

レシプロ方式水素内燃機関の技術現状と今後

山根 公高

武蔵工業大学工学部

〒158-8557世田谷区玉堤1-28-1

Recent Technology and Prospect of Reciprocating Hydrogen Fuelled Engines

Kimitaka YAMANE

Musashi Institute of Technology

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

The characteristics of hydrogen have been reviewed to show that hydrogen is good as a fuel of automobiles. There are two mixture formations in hydrogen engines. One is external mixture. And the other one is internal mixture formation. These mixture formations show different characters in engine performance. By comparing the two mixture formations, the author would like to show which one is better for automotive engines. Based on the result, recent technologies and prospects have been discussed.

Key words: internal combustion engine, hydrogen fuel, mixture formation

1. 緒言

自動車は、すでに社会の必需品となっている。加えて、世界の商品となっているのも事実である。よって、自動車はあらゆる環境で使われ、多くのあらゆる人が利用する。よって自動車は、タフでなければならない。

現在、自動車の燃料は化石燃料を使っている。化石燃料は、必ず炭素を含んでいる。エンジンで燃焼させた後必ず二酸化炭素（以下CO₂と表す）が排出される。CO₂は、温暖化ガスである。現時点では、自動車にCO₂を回収する装置をつけて走行できなくは無いと思うが、CO₂を回収する装置を装備して走行することになればその利便性を失ってしまう。よって、CO₂を撒き散らしながら走っている。日本国内の自動車からのCO₂排出量は、全日本のCO₂排出量の約20%でありその影響は大きい。

わが国においては自動車を使う石油量は、石油使用量の約35%でこれも大きい。中国、インドが先進国のように所得水準が向上して車を一人一人が持つようになれば石油消費の量は今とは比べ物にならぬほど大量消費とな

る。その結果、石油は、加速度的に埋蔵量が小さくなり価格の高騰、ひいては、石油を自動車の燃料として利用できなくなる。

加えて、短時間の石油多量消費は、CO₂排出量の急激な増大をもたらし、更に地球温暖化を加速することになる。

その結果、地球環境は大きく破壊され人類が地球上で生存することが危ぶまれる状況が到来することもありうる。

化石燃料を使い続ければ、地球温暖化に端を発する地球環境問題と化石燃料枯渇問題が同時に起こる。

自動車の燃料に炭素を持たない水素を使うことにより、この問題を同時に解決できる。

2. 水素の性質

表1に化石燃料であるガソリン、メタンと比較して水素の物性を示す。ガソリンやメタン燃料に比べ、水素の特徴は、

(1) 分子量が物質中で最も小さい。すなわち、最も軽い

表1 水素の物性と他燃料との比較

項 目	水 素	メ タ ン	ガ ソ リ ン	空 気	項 目	水 素	メ タ ン	ガ ソ リ ン	空 気
化学式:	H ₂	CH ₄	C _{7.5} H ₁₇	O ₂ +3.76N ₂	デトネーション限界 (Vol. %)	13-65	6.3-13.5	1.1-3.3	-
分子量:	2.016	16.043	107	29	(空気過剰率λ)	2.8-0.2	1.6-0.7	1.6-0.5	-
比重:					デトネーション速度(V _d) (km/s)	1.48-2.15	1.39-1.64	1.4-1.7	-
気体(ρ _G : 1atm, 273K) (kg/m ³)	0.084	0.651	4.400	1.24	理論爆発エネルギー (gTNT/kJ)	0.17	0.19	0.25	-
液体(ρ _L : 1atm, 沸点) (kg/m ³)	71	423	700	883	空気中拡散率(D _{air}) (cm ² /s)	0.61	0.16	0.05	-
(沸点) (20K)	(112K)	(310-478K)	(77.4K)		火炎放射率(E _{flame}) (%)	17-25	25-33	34-43	-
液体/気体比(ρ _L /ρ _G)	845	649	159	712	消炎距離(QD) (mm)	0.6	2.0	2.0	-
低発熱量(LHV):					(理論混合気の場合)				
質量当り (MJ/kg)	120	50	44.5	-	燃焼後のモル変化率 (%)	-15	0	+5.2	-
液体1L当り (MJ/L)	8.52	21.6	31.1	-	(理論混合気の場合)				
理論混合気の発熱量(Hm) (MJ/m ³)	2.98	3.40	3.55	-	粘性(μ:大気圧, 0°C) (μPa·s)	8.8	11.1	5.2	-
理論空気当りの発熱量(Ha) (MJ/m ³)	4.23	3.76	3.62	-	液体状態:				
自発火温度(t _{ig}) (deg. C)	585	540	228-501	-	密度(ρ _L :大気圧, 沸点) (kg/m ³)	71	423	700	883
火炎温度(t _{flame}) (deg. C)	2045	1875	2200	-	(沸点) (20K)	(112K)	(310-478K)	(77.4K)	-
着火限界 (Vol. %)	4-75	5.3-15	1.0-7.6	-	液体1?当り発熱量 (MJ/L)	8.52	21.6	31.1	-
(空気過剰率λ)	10-0.1	1.9-0.6	1.8-0.2	-	蒸発熱(H _{v,app}) (kJ/kg)	446	510	309	205
最小点火エネルギー(ME _{ig}) (mWs)	0.02	0.29	0.24	-	(kJ/L)	31.7	216	216	181
空気中火炎伝播速度(V _{flame}) (cm/s)	265	40	40	-	粘性(μ:大気圧, 沸点) (μPa·s)	12	114	204	172
(理論混合気)									

分子である。漏れやすく空気中で漏れれば、急速に上昇してゆく。

- (2) 質量当たりの低発熱量がガソリンの約3倍ある。容積より重量が性能に大きく影響する飛行機、ロケットの燃料としては合理的な燃料である。
- (3) 液体1リットル（水素の場合は液体水素）当たりの発熱量は、逆にガソリンのその約3.7分の1である。容積が貯蔵スペースに重要な要因である自動車では、ガソリンより1充填走行距離が短くなる。
- (4) 理論混合気の発熱量は、ガソリンのその約84%である。ガソリンのようにエンジン外で混合してエンジンに供給する外部混合方式では、理論最大出力は、ガソリンの約84%になる。一方、理論空気当たりの発熱量は、ガソリンのその約1.17倍あり、ディーゼルエンジンのように空気のみエンジンに取り入れて、吸気弁の閉弁後、燃料をエンジンの内部に筒内噴射する内部混合方式の場合は、同じ空気過剰率においては、理論上ガソリンより約1.17倍出力が得られる。よって、高出力を得るためには、水素エンジンでは内部混合方式が必須である。
- (5) 自発火温度は、585°Cであり、高温である。よって、自動車エンジンのようにいろいろな環境で、かつめまぐるしく変わる運転条件で運転するエンジンでは、火花点火方式か熱面着火方式を使う必要がある。
- (6) 火炎温度は、ガソリンよりむしろ低い。
- (7) 着火限界は、他の燃料に比べて断急に広い。他の燃料に比べれば、どんな混合気でも火がつくことになり、着火の危険性が高い。
- (8) 最小点火エネルギー（理論混合気）は、ガソリンの

約10分の1である。これも着火の面で危険性が高い。しかし、混合気の希薄化に応じて、最小点火エネルギーは大きくなる。理論混合気ガソリンの最小点火エネルギーと同じ水素の最小点火エネルギーは、空気過剰率で約2である。すなわち、水素空気混合気で理論空気量の2倍の空気量を投入するときに点火するのに必要なエネルギーである。エンジンでは、高い圧縮比ほど熱効率がよい。そのため圧縮比を大きくする。その分だけ圧縮圧力、すなわち点火するときの圧力が高くなる。一般に圧力が高くなると火花点火の放電が難しくなる。しかし、水素の場合は、他の燃料に比べ点火エネルギーは小さいのでその面でも有利である。

- (9) 空気水素理論混合気の火炎伝播速度は、ガソリンの約6.6倍である。燃焼の完結時間が短い。これもエンジン燃焼の等容度を大きくできるのでエンジン熱効率が向上する。ガソリンのそれと同じ火炎速度は、空気過剰率2~3で得られる。
- (10) デトネーション限界も、水素は他の燃料と比べると広い。これも危険視される理由である。しかし、数多くの研究からデトネーションが発生するメカニズムは、衝撃波が重なる場に、未燃の混合気がある場合起こるとされていて、エンジン内でのデトネーション現象は、未燃混合気が残っていないので起こり難い。
- (11) 理論爆発エネルギーは、ガソリンよりも水素のほうが小さい。爆発力はガソリンより小さい。
- (12) 空気中拡散率では、水素のそれは最も大きい。よって、空中に漏れた場合、ガソリンより約1.6倍の速度で、拡散してしまう。よって、希薄化するのも早い。一分間に1000回回転しているエンジンの

1回転に要する時間は、0.06秒である。それに比べるとこの拡散速度はとてつもなく遅い。よって、静的（濃度差だけによる拡散）拡散ではほとんど混合しない。

- (13) 火炎輻射率では、ガソリンの約半分である。水素は、ガソリンに比べて延焼が起き難い。
- (14) 消炎距離では、理論混合気状態では、ガソリンの約3分の1である。よって、いったん火がつくと冷却して火炎を消すことはガソリンよりも難しい。
- (15) 水素-空気燃焼前後のモル数変化は、大きくかつ負である。これで出力が小さくなると思うかもしれないが、投入したエネルギーが同じであれば、モル数が減った分温度が大きくなり、その結果として燃焼圧力は変化しないので、出力の低下は起こらない。
- (16) 液体水素の粘性は、ほかの燃料と比べると、約10～20分の1で、非常に小さい。よって、液体水素中での潤滑性は期待できない。液体水素ポンプでは、相対運動するところでは、液体潤滑剤は全て固化してしまうので、固体で自己潤滑性を持つすべり面構造体を使用する必要がある。

3. 二大混合気形成とその特徴

水素供給混合方式は、特に性能を大きく変える重要な項目である。大きく分けて、図1に示すごとく(a)外部混合方式（予混合）、(b)内部混合方式（筒内噴射）に2分される。

外部混合方式は、低い圧力で吸気管内に水素を供給するため、技術的には簡単である。すなわち、数気圧で水素を吸気管に連続的または、吸気弁開弁時期と同期させながら間欠的に投入することによって、吸入された空

気と混合しながらエンジン燃焼室内に導入し、燃焼室内でも混合が進み、圧縮され圧縮行程後半または上死点直後に点火栓で点火され燃焼する。よって、混合する時間が比較的長く取れるため、混合気は均一混合気に近い状態になって燃焼する。

もう一つの内部混合方式は、吸気弁を閉じた後、水素をエンジン筒内に噴射する。燃焼室内の圧力が高くないうちに早期に噴射し、均一混合気をねらった圧縮行程前期噴射と、層状燃焼を狙った圧縮後期に噴射する圧縮行程後期噴射がある。筒内噴射の場合、最低でも燃焼室内圧より高い圧力で噴射する必要があることから（理想的に言えば、燃焼室内の圧力に影響を受けない圧力で噴射することが要求される、よって噴射圧力は、水素の場合いつも燃焼室圧力より2倍以上の圧力で噴射する必要がある）高圧水素ガスを車上で作ることに、作動ばらつきが少ない高圧水素ガス噴射弁が必要になる。外部混合方式より高度な技術である。圧縮行程前期噴射は、圧縮行程後期噴射より早期に燃焼室内に水素を噴射するので、混合気は均一になり易い、しかし上手に噴射を行わないと、噴射した水素は水素ガスの塊のまま、燃焼室内を移動することもある。着火は火花点火で行う。

圧縮行程後期噴射は、噴射すると同時に着火・燃焼させるため、層状燃焼になる。圧縮前期噴射と異なって、着火方法に工夫が必要となる。このような場合の着火方法としては、水素噴射ジェットを900℃以上に加熱した熱面に当てて着火する熱面着火と点火栓を使って火花点火する方法がある。着火遅れが少ない燃焼をさせるために熱面着火では、水素噴射ジェットがあたるときに熱面温度を900℃以上しておく必要がある。それ以下の熱面温度では、着火遅れが大きく安定した運転が出来ない[1]。900℃以上に保って運転を続けるとバッテリー消費が多くなることにあわせ、熱面温度が高いため、熱面着火のために過熱しているヒータが短い期間で切れてしまう。一方、点火栓で火花点火する場合は、スパーク放電期間が瞬時であるため、水素噴射時期とのタイミングとスパークを起こす位置が安定着火の重要なパラメータとなる[2]。

水素エンジンでは燃料として水素、酸化剤は空気を使っているため、燃焼温度にもよるが、燃焼の生成物すなわち水素エンジンで唯一の排気有害成分である窒素酸化物NO_xが燃焼中に生成される。この生成量は、燃焼温度と時間、反応時の酸素濃度および窒素濃度によって決

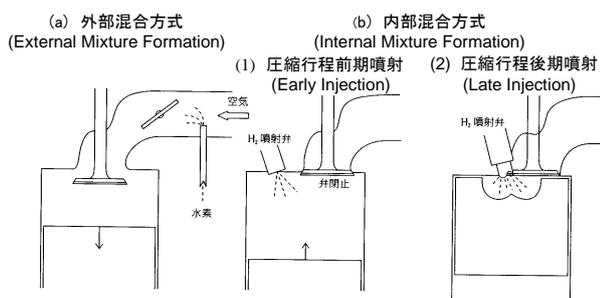


図1 水素エンジンの2大混合気形成

まる。燃焼温度は、酸化剤である空気量と燃料である水素量によって決まるため、特に外部混合方式では、混合気を均一化しやすいので、理論混合空燃比（重量比34：1）に対する空燃比（空気量と水素量の比）の比、空気過剰率 λ に依存する。空気過剰率 $\lambda = 2.5$ 以上の希薄均一運転では、排気中のNO_x排出濃度は、確実にゼロとみなせる値まで低下する。

内部混合方式の圧縮行程後期噴射は、噴射弁より噴射すると同時に着火・燃焼させるので、噴流ガスは理論混合比より燃料が濃い場所から薄い場所まで広い濃度分布を展開しながら燃焼する層状燃焼を行っている。よって、外部混合のように均一混合気を得ることが出来ないため、外部混合方式ではNO_xが生成されない希薄燃焼（低負荷運転域）であっても、NO_xが生成される。均一混合気燃焼でNO_x生成濃度が急激に多くなる空気過剰率 $\lambda = 2.0$ 以下での水素エンジン運転、すなわち、中負荷から高負荷にいたる運転条件では、内部混合方式の圧縮行程後期噴射運転の方が、外部混合方式均一混合気運転よりは、NO_x生成濃度は小さくなる。

以上の外部混合方式と内部混合方式特性比較を表2にまとめた。

表2 外部混合方式と内部混合方式の特性比較

比較項目	外部混合方式	内部混合方式	
		圧縮前期噴射	圧縮後期噴射
圧縮比	燃料性状で決定	エンジン要求で決定	—
冷却損失(同平均混合比)	大	中	小
熱効率(同出力時)	小	中	大
同行程容積での出力	小	大	大
リーンバーン運転時のNO _x	小	小	大
NO _x 低減装置	不要	不要	必要
バックファイヤー対策	必要	不要	—
車載液体水素ポンプ要否	不要	必要	—
大型エンジンへの適用	不向	不向	良好
システムの複雑さ	単純	複雑	—

4. 水素エンジンの現状技術

(1) 外部混合方式水素エンジンの例

前述したように、外部混合方式は、最も容易な燃料供給方式であるため、1970年に著者も最初は外部混合方式で水素エンジンを運転した。また、外部混合気、吸気弁同期吸気管噴射方式液体水素搭載水素自動車を試作し、1975年に米国のSEEDラリー出場、西海岸ワシントン州バーリングハムからカルフォルニア州ロスアンジェルス

間2800kmを5日間で平均速度80~88 km/hで走行、総合4位を勝ち取った。図2は、オレゴン近辺を走行している武蔵2号である。

液体水素搭載ドイツのBMWは、1975年より今日まで外部混合方式水素エンジンの実用化開発をしてきた。BMWは当初から燃料としては液体水素を超断熱タンクに貯蔵して、走行時には、タンク内で電気ヒータ（開発後期は、エンジン冷却水で加熱した水素ガスを再度タンク内に再循環する加熱方法に切り替えた）で加熱、蒸発して0.6MPaになった水素ガスをエンジンに導き、エンジン吸気入り口前で吸気管内にロータリ噴射弁から水素ガスを吸気弁開弁時に同期させ供給する燃料供給システムを採用している。液体水素燃料インフラが十分整備されていないことを考慮し、液体水素を使い尽くしてもガソリンで運転できるように、ガソリントankとその燃料供給装置を備えたデュアルフューエルシステムを当初から水素自動車に採用している。図3にBMWの水素自動車の仕様と写真をしめす。

燃焼中にNO_xの発生をさせないようにするため、空気



図2 米国オレゴンのハイウェイを走行する武蔵2号車



BMW Hydrogen Fueled Vehicle 750hL Running at Death Valley in U.S.
12-cylinder engine, output power 150kW/204hp, an acceleration from 0 to 100 km/h in 9.6 seconds, a maximum speed of 226 km/h, 140-litre cryogenic tank, a range of around 350 kilometres.
Ref.: BMW Group 2002 Clean Energy Seminar Sacramento 03/20/02 Page 17
By Wolfgang Strobl Hydrogen Vehicle Research Milestones during the last 25 years

図3 米国デスバレーを走行するBMW水素自動車750hL

過剰率 $\lambda=2$ 以上の超希薄運転を行っている。このような超希薄運転では出力がガソリンエンジンの約半分以下になるので、機械過給機を装備し過給により出力をガソリンの出力の75%まで向上させているが、それでもまだ十分でないことから、エンジン排気量が大きい6リットルのエンジンを使っている。

トヨタのガソリンハイブリッド車プリウスを利用して、燃料を水素にした水素ハイブリッド車が2004年度に米国で開発されている[3]。これも希薄燃焼によりNOx低減を行っているため、自然吸気では出力がガソリンの半分以下であるが、出力向上するために、ターボ過給機やルーツ型機械過給機を採用している。ターボ過給機を採用することによって、エンジン回転数3000rpm以上ではガソリンに勝る出力を得ている。燃費は、オリジナルのガソリンプリウスおよび本田の燃料電池自動車FCX並みの値が得られたと報告している。排気管出口エミッションは、エンジンおよびターボ過給機の潤滑油に起因するNMOG(Non-Methane Organic Gases)がSULEV(Super Ultra Low Emission Vehicle)PZEV(Partial Zero Emission Vehicle)規制値の約3倍、一酸化炭素は、千分の1、NOxは規定値をわずかに下回り、CO2は、ガソリンの100分の1であったと報告している。

水素の貯蔵方法は、BMWの液体水素貯蔵とは異なって、水素吸蔵合金または35MPa高圧タンク方式の2種類を水素貯蔵方法として採用している。

レシプロ方式外部混合水素エンジンでは、ガソリンエンジンと同じように、エンジンに投入する前に燃料を予め吸入空気と混合してエンジンに供給する。よって、吸入行程時にエンジン内に着火源が存在するとそれにより着火されバックファイアという異常燃焼が発生する。図4は、単筒エンジンでバックファイアが起こり、吸気管からバックファイアによる火炎が噴出した瞬間を捉えた写真である。その着火源としては、次の3つあることが確かめられている[4]。

- 1) エンジン点火ケーブルに電荷が残留して、吸入行程のように負圧時、残留電荷が自然放電することにより着火源になる。
- 2) 空気過剰率 λ 約1.8 (エンジンによる) より燃料の水素量を多くエンジンに投入することにより、燃焼圧、燃焼温度が高くなり、その結果点火プラグの電極が700℃以上に過熱され吸入水素混合気はその過熱部により着火される。

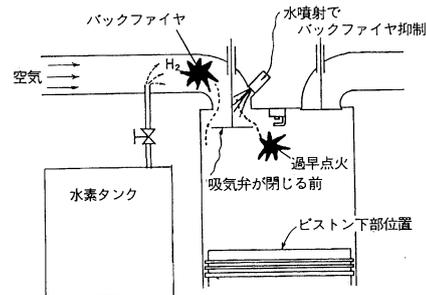


図4 外部混合で発生するバックファイア異常燃焼

- 3) 空気過剰率 λ 約1.0近辺で、ピストンとシリンダ間隙に押し込められた混合気が、その隙間が狭いため緩慢燃焼を行いその火炎が吸入行程まで燃え続き、燃焼室が負圧になったときその隙間から燃焼室に火炎が出てきて混合気を着火する。

このようにバックファイアの原因が明らかになったため、その対策を行うことでレシプロ方式外部混合水素エンジンの異常燃焼であるバックファイアを完全に起こらなくすることが出来るようになった。

(2) 内部混合方式 圧縮行程前期噴射運転の例

圧縮行程前期に吸気弁が閉じた後筒内に水素を高圧で噴射する方法は、次の特徴がある。

- 1) 水素を噴射する時の筒内圧力は、圧縮行程前期であるので圧縮行程後期よりかなり低圧である。そのため、噴射圧力はその分低くてよい。そのことにより、高圧タンク貯蔵方式では、高圧噴射の場合より、高圧タンクの水素を有効に利用できる。
- 2) 吸入弁が閉弁後直ぐに噴き始めるため、着火するまでに筒内に取り入れた空気と混合する時間が得られ、圧縮行程後期噴射より均一な混合気になり易い。
- 3) 着火するまでに噴射する時間が稼げるので、噴射弁としても大流量用の噴射弁でなくてもそれなりに機能をなす。

よって、吸気弁閉弁後、水素を筒内に噴射することにより、外部混合方式より吸入空気を多量に筒内に入れることが出来、筒内噴射の特徴である高出力が得られる。

混合気は、均一化が進むことから圧縮行程後期噴射と異なって低負荷すなわち希薄運転であつては、NO_xはほぼゼロとなる。更に、過給を加えれば希薄運転により、NO_xゼロを保ち高出力エンジンが実現できる。

図5は、内部混合方式圧縮行程前期噴射運転を軽自動車のエンジンで行い(図中Direct Injection)、外部混合方式(図中Pre-mixing)と比較したエンジン性能結果である[5]。横軸は、正味平均有効圧力すなわちエンジンの軸出力を平均圧力圧力の形で表したものである。縦軸はそれぞれの比較パラメータを示す。Direct Injectionの方が空気の流入量が大きくその結果大きい出力が得られた。NO_xは、同じ出力、すなわち同じ正味平均有効圧力では、Direct Injectionの方が低い値を示している。すなわち、エンジン内に多くの空気が入っているので多くの混合気がエンジン内で作ることができ、希薄な混合気でも同じ出力が得られた。

これは、上述した3つの特徴から得られた結果である。

(3) 内部混合方式 圧縮行程後期噴射運転の例

圧縮行程後期に筒内に水素を高圧で噴射する方法は、

次の特徴がある。

- 1) 圧縮行程前期噴射と異なって、後期噴射であるの為、燃焼室は空気がすでに圧縮されかなりの高圧になっている燃焼室に水素を噴射する必要から、かなり高い圧力で噴射をする必要がある。よって、高圧タンク貯蔵方式では十分にタンク内の水素を使うことが難しい。よって、液体水素を車載して、液体水素ポンプで高圧で吐出した液体を外部からの熱で加熱して高圧常温水素を車上で作る必要がある。
- 2) 圧縮行程後期で点火直前であるため、筒内噴射された水素が空気と混合する時間がない。噴射された噴流が空気を巻き込んで混合してゆくため、層状給気の状態で燃焼する。低負荷時でも層状給気の燃焼になるため、1部は濃い混合気、1部は薄い混合気となるため、外部混合気方式ではNO_xがゼロである運転であっても、圧縮行程後期噴射運転の場合は、NO_xが発生する。よって、NO_x低減対策が必要である。
- 3) 圧縮行程後期で噴射を行うため、前期噴射と違って、ピストンが上死点付近に留まっている内に瞬時に必要

な水素を高圧で燃焼室内に噴射する必要がある。そのため、噴射圧力は大きく、噴射弁の作動は速い必要がある

- 4) 上死点で高圧である水素を筒内に噴射することによって、噴射水素のエネルギー回収ができる。液体水素を燃料として使えば、高圧水素の持つエネルギーの起源は外部エネルギー、例えば外気、エンジン冷却水の持つエネルギーから回収したエネルギーとみなせることから、その分熱効率が向上できる。

武蔵工大の内燃機関水素エンジンは、本方式を永く研究してきた。それを車上で実現するために車上に搭載した液体水素タンクに高圧液体水素ポンプ(吐出圧力10MPa)の液体水素ポンプを同時に研究開発してきた。そのシステムを実際に搭載して、1990年に日産フェアレディ水素自動車を製作、日産追浜工場テストコースで公開走行を行い、最高速度130km/hの走行を実現した。この日産フェアレディ水素自動車は、LH2タンク100リットル、タンク重

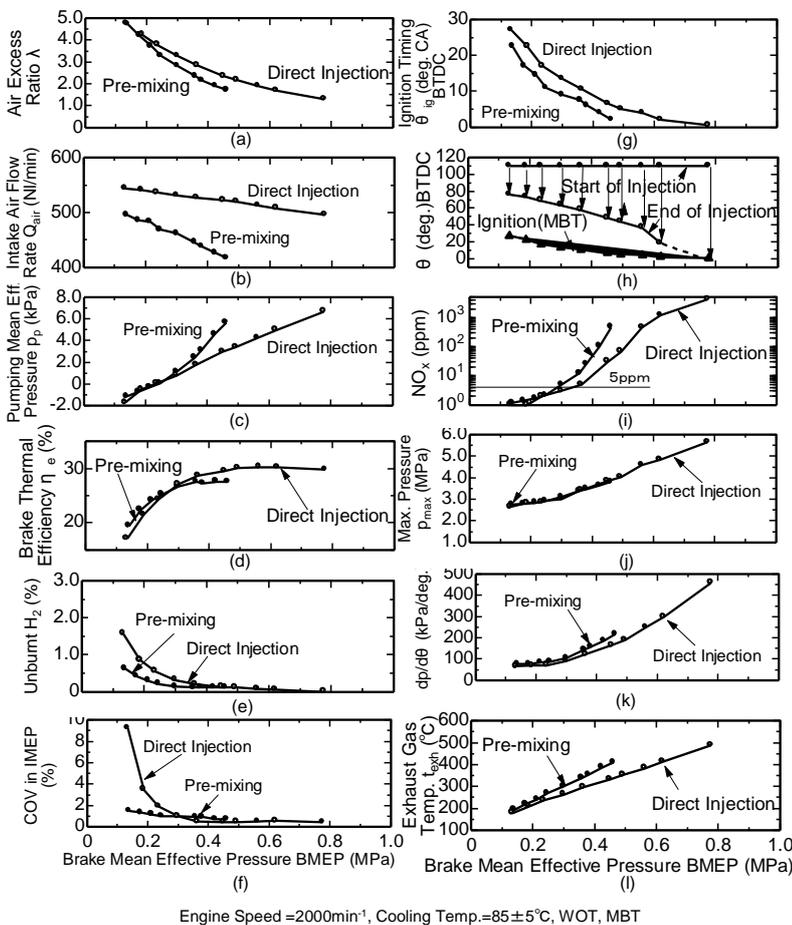


図5 圧縮行程前期噴射内部混合方式と外部混合方式のエンジン性能比較

量65kg、一充填走行距離:約300km、最高LH2ポンプ吐出圧:10MPaであり、ハワイWHECで出展・走行をおこなった。図6は、日産追浜工場テストコースで公開走行している日産フェアレディ水素自動車を示す。図7には、その燃料供給とエンジンシステムを示す。

1994年には、内部混合方式 圧縮行程後期噴射運転の高出力性を実証するため、および、液体水素の冷熱を有効に利用できることを証明するため、日野自動車株、岩谷産業株および武蔵工業大学とで共同して冷凍車武蔵9号車の開発を実施した。そのLH2タンク400リットル、タンク重量400kg、一充填走行距離:約400km、最高速度:120km/h、LH2ポンプ吐出圧:10MPaの水素トラックで平均傾斜8%の箱根ターンパイク13.5kmを平均時速約45km/hで一気に走破した。

図8は、箱根ターンパイク走行中の武蔵9号車である。図9に、冷凍車武蔵9号のシステム図を示す。

上述したように内部混合方式圧縮行程後期噴射運転のNOx排出特性を外部混合方式のそれと比較した結果を図10に示す。図から判るように外部混合方式ではNOxゼロの運転領域、すなわち希薄領域であってもNOxはゼロに



武蔵8号車 内部混合方式 圧縮行程後期上死点直前噴射点火エンジン
LH2タンク100リットル、タンク重量65kg、一充填走行距離:約300km、最高速度:130km/h、LH2ポンプ吐出圧:10MPa、ハワイWHEC出展・走行(1990)

図6 日産自動車追浜テストコースを走行する

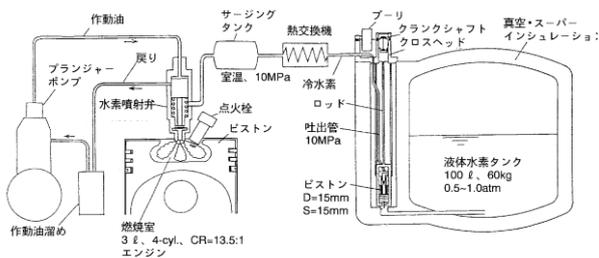


図7 武蔵9号車の燃料供給システムとエンジンシステム

はならない。しかし、高負荷領域では、外部混合方式の約半分以下のNOx排出濃度になる。どちらにしても、NOxが多く発生することから、燃焼制御によるNOx低減



武蔵9号車 内部混合方式 圧縮行程後期上死点直前噴射点火エンジン
LH2タンク400リットル、タンク重量400kg、一充填走行距離:約400km、最高速度:120km/h、LH2ポンプ吐出圧:10MPa、箱根ターンパイク13km制覇(1994)

図8 箱根ターンパイクを走行する武蔵9車

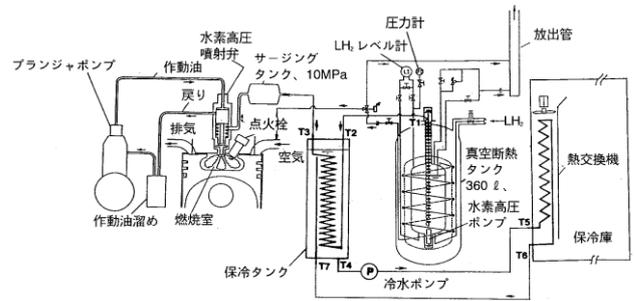


図9 武蔵9号車の燃料供給システムとエンジンシステム

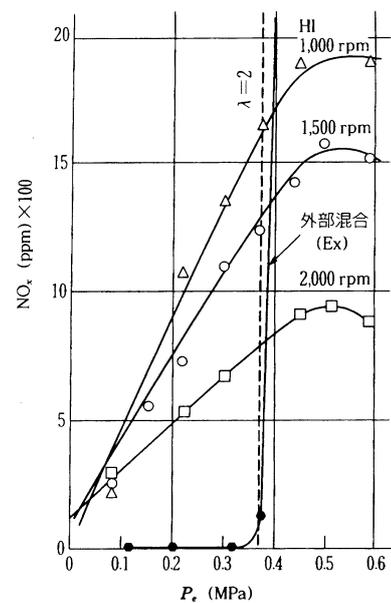


図10 外部・内部混合方式のNOx 排出特性比較

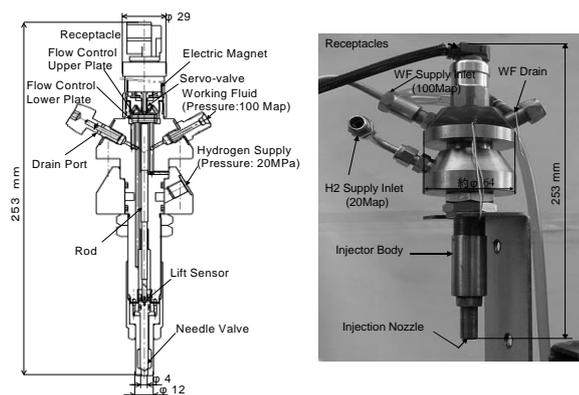


図1 1 コモンレール式高応答高圧水素噴射弁

策、EGRによるNOx低減策、de-NOx触媒によるNOx低減策を行う必要がある。

燃焼制御によるNOx低減策を実際におこなうため、また、熱効率向上のために上死点で瞬時に水素を筒内に噴射するためには、高応答の高圧水素噴射弁が必要である。ディーゼルエンジンのコモンレール燃料噴射システムを利用したコモンレール式高応答高圧水素噴射弁が試作されている[6]。その噴射弁は、3000rpm運転時クランク角度30° CA以内に行程容積10のエンジン中に空気過剰率 $\lambda=1$ に相当する水素を噴射圧20MPaで噴射可能である。また、ディーゼルエンジンのコモンレール燃料噴射システムで実現されている多段噴射も可能であり、多種多様な燃焼制御が試みられることが期待されている。図11にその断面図と写真を示す。

上死点で高圧水素ガスを筒内に噴射した場合、ピストンの膨張だけで得られる理論仕事は、供給した水素燃料発熱量の約1.6%となる。その分内部混合方式圧縮行程後期噴射運転では熱効率が向上されると期待されている[7]。

5. まとめ

このように水素を燃料とする内燃機関方式水素エンジンにおいては、その構造からバックファイア、過早着火に象徴される異常燃焼がまったく起こらない内部混合方式圧縮行程後期噴射運転が、同時に高出力を得られることから理想的な運転方法である。この技術を実現化するためには現状開発されている吐出圧10MPa以上の液体水素高圧ポンプ、高応答高圧水素噴射弁およびNOx低減策が確実に見出されてゆく必要がある。

参考文献

1. S. Furuhashi and T. Fukuma, "High Output Power Hydrogen Engine with High Pressure Fuel Injection, Hot Surface Ignition and Turbocharging", International Journal of Hydrogen Energy Vol.11, No.6, pp.399, 1986
2. Katsuyoshi Koyanagi, Masaru Hiruma, Hiromasa hashimoto, Kimitaka Yamane and Shoichi Furuhashi, "Low NOx Emission Automobile Liquid Hydrogen Engine by Means of Dual Mixture Formation", SAE Paper No. 930757, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, March 1-5, 1993
3. Richard Geiss, Bruce Webster, S. R. Ovshinsky and Robert Stempel, Rosa Chiang Young, Yang Li and Vitaliy Myasnikov, Burce Falls and Alwin Lutz, "Hydrogen Fueled Hybrid: Path to a Hydrogen Economy", SAE Paper 2004-01-0060, (2004)
4. 近藤卓也「外部混合方式水素エンジンの異常燃焼の発生源に関する研究」、武蔵工業大学大学院工学研究科博士論文091-1-1-1997-5, (1997)
5. 井上泰輔、中野平、中川研司、山根公高、高木靖雄、大平哲也、「290 水素筒内噴射小型エンジンの性能評価」、2005年自動車技術会春季学術講演会、パシフィコ横浜コンベンションセンター、2005年5月20日開催、JSAE Paper NO. 20055219
北浦知紀、及川昌訓、馬渡輝太、山根公高、近藤卓、「コモンレール式高圧水素噴射弁の開発」、第25回水素エネルギー協会大会発表論文、主催水素エネルギー協会、協賛エネルギー・資源学会、(社)化学工学会、(社)自動車技術会、(社)日本生物工学会、(社)日本エネルギー学会、(社)日本化学会、(社)日本機械学会、口頭発表、2005年12月14~15日、タワーホール船橋、東京都江戸川区船堀4-1-1, p.89-92, 2005
7. K. Yamane, Y. Takagi, T. Hashimoto, J. Suzuki, "Liquid Hydrogen for Automotive Vehicles", The Hydrogen Power Theoretical and Engineering Solutions International Symposium, HYPOTHESIS VI Proceedings held May 8, 2005 to May 12, 2005, at Havana in Cuba, pp.1-9, 2005