

海岸護岸における越波量空間分布の推定

平山 克也¹・森内 政弘¹

¹ (独) 港湾空港技術研究所 海洋研究領域波浪研究チーム (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

台風0418号及び台風0423号に伴う高波により海岸護岸背後の国道で通行障害が発生した高知県室津港海岸を対象として、波の碎波・遡上に加え越波計算が可能な平面2次元ブシネスクモデルを用い、道路通行規制実績から見た当時の越波状況の沿岸分布に関する再現計算を行うとともに、複数の代表断面において、既存の推定法により別途推定された打ち上げ高及び護岸越波量と比較し、その妥当性を検討した。ブシネスクモデルにより推定された越波状況は、護岸消波の影響または平面的な波浪変形が比較的小さい代表断面では1次元的手法による結果とよく一致するとともに、その他の沿岸方向の各護岸においても、妥当と判断される結果を得た。

キーワード 越波, 遡上, 護岸, ブシネスクモデル

1. はじめに

合計10個の台風が上陸し各地で高潮・高波災害が発生した2004年以降にも、わが国ではほぼ毎年のように高波の来襲による越波災害が発生している。2006年には台風12号に伴う高波が岩手県久慈港半崎地区に襲来し、護岸越波により背後の造船工場が浸水した。2007年には台風9号による高波が神奈川県湘南海岸に襲来し、西湘バイパス道路護岸が倒壊した。また2008年2月に富山湾に襲来した寄り回り波は、入善町芦崎地区（下新川海岸）では護岸背後の住宅地に甚大な浸水被害をもたらした。

これらの来襲波の周期はいずれも14s以上であり、より沖合の海底地形の影響を受けて平面的な波の集中が生じたことが、これらの越波災害に共通した特徴である。また一般に、海岸護岸に打ち寄せる波は、沿岸域の地形・海底特性に応じて変形・集中し、同じ沖波条件に対してもその空間分布は必ずしも一様ではない。

このために生じる護岸越波量の空間分布を把握することは、海岸護岸の適切かつ効率的な設計や背後地の面的防護策の立案等において非常に重要である。しかし、この推定に、岸沖方向に代表測線を設ける1次元的手法を適用することは、作業効率のみならず、平面波浪特性を考慮した護岸設計を行う上で限界がある。

そこで本研究では、港湾・海岸施設の設計や港内静穏度解析などに近年多くの実績を有するブシネスクモデル（NOWT-PARI）に対し越波計算モデルを組み込み、平面的な波浪変形の結果生じる護岸越波量の空間分布を算定できる計算ツールを開発した。さらに、現地海岸護岸に対する算定結果を現地の越波状況や従来の1次元的手法による結果と比較し、その妥当性を検証した。

2. 海岸護岸における護岸越波量の算定手法

台風0418号及び台風0423号に伴う高波により海岸護岸背後の国道55号線で通行障害が発生した高知県室津港海岸を対象として、波の碎波・遡上に加え越波計算が可能な平面2次元ブシネスクモデルを用い、道路通行規制実績から見た当時の越波状況の沿岸分布に関する再現計算を行うとともに、代表12断面において修正仮想勾配法を、さらにそのうち3断面でCADMAS-SURF/2D（※注）を適用して得られた打ち上げ高及び護岸越波量と比較し、その妥当性を検討した。

注) 波動現象に限らず流体の運動を直接解くダイレクトシミュレーション法のうち、水面境界の処理にVOF法を適用したものであり、護岸周辺の越波飛沫の挙動なども推定できる。しかし、膨大な計算時間を要するため、実務計算では断面2次元モデルが適用されることが多い。

(1) 対象海岸における波浪変形計算

計算対象とした現地海岸地形を図-1に示す。この海岸は隣接する高知県室津港と行当岬に挟まれ、2004年の台風23号に伴う高波による越波災害が発生した菜生海岸とは、室津港を隔てた反対側に位置している。また、海岸護岸のすぐ背後を通る国道55号（片側1車線）への越波対策として、2004年当時にも人工リーフ群がすでに数基設置されていたことが図より読み取れる。しかし、道路通行規制実績¹⁾によると、少なくとも2005年度末の護岸改良実施以前には、特に行当岬側の元海岸付近で越波による通行障害が度々発生していたようである。

そこで、後述する越波計算により当時の状況を推定するために、越波による片側通行規制が開始された台風

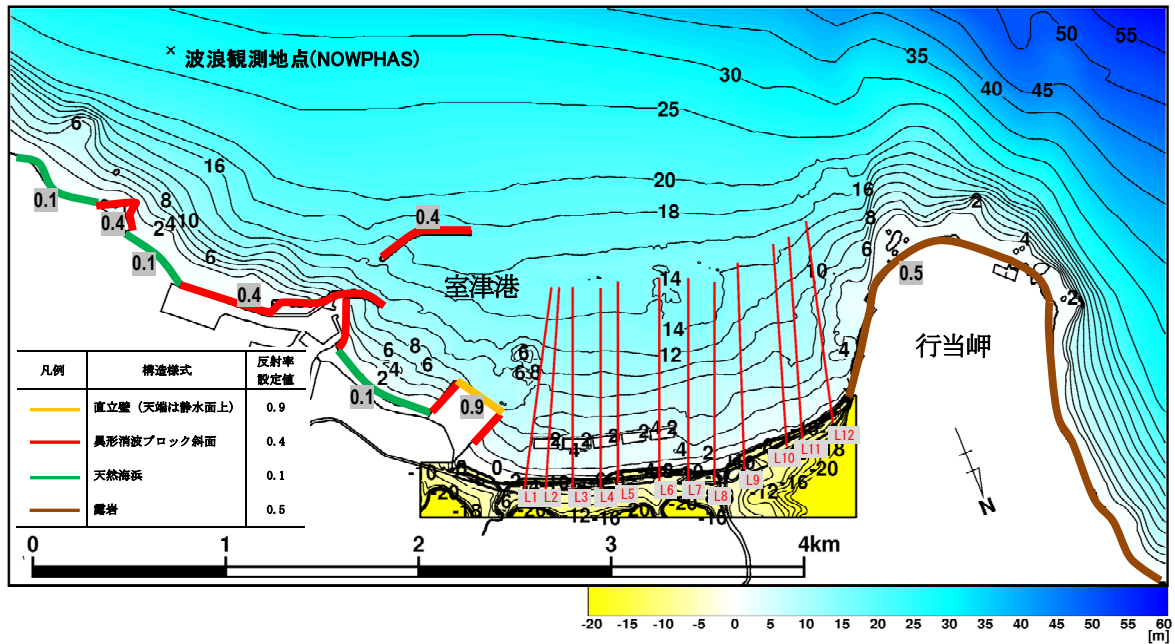


図-1 2004年当時の海岸地形とその周辺地形 (L1~12は護岸越波量算定のための代表測線)

表-1 対象擾乱時の波浪諸元及び潮位

擾乱	日時	波高	周期	波向き	潮位	備考
1	台風0418号 9/7 11:30	4.74m	11.0s	N214°	T.P.+0.46m	片側車線規制開始時刻
2	台風0423号 10/20 14:00	13.55m	15.8s	N208°	T.P.+1.99m	ピーク波高の観測時刻

表-2 各測線上の海岸護岸断面 (2004年当時)

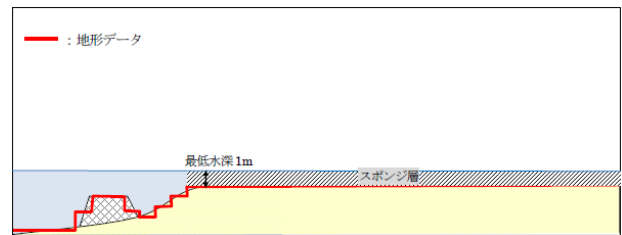
構造物	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
人工リーフ	無	有	有	有	間	有	無	無	無	無	無	無
護岸消波	有	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無
護岸天端高 (T.P.+ m)	8.6	8.6	8.6	10.0	8.2	8.2	10.0	8.2	8.4	7.8	7.8	10.0

※人工リーフにおいて“間”とは、代表断面が人工リーフ間に設定されていることを意味している

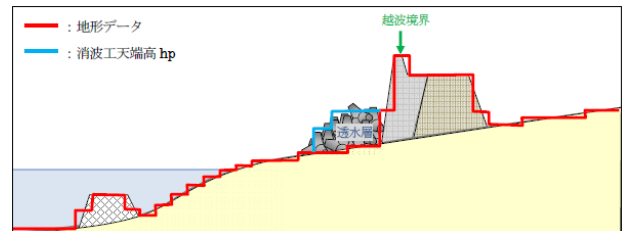
0418号来襲時の高波 (擾乱1), 及び既往最大波高を観測し全面通行止めが実施された台風0423号来襲時の高波 (擾乱2) を対象として, 汀線近傍の碎波・遡上計算が可能な平面2次元ブシネスクモデル²⁾ による波浪変形計算を行い, 海岸護岸周辺の進行波による平面波浪場を推定した. 対象時刻において近隣のNOWPHAS地点及び気象庁検潮所で観測された波浪諸元及び潮位を表-1に示す.

ここで, この沖合境界で与える入射波は, NOWPHASによる現地観測データから推定された沖波スペクトルをもとに, エネルギー平衡方程式法で算定した造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによって造波³⁾, 対象日時の観測潮位に加え, 沖の周辺・海底地形による平面的な波浪変形を考慮した. また, 比較のため, エネルギー平衡方程式法で算定した波浪変形も検討対象とした.

一方, 海岸前面の人工リーフ群は, 計算では不透過構造物として設定した. また, 防波堤, 護岸等に沿う曲線で示す反射境界について, エネルギー平衡方程式では凡例に示す反射率, ブシネスクモデルでは消波工に応じた反射率が算定される透水層⁴⁾ または碎波・遡上変形が生じる自然地形を設定した. さらに, 海岸護岸については, エネルギー平衡方程式法では反射率ゼロ, ブシネスクモ



(a) 海岸護岸なし



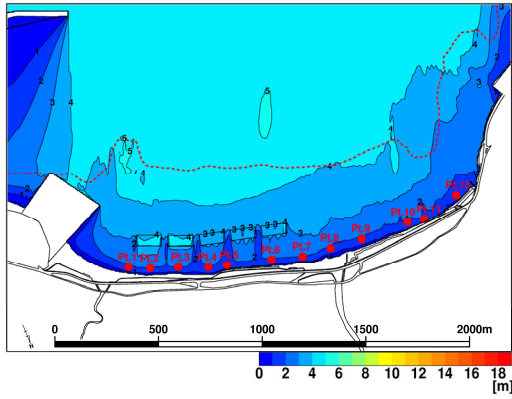
(b) 海岸護岸あり

図-2 海岸護岸周辺地形の模式図

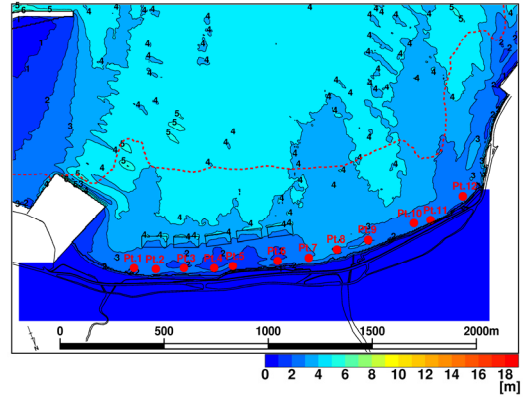
デルでは図-2(a)に示すように, T.P. -1.0m以浅に十分な幅のスポンジ層を設定し, 海岸護岸からの反射波を抑制した. なお, 図-2(b)に模式的に示す海岸護岸境界は, 後述する越波計算において設定した.

ところで, 図-1において岸沖方向に設けた線分 (L1~12) は1次元的手法により海岸護岸上の打ち上げ高及び越波量を推定するための代表測線を示す. 表-2には, 各測線上での2004年当時の海岸護岸断面の状況を示す. ちなみに, このうちL10~12の区間については現在, 人工リーフ (3基) の設置, 護岸天端高の1.2m嵩上げ, 及び堤脚部の消波が実施されていることを付記しておく.

対象とした擾乱1, 2に対し, エネルギー平衡方程式

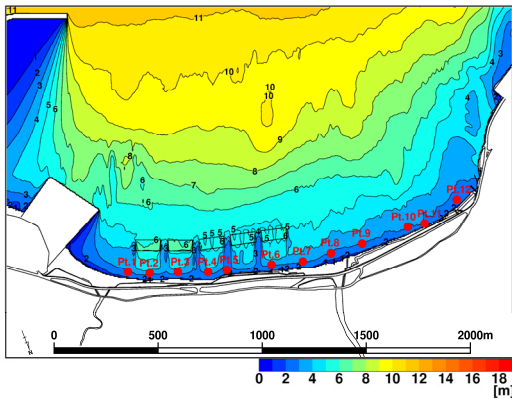


(a) エネルギー平衡方程式法

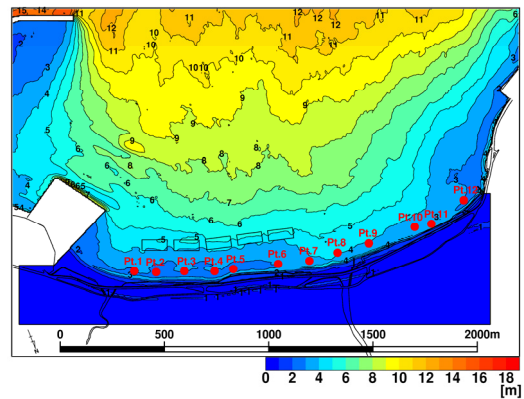


(b) ブシネスクモデル

図-3 海岸地形上の平面波高分布（擾乱1）（Pt.1～12は換算沖波波高算定用の波高抽出点、点線は砕波位置）

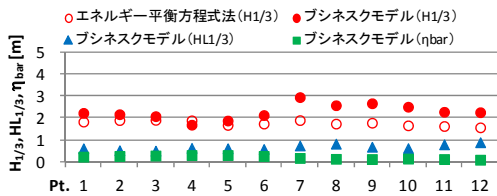


(a) エネルギー平衡方程式法

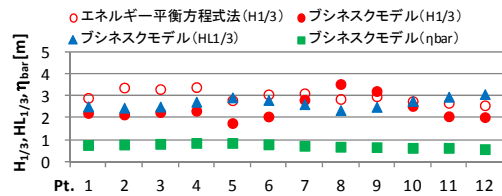


(b) ブシネスクモデル

図-4 海岸地形上の平面波高分布（擾乱2）（Pt.1～12は換算沖波波高算定用の波高抽出点、砕波位置は枠外）



(a) 擾乱1（台風0418号）



(b) 擾乱2（台風0423号）

図-5 代表地点で算定された波浪諸元

法及びブシネスクモデルで算定された現地海岸周辺の波高分布を図-3及び図-4に示す。ここで、図中の点線は、別途算定した砕波を考慮しないエネルギー平衡方程式法による波高分布と比較して、波高が7%減衰した位置を示し、本研究ではこれを砕波位置とみなす。ただし図-4では、これは描図範囲を超えた沖合に位置したため、図には示していない。また、これらの図の海岸護岸に沿って設けた代表地点（Pt.1～12）は図-1に示す代表測線上にあり、水深はT.P-2.0m程度である。これらの地点で算定された進行波の波浪諸元（有義波高： $H_{1/3}$ 、サーフビート波高： $HL_{1/3}$ 、平均水位上昇量： η_{bar} ）を図-5に示す。

図-3に示す擾乱1では、沖に人工リーフがないPt.7～12にかけて、ブシネスクモデルで算定された有義波高は

エネルギー平衡方程式法によるものよりも大きく、その他の地点で両者はほぼ等しい。これは、人工リーフ上で強制的に砕波する状況は両者で同様に算定されるものの、図-5(a)に示すサーフビートや平均水位上昇による潮位変化が考慮されないエネルギー平衡方程式法では、斜面上の砕波位置が岸側へ移動する状況を再現できていないためであると考えられる。

また、図-4に示す擾乱2では、かなり沖で砕波することに伴いサーフビートや平均水位上昇による激しい潮位変化が生じていると推定されるが、これらを考慮できないエネルギー平衡方程式法では、この影響が人工リーフ背後の不自然な波高分布となって現れている。一方、ブシネスクモデルでは、これらに加え人工リーフ上での再

砕波により平均水位上昇量がさらに増加している様子が、**図-5(b)**から読み取れる。なお、このとき推定されたサーフビート波高及び平均水位上昇量は、大きいところでそれぞれ約3m及び約0.8mに達している。

(2) 修正仮想勾配法

代表測線上に位置する護岸での1次元的な打ち上げ高及び越波量の推定には、玉田ら^{5) 6)}による修正仮想勾配法を適用した。ただし、玉田ら⁹⁾のうち、最大打ち上げ高を用いた越波量の算定式(9)及び(10)には誤りがあり、換算沖波波高に対する最大打ち上げ高の比を1/3乗している部分は、正しくは3/2乗とすべきである。

また、この外力となる換算沖波波高の算定には、通常用いられる砕波位置の有義波高ではなく、ブシネスクモデルまたはエネルギー平衡方程式法で算定される汀線付近(**図-3**及び**図-4**中のPt. 1~12)の有義波高(進行波)から算定したものをを用いた。これは、各擾乱での砕波位置が人工リーフ群の沖にあり、特に擾乱2では、隣接する港湾の沖防波堤よりも沖に位置していることを踏まえ、汀線近傍の人工リーフによる二次的な砕波減衰を含めた海岸地形上の平面的な波浪変形を極力取り込めるよう配慮したものである。なお、この場合、仮想勾配を算定する沖側端は、換算沖波波高を算定した水深T.P.-2.0m程度の代表地点となることに注意されたい。

さらに、汀線付近の有義波高の算定にブシネスクモデルを用いた場合には、同時に算定される平均水位上昇量及びサーフビート波高の1/2(片振幅)を潮位に加算し、換算沖波波高や打ち上げ高を算定することとした。

(3) 越波モデル

対象護岸での打ち上げ高及び越波量の空間分布の推定には、平山・長谷川⁷⁾による越波モデルを備えたブシネスクモデルを用いた。ここで、打ち上げ高は、**図-2(b)**に示す護岸前面で算定される水位変動の一波毎の極大値に相当し、越波量は、護岸天端高を超える水位変動から越流水深を得て、越流公式により算定される。ただし少なくとも、水面の水粒子が飛び出さないことを前提に導出されたブシネスク方程式では越波飛沫等は算定されな

いため、これらの護岸前面水位には、断面模型実験から得た補正係数が乗じられていることに注意されたい。

なお、このとき得られた海岸護岸前面の有義波高の平面分布は、進行波のみを対象とした**図-3(b)**及び**図-4(b)**に示した結果と大差ないことを別途確認している。これは、前面の海浜地形上での砕波・遡上変形による顕著な波高減衰により、海岸護岸からの反射波がほとんど発生しなかったためと推測される。

3. 海岸護岸上の打ち上げ高及び越波量の推定

計算対象とした2つの擾乱において、修正仮想勾配法で推定された各代表測線上の護岸での打ち上げ高及び越波量を、ブシネスクモデルで直接算定されるこれらの空間分布と比較し、計算結果の違いを確認した。さらに、これらの計算精度を検討するために、算定された護岸越波量を車両通行に関する許容越波量(1.0E-05 m³/m/s)と比較し、当時の越波状況の再現性を考察した。

(1) 台風0418号による高波(擾乱1)

このケースでは、修正仮想勾配法、越波モデルによるいずれの推定結果でも、後述する一部の区間を除き護岸越波量はほとんど算定されなかった。そこで、これらで推定される打ち上げ高を**図-6**に示す。ただし、修正仮想勾配法はL1~12で示す代表測線上にのみ適用し、越波モデルで算定される打ち上げ高の沿岸分布は、護岸前面の各計算格子の最大水位のうち、場所毎のばらつきを抑えるために前後2格子で移動平均したものを示した。

各手法による算定結果のうち、エネルギー平衡方程式法またはブシネスクモデルで算定される換算沖波波高を用いた修正仮想勾配法についてみると、堤前の潮位上昇分(平均水位上昇量及びサーフビート波高の片振幅)を考慮していない前者は、後者よりも打ち上げ高が小さい。さらに、後者は、前面に消波工が設置されていない直立護岸(L6~12)では越波モデルで直接算定される打ち上げ高と比較的よく一致するが、消波護岸(L1~5)上の打ち上げ高は越波モデルに比べ過大評価となる。これは、消波工法面を地盤とみなす仮想勾配法では、護岸前面の

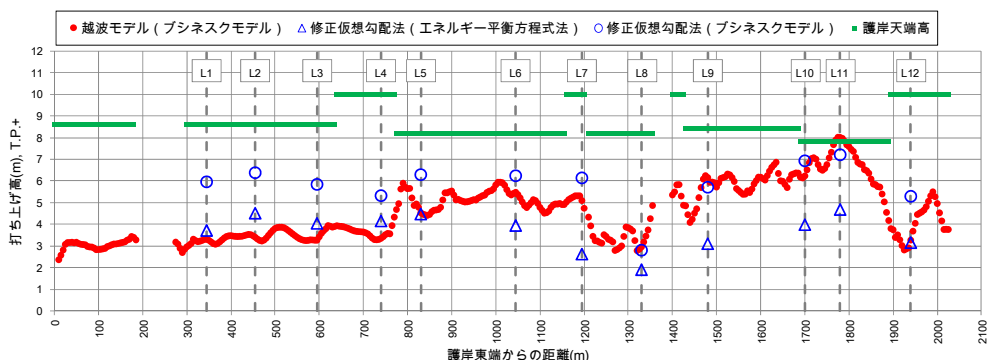


図-6 台風0418号来襲時の高波に対して推定された海岸護岸上の打ち上げ高

消波工による波浪減衰を考慮できないためと考えられる。

また、このときの高波により片側車線規制が開始されたL11付近に着目すると、越波モデルでは、この地点において護岸天端高を超える打ち上げ高とともに許容越波量 $1.0E-05 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ を僅かに上回る護岸越波量が算定され、当時の越波状況をよく再現していることが確認された。

(2) 台風0423号による高波（擾乱2）

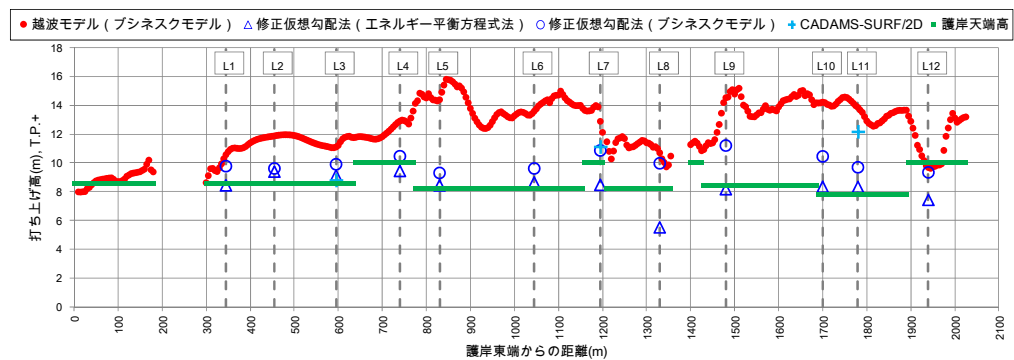
修正仮想勾配法、越波モデルでそれぞれ推定された打ち上げ高及び護岸越波量の沿岸分布を図-7に示す。このケースでは、特に越波モデルで推定された護岸越波量は、当時の護岸断面に対しほぼすべての護岸で車両通行に係る許容越波量を大きく上回る結果が得られた。これらは、ちょうどL1～12の区間に相当する1.4kmに渡る背後道路で越波による路面冠水が生じ、全面通行止めが実施されていた当時の状況によく符合している。

一方、修正仮想勾配法で推定された代表測線上の打ち上げ高及び護岸越波量のうちL1～5の区間では、いずれも越波モデルによるものを下回っていた。この原因には、このときの高波浪に伴う潮位上昇により護岸前面の消波工がほぼ水没した状態にあり、消波工法面を仮想勾配の一部とみなすことの影響が小さかったことに加え、堤前波の周期を沖波と同じに仮定したことにより波形勾配を過小評価したことなどが考えられる。また逆に、堤脚部が消波されていないL6～12の区間では、ブシネスクモデルと組み合わせた修正仮想勾配法で推定された打ち上げ

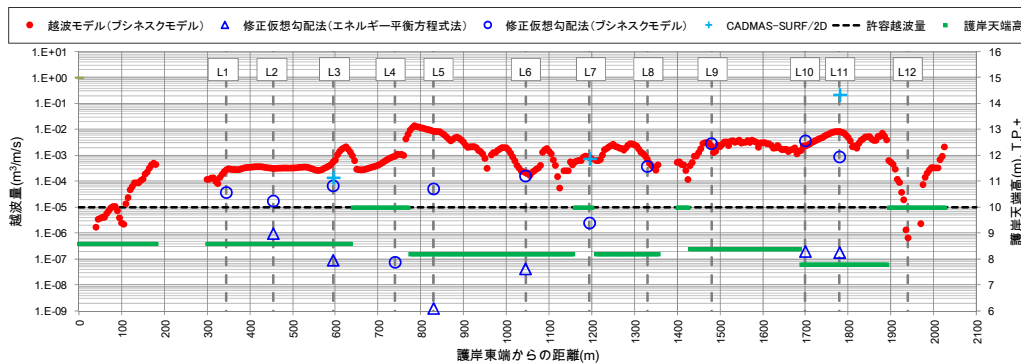
高及び護岸越波量は、越波モデルによる算定結果と比較的によく一致した。ただし、前面の比較的急な海底勾配上で碎波し、越波飛沫が生じ易いと考えられるL6～7及びL9～11では、これらを見積もるために補正係数が乗じられた越波モデルによる打ち上げ高は、修正仮想勾配法による最大打ち上げ高に比べ過大に算定されている。

そこで、これらの算定精度をより詳細に検討するために、L3, L7, L11の測線上のT.P.-8.0m以浅の断面地形（図-1を参照）を対象としてCADMAS-SURF/2D[®]による越波計算を実施した。ただし、入射波高の検定地点が碎波帯内に位置するためその沖での碎波変形が再現されていないことに加え、平面波浪場の影響が考慮されないために、予備計算で算定された汀線付近の代表地点Pt. 3, Pt. 7, Pt. 11でのサーフビート波高及び平均水位上昇量はブシネスクモデルに比べかなり過小評価された。そこで、これらの差： Δh を造波境界での初期水位に加算し、修正仮想勾配法と同様、汀線付近での潮位上昇量を予め考慮することとした。

初期潮位補正後にCADMAS-SURF/2Dで算定された汀線付近の代表地点での有義波高及び潮位上昇量は、いずれもブシネスクモデルによるものと比較的よく一致した（図-8）。ただし、Pt11で算定されたCADMAS-SURF/2Dによる有義波高が非常に大きいのは、行当岬側へ向かう屈折変形が考慮されないためと考えられる。また、図-7中に+印で示してあるCADMAS-SURF/2Dで算定された打ち上げ高及び護岸越波量をみると、L11を除き、飛沫を伴う越波

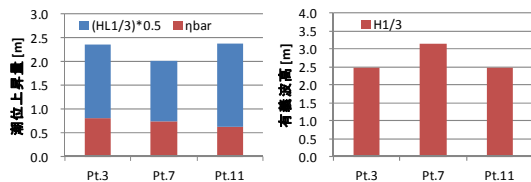


(a) 打ち上げ高

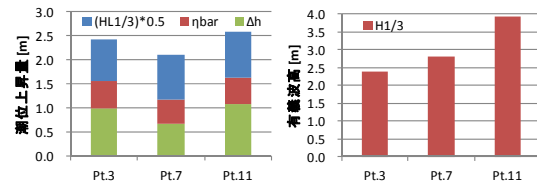


(b) 護岸越波量

図-7 台風0423号来襲時の高波に対して推定された海岸護岸での打ち上げ高と越波量



(a) ブシネスクモデル



(b) CADMAS-SURF/2D

図-8 ブシネスクモデル及びCADMAS-SURF/2Dで算定された代表地点での波浪諸元の比較

現象を直接再現したその計算結果は修正仮想勾配法による算定結果に近く、またこれを上回る場合にも、越波モデルによる算定結果とよく一致していることがわかる。したがって、前述の議論と合わせて考えると、海岸護岸前面の平面波浪場とともにブシネスクモデルで直接算定される打ち上げ高及び護岸越波量の沿岸分布は、概ね妥当な結果を与えていると判断できる。

(3) 高波災害に備えた今後の課題

本研究で対象とした室津港海岸では、港湾外郭施設の整備に伴う海岸侵食及びそれによる護岸越波量の増大が懸念されている。そこで、別途実施された将来港形に対する汀線・海底地形変化予測結果をもとに、上記のように計算結果の妥当性が確認されたブシネスクモデルを用いて、将来の海岸地形に対する護岸越波量の空間分布を推定した。その結果、多くの区間では現状に比べ打ち上げ高・越波量が大きく変化する様子は確認されなかったが、汀線前進が予測された室津港側の区間では打ち上げ高・越波量が大きく減少するのに対し、汀線後退が予測された一部の区間では現状に比べ打ち上げ高・越波量が増大することが確認された。したがって、この区間では、海岸護岸と国道との間に存在する緩衝帯を将来にわたって確保することが求められている。

4. おわりに

本研究では、波の砕波・遡上に加え越波計算が可能な平面2次元ブシネスクモデルを用い、越波による通行障害が生じた現地海岸における当時の越波状況を再現するとともに、その妥当性を道路通行規制実績及び代表断面に適用した修正仮想勾配法及びCADMAS-SURF/2Dによる算定結果と比較し検証した。この結果、越波モデルを備えたブシネスクモデルは、断面計算では扱えない平面的な波浪変形や堤前水深の変化をも考慮しつつ、護岸越波量より詳細な分布を直接算定できることがわかった。

水塊が水面を飛び出す越波現象は本来、水の波の伝播・変形過程を記述するブシネスク方程式の適用範囲外であるが、越波計算が可能なブシネスクモデルでは、越流公式を応用した境界処理法を導入することによりこれを克服している。しかし、越流水深を与える護岸前面水位には断面模型実験から得た補正係数が乗じられている

ため、適宜、修正仮想勾配法やCADMAS-SURF/2D等による算定結果との比較を行いながら適用事例を蓄積し、汎用性を高めていくことが望ましい。

なお、わが国沿岸においては、背後に道路や住宅地が迫り、越波量の空間分布を適切に評価しておくべき海岸護岸は決して少なくない。また、地球温暖化に伴う海面上昇とも相まって、面的防護を含む海岸の多様な越波対策の検討などへの活用が期待される⁹⁾。

謝辞：室津港海岸の地形や堤防の構造諸元、及び当時の越波による通行障害状況の把握にあたっては、国土交通省四国地方整備局の高松港湾空港技術調査事務所、高知港湾・空港整備事務所ならびに土佐国道事務所のご協力を頂きました。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 四国地方整備局災害対策本部：台風 23 号の影響による被害状況（第 4 報），2004。
(<http://www.skr.mlit.go.jp/bosai/sikoku/sokuhou/h16sokuhou.html>)
- 2) 平山克也，平石哲也：ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.11-15，2004。
- 3) 平山克也，岩瀬浩之，加島寛章：任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.11-15，2010。
- 4) 平山克也：透水層を用いた任意反射境界処理法の高精度化と遡上計算への適用，海洋開発論文集，第 22 巻，pp.241-246，2006。
- 5) 玉田 崇，間瀬 肇，安田誠宏：複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.62-65，No.1，pp.936-940，2009。
- 6) 玉田 崇，間瀬 肇，安田誠宏：波の打上げを考慮した越波流量算定法の提案，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.926-930，2010。
- 7) 平山克也，長谷川巖：ブシネスクモデルによる護岸越波・浸水過程に関する再現計算，土木学会論文集 B3（海洋開発）特集号，Vol.67，No.4，2011。
- 8) 財団法人沿岸開発技術研究センター：数値波動水路（CADMAS-SURF）の研究開発，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，457p，2001。
- 9) 加島寛章，平山克也：排水孔付き既設護岸背後の長周期うねりによる越波浸水・排水過程の数値計算，土木学会論文集 B3（海洋開発）特集号，Vol.68，No.4，2012。