

令和 2 年 4 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06177

研究課題名(和文) 最新ディーゼル燃焼に適合する修正セタン価および分子構造に基づく新着火性指標の提唱

研究課題名(英文) Predicted ignitability index based on the molecular structures of hydrocarbons for modern diesel combustion

研究代表者

小川 英之(Ogawa, Hideyuki)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：40185509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ディーゼルエンジンにおいて吸気温度、吸気圧力、吸気酸素濃度、燃料噴射圧力、および燃料のセタン価を広範囲かつ独立に変化させた際の着火遅れを実測し、簡便な着火遅れ予測式の構築を試みた。燃料噴射開始時の酸素分圧および平均筒内ガス温度を説明変数としたアレニウス型着火遅れ予測式に、各セタン価燃料の実測の着火遅れを与えてE/Rを未知数として求めたところ、セタン価CNに反比例する関数で与えることができた。それをもとに、セタン価が32から78の燃料について、前述の関数でE/Rを着火遅れの予測式に与えて本実験結果に適用したところ、着火遅れが2.0 ms よりも短い場合には高い精度で着火遅れの予測が可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ディーゼルエンジンにおける着火遅れは、機関性能および排気特性に対して大きな影響を与えるため、その把握はきわめて重要であるのに対して、広域かつ多様に变化するエンジン燃焼室内雰囲気条件と着火遅れとの関係を体系的に調査した例は少ない。広範な運転条件およびセタン価に対して適用可能な着火遅れ予測式を構築できれば、ディーゼルエンジンの高効率・高性能・低エミッション化に資する成果となることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：To understand the dependence of ignition delay on the cetane number under various super-charging and EGR conditions in diesel combustion, ignition delays were systematically measured in a 0.83L single cylinder diesel engine. The investigations were conducted over a wide range of intake oxygen concentrations, intake gas temperatures, intake pressures, and cetane numbers to develop an empirical formula for the ignition delay based on the Arrhenius equation. The final proposed equation can adequately predict ignition delays with three parameters: the cetane number as well as the in-cylinder gas temperature and the oxygen partial pressure at the start of the fuel injection. The equation can predict ignition delays shorter than 2.0 ms, but the calculated ignition delays are longer than the experimental data when the ignition delays exceed 2.0 ms. This is due to the earlier fuel injection timings with the longer ignition delay to maintain the ignition timing at TDC.

研究分野：エンジンシステム工学

キーワード：ディーゼルエンジン 着火遅れ セタン価 アレニウス式 酸素濃度 温度 圧力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

燃料の着火性はディーゼル燃焼の着火遅れを支配する最も重要な因子であり、ひいては燃焼特性を大きく左右するため、その把握が強く求められている。その指標として従来はセタン価が用いられてきた。セタン価は多くの場合に着火遅れと強い相関を示すが、噴射圧力が低い無過給・無 EGR (排気再循環) の副室式 CFR エンジンを用いて測定されるため、最近の高燃料噴射圧力・高過給・大量 EGR の直接噴射式ディーゼルエンジンでは、セタン価と着火遅れとの相関が低下する傾向にある。この要因として、現在のディーゼル燃焼では着火時の雰囲気条件がセタン価の計測条件と大きく異なることのほか、高圧力噴射を用いているので着火に対する燃料の蒸発性や粘性などの物理的性状の影響が弱くなり、着火遅れのほとんどが化学的性状に依存していることが挙げられる。したがって、化学的燃料性状因子である燃料中の炭素の結合構造を変数とするディーゼル燃料着火性指標を構築できれば、セタン価よりも良好に着火遅れ特性を記述できるものと考えられる。

2. 研究の目的

現在のディーゼルエンジンでは、高熱効率化や低エミッション化の要求から、高過給圧力・高 EGR 率・高燃料噴射圧力化が進展しているのに対し、広域かつ多様に变化する燃料噴射時の雰囲気条件と着火遅れとの関係を体系的に調査した例は少ない。さらに、石油資源有効利用の立場から着火性が低い分解系軽油の利用が望まれており、将来的に燃料の着火性も多様化することが予想されている。そこで、外部駆動による機械式過給機、低圧ループ・クールド EGR、およびコモンレール噴射系を有する単気筒ディーゼルエンジンにおいて、吸気温度 T_{in} 、吸気圧力 P_{in} 、吸気酸素濃度 O_{2in} 、燃料噴射圧力 P_{inj} の四つの運転条件と燃料の着火性を表す指標であるセタン価 CN を広域かつ系統的に変更し、各パラメータが着火遅れに及ぼす影響の検討を行った。さらに得られた着火遅れについて重回帰分析を用いることで、広範な運転条件およびセタン価に対して適用可能な着火遅れ予測式の導出を試みた。

3. 研究の方法

実験には、行程体積 830 cm^3 、ボア・ストローク $\phi 98 \times 110 \text{ mm}$ 、圧縮比 17.6 の四ストロークサイクル・単気筒・直接噴射式ディーゼルエンジンを用いた。噴射系はインジェクタ内燃料圧力により正確な燃料噴射時期の計測が可能なコモンレール燃料噴射システムを有しており、燃料噴射圧力を広域に設定することができる。さらに、低圧ループ・クールド EGR、外部駆動による機械式過給機、インタークーラ、および吸気ヒータを備えており、吸気温度、吸気圧力、および吸気酸素濃度をそれぞれ独立かつ広域に設定することが可能である。

燃料には表 1 に示す通り、セタン価 CN が異なるパラフィン系燃料 A および B を混合することにより、五種類のセタン価の燃料を調合した。燃料 A はノルマルパラフィンを中心とした高着火性燃料であり、燃料 B はイソパラフィンを主体とした低着火性燃料である。表中 CN 32、CN 57、および CN 78 のセタン価は実測値で、CN 38 および CN 45 はこれらの実測値から求めた加算平均値であり、数字はセタン価を示している。

本研究では表 2 および表 3 に示す二系統の実験条件を設定した。この際、すべての条件で図示平均有効圧力が 0.3 MPa 程度となるように燃料噴射量を 13.5 mg/cycle とし、機関回転速度が 1400 rpm 、冷却水温度 353 K で一定とした。表 3 に示す実験系統 I では、燃料噴射圧力 P_{inj} を 100 MPa で一定とし、吸気温度 T_{in} を $303, 343, 383, 423 \text{ K}$ 、吸気圧力 P_{in} を $110 \sim 150 \text{ kPa}$ (絶対圧力) まで 10 kPa ずつ変化させるとともに、吸気酸素濃度 O_{2in} を $21, 18, 15, 12 \text{ vol.}\%$ 、セタン価 CN を $32, 38, 45, 57, 78$ に設定し、以上の 4 パラメータについて 400 通りの着火遅れデータを取得した。表 3 に示す実験系統 II では、吸気温度 T_{in} を 303 K 、吸気圧力 P_{in} を 110 kPa 一定とし、吸気酸素濃度 O_{2in} を $21, 18, 15, 12 \text{ vol.}\%$ 、燃料噴射圧力 P_{inj} を $50, 100, 150 \text{ MPa}$ 、セタン価 CN を $32, 38, 45, 57, 78$ に設定し、以上の 3 パラメータについて 60 通りの着火遅れデータを取得した。

表 1 供試燃料

	Fuel A : B	Density [g/cm^3]
CN 78	100 : 0	0.75
CN 57	62.5 : 37.5	0.75
CN 45	45 : 55	0.75
CN 38	35 : 65	0.75
CN 32	25 : 75	0.75

表 2 実験条件

IMEP	$\approx 0.3 \text{ MPa}$
Fuel injection quantity	13.5 mg/cycle
Engine speed	1400 rpm
Cetane number: CN	32, 38, 45, 57, 78
Intake temperature: T_{in}	303, 343, 383, 423 K
Intake pressure: P_{in}	110, 120, 130, 140, 150 kPa
Intake O_2 concentration: O_{2in}	21, 18, 15, 12 vol. %
Injection pressure: P_{inj}	100 MPa
Coolant temperature	353 K

表 3 実験条件 II (燃料噴射圧力変更)

IMEP	$\approx 0.3 \text{ MPa}$
Fuel injection quantity	13.5 mg/cycle
Engine speed	1400 rpm
Cetane number: CN	32, 38, 45, 57, 78
Intake temperature: T_{in}	343 K
Intake pressure: P_{in}	110 kPa
Intake O_2 concentration: O_{2in}	21, 18, 15, 12 vol. %
Injection pressure: P_{inj}	50, 100, 150 MPa
Coolant temperature	353 K

なお、運転条件によって着火遅れが大きく異なるが、いずれの場合も着火が上死点で生ずるように燃料噴射開始時期を設定した。燃料噴射開始時期はインジェクタ内部燃料圧力が低下した時期とし、着火時期は熱発生率の一階微分値 ($d^2Q/d\theta^2$) が $10 \text{ J}/(^{\circ}\text{CA})^2$ を超えた時期として、燃料噴射開始時期から着火時期までのクランク角度を絶対時間に換算して着火遅れ [ms] とした。

4. 研究成果

図1に、燃料噴射圧力 P_{inj} を 100 MPa, 吸気温度 T_{in} を 303 K, 吸気圧力 P_{in} を 110 kPa 一定とし、吸気酸素濃度 O_{2in} を変化させた際の着火遅れおよび燃料噴射開始時の筒内ガス平均温度 T_{SOI} を示す。CN 32 では吸気酸素濃度を 12 vol.% まで低下させると失火に至るため、13.5 vol.% までとしている。いずれのセタン価においても、吸気酸素濃度の低下にともなって着火遅れは増加しており、その程度は低吸気酸素濃度・低セタン価になるほど顕著である。この EGR による吸気酸素濃度の低下にともなう着火遅れの増加は、燃料と酸素の遭遇確率の低下が主要因と考えられるが、二酸化炭素および水の増加に起因した比熱比の減少にともなう筒内温度の低下も相乗的に作用している可能性がある。ここで、吸気酸素濃度 18 vol.% では相対的に若干着火遅れが短くなっているが、これは EGR によって還流した NO_x が着火を促進していることが原因であると考えられる。一方、CN 32 で吸気酸素濃度を 13.5 vol.% とした場合には着火遅れが極端に増加しているが、これは上死点での着火を維持するために燃料噴射時期を進角したため、他の場合に比べて噴射時の筒内ガス温度が低いことも考慮する必要がある。

図2に、燃料噴射圧力 P_{inj} を 100 MPa, 吸気酸素濃度 O_{2in} を 21 vol.%, 吸気圧力 P_{in} を 110 kPa 一定とし、吸気温度 T_{in} を変化させた際の着火遅れおよび燃料噴射開始時の筒内ガス平均温度 T_{SOI} を示す。着火遅れはいずれのセタン価とも吸気温度の上昇にともなって直線的に同程度減少している。ここで、吸気温度の上昇が 303 K から 423 K に 120 K 増加するのに伴って燃料噴射開始時の筒内ガス平均温度は 130 K ほど増加しており、吸気温度の上昇が圧縮行程によりわずかに増幅されている。その際の増加の程度は、吸気温度 303 K では燃料噴射開始時の筒内ガス平均温度は 1000 K 程度と 3.3 倍ほど上昇しているのに対して、423 K では 1150 K と 2.7 倍程度となっている。これは、高吸気温度ほど吸気から圧縮行程における冷却損失が増大しているためであると考えられる。なお、この場合もセタン価が低いほど噴射時期を早期に設定しているため、燃料噴射開始時の筒内ガス平均温度は若干低くなっている。

図3に、燃料噴射圧力 P_{inj} を 100 MPa, 吸気酸素濃度 O_{2in} を 21 vol.%, 吸気温度 T_{in} を 303 K で一定とし、吸気圧力 P_{in} を変化させた際の着火遅れおよび燃料噴射開始時の筒内圧力 P_{SOI} をそれぞれ示す。いずれのセタン価でも、吸気圧力の増加にともなって着火遅れは減少している。これは、吸気圧力の増加により筒内の酸素分圧が増加して燃料と酸素の遭遇確率が高まるためと考えられる。なお、この場合も CN 32 では着火遅れが大きいため、噴射時期の進角にともなって燃料噴射開始時の圧力および温度が低下しており、それが相乗的に作用していることを考慮する必要がある。

図4に、吸気圧力 P_{in} を 110 kPa, 吸気酸素濃度 O_{2in} を 21 vol.%, 吸気温度 T_{in} を 343 K 一定とし、燃料噴射圧力 P_{inj} を変化させた際の着火遅れを示す。いずれのセタン価であっても、燃料噴射圧力の上昇に伴い着火遅れは減少している。これは、混合気形成の促進による物理的着火遅れの短縮が主要因の一つとして考えられる。

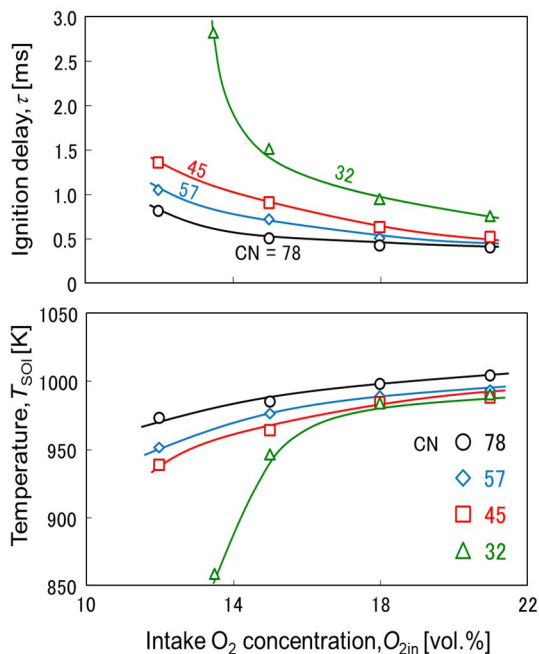


図1 吸気酸素濃度に対する着火遅れおよび燃料噴射開始時の雰囲気温度 (吸気温度: 303 K, 吸気圧力: 110 kPa)

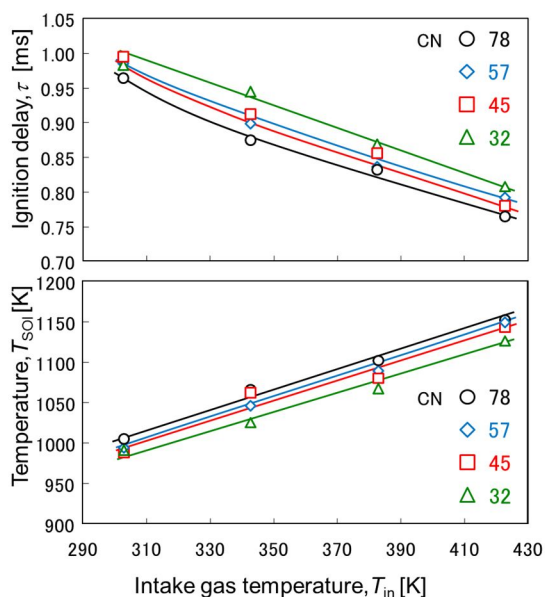


図2 吸気温度に対する着火遅れおよび燃料噴射開始時の雰囲気温度 (酸素濃度: 21%, 吸気圧力: 110 kPa)

物理的着火遅れと化学的着火遅れは、ほとんどの期間が重複しているとされているが、少なくとも液柱分裂が起こるまでの期間は化学反応が生じておらず、化学的遅れに含まれないものと考えられる。一方、液柱分裂から化学反応が開始するまでの期間は非常に短いと考えられることから、液柱分裂が化学的遅れの起点であり、その後の着火までの期間は概ね化学反応に律速される期間（以後準化学遅れ期間と呼ぶ）であると解釈できる。

ここで、燃料噴射圧力から液柱分裂時間 t_b を算定し、着火遅れとの関係を検討した。液柱分裂時間は廣安らが提案した式⁽⁸⁾の係数を座間ら⁽⁹⁾が修正した式(1)により求めた。

$$t_b = 106 \times 10^3 \left(\frac{\rho_l}{\rho_a} \right)^{-\frac{1}{4}} \frac{\rho_l \cdot d}{(\rho_a \cdot (P_{inj} - P_a))^{0.5}} \cdot \cdot (1)$$

ρ_l : 燃料密度 [kg/m³]
 ρ_a : 筒内雰囲気気密度 [kg/m³]
 d : 噴口径 [m]
 P_{inj} : 燃料噴射圧力 [Pa]
 P_a : 筒内雰囲気気圧 [Pa]

図5に、噴射圧力に対して着火遅れおよび(1)式で求めた液柱分裂時間を示す。燃料噴射圧力が50 MPaから150 MPaに上昇すると液柱分裂時間は約0.07 ms減少しており、燃料噴射圧力の高圧化が物理的着火遅れの減少に寄与することを示唆している。さらに、準化学的着火遅れ期間 ($t = t_b$) も燃料噴射圧力の高圧化により短縮していることもわかる。これは、燃料噴射圧力の上昇が液柱分裂後の燃料の微粒化、蒸発、および空気導入を促進し、その結果として混合気の局所当量比および温度経過に影響を受ける準化学的着火遅れが減少したことを示している。

図6に、吸気酸素 O_{2in} を 21 vol.%, 燃料噴射圧力 P_{inj} を 100 MPa, 吸気圧力 P_{in} を 110 kPa (abs.), 吸気温度 T_{in} を 343 K 一定とし、セタン価 CN を変化した際の着火遅れを示す。セタン価の減少にともない着火遅れは増加しており、その傾向はセタン価が50以下になると顕著になる。

本実験で得られた着火遅れをもとに、式(2)に示すアレニウス型着火遅れ予測式の適用を試みた。

$$\frac{1}{\tau} = A (P_{SOI} O_{2in})^a \exp\left(-\frac{E}{RT_{SOI}}\right) \cdot \cdot (2)$$

Livengoodら⁽¹⁰⁾によると、各パラメータは着火遅れ期間における時間の変数として与え、アレニウス式の積分値を用いて着火遅れを求めるべきであるが、ディーゼルエンジン噴霧内でこれらを時間の変数として与えることは困難であるため、ここでは簡易的に、吸気酸素濃度 O_{2in} [vol.%] および燃料噴射開始時の筒内圧力 P_{SOI} [Pa] の積で求められる酸素分圧および燃料噴射開始時の平均筒内ガス温度 T_{SOI} [K] を与えた。燃料噴射開始時の平均筒内ガス温度の逆数 $1/T_{SOI}$ に対して着火遅れの逆数 $1/\tau$ をアレニウスプロットしてその傾きから E/R を求め、さらに重回帰分析を行うことにより、各定数 A および a を決定した。

式(2)に各定数 A および a を山崎らがセタン指数 54.2 の軽油を燃料とした際の着火遅れデータから算出した値⁽¹¹⁾をそのまま用いると式(3)が得られる。

$$\frac{1}{\tau} = 3.4 \times 10^{-9} (P_{SOI} O_{2in})^{1.04} \exp\left(-\frac{E}{RT_{SOI}}\right) \cdot \cdot (3)$$

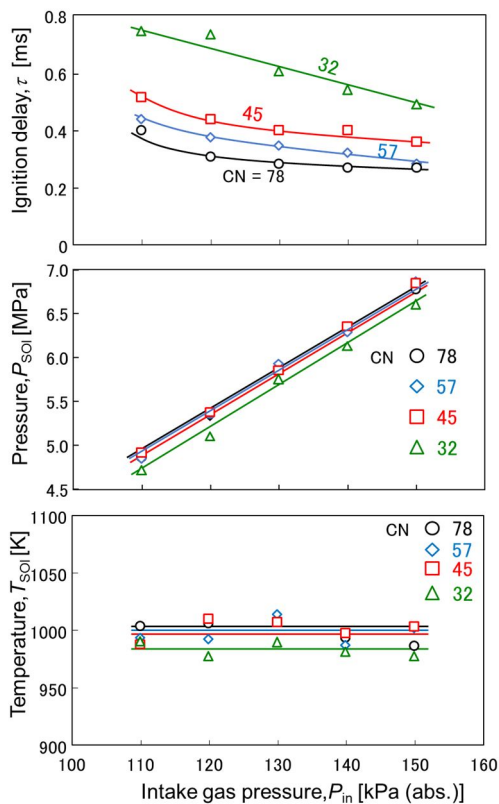


図3 吸気圧力に対する着火遅れ, 燃料噴射開始時の雰囲気圧力および雰囲気温度 (酸素濃度: 21%, 吸気温度: 303 K)

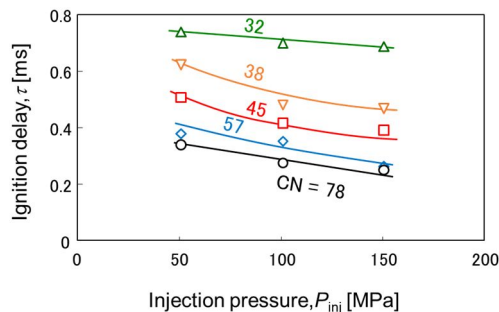


図4 燃料噴射圧力に対する着火遅れ (酸素濃度: 21%, 吸気: 110 kPa, 343 K)

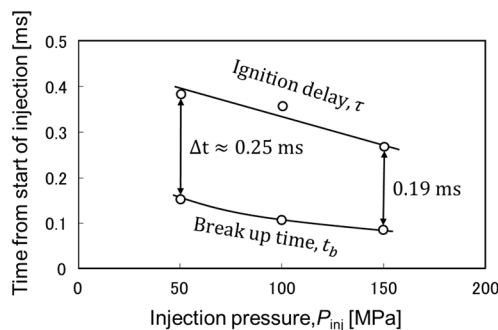


図5 燃料噴射圧力に対する着火遅れおよび噴霧分裂時間 (酸素濃度: 21%, 吸気: 110 kPa, 343 K, CN57)

さらに、セタン価が変化した場合の着火遅れへの寄与は活性化エネルギー E のみであると仮定し、(3)式に実験システムで設定した酸素分圧、燃料噴射開始時の温度、および対応する着火遅れの実測値を与えて E/R を求めた。なお、実験システムは物理的着火遅れに影響する噴射圧力を変更しているため、ここでは除外した。図7に、 E/R の平均値をセタン価の逆数に対して示す。 E/R はセタン価に反比例していることが明らかであり、(4)式で与えられる。

$$E/R = \frac{40600}{CN} + 1920 \dots (4)$$

この自由度調整済み決定係数 R^2 は0.99と極めて高いことから、セタン価により E/R を求めることができると言える。

図8に、実験から得られた着火遅れと式(3)から算出した予測着火遅れとの相関を示す。図8より、実着火遅れが2.0 msよりも短い場合には高い精度で予測できているものの、着火遅れがさらに長期化した場合には、予測値が実験値に対して長く算出されている。これは、計算では圧力および温度を噴射開始時期の一定値を与えているのに対し、実際の圧力および温度はその後の圧縮の進行にともなって上昇しているためと考えられる。このように着火遅れ期間中に圧力および温度が大きく変化するような場合には、Lievengood-Wu積分のように雰囲気条件が時間によって変化することを考慮した検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究の結果を要約するとおよそ以下のとおりである。

1. EGRによる吸気酸素濃度の低下にともなう着火遅れ増加の主要因は、燃料と酸素の遭遇確率の減少であるが、シリンダ内ガスの比熱比が減少して筒内温度が低下することも相乗的に作用している可能性がある。
2. 吸気圧力の高圧化は上死点近傍での筒内圧力に大きく影響し、その結果として着火遅れの短縮に寄与する。
3. 吸気温度の上昇に対して燃料噴射時の平均筒内ガス温度が直線的に上昇し、それに対応して着火遅れは減少する。
4. 燃料噴射圧力の上昇にともなう混合気形成が促進され着火遅れは短縮する。燃料噴射圧力の上昇は、噴霧分裂時間の短縮に加えて、噴霧内における当量比および温度の経過に影響を与えるため、物理的着火遅れのみならず、化学的着火遅れにも影響を及ぼす。
5. セタン価の減少にともなう着火遅れの増加は、セタン価が50以下になると顕著になる。
6. 燃料噴射開始時の酸素分圧および平均筒内ガス温度を説明変数としたアレニウス型着火遅れ予測式に、各セタン価燃料の実測の着火遅れを与えて E/R を未知数として求めたところ、次式のとおりセタン価CNに反比例する関数で与えることができた。

$$E/R = \frac{40600}{CN} + 1920$$

7. セタン価が32から78の燃料について、結論6の式で求めた E/R を以下の着火遅れの予測式に与えて本実験結果に適用したところ、着火遅れ期間中の雰囲気圧力および温度の変化が比較的小さい着火遅れが2.0 msよりも短い場合には、高い精度で着火遅れの予測が可能であった。一方、着火遅れがより長くなる場合には、着火遅れ期間中の雰囲気圧力および温度が大きく変化することに起因して計算値が過大評価する結果となり、雰囲気条件の変化を考慮した検討が必要であることが示唆された。

$$\frac{1}{\tau} = 3.4 \times 10^{-9} (PO_{2in})^{1.04} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

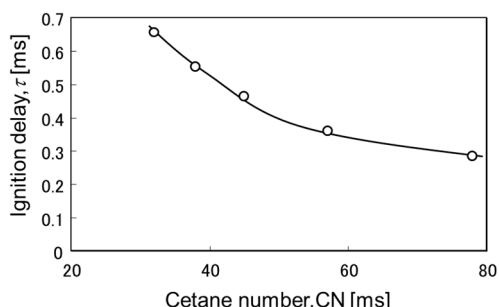


図6 セタン価に対する着火遅れ (酸素濃度：21%，吸気：110 kPa, 343 K)

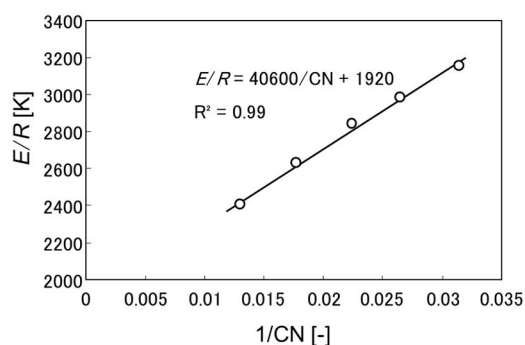


図7 セタン価の逆数に対する E/R

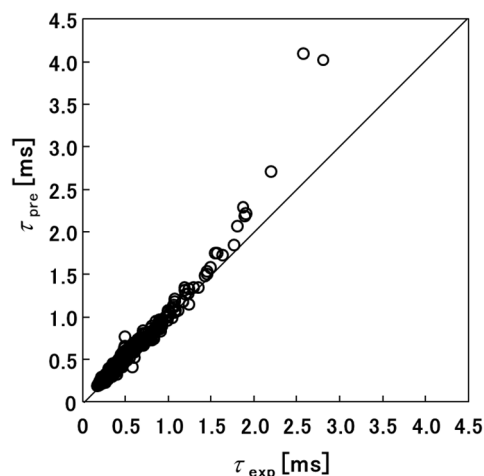


図8 着火遅れの予測値と実測値の相関

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hideyuki Ogawa, Akihiro Morita, Katsushi Futagami, and Gen Shibata	4. 巻 19
2. 論文標題 Ignition delays in diesel combustion and intake gas conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Engine Research (IMech E)	6. 最初と最後の頁 805-812
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/146808741773140	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山崎泰助, 菅野椋太, 坂根悠平, 小橋好充, 柴田元, 小川英之
2. 発表標題 ディーゼルエンジンにおける着火遅れの運転条件に対する依存性
3. 学会等名 第30回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 外処将貴, 大岡峻, 小橋好充, 柴田元, 小川英之
2. 発表標題 EGRガスの組成がディーゼル燃焼の着火遅れに及ぼす影響
3. 学会等名 自動車技術会2018年秋季大会 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideyuki Ogawa, Akihiro Morita, Katsushi Futagami and Gen Shibata
2. 発表標題 Ignition Delays in Diesel Combustion and Intake Gas Conditions
3. 学会等名 SAE 2017 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	柴田 元 (Shibata Gen) (70613785)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	
連携研究者	小橋 好充 (Kobashi Yoshimitsu) (80469072)	北海道大学・工学研究院・助教 (10101)	