自由乱流混合層内にある正方形柱の流体力学的特性*
(第2報, 変動圧力および近より流れの特性)

谷口清一**, 宮越勝美**, 堂田誠治***

Characteristics of Fluid Forces Acting on a Square Cylinder in a Free
Turbulent Mixing Layer
(2nd Report, Characteristics of Fluctuating Pressure and Approaching Flow)

by Seiichi TANIGUCHI, Katsumi MIYAKOSHI, and Seiji DOHDA

The characteristics of the fluctuating pressures on the surfaces of a two-dimensional square cylinder, and the approaching free turbulent mixing flow to the cylinder were experimentally investigated when the cylinder was placed in two sections of the free turbulent mixing layer. The power spectrum and cross-correlation of the fluctuating pressures on the upper and lower surfaces were larger at $\eta \approx -0.32$ and -0.1 , where the fluctuating forces and pressure attained their maximum values. It was also found that the flapping of the mixing layer was induced by the vortexes shedding from the cylinder and made these vortexes intense particularly at the above positions.

Key Words: Unsteady Flow, Fluid Vibration, Fluctuating Pressure, Power Spectrum, Cross-Correlation, Phase Averaging, Square Cylinder, Free Turbulent Mixing Layer

1. 緒 言

前報⁽¹⁾では, 自由乱流混合層内およびその近くに設置した二次元正方形柱に作用する流体力を調べた結果, 変動揚力係数, 変動抗力係数 $\bar{C}_L$, $\bar{C}_D$ の特性が, 正方形柱一辺の長さ h と混合層厚さ δ との比 h/δ によって異なることが明らかになった。すなわち, $\bar{C}_L$, $\bar{C}_D$ - η 曲線は $h/\delta \leq 0.62$ の範囲で相似形状になるが, この値を超えると h/δ の影響が現れ, $\bar{C}_L$, $\bar{C}_D$ には $\eta \approx -0.1$ に極大値が存在し, $\eta \approx -0.05$ になると急激に減少する特徴がある。これらの物理的要因を明らかにするためには, 積分量としての流体力のみならず局所的成分である圧力の性質および周辺流れの構造を知る必要がある。

本研究は, 前報に続いて混合層の影響を受ける二次元正方形柱表面上の変動圧力を測定して, その統計量を解析するとともに, 正方形柱への近より流れの性質を位相平均法によって調べ, 変動流体力の特性について検討したものである。

2. 使用記号

ここでは, 前報⁽¹⁾で用いた以外の使用記号を示す。

$\bar{C}_p$: 変動圧力係数 $= \bar{p}/(1/2\rho U_0^2)$

p : 正方形柱表面上の圧力 $= \bar{p} + \langle p \rangle + p'$

$\bar{p}$: 変動圧力の RMS 値

R_{du} : p_u^* , p_u^* の相互相関係数 ($p^* = \langle p \rangle + p'$)

u, v : x, y 方向の速度成分

ϕ : 位相角

η_0 : 正方形柱中心の η 座標

添 字

u : 正方形柱上面

d : 正方形柱下面

—: 時間平均量

$\langle \rangle$: 位相平均量

' : 微小変動量

3. 実験装置および実験方法

3.1 供試風洞および混合層 実験に用いた風洞は前報⁽¹⁾と同一なのでその詳細は省略する。主流速度 U_0 は 15 m/s, レイノルズ数 $Re (= U_0 h / \nu)$ は 3.9×10^4 である。本実験に先立って風洞出口の一部を改修したために, 前回と同一断面での混合層厚さに変化が

* 昭和60年11月2日 東北支部仙台地方講演会において講演, 原稿受付 昭和60年4月18日。

** 正員, 北見工業大学 (〒090 北見市公園町165)。

*** 准員, 北見工業大学。

あったが、その特性 (u/U_0 , $\bar{u}/U_0-\eta$) は同じであった。表1に測定2断面に関する混合層の諸量を示す。ここに η は、 $\eta = (Y - Y_{1/2}) / (X - X_0)$ で定義される無次元変数であり、 $Y_{1/2}$ は u が U_0 の1/2となる Y 座標、 X_0 は混合層の仮想原点である。

3.2 供試正方形柱および測定機器 変動圧力測定用正方形柱はその一辺の長さ h が40 mmであり、前回と同一寸法である。正方形柱の対向面中央(図1)に設けられた一対の圧力孔(直径0.8 mm)には半導体形圧力変換器が直結しており、変動圧力の測定に用いた。圧力変換器からの出力は増幅器を経由してアナログデータレコーダに記録され、その後スペクトルアナライザなどによってRMS値、パワースペクトル、相互相関係数の解析を行った。また、変動流体力の特性を明らかにするために、X形熱線プローブを用いて正方形柱上流側 ($x/h = -1.5$) における断面の流速を測定した。X形プローブは2台の定温度形熱線流速計によって作動され、その出力は後述する基準圧力信号と同時にアナログデータレコーダに収録される。データレコーダからの再生信号をA-D変換器によって5 KHzのサンプリング周波数でデジタル化(12 bit)し、マイクロコンピュータを用いて位相平均法による解析を行った。

3.3 位相平均法 近より流れの瞬間速度 u, v をそれぞれ

$$u = \bar{u} + \langle u \rangle + u', \quad v = \bar{v} + \langle v \rangle + v'$$

とする。ここに、 $\bar{u}, \bar{v}$ は時間平均量、 $\langle u \rangle, \langle v \rangle$ は位相平均量および u', v' は $\langle u \rangle, \langle v \rangle$ に重畳する微小変動量である。位相平均法による流れの解析は、多くの研究者によって組織的構造を有する流れ場に適用されているが、そのための基準信号として物体表面の圧力変

動⁽²⁾⁽³⁾、後流外層部の非回転流れ⁽⁴⁾および後流内の速度変動⁽⁵⁾⁽⁶⁾などがある。本実験では、変動揚力と近より流れの相互関係を調べるために、変動揚力の局所的成分である正方形柱下面中央の変動圧力(図1の p_d , p_d は p_u より変動振幅が大きい)を基準信号に採用した。変動圧力は、あらかじめパワースペクトル解析によって求められた卓越周波数を中心とするデジタルバンドパスフィルタによって、高周波および低周波成分を除去したのちに基準信号とした。この信号の一周期分(360°)を72等分(5°ピッチ)に分割して、同位相に対応するX形プローブからの信号を200回加算を行って平均化を行った。なお、平均回数の影響を調べるために100~600回の範囲で加算回数を変化させたが、200回を越えるとその結果に顕著な差はなかった。

4. 実験結果および考察

4.1 変動圧力 測定2断面 $h/\delta = 1.053$ および0.606に関する変動抗力係数 $\tilde{C}_D$ 、変動揚力係数 $\tilde{C}_L$ と η との関係を図2, 3に示す。これらの分布形状は前報⁽¹⁾での $h/\delta = 1.044$ および0.617の結果とほぼ同じであり、前報で指摘した2領域を代表している。以下はこの2断面に関する正方形柱上下面の変動圧力の特性を中心に考察する。

図4は、正方形柱上下面中央での変動圧力のRMS値をその係数形 $\tilde{C}_p$ で η に関して示したものである。 $\eta \approx -0.1$ において認められる $h/\delta = 1.053$ の場合の極

表1 測定断面における混合層厚さ

Section No.	$X - X_0$ mm	X mm	δ mm	h/δ
1	400	335	38.0	1.053
2	700	635	66.0	0.606

図1 主な記号および座標の定義

図2 変動抗力係数 $\tilde{C}_D$ と η との関係

図3 変動揚力係数 $\tilde{C}_L$ と η との関係

大値, 0.606 の場合のステップ状分布は $\bar{C}_L$ の状態に類似している。また, 上下面での $\bar{C}_p$ の差は混合層厚さ δ が薄い場合では小さいものの, 厚くなると顕著になりいずれも混合層高速域にある下面での値が大きい。これは, 下面前縁ではなく離せん断層が上面よりも強いことを示している。

変動圧力のパワースペクトル $P(f)$ は

$$\int_0^\infty P(f)df = \bar{p}$$

として定義される。ここに, f は変動周波数である。図5は, $P(f)$ の各 η における最大値をポテンシャルコア中心での値 P_0 で無次元化して表したものであり, パワースペクトルの卓越周波数に関する集中割合を示す。 $h/\delta=1.053$ の P_u/P_0 , P_d/P_0 はともにポテンシャルコア中心を離れた位置で最大になるが, ポテンシャルコア内部に正方形柱がある場合でも, 放とうずは混合層によって励起され強められているものと考えられる。この傾向は $h/\delta=0.606$ にも認められるが顕著ではない。また, $\eta \approx -0.1$ におけるパワースペクトル ($h/\delta=1.053$ の場合) も P_0 と同程度の大きさになり, この位置においても振動のエネルギーは放とうずの周波数に集中している。しかし, これら二つのピーク値の間のパワースペクトルは著しく小さい。これらの詳細

は後述する。

正方形柱上下面における変動圧力 p_u^* , p_d^* の相互相関係数 R_{du} は

$$R_{du} = \overline{p_d^* p_u^*} / \sqrt{\overline{p_d^{*2}} \overline{p_u^{*2}}}$$

である。図6はこのようにして求めた R_{du} を η に関して示したものである。 $h/\delta=1.053$ の R_{du} の絶対値は, $\eta \approx -0.32$, -0.1 において大きな値となり, 前述したようにこれらの位置では強められた周期的放とうずの存在を裏付けている。しかし, $h/\delta=0.606$ ではそのような傾向はなく, R_{du} は η の増加とともに単調に減少して $\eta \approx 0.05$ でほぼ零となる。この η の位置は, 前報

図6 相互相関係数 R_{du} と η との関係

図4 変動圧力係数 $\bar{C}_p$ と η との関係

図5 パワースペクトルと η との関係

(a) $h/\delta=1.053$

(b) $h/\delta=0.606$

図7 近より流れの時間平均成分
(測定位置 $x/h=-1.5$, η_0 : 正方形柱中心位置)

で示したストローハル数 S_r の消滅点でもある。

混合層厚さ δ が正方形柱一辺の長さ h と同程度の大きさになると、ポテンシャルコア中心を離れた二つの位置 ($\eta \approx -0.32, -0.1$) において、強い周期性を有する放とうずが形成されることが明らかになった。これらは、いずれも放とうずが混合層によって励起されることに基づくものと考えられる。しかし、 $\eta \approx -0.17$ に正方形柱がある場合には、放とうずの強さは弱められ変動流体力も小さくなる。つまり、正方形柱と混合層との相対位置によって両者の干渉の程度は大きく変化してくる。このことを検討するために、近より流れの性質を調べてみた。

4.2 近より流れの特性 図7(a), (b)は、それぞれ $h/\delta = 1.053, 0.606$ に関する近より流れの時間平均速度分布を示したものである。これらの図の横座標 η は、正方形柱設置断面における値である。 $\bar{u}/U_0$

の分布には、正方形柱設置位置 η_0 において速度欠損が認められ、その最大値は η_0 の変化にもかかわらずほぼ一定 (図7(b), $\eta_0 = -0.045$ を除く) になっている。 $\bar{v}/U_0$ は $\eta \leq \eta_0$ で負、 $\eta \geq \eta_0$ で正となり、正方形柱前方の流れがその上下に分岐していることがわかる。

図8(a)~(c)には、正方形柱前方 ($x/h = -1.5$) における速度分布の位相平均量 $\langle u \rangle/U_0, \langle v \rangle/U_0$ を位相角 ϕ について一周分 (360°) を示してある。図8中の $\langle p \rangle$ は位相平均に用いた正方形柱下面中央の基準圧力信号である。図8(a)の $\langle u \rangle/U_0$ は、 $\eta \approx -0.42 (= \eta_0)$ を境にして位相が 180° だけ異なっている。これは、正方形柱両側面から交互にはく離して形成される周期的放とうずによる速度変動を反映している。 $\langle v \rangle/U_0$ に関しては、 $\langle v \rangle \geq 0$ のときに $\langle p \rangle \geq 0$ となってその位相はほぼ一致している。このことは、変動圧力がその周辺の流れ速度変動に誘起されることを示して

図8 近より流れの位相平均量
($h/\delta = 1.053$, 測定位置 $x/h = -1.5$)

いる。混合層内 ($\eta \geq -0.1$) に着目すると、この領域における $\langle u \rangle$ の周期変動はないが、 $\langle v \rangle$ にはめいりょうな周期性が存在している。つまり、正方形柱からの放出口に伴って混合層が主流と直角方向に振動していることがわかる。また、 $\langle v \rangle$ の振幅は $\eta_0 \approx -0.32$ で極大となり、図 8 (b) の $\eta_0 \approx -0.17$ で極小となる。しかし、図 8 (c) の $\eta_0 = -0.108$ になると、 $\langle u \rangle / U_0$, $\langle v \rangle / U_0$ の振幅は著しく増加していることがわかる。したがって、 $h/\delta = 1.053$ の場合 $\eta = -0.32$ および -0.1 に正方形柱が存在すると、放出口による混合層の振動が大きくなり、逆にこの振動が放出口を強める相互作用によって、当該位置における正方形柱の変動流体力を大きくするものと考えられる。しかし、 $\eta_0 \approx -0.17$ においては、正方形柱が混合層の振動を阻止し変動流体力も小さくなると考えられる。なお、 $\eta \approx -0.1$ を除く変動流体力の極大・極小値を与える η は h/δ によって変化する⁽¹⁾。 $h/\delta = 0.606$ の場合には、混合層の振動現象はめいりょうでなく、その結果この領域 ($h/\delta \leq 0.62$) での変動流体力は η の増加 (近より流れの流速の減少) とともに単調に減少する。

5. 結 論

自由乱流混合層内に二次元正方形柱を設置し、その変動流体力の特性を、表面変動圧力、近より流れの変

動速度分布を測定して検討した。その結果を要約するとつぎのようになる。

(1) 変動圧力係数 $\bar{C}_p$ の η に関する分布は、上面ともに変動揚力係数 $\bar{C}_L$ の分布形状と類似しており、その値は下面の方が上面より大きく、両者の差は h/δ が小さくなるほど顕著になる。

(2) 変動流体力が極大値を示す二つの位置 ($h/\delta = 1.053$, $\eta \approx -0.32$ および -0.1) においては、パワースペクトルおよび相互相関係数値がともに大きく、これらの位置では強い放出口が発生する。

(3) 近より流れとしての混合層は、放出口によって主流と直角方向に振動する。特に、その振幅は変動流体力が極大となる位置で大きくなる。

本研究を遂行するに当たり、当時卒論生の渡辺高宏〔現富士ファコム制御(株)〕および茂木悟〔現ファナック(株)〕の両氏に協力を戴いた。ここに深く感謝します。

文 献

- (1) 谷口・ほか2名, 機論, 51-467, B (昭60), 2265.
- (2) Cantwell, B. J., *Ph. D. thesis, Calif. Inst. Tech.*, (1976).
- (3) Cantwell, B. J. and Coles, D., *J. Fluid Mech.*, 136 (1983), 321.
- (4) Davies, M. E., *J. Fluid Mech.*, 75 (1976), 209.
- (5) 木谷・松村, 機論, 50-458, B (昭59), 2563.
- (6) 木谷・松村, 機論, 51-463, B (昭60), 775.