

氏名	松本達治
生年月日	
本籍	兵庫県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第413号
学位授与の日付	平成13年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	振動流中に置かれた種々な断面形状の物体周りの流れ特性に関する研究
論文審査委員(主査)	岡島 厚 (工学部・教授)
論文審査委員(副査)	上野 久儀 (工学部・教授) 石田 啓 (工学部・教授) 森 茂 (工学部・教授) 木村 繁男 (工学部・教授)

学位論文要旨

Abstract The flow around a bluff body submerged in sinusoidally oscillatory flow consists of the development of separating flow which is usually related to starting flow and unsteady wake with a limited length because of flow of the oscillation in alternate directions. The studies of forces acting upon and flow patterns around the bluff body are fundamental to such fluid engineering constructions as piers, submarine pipelines, breakwaters, caissons, sheet piles, gates and other ocean structures. In this thesis, simultaneous measurements of both in-line and transverse forces of a bluff body were made in a relatively wide KC range. The force signals were analyzed spectrally to determine major frequency. Flow visualization was also employed to understand the correspondence between flow patterns and force coefficients. In particular, C_D values and St numbers compared with the experiment results obtained in steady flow. We discussed the influence of the angles of attack of the square cylinder and flat plate and the width/height ratio of the rectangular cylinder on the flow patterns and fluid dynamic characteristics in oscillatory flow. The discussion concerning the effects of the unsteadiness of oscillatory flow on force coefficients and flow patterns are presented. Force coefficients were measured in a wide range of KC numbers including high KC numbers. It is verified that good agreement between C_D and C_M in Morison's equation and near wake pattern at the time of maximum velocity and the volume of the flow region visualized at the time of zero velocity $U=0$, has been successfully obtained, respectively. The C_D values gradually approach the values for steady flow with increasing KC number for each shapes of bluff body. The phase delay angle ϕ_F of in-line forces related to oscillatory velocity strongly depend on the cross-section of bluff body. Good agreement between the growing/shedding process of vortices and the time trace of transverse forces was also confirmed by flow visualization. With increasing KC , dominant frequencies of transverse forces increase stepwise as integer multiples of oscillatory frequency along the St - KC line obtained in steady flow and the shedding frequency of wake vortices is controlled by oscillatory flow, except the cases of small angle of attack of square cylinder and flat plate.

1. 緒言

振動流中に置かれたはく離流れや有限長さの後流領域などの非定常な物体周辺流れを含むブラフボディ周りの流力特性に関する現象は、古くから研究者の興味を引き、数多くの実験的・理論的研究がなされてきたにも関わらず、いまだ不明なことが多い。近年、大型海洋構造物が流れや波などの流体力により破損する例が増加するに従い、これらの現象の解明は急務とされている。従来の研究の多くは、実用面から円柱を対象として、流体力の測定が行われ、Morisonの式に基づき、振動方向流体力係数が明らかにされてきた。しかし、円柱以外の実験データは極めて少なく、また比較的低いKC数(Keulegan-Carpenter number)($=2\pi a/D$; a : 振動振幅, D : 物体の流れと垂直方向の投影長さ)領域のみを対象とした研究が多い。したがって、広いKC数範囲にわたって振動流中に置かれた種々な断面を有する柱状物体に作用する定量的な流体力に関する系統的实验を行うことにより振動振幅の小さい非定常性の強い領域から一様流に漸近する大振幅の準定常領域までの現象を結びつけることは非常に重要な課題である

そこで本論文は、U字管振動流発生装置を用い、高KC数領域を含む広い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、装置と測定法の妥当性を検証し、次に振動流中に固定された種々な迎え角の正方形柱や平板、種々な断面辺長比の矩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、各流体力係数を算出するとともにその周波数解析を行った。そして、可視化観察に基づく流れパターンと流体力との対応について調べ、振動流中に置かれた構造物の設計に資する基礎的資料を提供することを目的として断面形状、KC数、 β 数($=D^2/vT$; v : 動粘性係数, T : 水の振動周期)などが流れの非定常性に与える影響について明らかにする。

2. 種々な断面形状の構造物に働く振動方向流体力

振動方向流体力 F_{in} を $\rho D^3 L/2T^2$ (ρ : 流体密度, L : 供試模型のスパン長さ)で無次元化した C_F^* のRMS値(C_F^*)_{rms}を図1に示す。(C_F^*)_{rms}にはKC数の影響が顕著に現れ、KC数の増加に伴い次第に増加する。また、実線で示すWilliamson⁽¹⁾の実験結果に良く一致することから本測定法が妥当であることを確認した。

また、 F_{in} の周波数解析の結果、いずれの断面形状においてもKC数全域にわたり2倍周波数

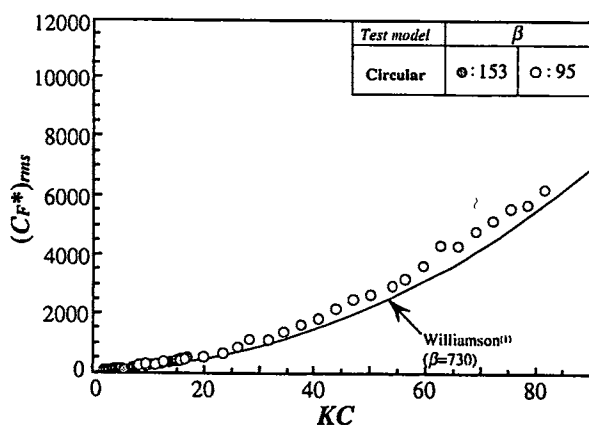


Fig.1 The rms values of in-line force coefficient for various cylinders against KC number

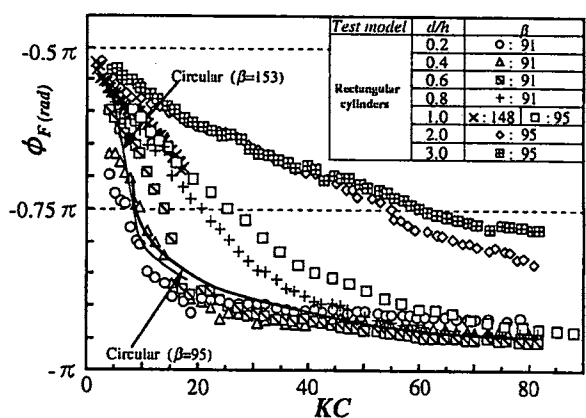
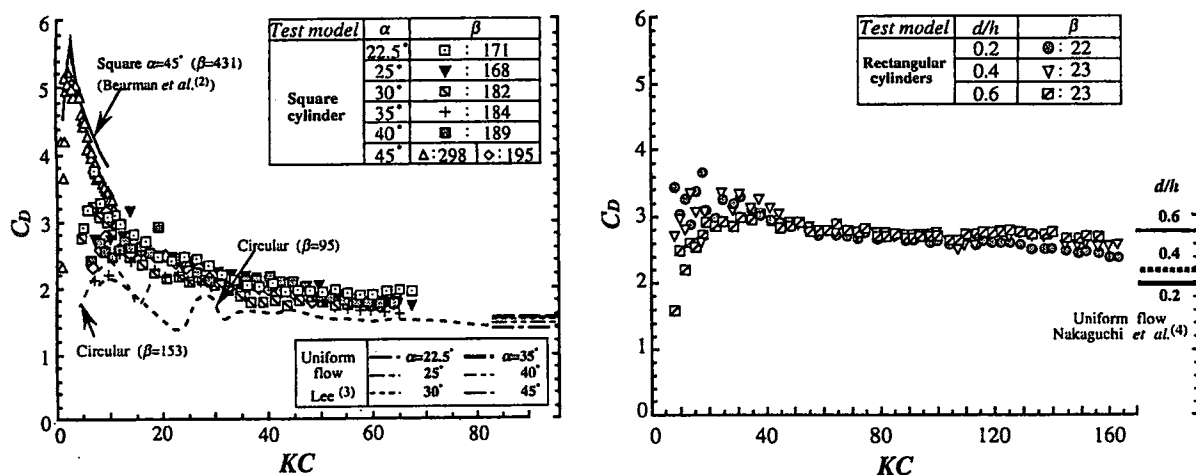


Fig.2 Phase angle ϕ_F of in-line forces for rectangular cylinders with a cross-section of various width/height ratios

以上の高次周波数成分は小さく、振動流の基本周波数である振動基本周波数成分 f_0 が極端に卓越する。ここで、流速変動に対する振動方向流体力 F_{in} の振動周波数成分 f_0 の位相差 ϕ_F の一例として矩形柱の場合を図2に示す。物体近傍ではく離流れが発達し、大きな渦を形成する物体形状の場合には低 KC 数領域で位相が大きく遅れ、一方、前後縁から小さい渦が放出される正方形柱や断面辺長比 d/h が大きい矩形柱の場合には位相の遅れは比較的小さい。また、約 90° の位相遅れを示す低 KC 数領域では流体力に占める慣性力の割合が相対的に大きくなり、高 KC 数領域では、それぞれほぼ一定の ϕ_F 値に到達し、抗力が支配的になるが、 $\phi_F = -\pi$ には至らず、常に一定の慣性力が作用していることが分かる。

3. モリソンの式による C_D と C_M

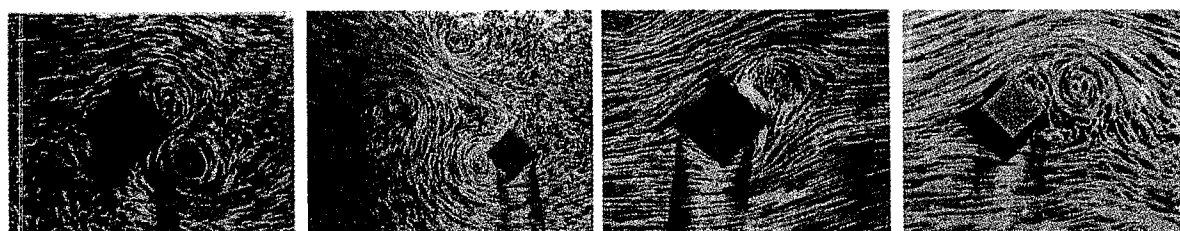
3.1 C_D の KC 数に対する変化と流れパターン モリソンの式より算出した抗力係数 C_D の例として迎え角の大きい正方形柱($\alpha \geq 22.5^\circ$)と断面辺長比が $d/h=0.2 \sim 0.6$ の矩形柱の場合を図3(a),(b)に示す。 KC 数の増加に伴い各断面形状の C_D 値はともに各図の右端部に示す一様流中における C_D 値に漸近する。正方形柱の迎え角が大きい $\alpha \geq 22.5^\circ$ の場合には低 KC 数領域で相対的に大きな C_D 値を示し、 KC 数の増加とともに C_D 値は減少する。特に、 $\alpha=45^\circ$ の場合、 C_D 値は低 KC 数領域で大きなピークを示す。このような C_D 値の変化と最大流速時における後流パターンの可視化写真とを比較すると、正方形柱 $\alpha=45^\circ$ の場合、低 KC 数領域では図4(a)に示すごとく後流はく離渦が大きく成長することに対応して大きな C_D 値を示す。図4(b)に示す「トランス



(a) Square cylinder ($22.5^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$)

(b) Rectangular cylinder ($0.2 \leq d/h \leq 0.6$)

Fig.3 Drag coefficients against KC number



(a) $KC=4.4, U=U_{max}$

(b) $KC=10.4, U=0$

(c) $KC=10.4, U=U_{max}$

(d) $KC=17.8, U=U_{max}$

Fig.4 Flow patterns for square cylinder at $\alpha=45^\circ$

パーストリート」の流れパターン領域に至ると半周期間に形成される二つのはく離渦の片側が流れに対して直角の遠方領域に放出され、図4(c)に示す後流幅が減少し C_D 値は漸減する。高 KC 数領域で流れパターンが交互渦放出パターンに変化しても図4(d)に示すように後流幅に大きな変化は見られず、 C_D 値はほぼ一定となる。このように C_D 値の変化は最大流速時の後流の流れパターンに良く対応している。また、矩形柱の場合、低 KC 数領域における C_D 値の変化は断面辺長比 d/h により「平板型」、「正方形柱型」、「円柱型」の3つのグループに分類され、「平板型」を示す $d/h=0.2$ と $d/h=0.4$ が他の断面辺長比の矩形柱に比べて相対的に大きな値になる。しかし、 $d/h=0.2, 0.4$ の場合には、高 KC 数領域で KC 数の増加に伴い減少して、一様流の実験値に漸近するが、 $d/h=0.6$ の場合には KC 数にはほぼ無関係に一定の C_D 値を示す。その結果、 $KC > 120$ では、振動流の場合においても $d/h=0.6$ の C_D が最大値を示す。

3・2 C_M の KC 数に対する変化と流れパターン

図5には、モリソンの式により求めた平板の場合の慣性力係数 C_M を示す。 A_0 を断面辺長さを直径とする円形断面積として求めた C_M には α の影響が顕著に現れ、全 KC 数領域を通じて、 α が大きいほど相対的に大きな C_M 値を示す。また、 $\alpha \geq 30^\circ$ では各迎え角ともに $KC \approx 20$ で谷を示し、 α が大きくなるほど明白に現れる。このような C_M 値の変化を調べるために図6(a),(b)には、平板 $\alpha=75^\circ$ の振動流速が零となる時刻、すなわち加速度が最大となる時刻付近で撮影した流れパターンを示す。大きな C_M 値を示す KC 数においては図6(a)に示すごとく物体近傍で運動している流体領域が大きくなる。一方、谷を示す KC 数では、図6(b)に示すように放出された渦を含む遠方領域とは区別して認識できる物体に付着して運動する流体領域は比較的小さい。このように C_M 値の変化は流速零時の物体近傍流れに良く対応する。

4. 種々な断面形状の構造物に働く直角方向流体力

図7には、迎え角が小さい場合の正方形柱の流速変動に対する直角方向流体力 F_L の f_0 成分の位相差 ϕ_L を示す。 α が小さい $\alpha=5^\circ, 10^\circ$ の場合には、 $KC > 60$ のように高い KC 領域では、 KC 数の増加とともに ϕ_L が顕著に遅れ、一様流中で負の揚力値を示すことに対応している。このような振動流中における ϕ_L の位相変化は α が小さい場合の負の揚力発生における非定常性を示している。

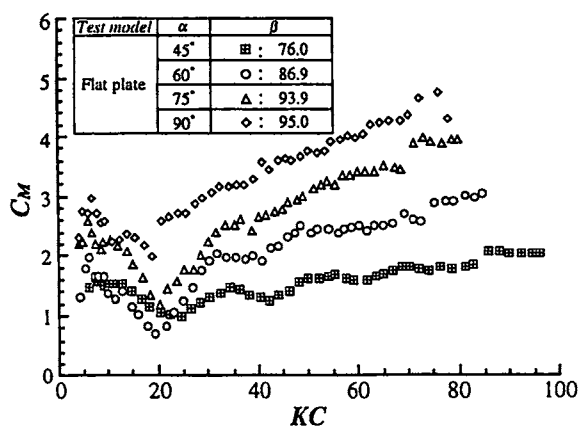
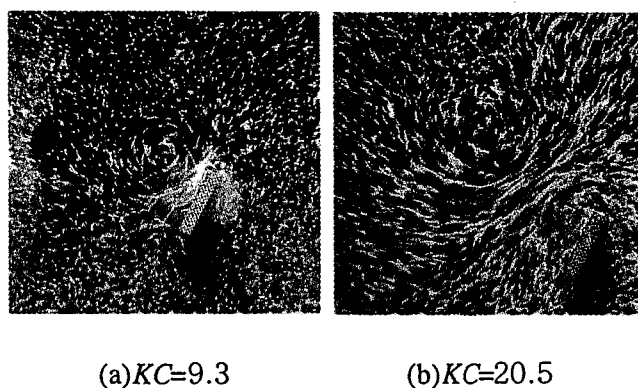


Fig.5 Inertia coefficients C_M in Morison's equation for a flat plate at $\alpha \geq 45^\circ$



(a) $KC=9.3$

(b) $KC=20.5$

Fig.6 Flow patterns at zero velocity by long exposure

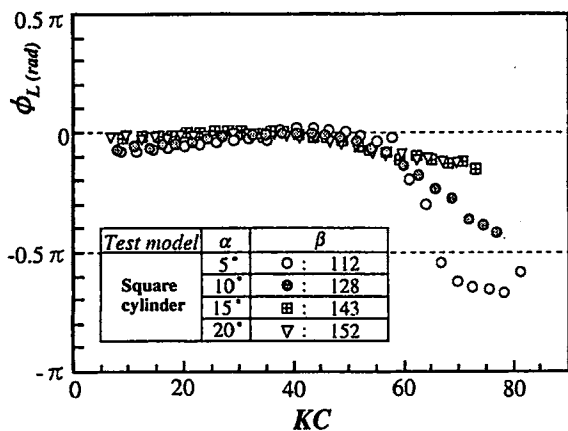


Fig. 7 Phase angle ϕ_L of transverse forces related to the oscillatory velocity for a square cylinder at $\alpha \leq 20^\circ$

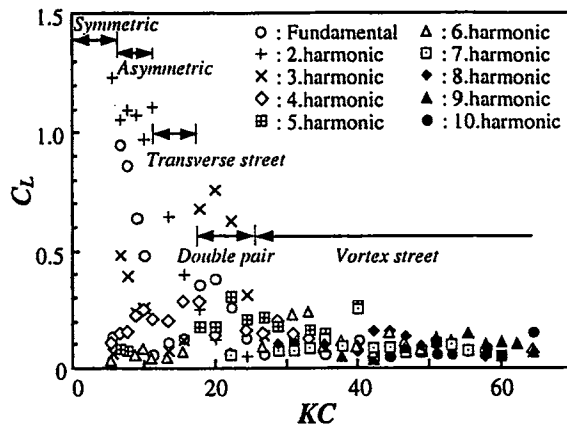
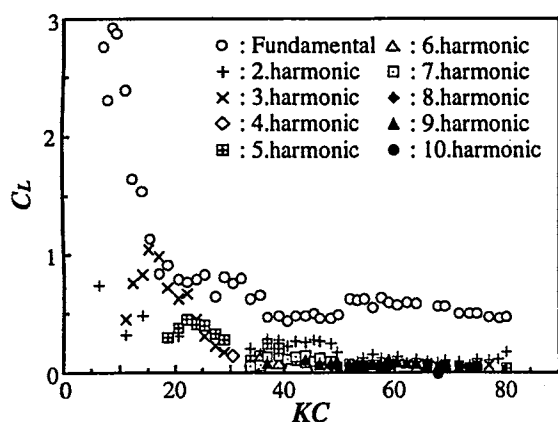
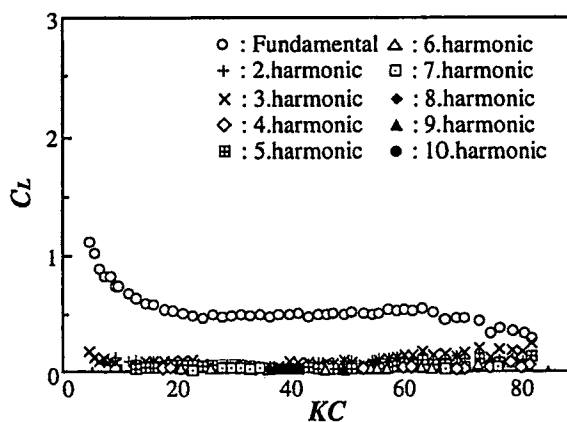


Fig. 8 Amplitude of spectrum components of transverse force coefficients for a square cylinder at $\alpha = 45^\circ$



(a) Flat plate ($\alpha=75^\circ$)



(b) Rectangular cylinder ($d/h=3.0$)

Fig. 9 Power spectra of C_L

図8には正方形柱 $\alpha=45^\circ$ の場合の C_L に占める卓越周波数成分と流れパターンとの対応を示すが、まず、低 KC 数の上下対称渦領域では直角方向流体力 C_L はほとんど生じない。次に「上下非対称渦パターン」に変化すると C_L を生じ、2倍周波数成分が卓越するが、「トランスバースストリート」の流れパターン領域に至ると2倍周波数成分は急減する。さらに「ダブルペア」の流れパターンでは3倍周波数成分がピークを示し、高い KC 数領域での「交互渦列」パターンでは、高次周波数成分が次々に卓越する。図9(a),(b)に C_L のFFT周波数解析による振動周波数の整数倍の各周波数成分のスペクトルの強さの例として平板 $\alpha=75^\circ$ および矩形柱 $d/h=3.0$ の場合をそれぞれ示す。平板の場合、各迎え角ともに KC 数全体を通じて基本周波数成分 f_0 が最も卓越する。また、低 KC 数領域で3倍周波数成分が卓越し、ピークが現れ、これに対応して「ダブルペア」の流れパターンが現れる。一方、矩形柱の場合は f_0 成分の卓越する KC 数領域は断面辺長比 d/h によって異なり、 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ため、 f_0 成分の卓越する領域が高 KC 数領域まで及ぶ。

5. 直角方向流体力の変動周波数と一様流中のストローハル数との比較

図10(a),(b)にそれぞれ正方形柱 $\alpha=45^\circ$ および $\alpha=10^\circ$ の場合の直角方向流体力 F_L の卓越周波数 f と振動基本周波数 f_0 との比 ff_0 を示す。なお、図10中には一様流中における St 値($=FD/U$)から $U=U_m$ として算出した ff_0 の変化も示す。各周波数成分のフーリエスペクトルの強度分布をそれぞれ図12の付図に示すが、 F_L のスペクトル分布は、振動周波数 f_0 の整数倍にピークが分布する。正方形柱 $\alpha=45^\circ$ の f は、 KC 数の増加とともに一様流の結果に沿って後流はく離渦の放出周波数が卓越し、 f_0 の整数倍で階段状に分布する。これに対して正方形柱 $\alpha=10^\circ$ の場合、 ff_0 は KC 数全域において一様流中の St 数とは離れた位置に分布し、高次周波数成分よりも低次の周波数成分が卓越することがわかる。これは正方形柱の α が小さい場合にはく離領域が小さく、一様流中におけるカルマン渦タイプの渦が物体から離れた下流遠方領域で形成され、特に高 KC 数領域においては準定常的に物体近傍で形成される非対称なく離渦パターンに対応して、最も卓越する周波数はこの場合、後流渦列による高次周波数成分よりもむしろ基本周波数 f_0 で変動する大きい振幅の直角方向流体力が支配的となる。このように迎え角 α が大きくなるにつれ、カルマン渦タイプの交互渦の放出に伴って高次周波数成分が卓越する。

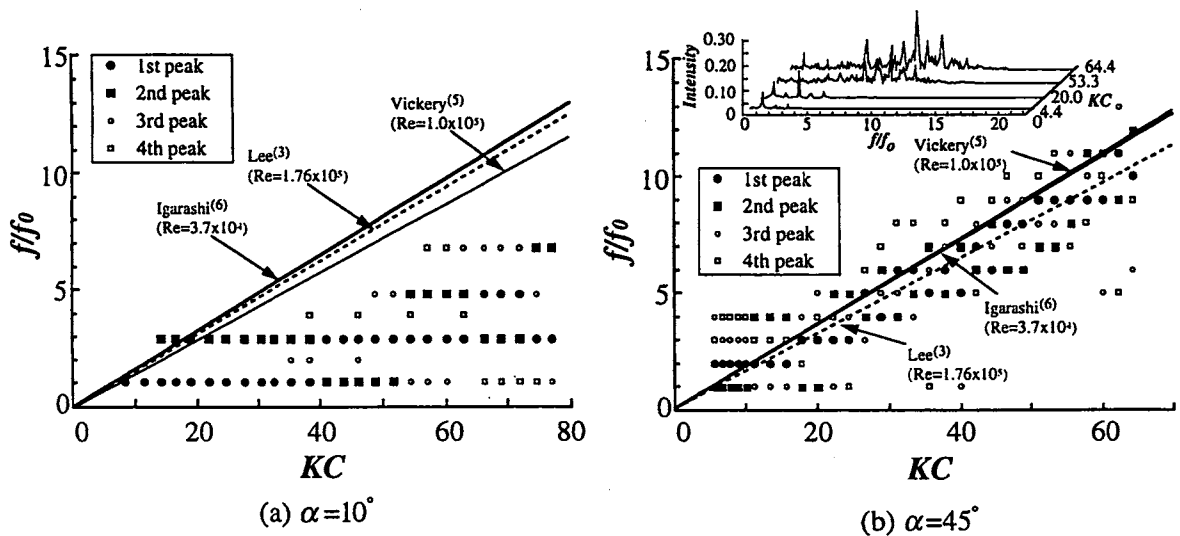


Fig. 10 Dominant frequency of CL

6. 結言

振動流中に置かれた種々な断面形状のブラフボディ周りの流れ特性を調べた。主な結論を以下に示す。

(1) 振動方向流体力 F_m の位相差 ϕ_F は、正方形の場合、迎え角 α の影響は大きく、低 KC 数領域では α が大きくなるほど ϕ_F の遅れは大きくなり、 KC 数の増加に伴いより小さい KC 数で一定の ϕ_F 値に到達する。平板の場合には正方形柱($\alpha=0^\circ$)の場合よりも円柱の場合に定性的に類似した変化を示し、矩形柱の場合には断面辺長比 d/h が小さく、アフタボディが減少するほど低 KC 数領域で大きく遅れる。

(2) モリソンの式の C_D 値は、各種断面形状ともに KC 数の増加に伴い一様流中の C_D 値に漸近する。一様流中で $d/h=0.6$ が最も大きな C_D 値を示す、いわゆる「中口ピーク」の現れる矩形柱

の場合、 $KC > 120$ では、振動流の場合においても $d/h=0.6$ の C_D が最大値を示す。また、 C_D 値の変化は最大流速時の後流の流れパターンに、またモリソンの式の C_M 値の変化は流速零時の物体近傍流れパターンの変化に良く対応する。

(3)正方形柱の FL 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生じ、ギャロッピングなど流力不安定を生じる負の揚力発生における非定常性を示している。

(4)平板の場合、直角方向流体力における3倍周波数成分の卓越領域で「ダブルペア」の流れパターンが現れる。一方、矩形柱の場合は振動基本周波数成分 f_0 の卓越する KC 数領域は断面辺長比 d/h によって異なり、 $d/h > 1.0$ 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ため、 f_0 の卓越する領域が高 KC 数領域まで及ぶ。

(5)直角方向流体力 FL の卓越周波数は、平板および正方形柱の迎え角が小さい場合を除いて一様流における 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分布し、振動流によって後流周波数は制御されている。

参考文献

- (1) Williamson, C. H. K., "Sinusoidal Flow Relative to Circular Cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.155, 1985, pp.141-174.
- (2) Bearman, P. W., Downie, M. J., Graham, J. M. R. and Obasaju, E. D., "Forces on Cylinders in Viscous Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter Numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.154, 1985, pp.337-356.
- (3) Lee, B.E., "The Effect of Turbulence on the Surface Pressure Field of a Square Prism," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.69, part2, 1975, pp.263-282.
- (4) 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一実験", *日本航空学会誌*, 16-168, 1968, pp.1-5.
- (5) Vickery, B. J., "Fluctuating Lift and Drag on a Long Cylinder of Square Cross-Section in a Smooth and in a Turbulent Stream," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.25, part 3, 1966, pp.481-494.
- (6) 五十嵐保, "正方形柱まわりの流れ特性", *日本機械学会(B編)*, 50-449, 1984, pp.210-218.

学位論文審査結果の要旨

平成13年1月25日、1月30日第1,2回学位論文審査委員会を開催し、1月30日口頭発表を行い、同日最終の審査委員会を開催した。協議の結果、以下の通り判定した。申請者は、平成8年3月、金沢大学大学院工学研究科機械システム工学専攻を修了し、平成10年4月、住友ゴム工業株式会社から本研究科地球環境科学専攻に社会人入学した。申請論文は、海洋構造物に代表される振動流中に置かれた構造物の設計に資する基礎的資料を提供することを目的として、新設のU字管振動流発生水槽装置により高いカーペンター数の領域を含む広い範囲の振動流中に固定されたブラフな断面形状の物体に作用する振動方向および直角方向流体力を測定し、流れの可視化に基づく流れパターンとの対応を調べている。特に、モリソン式の抗力係数と慣性力係数や直角方向流体力と可視化した流れパターン変化との間の対応を示し、振動流の特性を明らかにしている。そして種々な断面形状物体の振動方向流体力と振動流速の位相差、モリソンの式の抗力係数と慣性力係数および後流ストローハル数値を物体のブラフネス及びアフターボディーの効果として包括的に考察している。

以上、本論文は振動流中の種々なブラフネス及びアフターボディーの異なる物体周りの流れにおける非定常性の強い領域から大振幅の一樣流に漸近する領域までの流れ特性を調べ、振動流特有の流れの非定常性の効果を統一的考察を始めて提案し、海洋構造物の設計のみならず非定常流体力学分野において資する多くの新しい研究成果は注目でき、博士(工学)に値するものと認定する。