

## II-285

### 渦点法による非線形波動場の円柱まわりの流れのシミュレーション

東京大学工学部 正会員 小林智尚  
 東京大学工学部 正会員 磯部雅彦  
 東京大学工学部 正会員 渡辺 晃

#### はじめに

波動場中の構造物に作用する流体力はその構造物がつくり出す渦の挙動に深く関係している。本研究では、円柱の中心軸に垂直な面内において渦点法による数値シミュレーションを用いた2次元解析を行い、波動場における円柱まわりの渦の振舞い、とくに主流となる波動場の非線形性の強さとの関係について調べた。

#### 計算方法

数値シミュレーションには一定の渦半径をもたせた2次元渦点モデルを用いた。円柱表面での法線方向の境界条件を満足するために、一般には円柱表面に関する渦点の鏡像を用いるが、任意断面物体へのモデルの適用などの拡張性を考え、ここでは円柱表面に配置した束縛渦を用いることにした。そして、円柱表面でのNon-slip条件を満たすように各時間ステップごとに円柱表面ごく近傍に新たな渦を発生させた。主流の振動流には正弦波・Stokes波(Ursell数25)・Cnoid波(Ursell数100)の3種類の波の底面上流速を用い、同一のK.C.数(3.1, 6.3, 12.6の3種)のもとに比較を行った。渦点法を波動場に適用する場合、渦の減衰を考慮しない限り、一方向流がないため計算領域内では円柱表面で生成された渦度が増加し続ける、という問題が生ずる。そこで本モデルには指数関数的に循環が減衰する渦点モデルを導入した。減衰係数は、本計算に先立ち行った一様流中の円柱後方のカルマン渦のシミュレーション結果から適切な値を選定した。なお主流として底面上の流速を用いたためにStokes波動場とCnoid波動場では質量輸送が存在する。これを打ち消すよう一様流を重ね合わせたケースについても計算を行ったが、質量輸送の有無による渦運動の有意な差は見られなかった。

以下の渦度分布の図中において、位相 $\theta$ は波峰通過時を0としており、渦度は反時計まわりを正とした。時間と長さの次元はそれぞれ波動場の周期・円柱直径で無次元化した。

#### 計算結果および考察

K.C.数3.1の場合の計算結果を図-1に示す。正弦波動場では主流の減速期においてそれまで円柱周辺に存在していた渦とは逆向きの新たな渦が円柱表面上に発生し、古い渦の剝離を促している。この剝離の様子は他のケースでも同じであった。

Stokes波動場では正弦波動場と比較して剝離する渦はやや弱く、Cnoid波動場においては円柱近傍の渦は剝離と同時に円柱表面で発生した逆向きの渦と合体、消滅している。これは主流の非線形性が強くなるにしたがって、主流が岸向きの位相で生じる渦は短時間に集

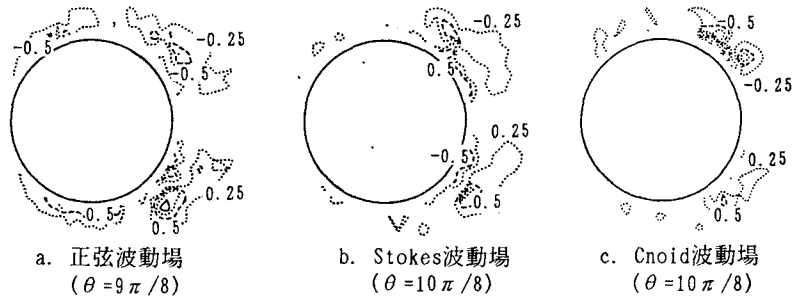


図-1 K.C.数3.1のケースの渦度分布

Stokes波動場では正弦波動場と比較して剝離する渦はやや弱く、Cnoid波動場においては円柱近傍の渦は剝離と同時に円柱表面で発生した逆向きの渦と合体、消滅している。これは主流の非線形性が強くなるにしたがって、主流が岸向きの位相で生じる渦は短時間に集

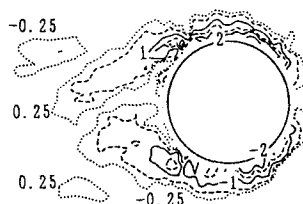


図-2 K.C.数6.3の正弦波動場の渦度分布 ( $\theta = 9\pi/8$ )

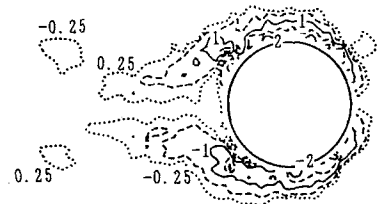


図-3 K.C.数6.3のStokes波動場の渦度分布 ( $\theta = 9\pi/8$ )

中して発生するようになり、引き続いて剝離する渦と短時間に合体するためである。

K.C. 数6.3の場合の結果を図-2～4に示す。正弦波動場(図-2)ではやや対称性が崩れた1対の剝離渦が放出され、さらにその外側に非常に弱い渦がみられる。この渦はちょうど1周期前に円柱表面で発生し、半周期前には円柱の反対側(岸側)で剝離渦を形成していたが、主流が冲向きに反転したのちに減衰しながら円柱側面を通過し沖側に移流したものである。同様の放出渦がStokes波動場(図-3)においても見られた。Stokes波動場でのこの渦は波峰通過時の主流の最大流速時に生成されたもので正弦波動場での渦と比較して強く、図の位相においても渦対を形成し互いの誘導速度により円柱から遠ざかって行く。Cnoid波動場(図-4)においては図-5の剝離点移動図にも見られるように、主流の岸向き流速最大時( $\theta=0$ )にはその渦度分布は対称性がほぼ保たれているが、冲向き流れの時には対称性が崩れている( $\theta=11\pi/8$ )。これは、主流が岸向きの時にはその主流の継続時間が短いために円柱より離れることができず円柱の存在により渦運動がある程度拘束されて対称形を保っているのに対し、逆に主流が冲向き流れの時には主流の継続時間が長く放出された渦の配列に不安定が生じ易くなるためと考えられる。

K.C. 数12.6の場合の結果を図-6に示す。正弦波動場・Stokes波動場・Cnoid波動場ともに対称性が崩れ、その渦度分布パターンにも周期性がなくなる。しかし、特にこの周期性の消失は正弦波動場でみられ、Stokes波動場ではあまり顕著ではなかった。これは、K.C. 数6.3のCnoid波動場のケースと同様、波峰通過時に剝離した渦が固体境界の円柱の拘束を受けその配列の対称性を保とうとする効果が表われたものと考えられる。ただし、Cnoid波動場のケースでは主流の冲向き流れ時にかなり非対称性が進んだため、この効果はStokes波動場のケースほどには現われなかった。

#### おわりに

渦点法を用いて、波動場円柱まわりの流れのシミュレーションを行った。その結果、波動場の非線形性が強くなるにしたがって、岸向き流れと冲向き流れの差が大きくなり、冲向き流れ時に放出された渦の配列は非対称になりやすく、逆に岸向き流れ時に放出された渦は対称な配列を保とうとすることが確認された。これは、渦配列に深く関係している流体力、特に揚力を見積る上で考慮しなければならない現象である。

今回は比較的不安定を示しやすい流体モデル、渦点法を用いて解析を行ったが、その計算結果として従来の可視化実験で見られる渦の様子とはほぼ同じものが得られた。この解析方法がK.C. 数の大きなケースや主流の非線形性が大きなケースなどにどこまで適用できるかは今後の課題である。

#### 参考文献

1) 沢本・他: 第26回海講, pp. 429-443, 2) 岩垣・他: 第22回海講, pp. 531-537

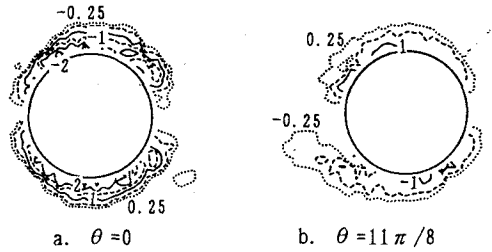


図-4 K.C. 数6.3の正弦波動場の渦度分布

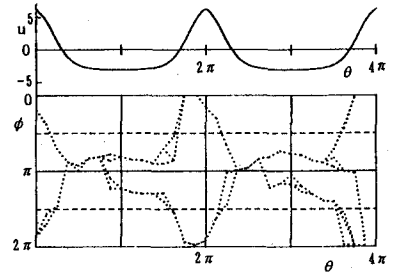
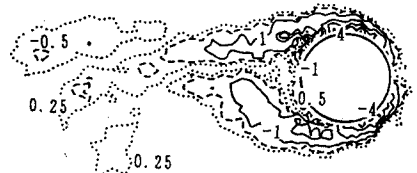


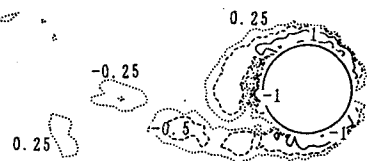
図-5 K.C. 数6.3・Cnoid波動場での剝離点の変動(角度φは円柱沖側を0とし反時計まわりを正)



a. 正弦波動場 ( $\theta=3\pi/8$ )



b. Stokes波動場 ( $\theta=5\pi/8$ )



c. Cnoid波動場 ( $\theta=4\pi/8$ )

図-6 K.C. 数12.6のケースの渦度分布