

K2-36

超急速圧縮装置における窒素希釈及び乱れがノッキング強度に及ぼす影響

Influence of Nitrogen Dilution and Turbulence on Knocking Intensity in a Super Rapid Compression Machine

○並木 信太郎¹, 津守 陽介¹, 日比 大雅², 田辺 光昭³*Shintaro Namiki¹, Yosuke Tsumori¹, Taiga Hibi², Mitsuaki Tanabe³

Abstract: Exhaust gas recirculation (EGR) operation is effective as the control method of knocking occurrence. In this study, fuel-air mixture was diluted by nitrogen that is a principal component in the exhaust gas. The influence of turbulence with diluted fuel-air mixture on flame propagation and knocking intensity was investigated by using a super rapid compression machine (SRCM). As a result, flame propagation velocity in the dilution case was relatively lower than the non-dilution case. In knocking condition with the dilution case, the combustion time of spontaneous ignition of end gas was prolonged as compared with the non-dilution case. In the dilution case, knocking intensity was too low to determine its dependence on the volume fraction for flame propagation.

1. 緒言

火花点火機関では、熱効率向上の手段として高圧縮比化が有効であるが、高圧縮比化はノッキングの発生により妨げられている。ノッキングの抑制手法として排気再循環 (Exhaust Gas Recirculation : EGR) が挙げられているが、EGR 時では燃焼速度の低下により燃焼が不安定となる。この解決方法として燃焼期間を短縮することにより、燃焼変動を抑制し EGR 時において安定した燃焼が可能となる^[1]。燃焼期間の短縮にはシリンダ内の乱れが有効であり、漆原ら^[2]の研究においてタンブル起源の渦によって燃焼速度が高くなることが分かっている。また、ノッキング強度 (ノッキングによる圧力振動の最大振幅) は、燃焼体積割合 (燃焼室の体積に対するノッキング発生直前の既燃ガスの体積割合) が約 6 割でエンドガスが自発点火すると、最大となると報告されている^[3]。EGR と乱れが、ノッキング強度に及ぼす影響についての知見を得るため、本研究では EGR ガス中の主成分である窒素に着目し、予混合気を窒素で希釈した。6000 rpm 相当の圧縮行程を模擬できる超急速圧縮装置 (SRCM)^[4]を用いて燃焼室内の乱れを変化させて実験を行い、窒素希釈の有無と乱れがノッキング強度に与える影響を比較した。

2. 実験装置及び方法

実験では過去の研究^{[4],[5]}と同一の実験装置を用いた。実験装置は SRCM を使用し、シリンダ壁面にスパークプラグが取り付けられており、その対向する壁面に取り付けてある圧力変換素子 (KISTLER, type6052C) により筒内圧力を取得している。シリンダヘッド部にサファイア製の窓を設けており、高速度カメラ (Phantom V12.1) を用いて直接撮影及びシュリーレン撮影を行っ

ている。本実験は初期圧力 0.1 MPa, 初期温度 333±3 K, 圧縮比 14.1±0.6, ピストン圧縮時間 4.7±0.4 ms, 火花点火時期は BTDC 0.4±0.2 ms (CA 20°相当) とした。また、燃料は *n*-heptane (10% vol.) と *iso*-octane (90% vol.) の混合物で PRF90, 当量比 1.0 のものを使用した。窒素希釈率は 0% と 30% の二種類で行い、窒素希釈率 (D_{N_2}) は以下の式で定義した。式中の n_{air} は予混合気中の空気の本数, n_{N_2} は添加する窒素の本数である。

$$D_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_{air} + n_{N_2}} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

また、SRCM の燃焼室内に挿入物 (多孔板) を設置し、ピストン圧縮により混合気を多孔板の開孔部から噴出させ、強い乱れを発生させることでタンブル起源の渦を模擬している。開孔割合 (シリンダ断面積当りの開孔部分面積), ピッチ (隣り合う孔の間隔) が異なる数種の挿入物により、燃焼室内の乱れを変化させ実験を行う^[5]。多孔板の孔は丸孔、開孔部の配列は 60° 千鳥型のものを使用した。ここで特性乱れ強さ u_c は以下のように定義する^[6]。式中の U_m は圧縮ピストンの平均速度, ε は圧縮比, A_r は開孔割合である。

$$u_c = \frac{U_m}{A_r \cdot \varepsilon} \quad (2)$$

3. 実験結果及び考察

Figure 1 に特性乱れ強さと火炎伝播速度の関係を示す。同じ特性乱れ強さの場合、窒素希釈率 30% では窒素希釈率 0% に比べ火炎伝播速度は低下した。また、両者とも特性乱れ強さが強くなるにつれて火炎伝播速度は高くなることが確認できた。ここで窒素希釈率 30% において、特性乱れ強さが約 5 m/s 以上では高速度カ

メラによる観察及び、圧力履歴から着火が確認できなかった。これは窒素希釈により酸素濃度、燃料濃度が低下したことで着火しなかったと考えられる。

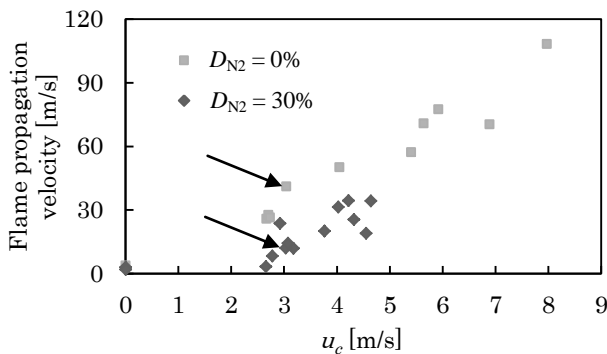


Figure 1. Dependence of flame propagation velocity on u_c .

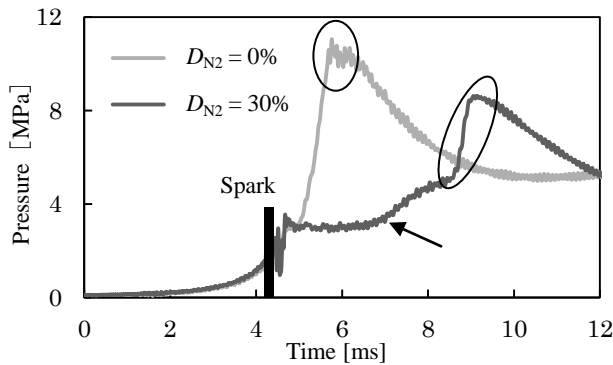


Figure 2. Cylinder pressure histories with and without dilution

Figure 2は Fig. 1 の矢印で示した二つのデータにおけるピストン圧縮を開始した時点からの圧力履歴である。窒素希釈率 0%、30%ともにピストン圧縮後、火炎伝播により圧力が上昇している。グラフの楕円で囲まれている範囲の圧力履歴に着目すると、窒素希釈率 0%ではエンドガスの自発点火による圧力振動が確認できる。一方、窒素希釈率 30%ではエンドガスの自発点火による圧力上昇があり、自発点火による圧力振動が窒素希釈率 0%の場合と比較して小さいことが確認できる。また、窒素希釈率 0%ではエンドガス全体で自発点火し圧力振動を引き起こしているのに対して、窒素希釈率 30%の場合は、エンドガスの自発点火が多段的に発生し、形成された火炎が緩やかに伝播したため圧力振動が低減したと考えられる。さらに、Fig. 2 の窒素希釈率 30%において、圧力上昇の傾きが約 7 ms を境に変化している (矢印部)。これは冷炎による発熱の影響により圧力が上昇したと考えられる。

次に、ノッキング強度と燃焼体積割合の関係性を Fig. 3 に示す。窒素希釈率 0%のデータは日比ら^[5]の研究のものである。燃料の組成や圧縮比を変えずに燃焼室内の乱れのみにより火炎伝播速度を変化させ、燃焼体積割合を変化させた場合、窒素希釈率 0%では約 0.6 付近で

ノッキング強度が最大となっている。それに対して、窒素希釈率 30%では燃焼体積割合約 0.6 ~ 1.0 の範囲で窒素希釈率 0%と比較してノッキング強度が低下した。これは先述の通り、自発点火後の圧力振動が低減したものであると考えられる。したがって、窒素希釈率 30%における燃焼体積割合とノッキング強度の関係性を明らかにすることはできなかった。

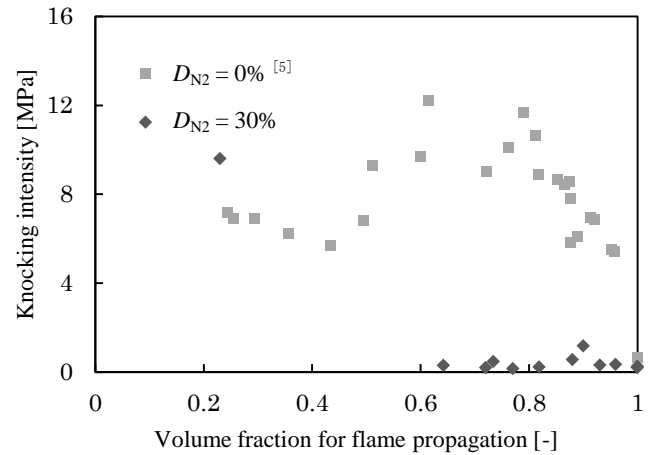


Figure 3. Dependence of knocking intensity on the volume fraction for flame propagation

4. 結論

- 窒素希釈率 30%では以下のことが明らかになった。
- 火炎伝播速度は窒素希釈率 0%に比べ低下した。
- 特性乱れ強さを強くしていくと、窒素希釈率 0%と同様に火炎伝播速度が高くなることが確認できた。
- 同じ特性乱れ強さにおいて、自発点火後の圧力振動が窒素希釈率 0%より低減した。
- 燃焼体積割合約 0.6 ~ 1.0 において、ノッキング強度は低く、燃焼体積割合とノッキング強度の関係性を明らかにすることは本実験からはできなかった。これはエンドガスの自発点火が多段的に発生し、形成された火炎が緩やかに伝播したことにより、圧力振動が低減したものであると考えられる。

謝辞

本研究において可視化にご協力いただいたスズキ株式会社 中間健二郎氏に深謝する。

5. 参考文献

- [1] 浜本嘉輔, 他, 日本機械学会論文集(B編), Vol.52, No. 480, pp.3059-3067, 1986.
- [2] 漆原友則, 他, 日本機械学会論文集(B編), Vol.60, No. 580, pp.302-308, 1994.
- [3] Kono, M. et al : "Combustion and Flame", Vol.54, pp.33-47, 1983.
- [4] Katsumata, M. et al., JSAE: 20119310, 2011.
- [5] Hibi, T. et al., COMODIA, pp.597-602, 2012.
- [6] Tanabe, M. et al., 5thPACME, 2012.