

角柱まわりの流れから発生する空力音の受動制御

Passive Control of Aeolian Tones Generated by a Square Cylinder in a Uniform Flow

○ 中島吉隆 (東北大工), 畠山望 (東北大流体研), 井上督 (東北大流体研)

Yoshitaka NAKASHIMA* and Nozomu HATAKEYAMA** and Osamu INOUE**

*Graduate Student, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

**Institute of Fluid Science, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

The sound generated by a square cylinder in a uniform flow and its control using a splitter plate attached to the cylinder are investigated by the direct solution of the two-dimensional compressible Navier-Stokes equations. The characteristic features of generated sound and vortex shedding from the cylinder are examined for different heights of the plate. The results show that the vortical structure near the cylinder is changed by the plate, and the generated sound is also changed by the vortex motion around the cylinder. As the plate is closer to the upper surface of the cylinder, the sound waves are radiated more asymmetrically with respect to the direction of the uniform flow.

1. 緒言

一様流中に置かれた角柱まわりの流れでは、角柱上下から交互に渦が放出される。渦の放出される側に負の変動圧力パルスが発生し、その反対側に正の変動圧力パルスが発生する。そのため、渦放出に伴い正負の圧力パルスが角柱上下から交互に発生する。これらの圧力パルスは揚力・抗力変動を作り出すとともに、音波として音速で遠方に伝播することがわかっている¹⁾。このようにして発生する音波の制御には能動制御と受動制御が考えられるが、必要とされるエネルギーの問題から受動制御にかかる期待は大きい。そこで、本研究では、直接数値計算(DNS)によって物体近傍の複雑な渦運動を厳密に解き、遠方へと伝播する音波を直接捉えることにより、形状の違いによる渦運動の変化が音場に与える影響を解明し、空力音を受動的に制御する方法を探ることを目的とする。発生する音波と渦運動には密接な関係があるため¹⁾、渦運動を受動的に制御する手法として有効であることがわかっているスプリッタープレート²⁾を採用し、空力音の制御を目指す。

2. 問題設定

受動制御手法として Fig.1(a) に示すような、正方角柱の背面に板を付けた形状を考える。正方角柱の中心を原点とし、一様流方向に x 軸を取る。流れの物理量は正方角柱の一边の長さ D 、静止音速 c_∞ 及び一様流密度 ρ_∞ によって規格化し、一様流マッハ数を $M=U/c_\infty=0.2$ 、レイノルズ数を $Re=UD/\nu=150$ とする。観測点は上流方向から時計回りに取った極座標系 (r, θ) で定義する。計算を行う形状は、長さ $l=1.0$ 、厚さ $d=0.1$ の板をそれぞれ高さ $h=0.00, 0.25, 0.45$ に付けた3種類の板付き正方角柱である。

Fig.1(b) に示すような板を付けない角柱についても計算を行う。角柱の縦の長さを D 、横の長さを L とし、アスペクト比を $\alpha=L/D$ で定義する。制御の対象である $\alpha=1.0$ の正方角柱、ま

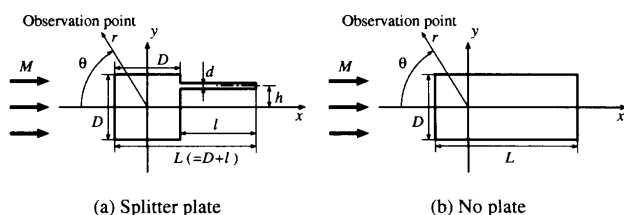


Fig.1 Schematic diagram of flow.

た比較のため $\alpha=2.0$ の長方角柱について計算を行う。原点は上流側の壁面から $D/2$ で定義し、アスペクト比に依らず上流側の壁面の x 座標が一定となるよう設定する。

3. 計算方法

基礎方程式は二次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式とする。音波を捉えるためには非常に高い精度が要求されることから、空間微分は8次精度 Padé 型コンパクトスキーム³⁾を用い、時間進行には4次精度 Runge-Kutta 法を用いる。壁面境界は断熱・滑りなし条件とし、遠方境界は数値的な反射を取り除くために Poinso & Lele による無反射境界条件⁴⁾を課す。

計算格子には非一様 L 型矩形格子を用いる。壁面近傍では境界層内の複雑な渦構造を捉えるために非常に細かい格子を用い、境界層及び板の厚みに対して十分な格子点数を分布させる。その外側には伝播する音波を十分捉えられるだけの格子幅を用い、ここまでは観測領域とする。さらに外側はバッファ領域とし、渦及び音波の減衰を図る。本計算では $|x|, |y| \leq 95$ を観測領域とし、妥当性を確認した計算格子を用いている。

4. 結果と検討

4.1 板を付ける効果

まず、後縁中央 ($h=0.00$) に板を付けた角柱と板を付けない角柱の計算結果を比較し、板を付ける効果について述べる。下面側から渦が放出され、物体に働く揚力が最小となる瞬間を $t^*=0$ とし、 $t^*=0$ における渦度場を Fig.2 に示す。板を付けた角柱 (Fig.2(b)) では、板後縁において、角柱前縁で剥がれた渦に対して逆回転の強い二次渦が形成される。また、板があることにより、正方角柱 (Fig.2(a)) に比べ、角柱背面からより後流側で、上面側からの渦と下面側の渦が干渉し合う。このような流れ場の違いに伴い、揚力・抗力係数は Fig.3 に示すようになる。板を付けることにより、板を付けない正方角柱より物体に働く力の変動は小さくなるが、 $\alpha=2.0$ の長方角柱ほどは小さくならない。また、揚力係数より求めた渦放出周波数 St は Table1 に示すようになる。板を付けた角柱の St は、正方角柱や長方角柱よりも

Table1 Comparison of the Strouhal number.

	No plate		Splitter plate		
	($\alpha=1.0$)	($\alpha=2.0$)	($h=0.00$)	($h=0.25$)	($h=0.45$)
<i>St</i>	0.151	0.148	0.136	0.140	0.145

小さい。

いづれの形状においても、周期的な渦放出に伴い二重極音が発生するが、音波の振幅及び波長は形状により異なる。それぞれの形状について、 $r=90$ における変動音圧の二乗平均 (RMS) を極座標表示して Fig.4 に示す。板を付けた角柱は、板を付けない正方角柱と比べ、発生する空力音は小さい。また、板を付けた角柱は、板を付けない角柱より St が小さいため、伝播する音波の波長はより長い。

4.2 板を付ける高さ h による効果

次に、板を付ける高さ h の違いによる音場の変化を述べる。Fig.5 は、 $h=0.00, 0.25, 0.45$ のそれぞれの形状について、 $r=90$ における変動音圧の RMS を極座標表示したものである。板が上部にあるほど (h が大きいほど) 一様流方向に対する形状の非対称性が強くなり、上面側と下面側から発生する音波はより非対称となる。また、空力音は特に下面側で減少する。 St は、Table 1 に示すように、板が上部にあるほど大きくなり、伝播する音波の波長は短くなる。

5. 結言

二次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式の DNS により、一様流中に置かれた板を付けた正方角柱まわりの流れから発生する空力音を捉え、板を付けない角柱との比較から板をつける効果を検証した。さらに、板を付ける位置が発生する空力音に与える影響について解析を行った。その結果、以下のような知見を得た。

- 正方角柱に板を付けることにより、物体に働く力の変動及び発生する空力音は小さくなる。また、 St は板を付けない角柱よりも小さくなり、伝播する音波の波長は長くなる。
- 板がより上部にあるほど、発生する音波は特に下面側で小さくなり、上下面でより非対称となる。また、 St は増加する。

以上から、渦放出が形状の変化によりある程度制御され、発生する音波もそれに伴い制御されることがわかった。

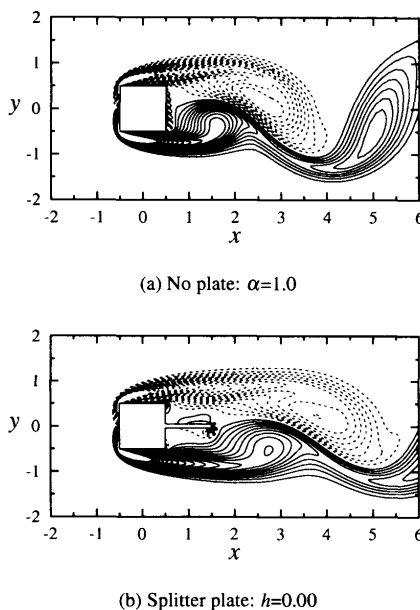


Fig.2 Vorticity field. —, $\omega > 0$; ---, $\omega < 0$; $\omega_{step} = 5 \times 10^{-2}$; $|\omega_{max}| \leq 1.0$.

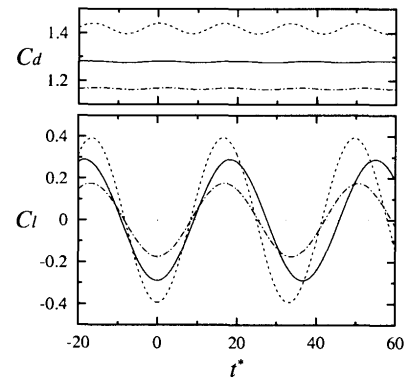


Fig.3 Time history of drag and lift coefficients. Splitter plate: —, $h=0.00$. No plate: ---, $\alpha=1.0$; - · - ·, $\alpha=2.0$.

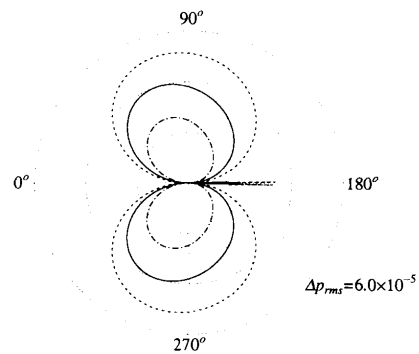


Fig.4 Polar plot of root mean square of the fluctuation pressure. Splitter plate: —, $h=0.00$. No plate: ---, $\alpha=1.0$; - · - ·, $\alpha=2.0$.

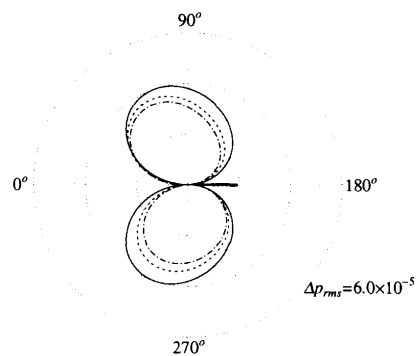


Fig.5 Polar plot of root mean square of the fluctuation pressure. Splitter plate: —, $h=0.00$; ---, $h=0.25$; - · - ·, $h=0.45$.

引用文献

- 1) 井上, 畠山, 大沼: 二重極音の発生メカニズムについて, 第 17 回数値流体力学シンポジウム, (2003) F6-2.
- 2) Kwon, K. & Choi, H.: Control of Laminar Vortex Shedding behind a Circular Cylinder Using Splitter Plates, Phys. Fluids, 8 (1996) 479-486.
- 3) Lele, S. K.: Compact Finite Difference Schemes with Spectral-like Resolution, J. Comp. Phys., 103 (1992) 16-42.
- 4) Poinot, T. J. & Lele, S. K.: Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows, J. Comp. Phys., 101 (1992) 104-129.