

エンジン内部の温度不均一性がエンドガス自着火に与える影響 End-gas Autoignition Behavior Affected with Temperature inhomogeneity

○ 野川理尚, 北海道大学, 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目, tnogawa@eis.hokudai.ac.jp
寺島洋史, 北海道大学, 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目, htera@eng.hokudai.ac.jp
Takahisa Nogawa, Hokkaido University, N13 W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, Japan
Hiroshi Terashima, Hokkaido University, N13 W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, Japan

The present study investigates the effect of temperature inhomogeneity on end-gas autoignition and subsequent pressure wave development during knocking combustion of $n\text{-C}_7\text{H}_{16}/\text{air}$ and $n\text{-C}_4\text{H}_{10}/\text{air}$ mixtures. We focused on the spatial temperature gradient among temperature inhomogeneities. The discussion is based on a one-dimensional direct numerical simulation, where the compressible Navier-Stokes equations are solved with detailed chemical kinetic mechanisms. The result shows that smaller temperature gradient leads the end-gas combustion mode to a developing detonation mode with severe pressure peaks, while larger gradients successfully reduce pressure peaks significantly through the generation of a successive autoignition mode. A comparison between $n\text{-C}_7\text{H}_{16}/\text{air}$ and $n\text{-C}_4\text{H}_{10}/\text{air}$ mixtures demonstrated the influence of the NTC characteristic of $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ on end-gas autoignition behaviors.

1. 緒言

火花点火ガソリンエンジンにおけるノッキング現象は強い圧力波を伴う異常燃焼の一つとして、古くから研究が行われている⁽¹⁾。ノッキング現象は圧縮比が上昇すると、発生しやすくなるため、エンジンの熱効率上昇を図るうえでの大きな弊害となっている。そのため、ノッキング現象の抑制は、エンジンの高効率化につながる。しかし、エンジン内のエンドガス自着火に起因する圧力波伝播現象は時間的・空間的に非常に小さいスケールで起こるため、実験、計算いずれの手法でもその詳細を解像するのは困難とされてきた。一方、近年、スーパーコンピュータや、計算手法の発展によって大規模詳細反応計算を用いた流体解析が可能となり、エンドガス自着火と圧力発生メカニズムの解明が行われるようになってきた⁽²⁾。

ノッキングの抑制手法としては様々なものが存在する。例えば、点火タイミングや燃料噴射タイミングの調整、燃料の改質等があげられる。本研究では、燃焼室内の温度不均一性に着目した。エンジン内において、温度不均一性は、壁面からの冷却、燃料の気化熱、対流等によって生成される可能性がある。ノッキング現象における温度不均一性に関する報告はいくつか挙げられている⁽³⁾が、その詳細なメカニズムは明らかになっていないといえない。

本研究では、温度不均一性、特に温度空間勾配の影響に着目した。初期条件に様々な温度勾配を与え、その影響を明らかにすること、また、温度勾配によるノッキング抑制手法を提案することを目的とした。解析手法には、詳細化学反応機構を用いた CFD 解析を使用した。

2. 計算手法

支配方程式には、各化学種の質量保存式を含めた圧縮性ナビエ・ストークス方程式と熱的に完全な状態方程式を用いた。また、化学反応計算のスキームには高速陽的時間積分法 ERENA、流体輸送係数の高速化に化学種バンドル法を適用している。解析手法の詳細は文献⁽²⁾を参照いただきたい。

3. 計算モデル・計算条件

本研究では、ノッキング現象を Fig. 1 のようにモデル化した。3次元計算の場合、計算コストを多大に必要とするため、1次元モデル化した。計算領域を $L = 4 \text{ cm}$ とし、左壁面を対称境界条件、右壁面を断熱境界条件とした。また、点火に関しては、左壁面から $L/40 \text{ cm}$ の領域に 1400 K の高温源を配置することで再現した。この点火源から発生した火炎が右壁面に移動していく過程で、火

炎と壁面の間にエンドガス領域が形成され、エンドガスが自着火することにより、ノッキング現象が再現される。

初期条件として、圧力を 5 atm 、当量比を 1.0 としている。また、温度勾配の与え方として、計算領域中心の温度を中心温度と定義し、中心温度 (T_c : Temperature at center) を 600 K から 900 K まで 50 K 刻みとした。勾配に関しては、壁面での冷却を考慮し $dT/dx = -100 \text{ K/cm}$, -10 K/cm , -5 K/cm , -1 K/cm , -0.5 K/cm , -0.1 K/cm の 6 条件を割り振り、合計で 42 条件の数値計算を行った。中心温度と勾配を決定することで、両端点の温度を計算し、線形に結ぶことで、Fig. 2 のように温度勾配を与えている。計算格子幅は計算領域全体において一定であり、 $22.1 \mu\text{m}$ とした。

詳細化学反応モデルは、KUCRS⁽⁴⁾を用いて作成し、燃料として用いた $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ は 373 化学種、1071 反応、 $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ の場合、113 化学種、426 反応で構成される。2 種類の燃料を用いたのは、燃料の特性を考慮するためである。Fig. 3 に、断熱定容容器を仮定した両燃料の着火遅れ時間を示す。通常、温度が上昇すると、着火遅れ時間が短くなるが、 $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ のような一部の多炭化水素には、温度が上昇すると、着火遅れ時間が長くなる特性があり、これを負の温度係数 NTC (Negative Temperature Coefficient) 領域と呼ぶ。 $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ は 700 K から 800 K 付近に NTC 領域が存在する。

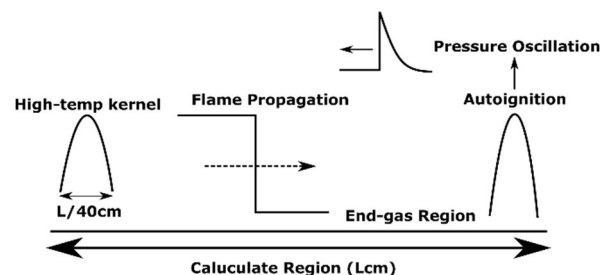


Fig. 1 Computational model

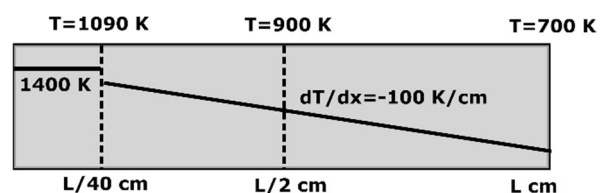


Fig. 2 Schematic of initial temperature distribution

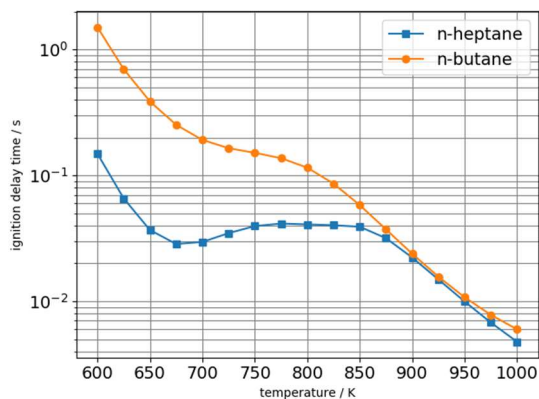


Fig. 3 Ignition delay time against temperature at 5 atm

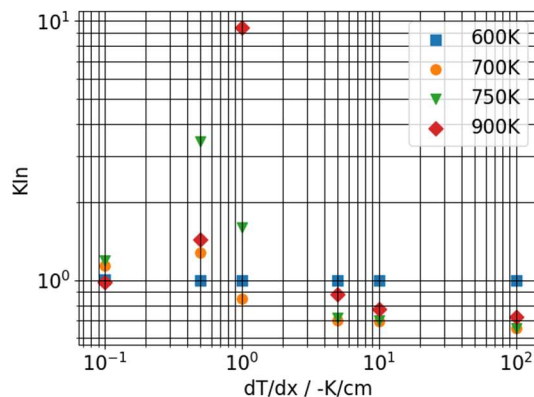


Fig. 5 Knocking intensity of *n*-C4H10

4. 解析結果

4-1. ノック強度

計算結果の解析に関しては、Fig. 4 のように、最大圧力履歴中の最初のピーク値 P_{max} を最終的に収束する終端圧力 P_e で割った値をノッキング強度 KI として式(1)のように定義した。

$$KI = P_{max} / P_e \quad (1)$$

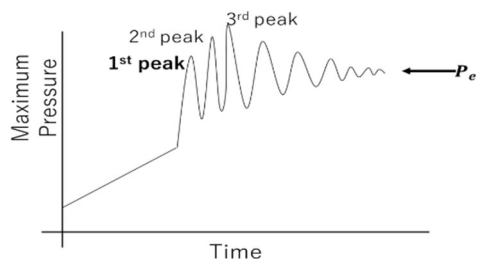


Fig. 4 Definition of knocking intensity

また、本研究では、初期温度一定の場合のノッキング強度と比較するため、新たに KI_n というパラメータを用いた。 KI_n は式(2)のように定義され、温度勾配を与えた場合のノッキング強度 KI_{TG} を温度一定の場合のノッキング強度 KI_u で割ったものとなる。

$$KI_n = KI_{TG} / KI_u \quad (2)$$

Figures 5 and 6 に、横軸を温度勾配、縦軸を KI_n とした結果を示す。 Figure 5 が *n*-C₄H₁₀、Fig. 6 が *n*-C₇H₁₆ の結果をそれぞれ示しており、結果の傾向が似たものは省略した。そのため、600 K、700 K、750 K、900 K の 4 種類のみを載せている。どちらの燃料にも共通に言えることとして、勾配が ~ 10 K/cm とした大きな場合、ノッキング強度が小さくなり、逆に、 -1 K/cm、 -0.5 K/cm とした小さな勾配ではノッキング強度が大きくなることわかる。一方、燃料による違いはピーク発生傾向に見られる。 *n*-C₄H₁₀ では、どの初期中心温度条件においても、温度勾配が ~ 1 K/cm 付近にピークが唯一発生するのに対し（低温の場合には、末端ガス自着火そのものが発生しなくなるため、明確なピークは見られなくなる）、 *n*-C₇H₁₆ の場合には、 -5 K/cm 付近にもう一つのピークが発生していることがわかる。また、初期温度 750 K では、ノック強度比がほぼ一定となる。これらは、末端ガス自着火に起因する燃焼モードの違いを反映しているものであり、次節で議論する。

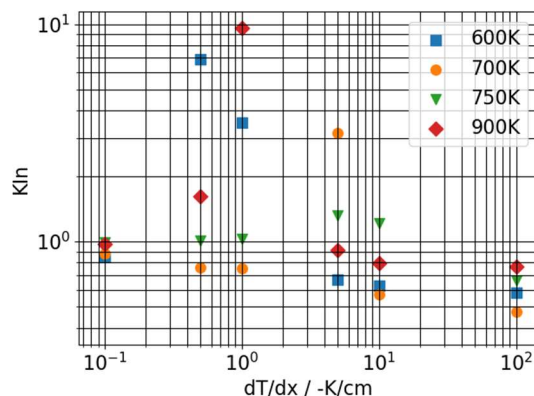


Fig. 6 Knocking intensity of *n*-C7H16

4-2. 末端ガス自着火燃焼モード

末端ガス自着火に起因する燃焼モードを見ていく。初期条件によって、様々な末端ガス自着火、圧力波発達現象が見られるが、燃焼モードの分類分けに関しては、Zeldovich⁽⁵⁾の研究を参考にした。ここでは代表的な計算結果として、燃料が *n*-C₄H₁₀、初期中心温度が $T_c=900$ K の場合について示し、議論していく。

まず、Fig. 7 に、比較対象として初期温度が 900 K で温度勾配無しの場合の温度履歴と圧力履歴を示す。温度勾配がない場合、右壁面から自着火が起こり、それに伴い発生した圧力波の振幅が徐々に大きくなっていくことがわかる。これに対して、温度勾配として -1 K/cm を与えたケースでの結果を Fig. 8 に示す。圧力履歴を確認すると、急峻なピークが立ち、徐々に大きくなっていくことがわかる。この急峻な圧力波が右壁面で干渉・反射することによって、右壁面で最大の圧力を観測している。これは、Zeldovich⁽⁵⁾が提唱する爆轟波発達モードに対応する。また、温度勾配が大きい ~ 10 K/cm の場合、対応する燃焼モードは Fig. 9 のようになる。温度履歴から、火炎が右壁面までゆっくりと伝播していることがわかる。Figure 8 と Fig. 9 に示す時間刻み幅のオーダーがそれぞれ 10^{-6} と 10^{-5} となっていることに注意いただきたい。この遅い変化のため、圧力変化は小さく、温度勾配が小さい or 無い場合に見られたような圧力波ピークも発生しない。これは燃焼モードが Zeldovich⁽⁵⁾の示す亜音速爆燃モードへ変化したためと考えられる。初期温度 900 K 以外でも、温度勾配が小さいときは、爆轟波発達モードとなっており、大きいときは亜音速爆燃モードになっていることが *n*-C₄H₁₀ では確認された。

燃料の違いによるノッキング強度を比較していく。初期温度 $T_c=750$ K の場合、*n*-C₇H₁₆ ではノッキング強度比がほぼ一定、ピークが発生しない。一方、*n*-C₄H₁₀ ではピークが見られていた。

そこで、燃焼モードの詳細な比較のために、Fig. 10, Fig. 11 に $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$, $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ それぞれの温度・圧力履歴を示す。 $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ では、空間に負の温度勾配があるにもかかわらず（左方が高温）、右壁面から自着火していることがわかる。一方、 $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ では、伝播火炎付近から自着火が開始している。これは前述した $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ の性質である NTC 領域の存在が原因と考えられる。そこで、初期状態での空間内の着火遅れ時間分布を調査した。Figure 12 に $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$, Fig. 13 に $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ の結果を示す。 $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ では、NTC 特性の反映により、壁面側の方が着火遅れ時間が短く、壁面で着火しやすいことがわかる。これに対して、 $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ では逆の分布を示している。このため、 $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ では、自着火は壁面より開始し、結果的に強い圧力波への発達が見られなかった。同じ中心温度、温度勾配であったとしても、燃料特性が異なれば、着火遅れ時間の分布が異なり、異なる燃焼モードとなることがわかる。

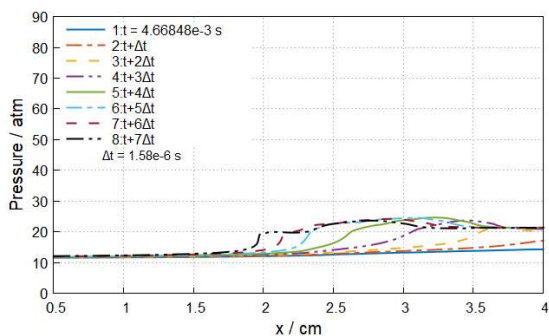


Fig. 7 A temporal sequence of pressure profiles for $T_c=900\text{ K}$, $dT/dx = 0\text{ K/cm}$

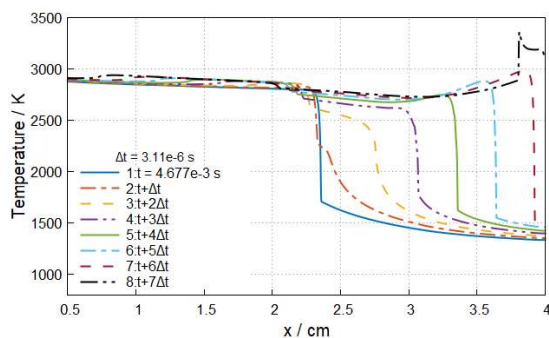
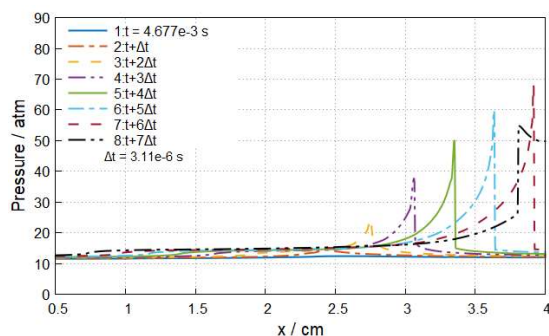
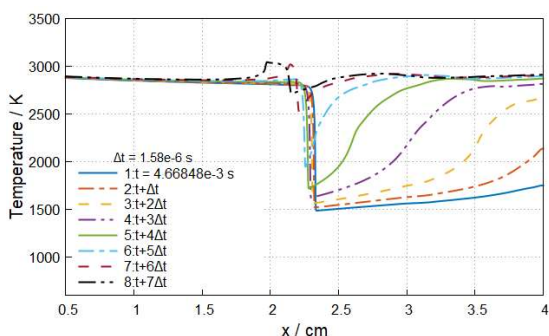


Fig. 8 A temporal sequence of pressure and temperature profiles for $T_c=900\text{ K}$, $dT/dx = -1\text{ K/cm}$

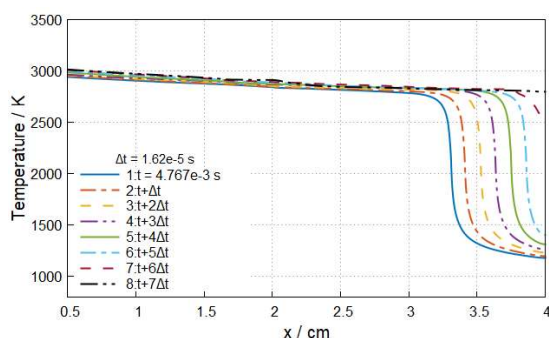
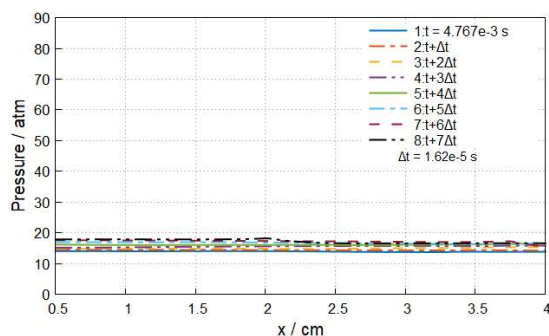


Fig. 9 A temporal sequence of pressure and temperature profiles for $T_c=900\text{ K}$, $dT/dx = -10\text{ K/cm}$

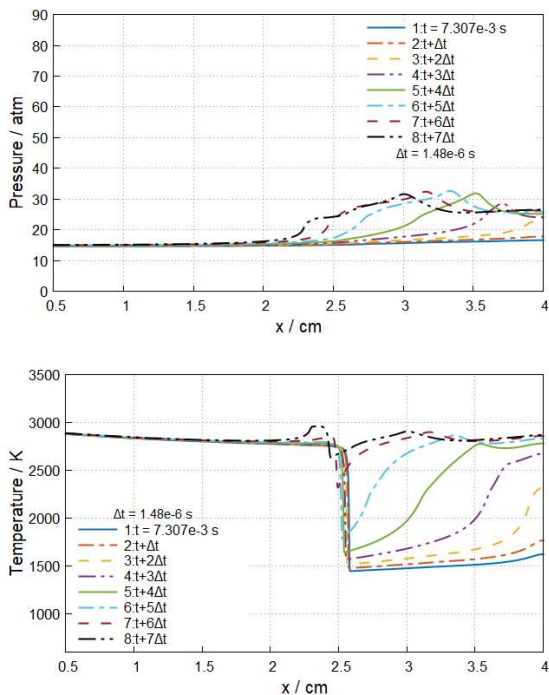


Fig. 10 A temporal sequence of pressure and temperature profiles of $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ for $T_c=750$ K, $dT/dx = -0.5$ K/cm

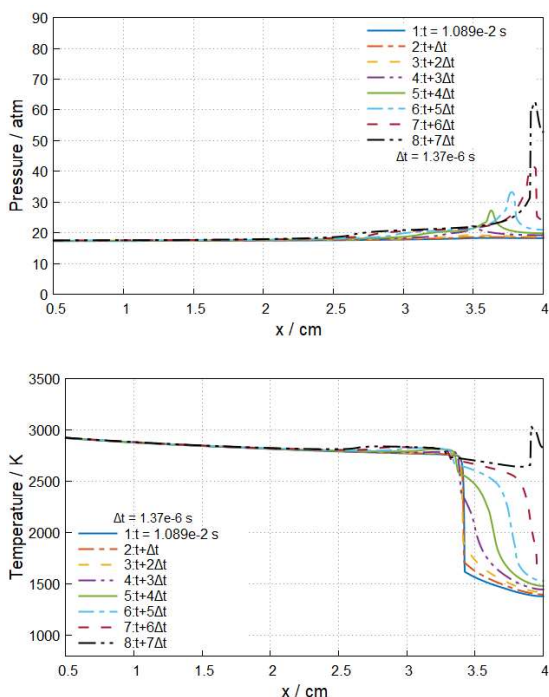


Fig. 11 A temporal sequence of pressure and temperature profiles of $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ for $T_c=750$ K, $dT/dx = -0.5$ K/cm

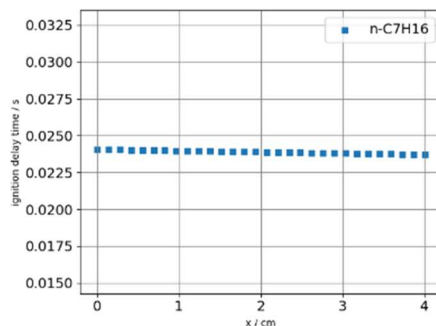


Fig. 12 Spatial distribution of ignition delay time of $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$

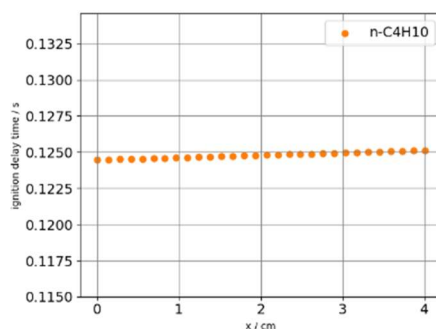


Fig. 13 Spatial distribution of ignition delay time of $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$

5. 結言

本研究では、詳細化学反応機構を用いた流体流解析により、初期温度勾配がノッキング現象に与える影響を調べた。燃料特性の異なる2種類の燃料を用い、燃料の違いによるノッキング現象の違いを調査した。空間温度勾配を -10 K/cmのように大きくすることで、ノッキング強度が小さくなり、圧力波ピークの抑制につながる。これに対して、 -0.5 K/cmといった小さな温度勾配を初期温度分布に与えた場合、燃焼モードが爆轟波発達モードに変化し、ノッキング強度が大きくなる場合がある。空間温度勾配に対するノック強度のピーク発生傾向は、燃料 NTC 特性の影響を受けるため、初期温度 750 K 付近で、燃料間の差異が発生する。実際のエンジンで空間全体の温度勾配をノッキング抑制に用いる場合は、大きな温度勾配を与えればよい。ただし燃料特性を十分に考慮する必要があることが示唆された。

参考文献

- (1) X. Zhen et al., "The engine knock analysis - An overview," Appl. Energy, 92, (2012), pp. 628–636.
- (2) H. Terashima and M. Koshi, "Mechanisms of strong pressure wave generation in end-gas autoignition during knocking combustion," Combust. Flame, 162, no. 5, (2015), pp. 1944–1956.
- (3) Poschl M, Sattelmayer T. "Influence of temperature inhomogeneities on knocking combustion." Combust. Flame, 153 (2008), pp. 562–73.
- (4) A. Miyoshi, KUCRS software library. See the web: <http://www.frad.t.u-tokyo.ac.jp/~miyoshi/KUCRS/> for update information, The program uses THERM program for thermodata generation.
- (5) Y. B. Zeldovich, "Regime Classification of an Exothermic Reaction With Nonuniform Initial Conditions," Combust. Flame, 39, no. 2, (1980), pp. 211–214.