

多数本角柱まわりの数値流体解析を行うための 境界条件とモデル化の検討

A STUDY ON TREATMENTS OF BOUNDARY CONDITION AND MODELING FOR
FLOW ANALYSIS AROUND PARALLEL CONFIGURATED RECTANGULAR CYLINDERS

丸岡 晃*・平野 廣和**・志村 正幸***

Akira MARUOKA, Hirokazu HIRANO and Masayuki SHIMURA

*正会員 工博 八戸工業高等専門学校助手 建設環境工学科 (〒 039-1192 青森県八戸市田面木字上野平 16-1)

**正会員 工博 中央大学教授 総合政策学部 (〒 192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

***正会員 工博 前田建設工業(株) 技術本部 (〒 179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16)

The purpose of this paper is to investigate treatments of boundary condition and modeling for a flow analysis around parallel configured rectangular cylinders. Wind tunnel experiments that had been investigated for noises from handrail caused by wind flow using real scale lightweight handrails made by the aluminum are referred to the present computation. The flow field is assumed to be the two-dimensional incompressible viscous flow at the Reynolds number 500, and the finite element method is used for the discretization. To investigate the treatments of the domain, the number of rectangular cylinders was changed, and two types of side face boundary conditions that are periodic and slip conditions were compared.

Key Words : flow around parallel configured rectangular cylinders, periodic boundary condition, slip boundary condition, finite element method

1. はじめに

数値流体解析の分野では、解析領域内に単一の物体を配置した状態で、このまわりの流れを解析することが圧倒的に多い。これらの解析においては、最近では2次元の風洞実験と比較する場合でも、軸方向に発生する変動流を考慮した大規模な3次元数値流体解析^{1),2),3)}が行われるようになってきている。さらに、風洞実験との比較によりデータの蓄積も多くなされ、精度・信頼性の高い解析が可能となってきた。

これに対して、解析領域内に複数の物体を配置した状態での解析は少ないのが現状である。この要因の一つとして考えられるのは、解析領域の上下境界での境界条件の取り扱い方である。閉塞効果を考慮して解析領域の上下の境界間を十分に広く取り、かつ上下境界にスリップ境界条件を用いた解析例としては、並列ケールで生じるウェークギャロピング現象を扱った解析⁴⁾や並列角柱を扱った解析⁵⁾などが挙げられる。これらは基本的に解析領域内に単一物体を配置した場合と同様な境界条件である。そのためこの境界条件を用いた場合には、解析領域内に物体が全て配置できれば解析可能であるが、流れと直角方向に多くの構造物が配置される場合には、平面での解析領域が広くなり、これに伴ってデータ量も膨大となる。よって、3次元解析を最終目標とした場合には、現実的でない境界条件である可能性も考えられる。一方、解析領域の上下境界に周期境界条件を用いた解析例としては、木村ら⁶⁾の研

究が挙げられる。これは、薄い平板を並列に配置して風が斜めから作用するときに生じる空力音⁷⁾の発生源を解明することを目的として、渦の運動およびそれから生じる圧力変動を2次元の非圧縮性粘性流れの数値流体解析により求めようとしている。ここで、複数の平板の解析領域の上下境界に周期境界条件を採用して、単独の平板が流れと直角方向に無限に並んでいることをモデル化している。しかし、周期境界条件を用いても十分な現象解明には至っていない。この一つの原因として解析領域のモデル化の妥当性が考えられる。それは、従来の研究では、周期境界条件の採用と解析領域内の物体との個数との関係により、流れの変化、空気力の変化が明らかにされていないことによる。このように、解析領域内に複数物体を配置する場合、特に流れと直角方向に多数の物体を有する解析を行う場合には、境界条件ならびにモデル化に関して検討することが多く残されている。

このような背景から、本論文では流れと直角方向に多数の物体が並列に配置された場合の流れの解析を行うときの解析領域の上下境界での境界条件ならびにモデル化に関して検討を行うものである。具体的には、解析領域の閉塞率を変化させた場合、解析領域内の角柱の本数を1本、4本、5本と変えた場合および上下境界の境界条件を周期境界条件とスリップ境界条件に変えた場合に関して、この影響により流れの状態ならびに空気がどのように変化するかを知ることが目的としている。なお、解析を行うに際し、多数の並列角柱を流

れと直角方向に配置した風洞実験結果⁸⁾を参考とした。また、数値流体解析は、非圧縮性粘性流れの有限要素法による解析手法⁹⁾を用い、境界条件とモデル化の検討を主眼としているので、ここでは解析が容易に行える Reynolds 数を 500 とした 2 次元解析を採用した。

2. 解析手法

流れ場を非圧縮性粘性流れに仮定し、基礎方程式は非圧縮 Navier-Stokes 方程式を用いる。時間方向の離散化には、Crank-Nicolson 法を適用する。時間方向に離散化された運動方程式と連続式は以下ようになる。

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} + u^n \cdot \nabla u^{n+\frac{1}{2}} + \nabla p^{n+1} - \nu \nabla^2 u^{n+\frac{1}{2}} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u^{n+1} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\nu = 1/Re$ であり、 Re は Reynolds 数である。また、 $u^{n+\frac{1}{2}} = (u^n + u^{n+1})/2$ であり、移流項の非線形項は移流速度を既知流速 u^n により近似する。

本手法では、連続式 (2) の代わりに圧力 Poisson 方程式を用いる分離型解法¹⁰⁾を適用する。式 (1) の発散をとり、式 (2) を代入することによって圧力 Poisson 方程式が得られる。

$$\Delta t \nabla^2 p^{n+1} = \nabla \cdot u^n - \Delta t \nabla \cdot \{u^n \cdot \nabla u^n - \nu \nabla^2 u^n\} \quad (3)$$

分離型解法では上式から圧力を求めるが、陰的解法では右辺項に未知流速 $u^{n+\frac{1}{2}}$ が含まれるので、式 (1) と連立して解くことになる。そこで、流速と圧力を分離するために、未知流速 $u^{n+\frac{1}{2}}$ を既知流速 u^n により近似している。

空間方向の離散化には、式 (1) に IBTD 法⁹⁾を適用し、式 (3) に Galerkin 法を用いる。IBTD 法は、BTD 法を改良した手法であり、Petrov-Galerkin 法の考えに基づき導出することもできる⁹⁾。IBTD 法の重み付き残差方程式は、SUPG 法¹¹⁾による安定化パラメータを $\frac{\Delta t}{2}$ に置き換えた形となる。流速と圧力の補間関数には、同次補間である四角形双 1 次要素の Q1Q1 要素を用いる。式 (1) と式 (3) の重み付き残差方程式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} w_h \cdot \left\{ \frac{u_h^{n+1} - u_h^n}{\Delta t} + u_h^n \cdot \nabla u_h^{n+\frac{1}{2}} \right\} d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \nabla w_h \cdot \{ -p_h^{n+1} I + \nu \nabla u_h^{n+\frac{1}{2}} \} d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \frac{\Delta t}{2} u_h^n \cdot \nabla w_h \cdot \left\{ \frac{u_h^{n+1} - u_h^n}{\Delta t} + u_h^n \cdot \nabla u_h^{n+\frac{1}{2}} \right. \\ & \quad \left. + \nabla p_h^{n+1} \right\} d\Omega = \int_{\Gamma_2} w_h \cdot \hat{t}_h d\Gamma \quad (4) \end{aligned}$$

$$\int_{\Omega} \Delta t \nabla q_h \cdot \nabla p_h^{n+1} d\Omega = - \int_{\Omega} q_h \nabla \cdot u_h^n d\Omega$$

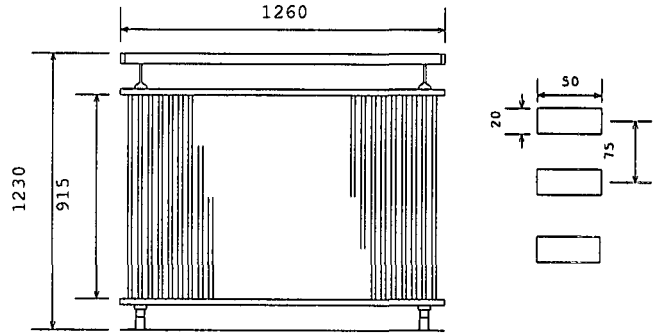


図-1 多数本角柱の例 (アルミ製手すり)

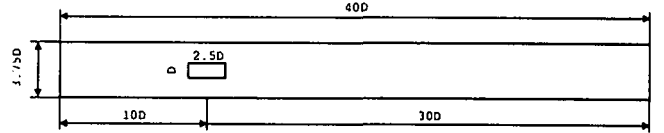


図-2 1 本角柱に対する解析領域

$$- \int_{\Omega} \Delta t \nabla q_h \cdot u_h^n \cdot \nabla u_h^n d\Omega - \int_{\Gamma_1} q_h \{ \hat{u}_h^{n+1} - \hat{u}_h^n \} \cdot n d\Gamma \quad (5)$$

式 (4) の左辺第 3 項が安定化項である。解析手順は、式 (5) により圧力 p^{n+1} を求め、式 (4) により流速 u^{n+1} を求める形になる。なお、本手法では、移流項と安定化項に含まれる時間微分項をまとめることによって、陰的部分を対称化できるため、式 (4) と式 (5) の代数方程式の行列がそれぞれ対称となる特徴を持つ⁹⁾。

3. 解析条件

多数本角柱の例として、図-1 に示すアルミ製手すりを選んだ。この手すりは、風騒音の発生の有無を調査することを目的として、前田建設工業(株) 所有の多目的風洞を用いて、実物大の試験体による風洞実験⁸⁾が行われたものである。試験体に用いた手すり子は幅 20mm、奥行き 50mm のものであり、隣接する手すり子の中心間隔が 75mm である。よって、この手すり子は、断面辺長比 B/D (ここで、 D は流れと直角方向の辺長、 B は流れ方向の辺長とする。) が 2.5 の角柱と同等である。

多角柱列が流れと直角方向に配置した風洞試験 (以下、風向 0° とする) では、風速 7~8m/s で、85Hz 前後の低いびり音が発生した。この音は、手すり子と手すり子の間に生じるカルマン渦の周波数と手すり子の 1 次固有振動数が一致し、手すり子が共振して生じたものである。この振動により、手すり子と横水平材の接合部が細かく接触を繰り返し、この接合部から音が発生した。この風騒音が発生したときの周波数の無次元量 ($= fD/U$, f は周波数、 U は風速) は、0.21 ~ 0.24 となる。この風騒音の原因となる振動現象は、通常の $B/D = 2.5$ の角柱の Strouhal 数に比べ、発振周波数

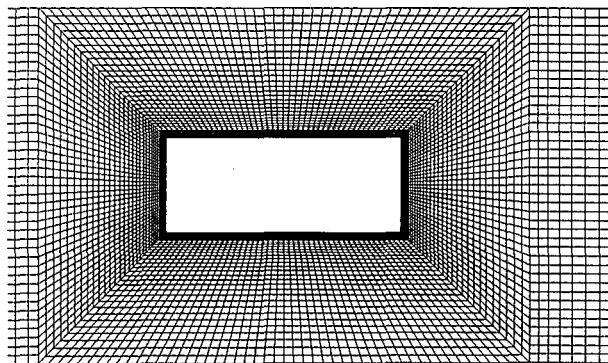


図-3 角柱まわりの有限要素分割図

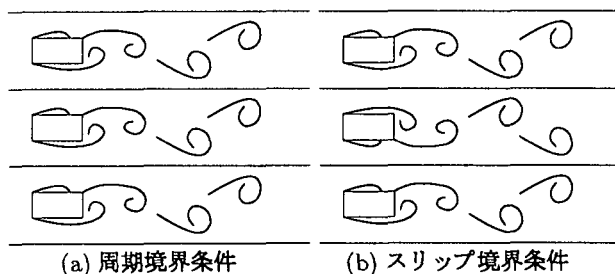


図-4 1本角柱に対する流れ場のモデル

が大きい値を示していることから、ある限定的な風速で発振していることから、 $B/D = 2$ の角柱等で発生する自己励起型渦励振と考えることができる。また、隣接する手すり子間の振動の位相差は、約 180° であり、ほぼ逆位相であった。

本論では、この手すりを多角柱列の一つの例としてモデル化し、数値流体解析により検討を行った。

3.1 多角柱列のモデル化

風向 0° の風洞試験と同様になるように、角柱の断面辺長比 B/D を2.5とし、中心間隔を $3.75D$ とモデル化した。多角柱列まわりの流れの数値流体解析のための有限要素分割は、まず1本角柱の有限要素分割を行い、これを結合することにより作成した。

1本角柱に対する解析領域は、図-2に示すようになる。解析領域は、流れと直角方向に $3.75D$ 、流れの方向に $40D$ であり、角柱は、領域の左端から $10D$ の位置に中心がくるように配置した。なお、1本角柱の解析領域に対して閉塞率は26.7%である。1本角柱に対する有限要素分割は、総節点数10,259、総要素数10,000であり、図-3に角柱まわりの有限要素分割図を示す。時間増分は $\Delta t = 0.04D/U$ とした。

多角柱列モデルにおける角柱の本数は、1本、4本、5本とした。また、検証用に通常の物体まわりの流れの数値流体解析で行われるような解析領域の上下境界にスリップ境界条件を用い、閉塞率を5%とした単独角柱まわりの流れの数値流体解析も同時に行った。

表-1 1本角柱の平均空気力

閉塞率	側面の境界条件	Cd_m	Cl_{rms}	St 数
5.0%	スリップ	1.32	0.400	0.186
	周期	2.48	0.538	0.246
26.7%	スリップ	2.32	0.772	0.238



スリップ境界条件 (閉塞率 5.0%)

周期境界条件 (閉塞率 26.7%)

スリップ境界条件 (閉塞率 26.7%)

図-5 1本角柱まわりの流れの渦度分布図

3.2 境界条件

境界条件は、左端の流入境界では、一様な流れ U 、角柱まわりでは、ノンスリップ条件、右端の流出境界では、 $p = 0$ を与えた。また、解析領域の上下境界では、解析領域内の多角柱列が周期的に接続しているものと仮定する周期境界条件と流れと直角方向の流速成分のみをゼロとするスリップ境界条件の2つの条件により検討を行った。

ところで、木村ら⁶⁾の研究の様に多角柱列まわりの流れを1本角柱でモデル化する場合、解析領域の上下境界での境界条件の取り方により、特徴のある流れ場を表現することになる。隣接する角柱間で発生する渦の位相を完全に同位相とする場合には、1本角柱の解析領域の上下境界に周期境界条件を適用することによってモデル化することができる(図-4(a))。それに対して、隣接する角柱間で発生する渦の位相を完全に逆位相とする場合には、流れ方向の角柱間の中心(両角柱間を二等分する軸)を境に流れが鏡面对称となる条件を与える。これは、その軸上での流れの直角方向の流速成分は、完全に打ち消し合わされゼロとなる条件である。ところで、本論文で取り扱う1本角柱に対する解析領域の上下境界は、隣接する角柱間をちょうど二分するところにあるので、流れの直角方向の流速成分をゼロとするスリップ境界条件を与えることにより、完全に逆位相となる流れをモデル化することになる(図-4(b))。

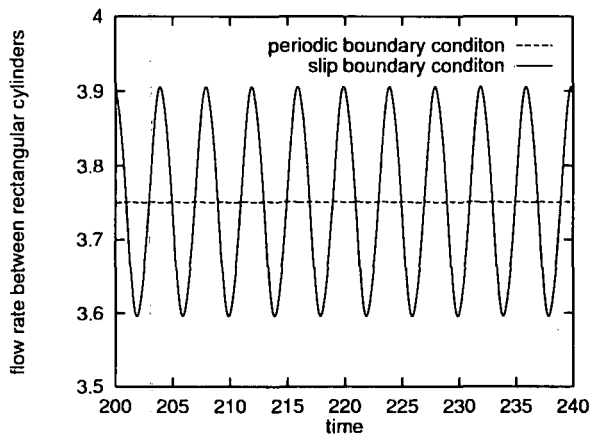


図-6 角柱間を通過する主流方向の流量の時刻歴

4. 解析結果

4.1 1本角柱

表-1に1本角柱の平均空気力の解析結果を示す。ここで、 C_{d_m} および Cl_{rms} は、抗力係数の平均値および揚力係数のRMS値である。図-5に1本角柱まわりの流れの各計算条件における渦度分布図を示す。また、図-6に周期境界条件が同位相となり、スリップ境界条件が逆位相となることを考慮して計算した角柱間を通過する主流方向の流量の時刻歴を示す。

$B/D = 2.5$ の角柱は、 $Re = 500$ 付近で流れが再付着流れから完全剥離流れに遷移することに伴い、Strouhal数が約0.185～0.05付近まで不連続に変化することが知られている。岡島ら¹²⁾の可視化実験によると、 $Re=500$ 以下の流れの場合、規則正しい間隔の比較的狭い渦が配列すると報告されている。従来の単独角柱解析の場合と同様の条件である図-5に示すスリップ境界条件(閉塞率5%)でもほぼ同様な渦配列の結果が得られている。よって、本解析で扱う流れ場は、不連続になる直前の流れを解析していることになる。なお、このときの実験でのStrouhal数は約0.185、数値解析では0.186であり、両者ともほぼ一致した値となっている。

次に、多角柱列を考慮した閉塞率26.7%の結果は、周期境界条件ならびにスリップ境界条件の両者ともに閉塞率5%の結果と比較し、空気力、Strouhal数とも増大している。この原因は、閉塞効果が高まったことによって角柱近くを通過する流速が増加し、それに伴い、前縁で剥離した渦の強度が強まり流体力が増大しているものと考えられる。また、Strouhal数が増加すること、閉塞効果に伴い角柱近くを通過する流速が増加することによって、相対的に渦の放出間隔が早められたものと考えられる。なお、本解析で得られたStrouhal数は、Reynolds数の異なる現象であるが、風洞実験において渦励振が発生したときの周波数の無次元量とほぼ一致している。

一方、周期境界条件とスリップ境界条件の結果を比

表-2 4本角柱の平均空気力

側面の境界条件	C_{d_m}	Cl_{rms}	St 数
周期	2.32	0.772	0.238
スリップ	2.32	0.772	0.238

表-3 4本角柱の隣接する角柱間の渦発生の位相差

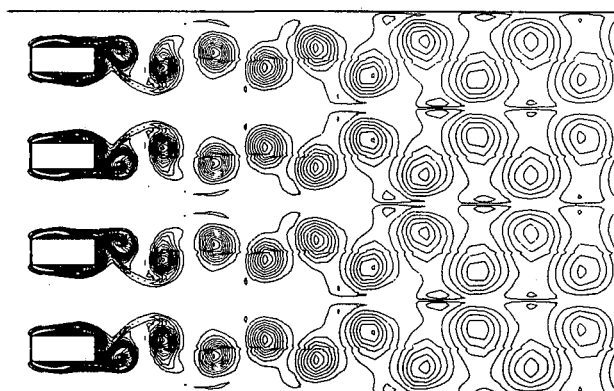
側面の境界条件	隣接する角柱間の発生渦の位相差 [deg]			
	A-B	B-C	C-D	D-A'
周期	179.4	-179.1	-179.9	179.6
スリップ	-179.9	-179.9	-180.0	

較すると、 Cl_{rms} のみスリップ境界条件の方が約1.4倍程度大きくなっている。これは、図-6に示すように隣接する角柱間を通過する流量は、隣接する角柱間で発生する渦が同位相となる周期境界条件の場合、非圧縮の連続条件を考えると常に一定となる。これに対して、逆位相となるスリップ境界条件の場合、渦の放出する周期によって周期的に変化する。よって、スリップ境界条件の場合は、角柱間の通過流量が大きいとき、前縁で剥離した渦の強度がさらに強まり、これが揚力を増大させている一つの原因になっていると考えられる。

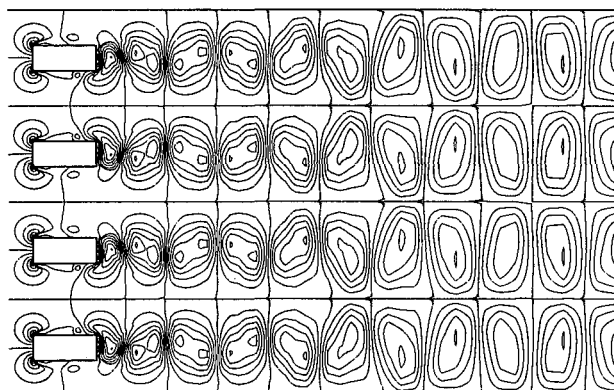
4.2 4本角柱

表-2に4本角柱の平均空気力の解析結果を示し、表-3に隣接する角柱間の渦発生の位相差を示す。ここで、A, B, C, Dとは、各角柱に対して順番に名前付けをしたものである。また、A'は、周期境界条件として扱っている解析領域の上下境界を仮想的に結合するとDの角柱の隣はAとなることを示している。図-7に4本角柱まわりの流れの周期境界条件における渦度分布図と直角方向流速分布図を、図-8に4本角柱まわりの流れのスリップ境界条件における渦度分布図と直角方向流速分布図をそれぞれ示す。図-7と図-8の比較から、スリップ境界条件の渦度分布と周期境界条件の渦度分布および直角方向の流速分布はほぼ同様であることがわかる。

ところで、偶数本である4本角柱の場合は、空気力、渦発生の位相差とも周期境界条件とスリップ境界条件の結果が一致している。位相差は、全て約 180° であり、逆位相になっている。これは、風洞実験による結果⁸⁾と一致している。なお、ここでの流れ場は、隣接する角柱間での渦の発生が逆位相の流れであることから、1本角柱の閉塞率26.7%のスリップ境界条件の結果と、流体力、渦度分布とも一致している。これより、風向 0° の多角柱列まわりの流れの特性は、1本角柱の解析領域の上下境界にスリップ境界条件を扱った場合でモデル化されることから、角柱間の直角方向の流れの干

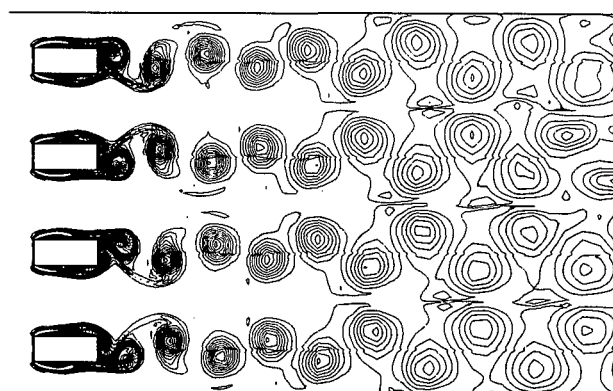


渦度分布図

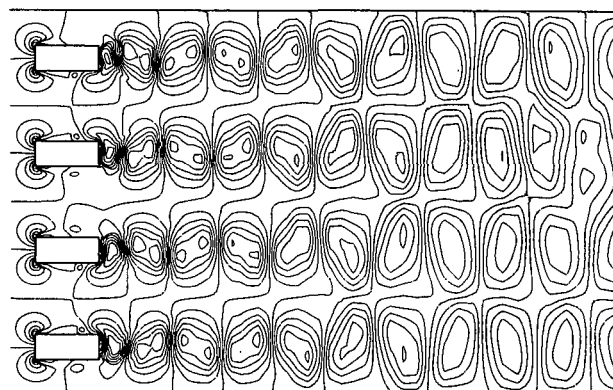


直角方向流速分布図

図-7 4本角柱まわりの流れの周期境界条件における渦度分布図と直角方向流速分布図



渦度分布図



直角方向流速分布図

図-8 4本角柱まわりの流れのスリップ境界条件における渦度分布図と直角方向流速分布図

渉より、閉塞効果の方が支配的であると考えられる。

図-7の直角方向流速分布図の1本角柱ごとの境界線上と一致する位置に水平にコンター線が引かれているが、これは、直角方向流速成分がゼロのコンター線である。この図から、逆位相の場合には、流れ方向の角柱間を二分する軸上で直角方向流速成分が打ち消し合わされゼロとなっていることが確認できる。

一方、周期境界条件を用いた場合、AとA'の渦発生の位相差は、 0° となるので、必ず同位相となる。これより、それぞれの隣接する角柱間の渦の発生する位相差(4本の場合、A-B、B-C、C-D、D-A')の和を求めると 360° の倍数になることがわかる。また、隣接する角柱間の位相差が全て同じ値であるとする、隣接する角柱間の位相差は、 360° /本数の倍数となっている。これを4本角柱の場合にあてはめると、隣接する角柱間の位相差は、 0° 、 90° 、 180° の場合が考えられるが、 180° となったことから、逆位相となる流れ場が、最も安定した流れであるということが考えられる。風洞実験においても、手すり子間の振動の位相差が逆位相であることは確認されている。

4.3 5本角柱

表-4に5本角柱の平均空気力の解析結果を示し、表

表-4 5本角柱の平均空気力

側面の境界条件	Cd_m	Cl_{rms}	St数
周期	2.33 ~ 2.36	0.756 ~ 0.773	0.238
スリップ	2.32	0.772	0.238

表-5 5本角柱の場合の隣接する角柱間の渦発生の位相差

側面の境界条件	隣接する角柱間の位相差 [deg]				
	A-B	B-C	C-D	D-E	E-A'
周期	142.4	148.1	152.4	144.8	132.3
スリップ	176.0	174.5	176.7	179.5	

-5に隣接する角柱間の渦発生の位相差を示す。また、図-9に5本角柱まわりの流れの渦度分布図を示す。

奇数本である5本角柱の周期境界条件の場合は、隣接する角柱間での渦発生の位相差が完全に逆位相とならなかったのに対し、スリップ境界条件の場合は、1本角柱のスリップ境界条件のケースや4本角柱のケースと同様に逆位相となった。ここで、周期境界条件の場合の各隣接する角柱間の位相差の和を求めると、 720° になり、A-A'の間で渦発生の位相差がないことが確認できる。また、隣接する角柱間の渦発生の位相差が

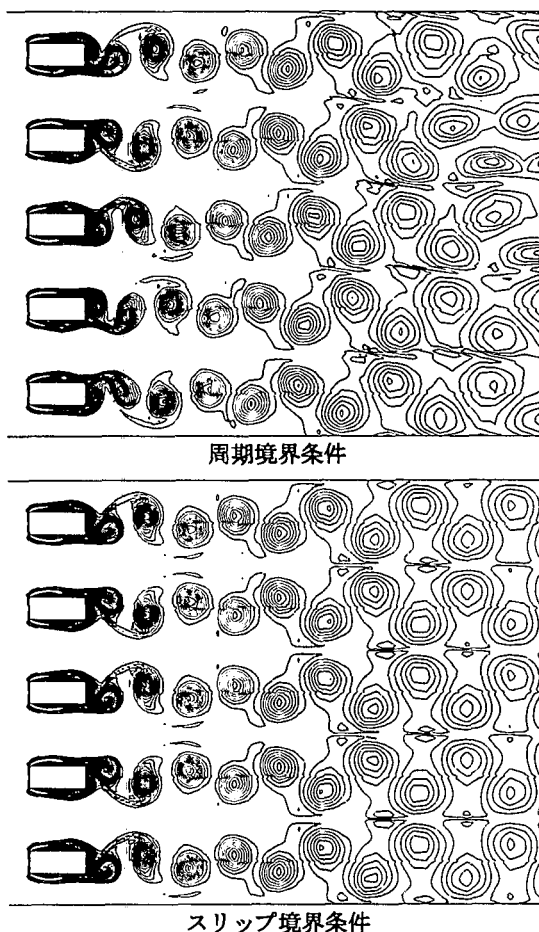


図-9 5本角柱まわりの流れの渦度分布図

全てが同じ位相であるとする、 144° となるはずであるが、渦発生の位相差には多少のばらつきが見られ、 $132.3 \sim 152.4^\circ$ の範囲となった。

本論の解析条件では、周期境界条件を取り扱った場合には、隣接する角柱間の渦発生の位相差が全てが同じ値となり、この場合の位相差は、 360° /本数の倍数になる。よって、本数が奇数である場合は、隣接する角柱間の位相差が全てが逆位相になり得ないことは明らかである。よって、周期境界条件を奇数本の多数角柱まわりに採用する場合には、隣接する角柱間の渦発生の位相差を考慮する必要がある。

5. おわりに

本論文では、解析領域内に複数の物体を配置した場合の境界条件とモデル化を検討するために並列に配置された多角柱列まわりの流れの数値流体解析を行った。風向 0° の場合に関して、以下のような結論を得ることができた。

1. 閉塞効果の増加に伴い、流体力、Strouhal数が増加することを示した。
2. 隣接する角柱間の渦発生の位相が完全に同位相または逆位相となることが想定できるならば、1本

角柱の解析領域の上下境界を周期境界条件またはスリップ境界条件で取り扱うことで、それぞれの渦発生の位相での解析が可能となることを明らかにした。

3. 1本角柱で多数本角柱をモデル化する場合には、角柱間の渦の発生が同位相になる上下境界にスリップ境界条件を扱った方が、4本、5本の場合の空気力にほぼ等しいことがわかった。これより、多角柱列まわりの流れは、角柱間の直角方向の流れの干渉より、閉塞効果の方が支配的であると考えられる。
4. 多数本角柱の上下境界を周期境界条件とした場合、隣接する角柱間の渦発生の位相差は、全てが同じ位相差になるとすると、 360° /本数の倍数になることを示した。ただし、奇数本数で周期境界条件を用いる場合には、解析領域の取り扱いに位相差を考慮して算定する必要がある。

謝辞： 本研究の一部は、文部省科学技術研究費・基盤研究(C)ならびに中央大学理工学研究所共同研究費の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 田村, 伊藤: 3次元流体解析による角柱に発生する種々の空力弾性挙動の再現と精度検討, 日本建築学会構造系論文集, No.497, pp.25-32, 1997.
- 2) 平野, 渡邊丸岡, 佐野: 断面辺長比4の矩形断面の空力特性に関する2次元・3次元数値流体解析, 土木学会論文集, Vol.598/I-44, pp.401-411, 1998.
- 3) 丸岡, 太田, 平野, 川原: 広範囲なReynolds数域での円柱まわりの2次元3次元数値流体解析, 土木学会論文集, Vol.591/I-43, pp.139-150, 1998.
- 4) 平野, 丸岡, 中久保: 近接する並列円柱の空力特性に関する数値流体解析, 日本風工学会誌, Vol.64, pp.19-27, 1995.
- 5) 枝元, 米田: 並列配置された正方形角柱まわりの有限要素流れ解析とその適用性に関する研究, 土木学会論文集, Vol.584/I-42, pp.287-294, 1998.
- 6) 木村, 山内, 藤野: 空力音発生に着目した平板列周りの数値流体解析, 日本風工学会誌, Vol.71, pp.203-204, 1997.
- 7) 比江島, 嶋田, 木村, 藤野, 野村: 平板列で構成される高欄に生じる空力音に関する実験的研究, 日本風工学会誌, Vol.55, pp.111-112, 1993.
- 8) 佐竹, 管, 義江: 軽量手すりの風騒音に関する検討, 前田建設工業技術研究所報, Vol.38, pp.125-131, 1997.
- 9) 丸岡, 太田, 平野, 川原: 同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.383-394, 1997.
- 10) Hayashi, M., et al.: Lagrangian finite element method for free surface Navier-Stokes flow using fractional step methods, *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol.13, pp.805-840, 1991.
- 11) Tezduyar, T.E., et al.: Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.95, pp.221-242, 1992.
- 12) 岡島: 種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ, 日本風工学会誌, No.17, pp.1-19, 1983.

(1999年4月23日受付)