

トピックス

水素ハイブリッドトラックの開発

伊東明美・岩崎秀之・清水勇毅・白倉寛之

東京都市大学

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

1. はじめに

地球温暖化および石油資源の枯渇に対し、二酸化炭素排出量削減および再生可能なエネルギーの活用は急務である。これは自動車をはじめとする運輸部門においても例外ではない。そのため自動車に対しても、二酸化炭素排出量が少なく再生可能なエネルギー源を活用したパワートレインの検討が強く求められている。

近年、エンジンに替わる自動車のパワートレインとして、燃料電池または蓄電池とモーターの組み合わせが提案され、これらは市街地走行を主とする車両向けに既に実用化されている。しかし比較的高負荷域が多用される商用車については、現在、有効な代替機関の提案が乏しいのが実情である。

ここで水素は、再生可能であり、また燃焼により二酸化炭素を一切発生しない燃料である。水素生成方法についての検討は必要であるが、水力発電あるいは夜間の余剰電力による電気分解や、化学プラントや製鉄所で発生する副生水素の活用等、環境負荷を増加させない水素生成の可能性が十分考えられる。

そこで本研究では、水素を利用した、商用車にて利用可能なパワートレインを開発することを目的に、水素エンジンの実用化に取り組んだ。現在の二酸化炭素排出量の現状を鑑み、近い将来に活用可能な代替機関の提案を目指し、信頼性が高く、低コストで、かつ現在の我が国の法規の下で比較的容易にナンバーが取得可能な、高圧の気体の水素を燃料とする予混合火花点火式水素エンジンを開発した。

水素エンジンの研究の歴史は古く、予混合火花点火式水素エンジンの課題は、バックファイヤ等の異常燃焼の発生およびベースエンジンに対する出力の低下であることが過去の研究により示されている[1]。また排気規制を満足させるためには、水素エンジンから唯一排出される

排気成分である窒素酸化物排出量の抑制も重要である。そこで本研究では、予混合火花点火式水素エンジンの窒素酸化物排出量を規制値を満足する水準に抑制した上で、バックファイヤ等異常燃焼の抑制およびエンジンの出力向上に取り組んだ。

2. 水素エンジンの開発

2.1. 水素エンジン諸元

ベースエンジンとして日野自動車株式会社製直噴4気筒過給ディーゼルエンジンN04Cを採用した。これに対し、燃料噴射弁の廃止および当該部位への点火栓の追加、天然ガス用噴射弁とスロットルバルブを有する新規に制作した吸気マニホールドの装着、ピストンの燃焼室形状の変更および圧縮比の18から12への変更を行った。図1にエンジンの構造を、表1に水素エンジン諸元を示す。また、以後本エンジンをN04-H2と称する。なお本エンジンは、排気後処理装置を一切使用していない。

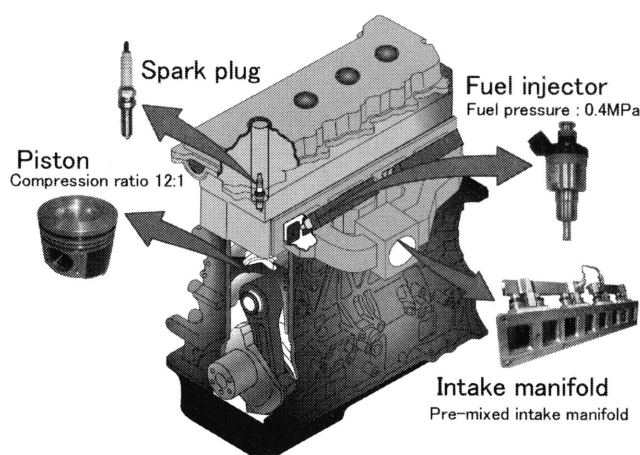


図1. 水素エンジンの構造

このエンジンを用い、バックファイヤ等異常燃焼の抑制は点火系の最適化により、出力の向上は、高回転域は

高過給により、低回転域はハイブリッドシステムを用いてモーターでアシストすることにより対策することとした。

表 1. 水素エンジン諸元

Enginetype	N04-H2
Displacement [L]	4
Bore × Stroke [mm]	104 × 118
Compression ratio	12
Number of cylinder	4
Injection system	Port injection
Valve train	OHV
Valve timing	I _{VO} =14°C _A BTDC
	I _{VC} =42°C _A ABDC
	E _{VO} =53°C _A BBDC
	E _{VC} =17°C _A ATDC

酸化物排出量がポスト新長期規制を満足するよう、全運転条件下において排気中の窒素酸化物濃度を 10 ppm 以下となるよう、空燃費を調整した。噴射弁に供給される燃料の圧力は 0.4 MPa とした。

表 2. 供試した点火系

点火方式	プラグギャップ (mm)	点火コイル
フルトランジスタ方式	0.9	購入品
	0.7	
	0.5	
	0.4	
	0.3	
	0.2	
C. D. I. 方式	0.9	MP13
		MP41

2. 2. 水素エンジン最適化のための実験方法

過去の研究により、点火栓の放電電圧波形の異常とバックファイヤとの関係が指摘されていたため[1]、本研究においてもその測定を行った。図 2 に測定系統図を示す。電圧プローブを用いて、プラグコードに印加される電圧を測定した。

またグロープラグ型圧力センサーにより筒内圧の測定を、また吸気管に取り付けた圧力センサーにより過給圧の測定を行った。

点火系は、フルトランジスタ方式および C.D.I. (Capacitor Discharge Ignition)方式について検討を行った。表 2 に供試した点火系の一覧を示す。

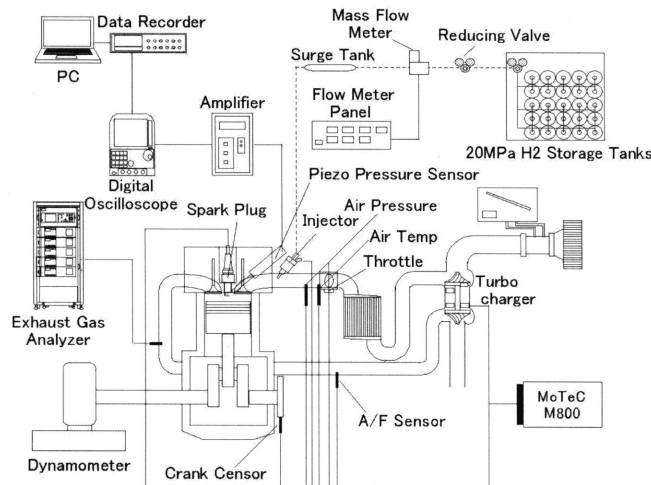


図 3. 実験系統図[2]

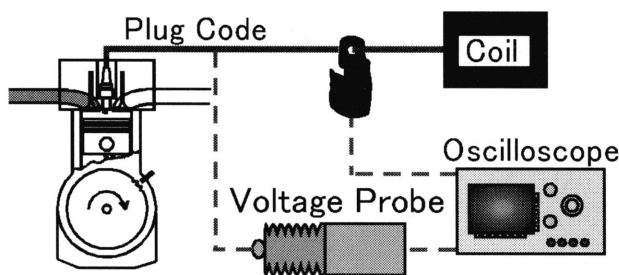


図 2. 放電電圧測定系統図[2]

図 3 に実験系統図を示す。試験条件はエンジン回転数 1000 rpm ~3500 rpm、水温 80 °C、吸気温度 45 °C とした。過給圧は可変容量式過給機により任意の値に設定されるが、上限は過給機の仕様にとり、ゲージ圧で 150 kPa とした。また、排気後処理装置を用いずに窒素

2. 3. 実験結果

2. 3. 1. 対策前の水素エンジン性能

ガソリンエンジンにて一般的に用いられている点火方式であるフルトランジスタ方式を用い、異常燃焼が発生しない範囲での過給圧の上限を求めた。プラグギャップはガソリンエンジンで一般的に用いられている 0.9 mm とした。このときの水素エンジン N04-H2 の出力をもとめ、ベースエンジン N04C (ディーゼルエンジン) の出力と比較を行った。その結果を図 4 上図に示す。図より N04-H2 の出力は N04C と比較して大幅に減少していることが分かる。この原因は過給圧の向上に伴いバックファイヤが発生したために、図 4 下図に示す値以上に過給圧を上げることができなかったためである。

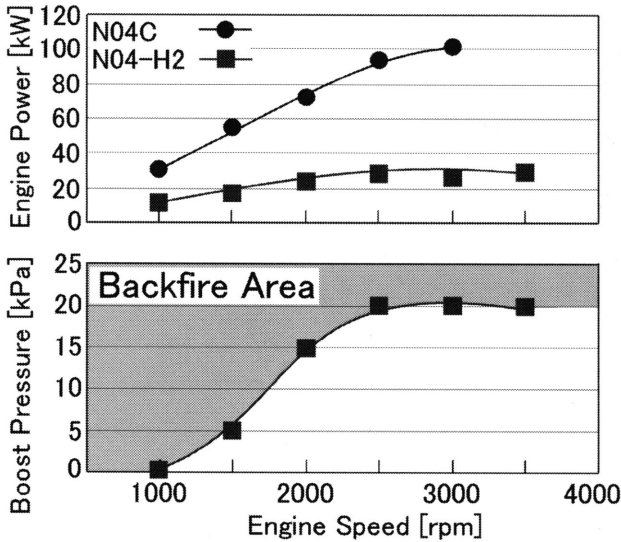


図4. 対策前の水素エンジン性能[2]

2.3.2. バックファイヤ原因の解析

図5にバックファイヤ発生時の放電電圧波形と筒内圧を示す。図中Aで示すように、一回目の放電後にも、点火系には電圧が残存していることが分かる。これにより筒内圧が低下し、再放電しやすい条件が整った吸気行程において再放電が発生していることがわかる。このとき吸気弁が開き、混合気が燃焼室内に導かれているために火炎が吸気管に戻り、いわゆるバックファイヤが発生していることがわかる。

この対策のため、①残存した電圧を逃がすために接地する対策ケーブルの使用[1]、②プラグギャップを低減し放電電圧を下げる、および③点火系に電荷を蓄積しにくいC.D.I方式の採用が考えられた。ここで、車両に搭載することを考慮し、耐久性に課題を有する対策ケーブルについては検討を行わなかった。そこで②および③について、以下にそれぞれの効果を示す。

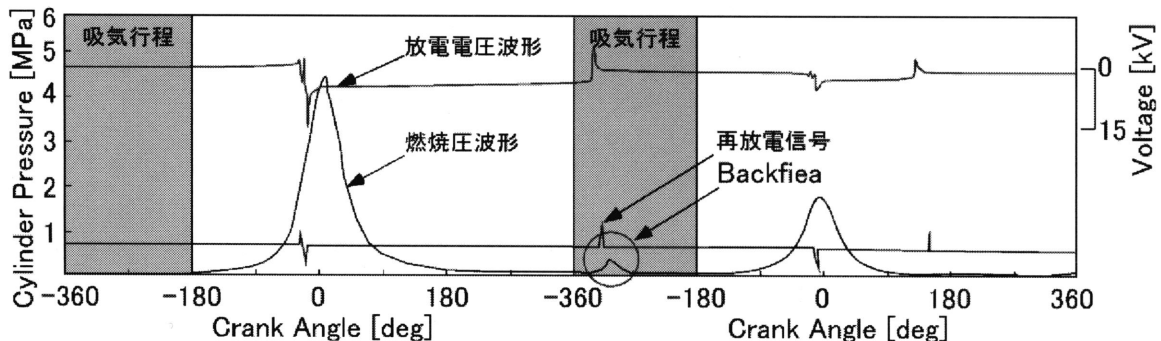


図5. バックファイヤ発生時の放電電圧波形と筒内圧[2]

図6にプラグギャップと過給圧および放電電圧の関係を示す。またこのときバックファイヤが発生した運転条件を図中に示す。図より、放電電圧はプラグギャップが大きいほど、また過給圧が高いほど、高くなっていることが分かる。またバックファイヤは放電電圧が12 kV以上になると発生することがわかった。このため、過給圧を上限の150 kPaまで上げるためには、プラグギャップは0.3 mm以下にする必要があることがわかった。

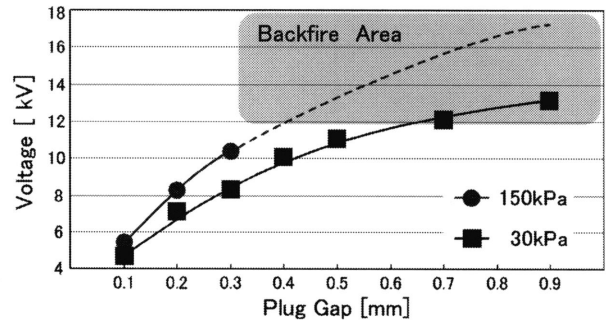


図6. プラグギャップと放電電圧[2]

図7に、C.D.I方式にて、2種類の点火コイルを用いてエンジン出力を測定した結果を示す。C.D.I方式にて点火コイルMP41を用いることで、エンジン出力を大幅に向上させることができた。図8に点火コイルMP13およびMP41の放電電圧波形を示す。MP13の放電時間はMP41より短いことがわかる。次に図9にそれぞれの点火コイルを用いた場合の過給圧を示す。MP13では高過給域で失火が発生したために、過給圧を十分上げることができなかった。

車両に搭載する点火系を決定するにあたり、プラグギャップの低減は、点火栓の電極摩耗時に、バックファイヤが発生しやすい方向にあるためロバスト性が低いと判断し、C.D.I方式を採用した。

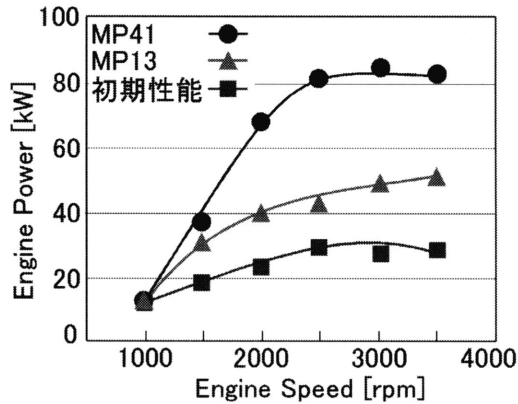


図 7. C.D.I.方式を用いた場合のエンジン性能[2]

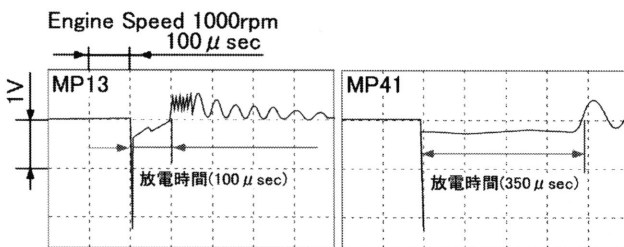


図 8. MP13 および MP41 の放電電圧[2]

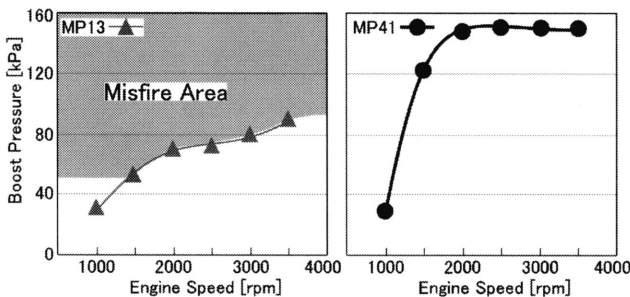


図 9. MP13 および MP41 使用時の過給圧[2]

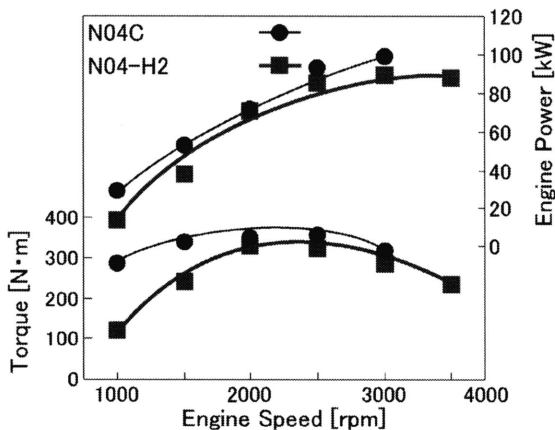


図 10. 水素エンジン最終性能[2]

図 10 に最終的に得られた水素エンジン N04-H2 の性

能を、ベースエンジン N04C と比較して示す。出力、トルクとも、ベースエンジンと比較して、高回転域では遜色ない値を示していることがわかる。

3. 水素ハイブリッドトラックの開発

水素ハイブリッドトラックの構造を図 11 に示す。エンジン整備時のキャブチルトを考慮し、キャブバックに水素タンクを搭載した。水素タンクは耐圧 35 MPa のものを 4 本搭載した。このときの一充填あたり航続距離は 150 km である。市街地における配送業務等では一日あたり走行距離は 100 km 前後であるため、このような用途には十分な航続距離である。さらに長い航続距離が要求される場合には、荷室容積はそのまま最大 8 本まで水素タンクの増設が可能である。

法規に従い、水素漏洩時には水素が速やかに車外に排出されるよう、水素漏洩の可能性のある箇所はすべて最上部に水素排出のための孔を設けてある。

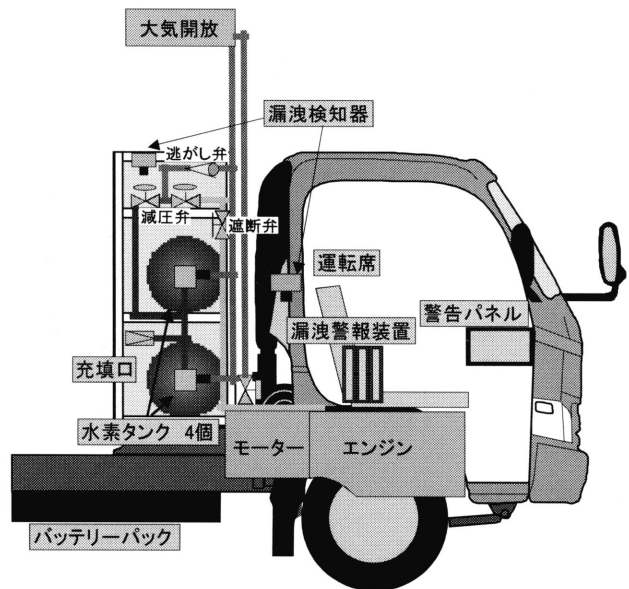


図 11. 水素ハイブリッドトラックの構造

図 12 に、モーターにて低速トルクのアシストを行った場合の車両性能を示す。図より、ベースエンジン N04C と比較して、ほぼ遜色ない出力およびトルクを得ることができた。

表 3 に JE05 モード下での排ガス性能を示す。触媒を用いることなく、ポスト新長期規制を満足していることがわかる。また二酸化炭素排出量もあわせて示す。水素

は燃焼によって二酸化炭素を排出しないが、エンジンの潤滑に使用される潤滑油が燃焼室内にわずかに入り込み燃焼するため、ごく微量の二酸化炭素は検出される。しかしベースエンジンと比較して極めて低いレベルであることが分かる。

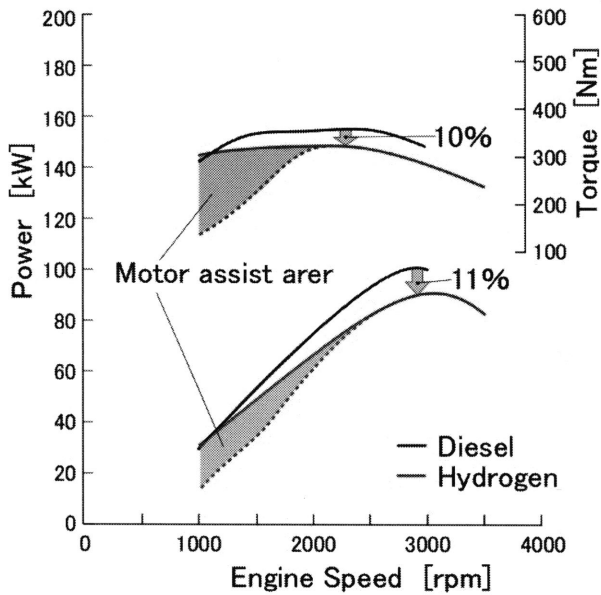


図 12. 車両性能曲線

表 3. 水素ハイブリッドトラック排ガス性能

	NOx (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	CO2
規制値 (ポスト新長期規制)	0.70	2.22	0.170	—
ベース車両	1.82	0.31	0.145	835.2
水素ハイブリッド トラック	0.18	0.029	0.002	3.2

4. 実証試験

開発した水素ハイブリッドトラックを用いて、室蘭市にて配送業務を行う実証試験を実施した。実証試験では坂道を含む市街地を主に走行している。総走行距離617kmをなんら不具合無く走破することができた。また運転者からは、通常のディーゼルエンジン搭載車両と遜色ないドライバビリティであるとの評価を受けた。

5. まとめ

点火系にC.D.I方式を使用し、点火コイルの最適化を

行うことで、高過給時にも異常燃焼を起こさずに運転が可能な水素エンジンの開発に成功した。これにより、高回転域では高過給が可能となり、出力およびトルクを向上させることができた。

新たに開発した水素エンジンを搭載し、低速トルク不足を補うためにハイブリッドシステムを採用した水素ハイブリッドトラックを開発した。当該車両はベース車両と比較して遜色ない性能を示した。

水素ハイブリッドトラックは35 MPa水素タンクを4本搭載した状態で、一充填あたり航続距離は150 kmであった。市街地の配送業務等の用途であれば十分な航続距離である。また現在と同等の荷室容積を確保したまま水素タンクは8本まで増設できるため、さらなる航続距離の延長も可能である。

謝辞

水素ハイブリッドトラックの開発にあたり、日野自動車株式会社、東洋電装株式会社、株式会社イワモト、株式会社フラットフィールド、横浜ゴム株式会社、株式会社原田精工の方々より多大なご支援を賜りました。ここに感謝の意を表します。

また本開発に携わった東京都市大学内燃機関工学研究室および自動車エンジン研究室の学生諸君のご協力に対し、心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 近藤卓, 他, 「水素エンジンの異常燃焼に関する研究」, 第13回内燃シンポジウム講演論文集, pp.133-138, 1996
- [2] 白倉寛之, 他, 「予混合水素エンジンのバックファイヤ抑制に関する研究」, 自動車技術会前刷集, No.29-10, 20105409, pp.23-28, 2010