

画面で学ぶ
ブラフボディーの流力振動

1. 円柱の流力振動

Flow-Induced Oscillations of Circular Cylinders

2. 矩形柱の静特性と流力振動

*Fluid-dynamic Characteristics and Flow-Induced Oscillation
of Rectangular Cylinders*

3. 振動流における物体周りの渦流れ

*Numerical and Experimental Studies on Vortex-Flow around
a Bluff Body Submerged in Oscillatory Flow*

4. 直列2円柱および2角柱の流力振動

*Flow-Induced In-Line Oscillation of Two Circular Cylinders and
Two Rectangular Cylinders in Tandem Arrangement*

ブラフボディーの流力振動 その3 振動流における物体周りの渦流れ

*Numerical and Experimental Studies on Vortex-Flow around
a Bluff Body Submerged in Oscillatory Flow*

金沢大学名誉教授 岡島 厚

安田孝宏（当時大学院D,現・滋賀県立大）松本達治（当時大学院D,現・住友ゴム株）

CommntJ

Draft Manuscript

振動流における種々な形状の物体周りの渦流れについて数値シミュレーションと水槽実験によって明らかにする。

要旨： 振動流中に固定された円柱周りの流れ場は流れの増速、減速によって生ずる非定常境界層の発達とはく離、さらに半周期ごとに形成され、放出される渦の相互干渉等、さまざまな流体力学の問題を含んでいる。また、海洋プラットフォームやパイプラインなど実際の海洋構造物周りの流れや作用する流体力の予測の基礎的課題として注目されている。振動流中に固定された円柱周りの流れに関する実験的研究は数多くなされてきた。Sarpkaya(1), Obasaju(2)らは振動流中の円柱周りの流れ場を流れの振動振幅に関するクーリガン・カーペンタ数(KC数)と振動周波数と粘性に関するストークス数(β 数)により整理した。振動振幅の小さい低KC数領域においてHonji(3), Tatsunoら(4)はスパン方向に周期的に配列する縦渦の存在を明らかにした。また、岡島ら(5)やWilliamson(6)は、KC数の増加に伴って出現する双子渦領域、非対称渦領域、トランスパースストリート領域、ダブルペア領域、交互渦列領域など、一連の流れパターンの変化を見だし、さらに物体に及ぼす流体力との関連を明らかにした。一方、振動流中の円柱周りの流れ場に関する数値シミュレーションによる研究もなされている。しかし、そのほとんどが二次元計算(7)-(1)であるため、可視化実験(4)により確認されたスパン方向の縦渦をはじめ本質的に三次元構造をもつ振動流特有の流れパターンが正確に再現されず、計算された流体力等も精度を欠くものである。したがって、振動流中の円柱周りの流れ場の解析においては三次元性の考慮が不可欠である。本報では、実験(4)(5)において振動流特有のパターンが見られた比較的低いKC数($3 \leq KC \leq 25, \beta = 95, 275 \leq Re \leq 2375$)範囲の振動流中の円柱周りの流れ場において非圧縮粘性流を仮定した三次元層流数値シミュレーションを行った。そして計算により得られた流れパターンのKC数による変化を可視化実験結果(4)(5)(6)と比較し、本計算手法の妥当性を検証し、その三次元構造を明らかにした。また、次報において、本報で得られた三次元流れと流体力の関連をスパン方向相関や周波数解析により検討し、さらに、モリソン方程式による振動方向流体力係数や直角方向流体力係数を実験結果と比較、検討する。

振動流中のブラフな断面物体周りの流れ

時間的変動を伴う流れ場

自然風、海洋の流れ、プラント配管内等の作動流体の流れ

+

非流線型断面物体



流れの様相：振動流の特性や物体断面形状により多種多様に変化



一様流中の物体周りの流れ場には見られない特有な流れの出現.

○新たな流れの現象の解明に対する興味

○実際の非定常な流れ場に置かれた構造物に働く流体力の

予測の点において重要

本研究の目的 →

種々な構造物周りの流れ場を構造物と流れ場の視点から、流れの非定常性や物体断面形状の効果を明らかにする.

Commnt J

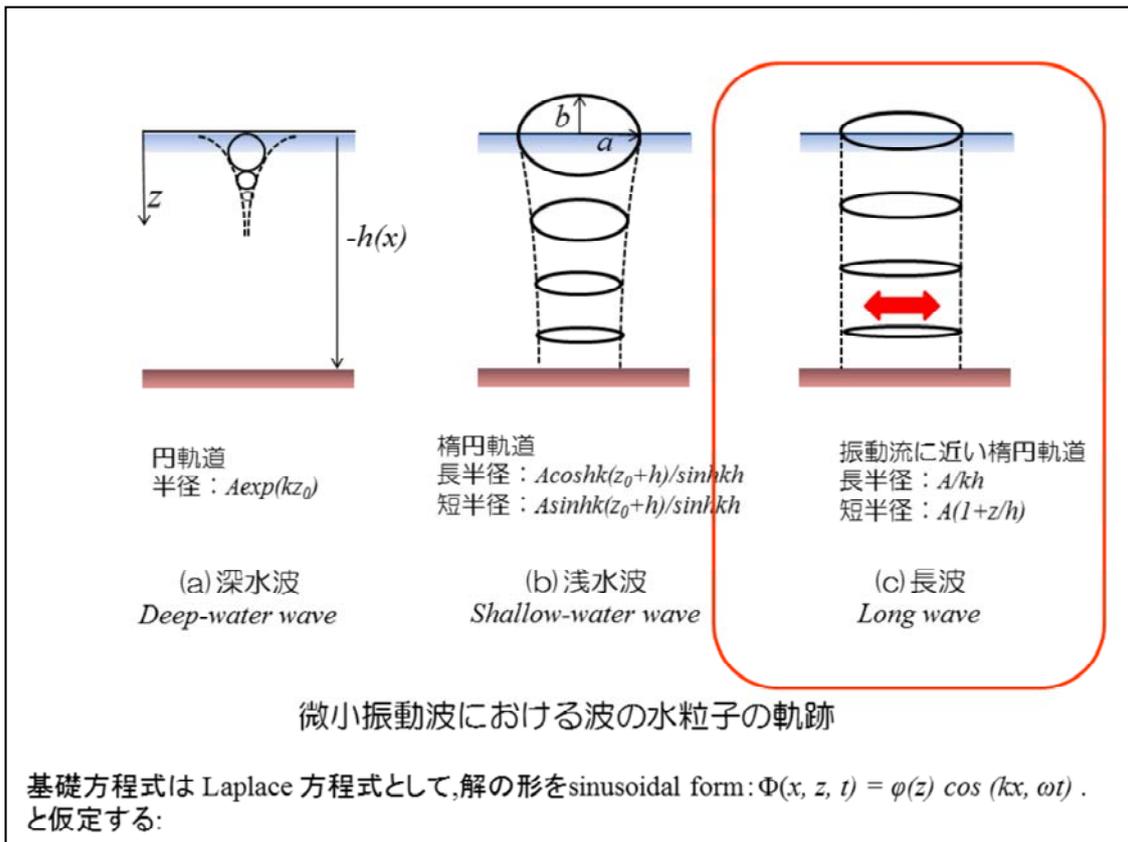
3

各種ブラフな断面物体周りの時間的変動を伴う流れ場の例は自然風、海洋の流れ、プラント配管内等の作動流体の流れに見られる。

このような流れの様相は、振動流の特性や物体断面形状により多種多様に変化するであろう。

それは、一様流中の物体周りの流れ場には見られない特有な流れの出現する。

そして、新たな流れの現象の解明に対する興味があるばかりでなく、実際の非定常な流れ場に置かれた構造物に働く流体力を予測する観点からも重要である。そこで、本研究の目的は、種々な構造物周りの流れ場を構造物と流れ場の両視点から注目して、流れの非定常性や物体断面形状の影響を明らかにする。



$$x = x_0 + A \sinh(kh) \cosh [k(z_0 + h)] \cos(kx_0 + \omega t), \quad (10.30)$$

$$z = z_0 + A \sinh(kh) \sinh [k(z_0 + h)] \sin(kx_0 + \omega t), \quad (10.31)$$

をえる. (10.30), (10.31) から時間を消去して粒子の軌道を求めると

$$(x - x_0)^2/a^2 + (z - z_0)^2/b^2 = 1, \quad (10.32)$$

$$a = A \cosh [k(z_0 + h)] / \sinh(kh), \quad (10.33)$$

$$b = A \sinh [k(z_0 + h)] / \sinh(kh), \quad (10.34)$$

となる. この軌道の特長は

- 長半径 a , 短半径 b の楕円軌道である.*5
- 回転方向は $\omega > 0$ ($\omega < 0$) のとき時計回り(反時計まわり)である.

$$x \ll 1 : \sinh x \sim x, \quad \cosh x \sim 1$$

$$x \gg 1 : \sinh x \sim \exp x, \quad \cosh x \sim \exp x,$$

Introduction

Flow around a bluff body submerged in oscillatory flow, is fundamental to fluid-engineering such as ocean-structures and pipe-structures in power-plant

OSCILLATORY FLOW PAST BLUFF BODIES

Flow around ocean-structures

Flow around pipes-structures in power-plant

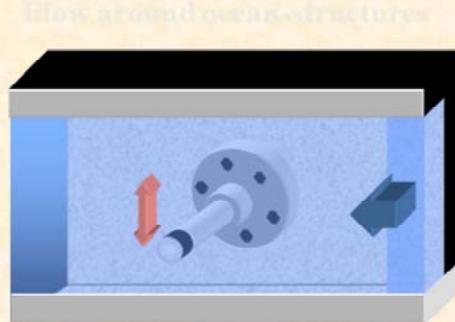
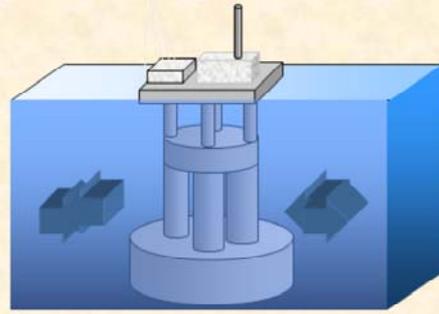
Oscillatory flow periodically reverses in the direction



Interaction of vortices for several oscillatory cycles

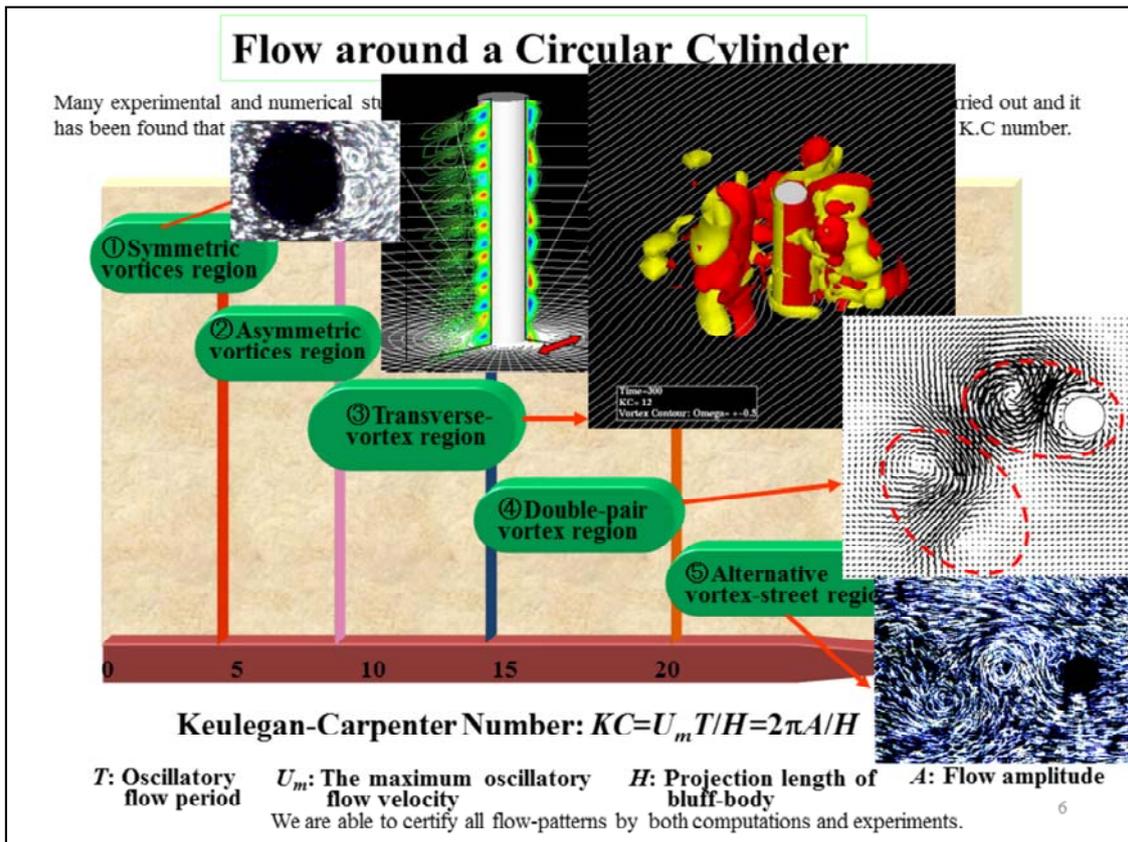


Determinations of formation of flow pattern and fluid dynamic forces, are very important.



5

Flow around a bluff body submerged in oscillatory flow, is fundamental to fluid-engineering such as ocean-structures and pipe-structures in power-plant. In the oscillatory flow, the fluid periodically reverses in the direction. Reversed flow occurs the interaction of vortices shed during the previous cycle. So it is essential and important to determine the formation of flow patterns and the fluid-dynamic forces.



Many experimental and numerical studies on the oscillatory flow past a circular cylinder have been carried out and it has been found that some typical repeatable flow-patterns appear, and we classify 5 regions by the Keulegan Carpenter number. When KC number increases from low values, the symmetric vortices region, asymmetric vortices region, transverse vortex-street region, double pair vortex region and alternative vortex street region, these patterns appear like these. We are able to certify all flow-patterns by both computations and experiments.

従来の研究

2次元的な可視化パターンや数値シミュレーションによる研究についても2次元計算がほとんどである。



流れパターンの3次元構造や流体力との関連について不明な点が多い。

研究内容

振動流中の円柱,正方形柱,矩形柱周りの流れ場の3次元数値解析

- 実験結果との比較から計算結果の妥当性の検証
- 流れパターンの3次元構造
- 流れの3次元構造と流体力との関連性
- 物体断面形状の影響

支配方程式

Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\rho \partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad i,j=1,2,3$$

本研究で用いるパラメータ

クーリガン・カーペンタ数: $KC = U_m T / H = 2\pi A / H$

ストークス数: $\beta = H^2 / \nu T$

レイノルズ数 $Re = KC \cdot \beta$

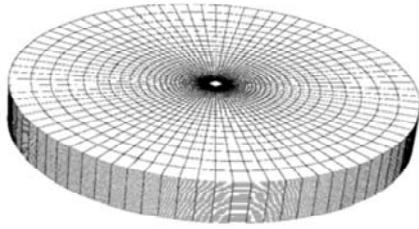
U_m : 最大振動流速, T : 振動周期,
 H : 物体投影長さ, A : 振動振幅,
 ν : 流体の動粘性係数.

Commnt J

8

支配方程式には非定常、非圧縮、粘性流れの3次元Navier-Stokes(N-S)方程式及び連続の式を用いる。本研究で用いるパラメータとして、振動振幅に比例するクーリガン・カーペンタ数と振動周期の逆数の比であるストークス数を用いる。なお、KC数と β 数の積は物体投影長さと最大振動流速を代表値とするレイノルズ数となる。

計算格子



一般座標系, O型格子

Body shape	Square cylinder
Number of grid points	41×80×25 (ξ_1, ξ_2, ξ_3)
Minimum mesh size	0.0067H
Length from center to outer boundary	20H
Time step value	0.0005T
Spanwise length	5H (0.2H×25)

メッシュサイズ, 時間ステップ

支配方程式の離散化

有限体積法 時間積分: *Crank-Nicolson*法

対流項の微分: 2次精度*Quick*スキーム

その他の空間微分項: 2次精度中心差分

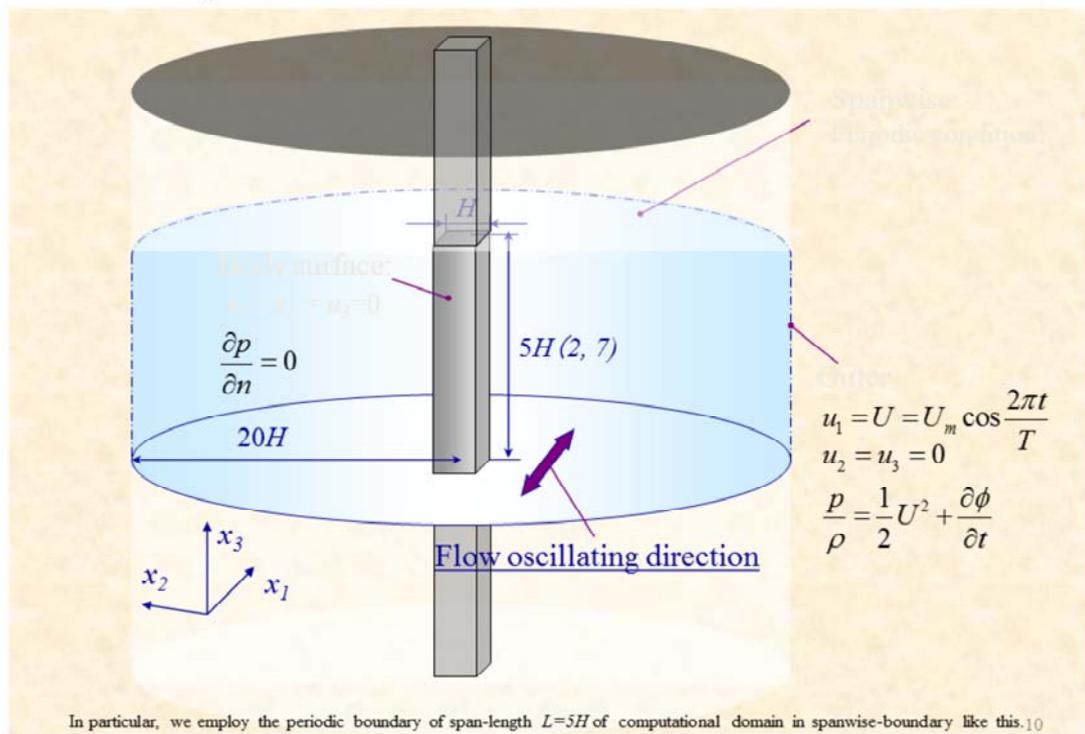
計算アルゴリズム *SIMPLE*法

Commnt J

計算に用いる格子ですが, 本計算で用いる正方形柱に対し, 物体角部で境界層の剥離が生じることや, 振動流中では渦が多方向に放出されることを考慮し, 図に示すような一般座標系のO型格子を用いました. 格子点は周方向に80点, 放射方向に41点, スパン方向に25点とし, 物体中心から外側境界までの距離は20H, スパン方向には角柱長さの5倍の距離をそれぞれ設けました. また, 支配方程式の離散化は有限体積法に基づき, N-S方程式の時間微分項に*Crank-Nicolson*法, 空間微分項は対流項を*Quick*スキームにより風上差分化し, その他の項には2次精度中心差分を用いた. また, 連続の式を満足させるための計算アルゴリズムには*SIMPLE*法を用いました.

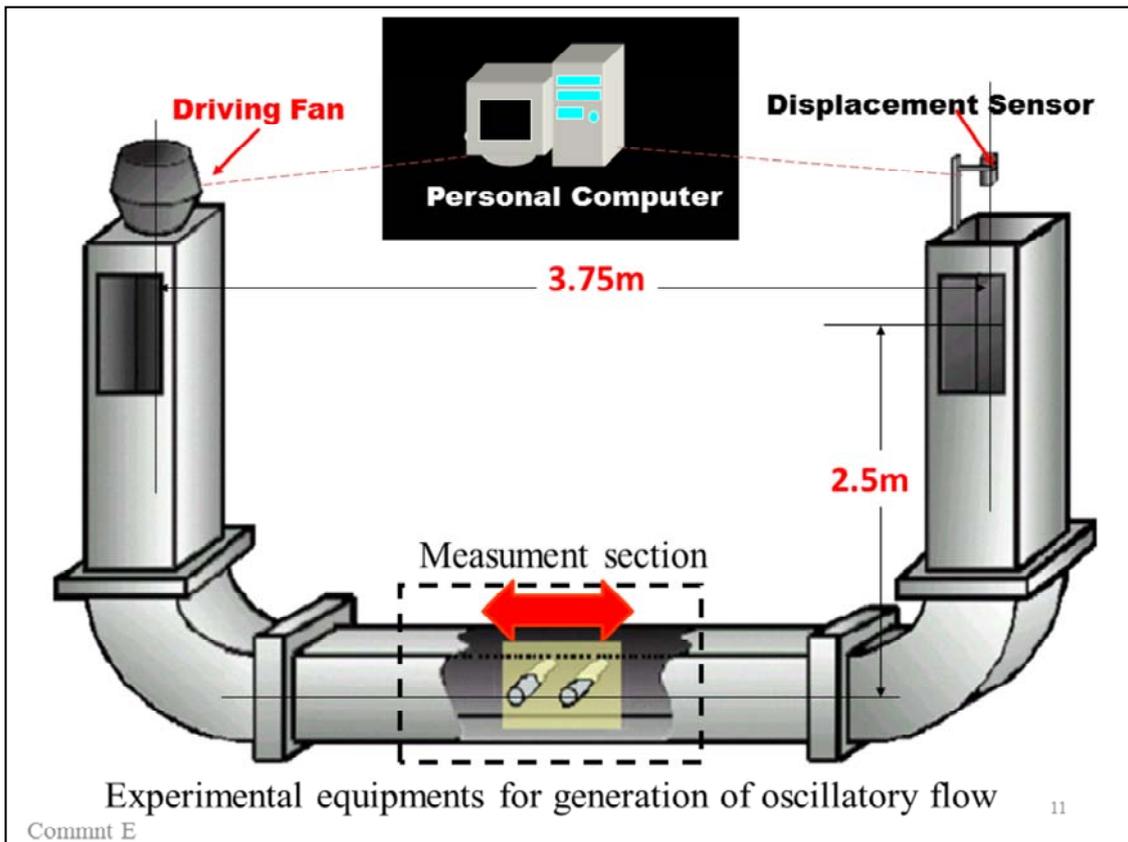
Boundary Conditions

We have developed our own computational code for oscillatory flow.



This fig. shows schematic of the boundary conditions. On the cylinder surface, the non-slip conditions for velocity and we imposed the zero-gradient condition for pressure; and applied the potential-flow-condition of the oscillatory flow like this in outer-boundary; In spanwise-boundary, we used the periodic boundary condition of span-length $L=5H$ of the computational domain like this.

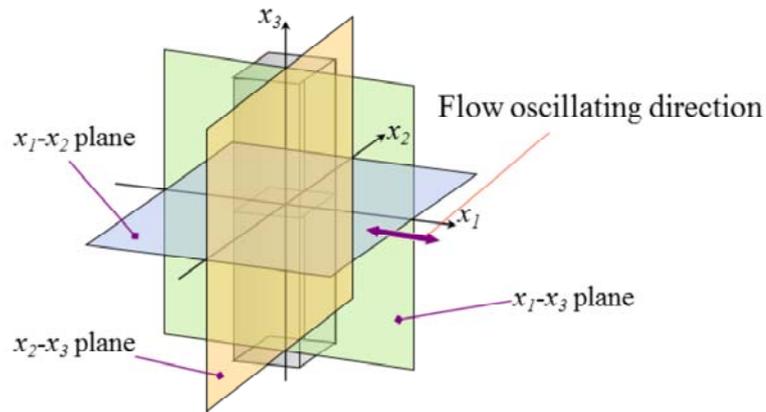
境界条件は図に示すように円柱表面上において速度は粘着条件を、圧力は壁面に直角方向の勾配が0であるノイマン条件をそれぞれ与え、遠方境界には振動速度を有する非定常ポテンシャル流での速度、圧力をそれぞれ与えた。また、スパン方向にはスパン長さ $5H$ を周期境界条件を課すことにより、対象とする正方形柱を2次元無限スパン長さとして相当することとして計算した。



We have carried out flow-visualization and measurement of fluiddynamic forces by using this equipment.

振動流を発生する実験装置である。U字管形状の水槽は、500mm×500mmの流路断面で、水平流路長さは3.75mで、高さ2.5mである。振動流はU字管水槽の左上に設置した送風ファンを周期的、間欠的に駆動することによって、U字管の共鳴振動の原理によって測定部に振動流(周期 $T=2\pi\sqrt{L/2g}$)が発生するようにする。

計算座標



計算条件

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
KC	2	2.5	3	4	5	6	8	12	16	20	25
β	95										
Re	190	237.5	285	380	475	570	760	1140	1520	1900	2375
A/H	0.32	0.4	0.48	0.64	0.8	0.95	1.27	1.91	2.55	3.18	3.98

比較的
低い Re

Commnt J

12

⑫

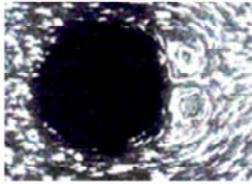
本計算で用いる座標系は振動方向を x_1 , それと直角方向を x_2 , そしてスパン方向を x_3 とし, 各平面を図のように定義する。

計算条件は, 過去の研究により, b 数の流れパターンへの影響が少ないことを考慮し, b 数を95で一定とし, KC 数を2から25まで変化させて計算を行った。本計算では表2に示す KC 数および β 数について計算を行った。

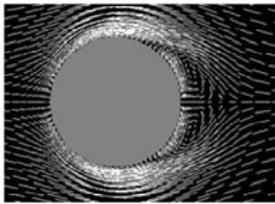
得られた流れパターンの KC 数による変化を実験結果(4)(5)と比較する。ここで, 岡島らの実験結果(5)は $\beta=95, 153$ を用いているが, 本研究ではレイノルズ数($Re=KC \cdot \beta$)を抑えるため $\beta=95$ を採用した。ここで, Tatsunoら(4)の流れパターンの分類に示されるように, $\beta=95$ と $\beta=153$ の相違が流れパターンに与える影響は比較的小さいことを考慮し, 計算結果は岡島ら(5)において分類された双子渦領域, 非対称渦領域, トランスパース・ストリート領域, ダブルペア領域, 交互渦列領域の各流れパターンが出現する領域内に対応する KC 数の可視化実験結果と比較した。なお, 計算結果の表示に用いる各平面を図4に示す。

1. 振動流中に置かれた円柱周りの流れ特性

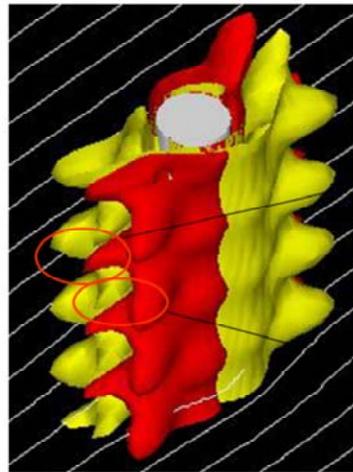
KC=3 (双子渦, スパン方向の縦渦形成領域)



Visualized pattern (x_1 - x_2 plane, $KC=3.5$, $\beta=153$, Okajima et al.)



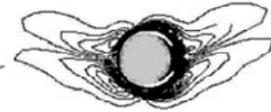
Velocity vector (x_1 - x_2 plane, $x_3/D=2.4$, $t/T=40.0$)



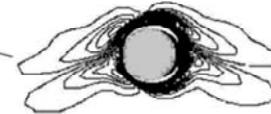
$t/T=60.0$

Iso-surface of vorticity ω_3 ($\omega_3 = \pm 0.05$)

Vorticity contour ω_3 (x_1 - x_2 plane, $t/T=60.0$)



$x_3/D=3.2$

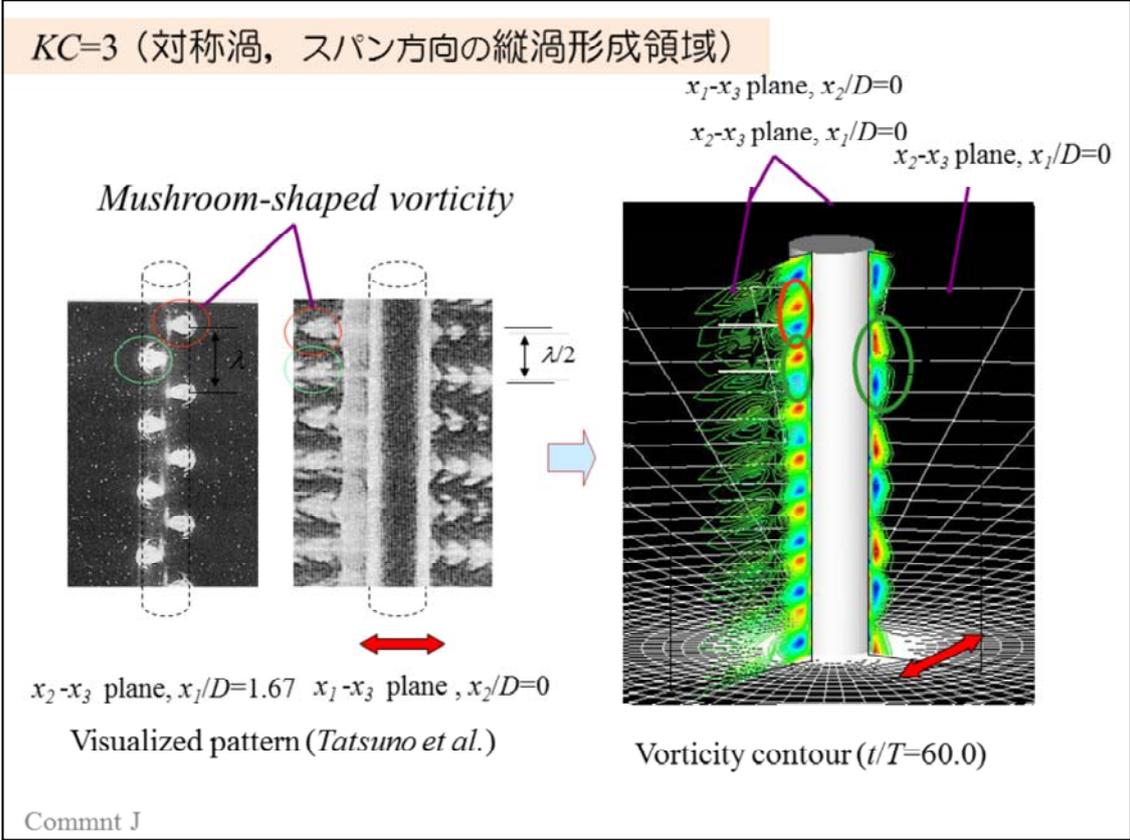


$x_3/D=2.6$



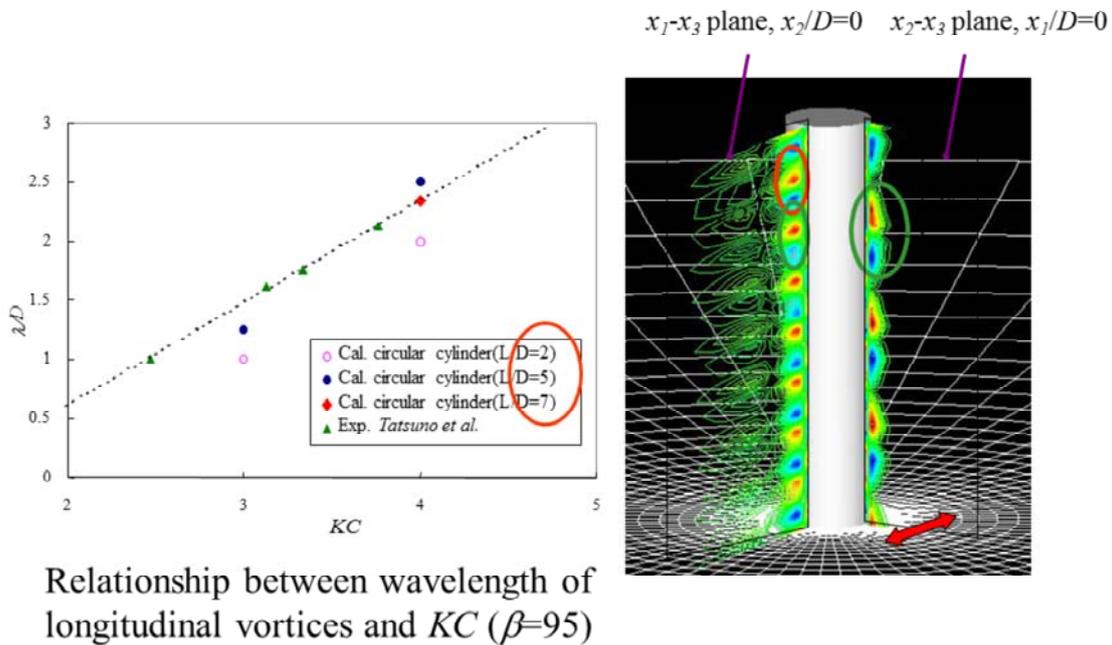
Commnt J

振動振幅の小さい $KC=3$ の場合, 図5(a)の最高流速時の x_1 - x_2 平面におけるベクトル分布図に示すように, 流れは物体表面から離れるが, 後流領域の発達是小さく, 流れパターンは振動方向に対してほぼ上下対称である. スパン方向の流れパターンは, 図5(b)の渦度の等値面に示すように時刻 $t/T=40.0$ までは二次元性を保つ. しかし, 時間経過とともに図5(c)~(f)に示すように, 時刻 $t/T=60$ ごろまでに流れ場は徐々に三次元構造をもつ流れに発達する. このパターンは図5(f)に示すようにスパン方向に周期性をもつセル構造を形成し, その各周期における逆位相のスパン断面では図5(g), (h)のように渦度分布の偏りは逆方向である.



Tatsunoらの実験(4)では、 $1.6 < KC < 15.5 < \beta < 160$ の範囲で流れパターンをA*, A~Gの8つの領域に区分している。このうち $KC=3, \beta=95$ の領域は領域Bに相当し、この領域では境界層の不安定により生じる図5(i), (j)の電解沈殿法による可視化写真に示すようにスパン方向に周期的なマッシュルーム形状をもつ縦渦が形成される。この縦渦は図5(i)に示す x_2-x_3 平面において波長 λ で円柱両側に存在し、その配列はそれぞれ円柱の左右で $\lambda/2$ だけスパン方向にずれている。そして、スパン方向にずれた縦渦は図5(j)に示す x_1-x_3 平面において交差する。このような可視化結果に対し、本計算の三次元流れも、図5(k)に示す x_2-x_3 平面においてマッシュルーム形状の渦が異なる円柱側面においてスパン方向に $\lambda/2$ ずれ、図5(l)に示す x_1-x_3 平面において交差している。また、図5(m)の円周方向の渦度の等値面に示されるように、 x_2-x_3 平面の縦渦は円柱表面に沿って連なり、 x_1-x_3 平面において交差することが明らかである。このようにマッシュルーム形状の縦渦が x_2-x_3 平面で円柱の左右においてスパン方向に交互に存在すること、それらの縦渦が x_1-x_3 平面において交差することの2点の特徴が同一であり、実験と計算の縦渦構造は極めてよく一致している。そして、 $KC=4$ の場合、流れの振動振幅の増加により、図6(a)に示すように後流域が大きくなるが、渦放出は見られない。これは、図6(b)の岡島ら(5)の粒子法による可視化実験結果と一致する。図6(c)~(e)に示すスパン方向の流れを見ると三次元渦構造は $KC=3$ の場合とほぼ同様であるが、縦渦の強さ、波長は増加する。Tatsunoらの可視化実験結果(4)では、この領域は領域Bと振動方向に対して片側への渦放出が見られる領域Eとの境界に位置し、本計算においても渦が物体に付着して存在する限界領域にあると推測される。

スパン方向の縦渦の波長のKC数による変化



Commnt J

図7に縦渦の波長 λ と KC 数の関係をまとめて示す. 図7より計算結果は KC 数に比例して大きくなりTatsunoらの実験結果(4)ともよく一致する. ここで,計算において周期境界を与えるスパン長さの影響を見るため,スパン長さ $L/D=2, 5$ の2種類について計算を行った.計算結果は $KC=3, 4$ ともスパン長さの大きい $L/D=5$ の計算結果のほうが実験結果により近づく. これはスパン方向の周期境界条件を与える際,縦渦の形成個数が整数個に限定され,その取り得る個数がスパン長さの増加に伴い増加し,波長の制限が緩和されるためである. また,周期境界条件,メッシュ間隔等の影響について調べるため,スパン方向に速度こう配零のSlip条件や格子間隔が半分メッシュを用いて予備計算を行ったが,縦渦の波長入等への大きな影響は見られなかった. 以上の知見より以後の計算についてはスパン長さ $L/D=5$,スパン方向の格子間隔 $0.2D$ とした. さらに流れの振動振幅が増加し, $KC=5$ になると渦の非対称性が顕著となるが,完全な渦の発達は見られない. この領域では流れの反転により物体から離脱した渦が x_1 に対し片側にのみ移流し, Tatsunoらの実験結果(4)による領域Bから領域Eへの流れパターン領域の移行と対応する.

Tatsunoらの実験結果のA,B,C,D,E領域:

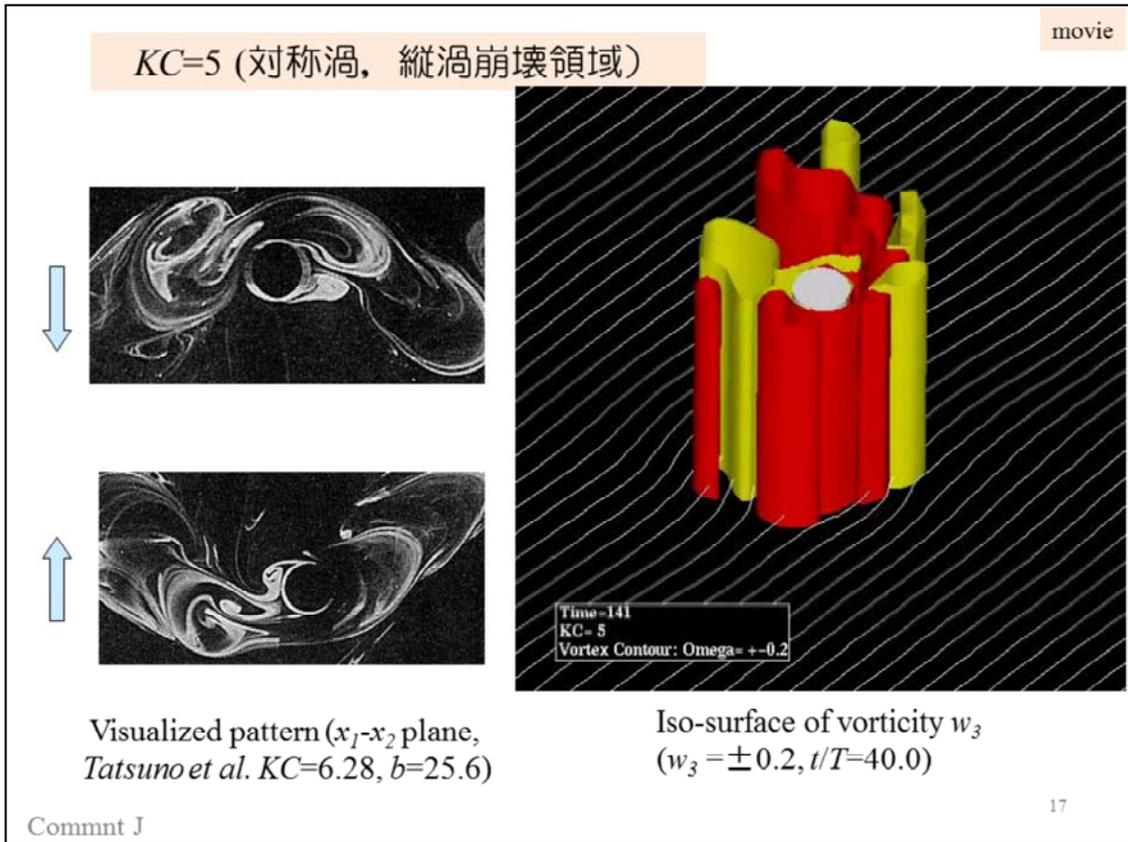
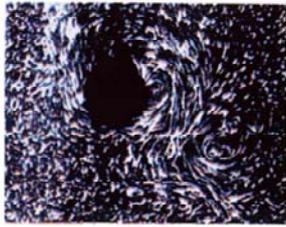


図8(a)に示すように流れの非対称性と三次元性がほぼ同時に見られる $KC=3, 4$ のパターンと異なり, $t/T=11.0$ 付近では振動方向に対する流れの非対称性のみが出現し, スパン方向の流れの変化は見られない. その後, 図8(b)に示すように, $t/T=20.0$ 付近から流れの三次元性が顕著になり, 図8(a)の流れパターンがいったん崩壊する. それから, 図8(c)に示す規則的な三次元セル構造をもつ渦が形成, 離脱する. この三次元セル構造は $KC=3, 4$ の場合と異なり, 円柱付近に残存せず振動方向に対して片側に移流される. その移流方向は, 図8(a)の方向とは逆になる. その後, 規則的な三次元セル構造も図8(d)に示す $t/T=39.0$ 付近で崩壊し, 再び渦の移流方向が反対側に変化する. 渦の移流方向の変化については図8(e), (f)のTatsunoらの可視化実験結果(4)(x_1 - x_2 平面)にも示されており, 小さなじょう乱が原因と言及されている.

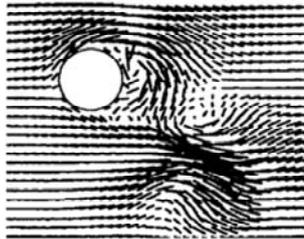
本計算結果では流れの二次元性の崩壊や規則的な三次元流れ構造が崩壊する過程において渦の移流方向が変化する様相がとらえられた.

3次元流れ構造のKC数による変化

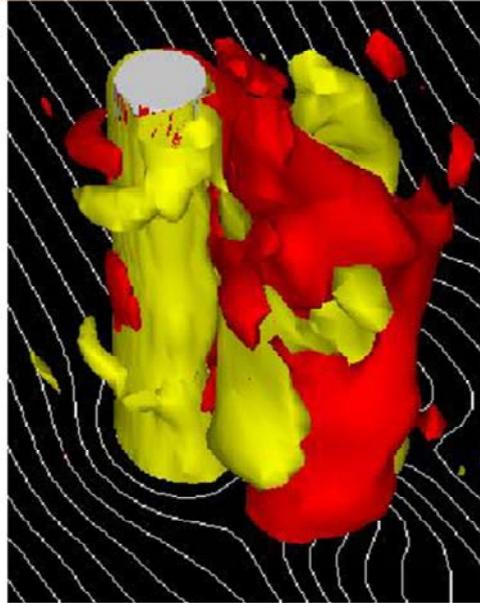
KC=8 (非対称渦, 縦渦崩壊領域)



Visualized pattern (x_1 - x_2 plane, Okajima et al. $KC=7.2$, $\beta=95.0$)



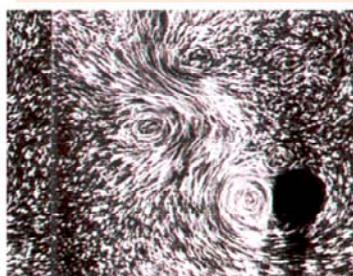
Spanwise mean velocity vector (x_1 - x_2 plane, $t/T=27.7$)



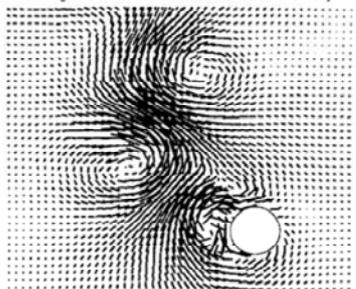
Iso-surface of vorticity ω_3 ($\omega_3 = \pm 0.2$, $t/T=40.0$)

KC数が増加しKC=8の領域では、図9(a), (b)に示すように x_1 - x_2 平面で流れの上下非対称性が大きくなり、形成された渦は振動の半周期で完全に発達し、放出される。そして図9(b)の流れパターン(x_1 - x_2 平面)のスパン方向の渦構造は、図9(c)のようにセル構造が崩壊していることがわかる。なお、渦放出と振動振幅の関連については第2報で詳述する。

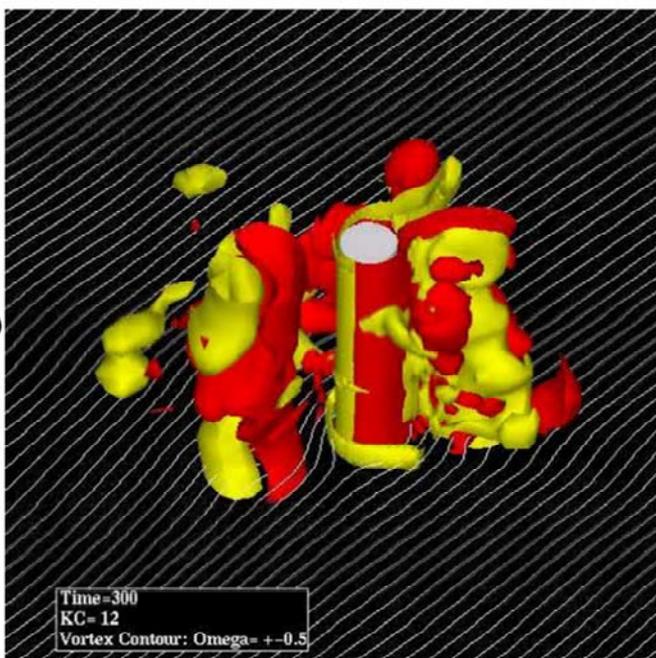
KC=12 (トランスバース・ストリート領域)



Visualized pattern (x_1 - x_2 plane,
Okajima et al. KC=11.9, $\beta=95.0$)



Spanwise mean velocity vector
(x_1 - x_2 plane, $t/T=38.7$)

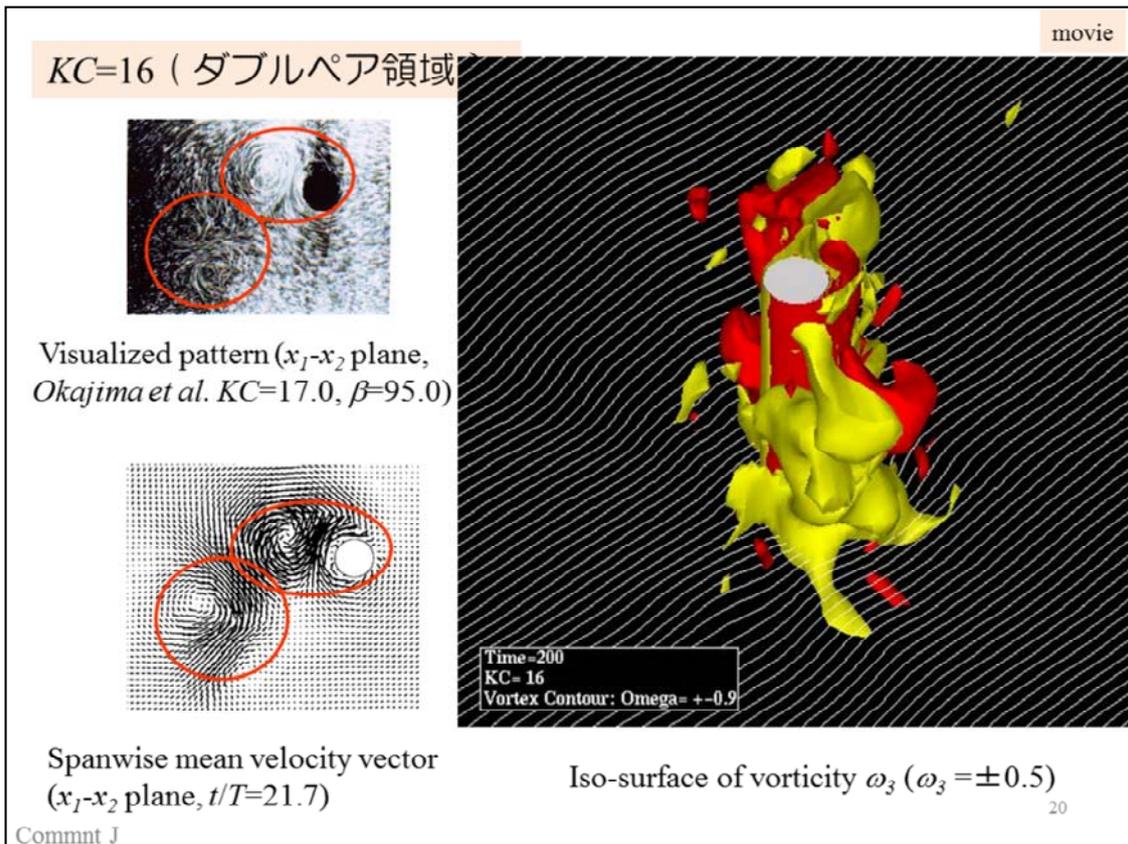


Time=300
KC= 12
Vortex Contour: Omega= + -0.5

Iso-surface of vorticity ω_3 ($\omega_3 = \pm 0.5$)¹⁹

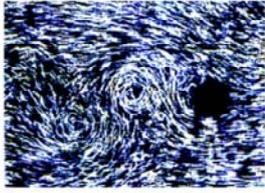
Commnt J

そして、 $KC=12$ 付近では図10(a)に示すように「トランスバース・ストリート」と呼ばれる振動方向に対し直角方向に渦列を形成する振動流特有のパターンが実験結果(5)において見られるが、このパターンは図10(b)のシミュレーション結果によっても再現される。この流れパターンが形成されるまでには図10(c)~(e)のように渦は種々な方向に放出され、その構造も複雑であるが、時間経過とともに、図10(f)のトランスバースストリートの流れパターンへと収れんする。

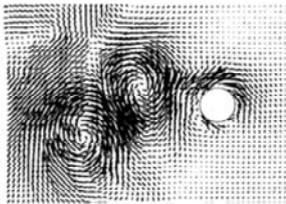


さらに、大きいKC数のKC=16付近では、図11(a)のような、各半周期ごとに振動方向に対して 45° の角度で渦列をなす「ダブルペア」の流れパターンが現れる。本計算においても図11(b), (c)に同様の流れ場が確認されるが、振動周期ごとの三次元構造や渦放出方向の変化が大きく、ダブルペアのパターンは断続的にしか見られない。

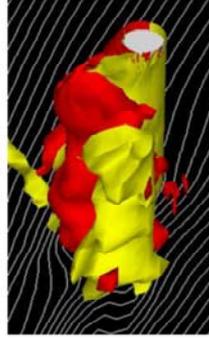
$KC \geq 20$ (交互渦列領域)



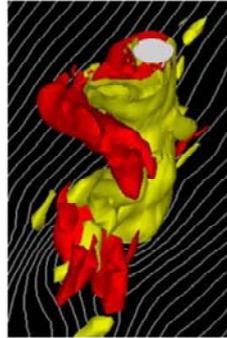
Visualized pattern (x_1 - x_2 plane,
Okajima et al. $KC=26.5, \beta=95.0$)



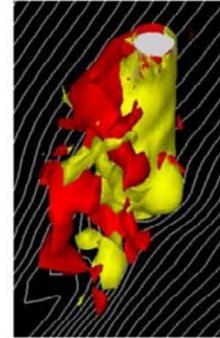
Spanwise mean velocity
vector (x_1 - x_2 plane,
 $t/T=21.7$)



$t/T=39.7$



$t/T=25.7$



$t/T=33.7$

Iso-surface of vorticity ω_3 ($\omega_3 = \pm 0.9$) ²¹

Commnt J

さらにKC数が増加し、 $KC \geq 20$ になると図12(a)(b)のように基本的には物体後流に交互渦列が形成されるが、図12(c)のようなスパン方向にほぼ一様な交互渦列が継続せず、図12(d)のようなスパン方向一様でないパターンや、さらには図12(e)に示す双子渦に近い流れパターンが間欠的に見られる。これは振動振幅の増加に伴い渦の強度が増し、その結果、数周期にわたり渦が円柱近傍に残存し、それらの干渉が流れパターンをより複雑にしているためと考えられる。

一般に、 x_1 - x_2 平面で二次元的に観測されるトランスパースストリート、ダブルペアそして交互渦列などの流れパターンは、本シミュレーションによっても再現でき、可視化実験結果とよい一致が得られた。さらにそれら振動流特有の流れパターンは、それぞれ三次元渦構造の複雑な時間的変化を伴っていることがわかる。

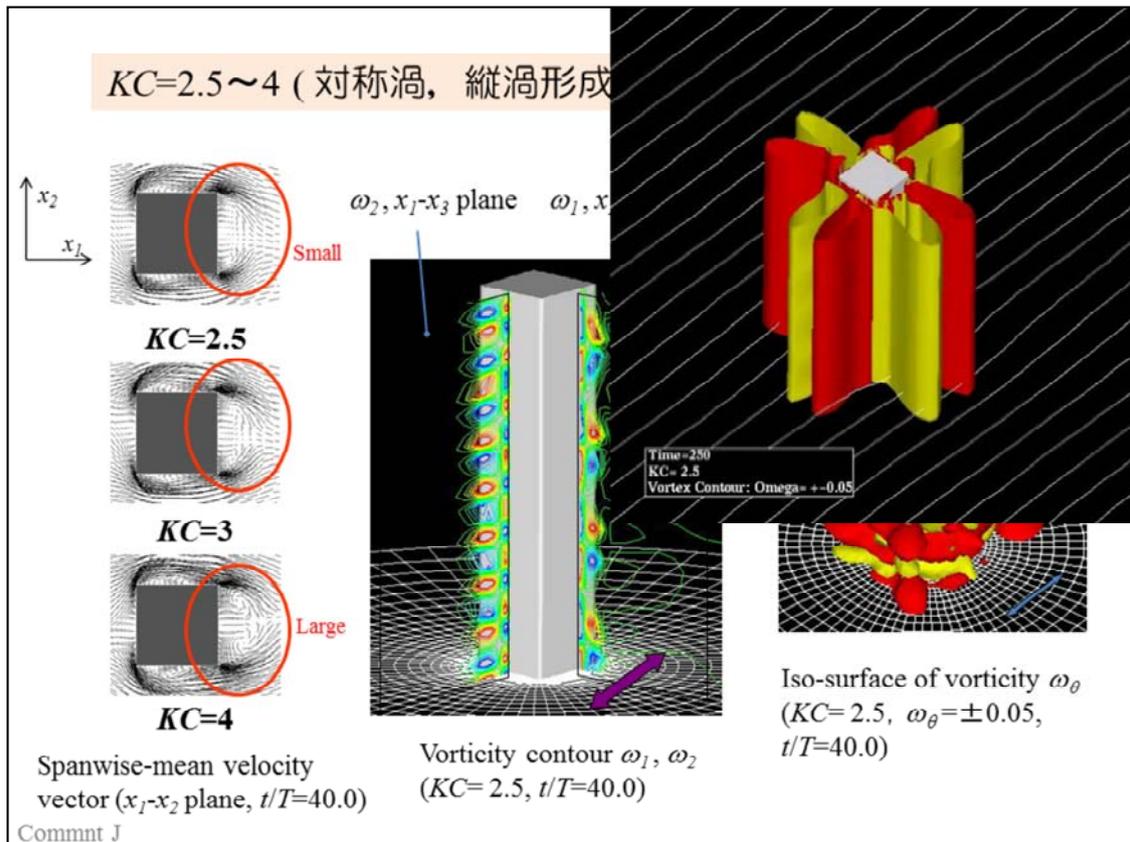
振動流中に置かれた円柱周りの流れパターンのまとめ

- ① KC 数の変化における流れパターンの変化を可視化実験結果と比較し、スパン方向に波長 λ の縦渦構造の形成、トランスバース・ストリート、ダブルペアの流れなどの振動流特有の流れパターンを再現し、本計算の妥当性を確認した。
- ② トランスバース・ストリート、ダブルペアそして交互渦列などの振動流特有の流れパターンにおいても、それぞれ3次元渦構造をもち、極めて複雑な時間的变化を伴って変化する。

2. 振動流中に置かれた正方形柱周りの流れ特性

23

説明



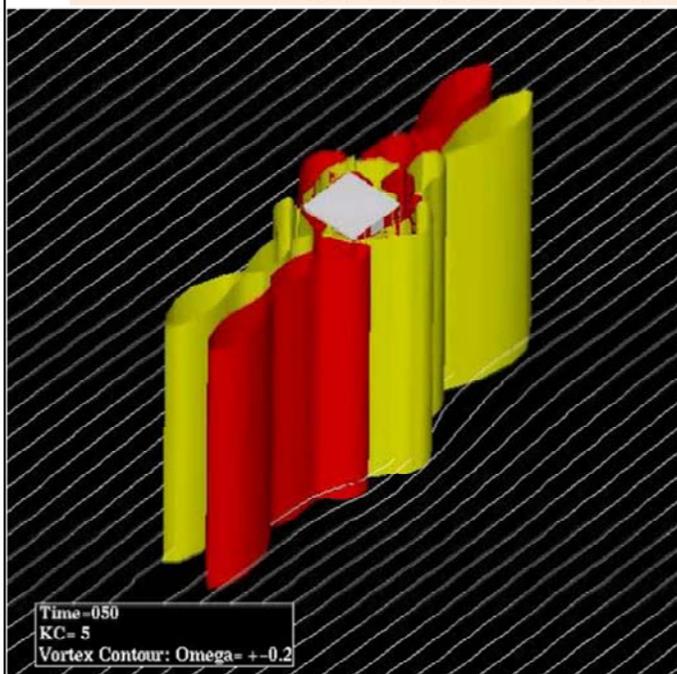
流れの振動振幅の小さい $KC=2.5\sim 4.0$ の領域での流れパターンを示す。

この領域では図4の最大流速時刻においてスパン方向に平均した x_1 - x_2 平面の速度ベクトルに示すように、前縁から剥離した流れは角柱側面において再付着し、その後、後縁において再び剥離する。 KC 数が増加するに従い、流れの再付着する位置は後縁に近づき、後縁から剥離した流れ領域も大きくなる。

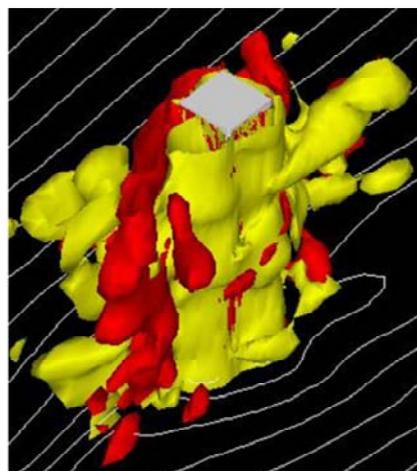
また、この KC 数領域では緒論で述べたように物体が円柱の場合、スパン方向に周期的に配列する縦渦が可視化実験や計算により確認されているが、図の x_2 - x_3 平面及び x_1 - x_3 平面における等渦度分布に示すように角柱の場合でもスパン方向に周期性を有する縦渦が形成されることがわかる。

その構造は、図6(a)の周方向の渦度(ω_θ)の等値面に示すように x_2 - x_3 平面に見られる縦渦が x_1 - x_3 平面において交差しており、その様相は円柱の場合とほぼ同じである。

$KC=5 \sim 8$ (対称渦, 縦渦崩壊領域)



Iso-surface of vorticity ω_3 ($KC=5$, $\omega_3 = \pm 0.2$)

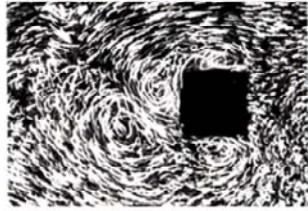


Iso-surface of vorticity ω_3
($KC=8$, $\omega_3 = \pm 0.4$, $t/T=14.7$)

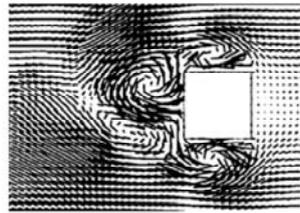
KC数が増加し $KC=5$ になると図10(a)の渦度の等値面に示すように流れの2次元性が崩壊する $t/T=10.1$ 付近において、一旦、スパン方向に波長の短い縦渦が形成されるが、その規則的な縦渦は持続して存在せず、図に示すように時間の経過と共に $t/T=14.1$ 付近ではその規則性が崩壊する。

さらにKC数が増加し、 $KC=8$ になると図のように後縁から剥離した流れ場に非対称性が見られるようになり、スパン方向の流れも規則性がなくなる。

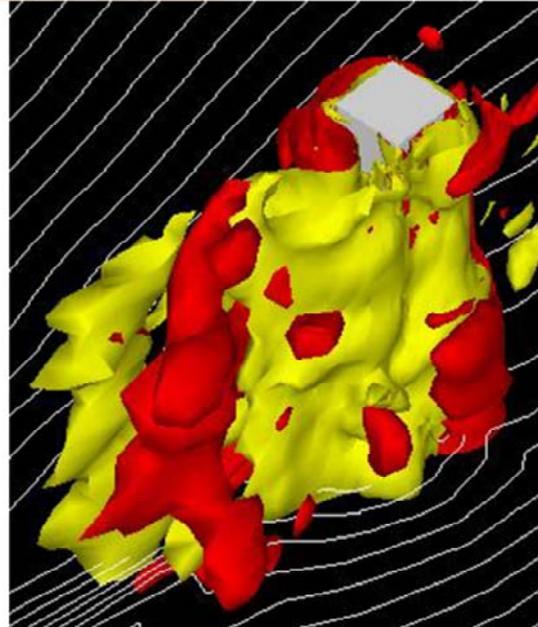
KC=12 (前縁, 後縁非対称渦領域)



Visualized pattern (x_1 - x_2 plane,
Okajima et al. KC=12.6)



Spanwise mean velocity
vector(x_1 - x_2 plane, $t/T=40.0$)



Iso-surface of vorticity ω_3 (ω_3
 $=\pm 0.5, t/T=32.7$)

Commnt J

$KC=12$ の領域では図12(a), (b)の x_1 - x_2 平面の流れに見られるように流れ場の非対称性は $KC=8$ の領域に比べ増加するが, 緒論で述べた円柱の場合にみられたトランスバース・ストリームの流れパターンは見られず, 形成された渦は物体近傍に留まっている。

この原因として角柱角部によりはく離点が固定され, さらに, 前縁から剥離した流れが角柱側面で再付着するため, 円柱のような片側の渦の卓越が抑制されるためと考えられる。

また, 図12(c)の渦度の等値面に示すようにスパン方向の流れ場は, さらに複雑となることがわかる。

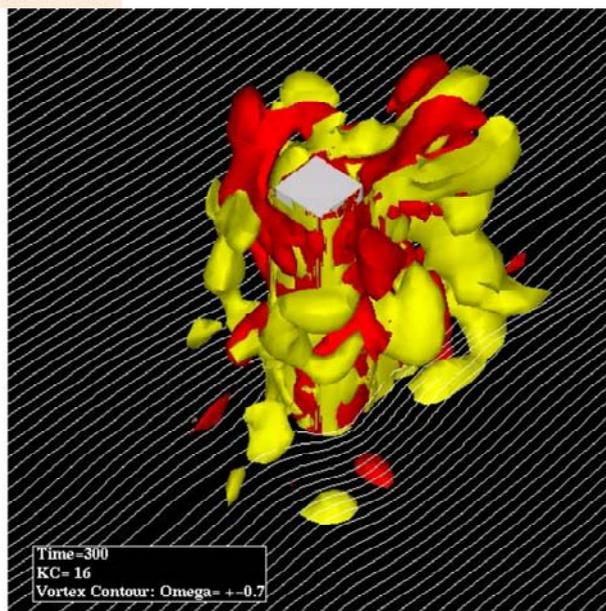
KC=16 (片側再付着流れ領域)



Visualized pattern (x_1 - x_2 plane,
Okajima et al. KC=17.0)



Spanwise mean velocity vector
(x_1 - x_2 plane, $t/T=40.0$)



Iso-surface of vorticity
 ω_3 ($\omega_3 = \pm 0.7$, $t/T=32.7$)

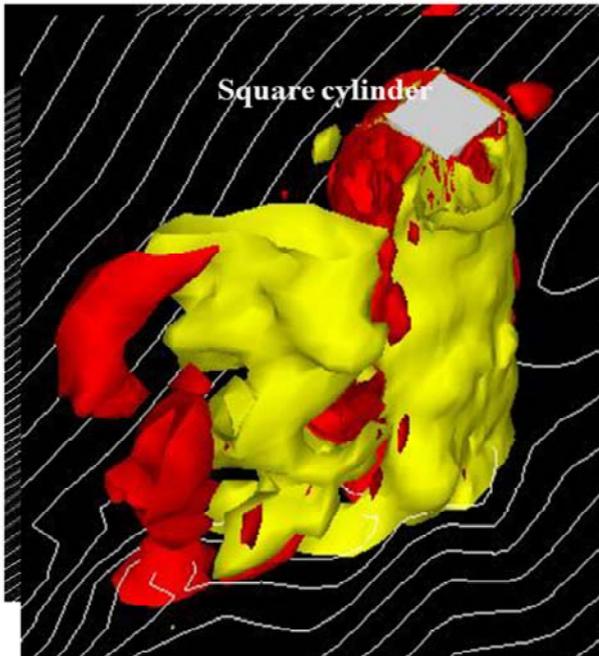
Commnt J

27

KC=16付近になると図13(a), (b)の x_1 - x_2 平面の流れのように, 実験結果, 計算結果共に流れ場の非対称性が大きくなり, 図13(c) の渦度の等値面のように前縁からはく離れた流れが角柱側面の片側でのみ再付着する片側再付着流れが見られる。しかし, 円柱で見られたようなダブルペアの流れパターンは出現しない。

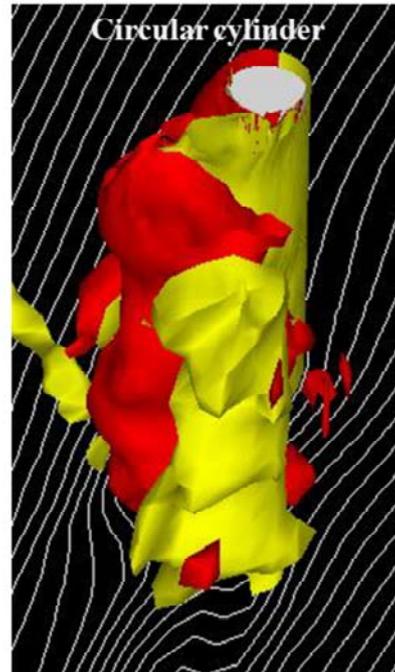
$KC \geq 20$ (完全剥離流れ領域)

movie



Iso-surface of vorticity ω_3 ($KC=20.0$,
 $\omega_3 = \pm 1.2$)

Commnt J

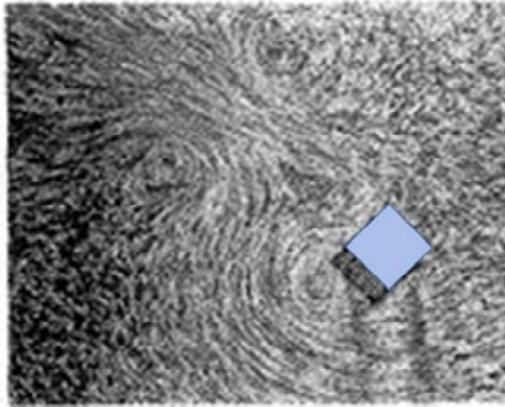


Iso-surface of vorticity ω_3 ($KC=20.0$,
 $\omega_3 = \pm 0.9$, $t/T=39.7$)

$KC > 20$ の領域では図14の渦度の等値面に示すように、角柱前縁からはく離れた流れは角柱側面で再付着せず、物体を巻き込む大きな後流領域を形成する。その結果、角柱後流には交互渦列が見られるようになり、更なるKC数の増加により、物体断面形状による相違が次第に小さくなると考えられる。

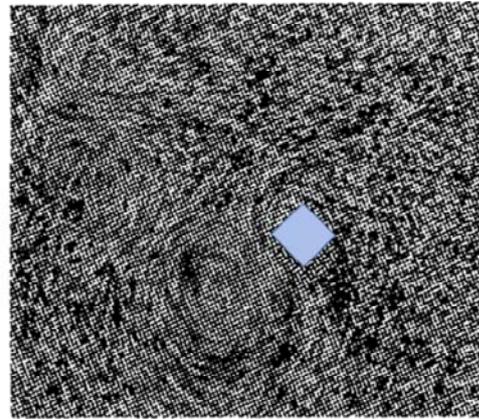
正方形柱の $\alpha = 45^\circ$ の場合、円柱と同様に半周期ごとに振動流特有の「トランスバースストリート」, ダブルペアの流れパターンが生じる。

③-9=178 振動流中に置かれた種々な迎え角の正方形柱の流れ特性「結論」



(d) $\alpha = 45^\circ, KC = 10.4, \beta = 29$
($U = 0$)

Transverse street pattern



(e) $\alpha = 45^\circ, KC = 20.0, \beta = 195$
($U = 0$)

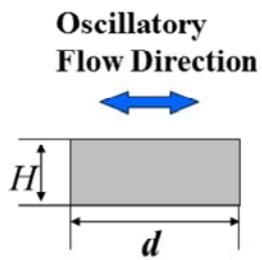
Double pair pattern

29 29

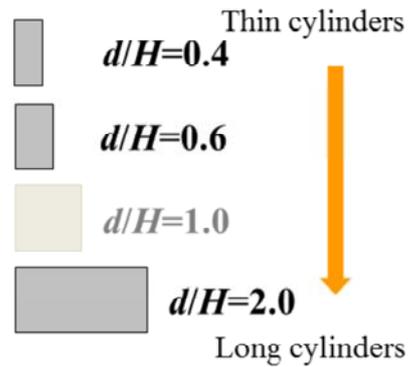
さらに KC 数が増加すると流れに対して物体形状が対称な $\alpha = 45^\circ$ の場合には円柱の場合に見られた振動数特有の流れパターンが現れる。すなわち、図5(d)と図5(e)には、それぞれ一般に「トランスバースストリート」と「ダブルペア」と称される流れパターンが現れる。

3. 振動流中に置かれた矩形柱周りの流れ特性

Rectangular Cylinder



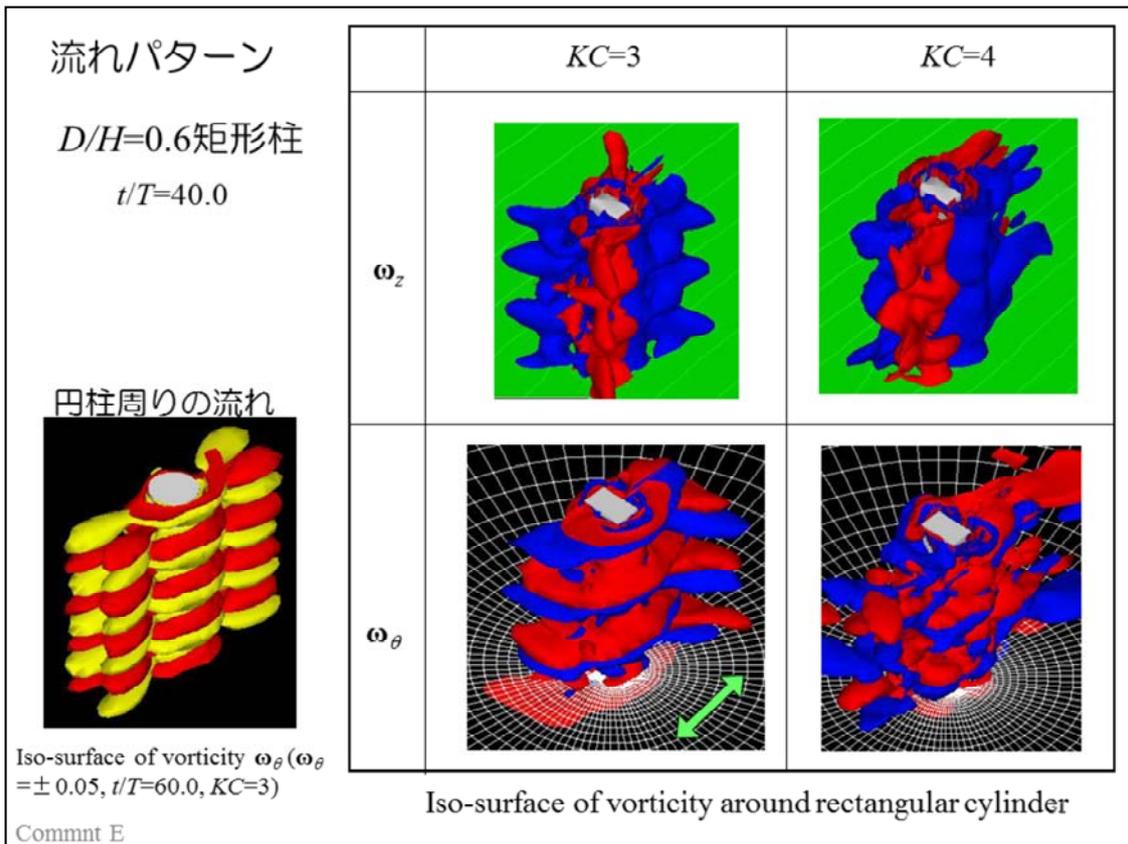
The Side Ratio: d/H



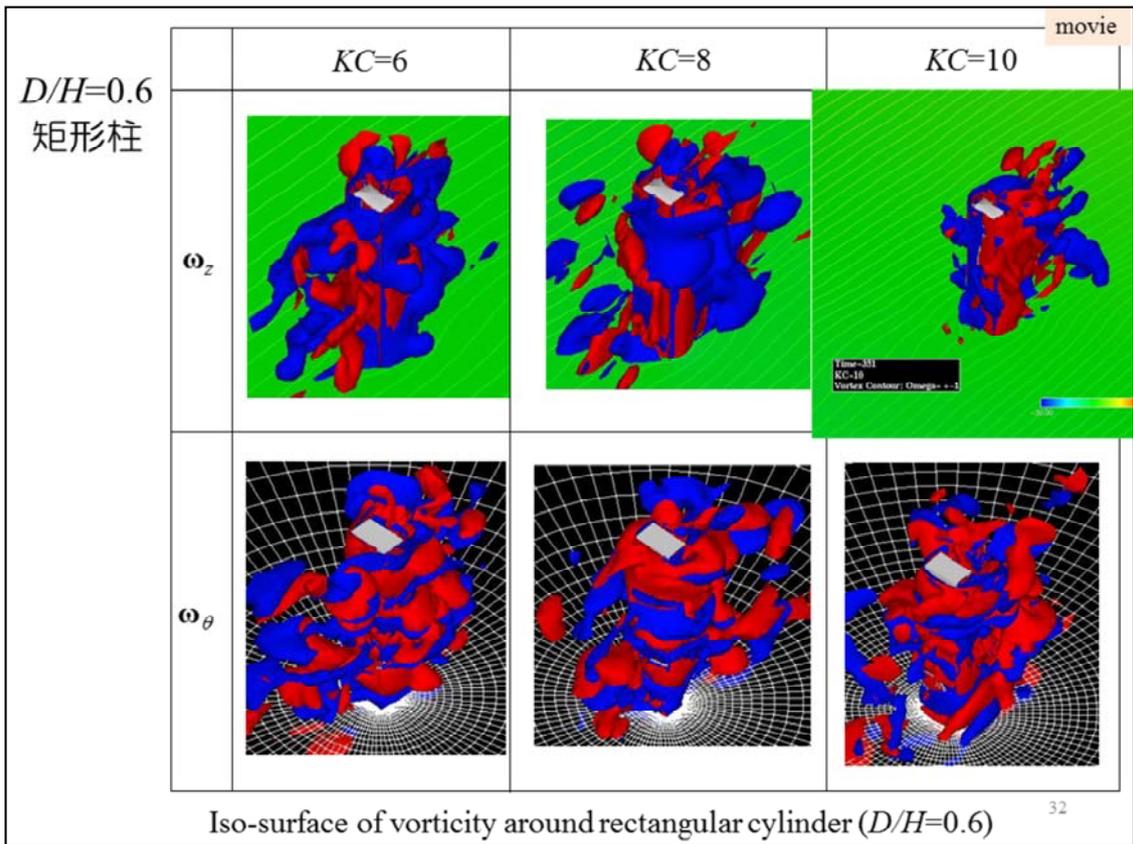
Commnt E

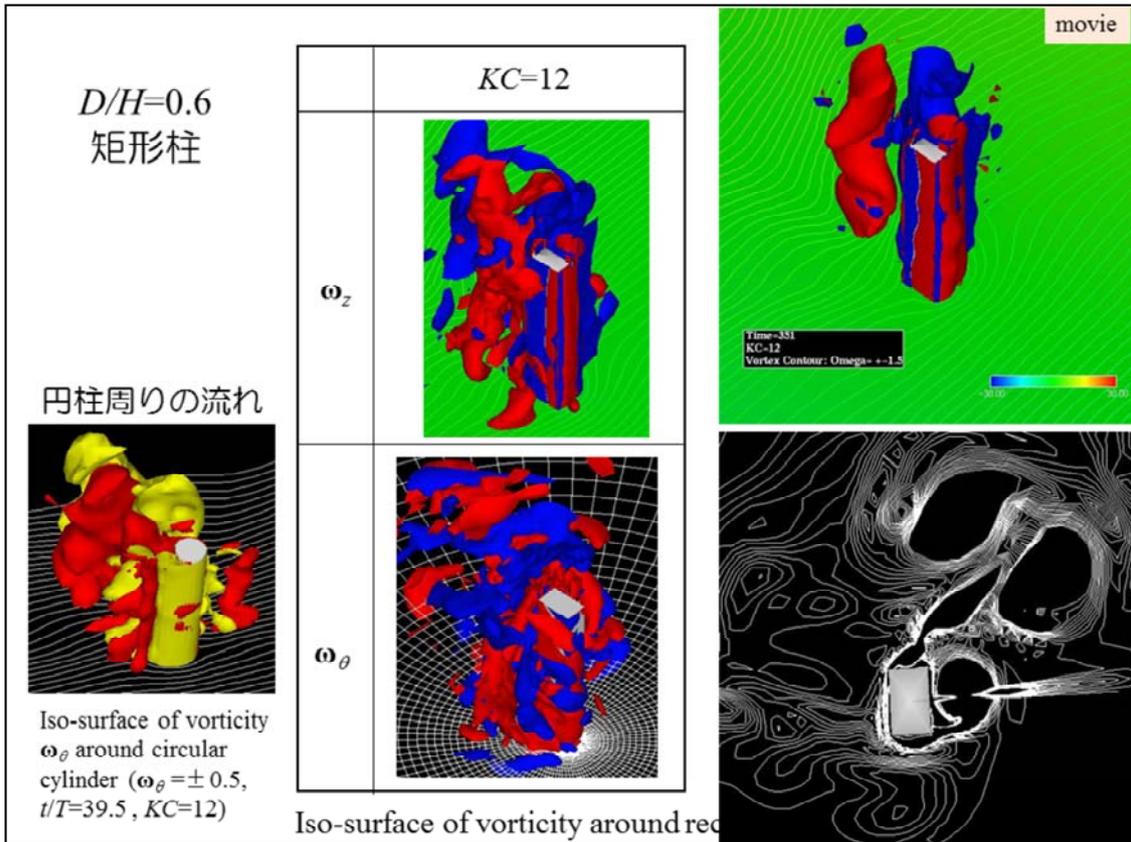
Flow separation from sharp-corner of various rectangular cylinders

Computational flow patterns around a rectangular cylinder with cross-section, $D/H=0.6, 1.0$ and 2.0 are shown in the plane x_1-x_2 as illustrated in Fig. 3.

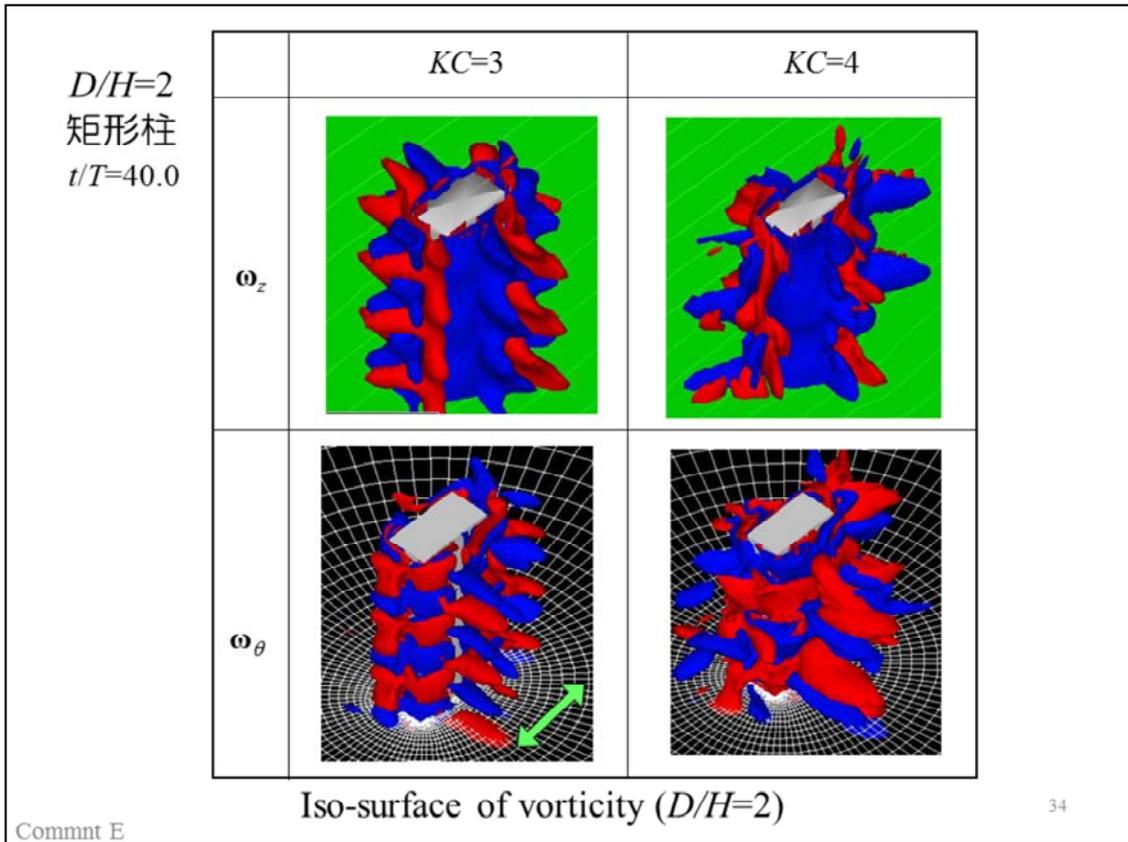


In the case of $D/H = 0.6$ the flows separated from the leading edges of the cylinder do not reattach to both sides of the cylinder independently of KC and roll up in the wake as in Fig4(a), (b) and (c).

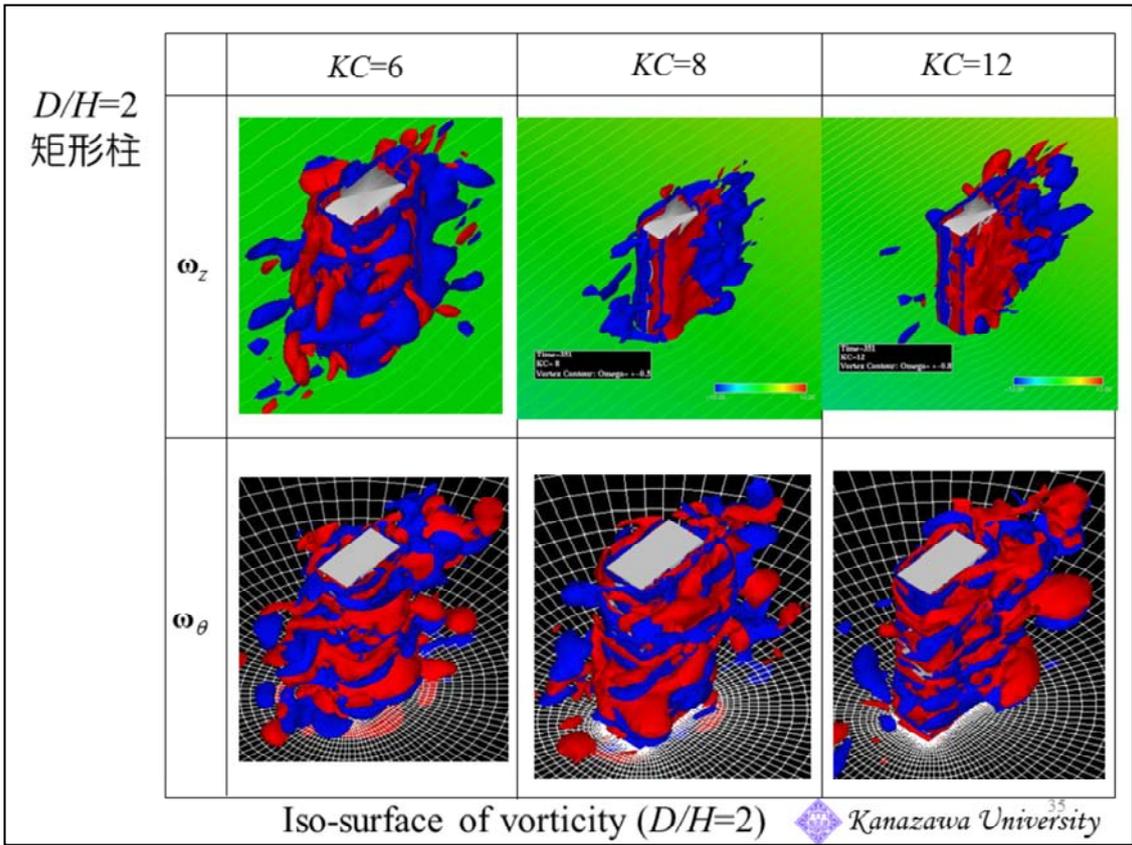




On the other hand, in the case of $D/H=1.0$, at the low KC numbers such as $KC=3.0, 6.0$, the flows separated from the leading edges of the cylinder reattached to the sides of it. Then the flows separate again from trailing edges and form the twin vortices in the wake. The size of twin vortices become large as KC increases as shown in Fig. 5 (a) and (b). At a further increasing of KC number, at $KC=12$, the flows separated from the leading edges reattach to one side of the cylinder, while on the other side of it, the flow roll up in the wake without reattachment to the side as shown in Fig. 5(c).



In the case of $D/H=2.0$, the flows separated it reattached to them and form separation bubble as shown in Fig.6(a), (b) and (c) in all KC range computed.



振動流中に置かれた正方形及び矩形柱周りの流れ特性のまとめ

- ① 正方形柱周りの流れ場では,スパン方向の周期的な縦渦が生じることを初めて明らかにした.
- ② 正方形柱周りの流れ場では,トランスバース・ストリートやダブルペアの流れパターンは形成されない.
- ③ 正方形柱の迎え角 $\alpha=45^\circ$ では,円柱の場合と同様, $KC=10$ でトランスバース・ストリート, $KC=20$ でダブルペアの流れパターンが形成される.
- ④ $D/H \neq 0.6$ 矩形柱の $KC=12$ では,トランスバース・ストリートの流れパターンが形成される.

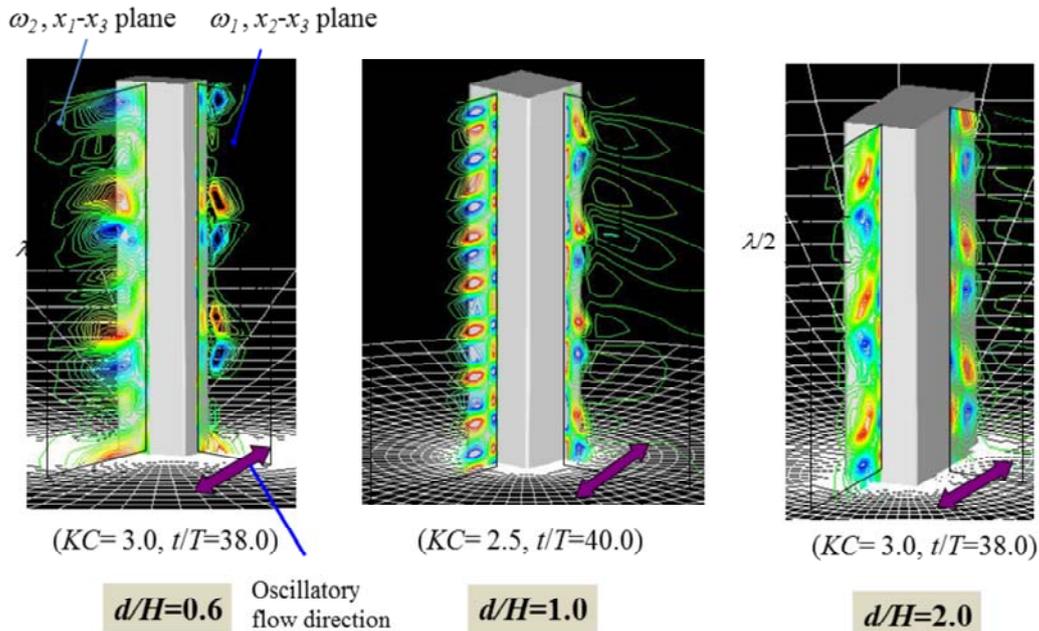
36

説明

4. 物体断面形状の影響と実験結果との比較
振動方向及び直角方向流体力係数

説明

Longitudinal Vortex-Structure $KC=2.5-3$



Comment E the structures of the mushroom-shaped vortices are the same for all cylinders.

38

These figure shows the vortex-contours in the spanwise section at KC number of about 3 for $d/H=0.6, 1$ and 2 cylinders. It is found that the longitudinal vortices were also formed for $d/H=0.6$ and $d/H=2$ cylinders, and the structures of the mushroom-shaped vortices are the same for all cylinders.

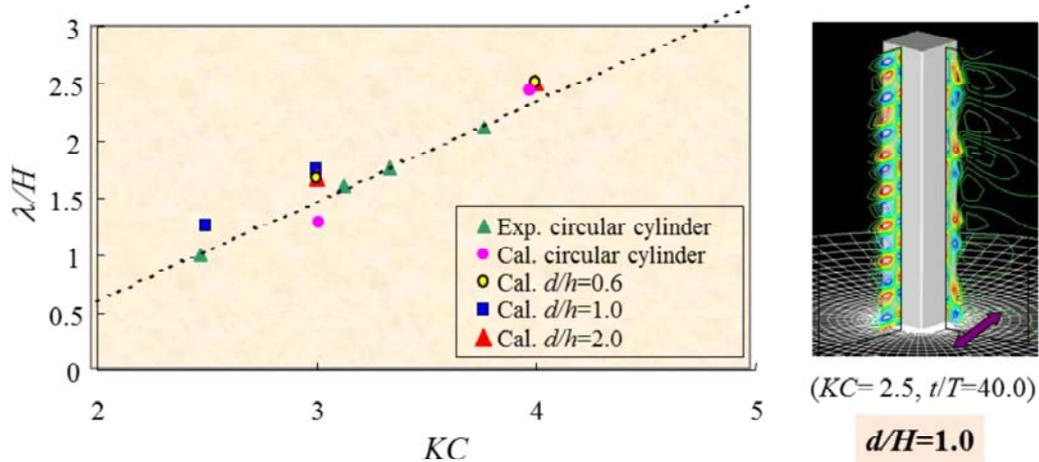
Three-dimensional flow structures around a cylinder

The 3-D flow structures x_1-x_3 plane ($x_2=0$) and x_2-x_3 plane ($x_1=0$) at the low KC region are shown by the vortex-contours in Fig.7(a), (b) and (c) in the cases of $d/H=0.6, d/H=1.0, d/H=2.0$, respectively.

In this KC range, the longitudinal vortices which arrange regularly along the cylinder have been observed by Tatsuno, et al.[5], and Honji [13], and reproduced by the calculations carried out by Okajima, et al.[14] in the case of a circular cylinder In

the case of a rectangular cylinder, the mushroom-shaped vortices also periodically appear along the surface of the cylinder with all cross-sections as shown in Fig7, and the alternately on either side of the cylinder with the vertical separation of the pitch λ along the span in the x_2-x_3 plane. Then the vortices intersect near the stagnation point and arrange in the plane with the vertical pitch of the $\lambda/2$. The structure of the longitudinal vortices is the same as that in the case of a circular cylinder.

Wavelengths of Longitudinal Vortices



Relationship between the wavelengths of longitudinal vortices and KC ($\beta=95$)

1. Longitudinal vortices are formed for various cylinders at low KC numbers.
2. The side-ratio gives no remarkable effect on the the wavelength of longitudinal vortices.

Commnt E

39

In this figure, we plot the spanwise-wavelength, λ against KC number, and also we compare the computed values of λ with the measured and calculated results of circular cylinder in this figure. For all the cross-sections, the values of λ increase as KC number increases, and the value of λ for a square and a rectangular cylinder, are almost the same value. The results indicate that longitudinal vortices are formed in the same way for various cylinders at low KC numbers, and the side ratio gives no remarkable effect on the wavelength of longitudinal vortices.

振動方向流体力

振動流中の物体には慣性力が作用する

Morisonの式

振動方向流体力 抵抗力 + 慣性力

$$F = F_d + F_i = \frac{1}{2} C_D \rho D |U| U + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{dU}{dt}$$

F_d : 抵抗力, F_i : 慣性力, C_D : 抵抗力係数, C_M : 慣性力係数

U : 瞬時の振動流速, ρ : 流体の密度

抵抗力係数, 慣性力係数の算出 \Rightarrow フーリエ変換

$$C_D = -\frac{3}{4} \int_0^{2\pi} \frac{F \cos \theta}{\rho U_m^2 H} d\theta$$

$$C_M = \frac{2}{\pi^3} \frac{U_m T}{D} \int_0^{2\pi} \frac{F \sin \theta}{\rho U_m^2 D} d\theta$$

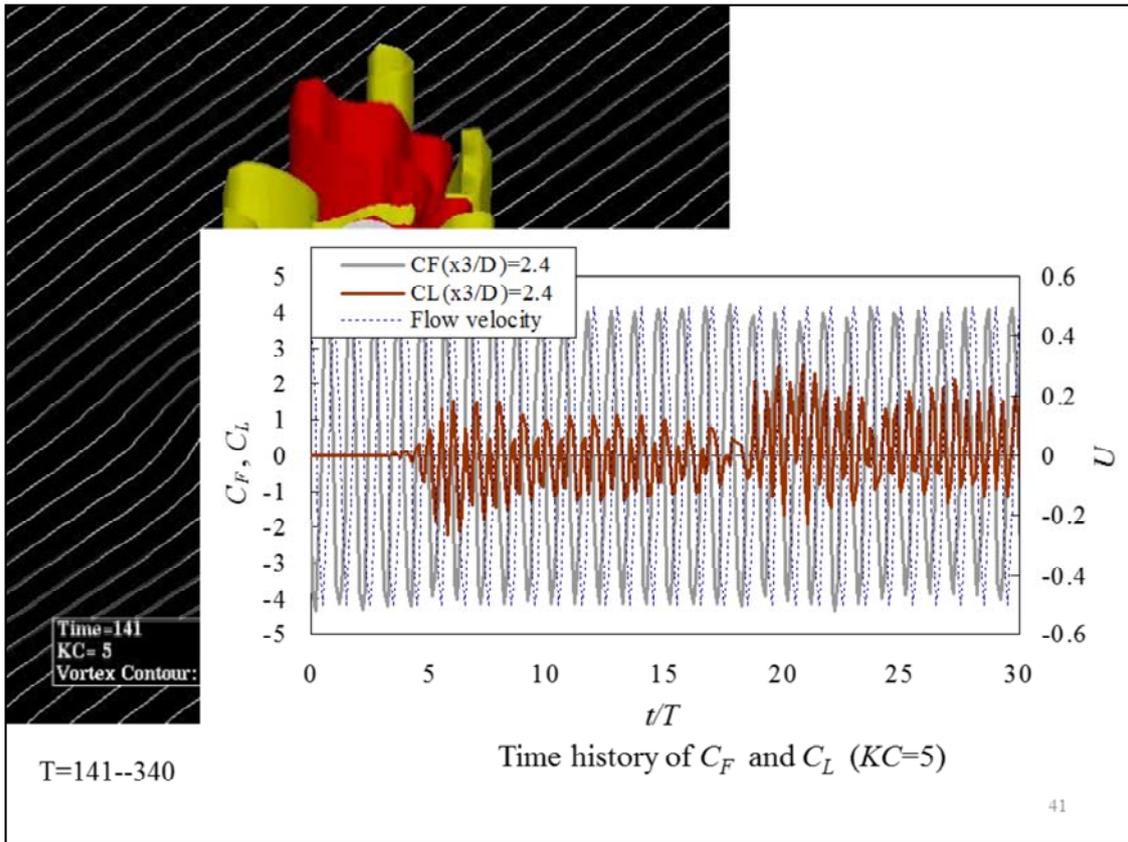
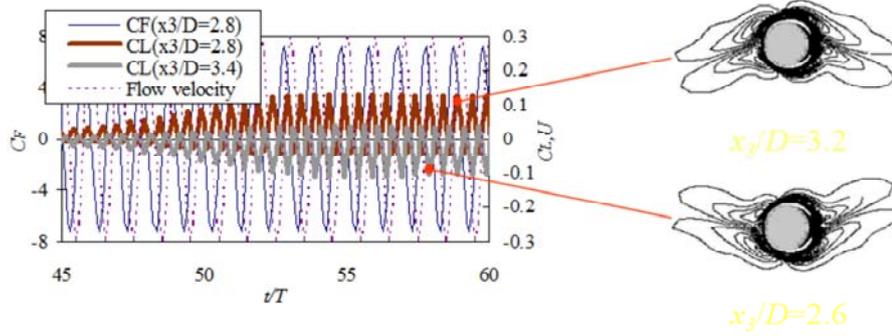
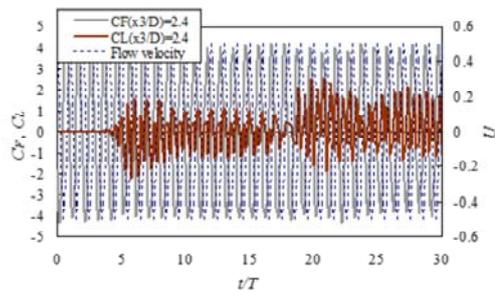


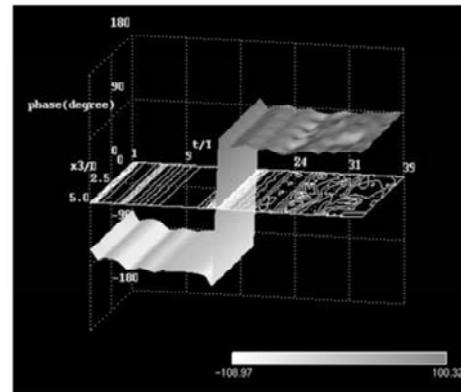
図2に示す $KC=5$ では、流れに三次元性が生じる前に流れ場は x_1 軸に対して非対称となり、その後、 $t/T=17$ 前後における流れパターンの二次元性の崩壊が生じ、渦の移流の方向が x_2 軸の正の方向から負の方向へと変化する。このような流れパターンの変化に対応して、 $x_3/D = 2.4$ における C_L の波形は、 $t/T=17$ 付近を境にオフセット値が -0.2 から 0.2 へと大きく変化する。なお、 $KC=5$ では C_L の波形の方向の相異はすくない。



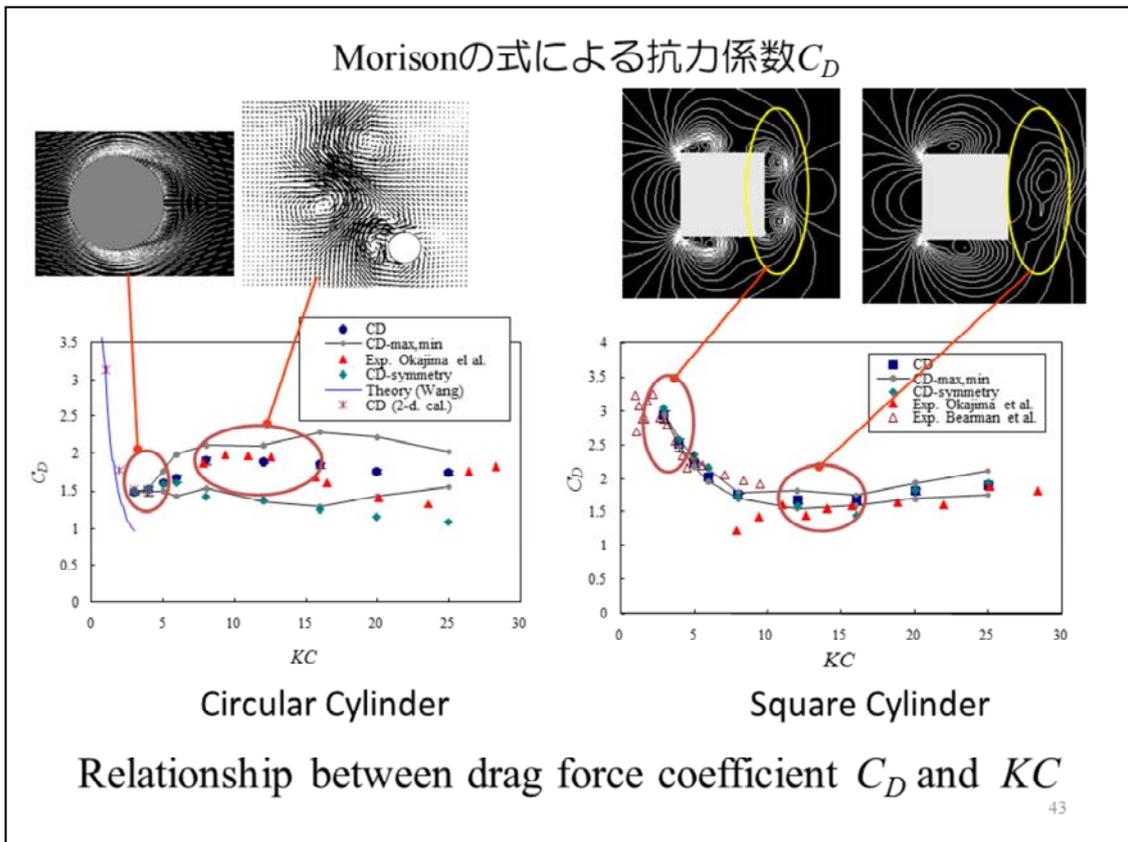
Time history of C_F and C_L ($KC=3$)



Time history of C_F and C_L ($KC=5$)



The phase of C_L ($KC=5$) 42

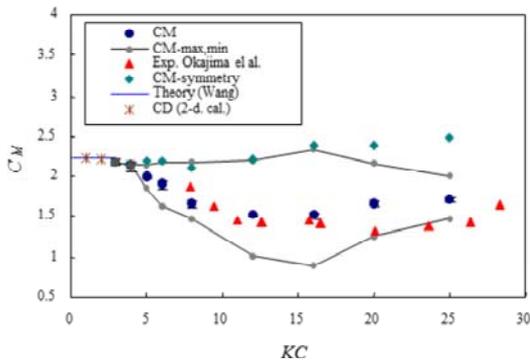


KC数の変化に対するモリソンの式による抗力係数 C_D の変化を図12に示す。ここで、●のプロットは流れ方向の x_1 軸に対する非対称性が卓越した後の時刻における C_D の方向平均値を示した。また、図12の実線は、 C_D の方向平均値を各周期ごとに算出し、その最大値および最小値を示している。参考のために、岡島らの実験結果を△印により、出発直後の数周期の間に見られる双子渦形成時の C_D の方向平均値を、◆印により示した。

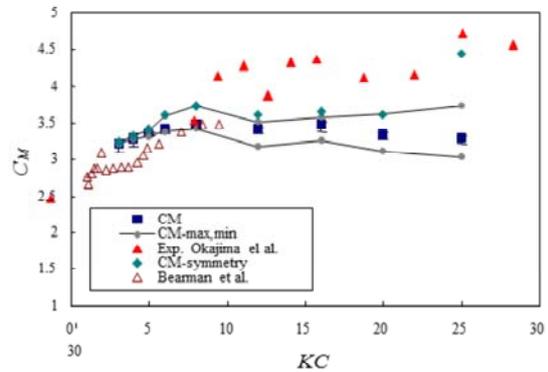
図12に示すように C_D 値は $KC = 4$ 付近の低 C_D 数領域から $KC = 12$ 付近までKC数の増加に伴い、剥離域の増大と渦形成、“トランスバースストリート”や“ダブルペア”等、大きな伴流を形成することによるため、実験結果と良く一致している。

一方、正方形柱の流体力は、モリソンの式による抗力係数 C_D とKC数の関係を右図に示す。ここで、計算結果の C_D は各位置におけるX1-X2断面で算出した抗力係数を方向に平均した値を用いた。図に示すように、 C_D は $KC=3$ の低KC数領域からKC数の増加と共に $KC=12$ まで値が減少しており、Bearmanらの実験結果($\beta=231$)(6)と良く一致している。この特性について調べるため、 $KC=3$ および $KC=12$ での最高振動流速時における物体周りの圧力場を最高振動流速に基づく動圧で規格化し、等高線として上図11(a),(b)にそれぞれ示す。 $KC=3$ のような低KC数では図11(a)のように物体後流の双子渦が物体近傍で強く巻き込む流れを形成し、その領域が負圧となるが、 $KC=12$ では図11(b)のように渦は低KC数領域に比べて物体から下流側に離れた位置で形成される。そのため、 $KC=12$ で $KC=3$ に比べて物体後流近傍で圧力が回復し、その結果、 C_D 値が小さくなるものと考えられる。 $KC > 12$ のKC数領域では C_D 値のKC数による変化が小さくなり、この結果は岡島ら(2)の実験結果とほぼ一致する。これは $KC > 12$ では流れの反転から次に流れが反転するまでに一つ以上の渦が完全に発達する振動振幅領域であるため、振動の半周期の間に放出される渦の個数は増加するものの、正方形柱周りの流れパターンに大きな変化が生じないためと考えられる。次に、図中に示す二本の破線は各KC数において一振動周期毎に C_D 値を算出し、そのうちの最大値と最小値をそれぞれ結んだ点であり、図の二本の破線に挟まれた領域が振動周期毎の C_D 値の変化の範囲を示している。図から明らかなように振動周期毎の C_D 値の変化は正方形柱から渦が放出され $KC > 8$ 付近から大きくなり、その変化の大きさは0.2~0.5程度である。また、図には示していないが各X1-X2断面で算出した方向の C_D 値のばらつきは最大で0.19程度であった。

Morisonの式による慣性力係数 C_M



Circular Cylinder



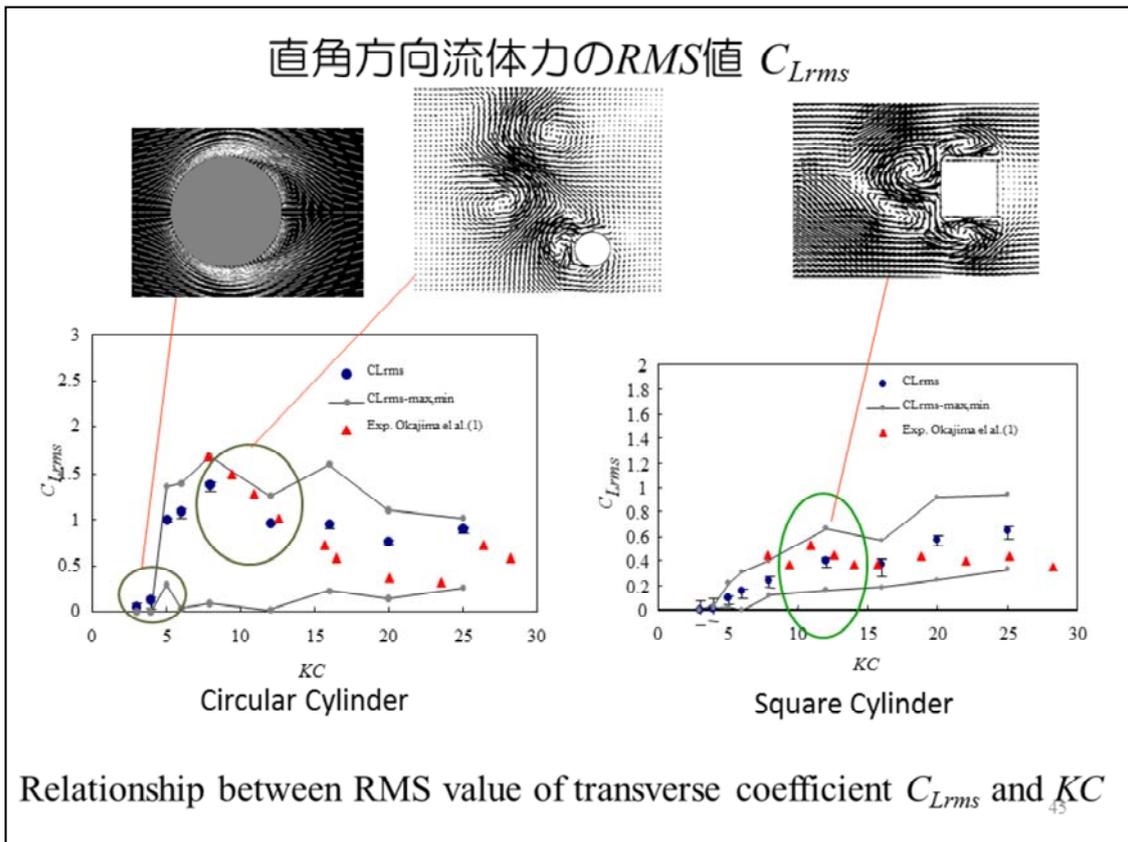
Square Cylinder

Relationship between inertia force coefficient C_M and KC

図に慣性力係数 C_M の KC 数に対する関係を示す。

C_M の KC 数による変化は C_D と逆の様相を呈する。すなわち C_M は低い KC 数領域から $KC=12$ 付近まで減少する。これらの変化は低い KC 数で物体に付着していた渦が KC 数の増加とともに非対称性を増して円柱から離脱し、放出された結果、付着領域が減少し、 C_M は減少する。また、 C_M は C_D の結果とは逆に、どの KC 数においても双子渦形成時の値が最大値となる。さらに、図12,13から C_D 、 C_M ともトランスバースストリートやダブルペアが見られる $KC=12\sim 16$ の領域において図12,13の実線で示す各周期ごとの C_D 、 C_M の最大値および最小値との差が大きくなる。

次に、図12に、正方形柱のモリソンの式による慣性力係数 C_M と KC 数の関係を示す。 C_M の計算結果は KC 数の増加と共に Bearman ら(6)の実験結果と同様に $KC=8$ 付近まで若干増加するが、 $KC>8$ では KC 数による変化が小さくなる。これは $KC<8$ では KC 数の増加とともに物体前縁あるいは後縁からの流れのはく離により形成される渦が大きくなり、それに伴い物体に付着して存在する領域も大きくなるため、結果として付加質量が大きくなるためと考えられる。また、 $KC\geq 10$ の領域に見られる岡島ら(2)の実験結果との定量的な相違はスパン方向の格子解像度や乱流の影響等が考えられる。

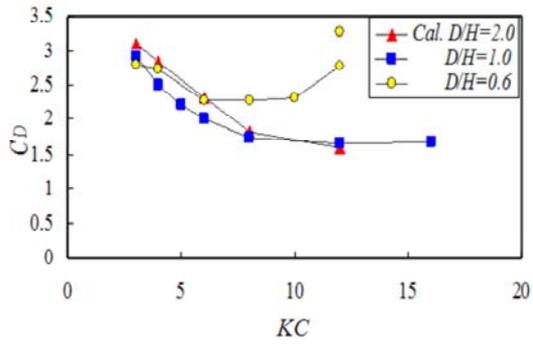


4.5 直角方向流体力のrms値 C_{Lrms}

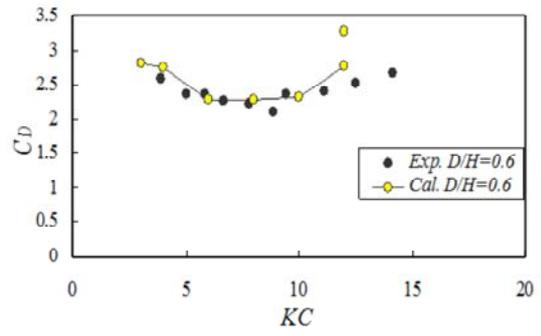
図16に直角方向流体力係数のrms値 C_{Lrms} の KC 数に対する変化を示す。 C_{Lrms} は渦の非対称になりはじめる $KC=4$ 付近から現れ始め、渦が完全に卓越する $KC=8$ 付近まで急激に増加し、流れの非対称性が顕著に現れる $KC=12, 16$ の“トランスバースストリート”および“ダブルペア”領域まで大きな値を保持する。これらの結果は実験結果とも良く一致する。さらに $KC=20$ の領域になるとスパン方向の相関性が低下するため、 C_{Lrms} 値に減少が見られる。

次に、正方形柱の直角方向の流体力を評価するため、各スパン位置における X_1-X_2 断面で算出した直角方向流体力のrms値を全断面で空間平均した値 C_{Lrms} 、及び各スパン位置における X_1-X_2 断面で算出した瞬時直角方向流体力の時間平均値を全断面で空間平均した値 C_{Lrms} を算出した。なお、 C_{Lrms} 及び C_{Lmean} の規格化は振動流の最大流速時の速度に基づく動圧を用いる。

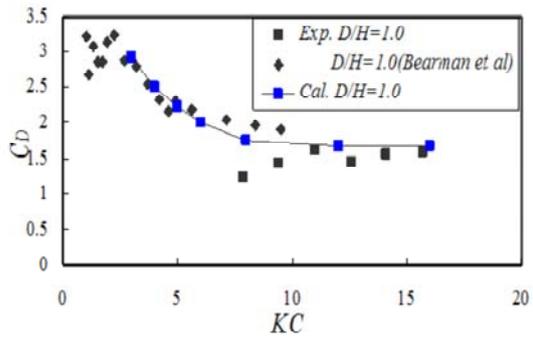
正方形柱の直角方向流体力のrms値 C_{Lrms} の KC 数に対する関係を図13に示す。図には比較のため円柱の場合における計算結果(7) C_{Lrms} の値を追加した。 $KC \leq 4$ の領域では正方形柱の C_{Lrms} は円柱の場合と同様に振動の半周期毎に物体後流に双子渦が形成され流れが上下対称となるため、ほぼ0に近い。 $KC > 4$ では KC 数の増加に従い、物体の上下で非対称な渦が次第に発達するため C_{Lrms} が増加する。また、円柱の場合に $8 \leq KC \leq 16$ の領域で、“トランスバース・ストリート”や“ダブルペア”等の上下非対称性が顕著な流れパターンが見られるため、 C_{Lrms} は急激に増加するが、正方形柱の場合には円柱の場合に比べて KC 数による流れパターンの変化が小さいため C_{Lrms} の急激な増加は見られない。さらに KC 数が増加し、 $KC \geq 20$ になると前縁からはく離れた流れは物体を巻き込み始め、物体下流でカルマン渦列のような流れパターンを形成するため、円柱の場合の流れパターンとほぼ同様になり、物体断面形状の相違による C_{Lrms} の相違が減少する。



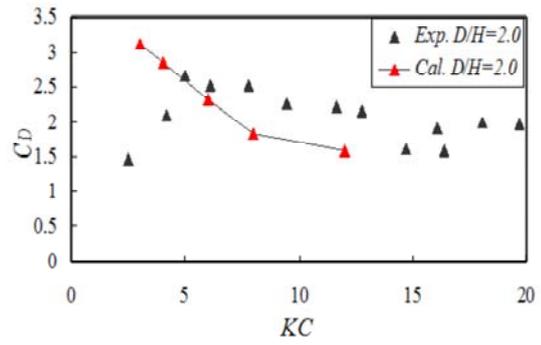
矩形柱の抗力係数 C_D



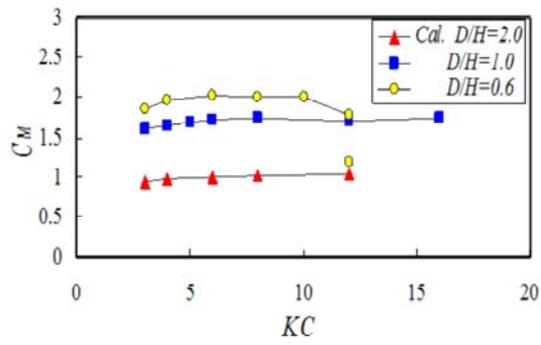
実験値との比較： $D/H=0.6$ 矩形柱



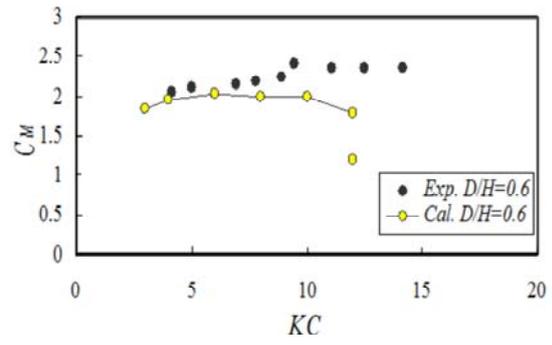
実験値との比較： $D/H=1$ 矩形柱



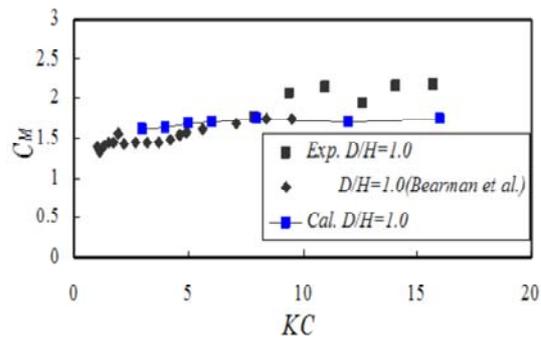
実験値との比較： $D/H=2$ 矩形柱



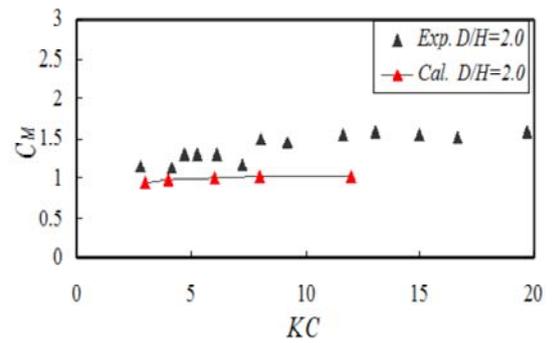
矩形柱の慣性力係数 C_M



実験値との比較： $D/H=0.6$ 矩形柱

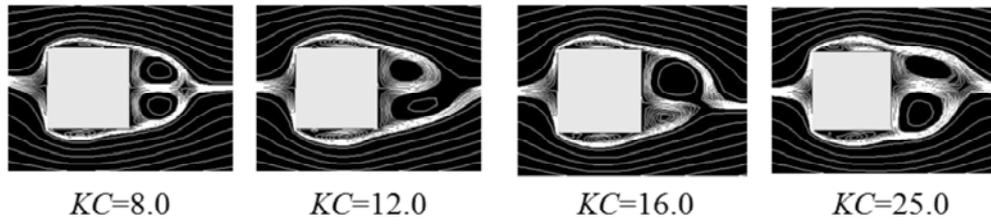


実験値との比較： $D/H=1$ 矩形柱

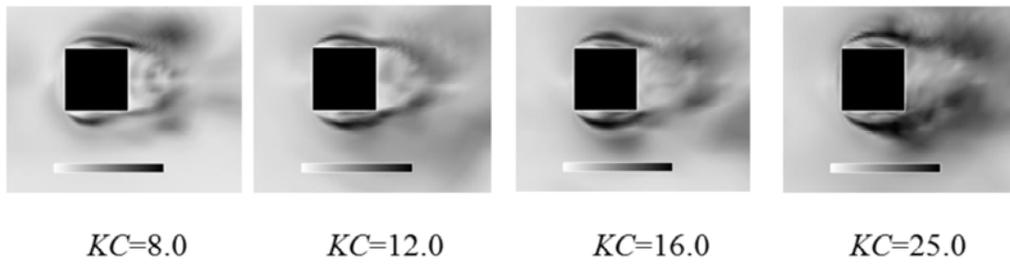


実験値との比較： $D/H=2$ 矩形柱

最高速度時の位相平均流線及び速度のrms値



Time-meaned stream line contour at maximum velocity



R.m.s. value of velocity vector at maximum velocity

流体力に対する物体断面形状の影響のまとめ

モリソンの式による抗力係数 C_D は、

- 円柱断面の場合：渦が非対称になる領域において C_D 値は大きくなる。
- 正方形断面の場合：双子渦領域に置いて大きな C_D 値をとる

モリソンの式による慣性力係数 C_M は、

- 円柱断面の場合：双子渦領域では大きな C_M 値をとる。
- 正方形柱断面の場合： C_M 値の変化は少ない。

直角方向流体力係数 C_{Lrms} は、

- 円柱断面の場合：非対称性が大きい流れの生ずる $KC=8\sim 16$ の領域で大きい C_{Lrms} 値となる。
- 正方形断面柱の場合： C_{Lrms} の値は抑制される。

矩形断面辺長比の影響は：

- 高 KC 数領域では矩形断面形状による差が小さくなる。
- 低 KC 数において矩形断面辺長比に関わらず、スパン方向の周期的な縦渦がみられ、断面辺長比による波長の変化はほとんどない。

結 論

振動流中の正方形柱および円柱周りの流れを $3 \leq KC \leq 25$, $\beta=95$ のパラメータ範囲で有限体積法により3次元数値解析を行い, 流れの3次元性の影響や物体断面形状の影響に着目して, 円柱に流れパターンや流体力特性を調べ, 同時に実験結果と比較し, 計算結果の妥当性を確認した.

1. 振動流の流れの反転は, 主として KC 数の変化によってトランスバース・ストリート, ダブルペア, 交互渦列などの2次流れや3次元縦渦構造形成する.
2. 振動流中の物体周りの流れ場では $KC \leq 4$ の低 KC 数領域において物体断面形状に依存せずスパン方向に周期的な縦渦構造が形成される. $8 \leq KC \leq 16$ では, 円柱, 0.6断面矩形柱, 45° 正方形柱で, トランスバース・ストリートやダブルペアの流れ場が生じ, $KC \geq 20$ で再び物体断面形状による流れパターンの相違が少なくなる.
3. 振動流中の物体に働く流体力は, KC 数に伴って形成される流れパターンの変化に対応して変化することを, 数値シミュレーション, 可視化実験, 流体力計測によって明らかにした.

REFERENCES③

1. Okajima, A.: Force Measurements on Bluff Bodies and Flow Visualization in Oscillatory Flow, Proceedings of 3rd int'l Colloquium on BBAA, (1996) C19.
2. Okajima, A., Matsumoto, T., Kimura, S.: Aerodynamic Characteristics of Flat Plates with Various Angles of Attack in Oscillatory Flow, Proceedings of JSME International Conf. on Fluid Eng., (1997.7) 1, pp. 513-518.
3. Okajima, A.: A Numerical Study of Oscillatory Flow around Circular and Square Cylinders, Proceedings of 1997 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Dallas, U. S. A., (1997) pp.127-134.
4. Okajima, A., Matsumoto, T., Kimura, S.: Force Measurements and Flow Visualization of Bluff Bodies in Oscillatory Flow, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (1997.10) 69-71, pp.213-228.
5. 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B,(1997.11) 63, 615, pp.3458-3476.
6. Okajima, A., Matsumoto, T., Kimura, S.: Aerodynamic Characteristics of Flat Plates with Various Angles of Attack in Oscillatory Flow, Japan Society of Mechanical Engineers, International Journal, (1998.2) 41, 1, pp.214-220.
7. Okajima, A., Matsumoto, T., Kimura, S.: Force Measurements and Flow Visualization of Circular and Square Cylinders in Oscillatory Flow, Japan Society of Mechanical Engineers, International Journal B, (1998.11) 41, 4, pp.796-805.
8. 岡島 厚,松本達治,木村繁男:振動流中に置かれた種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ特性,日本機械学会論文集B,(1999) 65, 635, pp.2243-2250.
9. 岡島 厚,松本達治,木村繁男:振動流中に置かれた種々な迎え角の正方形柱周りの流れ特性,日本機械学会論文集B,(1999) 65, 640, pp.3941-3949.
10. 松本達治,岡島 厚:正弦振動流中の平板周りの流れ,土木学会構造工学論文集,(2000.4), 46A, pp.1013-1022
11. Okajima, A., Matsumoto, T., Kimura, S.: Flow Characteristics of a Rectangular Cylinder with a Cross-Section of a Various Width/Height Ratios Submerged in Oscillatory Flow, Japan Society of Mechanical Engineers International Journal B, (2000.8) 43, 3, pp.329-338.
12. Okajima, A., Yasuda, T., Matsumoto, T.: Experimental and Numerical Studies on Flow and Fluid dynamic Forces of a Circular Cylinder Submerged in Oscillatory Flow, Proceedings of 3rd International Conference on Fluid Dynamic Measurement and Its Applications, Beijing, (1997.10) 3, pp.277-282.
13. Okajima, A., Yasuda, T.: A Numerical Study of Oscillatory Flow around Circular and Square Cylinders, Proceedings of the 1997 Int. Mechanical Eng. Congress and Exposition, Dallas, U.S.A., (1997.11) pp.127-134.
14. 安田孝宏,岡島 厚:振動流中の円柱周りの流れの三次元数値解析(第1報,三次元流れ構造のクリガン・カーペンタ数による変化),日本機械学会論文集B,(2002.2) 68, 666, pp.293-299.
15. 安田孝宏,岡島 厚:振動流中の円柱周りの流れの三次元数値解析(第2報,流体力特性),日本機械学会論文集B,(2002, 6) 68, 670, pp.1614-1620.
16. Yasuda, T., Okajima, A.: Numerical Study on Three-Dimensional Flow Structures around a Square Cylinder in Oscillatory Flow, Proceedings of Conf. on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibration, (2002.12) pp.77-80.
17. Yasuda, T., Okajima, A., Moriyoshi, M.: 3-D Flow Structures Around and Fluid-Dynamic Forces Acting on a Rectangular Cylinder in Oscillatory Flow, Proceedings of 4th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference (CD-ROM), Honolulu, U.S.A., (2003.7) FEDSM2003-45626, pp.1-6.
18. 安田孝宏,岡島 厚:振動流中の正方形柱周りの流れの三次元数値解析,日本機械学会論文集 B,(2008-3) 74-739, pp.515~522.

おわり

REFERENCE

2 円柱、直列配置、並列配置、後流中

1. Tanida, Y., Okajima, A., Watanabe, Y.: Stability of a Circular Cylinder Oscillating in Uniform Flow or in a Wake, *Journal of Fluid Mechanics* (1973) 61-4, pp.769-784.
2. 渡辺康之、岡島 厚、谷田好通：直列におかれた 2 本の円柱に働く流体力：日本機械学会論文集 (1974) 40, 331, pp.765-773.
3. 岡島 厚：高レイノルズ数における直列 2 本円柱まわりの流れ、日本機械学会論文集、(1978) 44, 384, pp.2663-2671
4. 岡島 厚、杉谷賢一郎：直列 2 本円柱の下流側円柱の静的空力特性、第 7 回風工学シンポジウム論文集、(1982.12) 7, pp.115-122.
5. 岡島 厚、杉谷賢一郎：後流中に置かれた円柱まわりの流れ(静止の時の抵抗とストローハル数) 日本機械学会論文集 B、(1984) 50, 458, pp.2531-2538.
6. 岡島 厚、杉谷賢一郎：高レイノルズ数における並列 2 円柱まわりの流れ、日本機械学会論文集 B、(1986) 52, 480, pp.2844-2850.

複数円柱

7. 岡島 厚、杉谷賢一郎、溝田武人：後流中に置かれた円柱まわりの流れ(自由振動実験)、日本機械学会論文集 B (1986.2) 52, 474, pp.527- 531.
8. Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA and Shigeo KIMURA, Flow-induced in-line oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement, *Proceedings of PVP2006-ICPVT-11, 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2006-ICPVT11-93873, Vancouver, BC, Canada, (2006.7)*
9. Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA, Shigeo KIMURA : FLOW-INDUCED STREAMWISE OSCILLATION OF TWO CIRCULAR CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENT, *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06), The 13th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, (2006.9)*
10. 岡島 厚、安井 聡、木村繁男、木綿隆弘：直列 2 円柱の流れ方向流力振動に関する研究、日本機械学会論文集 B、(2007.2), 73-726, pp.428-436.
11. Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA, Shigeo KIMURA, Flow-Induced Streamwise Oscillation of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28 (2007) pp.552-560.
12. Atsushi OKAJIMA, Takahiro KIWATA, Satoru YASUI, Yoshiki MORI and Shigeo KIMURA, Flow-induced streamwise oscillation of two square cylinders in tandem arrangement, *Proceedings of PVP2007/CREEP8, 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2007, PVP2007-26123, San Antonio, Texas, USA, July 22-26, 2007.7.*

複数静止矩形構造物の静特性

14. 岡島 厚、木綿隆弘：直列配置の 2 矩形柱の空力静特性、構造工学論文集、(1990.3) 36A, pp.849-857.
15. 岡島 厚、上野久儀、木綿隆弘、恵上浩一：並列角柱の空力静特性におよぼす迎え角の影響、構造工学論文集、(1992.3) 38A, pp.857- 864.

複数矩形柱

16. 岡島 厚、阿部彰人、木綿隆弘：直列 2 矩形柱の空力不安定振動、構造工学論文集、(1990.3) 36A, pp.859- 864.
17. 岡島 厚、安井 聡、森 快貴、木村繁男、木綿隆弘：直列 2 角柱の流れ方向流力振動に関する研究、日本機械学会論文集 B (2007.1), 73-725, pp.76-84
18. Takahiro KIWATA, Atsushi OKAJIMA, Flow-induced streamwise oscillation of two square cylinders in tandem arrangement, 9th International Conference on Flow-Induced Vibration - FIV2008, (2008-7) Prague, Czech Republic.

種々な断面柱

19. Okajima, A., Ueno, H., Yi, D.: Study on Aerostatic Characteristics and Aeroelastic Instability of Structural L-Shaped, T-Shaped and Cross-Shaped Sections, *Proceedings of Third ASIA-PACIFIC Symposium Wind Eng.*, (1993.12) pp.649-654.
20. Okajima, A., Ueno, H., Yi, D.: Observations of Flows about a Longitudinally Oscillating Cylinder with Rectangular Cross-Sections, *Proceedings of 3rd Asian Symposium on Visualization*, (1994.5) A16, pp.46- 50.
21. 岡島 厚、上野久儀、阿部彰人：隅切り矩形断面柱の空力特性におよぼすレイノルズ数の影響、日本風工学会誌、(1991.11) 49, pp.1- 13.
22. Mizota, T., Okajima, A.: Unsteady Aerodynamic Forces and Wakes of Rectangular Prisms with Oscillating Flaps at Leading Edges, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aero.*, (1992.10) 41, 44, pp.727- 738

REFERENCES

2 円柱、直列配置、並列配置、後流中

1. Tanida, Y., Okajima, A., Watanabe, Y.: Stability of a Circular Cylinder Oscillating in Uniform Flow or in a Wake, *Journal of Fluid Mechanics* (1973) 61-4, pp.769-784.
2. 渡辺康之、岡島 厚、谷田好通：直列におかれた2本の円柱に働く流体力：日本機械学会論文集 (1974) 40, 331, pp.765-773.
3. 岡島 厚：高レイノルズ数における直列2本円柱まわりの流れ、日本機械学会論文集、(1978) 44, 384, pp.2663-2671
4. 岡島 厚、杉谷賢一郎：直列2本円柱の下流側円柱の静的空力特性、第7回風工学シンポジウム論文集、(1982.12) 7, pp.115-122.
5. 岡島 厚、杉谷賢一郎：後流中に置かれた円柱まわりの流れ(静止の時の抵抗とストローハル数) 日本機械学会論文集 B、(1984) 50, 458, pp.2531-2538.
6. 岡島 厚、杉谷賢一郎：高レイノルズ数における並列2円柱まわりの流れ、日本機械学会論文集 B、(1986) 52, 480, pp.2844-2850.

複数円柱

7. 岡島 厚、杉谷賢一郎、溝田武人：後流中に置かれた円柱まわりの流れ(自由振動実験)、日本機械学会論文集 B (1986.2) 52, 474, pp.527- 531.
8. Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA and Shigeo KIMURA, Flow-induced in-line oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement, *Proceedings of PVP2006-ICPVT-11, 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2006-ICPVT11-93873, Vancouver, BC, Canada, (2006.7)*
9. Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA, Shigeo KIMURA : FLOW-INDUCED STREAMWISE OSCILLATION OF TWO CIRCULAR CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENT, *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06), The 13th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, (2006.9)*
10. 岡島 厚、安井 聡、木村繁男、木綿隆弘：直列2円柱の流れ方向流力振動に関する研究、日本機械学会論文集 B、(2007.2), 73-726, pp.428-436.
11. Atsushi OKAJIMA, Satoru YASUI, Takahiro KIWATA, Shigeo KIMURA, Flow-Induced Streamwise Oscillation of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28 (2007) pp.552-560.

12. Atsushi OKAJIMA, Takahiro KIWATA, Satoru YASUI, Yoshiki MORI and Shigeo KIMURA, Flow-induced streamwise oscillation of two square cylinders in tandem arrangement, *Proceedings of PVP2007/CREEP8,*
13. 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2007, PVP2007-26123, San Antonio, Texas, USA, July 22-26, 2007.7.

複数静止矩形構造物の静特性

14. 岡島 厚、木綿隆弘：直列配置の2矩形柱の空力静特性、*構造工学論文集*、(1990.3) 36A, pp.849-857.
15. 岡島 厚、上野久儀、木綿隆弘、恵上浩一：並列角柱の空力静特性におよぼす迎え角の影響、*構造工学論文集*、(1992.3) 38A, pp.857- 864.

複数矩形柱

16. 岡島 厚、阿部彰人、木綿隆弘：直列2矩形柱の空力不安定振動、*構造工学論文集*、(1990.3) 36A, pp.859- 864.
17. 岡島 厚、安井 聡、森 快貴、木村繁男、木綿隆弘：直列2角柱の流れ方向流力振動に関する研究、*日本機械学会論文集 B* (2007.1), 73-725, pp.76-84
18. Takahiro KIWATA, Atsushi OKAJIMA, Flow-induced streamwise oscillation of two square cylinders in tandem arrangement, *9th International Conference on Flow-Induced Vibration - FIV2008, (2008-7) Prague, Czech Republic.*

種々な断面柱

19. Okajima, A., Ueno, H., Yi, D.: Study on Aerostatic Characteristics and Aeroelastic Instability of Structural L-Shaped, T-Shaped and Cross-Shaped Sections, *Proceedings of Third ASIA-PACIFIC Symposium Wind Eng.*, (1993.12) pp.649-654.
20. Okajima, A., Ueno, H., Yi, D.: Observations of Flows about a Longitudinally Oscillating Cylinder with Rectangular Cross-Sections, *Proceedings of 3rd Asian Symposium on Visualization, (1994.5) A16, pp.46- 50.*
21. 岡島 厚、上野久儀、阿部彰人：隅切り矩形断面柱の空力特性におよぼすレイノルズ数の影響、*日本風工学会誌*、(1991.11) 49, pp.1- 13.
22. Mizota, T., Okajima, A.: Unsteady Aerodynamic Forces and Wakes of Rectangular Prisms with Oscillating Flaps at Leading Edges, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aero.*, (1992.10) 41, 44, pp.727- 738