

静止時および強制加振時における並列円柱まわり流れの有限要素解析

FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR WIND FORCES ON TANDEM CIRCULAR CYLINDERS
WHEN ITS STATIONARY AND FORCED VIBRATION STATE

枝元勝哉*, 米田昌弘**, 川原睦人***

Katsuya EDAMOTO, Masahiro YONEDA and Mutsuto KAWAHARA

*工修 川田工業(株) 技術本部中央研究室(〒114 東京都北区滝野川 1-3-11)

**工博 川田工業(株) 技術本部振動研究室(〒550 大阪市西区北堀江 1-22-19)

***工博 中央大学教授 理工学部土木工学科(〒112 東京都文京区春日 1-13-27)

Applicability of the fractional step finite element method to the flow around tandem-type circular cylinders is presented. The distance S between the two cylinders was fixed at $3d$ (diameter), and the aerostatic characteristics of the downstream cylinder in the $Re=5000$ uniform flow field was computed against various vertical distance y . In the case of $y/d=1$, the computed drag and pressure coefficients were well agreement with experimental results. But in another case of y/d , the coefficients except drag one were different from the experimental values, mainly because of the difference of the target Reynolds numbers. The aerodynamic coefficients during the forced vibration of the downstream cylinder at Reynolds number 600 was computed by using the arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE) technique. It was found that the procedure was suitable to the tandem-type structures.

Key Words : finite element method, tandem cylinders, forced vibration, ALE

1.はじめに

近年における製作・架設技術や数値解析手法の進歩,あるいは材料の高強度化にともない,大型で複雑化した構造物が数多く建造されるようになってきた。このような状況下において,安全でかつ使用者に不快感を与えない構造物を建設するために,風に対する設計上の配慮は必要不可欠なものになってきている。橋梁構造物においても,桁断面のみならず塔の断面形状や斜張橋のケーブル配置,あるいは床版のグレーチング効果など,耐風設計上考慮すべき要素は増加の傾向にあり,風洞実験の重要性もますます増加するものと思われる。しかしながら,風洞実験を実施する場合,当然のことながら実験施設や専門知識を有する技術者が必要となり,したがって実施できる機関も限られたものとなっている。

一方,近年のコンピュータハードウェアおよびそれを取り巻くソフトウェア環境の急速な進歩に伴い,従来風洞実験でのみ可能であった構造物の耐風安定性に対する検討を,数値シミュレーションで代替しようとする動きが現れてきた。いわゆる「数値風洞」¹⁾の試みである。単純な物体まわりの流れの状況を,差分法や有限要素法を用いて数値計算的に追跡することは以前から行われてきたが,最近では3次元計算やLES等の乱流モデルを取り入れた解析により,ビル周辺の気流解析や橋梁断面まわ

りの風の流れ解析なども実施されるようになってきた。現時点ではコンピュータの処理能力や搭載資源の制約から,風洞実験を完全に代替するには不十分な点も多いが,対象とする構造物によっては風洞実験と併用することによって,模型の基本断面や実験ケースの設定が容易となり,可視化なども含めた詳細な検討がより合理的に実施できる可能性が高いと思われる。それゆえ,数値解析結果と実験結果を対比した種々のデータを蓄積していくことは,耐風設計に関する実業務の合理化を図っていく上できわめて有意義なことと言える。

ところで,従来の数値流体解析では単一の物体(構造物)まわりの流れを対象としたものが圧倒的に多く,これらについては解析結果と風洞試験結果とを対比したデータも蓄積され,精度や信頼性の高い数値解析条件が明らかにされつつある。これに対し,並列橋梁や斜張橋に用いられるダブルケーブルのような,並列配置の構造物まわりの流れに関する数値解析事例はきわめて少ないのが現状である。このような状況を踏まえ,著者らはすでに,斜張橋のダブルケーブルを2次元の並列円柱にモデル化して,レイノルズ数 Re が $Re=2400$ なる限定された条件のもとで下流側ケーブルに作用する静的空気力を数値解析し,実験結果との対比を試みている²⁾。その結果,並列円柱を解析するにあたってはメッシュの問題とともに

レイノルズ数の設定が重要となり、解析条件を変化させたさらなる検討が必要であることが判明した。そこで、本研究では並列円柱問題のメッシュを改良するとともに、レイノルズ数が $Re=5000$ なるもとでも新たに下流側ケーブルに作用する静的空気力の数値解析を実施し、実験結果との対比を行うこととした。また、下流側ケーブルを強制加振した場合の空気力についても解析し、数値流体解析を実施するにあたっての留意点について検討した。その結果、いくつかの有用な知見が新たに得られたことから、ここにその結果を報告する。

2. 解析手法

本章では流れ場を支配する基礎方程式と、これを基にした有限要素方程式について説明する。

2.1 ALE 記述による基礎方程式

円柱を取り巻く流れ場を非圧縮粘性流と仮定し、基礎方程式として以下の連続の方程式と、ALE 記述された 2 次元の Navier-Stokes 方程式を用いる。

$$u_{i,j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho(u_j - v_j)u_{i,j} + p_{,i} - \mu(u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} = f_i \quad (2)$$

ここに u_i は流速、 p は圧力、 ρ は空気密度、 μ は粘性係数、 f_i は物体力である。

有限要素法や差分法により流れ場全体を離散化すると空間内には格子点が生ずる。物体の振動問題を取り扱う際には、物体の運動に合わせて周囲のメッシュもしくは格子も変形させた方が、解析精度の面から有利である。この際、格子点の移動速度を基礎方程式に組み込む必要があり、式(2)の v_j はこの移動速度を表す。また $v_j = 0$ と置けば物体が静止している時の式となる。

式(2)の時間項に Euler の 1 次前進差分を適用し、物体力による外力項を無視すると、時間方向に離散化された以下の方程式を得る。

$$u_{i,j}^{n+1} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + \rho(u_j^n - v_j^n)u_{i,j}^n + p_{,i}^{n+1} - \mu(u_{i,j}^n + u_{j,i}^n)_{,j} = 0 \quad (4)$$

ここに n 、 Δt はそれぞれ時間ステップ、時間きざみを表す。

本研究では式(3),(4)の解法として圧力と流速をおおの独立して計算する分離型解法³⁾を用いる。このため、式(4)の両辺を x_i で微分した方程式に、式(3)の条件を加味して圧力 p に関する以下のポアソン方程式を誘導する。

$$p_{,ii}^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} u_{i,i}^n - \rho(u_j^n - v_j^n)_{,i} u_{i,j}^n - \rho(u_j^n - v_j^n)_{,j} u_{i,i}^n + \mu(u_{i,j}^n + u_{j,i}^n)_{,ji} \quad (5)$$

以上の式(4),(5)が解析の基礎となる方程式である。したがって、実際の解析手順は式(5)により時刻 $(n+1)\Delta t$ における圧力 p^{n+1} を計算し、これを式(4)に代入することにより流速 u_i^{n+1} を求めるといった操作を繰り返すことになる。

2.2 有限要素方程式

解析の対象となる流れの領域 V を 3 角形 1 次要素を用いて離散化する。圧力および流速に同一の 1 次補間関数 Φ を用いると、式(5),(4)に対する有限要素方程式を次のように求めることが出来る。

$$A_{\alpha\beta i} p_{\beta}^{n+1} = -\frac{1}{\Delta t} H_{\alpha\beta i} u_{\beta}^n - K_{\alpha\beta\gamma} (u_{\beta}^n - v_{\beta}^n) u_{\gamma}^n + \hat{\Omega}_{\alpha i} \frac{u_{\beta}^{n+1} - u_{\beta}^n}{\Delta t} \ell_i \quad (6)$$

$$M_{\alpha\beta} u_{\beta}^{n+1} = M_{\alpha\beta} u_{\beta}^n - \Delta t \{ K_{\alpha\beta\gamma} (u_{\beta}^n - v_{\beta}^n) u_{\gamma}^n - H_{\alpha\beta} p_{\beta}^{n+1} + S_{\alpha\beta\gamma} u_{\beta}^n + S_{\alpha\beta i} u_{\beta}^n \ell_i - \hat{\Gamma}_{\alpha\beta} p_{\beta}^{n+1} \ell_i - \hat{\Gamma}_{\alpha\beta} u_{\beta}^n \ell_j - \hat{\Gamma}_{\alpha\beta i} u_{\beta}^n \ell_j \} \quad (7)$$

ただし、添字 α, β, γ は $1 \sim 3$ とし、

$$\begin{aligned} A_{\alpha\beta i} &= \int_V (\Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta,i}) dV, \quad H_{\alpha\beta i} = \rho \int_V (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta,i}) dV, \\ K_{\alpha\beta\gamma} &= \rho \int_V (\Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta} \Phi_{\gamma,j}) dV, \quad \hat{\Omega}_{\alpha i} = \rho \int_S (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta}) dS, \\ M_{\alpha\beta} &= \rho \int_V (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta}) dV, \quad K_{\alpha\beta\gamma} = \rho \int_V (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta} \Phi_{\gamma,j}) dV, \\ H_{\alpha\beta} &= \int_V (\Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta}) dV, \quad S_{\alpha\beta\gamma} = \mu \int_V (\Phi_{\alpha,i} \Phi_{\beta,j}) dV, \\ S_{\alpha\beta i} &= \mu \int_V (\Phi_{\alpha,j} \Phi_{\beta,i}) dV, \quad \hat{\Gamma}_{\alpha\beta} = \int_S (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta}) dS, \\ \hat{\Gamma}_{\alpha\beta j} &= \mu \int_S (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta,j}) dS, \quad \hat{\Gamma}_{\alpha\beta i} = \mu \int_S (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta,i}) dS \end{aligned}$$

である。上式中 $\hat{}$ 付きの記号は、それが領域境界 S 上の積分であることを表し、また記号 ℓ_i は境界上に立てた外向き法線ベクトルの方向余弦である。

式(6)の右辺最終項には導出課程で生じた未知の境界流速 u_{β}^{n+1} が存在するが、 Δt が微小であるとの前提から計算上はこの項を 0 と置いている。また式(7)における質量マトリクス $M_{\alpha\beta}$ は、コンピュータメモリの節約のため集中質量マトリクス $\bar{M}_{\alpha\beta}$ に置き換えている。最終的に得られた有限要素方程式(6),(7)を 2.1 節の手順で繰り返し計算することにより、各時間ステップ毎の圧力・流速が求められることになる。

2.3 有限要素メッシュの変形パターンについて

本研究では、下流側円柱を強制加振した場合の空気力をも解析する。そこで、本節では振動物体周辺のメッシュを物体の運動に合わせて変形させる際の変形パターンについて説明する。

図-1 は、既往の計算例で用いられている 3 通りのメッシュ変形パターンを示したものであり、ここではそれぞ

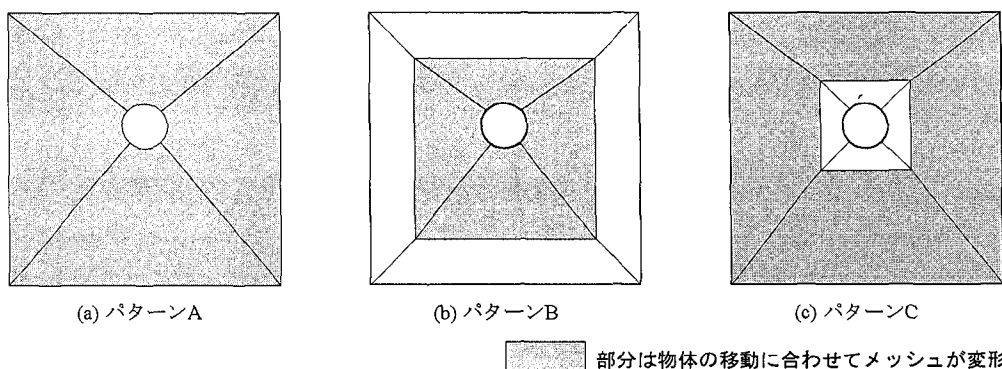


図-1 メッシュの基本的な変形パターン

れをパターン A,B,Cと呼ぶことにする。

パターン A はもっとも基本的なメッシュの変形パターンであり、解析の対象となる領域内すべての格点が物体の運動とともに移動する^{4),5)}。一方、パターン B は物体に近接する部分的な領域内においてのみ⁶⁾、またパターン C は逆に部分的な領域外においてのみ⁷⁾、それぞれメッシュの変形(格点の移動)を行うものである。各方法の特徴をまとめると表-1 のようになる。

表-1 各メッシュ変形パターンの特徴

	長 所	短 所
パターン A	・プログラミングが容易である。	・他の 2 つにくらべ計算量が多い。 ・物体に近接する部分のメッシュサイズが変化する。
パターン B	・計算量を少なくすることができる。	・物体に近接する部分のメッシュサイズが変化する。
パターン C	・計算量を少なくすることができる。 ・物体に近接する部分のメッシュサイズが不変である。	・物体が複数存在する場合に適用が困難である。

本研究で対象とした並列円柱の中心間隔は $3d$ と狭いためパターン C の適用が困難であり、下流側円柱を強制加振する解析においては、円柱近傍の要素サイズを十分に細かくした上でパターン B を採用することとした。

部分領域内におけるメッシュのパターン生成については、格点の座標 Y_m を物体の振動変位 y の一次関数として表す一般的な手法を用いる。すなわち、

$$Y_m^n = Y_0 + \frac{y^n}{y_0} \Delta Y_m \quad (8)$$

である。ここに Y_0 、 y_0 はそれぞれ格点の初期座標、物体

の単位振幅であり、また、 ΔY_m は物体が単位振幅だけ変位した時の座標移動量である。式(8)を用いることにより、式(2)における格点の移動速度 v は近似的に、

$$v_m^{n+1} = \frac{Y_m^{n+1} - Y_m^n}{\Delta t} \quad (9)$$

と算出することが出来る。

3.解析例 I—静止した並列円柱まわりの流れ解析

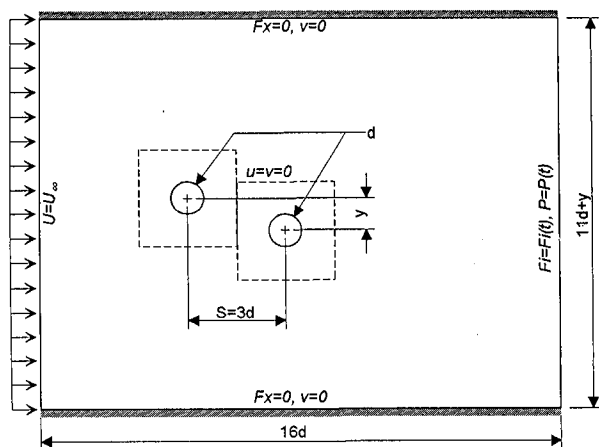
本章では、一様な流れの中に空間固定された 2 本の円柱を対象として、その下流側円柱に対する抗力・揚力係数および圧力係数の算出を行い、既往の風洞実験結果^{8),9)}との比較を行う。比較に際しては、著者らが新たに行った風洞実験結果との比較も行うこととする。なお、文献 2)では、レイノルズ数 Re が $Re=2400$ なる場合に限定していたことから、本研究ではより高い $Re=5000$ なるレイノルズ数域での解析を試みることにした。

3.1 解析モデル

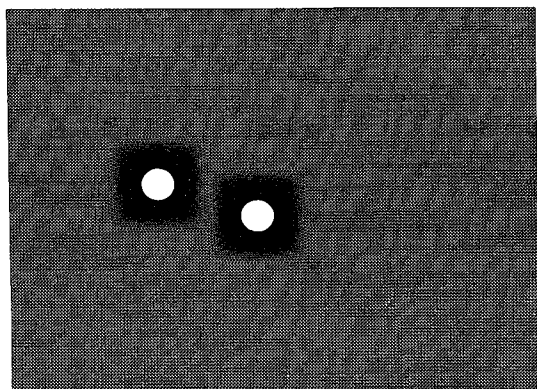
表-2 に本研究における解析諸元を、また、図-2 に解析に使用したモデル図ならびにメッシュ図を示す。節点の総数は 26749($y/d=0$ なる場合)~28359($y/d=1$ なる場合)であり、それに伴い要素数も 52720~55920 と変化する。

表-2 解析例 I における諸元

パラメータ	設定値
空気密度 ρ (g/cm^3)	0.001
粘性係数 μ (g/cm/s)	1.5×10^{-4}
一様流速 U_∞ (cm/s)	100.0($Re=5000$) 50.0($Re=2500$)
円柱直径 d (cm)	7.6
時間きざみ Δt (s)	0.0001($Re=5000$) 0.0002($Re=2500$)
解析時間 (s)	16.0~20.0
サンプリング時間	10 秒以上



(a) 解析モデル I



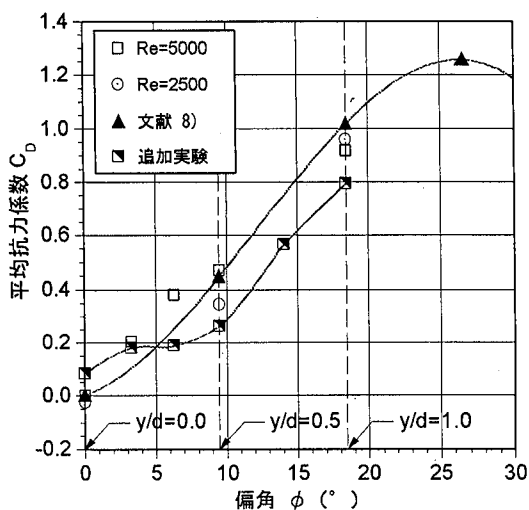
(b) 要素分割図 ($y/d=1$ なる場合)

図-2 解析モデルおよび要素分割図 (解析例 I)

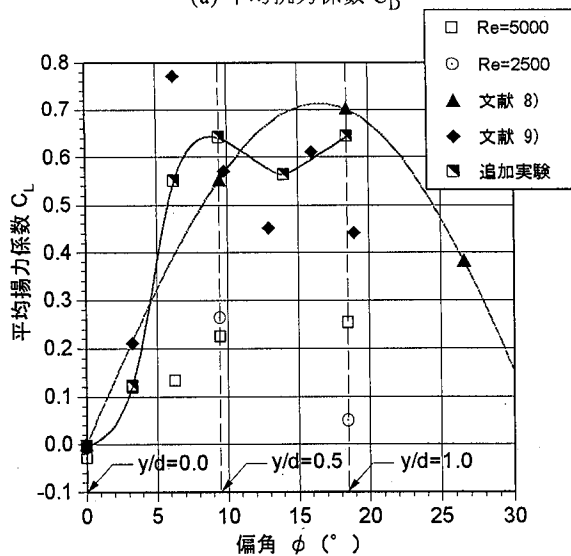
矩形領域内部には 2 つの円柱が固定され、これに一樣流が作用したときの下流側円柱に対する抗力・揚力係数ならびに圧力係数を算出する。基本境界条件として、領域の入口に一樣流速 U_0 を与え、また円柱表面上ではすべりなしの条件を、壁面上ではすべり壁の条件を設定する。なお式(6)の圧力のポアソン方程式を解く際に、流出境界上における圧力の基本境界条件が必要となるが、これには志村らの手法¹⁰⁾を用いている。

文献 2)においては、図-2(a)の破線領域内に相当する部分において、円柱を囲むメッシュを変形させることにより y/d を調節していたが、本研究では円柱近傍のメッシュ精度を損なわないよう、破線領域自体を上下させている。また、これに伴い全体領域の高さも同時に変化させているので、壁面と円柱との間隔は常に一定に保たれ、縮流の影響を極力避けるよう改善が図られている。

上・下流側円柱の水平中心間隔 S は円柱直径 d の 3 倍に設定しているが、これは既往の実験結果が豊富であることに加え、 $S/d=2.8$ 辺りを境に円柱の抵抗やストローハル数などが急変し、さらに S が増大すると下流側円柱の抵抗が間隔やレイノルズ数に強く依存する現象¹¹⁾を勘案したことによる。



(a) 平均抗力係数 C_D



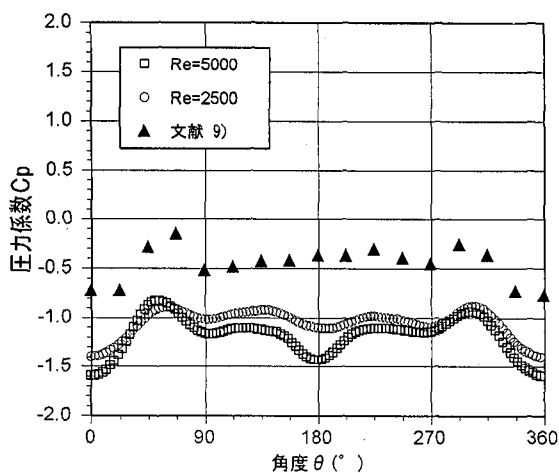
(b) 平均揚力係数 C_L

図-3 平均抗・揚力係数に関する計算値と実験値の比較

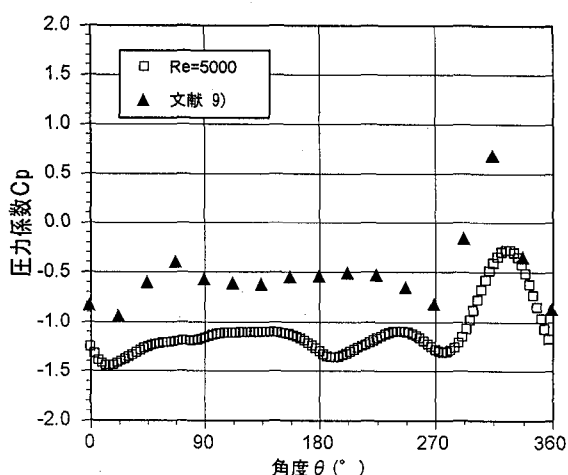
3.2 下流側円柱に対する平均抗力・揚力係数

下流側円柱に作用する抗力・揚力係数を時間平均した値と既往の実験結果とを比較して図-3 に示す。計算におけるレイノルズ数の影響をみるために、入口における一樣流速値として 2 種類の値($Re=5000, 2500$)を設定している。なお図には、著者らが新たに行った風洞実験結果についても併記してある。実験における模型直径 d は $d=76\text{mm}$ であり、風洞風速 $U=4\text{m/s}$ におけるレイノルズ数は $Re=2 \times 10^4$ である。また、図中の偏角 ϕ は、図-4(f)に示すように上下流両円柱の中心を結んだ線と水平軸がなす角度である。

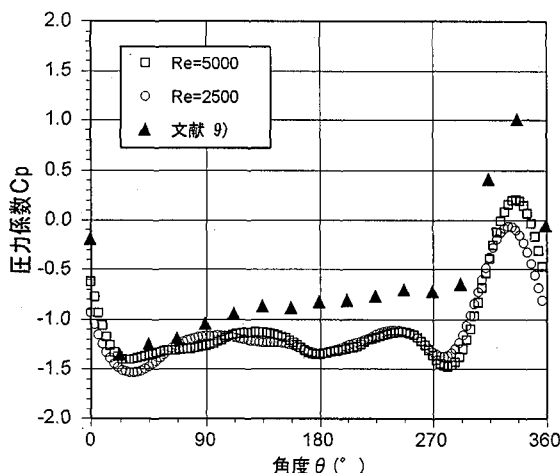
はじめに C_D の値については、図-3(a)から、レイノルズ数を $Re=5000$ と $Re=2500$ のいずれに設定した場合にも計算値は文献 8)の実験結果とよい一致を示していることがわかる。すなわち、並列円柱の平均抗力係数については、実験時よりかなり小さなレイノルズ数域での解析を実施しても、実務的にはほぼ充分な解析精度を有するも



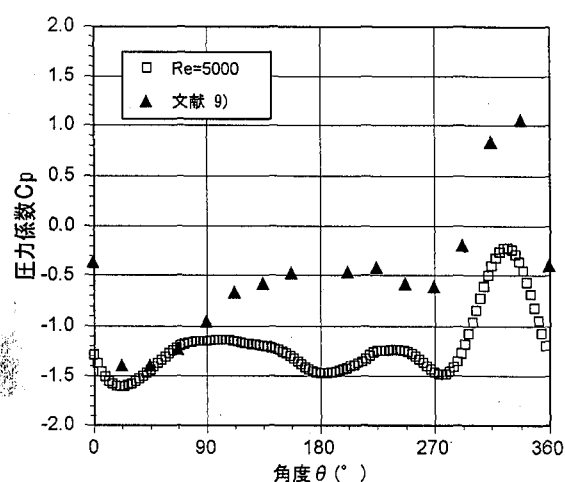
(a) $y/d=0.0$ における圧力係数分布



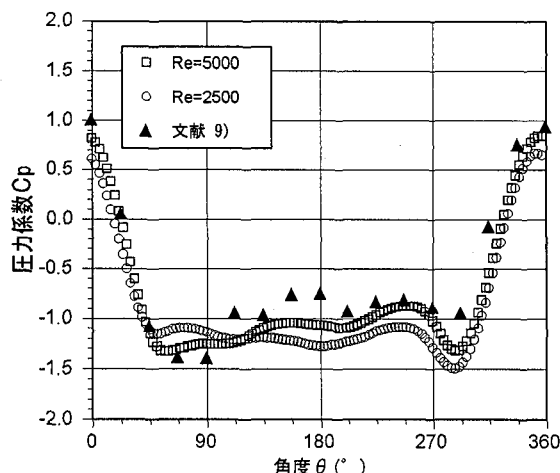
(b) $y/d=0.17$ における圧力係数分布



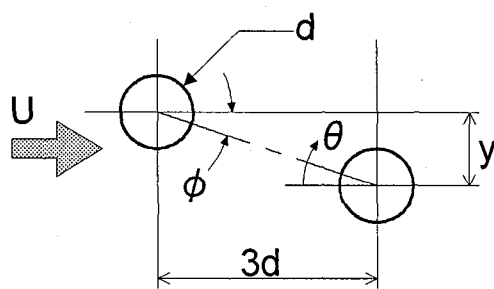
(c) $y/d=0.5$ における圧力係数分布



(d) $y/d=0.35$ における圧力係数分布



(e) $y/d=1.0$ における圧力係数分布



(f) 角度 ϕ , θ の定義

図-4 y/d を変化させた時の計算および実験圧力係数の比較

のと言える。

一方、図-3(b)に示す C_L の値についてみると、計算された C_L の値は各実験値に比較して小さめの値となる結果が得られた。とくに $Re=2500$ のケースでは、 $y/d=1$ においてその傾向が顕著である。また、同図には文献 9) によ

る結果も示してあるが、偏角 $\phi=6^\circ$ および 16° において 2 つのピークが存在し、他の 2 つの実験結果と傾向が異なることがわかる。各実験のレイノルズ数はいずれも 10^4 のオーダーであるが、レイノルズ数の若干の相違により、解析結果は実験結果と異なる傾向を示しているものと思

われる。したがって、平均揚力係数の計算にあたっては $Re=5000$ なるレイノルズ数域でも不十分と考えられ、揚力係数特性に及ぼすレイノルズ数の影響についてさらに詳細な検討が必要であると言えよう。

3.3 下流側円柱に対する平均圧力係数分布

上・下流側円柱の鉛直間隔 y に対する時間平均の圧力係数分布を、文献9)の結果とともに図-4に示す。

図から $y/d=0$ なる場合、計算値における圧力係数の分布形状は実験値と比較的類似しているものの、絶対値は計算値の方がかなり大きい値を与えている。次に、 $y/d=0.17\sim0.5$ なる場合、 $\theta=270^\circ\sim360^\circ$ において実験値の方が $C_p=1.0$ 前後まで圧力回復しているのに対し、計算値の方は 0 近辺までしか圧力が回復していない。この理由として、計算レイノルズ数と実験レイノルズ数の違いによって、上流側円柱の後流域の状態が相違していること、また、剥離位置の違いによって下流側円柱に及ぼす主流の影響が異なるという2つの要因が考えられる。最後に、 $y/d=1$ なる場合には、計算値は実験値を非常によく再現しており、この理由として、 y/d がある程度以上大きくなると、下流側円柱の空気力特性は単独円柱のそれに近づくためと思われる。なお、レイノルズ数を 5000 と 2500 の2通りに変えたことによる影響は、計算された圧力係数をみる限り比較的小さいと言える。

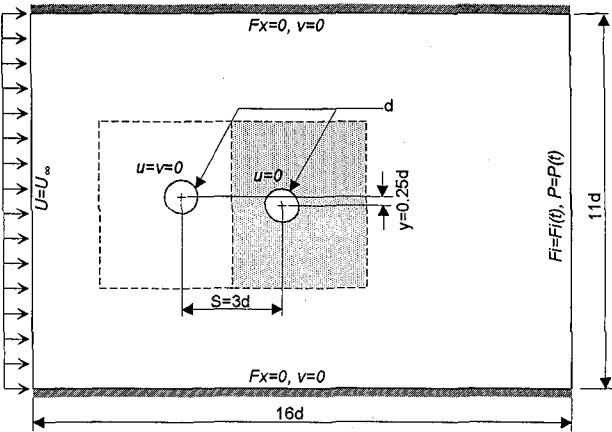
4.解析例 II-下流側円柱を強制加振した場合の流れ解析

本章では、下流側円柱のみを強制加振した場合の空気力を、第2章で説明したALE法を用いて解析する。解析にあたっての諸元を表-3に、解析モデルおよび要素分割図を図-5に示す。有限要素メッシュにおける節点総数は13151、要素総数は25752である。

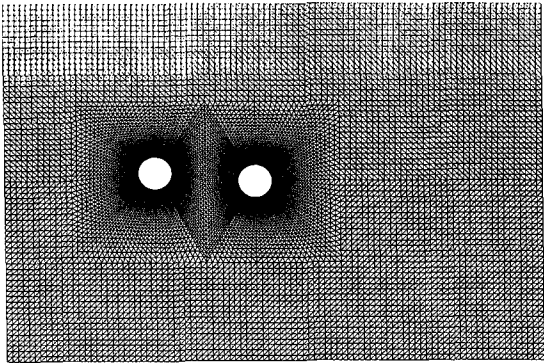
表-3 解析例 II における諸元

パラメータ	設定値
空気密度 ρ (g/cm ³)	0.001
粘性係数 μ (g/cm/s)	1.5×10^{-4}
一様流速 U_∞ (cm/s)	45.0($Re=600$) (無次元風速 30)
円柱直径 d (cm)	2.0
時間きざみ Δt (s)	0.0002
解析時間 (s)	8.0

本解析では図-5(a)に示すように、上流側円柱を鉛直上方に $0.25d$ だけ変位させて固定することとした。下流側円柱の振動に伴うメッシュの変形は、図に示す円柱まわりの薄墨部分においてのみ行う。解析では、比較のため、まず下流側円柱が静止している場合の空気力を計算し、次に下流側円柱に振幅 y が $y = 0.05d \sin 0.75t$ なる強制振動を与えた場合の空気力を計算した。解析結果を以下に



(a) 解析モデル II



(b) 要素分割図 (y/d=0.25)

図-5 解析モデルおよび要素分割図 (解析例 II)

考察する。

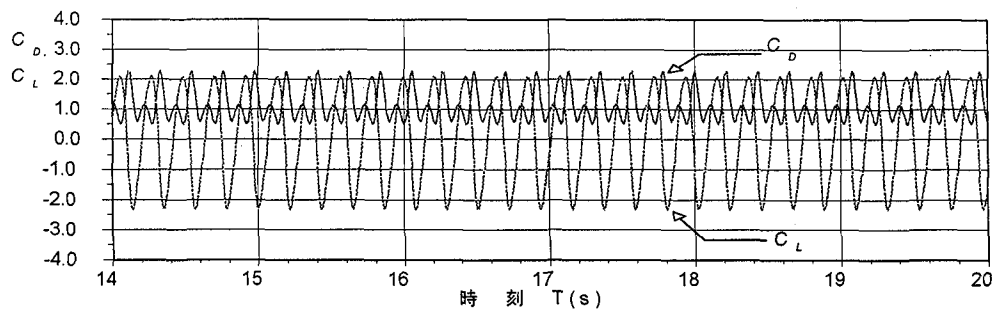
4.1 抗力・揚力係数の時刻歴

下流側円柱が静止した場合および強制振動を与えた場合の抗力係数と揚力係数をそれぞれ図-6(a),(b)に示す。図-6(a)から、 $y/d=0.25$ に設定したことにより非対称な渦が発生し、抗力係数の振幅に2つのピークが存在することがわかる。また、揚力係数も同様にマイナス側の絶対値が若干大きめの値となっている。一方、図-6(b)の方をみると、抗力係数の振幅変動が(a)に比べて大きく減少しており、強制加振したことによる影響が抗力に及んでいることがわかる。これに対し、揚力変動については(a)との差異がほとんど認められないという結果が得られた。今後は解析結果の精度を確認すべく、強制加振時における空気力の測定も行い、両者の結果を対比する所存である。

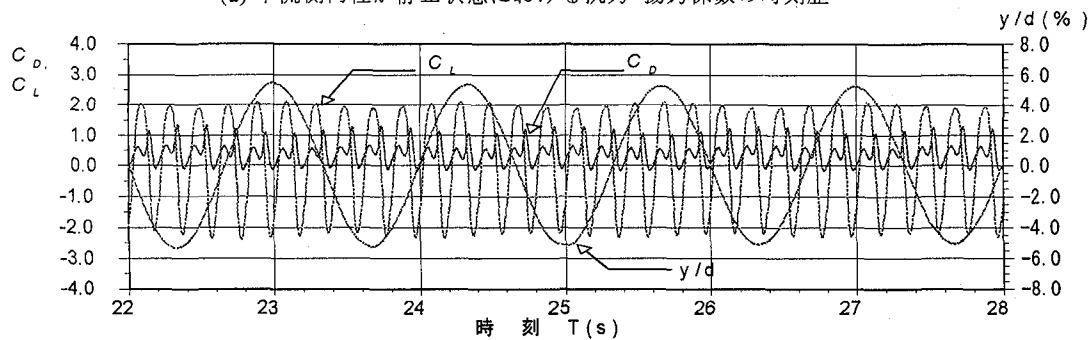
4.2 圧力および流速ベクトル分布

図-7に下流側円柱の静止時および強制加振時における、両円柱まわりの瞬時的な圧力および流速ベクトル分布を示す。図-7(c),(d)は図-6(b)における時刻 $T=26$ 秒に対応しており、ちょうど振幅が正から負へと移る直前である。

図-7のいずれのケースも比較的安定に解析されたが、強制振動時の(c),(d)図において、下流側円柱の後方に若干の空間的振動が認められる。ある程度以上流速が大き

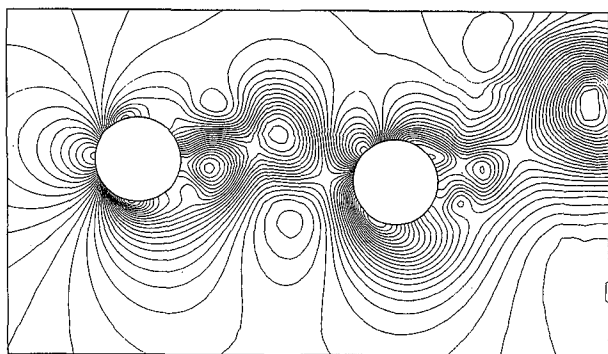


(a) 下流側円柱が静止状態における抗力・揚力係数の時刻歴

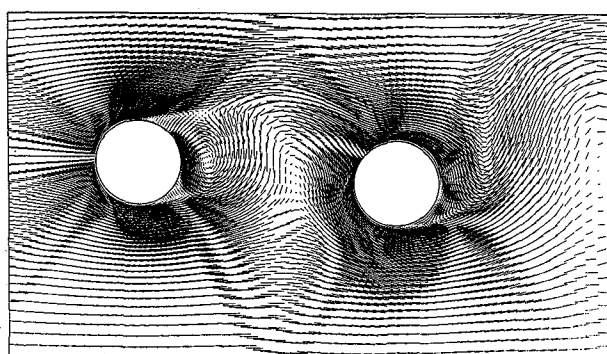


(b) 下流側円柱が振動状態における抗力・揚力係数の時刻歴

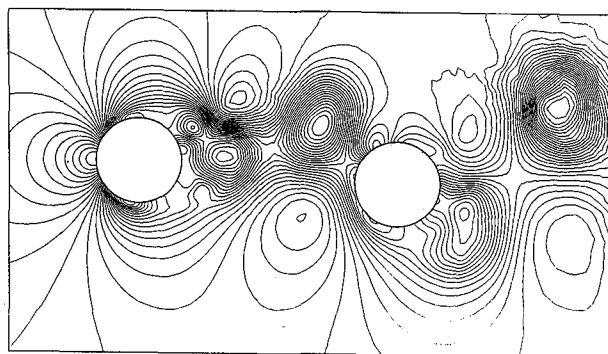
図-6 下流側円柱が静止・振動状態における抗力・揚力および自由振動応答時刻歴



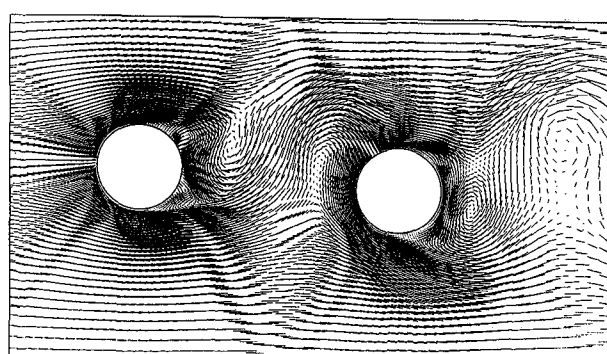
(a) 瞬間的な圧力分布 (静止時)



(b) 瞬間的な流速ベクトル分布 (静止時)



(c) 瞬間的な圧力分布 (強制加振時)



(d) 瞬間的な流速ベクトル分布 (強制加振時)

図-7 下流側円柱の静止状態および強制加振状態における瞬間的な圧力・流速ベクトル分布

くなると、空間振動を生ずる可能性のあることが報告されている²⁾が、本解析ではちょうど図-5(a)において、メッシュの分割パターンが変化する境界部分の近傍で空間振動が生ずる結果となっている。並列構造物を対象と

した複雑な物体境界を有する問題は、有限要素法の本来適するところであるが、本研究のように上流側構造物の後流域がとくに問題となるような解析に対しては、メッシュの分割形状にまだ改善の余地があるものと思われる。

5.まとめ

本研究では、一様な流れの中に置かれた 2 次元並列円柱まわりの流れ問題に有限要素法を適用し、下流側円柱に関する静的な空気力諸係数を算出した。また、部分的にメッシュを変形させる ALE 法を用いることにより、下流側円柱のみを強制加振した場合の空気力も解析した。以下に、得られた主要な結果をまとめる。

(1) 上・下流側円柱の水平間隔が $S=3d$ なる場合、平均抗力係数の計算値は既往の実験値と良い一致を示し、また、計算時のレイノルズ数の相違による大幅な違いは認められなかった。一方、平均揚力係数に関しては、計算値は実験値と大きく異なる結果が得られ、さらに $y/d=1$ なる場合の解析結果には、計算レイノルズ数の相違による影響が大きく現れた。揚力係数において計算値と実験値があまり良く一致しなかった理由として、レイノルズ数依存性の問題が考えられる。それゆえ、並列円柱の揚力係数については、 $Re>5000$ なる高レイノルズ数域における解析手法の確立が必要であると言えよう。

(2) 両円柱の鉛直相対距離 y を変化させた各ケースの圧力係数分布を比較したところ、計算値は実験値と良い一致を示した。しかしながら、 $y/d=1$ 以外のケースにおいては、計算値の絶対値が実験値と異なっており、特に円柱前面において平均圧力が負圧側に大きくシフトする結果が得られた。この理由として、上流側円柱を剥離した流れの影響と、主流が下流側円柱に直接作用する影響との相互作用が、レイノルズ数の相違により計算と実験で異なっているためと推察される。もう一つの理由としては、解析そのものが 2 次元計算であるため、剥離渦の特性が実際と大きく異なっていることが考えられる。とくに本研究のように、複数配置された構造系において下流側の物体まわりの流れを解析しようとした場合、その影響の検討の必要性があるものと思われる。

(3) 下流側円柱のみを強制加振した場合の空気力計算では、ALE 法により安定な解析を行うことができた。また強制振動時における抗力係数は静止時に比べ小さくなるなど、本手法により基本的な解析が可能であることが確認された。

静止した並列円柱の問題では、上流側円柱の後流域の形成状態により、計算に限らず実験においても、下流側円柱の空気力特性が著しく変化するものと考えられる。それゆえ、計算値と実験値との比較においては、風速あるいは模型寸法等をパラメータとしたさらなる検討を実施できればと考えている。一方、強制振動を扱った問題では、本研究で用いた ALE 手法により安定した解析を実施できることが明らかにされたことから、今後はウェイクギャロッピングの発生機構など、実現象の解明に応用

できるよう検討を重ねる所存である。最後に、本論文が数値流体解析を実務に応用してゆく上で有益な技術資料となれば幸いである。

参考文献

- 1) 岡島厚：耐風工学における数値風洞についての現況と展望，橋梁と基礎，Vol.23, No.8, pp.94~102, 1989.
- 2) 枝元勝哉，米田昌弘，川原睦人：2 次元並列円柱まわりの流れの有限要素解析とその適用性，第 13 回風工学シンポジウム論文集，pp.549~554, 1994.
- 3) Hayashi, M., Hatanaka, K. and Kawahara, M. : Lagrangian finite element method for free surface Navier-Stokes flow using fractional step method, International Journal of Numerical Methods in Fluid, Vol.13, pp.805~840, 1991.
- 4) 枝元勝哉，川原睦人：流れによる角柱の自由振動応答の ALE 有限要素解析，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，vol.16, pp.445~450, 1992.
- 5) 野村卓史，飯島政義，三橋浩一：振動する物体まわりの流れの問題の ALE 有限要素解析，東京工業大学土木工学科研究報告，No.40, 9月, 1989.
- 6) Shimura, M., Zienkiewicz, O.C. : Interaction analysis between structure and fluid flow using the direct Laplacian method, Proceedings of the 4th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, pp.267~274, 1991.
- 7) Edamoto, K. and Kawahara M. : Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element analysis for flow-induced vibration of rigid body, Proceedings of the 1st European Computational Fluid Dynamics Conference, pp.993 ~ 1000, 1992.
- 8) 宇都宮英彦，鎌倉米康：近接する並列円柱系の空気力学的挙動，土木学会論文集，第 336 号，pp.1~8, 1983.
- 9) Shiraishi, N., Matsumoto, M. and Shirato, H. : On aerodynamic instabilities of tandem structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 23, pp.437~447, 1986.
- 10) Shimura, M. and Kawahara, M. : Two dimensional finite element flow analysis using the velocity correction Method, Proceedings of JSCE, 398, pp.51~59, 1990.
- 11) 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，日本機械学会論文集(B 編)，52 巻 474 号，1986.

(1994 年 9 月 14 日受付)