

## 水素自動車

古浜庄一\*

自動車の将来エネルギーは太陽-電力-水素が理想的であり、武蔵工業大学で20年間研究した結果によれば、水素自動車のシステムとしてはLH<sub>2</sub>タンク、LH<sub>2</sub>ポンプ、水素噴射、火花点火方式が理想的であることがわかった。このシステムのうち石油燃料車と異なる、LH<sub>2</sub>タンク、LH<sub>2</sub>ポンプ、噴射装置、点火および燃焼、安全性の特性について、従来の研究成果と残されている問題点について説明する。

### Hydrogen Fueled Vehicles

Shoichi FURUHAMA\*

Hydrogen is the most promising fuel for automobiles, if it is produced by solar energy. Research and development on hydrogen vehicles at Musashi I.T. for twenty years have concluded that the most advantageous system consists of a LH<sub>2</sub>-tank, a LH<sub>2</sub> pump, hydrogen injection and spark ignition. Discussed in this paper are the LH<sub>2</sub>-tank, the pump, the injection equipment, ignition, combustion and safety, which are unique for the hydrogen vehicle and are different from those of petroleum fuel vehicles. The discussion includes R&D results until recently and problems to be resolved as future work.

#### 1. まえがき

人類が人畜や風水の動力に代わって、燃焼熱から大量の動力を軽量、コンパクトな熱機関によって得るようになり、それが大衆の便に供せられだしたのは、僅か50年位前からで、長い歴史のほんの一瞬にして、現在この方向に大きい赤信号が出た。化石燃料の枯渇化および公害、特にCO<sub>2</sub>による地球大気の変化で、今は予測に過ぎないが、それが現実の徴候を示しだしてからでは対策は手遅れになると警告されている。そのとき今のエネルギー関係者は一転して地球滅亡の責任を免れないであろう。人々が今求めているものを無批判に造って与える工業は今後は許されなくならざるを得ない。その判断を法規制にのみ頼ることはできない。関係者が十分議論し、かつ実行に近づける実験を伴った、思い切った研究が広く可能な態勢が何よりも必要であろう。予測や議

論のみでは新機軸は生まれず、将来予想を誤った例は少なくない。本文で紹介する水素自動車も実用上いくつかの問題点をもつが、その程度の問題は人間の英知で解決すべき覚悟がないと、人類は今後エネルギーを使えなくなるのではなからうか。

#### 2. 太陽・水素エネルギー

Fig. 1 は南極の水中の気泡の分析から得られた最近200年の大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加で、間違いなく急増し、2025年頃気温上昇に伴う諸現象が発生する恐れがあると言われている。このCO<sub>2</sub>増加は化石燃料燃焼による排出ガス中のCO<sub>2</sub>の約半分に当たり、残りは海面などに吸収されている。Table 1 は各種燃料が1万kcal (ガソリン1ℓが7,800kcal) 出すときのCO<sub>2</sub>排出量で、ガソリンに比し石炭は約1.6倍、天然ガスは0.8倍、他はほぼ同じで水素のみが0である。

しかし水素は他のエネルギーから造らなければならない。それが化石燃料であっては無意味である。毎日降り注いでいる太陽こそが、その量においても

\* 武蔵工業大学学長

President, Musashi Institute of Technology

原稿受理 1990年6月19日

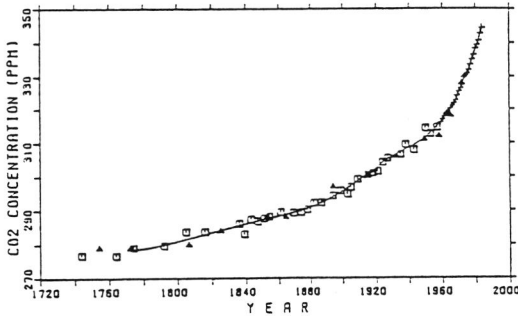


Fig. 1 最近200年のCO<sub>2</sub>の増加（ベルン大学グループによる）

全く無害である点からも人類の唯一のエネルギー源であるので、太陽・電力・水素系の実現を怠らざるべきであろう。

さて、晴天直射日光は700kcal/m<sup>2</sup>h=0.814kw/m<sup>2</sup>のエネルギー密度をもち、全地球表面で晴天日（7時間日照）が年間35%と言われ、その入力1%を利用するとき、50億人が1人当たり1日中85kwと計算され、効率12%で有効エネルギーに変換すれば10kw/人で米国より少ないが欧州より大きく全世界の現状、平均2~3kwよりはるかに大きい値である。もし人工衛星で受光する場合は昼が長く、曇りが無く密度も高いので上記の値は10倍に達する。いずれも太陽光を集光・高温作動物質に与えて熱機関を駆動し発電し、水の電気分解で水素をつくることを予想している。

ただし太陽光の密度は現在の技術では希薄過ぎて応用には新しい技術開発が期待されている。たとえばFig. 2は先年ソーラ・ラリーで優勝したGM-Sunraycerの上面で、総面積8m<sup>2</sup>、最大6.5kwの入力、太陽電池の出力1kwと発表され、正味効率15%で、これ以上の多くはあまり望めない。一方この程度の車には少なくとも数10kwを要するので、このようなソーラカーの実用は無理で、電力でいったん水素燃料を造って使う、水素自動車の意義がある。

### 3. 水素自動車開発の問題点

#### 3-1 高出力化

同じシリンダの容積に、空気と当量の水素蒸気（1.7体%）が入ったときの燃焼熱に対し空気と当量の水素（30%）の場合は85%の熱量に過ぎず、それだけ低出力である。その上このように外で混合したものをシリンダに吸入、圧縮、火花点火するときは、水素濃度が当量の約60%以上の高出力では吸気弁が締まる前に過早点火し、炎が吸気管に移り爆発

Table 1 燃焼により発生するCO<sub>2</sub> (kg/1万kcal)

燃料名称	代表分子	発熱量 kcal/kg	1万kcal当り CO <sub>2</sub> kg	ガソリン 対比
石炭	C	8100	4.52	1.56
軽油	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	10590	2.94	1.01
ガソリン	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	10630	2.90	1.00
メタノール	CH <sub>3</sub> OH	4770	2.88	0.99
天然ガス	CH <sub>4</sub>	11930	2.30	0.79
水素	H <sub>2</sub>	28700	0	0

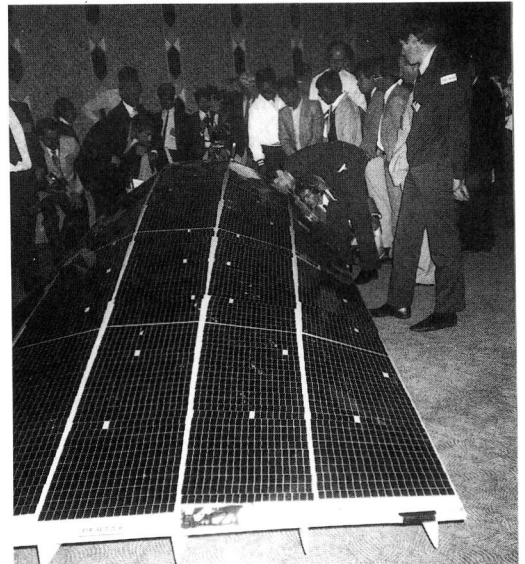


Fig. 2 GM-Sunraycer

してBackfire（逆火）を起こし運転不能となる。すなわち最大出力はガソリンの約半分に制限される。なおノッキングの起こる圧縮比はオクタン価90のガソリンと同等である。

逆火対策として武蔵工大では、空気のみ吸入（水素体積分の空気が増大）して圧縮中に水素を噴射する方法を試みた。これによれば逆火が起こらなるとともに燃焼できる水素が増加するので、ガソリンの120%の高出力が可能である。この際、次の2つの方式が実施された。

#### (1) 低圧噴射

圧縮行程前半に比較的低圧（10気圧）で噴射、火花点火、逆火は起こらないが、ガソリンと同等の出力以上では過早点火が起きる。これは-30℃ぐらいの冷水素の噴射で防止できる。

#### (2) 高圧噴射

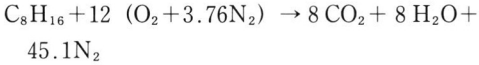
圧縮上死点付近で短期間噴射で熱面又は火花点火、

燃焼中であるので80~100気圧の高圧水素を要するが、圧縮比が自由に選べ(約12:1が性能最高で最小)、ノックしないので大型機関にも応用できる。

これら両噴射法とも高圧水素が必要であること、および噴射装置を要す。

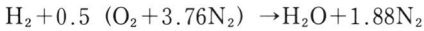
(3)燃焼による分子数の減少

今当量比の空気で燃焼前後のモル数を比較すれば、ガソリンの代表では



モル: 1 + 12 + 45.1 = 58.1 → 8 + 8 + 45.1 = 61.1  
3モル、約5%増である。

一方水素は、



1 + 0.5 + 1.88 = 3.38 → 1 + 1.88 = 2.88

約15%の減となり、このことで水素エンジンは基本的に低性能だとする人が少なくない。しかし、それは誤解である。一般にガスの分子比熱は分子の種類によらず近い値である。もし同じだとすればモル数の変化に逆比例して温度が変わり、圧力はそれに比例するので出力、熱効率には直接影響は無くなる。正確な比熱の値よりオットーサイクルの最大圧力を計算した結果がFig. 3で、そのことが証明され、分子数の減少の直接影響はないことがわかる。

3-2 水素運搬法

水素は空気の1/14.5と比重最小のガスであり、同じ燃焼熱を出すための対ガソリン比はFig. 4のように重さは約1/3と小さいが、体積は3千倍と大きく、そのままでは車に積めない。したがって一般に次の3法が試みられている。

(i) Metal hydride (水素吸着合金): MHと略記

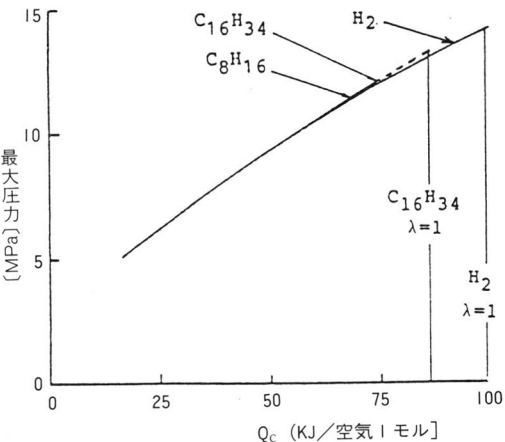


Fig.3 モル数変化と燃焼圧力

(ii) 150~200気圧の高圧ガス容器: HP

(iii) 液体水素 (-253°C): LH<sub>2</sub>

これらで貯蔵できる容器を含めた、ガソリン30ℓ分の重量を比較したものがTable 2である。そのうちMHはBenz社をはじめ多くの所で自動車用として試みられているが、重量がHP法と同様に極めて大きいことと噴射用高圧を得るためには大型の圧縮機と動力を要するので、格段に軽量のMHが出現しない限り自動車用には適しない。次にHPは噴射用には便利であるが重量が大きく、かつ噴射圧以下は使えない。そこで軽量容器や100 Kの低温HP容器の提案<sup>2)</sup>などがある。後者は密度が常温の3倍になり、同じ噴射圧で常温まで使えば残留量も少なくなる。

これらに対してLH<sub>2</sub>は比重0.071でガソリンの約1/10で、重量当り発熱量は2.7倍、約1/3の軽量でよいが体積当りは0.26で、約4倍の容量を要す。しかし実用性のある唯一の運搬法で、さらにLH<sub>2</sub>は、

- ①沸点20Kの極低温で高圧だけでは液化不可能
- ②断熱タンク(2重壁間真空、スーパーインシュレーション)に入れ1日の蒸発を1%ぐらいが望ましいが、自動車用としては3%位までは可能であるが、それ以下は今後の研究をまたねばならない。
- ③液相で水素を加圧すれば小さいポンプ(2~3ℓエンジン用にはD×S=15×15mmの単ピストンポンプを1,000rpmで供給すればよい)と小動力でよい

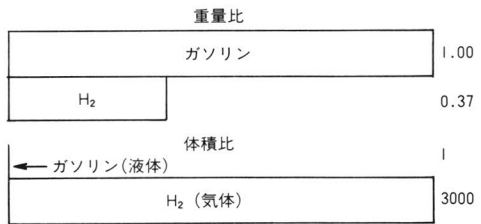


Fig.4 水素とガソリンの運搬性の比較

Table 2 ガソリン30ℓ分の燃料貯蔵重量比較

燃料タンク	中身		タンク重量 (kg)	全重量 (kg)
	体積 (ℓ)	重量 (kg)		
ガソリン	30	22	5	27
メタノール	62	49	8	57
水素				
MH		8.2	764	772
HP(150MPa)	670	8.2	755	763
LH <sub>2</sub>	115	8.2	62	70
バッテリー(※)				1360

注) ※: エネルギー密度40wh/kg、動力への変換効率がガソリンの5倍とする。

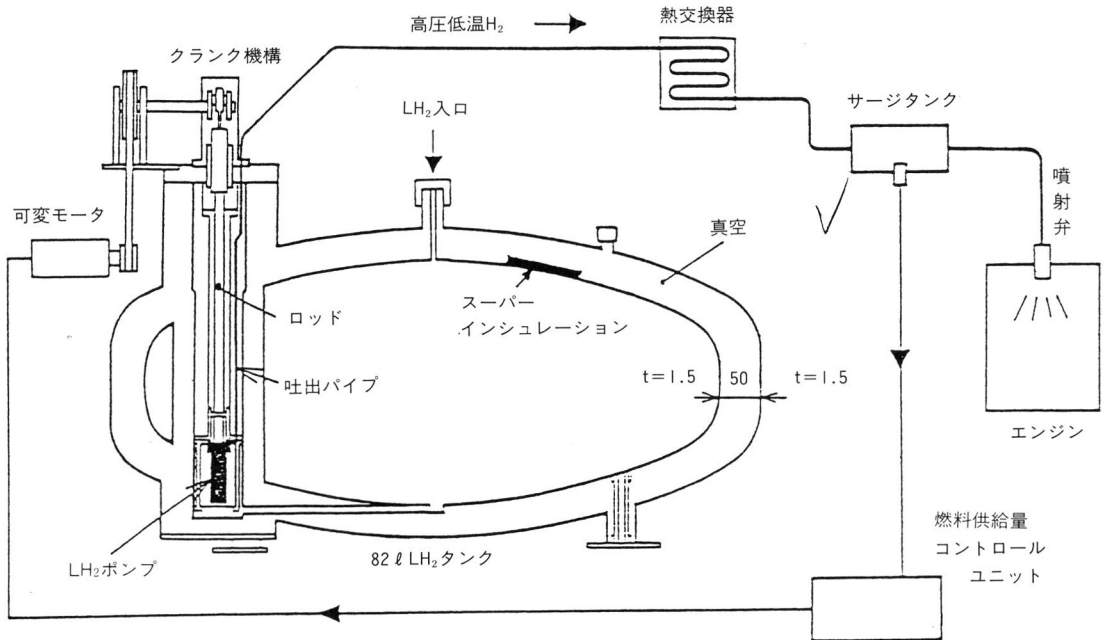


Fig. 5 6号車の水素燃料系統

ので噴射用、特に高圧噴射用には不可欠である。  
の特長がある。

4. LH<sub>2</sub>タンク、ポンプ、水素噴射エンジンの開発

前述のことから、現状では次の理由より以下のように考えるものである。

- (i) 異常燃焼を防止し高出力化のために筒内噴射
- (ii) 噴射圧を簡単に得るためにLH<sub>2</sub>ポンプ
- (iii) 自動車用として許し得るタンクの重さ

筆者らは武蔵工大で20年間水素自動車を技術的に研究している間に、このようなシステムが実用的水素自動車として一つの、又は唯一のものであるとの考えに達している、他研究所(者)のものとは異質であるので具体的な開発経過および現状を以下に説明する。

4-1 LH<sub>2</sub>ポンプ

Fig. 5は水素燃料系統図で、そのうちLH<sub>2</sub>タンクに挿入されたポンプは直流モーターで駆動されるクランク機構が上端にあり、それによる上下運動はロッドによって最下部のピストンを往復させ、噴射圧まで昇圧されたLH<sub>2</sub>を吐出するが、タンク外のパイプ内では直ちに気化してGH<sub>2</sub>になる。吐き出された水素は一樣な密度で噴射するために室温としてサージタンクにいったん入れて、噴射弁で燃焼室に噴入する。その際消費と供給を同一にするために、サー

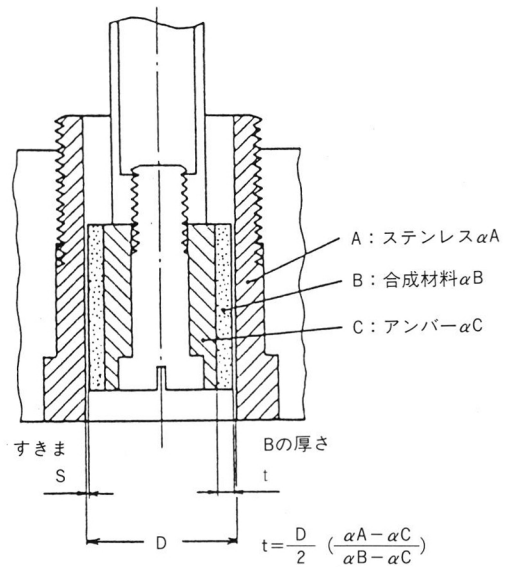


Fig. 6 ポンプのピストンとシリンダ

ジタンク圧が一定となるようにモーターの回転数を制御する。

次にポンプ自身の問題としては次のようなことがある。

(1)無潤滑：極低温のために潤滑油がなく、LH<sub>2</sub>も低粘度で金属対金属では直ちに焼き付く。対策として合成材料、現在はポリイミド系面を金属面上ですべらせる方法を採用。

(2)熱膨張差：合成材は金属より熱膨張係数αが数

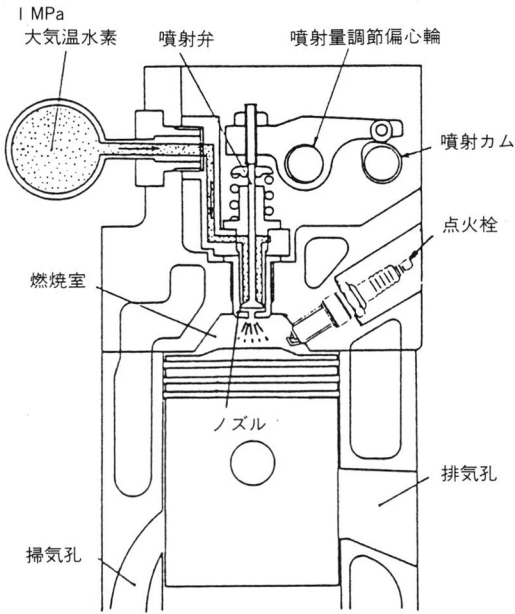


Fig. 7 低圧噴射 2 サイクルエンジン

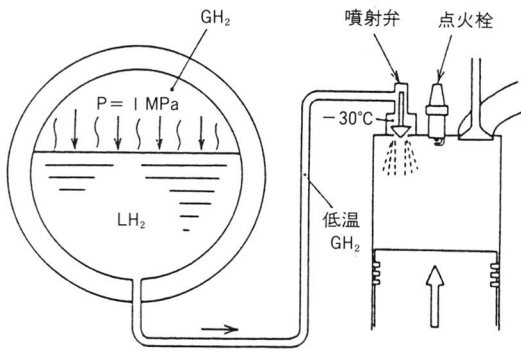


Fig. 8 低圧水素噴射法

倍大きい、シリンダを金属でピストンを合成材にすることが組立、締付上好都合であり、室温で加工してLH<sub>2</sub>に入れてもすきまが1.5~2.5μm一定で変わらないためにはFig. 6のようにピストン内部をαcの極めて小さいアンバーとし、(1)式を満足する無潤滑合成材の厚さtとすれば、温度にかかわらず、すきまSは不変となる。

(3)ガス圧縮：LH<sub>2</sub>は酸化熱が小さく僅かな熱でシリンダ内は液でなくガス化してガスの圧縮・膨張のみとなり、高圧LH<sub>2</sub>の吐出は不能となる。そのためにピストンリングの使用はできず、側圧による摩擦も避けるためにピストンがシリンダに押しつけられないで往復する構造を要する。

#### 4-2 噴射装置

本システムはディーゼルの噴射装置のように燃料

を1回毎に加圧して噴射する方式ではなく、LH<sub>2</sub>からGH<sub>2</sub>になって体積は膨張するが、圧力一定でサージタンクに溜めたものをエンジンの各シリンダの噴射弁を開閉することにより噴射する蓄圧式であり、水素は本質的にすきまから漏れやすいことと接触面の潤滑性のないことから設計・加工には慎重を要するが、弁の接触が一樣で微量のオイルの供給があれば目的は達せられる。

#### (1)低圧噴射 (2 サイクル)

筆者ら<sup>3)</sup>は2サイクルガソリン機関を改造して、Fig. 7のようにカム・タペットで噴射弁を開閉し、量の調節はタペットを支える偏心輪の回転により弁リフトを変化させる。これは噴射期間が長く許されることによる。又、噴射圧が1 MPa (10at) と低いので、全体として噴射装置は楽であり将来とも実用性が高い。さらにFig. 8のようにLH<sub>2</sub>タンクを1 MPa程度の耐圧性とすれば、重量はほぼ2倍ぐらいになるがポンプは不要になる。ただし過早点火防止に冷水素噴射のため温度調節が必要である。-100°C以下ではオイルが凍結する。

次に2サイクルに使ったときの特長は以下のようになる。

- ①構造簡単で、高出力。
- ②排気が吸気中に残り、一種のEGRとなりNO<sub>x</sub>が下がり、冷水素噴射でFig. 9のように更に下がる。
- ③ガソリンの場合、普通、圧縮行程中の噴射では点火不安定で、掃気中噴射とせざるを得ないのでガソリンが無駄に排気管へ素通りする欠点があるが、水素は点火混合比範囲が極めて広く、その欠点がないのでFig. 10(a)のようにη<sub>e</sub>が高い。
- ④4サイクルに相当させるために素通り分を補正したものが(b)で、部分負荷でη<sub>e</sub>が高いのは点火性が

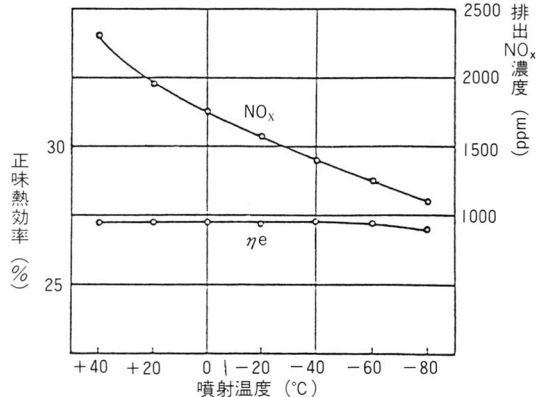
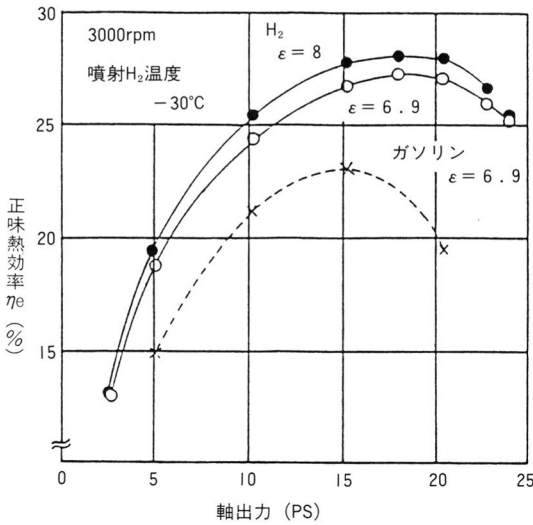
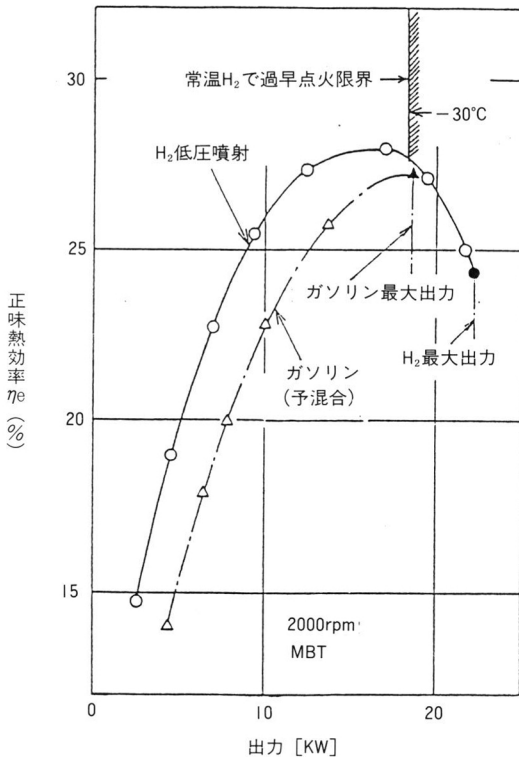


Fig. 9 NO<sub>x</sub>-噴射水素温度 (最大出力時)



(a) 2サイクル550cc機関の性能



(b) 2サイクルの素通りを除いたとき  
Fig.10 水素噴射2サイクルエンジンの性能

優れているために希薄燃焼ができるからである。

以上のように低圧噴射方式は実用的にみて魅力的であり、次の高圧式より必ずしも劣るものではない。特に2サイクルは潤滑油消費の問題が解決されれば冷水素低圧噴射法に適している。

(2)高圧噴射<sup>4,5)</sup>

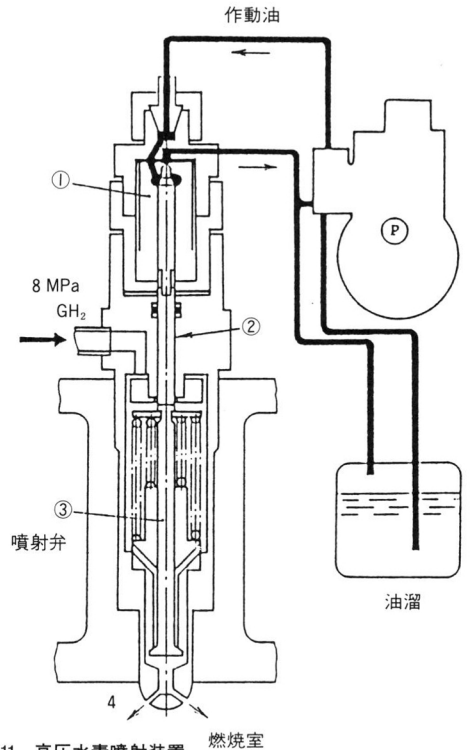


Fig. 11 高圧水素噴射装置

ディーゼル燃焼と同様にTDC直前から短期間、少なくとも爆発最高圧以上で噴射するので(1)とは異なる装置を要し、一例としてFig.11のようにディーゼルの燃料噴射ポンプPで昇圧された作動油が各シリンダの噴射弁①に逆方向から作用し、針弁で②を経て③の水素弁を押し開いて④の燃焼室へ噴射する。

4-3 高圧噴射方式のエンジン特性

(1)点火

水素は火花のような高温源では僅かなエネルギーでも点火できるが、ディーゼル発火のように混合気全体の高温(自発火温度)によるときは自発火温がディーゼル燃料(350°C)よりはるかに高い(580°C)ので、圧縮着火ができず、火花か熱面で点火が必要がある。その際点火限界混合比範囲が広く、逆火が起こることから、これらによる点火は容易のように思われるが、実際にはそうではなく、噴射から点火までの「発火おくれ」を短くしてFig.12(a)のような燃焼圧力振動を低くするための次のような方策を要する。

(i) 熱面点火

定常高温面に水素噴流を噴きつけるときの点火性はFig.13のように熱面温度が850~900°C以上が望ましい。しかしその温度は耐熱性の限界でもあるの

で測温しながら通電量を制御しなければならない。次に多噴口のうち熱面に近いものと距離 (Fig. 14 の  $x$ ) が短いほど  $\tau$  は短いので  $x$  を 3 ~ 5 mm とする。

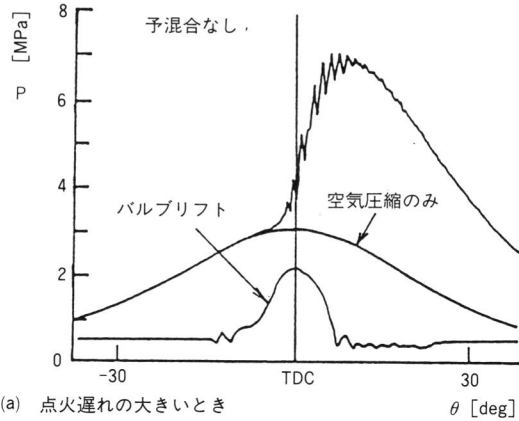
さらにエンジン停止中水素が弁から僅かにもれるとき、始動時逆火のおそれがある。その他に消費電力が比較的大きいので大型バッテリーを持つことおよび耐久性などに問題がある。

(ii) 火花点火

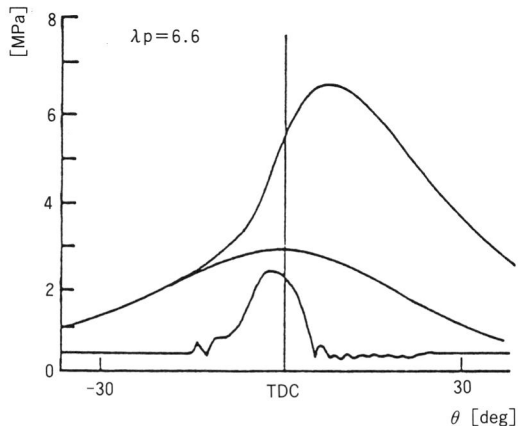
上記問題点は解決できる。ただ熱面では噴射時期のみの最適化で良いが、火花ではそのタイミングとの組合せであり、Fig. 15において噴流が火花ギャップに到達以前に火花が出ても勿論点火できない。また(c)のように噴流の後半はギャップ部は水素のみで空気が僅かであるので点火できない。したがって(b)の噴流の前半か(a)の先端が到達直後で点火する (黒い部)。そのうち(a)が最適である。

(2) 燃焼

混合気生成、水素火炎の伝播速度は極めて速いが、それは混合比に関係し、エンジン内の予混合燃焼で



(a) 点火遅れの大きいとき



(b) 僅かな水素を吸気管へ供給

Fig. 12 圧力振動

はガソリンの当量比 ( $\phi = 1$ ) と水素の  $\phi = 0.7$  がほぼ同等である。ディーゼルでは燃焼室全体が自発火温度を超えていることおよび放射熱も強いので、極めて速やかに全体の燃焼が完了する。しかし、水素噴流の等容器シュリーレン高速度写真によれば、Fig. 16のように1つの噴流の火炎が接近した隣の噴流に伝播するのに時間がかかり、これが  $\tau$  を長くし、圧力振動のもとになる。したがって混合気生成の促進が重要である。その対策としては、次のとおりである。

① 噴射圧力上昇：高圧ほど噴流の広がり速く乱

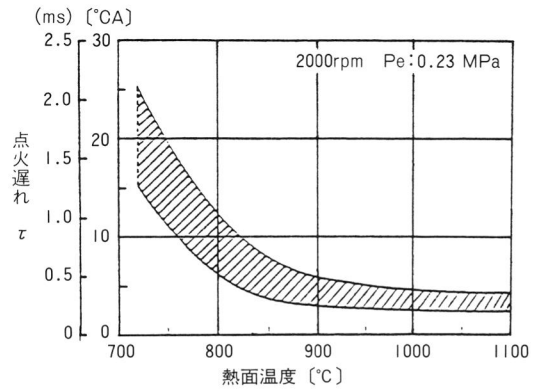


Fig. 13 熱面温度と点火遅れ  $\tau$  の関係

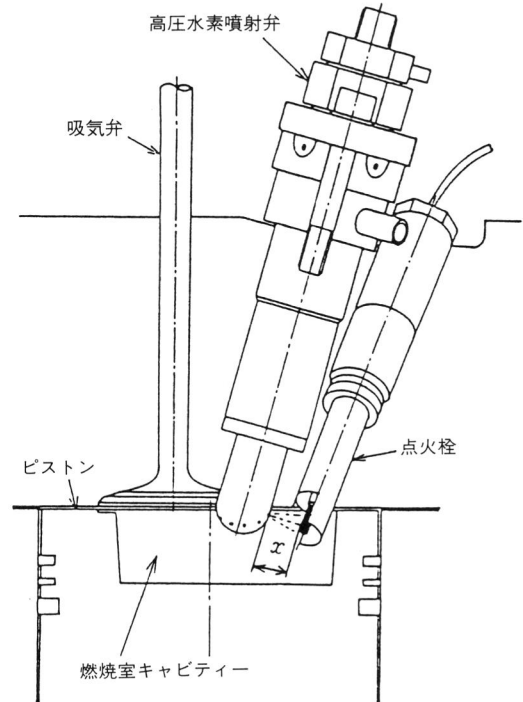


Fig. 14 燃焼室の配置

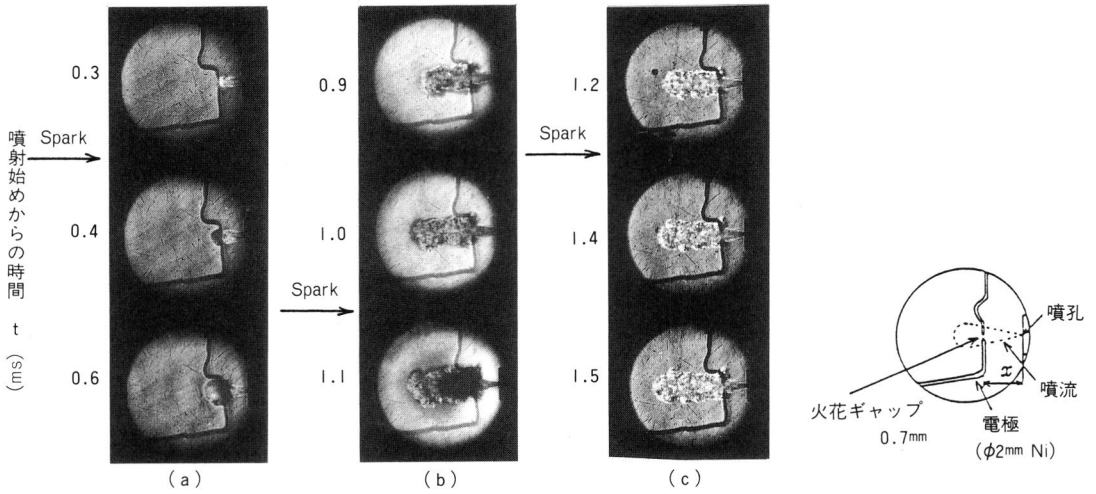


Fig.15 火花と噴射のタイミング

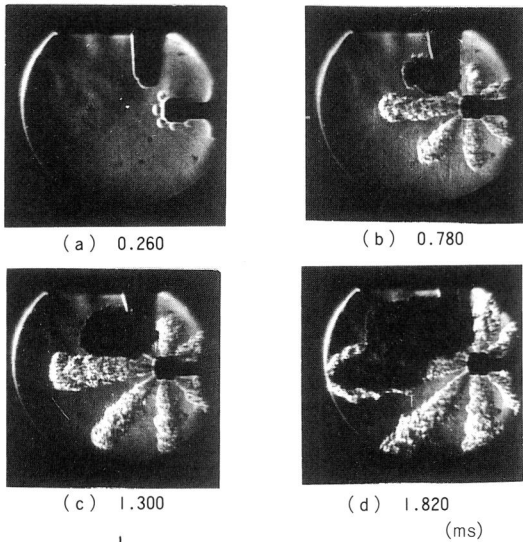


Fig.16 水素噴流の炎災伝播、シュリーレン写真

流も盛んになるので混合気生成に効果がある。しかしそのためにはLH<sub>2</sub>ポンプの吐出圧を高める問題がある。

②シュラウド付き吸気弁：弁傘部に、吸気流をシリンダ内周に接する方向に誘導するための衝立をもつシュラウド弁を使えばFig.17のように燃焼が早くなり（熱発生率=dQ/dθ）、かつ燃焼割合qも増加し、性能が向上する。

③その外、燃焼中のガス流動を促進する方法として燃焼室、吸気系の設計の一層の研究を要す。

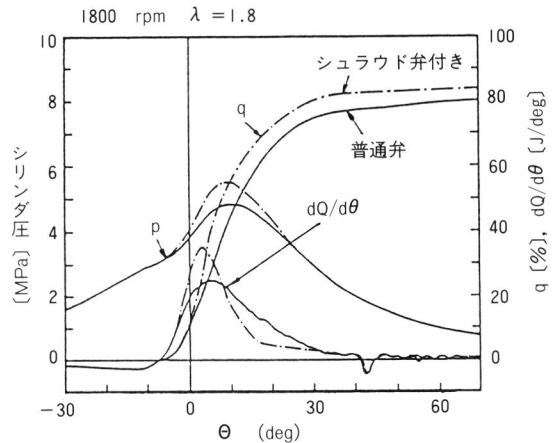


Fig.17 シュラウド弁による影響

(3)予混合の併用

噴射水素最大量の約1/7を常圧で吸気に混入すれば、 $\alpha$ を短くでき、Fig.12(b)のように圧力振動を消滅させることができる。またLH<sub>2</sub>タンクの蒸発分をこれに利用できる特長もある。しかしその混入が過剰なときは逆火又は過早点火が発生するので適量に調節の必要がある。

5. 安全性、その他

5-1 安全性

水素を極めて危険視する人が多いことは事実で、それは誤った知識、聞き伝えなどにに基づくものやかなり著名な人が用心のために発言されたことによるものもある。水素エネルギー関係者はこれに対して過度の危険視であり諸規制も再検討の要があると考えている。このことは水素取扱い経験者の実感から



来るものである。1970年頃から再開された水素エネルギー関係の諸実験は世界各国で数多く実施されて来たが、心配されるような事故発生の報告は皆無であり、また少数の危険性テストも行われたが、むしろ安全寄りの結果であったと聞いている。勿論すべて安全とは考えられない。科学的な対応が十分であればのことで、その対応手段が、極めて高度の技術と設備によらなければならないかどうかである。現状の規制はそのようであるが、ガソリン、プロパン、天然ガスなどの危険性とその規制法に比して水素では厳し過ぎると考えられるが、安全の実績を積み重ねることこそ重要なことと気長に考えざるを得ないのである。しかし実用化が夢でなくなった今、科学的な諸テストを数多く、積極的に、かつ公平な立場で実施し、その結果を水素の安全性に応用すべきであろう。これに関する基本性質は、

①火花のように極めて高温源では極めて小エネルギーでも点火する（ガソリン蒸気の0.08倍）。

②希薄混合気でも点火、ガソリンは当量比の0.7までに対して水素は0.14と1/5で点火可能。

③狭いすきまからのもれやすく、拡散もしやすい。の3点である。

これらの点火しやすい危険性に対してむしろ安全性の高い性質としては、

①比重が小さく、拡散性が大きいので空中に出た水素は直ちに空気中で薄められ、点火不能となる。したがって屋外では安全性が高い。

②もれて外に放出される水素の点火が最も危険視されるが、放出前のある種の酸化触媒を通せば、ほとんど常温で $H_2O$ （水蒸気）にして放出できる。

③高温室などでの自発火温度は石油より高く、自然発火の心配は少ない。

④石油などは燃焼炎中にすすなどの微粒子があり、



Fig.18 高圧噴射4サイクルエンジン搭載のトラック  
（4トン積み）

それによる輻射熱で炎が赤く、その周りが加熱されるが、水素炎は無色透明で熱は伝達でのみ、すなわち炎に触れてのみ加熱される。

があげられる。

## 5-2 水素自動車の試作

武蔵工大では次の車を水素燃料車に改造した。

- (1)武蔵-1号：7 Nm<sup>2</sup>ボンベ10本をもつ小型トラック、予混合、環-8走行（1974）
- (2)武蔵-2号：LH<sub>2</sub>：230ℓタンク、-130℃水素吸入、予混合、米西海岸2,800kmを走行（1975）
- (3)武蔵-3号：LH<sub>2</sub>タンクおよびポンプ、低压噴射、2サイクル、軽四輪車、岡山博で走行（1978）
- (4)武蔵-4号：同上方式1,100ccサイクル車、WHEC（世界水素エネルギー学会）東京大会出品（1980）
- (5)武蔵-5号：LH<sub>2</sub>タンク、LH<sub>2</sub>ポンプ、高圧噴射熱面点火、2サイクル1,100cc、WHEC-4、パサデナ走行（1982）
- (6)武蔵-6号：同上4サイクル2,000cc乗用車ディーゼル改造、WHEC-5、カナダ・トロントで走行（1984）
- (7)武蔵-7号：同上方式4,000ccトラックに応用（Fig.18）バンクーバー万博で走行（1986）
- (8)武蔵-8号：同上方式であるが、火花点火に改めて3,000ccスポーツ型乗用車、WHEC-8、ハワイで本年7月走行の予定で、目下製作中。

## 6. おわりに

LH<sub>2</sub>タンク、ポンプ、噴射、火花点火方式は小型から大型のエンジンに適する実用システムであることがわかってきた。

この方式の完成のためには主として次の研究課題が残されている。

①ポンプ、噴射装置、燃焼など従来のエンジンと異なる部分は今始められたばかりであるので、性能、耐久、使いやすさなどで改良すべき点が多い。

②LH<sub>2</sub>タンクの断熱構造、さらに極低温技術全体も実験的研究による開発の余地が多い。

③水素そのものの製造、液化技術については一層大きい問題の解決を要する。

しかしこれらの解決は研究者の英知と努力によらねばならないが、水素自動車の完成度を高めることがそのインパクトとなることを期待しているものである。

## 参考文献

- 1) P. Pichan, 岩田正、古浜庄一「高圧水素エンジンの燃焼中の損失解析」『第8回合同シンポ』 P.435、1990-1
- 2) T. Krepec, D. Miele and C. Lisio: New concept of hydrogen fuel storage and supply for automotive application, Hydrogen Energy Progress VII, Vol. 2, P.1127, 1988
- 3) 古浜庄一、小林良夫「水素噴射二サイクルエンジンの掃気特性と過給効果」『機学会論文集(B)』50-458、P.2487、昭和59-10
- 4) P. Pichan、福間隆雄、大塚干之、古浜庄一「水素噴射エンジンにおける燃焼圧力振動に関する研究」『機学会論文集(B)』54-500、P.1000、昭63-4
- 5) 小林春樹、松下智彦、古浜庄一「TDC直前水素噴射エンジンの点火法に関する研究」『機学会論文集(B)』55-511、P.895、1989-3