

Experiments and Numerical Simulations of Flow Around a Bluff Body in Oscillatory Flow

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-12-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Okajima, Atsushi メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00049366

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



振動流中におけるブラフな断面物体の流力特性 に関する実験及び数値シミュレーション

(研究課題番号 08455089)

平成 8 ~ 平成 10 年度科学的研究費補助金(基盤研究(B)(2))研究成果報告書

平成 11 年 3 月

東京大学学術出版会



表者 岡島 厚
学・工学部・教授)

8000-73566-0

平成10年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）

研究成果報告書

研究課題番号：08455089

研究課題：振動流中におけるブラフな断面物体の流力特性に関する実験
及び数値シミュレーション

はしがき

近年のウォーターフロント開発にみられる海洋開発の増大に伴い、往復振動する流れの中に配置されたブラフな断面形状の物体周辺流れ及びその流力特性は、潮流・波などに曝された橋脚やパイルなど海洋構造物の設計の基礎研究として重要であり、海洋構造物が破損、漂流した例も少なくない。また、工事中に発生する汚濁拡散に関連して構造物周辺流れの研究は、海洋環境汚染、汚濁の問題解決として環境問題の中でも緊急を要する課題である。

しかし、円柱以外の断面形状のブラフボディに対しては実験データが極めて少なく、また比較的低いKC数領域のみを対象とした研究が多く、定量的な流体力と可視化に基づいた流れパターンとの対応についての検討は未だ不充分のようである。

本研究では、実験データ量の比較的少ない高いカーペンター数領域を含む広い範囲のカーペンター数領域を対象とし、U字管形振動流発生装置内の振動流中に固定された平板、円柱、正方形そして矩形断面形状及び平板等のブラフな2次元物体に作用する振動方向及び直角方向流体力の同時測定と、さらに差分法による数値シミュレーションを行って、詳細な流れの様相を調べ、断面形状、迎え角、レイノルズ数、カーペンター数などの影響について研究した。

特に、一様流中のブラフな物体の流体力などの静特性と比較して振動流中の物体の流力特性に注目した。例えば、種々な矩形柱断面の振動流中の流体力と一様流中の流体力を詳細に比較することによって、矩形柱特有の「中口ピーク」の発生メカニズムにおける流れの非定常性の観点から新たな考察を得た。さらに、円柱及び矩形柱周りの3次元数値シミュレーションを行い、低いカーペンター数で生ずる振動流方向に軸を持ち、スパン（軸）方向に一定のピッチで形成される渦（Longitudinal Vortex）を数値シミュレーションで始めて再現し、実験結果と比較し、3次元数値シミュレーションの有効性を示した。

以上、本研究は、振動流中におけるブラフな断面物体の流力特性の基礎的な研究を行ったものであり、平成8、9、10年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）の援助を受けた。

研究組織

研究代表者：岡島 厚（金沢大学 工学部 教授）
研究分担者：上野 久儀（金沢大学 工学部 教授）
木村 繁男（金沢大学 工学部 教授）
木綿 隆弘（金沢大学 工学部 助教授）

研究経費

平成 8 年度	3,700 千円
平成 9 年度	3,600 千円
平成 10 年度	500 千円
計	7,800 千円

研究発表

(1) 学会誌など

1-1) Okajima,A., Matsumoto,T., Kimura,S.

Force Measurements and Flow Visualization of Bluff Bodies in Oscillatory Flow,
J. Wind Eng.and Industrial Aerodynamics, 69-71, pp.213-228, (1997. 10).

1-2) 岡島 厚, 松本達治, 木村繁男

振動流中の円柱及び正方形柱に作用する流体力の測定と流れの可視化,
日本機械学会論文集, 63, 615B, pp.3458-3476, (1997. 11).

1-3) Okajima,A., Matsumoto,T., Kimura,S.

Aerodynamic Characteristics of Flat Plates with Various Angles of Attack in Oscillatory Flow,
JSME Int. J., B, 41, 1, pp.214-220, (1998, 2).

1-4) Okajima,A., Matsumoto,T., Kimura,S.

Force Measurements and Flow Visualization of Circular and Square Cylinders in Oscillatory Flow,
JSME Int. J., B, 41, 4, pp.796-805, (1998. 11).

(2) 口頭発表

2-1) 松本達治, 岡島 厚, 木村繁男, 中筋信弥

振動流中の角柱及び平板に作用する流体力と流れ,
日本機械学会第 73 期通常総会講演会 講演論文集(III), 習志野, pp. 300-301, (1997. 3-4).

2-2) A. Okajima, T. Matsumoto, N. Nakasuji, S. Kimura

Force Measurements on Bluff Bodies and Flow Visualization in Oscillatory Flow.

Proc. of 3rd International Colloquim on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Blacksburg,
VA, USA, pp. CI9-CI, (1996. 8).

- 2-3) A. Okajima, T. Matsumoto, S. Kimura, N. Nakasui
Aerodynamic Characteristics of Flat Plates with Various Angles of Attack in Oscillatory Flow, 第19回国際応力会議, 京都, (1996. 8).
- 2-4) 安田孝宏, 岡島 厚, 木村繁男
振動流中における円柱周りの流れの数値シミュレーション,
日本機械学会第74期通常総会講演会 講演論文集, 東京, pp. 300-301, (1997. 3-4).
- 2-5) 岡島 厚, 安田孝宏, 木村繁男
振動流中の円柱周りの流れの数値シミュレーション (低いKC数の場合),
日本機械学会創立100周年記念北陸信越支部記念式典・講演会・公開シンポジウム講演論文集, 金沢, pp. 195-196, (1997. 9).
- 2-6) A. Okajima, T. Matsumoto, S. Kimura,
Aerodynamic Characteristics of Flat Plates with Various Angles of Attack in Oscillatory Flow,
JSME CENTENNIAL GRAND CONGRESS. Proc. of International Conference on Fluid Engineering, Vol.1, pp. 513-518, 東京, (1997. 7).
- 2-7) Okajima,A., Yasuda,T., Matsumoto,T.
Experimental and Numerical Studies on Flow and Fluiddynamic Forces of a Circular Cylinder Submerged in Oscillatory Flow, Proc. of 3rd Int. Conf. on Fluid Dynamic Measurement and Its Applications, Beijing, China, pp.277-282, (1997. 10).
- 2-8) Okajima,A., Yasuda,T.
Numerical Study of Oscillatory Flow around Circular and Square Cylinders,
Proc. of the 1997 Int. Mechanical Eng. Congress and Exposition, Dallas, U.S.A., pp.127-134, (1997. 11).
- 2-9) A. Okajima, T. Matsumoto, S. Kimura
Experimental study on flow characteristics of a rectangular cylinder with cross-section of various width/height ratios submerged in oscillatory flow.
Proc. of 1998 ASME FLUIDS ENGINEERING DIVISION (ANNUAL SUMMER MEETING), Washington, D.C., pp. 20, (1998. 6).
- 2-10) 安田孝宏, 岡島 厚, 木村繁男, 木綿隆弘
振動流中の角柱周りの流れの3次元数値シミュレーション,
日本機械学会第76期全国大会講演会 講演論文集, 仙台, pp. 300-301, (1998. 10).

研究成果

目 次

第1章 総 括

1

第2章 振動流中におけるブラフな断面物体の流力特性に関する実験

2.1 振動流中における円柱の流力特性に関する実験 (1-2、1-4)	5
2.2 振動流中における種々な迎え角の正方形柱の流力特性に関する実験 (1-1、2-2)	24
2.3 振動流中における平板の流力特性に関する実験 (1-3、2-3、2-6)	44
2.4 振動流中における矩形柱の流力特性に関する実験 (2-1、2-9)	57

第3章 振動流中におけるブラフな断面物体の流力特性に関する数値シミュレーション

3.1 振動流中における円柱の流力特性に関する数値シミュレーション (2-4、2-5、2-7)	66
3.2 振動流中における角柱の流力特性に関する数値シミュレーション (2-8、2-10)	76

第1章 総 括

往復運動する流体中に固定されたブラフボディの周りの流れは、出発流れの際に見られる発達する剥離流れや後流領域などの非定常な物体周辺流れを含み、その流力特性は複雑に変化する。このような流れの代表的な例は、橋脚やパイプラインなどの海洋構造物周りの流れに見られるが、潮流・波などの流れによる流体力やその流れ場については未だ不明なことが多く、構造物が破損・漂流した例も少なくない。

振動流では、流速が正弦波状に変化することにより周期的に流れが反転し、この反転した流れが流体力や渦放出に複雑な影響を及ぼす。特に振動流中では先の半周期に発生した渦と次の半周期に発生する渦との干渉過程が振動振幅により様々に変化する。

この様な振動流中にある構造物に作用する流体力に関する研究として、円柱についての実験的研究は、Sarpkaya や田才の円筒海洋構造物に作用する流体力の解説にあるように、今日まで数多くの研究が報告されている。Sarpkaya は、広い KC 数(Keulegan-Carpenter number) ($=2\pi a/D$; a :振動振幅, D :投影長さ) とストークス数 β ($=D^2/vT$; v :動粘度, T :振動周期)範囲で流体力の測定を行い、また Sortland は、振動方向及び直角方向流体力の同時測定が可能な流体力変換器を用い、モリソンの式に基づき各流体力係数を明らかにした。石綿・大橋は往復振動流中の円柱に作用する流体力を測定するだけでなく、さらに数値解析によって流体力を算出した。さらに、Obasaju らは、 $KC=4 \sim 55$ における直角方向流体力のスパン方向相関長さや物体まわりの循環について研究し、一方 Tatsuno-Bearman は、 $KC=1.6 \sim 15$ の範囲で振動円柱周りの流れパターンを可視化して 3 次元構造を明らかにし、Williamson は、 $KC < 35$ の範囲において直角方向流体力波形と可視化流れパターンとの関連を明らかにしている。

しかし、円柱以外のブラフボディに対しては実験データが極めて少なく、また比較的低い KC 数領域のみを対象とした研究が多く、定量的な流体力と可視化に基づいた流れパターンとの対応についての検討は未だ不充分のようである。

本報告は 3 章からなり、第 1 章は本研究の総括、第 2 章は振動流中におけるブラフな断面物体の流力特性に関する実験について述べる。内容はブラフな断面物体として、(1) 円柱、(2) 種々な迎え角の正方形柱、(3) 平板、(4) 矩形柱を例にしてそれらの流力特性に関する実験による研究成果を述べる。次に、第 3 章では、振動流中におけるブラフな断面物体の流力特性に関する数値シミュレーションについて、(1) 円柱、(2) 角柱を例にして述べる。

まず、第 1 章は本研究の総括を行う。次に、第 2 章 2.1 節では、高 KC 数領域を含む $KC=1 \sim 90$ の広い KC 数範囲を対象とし、まず、従来実験データの多い円柱について実験を行い、本測定法の検証を行うとともに、流体力と流れパターン変化の対応について詳細に検討する。次に、振動流中に固定された正方形柱に作用する振動方向及び直角方向の流体力の同時測定を行い、各流体力係数を導くとともにその周波数解析を行う。ここでは、正方形柱は迎え角 $\alpha = 0^\circ$ の場合のみ比較のために示した。振動流中の円柱及び正方形柱周りの流れにおいて、物体表面からの流れの剥離、後流域における渦の形成・放出の状況を可視化観察し、KC 数に依存して生じる特有の流れパターン変化に基づいて分類を行い、流体力との対応を検証する。さらに円柱及び正方形柱との流れパターンと流体力の実験結果を比較することにより、剥離点が固定している場合の影響やアフターbodyについて検討する。その結果、振動

流中に固定した円柱及び正方形柱に作用する流体力の測定と流れの可視化を行い、以下の結果を得た。

- (1)円柱の流体力係数($(C_F)_{\max}$, $(C_F^*)_{\text{rms}}$, C_D , C_M , $(C_L)_{\max}$, $(C_L^*)_{\text{rms}}$)は、従来の実験値と比較してほぼ妥当な値を得た。
- (2)正方形柱について、広いKC数範囲における流体力係数を求め、KC数と流れパターンとの相関を明らかにし、流れと流体力係数の変化との対応を明らかにした。
- (3) C_D と後流幅、 C_M と流速0の時の物体近傍流れの対応を見出した。
- (4)KC数変化に対する円柱及び正方形柱の直角方向流体力の各周波数成分の変化は流れパターンに対応する。
- (5)円柱及び正方形柱の C_D と C_M 値には、本実験範囲の β 数の相違による大きな影響は見られない。
- (6)正方形柱の振動方向流体力の流速に対する位相遅れは、円柱と比べ異なり、KC数の広い領域で慣性力成分が支配的である。
- (7)円柱及び正方形柱の直角方向流体力の卓越周波数はKC数の増加に伴い、一様流におけるSt数変化の直線に沿って振動周波数の整数倍で階段状に変化し、振動流によって後流周波数が制御されている。

第2章2.2節では、さらに種々な迎え角 $\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$ の正方形柱作用する流体力の測定と流れの可視化を行った。主な結論は以下の通りである。

(1) F_{in} の位相差 ϕ_F に与える迎え角 α の影響は低KC数領域で顕著に現れ、 α が大きくなるほど ϕ_F の遅れは大きくなるが、高KC数領域では各迎え角ともにほぼ一定の ϕ_F 値に収束する。

(2)モリソンの式の C_D 値は、いずれの迎え角ともにKC数の増加に伴い一様流の C_D 値に漸近し、正方形柱背後でのはく離せん断層の巻き込み強さに依存して変化する最大流速時の後流幅と良く対応する。

(3)モリソンの式の C_M 値は、流れパターンの変化に強く依存して変化し、流速0の時の物体近傍流れと良く対応する。

(4) F_L の位相差 ϕ_L は、高KC数領域において、特に $\alpha = 5^\circ, 10^\circ$ の場合に顕著な遅れを示し、負の定常直角方向流体力が次第に支配的になる。また、低KC数領域および α が大きい場合には ϕ_L の遅れは生じず、 F_L ははく離渦放出に伴う変動成分に支配される。

(5)迎え角により、流れパターンの変化はそれぞれ異なる経緯をたどり、特に、 $\alpha = 45^\circ$ の場合には、円柱と同様、各半周期毎に振動流特有の「トランスバースストリート」、「ダブルペア」の流れパターンが生じる。その時のKC数変化に対する直角方向流体力の卓越周波数成分の変化は流れパターンに良く対応する。

(6) F_L の卓越周波数 f は、KC数の増加とともに後流はく離渦の放出周波数に伴い一様流の結果に沿って基本周波数 f_0 の整数倍で階段状に分布するが、 $\alpha \leq 15^\circ$ の場合には高KC数領域で次第に定常直角方向流体力が支配的になるにつれ、一様流の渦放出周波数よりも低次の周波数成分が卓越するようになることを明らかにした。

次に、第2章2.3節、振動流中の平板周りの流れにおいて、振動流中に固定した種々な迎え角の平板に作用する振動方向及び直角方向の流体力の同時測定と流れの可視化を行い、広いカーペンター数(KC数)範囲における流力特性を調べた。その結果、平板においてもKC

数に対する振動流特有の流れパターンの出現を確認し、流れパターンと各流体力係数変化との間の良い対応を示した。また、振動方向及び直角方向流体力の時間的変化と渦運動との対応を明かにした。また、各流体力係数はKC数の増加に伴い一様流中の値に漸近するが、迎え角の影響を強く受ける。さらに直角方向流体力の卓越周波数は一様流中のSt数変化の直線に沿って振動数の整数倍で階段状に変化することを明かにした。

第2章2.4節では、振動流中に固定した種々な断面辺長比 d/h の矩形柱に作用する流体力の測定と流れの可視化を行い、以下の結果を得た。

- (1) 流体力の位相 ϕ_F の遅れは、断面辺長比 d/h が小さいほど低KC数領域では大きくなり、より小さいKC数で一定値に漸近する。 $d/h \leq 0.6$ の矩形柱では円柱の結果とほぼ同様の変化を示し、一方、 $d/h=2.0, 3.0$ ではKC数の増加に伴い、 ϕ_F は緩やかに遅れ、広いKC数範囲にわたり、慣性力が支配的になる。
- (2) モリソンの式の C_D 値は、各断面辺長比 d/h とともにKC数の増加に伴い、一様流の C_D 値に漸近し、 $KC > 120$ では、振動流の場合も $d/h=0.6$ が最大値を示すことを明らかにした。また、最大振動流速時における流れパターンと C_D 値変化との対応を示した。
- (3) 低KC数領域での C_D 値の変化より、 d/h で整理して、「平板型」、「正方形柱型」、「円柱型」の3つのグループに分類した。また、 $d/h=0.4$ および 0.6 においてKC数の変化に伴い「平板型」と「正方形柱型」変化の移行があることを見出した。
- (4) モリソンの式の C_M のKC数に対する変化は、矩形柱の d/h によって大きく異なり、 $d/h = 0.2, 0.4$ の C_M 値についてはKC数の増加に伴い、 $KC > 20$ で直線的に増加し、 $d/h \geq 0.6$ では高KC数領域でそれぞれほぼ一定の C_M 値を示す。
- (5) 直角方向流体力の卓越周波数は、KC数の増加に伴って、一様流におけるSt数変化の直線に沿って変化する。特に、 $d/h=2.0$ については $Re=3300$ 付近で、卓越 St 数に不連続を生じ、高い側および低い側の卓越 St 数ともに一様流の結果と良く一致する。
- (6) 直角方向流体力の基本振動周波数 f_0 の卓越 KC 領域は断面辺長比 d/h によって異なり、はく離せん断層が再付着しない $d/h \leq 0.8$ では $KC < 20$ の範囲で卓越し、 $d/h > 1.0$ では、 d/h が大きくなるにつれ、はく離せん断層の周期的再付着の影響で f_0 の卓越領域が高KC数領域にまで及ぶ。

次に、第3章においては、3次元数値シミュレーションによって振動流中における円柱の流力特性に関する研究を行った。数値シミュレーションによる研究は、Lin & Bearmanらが離散渦法によりストークス数 $\beta (=Re/KC=D^2/\nu T; Re: レイノルズ数, \nu: 動粘度, T: 振動周期)=76$ における円柱周りの流れを計算し、その際、問題となる物体表面の圧力の導出方法について4種類の方法を用い、それぞれの数値シミュレーション結果を比較し、得られた流れパターン及び流体力係数を実験結果とも比較している。しかし、数値シミュレーションによる計算例は実験的研究に比べて少なく、特に、振動流中の物体周りの流れは本質的には3次元構造を呈するが、3次元数値シミュレーションの例はさらに少い。

そこで、第3章3.1節では、振動流中の物体まわりの流れに現れる特有な流れパターン、流れの3次元構造、そして物体に作用する流体力を差分法による3次元数値シミュレーションによって予測する。数値シミュレーションでは、KC数を5～30の範囲で変え、ストークス数は $\beta=95$ で一定とし、流れパターンおよびモリソンの式により得られる流体力係数との関係を調べ、流れパターンなどの実験結果との比較は、主として本研究室で得られた可視化

観察結果と比較して考察を行った。

その結果、振動流中におかれた円柱周りの流れを非定常、非圧縮、粘性流れの仮定の下で KC 数 30までの領域において 2 次元及び 3 次元層流数値シミュレーションを行い、計算結果を実験結果と比較した。振動流中の円柱周りの流れ場は、ALE 法を用い、有限体積法で解析した。その結果、得られた流れパターンは、 KC 数によって分類され、各 KC 数における流れパターンは実験値と良く一致し、特に”トランスバース・ストリート”、”ダブルペア”などの振動流に特有な流れパターンが計算においても再現された。また、3 次元計算におけるスパン方向の流れの非一様性は計算された全ての KC 数領域において現れ、特に、低 KC 数領域のスパン方向流れパターンは Tatuno & Bearman による可視化実験結果と良く一致した。また流体力に関しては振動方向流体力、直角方向流体力とも計算結果と実験結果は良く一致した。特に直角方向流体力は KC 数における流れパターンに対応した結果が得られた。また、振動方向流体力はモリソンの式において得られる抗力係数及び慣性力係数においても表現され、計算において得られた KC 数の変化による C_D 、 C_M の値は実験結果と良く一致した。特に、3 次元計算結果は 2 次元計算結果よりも実験結果に近い値である。

第 3 章 3.2 節においては、振動流中における角柱の流力特性についての数値シミュレーションを行い、実験結果と比較すると共に、3 次元渦構造に対する断面形状の相違による影響を明らかにした。振動流中におかれた角柱周りの流れの差分法による 3 次元数値シミュレーションを行い、以下の結論を得た。

- (1) KC 数の変化による流れパターンの変化を実験結果と比較し、良い一致を得ると共に、円柱の結果と比較して、物体形状による影響を明らかにした。
- (2) 低 KC 数領域においては、円柱と同様、スパン方向にならぶ縦渦の存在を確認した。
- (3) KC 数の変化におけるモリソンの式による C_D 、 C_M 及び C_{Lrms} を計算し、実験値と良い一致を得ると共に、円柱に対する結果との比較から、流体力と角柱特有の流れパターンとの対応を明らかにした。

これらの主な研究成果は、関連学会の論文集に 4 編の論文 (1-1, 1-2, 1-3, 1-4)、そして関連学会において 9 編の口頭発表論文 (2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5, 2-6, 2-7, 2-8, 2-9, 2-10) として報告した。