

## 6. 研究論文

### 高圧水素ガスモーター駆動のLH<sub>2</sub>ポンプを持つ水素噴射エンジンシステム

武蔵工業大学 古浜庄一 松下智彦  
大塚千之 中島俊弥

#### 1. まえがき

現在、自動車用水素エンジンの燃料貯蔵、供給、燃焼システムについて多くの研究が行なわれている。その中で武蔵工業大学では、水素を液体で貯蔵しLH<sub>2</sub>ポンプにより高圧化した水素をシリンダ内に直接噴射、熱面により点火する方式をこれまでに開発してきた。液体水素法は他の水素貯蔵法（例えば高圧ガスボンベやメタルハイドライドなど）に較べ非常に軽量であり、エンジンの高出力化に必要なシリンダ内水素噴射を行うための高圧の水素を小型のLH<sub>2</sub>ポンプで得ることができるなどの特徴を持っており、自動車用システムとして考えた場合非常に都合が良い。

さらに今回、吸気管に水素の一部を予混合したところ、燃焼改善の効果があり、LH<sub>2</sub>タンクからの蒸発水素を予混合水素として有効に利用できることがわかった。また、熱面点火栓より消費電力が少ないなどの特徴を持つスパークプラグ点火を試み、点火可能であることがわかった。さらに、LH<sub>2</sub>ポンプの駆動力として従来の電気モーターに変わって高圧液体水素が大気熱を受け取って蒸発および常温まで加熱される現象を利用したガスモーターを開発し、このガスモーターでLH<sub>2</sub>ポンプが駆動可能であることがわかった。これらの実験によって一層高性能な水素エンジンシステムの明るい見通しを得た。

#### 2. 供試エンジン

供試エンジンは日産自動車製乗用車用水冷4サイクル4気筒渦流室式ディーゼルエンジン、内径×行程＝85×86mm、総排気量1952cm<sup>3</sup>で、これをφ62mm、深さ14mmのピストンキャビティ燃焼室を持つ直接噴射式に改造し、熱効率、最大圧力、振動、騒音及びNO<sub>x</sub>排出量などを考慮して圧縮比を12：1に下げた。点火法は、油圧を利用した水素噴射弁によって、8MPaの高圧水素を8噴口から直接シリンダ内に噴射し、その一つの噴流を熱面に当てて点火させる方式をとっている。図-1に燃焼室の断面図を示す。

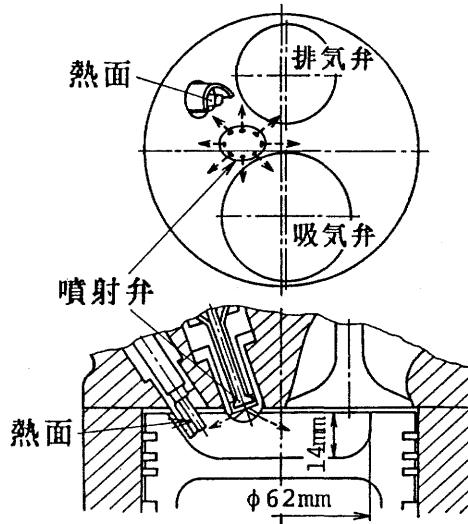


図-1 燃焼室断面図

### 3. 水素一部予混合効果

図-2 に熱面点火方式における代表的圧力線図を示す。図中Pは燃焼圧力、Lは水素噴射弁の揚程を示す。

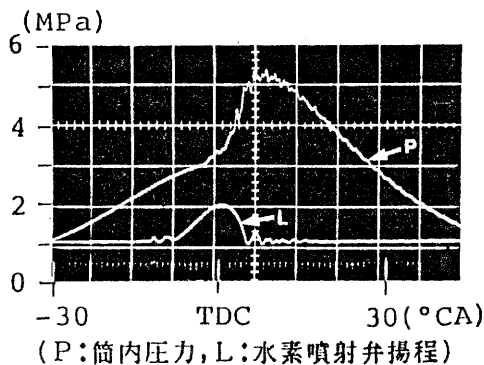


図-2 振動を伴う圧力線図

図よりわかるように点火後燃焼圧力振動が観察される。この振動はほとんどの運転条件で発生し、振動、騒音が増大する要因となる。

そしてこの振動は点火遅れが大きく急激な圧力上昇が原因であることが、これまでの研究からわかった。そこで点火遅れを短くして圧力振動の抑制を計るために、水素の一部を吸気管に予混合することを試みた。その結果を図-3に示す。

ここで  $\lambda_{pre}$  は吸入空気量に対する予混合水素のみの空気過剰率を示す。図中(a)の  $\lambda_{pre} = 7.8$  では燃焼圧力は激しい振動を伴っているが、(c), (d)のように水素量を増して  $\lambda_{pre} = 7 \sim 6.6$  にすれば振動が消滅することがわかる。しかし、さらに高濃度になると熱面による過早着火を起こすことがわか

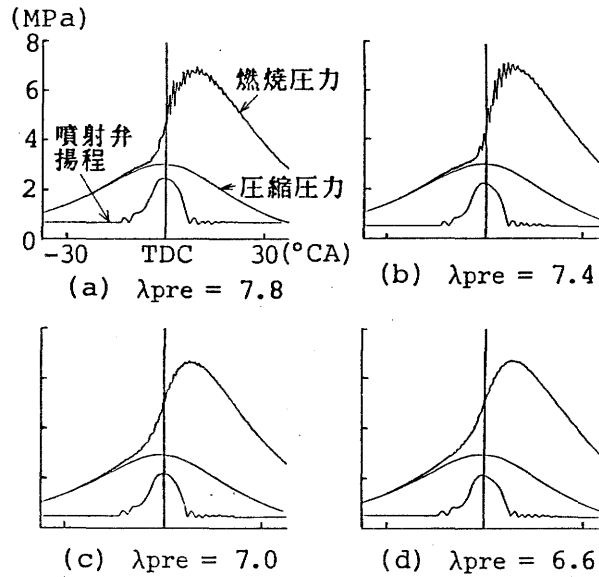


図-3 水素一部予混合時の圧力線図

った。図の筒内圧力線図には圧縮圧力線が重ねて示してあり、(c)(d)においては噴射による圧力上昇および主噴射前の点火による圧力上昇が認められる。このことは予混合水素が熱面で点火していることを示し、点火したところへ主噴射が行なわれるので点火遅れが極めて短くなることがわかる。

このような燃焼改善の実際の効果を図-4に示す。図より、予混合量を増し圧力振動を減少させると、エンジン騒音、NO<sub>x</sub>排出量は減少するが、熱効率はほとんど変化せず、むしろ上昇傾向にあることがわかる。

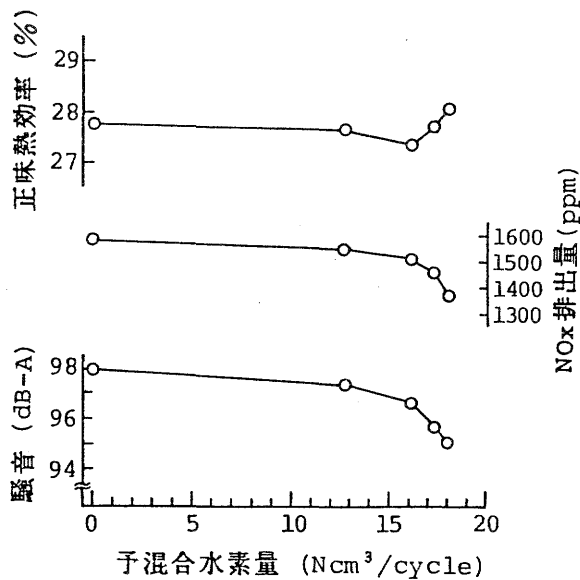


図-4 水素一部予混合の効果

この水素一部予混合によってLH<sub>2</sub> タンクからの蒸発水素を回収することができ、エネルギー損失を減少させるだけでなく、燃焼改善にもなることがわかった。

#### 4. 火花点火水素噴射方式

従来の熱面点火エンジンは、熱面点火栓が常に燃焼室内で赤熱しているので、水素噴射時期によらず安定した点火が得られる反面、消費電力の大きいことと、故意にまたは噴射弁からの漏れなどによって予混合気が圧縮するときに過早着火の起こることが問題であった。これに対して電気火花方式とすれば、消費電力の大幅削減が可能であり、過早着火も起こりにくいと考えられる。そこで熱面点火方式にかわって火花点火方式を試みた。図-5に従来の熱面点火栓の位置に火花点火栓を装着した燃焼室の断面図を示す。

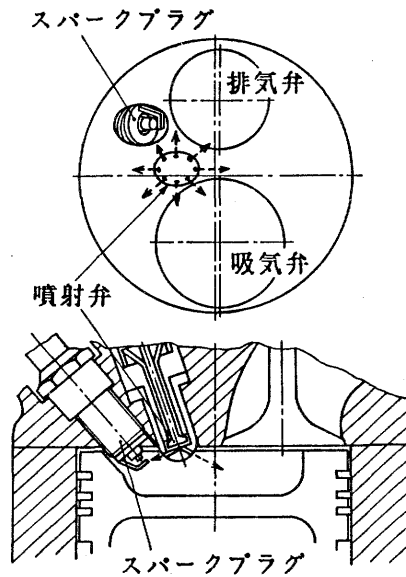


図-5 火花点火方式燃焼室断面図

火花点火栓を用いた場合、スパーク時、その場所に点火可能な混合気が存在しなければならないが、噴流の一つを点火栓に向かって噴射し水素噴射時期と火花点火時期を適切に決めれば圧縮上死点付近噴射火花点火方式でも安定した点火が可能であることが確認された。

図-6は水素噴射時期を上死点前13°一定とし、火花点火時期を上死点前10°、8°、6°、4°と変えた時の筒内圧力線図を示す。図より燃焼波形にはやはり燃焼圧力振動が観察されるが、水素噴射後早い時期に火花点火した方が振動が小さいことがわかる。これは火花点火する前に噴射された水素量が多いと、それが急激に燃焼し、圧力上昇率が高くなるためだと考えられる。そしてさらに点火時期を早めると、失火してしまうことがわかった。

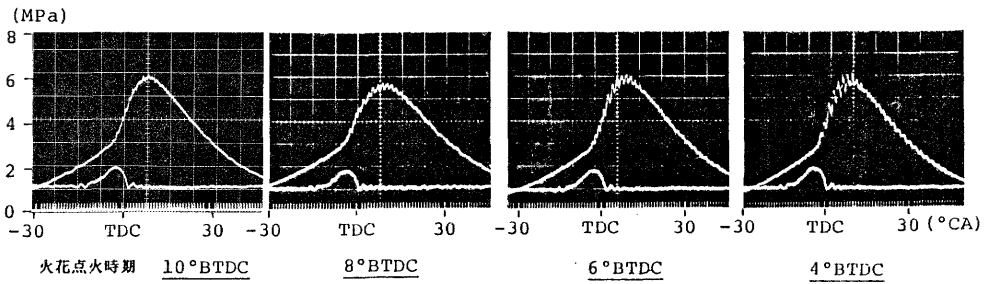


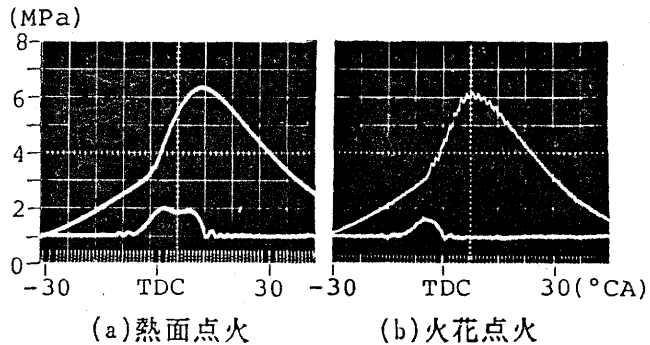
図-6 火花点火時期の影響

## 5. 火花点火方式と水素一部予混合

3章で述べたように水素一部予混合による燃焼圧力振動の減少は、噴射前に予混合気熱面によって緩やかな燃焼を起こすためであることがわかった。よって火花点火ではその予備燃焼が起らないと考えられた。そこで熱面での予混合時の現象を確認する意味で火花点火方式でも水素一部予混合を試みた。図-7は熱面点火時と火花点火時の  $\lambda_{pre} = 7$  付近での圧力線図を比較したもので、(a)では燃焼圧力振動が消滅しているのに対し、(b)では振動が消滅していない。このことから、3章の予混合気予備燃焼による点火遅れ減少の考えは正しいと考えられる。さらに熱面点火方式においては、 $\lambda_{pre} = 7$  より濃くなると過早着火の恐れがあったが、火花点火方式の場合、その量はほぼ予混合水素のみで運転可能なまで濃くできるので、後述する水素ガスモーターからの排水素を吸気管に予混合しても、量的に全く問題ないことが確認された。

図-7

$\lambda_{pre} = 7$  での圧力線図の違い



## 6. 高圧水素ガスモーターによるLH<sub>2</sub>ポンプ駆動

現在の水素燃料供給系における問題点の一つとして、液体水素ポンプ駆動用動力の低減がある。この動力そのものは大きい値ではないが、エンジンの出力で発電機により電力をバッテリーに充電し、それを電気モーターで駆動する現状では途中の損失が大きいのでかなりのエンジン動力を消費する。また同時に大形のバッテリーも必要になる。

一方ポンプから吐出される高圧液体水素は、極低温であるので大気熱を受け取って容易に蒸発および常温に加熱膨張される。その大部分はエンジンに噴射されるが、その一部をガスモーターに供給し膨張によって仕事をさせ、それでLH<sub>2</sub>ポンプを駆動すれば、外部の動力に頼らず、独自にエンジンに高圧水素を供給することが可能である。そこでこのシステムの確立のため、高圧水素ガスモーターを試作し

た。図-8にこのガスマーターの断面図を、表-1(a)に諸元を示す。このガスマーターはカムと連動したピストンクランク機構をもっておりそのP-V線図は図-9のようになる。

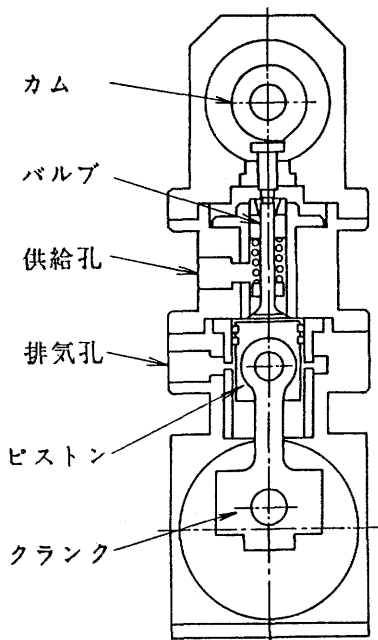


図-8 ガスマーター組立図

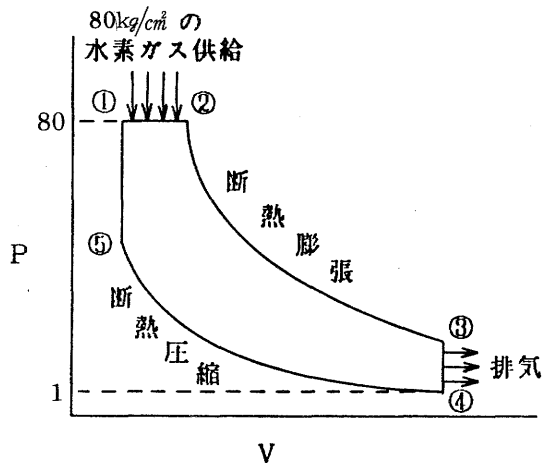


図-9 ガスマーターP-V線図

上死点後クランクアングルで約 $20^\circ$ の間バルブが開き、この時に供給孔から $80\text{ kg/cm}^2$ の水素ガスが流入し(①-②)、バルブが閉じた後ガスが膨張することによってピストンを押し下げ動力を発生する(②-③)。ピストンが下がり排気孔が開くと低圧となった水素が排出されシリンダ内はほぼ大気圧となる(③-④)。そして再びピストンが上昇し④-⑤は圧縮となりピストンはガスの圧力に逆らって上昇するがこの仕事は膨張行程で取り戻すことができるので損失にはならない。

このガスマーターを組み込んだ水素燃料供給系を図-10に示す。

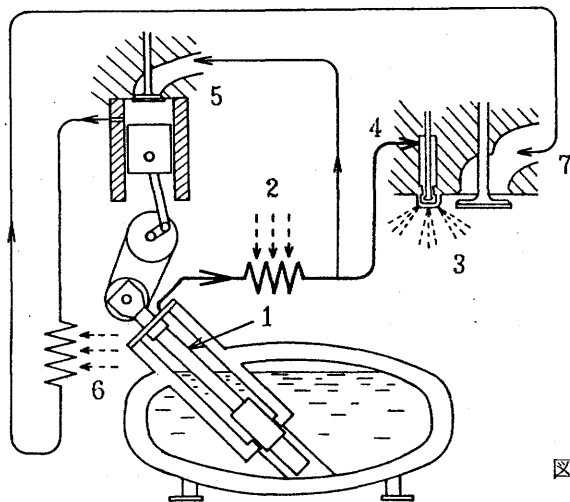


図-10 高圧水素ガス供給系統図

図において液体水素ポンプ1から吐出された高圧液体水素(80~100気圧)は、水素配管内を通る間に2の大気熱を受け取って、高圧のまま常温の水素ガスになる。その大部分は、エンジン3の噴射弁4でシリンダ内に直接噴射され、残りの一部をガスモーター5に供給して膨張させ、動力を発生させる。この動力をポンプ1に伝え、ポンプを駆動する。さらにモーターから排出される水素は、断熱膨張で約85℃温度降下し-60℃位になるので、この低温でタンクおよびポンプの高温部を冷却することができる(6)、タンクの断熱性向上にも利用できる。最後にモーターからの排出ガスをエンジンの吸気管7に予混合することによって、その水素は無駄にならないで、かえってエンジンの燃焼改善に役立たせることができる。次にこのガスモーターで表-1(b)に示す諸元のLH<sub>2</sub>ポンプを駆動し、ポンプの運転条件(吐出圧80kg/cm<sup>2</sup>, 600rpm)を満たすときの、ガスモーターの水素ガス消費量を測定し、表-1(c)のような結果を得た。

表-1 ガスモーター、LH<sub>2</sub>ポンプ諸元および水素ガス消費量測定結果

(a)	ガスモーター諸元	内径	25 (mm)
		行程	15 (mm)
		圧縮比	14
		回転数	1200 (rpm)
(b)	LH <sub>2</sub> ポンプ諸元	内径d	12 (mm)
		行程S	15 (mm)
		回転数	600 (rpm)
(c)	供給ガス圧力 P <sub>1</sub>	80 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	供給ガス温度 T <sub>2</sub>	25 (°C)	
	排気ガス温度 T <sub>3</sub>	-60 (°C)	
	実際のGH <sub>2</sub> 消費量 G	14.6×10 <sup>-3</sup> (g)	
	ポンプのLH <sub>2</sub> 吐出量 G <sub>p</sub>	120×10 <sup>-3</sup> (g)	
	G/G <sub>p</sub>	12.2 (%)	

すなわち本装置ではLH<sub>2</sub>ポンプ吐出量120×10<sup>-3</sup>g(ポンプ1サイクル当たり)のうち14.6×10<sup>-3</sup>gをガスモーターに供給すれば、ポンプ駆動動力がガスモーターによって得られ、これはLH<sub>2</sub>ポンプ吐出量の約12%となる。しかし損失のない理論計算によれば、ポンプ必要動力は

$$W_p = \pi d^2 S P_1 / 4 = \pi \times 1.2^2 \times 1.5 \times 80 / 4 = 136 \text{ (kg-cm)} \quad (1)$$

一方、ガスモーター出力W<sub>m</sub>は

$$W_m = P_1 \left[ V_2 \{ n - (V_2/V_4)^{n-1} \} / (n-1) - V_1 \right] - P_4 V_4 \{ (V_4/V_5)^{n-1} - 1 \} / (n-1) \quad (2)$$

$$V_4/V_5 = 1.4$$

また

$$T_3 = T_2 (V_2/V_3)^{n-1} \quad (3)$$

(2), (3)より  $n = 1.215$ ,  $W_m = W_p$  とするための理論必要水素量  $G_m$  は

$$G_m = 5.5 \times 10^{-3} \text{ (g)}$$

であるが実際のポンプの吐出量  $G_p$  は

$$G_p = 120 \times 10^{-3} \text{ (g)}$$

であるので

$$G_m / G_p = 5.5 / 120 = 4.6 \%$$

となり,  $LH_2$  ポンプ吐出量の 4.6% を供給すれば良いことになる。つまり実験値に対しては全効率

$$\eta_g = 4.6 / 12.2 = 38 \%$$

となる。

つぎに, 水素消費量  $G$  で, 図-8の  $P-V$  線図の仕事させると, 式(2)より

$$W_m = 342 \text{ (kg-cm)}$$

と計算される。しかし実際は 136 (kg-cm) しか出力していないので全効率は

$$\eta_e = 136 / 342 = 40 \%$$

となる。このように消費水素量から求めた効率  $\eta_g$  も, 出力から求めた効率  $\eta_e$  もともに 40% 前後と低い値であるが, 通常の機械の動力伝達効率から考えて 60~80% に上げ得るものと考えられるので, 今後その方向に研究を進める。

## 7. 結 論

- (1) 予混合法はタンクの蒸発損失を回収し, 燃焼圧力振動を防止する効果がある。
- (2) 熱面点火をスパーク点火に変えることが可能で, プラグと噴射弁の位置, 噴射と点火のタイミングなどの調節で一層都合の良い条件が見出だし得ると考えられる。
- (3)  $LH_2$  ポンプの吐出量の  $1/6 \sim 1/10$  の水素をガスモーターに供給すればポンプの駆動が可能で, その必要量はさらに減少できる。またモーター排水素は予混合に利用して有効に使える。