

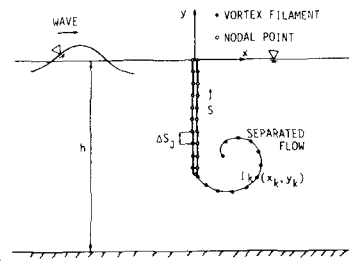
カーテン防波堤まわりのはく離流れに関する数値シミュレーション

愛媛大学工学部 正員 中村孝幸
愛媛大学大学院 学生員 久保達郎

1. まえがき：カーテン防波堤の下端部付近には、大規模な後流渦の形成が見られることやこの渦の形成現象がカーテン堤による消波効果に密接に関連していることなどが知られている¹⁾。しかしながら、従来においては渦の形成現象が波の変形を伴う複雑な流体場中で生じていることから、その理論的な解明はほとんど行われていない。本研究は、物体表面上に形成される境界層すなわち渦層を表現するのに最適であることが知られている表面渦度分布法と離散的な渦糸モデルに基づき、波動場中の鋭角部を有する物体まわりの流れの解析法について明らかにする。そしてこの解析法の妥当性を検証するため、カーテン防波堤下端部よりのはく離流れに関する算定を行ない、模型実験による流況の観測結果と比較したものである。

2. はく離を伴う物体まわりの流れの解析法：(1) 解析モデルおよび

仮定：(i) 解析モデル：図-1に示すように一定水深 h の波動場にかつ水深 d の有厚さのカーテン堤が固定されているものとする。そしてカーテン堤の下端部より波動運動に伴ないはく離流れが生じる場合を考える。(ii) 仮定：(a) はく離流れすなわちせん断層は、離散的な渦糸モデルにより近似できる。(b) 発生した渦糸は、減衰しないものとする。(c) はく離流れの出



現により波は変形を受けず、流況場ははく離流れと波動運動の両者によるもの線形重ね合せで与えられる。(d) はく離流れを複数渦糸で近似するに当り、自由表面は固定境界条件で近似できるものとする。(2) はく離流れを近似するための複数渦糸による流れ関数：複数渦糸による物体まわりの流れ関数は、物体がないときの渦糸による流れ関数 ψ_a と物体が置かれた場合にこの物体の境界条件を満足するように ψ_a に付加すべき流れ関数 ψ_R との線形和により求めることができる。流体中の任意点 (x, y) の ψ_a は仮定(a)の境界条件を満足するように、Schwarz-Christoffel変換を用いて式(1)で与えられる。

$$\psi_a(x, y) = \sum_{k=1}^K \Gamma_k \cdot F(x, y; x_k, y_k) \quad (1)$$

$$\text{ここに、} F(x, y, x_k, y_k) = -\frac{1}{4\pi} \left[\log \{ \cosh C(x - x_k) - \cos C(y - y_k) \} - \log \{ \cosh C(x - x_k) + \cos C(y - y_k) \} \right] \quad (2)$$

である。また $C = \pi/h$ 、 (x_k, y_k) は k 番目の渦糸の座標、 Γ_k は渦糸の循環である。一方、上記 ψ_R は、表面渦度分布法により図-1に示す流況場のGreen関数 G_R を用いて、式(3)のよつに表される。

$$\psi_R(x, y) = \int_S f(x, y) \cdot G_R(x, y, x, y) ds \quad (3)$$

ここに f は、渦層の強さの分布関数である。また G_R の表示式は、式(2)の F において (x_k, y_k) を物体表面上の座標 (x, y) で置換したもので与えられる。なお、式(3)中の未知関数 f は、Lewis²⁾により示されているように、 ψ_a と ψ_R による物体表面上の接線方向速度が0になるという条件を用いて決定される。

(3) 渦糸の運動方程式：K個の渦糸群の中の j 番目の渦糸に着目して、その運動方程式を導くと式(4)のよつである。

$$\frac{dx_j}{dt} = \frac{d(\psi_a + \psi_R)}{dy} \bigg|_{x=x_j, y=y_j} + u_w, \quad \frac{dy_j}{dt} = -\frac{d(\psi_a + \psi_R)}{dx} \bigg|_{x=x_j, y=y_j} + v_w \quad (j=1, K) \quad (4)$$

ここに u_w, v_w は、おのおの波動運動による (x_j, y_j) への誘起速度で、著者らの中の1人が明らかに

している Green 関数法に基づく解析法⁽²⁾により求められる。(4)はく離流れの算定法:はく離流れは、各時間ステップにおいて、式(4)の2K個の微分方程式を解くことにより求められる。この際、渦糸の初期位置および循環量が問題となる。本研究では、渦糸の初期位置として、堤体下端部より境界層厚さ δ_B だけ鉛直下方に離れた点を採用し、その循環量として、発生位置に誘起される流速 U_s を用いて、 $\Gamma = U_s \Delta t / 2$ で与えられる量を用いた。なお、 Δt には、はく離点において Kutta 条件が満足されるように選定した値を用いた。

3. 渦パターン⁽¹⁾の算定結果と

実験結果との比較:本研究で算定

結果との比較に用いた実験結果は、中村ら⁽¹⁾によるカーテン防波堤の模型堤体を用いた水理実験によるもので算定の対象にした実験条件は、静水深 $h=7.8$

cm, 堤体のさき水 $d=27.5$ cm のものである。(はく離流れを含む渦パターン⁽¹⁾の観測結果と算定結果との比較に関する1例を示すのが写真-1と図-2である。この場合波条件は、周期

$T=1.93$ sec, 波高 $H=5$ cm 程度のものである。なお、これらの(2)~(c)は、たがいに対応する時間位相の結果を示すもので、算定結果については、初期条件の影響が小さいと思われるほぼ1周期から1.5

周期の間⁽¹⁾の流れの時間変化について示してある。また、写真中 写真-1 流れの実験結果($T=1.93$ sec, $H=5$ cm)

の正方メッシュは5 cmで、図中の+印は正の循環をもつ渦糸と、△印は負のそれを示す。これら実験結果と算定結果の比較から、反射波側に形成される渦は、両者ともに堤体下端部より水平方向に10 cm程度離れたところに形成されており、その形もよく似ている。また透過波側に現れる渦は、写真からわかるように、はく離流れが下方に向かい、堤体の鉛直下方のところに形成されるという特性がみられ、これについても本算定結果は、よく類似した渦パターンになっていることが認められる。本研究では、他の波条件の場合についても、上記と同様の比較を行っている。その結果、渦パターンの観測結果と算定結果とは、時間履歴の新しい渦については、ほぼ一致していたことを確認しており、ここに付記しておく。一方、本算定法においては、発生した渦の減衰が考慮されていないため履歴の古い渦がそのまま残存しており、実験結果にみられるような前の周期に発生した渦の早期消散が再現されていない。この渦の減衰については、消散機構を分けて今後に続く研究課題としてい

ておく。また、写真中 写真-2 流れの算定結果($T=1.93$ sec, $H=5$ cm)

の正方メッシュは5 cmで、図中の+印は正の循環をもつ渦糸と、△印は負のそれを示す。これら実験結果と算定結果の比較から、反射波側に形成される渦は、両者ともに堤体下端部より水平方向に10 cm程度離れたところに形成されており、その形もよく似ている。また透過波側に現れる渦は、写真からわかるように、はく離流れが下方に向かい、堤体の鉛直下方のところに形成されるという特性がみられ、これについても本算定結果は、よく類似した渦パターンになっていることが認められる。本研究では、他の波条件の場合についても、上記と同様の比較を行っている。その結果、渦パターンの観測結果と算定結果とは、時間履歴の新しい渦については、ほぼ一致していたことを確認しており、ここに付記しておく。一方、本算定法においては、発生した渦の減衰が考慮されていないため履歴の古い渦がそのまま残存しており、実験結果にみられるような前の周期に発生した渦の早期消散が再現されていない。この渦の減衰については、消散機構を分けて今後に続く研究課題としてい

ておく。また、写真中 写真-2 流れの算定結果($T=1.93$ sec, $H=5$ cm)

の正方メッシュは5 cmで、図中の+印は正の循環をもつ渦糸と、△印は負のそれを示す。これら実験結果と算定結果の比較から、反射波側に形成される渦は、両者ともに堤体下端部より水平方向に10 cm程度離れたところに形成されており、その形もよく似ている。また透過波側に現れる渦は、写真からわかるように、はく離流れが下方に向かい、堤体の鉛直下方のところに形成されるという特性がみられ、これについても本算定結果は、よく類似した渦パターンになっていることが認められる。本研究では、他の波条件の場合についても、上記と同様の比較を行っている。その結果、渦パターンの観測結果と算定結果とは、時間履歴の新しい渦については、ほぼ一致していたことを確認しており、ここに付記しておく。一方、本算定法においては、発生した渦の減衰が考慮されていないため履歴の古い渦がそのまま残存しており、実験結果にみられるような前の周期に発生した渦の早期消散が再現されていない。この渦の減衰については、消散機構を分けて今後に続く研究課題としてい

ておく。また、写真中 写真-2 流れの算定結果($T=1.93$ sec, $H=5$ cm)

の正方メッシュは5 cmで、図中の+印は正の循環をもつ渦糸と、△印は負のそれを示す。これら実験結果と算定結果の比較から、反射波側に形成される渦は、両者ともに堤体下端部より水平方向に10 cm程度離れたところに形成されており、その形もよく似ている。また透過波側に現れる渦は、写真からわかるように、はく離流れが下方に向かい、堤体の鉛直下方のところに形成されるという特性がみられ、これについても本算定結果は、よく類似した渦パターンになっていることが認められる。本研究では、他の波条件の場合についても、上記と同様の比較を行っている。その結果、渦パターンの観測結果と算定結果とは、時間履歴の新しい渦については、ほぼ一致していたことを確認しており、ここに付記しておく。一方、本算定法においては、発生した渦の減衰が考慮されていないため履歴の古い渦がそのまま残存しており、実験結果にみられるような前の周期に発生した渦の早期消散が再現されていない。この渦の減衰については、消散機構を分けて今後に続く研究課題としてい

ておく。また、写真中 写真-2 流れの算定結果($T=1.93$ sec, $H=5$ cm)

の正方メッシュは5 cmで、図中の+印は正の循環をもつ渦糸と、△印は負のそれを示す。これら実験結果と算定結果の比較から、反射波側に形成される渦は、両者ともに堤体下端部より水平方向に10 cm程度離れたところに形成されており、その形もよく似ている。また透過波側に現れる渦は、写真からわかるように、はく離流れが下方に向かい、堤体の鉛直下方のところに形成されるという特性がみられ、これについても本算定結果は、よく類似した渦パターンになっていることが認められる。本研究では、他の波条件の場合についても、上記と同様の比較を行っている。その結果、渦パターンの観測結果と算定結果とは、時間履歴の新しい渦については、ほぼ一致していたことを確認しており、ここに付記しておく。一方、本算定法においては、発生した渦の減衰が考慮されていないため履歴の古い渦がそのまま残存しており、実験結果にみられるような前の周期に発生した渦の早期消散が再現されていない。この渦の減衰については、消散機構を分けて今後に続く研究課題としてい

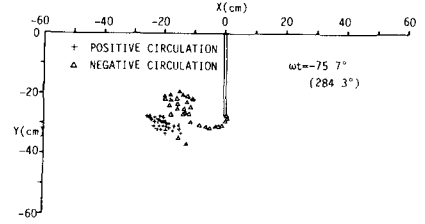
ておく。また、写真中 写真-2 流れの算定結果($T=1.93$ sec, $H=5$ cm)

の正方メッシュは5 cmで、図中の+印は正の循環をもつ渦糸と、△印は負のそれを示す。これら実験結果と算定結果の比較から、反射波側に形成される渦は、両者ともに堤体下端部より水平方向に10 cm程度離れたところに形成されており、その形もよく似ている。また透過波側に現れる渦は、写真からわかるように、はく離流れが下方に向かい、堤体の鉛直下方のところに形成されるという特性がみられ、これについても本算定結果は、よく類似した渦パターンになっていることが認められる。本研究では、他の波条件の場合についても、上記と同様の比較を行っている。その結果、渦パターンの観測結果と算定結果とは、時間履歴の新しい渦については、ほぼ一致していたことを確認しており、ここに付記しておく。一方、本算定法においては、発生した渦の減衰が考慮されていないため履歴の古い渦がそのまま残存しており、実験結果にみられるような前の周期に発生した渦の早期消散が再現されていない。この渦の減衰については、消散機構を分けて今後に続く研究課題としてい

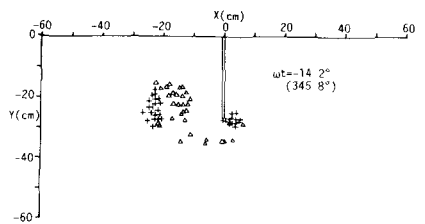
(a) $\omega t = -75^\circ$

(b) $\omega t = -142^\circ$

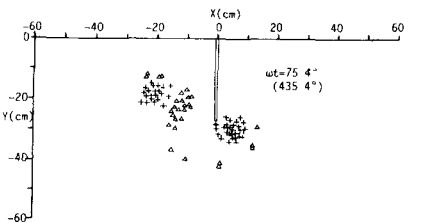
(c) $\omega t = 63^\circ$



(a) $\omega t = -75.7^\circ$



(b) $\omega t = -142^\circ$



(c) $\omega t = 75.4^\circ$

4. 結論:以上の検討より、本解析法を用いて、カーテン防波堤下端部よりの流れのはく離に伴う渦の形成現象は、ほぼ再現できるとは言え、明らかならな

(参考文献) 1) 中村孝幸, "カーテン防波堤とわりの波高計と作用波力に関する研究", 第21回海浜学会, pp. 512-516, 1984
2) R I Lewis, "Surface vorticity modelling of separated flows from two dimensional bluff bodies of arbitrary shape", Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 23, No. 1, pp. 1-12, 1981
3) 中村孝幸, "湾内防波堤とわりの波高計と作用波力に関する研究", 第20回海浜学会, pp. 410-414, 1983