

物体後方流れの数値シミュレーション

田 島 勲*・蘇 武 栄 治**

Numerical simulations of the flow.

Isao TAJIMA and Eiji SOBU

This paper describes the effect of spacing between two circular cylinders on flow around two-dimensional circular cylinders. We used a graphics work station for numerical simulations of the vortex wake of two circular cylinders of the same diameter in tandem arrangement.

We carefully observe the wake flow by means of high-speed video camera, whose framing rate is 500 per second. The wake flow patterns were compared between numerical and experimental results. The cylinder spacing parameter L/d is varied between 2.5 and 20. These showed good agreement, verifying the simulation results.

1. 緒 言

高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故の原因にも見られるように、流れ場におかれた物体の周りおよび後流に渦が発生すると、圧力変動によって物体が振動し、金属疲労で亀裂が入って、ついには、破損に至るということが問題になる。これは、事故後のGWSによる数値シミュレーションでも再現され確認されたことが報告されている。また古くから渦発生に起因するキャビテーション現象による振動・壊食⁽¹⁾も問題とされている。60 < Re < 5000では物体の上下から規則正しい渦が発生し千鳥状の配列となるカルマン渦列が発生し、この渦が物体から離れるたびに、物体には交互に正負の揚力が生じて、振動の原因となり、渦の発生周波数が物体の固有振動数と一致すると共振状態に陥るのである。流れの中に円管群がおかれる熱交換器では、流れの状態によって熱伝達が大きく影響を受け、また装置の大型化と流れの高速化にともない、管外流れの振動や騒音、管に加わる変動圧力などが問題となっている。このように、後流特性が物体に及ぼす影響は大きい。

円管群の中でも、最も基本的な配置形である平行な2円柱周りの流れは研究例が多く、2円柱の間隔も広範囲に変化させ、言及されている⁽²⁾⁽³⁾。また、渦形成に起因する因子についてもいくつか

明らかになっている。

一方近年、計算機の日覚ましい進歩（高速化、大容量、並びに多様化）によって、数値流体力学（CFD: Computational Fluid Dynamics）も大きく進歩した⁽⁴⁾。大型電子計算機で始められた計算もEWS, GWSにより手軽に利用可能となり、更にパーソナルコンピュータ利用の時代が見えて来た。流れの数値解析を行うことにより、流れの可視化を迅速かつ正確に処理し、短時間で流れの再現が可能となり、多くの2, 3次元流れに関する客観的・定量的な情報を比較的容易に得ることが可能になってきている。流れの様相を記録する方法としては高速度カメラのフィルムに長く頼っていたが、最近では高速度ビデオカメラで観察⁽¹⁾し画像解析するようになった。

本研究は流れ場の流体のレイノルズ数を一定にし、数値解析することで直列に並べられた物体周りの流れをシミュレーションし、フローパターンを分類すると共に、風洞実験による渦発生を観察・記録と照らし合わせ、2方面から流れの場におかれた物体周りの流れを明らかにしたものである。

2. 数 値 解 析

流れの数値シミュレーションはSilicon Graphics社のIndy R 4000 SC, ソフトはNK-EXA社の有限要素法による汎用非圧縮性流体解析システムMTFLOWTMを利用した。風洞実験には先に報

* 助教授 機械工学科

** 技 官 機械工学科

告⁽⁵⁾⁽⁶⁾した装置を使った。

MTFLOWTMでは、要素分割法にマルチブロック分割法を採用し、計算の高速化のために、四接点四角形要素に分割しており、さらに Element-by-Element 共役勾配法を採用し省メモリーがはかられている。また、流線、圧力分布、速度ベクトルなどの計算経過における変化を画面で目視することが出来る。また壁面境界条件として no-slip 条件を選ぶことが出来る。支配方程式は非定常 Navier-Stokes 方程式である

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{1}$$

と連続の式（非圧縮条件）

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2}$$

を考える。ただし、 u 、 v は x 方向、 y 方向の速度成分、 p は圧力、 t は時間、 ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数である。前もって流入壁面の影響を受けない円柱直径をあらかじめ計算し、その円柱を直列に2本並べ計算を行った。

経時変化を示す画面はホームビデオで記録し、必要な内容をビデオコピーによって出力させた。

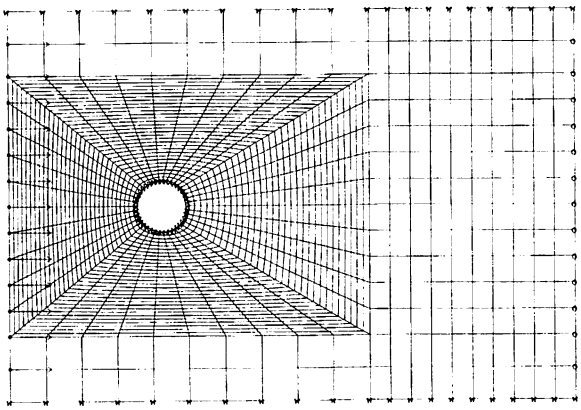


図1 単円柱要素分割例

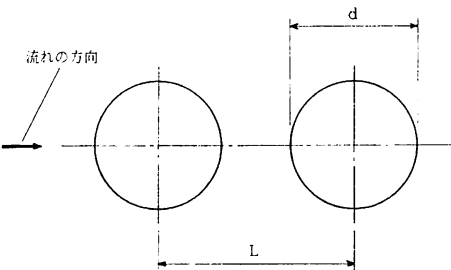


図2 直列配置型2円柱

図1は単円柱を計算したときの要素分割の一例を示した。なお計算時間は2円柱の場合、長いときで6時間程度であった。今回計算した2円柱間隔比について L/d を図2に示す。計算した際の円柱直径、接点数、要素数、計算ステップ数の上限を表1、また表2に2円柱の場合のそれぞれの値をまとめた。図3には直列配置型2円柱の計算の際に計算領域内を要素分割した代表的な例を示した。単円柱、直列配置型2円柱ともに $Re = 660$ であり、円柱直径10mm、流速1.0m/s、温度20℃の空気を流体とした場合の風洞実験とほぼ同じレイノルズ数である。

単円柱の場合の直径は1.5、2.0、3.0、4.0を選んだ。図4は風洞実験で得られた単円柱の後流の様相であり、図4(a)は円柱前方と後方にニクロム線を張ってスモークワイヤ法で可視化した流

表1 単円柱における計算要素

円柱直径	接点数	要素数
1.5	1184	1120
2.0	1434	1380
3.0	1184	1120
4.0	1184	1120

表2 2円柱における計算要素

L/d	接点数	要素数
2.5	2473	2365
3.0	2243	2140
3.5	2243	2140
4.0	1903	1820
4.5	2145	2048
5.0	2145	2048
5.5	2145	2048
6.0	1903	1820
6.5	2258	2180
8.0	1903	1820
10.0	2108	2020
13.0	2278	2170
15.0	2353	2240
17.0	2428	2310
19.0	2503	2380
21.0	2578	2450

れの模様であり、図 4 (b) は同じく円柱後方にニクロム線を張った場合である。いずれも 250fps で撮影した。なお数値シミュレーションでは円柱間隔比 L/d を 2.5～21.0 までの間で 16 種類選んだ。

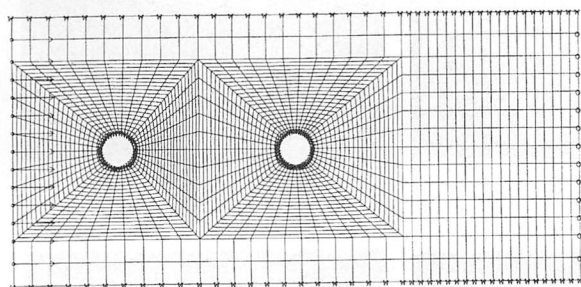
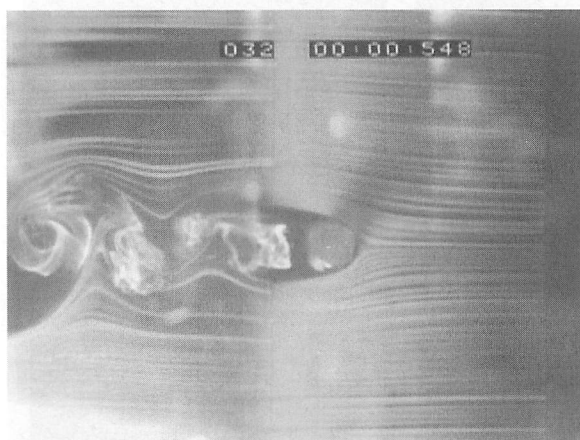
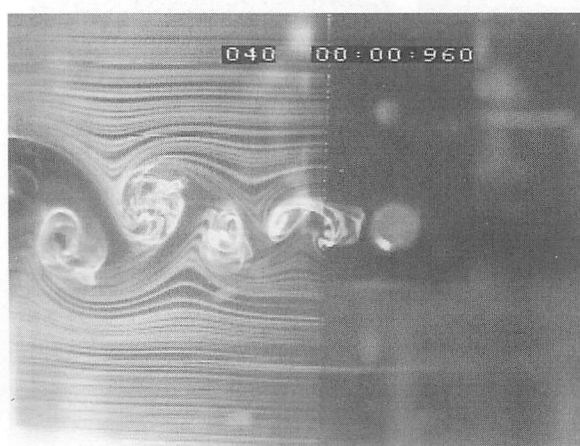


図 3 直列配置型 2 円柱要素分割例



(a) 熱線を円柱前、後方に設置



(b) 熱線を円柱後方に設置

図 4 単円柱周りの流れ

3. 計算結果および考察

流入境界壁面長さを 15 として計算した単円柱の場合の流線、圧力分布、速度を図 5 に示した。図 5 では直径の変化による後流渦の発生に違いは見られないが、直径 1.5 の時は流線、圧力分布を見ても渦が不完全に現われている。これは、円柱直径が小さいためばかりではなく円柱周りの要素分割数が少なかったためもある。直径が小さくなれば接点数、要素数を多くしなければ精度の高い計算は望めなくなり、逆に多くすれば計算時間が長くなる結果となる。よって直径 1.5 は検討の対象から除外した。直径 2.0, 3.0, 4.0 のときは、渦がきちんと発生している。このなかで一番壁面に影響が少ないのは、圧力分布の比較で図 5 (b) の円柱直径が 2.0 のときであり、直径が大きい場合壁面近くまで負圧が広がっていることから確認できる。圧力分布図において、青い部分が負圧で、緑が濃くなるにしたがって圧力は大きくなり、最大は赤の部分である。

分割数が少ない場合には、精度の高い結果が得られないのでどの程度の分割数にすればよいかは、得られた結果を実験の結果や文献と比較したりして判断しなければならない。

得られた結果がどの程度信頼できるものなのかを、考えてから計算を進めていくのが時間の有効利用につながると思われる。直列配置型 2 円柱において、文献⁽²⁾の実験結果は、曳航式水槽を使用し、円柱直径は 10, 20mm でレイノルズ数 40～120 の範囲である。可視化のトレーサーには、主として粒径 10～30 μm のアルミ粉末を用いている。今回の計算例はこのような水槽ではないが、2 次元流れを想定して計算した。

文献⁽²⁾では円柱間隔比による後流パターンの全般的变化を調べている。この結果として直列 2 円柱の後流パターンは、下記のように 3 通りに基本分類されている。

- ① 両円柱間に渦の巻き込みが見られず、2 円柱から単一物体的な渦流出が観察される状態 ($L/d \leq 4.0 \sim 5.0$)
- ② 両円柱間に上流円柱からの周期渦流出が定常的に観察され、下流円柱の背後でも上流からの波長・振幅・位相をほぼ継続する形で規則的な交互渦列が流出する状態 ($4.0 \sim 5.0 \leq L/d \leq 8.0 \sim 10.0$)
- ③ 上流円柱の後流内で下流円柱が独自の周期渦流出を開始し、下流渦列の縮退・打ち消しや融



(a) 円柱直径 1.5



(b) 円柱直径 2.0



(c) 円柱直径 3.0



(d) 円柱直径 4.0

図5 短円柱計算結果

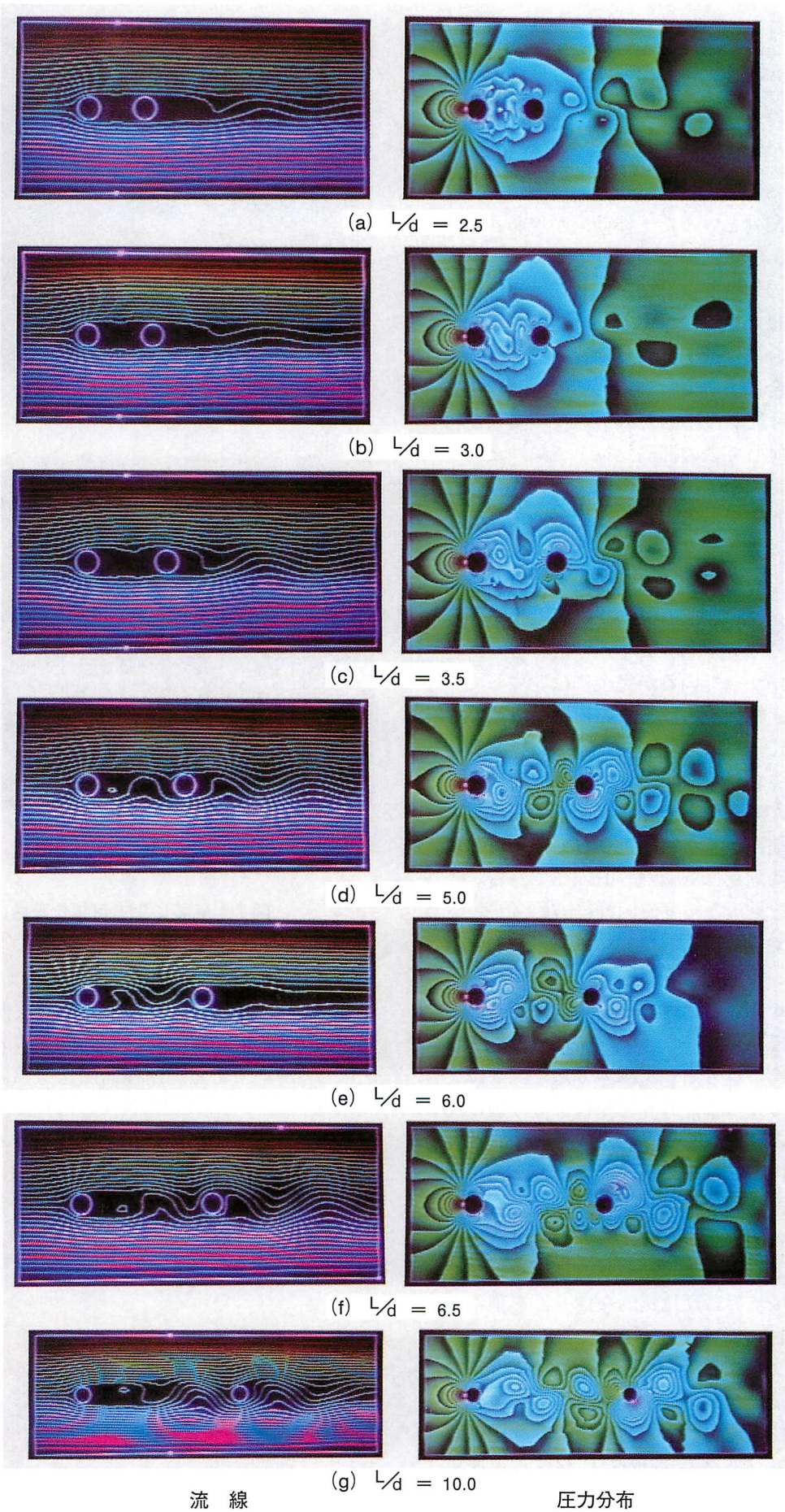


図 6 直列配置型 2 円柱計算結果

表 3 後流渦の領域境界

	領域①	領域②	領域③
計算結果	$L/d \leq 3.0$	$3.0 \leq L/d \leq 5.5$	$5.5 \leq L/d$
文 献 ⁽²⁾	$L/d \leq 4 \sim 5$	$4 \sim 5 \leq L/d \leq 8 \sim 10$	$8 \sim 10 \leq L/d$

合による再配列といった干渉効果が現われる状態 ($L/d \leq 8.0 \sim 10.0$)

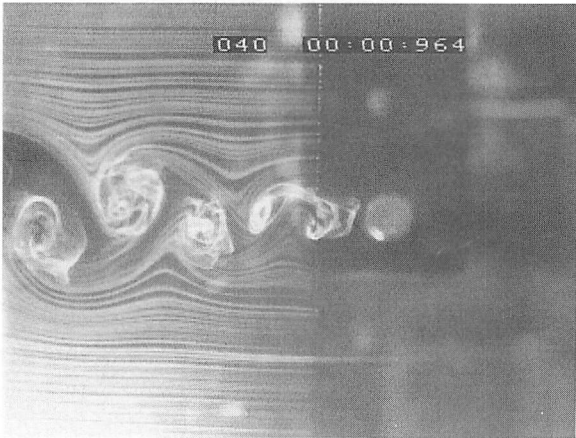
このうち③の領域では $L/d \geq 10 \sim 12$ 付近を境として干渉の模様がやや変化する。すなわちこの間隔比以下の場合には、下流円柱の背後で渦の縮退が著しく、場合によっては渦列形態の消滅の後、下流 $10 \sim 30d$ 付近から、拡大スケールの渦列が再配置するのに対してこの間隔比以上では、ビート状の融合渦列形成が下流円柱のほぼ直後から観察されるという相違である。ビート状渦列とは、わずかに振動数の違う 2 つの波が重なり合い周期的に振幅が大きくなる渦列のことである。

図 6 (a)～(g) を見て、3 つの領域に分類すると次のようになった。図 6 (a) (b) を見ると、円柱間に渦が出来かかっているが完全には発生していない。よって、領域①に該当する円柱間隔比は $L/d \leq 3.0$ である。

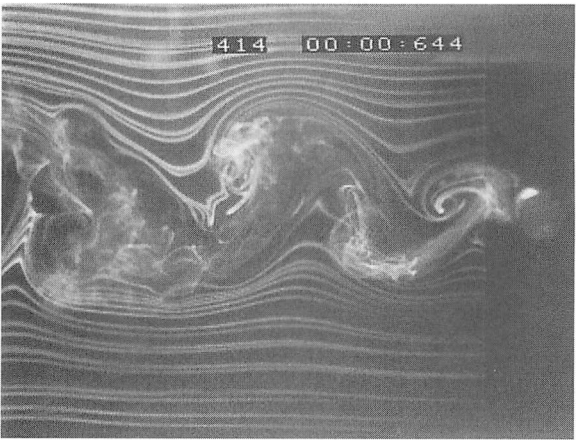
図 6 (c)～(e) を見ると、円柱間に上流円柱からの周期渦流出が確認できる。また、下流円柱後方に継続した周期渦が見られる。よって、領域②に該当する円柱間隔比は $3.0 \leq L/d \leq 5.5$ である。

図 6 (f) (g) を見ると、下流円柱後方に、ビート状渦列が確認できる。よって、領域③に該当する円柱間隔比は、 $L/d \leq 5.5$ である。ただし、領域③では $L/d \leq 6.0$ 付近で、下流円柱の背後で縮退が著しくなっている。

今回の計算による分類と文献の分類を表 3 にまとめた。表 3 を見ると、計算結果による分類は文献の流域境界より小さくなったが、それはレイノルズ数の違いによるものであると思われる。後流渦のパターン変化の模様をレイノルズ数と L/d で整理した文献の図から、領域①～③のパターンはいずれも L/d とレイノルズ数の双方に依存して変化し、その領域境界は反比例的な曲せんを描くことが分かる。図のレイノルズ数は、120 までなので今回の計算条件であるレイノルズ数 660 の時の領域境界は直接分らないが、レイノルズ数が大きくなると円柱間隔比が小さくなるという関係があるので、レイノルズ数 660 の際における領域境界は文献で述べられている円柱間隔比より小さくなったと考えられる。



(a) 単円柱



(b) $L/d = 4.0$ 下流側円柱

図 7 実験による可視化画像

図 7 (b) は風洞実験により撮影された円柱間隔比 4.0 の下流円柱後方の渦列の映像で、図 7 (a) は単円柱後方の渦列である。2 枚の映像の風速は 1 m/s である。円柱間隔比 4.0 に近い図 6 (c) を始めとする領域 2 に属する円柱間隔比の図を見ると、その特徴である上流円柱からの周期渦を下流円柱後方で継続している。図 7 (b) は、領域 2 に属しているのでその特徴を示すはずであり、単円柱を上流円柱と考えると、図 7 (a) (b) の渦列は多少のずれはあるがほぼ一致する。

4. ま と め

有限要素法を用いた数値解析によって流れのシミュレーションを行い次のような結果が得られた。

- 1) メッシュ図の作成方法、計算条件が適切であれば、実験の結果に対して画像処理を行ってい

る文献に較べて、短時間で同様の結果が得られることがわかった

- 2) 円柱間隔比の変化による直列配置型二円柱の後流パターンを文献と同じように三つの領域に分類することができ、各領域の渦列を可視化することができた
- 3) 直列配置型二円柱における風洞実験による可視化と数値解析による映像を比較した場合、同様の結果を得られることが分かった

参考文献

- 1) 祖山 均, 大場 光太郎, 武田 渉, 大場 利三郎 機械学会論文集 B 60-572 (1994), 1133
- 2) 近江 和生, 今市 憲作, 山本 富士夫 機械学会論文集 B 58-553 (1992), 2651
- 3) 坂田一郎, 木谷勝 機械学会論文集 B 49-447 (1983), 2618
- 4) 小林 敏雄 機械の研究 45-1 (1993), 80
- 5) 田島 勲, 蘇武 栄治 苫小牧高専紀要 NO30(1995), 7
- 6) 田島 勲, 蘇武 栄治 苫小牧高専紀要 NO31(1996), 19

(平成 8 年 11 月 29 日受理)

