

# 海岸管理のための波の打上高予測に関する研究

長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 山之内 基記  
長岡技術科学大学 環境社会基盤工学 細山田 得三

## 1. はじめに

海岸を管理することの重要性は、国土の保全や海岸の有効利用を確保することに直結することから広く社会で認識されている。また、日本の海浜は海岸侵食によって長年にわたり縮小傾向にあり社会問題となっている。海岸侵食の大きな原因は当然ながら沖から岸に向かう波浪であり、波浪の影響が砂浜の存続に関わっている。砂浜は波浪を減衰させる重要な役割を果たしており、海岸法においては海岸保全施設の一つとして位置づけられている。浸食によって消失することは、国土を失うだけでなく、背後地にある住宅街等への浸水被害拡大につながるため、波浪を抑制し砂浜の流失を抑えることは重要となる。

海岸で波が汀線を越えて陸上を遡上する際の汀線からの鉛直高さを打上高という。打上高を把握することで、波浪をどの程度抑制する必要があるか分かり、海岸保全施設の天端高等を決める指標となる。したがって、打上高を定量的に評価することは必要不可欠である。

従来、打上高を定量的に評価するために、室内実験が行われた。ルメオーテリは相対遡上高をMicheの非砕波理論式や高田<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>が改良仮想勾配法を提案している。この方法は打上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同時に、現地との整合性が指摘されている。一方、波の遡上を数値計算によって求める手法はNS方程式を直接計算することが最もプリミティブと考えられているが、従来使用されてきた、下園ら<sup>4)</sup>によって示されて非線形長波方程式やブシネスク方程式などの1次元化した方程式によって求めることも可能である。後者の方法は計算負荷が前者に比べて圧倒的の小さいが、砕波の有無でスキームを使い分けることや高次の分散項の処理などをコード化する必要があり、困難な点が

多い。

本研究では、NS方程式に自由表面での砕波変形までも考慮できるVOF法を付加した方法であるCADMAS-SURF/2Dを用いて、波の遡上の計算を行い、外浜の地形による打上高の変化について調べることが目的とする。さらに、打上高の簡便な算出方法として一般的に使用される改良仮想勾配法とCADMAS-SURF/2Dで算出した結果を比較し、改良仮想勾配法の適用範囲について検討する。

## 2. 計算方法

### (1) CADMAS-SURF

数値波動水路CADMAS-SURF/2Dは、流体の基礎方程式であるNS方程式を数値的に解き、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なVOF(Volume of Fluid)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を採用している。

### (2) 改良仮想勾配法

複合断面の打上高の算定にはSaville<sup>5)</sup>により、地形と護岸の形状を砕波点の位置と打上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。改良仮想勾配法の模式図を図-1に示す。算定方法は、砕波点と仮打上高Rを定め、図-1の全断面積を求める。その断面積と等しいR+hb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 $\alpha$  (勾配の逆数) と沖波波形勾配H<sub>0</sub>/L<sub>0</sub>を図-2の算定図に当てはめ、無次元打上高を求める。これと先立って仮定した仮打上高を比較し、両者が十分一致するまで仮打上点の位置を修正して反復計算を行う。最終的に算出されたRがそのパラメータに対する打上高となる。こ

のように比較的簡便に打上高を算出できるが、海底勾配が1/30より緩やかな地形では、打上高の算出結果が過大となる可能性が指摘されている。

本研究では図-1に示した3つの屈曲点を持つ海浜断面地形ではなく、汀線での屈曲をもつ2つの勾配を持つ断面でも適用できるように変更を加えるプログラムを作成し、計算を行った。

### 3. 計算条件

CADMAS-SURF/2Dによる計算は図-3、表1、2に示す条件で行った。差分スキーム値は一次風上差

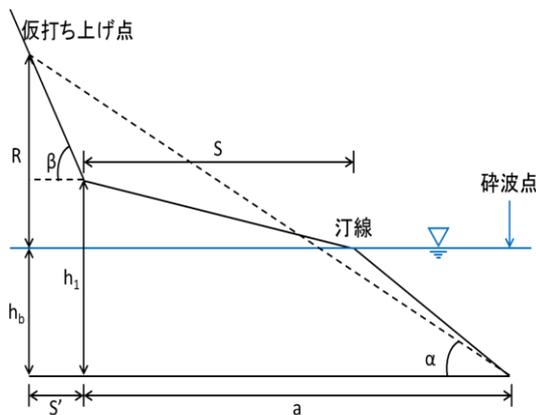


図-1 改良仮想勾配法の模式図

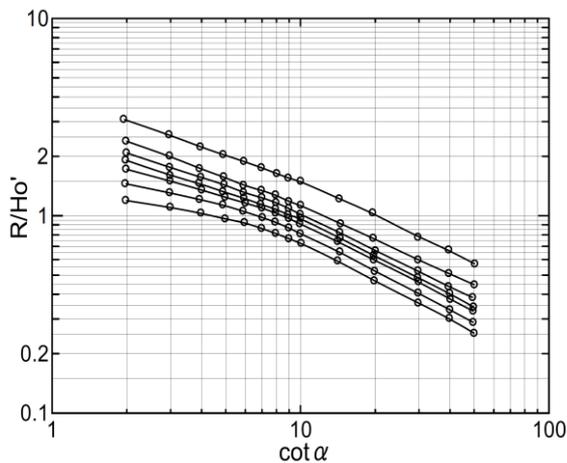


図-2 無次元打上高(R/Ho)と勾配の逆数の関係図

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。計算に適用した報告書<sup>6)</sup>では、差分スキームは0.1~0.5が妥当であり、推奨値を0.2としているため、0.2を採用した。しかし、差分スキームの値が打上高に与える影響についても検討が必要だと考え、実際に計算を行った。格子間隔は遡上波の距離を詳細に観測するため、汀線付近から前浜にかけて細くなるように設定した。

また、地形条件は外浜の勾配による打上高の違いを確認するために、1/10から1/50の5ケースで、前浜勾配は1/20に固定して行った。波浪条件は規則波とし、周期Tは6秒、8秒、10秒、12秒の4ケース、波高Hは周期Tが6秒では、1.0m、2.0m、3.0mの3ケース、他は1.0m、2.0m、3.0m、4.0m、5.0mの5ケースとして計算を行った。海岸浸食の原因となる遡上波は周期と波高がともに高く、波のエネルギーが大きい場合だと考えられるが、CADMAS-SURF/2Dによる計算の特性についても検討するため、周期と波高が小さいケースでも計算を行った。

表-1 CADMAS-SURF/2Dの計算条件

項目	設定値
造波モデル	造波境界
解析時間	300s
差分スキーム	VP-DONOR 0.2
dx	0.2~1.0m
dz	0.2~0.5m

表-2 地形条件

ケース	外浜勾配	前浜勾配
1	1/10	1/20
2	1/20	1/20
3	1/30	1/20
4	1/40	1/20
5	1/50	1/20

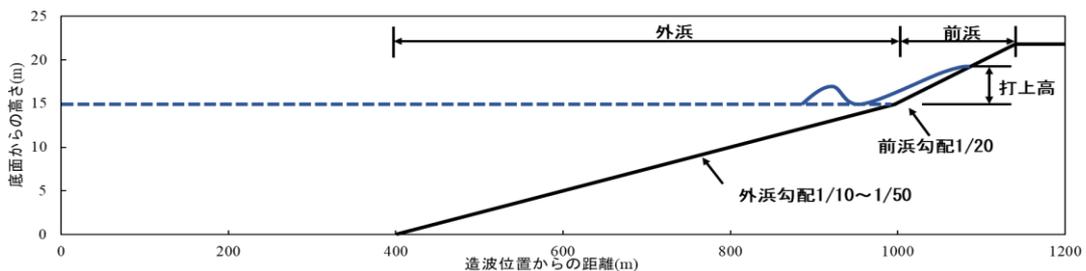


図-3 CADMAS-SURF/2Dの計算領域

#### 4. 計算結果

CADMAS-SURF/2Dの計算では、引き波と遡上波が干渉することによって、規則波を用いても、打上高は一定とならない。本研究では遡上した波の上位1/3を平均した値を打上高として採用した。

また、CADMAS-SURF/2Dの特性上、計算のステップ数は999999に制限されている。波の波高や周期が増加すると、計算のステップ数も増加する傾向にあり、一部のケースでは300sまでの計算結果を得ることができなかった。

##### (1) 差分スキーム

差分スキームの値が打上高に与える影響について検討するため、0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5の5ケース、外浜勾配1/10と1/50の2ケース、波浪条件は周期Tが10秒、波高Hを5.0mとして計算を行った。計算結果を表-3、差分スキーム値が0.1, 0.3, 0.5のケースにおける打上高の時系列データを図-4に示す。

表-3より差分スキーム値が増加するほど打上高が増加傾向にあることが示された。これは風上差分の割合が増すと、数値粘性が高くなるため、遡上した波が前浜にとどまりやすくなるからである。これにより、次々と押し寄せる波によって、前浜に残った波が押し上げられ、打上高が上昇したと考えられる。また、図-4の時系列変化から、外浜勾配が1/10では差分スキームの値によって打上高の変化は小さく、1/50では打上高の変化が大きいことが確認でき、緩勾配であるほど差分スキーム値による影響が高くなることが示された。

また、勾配が緩いと打上高が高くなるのは、砕波と関係があると考えられる。緩勾配のほうが、より沖側で砕波することで、汀線に達する前に波長が短くなる。これにより、遡上した波が沖合に戻るよりも先に、次の波が押し寄せることで、海水が沖合に戻りにくくなり、汀線付近で水位は上

昇する。結果として、打上高も高くなったと考えられる。この考察のように、波の遡上高は基本的には統計量であり、数値計算における決定論で定義することにはやや困難があることが示された。

##### (2) CADMAS-SURF/2Dと改良仮想勾配法の比較

各勾配での計算結果を図5から図9に示す。それぞれ散布図がCADMAS-SURF/2Dの計算結果、直線のグラフが改良仮想勾配法の計算結果である。

各グラフより、CADMAS-SURF/2Dの計算結果は波高と周期が増加すると打上高も増加する傾向にあり、これは改良仮想勾配法でも同様の傾向が示されている。ただ、数値計算では引き波と遡上波の干渉による影響等によって、値は散らばる結果となった。

図-5と図-6より、外浜勾配が1/10と1/20のケースでは改良仮想勾配法の計算結果は若干過大評価している。一方で図-7から図-9より、外浜勾配が1/30より緩勾配になると改良仮想勾配法の計算結果は過小評価する傾向にある。さらに、勾配は緩やかになるほど、改良仮想勾配法の計算結果は著しく過小評価することが確認された。また、外浜勾配が1/10から1/30の間では概ね誤差0.5m以内であったが、外浜勾配が1/40や1/50では、1.0m以上誤差が発生するケースが頻繁にあり、改良仮想勾配法の適用範囲に関しては、依然課題が残る結果となった。

本研究では、遡上した波の上位1/3を平均した値を打上高としているため、計算結果は収まりやすくなっている。しかし、ピーク値に着目すれば、緩勾配のほうが打上高は高くなる傾向にあり、これは実際の現象と比較し、各種パラメータや打上高の算出方法について検討する必要がある。

表-3 差分スキーム値による打上高

差分スキーム	外浜勾配	
	1/10	1/50
0.1	2.542m	2.388m
0.2	2.553m	2.814m
0.3	3.024m	2.980m
0.4	3.207m	3.188m
0.5	2.995m	6.102m

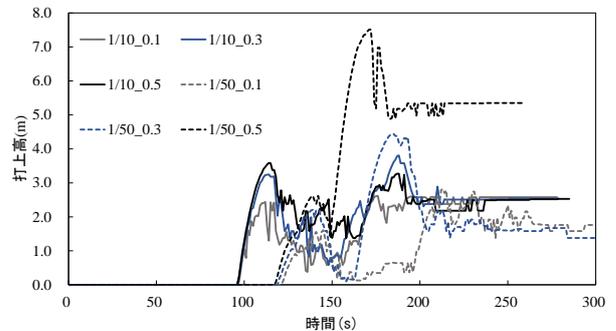


図-4 差分スキーム値による打上高の時系列データ

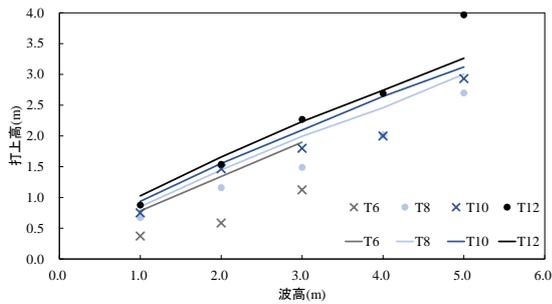


図-5 外浜勾配1/10の計算結果

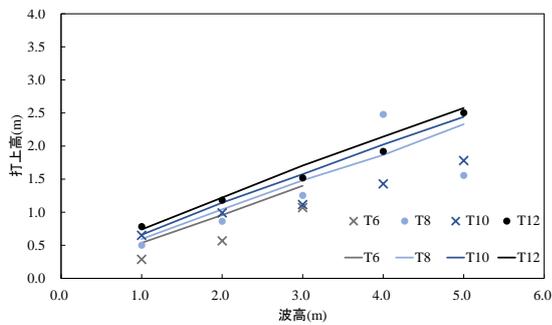


図-6 外浜勾配1/20の計算結果

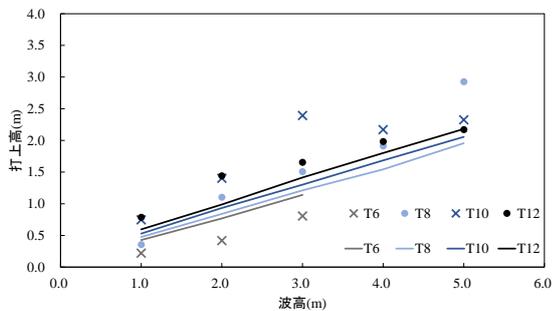


図-7 外浜勾配1/30の計算結果

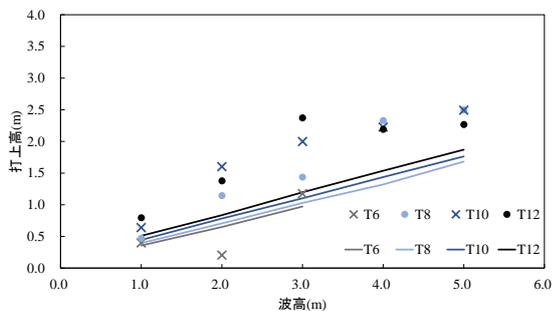


図-8 外浜勾配1/40の計算結果

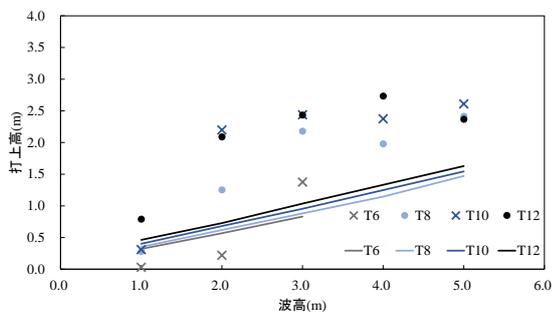


図-9 外浜勾配1/50の計算結果

(改良仮想勾配法：直線，CADMAS-SURF/2D：散布図)

## 5. おわりに

本研究の計算結果より改良仮想勾配法の適用範囲は外浜勾配が1/10から1/30の間である場合だと考えられる。

既往研究では、改良仮想勾配法は1/30より緩勾配では計算結果が過大評価される可能性が示されていたが、本研究では過小評価する結果となった。

しかし、CADMAS-SURF/2Dによる計算では緩勾配になるほど、打上高により影響を与えることが確認された。このような結果から、各種パラメータは計算する現象や地形条件等に応じて適宜設定する必要がある。本研究では、どの条件においてもパラメータは変えずに計算を行っており、適切でなかった可能性がある。よって、1/30より緩勾配で改良仮想勾配法が過小評価していると断定できず、適用範囲に関しても検討の余地がある。

また、波の遡上のような波の場に依存する現象を決定論的な数値計算で確定することは困難であり、波の挙動はサーブビートのような要因や地形に強く影響されるため、計算結果の解釈に工夫を要する。

今後は適切にパラメータを設定できるように、各条件によって検討を進める必要がある。また、今回は打上高を遡上した波の上位1/3を平均して求めたが、他の算出方法も検討する必要がある。

## 6. 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) 下園武範, 草野真史, 田島芳満, 佐藤慎司, ShockCapturingSchemeの浅海短周期波への適用, 海岸工学論文集, 第54集, pp.26-30, 2007.
- 5) Saville, T., Jr. (1958): Wave run-up on composite slopes, Proc. 6th Coastal Engg. Conf., ASCE, pp.691-699.
- 6) 財団法人沿岸技術センター(2008): CADMAS-SURF 実務計算事例集, 沿岸開発技術ライブラリー, No.30.