

素反応シミュレーションを用いた ガソリンエンジンにおける低回転自着火の解析

Study of Low-engine-speed Self-ignition in Gasoline Engine Using Elementary Process Simulation

中 島 進*
Susumu NAKAJIMA

要 旨

ガソリンエンジンの低回転における自着火に起因する音(以下、自着火音)の低減は商品性における課題の一つである。低回転自着火音は散発的に発生し、サイクルごとのトルク変動が大きくエンジンの振動も大きい。従って、音の発生と同期させての計測が困難であり、また現象の再現も難しいため、解析は進んでいなかった。本報では、素反応シミュレーションが自着火音を発生させる燃焼を良く模擬できることを確認し、それを用いて、自着火発生時の素反応レベルにおける現象の確認と、条件変化による自着火特性の変化の確認および改善手法の検討をおこなった。確認した条件変化は混合気温度、圧縮比、空気過剰率、EGR、残留ガス、オクタン価である。また、それらの結果から再始動時の自着火の対策として、リーン化での燃料密度の低下による自着火抑制が効果的であることを確認した。また、残留ガスの低減は混合気の温度を低下させ、自着火を抑制できることがわかった。さらに、本シミュレーションの活用法として、販売地域により、オクタン価、外気温度等が変わる際の自着火特性を予測し、適切な仕様設定が机上でおこなえることを示した。

ABSTRACT

The mitigation of noise originating in self-ignition in gasoline engines at low speed ("self-ignition noise" below) is an issue in realizing increased commercial appeal. Low-speed self-ignition noise occurs sporadically, producing significant torque fluctuation and engine vibration in each cycle. Synchronizing measurements with the occurrence of the noise and reproducing the phenomenon has therefore represented a challenge, and progress has not been made in its analysis. The research discussed in this paper verified that an elementary process simulation was able to model combustion conditions in which self-ignition noise occurs with sufficient accuracy. Using this simulation, the research studied phenomena occurring at the level of elementary processes when self-ignition occurs, changes in self-ignition characteristics with changes in conditions, and methods of ameliorating self-ignition. The conditions varied in the simulations were air-fuel mixture temperature, compression ratio, excess air ratio, EGR, residual gas and octane number. The results of these studies showed that reducing fuel density by increasing leanness is an effective means of controlling self-ignition when the engine is restarted. In addition, it was shown that it is possible to control self-ignition by reducing the temperature of the air-fuel mixture through reduction of the ratio of residual gas. Further, the simulation can be utilized to predict self-ignition characteristics produced by changes in factors such as the octane number of the fuel and the temperature of the external air in different regions, and to set appropriate specifications, on the desktop.

1. はじめに

近年、地球温暖化防止等の観点から、より一層の内燃機関の高効率化が求められている。ガソリンエンジンの高効率化の手法としては圧縮比の増加、冷却水温度の高温化、過給ダウンサイジング化等が挙げられる。これらの技術は燃焼室の圧力と温度の上昇を伴うため、高吸気温時等にノッキングやプレイグニッションなどの異常燃焼の発生の可能性が高まる。異常燃焼は Fig. 1 に示すように、ノッキ

ング、低回転自着火、Low-speed pre-ignition、暴走型プレイグニッションに分類される。これまで、低回転自着火はサイクルごとのトルク変動が大きく、エンジンの激しい振動を伴うため、現象を安定して計測することが困難で、解析が進んでいなかった。これまでの研究では^{(1), (2)}条件の変化と自着火の発生時期に関する考察がおこなわれているが、自着火音が発生する条件には言及していない。また、素反応シミュレーションを低回転自着火の解析に用いた論文は少ない。中島らのガソリンエンジンにおけるアイドル

*四輪 R&D センター

回転近傍での自着火に関する研究⁽³⁾により、低回転自着火音の発生メカニズムが解明された。Fig. 2に低回転自着火音が発生する必要十分条件の燃焼を示す。エンジン回転数は750 rpm、吸気圧力は大気圧である。横軸はクランク角度で、縦軸は質量燃焼割合 (MBF) と $dP/d\theta$ 、筒内圧である。クランク角度 0 deg、すなわち TDC 近辺で低温酸化反応が開始し、ATDC37 deg で残りの約 60% の混合気が自着火し、ATDC40 deg 近辺の $dP/d\theta$ が最大となる角度でピストンがスリーブに接触して自着火音を生じる。本報ではそのメカニズムを基に、素反応シミュレーションにより低回転自着火音が発生する燃焼を模擬し、自着火発生メカニズムを確認し、対策の方向性を決定する。

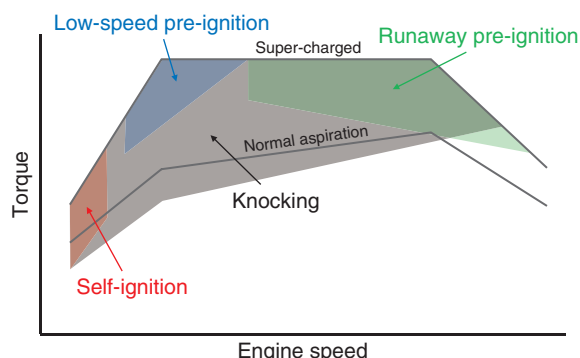


Fig. 1 Classification of abnormal combustion

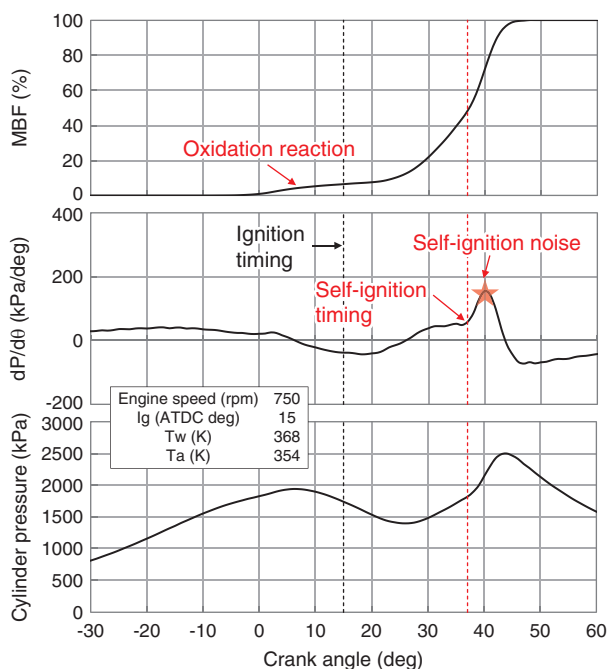


Fig. 2 Combustion generating self-ignition noise

2. 低回転自着火のシミュレーションモデル

2.1. 素反応シミュレーションの適用

計測が困難な低回転自着火はシミュレーションに置き換えて各種検討をおこなうことが望ましい。詳細に実機試験以

Table 1 Fuel specifications (RON91)

n-Heptane	0.1823
iso-Octane	0.6642
Toluene	0.1535

Table 2 Engine specifications

Fuel		Gasoline
Cylinder configuration		In-line 4-cylinder
Displacement (cm³)		1799
Bore (mm)		81.0
Stroke (mm)		87.3
Compression ratio		10.5
Crank offset (mm)		12.0
Valve diameter (mm)	In.	32
	Ex.	26

上の情報が得られるシミュレーションとして、素反応シミュレーションが挙げられる。しかし、素反応シミュレーションは0次元シミュレーションであるため、火花点火による火炎伝播を再現することはできない。素反応シミュレーションの適用が難しい例としては、火花点火により燃焼した大部分の混合気の圧力により一部分のエンドガスが自着火するノッキングがある。しかし、自着火音が発生させる燃焼は遅角時に大きな割合の燃料が自着火するため、その時点で燃焼した混合気の割合は少なく、火花点火による燃焼の圧力等の影響は限定的であると考えられる。従って、素反応シミュレーションにより実機試験の模擬が可能であると考えられる。

2.2. 素反応シミュレーションの仕様

低回転自着火を、Homogeneous-Charge Compression Ignition (HCCI) のシミュレーションなどに使用される素反応シミュレーションを適用して検証した。以下にシミュレーションの仕様を示す。

(1) 素反応シミュレーション

CHEMKIN-PRO (Ver.2010/06/28)

(2) Model: Ignition Combustion (IC) Engine

2.3. サロゲート燃料

ガソリンは n-Heptane, iso-Octane, Toluene の3成分の割合の変更で性状を模擬可能とされている (サロゲート燃料)^{(4), (5)}。割合は計測結果から実機試験で使用した燃料に最も近いものとした。Table 1 に割合を示す。

2.4. エンジンの仕様

Table 2 に実機試験およびシミュレーションをおこなったエンジンの仕様を示す。

2.5. 素反応シミュレーションと実機試験の比較

Fig. 3 に実機試験と、パラメータを調整した素反応シミュレーションの結果を示す。条件は750 rpm、吸気圧力は

低い温度である。素反応シミュレーションも、吸気温度は自着火が生じる最も低い温度である。横軸はクランク角度で、縦軸はMBFと $dP/d\theta$ 、筒内圧である。実機試験は質量燃焼割合から判断して、TDC近辺から低温酸化反応が生じており、素反応シミュレーションもそれを再現している。実機試験はATDC37 degまで燃焼が進行した後に、残りの約60%の燃料が自着火してATDC40 deg近辺で $dP/d\theta$ が最大となり、自着火音を発生すると考えられるが、素反応シミュレーションもATDC40 deg近辺で熱炎の発生に至る。従って、自着火が発生する最も低い吸気温度の場合は実機試験、素反応シミュレーションともほぼ等しいクランク角度において低温酸化反応を開始する。また、やはりほぼ等しいクランク角度にて、実機試験は自着火を発生し $dP/d\theta$ の最大値となり、素反応シミュレーションは熱炎の発生角度を実機試験の $dP/d\theta$ の最大値、すなわち自着火音発生角度と考えれば、火花点火による火炎伝播が模擬できなくても、素反応シミュレーションは実機試験をかなり良く再現できていると考えられる。

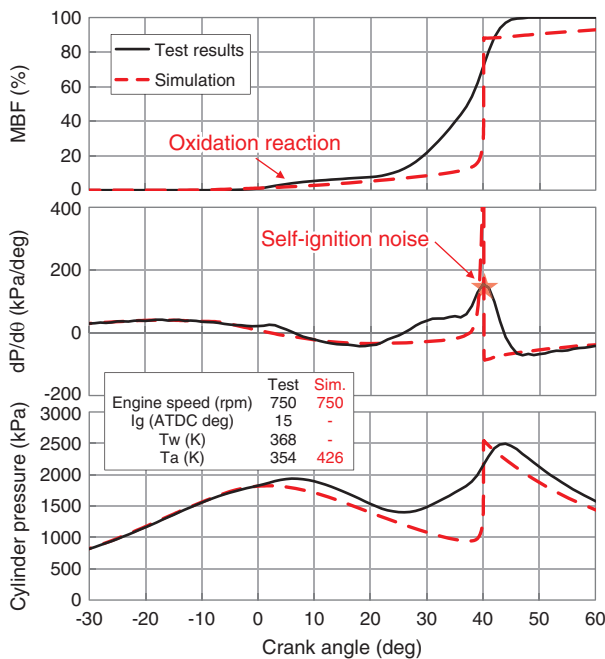


Fig. 3 Results of elementary process simulation

3. 実機試験との相関性の確認

3.1. 吸気温度の影響

低回転自着火音を発生させる燃焼を模擬できるように設定した素反応シミュレーションと実機試験との相関性をパラメータを変化させて確認する。Fig. 4に吸気温度を変更した場合のシミュレーション結果を示す。横軸はTDCを0 degとしたクランク角度で、縦軸はサロゲート燃料の3成分および酸素のモル濃度と混合気温度と圧力

である。圧縮行程が進行して温度および圧力が上昇するとn-Heptane, iso-Octaneが酸化され、酸素が減少する。この段階では酸化されにくいTolueneはほとんど酸化されない。さらに酸化反応が進行すると、燃料および酸素が急速に減少して温度および圧力が急増する。この角度を自着火が発生した角度であると定義する。吸気温度が低いと酸化反応に時間を要するため、自着火発生回転数が低くなる。Fig. 5に、吸気温度を変化させ、素反応シミュレーションおよび実機試験における自着火が発生するエンジン回転数の比較を示す。実機試験と素反応シミュレーションがよく一致することが確認できる。

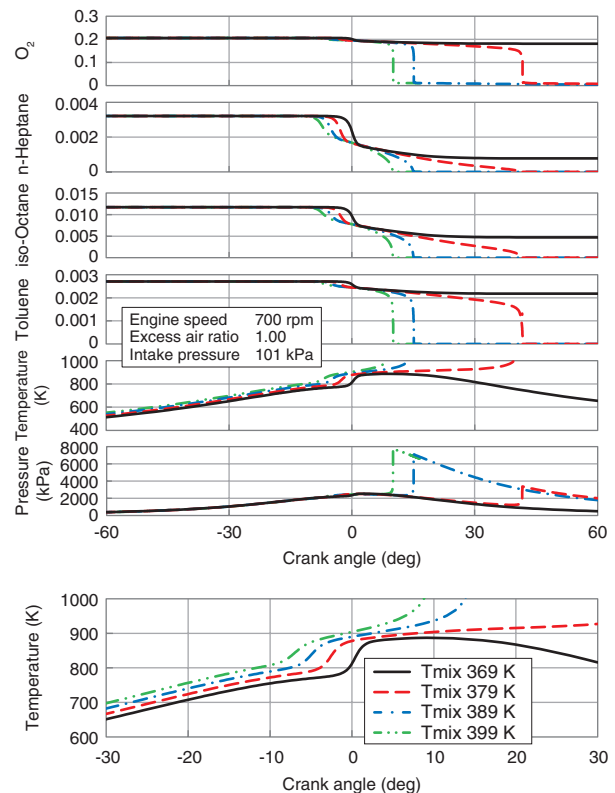


Fig. 4 Results of elementary process simulation

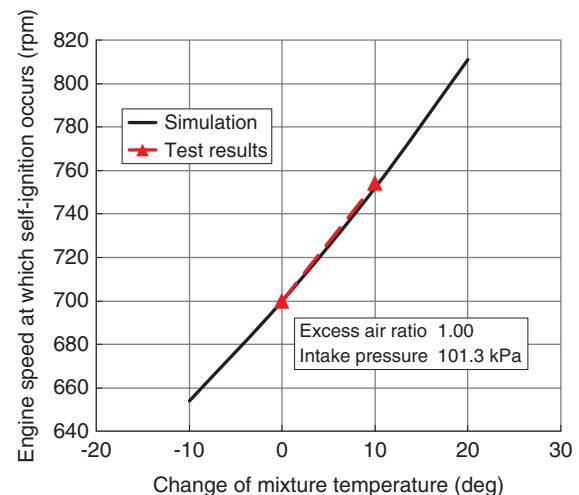


Fig. 5 Relationship between mixture temperature and self-ignition

3.2. 圧縮比の影響

圧縮比は圧力を変化させるため、自着火発生に大きな影響を与える。Fig. 6 に圧縮比を 9.5 から 12.5 まで変化したシミュレーション結果を示す。圧縮比が高いほど酸化反応の開始時期が早まり、自着火発生時期も早まることが確認できる。Fig. 7 に圧縮比と自着火発生回転数の関係を示す。吸気温度の変化と同じく、圧縮比の変化においても実機試験結果と素反応シミュレーションの結果はほぼ一致することが確認できる。素反応における重要なパラメーターである温度と圧力を変化させて、実機試験結果を再現可能

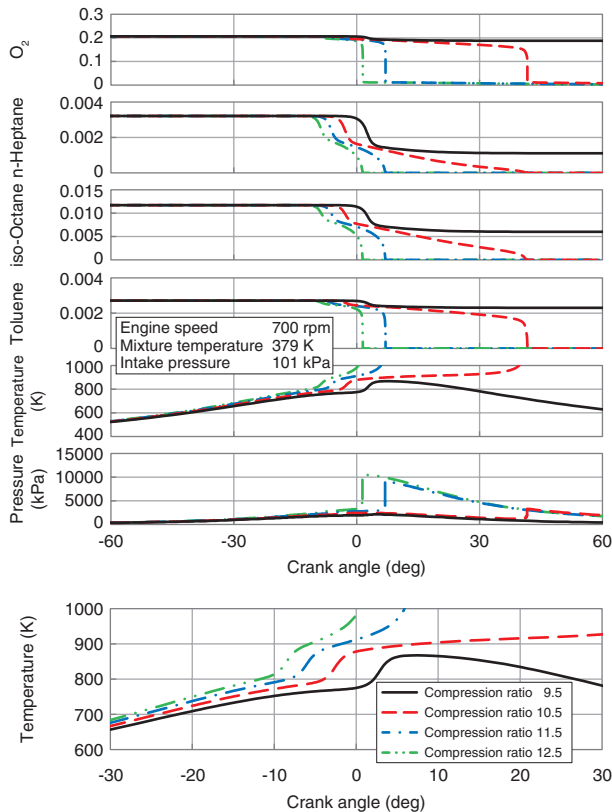


Fig. 6 Elementary process simulation of compression ratio change

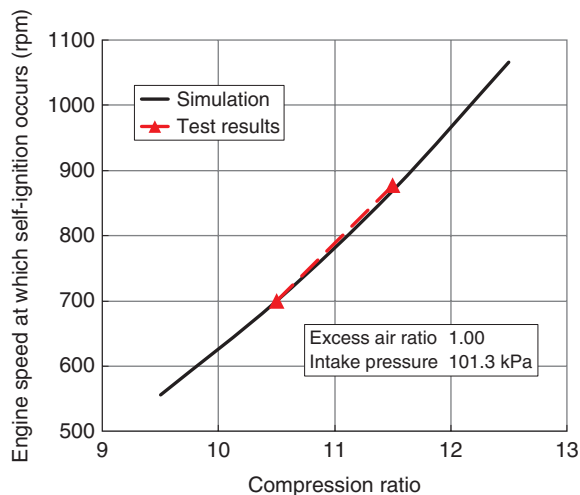


Fig. 7 Relationship between compression ratio and self-ignition

なこの素反応シミュレーションモデルを用いて、運転条件の変化が自着火に与える影響、自着火の改善手法の検討をおこなう。

4. 低回転自着火の発生メカニズム

4.1. 空気過剰率の影響

空気過剰率は自着火特性に大きな影響を与える。実機試験でも限定された条件ではリッチまたはリーン化が効果があることは確認されているが、実験の困難さから、メカニズムの解明はなされていない。実機試験による空気過剰率と自着火が発生する吸気圧力およびその条件で発生するトルクの関係を Fig. 8 に示す。リッチ化、リーン化共に理論空燃比よりも自着火が発生する吸気圧力は大きくなるが、同一吸気量での発生トルクはリッチ化の方が大きいため、リッチの方が発生するトルクは大きい。リッチ側の自着火特性が改善する理由は気化潜熱による冷却効果が大いと考えられるが、リーン側の低下の詳細な原因はわからない。そこで素反応シミュレーションにより詳細な解析をおこなう。Fig. 9 に空気過剰率を理論空燃比、 $\lambda = 1.20$ 、 $\lambda = 0.83$ と変化した場合のシミュレーション結果を示す。気化潜熱、残留ガス成分の変化等は考慮しない。また、TDC 前後の混合気温度を Table 3 に示す。

(1) 圧縮時の温度

炭化水素は多原子分子であるため、比熱比が低い。従って、比熱比は燃料の割合が少ない $\lambda = 1.20$ が大きいため、圧縮時の温度も高い。

(2) 酸化反応開始後の温度

酸化反応が始まると、燃料の割合が多い $\lambda = 0.83$ の温度上昇が大きく、 $\lambda = 1.20$ を逆転する。

自着火しやすいのはこの場合はリッチである $\lambda = 0.83$ である。Fig. 10 に空燃比を変化させた場合の自着火発生回転数の変化を示す。同一吸気圧力で空気過剰率を変化させた

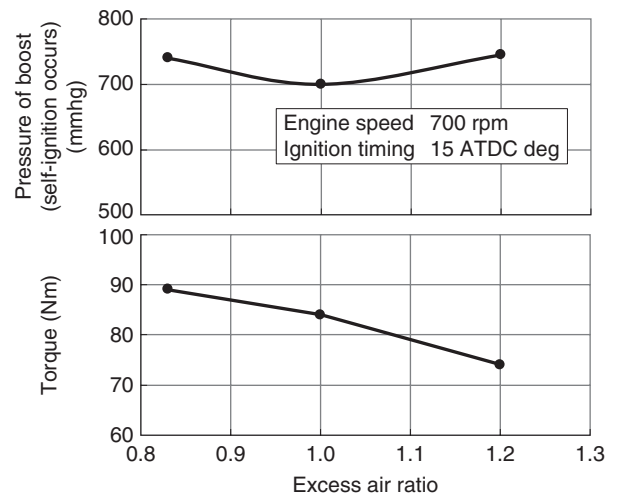


Fig. 8 Relationship between excess air ratio and pressure boost of self-ignition

Table 3 Comparison of cylinder temperature

Excess air ratio		0.83	1.00	1.20
Mixture temperature (K)	BTDC 10 deg	753	772	788
	ATDC 10 deg	1000	905	880

場合を黒線で、同一トルクで空気過剰率を変化させた場合を赤線で示す。与えた条件は Table 4 に示す。同一吸気圧力の場合はリーン化が自着火抑制に有効であるが、同一トルクの場合はリーン化すると自着火は発生しやすくなる。これは、リーン化による酸化反応の抑制効果より、圧力増加による酸化反応の促進が勝るためであると考えられる。

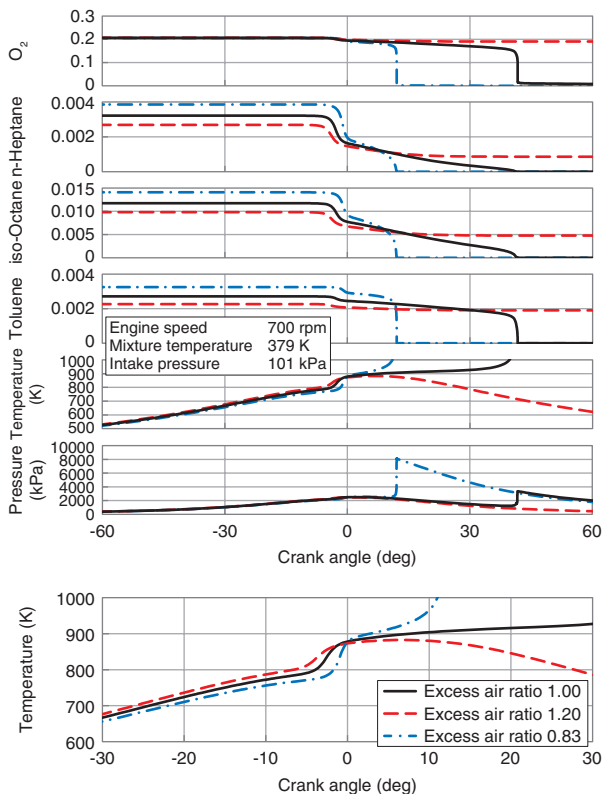


Fig. 9 Simulation results of change in excess air ratio

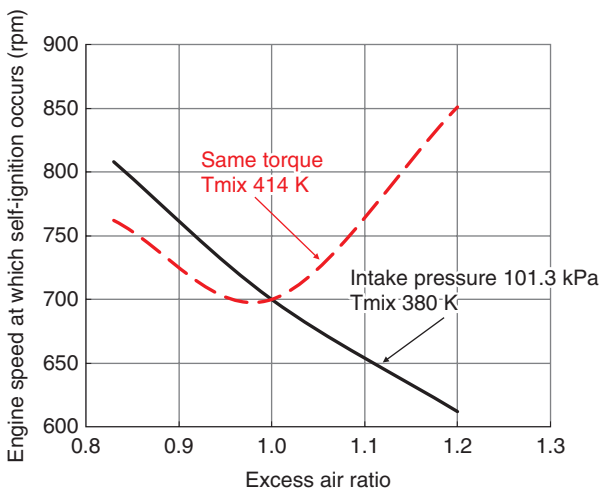


Fig. 10 Relationship between excess air ratio and self-ignition

Table 4 Conditions of simulation

Excess air ratio		0.83	1.00	1.20
Same intake pressure	Intake pressure	101	101	101
	(kPa)	84.4	84.4	101

Table 5 Comparison of cylinder temperatures

Excess air ratio		1.00	1.00	1.20
EGR ratio		0.0	0.167	0.0
Mixture temperature (K)	BTDC 10 deg	772	778	788
	ATDC 10 deg	905	853	880

また、気化潜熱による冷却効果を考慮しないシミュレーションの結果ではリッチ化も自着火が発生しやすくなったが、これは燃料の割合が大きく、酸化反応による温度の上昇が大きいためと考えられる。

4.2. EGR の影響

空気過剰率による対策は一時的であればよいが、常時用いるとエミッションの増加を招く。そこで、代替手法として EGR による抑制を検討する。燃料の希釈という点では同等の効果があることに加え、EGR は 3 原子分子である CO_2 、 H_2O が多く比熱比が小さい点でより有利であると考えられる。素反応シミュレーション結果を Fig. 11 に示す。EGR の温度は混合気と同じとする。Table 5 に燃料の希釈をリーン化および EGR にておこなった場合の TDC 近辺の混合気温度を示す。リーン化よりも EGR の方が圧縮時の温度が下が

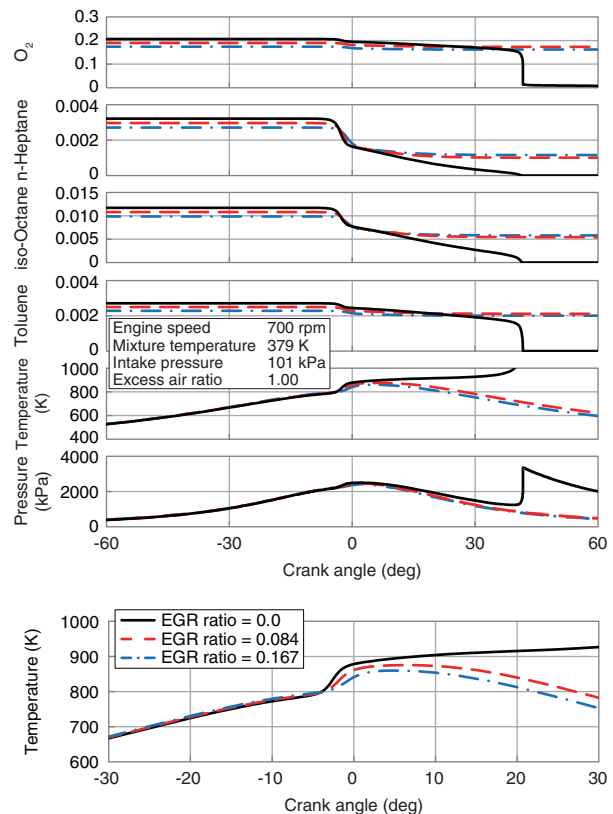


Fig. 11 Simulation results of EGR

Table 6 Conditions of simulation

EGR ratio		0	0.1	0.2
Same intake pressure	Intake pressure	101	101	101
Same torque	(kPa)	81.1	90.1	101

Table 7 Fuel specifications

RON	87	91	95	100
n-Heptane	0.2247	0.1823	0.1602	0.1256
iso-Octane	0.6215	0.6642	0.5781	0.5183
Toluene	0.1538	0.1535	0.2617	0.3561
C/H ratio (weight)	5.6717	5.6724	5.9951	6.3145

る。Fig. 12 に EGR 率と自着火発生回転数の関係を示す。同一吸気圧力で EGR 率を変化させた場合を黒線で、同一トルクで EGR 率を変化させた場合を赤線で示す。シミュレーションの条件は Table 6 に示す。同一トルクの場合は EGR 還流による改善効果はわずかである。この理由は EGR の割合に相当する分だけ吸気圧力が上昇して、酸化反応が促進されて効果が相殺されたためであると考えられる。

4.3. オクタン価の影響

混合気の自着火現象は燃料の化学構造の影響を受けやすいことが知られている^{(6), (7)}。従って、オクタン価は燃料の自着火特性の指標になると考えられる。サロゲート燃料でオクタン価を変更する場合は、オクタン価を合わせるだけでなく、C/H 比も合わせる必要がある。Table 7 に RON とサロゲート燃料の成分割合を示す。この燃料の差を確認するシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。オクタン価と自着火特性は密接な関係があり、それは主として低温酸化反応中ではほとんど酸化されない Toluene の割合の差によることがわかる。また、RON と自着火発生回転数の関係を Fig. 14 に示す。RON はノッキングと同様に燃料の自着火のしやすさの指標にもなることが確認された。

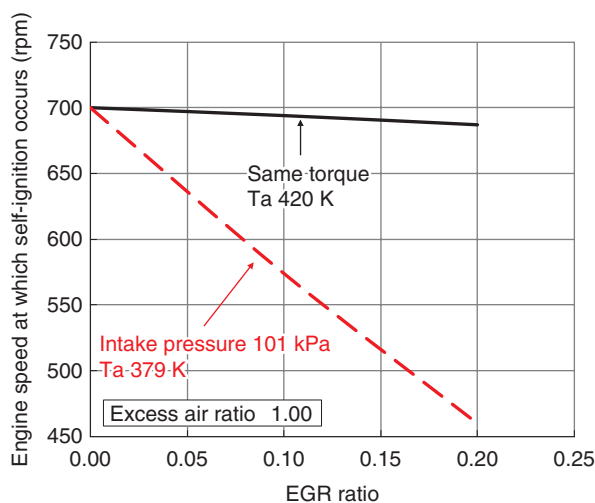


Fig. 12 Relationship between EGR ratio and self-ignition

Fig. 4, Fig. 6, Fig. 9, Fig. 11, Fig. 13 より、どのパラメータを変化させた場合でも、混合気温度が 900 K を超えると膨張行程においても酸化反応が進行して、950 K を超えると急速に熱炎の発生に至ることがわかる。

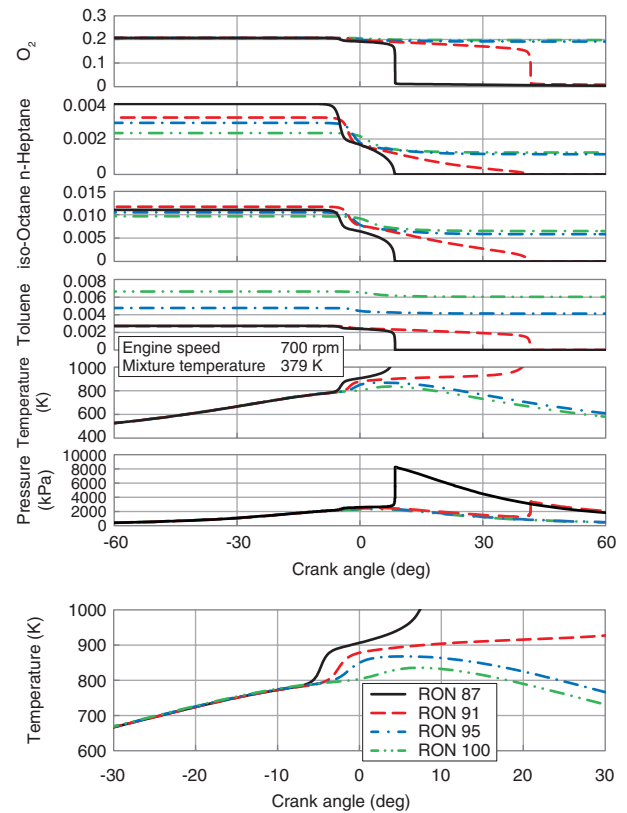


Fig. 13 Simulation of octane number

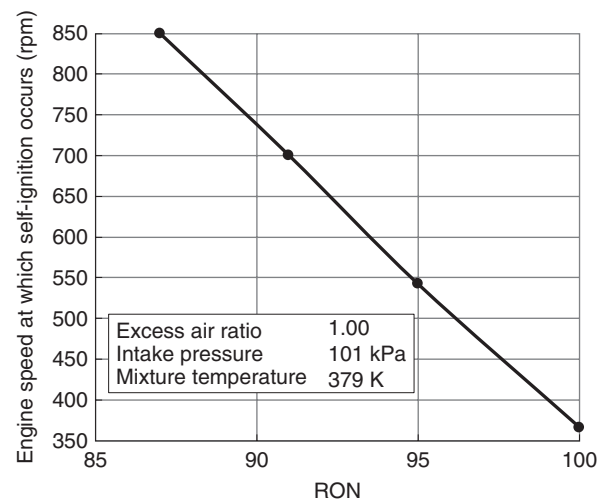


Fig. 14 Relationship between RON and self-ignition

5. 低回転自着火の対策

5.1. 残留ガスの低減

混合気温度と同等まで冷却された場合でも、EGR は自着火に対して効果が少なかった。従って、混合気の温度上昇の原因となる残留ガスは悪影響が大きいと考えられる。

Fig. 15 のようにバルブのオーバーラップを減らしたカムプロフィールにて実機試験をおこなった。吸気温度と自着火またはノックが発生する直前の点火時期とその条件で発生するトルクの関係を図. 16 に示す。全温度域で自着火特性が改善しており、トルク換算で最大 8% の改善が見られる。この実験結果を詳細に解析するために、残留ガスと混合気の温度差を全開運転相当の 700 K としてシミュレーションをおこなった。Fig. 17 にシミュレーション結果を示す。残留ガスが増加すると混合気温度が上昇し、酸化反応が早く開始されることがわかる。Fig. 18 に残留ガス割合と自着火発生回転数の関係を示す。残留ガスと混合気温度の差がないと仮定した場合を黒線で、温度差が 700 K であると仮定した場合の結果を赤線で示す。残留ガスの影響は EGR による自着火抑制効果は少なく、混合気の温度上昇による自着火促進の影響が大きいことがわかる。以上より、バルブオーバーラップの縮小による自着火の抑制の要因は、残留ガスの低減による混合気温度の低下である。また、燃料密度の増加による自着火の促進はほとんどないと考えられる。

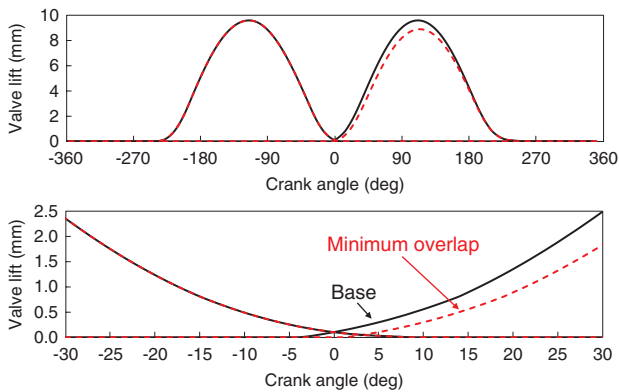


Fig. 15 Profile of reduced overlap cam

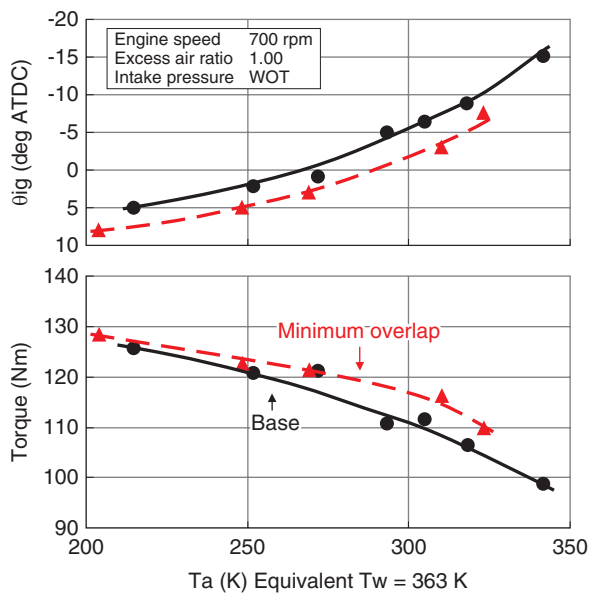


Fig. 16 Effect of residual gas reduction

5.2. 再始動時の自着火抑制

再始動時の自着火は、近年増加しているアイドルストップを採用する機種などには重要な課題である。再始動時の条件は、

- (1) 筒内の温度が高い
- (2) 吸気圧力は大気圧
- (3) フリクションは少ない

従って、自着火を回避するためには回転上昇に大きな影響がない程度のトルク低下ならば許容できる。そこで、同一吸気圧力ならば自着火抑制に効果があった空気過剰率の

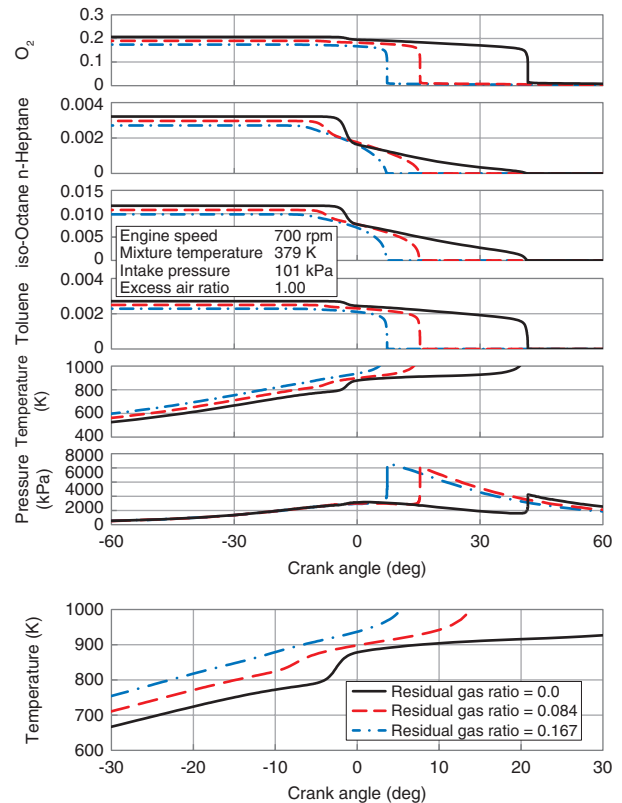


Fig. 17 Simulation of residual gas ratio change

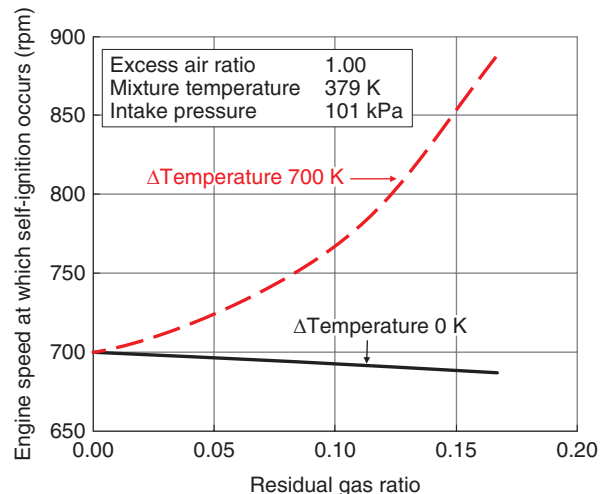


Fig. 18 Relationship between residual gas ratio and self-ignition

リーン化が改善手法として考えられる。シミュレーションの基本条件は充填効率の変化を考慮して、吸気温度を調整して実機試験相当の結果が得られるようにした。Fig. 19に再始動相当の250 rpmとアイドル相当の700 rpmの比較を示す。再始動相当の250 rpmでは、酸化反応開始角度が遅いが、回転数が低く圧縮行程の時間が長いために自着火に至る。自着火する際の温度、圧力は異なるが、サロゲート燃料の3成分の酸化状態はほぼ同じであることが確認できる。Fig. 20に空気過剰比をリーン化させた場合のシミュレーション結果を示す。再始動はエンジン回転数が決

まっているため、本シミュレーションの結果は自着火が生じる混合気温度で示す。再始動時の適度なリーン化は自着火が生じる混合気温度が上昇し、自着火抑制に効果があることがわかる。

5.3. シミュレーション結果の活用による予測

各シミュレーション結果の組み合わせにより、販売地域、使用するガソリンの変更等、条件が変化した場合にどのように自着火特性が変化するか等のシミュレーションが可能である。一例として、圧縮比の影響とRONの影響のシミュレーション結果を組み合わせると、Fig. 21に示すように、RONを変化させた場合にRON91、圧縮比10.5と同等の自着火特性となる圧縮比が推定できる。これは一例であり、販売地域の変更等により、使用状況が変化した場合に仕様変更の机上検討等をおこなう上で有用である。

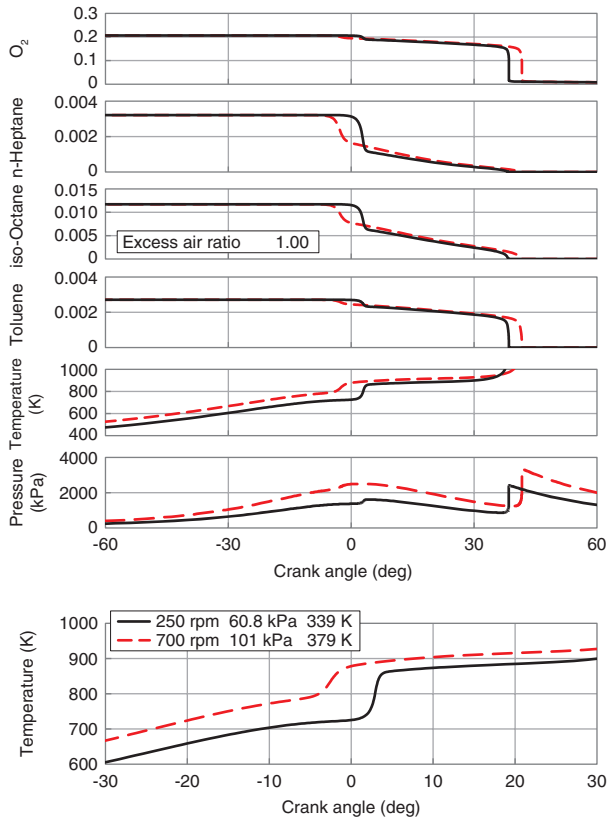


Fig. 19 Simulation at engine restart

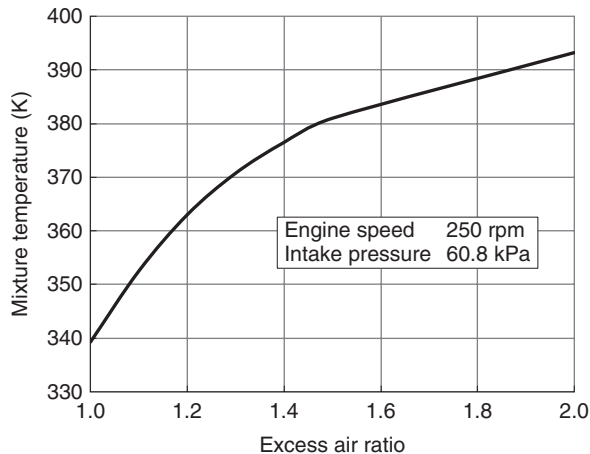


Fig. 20 Relationship between excess air ratio and self-ignition

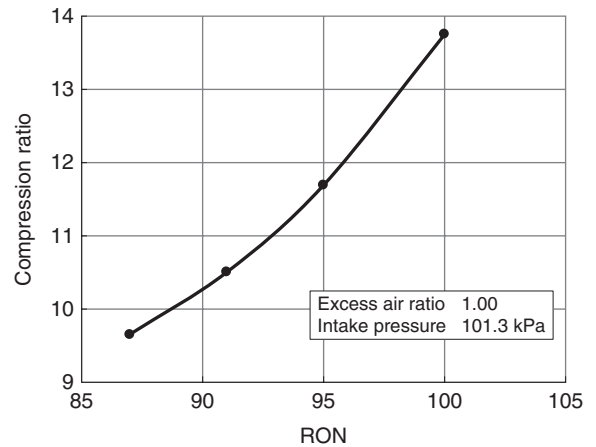


Fig. 21 Simulation of relationship between RON and compression ratio

6. 結論

低回転自着火音を生じる燃焼を模擬できる素反応シミュレーションモデルを設定し、解析をおこない以下の知見が得られた。

- (1) 低回転自着火音を発生させる燃焼のシミュレーション
CHEMKIN-PROを用い、低温酸化反応と自着火発生の開始時期および、パラメータの変更による自着火特性の変化を実測と合わせることが可能であることを示し、このモデルを用いて実測にくい低回転自着火のさまざまな検討をおこなった。
- (2) 自着火発生のメカニズム

低回転自着火音の原因となる、ATDC 40 deg 近辺での自着火は、圧縮による温度と圧力の上昇により低温酸化反応が開始し、さらに温度が上昇し、混合気温度が900 Kを超えると不可逆的に酸化反応が進行して、950 Kを超えると一気に進行して熱炎の発生に至る。

自着火を抑制する方向としては、混合気温度、圧力の低減が挙げられる。また、同一空気量の場合は空気過剰率または EGR による混合気中の燃料濃度の低減が挙げられる。また、RON が大きくなると n-Heptane に代表される直鎖系の酸化されやすい成分が減るため、自着火しにくくなる。RON は燃料の自着火しやすさの良い指標であると考えられる。

(3) 自着火の抑制手法

混合気温度の低減を実現する手法としては残留ガスの低減があり、混合気の温度の低減の効果は、燃料濃度の増加による低温酸化反応時の混合気の温度の上昇を上回ることが素反応シミュレーションにて確認された。また、再始動時は吸気圧がほぼ大気圧であるため、空気量過剰で、トルク低下が許容できるため、リーン化による自着火抑制が効果的である。

(4) 仕様検討への有用性

各シミュレーション結果の組み合わせにより、販売地域の変化、使用するガソリンの変更等、条件が変化した場合にどのように自着火特性が変化するかシミュレーションが可能であり仕様変更を検討する上で有用である。

参考文献

- (1) 森勝之, 小浜時男, 渡辺聖彦, 川辺泰之, 伊藤良秋, 鈴木道雄: ガソリンエンジンにおける自発火現象－発生メカニズムと予測手法－, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.982, p.87-90(1998)
- (2) 岩井浩平, 梅原健: 低回転・高負荷におけるガソリンエンジンの圧縮自己着火現象－前炎反応におよぼす混合気濃度・温度・圧力の影響－, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.39-00, p.5-8(2000)
- (3) 中島進, 田村友幸: ガソリンエンジンのアイドル回転近傍での自着火に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.121-12, p.1-6(2012)
- (4) 酒井康行: 詳細反応モデルによるガソリンサロゲート燃料の着火プロセスの解析, 自動車技術会シンポジウム, No.08-08, p.28-33(2009)
- (5) 手崎衆, 山田裕之, 金子誠: 混合気の着火性制御による高圧縮比内燃機関開発に関する基礎的研究, 平成 19 年度運輸分野における基礎的研究推進制度研究成果報告, 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (2008)
- (6) 佐々木望, 中田浩一: 燃料性状がエンジンの異常燃焼に与える影響, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.126-11, p.13-16(2011)
- (7) 三好明: 燃料化学反応モデリングへの誘い, 日本燃焼学会誌, 第 50 巻, 154 号, p.37-42(2008)

■ 著 者 ■



中 島 進