

2019年 日本建築学会賞(論文)

流体－構造連成問題への有限要素解析 に関する一連の研究

A Series of Studies on Finite Element Analysis for
Fluid－Structure Interaction

日 本 大 学
教 授
近 藤 典 夫

流体－構造連成問題への有限要素解析 に関する一連の研究

序文

第1章 非圧縮粘性流体解析のための3次上流有限要素法の提案

第2章 3次上流有限要素法の有効性の検証と応用

第3章 自由表面問題への3次上流有限要素法の提案と応用

第4章 有限要素体系による流体－構造連成解析法の確立と応用

まとめ

論文リスト

謝辞

序文

著者の研究は、流体－構造連成現象の解明に主眼を置いている。流体計算に関わる数値手法は、有限差分法、有限要素法そして粒子法等に大別されるが、著者は、要素分割の自由度が高い有限要素法を流体計算のために適用することを考えている。このことから、高精度の上流有限要素法の開発が必要となる。そこで、本冊子は、有限要素法による高精度の流体解析手法の確立を目指した研究とその有限要素法を適用した流体－構造連成解析手法の研究によって構成し、「流体－構造連成問題への有限要素解析に関する一連の研究」としてまとめたものである。

第1章 非圧縮粘性流体解析のための3次元有限要素法の提案

基礎方程式

ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i$$
$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

u_i : 流速,

p : 圧力,

f_i : 外力,

Re : レイノルズ数,

h : 波高

連続方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

高さ関数法

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_j \frac{\partial h}{\partial x_j} = u_3$$

構造物の振動方程式 (1質点2自由度系)

$$\frac{d^2 Y_\alpha}{dt^2} + \frac{4\pi h}{Ur} \frac{dY_\alpha}{dt} + \left(\frac{2\pi}{Ur} \right)^2 Y_\alpha = \frac{1}{2\chi} C_{L\alpha}$$

$$\frac{d^2 X_\alpha}{dt^2} + \frac{4\pi h}{Ur} \frac{dX_\alpha}{dt} + \left(\frac{2\pi}{Ur} \right)^2 X_\alpha = \frac{1}{2\chi} C_{D\alpha}$$

Ur : 換算速度, h : 構造減衰定数, χ : 質量比, C_D : 抗力係数, C_L : 揚力係数

X : インライン変位, Y : クロスフロー変位

修正重み関数

- ・ ナビエ・ストークス方程式を有限要素法で計算するときの修正重み関数内の付加関数を標準重み関数の2階と3階微分項で表現する。
- ・ 2階微分項は、4次精度の空間離散化を作る役割を持つ。
- ・ 3階微分は、ナビエ・ストークス方程式と結びついて、4階微分の数値粘性を作る働きがある。

修正重み関数 u_i 標準重み関数 w_i 付加関数 \tilde{w}_i

$$u_i = w_i + \tilde{w}_i$$

$$\tilde{w}_i = -\frac{1}{3} \Delta x_{(j)}^2 \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_{(j)}^2} - \frac{1}{12} \alpha \operatorname{sgn}(u_{(j)}) \Delta x_{(j)}^3 \frac{\partial^3 w_i}{\partial x_{(j)}^3}$$

正準分解

- 1次アイソパラメトリック要素を適用するために、付加関数内で標準重み関数の2階微分を他の関数に置き換えをする。つまり、正準分解を適用する。

これが高次精度上流スキームを作るための重要なアイデアである。

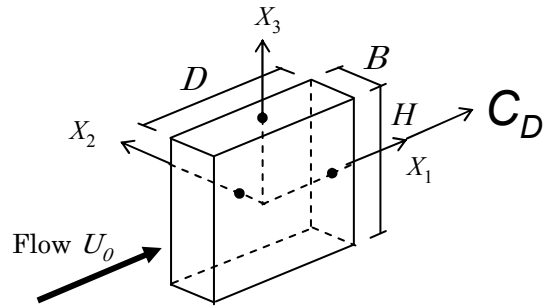
正準分解

$$\phi_{i(j)} = \Delta x_{(j)}^2 \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_{(j)}^2}$$

$$\tilde{w}_i = -\frac{1}{3} \phi_{i(j)} - \frac{1}{12} \alpha \operatorname{sgn}(u_{(j)}) \Delta x_{(j)} \frac{\partial \phi_{i(j)}}{\partial x_{(j)}}$$

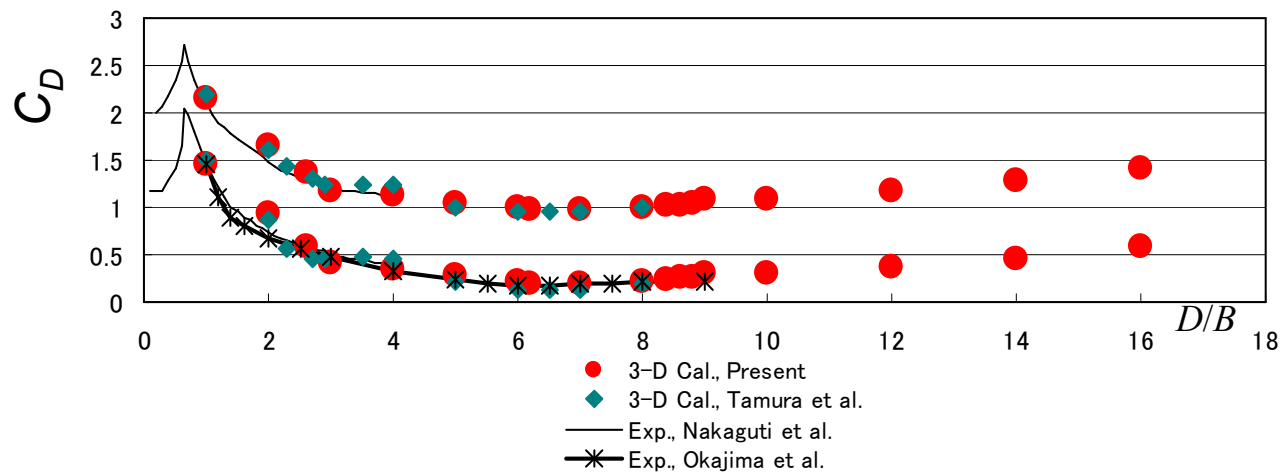
第2章 3次元有限要素法の有効性の検証と応用

角柱の辺長比 D/B に対する抗力係数 C_D



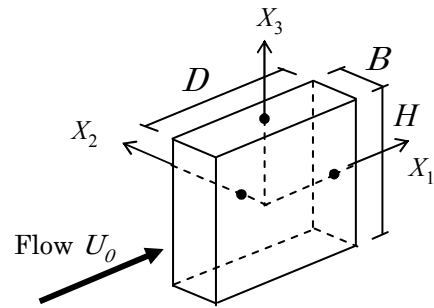
- ・ 辺長比 D/B が 1 ~ 16 までの抗力係数 C_D の結果である。
- ・ 実験結果と良い一致を示している。

2次元長方形角柱の計算モデル



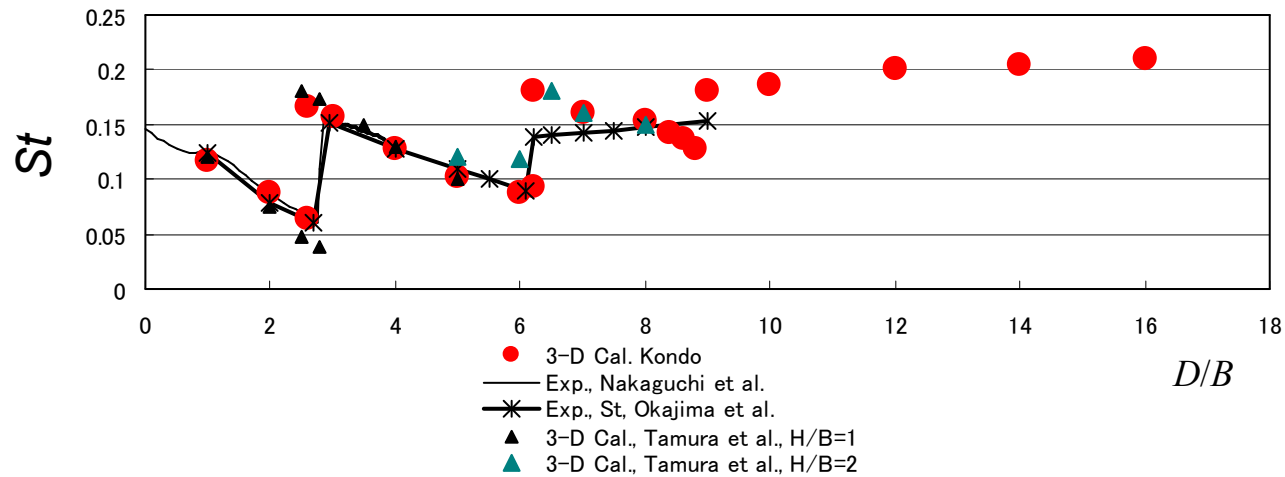
辺長比 D/B に対する抗力係数 C_D の変化

角柱の辺長比 D/B に対するストローハル数 St



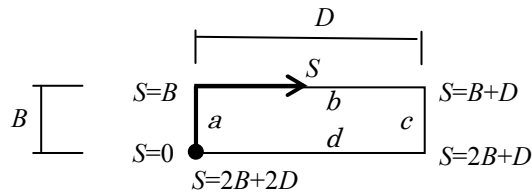
- ・ 辺長比 D/B が 1 ~ 16 までのストローハル数 S の結果である。
- ・ 急激なストローハル数の変化をよく捉えている。

2次元長方形角柱の計算モデル

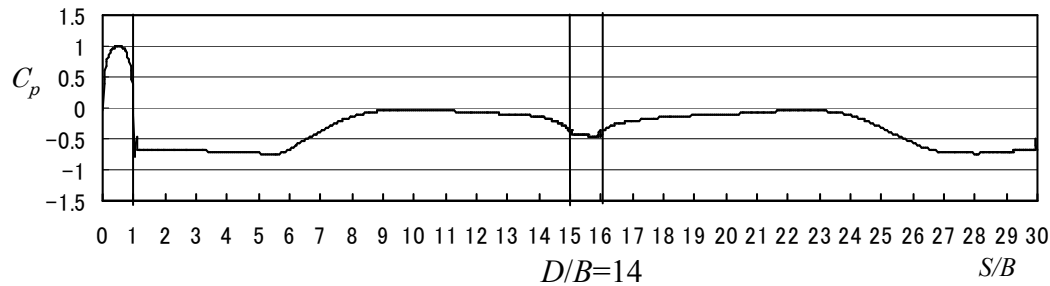
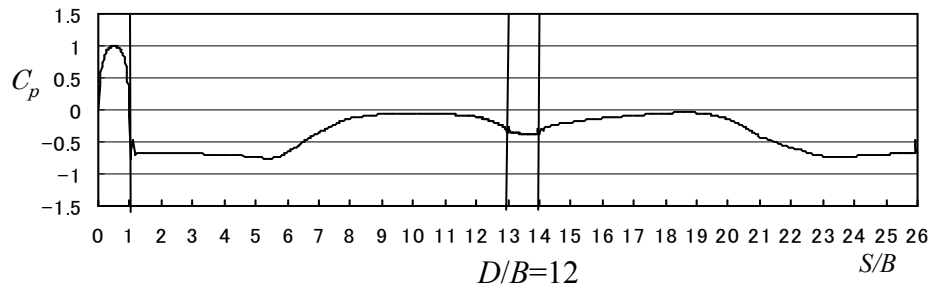
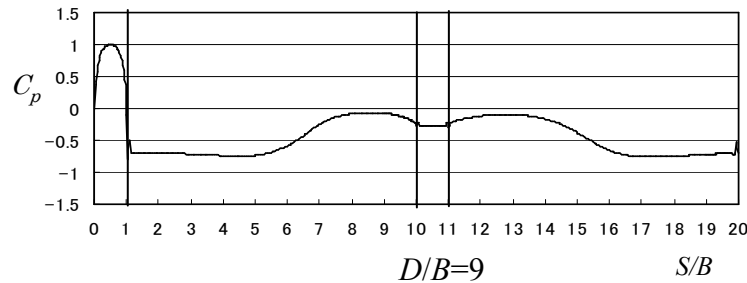


辺長比 D/B に対するストローハル数 St の変化

角柱の辺長比 D/B に対する圧力係数 C_p



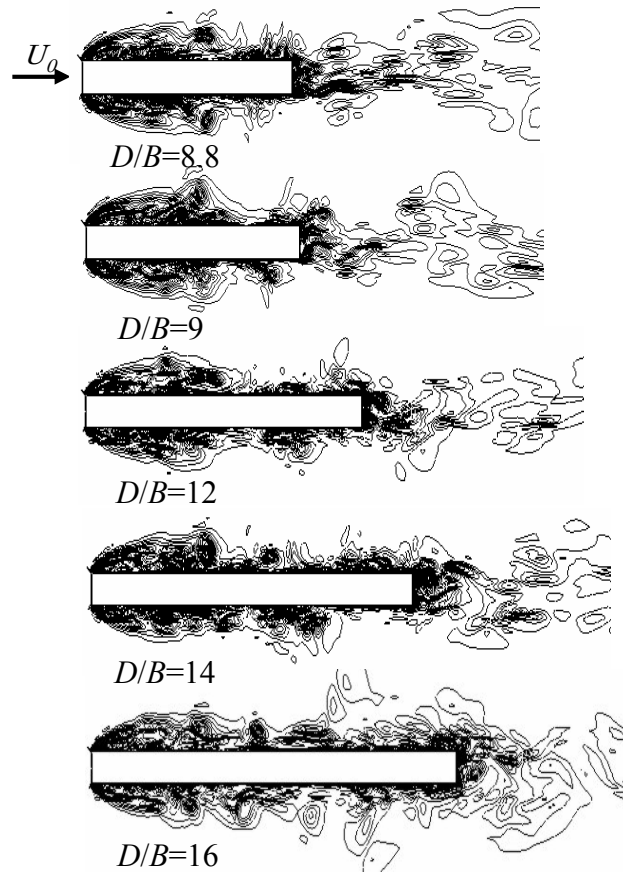
角柱の面の記号および表面の座標 S



長方形角柱表面の平均風圧係数

- ・ 辺長比 $D/B=9, 12, 14$ の圧力係数 C_p の結果を示す。
- ・ 前方の隅から $4B \sim 5B$ まで圧力が低い

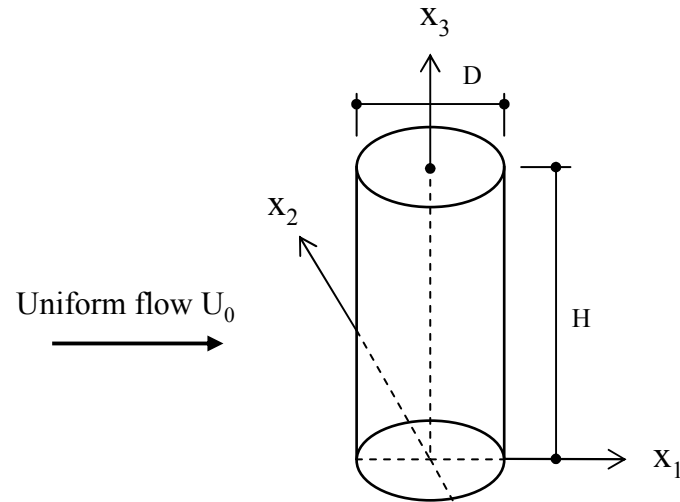
角柱の辺長比 D/B に対する流れの性状



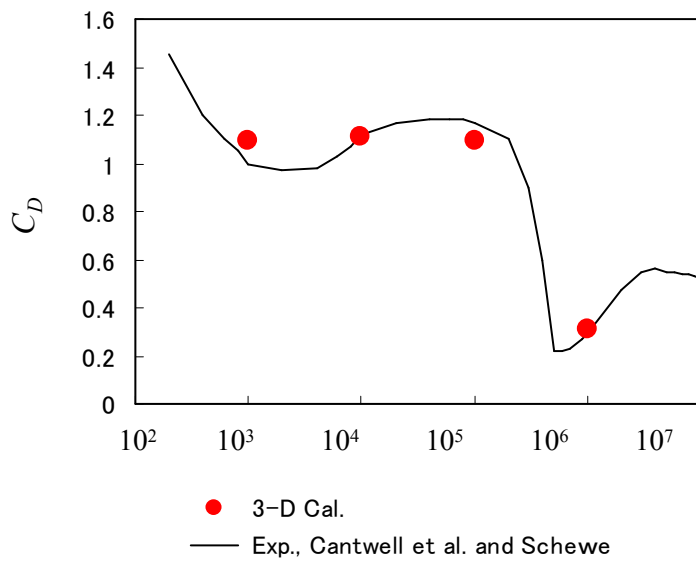
角柱まわりの瞬間渦度の等高線

- ・辺長比 $D/B=8.8 \sim 16$ において、角柱まわりの流れを表している。
- ・前方の隅から $4B \sim 5B$ 辺りまで再付着領域になっている。

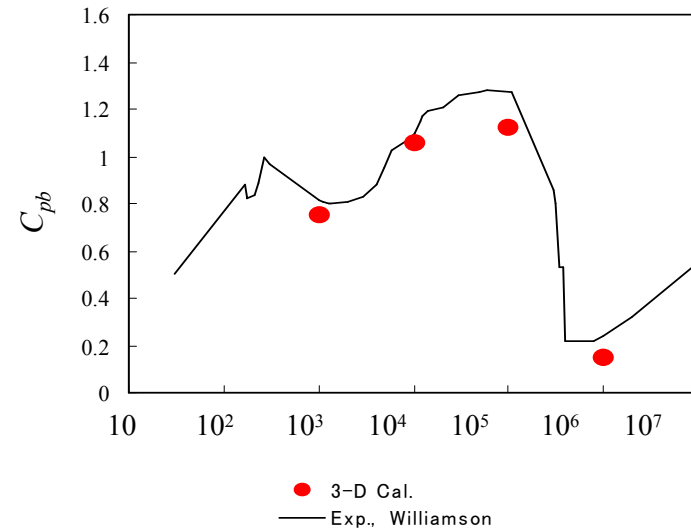
静止円柱の抗力係数 C_D とストローハル数 St



- ・ 円柱の抗力係数 C_D とストローハル数 St の結果を示している。
- ・ 数値結果は、高レイノルズ数域まで実験結果とよく一致している。

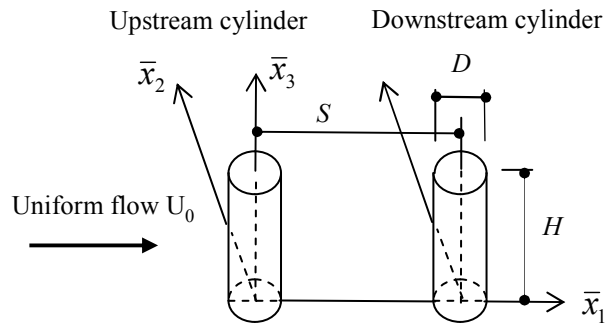


抗力係数 C_D



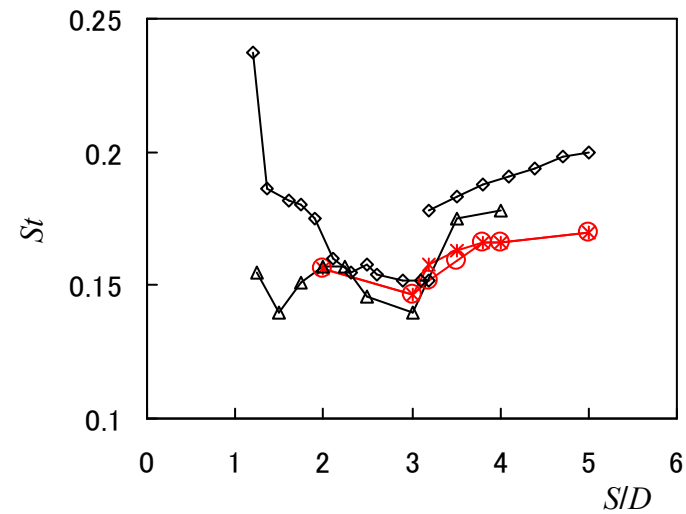
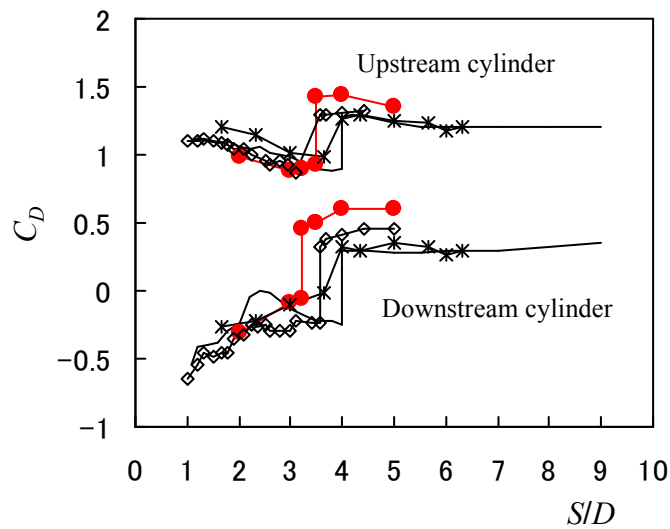
ストローハル数 St

直列2円柱の抗力係数 C_D とストローハル数 St



直列2円柱の計算モデル

- 直列2円柱に作用する抗力係数 C_D とストローハル数 St の数値結果を示す。
- C_D と St の変化を良く捉えている。



- 3-D Cal.
- * Exp, Okajima, Re=170000
- ◇ Exp., Igarashi, Re=35500
- Exp., Alam *et al.*, Re=65000

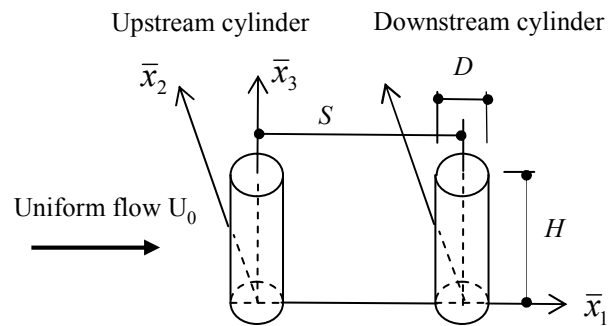
- 3-D Cal., Upstream cylinder.
- * 3-D Cal., Downstream cylinder.
- △ Exp., Okajima et al. Re=20000
- ◇ Exp., Igarashi, Re=22000

$H/D=2.5, Re=20,000$

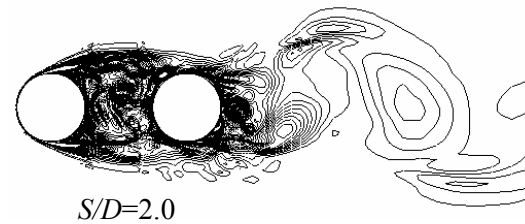
直列2円柱の抗力係数 C_D とストローハル数 St

直列2円柱のまわりの流れの性状

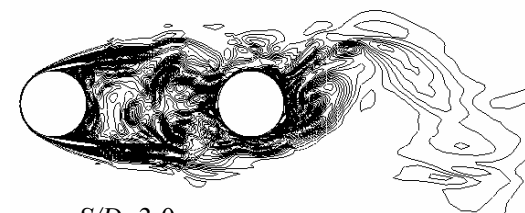
- ・ 直列2円柱まわりの流れパターンを示す。
- ・ 円柱まわりの流れは抗力係数 C_D が変化する $S/D=3.5\sim 4$ の前後で異なる。



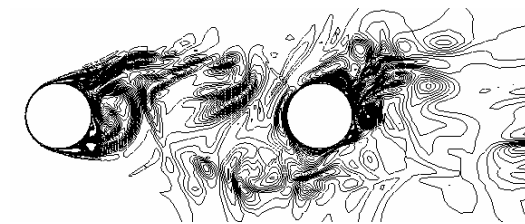
直列2円柱の計算モデル



$S/D=2.0$



$S/D=3.0$

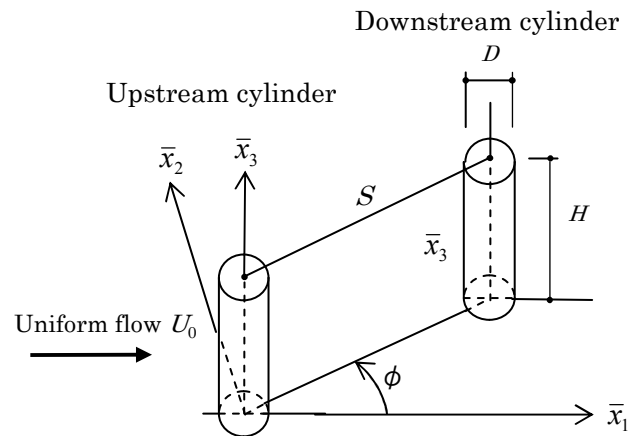


$S/D=4.0$

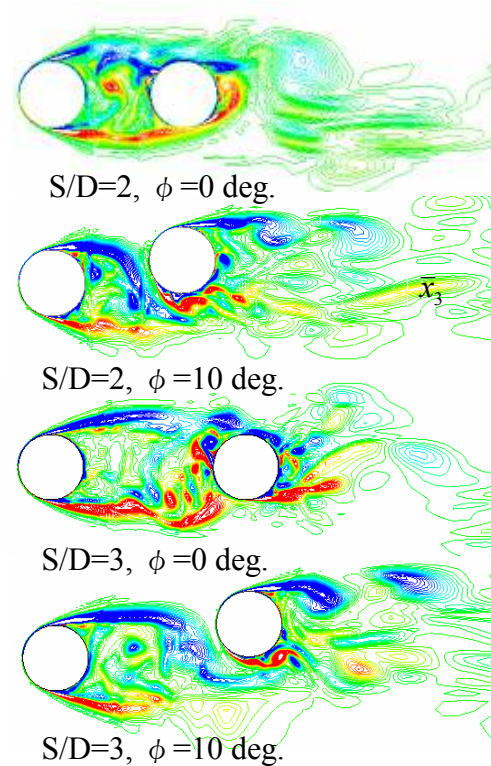
直列2円柱のまわりの流れの性状

くい違い2円柱のまわりの流れの性状

- ・ くい違い2円柱まわりの流れパターンを示す。
- ・ 円柱まわりの流れは間隔比 S/D とくい違い角度 ϕ に依存した流れになる。



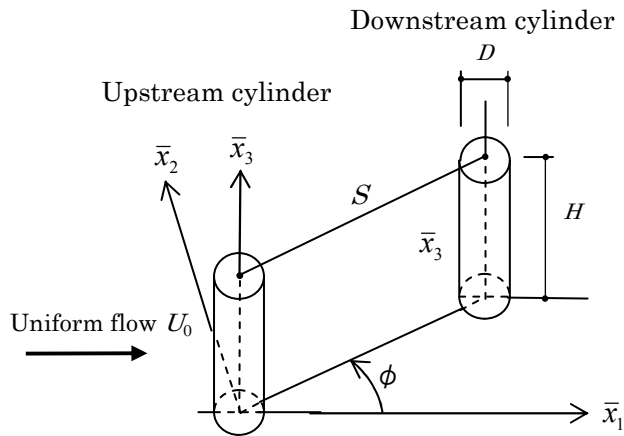
くい違い2円柱の数値計算モデル



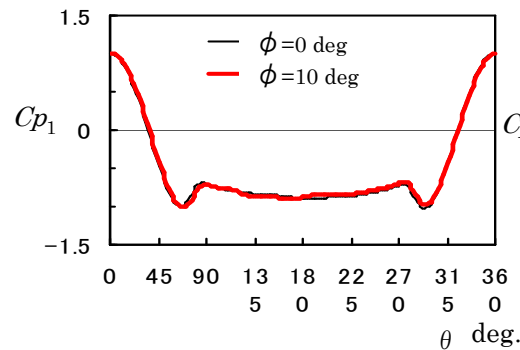
静止円柱周りの瞬間渦度

くい違い2円柱の圧力係数 C_p

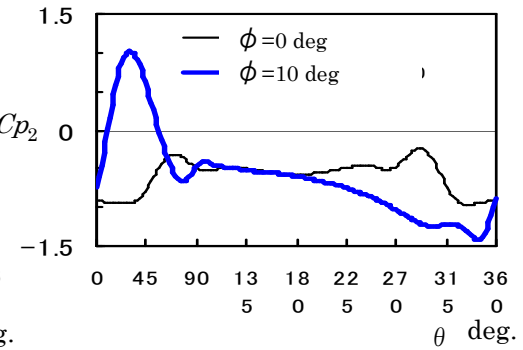
- ・ くい違い2円柱表面の圧力係数 C_p を示す。
- ・ 上流側円柱はの圧力分布は、くい違い角度が異なっても同じであるが、下流円柱では角度が異なると圧力分布に相当な相違が現れる。



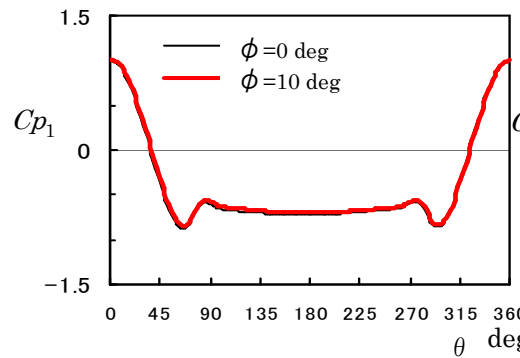
くい違い2円柱の数値計算モデル



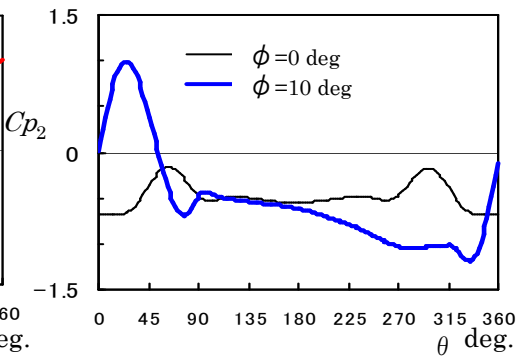
上流円柱, $SD=2$



下流円柱, $SD=2$



上流円柱, $SD=3$

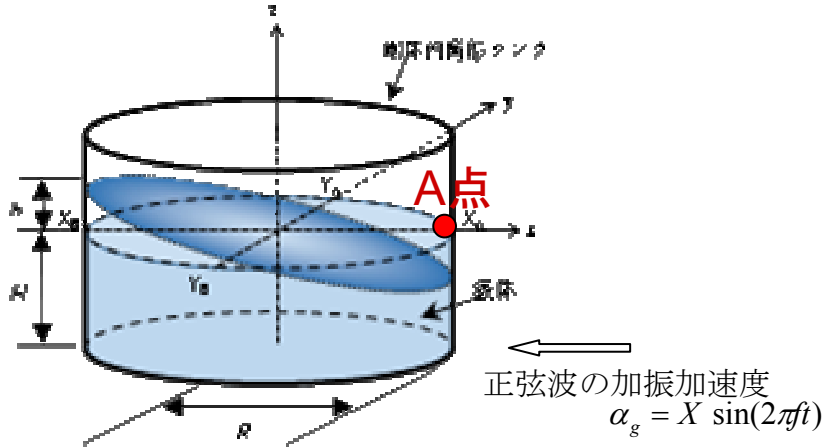


下流円柱, $SD=3$

静止2円柱の平均圧力係数 $C_{p\alpha}$

第3章 自由表面問題への3次上流有限要素法の提案と応用

正弦波の加振加速度による円筒タンク内の液面動揺



タンクの直径 : $2R=1.0$ (m)

静止面の高さ: $H=0.6$ (m)

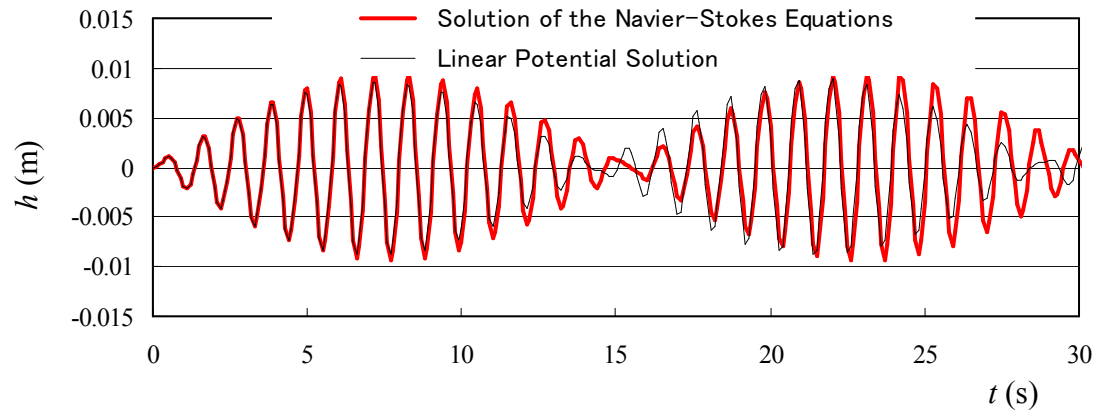
加振加速度 $\alpha_g = X \sin(2\pi f t)$

加振振幅 $X = -0.015g$

加振振動数 $f = 0.875 \text{ Hz}$

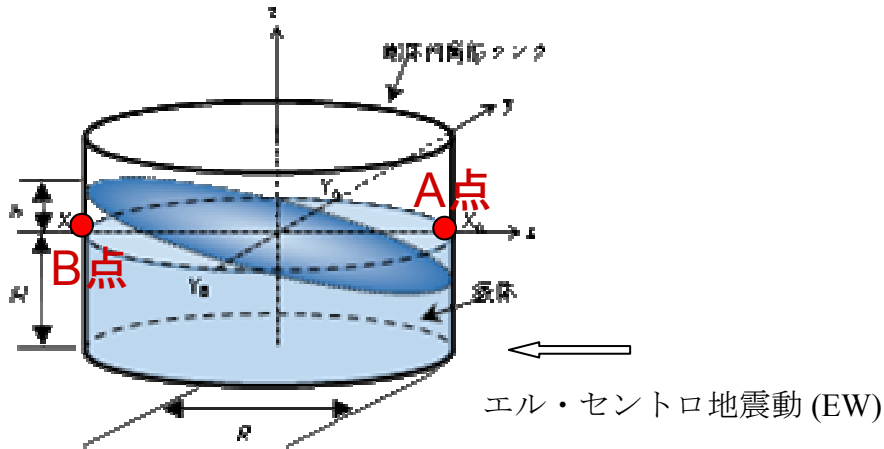
重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

- ・ 正弦波の加振加速度を与えた時のA点での液面動揺の時刻歴曲線を示す。
- ・ 本数値解は、線形ポテンシャル解とよく一致している。



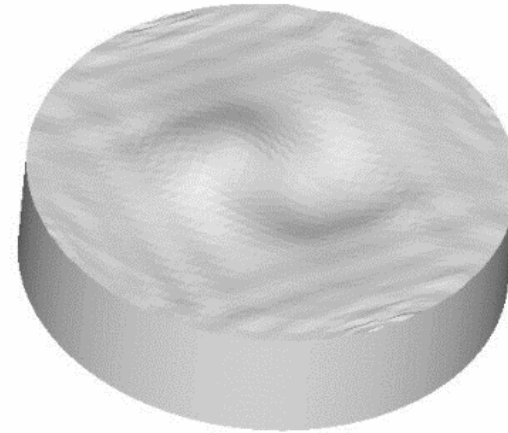
A点での波高 h の時刻歴曲線, 加振加速度 $\alpha_g = X \sin(2\pi f t)$

エル・セントロ地震動による円筒タンク内の液面動揺



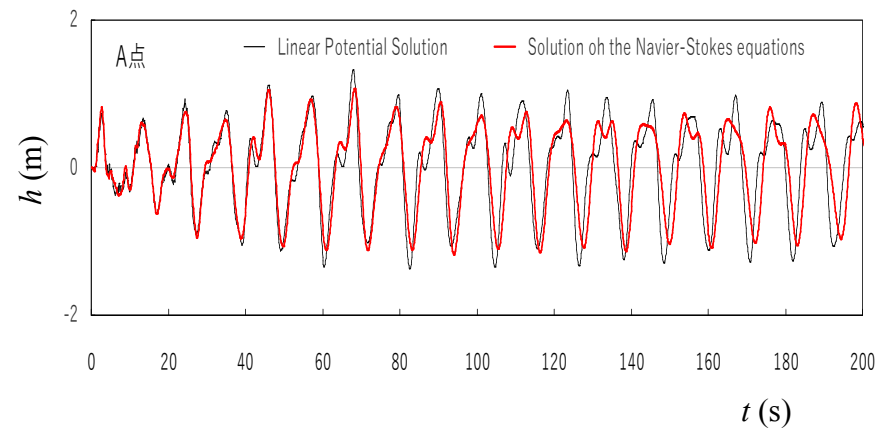
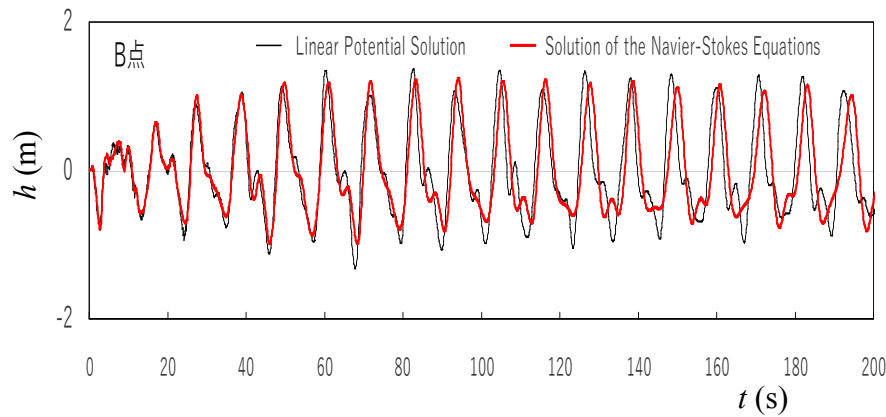
タンクの直径 : $2R=80$ (m)

静止面の高さ: $H=20$ (m)



円筒タンク内の液面動揺

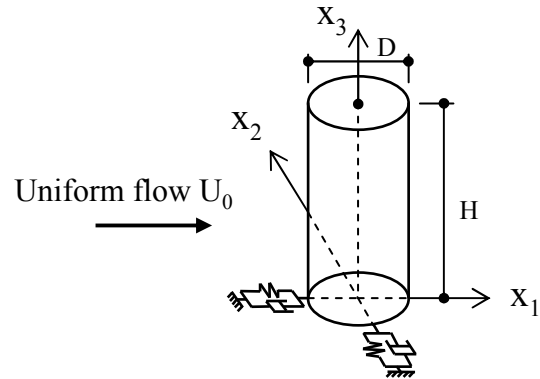
(ナビエ・ストークス方程式による数値解)



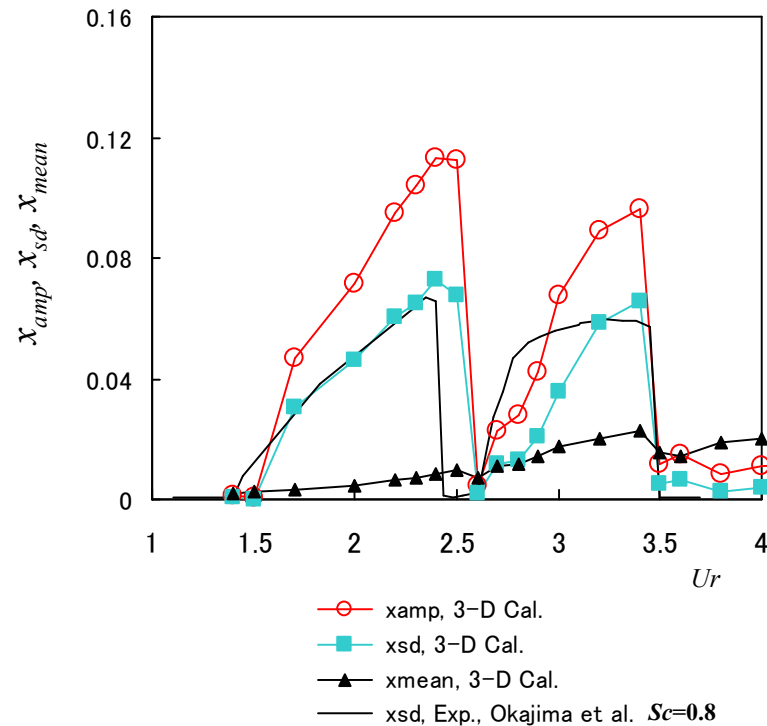
A点とB点での波高hの時刻歴曲線 (エル・セントロ地震動, EW波)

第4章 有限要素体系による流体－構造連成解析法の確立と応用

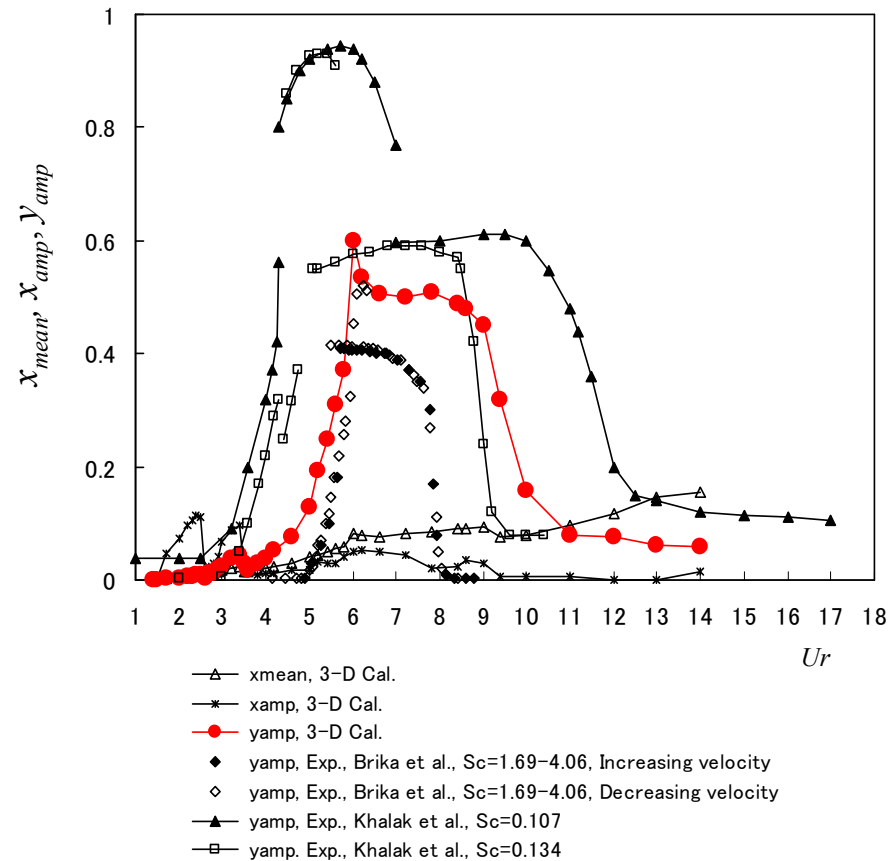
円柱のクロス・フロー振動



- $Sc=0.8$ において、 Ur の変化による単一円柱の流力振動結果を示す。
- 実験結果と良い傾向を示している。

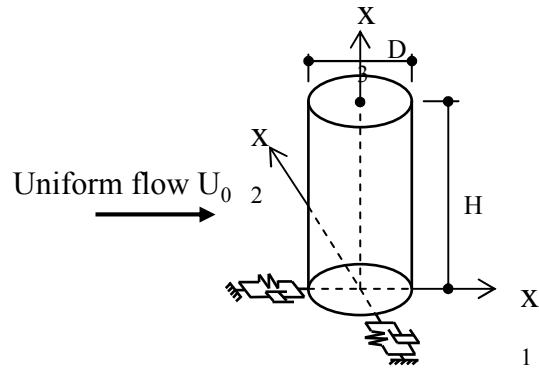


円柱のイン・ライン振動, $Sc=0.8$

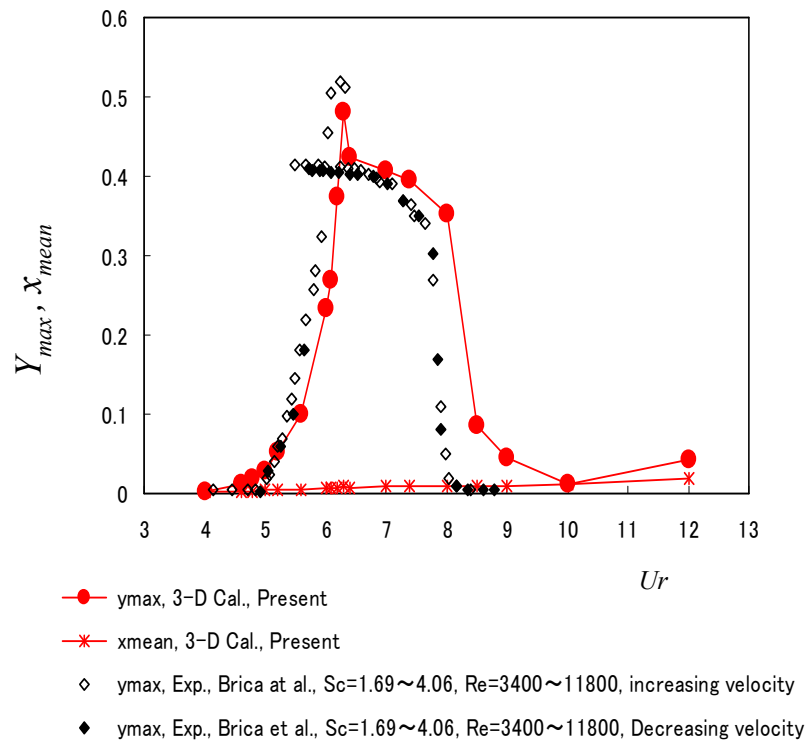


円柱のクロス・フロー振動, $Sc=0.8$

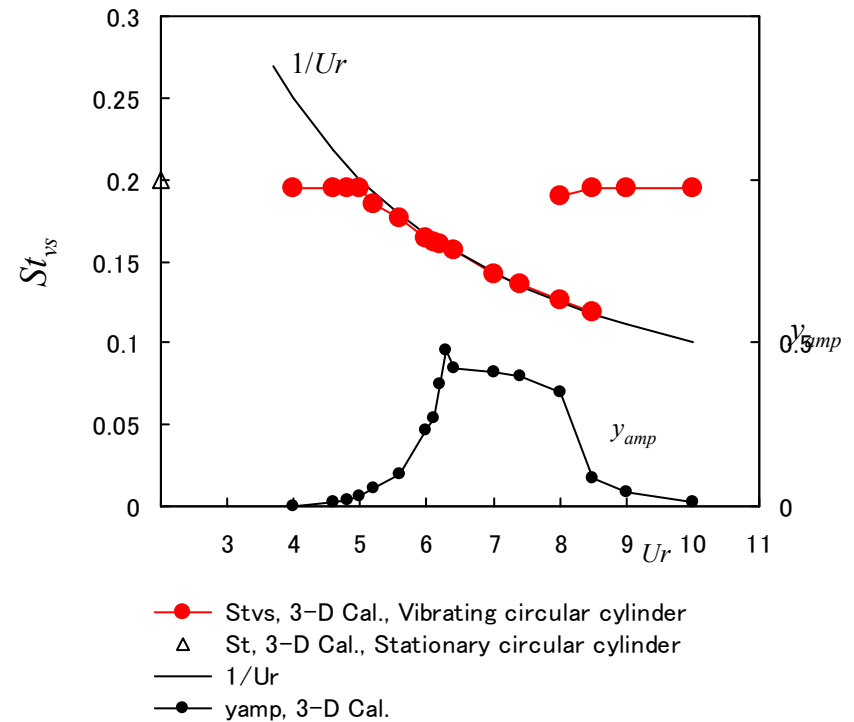
円柱のクロス・フロー振動



- $Sc=2.0$ において、 Ur の変化による単一円柱の流力振動結果を示す。
- 実験結果と良い傾向を示している。
- ロック・インを正確にとらえている

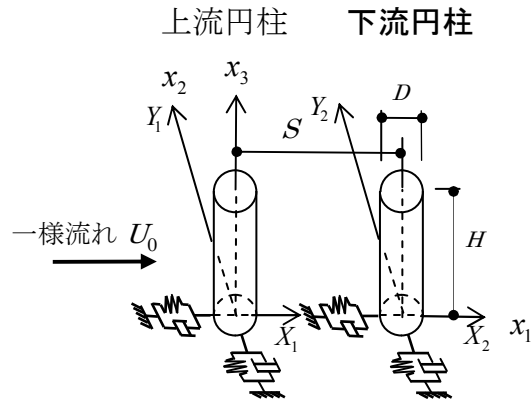


円柱のクロス・フロー振動, $Sc=2.0$



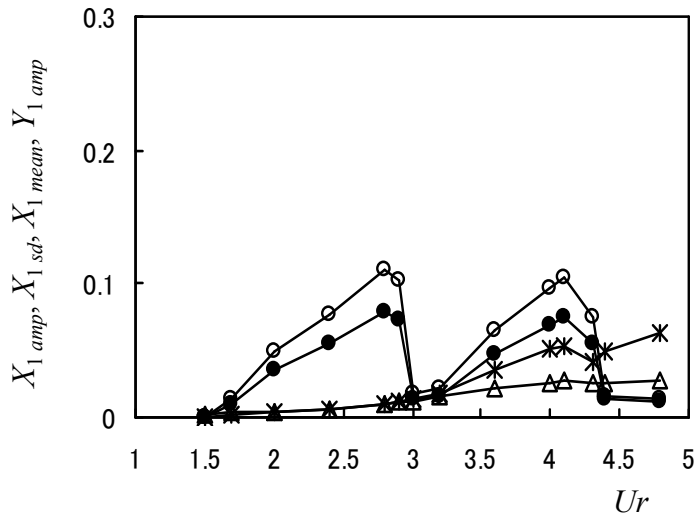
円柱のロック・イン, $Sc=2.0$

直列2円柱のイン・ライン振動

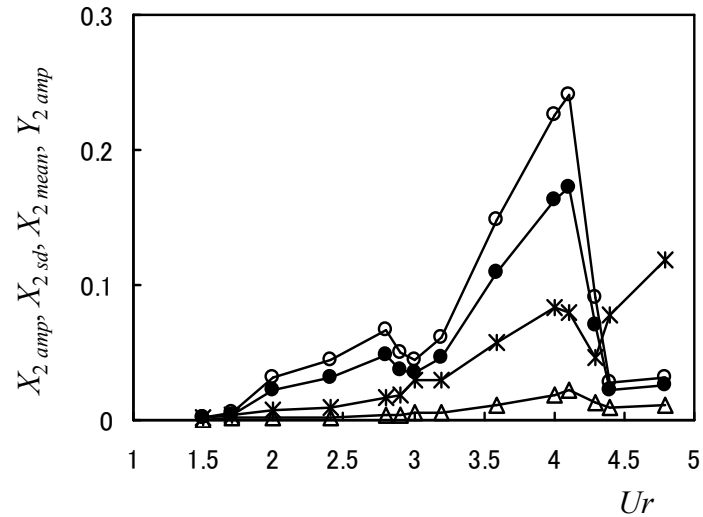


・ $Sc=0.99$ において、 Ur の変化による直列2円柱のイン・ライン振動結果を示す。

直列2円柱に関する流力振動モデル



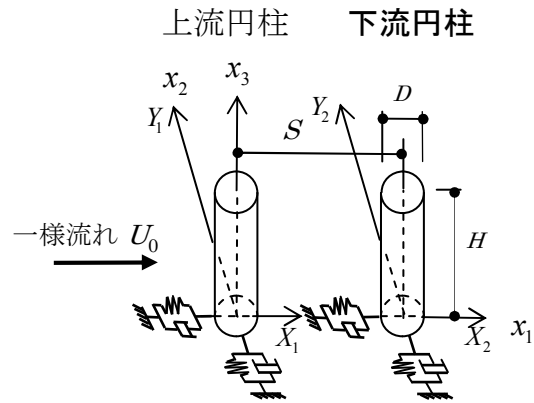
上流円柱のイン・ライン振動



下流円柱のイン・ライン振動

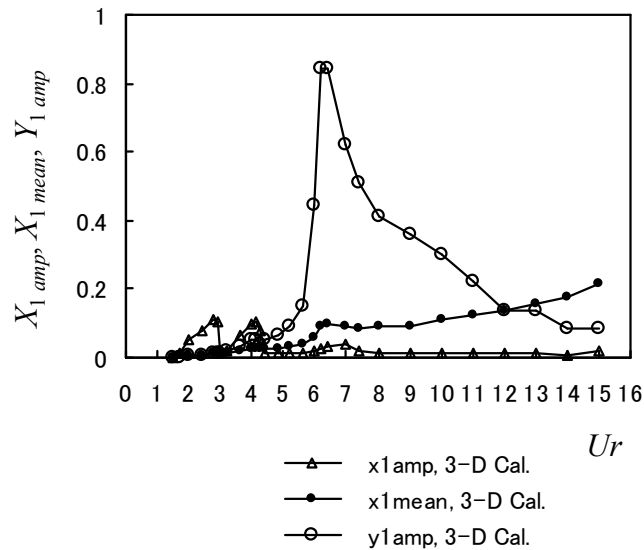
直列2円柱のイン・ライン振動, $S/D=3$

直列 2 円柱のクロス・フロー振動

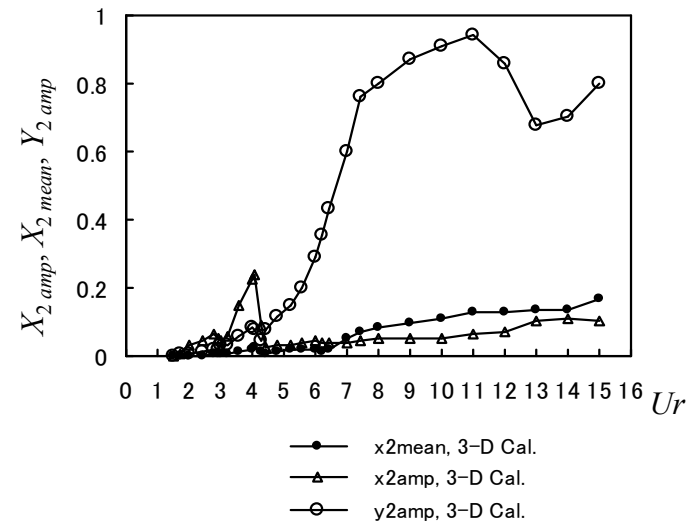


- ・ $Sc=0.99$ において、 Ur の変化による直列2円柱のイン・ライン振動結果を示す。
- ・ 上流円柱と下流円柱での振動性状の相違を捉えている。

直列 2 円柱に関する流力振動モデル



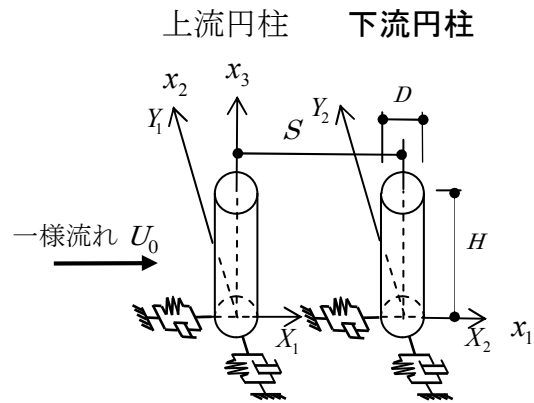
上流円柱のクロス・フロー振動



下流円柱のクロス・フロー振動

直列 2 円柱のクロス・フロー振動, $S/D=3$

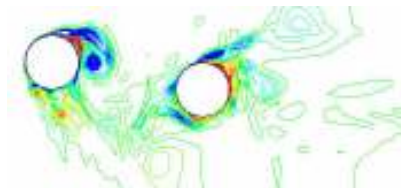
直列2円柱まわりの流れと2円柱の流力振動



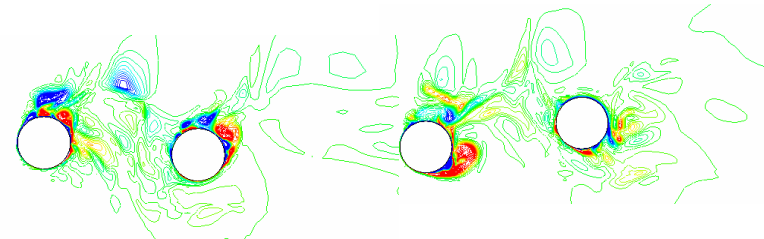
- 直列2円柱が振動しているときの円柱まわりの流れ性状を示している。

直列2円柱に関する流力振動モデル

一様流れ U_0

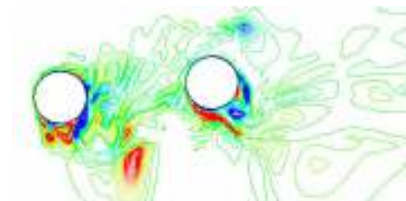


1) $Y_1 = Y_{1 amp}$

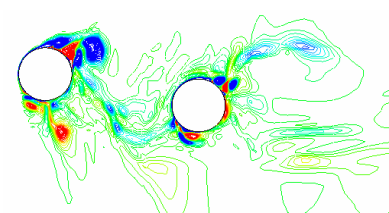


2) $Y_1 = 0$

3) $Y_1 = -Y_{1 amp}$



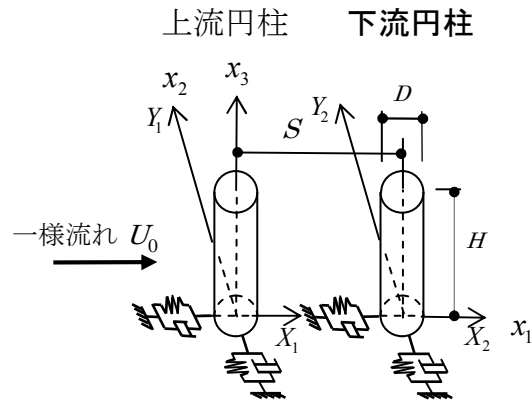
4) $Y_1 = 0$



5) $Y_1 = Y_{1 amp}$

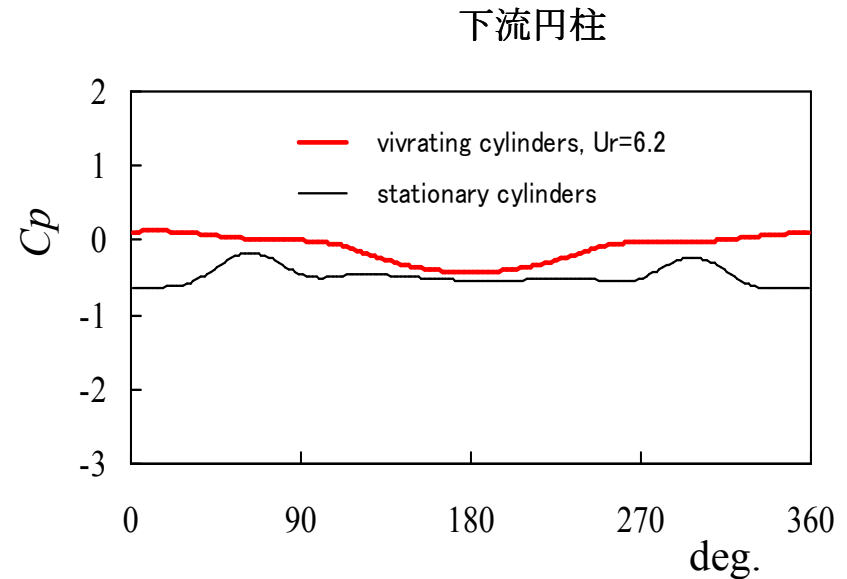
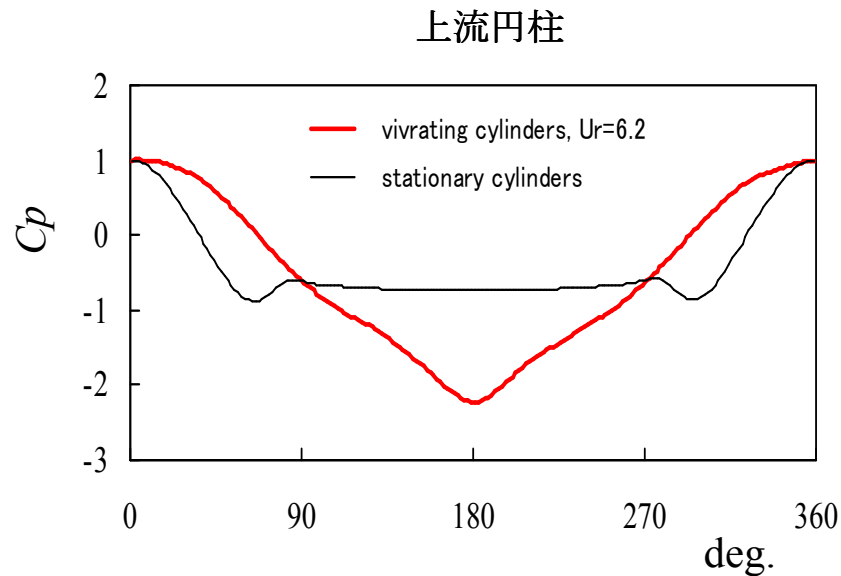
$x_3 = H/2, Ur = 6.2, S/D = 3.0.$

振動している直列2円柱に作用する平均圧力係数 C_p



直列2円柱に関する流力振動モデル

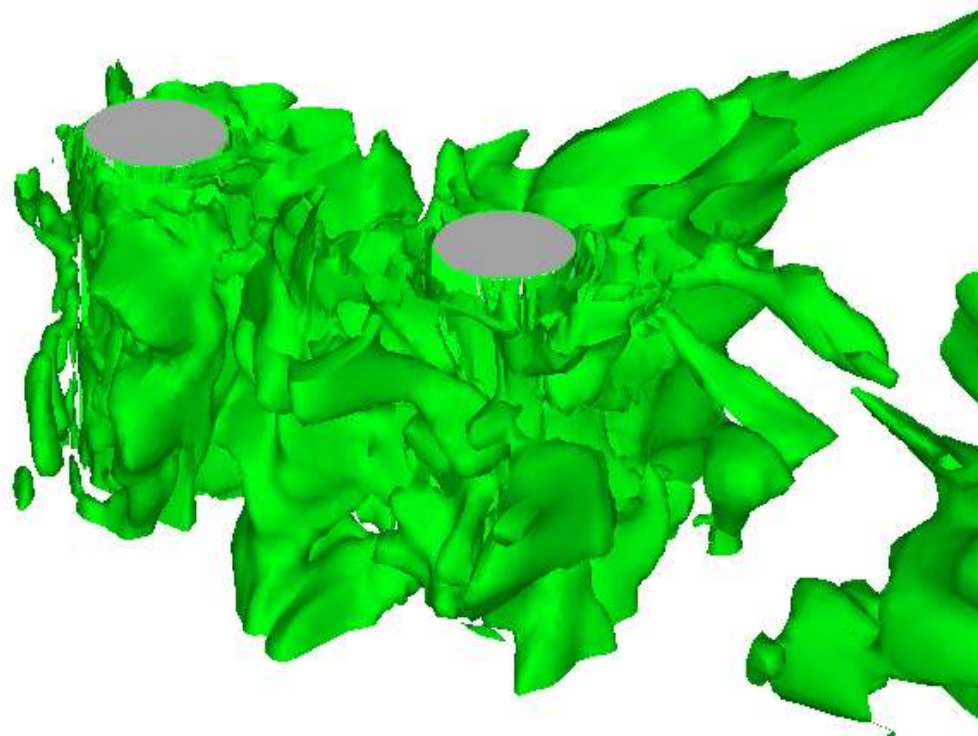
- ・ 上流円柱のクロス・フロー振幅が最大になるときの2円柱表面の圧力係数 C_p を示している。
- ・ 振動時の圧力係数は静止時のものと相当に異なることが分かる。



振動している2円柱に作用する平均圧力係数 C_p , $Ur=6.2$, $S/D=3$

振動している直列2円柱まわりの瞬間圧力の等値面

- ・振動している2円柱まわりの流れの様子を表した鳥瞰図を示す。



振動している2円柱まわりの流れの鳥瞰図(渦度表示)

$Sc=0.99$, $S/D=3$, $Ur=6.2$

まとめ

著者は、有限要素法の立場から流体計算のための3次上流有限要素スキームの開発を成し遂げた。この3次上流有限要素スキームによって、有限要素法でも有限差分法と同様に高レイノルズ数までの流体計算を高精度で行えることが可能となった。そして3次上流有限要素スキームを流体－構造連成解析へ適用し、角柱や円柱の流力振動を精度よく計算できることを立証するとともに、詳細にその現象の解明を行ってきた。流体－構造連成問題は、建築の分野のみならず、幅広い構造工学の分野に共通する問題である。流体と構造物の各方程式が結びつくような現象の解明には各方程式を精度良く解ける計算スキームの組み合わせが必須であることは言うまでもない。

本冊子に掲載した内容が、今後の様々な流体现象や流体－構造連成問題に取り組む研究者や技術者の参考になれば幸いである。

論文リスト

第1章 非圧縮粘性流体解析のための3次上流有限要素法の提案

- 1-1 高レイノルズ数流れの有限要素解析
- 1-2 Third-order upwind finite element formulations for incompressible viscous flow problems
- 1-3 Third-order upwind finite element solutions of high Reynolds number flows

第2章 3次上流有限要素法の有効性の検証と応用

- 2-1 断面辺長比が大きい長方形構造物の流体力特性に関する3次元数値解析
- 2-2 Three-dimensional finite element analysis for flow around square cylinders
- 2-3 Numerical simulation of aerodynamic characteristics of two rectangular cylinders in side-by-side arrangement
- 2-4 Numerical simulation for flow around two circular cylinders in tandem
- 2-5 Three-dimensional computation for flow around two circular cylinders in side-by-side arrangement by a third-order upwind finite element method
- 2-6 Numerical simulation for aerodynamic characteristics of two circular cylinders in staggered arrangement by a third-order upwind finite element method

論文リスト

第3章 自由表面問題への3次元有限要素法の提案と

3-1 自由表面を有する非圧縮粘性流れの数値解析

3-2 Three-dimensional finite element analysis for Incompressible viscous fluid with free surface

第4章 有限要素体系による流体－構造連成解析法の 確立と応用

4-1 Numerical computation for hydrodynamic oscillations of a square cylinder

4-2 Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder

4-3 接近した直列2円柱における上流側円柱の流れ方向および流れ直交方向の流力振動に関する3次元数値解析

4-4 Three-dimensional computation for flow-induced vibrations of an upstream circular cylinder in two tandem circular cylinders

4-5 低間隔における直列2円柱の流れ方向および流れ直交方向の流力振動に関する3次元数値解析

謝辞

本研究は、流体现象の数値解析を研究テーマとし行うようになってから、現在に至るまでの研究成果をまとめたものです。この間に、多くの方々から助言・ご指導を頂きました。感謝申し上げます。