

定在音場中の予混合火炎に発生する皺の予測法

Prediction method of wrinkles occur on the premixed flame in the standing acoustic field

○ 梶井隆彦¹, 野村裕太¹, 山田宏典², 滝澤渉², 田辺光昭³*Takahiko. Momii¹, Yuta. Nomura¹, Hironori. Yamada², Wataru. Takizawa², Mitsuaki. Tanabe³

Abstract: Wrinkling on the flame surface is generated by baroclinic torque caused by the density gradient due to combustion and the pressure gradient of the acoustic wave. In this report, the influence of effective sound pressure on the wrinkle depth was investigated. Methane – Oxygen – Nitrogen mixture whose equivalent ratio is 0.9 was employed. Effective sound pressure was 0.71 kPa and 0.86 kPa and resonant frequency was 3.07 kHz. The relations between the experimental results and a previously introduced velocity addition model that uses laminar burning velocity and by baroclinic torque, were verified. As a result, the maximum wrinkle depth increased with increasing the sound pressure. The model succeed to predict the observed wrinkles depth quantitatively.

1. 緒言

ロケットエンジンなどの連続燃焼を行う燃焼器では、燃焼振動が発生し熱的・機械的負荷により破壊に至ることがある^[1]。燃焼振動の発生要因として、音響振動との連成が考えられる。そのため音場中の燃焼をモデル化する事は安全な燃焼器を開発する上で重要である。

定在音場中の速度振動の腹における予混合火炎は、音圧の増加に伴い皺が形成される^[2]。この皺形成はバロクリニックトルクが支配的である^[3]。また、Petersの乱流燃焼構造ダイアグラムで、Wrinkled Flameletsに分類される火炎の変形は、流れの速度擾乱と層流燃焼速度が影響を及ぼすと報告されている^[4]。定在音場中の皺形成もこの二つが大きく影響していると考えられる。

本研究では実験により皺深さを調査し、層流燃焼速度とバロクリニックトルクにより決まる速度和モデル^[5]で算出される皺深さと比較し、モデルの検証を行った。

2. 理論

定在音場中の予混合火炎の皺形成の原因はバロクリニックトルクが考えられ、このトルクは(1)式の渦度方程式の右辺に現れる項である。

$$D\boldsymbol{\omega}/Dt = (\nabla\rho \times \nabla P)/\rho^2 \quad (1)$$

ここで $\boldsymbol{\omega}$ は渦度ベクトル、 ρ は密度、 P は圧力である。定在音場中の燃焼では、密度勾配と圧力勾配はそれぞれ燃焼と音の圧力振動のみを考慮する。定在音場の圧力振動 P' は、 $P' = \sqrt{2}P'_e \sin(2\pi x/\lambda) \sin(2\pi ft)$ である。ここで、 P'_e は実効音圧、 f は共鳴周波数、 λ は音の波長である。定在音場の腹での圧力勾配は(2)式となる。

$$\partial P/\partial x = 2\sqrt{2}\pi P'_e \sin(2\pi ft)/\lambda \quad (2)$$

今回は火炎のスケールに着目し、火炎帯厚さ δ_D を用い

て密度勾配を求め、 $\nabla\rho = (\rho_u - \rho_b)/\delta_D$ とした。

バロクリニックトルクによって生じる流体の渦度は(2)式を(1)式に代入し、時間積分した。積分定数 C_1 は、渦度の時間平均が0より、(3)式で表せる。

$$\boldsymbol{\omega} = (\partial\rho/\partial y)\sqrt{2}P'_{max} \cos(2\pi ft)/\rho^2 f\lambda \quad (3)$$

層流燃焼速度と流体の速度の和が単位時間当たりの火炎の変形量となる速度和モデルを考える(図1)。このモデルでは範囲 $0 \leq x \leq 2r$ では火炎形状を表す関数を F とすると

$$\begin{aligned} \partial F/\partial t &= \mathbf{e}_y (\partial H/\partial t) + \mathbf{e}_x (\partial x/\partial t) \\ &= \mathbf{e}_y (S_L + u'_e) \sqrt{1/(1+(\partial H/\partial x)^2)} \\ &\quad + \mathbf{e}_x (S_L + u'_e) \sqrt{(\partial H/\partial x)^2/(1+(\partial H/\partial x)^2)} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで、 \mathbf{e}_x 及び \mathbf{e}_y は x 軸、 y 軸の基底ベクトルである。 u'_e は流体の回転中心の条件とし $u'_{e(x=r)} = 0$ と仮定し、図1-(c)の関係を用いて(5)式を算出した。なお、皺深さは式(4)を差分化し数値的に解くことで算出した。

$$u'_{e(x)} = u'_{e(x-\Delta x)} + \frac{\sqrt{2}}{2\rho^2 f\lambda} \frac{\partial\rho}{\partial x} P'_e \cos(2\pi ft) \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (5)$$

3. 実験装置及び方法

実験装置の概略図を図2に示す。燃焼容器内で2台のスピーカを正対させ、共鳴周波数で駆動する事で定在音場を生成した。スピーカ間の距離は約180 mmである。速度振動の腹を点火位置とし、点火方法は容量放電を用いた。またシュリーレン光学系を用い、火炎の可視化を行った。シュリーレン像は高速度カメラで撮影した。混合気は当量比0.9のメタン-酸素-窒素を使用した。酸素と窒素のモル比はそれぞれ0.21と0.79である。実効音圧は0.71, 0.86 kPa, 共鳴周波数は3/2波長で共鳴させるため3.07 kHzである。

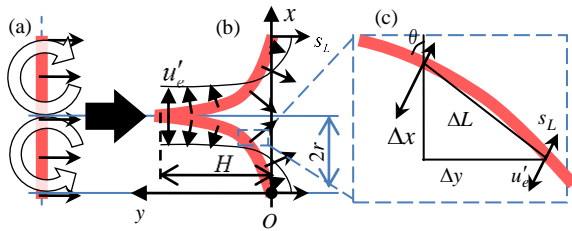


Figure 1. Schematic of velocity addition model

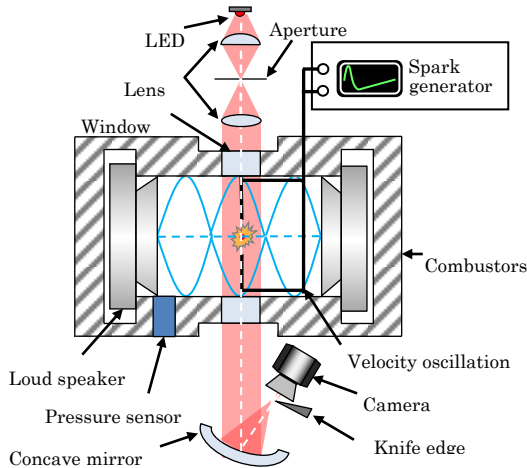


Figure 2 Schematic of experimental apparatus

4. 結果及び考察

図 3 に点火後 4.50ms から音の一周期後までのシュリーレン像を示す。両条件で火炎に皺が形成され、成長と減衰が繰り返していることが確認できる。

また、火炎は横方向に比べ縦方向の伝播が速い。これは二次流れ^[6]が原因と考えられる。

図 4 に二周期分の皺深さの時間履歴を示す。

シュリーレン像から火炎の中心付近に形成されている皺を選び、皺深さは Kusakawa ら^[2] の定義を用い、測定した。時間は皺深さが最小のときを 0 とした。実験とモデル共に半周期後付近で皺深さが最大となり、一周期後に皺深さが最小となった。皺深さの周期が定在音場の周期と近いので、定在音場の影響が皺形成の要因と言える^[4]。また、実効音圧が高い場合、実験とモデル共に実行音圧が低い場合に比べ皺深さが大きくなった。速度モデルでは周期的に形成される皺を定性的に予測できたと考えられる。

5. 結論

- ・実効音圧が高くなると皺深さは大きくなる。
- ・層流燃焼速度及びバロクリニックトルクで決まる速度モデルは定性的に皺の変化を予想できる。

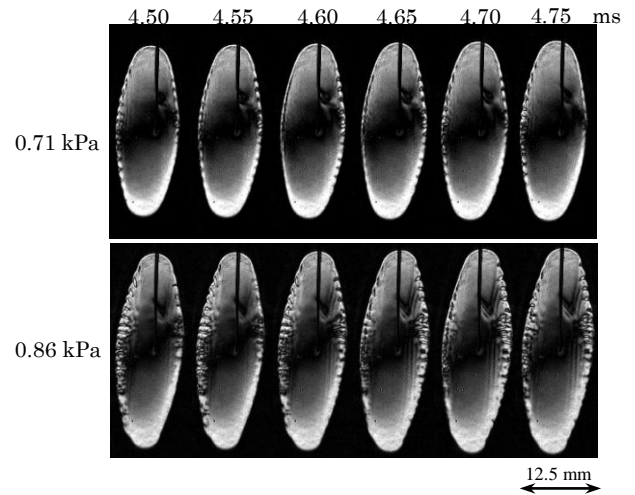


Figure 3. Processed sequential schlieren images of propagating flame (Ethane-Oxygen-Nitrogen, ϕ 0.9)

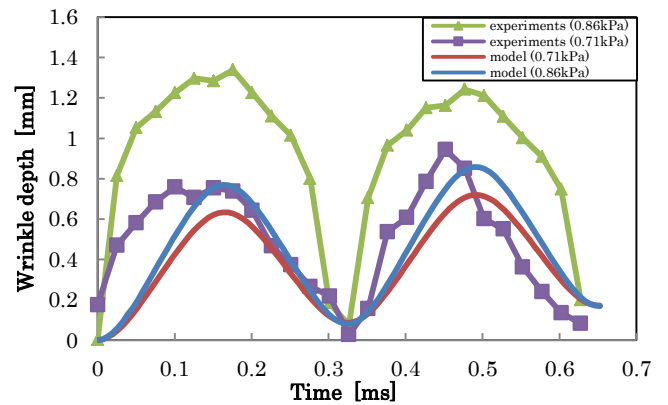


Figure 4. Wrinkle depth as a function of time

謝辞

本研究は日本大学理工学部シンボリックプロジェクトにより実施されたものである。

6. 参考文献

- [1] A. Duvvur, C. H. Chiang, W.A. Sirignano, Journal Of Propulsion and power, Vol.12, No.2, March-April 1996, pp. 358-356, 1996
- [2] H. Kusakawa, et al., eighth Asia-Pacific Conference on Combustion, pp. 194-198, 2010
- [3] T. Hiroswawa, et al., 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2012-341, 2011
- [4] N. Peters, Journal of Fluid Mechanics, 384, 1999, pp.107
- [5] 広澤拓也：「定在音場中の予混合火炎のしわ形成に与えるバロクリニックトルクと層流燃焼速度の影響」, 日本大学大学院 修士論文, 2011
- [6] Y. Ymauchi, et al., proceedings of the 25th ISTS, pp.892-897, 2005