

報 文 1

ガソリンエンジンのリーン限界へ及ぼす燃料化学種の影響

中央技術研究所
燃料研究所 燃料技術グループ
あおき 剛
青木 剛



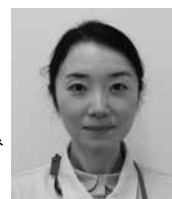
中央技術研究所
燃料研究所 燃料技術グループ
おばた けん
小島 健



中央技術研究所
技術戦略室 エネルギー技術グループ
わたなべ まなぶ
渡邊 学



トヨタ自動車株式会社
よこお のぞみ
横尾 望



トヨタ自動車株式会社
みやもと よしのり
宮元 敬範



トヨタ自動車株式会社
なかた こういち
中田 浩一



1. はじめに

地球温暖化にグローバルに対処するため、2015年12月に催された国連気候変動枠組条約「第21回締約国会議(COP21)」において、温室効果ガス削減に関する国際的な枠組みが合意された(パリ協定)。我が国においては、中期目標として、2013年比26%の温室効果ガス削減目標が定められた¹⁾。

当社の主力製品であるガソリンや軽油は、運輸部門における温室効果ガスであるCO₂の排出に密接にかかわる。国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスが公開している運輸部門におけるCO₂排出量の推移²⁾によると、自動車の燃費改善等によって2001年以降減少傾向にある。しかしながら、運輸部門のCO₂排出量・割合は、依然として高いレベル²⁾であり、一層のCO₂の排出抑制が求められる。

運輸部門のCO₂排出抑制対策の一つに将来的なEV(Electric Vehicle)の導入が検討されている。しかしながら、EVの電源としてどのような1次エネルギーを用いるかによりCO₂排出量が変わるため、Well to WheelでのCO₂排出量を考えていくことが重要である。

また、国際エネルギー機関(IEA)の報告書等³⁾でみられるように、2050年時点でも乗用車においてはハイブリット自動車等を含む内燃機関搭載車の販売台数が過半を占めることが予測されており、内燃機関の熱効率の向上は今後も重要な課題である。

内燃機関の熱効率の向上を燃料と組み合わせる高いレ

ベルで実現することは、低炭素社会実現に貢献するとともに、運輸部門の持続可能性に資すると考えられる。特に本報ではガソリンエンジンの熱効率向上に関する取り組みを紹介する。

ガソリンエンジンの理論サイクルであるオットーサイクルの熱効率 η は、圧縮比 ε と比熱比 κ の関数として、 $\eta = 1 - (1/\varepsilon)^{\kappa-1}$ で記述されることが知られている。つまり、熱効率を向上させるためには、圧縮比・比熱比を上げる必要がある。従来エンジンでは、理論空燃比で燃焼させることが一般的であったが、混合気の希薄化や低温燃焼等による比熱比向上と冷却損失低減を目的とした、超希薄燃焼(スーパーリーンバーン)が注目されている。

内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)⁴⁾では、熱効率50%を目指してスーパーリーンバーンを実現するための研究が進められており、強タンブル流や強力点火装置の導入により燃焼を安定・促進させることで、リーン限界を拡大させる方法が検討されている。

一方、燃焼を安定・促進させるためには、燃料化学種の層流燃焼速度も重要な因子であると考えられるが、エンジンのリーン限界に与える燃料化学種の効果や強タンブル流と組み合わせた際の効果は良くわかっていない。

そこで、本報告では燃料化学種の層流燃焼速度に着目し、リーン限界に与える影響に関して表1に示す諸元のエンジンをを用いて検討した。

表1 エンジン諸元

	Engine A	Engine B
エンジンタイプ	1.8L Inline4	←
ボア, mm	80.5	←
ストローク, mm	88.3	←
圧縮比	13	←
燃料噴射方式	PFI	←
吸気バルブオープン, deg.BTDC	-12 ~ 29	-22 ~ 23
吸気バルブクローズ, deg.ABDC	102 ~ 61	102 ~ 57
排気バルブオープン, deg.BBDC	31	35
排気バルブクローズ, deg.ATDC	-3	9
タンプル比	0.8	2.8

2. エンジン諸元

筒内のタンプル流の影響を確認するため、タンプル比が異なる2種の市販エンジンをを用いた。(表1)

3. 試験燃料

本検討では、燃料化学種の燃焼促進の指標として層流燃焼速度に着目した。層流燃焼速度がリーン限界に及ぼす効果を明確化するため、高オクタン価を維持しつつ層流燃焼速度を高めることを目標として燃料化学種を選定した。図1に、ガソリン等に含まれる主要な炭化水素の層流燃焼速度⁵⁾とオクタン価 RON⁶⁾との関係を示す。

図1に示す物質の中で、アニソール(メトキシベンゼン)、エタノールが高い層流燃焼速度とRONを両立していることが示された。また、フランも層流燃焼速度が高く、RONが高いことが示唆された^{7) 8)}ため選定した。層流燃焼速度が遅い燃料化学種としてトルエン、ETBE、イソオクタンを選定し、計6種の燃料化学種をベースに検討することとした。

さらに、燃焼促進効果の見込まれるニトロメタン、オクタン価向上剤として知られるアニリン、および共役による安定化でオクタン価向上効果が見込まれる共役ジエンを少量混合し、それぞれの効果を検討した。

評価燃料の組成及び性状を表2に示す。表中のRONについては、Fuel 13,14を除き評価燃料をノルマルヘプタンで希釈し計測した値から算出した。Fuel 14のRONは無水エタノールの文献値⁶⁾を示した。

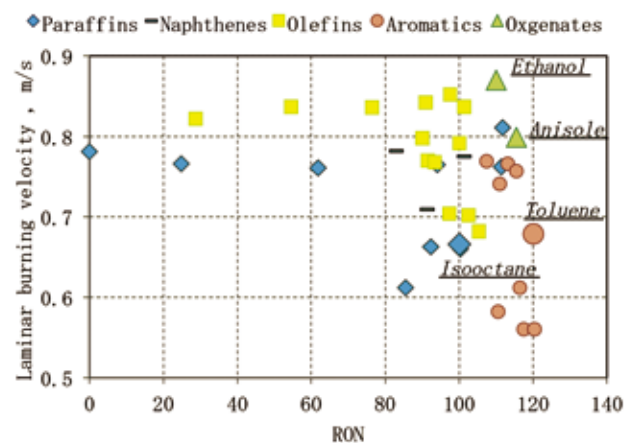


図1 層流燃焼速度⁵⁾とRON⁶⁾

表2 試験燃料性状

Note:		部材影響を考慮し 検討化学種をイソオクタンで希釈					燃焼促進 化学種を混合					オクタン価向上 化学種を混合		Reference	
		Fuel1	Fuel2	Fuel3	Fuel4	Fuel5	Fuel6	Fuel7	Fuel8	Fuel9	Fuel10	Fuel11	Fuel12	Fuel13	Fuel14
isooctane (C ₈ H ₁₈) ^{a)}	vol%	50	50	50	50	50	47.5	47.5	47.5	47.5	47.5	47.5	47.5	100	
toluene (C ₇ H ₈)	vol%	50					47.5								
ethanol (C ₂ H ₅ OH)	vol%		50					47.5							100 ^{b)}
ETBE (C ₈ H ₁₆ OC(CH ₃) ₂) ^{c)}	vol%			50					47.5						
anisole (C ₇ H ₈ O)	vol%				50					47.5					
fruran (C ₄ H ₄ O)	vol%					50					47.5				
nitromethane (CH ₃ NO ₂)	vol%						5	5	5	5	5				
aniline (C ₆ H ₅ NH ₂)	vol%											5			
2,5-dimethyl-2,4-hexadiene (C ₇ H ₁₂)	vol%												5		
Heat value	MJ/kg	41.74	34.52	39.79	37.68	35.14	39.6	33.06	37.5	35.68	33.13	41.11	41.62	44.46	25.05
Density	g/cm ³	0.7833	0.7424	0.7208	0.849	0.8126	0.8004	0.7621	0.7421	0.8624	0.8297	0.7953	0.7827	0.691	0.785
H/C	-	1.61	2.58	2.29	1.61	1.78	1.64	2.60	2.34	1.65	1.82	1.63	1.64	2.25	3.00
O/C	-	0.00	0.20	0.08	0.09	0.14	0.03	0.24	0.12	0.11	0.17	0.00	0.00	0.00	0.50
N/C	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
RON (Blended)	-	112	123	117	115	121	107	121	111	112	115	126	114	100	106

^{a)} 2,2,4-trimethylpentane ^{b)} ethanol 94.8vol%, water 5.2vol% ^{c)} ethyl tert-butyl ether

4. 実験結果

図2にエンジン回転数 2000rpm、正味平均有効圧力 0.4MPa における、各試験燃料のリーン限界と熱効率向上率を示す。ここで、リーン限界は図示平均有効圧力の変動率が 3% となる空気過剰率 λ とした。熱効率向上率は、各試験燃料のリーン限界における熱効率を、各エンジンの $\lambda=1$ における Fuel 13 (イソオクタン) の熱効率で除して算出した。

Fuel 1~5 を比較すると、イソオクタン、トルエン、エタノール、ETBE、アニソール、フランのうち、フランが最もリーン限界を拡大させる効果が高いことが分かった。また、Fuel 1~5 と Fuel 6~10 を比較することにより、燃焼促進化学種であるニトロメタンを混合するとリーン限界が拡大することが示された。一方、Fuel 1, 11, 12 の比較から、オクタン価向上化学種であるアニリン、2,5-ジメチル-2,4-ヘキサジエンはリーン限界拡大に寄与しないことが分かった。

リーン限界の値が最も小さい Fuel 13 と最も大きい Fuel 10 を比較すると、エンジン A においては 0.28 ポイント、エンジン B では 0.27 ポイント、それぞれリーン限界が拡大した。

熱効率向上率については、Fuel 13 が最も低く、Fuel 10 が最も高い値を示しており、概ねリーン限界と対応していることが分かった。Fuel 10 においては、 $\lambda=1$ における Fuel 13 の熱効率から、エンジン A で 10% 程度、エンジン B で 15% 程度向上した。

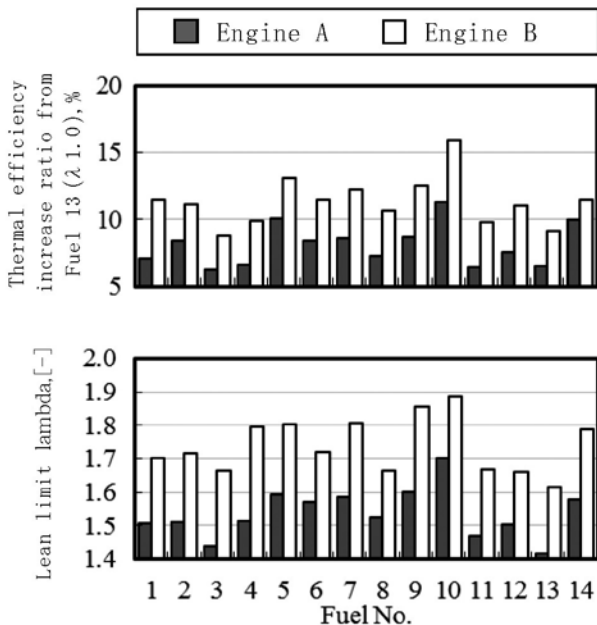


図2 各試験燃料のリーン限界と熱効率向上率

5. 考察

5.1 リーン限界と筒内燃焼速度

リーン限界について、筒内燃焼速度との相関を確認した

結果を図3に示す。筒内燃焼速度は、エンジン筒内における燃焼速度の指標として用いられる⁹⁾、ボア径を点火~燃焼質量割合 90% までの期間で除した速度の次元 [m/sec] を持つ値で代表させた。この値が高いほどエンジン筒内の燃焼速度が大きいことを示している。

エンジン A とエンジン B の結果を比べると、プロットが総じて右上に移動し、同じ試験燃料であっても筒内燃焼速度が向上し、リーン限界が拡大している。これはタンブル流の強化による効果と考えられる。また、どちらのエンジンにおいても各試験燃料の筒内燃焼速度とリーン限界との決定係数が 0.8 を超えており、試験燃料の効果により筒内燃焼速度を向上させることでリーン限界が拡大することが分かった。

試験燃料のリーン限界拡大効果に及ぼすタンブル流の影響を調べるため、図4にエンジン A とエンジン B における各試験燃料のリーン限界の相関関係を整理し、図中に線形近似直線式を示した。

線形近似直線式の切片に着目すると、0 より大きな値であった。これは、エンジン B の方がタンブル流が強く、筒内燃焼速度が大きいことを示している。次に、線形近似直線式の傾きの値がほぼ 1 であったことから考えると、今回試験したタンブル流の範囲においては、ほぼ独立して試験燃料の筒内燃焼速度の向上がリーン限界を拡大することが分かった。

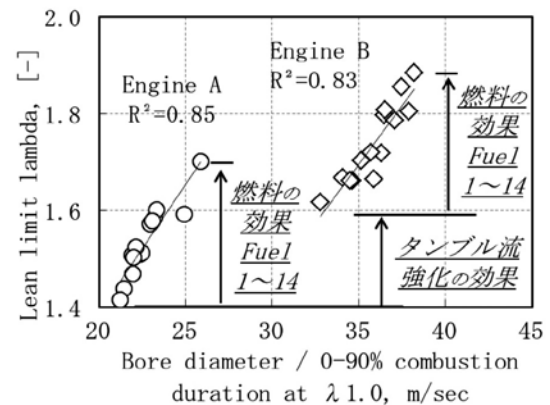


図3 筒内燃焼速度とリーン限界の関係

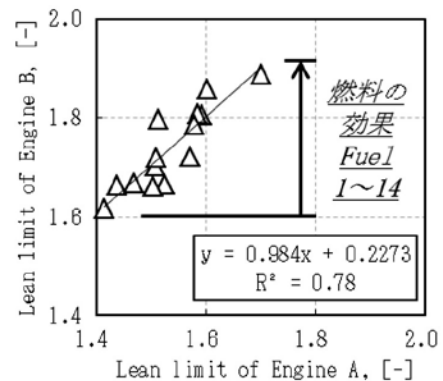


図4 試験燃料がリーン限界拡大効果に及ぼすタンブル流の影響

5. 2 層流燃焼速度 (計算値) との比較

図 5 に、リーン限界と層流燃焼速度との関係について示す。ここで、層流燃焼速度は燃焼解析ソフト「CHEMKIN-PRO」を用いた計算値である。反応機構には SIP「ガソリンサロゲート詳細反応機構 ver1.0」¹⁰⁾を用いた。また、反応条件はリーン限界における点火時の筒内雰囲気をも模擬した【 $\phi=0.6$ 、 $T=650\text{K}$ 、 $P=700\text{kPa}$ 】にて計算を行った。

リーン限界は層流燃焼速度と良い相関にあることが分かった。つまり、高い層流燃焼速度を示す燃料化学種を探索するとともに、その反応機構を解明していくことで、リーンバーンエンジンに適した燃料を設計できると考えられる。なお、今回は詳細反応機構が判明している燃料化学種について検討を行ったが、今後は他の燃料化学種についても検討を進め、キーとなる分子構造や反応機構を探索する予定である。

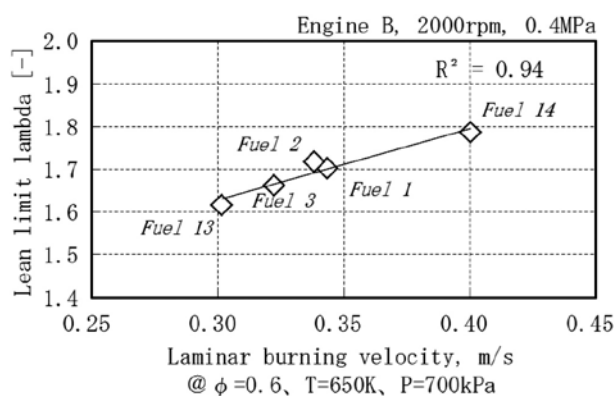


図 5 層流燃焼速度とリーン限界の関係

6. まとめ

エンジン技術と燃料技術の組み合わせによる燃焼促進を目的とし、リーン限界に対し燃料化学種が与える影響について、以下の知見を得た。

- ・ タンブル比の異なる 2 つのエンジンを用い、それぞれのエンジンで燃料化学種の変更により、筒内燃焼速度を向上させたところ、リーン限界と筒内燃焼速度は良く相関した。また、リーン限界の向上幅は同等であった。
- ・ 従って、タンブル強化によるリーン限界拡大効果と燃料化学種の変更によるリーン限界拡大効果は独立していることが示唆された。
- ・ 燃料化学種の変更により、イソオクタン対比でリーン限界が最大 0.28 ポイント拡大し、これに従い、熱効率はイソオクタンの理論空燃比対比で最大 15% 程度向上した。
- ・ 今後、分子構造と燃焼速度、リーン限界の関係について、実験・計算の両面から検討を進めていく。

－ 参考文献 －

- 1) 首相官邸 地球温暖化対策推進本部 日本の約束草案
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai30/yakusoku_souan.pdf
- 2) 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス
<http://www.gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>
- 3) International Energy Agency, Energy Technology Perspectives (2012)
- 4) SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)、革新的燃焼技術 ガソリン燃焼チーム
http://www.jst.go.jp/sip/k01_team1.html
- 5) J. T. Farrell, R. J. Johnston, I. P. Androulakis; Molecular Structure Effects On Laminar Burning Velocities At Elevated Temperature And Pressure, SAE Technical Paper, 2004-01-2936 (2004)
- 6) American Society for Testing Materials; Knocking characteristics of pure hydrocarbons, developed under American Petroleum Institute Research Project 45., Philadelphia (1958)
- 7) G. J. Gibbs, H. F. Calcote; Effect of Molecular Structure on Burning Velocity, J. Chem. Eng. Data 4 (1959) 226-237
- 8) M. A. Eldeeb, B. Akih-Kumgeh; Reactivity Trends in Furan and Alkyl Furan Combustion, Energy Fuels 28 (2014) 6618-6626
- 9) D. Takahashi, Y. Yoshihara, T. Omura, K. Nakata; Combustion Development to Realize High Thermal Efficiency Engines, SAE Technical Paper, 16PFL-0709/SAE 2016-01-0693
- 10) 三好 明・酒井 康行; ガソリンサロゲート詳細反応機構の構築, 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, 2017 年 5 月 24 日～5 月 26 日, 横浜.