

渦—水面相互作用を経た三次元的不安定性に関する研究

Study on three-dimensional instability via interactions of vortex and water surface

北海道大学工学部 4年 ○学生員 菊池 陸 (Riku Kikuchi)
 北海道大学工学研究院 正員 渡部 靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

砕波帯では、浅水変形によって発生した波浪のクレストが前方に放出し、着水を経て水平ローラー渦を生成する。その後、二次ジェット放出と再着水を繰り返し、水面下に同一方向に回転する渦列を形成する。この渦列間では、淀み点流れの不安定からローラー渦の指向性が変化して形成された渦ループの斜め方向の伸張により、ローラー渦を交互交代縦渦が包絡する組織渦構造が発生することが明らかになっている(Watanabe et al. 2005)¹⁾。この交互交代渦列は水面における熱輸送(Watanabe & Mori 2008)²⁾や海底面における砂の浮遊(Otsuka et al 2017)³⁾を支配するため、海洋環境評価において重要であるが、渦列間隔や渦の強度など基本パラメーター自体が明らかでない。

渦が水面に近づく時に発生する渦—水面相互作用についてはいくつかの基礎研究が行われてきた。Tryggvason (1988)⁴⁾は水面下に与えられた渦層が水面を変形させ、その深さと強度に依存して、砕波、空気混入、水面渦列の特徴的水面形状を形成させることを明らかにしている。Sarpkaya and Suthon (1991)⁵⁾は交互交代渦列がその中央で水面を持ち上げ両端に水面が取り込まれる scara 形成ならびに、渦軸方向には、水面変動を誘発する三次元不安定を実験的に発見している。バルク中の渦対間で発生するクロウ不安定、楕円不安定等三次元不安定性については多くの知見が得られている一方(Crow (1970)⁶⁾, Kerswell (2002)⁷⁾、水面の存在が渦対不安定に与える影響は不明である。

本研究は、砕波下の渦—水面相互作用と不安定性の発生メカニズムを解明することを目的とし、水面下の渦構造と三次元的な水面形、そして渦の発達の特徴を数値的に明らかにしようとするものである。

2. 数値計算

数値モデルの性能の検証が済んでいる3次元 Large Eddy Simulation を行う。

(1) 支配方程式

支配方程式として、粗視化されたナビエ—ストークス方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

と Subgrid 乱れエネルギーに対する輸送方程式を用いる。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x_j} \bar{u}_j = c_{kk} \frac{\partial}{\partial x_j} \Delta q^{\frac{1}{2}} \frac{\partial q}{\partial x_j} - \tau_{ij} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \nu \frac{\partial^2 q}{\partial x_j \partial x_j} - c_\epsilon \frac{q^{\frac{3}{2}}}{\Delta} \quad (2)$$

(1)と(2)は、Fractional Step 法によって移流項と非移流項に分け、CIP 法によって移流項を更新し、予測子修正子法によって非移流項を計算する。また、圧力のポアソン式は、Projection 法ベースのマルチグリッド法で計算する。自由水面は、水面からの距離を表すレベルセット関数 d を用いて検出する。

$$\frac{Dd}{Dt} = \frac{\partial d}{\partial t} + u_j \frac{\partial d}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

移流計算により、レベルセット関数を更新することで Subgrid 水面位置 $d=0$ を内挿し、自由水面上では、圧力のジャンプ条件とゼロ接線方向せん断力条件を境界条件として与える。

(2) 渦対モデル

渦対のモデルとして、円形ラム・オズン渦の線形重ね合わせを考える。円筒座標系でそれぞれの渦の物理量は次式で与えられる。

$$v_\theta(r) = \rho V_{max} \frac{r_c}{r} \left(1 - e^{-\frac{r^2}{r_c^2}} \right)$$

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\rho v_\theta^2(r)}{r}$$

r_c は渦核の半径、 V_{max} は、 $r = r_c$ の時の最大接線方向流速を表す。

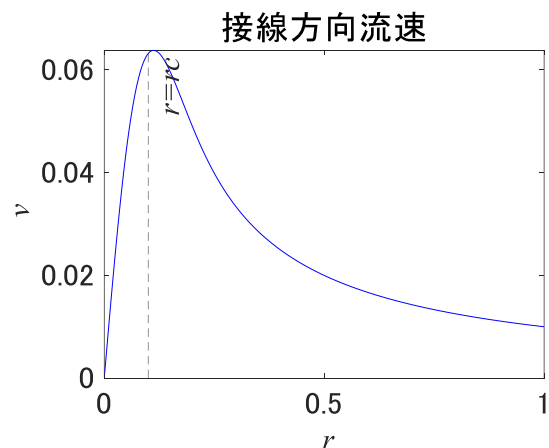


図-1 $V_{max}=0.1, r_c = 1/100$ の時の接線方向流速

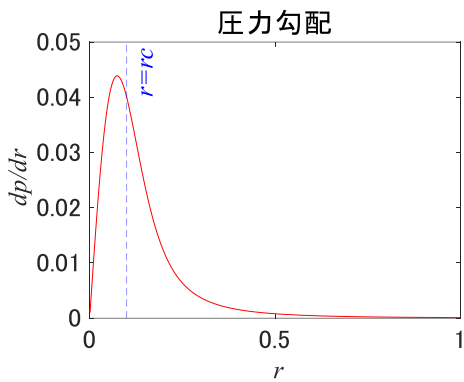


図-1 $V_{max}=0.1, r_c = 1/100$ の時の圧力勾配

(3) 計算条件

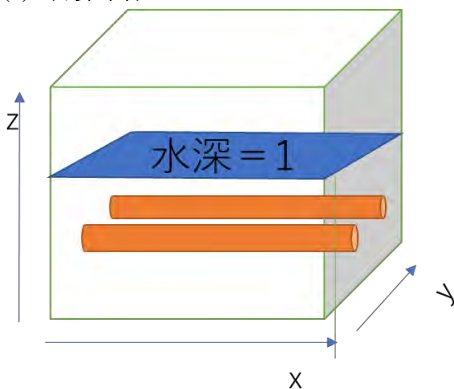


図-1 計算領域

水の密度と水深、重力加速度によって無次元化を行い、計算領域は 1.0,1.0,1.2 の無次元長さで表される直方体とし、水面は静水位を考える。初期条件として渦列を図-1のように x 軸方向に様に設置し、静水圧と渦列による速度、速度勾配、圧力を与えて計算を行う。

3. 検証実験

まずは、渦列一つがどのような挙動をするかを調べるために、初期条件として以下のパラメーターを持つ渦列を与えた。グリッド幅は 1/200、渦核の半径 1/100、最大接線方向流速 0.1、中心座標(y,z)=(0.5,0.6)とした。

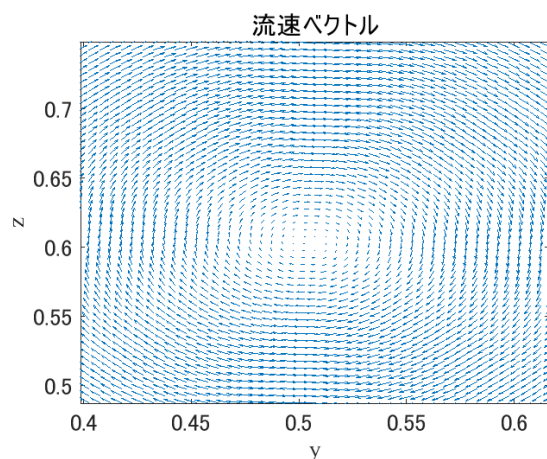


図-2 時計周りに回転する渦列の y-z 断面

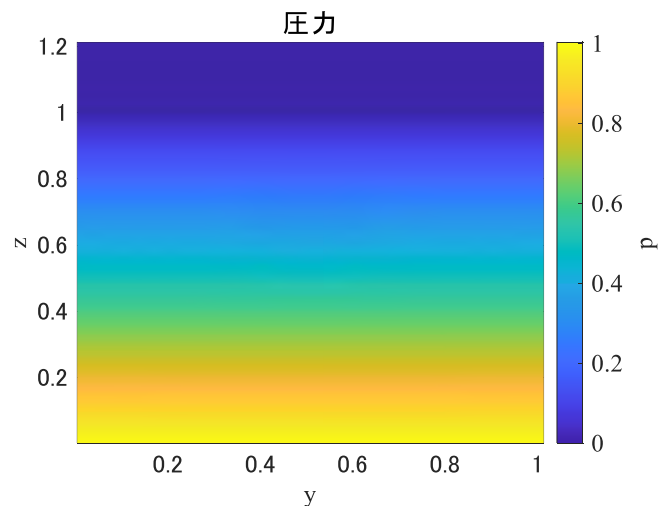


図-3 静水圧と渦による圧力分布 (y-z 断面)

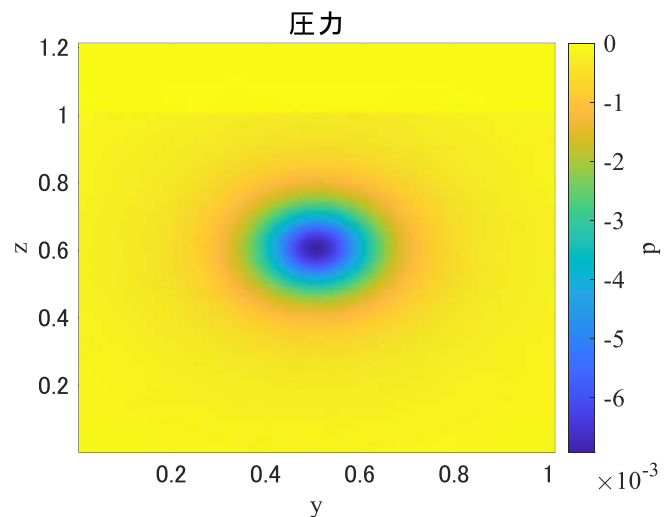


図-4 渦による圧力分布 (y-z 断面)

4. 終わりに

今後の研究では、渦の強度や水面との距離を変えながら時間とともにどのような変化が起こるのかを調べ、渦列一つと水面の 3 次元的相互作用を解析する。その後、渦対と水面の影響の解明を行う。

参考文献

- 1) Watanabe, Y., Saeki, H., Rojer, J. H.: Three-dimensional vortex structures under breaking waves
- 2) Watanabe, Y., Mori, N.: Infrared measurements of surface renewal and subsurface vortices in nearshore breaking waves
- 3) Otsuka, J., Saruwatari, A., Watanabe, Y.: Vortex-induced suspension of sediment in the surf zone
- 4) Tryggvason, G.: Numerical simulations of the Rayleigh-Taylor instability
- 5) Sarpkaya, T., Suthon, P.: Interaction of a vortex couple with a free surface
- 6) Crow, S. C.: Stability theory for a pair of trailing vortices
- 7) Kerswell, R. R.: Elliptical instability