

## DamBreak モデルによる越流ジェット下の渦構造

vortex structure under the overflow jet by dam break model

北海道大学工学院 修士1年 学生員 ○佐藤駿一 (Shunichi Sato)  
 北海道大学工学研究院准教授 正会員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

## 1. はじめに

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震が発生し、大地震により多くの家屋は東海や液状化被害に遭った。海岸域では、堤防の結界や越流の落下により堤防背後の地面が抉れ、また津波の砕波でも同様な被害や侵食などが見られた。その要因として堤防決壊位置から出る噴流や津波の砕波で生じる渦が挙げられる。しかしながら、渦は極めて複雑な構造をし、発生メカニズムは多様であるため解析は困難な作業である。

本研究では、境界条件を満足させるためにDambreakを数値シミュレーションのモデルとし、越流が自由落下する高さを変化させるパラメータをすることで越流ジェット下の渦構造の形状や生成過程の違いを明らかにしようとするものである。また、通常のDambreakも同様に数値計算し越流ケースとの比較も同時に行う。

## 2. 数値計算

## 2.1 計算方法

本研究では、流体の乱流モデルとしてLarge Eddy Simulation (LES)を用いる。LESはcutoff-lengthを境に流れを大スケールと小スケールの2つの変動に分離し、普遍性の期待できる小スケール変動に対して乱流統計量を基礎としたモデルを適用する計算方法である。Navier-Stokes方程式より、以下の式を得る。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial x_i^2} \right) + g_i - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

ここで、SG応力  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$  である。

また、圧力に関するPoisson方程式をIrregular star法ベースのMultigrid法、移流方程式を双曲型微分方程式を解く高次精度差分法の1つであるCIP法 (Cubic Interpolated Pseudo-Particle Scheme) (Yabe,1991)、水面を表現する方法としてLevel-set法 (Sethian and Smereka,2003)を用いる。

## 2.2 計算条件

本研究で数値シミュレーションを行うDamBreak水槽の計算領域は280×60×56gridで、大きさは縦1.4m×横0.3m×高さ0.28mとした。また、水槽底面と水槽側面(短辺)はslip条件、水槽側面(長辺)は周期境界条件を用い、x=0.25mの位置に水を堰止めるための不透過のゲートを設ける。このゲートは同サイズの実験水槽で簡易的に計測した速度(0.2582m/s)で垂直上方に引き上げられる。x=0mからゲート手前に水深20cm、ゲート奥側に水深5cmの水を溜めた状態を共通条件にし、ゲートの引き上げを開始する高さを0cm、5cm、7cm、10cmのcase1、case2、case3、case4の4ケースをそれぞれ計算する。Case1以外の3ケースではゲート直下にゲートと同様な不透過条件の壁(wall)を設置する。

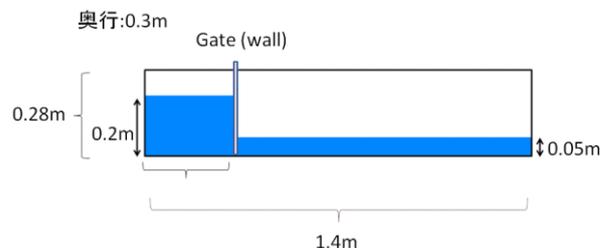


図1 Dambreak水槽 (模式図)

## 3. 計算結果

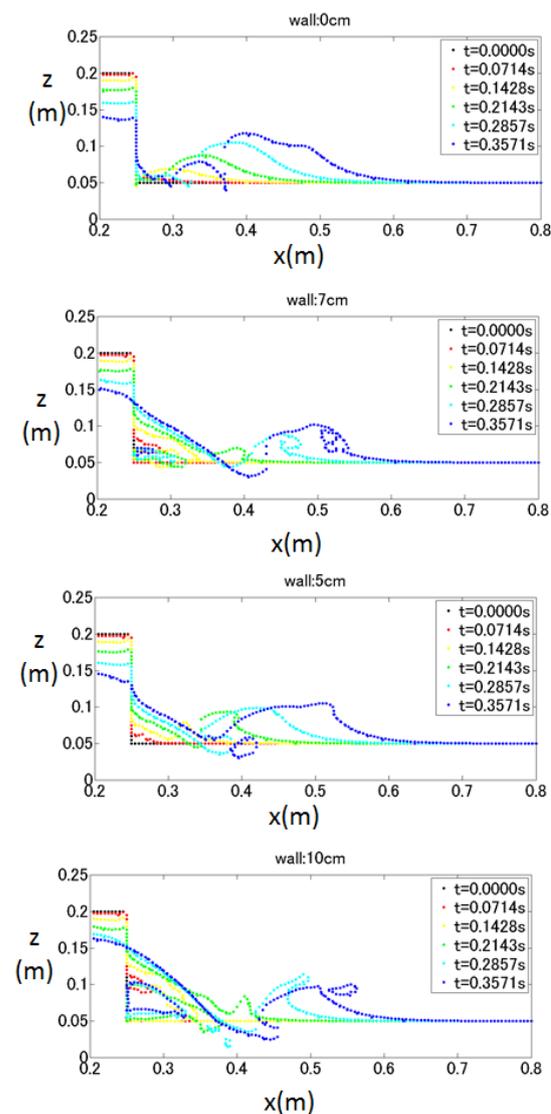


図2 各 case における x-z 座標の水面形時系列 (上から case1、case2、case3、case4)

計算開始、すなわちゲート引き上げ開始時刻から $t=0.3571s$ までの水面形を時系列に沿って表示させたものが図2であり、どのケースも $t=0.3571s$ における水面形の変化から波は $x=0.5m$ 付近まで伝播しているのがわかる。また、case3とcase4では、噴流が下方水面に着水した後に水面を押し下げるように水深が低くなりジェットが生成している。

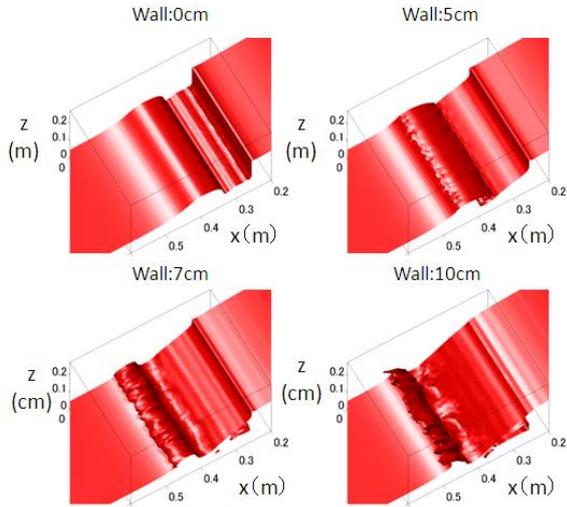


図3  $t=0.2857s$ における3次元水面形  
(左上:case1、右上 case2、左下:case3、右下:case4)

図3はLevel-set法により水面形を3次元表示させたもので、これを見るとそれぞれのcaseでの噴流が及ぼす下方水面の影響の違いがよく観察できる。case1は下方水面の変化がほぼ2次元的なものだが、噴流の落下位置が高いほど下方水面が複雑な3次元変動しているのがわかる。

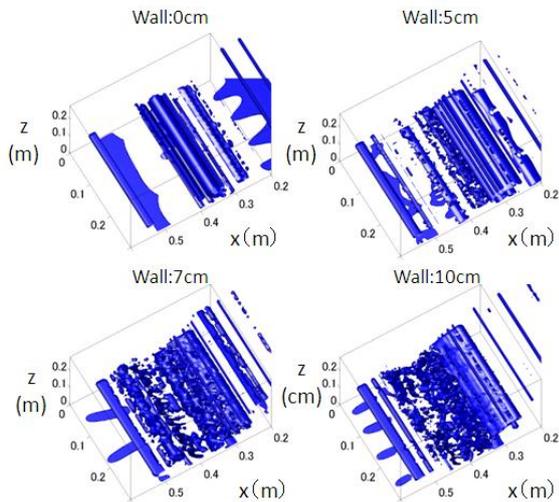


図4  $t=0.2857s$ における vortex core  
(左上:case1、右上 case2、左下:case3、右下:case4)

図4は図3と同時刻での vortex core (渦核) を求め表示させた結果である。図3でも示すように case1 では下方水面が2次元的变化しかせず、図4(a)を見ても vortex core のほとんどが y 方向に伸びる primary vortex で占められている。それに対して他の3ケースでは着水地点手前で大きく巻き込む primary vortex が形成され、ジェット頂上付近でも同じ回転方向の渦が形成されている。

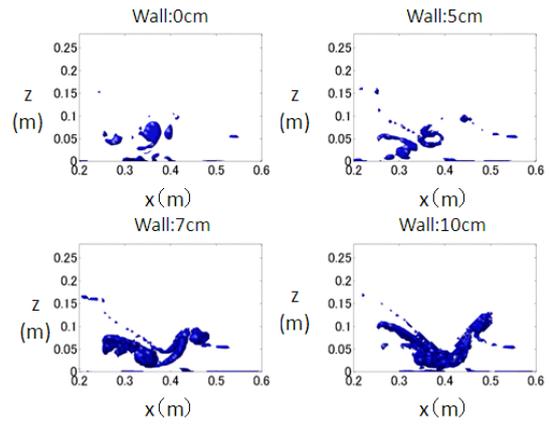


図5  $t=0.2857$ における x-z座標の vortex core  
(左上:case1、右上 case2、左下:case3、右下:case4)

さらに図5も合わせて見ると、この二つの渦核を繋ぐように、x方向に細く伸びるrib vortexもいくつかつづら折り状に発生しているのが観察できる。case3とcase4を比較するとrib vortexの発生している本数や太さが異なっているのが確認できる。

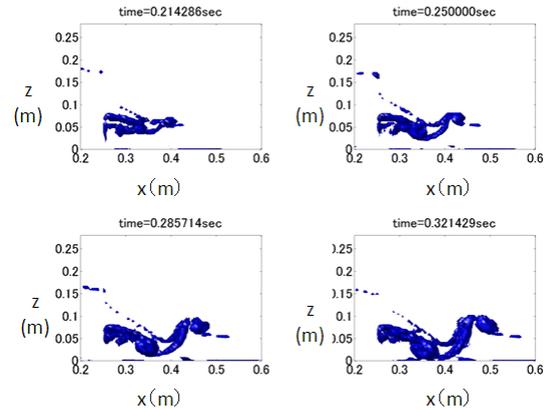


図6(a) case3での vortex core の発達過程

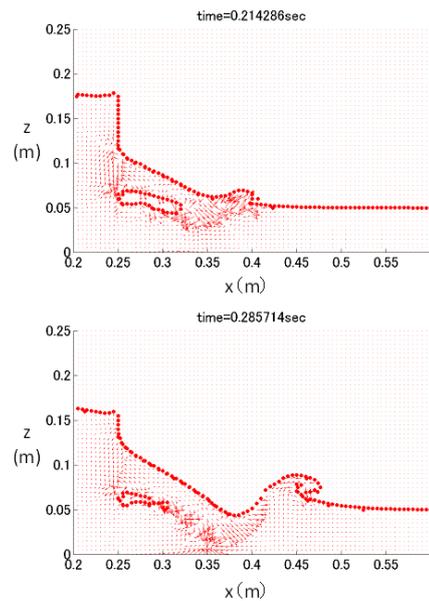


図6(b) case3での歪テンソル

Case3について、渦核の発達の様子を時間経過とともに追っ

たものが図6(a)である。ゲートの引き上げ開始高さ7cmの位置から噴流が下方水面に着水しprimary vortexとrib vortexが形成された後、rib vortexはz方向に伸びて発達する。この時、図6(b)の歪テンソルの分布を見ると、着水時の着水面の歪テンソルは右斜め上方に引っ張りが生じている。引っ張りがかかることで、rib vortexは細く伸びのために渦の伸張効果で渦が強くなり、より周りの流体を巻き込んで水面が上昇する渦が発達する。

このような傾向は越流であるcase2、case3、case4でも見られ、その顕著さは越流位置が高いほどよく見られる。一方で、case1は他の3ケースとは渦核や歪テンソルの分布が異なるものを示す。

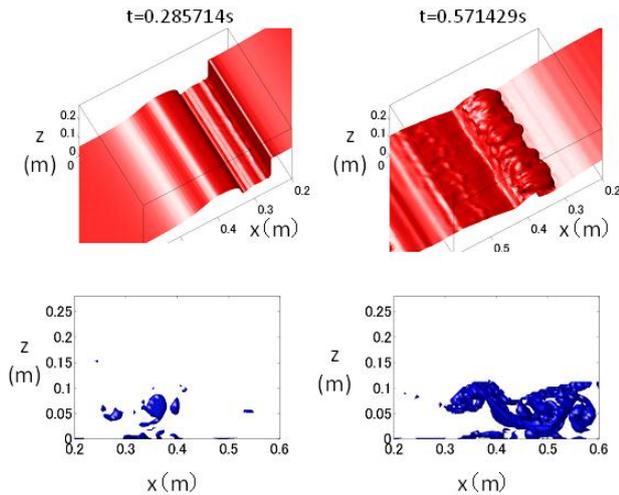


図7(a) case1でのvortex coreの発達過程  
(上:3次元水面形,中:vortex core)

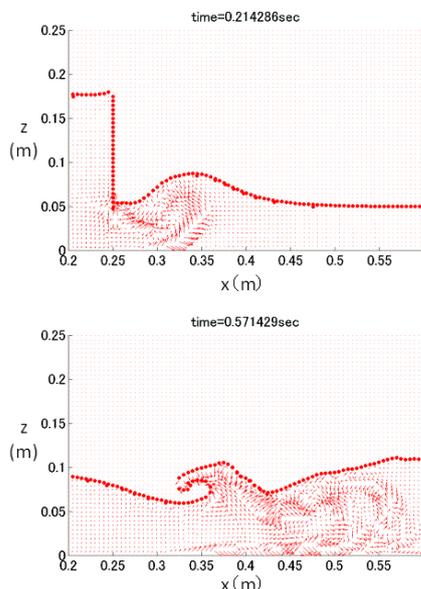


図7(b) case1での歪テンソル

case1はゲートの引き上げ開始高さが0cm、つまりゲートと底面が接した状態のために越流は生じない。ゲート引き上げが進行していくにつれてゲート直下から噴流が流れ込み、図7(a)のようにゲート奥で流体が盛り上がる。この時の渦構造は単純だが、その後さらに先へ進んだ位置でrib vortexを形成する。この理由としては、先に盛り上がった水塊に次々と流れ込む噴流が追いつくことで発達したと考えられる。そのため、図7(a)右下

のように越流のケースとは渦の発達形状が異なっているのがわかる。また、図7(b)からその時の歪テンソルは、 $x=0.45\text{m}$ 付近で右下がり引張り合う分布が出ており、これは他の越流のケースとは異なる分布である。これらの事から、越流の有無から渦の構造を判断できると推定される。

#### 4. 結論

越流ジェット下の渦構造を観察するために、Dambreakを数値シミュレーションのモデルとし、シミュレーションのモデルとし、ゲート引き上げ開始高さを0cm、5cm、7cm、10cmの4ケースに関してそれぞれ数値計算を行った。

Level-set法を用いることで数値計算の結果から各ケースの3次元水面形を取得し、越流位置と水面形の複雑さに関して考察した。

vortex coreを求め、各ケースでの渦形成の様子を3次元、またx-z座標面で観察し、primary vortexとrib vortexの形成状況と越流位置の高さとの関連を考えた。またcase3の渦構造の時系列から渦構造を追うことでrib vortexの発達過程を明らかにした。

歪テンソルを求めることで、流体に及んでいる引っ張りの方向が取得でき、渦構造の発達過程を予測する可能だと推定した。

越流の起こらないcase1の水面形およびvortex coreについて、他の越流ケースと比較することで異なる渦の発達過程を持つことが確認でき、越流するかどうかにより渦構造が決定でき、また越流する高さによりその渦発達の顕著さを決めることができると推定した。

#### 参考文献

- 1) Yasunori Watanabe, Hiroshi Saeki and Roger J. Hosking : Three-dimensional vortex structures under breaking waves, J. Fluid Mech. vol.545 pp.291-328, 2005.
- 2) T. Yabe and P. Y. Wang : Unified numerical procedure for compressible and incompressible, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.60, No.7, pp. 2105-2108, 1991
- 3) Sethian, J. A. and P. Smereka : Level set methods for fluid interfaces, Annu. Rev. Fluid. Mech., 35, pp.341-372, 2003.

(2012.12)