希薄予混合ガスタービンモデル燃焼器で発生する振動燃焼の検知手法の開発 -力学系理論の導入-

Early detection of thermoacoustic combustion oscillations in a laboratory-scale premixed gas-turbine combustor using dynamical system theory.

学 小林 将紀 (立命館大院) 学 浮田 遼 (立命館大) 学 篠田 雄太 (立命館大院)
学 奥野 佑太 (立命館大) 正 後藤田 浩 (立命館大) 立花 繁 (宇宙航空研究開発機構)
Masaki KOBAYASHI, Ritsumeikan University, 1-1-1 Nojihigashi, Kusatsum Shiga, 525-8577
Ryo UKITA, Yuta SHINODA, Yuta OKUNO, Hiroshi GOTODA, Ritsumeikan University
Shigeru TACHIBANA, Japan Aerospace Exploration Agency

1 緒言

ガスタービンエンジンから排出される NO_x を低減する手法として、希薄予混合燃焼が注目されている。しかしながら、燃焼不安定が発生しやすく、特に燃焼器の破損や短命化に繋がる振動燃焼の予兆を検知できる手法の開発が必要とされている。本報では、力学系理論の視点から実験室レベルの希薄予混合ガスタービンモデル燃焼器で発生する振動燃焼の予兆を検知・回避する手法を提案することを目的とする。

2 実験装置および実験方法

本研究で使用する実験装置は篠田ら¹⁾が用いていたのと同じである。燃料にはメタンを用い、火炎は燃焼室入り口に組み込まれた軸流スワロー(ハブ径 19mm, スワロー外径 30mm)によって保持されている。燃焼室内の圧力変動は、圧力トランスデューサ(JTEKT 製 PD104K-10kPa)によって計測され、サンプリング周波数を 5kHz とする。本研究では、予混合気中の空気のスワロー流路断面平均流速を 3.5m/s(148L/min)で一定に保ちながら、燃料流量のみを徐々に増加させていくことで、振動燃焼が発生する条件に至らせる。初期状態(時刻 $t = 0$ sec)での当量比を $\phi = 0.55$ とし、10 sec から燃料流量を徐々に増加させる。

3 順列エントロピー法

本研究では、圧力変動の時系列データ $\{p'(t), t = 1, 2, \dots, N\}$ から構築される位相空間内に分布する点 $\mathbf{p}_t$ の各成分の順列パターンに着目した順列エントロピー法を用いる²⁾。

ただし、 $\mathbf{p}_t = \{p'(t), p'(t+\tau), \dots, p'(t+\tau(D-1))\}$ 、位相空間の次元を D 、 τ を遅延時間とし、位相空間内に存在する点集合の総数を $N_N (= N - (D-1)\tau)$ とする。

$\mathbf{p}_t$ のランクオーダーを順列 π_t (例えば、 $\mathbf{p}_n = [4, 7, 9, 10, 6, 11, 3]$ とすると、 $\pi_n = [2, 4, 5, 6, 3, 7, 1]$ となり、 n 番目の順列が決まる。)とし、 π_t の相対度数 $p(i) (= \pi_i/N_N)$ をシャノンエントロピーの定義式に適用することで、次式で示される無次元の順列エントロピー h_p を算出する。

$$h_p = \frac{-\sum_{i=1}^{D!} p(\pi_i) \log_2(p(\pi_i))}{\log_2 D!}$$

h_p は 0 から 1 までの範囲の値をとり、 $h = 1.0$ は完全ランダム過程(ホワイトノイズ)に対応する。本研究では $\tau = 1$ 、 $D = 7$ とする。なお、本報では h_p はサンプリングされる圧力変動の 100 ms 分ごとに対してリアルタイムに算出され、刻々と変化する圧力変動のダイナミクスを捉える。

4 結果および考察

図 1 に当量比 ϕ を変化させたときの圧力変動の標準偏差 p'_{rms} と順列エントロピー h_p の時間変化を示す。図 1 で示されるように、 ϕ を増加させると h_p の値も徐々に減少していく。このことから、 h_p は ϕ の増加に伴う燃焼状態の変化を捉えていると言える。さらに ϕ を増加させていくと p'_{rms} の急激な変化(破線部分)を伴った振動燃焼が発生する。このときの h_p も破線で示す。そこで h_p に閾値 $h_{p, thre}$ を設け、 h_p が $h_{p, thre}$ を超えた際に ϕ を減少させることで振動燃焼の事前回避を行った。 $h_{p, thre} = 0.40$ とすると、 p'_{rms} の実線で示したように振動燃焼の発生が事前に検知され、大きな圧力変動の発生が回避されている。このことは、順列エントロピーを検知器として用いることで、振動燃焼の発生を事前に回避できると言える。

Fig. 1 Time variation in p'_{rms} , h , and ϕ

4 まとめ

力学系理論の視点から希薄予混合ガスタービンモデル燃焼器で発生する振動燃焼の早期検知と回避を試みた。検知器として順列エントロピーを用いることで、振動燃焼の予兆の検知・回避が可能であることが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費 若手研究 A、パロマ環境技術開発財団、科学技術振興機構 研究成果最適展開支援プログラム (A-Step)の一部によって実施されました、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 篠田 雄太, 小林 将紀, 後藤田 浩, 立花 繁, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 410–411, 2012.
- 2) H. Gotoda, M. Amano, T. Miyano, T. Ikawa, K. Maki, S. Tachibana, Chaos, vol. 22, 043128 (8 pages), 2012.