

# 海岸地形管理のための簡易的な波の遡上シミュレーションモデル

長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 非会員 菊地 野生  
長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 非会員 郭 徳杰  
長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 正会員 細山田 得三  
モンゴル科学技術大学 非会員 Ayuruzana Badarch

## 1. はじめに

海岸で波が汀線を超えて陸上に乗上げる現象は遡上と言われるが、打ち上げと称することもある。遡上波は前浜の海岸浸食の一因となり、海岸を管理する上で極めて重要である。津波が来襲して海岸近傍の都市に大きな被害が生じるのも広義には遡上とみなすこともできる。また、波の遡上高は海岸構造物の天端高を決定する上で重要である。防波堤や離岸堤が設置された海岸ではそれらの海岸構造物に衝突した波面が構造物前面で急上昇して構造物の上に乗上げる越波という現象がある。これらの現象に共通しているのは、静水状態では陸上であった部分が波の進行によって冠水することである。

斜面への遡上に影響を与える項目には入射波特性、斜面勾配、表面粗度、透水性、斜面前面の海岸地形などがある。遡上波は短周期の場合、陸上を進行する際に当然底面摩擦によってエネルギーを逸散するため、反射率が小さくなる。従来、遡上高を定量的に評価するためには室内実験が行われた。ルメオーテリは相対遡上高を Miche の非碎波理論式や高田<sup>2)</sup>の実験結果に加えて、碎波を考慮してエネルギー損失を考慮した式を提案している。斜面上で碎波する場合は高田の実験式や Saville の図表評価法が提案されている。

一方で数値計算の手法としては長波方程式およびその式を分散性の波動方程式に発展させたブシネスク方程式がある。この計算方法は津波の遡上と同等の計算アルゴリズムであり、簡便で計算速度も速い。近年ではナビエストークス方程式に自由表面での碎波変形までも考慮できる VOF 法を付加した方法が一般化している。この方法は原理的に最も流体計算の本質に近い方法であり、優れているとみなせるが、圧力と流速の緩和計算で収束計算を行う必要があり、計算時間や計算資源（メモリ）を要する。それに比して前者の非線形長波方程式は非線形性、分散性を考慮することができ、かつ計算速度は圧倒的に早い。簡便で軽量の計算方法である非線形長波方程式と VOF 法による方程式の比較を行ってその特性を把握しておくことは有用であると考えられる。

本研究では非線形長波モデルと VOF 法による数値波動水路 CADMAS-SURF を用いて同条件の計算を行い、比較検討した結果について報告する。

## 2. 計算方法

### (1) 遡上モデルの概要

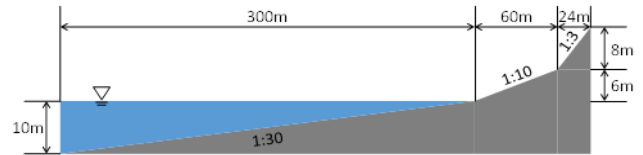


図-1 モデル地形の岸沖方向分布

計算に用いた波動モデルの基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + MD_x =$$

$$\left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 m}{\partial t \partial x} \right) + Bgh^2 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \right) \quad (2)$$

式(1),(2)はそれぞれ連続式、 $x$ 方向の運動方程式である。独立変数  $t, x$  は時間と1次元の座標であり、 $\eta, m$  はそれぞれ未知数である水位と線流量である。変数  $h, D$  は静水深および  $h$  と  $\eta$  の和である。 $B$  は深海波領域でも精度が比較的高いと言われている  $1/21$  としている。本研究の対象領域は極浅水領域（長波）であり、短周期や深海波領域で有効な右辺の分散項については必須ではない。 $g$  は重力加速度である。式(2)の左辺の最終項は、渡辺・丸山(1984)<sup>3)</sup>によって提案された碎波減衰項であり、碎波指標に基づいて計算される。これらの基礎方程式はスタガード格子に基づいて離散化してコード化した。図-1には計算に用いた仮想的な断面を示す。

### (2) 遡上波の計算の考え方

式(1),(2)は CADMAS-SURF や OpenFOAM 等に用いられている VOF 法による流体計算の基本的な手法とは異なり、基本的には圧力項は水位のみで決定される。そのため水面勾配が圧力勾配と同じ意味となり、式(2)の左辺第3項の水面勾配が決定され、計算を進める。地形標高が水位を上回っているところが陸上であり、陸上と海域の境界での水位勾配は水位と陸上標高の差を距離で除すことによって近似的に評価した(図中点線)。また、式(1)の連続式は線流量の差が水位変化を引き起こすという極めて単純な質量保存則を意味している。なお、CADMAS-SURF の遡上計算は VOF 法による自由水面変形アルゴリズムによって境界面の水平および上方への移動として計算される。

### (3) 入射波の条件および計算条件

入射波条件は周期  $T$  を 9 秒に限定し、波高  $H$  は 2.5m

および4mのストークス波とした。T=9s,H=4mは新潟西海岸のエネルギーピーク波に相当する。

### 3. 計算結果と考察

図-3 にブシネスクモデル（非線形長波系）およびCADMAS-SURFでのVOF法（CDF系）による水位変動の時間・空間分布を示す。この図より、造波境界（沖）での波速はいずれのモデルともほぼ同じであり、両者はよく一致しているが、波が岸に近づき遡上し始めるあたりでは、ブシネスクモデルの波速がかなり低減している。またブシネスクモデルは砕波が顕著になる付近では波の峰の水位が低減し、峰以外の部分の水位が高くなり、全体的にぼやけている。VOF法でも汀線の近くでは巻き波に近い砕波が生じており、水位変動（波高）が低減している。また、遡上も顕著であり、80秒程度で一旦遡上した波の引き波も明確に表れている。VOF法による計算は数値流体力学の基本原則に基づいており、深海波や長波といった仮定は含まれておらず、一方、ブシネスク方程式は長波を基本として深海波を計算するために拡張されており、使用にやや制約がある。また1次元計算であり、砕波と判定されたらその影響が計算全体に及ぶが、CADMASによる砕波は水塊が分裂したとしても岸方向への運動量は保存されて、それが再度水面に衝突しても岸方向の運動への加速には有効である。このような特性が計算に表れていると思われる。

図-4 に汀線近傍の水位変動の断面比較図を示す。ブシネスクモデルの波形が砕波判定によりなだらかになっている。対してVOF法では波の峰が立っており、遡上も顕著であるが、波形が乱れていることから、過大評価となっている可能性がある。そのため差分スキームの係数などを調整する必要があると考えられる。

本計算を実施するにあたり、VOF法(CADMAS-SURF)では格子形状比や鉛直方向解像度の制約からdx=0.5mとした。これに対しブシネスクモデル（長波）ではdx=2.0mと4倍程度の粗い格子で計算を行った。CPU時間と計算結果の出力に要した時間はCADMAS-SURFが約3時間であり、ブシネスクモデルによる計算が最大で10秒程度であり、計算負荷に大きな違いがあることが分かった。ブシネスクモデルでは砕波による波高減衰が全般に見られるがCADMAS-SURFではそれが局所的であり、実現に近い遡上高がかなり大きくなった。これらの差異についてあらためて検討していく必要があることが分かった。

### 4. まとめ

ブシネスクモデル（非線形長波系）とCADMAS-SURF（VOF法）の計算結果の比較を行った。両者は近い挙動を示したが、砕波が発生してからは全体的にブシネスクモデルの結果の方が波高・遡上高が小さくなった。両者ともにパラメータの改良の余地があるため、調整を行うとともに、水理実験との比較を行うことで、差異を定量的に評価することが必要である。

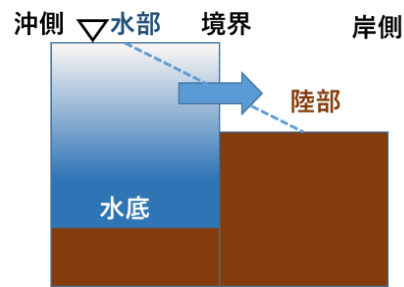


図-2 長波での遡上波の取り扱い

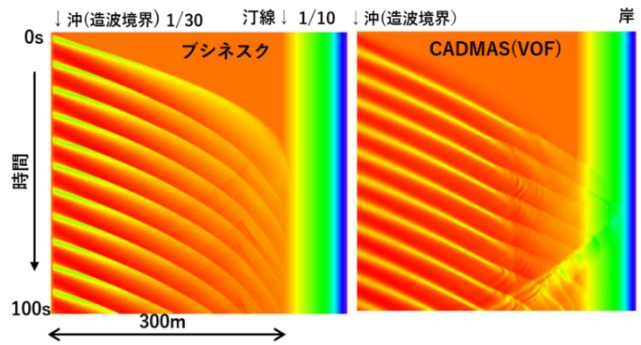


図-3 ブシネスクモデルとVOF法の比較  
水位分布, H=4.0m, T=9.0s

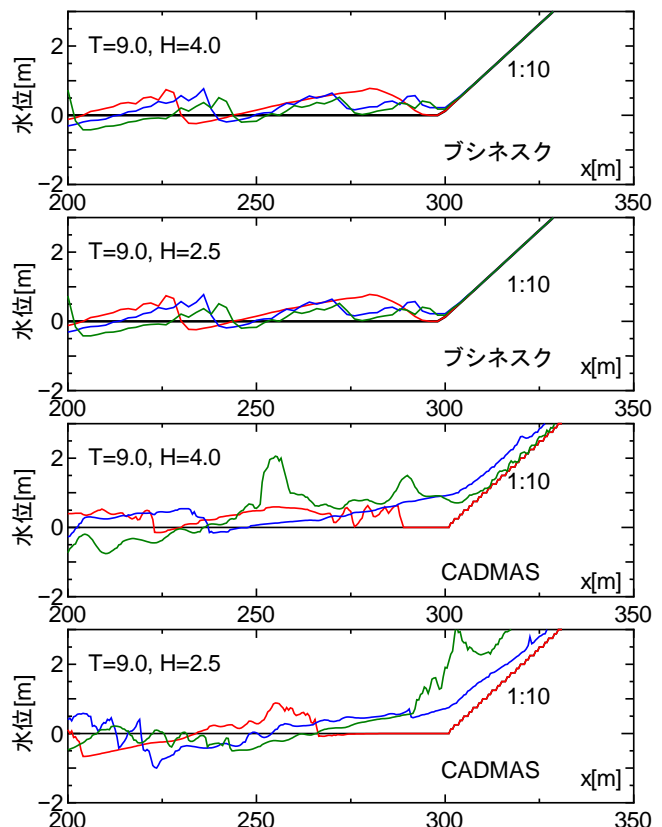


図-4 水位変動の比較

### 参考文献

- 1) LeMehaute,B,et.al(1968): A synthesis on wave run-up, Proc. ASCE, Vol.94, No.WW1, pp.77-92.
- 2) 高田彰(1975): 規則波の打ち上げ高および越波量の定式化について, 第22回海岸工学講演会論文集, pp.377-386.
- 3) 渡辺晃・丸山康樹(1984): 砕波変形を含む波浪場の数値計算法, 海岸工学講演会論文集, 第33巻, pp.103-107.