

# タコニス振動中での境界層の挙動

石垣将宏（名大工），石井克哉（名大情連基セ）

## Vorical flow in Boundary layers of Taconis oscillation

M. Ishigaki\* and K. Ishii\*\*

\* Dept. of Comp. Sci. Eng., Nagoya University,

\*\* Information Technology Center, Nagoya University

### ABSTRACT

Taconis oscillation is one of thermoacoustic oscillations. Taconis oscillation in a closed long tube is studied by the numerical simulations of the 2D compressible Navier-Stokes equations. Both end walls of the tube are hot ( $T = T_H$ ), and the central regions of side walls are cold ( $T = T_C$ ). A spontaneous oscillation is amplified when the temperature ratio ( $T_H/T_C$ ) is large, and damping when the temperature ratio ( $T_H/T_C$ ) is small. The time development of the vorticity and temperature fields in the tube are analyzed.

Key Words: Taconis oscillation, viscous and thermal boundary layers

## 1 はじめに

細管の軸方向に急激な温度勾配を与えることで、管内の流体が振動する現象を熱音響自励振動と呼ぶ。特に、1本の細管内で生じる熱音響自励振動はタコニス振動と呼ばれる。著者らはこれまで、アスペクト比が0.005である閉管内で生じるタコニス振動の数値シミュレーションを行い、ヒステリシス現象が観測されたことを報告してきた [1]。管のアスペクト比が0.005よりも大きい場合のタコニス振動を解析した結果について報告する。

## 2 問題設定

本研究では Fig.1 に示すような両端が閉端である管を2次元の矩形領域として扱う。管内の流体は室温で1気圧の気体のヘリウムを想定する。

管の幅方向に対称性を仮定する。管の角に原点  $O$ ，長さ方向に  $x$  軸，幅方向に  $y$  軸をとり，管の長さを  $l$ ，管の幅を  $2w$  とする。本研究では  $l = 28\text{cm}$ ， $2w = 1.4, 2.1\text{mm}$ ， $\Delta l = 7.5\text{mm}$  とし，管のアスペクト比  $\Gamma \equiv 2w/l$  を 0.005, 0.0075 とした。管の両端の壁を室温  $T_H$  にし管の中央部分の壁を低温  $T_C$  にすることで，Fig.2 のような温度勾配を長さ  $\Delta l$  の領域に与える。室温  $T_H$  は一定にして，低温部の温度  $T_C$  を変化させることで，温度比  $\equiv T_H/T_C$  を変化させた。

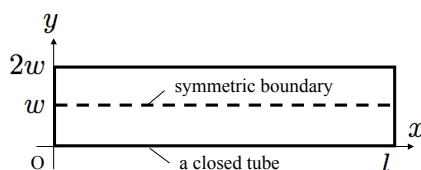


Fig. 1: A closed tube.

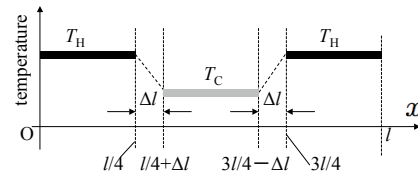


Fig. 2: The temperature distribution of the tube wall.

## 3 基礎方程式・計算手法

基礎方程式には，理想気体の2次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式系を用いる。本研究では代表速度および密度を室温・大気圧での音速および密度とし，代表長さを管長  $l$  としている。数値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 [2] を用い，時間発展には2次精度の3点後退差分，対流項には4次精度の中心差分，粘性項には2次精度の中心差分を適用する。境界条件は，管壁上ですべりなし，壁垂直方向に圧力勾配なしとした。さらに  $y = w$  を対称境界とし，対称条件を課した。管壁の温度は中心部分で温度  $T_C$ ，両端部分で  $T_H$  となるようにする。ただし，初期の温度の不連続を避けるために，中心部分の管壁の温度は室温  $T_H$  から時間経過とともに低下していき，温度  $T_C$  となるようにする。

## 4 計算結果

Fig.3 にアスペクト比  $\Gamma = 0.005$  の場合の温度比 9.1, 5.7 における圧力の時間発展を示す。温度比 = 9.1 では振動状態が観測される。また = 5.7 としたときには，ほぼ静止状態となっている。

Fig.4, Fig.5 にそれぞれ時間  $t = 978.5, 982$  での管内の渦度分布及び温度分布を示す。  $\Gamma = 0.005$ ， = 9.1 である。 Fig.4 では  $x/l = 0.8$  付近， Fig.5 では  $x/l = 0.2$  付近で大きく渦が巻き上がっており，その位置で  $y$  方向に

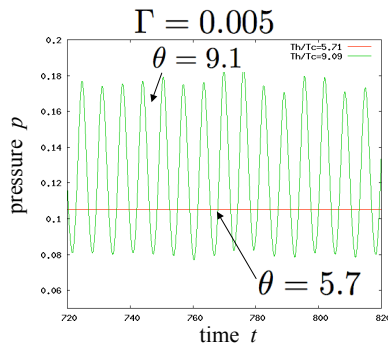


Fig. 3: The time history of the pressure.

大きな温度勾配が形成されていることが分かる。これらの位置は管壁に温度勾配を与えた位置の近傍である。高温領域では強い渦度の分布は見られないが、低温領域では強い渦度の分布が見られる。

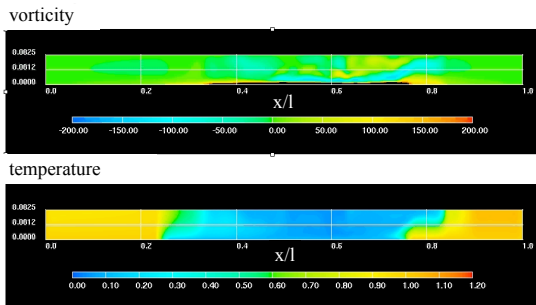


Fig. 4: The distributions of vorticity and temperature in the tube at  $t = 978.5$ .

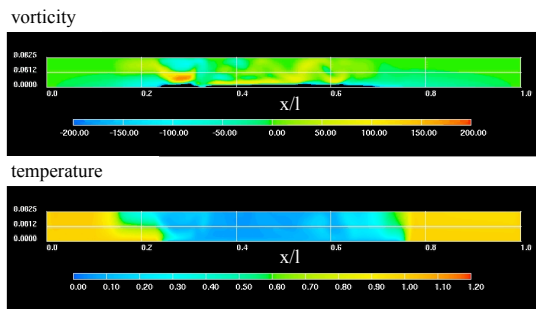


Fig. 5: The distributions of vorticity and temperature in the tube at  $t = 982$ .

次に管壁の温度比を変化させたときの圧力振幅について見てみる。 $\Gamma = 0.005, 0.0075$  でそれぞれ2つの初期状態 (A),(B) を用いた結果を示す。ここで初期状態 (A) は温度比  $\theta = 9.1$  での振動状態で、(B) は温度比  $\theta = 5.7$  での静止状態である。Fig.6 に温度比  $\theta$  と管端近傍での圧力振幅  $p_{amp}$  の関係を示す。 $\circ$  は  $\Gamma = 0.005$ :初期状態 (A),  $\triangle$  は  $\Gamma = 0.005$ :初期状態 (B) のときの圧力振幅である。また  $\square$  は  $\Gamma = 0.0075$ :初期状態 (A),  $\times$  は  $\Gamma = 0.0075$ :初期状態 (B) のときの圧力振幅である。

$\Gamma = 0.005$  のとき、初期状態 (A) の場合は、 $\theta \geq 5.9$  では自励振動が観測され、 $\theta \leq 5.7$  では静止状態となった。初期状態 (B) の場合では、 $\theta \leq 6.5$  で静止状態が観測され、 $\theta \geq 7.1$  では自励振動が観測された。 $\Gamma = 0.005$

のとき振動状態から静止状態へと遷移する温度比  $\theta_{1A}$  は  $5.7 < \theta_{1A} < 5.9$  であり、静止状態から振動状態へと遷移する温度比  $\theta_{1B}$  は  $6.5 < \theta_{1B} < 7.1$  であることが分かる。一方、 $\Gamma = 0.0075$  のとき、初期状態 (A) の場合は、 $\theta \geq 6.1$  では自励振動が観測され、 $\theta \leq 5.9$  では静止状態となった。初期状態 (B) の場合では、 $\theta \leq 6.7$  で静止状態が観測され、 $\theta \geq 7.4$  では自励振動が観測された。 $\Gamma = 0.0075$  のとき振動状態から静止状態へと遷移する温度比  $\theta_{2A}$  は  $5.9 < \theta_{2A} < 6.1$  であり、静止状態から振動状態へと遷移する温度比  $\theta_{2B}$  は  $6.7 < \theta_{2B} < 7.4$  である。 $\Gamma = 0.0075$  の場合でもヒステリシス現象は観測された。また初期状態 (A) のとき、 $6.7 < \theta < 6.9$  で圧力振幅が不連続に変化しており、新しい分岐点が存在している可能性がある。

管の  $1/2$  の幅  $w$  と高温部における粘性境界層の厚さ  $\delta_H$  の比  $w/\delta_H$  を見積もった。 $\Gamma = 0.005$ ,  $\theta = 5.9$  では  $w/\delta_H \approx 1.6$ ,  $\Gamma = 0.0075$ ,  $\theta = 6.25$  では  $w/\delta_H \approx 1.9$  であった。管のアスペクト比を1.5倍にしたにも関わらず、 $w/\delta_H$  の値は1.2倍程度にしかならなかった。このため、 $\Gamma = 0.005$  と  $0.0075$  で、遷移の温度比が同程度の値になったと考えられる。

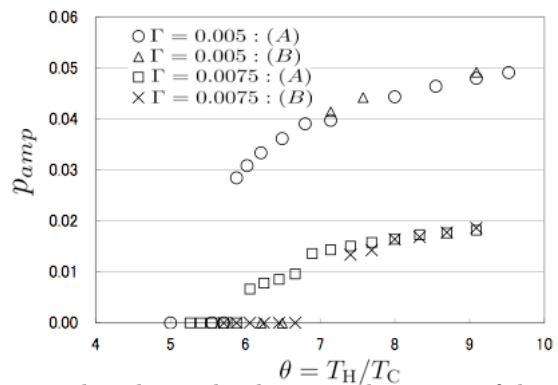


Fig. 6: The relationship between the square of the pressure amplitude and the temperature ratio.  $\circ$ : initial state (A),  $\triangle$ : initial state (B).

## 5 まとめ

アスペクト比  $\Gamma$  が  $0.005, 0.0075$  である閉管内でのタコニス振動の数値シミュレーションを行った。管壁に温度勾配を与えた領域付近では、強い渦の巻き上がりが生じ、管内の流体は幅方向に大きな温度勾配をもつことが分かった。また、低温領域でも強い渦度が観測された。 $\Gamma = 0.005, 0.0075$  のどちらの場合にも、ヒステリシス現象を観測した。 $\Gamma = 0.0075$  では新たな分岐点が存在する可能性がある。今後は、更に大きくパラメータを変化させ、管の幅と粘性境界層の厚さの比  $w/\delta_H$  を変化させた場合の解析を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] M.Ishigaki et al, Theor. Appl. Mech. Jap., **56**, pp.307, (2008)
- [2] Y.Shida et al, AIAA J., **25**, pp.408, (1987)
- [3] N.Rott, Z. Angew. Math. Phys., **20**, pp.230, (1969) & **24**, pp.54, (1973)