

正弦的脈動流を受ける角柱放出渦の Lock-in

小園 茂平¹⁾・和田一洋²⁾

Vortex Shedding from Rectangular Cylinders in Sinusoidal Pulsating Flow

Shigehira OZONO, Kazuhiro WADA

Abstract

This paper describes the lock-in of the vortex shedding from a rectangular cylinder in sinusoidal pulsating flow. The side ratios d/h of the models used for measurements are varied over the range 0.6-2.5. Here, d is the depth and h is the height of the cylinder. Sinusoidal pulsating flow is created using a wind tunnel of multi-fan type, where the forced frequency is varied from 0 to 4.6Hz. Dimensionless amplitude ratio ε is set to 0.05, where $\varepsilon = \Delta U / (2\pi f d)$ and the pulsating component is expressed by $\Delta U \sin 2\pi f t$. The vortex shedding frequency tends to the line $f = 2f_s$, and eventually coincides with that line, meaning that lock-in commences somewhat prior to $f/f_{s0} = 2$, where f is the frequency of pulsating flow, f_s the vortex shedding frequency, and f_{s0} the natural vortex shedding frequency. For this range, the base pressure decreases significantly.

Key Words:

Wind tunnel of multi-fan type, Rectangular cylinders, Kármán vortex shedding, Base pressure, Lock-in

1. はじめに

一様流中で物体が面内振動する時の渦放出特性の変化に関する問題は多くの文献で取り上げられている^{1),2)}。それらには円柱振動と円柱後方渦列の発生振動とが同期する領域がある事やカルマン渦の自然渦放出振動数 f_{s0} の2倍近傍で円柱を振動させた場合、渦発生振動との間に同期現象が見られたことなどが報告されている。このような同期現象は近寄り流れが充分大きな振幅の周期的変動を持つ場合にも生じ、円柱や角柱³⁾⁶⁾で調べられている。本研究では角柱を固定し流体に正弦的脈動成分を与えた時の角柱からの放

出渦の挙動を考える。マルチファン型風洞を利用し乱流の素過程である正弦的脈動を生成し、いろいろな断面比 d/h (d , 流れ方向の辺長; h , 流れ方向と直角の辺長)の角柱に関して正弦的脈動が矩形柱から放出される渦を引き込む現象(Lock-in)を再現し、それらの機構を考察するのが目的である。

2. 実験装置

風洞装置には室内開放型押込式(エッフェル型)のマルチファン型風洞を使用した。最大測定部長さは15.45[m], 測定部断面は幅 2.54[m], 高さ 1.80[m]であり、送風機は横9列縦11段、合計99台で構成されている。風速設定は送風機の回転数により行なわれ、独立にコンピュータ制御が可能である。可搬胴の組み合

1) 材料物理工学科助教授

2) 材料物理工学科4年

わせにより風路長の変更が可能であり、本研究は測定部長さを 6m に設定した。

図 1 は実験状況を示す。本実験で使用した角柱は断面高さ $h=30$ [cm]、スパン長 $H=175$ [cm] である。木製角柱とウッドラックを組み合わせていろいろな辺長比 d/h の角柱を製作した。使用した辺長比は $d/h=0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ の 5 種類である。また、角柱の背面には一端を封じた静圧管を埋め込み、模型の中央に合わせて静圧孔を開けた。測定部入り口から 4.5[m] の地点に角柱の前面が来るように設置し、床面と天井に垂直にねじで固定した。端板は使用していない。

脈動流を生成する際には、風洞の吹き出し口から 4.5[m] の地点に線径 $5[\mu\text{m}]$ 、受感部長 1 [mm] の I 型プローブを設置した。気流の測定には熱線流速計 (Kanomax, CTA1011) を用いた。信号はサンプリング周波数 200 [Hz]、データ長 5000 個でロガー (KEYENCE, NR2000) を用いて AD 変換した。

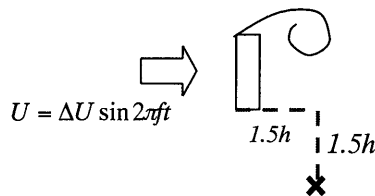


図 1 実験状況

渦放出振動数 f_s の測定は角柱のスパン中央の前縁角から $1.5h$ 流, $1.5h$ 方の地点に I 型プローブを設置して行なった。その地点で検出された気流変動を FFT (フーリエ変換) によりスペクトル解析した。信号のサンプリング周波数は 200 [Hz]、データ長は 20000 個に設定した。

背圧係数 C_{pb} は次式で定義される。

$$C_{pb} = \frac{P_b - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

ここで P_b は背圧, P_∞ は基準静圧, ρ は空気密度, U は流速である。また動圧 $\frac{1}{2} \rho U^2$ は全圧から静圧を引いて求めた。背圧 P_b は、静圧管から直径 3.5 [mm] 塩化ビニールチューブを経て差圧計 (COSMO 製, DM3500) に導き, NR-2000 で収録した。サンプリング周波数は 200 [Hz]、データ長は 20000 個で行なった。また本実験での h に基づくレイノルズ数は 10^5 であった。

3. 脈動流の生成

風洞の吹き出し口から 4.5 [m] の地点で正弦波 $U = \bar{U} + \Delta U \sin 2\pi ft$ を生成した。平均風速 \bar{U} は 5.0 [m/s]、振動数 f は $0.5 \sim 4.6$ [Hz]、振幅は $\Delta U = 0.0578 \sim 0.4224$ [m/s] に設定した。振幅 ΔU は無次元振幅 $\epsilon = \Delta U / 2\pi f d = 0.05$ と置きそれぞれの振動数ごとに決定した。本実験で使用した風洞のシステムでは、入力信号で想定された U , ΔU が風洞内で実際に生じる値とは必ずしも一致しない。よって入力信号を適宜チューニングし、目標の正弦波を生成した。図 2 はそれぞれ $f=2$ [Hz] で生成した脈動正弦波の流速の時系列とそのスペクトルピークである。得られた気流変動は正弦波に高周波成分が重畳されている。しかしスペクトルを見ると単一成분이卓越し高周波成分の影響は小さいと思われる。

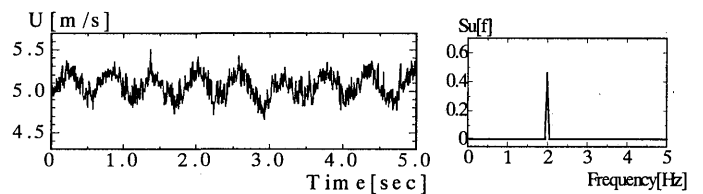


図 2 2.0Hz 流速時系列とスペクトルピーク

4. 実験結果

4.1. 背圧係数

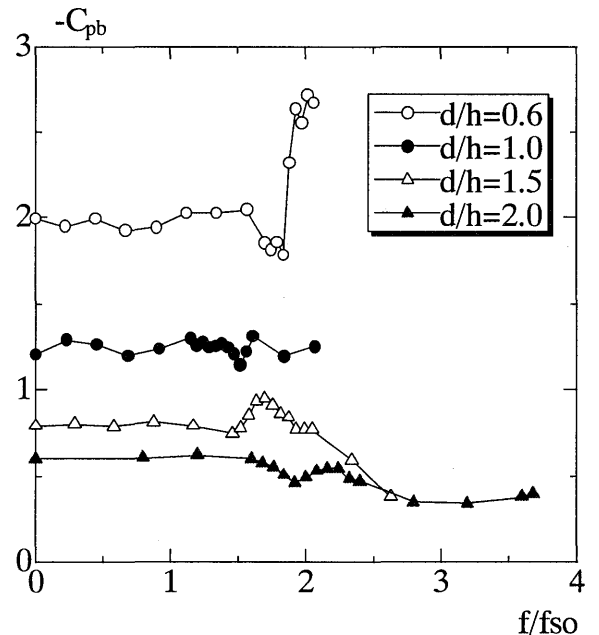
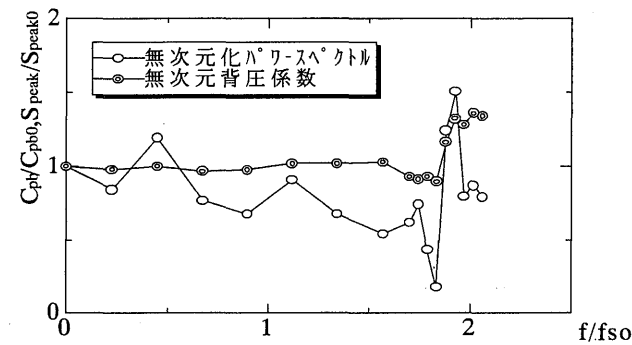


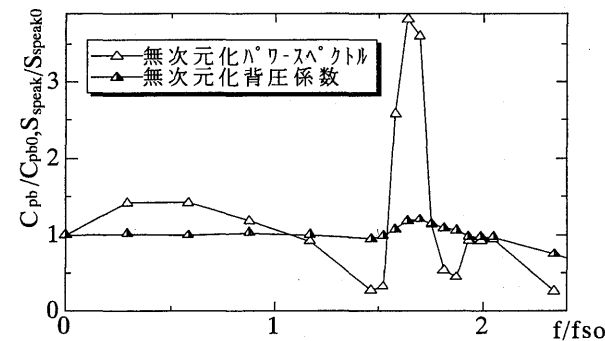
図 3 背圧係数 C_{pb} と周波数 f の関係

図3は脈動流の周波数に対する角柱の背圧の変化を示す。この図では脈動正弦波の周波数 f は自然渦放出周波数 f_{so} で無次元化した。Barnes ら³⁾による f_{so} の2倍値の近傍でカルマン渦が増強されるという報告に符合している。 $d/h=0.6$ では $ff_{so} \sim 2$ で背圧に著しい低下が見られる。 $d/h=1.0, 1.5$ では $ff_{so} \sim 1.7$ で小さいピークが見られるが $d/h=2.0$ ではピークは明瞭ではない。

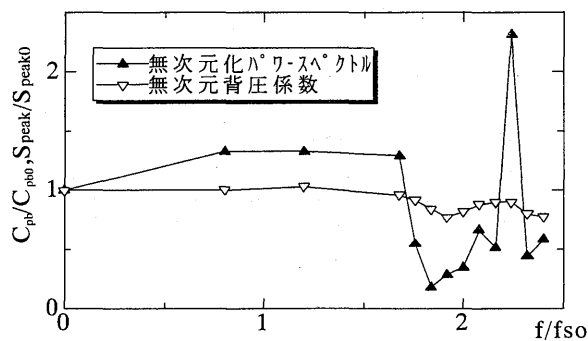
これらの挙動をさらに明らかにするため図4に脈動正弦波の周波数を横軸にし、背圧係数と気流変動のパワースペクトルのピーク値 S_{peak} を縦軸にプロットした。



(a) $d/h=0.6$



(b) $d/h=1.5$



(c) $d/h=2.0$ 図4 背圧係数とパワースペクトルの関係

背圧係数 C_{pb} は C_{pb0} で、スペクトルピーク値 S_{peak} は S_{peak0} で無次元化してある。但し、 C_{pb0} 、 S_{peak0} は定常流時の値である。 $d/h=0.6$ では $ff_{so} \sim 2$ で背圧が著しく低下するが、 $ff_{so}=2$ より少し小さい値でわずかな回復が見られる。スペクトルピーク値は $ff_{so} \sim 1.9$ で大きい値をとりそれより少し小さい値で明らかな減少が見られる。すなわち背圧とスペクトルピーク値の挙動はよく対応している。その他の断面比の場合も背圧が回復する時にはパワースペクトルのピーク値が下がり、背圧が下がる時にはパワースペクトルのピーク値が大きくなっていることが分かる。

図5では背圧係数の最小値を断面比ごとにプロットした。この図から断面比が小さい場合には背圧は脈動正弦波の影響で低下するが、断面比が大きくなるにつれて定常流の値にほぼ重なり d/h が2以上では逆に脈動流の場合の方がわずかながら回復する。この挙動は d/h が大きくなり Afterbody が渦形成を妨げることに起因すると考えられる。

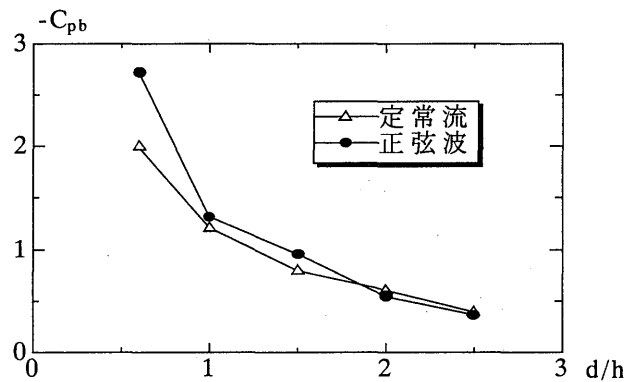


図5 背圧係数と断面比

4.2. f_s と f の関係

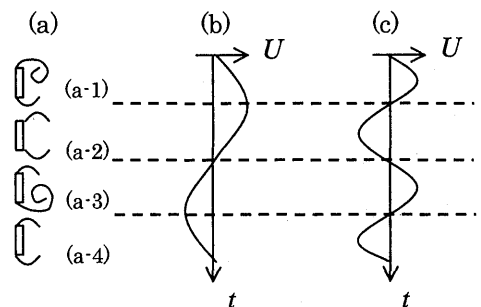


図6 渦の周期と正弦波の周期

渦放出パターンと脈動流の関係を図6に示す。渦放出の1周期の流れのパターンを(a-1)~(a-4)に模式的に示す。脈動正弦波の周波数が自然渦放出周波数と同じ程度である場合の気流変動を(b)に表わした。この場合は(a-1)では渦が放出されるときに正弦波が加速していることから渦が増強されると考えることができるが、(a-3)で再び渦が放出されるときに正弦波が減速されておりこの場合は渦の巻き込みが阻害されると考えられる。そこで脈動正弦波の周波数が自然渦放出周波数の2倍程度の場合の気流変動を(c)に考える。この場合は(b)の場合とは違い渦が放出される際には正弦波も加速されていることから渦の巻き込みが促進されると考えられる。よって渦の周波数と正弦波の周波数の比が1:2の場合に渦が増強されると考えられ、またこの状態により lock-in 現象が起こると考えた。

図7には正弦波の周波数と渦の周波数の変化を示した。図から分かるように、辺長比の比較的これらの断面比の場合は全て同じ様な傾向を示している。

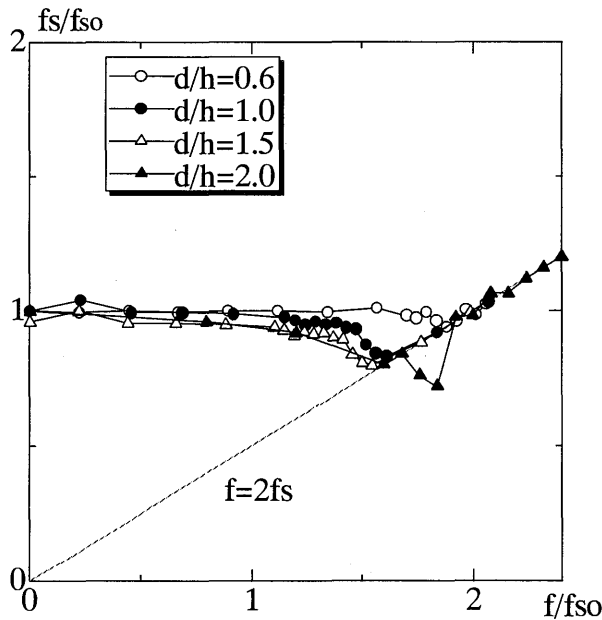


図7 f と f_s の関係

角柱からの渦放出周波数 f_s は f が低周波数のところでは自然渦放出周波数 f_{s0} と同じほぼ一定の値をとり、その後正弦波の影響を受け $f=2f_s$ の線上に引き込まれている。角柱からの渦放出周波数が外部の脈動に関連する周波数に変化する、すなわち lock-in 現象を確認することができた。すでに Barbi ら⁴⁾は円柱でこのよ

うな lock-in を報告しており辺長比が比較的小さい角柱でも同様の lock-in が認められたことになる。

また図3で背圧係数がいったん下がるところと図7で渦が脈動流に引き込まれ始める際の周波数が一致していることから、脈動流が渦を引き込む際には、いったん渦が弱まり、その後渦が強くなることが分かった。

この lock-in の様子は図8のスペクトルの変化を見ても確認することができる。図8は $d/h=1.0$ の場合であるが他の辺長比の場合も同様であった。

図9は $d/h=2.5$ の場合の f と f_s の関係を示す。この断面比の場合は Afterbody の張り出しが大きく渦の放出モードが変化するものと考え、図9に別に示した。

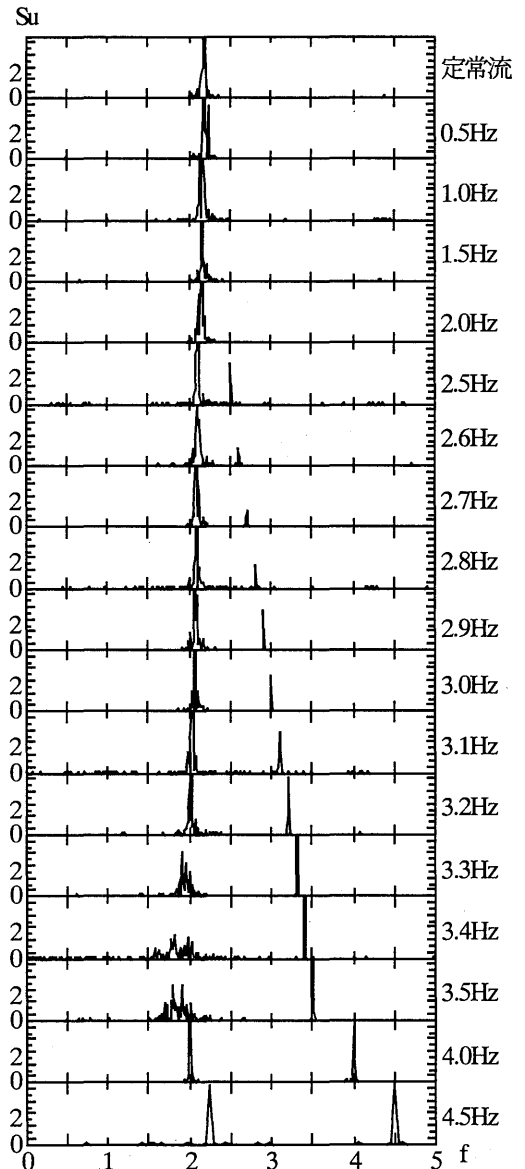


図8 1.0Hz スペクトルの変化

この断面比の場合は図7の比較的小さい辺長比の角柱に見られた $f=2f_s$ へのlock-inは見られず、 $f=1/2f_s$ 、さらに高周波数の f では $f=1/3f_s$ にlock-inされた。渦放出モードが関わっていることは確かであるが、このような特性がなぜ生じるのかはこのデータだけでは判然としない。

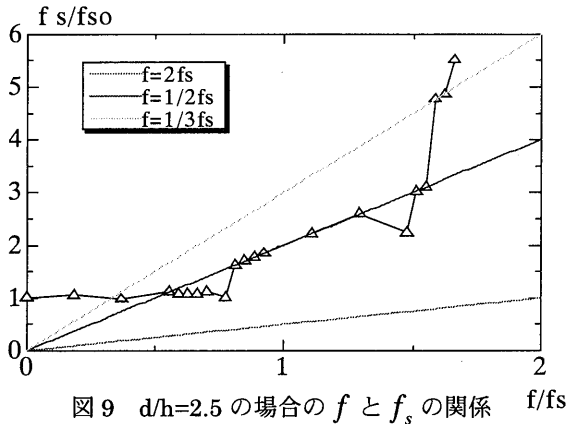


図9 $d/h=2.5$ の場合の f と f_s の関係

5. 結論

- 1) $d/h=0\sim 2.0$ の比較的小さな辺長比の角柱では、正弦的脈動流は $f\sim 2f_s$ の線に角柱からの渦放出周波数を引き込む(すなわち lock-in する)。脈動流が渦を引き込み始める時はいったん渦が弱くなり、その後渦放出が増強される。
- 2) $d/h=2.5$ の場合は $f\sim 2f_s$ でなく $f=1/2f_s$ や $f=1/3f_s$ に引き込まれる。これは Afterbody のはり出しにより渦の放出モードが変わったと考えられる。

現象と流れパターンの関係を解明する事が今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、宮城弘守助手をはじめ多くの先輩方に多くの助言を頂きまして、ここに深謝申し上げます。

参考文献

- 1) Y. Tanida: Stability of a circular cylinder oscillating in uniform flow or in a wake, J. Fluid Mech. Vol. 61, part 4, 769-784, 1973
- 2) M. Tatsuno: 流れ方向に振動する円柱後方の渦列, 九州大学応用力学研究所報, 第 39 号, 25-37, 1972
- 3) F. H. Barnes, I. Grant: Vortex shedding in unsteady flow, J. of Wind Eng. and Ind. Aero., 11, 335-344, 1983
- 4) C. Barbi: Vortex shedding and lock-on of a circular cylinder in oscillating cylinder—Part 2. Mode competition in the near wake. J. Fluid Mech. 191, 225-245, 1988
- 5) B. J. Armstrong: The effect of perturbation on the flow over a bluff cylinder, Phys. Fluids, Vol. 29, No. 7, 1986
- 6) I. P. Castro: Vortex shedding in oscillatory flow: geometrical effects, Flow Meas. Instrum. Vol. 3, No. 3, 1992