土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 76, No. 2, I_715-I_720, 2020.

# 数値波動水槽とブシネスクモデルを用いた人工リーフ改良に関する研究

高木　利光[1]・松島　三郎[2]・座波　健仁[3]

[1]フェロー会員　八千代エンジニヤリング株式会社　事業統括本部国内事業部　河川部
（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8）
E-mail:ts-takagi@yachiyo-eng.co.jp
[2]合同会社アユーダ（〒134-0088 東京都江戸川区西葛西6-8-16　エスエス5 504）
[3]八千代エンジニヤリング株式会社　事業統括本部国内事業部　河川部
（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8）
E-mail:tk-zaha@yachiyo-eng.co.jp

人工リーフは水面下の構造物であることから景観に配慮した海岸保全施設として一時広く普及した．しかし，波浪は低減できるものの，天端上での砕波によって誘発される流れのため背後の土砂の安定性に対しては効果が発揮しずらいことが，その後の事例等で明らかとなってきた．そのことから人工リーフの構造改善のためクレスト型人工リーフなど，様々な改善が試みられているが必ずしも効果が発現されていない．ここでは，クレスト型人工リーフをもとに更なる改善案を提案するとともに，その効果をここで提案した数値解析手法により検証した．その数値解析手法は，数値波動水槽による断面二次元波浪変形計算によって得られたクレスト上を越流する流量をブシネスクモデルの境界条件として与え，平面的な波浪・流況場を計算する方法である．

***Key Words :*** *artificial reef , crest type, CADMAS-SURF, Boussinesq equation model*

## 1.　はじめに

人工リーフは，離岸堤による景観の悪化などに対応して，1992年に「人工リーフの設計の手引き」[1]が出されたこと，また2000年の「防護・環境・利用の調和」を目的とした海岸法の改正を契機に，全国に普及した海岸保全施設である．人工リーフは天然のサンゴ礁の高い消波効果を真似して，その広く浅い天端上での強制砕波により波高を低減させるとともに，その背後の海浜地形の安定に効果があるとして，侵食対策施設としても設置されてきた．

しかし，人工リーフ（幅広潜堤含む）が全国に普及するにつれ，波浪低減効果はあるものの侵食対策としての海浜の安定化には効果が現れない場合もあり，場合によっては背後や隣接する海岸に局所的な洗掘を生じさせる事例が散見されるようになってきた（例えば，吉田ら[2]，黒岩ら[3]，中川ら[4]）．その要因は人工リーフ天端上で強制的に砕波することでその背後に向かう強い流れが発生，それによって背後の平均水位が上昇，それに伴い水位差によって人工リーフ群の開口部あるいは人工リーフの両サイドから強い流れが発生し，その流れにより土砂が移動することが，現地での観測や水理模型実験，さらには数値計算等で明らかとなってきた（例えば，下園ら[5]，山本ら[6]，宇多ら[7]）．そこで，そのような現象の防止あるいは緩和のため様々な改善策が検討されてきた．人工リーフの端部開口部に突堤あるいは潜突堤を設置することで流れを緩和する方法などが提案され，効果があるとした事例もある（例えば，杉原ら[8]）．また，人工リーフそのものの構造を変える提案もあり，クレスト型（山本ら[9]）や二山型（上谷ら[10]）はその代表例である．クレスト型人工リーフは皆生海岸に適用され，その効果をモニタリングにより確認したり（宇多ら[7]），さらなる構造の改良が水理模型実験により検討されている（宇多ら[11],[12]）．しかしながら効果的な人工リーフの改善案はなかなか見つからず，中には人工リーフの天端上に異形ブロックを積み上げて従来の離岸堤に変えるなどの対策も実施され（例えば，神庭ら[13]），人工リーフ本来の景観に配慮した構造まで捨てざるを得ない状況ともなっている．

ここでは，クレスト型人工リーフを基本として，その構造の改良案を考案するとともに，既往の水理模型実験により検証した方法のもとでその効果を検討し，新たなタイプの人工リーフを提案するものである．

## 2. 人工リーフの改良方針

クレスト型人工リーフの断面模式を**図-1**に示す．クレスト型人工リーフは，天然のリーフにおいてリーフエッジのすぐ岸側に礁嶺があり，そこで効果的な砕波が生じることなどから，礁嶺と類似した突起物（クレスト）を人工リーフの天端の沖側に設置し，さらに2列に設置する方が効果が高いとして開発された（山本ら[9]）．しかし，人工リーフ天端上で砕波によって岸側に輸送される質量を低減させるためには砕波による波浪低減効果を高めるよりも，むしろ砕波によって波浪エネルギーが流れに変化した後に，その流れを有効に緩和するほうが得策と考えた．そこでここでは人工リーフの波浪低減効果を最大限生かすとともに，天端上で発達した岸向き流れを人工リーフ背後域に持ち込むことを緩和させるため，突起物を人工リーフ天端の岸側端に設置することを考案した．**図-2**に改良した人工リーフ案を示す．従来のクレスト型の突起物（クレスト）と同様に沖側の法勾配が1:3と緩勾配の案と，勾配を直壁とした案と，さらに波返し効果を期待して湾曲させたものの3案を考案した．なお，それら突起物の天端高は従来のクレスト型と同様，水面上0.5mの高さとして景観に配慮したものとした．

## 3. 数値モデルの構築

### (1) モデルの概要

人工リーフの天端上に水面上に突出する構造物を有すること，人工リーフ天端上での現象は突起物の構造含めてほぼ断面二次元的な現象であることから，突起物を越流する現象を断面二次元の波浪変形モデルの一つであり，VOF法に基づき開発された数値波動水槽（CADMAS-SURF/2D）[14]を用いて再現することとした．これによって突起物を越流する流量を時系列で把握した．次に，平面波浪場さらにはその波浪場から流況場が得られるブシネスクモデル（例えば，佐藤ら[15]）を用いて，先に得られた突起物を越流する流量を境界条件として与えることで人工リーフ周辺の波浪・流況場を再現することとした．

突起物天端上を越流する流量は，数値波動水槽から得られた天端上の時々刻々の流速と水位を積分して求めた．また，数値波動水槽での突起物の越流状況から，ブシネスクモデルでの計算では，突起物周辺において**図-3**に示すように越流状況を再現した．1波毎の越流流量を時間方向に正弦関数で近似し，波の山に当たる時間帯にのみ，すなわち半周期毎にその流量に相当する微小時間間隔での水位変化量を，突起物の沖側計算格子では低下させ，一方岸側計算格子では上昇させ，保存則を満足させる形とした．また，流量を与える位相は，突起物の位置に隣接する人工リーフ開口部の水位変化から波の山となる位相と合わせた．

### (2) モデルの検証

構築したモデルを既往の水理模型実験により検証した．宇多ら[12]はクレスト型人工リーフの改良を目的に水理模型実験を実施している．その水理模型実験とほぼ同様の地形（**図-4**，**図-5**）および波浪条件のもとで計算を行った．なお，水理模型実験は幅100m（実験スケールで2m）水槽の固定床模型と，幅800m（実験スケールで16m）水槽の移動床模型で実施している（以降，前者を「狭域場」

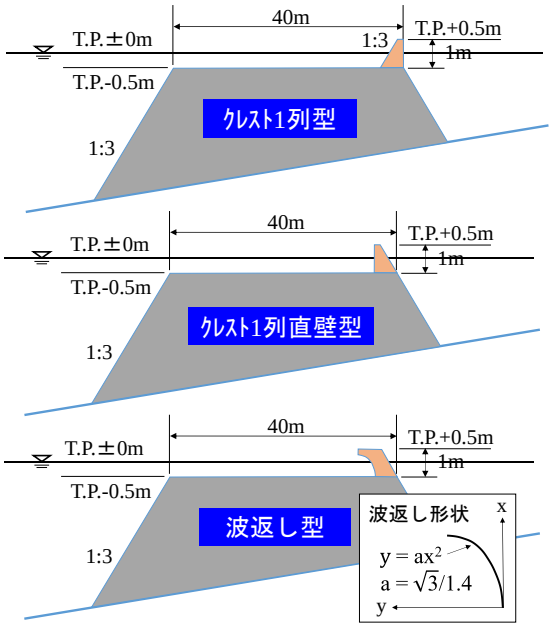


**図-2** 人工リーフ改良案

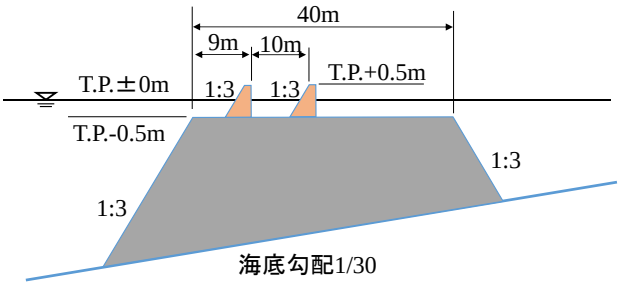


**図-1** クレスト型人工リーフ断面

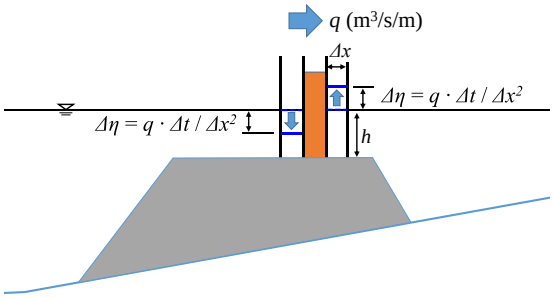


**図-3** ブシネスクモデルでの突起物の境界条件

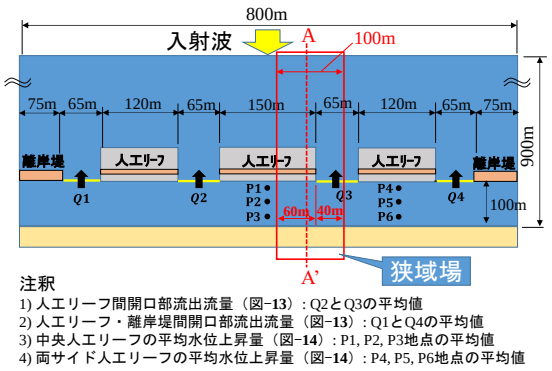


**図-4**　ブシネスクモデルでの計算範囲と施設配置

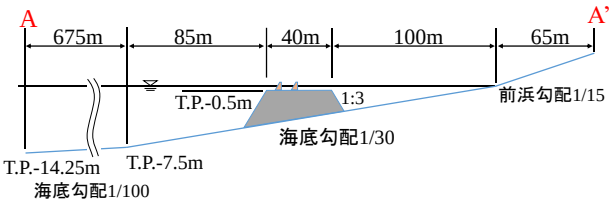


**図-5**　海浜断面と施設配置（A-A’断面）

後者を「広域場」と呼ぶ）．ここでは狭域場の固定床実験と比較検証した．人工リーフ堤体は実験では不透過構造であるため計算では海底地形として取り扱った．対象とした実験ケースは，既存のクレスト型人工リーフに対して，代表波（換算沖波波高3m，周期8sの規則波）を与えたケースとした．数値波動水槽により得られたクレスト天端上を越流する流量，ただし計算開始から波が伝播して越流状況が安定化し始める300s以降について，100s間毎に累積した時間変化を**図-6**に示す．400s以降ほぼ安定していることから，400～600s間の越流量を採用した．なお，クレストは2列あることから，岸側の2列目のクレストを越流する流量を示している．次にこの流量を2列目クレスト位置での境界条件としてブシネスクモデルで計算した波浪場および流況場と水理模型実験結果とを比較した．計算範囲は**図-4**に示す狭域場とし，計算格子間隔は5m，微小時間間隔は0.001sとした．水理模型実験と同じ定点での波高比，水位上昇量および流速の比較を**図-7**に示す．波高の透過率はやや計算が過大，水位上昇量は計算がやや過小であったものの，オーダーとしては大きな差がないものであった．流速については岸方向成分で比較すると計算は過大であるものの，絶対流速で比較するとほぼ合致している．したがって流向がやや一致していないと考えられる．そこで平面的な流速場を比較した（**図-8**）．水理模型実験では人工リーフ天端上を岸に向かう流れは天端の後法面から斜めの流向となり，人工リーフ背後の時計回りの循環流に合流するパターンとなっている．一方，計算では人工リーフ天端上では岸に向かう流れが，実験と同様に人工リーフ背後に形成さ

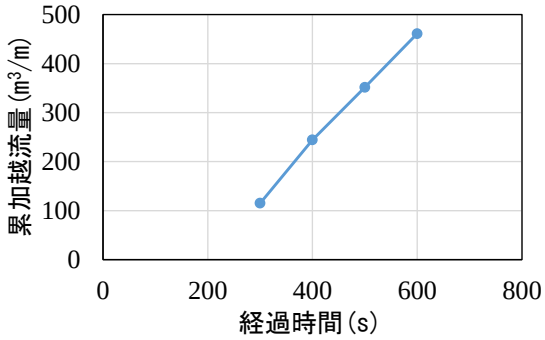


**図-6**　2列目クレスト上の越流流量

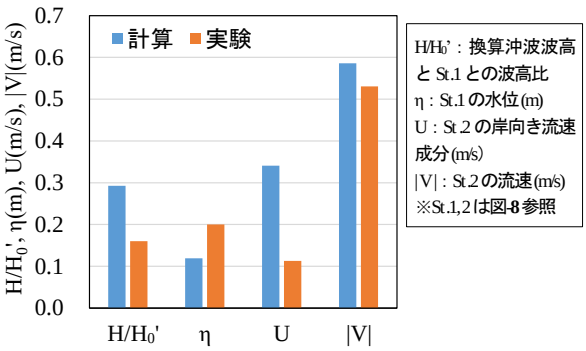


**図-7**　実験との波高比・水位上昇・流速の比較

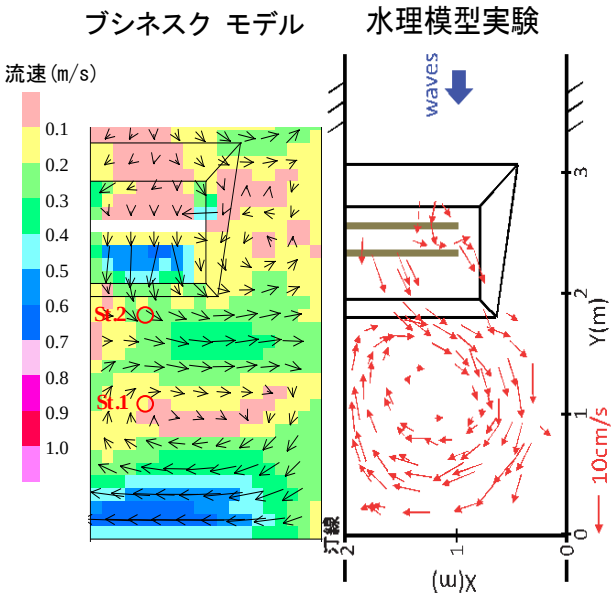


**図-8**　実験との流況パターン比較

れている時計回りの循環流に合流している．全体的に流況パターンは再現されており，先の岸向き流速成分の過大の理由は循環流と合流する付近の流向の大きな変化に起因していると思われる．以上から，ここで構築した数値モデルはクレストのような水面上に突出する構造物を有する地形条件のもとで波浪場および流況場を再現できることが確認できた．

## 4. 人工リーフ改良の効果

### (1) 越流流量

考案した案に対してクレスト等の突起物を越流する流量を，モデルの検証時と同様の波浪・潮位条件のもとで比較した（**図-9**）．従来のクレスト型に対して，クレストを天端後端に1列設置すると越流流量は65%に低減する．さらにそのクレストの沖側法面を1:3から直壁に変えると，わずかではあるが62%となり，さらに波返し構造とすると56%にまで低減する．このように，突起物を人工リーフの天端後端にすることで人工リーフ背後に持ち込まれる流量はかなり低減できることがわかった．

### (2) 狭域場での波浪・流況計算結果

先に実験を再現した時と同様の狭域場の地形のもとで，考案した案に対する波浪場および流況場を計算した．なお，比較のため天端上にクレスト等の突起物のない従来の人工リーフも比較対象とした．この場合は水面上に突起物がないことからブシネスクモデルのみで計算した．**図-10**に各案の計算結果を示す．クレスト型人工リーフは従来の人工リーフと比較し水位上昇量は抑制できるものの，流速はほとんど低減できていない．一方，改良案である突起物の設置位置を天端後端にした場合は従来の

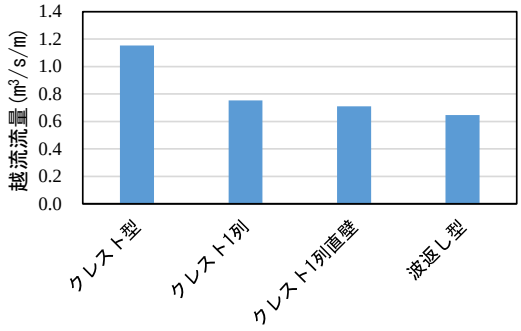


**図-9** 人工リーフ改良案の越流流量

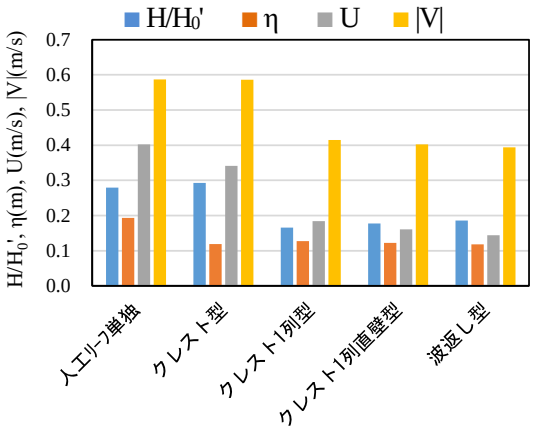


**図-10** 人工リーフ改良案の効果

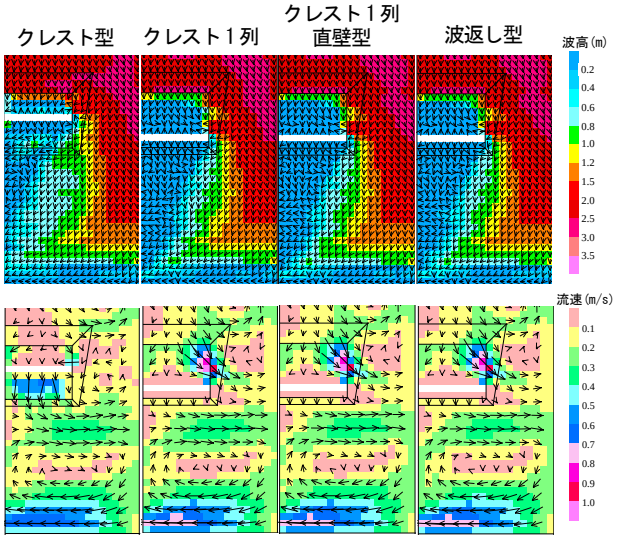


**図-11** 人工リーフ改良案の流況（上段：波高分布，下段：流速分布）

クレスト型と比較しても，波高透過率はより低下，水位上昇量はほぼ同等であり，さらに人工リーフ背後の流速は7割程度に低減している．平面的な波高分布および平面的な流況をベクトル図で**図-11**に示す．人工リーフ背後の波高分布および流況パターンは各ケースとも大きな違いはないが，波高分布は改良案がやや背後の波高が小さく，背後に生じる時計回りの循環流の汀線付近の流速が速くなっている．これは波高の空間的勾配，すなわち流れ場の外力となるラディエーション・ストレスの勾配が急になったためと考えられる．

### (3) 広域場での波浪・流況計算結果

実際の地形に近い状況で人工リーフ改良の効果を検討した．宇多ら[12]において実施された3基の人工リーフと2基の離岸堤を組み合わせた移動床水理模型実験の地形（広域場）と同様な地形（**図-4**）で，改良した人工リーフの効果を確認した．なお，突起物を人工リーフ天端の岸側に設置した3案に対しては，突起物を越流する流量（**図-9**）および背後の波高および流況（**図-10**，**図-11**）に大きな差がなかったことから，3案の中でわずかではあるがより効果が期待できる波返し型を改良案の代表案として比較検討した．波浪および潮位条件は先に示した狭域場の計算と同じとした．平面的な波高分布および流速ベクトルを**図-12**に示す．施設配置が左右対称であることから，左半分に波高分布（図中矢印は波向き）を，右半分には流速分布（図中矢印は流速ベクトル）を示す．人工リーフ周辺の波高分布は各ケース大きな違いはない．流速分布は，従来型人工リーフは天端上で速い岸向き流速が発達し人工リーフ背後に流れ込んでいるのに対し，クレスト型は天端上の流速が抑制され，さらに背後への流れ込む流速も抑制されている．一方，波返し型人工リ

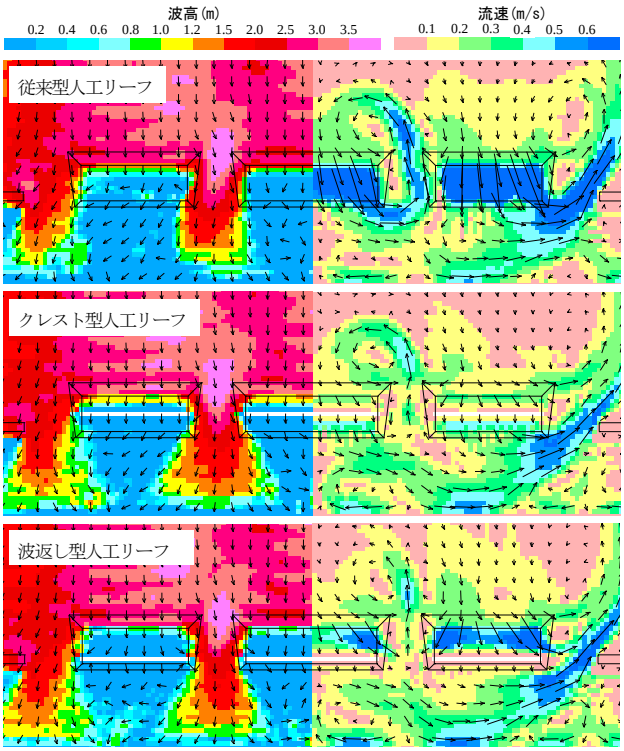


**図-12**　広域の計算結果（左図：波高分布，右図：流速分布）

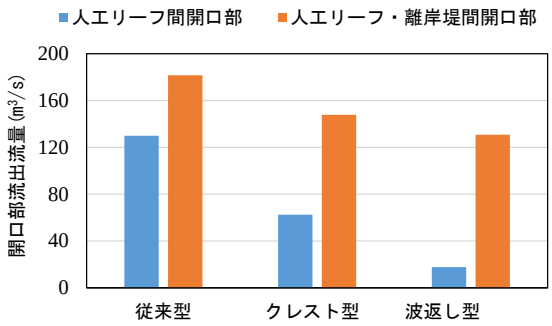


**図-13**　開口部の流出流量

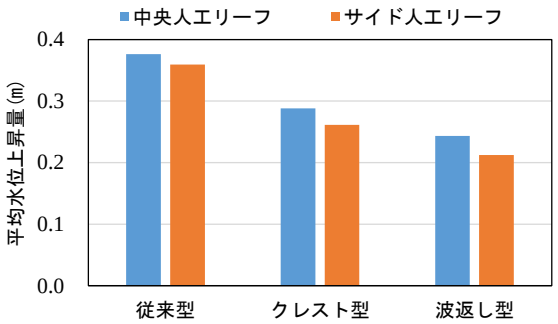


**図-14**　人工リーフ背後の平均水位

ーフでは天端上で従来型と同様速い流速は発生しているものの，その流れは波返しの突起物によって沿岸方向に曲げられ，人工リーフ背後の水域に流れ込む流速は，クレスト型よりもさらに減少している．このことは**図-9**で示したクレスト上あるいは波返し状の突起物を越流する流量を境界条件として与えていることから当然の結果でもある．各ケース人工リーフ天端上の流況は異なるものの，人工リーフ背後および各開口部の流況パターンには大きな違いは見られない．各ケースとも中央人工リーフ背後には背後中央に回り込む一対の循環流が発生するとともに，両サイドの人工リーフとの開口部から沖への流れが見られる．両サイドの人工リーフ背後では両端の離岸堤との開口部に向かう沿岸流がその開口部から沖に流れ出ている．

人工リーフ背後の地形の安定性を評価する上で重要な開口部から沖への流れと，その流れの要因でもある背後の平均水位上昇量を確認した．人工リーフ間の2ケ所の開口部と人工リーフと離岸堤間の2ケ所の開口部に対して，開口部から沖への流量（各2ケ所の平均値）を**図-13**に示す．いずれの開口部とも従来型，クレスト型，波返し型の順に流量は低減している．特に波返し型の人工リーフ間の開口部からの流量は，従来型の14%，クレスト型の28%にまで低減している．中央の人工リーフとその両サイドの人工リーフ背後の平均水位上昇量（**図-4**に示す人工リーフ背後中央の3地点の平均）を**図-14**に示す．平均水位上昇量も，従来型，クレスト型，波返し型の順に低下しており，中央人工リーフ背後で見た場合，波返し型は従来型の70%，クレスト型の87%まで低減している．これら結果から，波返し型に代表されるように改良した人工リーフでは，人工リーフおよび離岸堤との開口部から沖に流出する土砂量も緩和されることが予想されることから，人工リーフ背後の地形の安定性に対しても効果が期待できる．

## 5.　おわりに

人工リーフの弱点であった岸向きの速い流れの誘発を抑制する対策として，人工リーフ天端の岸側端部に水面上に出る小規模の突起物を設置した改良案を提案し，その効果を数値波動水槽とブシネスクモデルを組み合わせた手法により確認した．以下に明らかとなった点を示す．

・水面上に干出し，越流する施設を持つ構造物に対して，数値波動水槽により越流流量を求め，それを境界条件としてブシネスクモデルにて波浪場および流況場を求める方法の妥当性を水理模型実験と比較することで明らかとした．

・従来の人工リーフを改良したクレスト型人工リーフと，さらにそれを基に本研究で提案した改良人工リーフを比較した結果，突起物（クレスト）を人工リーフ天端の岸側端部に設置することで，人工リーフ岸側に持ち込まれる流量をクレスト型人工リーフの65%まで低減でき，さらに，人工リーフ天端岸側端部に設置する突起物の沖に面する法面をクレスト型で採用されている1/3から直

壁とすることで流量を65%から62%に，さらに波返し構造とすることで56%まで低減できる.

・改良案により人工リーフ背後に持ち込まれる流量を低減することで人工リーフ背後の流速および水位上昇量が緩和され，それに伴い開口部から沖に流出する流量も緩和できることから，改良案は人工リーフ背後の土砂移動の抑制にも効果が期待できる.

今後は以下について更なる検討が必要と考えられる.

・天端水深，天端幅など規模の異なる人工リーフにおいても同様の改良により効果が認められるか否か.

・計画波規模のより大きな波浪等に対しての効果・影響はどうか.

・波浪・流況場の計算結果をもとに地形変化を予測し，侵食対策効果を検討.

・突起物の波浪等に対する安定性（突起物の取り付け方法を含めた構造）と改良施工方法についての検討.

・断面2次元モデルである数値波動水槽と平面2次元モデルのブシネスクモデルを組み合わせることなく，3次元の数値波動モデルで直接計算することでの精度向上の可能性について.

## 参考文献


1) 建設省河川局海岸課: 人工リーフの設計の手引き，全国海岸協会，94p, 1992.
2) 吉田秀樹，清水利浩，伊部知徳，山田貴裕，片野明良: 大規模潜堤背後の海浜地形の特徴と地盤沈下による断面変化，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.751-755, 2008.
3) 黒岩正光，松原雄平，市村康，丸毛裕治，中野伸太郎，津留秀臣: 人工リーフ開口部における地形変化に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp.566-570, 2012.
4) 中川洋一，奥田聡，清水利浩，片野明良，久留島暢之: 現地データを用いた潜堤背後の地形変化と流況に関する検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp.571-575, 2012.
5) 下園武範，鈴木淳也，佐藤愼司，磯部雅彦: 人工リーフ背後における海浜流と漂砂の制御，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.606-610, 2004.
6) 山本学，宇多高明，石川仁憲，星上幸良，福濱方哉，野口賢二: 向岸流の抑制により局所洗掘防止を図る人工リーフの開発，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.806-810, 2007.
7) 宇多高明，森川数美，上橋昇，大木孝志，芹沢真澄，神田康嗣，福本崇嗣: 皆生海岸のクレスト型人工リーフ周辺の地形変化実態とその予測，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.65，No.1，pp.571-575, 2009.
8) 杉原卓行，斎藤康紀，池谷慎，高木利光，高木栄，大谷拓也，瀬戸口喜祥，反町悠子: 和木波子海岸における養浜砂流出防止のための突堤・潜突堤の効果，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.74，No.2，pp.931-936, 2018.
9) 山本正司，鳥居謙一，福濱方哉，人見寿，宇多高明，高橋功: 水理模型実験によるクレスト型人工リーフの開発，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.771-775, 2004.
10) 上谷昌史，高井光彦，山田浩次，橋本新: ヘッドランド間の海浜安定化に対する人工リーフの効果について，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.581-585, 2008.
11) 宇多高明，藤原博昭，上橋昇，大木孝志，田代洋一，酒井和也: 皆生海岸の人工リーフの嵩上げの効果に関する実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.891-895, 2010.
12) 宇多高明，佐藤愼司，野口賢二，柴﨑誠，熊田貴之: 水理模型実験によるクレスト型人工リーフの改良検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.596-600, 2013.
13) 神庭治司，岩田学，今本真也，黒岩正光，口石孝幸，加藤憲一，吉松健太郎，小坂田祐紀: 皆生海岸富益工区における人工リーフの改良効果の分析，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.75，No.2，pp.619-624, 2019.
14) 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.
15) 佐藤愼司，Michael Kabiling: Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算，海岸工学論文集，第 40 巻，pp.386-390, 1993.



**(Received March 16, 2020)**
**(Accepted July 27, 2020)**


# IMPROVEMENT OF ARTIFICIAL REEF USING CADMAS-SURF AND BOUSSINESQ MODEL


Toshimitsu TAKAGI, Saburo MATSUSHIMA and Takehito ZAHA



The artificial reefs have been constructed in sandy beachs as the countermeasure of coastal erosion since about 1990. However, some have not shown efficient shore conservation work because of strong nearshore currents due to breaking waves on artificial reefs. In this study, some improvement ideas of the artificial reefs based on the crest type of reefs are presented. It is obvious that the improved artificial reefs equipped with the small obstacle on the onshore edge of the crown is effective for reducing the onshore currents, using the CADMAS-SURF model and Boussinesq model. The wave overtopping rate over the obstacle attached to the reef is calculated by CADMAS-SURF model capable of 2-D vertical wave deformation, and under the boundary condtions of obtained wave overtopping rate, 2-D horizontal distribution of wave height and nearshore currents around the artificial reefs are calculated by the Boussinesq model.