

K-2

自発点火伝播速度が収束する火炎で生じるノッキングの強度に与える影響

Influence of Spontaneous Ignition Propagation Velocity on the Intensity of Knocking Induced by Converging Flames

○松岡歩¹, 伊藤遥輝¹, 中村航大², 齊藤允教³, 田辺光昭³*Ayumu Matsuoka¹, Haruki Ito¹, Kodai Nakamura², Masanori Saito³, Mitsuaki Tanabe³

Abstract : To clarify the knocking that occurs in the flame-surrounded area, the regimes of spontaneous ignition were investigated. The regimes of spontaneous ignition were simulated by varying the propagation velocity of spontaneous ignition (u_a). Converging flames were numerically simulated using a 1D axisymmetric domain. The temperature gradient in the unburned area was varied. u_a was compared with knock intensity. It was suggested that the regime of spontaneous ignition changes the knocking intensity affects at the propagation velocity of spontaneous ignition of approximately 1000 m/s.

1. 緒言

内燃機関には熱効率向上が求められている。熱効率向上には、圧縮比と比熱比を高くすることが有効である。圧縮比を高くすると圧力波の往来であるノッキングが発生し、機関破壊に繋がる可能性がある。圧力波は火炎伝播が終了する前に未燃混合気が発火することで発生する。未燃混合気が均一に自発点火する場合、熊谷らは既燃混合気と未燃混合気の割合である燃焼体積割合が約 6 割の際にノッキング強度 P_{KI} が最も大きくなることを示した^[1]。一方、未燃混合気が不均一に自発点火する場合は Bradley により、自発点火の連続である自発点火伝播が圧力波の成長要因であり、自発点火伝播速度 u_a が音速に近づくほど P_{KI} が大きくなることが明らかにされた^[2]。 u_a は温度勾配が緩やかであり、自発点火遅れ時間の温度依存性が低いほど増加する。また、比熱比の向上には、予混合気の希薄化が有効である。しかし、点火が不安定になることや、燃焼速度の低下などの問題が挙げられる。これらの問題に対しては、多点から燃焼を開始することが有効である^[3]。Shi らは、火炎と壁に囲まれた領域と火炎に囲まれる領域で自発点火が発生することを実験的に明らかにした^[4]。高城は火炎に囲まれた領域のモデル化を行い、不均一な自発点火が P_{KI} に影響を与えることを報告した^[5]。また、条件により均一な自発点火が P_{KI} に影響を与えることを示唆した^[5]。 u_a が音速よりも速い場合、反応面は存在するが均一な自発点火とみなすことができる。したがって、 u_a のみでも均一な自発点火の傾向を確認することができる。不均一な自発点火から均一な自発点火へ切り替わる条件での u_a が P_{KI} に与える影響については明らかになっていない。本研究では、

未燃混合気に温度勾配を与えることで u_a を変化させ、不均一な自発点火、均一な自発点火とこれらの切り替わる条件が P_{KI} に与える影響についての議論をおこなった。

2. 計算条件

収束する火炎を模擬するため、ANSYS Fluent 2023 R2 を用い、1次元非定常軸対称計算を行った。図1に計算領域、表1に計算条件を示す。計算格子幅は $20\ \mu\text{m}$ とした。火炎および自発点火の発生場所付近の計算格子幅を細かくし、最小 $2.5\ \mu\text{m}$ とした。時間刻み幅は、火炎伝播速度および自発点火伝播速度を考慮し、 $1\ \text{ns}$ から $500\ \text{ns}$ とした。反応モデルは酒井らが作成した SIP-Gr2.0-s2^[6]を用いた。燃料は当量比1の *n*-heptane を用いた。初期火炎の位置は断熱壁から $0.1\ \text{mm}$ とした。初期温度は $700\ \text{K}$ 、 $870\ \text{K}$ 、 $1000\ \text{K}$ とし、未燃領域に与えた温度勾配は $0\ \text{K/mm}$ 、 $1\ \text{K/mm}$ 、 $1.5\ \text{K/mm}$ 、 $2\ \text{K/mm}$ 、 $5\ \text{K/mm}$ とした。

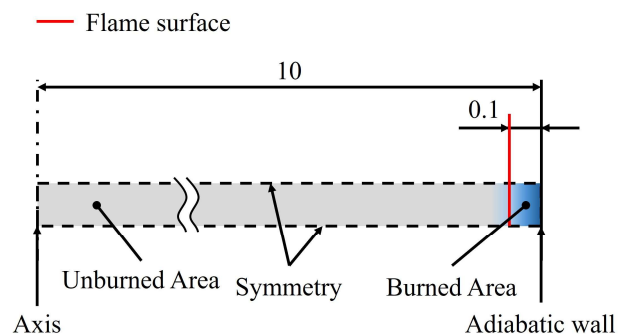


Fig. 1 Simulation schematic domain.

3. 結果および考察

均一な自発点火と不均一な自発点火の切り替わる領域が P_{KI} に与える影響を明らかにするため、 u_a と P_{KI} の関係を図2, 燃焼体積割合 m と P_{KI} の関係を図3に示す。また、曲線は熊谷らの理論線である。凡例の色はそれぞれ初期温度を表し、形は初期の未燃領域に与えた温度勾配を表す。

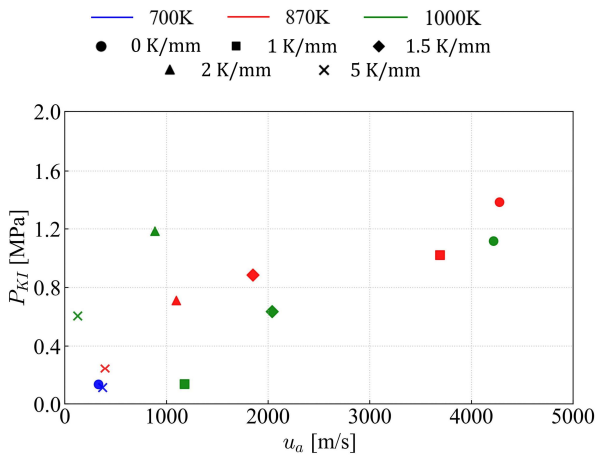


Figure. 2 Dependence of u_a and P_{KI} .

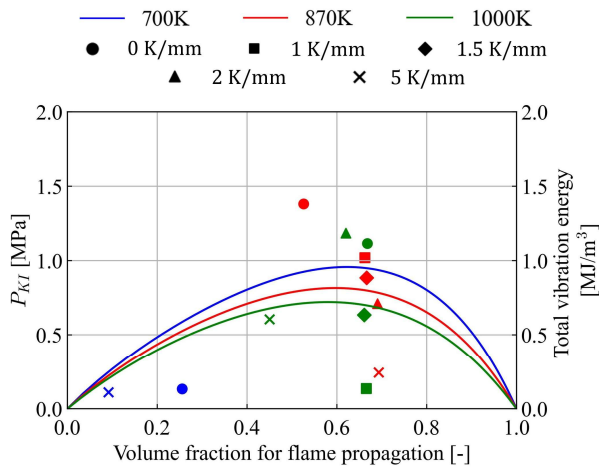


Figure. 3 Dependence of Volume fraction for flame propagation and P_{KI} .

図2より u_a が1000 m/s付近で P_{KI} が減少し、 u_a が1000よりも増加すると P_{KI} が増加する傾向が確認できる。よって、 u_a が1000 m/s付近の条件は、収束する火炎で発生するノッキングに影響を与える自発点火の形態が変化する条件である可能性がある。ここで、1000Kの温度勾配が1 K/mmの条件での自発点火開始から中央に伝播するまでの u_a の時間履歴を図4に示す。これより u_a は一定ではなく、2段階で増加していることが確認できる。増加の2段階目では u_a が音速よりも速いことから均一な自発点火と考えると、自発点火の形態が変

化する条件では、不均一な自発点火と均一な自発点火の両方が発生する可能性がある。

図2, 3より、 u_a が0~1000 m/sの音速付近のプロットは理論線よりも P_{KI} が小さくなることが確認できる。一方、 u_a が3000 m/s以上の音速より早い領域は理論線よりも大きくなることが確認できる。よって、不均一な自発点火と均一な自発点火それぞれで m が P_{KI} に与える影響は変化する可能性がある。

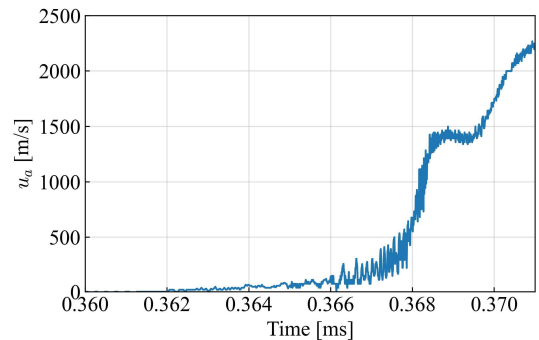


Figure. 4 Time history of u_a (1000K, 1K/mm)

4. 結言

- ・ u_a が1000 m/sより早い場合、 u_a が増加すると P_{KI} が増加する可能性がある。
- ・ u_a が1000 m/s付近でノッキングに影響を与える自発点火の形態が変化する可能性がある。
- ・自発点火の形態が変化する条件では、不均一な自発点火と均一な自発点火の両方が発生する可能性がある。

5. 参考文献

[1] 熊谷ら:火花点火機関のノックの強さ, 機械の研究, 第5巻, 第10号, pp 17-18, 1953.
 [2] D. Bradley: "Autoignition and detonations in engines and ducts", Transaction of the Royal SocietyA, Vol.370, Issue 1960, pp 689-714, 2012.
 [3] 高島ら: 多点点火がガスエンジンの燃焼に及ぼす影響, 自動車技術論文集, Vol47, No.3, 2016, pp658-663.
 [4] H. Shi, et al.: "Optical diagnostics and multi-point pressure sensing on the knocking combustion with multiple spark ignition", combustion and flame Vol.162 Article 111802, 2015.
 [5] 高城: 超希薄混合気中で収束するデフラグレーションがノッキング強度に与える影響, 日本大学大学院理工学研究科修士論文, 2023.
 [6] 酒井ら: 含酸素燃料を含むガソリンサロゲート燃料簡略反応機構の構築, 第29回内燃機関シンポジウム, NO. 20183155, 2018.