

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420142

研究課題名(和文) 超高効率次世代エンジン燃焼用燃料の新着火指標の研究

研究課題名(英文) Study of New Fuel Auto-Ignition Characteristics for Next Generation Engines with Higher Thermal Efficiency

研究代表者

柴田 元 (Shibata, Gen)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70613785

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：炭化水素のオクタン価データより自着火に影響を及ぼす炭化水素構造パラメータが二級炭素(C2)、直鎖の長さ(Cd)、ナフテン環の中炭素(Cn)、ナフテン環側鎖中の二級炭素(C2n)、ベンゼン環中の炭素(Cb)であることを明らかにした。次に予混合圧縮着火エンジンを運転し低温酸化反応特性を変化させた際の炭化水素の着火性を調べた。予混合圧縮着火条件での着火性をオクタン価で整理できない理由は、オクタン価計測条件と予混合圧縮着火条件でナフテン系炭化水素の着火性が変動することが原因であることが分かった。またLivengood-Wu積分解析より着火に最も影響を与える因子はエンジン回転数であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Effects of hydrocarbon structures on auto-ignition characteristics were investigated. The secondary carbon atoms in straight chain(C2), the length of straight chain in the molecules(Cd), the carbon atoms in naphthenes(Cn), the secondary carbon atoms in the side chain of the naphthene ring(C2n), and the carbon atoms in aromatics (Cb) are the parameter variables of the hydrocarbon structure. An HCCI (homogeneous charge compression ignition) engine was operated with various low temperature heat release conditions, and the auto-ignition characteristics of hydrocarbons were investigated. The ignitability trend differences of the naphthenes in the conventional HCCI and SI knocking conditions are one reason why the HCCI ignitability can not be expressed accurately by the octane numbers. From the Livengood-Wu analysis, it was obvious that the most effective operational parameter variable was the engine speed.

研究分野：熱工学

キーワード：燃料 着火性 予混合圧縮着火 次世代エンジン オクタン価 着火指標

### 1. 研究開始当初の背景

最新の電子制御噴射システムを備えるディーゼルエンジンでは燃料の噴射圧力が旧来のディーゼルエンジンと比べて10倍以上も高いため、シリンダ内での混合気形成および燃焼雰囲気条件が大きく異なり、従来の燃料指標であるセタン価を最新のディーゼルエンジンに適用できないという課題がある。また自動車用燃料はガソリンと軽油しか市場に存在しないため、次世代エンジンはこれらの燃料をベースに開発せざるを得ず、エンジンの燃費性能、排出ガス性能が十分に発揮されていないという状況にある。特に次世代エンジンとして注目される予混合圧縮着火(HCCI)エンジンでは、燃料を構成する炭化水素構造により着火性能が著しく変化し、エンジン性能が大きく変動するという課題がある。

### 2. 研究の目的

予混合圧縮着火エンジンを用いた実験と計算シミュレーションを通じて炭化水素の構造面から着火性を解析し、次世代エンジン用の新しい着火指標を開発することを本研究の目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) システムの構築と燃料の選定

ディーゼルエンジンを予混合圧縮着火エンジンに改造し、排出ガス分析装置、燃焼解析装置、スモークメータなどの周辺機器を接続してエンジン実験システムを構築した。また低温酸化反応の大きさを変化できるように、吸気系に電熱ヒータを導入した。

実験の解析を容易にするために、既知量を混合した薬品ベースの燃料を用いて実験を行った。具体的には、PRF50燃料(ノルマルヘプタンとイソオクタンを半量ずつ混合した燃料)80%に単一炭化水素(パラフィン系炭化水素4種類、ナフテン系炭化水素3種類、芳香族系炭化水素6種類)20%を混合し、各単一炭化水素の着火性を燃焼解析により評価した。

#### (2) 実験と解析方法

##### ① 着火性の統計解析評価

既知の炭化水素の構造(直鎖の長さ、側鎖の有無、一級炭素から四級炭素の数、芳香族環の有無、ナフテン環を構成する二級炭素の数)とオクタン価の関係を統計的に解析し、着火性と炭化水素の構造の関係を明らかにした。

##### ② 予混合圧縮着火エンジンによる炭化水素の着火性評価

予混合圧縮着火燃焼では、低温酸化反応で生成されるラジカル(反応活性種)の量により続く高温酸化反応の反応速度が変化する。このことから低温酸化反応の発熱量を変化させる吸気温度(50℃、100℃、150℃)、エ

ンジン回転数(1000rpm、1400rpm、1800rpm)、吸気酸素濃度(17%、19%、21%)をパラメータにとり、エンジン実験を行った。着火性は本研究の中で定義されたオクタン価計測法に準ずるHI indexにより定義した。「着火性の統計解析評価」で明らかにした着火性を支配する構造因子を用いて得られた炭化水素の構造パラメータを用いて各炭化水素のHI indexデータを整理し、吸気温度、エンジン回転数、吸気酸素濃度を変えた際に各構造因子が与える影響を調べた。

##### ③ Livengood-Wu 積分を用いた着火性評価

特に着火に与える影響の大きかった吸気温度とエンジン回転数を変更した実験結果に対して、Livengood-Wu 積分によるシミュレーション結果と実験結果の比較を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 着火性の統計解析評価の結果

構造が既知の58種類の炭化水素を用いて炭化水素の構造とオクタン価の相関式を求めた(式(1)参照)。またこの計算値(縦軸)と実際の測定値(横軸)との相関を図1に示す。図1より明らかのように式(1)には高い相関があることが分かる。オクタン価は小さいほど着火性が向上するので、オクタン価計測条件では、

- ① 直鎖が長いほど着火性が向上する。
- ② ナフテン環のサイズが大きく側鎖が長いほど着火性が向上する。
- ③ 芳香族は着火性を低下させる。

ことが明らかとなった。

$$RON_{calc} = (-9.13C_2 - 46.0C_d) + (-4.63C_n - 28.0C_{2n}) + 2.30C_b + 107 \quad (1)$$

RON<sub>calc</sub>: 統計計算より得られるオクタン価

C<sub>2</sub>: 直鎖中に含まれる二級炭素の数

C<sub>d</sub>: ダミーパラメーター(直鎖中の炭素数の数が6を超える場合はC<sub>d</sub>=1, 6以下の場合はC<sub>d</sub>=0)

C<sub>n</sub>: ナフテン環を構成する炭素の数

C<sub>2n</sub>: ナフテン側鎖中の二級炭素の数

C<sub>b</sub>: 芳香族環を構成する炭素数

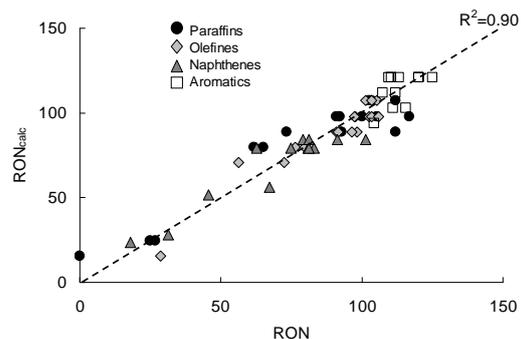


図1 オクタン価計算値(式(1))と実測値の比較

(2) 予混合圧縮着火エンジンによる炭化水素の着火性評価の結果

吸気温度, エンジン回転数, 吸気酸素濃度をパラメータに予混合圧縮着火エンジンを運転し, 各パラメータが炭化水素の着火性に与える影響について詳細に調べた。

① 吸気温度の影響について

吸気温度を 50°C, 100°C, 150°C の 3 条件で炭化水素の着火性を評価した。パラフィン系炭化水素は温度に対して着火性は変化しない。一方, ナフテン系炭化水素では吸気温度上昇とともに着火性が低下し, 芳香族系炭化水素では着火性が向上することが明らかとなった。芳香族系炭化水素では, たとえば, 3 種類の異性体 (オルト(o-), メタ(m-), パラ(p-)) があるキシレンではメチル基の配置により着火性が異なり, 特に o-キシレンの着火性が優れていることが明らかとなった (図 2 参照)。これは o-キシレンの構造上, 側鎖からの水素引き抜きがこれら 3 種類の異性体の中で最も容易なためである。

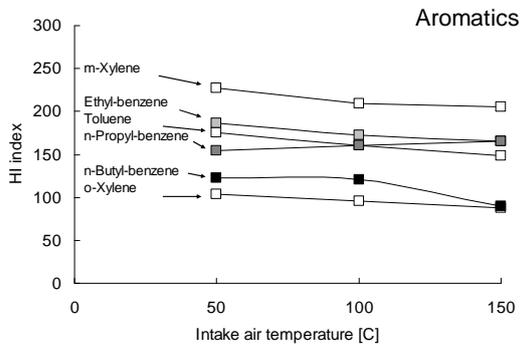


図 2 芳香族炭化水素の温度に対する着火依存性

これらの実験結果を式(1)で得られた構造パラメータで整理した HI index 値を式(2)-(4)に示す。

<吸気温度 50°C の式>

$$HI\ index_{50C} = -25.42C_2 - 2.21C_d + 2.42C_n - 96.77C_{2n} + 13.10C_b + 125.29 \quad (2)$$

<吸気温度 100°C の式>

$$HI\ index_{100C} = -20.11C_2 - 17.97C_d + 8.42C_n - 116.06C_{2n} + 11.92C_b + 117.26 \quad (3)$$

<吸気温度 150°C の式>

$$HI\ index_{150C} = -23.54C_2 - 9.14C_d + 12.07C_n - 135.68C_{2n} + 9.84C_b + 123.99 \quad (4)$$

HI index 値は数値が小さいほど着火性が優れていることを示す。各温度に対して同じパラメータの係数値を比較すると, 例えばナフテン系炭化水素では, 吸気温度が高いほど  $C_n$  の係数が大きくなり着火性は悪化するが, ナフテン環にエチル基以上の長さの側鎖があると  $C_{2n}$  の値が小さくなり着火性が改善されることが明らかとなった。また, パラフィン系炭化水素を表す  $C_2$  および  $C_d$  の係数は常

に負で全ての温度条件で着火性を向上させるのに対し, 芳香族系炭化水素を表す  $C_b$  は常に正の値を示し着火性を低下させることが明らかとなった。

② エンジン回転数の影響について

エンジン回転数を 1000rpm, 1400rpm, 1800rpm の 3 条件で運転し, その際の HI index を求めた。図 3 から図 5 にその結果を示す。パラフィン系炭化水素ではエンジン回転数に対する着火性は各炭化水素とも変化しない。一方, ナフテン系炭化水素および芳香族系炭化水素では着火性が低下する傾向が見られた。

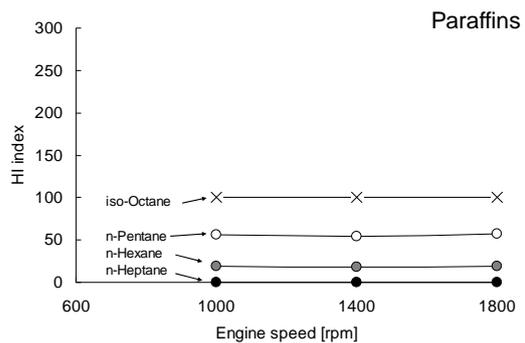


図 3 パラフィン系炭化水素のエンジン回転数に対する依存性

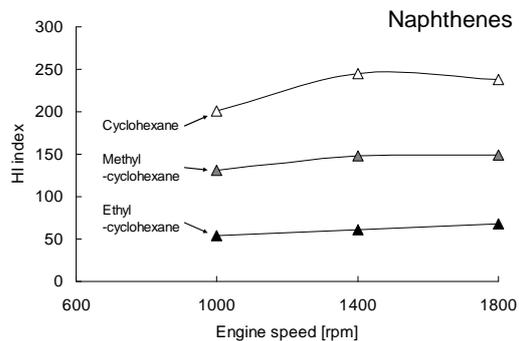


図 4 ナフテン系炭化水素のエンジン回転数に対する依存性

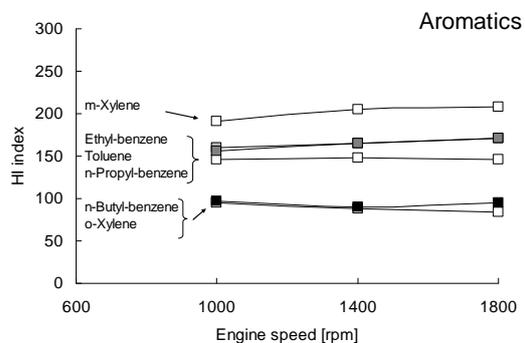


図 5 芳香族系炭化水素のエンジン回転数に対する依存性

式(1)で得られた構造パラメータで HI index の実験結果を整理した実験式を式(5)-(7)に示す。各係数の符号はエンジンの回

転数に対して変化は無く、パラフィン系炭化水素は着火性を向上させ、芳香族系炭化水素は着火性を低下させていることが分かる。またナフテンについては環構造の大きさと側鎖の長さで着火性が決まる。

<エンジン回転数 1000rpm の式>

$$\text{HI index}_{1000\text{rpm}} = -20.45C_2 - 17.39C_d + 7.87C_n - 112.02C_{2n} + 9.30C_b + 118.90 \quad (5)$$

<エンジン回転数 1400rpm の式>

$$\text{HI index}_{1400\text{rpm}} = -23.54C_2 - 9.14C_d + 12.07C_n - 135.68C_{2n} + 9.84C_b + 123.99 \quad (6)$$

<エンジン回転数 1800rpm の式>

$$\text{HI index}_{1800\text{rpm}} = -21.76C_2 - 14.98C_d + 11.81C_n - 124.79C_{2n} + 10.38C_b + 122.28 \quad (7)$$

### ③ 吸気酸素濃度の影響について

EGR(exhaust gas recirculation)を用いて吸気酸素濃度を 17%から 21%の範囲で実験を行った。計算結果を式(8)-(10)に示す。ここでの値は HI index 値ではなく、高温酸化反応が 10%熱発生したクランク角度 CA10 HTHR で評価した。(CA10 HTHR が小さいほど着火性に優れることを示す。)

<吸気酸素濃度 21%の式>

$$\text{CA10 HTHR}_{21\%} = -1.01C_2 - 4.29C_{2n} + 0.37C_n + 0.42C_b - 4.34 \quad (8)$$

<吸気酸素濃度 19%の式>

$$\text{CA10 HTHR}_{19\%} = -0.64C_2 - 4.31C_{2n} + 0.66C_n + 0.62C_b - 2.12 \quad (9)$$

<吸気酸素濃度 17%の式>

$$\text{CA10 HTHR}_{17\%} = -0.57C_2 - 7.88C_{2n} + 0.83C_n + 0.92C_b + 0.37 \quad (10)$$

この結果、燃料中に含まれるベンゼン環  $C_b$  およびナフテン環  $C_n$  は着火性を低下させ、酸素濃度が低いほどその効果が大きくなっており、予混合圧縮着火燃焼における着火性がオクタン価で整理できない理由は、ナフテン系炭化水素の着火性がオクタン価計測条件と予混合圧縮着火条件で大きく異なることが原因であることが明らかとなった。また二級炭素およびナフテン環側鎖の二級炭素は着火時期を進角させるが、二級炭化水素は吸気酸素濃度の低下とともに  $C_2$  の係数が大きくなり着火性が低下していることを示している。

### (3) Livengood-Wu 積分を用いた着火性評価

着火遅れ時間を Livengood-Wu 積分を用いて計算し、実験結果と比較をした。図 6 に吸気温度の影響を、図 7 にエンジン回転数の影響について記す。燃料には PRF40 を用いた。

この結果より、Livengood-Wu 積分は吸気酸素濃度に対しては極めて正確に表現できるが、エンジン回転数を変化させると単位クランク角度辺りの実時間が変わるため評価できないことが分かる。つまりエンジン回転数を変化させる場合には各回転数に対して Livengood-Wu 積分の係数を改めて決める必要があることを示している。

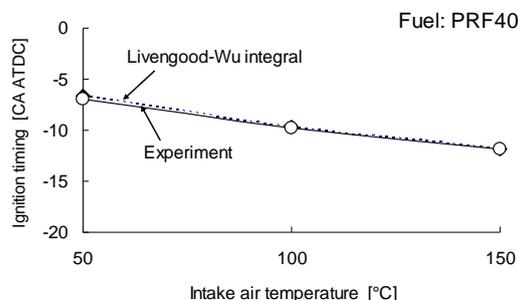


図 6 Livengood-Wu 積分と実験値との比較 (パラメータ: 吸気温度)

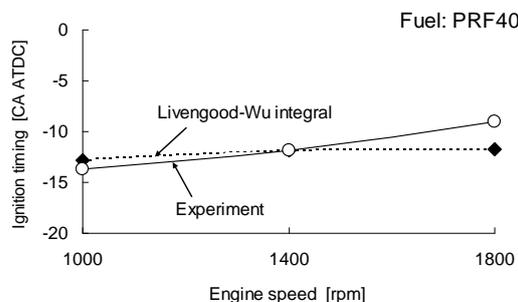


図 7 Livengood-Wu 積分と実験値との比較 (パラメータ: エンジン回転数)

### (4) 結論

- ① 着火に影響を与える炭化水素の構造パラメータを明らかにした。
- ② 炭化水素の着火性に大きく影響を与える吸気温度、エンジン回転数、吸気酸素濃度をパラメータに実験を行い、エンジンの運転条件に対して燃料を構成する炭化水素の着火性がどのように変化するかを明らかにした。
- ③ 予混合圧縮着火燃焼における着火性がオクタン価で整理できない理由は、ナフテン系炭化水素の着火性がオクタン価計測条件と予混合圧縮着火条件で大きく異なることが原因である。
- ④ Livengood-Wu 積分との相関を調べ、着火に対して最も影響を与える因子がエンジン回転数であることを明らかにした。これはエンジンの回転数を変えると燃焼反応の実時間が変化するためである。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕（計1件）

- (1) Shibata, G., Kawaguchi, R., Yoshida, S., and Ogawa, H., “Molecular Structure of Hydrocarbons and Auto-Ignition Characteristics of HCCI Engine”, SAE Journal Paper, 査読有, Vol. 7(3), Page 1050-1061, 2014

〔学会発表〕（計5件）

- (1) 鈴木拓也, 吉田蒼明, 柴田元, 小川英之, 炭化水素の予混合圧縮着火指標の開発とその汎用性, 2015年年度大会, 日本機械学会, 2015年9月14日, 会場: 北海道大学工学部 (札幌)
- (2) 吉田蒼明, 川口亮太, 柴田元, 小川英之, 炭化水素の構造が HCCI 燃焼の着火性に与える影響, 第25回内燃機関シンポジウム, 日本機械学会, 2014年11月28日, 会場: 産業総合研究所 (つくば)
- (3) Shibata, G., Kawaguchi, R., Yoshida, S., and Ogawa, H., “Molecular Structure of Hydrocarbons and Auto-Ignition Characteristics of HCCI Engine”, SAE International Small Engine Technology Conference (SETC), 2014年11月19日, 会場: Palazzo Dei Congressi (Pisa, Italy)
- (4) 川口亮太, 長谷川諒, 柴田元, 小川英之, 炭化水素の構造に基づく世混合圧縮着火エンジンの着火指標の開発, 第24回内燃機関シンポジウム, 日本機械学会, 2013年11月26日, 会場: 神戸大学六甲第2キャンパス百年記念館 (神戸)
- (5) 柴田元, HCCI 燃焼と燃料特性, 内燃機関シンポジウム (招待講演), 日本機械学会, 2013年11月28日, 会場: 神戸大学六甲第2キャンパス百年記念館 (神戸)

〔図書〕（計1件）

- (1) 柴田元ほか, 革新的燃焼技術による高効率内燃機関, page 107-114, ISBN9784860434304, 株式会社 NTS 社出版, 2015年6月

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://mech-hm.eng.hokudai.ac.jp/~engine/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 元 (SHIBATA Gen)

北海道大学・工学 (系) 研究科 (研究院)

准教授

研究者番号：70613785

(2) 研究分担者

小川 英之 (OGAWA Hideyuki)

北海道大学・工学 (系) 研究科 (研究院)

教授

研究者番号：40185509