

閉管内熱音響自励振動の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Thermoacoustic Spontaneous Oscillation in a Closed Tube

○石垣将宏, 名大院工, 名古屋市千種区不老町, ishigaki@fluid.cse.nagoya-u.ac.jp

葛生和人, 名大情連基セ, 名古屋市千種区不老町, kuzuu@itc.nagoya-u.ac.jp

石井克哉, 名大情連基セ, 名古屋市千種区不老町, ishii@itc.nagoya-u.ac.jp

M. Ishigaki, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

K. Kuzuu, Information Technology Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

K. Ishii, Information Technology Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

The working mechanism of thermoacoustic engine is based on thermoacoustic spontaneous oscillation in a number of narrow tubes. This oscillation is also observed in a narrow tube with thermal gradient. Thermoacoustic spontaneous oscillation in a closed narrow tube is studied by numerical calculation of the 2D compressible Navier-Stokes equations. The center of the tube wall is cold ($T = T_C$), and the both sides are hot ($T = T_H$) in the simulation. The spontaneous oscillation is observed when the ratio of temperature (T_H/T_C) is large. The time development of velocity in a cycle is investigated.

1. はじめに

近年, エネルギー変換効率がよく, 可動部をもたない熱音響エンジンへの関心が高まっている⁽¹⁾⁽²⁾. 熱音響エンジンは熱音響自励振動と呼ばれる現象に基づく. 熱音響自励振動とは, 径が熱境界層厚程度程度の細管にある値以上の温度勾配を与えると, 音波が発生する現象である.

このため熱音響エンジンの実用化を進める上で熱音響自励振動が発生した細管内の流れを測定することは重要である. しかし多くの場合, 細管はセラミックスや金属メッシュでできているために, 実験的に細管内の流れを観測することは難しい. そこで細管内の流れを数値シミュレーションによって観測する.

本研究では Fig.1 で示すような両端が閉端である細管を 2 次元の矩形領域に置き換えて, シミュレーションを行う. ここで管の角に原点 O , 長さ方向に x 軸, 幅方向に y 軸をとり, 各方向の長さを l, w とする. 管の両端を高温にし管の中央部分を低温にすることで, Fig.2 で示す 2ヶ所に階段状の温度勾配を与える. また計算は系の対称性を考慮して, 管全体の 1/4 の領域 (Fig.1 の斜線部分) で行う.

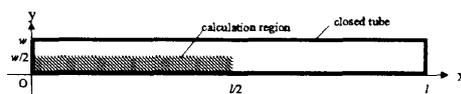


Fig. 1 A closed tube

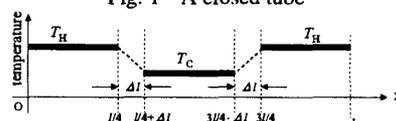


Fig. 2 Temperature distribution

2. 問題設定および計算手法

本研究では, 理想気体の 2 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式系を用いる. 管内の流体は初期に静止しており, 圧力は大気圧, 温度は室温とする. また境界条件として管壁上ですべりなし, 壁垂直方向に圧力勾配なしとしている. 温度の条件は, 管の中心部分で温度 T_C , 端部分で T_H となるようにした. ただし, 初期の温度の不連続を避けるために, 管の中心部分の温度は室温から時間経過とともに低下していき, 温度 T_C となるようにした. 流速は室温・大気圧での音速, 長さは管の全長 l で規格化する. これ以降は物理量を無次元化を行ったものとして表記する.

計算には近似因子分解法に基づいたブロック 5 重対角行列スキームを用い, 時間発展は 2 次精度 Adams-Bashforth スキーム, 対流項に 4 次精度の中心差分, 粘性項に 2 次精度の中心差分を適用する.

3. 結果・考察

Fig.3 に, $T_H/T_C = 10, \Delta l = 2.7 \times 10^{-2}, w = 5 \times 10^{-3}$ としたときの $x = 0.25, y = 2.5 \times 10^{-3}$ の位置での x 方向の流速の時間発展を示す. この図から時間 t が 20 以上で, 自励振動が生じ, その振幅が時間とともに増幅していることが分かる.

Yazaki⁽³⁾ は本研究で扱うような系では 10^2Pa から 10^4Pa 以上の振幅で振動すると報告しており, 本研究では圧力振幅が 10^3Pa 程度の大きさなので妥当な値になっていると考えられる. また観測された振動数は, 平均的な温度での音速を仮定したときの定在波の周波数とほぼ一致している.

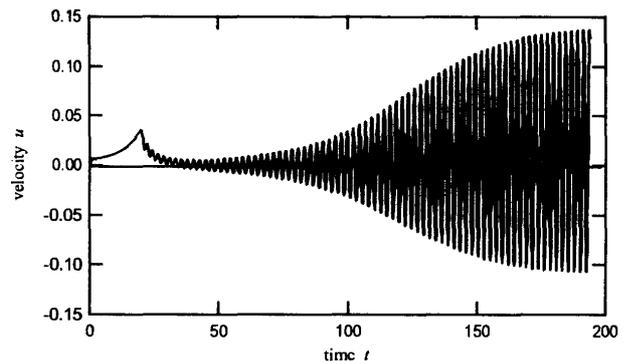


Fig. 3 Time evolution of velocity

参考文献

- (1) T. Yazaki, A. Iwata, T. Maekawa and A. Tominaga, "Traveling Wave Thermoacoustic Engine in a Looped Tube", Physical Review Letters, Vol.15, 3128, (1998)
- (2) S. Backhaus and G.W. Swift, "A thermoacoustic Stirling heat engine", Nature, Vol.39, 335 (1999)
- (3) T. Yazaki, "Experimental observation of thermoacoustic turbulence and universal properties at the quasiperiodic transition to chaos", Physical Review E, Vol.48, 1806, (1993)