

超音波印加が火炎伝播と自発点火に及ぼす影響

Influence of Forcing Ultrasonic Waves on Flame Propagation and Spontaneous Ignition

高田祐輔¹, ○渡邊直哉¹, 小幡充志², 田辺光昭³Yusuke Takada¹, *Naoya Watanabe¹, Takashi Kohata², Mitsuaki Tanabe³

Abstract: The influence of forcing ultrasonic waves on the behavior of flame propagation and spontaneous ignition of end gas are investigated experimentally by using constant-volume combustion vessel and numerically. To simulate the knocking phenomena, low-octane mixture is employed. The ultrasonic waves are generated by an ultrasonic horn whose resonance frequency is 27.5-27.7 kHz. As a result, the wrinkle on the flame front is generated and changed the position of spontaneous ignition by forcing ultrasonic waves. It is thought that the pressure wave generate the disturbance. The disturbance is possible to generate the wrinkle on the flame front and change the position of spontaneous ignition.

1. 緒言

環境負荷の低減や燃料枯渇問題により、内燃機関には更なる熱効率の向上が求められている。内燃機関の1つである火花点火機関では、熱効率向上の手段として高圧縮比化が有効であるが、これはノッキングによって妨げられている。火花点火機関におけるノッキングとは、火炎伝播によって圧縮されたエンドガスが自発点火し、圧力振動を生じさせる現象のことであり、機関破壊の原因となる。これを解決するため、ノッキングの機構解明のための研究が行われている。これまでの研究で、熊谷は燃焼室に超音波印加することで擾乱を生成し、擾乱と火炎伝播速度の関係を報告している^[1]が、超音波とノッキングの関係については報告されていない。そこで本研究では高温の定容容器内に正ヘプタン/酸素/アルゴン予混合気を充填し火花点火することでノッキングを模擬した。さらに超音波を燃焼室内に印加することで燃焼室内に擾乱を発生させた。超音波を印加したときの火炎伝播とエンドガスの自発点火の挙動を撮影した映像と数値計算による解析から、超音波印加が火炎伝播とエンドガスの自発点火に及ぼす影響について評価した。

2. 実験装置及び方法

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。正ヘプタン/酸素/アルゴン予混合気を燃焼室に充填し、シリンダ壁面に取り付けたスパークプラグにより火花点火させた。燃焼容器にはヒータが埋め込まれており、これにより燃焼室内の初期温度を調節する。超音波を発生させるために BLT 振動子と超音波ホーンを連結し、ファンクションジェネレータと高速バイポーラ電源を用いて BLT 振動子に正弦波電圧を印加することで振動させた。ま

た、シリンダヘッドにはサファイア窓を設けることで燃焼室全域を観察でき、高速度カメラの直接撮影により映像を取得した。本実験では初期圧力を 1.7 MPa、初期温度 493 K、当量比を 1.0 とした。超音波の条件は、共振周波数 27.5~27.7 kHz、超音波ホーン振動面での振幅 60 μm 、波長 16.1 mm である。またノッキングを観察しやすくするため、燃料に自発点火遅れ時間の短い正ヘプタンを用い、正ヘプタン/酸素/アルゴン混合気を使用した。アルゴンは比熱が低いため、火炎伝播によってエンドガスが圧縮された時の温度の上昇幅が大きくなることから、バランスガスに使用した。また、酸素とアルゴンの体積割合は 21:79 とした。

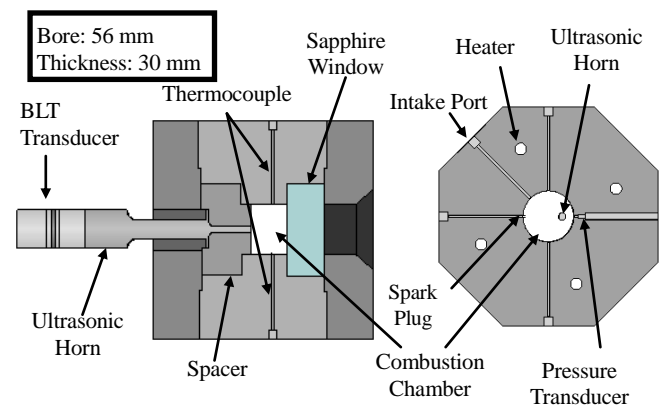


Figure 1. Experimental apparatus

3. 結果及び考察

Figure 2 に超音波印加有/無での火炎伝播の様子を示す。火花点火時間を 0 ms とした。超音波印加をしない時は、火炎面が滑らかに広がった後に、丸で囲った部分から自発点火した。一方、超音波印加時は火炎面に皺が発生した。

超音波印加有/無による燃焼室上部と下部で自発点

火する頻度を Fig. 3 に示す. 本研究では Fig. 2 の映像に映されている燃焼室の上半分を燃焼室上部, 下半分を燃焼室下部とした. 超音波を印加しない場合には上部での自発点火を確認した. ヒータの温度は燃焼室上下で同じ温度にしているが, 重力の影響で, 燃焼室上下で温度に僅かなムラがあることが原因だと考えられる. 一方, 超音波を印加した場合は上部以外での自発点火が確認された. 超音波によって筒内のエンドガスが攪拌されたものと考えられる.

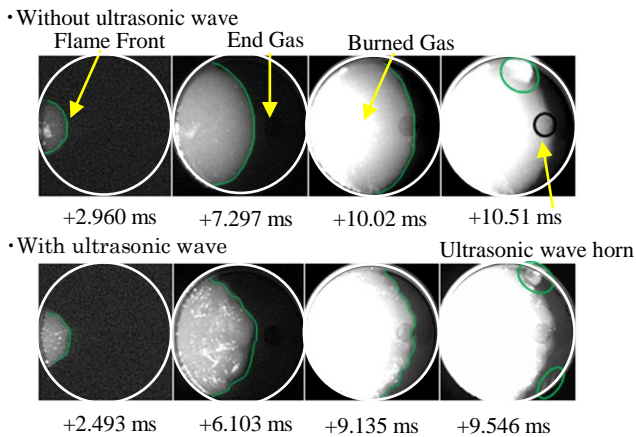


Figure 2. Behavior of flame propagation with or without ultrasonic waves

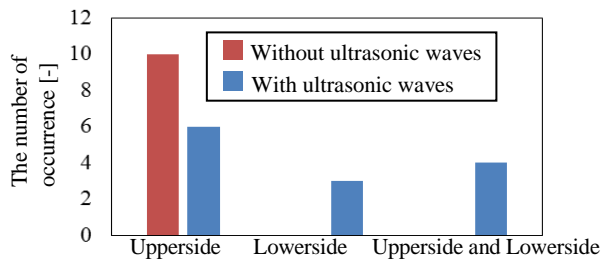


Figure 3. The number of occurrence of spontaneous ignition with or without ultrasonic waves

ここで, 燃焼室内に超音波を印加した場合の筒内の流動場を見積もるため, 数値計算を用いて筒内流動場の解析を行った. 計算には FLUENT 14.5 を使用し, 乱流モデルは LES モデルを用いた. 計算結果より筒内の速度振動を示したグラフを Fig. 4 に示す. 速度振動は筒内に超音波を一定時間印加したときの平均二乗偏差とした. SRCM と比較して^[2]弱い擾乱が確認できた. また, 超音波ホーン先端部の擾乱が最も強く, 先端部から離れるに連れて弱くなっている. 実験映像にて火炎面の皺がホーン先端部に近づくに連れて大きくなっていったことから, この擾乱が火炎面の皺形成と自発点火位置の変化に関係する可能性がある.

Figure 5 に, 超音波ホーン先端部の振幅が 0.1 mm と 0.06 mm における時間と反応速度の関係を表すグラフ

を示す. 計算の簡略化のため 2 次元とし, 初期圧力及び温度はそれぞれ 1.7 MPa, 700 K で超音波の印加のみを行い自発点火させ, 反応速度をアレニウスの式より求めた. 活性化温度は Belli ら^[3]の値を用いて, 頻度因子は SRCM を用いた実験^[2]から 0.207 とした. 超音波ホーン先端部の振幅 0.06 mm に比べて振幅 0.1 mm の方が超音波により得られる圧力波が大きくなる^[4]. 圧力波に伴う温度振動の時間平均は 0 であるが, アレニウスの式より反応速度は温度の上昇に対して指数関数的に増加することから, 超音波を印加することで, 反応促進効果が得られた.

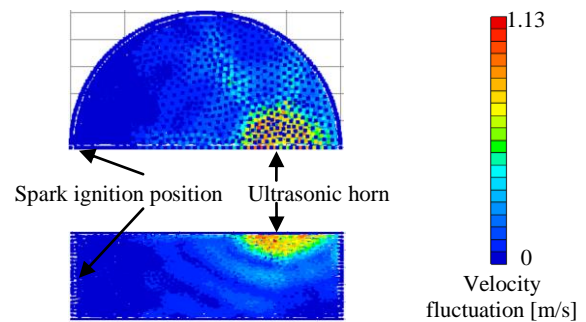


Figure 4. Distribution of the value RMS of the velocity fluctuation in the combustion chamber with ultrasonic waves

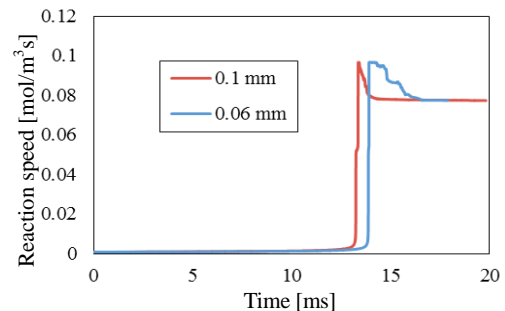


Figure 5. Relation between time and reaction speed

4. 結論

- 超音波印加によって発生した擾乱が火炎面の皺形成と自発点火位置の変化を引き起こした可能性がある.
- 超音波印加によって反応速度が促進される.

5. 参考文献

- [1] 熊谷清一郎: 日本機械学会誌, Vol.55, No.406, pp730-736, 1952
- [2] T.Hibi et al., : Journal of Science and Technology, Vol.8, pp.460-475, 2013
- [3] Belli et al., : International Symposium COMODIA, pp.105-109, 1990
- [4] 鈴木信夫: 超音波便覧, 丸善株式会社, 1999