キャビティを過ぎる自励振動流の数値解析

松本紋子（指導教員：河村　哲也）

1　はじめに

乗用車がサンルーフを開けて走行した場合に，ある特定の車速域で空力騒音が発生し，しばしば問題となっている．その原因の一つとして自励振動が挙げられる．

自励振動とは，振動的ではない特定の入力によって，系の持つ固有振動特性に従って持続的に振動が発生する現象のことである．この自励振動が起きる現象としてキャビティを過ぎる流れがあり，工業的に多くの例がある．例えば上記のように自動車のサンルーフや航空機の車輪格納室，鉄道車両の連結部のくぼみなどが挙げられる．キャビティは単純な幾何学形状にもかかわらず，フィードバックメカニズムにより，はく離せん断層が自励振動する複雑な現象になることから多くの研究が行われてきた．

本研究では，循環渦と自励振動の制御の関係に着目し，閉じたキャビティ問題のようにキャビティの底面を一定速度で駆動することによってせん断力を与え，それによってキャビティ内の循環渦を変化させ，はく離せん断層の自励振動を制御できるかどうかを調べた．さらにその他の制御法も検討した．

2　モデル化

本研究では低マッハ数流れにおいて発生する流れを精度良く捉えることを目的として，圧縮性流れの連続の式およびNavier-Stokes方程式を用いFractional step法に準じた手続きを適用し解いた．

格子はFig.1に示すようにキャビティ長さL，深さDとし，それらのアスペクト比L/D=2.0，L/D=2.5，L/D=3.5の3つについて底面をそれぞれ正負に駆動した場合と，上流角付近よりジェット流を起こした場合の数値解析を行った．

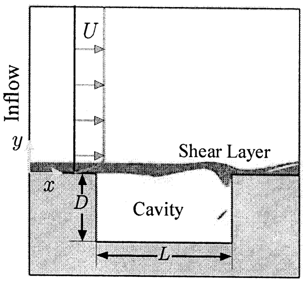


Fig.1

3　計算方法

3.1　基礎方程式の導出

低マッハ数の条件で弱い圧縮性を考慮した流れの基礎方程式の導出を以下に示す．

まず一般的に用いられる圧縮性流れの連続の式およびNavier-Stokes方程式は，次元を持った形では，

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{\rho}\tilde{u}_j}{\partial \tilde{x}_j} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}\tilde{u}_i}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{\rho}\tilde{u}_j\tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}_i} + \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial \tilde{x}_j} \tag{2}$$

$$\tilde{\tau}_{ij} = \tilde{\mu}\left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial \tilde{x}_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \tilde{u}_m}{\partial \tilde{x}_m}\right) \tag{3}$$

となる．これらの式を自然対流に適したスケールで無次元化すると次のように書き換えられる．ただしReはレイノルズ数でρ'は基準密度からの変化分である．

$$\frac{1}{1+\rho'}\left\{\frac{\partial \rho'}{\partial t} + u_j\frac{\partial \rho'}{\partial x_j}\right\} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} - u_i\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \frac{1}{1+\rho'}\left\{-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau''_{ij}}{\partial x_j}\right\} \tag{5}$$

$$\tau''_{ij} = \frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_m}{\partial x_m}\right) \tag{6}$$

上式(4)～(6)を以下に示す近似を行う．

① 低マッハ数であるため基準密度に比べて密度変化が十分に小さい($\rho' << 1$)と仮定し，$1/(1+\rho') \approx 1$とする．

② 式(4)～(6)を閉じた方程式とするため，密度変化ρ'に関して等エントロピー変化を仮定することにより，モデル化を行う．

③ 式(6)(粘性項)中における$\partial u_m / \partial x_m$の影響は相対的に小さいと考えられるため，$\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i >> \partial u_m / \partial x_m$としてこの影響を無視する．

以上の近似を行うことにより，最終的に以下に示す低マッハ数流れにおける弱い圧縮性を考慮した基礎方程式が得られる．

$$M^2\left\{\frac{\partial p}{\partial t} + u_j\frac{\partial p}{\partial x_j}\right\} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} - u_i\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{8}$$

$$\tau_{ij} = \frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{9}$$

ここでu_iとu_jはi方向速度成分，pは圧力，Mはマッハ数であり，本研究では$M = 1.0$に固定した．

本研究では，Fractional step法に準じた手続きを適用し，これらの方程式を解いた．

3.2　計算条件

レイノルズ数を3000に固定し，アスペクト比L/D=2.0の時に底面の速度を+0.05～+0.5 と－0.05～－0.5 の間で変化させ，L/D=2.5の時に底面の速度を+0.1～+0.5と－0.1～－0.5の間で変化させ，L/D=3.5の時に底面の速度を+0.2～+0.5 と－0.2～－0.5 の間で変化させて駆動した場合のキャビティ内の循環渦とせん断層の自励振動の変化を調べた．

さらに各アスペクト比において，上流の角付近よりジェット流を起こした場合のキャビティ内の循環渦とせん断層の自励振動の変化を調べた．

各計算の初期値は,各アスペクト比で制御しない場合の計算結果を用いた．十分に計算時間が経過し，周期的な自励振動状態となったある時刻の流れ場を初期値に用いた．初期値の時刻をt=0とし，その瞬間から制御を開始する．

4　計算結果

4. 1　L/D=2.0

初期値 t=0 での流線は，下流側に時計回りの渦，上流側に反時計回りの渦がひとつずつ存在し，せん断層が自励振動している(Fig.2).

底面の速度が－0.5 の場合，大きな一つの循環渦となり定在し，振動は停止した(Fig.3).　底面の速度が＋0.5 の場合，上部に時計回りの循環渦，下部に反時計回りの循環渦が定在する状態で振動は停止した(Fig.4).

また，t=0 より上流の角付近にあるジェット流を 0.3, 0.5 で与えた場合，大きな一つの循環渦となり定在し，振動は停止した. (Fig.5)　ジェット流が 0.3 以下では振動は止まらなかった.

4. 2　L/D=2.5

初期値 t=0 での流線は，下流側と上流側に時計回りの渦がひとつずつ，その間に反時計回りの渦がひとつ定在し，せん断層が自励振動している(Fig.6).

底面の速度が－0.4 の場合，大きな一つの循環渦となり定在し, L/D=2.0 と同様の状態で振動は停止した(Fig.7). 底面の速度が＋0.5 の場合，上部に時計回りの循環渦，下部に反時計回りの循環渦が定在する状態で振動は停止した(Fig.8).

また，t=0 より上流の角付近にあるジェット流を 0.5, 0.8 で与えた場合，大きな一つの循環渦となり定在し，振動は停止した(Fig.9).　ジェット流が 0.5 以下 1.0 以上では振動は止まらなかった.

4. 3　L/D=3.5

初期値 t=0 での流線は，下流側に時計回りの渦，上流側に反時計回りの渦がひとつずつ存在し，せん断層が自励振動している(Fig.10).

底面の速度が－0.5 の場合，L/D=2.5 などと同様に変化し，上流側の反時計回りの渦が消滅し大きな一つの循環渦となり定在し，振動は停止した(Fig.11).　底面の速度が正の場合，振動は止まらなかった.

また，t=0 より上流の角付近にあるジェット流を 0.5 から 1.5 まで与えた場合，振動は止まらなかった.

5　考察

開いたキャビティを過ぎる流れ場について，本研究で調べた全てのアスペクト比に対して底面を負の方向に駆動する場合は，負の方向のせん断応力によって時計回りのひとつの循環渦となり，自励振動を止める制御が可能であることを明らかにした．正の方向に駆動する場合は，L/D=2.0,2.5 については時計回りの渦が上部に，反時計回りの渦が下部に定在する状態になり，振動を止める制御が可能であることを明らかにした．またジェット流においても制御できることが分かった.

6　まとめと今後の課題

今回は弱圧縮性流れの式を用いたため，この式の精度をより高めることにより，音波の発生も解析出来るようにしたい.

参考文献

[1]M.Inagaki et al: Numerical Prediction of Fluid-Resonant Oscillation at Low Mach Number, AIAA JOURNAL, Vol.40, No.9 (2002), 1823-1829

[2]炭谷・前田 他: 車体周り流れと空力特性，ながれ 23(2004) 445-454

[3]井上 他: キャビティを過ぎる自励振動流の底面駆動を用いた制御の数値解析，第 21 回数値流体力学シンポジウム(2007)

[4]河村哲也: 流体解析Ⅰ，Ⅱ，朝倉書店，1996

[5]笹尾・西田 他: 新しい外力評価法を用いた仮想境界法による二次元円柱周りの流れの数値計算，第 19 回数値流体力学シンポジウム(2005)

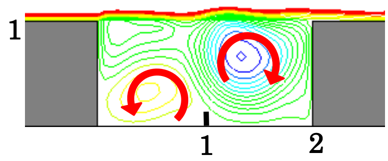
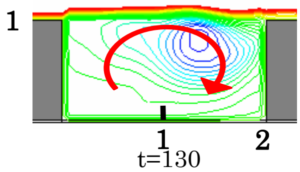
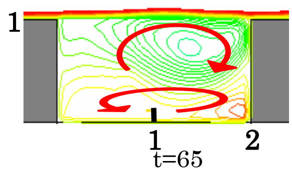


Fig.2 L/D=2.0　t=0

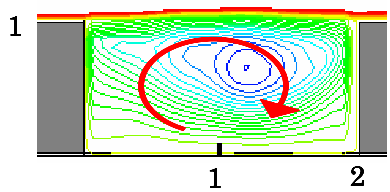


t=130



t=65

Fig.3 底面の速度=－0.5　Fig.4 底面の速度=+0.5



t=58

Fig.5 ジェット流=0.5

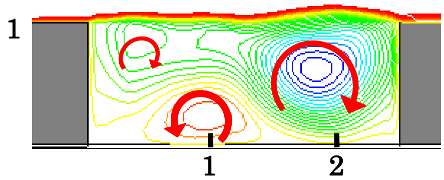
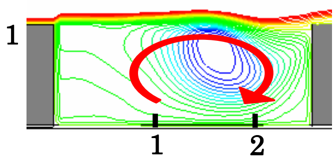
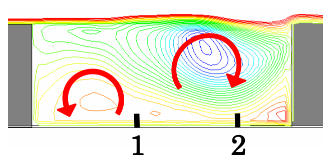


Fig.6　L/D=2.5　t=0

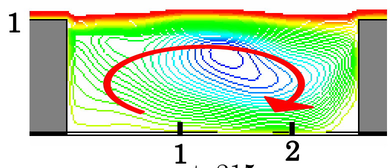


t=122



t=103

Fig.7 底面の速度=－0.4　Fig.8　底面の速度=+0.6



t=215

Fig.9 ジェット流=1.0

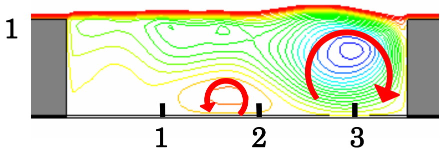
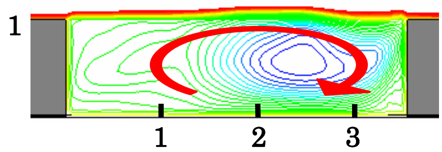


Fig.10　L/D=3.5　t=0



t=113

Fig.11　底面の速度=－0.5