

越波排水路を有する低天端護岸における越波現象に対する 数値波動水路の適用性

Applicability of Numerical Wave Flume for Wave Overtopping Phenomenon on
Stepped Seawall with Drainage

有光 剛¹・安岡恒人²・川崎浩司³

Tsuyoshi ARIMITSU, Tsunehito YASUOKA and Koji KAWASAKI

A stepped seawall with a large drainage is expected to reduce both wave overtopping to coastal land areas and wave reflection toward the offshore direction. For the economical design of such a seawall, it is important to estimate wave overtopping phenomenon as well as the adequate volume of the drainage. This paper aims to investigate wave overtopping process as well as overtopping quantity on the stepped seawall with the drainage by conducting hydraulic experiments and numerical simulations with a numerical wave flume CADMAS-SURF. As a result, it was confirmed that wave overtopping characteristics depend on wave condition and the computational results were in good agreement with the experimental ones. The effect of optimal parameters in the CADMAS-SURF on wave overtopping was also examined.

1. はじめに

近年、港湾施設や汽力発電所は、沖合人工島に代表されるように、高波浪が直接来襲する外洋に面した大水深域に展開されつつある。このような施設では、背後地の安全性確保のための越波量の低減と費用削減のための構造物のスリム化が同時に要求される。これらの要求を満足する護岸断面の一つとして、越波排水路を有する低天端護岸が挙げられる。この形式の護岸では、天端上の波浪変形、排水路壁への水塊の衝突および越波といった複雑な水面挙動により越波量の予測が困難で、その設計のためにはこれまで主に水理模型実験が実施されてきた(例えば、筒井ら(1997))。

一方、水理模型実験に代わる耐波設計ツールとして数値計算の役割が高まりつつあり、後藤ら(2006)はこのような複雑な形式の護岸に対する越波過程に対して MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法の適用を試みている。これに対して、榊山ら(1998)、佐貫ら(2001)、川崎ら(2007)は Euler 型モデルの代表的手法でもある VOF (Volume Of Fluid) 法を用いた越波の数値計算を行っている。しかしながら、VOF 法を用いたこれらの研究は直立壁や消波ブロック被覆堤のように比較的単純な護岸形状を対象としており、越波排水路を有する低天端護岸のように複雑な断面形状の海岸構造物に対する越波過程にまで踏み込んで検討した例はほとんどないのが現状である。

本研究では、数値波動水路 CADMAS-SURF (磯部ら, 1999; (財)沿岸開発技術研究センター, 2001) を用いて越波排水路を有する低天端護岸周辺の越波現象を計算し、

その適用性・再現性を水理模型実験により検証する。

2. 水理模型実験の概要

図-1 に、本研究で対象とした越波排水路を有する低天端護岸の断面を実スケールで示す。ケーソン前面壁から 20 m 岸側に、水路幅 15 m の越波排水路が設置され、その壁の高さは沖側で EL+12.5 m、岸側で EL+13.0 m である。

本研究では、図-2 に示す造波板から 13.7 m の水平床と 17.5 m の 1/50 一様勾配斜面を有する長さ 33 m の二次元造波水路を用いて水理模型実験を実施した。なお、一様水深部における静水深は 0.7 m で、模型縮尺は 1/60 とした。

沖側から護岸周辺までの波浪変形特性を把握するため、図-2 に示すように、容量式波高計を 6 本設置し、最も沖側の波高計で測定される波高を沖波波高とした。図-3 (a) に水理模型実験で用いた護岸模型の概要を示す。2

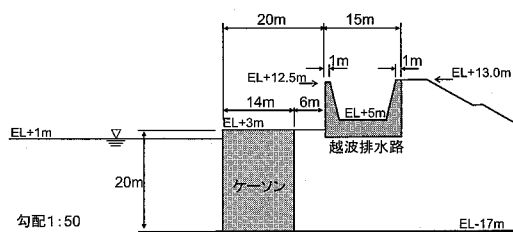


図-1 越波排水路を有する低天端護岸の断面図

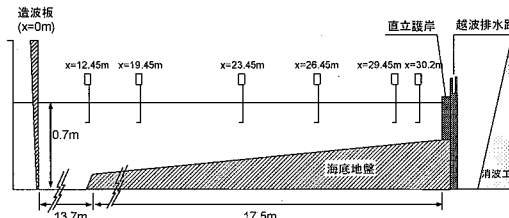


図-2 二次元造波水路を用いた水理模型実験の概要図

1 正会員 博(工) 関西電力(株)電力技術研究所
2 正会員 関西電力(株)電力技術研究所
3 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

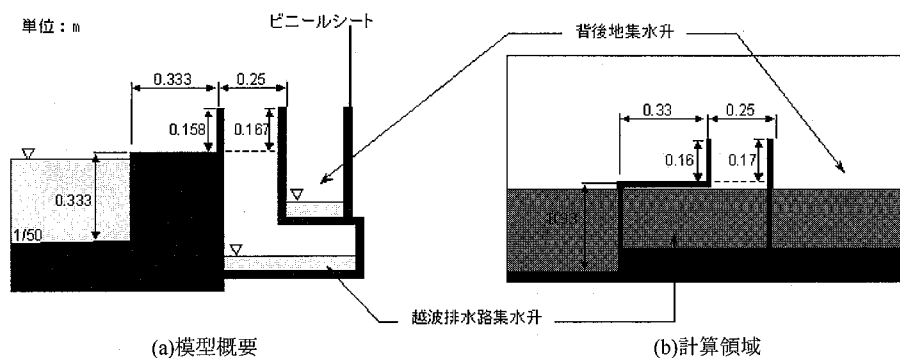


図-3 護岸周辺の模型概要と計算領域

表-1 計算条件

沖波波高	17 cm, 19 cm
周期	1.9 s
水深	70 cm
Δx	5 cm ($x=0 \sim 20$ m)
	3 cm ($x=20 \sim 26$ m)
	1 cm ($x=26 \sim 32.3$ m)
Δz	1 cm
計算時間	33 s
ボラス下限値	0.001
造波モデル	造波境界条件
粘性	なし
流速・圧力境界条件	スリップ
VOF 関数 F 境界条件	フリー
計算スキーム	表-2 参照
気泡上昇速度・水滴落下速度	表-2 参照

個の集水升を岸沖方向に並列に設置し、越波排水路への流入量と越波排水路背後地への流入量をそれぞれ測定した。集水升には蓋を設けて、波高が安定してからの5波のみを越波させ、造波終了後に増加した水量を計測した。集水升を越えて飛散する飛沫については、岸側の越波排水路背後地用の集水升に含まれるように、越波升背後にビニールシートを展張した。なお、同様の護岸形状に対する既往の実験（後藤ら，2006）とは、海底形状と一様水深部の静水深が異なっている。入射条件は沖波波高 $H=17$ cm, 19 cm の2ケースとし、周期 $T=1.9$ s の規則波を造波させた。また、同一条件に対して、実験を5回繰り返し実施した。

3. 低天端護岸に対する越波再現計算の概要

数値波動水路 CADMAS-SURF を用いて、越波排水路を有する低天端護岸の越波再現計算を実施した。表-1 に計算条件を示す。計算領域は実験と同様とし、格子間隔は鉛直方向に 1 cm、水平方向に可変メッシュを用いて沖側から 5 cm, 3 cm, 1 cm と変化させた。特に護岸周辺の越波現象を高精度に解析するため、護岸近傍の格子間隔は $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ とした。護岸周辺の計算領域を図-3(b)に示す。実験と同様に、2つ集水升を岸沖方向

表-2 再現計算ケースと各種パラメータ

Case	波高	DONOR	表面セル流速境界処理	気泡上昇速度、水滴落下速度
1-1	17 cm	0.2	勾配ゼロ	0.2 m/s, 自由落下 + 斜面
2-1	19 cm	0.2	勾配ゼロ	0.1 m/s, 自由落下 + 斜面

に並列に設置した。

各波高に対する再現計算ケースを表-2 に示す。越波量の算定には、集水升内の水量の増分から算定する方法、検査断面を通過する流量フラックスから算定する方法が考えられる（川崎ら，2007）。前者は、集水升内の VOF 関数 F 値の面積積分値の増分を越波量とし、後者は集水升の沖側の鉛直断面を通過する流量フラックスの鉛直積分値を越波量とする方法である。ここでは、両ケースとも越波量を集水升内の VOF 関数 F 値により求めた。なお、越波量算定方法および CADMAS-SURF の各種パラメータ（差分スキーム、表面セル流速の境界処理、気泡・水滴処理）が計算結果に及ぼす影響については後述する。

4. 低天端護岸に対する越波再現計算結果

(1) 天端上の水塊挙動

図-4 に、水理実験と数値計算の水面瞬間挙動を比較して示す。 $H=17$ cm では水塊の下方が先行して天端上を滑るように進行するのに対して、 $H=19$ cm では上方の水塊の勢いが強く、高く切り立った形状の水塊が排水路壁へ衝突する。このように、護岸天端に乗り上げた来襲波がケーソン上を進行する形態は波浪条件によって大きく異なることがわかる。また、天端上の水塊の挙動については、実験と計算の対応は良好であるといえる。

(2) 水位変動および波高分布

図-5 には前節と同じケースに対する波高分布を示す。計算値は護岸近傍で実験値より若干小さくなる傾向はみられるものの、沖から岸へかけての波浪変形を精度良く再現している。両ケースの 30.2 m 地点（護岸より 1 m 沖）における水位変動を図-6 に示す。 $H=19$ cm の場合に波峰で実験値と若干の差がみられるものの、両条件とも計

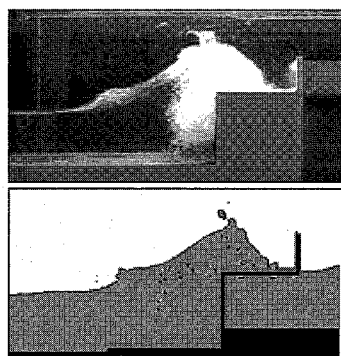
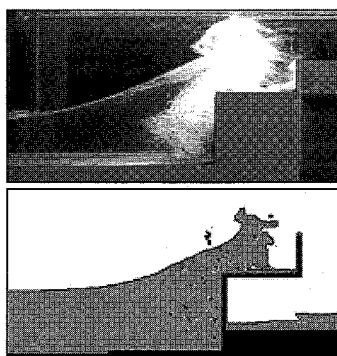
(a)Case1-1 ($H=17\text{cm}$)(b)Case2-1 ($H=19\text{cm}$)

図-4 護岸天端上での水塊の挙動

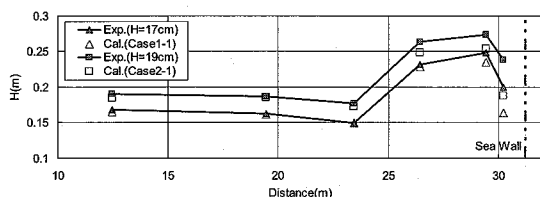


図-5 波高分布

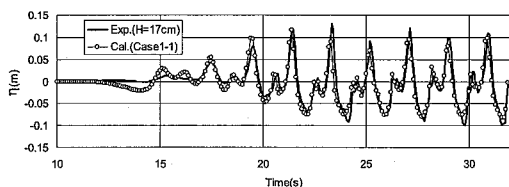
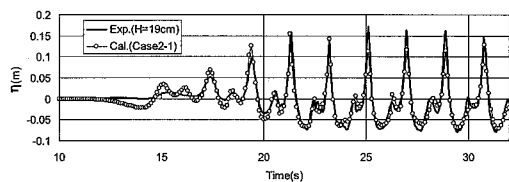
(a)Case1-1 ($H=17\text{cm}$)(b)Case2-1 ($H=19\text{cm}$)

図-6 水位変動

算は二次波峰の発生など複雑な水面変動を再現している。

(3) 越波量

図-7 には、上述した計算条件と同じケースに対する一
波あたりの越波量の比較を示す。Q1 と Q2 はそれぞれ越
波排水路と排水路背後地への越波量を表している。なお、
実験結果は5回繰り返した計測の平均値とばらつきの範
囲を示す。 $H=17\text{cm}$ では、排水路壁に衝突した水塊が
排水路内へ越流するものの、水塊は背後地まで到達しな
い。一方、 $H=19\text{cm}$ では排水路への越波量が $H=17\text{cm}$
の2倍程度と大きくなっている。計算値と実験値を比較
すると、排水路への越波量に関しては、両ケースとも数
値計算の再現性は良好である。しかし、 $H=19\text{cm}$ の場
合の実験では、背後地への越波量が排水路の越波量の4

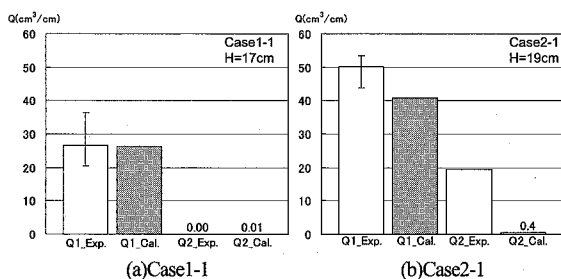


図-7 越波量

割程度であるのに対し、計算は実験を十分に再現してい
ない。これについては、次章で越波量算定方法および
CADMAS-SURF の各種パラメータが与える影響につい
て検討するものの、今後の検討課題である。

5. 各種パラメータが計算結果に及ぼす影響

上述のように、越波量の計算結果に関しては比較的高
波浪の条件に対して若干の課題が確認されたため、以下
では各種計算パラメータを変化させた計算を行い、それ
ぞれの条件が越波量の計算結果に及ぼす影響を検討する。

表-3 に検討ケースを示す。差分スキームに関しては
従来から行われている検討と同様、1次精度風上差分と
2次精度中央差分の割合を示す DONOR パラメータの差
異が計算結果に及ぼす影響を調べた。さらに本研究では、
これまで詳細な検討例があまりない表面セル流速の境界
処理方法および気泡・水滴の処理方法が及ぼす越波量の
計算結果への影響についても検討した。また、越波量算
定方法が計算結果に及ぼす影響を把握する目的で、全ケ
ースに対して、第3章で前述した双方の越波算定法を用
いて越波量を算出した。

(1) 差分スキームの影響

数値波動水路 CADMAS-SURF では、運動方程式の
移流項の差分スキームとして DONOR スキームが用い
られている。これは、DONOR パラメータ D により、1

表-3 各種パラメータの影響に関する検討ケース

Case	波高	DONOR	表面セル流速境界処理	気泡上昇速度, 水滴落下速度
1-1	17 cm	0.2	勾配ゼロ	0.2 m/s, 自由落下 + 斜面
1-2			外挿	
2-1	19 cm	0.2	勾配ゼロ	0.1 m/s, 自由落下 + 斜面
2-2				0.3 m/s, 自由落下 + 斜面
2-3				0.2 m/s, 自由落下 + 斜面
2-4		0.1		
2-5		0.5		0.2 m/s, 自由落下 + 斜面
2-6		0.2	外挿	
2-7		0.2	外挿	
2-8		0.1		0.2 m/s, 3.0 m/s
2-9		0.5		
2-10		0.2	外挿	
2-11		0.1		なし, なし
2-12		0.5		

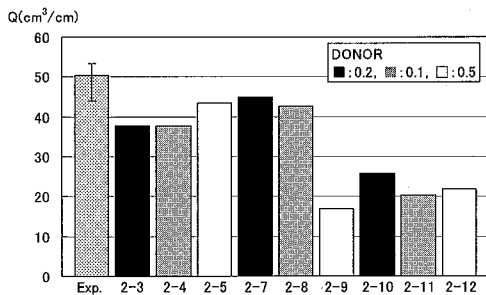


図-8 差分スキームの影響

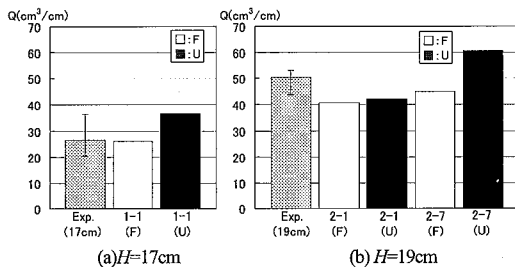
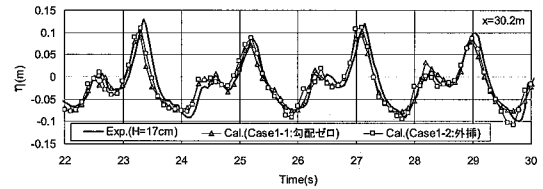


図-9 越波量算定方法の影響

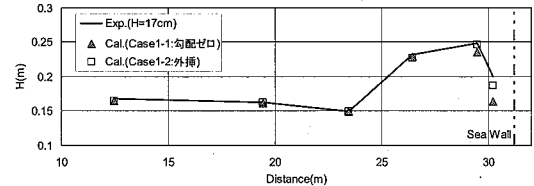
次精度風上差分を D , 2 次精度中心差分を $(1-D)$ の割合で重み付き平均する方法である。Case2-3 ~ Case2-5, Case2-7 ~ Case2-9 および Case2-10 ~ Case2-12 では DONOR パラメータを 0.1, 0.2, 0.5 として計算を行った。図-8 に, 各ケースの越波排水路への越波量の計算結果を示す。DONOR パラメータが大きい場合には, 水滴・気泡の処理方法によって精度に大きなばらつきがみられ, 特に Case2-9 では実験値を著しく過小評価している。DONOR パラメータが 0.1 と 0.2 の場合の計算結果は, 他の条件には関係なく同程度の精度が得られるが, 0.2 の場合に再現性がより高くなっている。

(2) 越波量算定方法の影響

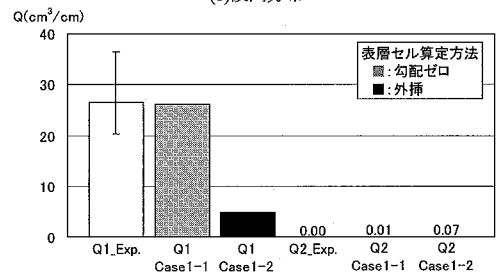
4. (3) 節で計算結果を示した Case1-1 と Case2-1 に



(a) 水位変動



(b) 波高分布



(c) 越波量

図-10 表面セル流速の境界処理方法の影響

Case2-7 を加えて, 越波量の算定方法による計算結果の差異を図-9 に示す。いずれの波高に対しても, 算定方法によって越波量に差異が生じ, 検査断面での流量フラックスに基づいて算定された越波量 (U) が, 集水升内の水量の増分から求めた値 (F) と比べて大きい。この原因として, CADMAS-SURF では, ドナーアクセプタ法を用いて自由表面形状を計算する際, 自由表面の向きに応じて表面セルの境界条件が設定されるのに対して, データ出力ではその影響を考慮せず流量フラックスを算定しているためと考えられる。したがって, CADMAS-SURF では, 越波升内の水量の増分より越波量を算定することが望ましいといえる。

(3) 表面セル流速の算定方法の影響

数値波動水路 CADMAS-SURF のデフォルトでは, 表面セルの流速値を流体側の 2 点から外挿することで求めている。この他に, 表面セルの流速を流体側の流速と等しい (速度勾配ゼロ) として処理する方法の選択が可能である。

$H=17$ cm に対して, 表面セル流速を勾配ゼロの条件から求めた場合 (Case1-1) と外挿で求めた場合 (Case1-2) の計算結果の比較を図-10 に示す。波高分布と 30.2 m 地点 (護岸より 1 m 沖) における水位変動については, 表面セルを外挿で求めた方が勾配ゼロから求めた場合と比べて実験結果の再現性が高い。しかしなが

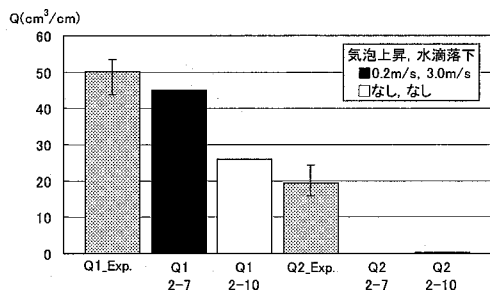


図-11 気泡・水滴処理と越波量計算結果

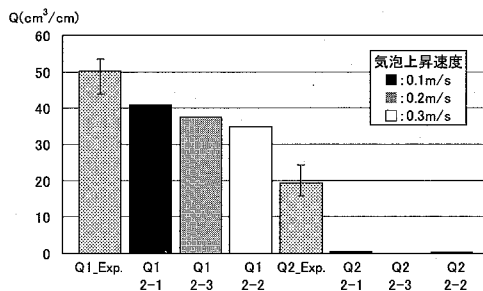


図-12 気泡上昇速度と越波量計算結果

ら、越波量を比較すると勾配ゼロの方が再現性がよい。以上のことから、護岸近傍までの波浪変形は表面セルの流速を外挿から求めた方が実験の再現性が高く、護岸天端上での複雑な水塊の挙動や越波量に関しては勾配ゼロの条件で計算した方の再現性がよくなるといえるが、より一層の検討が必要である。

(4) 気泡・水滴の処理方法

水理模型実験では、護岸周辺でケーソン天端からの水塊の落下に伴う水領域への大量の気泡の混入や越波排水路壁への水塊の衝突による飛沫の飛散が顕著にみられた。CADMAS-SURF では、計算の安定性のために Timer-Door 法を用いた気泡・水滴の処理が可能である。表-3 に各ケースの気泡上昇と水滴落下の速度を示す。なお、水滴落下で「自由落下+斜面」と記載しているケースについては、自由落下に加えて斜面落下速度を評価している。

$H=17$ cm については、図-5～図-7 に結果を示すように、気泡上昇速度を推奨値である 0.2 m/s、水滴は自由落下と斜面落下を考慮した条件 (Case1-1) で精度良く実験を再現できている。図-11 に、 $H=19$ cm に対して気泡上昇速度・水滴落下速度をそれぞれ 0.2 m/s、 3.0 m/s とした条件 (Case2-7) と両者の処理なし (Case2-10) の計算結果の比較を示す。越波排水路への越波量は、気泡上昇と水滴落下の処理を行った方が実験結果に近い計算結果となっている。

気泡上昇速度の影響を詳細に検討するために、表面セルの流速を勾配ゼロから求めたケースにおいて、気泡上昇速度を 0.1 m/s ～ 0.3 m/s の範囲で変化させた結果を図-12 に示す。同図から、気泡上昇速度が小さいほど再現性が向上することが確認できる。CADMAS-SURF の推奨値である 0.2 m/s は、気泡が数 cm と大きい場合を想定している。しかし、図-4 にも示したとおり、 $H=19$ cm の条件のように小さな気泡が大量に混入する条件に対しては、気泡の上昇速度を小さくすることで再現性が向上可能であるといえる。

5. ま と め

本研究では、数値波動水路 CADMAS-SURF を用い

た数値計算と水理実験により、天端上に越波排水路を有する低天端護岸周辺の越波現象について検討を行った。その結果、計算結果は、天端上における水塊挙動、沖から護岸周辺までの波浪変形、護岸背後への越波量の実験結果を良好に再現できることを確認した。したがって、複雑な断面形状を有する海岸護岸の越波解析に、数値波動水路 CADMAS-SURF は十分適用可能であるといえる。しかしながら、入射波高が大きい場合の実験でみられた顕著な飛沫による排水路背後地への越波量に対する再現性については今後検討すべき課題である。

謝辞：本研究は「数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会(代表：東京大学大学院・磯部雅彦教授)」における研究成果であることを付記し、関係各位に感謝の意を表する。また、水理実験にあたっては、(株)日本工業試験所・新幸弘行氏の協力を得たことを記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 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(1999): 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.
- 川崎浩司・菊 雅美・嶋田 宏・柴多哲郎・板橋直樹・馬淵幸雄(2007): 現地リーフ地形における波浪変形と護岸周辺の越波に関する数値解析, 海洋開発論文集, 第 23 巻 (印刷中).
- 後藤仁志・五十里洋行・目見田哲・安岡恒人・望月貴文(2006): 低天端護岸上部の大型排水路への越波過程に対する粒子法の適用性, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 701-705.
- 榊山 勉(1998): 消波護岸の越波に関する数値計算モデルの開発と検証, 電力中央研究所報告, 研究報告, U97103, 27p.
- 佐貴 宏・藤田 龍・関本恒浩・清水琢三(2001): 数値モデルによる越波量の評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 736-740.
- (財)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.
- 筒井勝治・北野正夫・八木典昭・目見田哲・殿最浩司(1997): 上部スリット式護岸の越波および反射特性について, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 615-619.