# 振動円柱まわりの流れの三次元解析

Three-Dimensional Analysis of Flow Around an Oscillating Circular Cylinder

時田裕一, 横浜国大院, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5, <u>m00da051@ynu.ac.jp</u> 松本裕昭, 横浜国大, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5, 亀本喬司, 横浜国大, 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5, Yuichi Tokita, Yokohama National University, Tokiwadai79-5,Hodogaya,Yokohama,Kanagawa,Japan

Hiroaki Matsumoto, Yokohama National University, Tokiwadai79-5,Hodogaya,Yokohama,Kanagawa,Japan Kyoji Kamemoto, Yokohama National University, Tokiwadai79-5,Hodogaya,Yokohama,Kanagawak,Japan

In this study, three-dimensional and two-dimensional calculations were performed for the flow around an in-line forced oscillating circular cylinder at the Reynolds number Re=1000, at the amplitude ratio a/D=0.10, in the range of the non-dimensional frequency  $St_b=0.00\sim0.70$ . It was simulated that the asymmetric vortex and twin vortex were shed alternately from the circular cylinder and rapidly formed to Karman vortex in the wake at  $St_b=0.46$  for the three-dimensional calculation and at  $St_b=0.48$  for the tow-dimensional calculation, respectively, which were observed in the experimental results.

# 1.緒言

- 様流中に置かれた円柱の後流に形成されるカルマン渦 列の渦放出周波数に近い振動数で円柱を振動させると、放出 される渦の周期が円柱の振動に同期する Lock-in 現象が起こ る。Lock-in 現象についてはこれまで多くの実験や解析が行 われその特徴が明らかにされてきており、振動している物体 のまわりの流れは、静止時と比較して二次元性が強まるとい うことが知られている。レイノルズ数 Re=1000、の一様流中 で無次元振幅 a/D=0.14、で流れ方向に強制振動する円柱まわ りの流れの数値解析では、低振動数域では三次元性が強く、 振動数を上げ Lock-in 領域に入ると突然二次元的になり、 Lock-in 領域を外れる間際の無次元振動数 St<sub>b</sub>=0.48 では、き れいな双子渦放出になる解析結果が得られている。しかし、 交互渦から双子渦になる遷移過程の領域は詳しく解析され ていない。一方、円柱の振動振幅が a/D=0.10、レイノルズ数 Re≅1000とほぼ同様の条件にて行なわれた実験結果<sup>(1)</sup>からは、 Lock-in 領域内で後流の渦構造に多少の三次元性がみられた り、Lock-in 領域内の高振動数域では、時間によって交互渦 がみられたり、双子渦がみられたりする不安定領域の存在が 確認されている。この現象は物体の振動数や振幅に大きく依 存すると考えられている。そこで本研究では、Lock-in 高振 動数側の遷移領域に特に注目し、遷移領域において二次元お よび三次元数値解析を行い、実験結果と比較し、Lock-in 遷 移領域での渦放出形態の特性を明らかにすることを目的と している。解析手法として移動境界座標系を用いて、MAC 法に基づいて解析を行った。

# 2.数值計算

## 2.1 計算対象流れ場

流れ方向に強制的に振動する円柱まわりの流れについて 移動境界適合座標を用いて二次元および三次元解析を行な う。主流方向にx軸、主流に対して垂直方向にy軸、三次元 解析においては円柱のスパン方向にz軸をとる。計算には半 径 $R_o$ の型グリッドを使用し、周方向にx軸、半径方向にh軸をとる。三次元解析ではz軸方向の計算領域を  $-L/2 \le z \le L/2$ にとる。ここにLは計算領域の円柱の長さで ある。また、円柱は主流方向(x方向)に正弦的に振幅a、 振動数f で強制振動するものとし、円柱中心の変位dxを次 式で与える。

$$dx = a\sin(2p ft)$$
 (1)  
2.2 基礎方程式

支配方程式は、以下に示す非圧縮のナビエストークス方程 式および連続の式である。ただし、移動境界適合座標系を使 用するため、対流項に物体の移動速度の補正項を加えてある。

$$\nabla \boldsymbol{u} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \left\{ \left( \boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_{w} \right) \cdot \nabla \right\} \boldsymbol{u} = -\nabla P + \frac{1}{\operatorname{Re}} \nabla^{2} \cdot \boldsymbol{u}$$
(3)

ここに、u、P、 は、速度ベクトル、圧力、微分演算子を それぞれ表す。式(2)、(3)において円柱二次元断面(*x*-*y* 平面)を一般曲座標系( - 平面)に変換し、差分法を用 いて解析を行った。

# 2.3 離散化

離散化には対流項に対しては三次精度の風上差分(k-k ス キーム)、圧力項および粘性項には二次精度の中心差分、ま た時間発展には、二次精度の Adams-Bashforth 法をそれぞれ 用いた。また、圧力は MAC 法を適用し解析した。

## 2.4 境界条件

境界条件として、速度の境界条件は、流入部では一様流入、 流出部では自由流出、壁面上では non-slip とした。また、 圧力の境界条件は流入部では垂直方向の圧力変化を0、流出 部では基準圧として0を与えた。三次元解析では、スパン方 向は周期境界条件を課した。

## 2.5 計算条件

計算領域は二次元断面に関して半径方向に円柱直径の 20 倍とり、周方向に対しては 90 等分、半径方向に 120 分割し た。三次元解析では、スパン方向に円柱直径の 6 倍の領域を とり、55 等分した。なお、半径方向の分割は円柱表面から 8 番目までは、 $dr_{min}=1.95 \times 10^3$  で等間隔に分割し、9~15 番目 までは、20%ずつ間隔を増加させ、16 番目以降は、ポアソン 方程式を解くことによって、格子を分割した。計算を行う際 のパラメータは円柱の無次元振動数 St<sub>b</sub> とレイノルズ数およ び振動の無次元振幅 a/D で与える。本研究においては、振動 数の違いによる影響を調べるため St<sub>b</sub> のみをパラメータにと リ、レイノルズ数及び円柱の振幅は固定して計算を行った。 Table1 に示すように、レイノルズ数 Re=1000 とし、無次元 振幅については実験<sup>(1)</sup>を参考に、a/D=0.10 とした。円柱の無 次元振動数は、St<sub>b</sub>=0.0, 0.40, 0.46, 0.48, 0.50, 0.60, 0.70 の 7 ケースとした。St<sub>b</sub>=0.0, 0.40, 0.46 については二次元および三次元計算を行ない、St<sub>b</sub>=0.48, 0.50, 0.60, 0.70 については二次元計算を行なった。

	条件	
タイムステップ	5 × 10 <sup>-4</sup>	
振幅 a/D	0.10	
レイノルズ数	1000	
初期流速	u =U , v=w=0	
初期圧力	p =0	

Table1Calculation condition (1)

#### 3.解析結果

3.1 静止円柱の解析結果

計算が正しく行われているかを確認するために、まず静止 円柱まわりの流れを解析した。Table3 に本解析により得られ た静止円柱に対する平均抗力係数、ストロハル数の値および 実験値<sup>(2)(3)</sup>を示す。三次元解析のストロハル数および平均抗 力は実験値を良好に再現している。また、スパン方向の渦度 が拡散されないために二次元解析は三次元解析よりストロ ハル数および平均抗力は高めに出る事が知られており、本解 析においても二次元解析が三次元解析および実験値より高 い値をとっており、その傾向があらわれている。

	2D	ЗD	Experiment
平均抗力係数 C <sub>D</sub>	1.438	1.042	1.0 <sup>(2)(3)</sup>
ストローハル数 St	0.24	0.20	0.18~0.21 <sup>(2)(3)</sup>

 Table3
 Analysis in the case of stationary circular cylinder

# 3.2 振動円柱の解析結果

3.2.1 円柱に作用する流体力の波形

二次元および三次元解析によって得られた円柱に作用す る流体力の抗力係数  $C_D$ および揚力係数  $C_L$ の変動波形と、揚 力変動の FFT 解析によるスペクトルをそれぞれ Fig1 ~ Fig6 に示す。ただし三次元解析による流体力はスパン方向の平均 値として示した。また FFT 解析に用いた揚力変動波形は、無 次元時刻 100 ~ 200 である。なお、渦の発生周波数  $St_v$ は揚力 変動と相関が高いと考えられるので揚力の卓越周波数を  $St_v$ とした。

Fig1 に示すように St<sub>b</sub>=0.40 では二次元解析と三次元解析で ほぼ同様の変動特性となっており、 $C_D$ 、 $C_L$ ともにほぼ一定 の振幅で強い規則性を持って変動し、 $C_L$ の最大値および最小 値近傍で波の先端が欠けたような形をしていることがわか る。これは Lock-in 領域内で特徴的である、同一回転方向の 渦が円柱の同一側から時間的に引き続いて2個づつはき出 されるという現象によるものであると思われる。片方の渦は もう片方の渦に巻き込まれて減衰していくため、大きな波形 として現れるような強さはなく、わずかに波の先を欠くとい う形で表れていると考えられる。FFT 解析より二次元、三次 元解析とも St<sub>v</sub>=0.20 となり、揚力変動が円柱振動数の2分 の1に同期していることがわかる。

Fig2 に示すように St<sub>b</sub>=0.46 では、二次元解析と三次元解析 で全く異なる波形を示していることがわかる。二次元計算で は St<sub>b</sub>=0.40 と同様に規則的な波形をしているのに対し、三次 元計算では C<sub>D</sub> は振幅の振れ幅の大きさはほぼ一定である が周期的なうなりを生じ、C<sub>L</sub>は規則的な周期が崩れ、振幅も 一定値を取らず変動していることがわかる。後で流れの様相 の項で述べるが、この違いは渦放出形態にはっきりと表れて いる。二次元計算では交互渦のみの放出となっているが、三 次元計算の場合、交互渦と双子渦の二つの渦放出形態を示し ている。C<sub>D</sub>、C<sub>L</sub>の変動にうなりや変動に不規則性が生じる のは、交互渦から双子渦に変化する過程での渦の不安定性に 起因していると思われる。なお、Fig2(c),(d)に示すように、 FFT 解析よりC<sub>L</sub>の卓越周波数は二次元解析でSt<sub>v</sub>=0.23、三次 元解析でSt<sub>v</sub>=0.22 となり、ほぼ円柱振動数の2分の1に同期 していることがわかる。

Fig3(a)に示すように St<sub>b</sub>=0.48の二次元解析では、三次元解 析の St<sub>b</sub>=0.46の波形と同じように C<sub>L</sub>の周期、振幅が一定で ないことがわかる。後で流れの様相の項で述べるが、このと きの渦放出形態も、三次元解析と同様に交互渦と双子渦の二 つの様相を示している。また、Fig3(b)より FFT 解析による C<sub>L</sub>のピークは 0.21 でこれは二次元解析におけるストロハル 数に近い値であり、円柱の振動数の 2分の 1 とはなっていな い。従って、渦放出周波数は円柱の振動数に同期していない と考えられる。しかし円柱の振動数は二次元解析のストロハ ル数 St=0.24 のちょうど 2 倍であることを考慮すると St<sub>b</sub>=0.48 は Lock- in から非 Lock- in 領域への遷移域であると 予想される。

次に Fig4(a)に示すように St<sub>b</sub>=0.50 の二次元解析における 抗力・揚力係数の波形は、 $C_D$  はほぼ規則的に振動している が、 $C_L$ に関しては周期、振幅ともに一定ではないことがわか る。Fig4(b)に示すように  $C_L$ の卓越周波数は St=0.21 で三次元 解析のストロハル数に近い値となっているが、まだいくつか ピークが存在している。

Fig5(a),Fig6(a)に示すように St<sub>b</sub>=0.60、0.70 の二次元解析に おける抗力・揚力係数の波形については、振動数が大きくな るにつれ C<sub>D</sub>の振幅は大きくなっていき、C<sub>D</sub> はいずれもほぼ 規則的に変動している。C<sub>L</sub>に関しては St<sub>b</sub>=0.60、0.70 のいず れも、ほぼ規則的に変動している。Fig5(b),Fig6(b)で示す ように FFT 解析による揚力の卓越周波数は St<sub>b</sub>=0.60 で 0.20、 St<sub>b</sub>=0.60 で 0.21 となっており円柱の振動数には依存していな いことがわかる。この値は三次元解析によって算出されたス トロハル数 St=0.20 と近い値となっている。



Copyright © 2000 by JSCFD



Fig1: Time histories of drag and lift coefficient and power spectrum of lift coefficient. (St<sub>b</sub>=0.40)





Fig2: Time histories of drag and lift coefficient and power spectrum of lift coefficient. ( $St_b=0.46$ )





Fig3: Time histories of drag and lift coefficient and power spectrum of lift coefficient.  $(St_b=0.48)$ 



(b) St=0.50 (2D)

Fig4: Time histories of drag and lift coefficient and power spectrum of lift coefficient. ( $St_b=0.50$ )



Fig5: Time histories of drag and lift coefficient and power spectrum of lift coefficient. (St<sub>b</sub>=0.60)



Fig6: Time histories of drag and lift coefficient and power spectrum of lift coefficient. (St<sub>b</sub>=0.70)

## 3.2.2 流れの様相

Fig7~Fig9 に二次元解析による流れ場の渦度分布、三次元 解析による円柱中心付近断面でのz軸まわりの渦度分布およびz軸まわりの渦度の等数値面図を示す。

まず、Fig7 に示すように St<sub>b</sub>=0.40 については二次元および 三次元解析いずれにおいても円柱の直後では、交互渦を放出 し流れ場全体では、後方になるにつれ、異なる回転方向の渦 が間隔を狭めた形で放出されているのが確認できる。 Fig1(c),(d) より渦の発生周波数は二次元、三次元計算いずれ においても St<sub>v</sub>=0.2 となっていることがわかり、円柱振動数 の2分の1に同期していることがわかる。同じ図で、揚力・ 抗力の波形が安定していることから、前述の渦を規則的に放 出していると考えられる。三次元解析については Fig3(c)からわかるように流れは強い二次元性を示しており、同期領域内の流れの特徴をよく表している。





(c) St<sub>b</sub>=0.40 <sub>Z</sub>=2.0 Time=200 (3D-cal) Fig7: Instantaneous vorticity contour

次に Fig8(a)~(d)で示すように、Stb=0.46 では、二次元解析 では交互渦のみの放出に対し、三次元解析では時間によって 形の異なる渦放出形態をとっていることがわかる。 Fig8(b),(c)に示す無次元時刻 T= 85, 125 の z 軸まわりの渦度 線図より T=85 では円柱直後で双子渦に近い形で渦が放出さ れ、すぐにカルマン渦的な交互渦配列に変化しているのに対 し、T=125では円柱からは交互渦のみが放出されていること がわかる。すなわち、交互渦と双子渦の二つの渦放出形態が 存在していることがわかる。Fig2(b)の CL の時間履歴と比べ てみてみると、T=85の時はCLの振幅が小さくなっているの に対し、T= 125の時はCLの振幅が最大値に近い値となって いることがわかる。従って、Stb=0.46の振動数ではCLの振幅 が大きい時は交互渦、0に近い時は双子渦に近い渦放出とな りこれを繰り返していると思われる。なお、Fig9 に示すよ うに二次元解析のStb=0.48においても同様に交互渦と双子渦 つの渦放出形態の存在が確認できた。本研究の三次元解析 の St<sub>b</sub>=0.46、および二次元解析の St<sub>b</sub>=0.48 は、交互渦放出か ら双子渦放出へ変化する遷移域であると考えられる。Fig8(d) の×軸まわりの渦度 、=0.02の等数値面図から Stb=0.46の 三次元解析において若干の三次元性が見られたが、これは流 れが交互渦になったり双子渦になったりする際の不安定性 に関係があると思われる。

比較の為、Fig6 にほぼ同様の条件における可視化実験<sup>(1)</sup> 結果の図を示すが、この実験結果の図からも双子渦に近い形













 $\begin{array}{ccc} Re{=}939 \quad a/D{=}0.10 \quad f/f_k{=}2.2 \\ Fig10: \ experimental \end{array}$ 



St<sub>b</sub>=0.50 についても、Fig11 に示すように交互渦に近い形と 双子渦に近い形の渦を放出しているのが確認できる。また、 Fig4(a)の揚力変動の振幅と周期が一定ではなことから、まだ 不安定性が残っていると考えられる。

St<sub>b</sub>=0.60、0.70 における渦放出の特徴は Fig12, 13 に示すように、いずれのケースも交互渦に近い形で放出されていることがわかる。また Fig5(a), Fig6(a)で示したように揚力変動がほぼ規則的であることから交互渦放出を繰り返していると考えられる。Fig5(b),Fig6(b)の C<sub>L</sub>の FFT 解析結果から St<sub>b</sub> = 0.60、0.70 においてはそれぞれ、St<sub>v</sub>=0.20, 0.21 で規則的に渦を放出していると考えられ、不安定領域は外れたと思われる。





(b) St<sub>b</sub>=0.70 Time=200 (2D-cal) Fig13: Instantaneous vorticity contour

#### 3.3 同期領域

Fig14 に横軸に物体の振動数 St<sub>b</sub>、縦軸に物体の振動数をその振動数における円柱からの渦発生周波数 St<sub>v</sub>で割り比をとったグラフを示す。ここで St<sub>v</sub> は C<sub>L</sub>を周波数解析し、その卓越周波数から算出したものである。グラフが比例している領域は物体の振動数に渦の発生周波数が依存しない非 lock-in 領域であることを表し、一定の値をとっている領域は物体の振動に渦の発生が同期する lock-in 領域であることを表す。

で示されているのは Tanida<sup>(4)</sup>らの Re=4000.0, a/D=0.14 の 実験結果で、 は本研究における 3 次元解析結果を、 は 2 次元解析結果を示している。Tanida<sup>(4)</sup>らの実験と本研究とは レイノルズ数、円柱振動振幅とも異なるが、参考として比較 した。

本研究の二次元計算における  $St_b=0.40, 0.46$ 、三次元計算に おける  $St_b=0.40$  いずれにおいても、渦の発生周波数は円柱の 振動数の 1/2 となっており、円柱振動に同期していると考え られる。また、二次元計算の  $St_b=0.48$ 、三次元計算の  $St_b=0.46$  においてはわずかに Lock-in 領域を外れていることがわかる。 この時、渦放出形態に交互渦と双子渦の二つの様相がみられ る不安定な領域であると考えられる。Stb=0.50,0.60,0.70の条 件の下では、円柱からの渦発生周波数は円柱の振動数にかか わらずほぼ一定値をとっていることがわかる。しかもその値 はすべて三次元解析におけるストロハル数 St=0.20 に近い値 となっている。Stb=0.50,においてわずかに渦放出形態に不安 定性はみられるが、同期現象は生じていないと考えられる。



Fig14 Lock-in region Re=1000 (present Cal) Re=4000(Tanida)

### 3.3 変動揚力係数·平均抗力係数

Fig16 に変動揚力係数、Fig17 に平均抗力係数を示す。レ イノルズ数、円柱振動振幅の条件は異なるが,参考までに Tanida<sup>(4)</sup>の実験と比較した。横軸は物体の無次元振動数、 縦軸はそれぞれ変動揚力係数および平均抗力係数となって いる。また、変動揚力係数および平均抗力係数を求める際、 用いたサンプル時間はいずれの場合も無次元時刻 100~200 とした。

ー般に Lock-in 領域では揚力や抗力が増大することが知ら れている。Fig15,16より変動揚力係数、平均抗力係数いずれ も定性的にはそのような傾向をとらえている。しかし、全体 的実験値よりも大きな値をとり、なめらかに減少していって いる。これは実験との円柱振幅の違いによる影響だと思われ る。変動揚力係数の実験値は St<sub>b</sub>=0.48 付近で急激に値が減少 しているが、これはこの付近で渦の放出形態が双子渦になる ためで、本研究においては振動振幅が小さいため二次元およ び三次元解析いずれにおいてもきれいな双子渦放出とはな らず、揚力係数の急激な減少は見られなかった。



Fig15: Rms value of lift coefficient Re=1000 (present cal.) Re=4000(Tanida)



Fig 16: Mean value of drag coefficient Re=1000 (present cal.) Re=4000(Tanida)

#### 4. 結論

移動境界適合座標を用いて、流れ方向に強制振動する円柱 まわりの流れの二次元および三次元解析を Re=1000, 無次元 振幅 a/D=0.10, 無次元振動数 St<sub>b</sub>=0.0~0.70 の範囲で行ない、 円柱に作用する流体力の波形、流れの様相について考察した。

Lock-in 領域内の St<sub>b</sub>=0.40 では二次現元性の強いカルマン 渦状の交互渦放出を確認できた。

Lock-in から Lock-in 領域を外れる不安定領域では双子渦 と交互渦の放出形態が混在する遷移領域が存在することが わかった。これはほぼ同条件の可視化実験<sup>(1)</sup>の結果と良好な 一致を示した。遷移領域は、二次元、三次元解析で捕らえる ことができたことから、遷移域の存在は、流れの三次元性に は大きく依存することはなく、円柱の振動数に影響されると 思われる。一方遷移域の始まりは三次元解析では $St_b=0.46$ , 二次元解析では $St_b=0.48$ と三次元解析の方が小さい振動数 となっている。これは、円柱の振幅が小さいため流れにわず かな三次元性が存在することによると思われる。

高振動数側のLock-in領域を外れた領域での円柱からの渦の放出周波数は三次元解析におけるストロハル数に近い値となった。

## 参考文献

- (1) 正能秀昭、"In-Line 強制振動円柱の渦放出形態に関する 研究"、横浜国大院修士論文(1999)
- (2) 豊倉・亀本、流体力学、(1976)、実教出版
- (3) Cantwell, B., Coles, D., J. Fluid Mech., 136(1983), 321
- (4) Tanida,Y., Okajima,A., Watanabe,Y., J.Fluid Mech., vol61, part4 (1973), 769