

「水素エンジンの異常燃焼について」

スズキ(株) 技術研究所 清水義明・前田忠政・小柴 優

1. はじめに

昭和61年度より通産省の補助金を受けて、石油代替燃料自動車の開発を実施してきた。燃料としてはLNGを利用するものであるが、水素にもこのシステムが適用出来るか検討することも一つの項目となっている。しかも、安全上の配慮から水素貯蔵合金(MH)を利用した自動車とすることが前提となっている。この点から出力、逆火の問題を承知して予混合方式の水素エンジンの開発を実施した。本稿は水素特有の逆火の発生に関して、エンジン諸元の変更や水噴射により逆火がどのように変化し、防止出来るかを報告する。

2. 供試エンジンと実験方法

供試エンジンは、スズキ製F5A(4サイクル直列3気筒、543cc)ガソリンエンジンをベースとした、マニホールドインジェクションのLNGエンジンを転用した。水素供給には高圧水素ポンペ(約14.7MPa)を使用し、水素ガスはこれより2段階で減圧し、インジェクターには約0.11MPaに調圧して供給している。

本実験は回転速度2000rpm、3000rpmで、主に絞り弁全開(WOT)の運転条件を中心として点火時期、空気過剰率、燃料噴射時期をパラメーターとし、水素燃焼、特に逆火現象に視点を置いて実験を行った。

3. 実験結果

3.1. 動力性能

図1に2000rpm、WOTにおける空気過剰率(λ)に対する出力、体積効率、最適点火時期(MBT)の変化を示す。これからMBTは、 λ が小さくなるほど遅角して、火炎スピードの増加するのがわかる。正味出力に関しては、 λ が小さくなると水素ガスの流量が増加するため、体積効率が低下するものの出力は増大する。しかし、本噴射条件(BTDC 5°)では λ が1.5より小さく

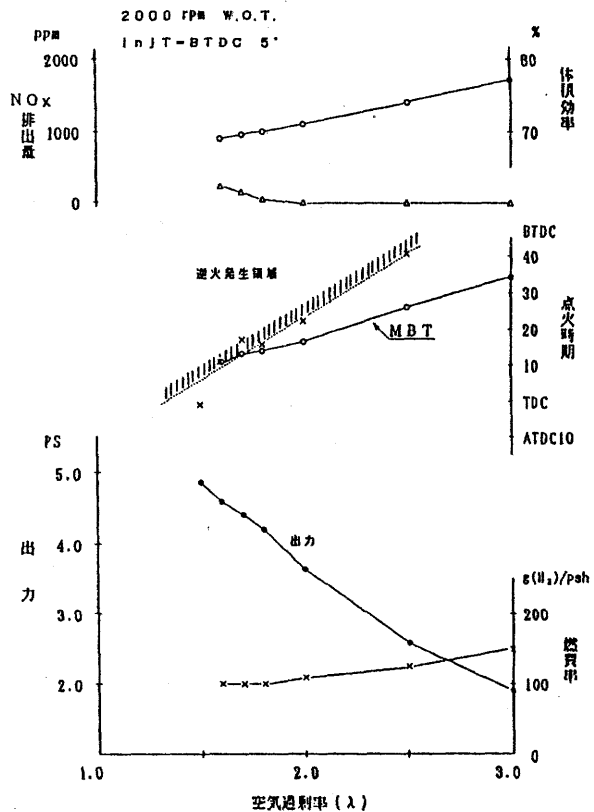


図1 空気過剰率と性能の関係

なると逆火が発生し、これ以上に小さくすることは出来ない。NO_xの排出も $\lambda = 1.6$ より小さくすると増加の兆しがある。

3.2. 逆火の観察及び条件

前記の逆火現象を吸気管内の圧力波形さらには逆火発生時の排ガス組成などから観察するとともに、その逆火限界を調べた。掘場製(MEXA-9100D)排ガス測定装置を用いて、逆火運転時の排ガス分析を行ったところ図2に示すように、逆火時にはO₂濃度が減少し、針状の鋭い波形が観察されることがわかった。そこでこのO₂濃度の低下量により逆火の大きさが推定できることがわかった。後述する逆火頻度はこの方法で測定した値である。

(1) 水素噴射時期の影響

3000 rpm、WOT、I_gT: ATDC 3°、 $\lambda = 1.29$ の設定で燃料噴射時期を変えて、逆火の発生状況を観察した結果を図3に示す。逆火は筒内圧力波形から見ると筒内で着火し吸気管に吹き戻されているように思われる。そして、吸気管内で激しい圧力振動が生ずる。無論、新混合気は燃焼してしまっているので次の筒内爆発は得られない。

そして、噴射時期により吸気管内爆発の大きさと発生時期が異なることが分かる。即ち、ATDC 35°~50°の噴射時期では逆火による吸気管爆発圧が高く、その発生する時期は燃料噴射時期よりかなり遅くなる。

更に75°まで遅らせると爆発圧は小さくなり、筒内圧力センサーには感じないほどになる。そして逆火は燃料噴射時期以前に発生している。これは吸気弁が閉じた後も燃料が噴射し続けるため、この燃料は次のサイクルで

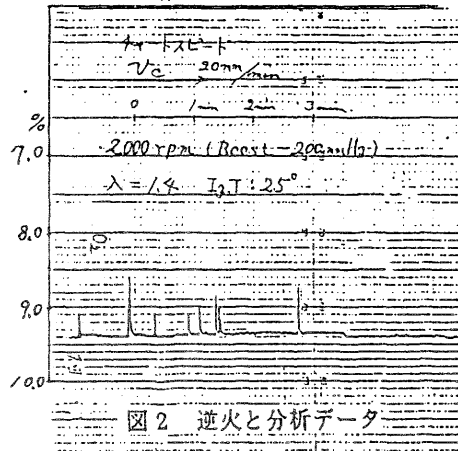


図2 逆火と分析データ

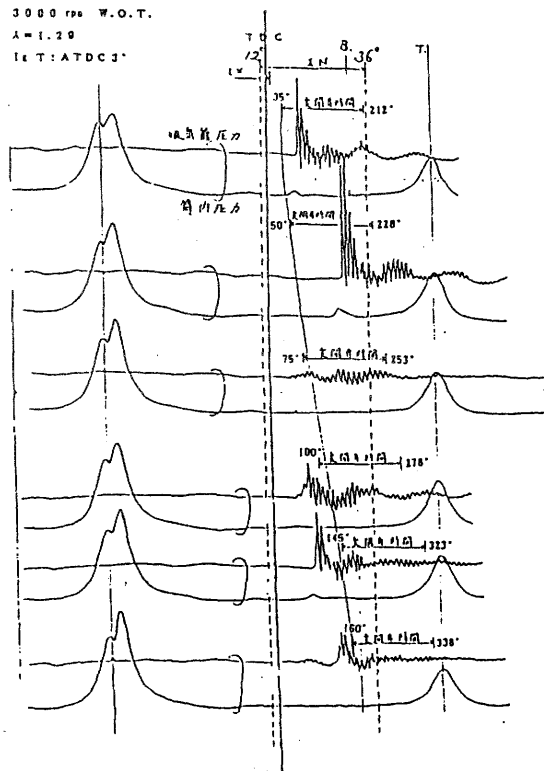


図3 燃料噴射時期と逆火波形

多量の空気に薄められて、吸気弁が開くと同時にシリンダー内に入り、着火してゆっくりと吸気管で燃えるものと思える。しかし、噴射時期を更に遅らせると吸気閉弁後の噴射量が多くなり、次のサイクルで濃い混合気が筒内に入る様になり、再び爆発圧は大きくなる。以上の現象を2000 rpm、-200 mmHg、 $\lambda = 1.5$ 、点火時期 (I g T) B T D C 25° の条件下で燃料噴射時期と逆火の発生頻度を整理した結果を図4に示す。

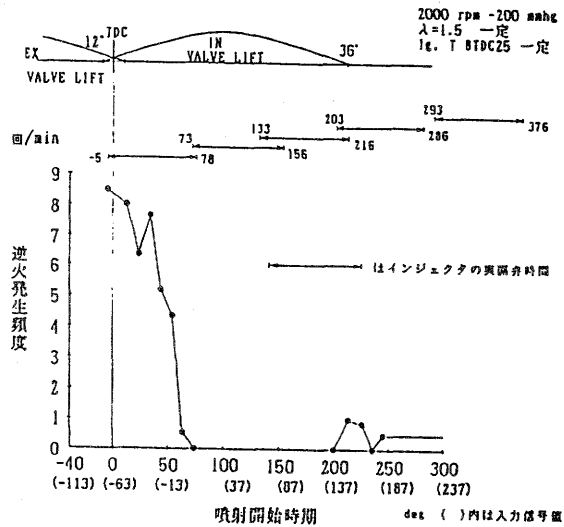


図4 噴射時期による逆火発生頻度

噴射時期 B T D C 5° では、逆火の発生頻度は極めて高い位置で

あるが、噴射時期を遅らすにしたがって逆火発生回数が減少し、A T D C 73° では逆火が発生しなくなる。そして、A T D C 203° まだが逆火に対して安全領域であることが分かる。これを越えると再び逆火を発生するが、その頻度は小さい。

以上の結果をまとめると次のように推測出来る。

- ① 吸入弁の開弁前又は、その直後での燃料噴射では新気より先に水素が筒内に入るのので、瞬間的に空燃比が濃い状態となる。そして筒内の壁温は高く、高温残留ガスも多く内在して、逆火し易い。
- ② 逆火しない領域では、燃料噴射前に新気が流入して筒内を冷却するとともに遅れて入って来た燃料と良く混合するので異常燃焼し難い。
- ③ 吸入弁の開弁間際かそれ以後の噴射では、大部分の燃料が吸気管内に残留して拡散し、次の行程で新気と混じりながら流入するものと思われる。したがって①の条件よりは異常燃焼し難い。したがって、燃料の噴射時期は吸気の開弁期間中の出来るだけ遅い時期に噴射を開始して、しかも吸気閉弁後は出来るだけ早く噴射を完了させる必要がある。しかし、供試した噴射弁を用いて更に高負荷、高回転を考えると、上記条件を満足するのは難しくなる。

(2) 点火時期の影響

図5に3000 rpm、W O Tで $\lambda = 1.2$ における I g Tと逆火の関係を示す。これによると、点火時期により逆火の発生時期とその大きさが異なることは注目し値する。

即ち、点火時期が上死点以後の設定であれば燃料噴射直後に逆火が発生する。しかしその大きさは小さい。これは、点火が遅過ぎるために排気温度が高くなり、

筒内の壁面は過熱され、又残留ガス温度も高いので混合気が筒内に入ると同時に着火し、吸気管へ逆火するものと思う。又、管内では燃料及び吸気が供給され、少しずつ長く燃え続けるものと思える。点火時期が上死点前5°以前の設定の時は、前記条件での逆火時期より約90°も遅れて発生している。しかし、その最大圧は約3倍となる。

I g T $\geq 5^\circ$ 以上進角している場合には、残留ガス温度は比較的低いので、特定部、例えば排気弁又はプラグ等の限られた箇所で表面着火して吸気側へ逆火すると思われる。したがって、燃料がその遅れた分蓄積するので、爆発的に燃えるものと推測される。

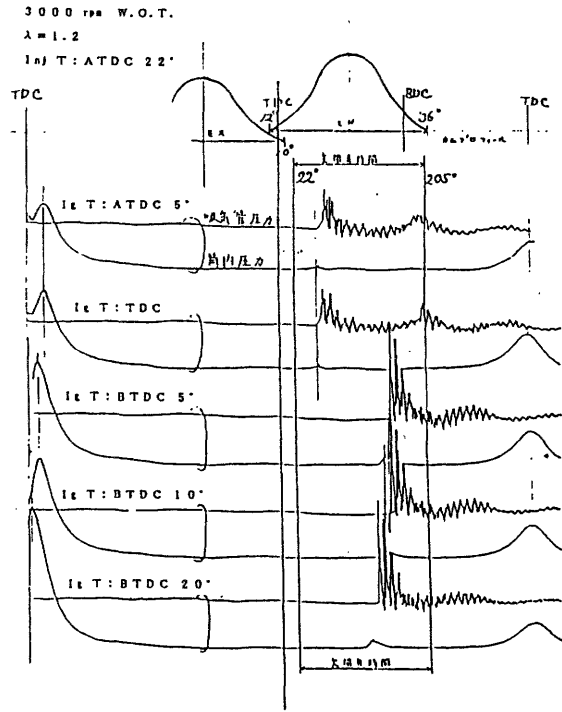


図5 点火時期と逆火

4. 水噴射による逆火防止策

前記の実験結果を見る限りでは、空気過剰率を小さくするとエンジン諸元を変更しても逆火を抑制することが出来ないことが分かった。しかし、表面着火が起きるからには、混合気が燃焼限界にあって、着火温度以上に加熱されたと考えざるを得ない。そこで吸気管に水を噴射してその蒸発熱により筒内温度を下げ、表面着火温度以下にすることが可能と考えて実験を行った。この結果、逆火なしに最高出力空気過剰率以上に濃くすることが可能であることが判明した。

4.1. 実験方法

本実験では、一気筒のみを用いた。図6に示す通り、従来の吸気管とシリンダーヘッドの間に水噴射弁用のアダプターを設けた。水噴射弁としてはガソリン用

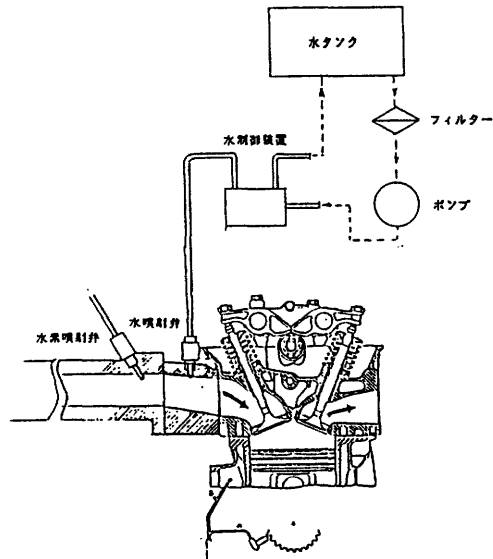


図6 水素噴射装置

インジェクターをそのまま使用した。水噴射量は予め開弁時間との相関を確認し推量した。

4.2. 水噴射量の効果

水噴射割合（水噴射割合＝水噴射重量／吸入空気重量）に対する逆火発生頻度の関係を図7に示す。 $\lambda = 1.25$ の逆火領域でも水を噴射すると、その量の増加と共に逆火発生頻度は低下して、水噴射割合がほぼ2%を越えると逆火は発生しなくなる。

4.3. 水噴射時期の効果

水噴射時期の影響をみるため $\lambda = 1.28$ の条件で、水噴射割合1.6%一定にして噴射時期を変化させた。この結果を図8に示す。逆火に対する水噴射時期の影響は大きく、その噴射時期は上死点からATDC120°までに噴射するのが効果的である。前述の通り逆火の発生頻度にはバラツキがあるものの、繰り返しのテストから吸気弁の開口時期から燃料の噴射時期の間で水噴射するのが逆火に対し最も効果的であることがわかった。

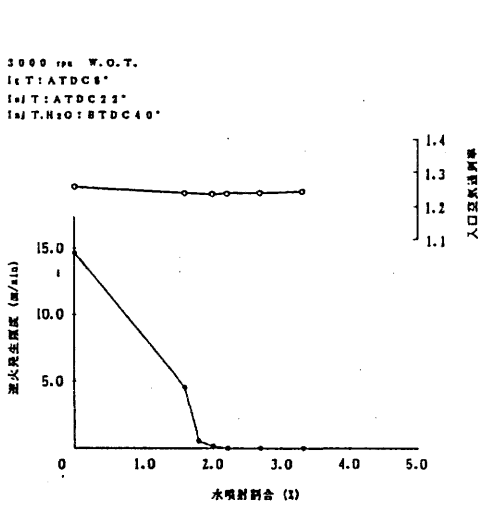


図7 水噴射量と逆火発生頻度

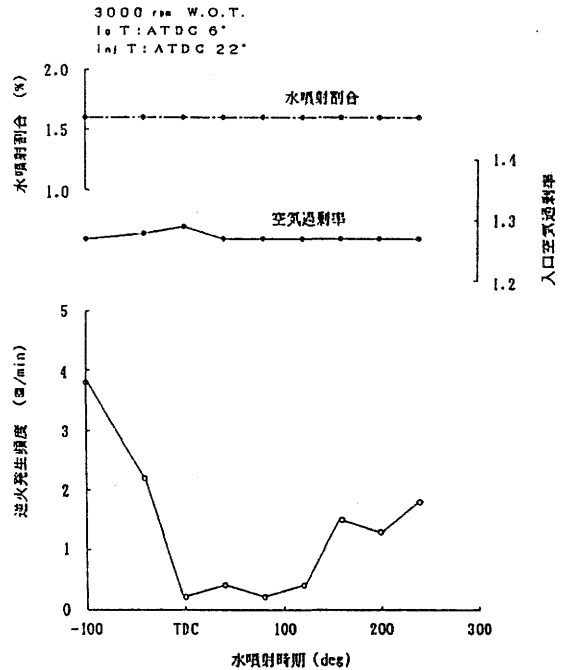


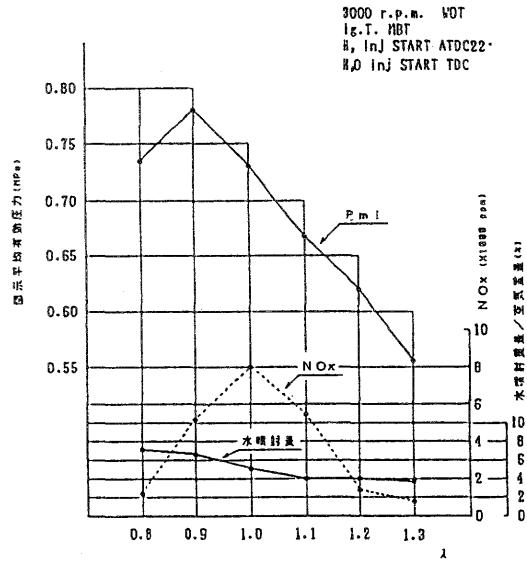
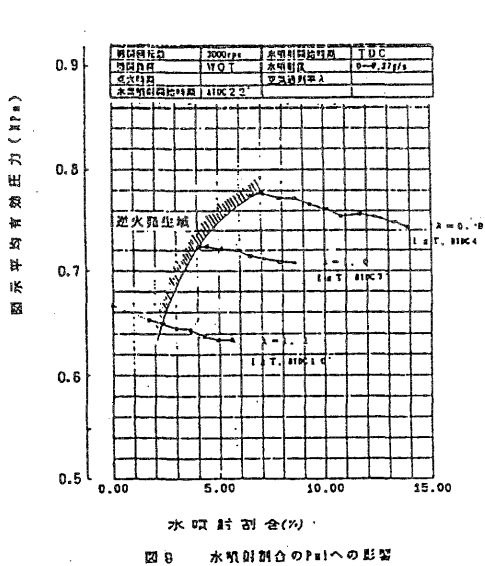
図8 水噴射時期と逆火の発生頻度の関係

4.4. 水噴射によるエンジン性能への影響

前述の条件を考慮して水噴射割合と図示平均有効圧力の関係を λ をパラメータとして整理した結果を図9に示す。この結果、空気過剰率が小さいほど逆火抑制のための要求水噴射割合は大きくなるが、水噴射割合を7%以上にすれば

3000rpmのWOT運転において、最大出力空気過剰率でも逆火は発生しない。以上を空気過剰率について、図示平均有効圧及びNO_xに関して整理すると図10の結果を得る。

水素エンジンの最大出力を得る空気過剰率(λ_{max})は0.9付近にある。この場合の図示平均有効圧力は0.77MPaである。この値はガソリンエンジンと比べるとまだ64%に過ぎない。

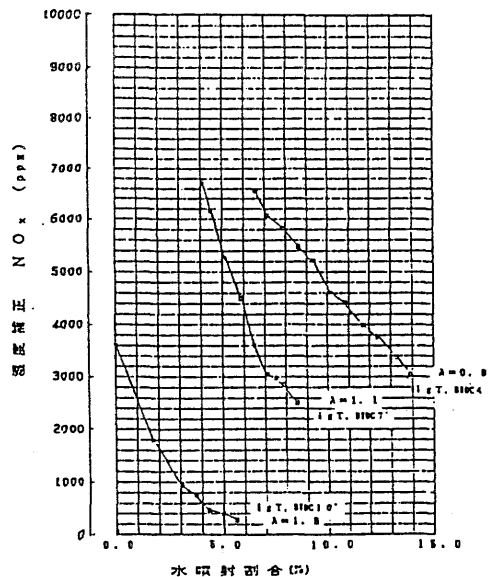


4.5. 水噴射によるNO_x低減効果

水素エンジンの唯一の有害ガスはNO_xである。従来逆火のために空気過剰率(λ)を小さく出来なかったため、NO_xの排出が極めて少なく問題にしなくてよかったが、水噴射によりλを小さく出来る様になるとNO_x問題がクローズアップする。図11に3000rpm、WOT時における水噴射量とNO_xの関係を示す。

これより水噴射割合を上げることにより大幅にNO_xを低減出来る事が分かる。即ち、水噴射割合は単に過早着火防止のみではなく、NO_x低減に有効な手段であることが分か

試験機	3000rpm	水噴射開始時期	TDC	Date	20/07/23
運転条件	WOT	水噴射量	φ=0.27g/s	Pa	229.6
点火時期		変速機制御	1.1.1.0.0.1	Tc	29.3
水噴射開始時期	ATDC2°			Wm	79.7
				Wt	1.2249



った。出力とのかねあいで、水噴射のデメリットを追究しながら適量を決める必要がある。

5. 今後の課題

逆火は燃焼室のデポジット、点火プラグ、バルブなどが過熱されて着火源となって発生すると云われている。そして、水素がガソリンに比べて着火し易い理由として燃焼速度が速い、可燃範囲が広い、最小点火エネルギーが小さい、火炎温度が高い等が上げられている。

しかし、逆火はその着火温度以上にならなければ発生しないはずであり、最低自発火温度はガソリンの方が低い。今後とも逆火現象を究明して行く必要がある。ともかく、燃焼室内の温度が下がれば逆火が抑制出来ることは事実で、水噴射により予混合水素エンジンでも最大出力空気過剰率まで濃くできることが確認出来た。同時に水噴射は NO_x の低減にも大きな効果があることが分かった。

しかし、水噴射には錆や潤滑油の白濁による潤滑性の劣化が心配される。又自動車とする場合、水噴射のために水タンクの搭載が必要となり、その補給管理も今後の課題である。

6. おわりに

本研究は通産省の「石油代替エネルギー開発技術実用化開発費」を受けて実施したものである。そして、通産省 機械技術研究所の紺谷和夫課長、浜 純主任研究官の御指導を賜ったことを記し深く感謝いたします。

参考文献

- (1), (2) 資源エネルギー庁：資源エネルギー年鑑'90
- (3) 清水, 前田：水素エネルギーシステム 14巻 1号 1989
- (4) 飯 純 : エネルギー総合工学 Vol.10 No.3 1987
- (5) 古旗 庄一：エンジンの再発見 ブルーボックス
- (6) 飯 純 : 燃焼研究 23号 1990