

噴霧の高分散化による燃焼改善

研究報告

小池誠，鈴置哲典

Fuel Economy Improvement of a DI Gasoline Engine Using a Fan-Shaped Fuel Spray

Makoto Koike, Tetsunori Suzuoki

要 旨

直噴ガソリンエンジンにおける成層混合気形成を混合速さの観点から考察し，空気を巻き込み易くして過濃混合気を減らすことが性能改善に有効であることを示した。そして，これをもとに新しい成層混合気形成法を開発した。本混合気形成法は偏平扇形の噴霧をピストン頂面に向けて噴射し，ピストンに設けたキャビティを利用して点火栓周りに燃料を成層化する方法で，噴霧が作り出す流れとキャビティ形状により，最初は偏平扇形の噴霧が点火時にはほぼ回転楕円形状の混合気になる。本手法は従来の成層混合気形成法とは噴霧形状が異なるだけでなく，スワール，タンブル等の

大きな筒内ガス流動を必要としない特徴がある。

偏平扇形の噴霧はノズルにスリット噴孔を開けて形成した。このようにして形成した噴霧はスワールノズルで形成した円錐噴霧と異なり，空気密度の高い圧縮行程噴射でも噴霧が縮みにくく，貫徹力が大きい特徴を持つ。

本燃焼系の性能は単筒エンジンを用いて調べた。噴射方向をシリンダ下方に選び，シェル（貝）型キャビティを用いると低燃費が得られることを見出した。そして，エミッションと燃費が改善できることを明らかにした。

キーワード

直噴ガソリンエンジン，成層燃焼，燃料噴射，噴霧，混合気形成，燃費，エミッション

Abstract

A new stratified charge combustion system has been developed for direct injection gasoline engines. The special feature of this system is the use of a thin fan-shaped fuel spray formed by a slit nozzle. The stratified mixture is prepared by the combination of this fan-spray and a shell-shaped piston cavity. Both under-mixing and over-mixing of the fuel in the stratified mixture is reduced by this system. This combustion system does not require a distinct charge motion such as tumble or swirl, which allows the intake port geometry to be simplified in order to improve the

full-load performance. This paper first describes the theoretical background, which focuses on the mixing speed of the fuel with air in the cylinder during the compression stroke. Next, the major characteristics of the fan-shaped spray are shown and compared to the cone sprays with swirl nozzles. Finally, some spray effects on engine performance are described. The fuel consumption and emissions such as smoke, CO and HC are greatly improved at medium load and medium engine speed.

Keywords

Direct injection, Gasoline engine, Stratified charge, Spray, Mixture preparation, Fuel economy, Emissions

1. まえがき

1990年代後半以降に実用化された直噴ガソリンエンジンには三菱自動車のGDI、トヨタ自動車のD4、日産自動車のNEO-DI、VWのFSI、PSAのHPI、ルノーのIDEがあるが、1999年に発表されたトヨタ自動車の第II世代D4を除くと、全ての燃焼系はスワールノズルによる円錐噴霧を使い、成層燃焼を行わないルノーIDEは別にして、スワール、タンブルなどの気流とピストン頂面に設けたキャビティを利用して成層混合気を形成する。これに対してトヨタ第II世代D4はスリットノズルによる偏平扇状の噴霧とピストンキャビティにより成層混合気を形成し、スワールやタンブルといった強い筒内流動の助けを要しない特徴がある。

ここでは成層混合気形成法について、トヨタ第II世代D4の基となった高分散噴霧燃焼系の考え方と、主に開発初期段階で単筒エンジンを用いて燃焼系を検討した結果を報告する。

2. 成層燃焼改善の考え方

2.1 噴霧の高分散化

直噴ガソリンエンジンは、成層燃焼でも火炎伝播主体で燃焼が進むため、点火前には、火炎伝播できる濃度範囲まで、燃料の大部分が空気と混合していることが望まれる。エンジン筒内の燃料と空気の混合過程は、燃料質量分率（燃料質量 / 混合気質量）の確率密度を使うとFig. 1の模式図のように表わせ

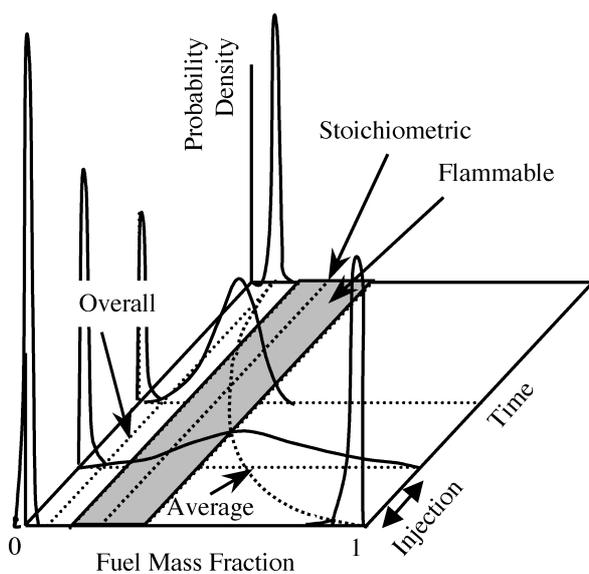


Fig. 1 Fuel-air mixing process.

る。これは噴射直後には分離している燃料と空気が、時間とともに混合し、次第に筒内全体の平均濃度へと近づいていく様子を表わしている。ガソリンが火炎伝播して燃焼できるのは斜線部で表わした濃度範囲（可燃範囲）に限られている。ガソリンは希薄側の火炎伝播限界が広くないため、一般に燃料を分散させないことが重要と考えられているが、このような表記でみればたくさんの空気で燃料を薄めなくては可燃範囲に至らないことがわかる。何れにせよ筒内噴射では概略Fig. 1のような過程を経るので、燃料の蒸発・混合の速さが燃焼系を決める大きなポイントになる。燃料の蒸発・混合がエンジン回転数や噴霧の移動時間・距離に比べて充分速ければ、燃料が可燃範囲を超えて薄くならないうちに素早く点火しなくてはならず、そのために、燃料が分散しないようにしたり、噴射弁と点火栓を近接して配置したりしなくてはならない。一方、蒸発・混合が遅ければ、そのための時間と空間の確保や、空気をいち早く噴霧内に取り込む工夫が求められる。燃料と空気の混合には、まず噴霧内に空気を取り込むことが必要であるから、この空気取り込み速さから平均的な燃料の混合速度を評価した。Fig. 2は運動量理論¹⁾から空気取り込み速度を見積もり、等速度線を求めた結果である。このとき噴孔条件は同一とし、筒内空気密度と燃料噴出速度をパラメータとして計算した。図中の線はその数字が大きいほど噴霧が空気を巻込む速度が大きく混合が速いことを表わす。図中斜線で示したのは直噴ガソリンエンジンと直噴ディーゼル

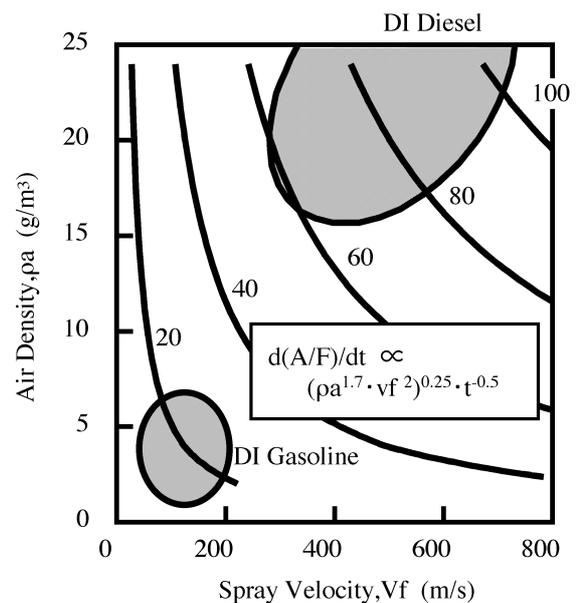
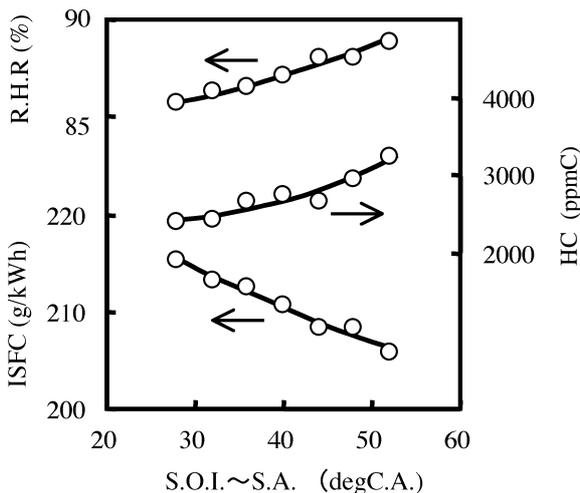


Fig. 2 Air entrainment speed of spray.

エンジンにおける噴射条件である。直噴ディーゼルは上死点近傍で燃料を噴射し、すぐに燃焼させても高い燃焼効率が得られている。この直噴ディーゼルと比べると、直噴ガソリンの混合速さは約1/4程度と小さいことがわかる。噴霧内に取り込まれる空気量は時間の1/2乗に比例して増加するから、直噴ガソリンで噴霧平均濃度が直噴ディーゼルと同じになるには16倍の時間を要することになる。これは噴孔条件を同じにしているし、簡単な仮定での見積もりであるから、値は目安に過ぎないが、直噴ガソリンエンジンでは筒内の燃料と空気の混合は、平均的にみれば比較的ゆっくりと進行すると考えられる。このことは直噴ガソリンエンジンの噴射時期がディーゼルエンジンに比べてかなり早いことや、次のエンジン実験結果からも明白である。Fig. 3は噴射から点火までのインターバルを変えたときの図示燃費率 (ISFC : Indicated Specific Fuel Consumption), 排出HC, 見掛けの発熱量割合 (R.H.R (熱発生率の積分値/燃料の発熱量)) を示す。インターバルを長くすると、局所的には混合が進み過ぎて希薄燃料が増え、排出HCが増加するが、これに反して見掛けの発熱量は増加し、燃費は改善する。これはインターバルを長くすると過濃混合気が減少し、その結果、TDC (Top Dead Center) 近傍の燃焼効率が向上するためと考えられる。したがって、局所的な希薄化を避けながら噴霧全体としては素早く空気を取込むような噴霧形



Engine Speed : 1200rpm, Fuel Flow : 15mg/st
 S.O.I. : Start of Injection, S.A. : Spark Advance
 R.H.R. : Ratio of Heat Release

Fig. 3 Effects of intervals between S.O.I and S.A.

態を作り出すことが望ましい。また、空気を積極的に取り込むようにすることは燃料蒸発にとっても有利である。噴霧内の燃料は主に取り込んだ空気の熱を使って蒸発すると考えられる。そのため、燃料蒸発によって噴霧内の温度は周囲の作動ガスよりも低下するが、取り込む空気量が多ければ噴霧内の温度低下が少なくなり、燃料への熱量供給も多くなって蒸発が速く進行する。噴霧高分散化の意図は空気を積極的に噴霧内に取り込み、過濃部を極力作らないようにするとともに取り込んだ空気の熱量で素早く燃料を蒸発させることであり、成層化された混合気内の濃淡を減じて燃焼効率を高めるのがねらいである。

2.2 筒内空気流動

ところで、前述したように、近年実用化されたエンジンのほとんどは点火栓と噴射弁を離し、噴霧が直接点火栓に向かわないように噴射方向を設定し、スワールやタンブルといった空気流動を利用して混合気を点火栓に導く方法がとられている。そして、ノズルにはスワールノズルが使われている。スワールノズルで形成される噴霧は貫徹力が小さいので、混合気を運ぶ空気流動の役割は重要である。しかし、大きな空気流動を作り出すためのポート形状や空気流動を可変にするためのバルブは流量係数を低下させる原因となるので、出力性能向上の妨げになりやすい。さらに、空気流動を作り出すことによる損失は機関の体積効率減少だけでなく、エンジン筒内壁面への冷却損失を増大させるので、燃費の観点からも好ましいとは言えない。また、この気流生成の影響は高回転ほど顕著に現われやすい。したがって、直噴化による出力性能向上のメリットを十分に引き出す、あるいは成層域を高速高負荷側に拡大して燃費を改善する、等の性能改善には、強い空気流動を使わずに成層混合気を形成する技術が求められる。

3. 高分散噴霧 (ファンスプレー) 燃焼系

上記のようなことから、空気を巻き込みやすい噴霧を作り、この特性を生かして成層混合気を形成する方法を検討した。スワールノズルはノズル内で形成した旋回流で噴孔出口の液膜を薄くし、大きな噴霧角で燃料を噴出するので、基本的には燃料と空気を混合させるのに好都合であるが、空気密度が高くなる圧縮行程では噴霧角が小さく縮む特性があり、噴射量が大きくなるにつれて混合不足となりやすい。そこで、偏平で扇状に広がるファンスプレーを検討した。ファンスプレーには以下の特徴があり、直噴ガソリンエンジンの混合気形成に適した噴霧で

あると考えた。

(1) 偏平な噴霧は空気とのせん断面積を大きくとれるので空気を噴霧内に取り込み易い。

(2) 均等に広がる連続した噴霧なので濃淡を生じにくい。

(3) 噴霧厚さが薄いので、内部に過濃部を残しにくい。

(4) 噴霧のせん断によって混合気内に乱れを生じ、燃焼速度を高められる。

ファンスプレーは塗装用などの噴霧器には使われているが内燃機関への適用例は極めて少ない。当社ではディーゼルノズルにスリット状の噴孔を開けてファンスプレー形成を調べた経験があり²⁾、これを基に検討を進めた³⁾。

当初は球状のサックを持つノズルにFig. 4のようなスリットを切ってファンスプレーを形成した。噴霧角はスリットの切込深さにより、流量はスリット厚さにより調整した。このようにして形成した噴霧の例をスワールノズルによる円錐噴霧と比較してFig. 5に示す。噴霧を種々の圧力条件で調べると、

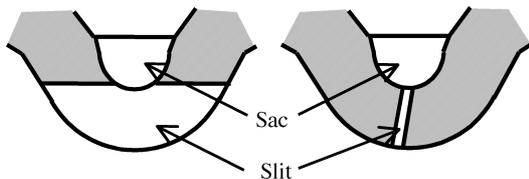


Fig. 4 Slit nozzle configuration.

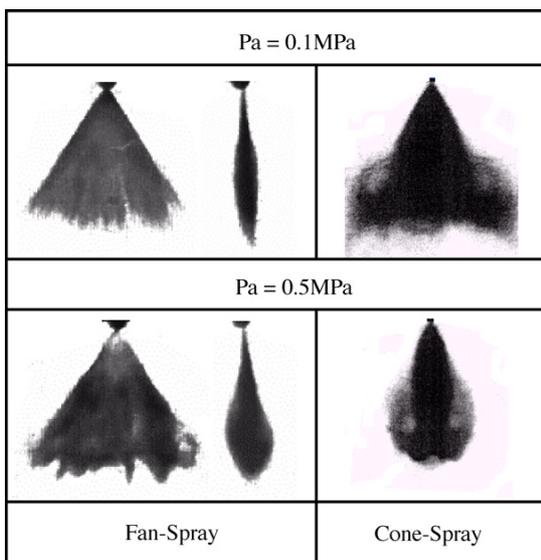


Fig. 5 Comparison of spray shape.

ファンスプレーの正面噴霧角（噴霧角の大きい方）は空気密度変化の影響を受けにくい、側面噴霧角（噴霧角の小さい方）は空気密度が高いほど大きくなるのがわかった。この噴霧角が大きくなる特性はホールノズルに近く、空気密度が高いほど噴霧角が小さくなるスワールノズルとは異なっている。また、噴霧の貫徹力は、幾何学寸法が限定されるエンジン筒内では重要な因子であるが、ここではファンスプレーと円錐噴霧の貫徹力を運動量理論によって比較検討した結果を示す。Fig. 6は同一流量条件で噴霧貫徹力が同一となる噴霧角を計算した結果である。ファンスプレーは正面噴霧角をパラメータとし

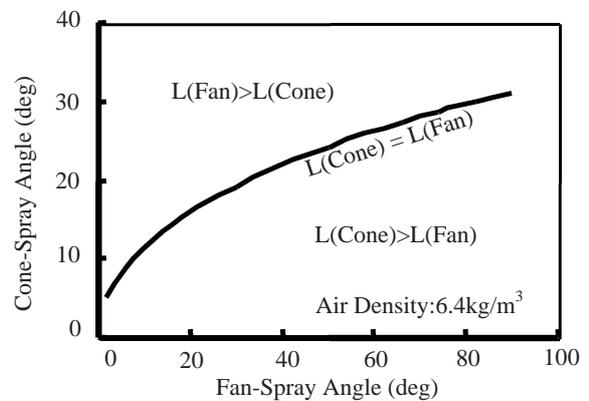


Fig. 6 Spray angle effect on penetration.

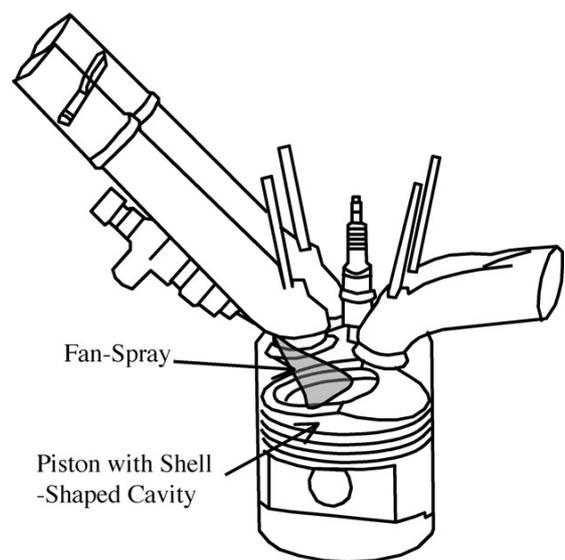


Fig. 7 Test engine configuration.

た。これより、同一の噴霧角であればファンスプレーの貫徹力の方が円錐噴霧より大きいことがわかる。そのため、ファンスプレーでは点火栓周りへ混合気を移動させるための筒内流動の必要性は小さくなる。

次に筒内における混合気形成を説明する。Fig. 7は燃焼系の構成を示す。シリンダヘッドは4弁ペントルーフ型で、点火栓はシリンダのほぼ中央、噴射弁は吸気2弁の間でボア側に位置する。燃料は点火栓に向かって対称に、噴霧の扇面がピストンに向くように噴射した。このときの噴射方向はシリンダ下方とし、噴霧液滴が点火栓に直接衝突しないようにするとともに、ピストンに設けたキャビティ壁面を使って成層混合気を形成するようにした。そして、噴霧と対向する側のキャビティ壁面を、噴霧が折り返してキャビティの中心に向かうようにした。すなわち、噴射後の燃料噴霧は偏平扇状で空気を巻き込みながら移動し、キャビティ対向壁に至ると今度は噴霧が集まるように方向を変えて点火栓周りに混合気を作る構成とした⁴⁾。このとき強い空気流動があると、上記の挙動を阻害してしまい、噴霧固有の特徴を引き出しきれない。ピストンに向けて噴射するのは混合気濃度を主に噴射時期によって制御するためであるが、同時にキャビティを利用することで混合気の整形や混合気周囲の過度の希薄化を抑制できると考えたからである。以上のような構成の燃焼系について数値解析やLIF (Laser Induced Fluorescence) 計測などを用いて混合気形成過程を調べた結果、上記の挙動を確認するとともに、Fig. 8に示すように本燃焼系では噴霧の扇面が作り出す渦によって噴霧が丸められるように移動する効果があり、点火時期

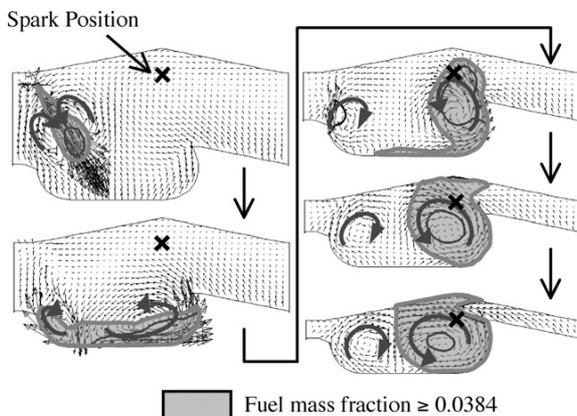


Fig. 8 Gas movement and mixture behavior (Simulated).

にはほぼ回転楕円体の混合気塊が点火栓近傍にできることがわかった。

4. エンジン性能

エンジン性能は排気量500ccの単筒エンジンを用いて調べた。キャビティ形状、噴霧、気流 (スワール) などの影響を調べ、最適な条件を調べた。キャビティは種々の形状を検討した結果、Fig. 9のようなシェル (貝) 型のキャビティが適していることがわかった。図のキャビティはノズルと点火栓を結ぶ軸Aとは非対称になっているが、後に対称にした場合でもほぼ同じ性能が得られることがわかった。ここでは噴霧の影響について述べる。Fig. 10は噴霧角を60°一定として噴射の下向角度 (V) を変えた時の図示燃費率 (ISFC) を図示平均有効圧力 (IMEP: Indicated Mean Effective Pressure) に対して示す。低負荷における燃費率は噴射方向の影響をあまり受けないが、中負荷以上では下向角度を大きくとった方がよい燃費率が得られた。そして、この傾向はエンジン回転数が高いほど大きく現われた。また、高負荷側の成層燃焼可能限界も下向噴射角度を大きくとった方が広がった。

次に噴霧角の影響をFig. 11に示す。噴霧角以外にも、ノズル流量を同じにするためスリット高さを、また、噴霧がキャビティからはみ出さないために下向角度を変更した。エンジン回転数が低い1200rpmにおいては噴霧角による違いはほとんど現われなかったが、2400rpmにおいてはスリットを薄くして噴霧角を大きくとり、下向角度を小さくするよりも、噴霧角を小さくしても下向角度を大きくした方がよい燃費率が得られた。

以上のようなことから噴霧角を60°、噴霧下向角度を48°としてエンジン性能を詳細に調べた。Fig. 12は低速低負荷条件における噴射、点火時期の影響を

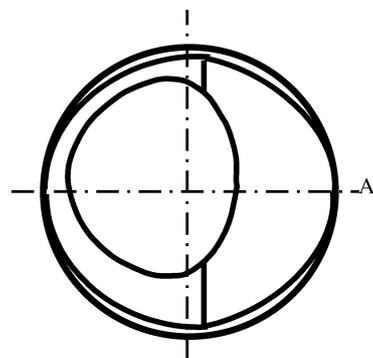


Fig. 9 Shell-shaped piston cavity.

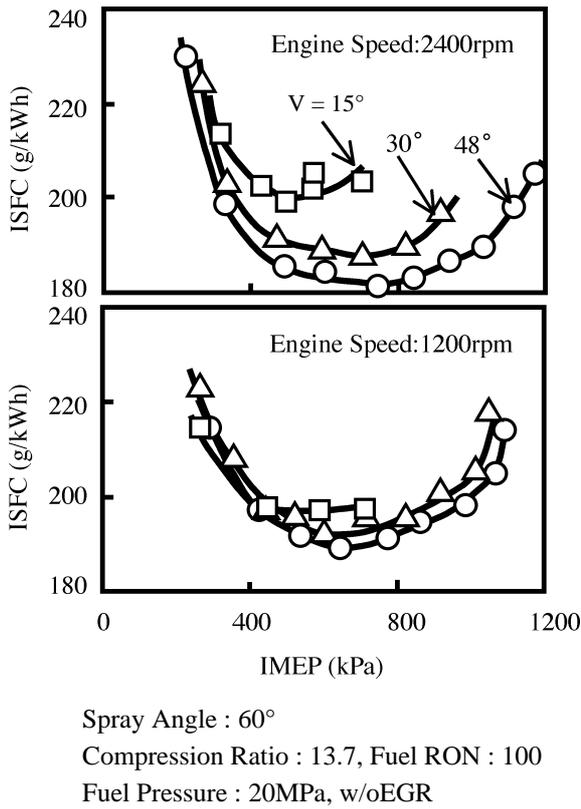


Fig. 10 Injection angle effect on ISFC.

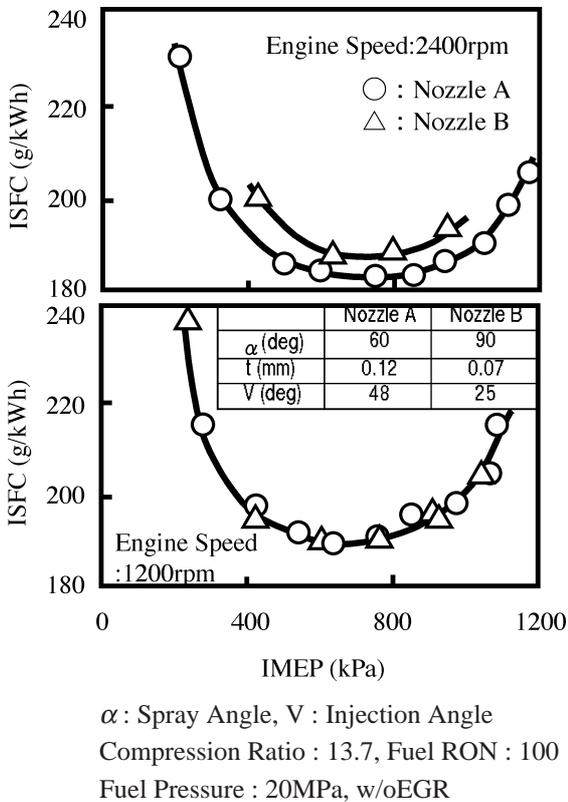
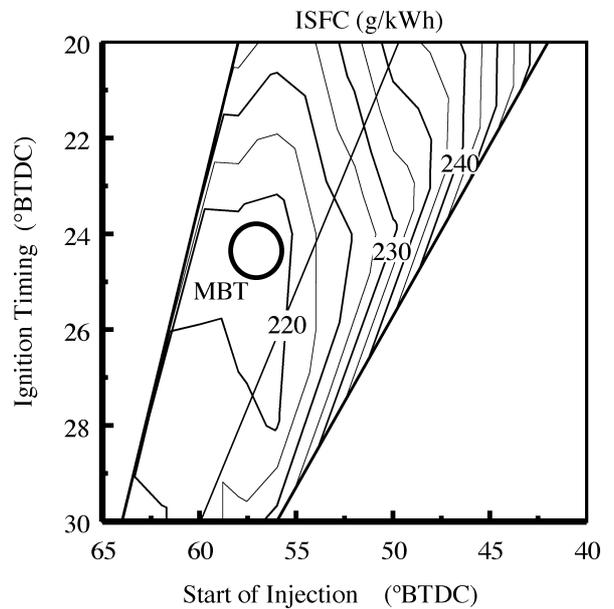


Fig. 11 Spray angle effect on ISFC.

示す。成層燃焼では点火栓周りに可燃混合気があつて安定燃焼できる範囲、いわゆるウィンドウが存在する。この燃焼可能な噴射と点火のウィンドウは主に噴射から点火までのインターバルに起因し、それぞれの点火時期でみると、本燃焼系では噴射開始から点火まで約30~35degCAが適正インターバルであり、MBT (Minimum advance for Best Torque) はウィンドウの中ではインターバルの長い側にある。Fig. 13はウィンドウ内のHC排出量を ISHC (Indicated Specific HC emissions) で表わした図である。未燃HCは点火時期を進角するほど減少する特性を持つ。そのため、Fig. 12中に示したMBTでの燃焼時期はポート噴射エンジンに比べて進角側にある。これは本燃焼系に固有のことではなく、現在のところ直噴ガソリンの低負荷成層燃焼に共通している特徴である。Fig. 14は中速中負荷条件 (成層域内では高速・高負荷) におけるエンジン性能、噴射時期に対する燃費・排気の変化を、従来のスワールノズルと筒内流動 (スワール) を使った燃焼方式と比較して示す。ファンプレー燃焼系のエミッションはスモーク、CO、HC何れも従来法より減少した。スモークとCOの減少は過濃混合気の減少、HCの減少は過薄混合気の減少によると考えられる。また、遅角側噴射ではHCの差は小さいが、従来法では噴射を進角する



Compression Ratio: 11, Fuel RON: 90
 Fuel Pressure: 12MPa,
 w/EGR, ISNOx < 2.5g/kWh

Fig. 12 ISFC map.

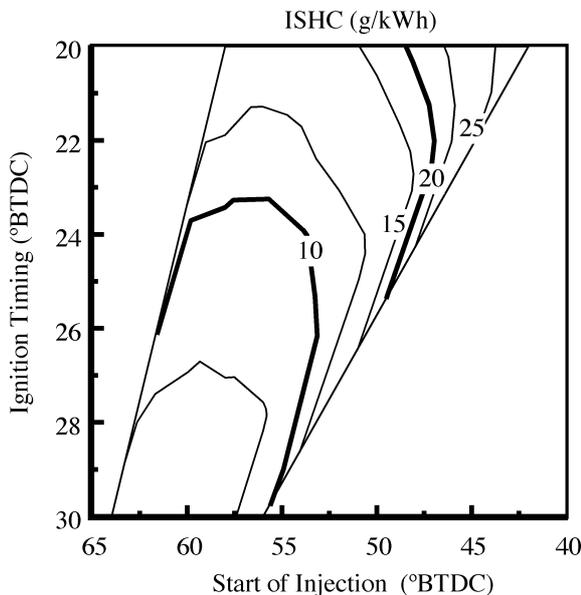
と、HCが増加してしまうのに対して、本燃焼系では逆にHCが減少し、最小HCは従来法の約半分と大幅に改善した。これらの結果から本燃焼系は過薄・過濃混合気を少なくし、成層混合気内をより均質化できる混合気形成法であると推測される。そして、以上の効果により燃費率が改善できることが確認できた。

5. まとめ

偏平で扇形に広がる噴霧（ファンスプレー）と、この噴霧を利用して点火栓周りに適性混合気を形成するシェル（貝）型キャビティを用いた、強い空気流動を用いない直噴ガソリンエンジン用の新しい混合気形成法を考案した。そして、噴霧、混合気形成過程を調べるとともに、単筒エンジンでエンジン性能を測定し、その有効性を確認した。

謝辞

本研究にご協力頂いたトヨタ自動車(株)関係各位に感謝申し上げます。また、本開発にあたっては当社の斎藤昭則氏に多くの助言を得た。さらに、ノズル製作については開発部の、噴霧、LIF計測、数値計算については機械1部、河村清美氏、藤川武敏氏、野村佳洋氏の協力を得た。



Compression Ratio : 11, Fuel RON : 90
Fuel Pressure : 12MPa,
w/EGR, ISNO_x<2.5g/kWh

Fig. 13 HC emissions.

参考文献

- 1) 和栗雄太郎, 藤井勝, ほか2名: 日本機械学会論文集 (第2部), 25-156(1959), 820
- 2) 河村清美, ほか1名: "燃料噴射弁", 特開平03-078562
- 3) 小池誠, ほか2名: "燃料噴射弁", 特開平09-126095
- 4) 小池誠, ほか1名: "火花点火式燃焼方法および火花点火式内燃機関", 特開平09-158736

(2001年9月24原稿受付)

著者紹介



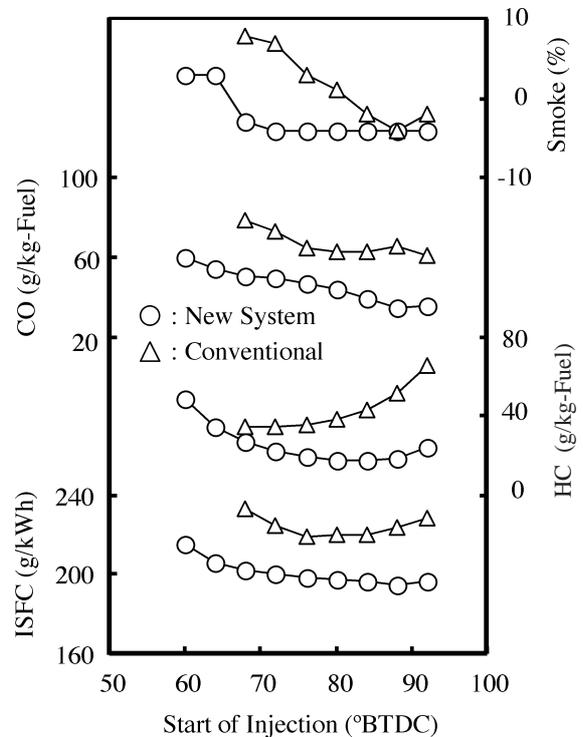
小池誠 Makoto Koike
生年：1957年。
所属：直噴ガソリン研究室。

分野：直噴ガソリンの燃焼改善と性能向上に関する研究，技術開発。
学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。
2000年度日本機械学会技術賞受賞。



鈴置哲典 Tetsunori Suzuoki
生年：1964年。
所属：直噴ガソリン研究室。

分野：直噴ガソリンの燃焼および排気エミッションの研究・開発。



Compression Ratio : 11, Fuel RON : 90
Fuel Pressure : 12MPa, w/oEGR

Fig. 14 ISFC and emissions at medium speed and Load.