

臨界面を有する矩形柱まわりの流れの構造の検討

○中央大学 学生員 鈴木宏之 中央大学 正会員 平野廣和
 八戸高専 正会員 丸岡 晃 中央大学 正会員 佐藤尚次

1. はじめに

角柱まわりの流れについては、多くの研究がなされており、辺長比が変化した場合、ストローハル数 S_L が辺長比 2.8 付近¹⁾及び辺長比 6.0 近傍²⁾にて不連続的に変化することが指摘されている。特に辺長比 2.8 においては、低周波および高周波の S_L に加えて、それらの中間付近の S_L を示す 3 つの流れが存在することが指摘されており³⁾、非常に不安定な流れとなっている。

そこで、本研究では、辺長比 2.8 の断面の 3 次元解析を行い、 $B/D=0.5\sim 2.0$ の S_L の延長線付近の値を示す流れ (mode I)、 $S_L=0.12\sim 0.14$ 付近の値を示す流れ (mode II)、そして $B/D=3.0\sim 5.0$ の S_L の延長線付近の値を示す流れ(mode III)の 3 つの異なる流れが存在する不安定な流れの構造を把握することを目的とする。

2. 解析概要

本数値流体解析には、著者ら⁴⁾が提案している IBTD/FS 有限要素法を適用し、乱流モデルには LES の 1 つの手法である Smagorinsky SGS モデルを採用する。

(a) 支配方程式

構造物周りの風の流れは、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式で以下のように表す。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p - \nu \nabla^2 \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega \quad \dots(1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad \dots(2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$: 流速, t : 時間, $\mathbf{f}$: 外力, p : 圧力, ν : 動粘性係数を表す。

(b) 解析条件及び境界条件

図-1 に解析領域を示し、表-1 に断面モデルの要素分割数を示す。境界条件には、流入境界 Γ_1 で無次元流速である一様流速 1.0, 流出境界 Γ_2 では移流境界条件とする。また、側方 Γ_3 で slip, 物体周り Γ_4 で no-slip とし、断面軸方向の境界 Γ_5 は周期境界条件を用いている。またレイノルズ数 $Re=10^4$ とする。

3. 解析結果

(a) 辺長比 2.8 におけるストローハル数

図-2 に辺長比 2.8 における揚力の時刻歴変化を示し、図-3 に図-2 の揚力の時刻歴変化に対してスペクトル解析を行った結果を示す。図-3 より、図-2 に示す揚力の時刻歴には $S_L=0.036, 0.122, 0.159$ の 3 つの S_L が卓越していることがわかる。ここで、低周波成分を示す流れを mode I と高周波成分を示す流れを mode III、そして、それらの中間付近を示す流れを mode II とし、3 つの異なる流れが存在している。これは、岡島ら³⁾が指摘することと一致する結果が得られている。また、mode II の流れの特徴として、mode I や mode III に比べて、流速変動の相関性が低くなることが指摘されている。

次に、図-2 に示す 3 種類の流れ A~C の半周期に着目し、スペクトル解析を行った結果を図-4(A~C の流れでは周期が異なるため 2 軸で表記する)に示す。図-4 に示す A の流れのスペクトルは、mode I に対応する $S_L=0.036$ が卓越している。そして、B の流れのスペクトルは、mode II に対応する $S_L=0.122$ が表れ、C の流れのスペクトルは、mode III に対応する $S_L=0.159$ が表れており、A~C の流れは mode I ~ III に対応する S_L が顕著に表れていることがわかる。

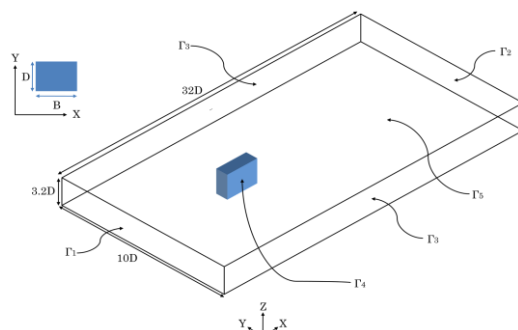


図-1 解析領域

表-1 物体周りの分割数及び節点数

モデル	辺長比	x方向分割数	y方向分割数	z方向分割数	総要素数
①	2.8	140	50	32	37960 × 32

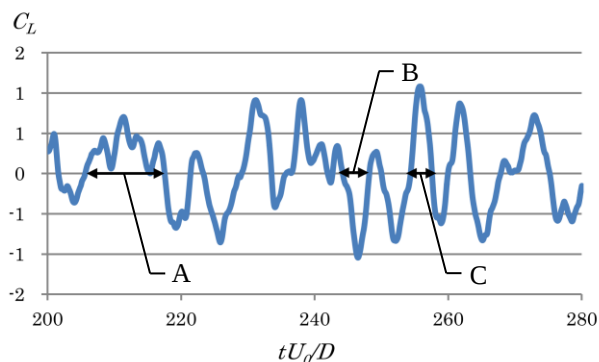


図-2 揚力の時刻歴(B/D=2.8)

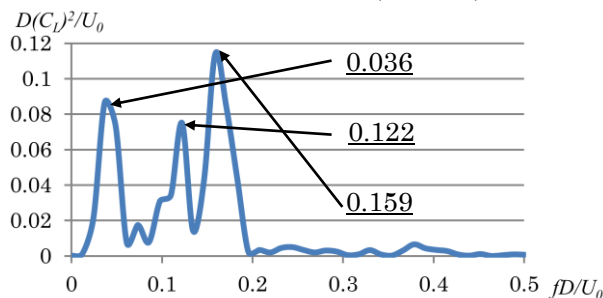


図-3 パワースペクトル

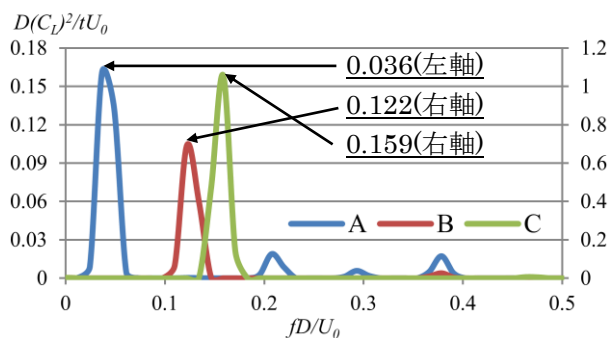


図-4 A~C の流れのパワースペクトル

キーワード: 矩形断面, ストローハル数, 数値流体解析

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816

fax.03-3817-1803

(b) mode I ~ III の流れの構造(平面上)

ここでは、前節より得られた mode I ~ mode III に対応する A ~ C の流れに着目し、mode I ~ III の平面上およびスパン方向に対する流れの構造の検討を行う。図-5 に、図-3 に示す 3 つの流れ A ~ C における瞬間圧力分布図それぞれを示す。ここで示す圧力分布図は、左側が揚力の絶対値が最大となった時、右側がその後の無次元時間 $t=2$ 経過した時の 2 つの瞬間である。また、図の赤い部分が正圧、青い部分が負圧を示し、濃くなるほど絶対値の高い値を示している。さらに、A、C の流れは、下側の剥離せん断層から渦放出、B の流れは、上側の剥離せん断層から渦放出をする際の流れである。

まず、図-5(a) の mode I に対応する A と図-5(c) の mode III に対応する C の流れに着目する。A の流れにおいて角柱下側の剥離せん断層から放出された渦 A1 は角柱背面まで巻き込み、その後大きく成長している。一方、C の流れでは、角柱下側の剥離せん断層から放出された渦 C1 は角柱背面まで巻き込まず、角柱後縁から離れ、渦の規模が縮小している。ここで、巻き込み渦の成長過程において、角柱前縁から剥離した初期の剥離せん断層と巻き込み渦が連なった状態にあることを考慮すると、これら 2 つの流れは、剥離せん断層と巻き込み渦の分離の時期が異なることが考えられる。そして、これが S_L の急激な変化を生じさせていると考えられる。

また、図-5(b) の mode II に対応する B の流れに着目すると、角柱上側の剥離せん断層から放出された渦 B1 および渦 B2 が観察される。渦 B1 は角柱背面に巻き込まず放出され、渦 B2 は角柱背面まで巻き込んでいる。そして後に、角柱背面まで巻き込んだ渦 B2 は消失し、渦 B1 のみが残っていることがわかる。このように B の流れでは、A、C の流れの特徴の双方が見られ、不安定な流れの状態になっていると考えられる。よって、mode II の流れは、mode I・III の流れの両方の性質を持つことで、 S_L は mode I・III の中間の値を示すと考えられる。

(c) mode I ~ III の流れの構造(スパン方向)

図-6 に、図-5 の左側に示す時の A ~ C の流れの 3 次元の瞬間圧力分布図を示す。ここで示す圧力分布図は、物体後方の渦構造に着目するため、負圧部分のみを表示したものであり、図-5 に示す矢印の方向から可視化を行ったものである。

図-6(a) の mode I に対応する A と図-6(c) の mode III に対応する C の流れに着目すると、物体後方における渦構造はスパン方向に対してほぼ一様に広がっていることが観察される。それに対して、図-6(b) の mode II に対応する B の流れに着目すると、物体後方の渦構造はスパン方向に対して一様に広がっておらず、スパン方向に対して部分的に渦が発生していることが観察される。以上より、mode II の流れでは、mode I や III に比べスパン方向の相関性が低くなるため、渦構造が一様に発生せず不安定な状態になっていると考えられる。

4. おわりに

本論文では、 $B/D=2.8$ を対象に 3 次元解析を行い、3 つの流れが生じる不安定な流れに関して検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) $B/D=2.8$ において、mode I ~ III に対応する 3 つの S_L が得られた。
- (2) $B/D=2.8$ における S_L の飛びについては、初期の剥離せん断層と巻き込み渦の分離過程が異なることで生じると推察される。
- (3) mode II の流れは、スパン方向の渦構造に乱れが観察され、相関性が低くなっているため、非常に不安定な状態になると推察される。

参考文献

- 1) 中口博, 橋本貴久裕, 武藤真理: 矩形断面の柱の抗力に関する実験, 航空学会誌, 16 巻 168 号
- 2) 岡島厚: 種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ, 日本風工学会誌, 17 号, pp1-19(1983)
- 3) 岡島厚, 上野久儀, 易東来, 中村透: 断面比 2-3 の矩形柱周りの流れにおけるレイノルズ数の影響 第 13 回風工学シンポジウム, pp.113-118(1994)
- 4) 丸岡他: 数値流体解析による断面辺長比 4 の矩形断面の空力応答特性に関する検討, 応用力学論文集 Vol.8, 2005

