

不規則波動場を対象とした平面・断面2次元 モデルの連結による越波解析の有用性

AVAILABILITY OF WAVE OVERTOPPING ANALYSIS USING HORIZONTAL
AND VERTICAL TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL WAVE MODELS
IN IRREGULAR WAVE FIELD

川崎浩司¹・菊雅美²

Koji KAWASAKI and Masami KIKU

¹正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-3(651))

²学生会員 修(工) 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

It would be difficult to compute wave overtopping phenomena using a 3-D numerical wave model because wave overtopping analysis requires high computational efforts. The objective of this study is to investigate the availability of wave overtopping analysis using the latest version of a 2-D horizontal numerical model based on modified Boussinesq equation 'NOWT-PARI' and a 2-D vertical numerical wave flume based on a VOF method 'CADMAS-SURF' in a irregular wave field. The numerical simulations show that the coupled model has the computational capability for wave overtopping phenomena considering not only wave shoaling and breaking but also horizontal wave deformation such as wave refraction and diffraction.

Key Words : CADMAS-SURF, NOWT-PARI, wave overtopping, wave deformation,
irregular wave field, reef topography

1. はじめに

近年, 実務において断面2次元数値モデルが積極的に利用されている. 特に, VOF法に基づく数値波動水路 CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure)^{1), 2)}は, 海岸構造物の耐波設計に適用可能なモデルとして開発され, 磯部ら³⁾をはじめとする数多くの研究事例によって, 進行波の浅水変形や砕波・越波現象に対する妥当性が確認されている. しかし, 実際の海域は複雑な波動場となっており, より詳細な解析を行うには, 護岸周辺の波の浅水・砕波変形だけでなく, 沖合での波の屈折・回折も含めた平面的な波浪変形を考慮する必要がある. そこで, 3次元波動場を直接的に計算する3次元モデルの開発が進められている(例えば, 有川ら⁴⁾, 川崎・袴田⁵⁾). ただし, 3次元数値モデルを実海域に適用するにあたっての当面の問題として, 計算コストが挙げられる. 特に, 越波現象の解析には多大な計算時間が必要となるため, 現時点において実務への3次元数値モデルの適用は難しい. 一方, 修正ブシネスク方程式に基づく平面2次元数値モデルNOWT-PARI (Nonlinear Wave Transformation model by Port and Airport Research Institute)⁶⁾は, 波の浅水変形・屈折・回折を同時に解析可能であり, 波高分布などの算定に対して高い

実績を有している. さらに, 平山ら⁷⁾は, ブシネスクモデルに越流公式を導入することで, 護岸背後への越流量が算出可能になることを示している. ただし, 飛沫を含む越波現象を直接的に解けないため, 越波解析に関して課題が残されている.

そこで, 川崎ら⁸⁾は, 平面的な波浪変形を解析可能なNOWT-PARI Ver.4.6c4と複雑な水面挙動を高精度に解析できるCADMAS-SURFを連結することで, より実現象を反映した護岸の実務耐波設計が可能になると考え, 沖合の波浪変化を考慮した護岸周辺の越波解析を試みた. その結果, 護岸への入射波向きに応じた断面計算を実施することで, 波の浅水変形・屈折・回折の影響を含めた砕波・越波計算が可能になることを示した. しかし, 作用波が規則波であったこと, 護岸への入射波向きの推定に波高分布を用いていたことなど, 課題が残されていた.

上述の背景に基づき, 本研究では, 不規則波波動場を対象に, 公開されている最新版のNOWT-PARI Ver.4.6c7aとCADMAS-SURF Ver.5.1の連結による越波解析を行い, その有用性について検討する.

2. NOWT-PARI による波浪変形計算

(1) 計算領域および計算条件

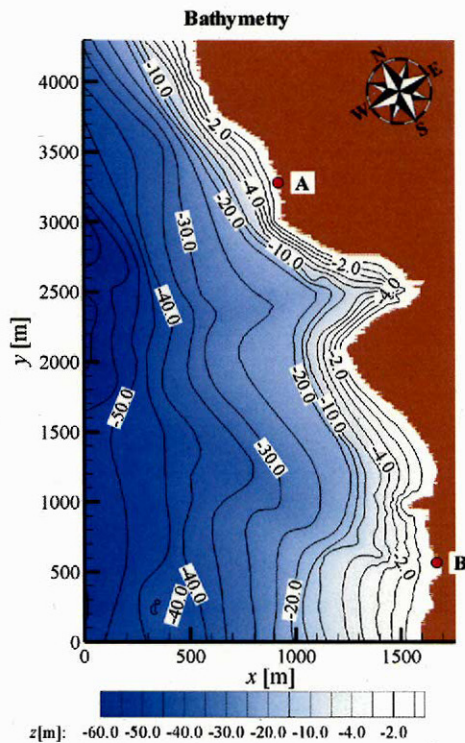


図-1 計算領域の水深分布

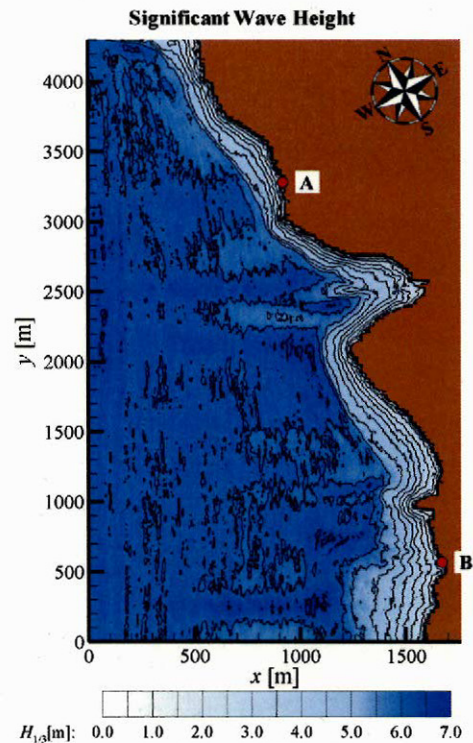


図-2 有義波高分布

表-1 NOWT-PARIの計算条件

時間	時間間隔 Δt	0.010s
	終了時間	1800.0s
格子	x方向格子数	406
	y方向格子数	1006
	格子間隔 $\Delta x, \Delta y$	5.0m
波浪	有義波高 $H_{1/3}$	6.58m
	有義波周期 $T_{1/3}$	9.2s
	波向	0°
	成分波数 NS	100
水深	方向集中度 $S_{\max}$	∞ (999.0)
	入射境界水深 h	52.24m
	潮位 WL	1.20m
	潮位加算後の最小水深 HLIMIT2	1.0m
	潮位加算後の平均全水深の最小値 HLIMIT3	0.01m
	砕波限界流速波速比 γ_b	0.64

本研究では、天然リーフが発達し、複雑な波動場となっている沖縄本島北部海域の実海底地形を計算対象とした。図-1に、NOWT-PARIにおける計算領域の水深分布を示す。当該海域では、岸側に浅水域が広く分布し、沖側に向かって急激な水深変化を伴う地形となっている。

表-1にNOWT-PARIにおける計算条件を示す。本計算では、対象域において過去に越波災害が発生したときの波浪条件を参考に入射波を設定した。不規則波のスペクトルタイプは修正Bretschneider・光易型とし、有義波高 $H_{1/3}=6.58\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=9.2\text{s}$ の不規則波を、図-1に示す造波境界($x=0.0\text{m}$)から波向0°の一方向波として入射させた。また、試行

計算の結果から、潮位換算後の最小水深HLIMIT2と平均全水深の最小値HLIMIT3を、それぞれ1.0mおよび0.01mとした。計算領域の外周には、境界での反射波を抑えるためのエネルギー吸収帯を設定した。ただし、海域と陸域の境界は完全反射とした。

(2) 沖合から護岸までの波浪変形特性

図-2に、計算領域における有義波高 $H_{1/3}$ の空間分布を示す。同図から、水深が10mより浅い岸側では、砕波の影響により波高が急激に減衰していることがわかる。また、平均水位 η の空間分布を示す図-3から、有義波高が減衰している岸側の領域において平均水位が顕著に上昇し、wave setupが認められる。さらに、砕波点近傍の水深10mより沖側では、wave setdownの発生もみられる。図-4は、微小振幅波理論に基づき算出された波速ベクトルおよび平均波向角の空間分布である。なお、平均波向角は、x軸から反時計回りを正と定義している。同図から、岸側の海底地形の影響によって、浅海域では波速ベクトルが変化している様子がみられる。特に、 $x=1500\text{m}$ 、 $y=2500\text{m}$ 付近の入江において、入射波が大きく屈折していることがわかる。以上から、NOWT-PARIは沖合から岸側までの波の屈折や回折を含む波浪変形を適切に計算可能であると定性的に判断される。

3. CADMAS-SURFによる越波解析

(1) 計算条件の設定

CADMAS-SURFでは、NOWT-PARIの計算結果に基づいて、台風の接近・通過によって過去に越波被害を受けた2箇所を対象に、護岸周辺の越波計算を

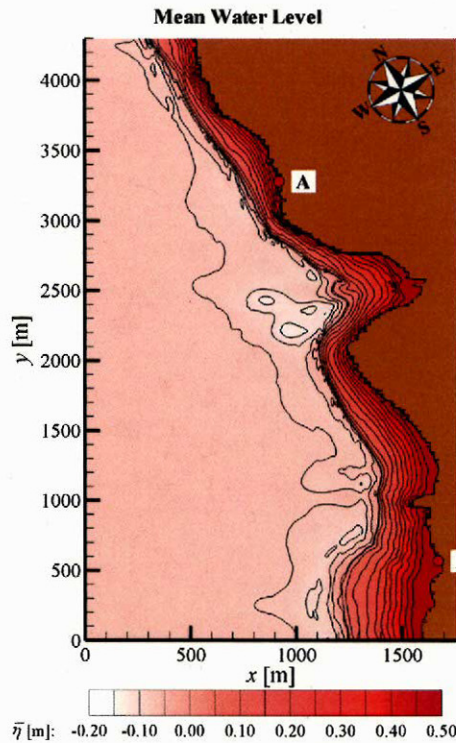


図-3 平均水位分布

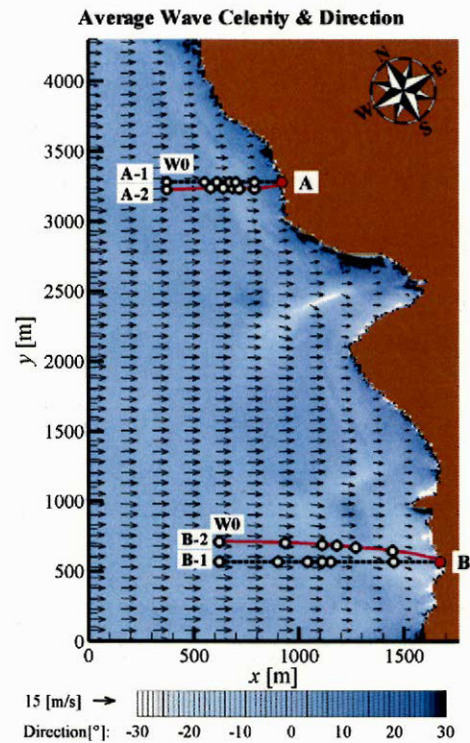


図-4 波速ベクトルおよび波向角

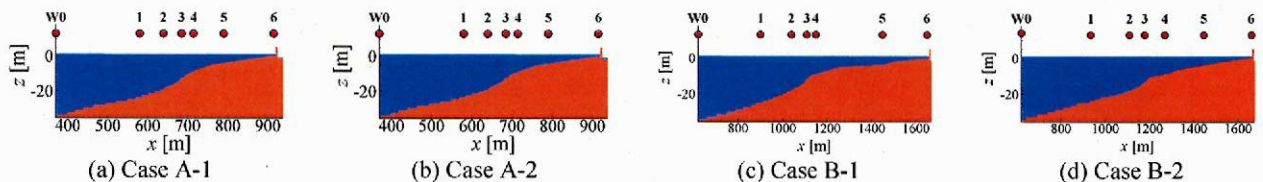


図-5 CADMAS-SURFによる計算領域

表-2 CADMAS-SURFの計算条件

		Case A-1	Case A-2	Case B-1	Case B-2
計算時間	時間間隔 Δt	0.005s			
	終了時間	1700.0s			
計算領域	格子間隔	$\Delta x = 1.25 \sim 1.75\text{m}$, $\Delta z = 0.30 \sim 1.60\text{m}$			
	護岸天端高*	EL+5.10m		EL+4.93m	
波浪条件	水深 h	35.38m	35.37m	35.26m	34.57m
	潮位 WL	1.20m	1.20m	1.20m	1.20m
	有義波高 $H_{1/3}$	6.23m	6.28m	6.28m	6.30m
	有義波周期 $T_{1/3}$	9.09s	9.21s	9.23s	9.15s

* ELは対象地域の標高基準海面

行った。対象地点を図-1に示す。同図から、Site A 周辺は等深線が密となっており、水深が急変する地形である。一方、Site B周辺はSite Aよりも比較的緩やかな地形となっている。

図-4の平均波速分布に基づき、Site AおよびSite Bへの入射波向線を求めた結果を、同図中に実線で図示する。両箇所とも、海底地形による屈折などの影響により、NOWT-PARIの造波境界に対して直角ではない波向線を有した波が入射していることがわかる。したがって、NOWT-PARIによる計算結果をCADMAS-SURFに接続する際には、護岸に入射する波向線を考慮して断面を設定する必要があると考えられる。

そこで、本計算では、護岸への入射波向線の影響について検討するため、造波境界に対して直角に断面を取ったCase A-1、Case B-1と、図-4で算出した入射波向線に応じて断面を設定したCase A-2、Case B-2について、それぞれ越波計算を行った。図-5は、各ケースにおける計算領域である。計算断面の海底地形は、NOWT-PARIで用いた海底地形データから該地点の水深を出力することによって作成した。計算開始地点は、全ケースにおいて地形変化が安定する水深 $h \approx 35\text{m}$ の地点とした。図-4および図-5に、CADMAS-SURFでの各断面の計算開始地点W0を示す。また、W1～W6は水面変動量の算出位置であり、各断面において水深が $h \approx 25, 20, 15, 10, 5\text{m}$ とな

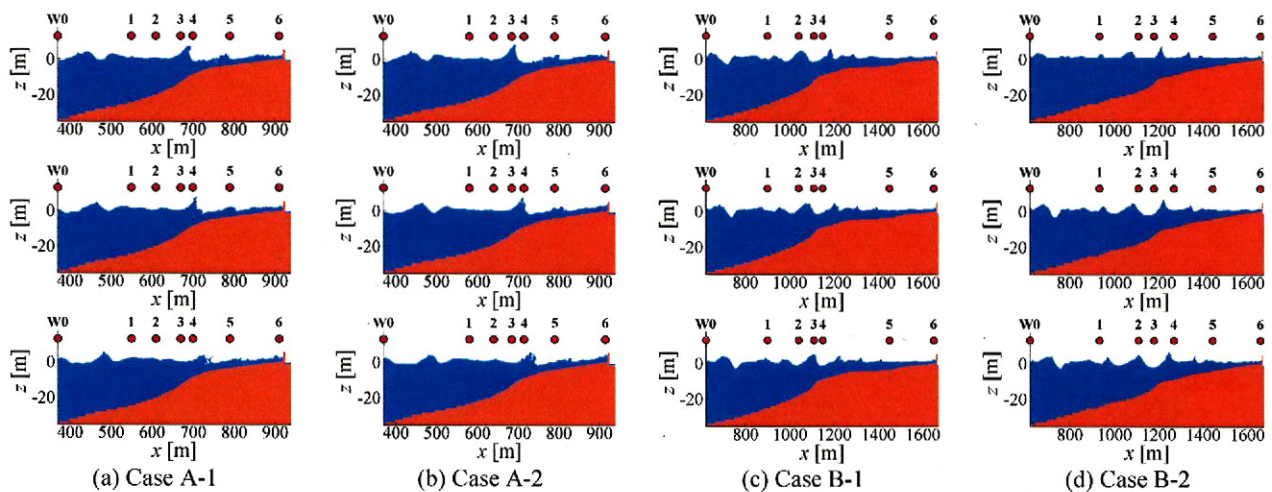
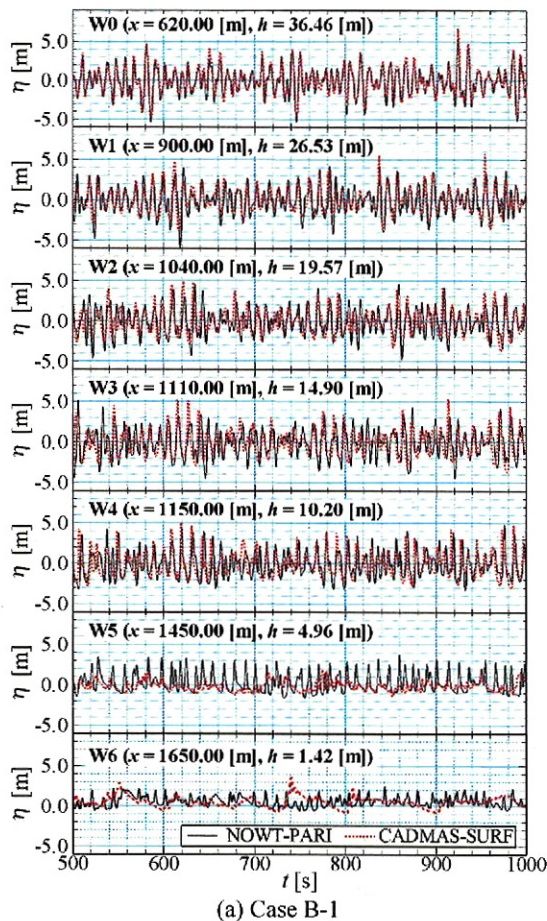
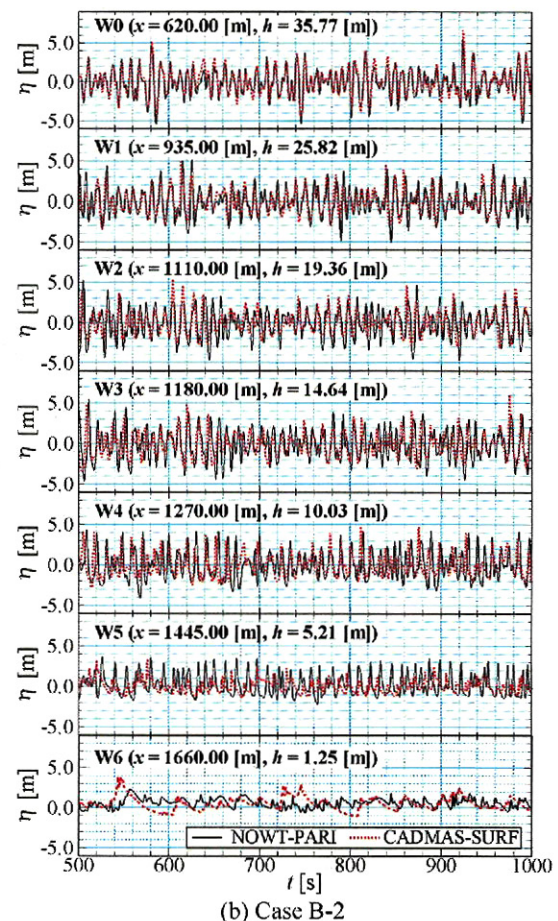


図-6 水面波形の空間変化



(a) Case B-1



(b) Case B-2

図-7 水位の時系列変化の比較

る地点および護岸前面とした。岸には、現地護岸の天端高を有する直立護岸を設置した。

表-2に計算条件を示す。断面計算を行うには、流速の鉛直分布が必要となるものの、平面計算で得られる流速は断面平均流速である。そこで、本研究では、NOWT-PARIで得られたW0における水面変動量 η のフーリエ変換から、各周波数の振幅と位相角を算出した。そして、微小振幅波理論を用いた波の重ね合わせから、CADMAS-SURFの造波境界における水位 η 、流速 u 、 w の鉛直分布を求めた。なお、両モデルの接続はone-wayとした。

CADMAS-SURFでは、護岸背後に越波升を配置し、VOF関数 F 値の面積積分値から越波量 Q の時系列変化を算出した。さらに、第1波が護岸に到達してから計算終了までを越波量の計測時間とし、累積越波量を計測時間で除して越波流量 q を算出した。

(2) 直立護岸周辺の越波解析

水面波形の空間変化を図-6に例示する。全断面において、水深が10mから5mへ変化するW4~W5にて大規模な砕波が生じ、その後も砕波を繰り返しながら入射波が岸側へ進行している様子が確認できる。

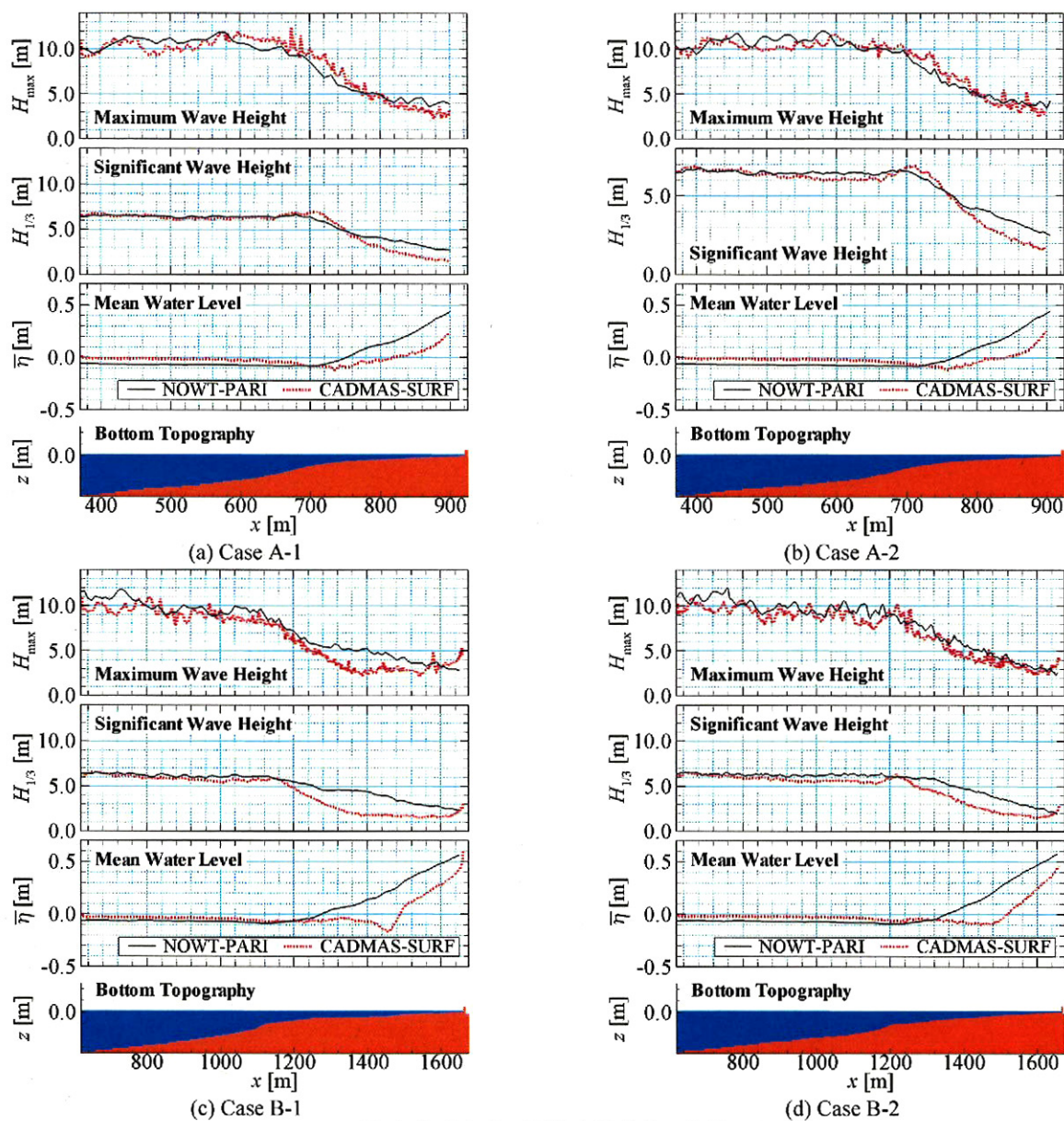


図-8 波高および平均水位分布の比較

表-3 造波開始地点の水位変動に対するNOWT-PARIとCADMAS-SURFの相互相関係数

Case	相互相関係数 R
A-1	0.961
A-2	0.961
B-1	0.970
B-2	0.964

図-7に、NOWT-PARIおよびCADMAS-SURFによって計算された水位 η の時系列変化の比較を示す。なお、ここでは、紙面の都合上、Case B-1およびCase B-2の結果を例示する。図-7(a)および(b)から、計算開始地点W0において、CADMAS-SURFはNOWT-PARIの水面変動量をよく表現している。W0におけるNOWT-PARIとCADMAS-SURFの水位変動について相互相関係数を求めたところ、表-3に示すように、全てのケースにおいて0.96以上となった。したがって、本研究で行った両モデルの接続方法により、NOWT-PARIで計算された不規則な水面

変動をCADMAS-SURFで再現できることが定量的にも確認された。また、図-7から、Case B-1、Case B-2ともに、W4 ($h \approx 10\text{m}$) までは両者の振幅および位相はほぼ一致している。しかし、NOWT-PARIにおいて波向角が 0° ではなくなる水深10m以浅(W5およびW6)では、両者の水面変動量に大きな差異がみられる。特に、CADMAS-SURFでは、護岸前面W6において長周期波成分の卓越が認められる。NOWT-PARIでは、経験値に基づいて算出される渦動粘性係数を導入することで、砕波後の波高減衰を計算している。一方、CADMAS-SURFでは、渦によって波のエネルギーが逸散するため、砕波に伴う波高の減衰は付加的な項を導入することなく表現される。したがって、砕波に対する計算手法の違いにより、砕波後の水面変動量に大きな差異が生じたと考えられる。

砕波に起因する両モデルの差異は、図-8に示す波高および平均水位の空間分布の比較からも明らかで

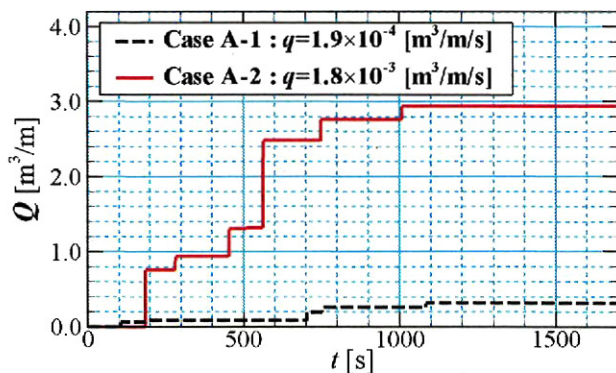


図-9 Site Aにおける越波量の時系列変化

表-4 各断面における越波流量

Case	越波流量 q [m³/m/s]
A-1	1.9×10^{-4}
A-2	1.8×10^{-3}
B-1	5.2×10^{-4}
B-2	1.8×10^{-5}

ある。特に、砕波後の有義波高 $H_{1/3}$ および平均水位 $\bar{\eta}$ の空間分布に大きな差異が生じていることが確認できる。この要因として、図-7に例示したように、CADMAS-SURFにおいて低周波成分が卓越したことが挙げられるものの、砕波後に生じる両者の差異については、今後、詳細に検討する必要がある。以上から、NOWT-PARIの計算結果に基づいてCADMAS-SURFで護岸周辺の越波解析をする際には、砕波帯より沖に両モデルの連結地点を設定することが推奨される。一方、図-8(b)および図-8(d)から、Case A-2およびCase B-2において、NOWT-PARIとCADMAS-SURFで算出された最大波高 $H_{\max}$ はほぼ一致している。護岸への入射波向線を考慮したことにより、考慮しない場合よりも屈折の効果が反映できたためと推察される。

また、CADMAS-SURFでは断面2次元場における越波計算が可能であるのに対し、本研究で用いたNOWT-PARI Ver.4.6c7aでは越波・越流計算が行えないため、入射波は護岸にて全反射する計算条件となっている。したがって、砕波や屈折による波浪変形だけでなく、護岸背後の取り扱い方も両者の計算結果に差異が生じる要因であると考えられる。以上から、沖合の波浪変形計算にはNOWT-PARIを、護岸周辺の越波計算にはCADMAS-SURFを用いることにより、両モデルの特性を活かした越波解析が可能になると判断される。

図-9は、CADMAS-SURFによって計算されたSite Aにおける越波量 Q の時系列変化である。同図から、Case A-1に対し、Case A-2では1回あたりの越波量が大きいことがわかる。また、Site Aでは、護岸への入射波向線を考慮したCase A-2の方が越波流量 q は多かったのに対し、Site Bでは、表-4に示すように、Case B-1の方が大きくなった。このことは、越波流量に及ぼす護岸への入射波向線の影響が大きいことを示唆するものである。したがって、平面計算による波浪変形を反映させる方法のひとつとして、

沖合から護岸への波向線に基づいた断面計算を行うことにより、より実現象を反映した越波計算が可能になると考えられる。

4. おわりに

本研究では、断面2次元数値波動水路CADMAS-SURFと平面2次元ブシネスクモデルNOWT-PARIを用い、3次元数値モデルの代替として、沖合の波浪変化を考慮した護岸周辺の越波解析を試みた。その結果、平面および断面2次元モデルを有効活用することは、波の浅水変形・屈折・回折の影響のみならず、砕波・越波現象も良好に考慮することができる上、計算負荷が少ないため、越波対策護岸の耐波設計を行う際に役立つことを示した。しかし、護岸への入射波向線による断面の決定方法や、本計算で得られた波浪変形および越波量に対して、現地観測や水理模型実験との比較による定量的な検証には至っていないため、今後の検討課題である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究(A)（研究代表者：名古屋大学・川崎浩司，課題番号：21686046）および特別研究員奨励費（研究代表者：名古屋大学・菊 雅美，課題番号：2110250）であることをここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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.12，457 p，2001.
- 2) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，沿岸技術ライブラリーNo.30，306p，2008.
- 3) 磯部雅彦，高橋重雄，余 錫平，榊山 勉，藤間功司，川崎浩司，蔣 勤，秋山 実，大山洋志：数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF 法基本プログラムの作成—，海洋開発論文集，第 15 巻，pp. 321-326，1999.
- 4) 有川太郎，山田文則，秋山 実：3 次元数値波動水槽における津波波力に対する適用性の検討，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 46-50，2005.
- 5) 川崎浩司，袴田充哉：3 次元気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の開発と波作用下での漂流物の動的解析，第 54 巻，海岸工学論文集，pp. 31-35，2007.
- 6) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1036，162 p，2002.
- 7) 平山克也，長谷川準三，長谷川巖：越流を考慮したブシネスクモデルによる不規則波の越波量に関する数値計算，海岸工学論文集，第 53 巻，pp. 706-710，2006.
- 8) 川崎浩司，菊 雅美，大久保陽介：越波対策護岸の実務耐波設計を目指した平面・断面 2 次元モデルの有効活用の試み，海洋開発論文集，第 24 巻，pp. 1005-1010，2008.