

数値波動モデルを用いた海岸汀線付近の遡上波の変形に関する研究

水圏防災研究室 17324585 菊地野生
指導教官 細山田得三

1. はじめに

新潟西海岸は新潟県新潟市の信濃川河口から関屋分水までの間に位置する延長約 2.5km の海岸であり、その背後には本州日本海側最大の都市である新潟市の中心市街地が広がっている。もとは堆積性の海岸であったが、信濃川の河川改修に伴う流送土砂の減少により海岸侵食が発生し、明治 22 年から昭和 23 年までに汀線は最大で 350m 後退した。対策には面的防護工法が採用され、約 500m 沖合の潜堤及び海岸から直角に伸びる突堤等の構造物を複合的に配置し、潜堤の背後には砂浜が造成された。対策の結果、汀線の後退は沈静化した。海岸保全のための監視・維持管理が行われている。

海岸で波が汀線を越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侵食の一因となり、海岸を管理する上で極めて重要である。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¹⁾は相対遡上高を Miche の非砕波理論式や高田²⁾の実験結果に加えて、砕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。斜面上で砕波する場合は中村ら³⁾が改良仮想勾配法を提案している。この方法は打ち上げ高を比較的簡易に求めることができるが、適用範囲に制限があるとともに、現地との整合性が指摘されている。一方で数値計算の手法としては、NS 方程式に自由表面での砕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。この方法は非圧縮性流体の連続条件を反復的に収束させているた

め、原理的に最も流体計算の本質に近い方法であるが、一定の条件下で打ち上げ高が過大となる可能性が指摘されている。

上述のように、打ち上げ高の算定法は複数あり、特徴を把握し妥当性を検討することは有用であると考えられる。本研究では改良仮想勾配法・VOF 法による数値波動水路 CADMAS-SURF を用いて新潟西海岸での波の遡上計算を行い、実際の観測値と比較し妥当性を検討する。

2. 改良仮想勾配法

複合断面の打ち上げ高の算定には Saville⁴⁾により、地形と護岸の形状を砕波点の位置と打ち上げ点で代表させる仮想勾配法が提案された。これを中村らが中間地形を考慮して修正したのが改良仮想勾配法である。概念図を図-1 に示す。算定方法は、まず砕波点と仮打ち上げ点を定め、間の断面積を求める。その断面積と等しく $R+h_b$ を高さとする仮想三角形を求め、斜辺の勾配を仮想勾配とする。ここで求められた $\cot \alpha$ と波形勾配 H_0/L_0 を算定図に当てはめ、得られた打ち上げ高を比較し、両者が一致するまで仮打ち上げ点の位置を修正する。そして最終的に一致した点が打ち上げ高となる。

このように比較的簡易に打ち上げ高を算出できる改良仮想勾配法だが、海底勾配が 1/30 より緩やかな地形では、打ち上げ高の算出結果が過大となる可能性が指摘されている。そこで改良仮想勾配法をプログラム化させ、各種入力条件を変化させたときの挙動を調べた。図-2 に砕

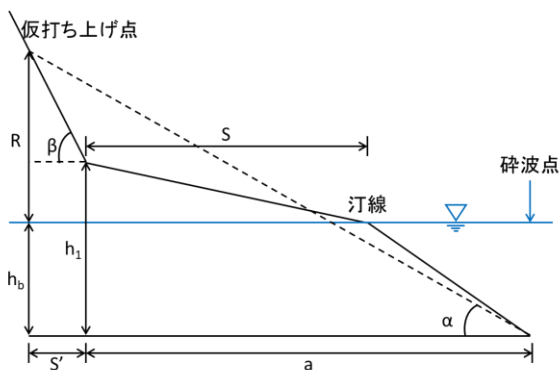


図-1 改良仮想勾配法概念図

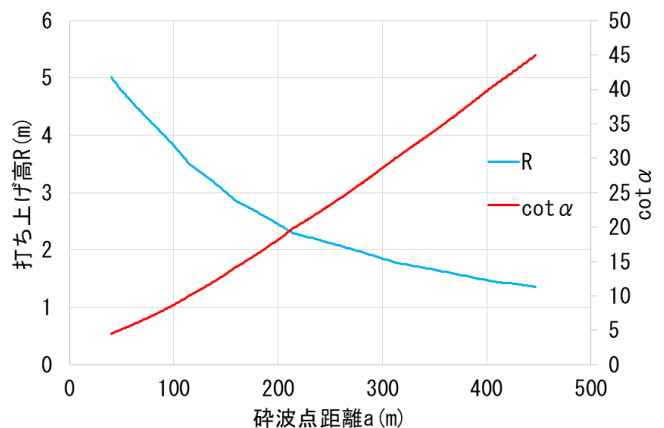


図-2 砕波点距離 a による影響

波点距離 a を変化させた時の挙動を示す。砕波点距離 a が増加するほど打ち上げ高 R は対数関数的に減少している。これは砕波点距離 a が大きいほど波が進む距離が長くなり、底面からの影響を多く受けることでエネルギーが減衰するためだと考えられる。改良仮想勾配法は海底勾配が $1/30$ よりも緩やかな領域では過大評価となることが指摘されているが、今回のケースでは水深 h_b を 8m ・海岸幅 S を 40m で固定しているため、砕波点距離 a が約 280m 以上で海底勾配が $1/30$ よりも緩やかになる。砕波点距離 a が 280m 以上では打ち上げ高 R の減少傾向は緩やかになっており、過大評価となっている可能性がある。そのため、改良仮想勾配法を使用する際は海底勾配に注意する必要がある。

3. CADMAS-SURF

数値波動水路 CADMAS-SURF は、流体の基礎方程式である NS 方程式を数值的に解き、自由表面解析モデルには汎用性が高く複雑な表面形状を解析可能である VOF 法を採用した計算手法である。

海岸域における波浪場の解析では、海底斜面や透過性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えることが必須となる。このため、数値波動水路の基礎方程式には、二次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式及び Navier-Stokes 方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した、式(1)の連続式と式(2)~(3)の運動方程式を採用している。ここで、 t :時間、 x, z :水平・鉛直座標、 u, w :流速の水平・鉛直成分、 ρ :密度、 P :圧力、 v_e :分子動粘性係数と渦粘性係数の和、 g :重力加速度、 γ_x, γ_z :水平・鉛直方向の面積透過率である。

波・流れ・地盤の相互作用を伴う複雑な現象の数値シミュレーションを迅速かつ容易に行うことができる CADMAS-SURF だが、一定の

条件下で打ち上げ高が過大となることが報告されているとともに、計算で適用した報告書を確認すると、各種パラメータの設定に疑問が残ることも多く、現象によっては適用法に基準がない。そのため各パラメータによる影響を調べ、波の遡上計算における最適の計算条件を求めた。

(1) 乱流モデル

CADMAS-SURF では乱流モデルとして、実用性が高く様々な分野で用いられている高 Re 型 $k-\epsilon^2$ 方程式モデルを使用することができる。しかし乱流モデルが計算結果にあまり影響を及ぼさず、計算時間を要するため実用的ではないとされており、適用事例は少なく、その適用性については未だ不明な点が多い。しかし、乱流モデルを使用したケースと使用しないケースで計算結果を比較したところ、使用しないケースでは打ち上げ高が非常に高くなった。水位変動の比較図を図-3 に示す。遡上後の波形が変化

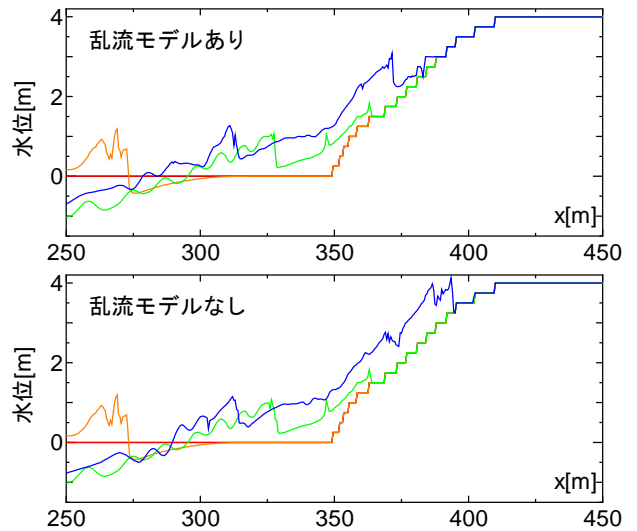


図-3 水位変動比較図

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_\rho \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g \quad (3)$$

していることから、乱流を使用しないケースでは、斜面上で乱流によるエネルギー散逸が小さくなり、遡上するエネルギーが減少しなかったと考えられる。そのため遡上計算では、乱流を考慮することが重要であると結論づけた。しかし乱流モデルを使用したところ、計算が不安定になり発散することもあったため、非線形性が強い水深が浅い領域の格子幅 dz を重点的に小さくするなどして計算を安定化させる必要がある。

(2) 差分スキーム

CADMAS-SURF では差分スキームとして DONOR スキームパラメータを設定する。この値は一次風上差分と二次中心差分の割合を表しており、一次風上差分のみを使用する場合は 1.0、二次中心差分のみを使用する場合は 0.0 と設定する。図-4 に DONOR1.0,0.5,0.0 のときの水面波形を示す。DONOR1.0 は風上差分のため数値粘性が高くなり、遡上した波が斜面部に長く留まることで水位が不自然に高くなったとともに、打ち上げ高も高くなった。対して DONOR0.0 では水面波形が不安定になり遡上高も非常に小さくなった。これは波のエネルギーが分散し、遡上するエネルギーが減少したためである。一次風上差分と二次中心差分のミックスの DONOR0.5 は水面波形が安定し不自然な

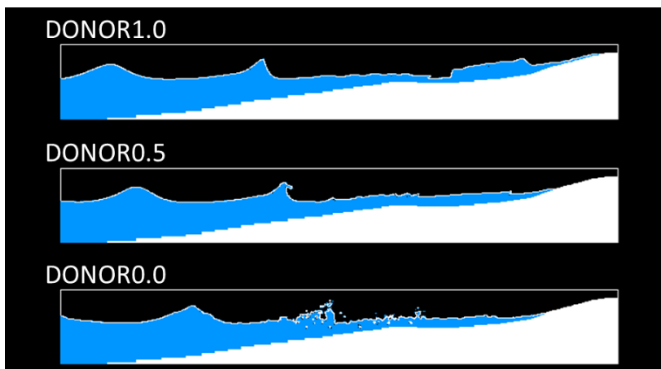


図-4 差分スキームによる影響

点は見られなかったため DONOR0.5 が最適であると結論づけた。

4. 再現計算・比較

2014年12月17日の爆弾低気圧時と、2021年1月7日の現地調査時の2ケースについて、CADMAS-SURF と改良仮想勾配法を用いて打ち上げ高を計算した。図-5 に計算領域を、表-1 に CADMAS の計算条件を、表-2 に入射波条件と計算結果を示す。打ち上げ高を算出した結果、両者ともに実測値との差を約 10% 以内に収めることができた。しかし爆弾低気圧時の改良仮想勾配法の結果が実測値よりも約 0.5m 低くなり、現地調査 16 時の CADMAS の結果が実測値よりも約 0.4m 高くなった。

改良仮想勾配法の結果が低くなった原因は、地形を近似したことによる誤差が考えられる。改良仮想勾配法では仮想斜面によって地形を近似し、断面積をもとに計算を行うが、その際に実際の地形の性質を正しく表せていない可能性が考えられる。また、改良仮想勾配法が引

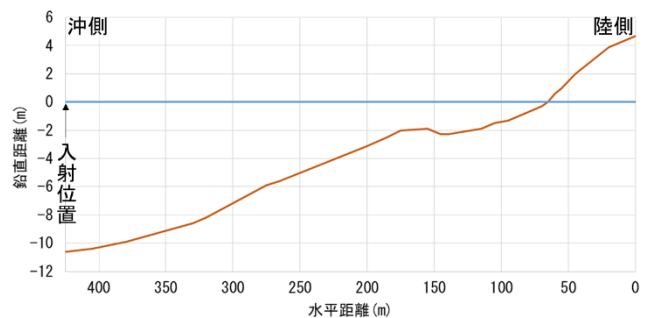


図-5 計算領域

表-1 CADMAS 計算条件

dx	1.0m
dz	0.5~0.2m
乱流モデル	高Re型k-ε 2方程式
差分スキーム	DONOR0.5

表-2 入射波条件・計算結果

		換算沖波波高 H_o'	周期T	波形勾配H/L	潮位+η	計算法	打ち上げ高	実測値
爆弾低気圧		3.20m	11.8s	0.03	1.20m	CADMAS	3.50m	3.50m
						仮想勾配	2.94m	
現地調査	12時	1.10m	7.4s	0.02	0.79m	CADMAS	1.30m	1.17m
						仮想勾配	1.31m	
	14時	1.24m	7.1s	0.05	0.91m	CADMAS	1.50m	1.56m
						仮想勾配	1.46m	
	16時	1.76m	9.7s	0.03	0.95m	CADMAS	2.10m	1.70m
						仮想勾配	1.83m	

波や打ち上げ波の影響を考慮していないことによる影響や、波高・周期が非常に大きい場合に実現象と実験値との結果に乖離が起きている可能性などが考えられる。

CADMAS-SURFの結果が高くなった原因は、解析格子の影響や乱流の影響が考えられる。解析格子の影響については、CADMAS-SURFの計算精度は主に計算格子と差分スキームに影響されると言われている。これらについては3章で扱っており、設定が少しでも変わると計算の結果が大きく変わった。格子条件は計算を安定させるため、水深によって dz を変化させる不等間隔格子を採用し、DONORスキームパラメータは一次風上差分と二次中心差分を均等に使用した。しかし、格子については計算機の性能との兼ね合いから、その大きさは $0.5m \sim 0.2m$ と比較的大きな分割方法となってしまった。また、 dz の変化率も3段階としたため格子の大きさが変化する際に数値的な問題が発生する可能性は否定できない。そのため、数値波動水路による計算を行う際には、出力された数値だけでなく、描画部による水面波形の確認を行うなど適宜工夫が必要である。計算機の性能との兼ね合いから格子間隔が比較的大きくなってしまったこと、 dz の変化率を3段階としたため格子の大きさが変化する際に数値的な問題が発生している可能性などが考えられる。

乱流の影響については、波の遡上という現象において、砕波・乱流は波のエネルギー減衰に大きく影響を及ぼすため、特に注目する必要がある。しかし、乱流という現象の複雑さから、CADMAS-SURFで乱流について考察を行っている論文は多くはない。乱流モデルは通常、水路や河川・湖沼・海洋などのように一方向流が卓越した流れの場に適用される。海岸波動のように往復流や砕波が卓越する場において適用することが妥当かどうか検討される必要があると考えられる。実際に適用される乱流モデルは $k-\varepsilon$ モデルが多いが、そのモデル構成はせん断乱流であり、波の打ち上げのような現象に適用することが妥当かどうか本来は検討されるべきと思われる。あるいはLES(Large Eddy Simulation)の方が現象に適合するように思われるが十分な検討がされていない。また、実際に計算を行った結果、乱流モデルを利用すると計算が不安定になることも多く、その挙動を完全に把握することはできなかった。そのため水理実験などを並行して行い、その特性を定量的に

評価することが必要と思われる。

5. 結論

改良仮想勾配法・CADMAS-SURFの特徴をまとめることができた。基本的には両者とも打ち上げ高を精度良く算出していた。改良仮想勾配法による算出の容易さや、CADMAS-SURFが使用するにはある程度の熟練度と計算時間が必要なことから、打ち上げ高を算出する際には基本的には改良仮想勾配法を用いるのが、海岸管理を容易にする上で適切である。CADMAS-SURFは重要な箇所の確認や激しく擾乱している場合、打ち上げ高以外に流速や波圧などの波浪の詳細な情報が必要な場合に適用するのが現実的である。

6. 課題・展望

本研究では潜堤通過後の波浪を扱い計算を行った。改良仮想勾配法では砕波点から計算を行うため、潜堤より沖側から計算を行うことはできないが、CADMAS-SURFであれば潜堤を考慮して計算を行うことができる。計算負荷が高くなるため本研究では行わなかったが、潜堤の影響を考察することは有用であると考えられる。本研究では、新潟西海岸の地形のみを取り扱ったが、他の海岸地形でも検証を行い影響を調べることは有用であると考えられる。

現地調査では打ち上げ高の測定をレーザー変位計を用いて実際に行ったが、非常に強い突風が吹いていたため、各時間3~5回の測定が限界であった。そのため今回の測定結果が新潟西海岸の特性を完全に代表しているとは言い難い。そのため更に精密な測定をもとにデータ数を増やす必要があると思われる。

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) 中村充 (1972): 複合断面における波の打ち上げに関する研究, 第19回海岸工学講演会論文集, pp.309-312.
- 4) Saville,T.,Jr.(1958): Wave run-up on composite slopes,Proc.6th Coastal Engg.Conf.,ASCE, pp.691-699.