

水素エンジンの開発の思い出

—水素エンジンの“ガン”はバックファイヤーだった—

武蔵工業大学
水素エネルギー研究センター
山根 公高

前回の「水素エンジンの開発の思い出」に引き続き、武蔵工業大学の在学生に対し古浜学長がお話しされた「水素エンジンの“ガン”はバックファイヤーだった」についてお話を致します。

1. 予混合水素エンジンのなきどころ

点火する前に予め空気と燃料である水素を混合して用いる予混合水素エンジンは、水素がガス状であるため、理論混合比（空気過剰率 $\lambda = 1$ ）で水素をエンジンに供給したとしても、燃焼室内の約三分の一を水素が占め、ガソリンと比べると85%の出力しか得られない計算になる。また、水素エンジン研究者誰もが経験する現象として、吸入行程中に予混合気が何らかの熱源で点火され、吸気管に逆火（バックファイヤー）する現象がある。図-1は、単筒エンジンを運転中に吸気管に逆火した瞬間をとらえた貴重な写真である。

この逆火現象は、理論混合気よりも燃料の濃い所

（ $\lambda < 2$ ）で起こる。従って、逆火の起こらないところで運転しようとすると、エンジン出力は更に低下し、ガソリンエンジンの約半分となる。

予混合エンジンは、水素の着火可能範囲が広い性質を

利用して、出力を水素の流量のみで容易に調整できるエンジンで最もシンプルであるが、以上のような実用エンジンとしては致命的な問題を抱えている。

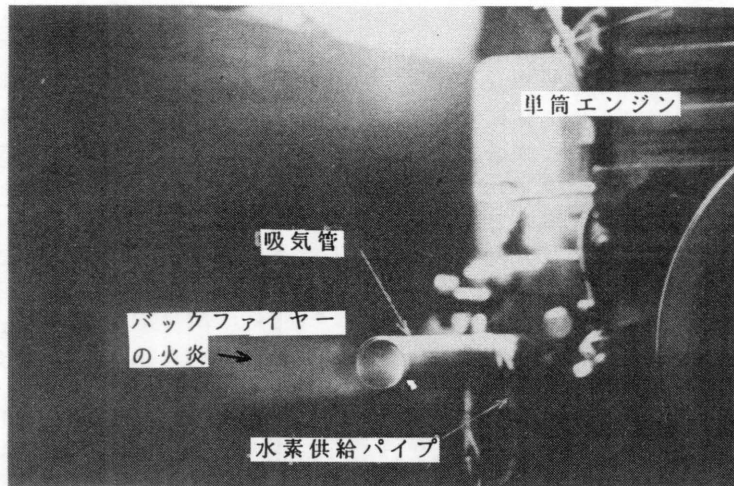


図-1 バックファイヤー

2. バックファイヤーとは

もう少し詳しくバックファイヤーについて説明する。

2. 1 バックファイヤーの現象

吸気管側に逆火する現象をバックファイヤーと呼ぶ。図-2は予混合エンジンの逆火現象を図解したものである。水素と空気が図のように吸気管で混合してエンジンの吸入行程中吸気弁が開いてピストンにより吸い込まれて燃焼室にはいる。燃焼室内の熱源によって混合気が着火され、吸入弁が開いているので、吸気管まで逆火する。吸気管内で水素と空気が燃焼してしまうので、新混合気がエンジン内に吸い込まれずエンジンは停止する。一方、この現象は無負荷運転即ち $\lambda = 4 \sim 5$ の薄い混合気でも起こるが、逆火で発生する圧力波によって通常は水素出口で燃焼している水素は吹き消され、新混合気が再び形成されエンジン内で燃焼するためエンジンは、停止しない。しかし、その回転は不安定となる。この様に、逆火が起こる現象には大別して以下の2つうりがある。

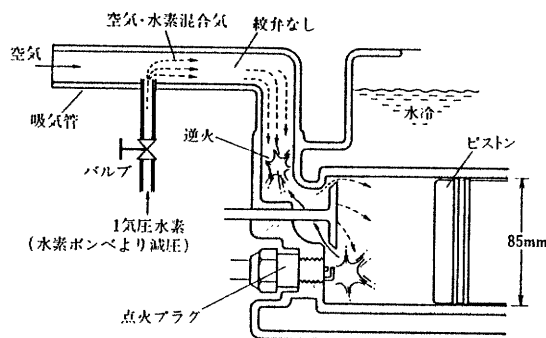


図-2 逆火現象の図解

(1) 高負荷時すなわち水素濃度が濃い時の逆火

空気過剰率が2以下(水素体積濃度で17~30%)で起こる逆火は、エンジン内の高温部、例えば、排気弁表面、点火プラグ表面が水素-空気混合気の燃焼により高温になりそれが着火源となる。図-3は、加熱高温面による各種混合気の発火温度を図-4に示すカルタン抵抗線を着火源として実測したものである。これから判るように、水素-空気混合気は、全ての空気過剰率 λ においても、プロパン-空気、ガソリン-空気より、発火温度が低い。よって、水素-空気混合気の方がガソリンおよびプロパン-空気より逆火が起こり易い。この逆火は一瞬の内に起こる。それは先ず、混合気を吸い込んだ後、圧縮中に点火スパーク前に、燃焼室内の高温部で混合気が着火され、それが次のサイクルにはより早く着火して行く。すなわち、過早着火が起こる。結局、吸気弁が開いている時期まで進み、逆火が起こる。図-5にその過程を示す。燃焼圧力と吸気管圧力を計測することにより、逆火の検知をしたものである。

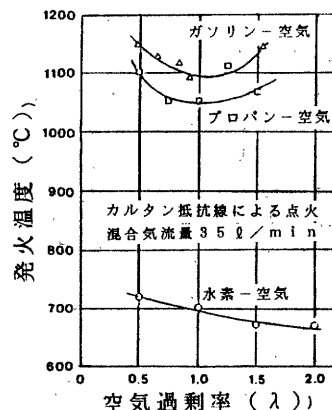


図-3 加熱高温面による各種混合気の発火温度

(2) 無負荷時、空気過剰率 $\lambda = 4 \sim 5$ で起こる逆火

無負荷のような低負荷時、すなわち、 $\lambda = 4 \sim 5$ では、燃焼速度が遅いため排気

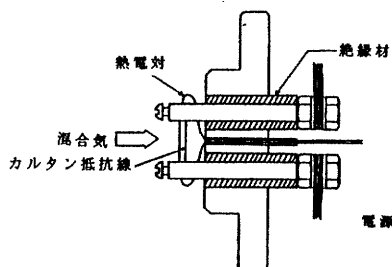


図-4 混合気の着火源

後吸気弁が開いたときでも、まだ、燃焼室に火炎が残っていることが予想される。また、高温の残留酸素も多い。この逆火は、それら、残留ガスが着火源となり新混合気がエンジン内に吸い込まれた後で、発火すると考えている。図-6は、混合気50ℓ/minに加熱空気又は、加熱窒素ガス10ℓ/minを吹き付け、発火する温度を計測したものである。これから判ることは、加熱空気の方が低温で発火している。おおよそ550~600℃で、残留ガスがこの温度になっていることは考えられる。この現象は、エンジンスタート時すなわち、冷間時でも起こるので、前項のものとは性質を異にしている。この様な無負荷時の逆火過程を燃焼圧力と吸気圧力によって計測したものを、図-7に示す。

2. バックファイヤーの原因

バックファイヤーの現象をつかむことはできたが、着火源となる高温部は排気弁、点火プラグまたは別の高温源かまだ明確ではない。しかし、それはエンジンによって異なってくるように思える。点火プラグは着火源の候補であるということは図-8で判る。すなわち、冷却されにくい普通プラグの運転可能範囲は空気過剰率 $\lambda = 1.96$ までである。一方、冷却され易い小点火プラグの運転可能範囲は、 $\lambda = 1.54$ まで広がっている。また、排気弁の冷却、吸気管内に水噴射等で逆火を防止できることが報告^{(1)、(2)、(8)、(4)、(5)、(6)、(7)}されていることから、明らかに燃焼室の高温部が逆火の原因になっていることは間違えない。従って、考えられる着火源は、①高温壁面、②残留ガス、③高温ガス中の微粒粉(オイルの燃えかす、空気中のダスト)である。

3. バックファイヤーを防止するためには

バックファイヤーの着火源を除去する対策をとれば良いが、あらゆる運転条件を考慮しなければならないため、それは大変

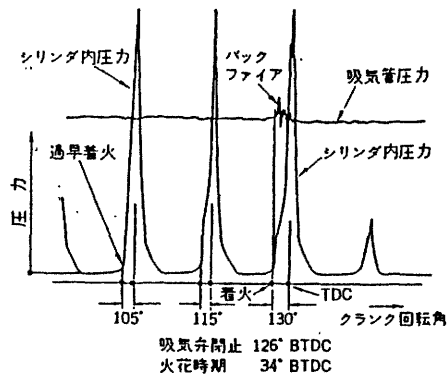


図-5 過早着火による逆火

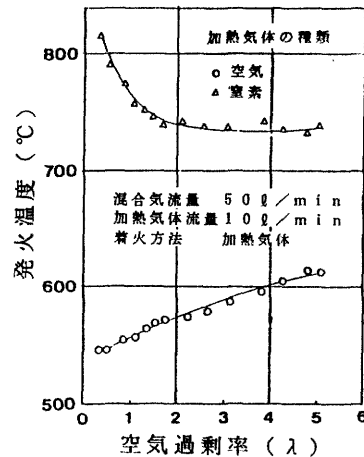


図-6 加熱気体による着火

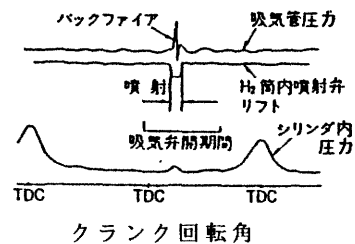


図-7 無負荷時の逆火

なことである。従って、バックファイヤーを根絶できかつエンジンの出力向上が期待できる上死点直前水素高圧噴射が考えられた(7)、(8)。

3. 1 上死点直前水素高圧噴射エンジン

この方法は、空気のみを吸い込んで圧縮上死点直前で高圧で水素を噴射弁から燃焼室に直接噴射し、その噴射水素の先端が噴射孔のすぐ下流にある点火プラグのスパーク部に到達したと同時に、点火プラグで着火、燃焼する方法である。この方法を用いれば、着火まで水素と空気とが混合することはまったく無い。従って、高温部、残留ガスまたは高温ガス中に微粒粉が燃焼室にあると無かろうと、それによる着火はないので、逆火は完全に除去できる。一方、空気を吸入して圧縮後空気に見合った分水素を噴射できるので、過給の作用と同じ

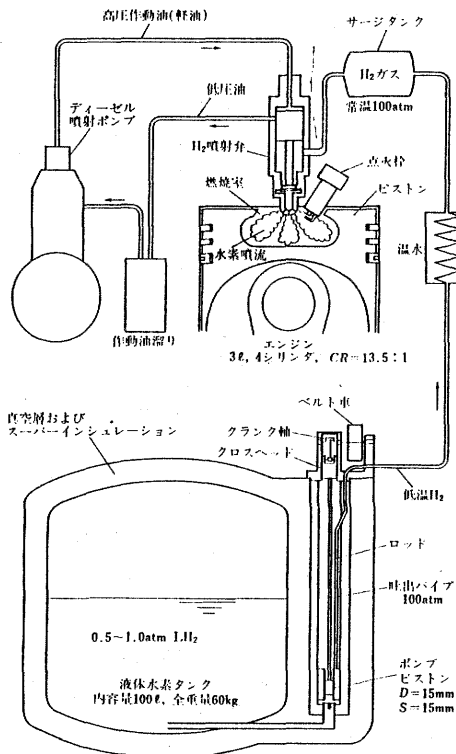


図-9 武蔵8号の水素エンジンシステム

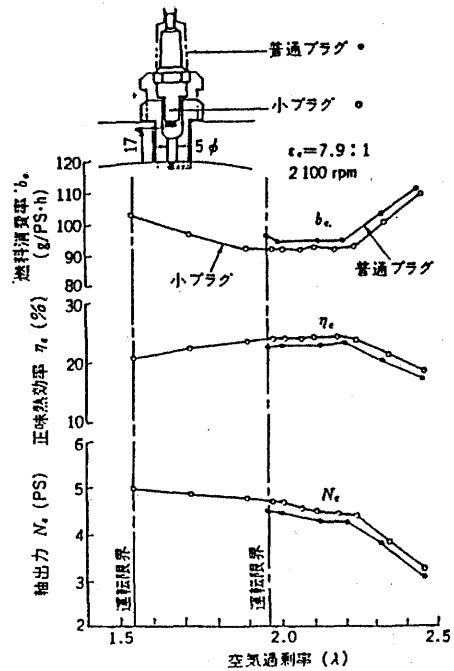


図-8 小プラグによる運転可能範囲の拡張

となり、前回お話ししたとおり、ガソリンに比して理論的に120%の出力が得られる。しかし、本システムは、高圧で水素を噴射しながら燃焼させる方式のため、水素を吸入空気に見合うだけ噴射するには、燃焼圧力より高い(今回は10MPa)圧力で燃焼室に水素を噴射する必要がある。高圧水素を得るためには、水素ガスを圧縮することによって得られるが、10MPaまで圧力を上げるには大きな動力が必要になる。よって、液体水素のまま圧縮し10MPaにできる液体水素高圧ポンプを開発して用いている。図-9は、水素自動車武蔵8号に用いられている水素エンジンシステムである。

4. 水素自動車での唯一の公害物質 NOx の排出

水素自動車は、水素を燃料とし空気

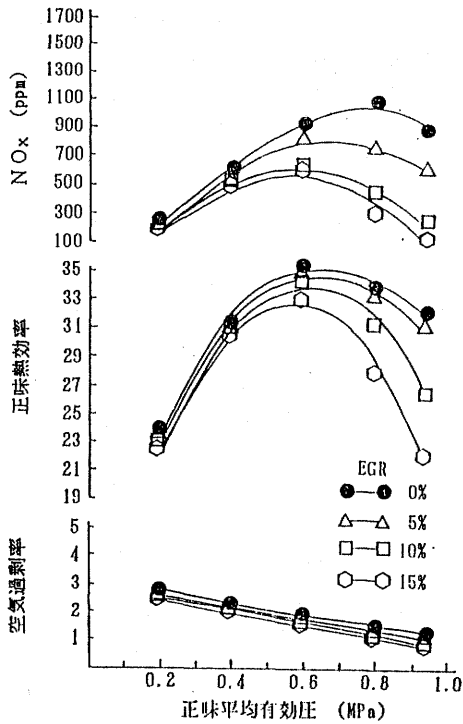


図-10 排気中のNOx濃度

と混合して燃焼させ出力を得る。そのため、窒素酸化物NOxが唯一の公害成分として発生する。図-10は、NOx低減法の一つである排気再循環の率(EGR)をパラメータとして、出力に対する排気中のNOx濃度、正味熱効率および空気過剰率λを計測した結果である。EGR=0%時、即ち、未対策の排気中のNOx濃度は、最大で1050ppmである。正味熱効率の最大値35%即ち正味平均圧力0.67MPaで運転すると、NOxはEGR=0%時1000ppmであり、EGR=10%時には、NOxは半減しその時の正味熱効率低下は1.5%にくだりどめることができる。

5. 水素自動車の更なる発展に向けて

バックファイヤーの起きない水素エンジンの開発を実施してきたが、一般の人がガソリン車、プロパン車およびディーゼル車のように町の中で運転できるようにするには、更なる改善が必要である。

エンジンとしては：

- 1) 高热効率、低NOxを狙った混合気の形成法
- 2) NOxの低減
- 3) 熱効率の向上
- 4) エンジンシステムとしての耐久性向上

液体燃料供給システムとしては：

- 1) 液体水素ポンプの吐出効率の向上
- 2) 液体水素ポンプの耐久性向上
- 3) 液体水素タンクの蒸発損失の低減
- 4) 液体水素タンクの軽量化
- 5) 取扱いおよび衝突時の安全性の検証

である。

二酸化炭素排出のための地球温暖化問題の解決、将来かならずやってくる化石燃料の枯渇化問題とエネルギー問題、また、普及のための水素自動車の安全性の評価について、今年度4月に発足した武蔵工業大学すいそえねるぎーけんきゅうせんたーは、今後とも益々势力的に推進して行く考えである。諸兄のご協力とご支援をお願いして、ひとまず「水素エンジンの開発の思い出」シリーズを終了したい。

参考文献

1. R.O. King, W.A. Wallance and B. Mahapatra, "The Oxidation and Detonation of Fuel Vapors and Gases-V. The Hydrogen Engine and the Nuclear Theory of Ignition", Can. J. Res., F26, pp.264, (1948)
2. R.O. King and M. Rand, "The Oxidation, Decomposition, Ignition and Detonation of Fuel Vapors and Gases-XXVII, The Hydrogen Engine", Can. J. Technol. 33, pp. 445, (1955)
3. R.O. King et. la., "The Hydrogen Engine, Combustion Knock and the Related Flame Velocity", Trans. Engr. Inst. Can. 2, pp.143, (1958)
4. R.E. Billings and F.E. Lynch, "History of Hydrogen-fueled Internal Combustion Engines", C.F. Kettering基金への報告、No. 73001, (1973)
5. J.G. Finegold, Wm.D. Van Vorst, "Engine Performance with Gasoline and Hydrogen, A Comparison Study", Proc. Hydrogen Economy(Miami) Energy Conf., (1974.3)
6. Daimler-Benz AG Zentrale Forchung: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, "Wasserstoffantrieb Komponenten entwicklung Motor", BMFT-TV 7541(1978)
7. 古浜庄一、「未来をひらく水素自動車」東京電気出版局、平成4年3月、pp. 29, 103
8. 小林泰樹、他2名「TDC直前噴射エンジンの点火法に関する研究」(1989) 機学会論文集、55-511, pp. 895

以上