

直噴ガソリンエンジン用燃料に関する研究

環境システムコース 環境安全システム工学
96607 谷口 昌司

1. 緒言

近年のエネルギー問題や地球環境問題対応のために自動車エンジンの低燃費化が課題となっている。そのため、高出力と低燃費を両立する直噴ガソリンエンジンが注目を集めており、盛んに研究、報告されている。

直噴ガソリンエンジンは、低負荷時に成層燃焼を行い、ポンピングロスが減らすことにより低燃費を実現しているが、成層燃焼を行うための混合気制御が難しい、成層領域でNO_xエミッションが高いなどの課題もある。そのため、直噴ガソリンエンジンの成層燃焼に適した燃料性状を明確化し、直噴ガソリンエンジン用の燃料を設計する事は大変有用である。しかしながら、直噴ガソリンエンジンに適した燃料を設計するためなどの燃料面から研究された例は数少ない。

橋本らの研究¹⁾により、燃料性状が直噴ガソリンエンジンの出力、排出ガス特性に及ぼす影響が示されている。しかし直噴ガソリンエンジンの出力、排出ガス特性に大きく寄与する成層燃焼時の混合気形成と燃料性状の関連については明らかになっていない。点火時に混合気濃度が均一かつ点火プラグ近傍濃度が可燃範囲であること、混合気と空気の境界がはっきりしていること、サイクルごとのばらつきが小さいことなどは出力を向上させ、排出ガスを改善することにつながる。このため、成層燃焼時の混合気形成状態を把握することは重要である。

混合気形成状態を調べる方法としては、筒内の可視化や超高速応答 FID²⁾を用いた点火プラグ近傍の混合気濃度測定法などがある。筒内の可視化はシリンダーを透明な材料にするなどの大掛かりな改造が必要になるのに対し、超高速応答 FID を用いた方法は、点火プラグにサンプリングチューブを差し込むだけで、簡便かつエンジンの燃焼に及ぼす影響も少ないという特長を有する。

そこで本研究では、超高速応答 FID を用い、点火プラグ近傍の混合気濃度測定実験を行う事により、燃料性状が直噴ガソリンエンジンの混合気形成に及ぼす影響について検討する。また、この混合気の状態が直噴ガソリンエンジンの燃焼、出力、排出ガス特性に及ぼす影響について明らかにする事を目的とする。

2. 研究方針

まず、超高速応答 FID による点火プラグ近傍空燃比測定法を確立させ、燃料噴射時期、点火時期が、直噴ガソリンエンジンの成層燃焼時の混合気形成に及ぼす影響を明らかにする。次に、沸点、化学組成の異なる試料について系統的に実験を行い、燃料性状が成層燃焼時の混合気形成に及ぼす影響について明らかにする。また、理論考察により、実験結果の妥当性を検討し、成層燃焼に適した燃料性状を探索する。

3. 実験

3.1. 実験装置

研究用直噴ガソリンエンジンは、トヨタ D-4 エンジンをリカルド社が単気筒エンジンに改造したものである。点火プラグには、カンパッション社製の超高速応答 FID HFR400 のサンプリングチューブを差し込んだ(図 1)。出力は、パソコンに取り込み燃焼解析ソフト DS-0928 により燃焼解析を行った。堀場製作所の排ガス分析計 MEXA-8320 に

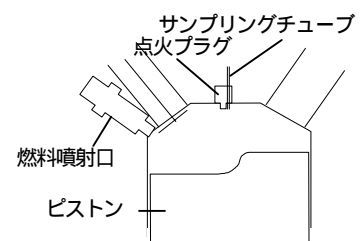


図 1 実験装置図

より、排気ガス中のNO_xおよび未燃炭化水素(THC)濃度を測定した。

3.2. 試料

本実験に用いた試料を、表 1 に示す。パラフィン、オレフィン、エーテル、シクロパラフィン、芳香族から、沸点が 50、100 付近のものを選定し、実験を行った。またベース燃料として、芳香族を含まないアルキレートガソリンを用いた。

表 1 純物質性状

試料	略称	組成	沸点(°C)	密度(g/cm ³)
2,2-ジメチルブタン	DMB	C ₆ H ₁₄	49.7	0.653
2,2,4-トリメチルペンタン	I-octane	C ₈ H ₁₈	99.2	0.698
4-メチル-1-ペンテン	4M1P	C ₆ H ₁₂	53.9	0.668
2,4,4-トリメチル-1-ペンテン	DIB	C ₈ H ₁₆	101.4	0.719
メチル-tert-ブチルエーテル	MTBE	C ₅ H ₁₂ O	55.2	0.740
シクロペンタン	CycloP	C ₅ H ₁₀	49.3	0.759
トルエン	Toluene	C ₇ H ₈	110.6	0.873

3.3. 実験条件

本実験では、回転数は毎分 1200 回転、成層燃焼において、点火時期が上死点基準で-20°、燃料噴射終了時期-50°の時に、空気過剰率 =2 となる燃料噴射期間に固定した。ベース燃料については、点火時期を-14°~-24°、燃料噴射終了時期を-25°~-75°まで変化させ、その他の試料については、点火時期を-20°に固定し、燃料噴射終了時期を変化させた。

4. 結果と考察

4.1. ベース燃料を用いた燃料噴射時期、点火時期が混合気形成に及ぼす影響

それぞれの点火時期、燃料噴射時期における IMEP(図示平均圧力:出力を表すパラメータ)を図 2 に、点火時期-20°の超高速応答 FID の測定結果を図 3 に示す。図 2 より、点火時期-20°の時、最も広い燃料噴射時期(-33°~-70°)で燃焼が起こることが分かった。また、図 3 より、点火時における混合気濃度が理論混合比(空気過剰率 =1)に近い時と、IMEP のピーク位置(-40、-60°付近)が一致していることが分かった。また点火時期-50°の時は、点火時に混合気濃度が高すぎることから、IMEP が減少していると考えられる。これより、超高速応答 FID の結果は、エンジン内の混合気形成状態を良く示しているといえる。

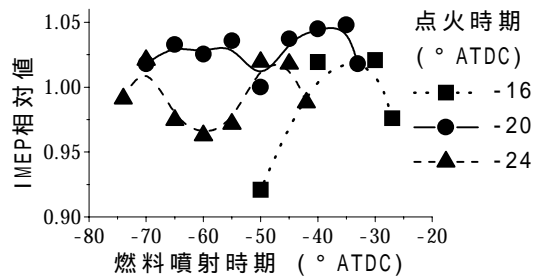


図 2 ベース燃料の IMEP

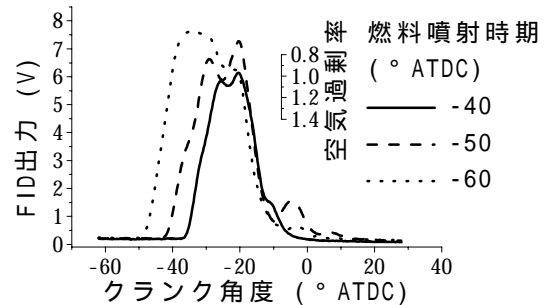


図 3 超高速応答 FID の結果

4.2. 燃料性状が混合気形成に及ぼす影響

4.2.1 超高速応答 FID による混合気濃度解析

図 4a にパラフィン、オレフィンについて、図 4b、4c にはそれぞれ沸点 50、100 付近の試料についての超高速応答 FID の結果を示す。図 4a より沸点の低い DMB、4M1P が沸点の高い I-octane、DIB に比べ点火プラグ近傍の濃度上昇開始時期が早いことがわかる。混合気が点火プラグ近傍に運ばれるのにかかる時間は、燃料噴射の勢い、混合気の空気流動への追従性に大きく影響を受ける。燃料噴射の勢いについては燃料性状による違いは少なく、空気流動への追従性が問題となる。この追従性についても、燃料がすべて気体になった後は燃料性状による違いは少なく、燃料液滴の蒸発速度が大きく寄与すると考えられる。このことから沸点の低い試料の方が、燃料液滴が早く蒸発して空気流動への追従性が上昇するために、混合気が点火プラグ近傍まで早く運ばれたものと考えられる。また図 4b、4c より沸点がほぼ等しい試料について、点火プラグ近傍の濃度上昇開始時期が

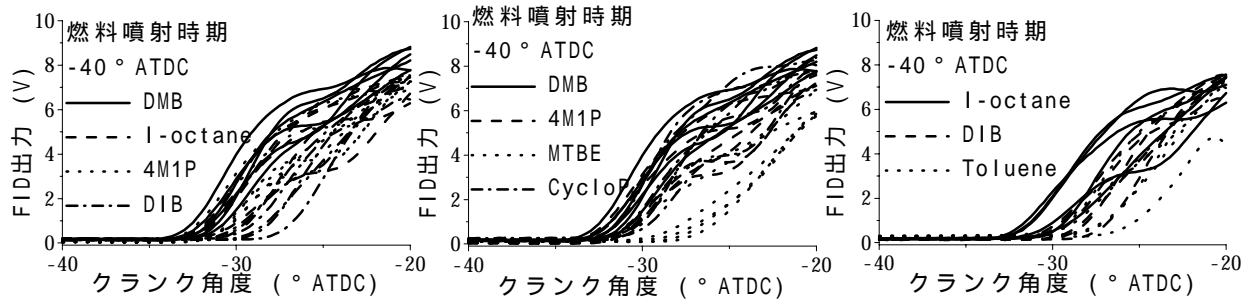


図4a 組成別のFID結果 図4b 沸点50 付近のFID結果 図4c 沸点100 付近のFID結果

早い順に並べるとパラフィン、シクロパラフィン、オレフィン、エーテル、芳香族の順となった。沸点がほぼ等しい試料でも、点火プラグ近傍の濃度上昇開始時期が異なっており、沸点以外の性状が影響を及ぼしていると考えられる。そこで燃料液滴の蒸発する速度に大きく寄与する物性として初期の燃料液滴の粒径に注目した。

初期の燃料液滴の粒径は、燃料の噴射圧力、噴射量が等しいとすると以下の式³⁾が成り立つ。

$$d \propto T/\rho \quad d: \text{粒径}, T: \text{表面張力}, \rho: \text{密度}$$

各試料の T/ρ の値を表2 に示す。沸点50、100 付近のものをそれぞれ T/ρ の小さい順に並べると、 $DMB < MTBE < 4M1P < CycloP$ 、 $I\text{-octane} < DIB < Toluene$ となり、MTBEを除いて点火プラグ近傍の濃度上昇が早い順と一致する。つまり混合気が点火プラグまで運ばれるのにかかる時間は、燃料液滴が気化するのにかかる時間の寄与が大きいことが示唆された。

表2 T/ρ 値

試料	T/ρ (10^{-5}Jm/kg)
DMB	2.194
I-octane	2.461
4M1P	2.254
DIB	2.549
MTBE	2.228
CycloP	2.627
Toluene	3.024

また図5に超高速応答FIDにより測定した点火時の濃度を、図6には点火時の濃度のサイクル変動を示す。それぞれ50 サイクル分について計算した。図5より燃料噴射時期-45° ~ -35° ATDCについて、濃度変化が小さい順に並べると $DMB < CycloP < 4M1P < I\text{-octane} < DIB < Toluene < MTBE$ となった。これは点火プラグ近傍の濃度上昇開始時期が早い順と一致する。濃度変化が小さいことは、早期から混合気濃度が適切であることを意味し、燃料液滴の蒸発が早いと空気との混合が促進され、混合気濃度が比較的均一になっていることが示唆される。図6より-35、-40° ATDCのような遅い燃料噴射時期では、燃料の蒸発が早い試料の方が、サイクル変動が小さい。このこともまた混合気が均一になっていることを示している。

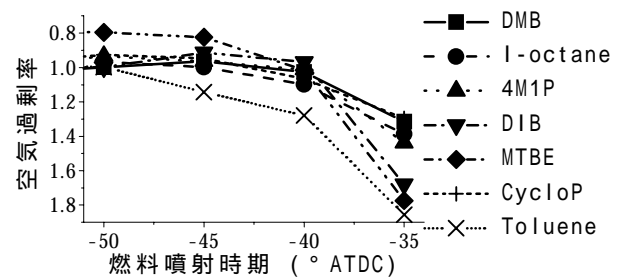


図5 点火時の濃度

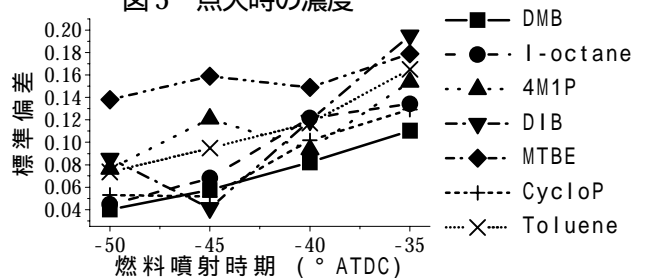


図6 点火時濃度のサイクル変動

以上、超高速応答FIDの結果から、成層燃焼時の混合気形成に適している燃料性状は、燃料液滴の早い蒸発を促す低沸点、低表面張力、高密度であることといえる。

4.2.2 出力

点火時の濃度のサイクル変動は、出力のサイクル変動と関連があると考えられる。そこで出力のサイ

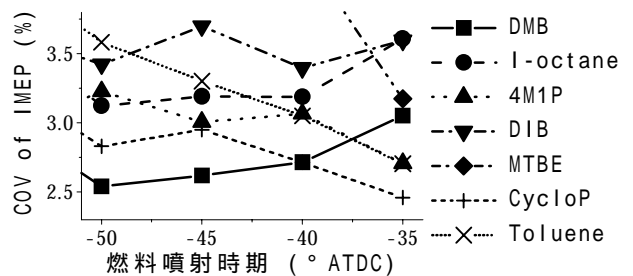


図7 COV of IMEP

クル変動を表す COV of IMEP の結果を図 7 に示す。COV は各サイクルの IMEP の標準偏差を平均の IMEP で割ったものである。図 7 より、COV が低い順に並べると DMB CycloP < 4M1P Toluene < I-octane < DIB < MTBE (燃料噴射時期 -40 ° ATDC) となった。この結果を点火時の濃度のサイクル変動と比較してみると、やはり沸点の低い試料の値がともに小さくなっている。

図 8 に各試料の IMEP を示す。それぞれ IMEP の高い順に並べるとパラフィン=シクロパラフィン > オレフィン > 芳香族 > エーテルとなった。既往の研究¹⁾では、各試料について空気過剰率を一定にして IMEP を比較した。しかし本研究では燃料噴射期間を一定にし実験を行った。このため試料によって濃度は異なり IMEP の大きさを単純に比較することはできない。特に MTBE については濃度が低くなり、IMEP の値が極端に低くなってしまった。

4.2.3 排出ガス

燃焼の状態を確かめるために THC 排出濃度を図 9 に示す。図 9 より沸点の低い試料の方が THC 排出濃度は低くなった。これは沸点の低い試料の方が、混合気が均一であることと壁面に付着する割合が少なくなるためと考えられる。また試料によって燃焼しやすさに違いがあり、Toluene は燃焼しにくいことから、大きな THC 排出を示している。

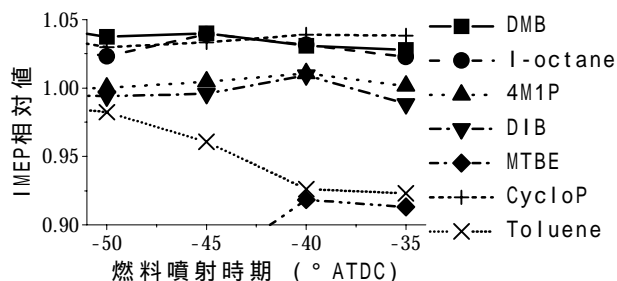


図 8 各試料の IMEP

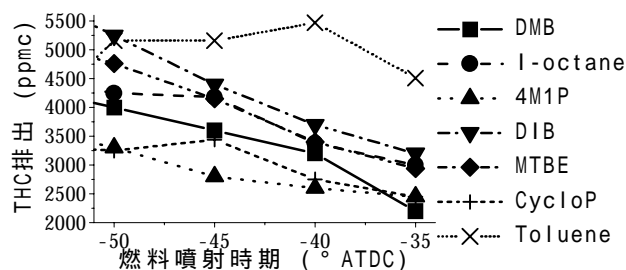


図 9 THC 排出濃度

5. まとめ

本研究は、燃料性状が直噴ガソリンエンジンの成層燃焼に及ぼす影響を把握するため、まずベース燃料を用いた実験により、超高速応答 FID による点火プラグ近傍の混合気濃度測定法を確立し、燃料噴射時期と点火時期が混合気形成に及ぼす影響を明らかにした。次に種々の燃料を用いた超高速応答 FID による混合気濃度解析を行い、低沸点の燃料は液滴の蒸発速度が早く、空気との混合が促進されるために混合気が均一になることがわかった。このことにより点火時の濃度のサイクル変動や IMEP のサイクル変動も小さくなったと考えられる。また燃料液滴の初期粒径の見積もりより、燃料液滴の蒸発速度に寄与する沸点以外の物性として表面張力と密度が混合気形成に寄与することが示唆された。IMEP については、パラフィン、シクロパラフィンが最も高くなり、THC 排出については低沸点の試料が低い値を示した。以上より、直噴ガソリンエンジンに適した燃料は、低沸点、低表面張力、高密度の物質であるといえる。

参考文献

- 1) Kohtaro Hashimoto, Osamu Inaba and Yukio Akasaka, "Effects of Fuel Properties on the Combustion and Emission of Direct-Injection Gasoline Engine", SAE Paper, 2000-01-0253(2000).
- 2) 山下洋幸, 丸原正志, 太田統之, 工藤秀俊, 山本博之, "筒内噴射ガソリンエンジンの混合気形成", 自動車技術会 学術講演会前刷集, 9740316(1997).
- 3) R. C. Reid and T. K. Sherwood, The Properties of Liquids and Gases (McGraw-Hill, New York, 1966).