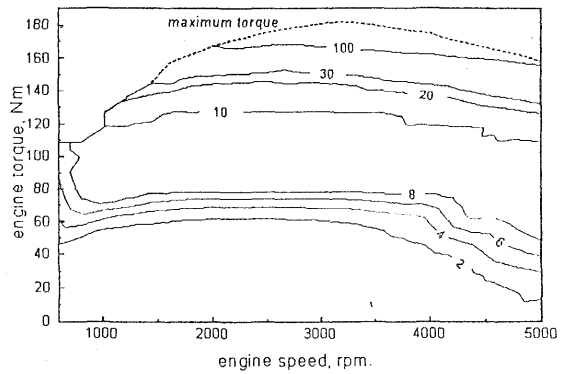


図11 シミュレーション計算によるNOx排出濃度(ppm)マップ

Patton らが1989年に発表した摩擦損失モデルおよび機械過給またはターボ過給熱力学モデルが織り込んである。熱交換率0.7の水冷式インタークーラのモデルも含めた。NOx 排出濃度は、実験で得られた当量比φ(=1/空気過剰率λ)とNOx 排出濃度の関係から求めた。過給機使用時のNOx 排出濃度は、過給によるエンジン入口温度上昇を考慮して修正をかけた。体積効率は、低速で85%、高速4000rpmでは、95%とし、5000rpmでは、90%として計算を行った。燃焼モデルから得られた図示熱効率の計算値と実験で得られた図示熱効率を当量比で整理し比較したものを図8に示す。全運転範囲で最大誤差は、1%程度である。NOxについては、当量比の関数である。図9に実験で得られた当量比とNOx 排出濃度の関係を示す。この関係をシミュレーション計算では利用している。

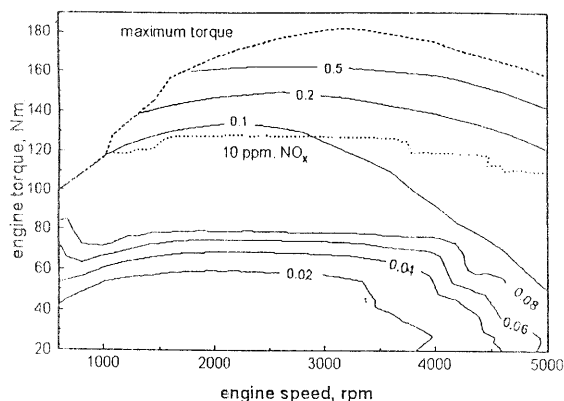


図 12 シミュレーション計算による  
NOx 比排出量 (g/kWh) マップ

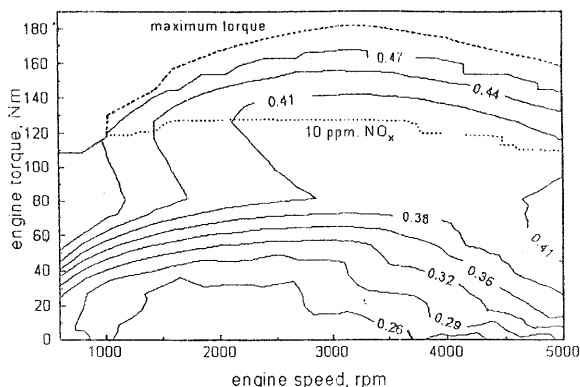


図 13 シミュレーション計算による  
当量比  $\phi$  マップ

### 3.2 機械過給 4 気筒水素エンジンのシミュレーション 運転

シミュレーション計算で得られるエンジン性能および排気性能が変化するのを避けるため、シミュレーション計算対象 4 気筒エンジンは、データを取るのに用いた単筒エンジンの幾何学的仕様を踏襲してシミュレーション計算を行った。その結果を図 10 にエンジン回転数とエンジントルクのマップ上に正味熱効率を示した。図 11 に NOx 排出濃度 (ppm)、図 12 に NOx 比排出量 (g/kWh)、図 13 に運転時の当量比を示す。最大正味熱効率は当量比  $\phi=0.4$  即ち空気過剰率  $\lambda=2.5$  で、36%となっており参考文献 [1] のデータにも近い。NOx 排出濃度はトルク 40Nm までほとんどエンジン回転によらず 2ppm 一定である。トルク 80~120Nm 間もエンジン回転数によらず 8~10ppm である。このことは、低トルク、低回転を中心とする都市走行モデルでは、NOx 排出量を小さく出来る事を意味している。単筒水素エンジンの運転範囲は、1200~1800rpm である。そのデータから外挿して 5000rpm までのデータを作ったので、外挿による誤差が生じる事が考えられる。エンジン回転数が変われば流れの乱れが変化することは明らかであり、その結果、熱発生率、等容度や熱伝達の変化により熱損失が変化する。しかし、この事は今回の検討に影響が少ないと考えている。その理由

の一つは、検討した都市モード運転、ハイウェイモード運転の平均エンジン回転数は、それぞれ 1500rpm、2700rpm であり、検討シミュレーション運転中の最大エンジン回転数は 3300rpm である。またシリーズ型ハイブリッドシステムでのエンジン回転数は、2400rpm 一定であり、基本となっている実験データと大きく離れていない。第二の理由は、実験データとシミュレーション計算で得られた結果は、1%程度の高い精度で一致している。

### 3.3 水素エンジンシステムとシリーズ型ハイブリッド電気自動車システム運転のシミュレーション

前項のエンジン正味熱効率と NOx のマップ予測データを用いて、表 3 に示すそれぞれの動力源システムで運転した時の燃費、エンジン性能と排気性能を検討した。水素エンジンシステムの全重量は、1136kg で、シリーズ型ハイブリッドシステムのそれは、シリーズ型ハイブリッド化による補機類の重量増加を考慮して 100kg を増加し 1236kg とした。燃料としては、どちらも液体水素 5kg を搭載した。液体水素を選んだ理由は、他の水素貯蔵法は、車両重量が重くなりすぎるためである。水素エンジンシステムのトランスミッションは、5 速、シリーズ型ハイブリッドシステムは 1 速とした。シリーズ型ハイブリッドシステムは、高性能フライホイール回生装置を装備した。従って、フラ

表3 水素エンジンシステム車およびシリーズ型ハイブリッドシステム車の仕様

Vehicle Parameter	Engine System	Hybrid System
Test Weight (kg)(Empty wt.+136kg)	1136	1236
Frontal Area (m <sup>2</sup> )	2.04	2.04
Aerodynamic Drag Coefficient	0.24	0.24
Coefficient of Rolling Friction	0.007	0.007
Transmission Efficiency	0.94	0.95
Transmission Gears	5	1
Accessory Load (kg)	1000	1000
Hydrogen Storage Capacity (kg)	5	5
Engine Idling Speed (rpm)	600	-
Launch Engine Speed (rpm)	3600	-
Regenerative Braking	no	yes
Generator Type	-	Perm.Magnet
Motor Type	-	AC Induction
Energy Storage Device	-	Flywheel
Motor Max. Torque (Nm)	-	95
Motor Max. Speed (rpm)	-	11000
Flywheel Energy Storage (kWh)	-	1
Flywheel Max. Power (kW)	-	100

イフォール回生装置がフル充電されるとエンジンが止まる。表4に水素エンジンシステムとシリーズ型ハイブリッドシステム車を、都市型モード運転、ハイウエイ型モード運転、都市/ハイウエイ複合型モード運

転にてシミュレーション走行させたときの燃費、NO<sub>x</sub>排出量、0~97km/h加速時間、97km/hでの最大登坂傾斜率および都市/ハイウエイ複合型モード運転時の1充填走行距離を示す。燃費はガソリン換算値である。水素エンジンシステム車の燃費は、17.4km/lでかなり良い燃費を示しているが、車上での水素燃料貯蔵量は、5kgであり、ガソリン換算すれば約19リットルのガソリンに相当する。従って、燃料搭載量が少ないため1充填走行距離が330kmと一般のガソリン車に比べ小さい。それでもその走行距離は実用上問題の無い大きさである。水素エンジンシステム車の特徴は、NO<sub>x</sub>の排出量である。その値はEZEV NO<sub>x</sub>規制値の約1/7.5である。その理由は、走行のほとんどの時間、NO<sub>x</sub>排出濃度が10ppm以下の低トルク域で運転されるからである。

一方、シリーズ型ハイブリッドシステム車の運転の特徴は、高い燃費でありその為に1充填走行距離は、一般ガソリンエンジン車と同じ程度の走行距離508kmを走る事が出来た。都市型モード運転、ハイウエイ型モード運転、都市/ハイウエイ複合型モード運転のうち、どの運転でもシリーズ型ハイブリッドシステム車は、EZEV NO<sub>x</sub>規制値の約半分弱で走行できる事が判った。NO<sub>x</sub>排出量が水素エンジンシステム車より大きくなる理由は、シリーズ型ハイブリッドシステム車は、燃費を最小にする運転をするため熱効率の高いNO<sub>x</sub>排出濃度10ppm付近のみで運転を行うためである。

表4 水素エンジンシステム車およびシリーズ型ハイブリッドシステム車の走行シミュレーション結果

Vehicle Parameter	Engine System	Hybrid System
Fuel Economy <sup>1</sup> , Urban cycle (km/liter(mpg))	15.0(35.3)	24.7(58.2)
Fuel Economy <sup>1</sup> , Highway cycle (km/liter(mpg))	21.7(51.1)	30.0(70.6)
Fuel Economy <sup>1</sup> , Combined cycle (km/liter(mpg))	17.4(41.0)	26.9(63.2)
NO <sub>x</sub> Emission, Urban cycle (g/km(g/mile))	0.0020(0.0032)	0.012(0.019)
NO <sub>x</sub> Emission, Highway cycle (g/km(g/mile))	0.0013(0.0020)	0.0097(0.015)
NO <sub>x</sub> Emission, Combined cycle (g/km(g/mile))	0.0016(0.0027)	0.011(0.018)
Time for 0-97km/h (0-60mph)(sec)	10.0	10.0
Max. Climbing Slope at 97km/h (60mph)(%)	13.1	6.0
Vehicle Range, Combined cycle (km(miles))	330(205)	508(316)

1. Gasoline-equivalent

#### 4. まとめ

高圧縮比化と摩擦損失低減策を行った総排気量 1.3 リットル 4 気筒水素エンジンを空気を絞らないで混合気濃度調整法によって運転する事によって、30.5 から 35.5%まで正味熱効率を増加できる事が判った。EZEV NOx 規制値を満たす NOx 排気濃度 10ppm 以下で運転するためには、空気過剰率 $\lambda=2.5$ 以上で運転する必要がある事も明らかになった。

一方、Salvador M. Aceves と J. Ray Smith は、単筒水素エンジンを実際に運転し得られたデータを活用して、4 気筒水素エンジンのエンジン運転性能と排気性能をシミュレーション運転で得た。これは、参考文献 [1] の総排気量 1.3 リットル 4 気筒エンジンの運転実験で得たデータとほぼ同じ結果となった。すなわち、最大正味熱効率が約 36%、NOx 排気濃度 10ppm 時の空気過剰率は 2.5 (当量比 $\phi=0.4$ ) である。この事から、彼らのシミュレーション運転はかなり精度の高い結果を示している事が考えられる。

この結果を用いて、水素エンジンシステム車およびシリーズ型ハイブリッドシステム車で、都市型モード運転、ハイウェイ型モード運転、都市/ハイウェイ複合型モード運転シミュレーション運転を行った。その結果、加速性能および登坂性能とし実用に耐える性能を得ながらシリーズ型ハイブリッドシステム車では、5kg の液体水素 (ガソリン 19 リットル相当) で 2 リットル 4 気筒ガソリンエンジン車に匹敵する 1 充填走行距離 508km を、EZEV NOx 規制値の約半分以下の NOx 排出量で走行できる事が走行シミュレーションで明らかになった。また、水素エンジンシステム車においても、1 充填 5kg の液体水素で 330km を走れる事が示

され、かつその時の NOx 排出量は、EZEV の NOx 規制値の 1/7.5 になる事が同様の走行シミュレーションで示された。

この事から、安価なコストと信頼性が既に実証されている内燃機関エンジンをを用いることによって、EZEV 排気規制値以下の低公害性を実現でき、かつ高効率の車用原動機が水素を燃料とする内燃機関エンジンで実現できる可能性がここに示された。

自動車用燃料電池原動機システムには、コスト、耐久性および信頼性を確認するために研究開発する事が多数あり、これを解決するには多くの期間と開発費が必要な事から、水素エンジンをを用いた原動機についても更なる研究開発を実施し、それぞれの原動機の長所、短所を明確にする事が大切である。

#### 参考文献

1. 井口豊樹、沼田智昭、昼間勝、山根公高、中島泰夫、古浜庄一、「ハイブリッド電気自動車用水素エンジンに関する研究 (第 1 報)」、自動車技術会学術講演会前刷集 No. 80-98、p.9-12、1998
2. Salvador M. Aceves and J. Ray Smith, "Lean-Burn Hydrogen Spark-Ignition Engines: The Mechanical Equivalent to the Fuel Cell", prepared for submittal to American Society of Mechanical Engineers, Internal Combustion Engine 1996 Fall Conference, Fairborn, Ohio, October 20-23, 1996
3. Djong-Gie, Oei, Ford Motor Company, "Fuel Cell Engines for Vehicles", Automotive Engineering/February 1997, p.115-117