

3次元数値波動水槽を用いた波力低減型海域制御構造物に関する数値実験

Numerical Experiments on a Permeable Breakwater by Using CADMAS-SURF/3D

高橋研也¹・安野浩一朗²・西畑 剛¹・関本恒浩³

Kenya TAKAHASHI, Koichirou ANNO, Takeshi NISHIHATA and Tsunehiro SEKIMOTO

Experimental studies used to be conducted to investigate hydraulic performance of permeable breakwaters due to complexity of the wave absorption mechanism. Although the numerical wave flumes such as CADMAS-SURF have recently been applied to the wave-structure interaction system, 3-D configuration of permeable breakwaters cannot be reproduced by the method. In this study, CADMAS-SURF/3D which is newly developed as 3-D numerical wave tank is applied to estimate the hydraulic performance of the permeable breakwater. The applicability of CADMAS-SURF/3D to such structures is investigated from the comparison between experimental and numerical results, in which detailed wave dissipation mechanism is also discussed.

1. はじめに

スリット壁や遊水室を有する消波構造物の水理性能の検証に関しては、その消波メカニズムの複雑さから、2次元造波水路を用いた水理模型実験によることが多い。しかし、水理模型実験には多くの手間と費用が必要であるため、最近の耐波設計においては、これよりも簡便に行える2次元数値波動水路を用いた数値実験が実務で主流となりつつある（たとえば、財団法人沿岸開発技術研究センター，2001）。ここで注意すべきは、通常の消波構造物はスリットなどの3次元的な構造を有しているため、堤体の構造に抵抗則などの何らかのモデルを導入するか、ある代表断面で近似して解析するしかない点である。小竹ら（2001，2007）は、直立消波堤における透過スリットを格子分割および多孔質体としてモデル化する手法の2次元数値波動水路への適用性について検討している。

一方、3次元数値波動水槽の開発も行われており、有川ら（2007）や榊山ら（2007）により各種の適用性について検討されているものの、上記のように形状が複雑な消波構造物への適用事例は見当たらない。そこで、本研究では、透過水平版付スリットケーソン型構造物の前面を上部斜面堤とした、図-1に示す波力低減型海域制御構造物（西畑ら，2008）に関する2次元水理模型実験を対象に、3次元数値波動水槽を用いて再現計算を行った。これらより得られた水位・波圧・流速などの水理諸量をそれぞれ比較することにより、3次元数値波動水槽の消波構造物への適用性について検討した。さらに、計算結果を可視化することにより、消波メカニズムについて詳しく考察した。

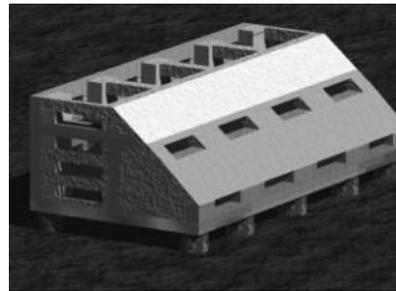


図-1 波力低減型海域制御構造物のイメージ図

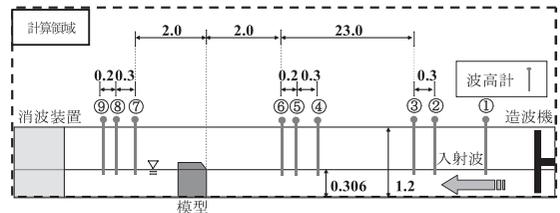


図-2 常時波浪時消波性能確認実験の概要（単位：m）

2. 水理模型実験および再現計算の概要

(1) 水理模型実験の概要

西畑ら（2008）および安野ら（2009）は、長さ50m×幅0.6m×高さ1.2mの2次元造波水路を使用し実験を実施した。対象とする波浪は規則波とし、模型設置位置において20波以上のデータを取得できるまで計測を行った。

a) 常時波浪時消波性能確認実験（西畑ら，2008）

図-2に常時波浪時消波性能確認実験の概要を示す。実験模型縮尺は1/25とし、一様水深とした。消波性能の確認は、模型前後に配置した④～⑥および⑦～⑨の容量式波高計により20Hzで計測された水位から、合田ら（1976）による入・反射波分離を行って反射率と透過率を算出した。

b) 高波浪時消波性能確認実験（安野ら，2009）

図-3に高波浪時消波性能確認実験の概要を示す。実験

1 正会員 修(工) 五洋建設(株)技術研究所
2 正会員 五洋建設(株)技術研究所
3 フェロー 博(工) 五洋建設(株)技術研究所

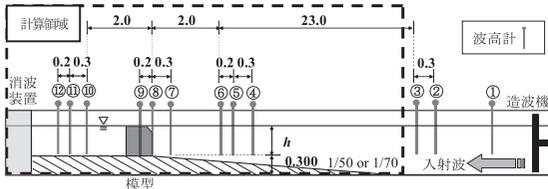


図-3 高波浪時消波性能確認実験および流速検定の概要 (単位: m)

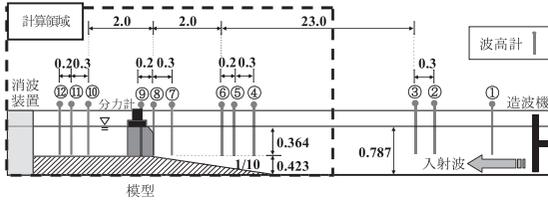


図-4 波力実験の概要 (単位: m)

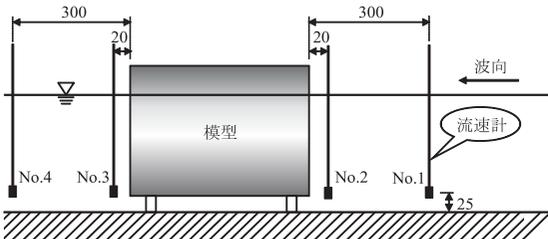


図-5 流速検定の概要 (単位: mm)

模型縮尺は1/25とし、模型堤前には $i=1/50$ の海底勾配を設け、潮位条件はH.W.L. ($h=0.336\text{m}$) およびH.H.W.L. ($h=0.364\text{m}$) の2タイプとした。まず、模型を設置していない状態で波高検定を行い、波高計⑦～⑨の計測水位から合田ら (1976) による入・反射波分離を行って入射波高を決定した。次に、2. (1) a) と同様に透過率を算出して消波性能の確認を行った。

c) 波力実験 (西畑ら, 2008)

図-4に波力実験の概要を示す。実験模型縮尺は1/25とし、模型堤前には $i=1/10$ の海底勾配を設け、2. (1) b) と同様に波高検定を行い、入射波高を決定した。実験では模型天端に2成分分力計を設置固定し、水平波力と揚圧力を500Hzで計測した。また、各部材に配置した合計22個の波圧計から部材波圧も500Hzで計測した。

d) 流速検定

実験模型縮尺は1/35とし、図-3の海底勾配を $i=1/70$ とした地形を用いた。図-5に流速検定の概要を示す。模型前後に電磁流速計を合計4台設置し、底面付近における水平流速を20Hzで測定した。

(2) 再現計算の概要

a) 数値計算モデル

再現計算には、有川ら (2005) による3次元数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) を用いた。CADMAS-SURF/3Dは2次元数値波動水路 (CADMAS-SURF) の計算手法を基

表-1 実験条件および計算条件

実験	a) 常時	b) 高波浪	c) 波力	d) 流速
縮尺	1/25			1/35
海底勾配	—	1/50	1/10	1/70
水深 (cm)	30.6	66.4 63.6	78.7	51.9
波高 (cm)	12.0	32.0 32.0	25.0	7.14 11.4
周期 (s)	2.0	3.2 2.4	1.8	1.69 2.02
計算領域 x (m)	50.00	24.88	20.76	34.00
格子数 (個)	2,732,400	2,293,200	1,922,400	3,114,000
解析時間 (s)	65.0	30.0	17.0	30.0
計算所要時間	約3.8日	約4.7日 約4.4日	約6.2日	約1.2日 約1.6日

表-2 計算条件

入射波	規則波
造波関数	流れ関数法B (19次), 造波境界
差分スキーム	DONOR-0.2
乱流モデル	使用しない
格子間隔 (m)	$\Delta x=0.025 \sim 0.040$, $\Delta y=0.025$, $\Delta z=0.010$

にしたものであり、自由表面解析モデルにVOF法を採用したものである。基礎方程式は、3次元非圧縮粘性流体を対象とした連続式およびNavier-Stokes方程式をポラスモデルに基づいて拡張した運動方程式から構成されている。

b) 計算環境

計算環境はCore 2 Quadの2.66GHz, RAMメモリー3.48GBのWindows PCであり、MPIを用いた並列計算を行った。

c) 計算条件

表-1および表-2に実験条件と計算条件を示す。計算は水理模型実験と同じケース・条件にて行った。入射波は規則波とし、流れ関数法B (19次) により造波境界にて造波した。移流項の差分には1次精度風上差分と2次精度中央差分のハイブリッド差分法を使用し、両者の比率を示すVP-DONORの値には0.2を用いた。計算領域は長さ50mの実験水路と同様としたが、海底勾配のあるケースでは浅水・碎波変形などによる計算時間の増大が懸念されたため、多重反射系が形成されない範囲において延長方向に縮小した。格子間隔は構造物周辺を密にする不等間隔格子とし、構造物背後の領域端部にはSommerfeldの放射境界およびエネルギー減衰帯を設け、透過波に反射波が含まれないようにした。なお、本研究では消波構造物の3次元の特性を把握することを目的としたため、乱流モデルは用いなかった。

d) 波力低減型海域制御構造物のモデル化

本研究で対象とする波力低減型海域制御構造物は、ス

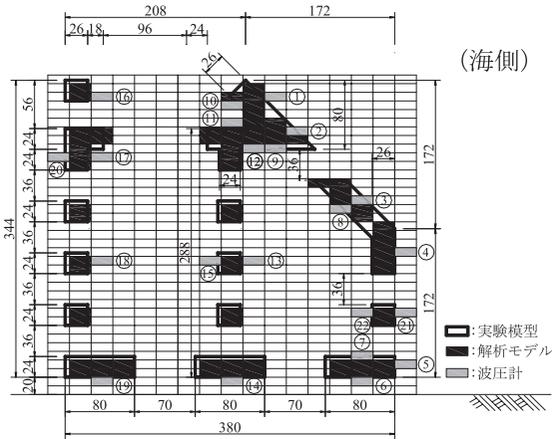


図-6 波力低減型海域制御構造物の解析構造断面図 (単位: mm)

リット壁、遊水室および上部斜面を有することが特徴の構造物であり、これらの各部材をいかにモデル化するか計算精度を左右する。しかし、実務に耐え得る現実的な計算時間とするためには、構造物形状を再現可能な範囲で格子間隔をできるだけ粗くすることが望ましい。小竹ら (2001) は、スリット壁の孔を鉛直方向に格子分割する際、1メッシュにすると極端に反射率が低下すること、および2メッシュにした場合と3メッシュにした場合とではほぼ同じ計算結果が得られることを示している。

これらの点を考慮して、構造物上における格子間隔を $\Delta x=0.025\text{m}$, $\Delta y=0.025\text{m}$, $\Delta z=0.010\text{m}$ と設定し、波力低減型海域制御構造物の解析構造をモデル化したものを図-6に示す。これは、構造物中心線位置での断面図である。図中には、波力実験において用いた波圧計の配置も示した。格子間隔は若干粗く感じられるものの、実験模型部材の幅や厚さなどが概ね再現できており、スリット孔の鉛直方向分割数も2~4メッシュ確保されている。この解析構造を用いることにより、表-1に示した通り各ケースとも計算所要時間が1週間以内となり、かなり現実的な計算が可能となった。

3. 波力低減型海域制御構造物への適用性

ここでは計算結果と実験結果を比較し、消波構造物へのCADMAS-SURF/3Dの適用性について検討する。なお、以下に示す時系列図においては、横軸は計算経過時間を示しており、実験結果の位相を計算結果の位相に一致させて表示している。

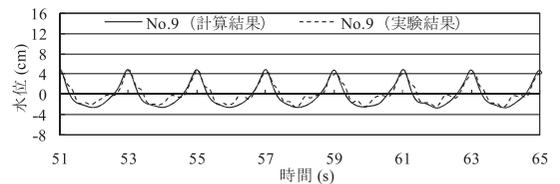
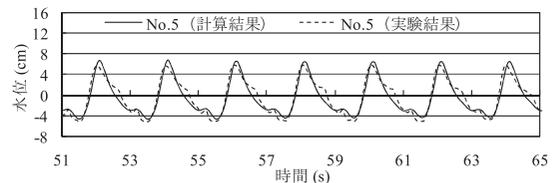
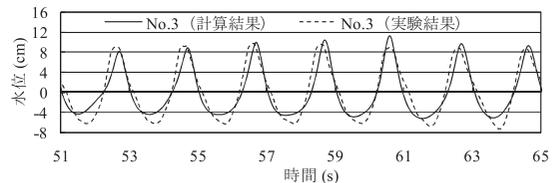
(1) 水位変動

図-7 (a), (b) にそれぞれ常時波浪時消波性能確認実験および高波浪時消波性能確認実験 (潮位条件: H.H.W.L.) における水位変動の計算結果と実験結果の比較を示す。図中に示した番号は、図-2および図-3に示した波高計の番号

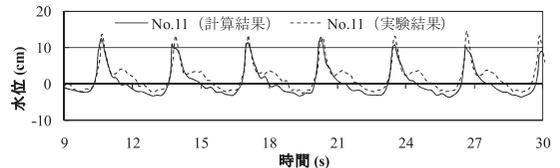
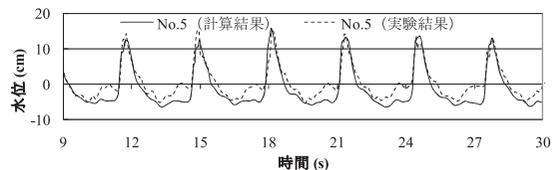
に対応する。実験結果では造波板による非線形発生波によって励起される二次波峰が認められるが、これを除けば波高や周期などが概ね再現できている。常時波浪が一樣水深を伝播する図-7 (a) のような線形的現象のみならず、海底斜面上で碎波を伴いながら変形する非線形性の強い図-7 (b) のような条件についても、実務に耐え得る精度で波の伝播が再現できることが確認された。

(2) 反射率および透過率

表-3および表-4に常時波浪時消波性能確認実験および高波浪時消波性能確認実験における反射率と透過率の計算結果と実験結果の比較を示す。水位変動が概ね再現されているためこれらもよく再現されているが、常時波浪条件における反射率および透過率の計算結果が実験結果よりも過大に評価されている。これは、解析構造の開口率が実験模型と異なることや、上部斜面を階段状に近似していることなどによるものと考えられる。また、高波浪



(a) 常時波浪時消波性能確認実験



(b) 高波浪時消波性能確認実験 (潮位条件: H.H.W.L.)

図-7 水位変動の計算結果と実験結果の比較

表-3 反射率の計算結果と実験結果の比較

	反射率	計算結果	実験結果	差
a)	常時波浪	0.44	0.36	0.08

表-4 透過率の計算結果と実験結果の比較

	透過率	計算結果	実験結果	差
a)	常時波浪	0.64	0.56	0.08
b)	高波浪 (H.H.W.L.)	0.72	0.77	-0.05
	高波浪 (H.W.L.)	0.57	0.58	-0.01

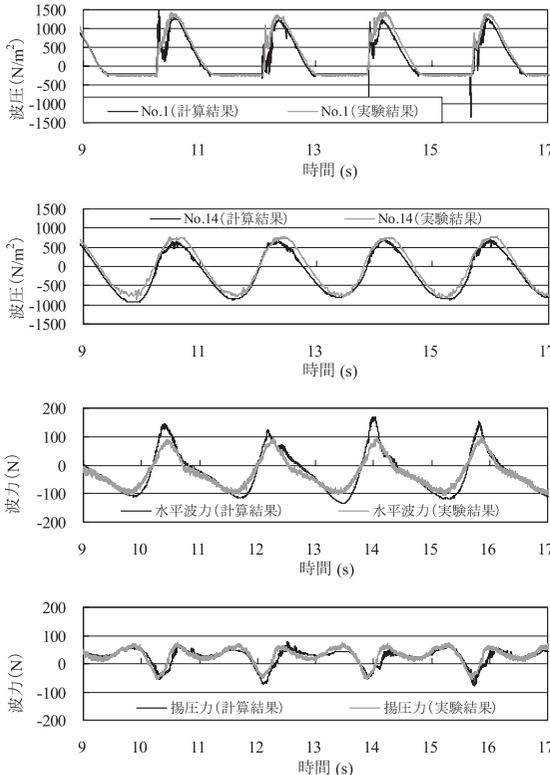


図-8 波圧・波力の計算結果と実験結果の比較

時における透過率がよく一致していることから、高波浪条件においては越波による透過が支配的となり、常時波浪条件ほどは解析構造の影響を受けないものと思われる。

(3) 波圧および波力

波力計算に当たっては、図-6に示したように解析構造が複雑であり、遊水室内への気泡の混入などが考えられたため、有川ら (2008) に倣い、スパイクノイズ対策として流速・圧力計算を2回繰り返す処理を行った。図-8に波力実験における波圧・波力の計算結果と実験結果の比較を示す。図中の番号は、図-6に示した波圧計の番号に対応する。なお、波力は構造物セル上下前後の圧力積分の差から算定した。各設置位置での波圧波形は計算結果と実験結果で良好な対応を示しており、斜面部および遊

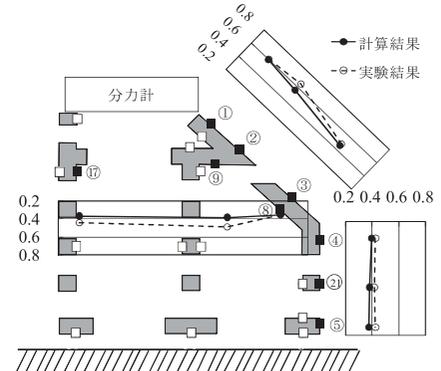


図-9 各波圧計における最大波圧分布 (単位: ρgh)

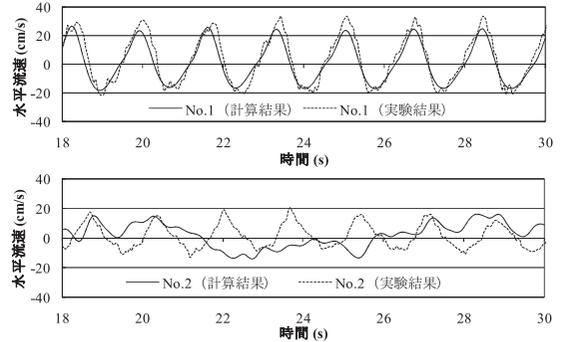


図-10 水平流速の計算結果と実験結果の比較

水室内においても再現性が高い。波力に関しては、揚圧力について良く一致しているが、水平波力のピーク値が若干過大に評価されている。これは、入射波高がほぼ碎波限界であるため計算上は碎波するものの、実験では碎波点近傍の不安定性により碎波圧が作用しなかったためと考えられる。また、各波圧計における最大波圧分布を図-9に示す。斜面部はNo. 1, 2, 3, 直立部はNo. 4, 5, 21, 揚圧力はNo. 8, 9, 17における最大波圧を示しているが、いずれもほぼ一致している。

(4) 底面水平流速

図-10に流速検定における水平流速の計算結果と実験結果の比較を示す。図中の番号は、図-5に示した流速計の番号に対応する。構造物から300mm離れたNo. 1およびNo. 4においてはよく一致したが、構造物から20mmと極近傍のNo. 2およびNo. 3においては再現されなかった。これは、格子間隔を $\Delta x = 0.025m$ と設定したことにより、流速計セルと構造物セルとが隣り合ったためであると考えられるが、構造物極近傍における流速場を適切に評価するためには、格子間隔をさらに小さく設定するなどしてその再現性について確認しておく必要がある。

4. 消波メカニズムに関する考察

図-11に常時波浪時消波性能確認実験における1周期間

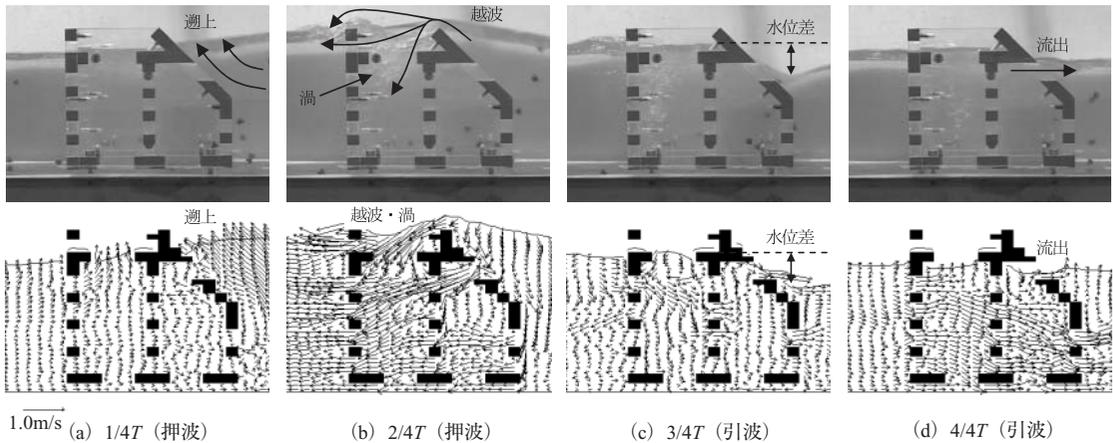


図-11 常時波浪時消波性能確認実験における実験写真と計算流速ベクトル図の比較

の実験写真と計算流速ベクトル図を示す。まず、両図を比較すると、押し波時には (a) 水塊が上部斜面を越え上し (b) 越波に伴い水平版から遊水室内へ打ち込まれて渦が励起され、流れが後壁スリットを通過する様子が、また引波時には (c) 遊水室と堤前とに水位差が生じ、(d) 流出が促進される様子が良く再現されており、本計算手法の適用性は良好である。

次に計算流速ベクトル図に着目すると、押し波時には (b) 越波とともに斜面スリットから流入する強い流れが特徴的である。この流れは中間壁および後壁のスリットで分流し、かつスリット近傍において強い乱れが生じている。また、引波時には (d) 前壁直立部からの流出が著しい。さらに、底版水平スリットの存在により、押し波時・引波時ともに底面付近の流れが弱まっている。これらの消波メカニズムに関する知見は水理模型実験からは得られなかったものであり、本数値計算により効果的なスリットの位置や幅の配置を検討できる可能性が示唆される。

5. まとめ

本研究では、波力低減型海域制御構造物の水理模型実験に関する再現計算を3次元数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) により行った。その結果、現実的な計算時間において、水位・波圧・流速などの水理諸量が再現可能であることが確認された。また、計算結果から消波メカニズムについて考察し、スリットの位置や幅が効果的に機能している可能性が示唆された。これらは、堤体の抵抗係数などのパラメータスタディを必要としないため、堤体内外の水理現象を再現する上で適切なツールとなり得ることを示している。

なお、乱流モデル (高Re型 $k-\epsilon$ 2方程式モデル) の有無による計算結果の比較も行ったが、本計算においては有意な差が認められなかった。これまでのところ、本計算

手法の適用事例が少ないのが現状であり、今後も種々の構造物に対する適用性について検討する必要があると考えられる。

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 (事務局：財団法人沿岸技術研究センター)」の協力を得ました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 有川太郎・山田文則・秋山 実 (2005)：3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 46-50.
- 有川太郎・山野貴司・秋山 実 (2007)：数値波動水槽における碎波変形計算の高精度化, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 71-75.
- 有川太郎・山野貴司 (2008)：数値波動水槽を用いた衝撃波圧に関する大規模計算, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 26-30.
- 安野浩一朗・西畑 剛・関本恒浩・高橋研也・羽田 宏・山本 敦 (2009)：波力低減型海域制御構造物の高波浪時消波性能に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 605-610.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治 (1976)：不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.
- 小竹康夫・松村章子・藤原隆一・高橋重雄・磯部雅彦 (2001)：直立消波ケーソン堤の反射率算定に対するVOF法の適用性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1016-1020.
- 小竹康夫・小淵康義・高橋重雄 (2007)：直立消波堤に作用する波圧算定への数値波動水路の適用性検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 816-820.
- 財団法人沿岸開発技術研究センター (2001)：CADMAS-SURF数値波動水路の研究・開発, 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書, 沿岸開発技術ライブラリーNo. 12, 296 p.
- 榊山 勉・米山 望 (2007)：数値波動水槽による多方向不規則波の3次元計算の検証と課題, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 183-188.
- 西畑 剛・安野浩一朗・下村直己・山本 敦・羽田 宏・関本恒浩 (2008)：波力低減型海域制御構造物の開発, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 525-530.