

等深線変化モデルによる人工リーフ周辺の海浜変形予測

鳥居謙一* ・福濱方哉**・人見 寿***
 宇多高明****・芹沢真澄*****

沿岸漂砂が卓越する場に人工リーフが設置された場合や、人工リーフ背後で養浜が行われた場合の海浜変形を予測するモデルを構築した。具体的には、護岸や離岸堤が設置された場合の海浜変形はもちろん、施設沖合での沿岸漂砂の回り込み現象の再現が可能で、縦断形の安定効果を取り入れた等深線変化モデルを人工リーフ周辺の海浜変形予測に適用した。実証データとして石川海岸と新潟県北部の乙大日川河口沖に建設された人工リーフ周辺の現地データを収集し、これを基礎に基本モデルの構築を行った。等深線変化モデルが人工リーフ周辺の海浜変形予測に有効なことが明らかになった。

1. まえがき

人工リーフは天端が水面下にあることから景観に影響を与えないという特性を有するとともに漁礁効果を発揮することなどから従来の離岸堤に代わって全国各地で造られてきている。2000年に施行された新海岸法では、防護・環境・利用の調和のとれた施設整備が求められていることから人工リーフは重要な海岸保全施設である。さらに人工リーフ背後に養浜を行うことによって砂浜を復元することも各地で行われている。しかし、現在使用されている人工リーフの設計の手引き（建設省河川局、1992）などでは、養浜砂の安定性について無限に長い人工リーフを想定し、しかも波浪の強弱に伴う汀線付近での変動を対象とした判別式を準用するのみで、沿岸漂砂の効果などについては全く取り入れられていないのが実情であり、養浜後砂が流出してしまう例も多い。本研究はこの点を考慮し、沿岸漂砂が卓越する場に人工リーフが設置された場合や、人工リーフ背後に養浜が行われた場合の海浜変形を予測するモデルを構築する。具体的には護岸や離岸堤が設置された場合の海浜変形はもちろん、施設の沖合での沿岸漂砂の回り込みの再現が可能な、縦断形の安定効果を取り入れた等深線変化モデル（芹沢ら、2002）を適用する。まず実証データとして石川海岸と新潟県北部の乙大日川河口沖に建設された人工リーフ周辺の現地データを収集し、これを基礎に基本モデルの構築を行う。

2. 現地海岸に設置された人工リーフ周辺の地形変化

石川海岸では人工リーフ設置後の海浜変形が調べられている（武藤ら、1992）。深浅図を図-1に示す。人工リーフ背後では-2mの等深線が舌状に前進する一方、離岸堤と人工リーフ間では局所洗掘が見られる。また-3m

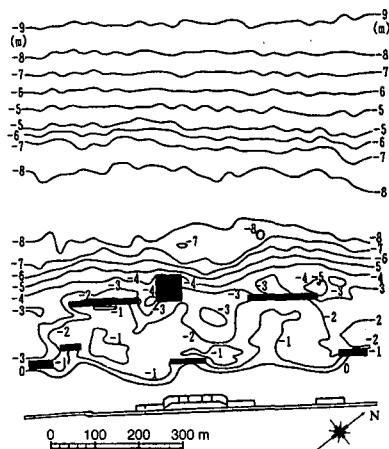


図-1 人工リーフ周辺の等深線図（石川海岸 1991年2月）

の等深線は人工リーフの北側では前進し、南側では後退している。これらのうち人工リーフを挟んだ等深線の南北非対称性は、この海岸で卓越する南向きの沿岸漂砂が人工リーフによって阻止されたために形成されたと推定される。

同様に、北陸地方の荒川に隣接する乙大日川河口でも人工リーフが造られ、その周辺での海浜変形が宇多ら（2000）によって報告された。設置された人工リーフの諸元は、天端幅が60m、堤長が70m、天端高がT.P.-2.5mである。人工リーフ周辺の深浅図を図-2(a), (b), (c)に示す。(a)は1998年11月30日、(b)は1999年1月25日、(c)は2月26日の深浅図であり、冬季風浪前後の海底地形を表している。

図-2(a)において、人工リーフ両側の等深線形状に着目すると、-3mの等深線は北側から人工リーフになだらかに接続した後、南側では急激に岸に接近し、深みが岸近くまで広がっている。人工リーフを挟んだ等深線形状の非対称性が明瞭に現れている。図-2(b)に示す1999年1月25日では、人工リーフの北側では-4mの等深線がその沖合部分に北側から覆いかぶさるように伸びているが、南側ではこの等深線は凹状となって岸に接近している。また人工リーフの南端部では斜め岸向きに-4.5

* 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室
 ** 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室
 *** 正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室
 **** 正会員 工博 (財)土木研究センター審議役なごさ総合研究室長
 ***** 正会員 海岸研究室(有)

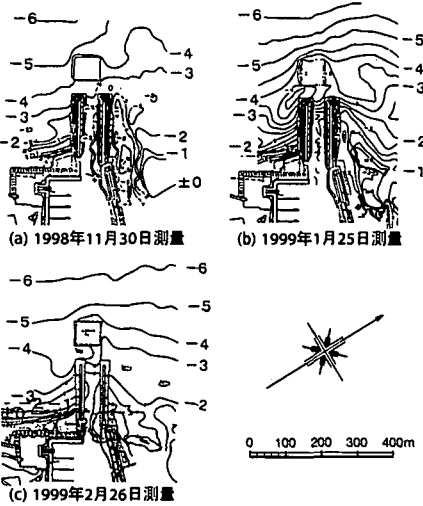


図-2 人工リーフ周辺の海底地形変化 (a)1998年11月30日, (b)1999年1月25日, (c)2月26日

mに至る深みが形成された。図-2(c)に示す1999年2月26日の深浅図では、人工リーフを挟んで-4mの等深線が北側では突出し、南側では局所的に大きく凹んでいる。

一連の深浅図で特徴的な点は、冬季風浪が最も発達すると考えられる1月25日の観測では、人工リーフを挟んだ南北の海浜地形に著しい非対称性が見られ、人工リーフの沖側直近では北側から等深線が覆いかぶさるように延びたことである。このことは全体としてこの地点では南向きの沿岸漂砂が卓越し、この沿岸漂砂が人工リーフによって一部阻止されているためこのような等深線形状になったと考えられる。しかしその機構についての定量的検討は行われていない。そこで以下では等深線変化モデルを用いてその再現を試みる。

3. 等深線変化モデルによる計算法と計算条件

人工リーフ背後を除く周辺部については、芹沢ら(2002)がそのまま使用できる。計算で設定した人工リーフの諸元は、天端水深が-1.5m、天端幅が40m、堤長が100mである。また初期地形は1/30の一樣勾配斜面とし、波による地形変化の限界水深 h_c を9mとする。宇多ら(2002)は、波浪観測データにおいて未超過確率95%の波高と、波による地形変化限界水深の関係について調べ次式を導いた。

$$h_c = 3.64 H_{0.95} \dots \dots \dots (1)$$

ここでは h_c を9mと与えたので、式(1)から未超過確率95%の沖波波高は $H_0 = 2.5$ mとなる。また砕波波高は、合田の砕波指標をもとに沖波波形勾配が0.03程度と

仮定すると、 H_b は3.0mとなる。さらにバーム高は $h_R \approx H_b$ を仮定すると $h_R = 3$ mとなる。沿岸漂砂の水深方向分布には宇多・河野(1996)の3次式を用いた。沿岸漂砂量の計算式には人工リーフ背後の波の遮蔽域での波高の沿岸方向勾配に依存した漂砂をも評価するため、芹沢ら(2002)の式に小笹・プランプトンの項を付加した。土砂の落ち込みに関する限界勾配は、陸上部で1/2、水中では1/3と仮定した。平衡勾配 $\tan \beta_c$ は人工リーフ設置前の自然状態の海底勾配1/30で与えた。

工夫を要するのは人工リーフ背後域の波浪場である。この計算には、芹沢ら(1993)の不規則波の方向分散法を用い、人工リーフ背後の各地点の回折係数 K_d 、回折波向 θ_d を求めて次のように算定する。

$$H_b^{(i,k)} = K_d^{(i,k)} H_0^{(i,k)} \dots \dots \dots (2)$$

$$\theta_b^{(i,k)} = \theta_d^{(i,k)} \dots \dots \dots (3)$$

$$h_c^{(i,k)} = K_d^{(i,k)} h_c \dots \dots \dots (4)$$

$$h_c^{(i,k)} = K_d^{(i,k)} h_c \dots \dots \dots (5)$$

つまり人工リーフ背後の各地点の砕波波高は、人工リーフを設置しない場合の砕波波高に回折係数 K_d を乗じて低減させて式(2)で与え、波向は式(2)のように各地点の回折波向 q_d を与えた。波の屈折変形は無視しているが、これは人工リーフ背後の舌状砂州の発達には回折変形が支配的と考えたためである。 h_c 、 h_R は波高の低減率に比例して小さくなると考え、式(4)、(5)のように K_d を乗じて低減させた。なお、式中の上添え字の i および k は沿岸方向および鉛直方向のセル番号である。

人工リーフの岸側・沖側の境界処理法には芹沢ら(2002)の方法を適用し、等深線が人工リーフに接近した場合等深線が人工リーフに張り付くと漂砂量が0になるよう低減率を乗じて漂砂量を低減させた。人工リーフ区間では計算領域を岸側と沖側に分割して計算し、沿岸方向のブロック相互の関係を連携させて連続式を解いた。

計算区間は、人工リーフ設置地点の上手・下手側にそれぞれ1km、合計2kmを取り、両端部は固定境界条件とした。すなわち、そこを横切る沿岸漂砂量は時間経過に無関係に0である。計算時間間隔は0.2時間とし、5000ステップまで計算を行った。総計算時間は42日である。漂砂量係数については、沿岸漂砂に関する係数を $K_x = 0.2$ 、小笹・プランプトンの項の係数を $K_2 = 0.4K_x$ 、岸沖方向漂砂に関する係数を $K_z = 0.2K_x$ とした。回折計算における人工リーフの波高伝達率は $K_t = 0.5$ とした。入射方向については、波が人工リーフに対し直角入射と、斜め入射の場合を対象とした。計算では人工リーフの離岸距離を2ケース変えるとともに、人工リーフ背後に發浜を行った場合についても計算を行った。表-1には計算条件を一括する。

表-1. 計算条件一覧表

数値計算手法	海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル (芹沢ら, 2002)
計算対象範囲	海岸線延長 2 km (人工リーフ設置地点の左右 1 km)
計算ケース	ケース 1 直角入射 ケース 2 斜め入射 ケース 3 發浜, 直角入射 ケース 4 發浜, 斜め入射
初期地形	直線平行等深線地形 (勾配 1/30)
入射波条件	碎波波高 $H_b=3$ m 碎波波向 $\alpha_b=0^\circ$ (ケース 1, 3), 10° (ケース 2, 4)
地形変化の水深範囲	地形変化の限界水深 $h_c=9$ m, バーム高 $h_B=3$ m
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_x=0.2$ 岸沖漂砂量係数 $K_x=0.2 K_x$ 小笹・プランプトン項の係数 $K_2=0.4 K_x$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野 (1996) の 3 次式
平衡勾配	$\tan \beta_c=1/30$
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/3
計算等深線範囲	$Z=+5$ m ~ -15 m
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=25$ m, 鉛直方向 $\Delta Z=1$ m
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=0.2$ hr
計算ステップ数	1000 steps
境界条件	左右端: $q_x=0$, 岸沖端: $q_x=0$
数値計算法	陽解法による差分法
人工リーフの波帝伝導率	$K_r=0.5$
回折計算法	方向分散法 (芹沢ら, 1993) $S_{max}=25$

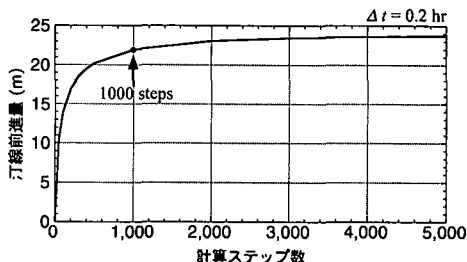


図-4 ケース 1 における汀線変化量と計算ステップ数の関係

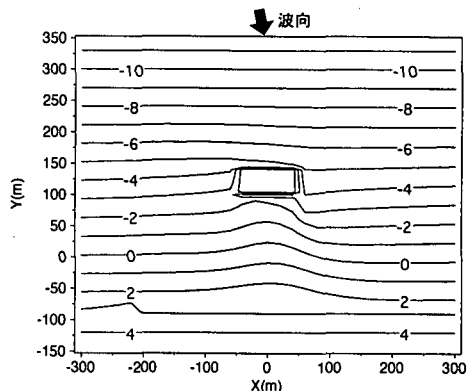


図-5 ケース 2 (斜め入射) の計算結果

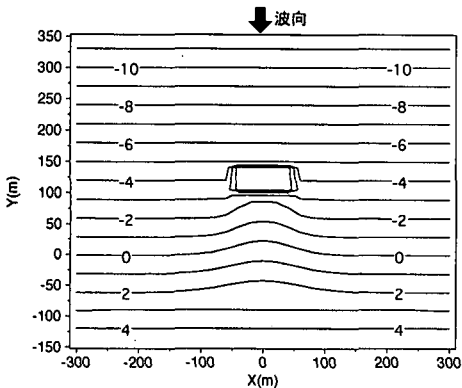


図-3 ケース 1 (直角入射) の計算結果

4. 計算結果

(1) 自然海浜に人工リーフを設置した場合

ケース 1 (離岸距離 100 m, 直角入射) の計算結果を図-3 に示す。波が直角入射するために, 人工リーフの中心線を境に左右対称の海浜変形が生じた。人工リーフ背後にはその消波効果に応じた舌状砂州が形成される。舌状砂州の形成に必要な土砂は周辺域から集められている。人工リーフの消波効果に応じて安定な舌状砂州の形態が定まることは, この舌状砂州の堆積範囲を超えて發浜が行われた場合, 過剰な土砂は周辺域に流出すること

を意味する。当然のことながら人工リーフの消波性能に応じて舌状砂州の規模と形状は変化する。

海浜変形は経時的現象として生じ, 波浪作用の開始直後の海浜変形速度は大きい, 時間経過とともに次第に海浜変形は収束する。図-4 には, ケース 1 の人工リーフ中央測線上における汀線位置の前進量と計算ステップ数の関係を示す。この計算では 5000 ステップまで計算を行った。この結果, 5000 ステップ後の汀線前進量は 23.7 m となった。一方 1000 ステップ目での汀線前進量は 21.9 m であり, 5000 ステップの 92% の結果が得られている。これらの差異は十分小さいことから, 以後の計算ではいずれも 1000 ステップで計算を打ち切り, 計算時間を短縮することにした。

ケース 2 (離岸距離 100 m, 入射角 $\alpha_b=10^\circ$) の計算結果が図-5 である。波が左斜め 10° の角度で人工リーフに対して斜め入射している。斜め入射波条件のために右方向への沿岸漂砂が卓越する。波が人工リーフに対して斜め入射するために, 人工リーフ側面にある -4 m の等深線形状を人工リーフの左右で比較すれば明らかのように, 左側では前進し右側では後退している。この結果 -4 m の等深線は人工リーフを挟んで左右非対称となった。このような等深線形状の非対称性は不透過突堤が設置されて沿岸漂砂が阻止された場合の汀線変化と同様な

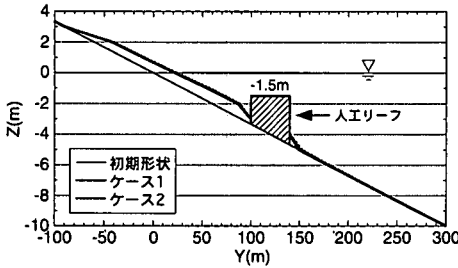


図-6 人工リーフ中央断面上における海浜縦断形の比較 (ケース1 vs. ケース2)

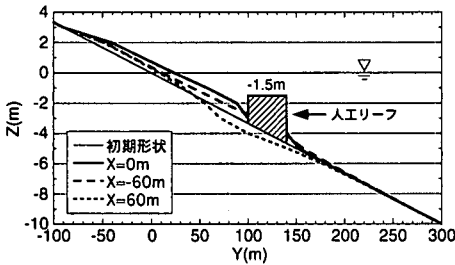


図-7 人工リーフの中央断面と両側に60m離れた断面の縦断形の比較 (ケース2)

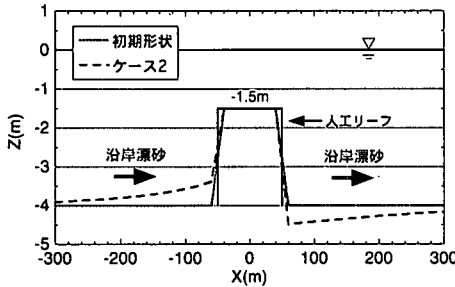


図-8 人工リーフを Y=120m で横断する測線上における海浜横断形の比較

変化である。一方、人工リーフの沖合では、左から人工リーフ沖への漂砂移動が生じたことにより、-5mの等深線の形状に典型的に見られるように、等深線の蛇行が起こる。また人工リーフの右側端部周辺では局所洗掘が進む。人工リーフ背後では舌状砂州の形成も進むが、その形状は左右非対称となり、左側の汀線は前進し、右側では後退する。以上の結果は第2節で述べた観測結果をかなりよく説明している。

図-6は、波の直角入射(ケース1)・斜め入射(ケース2)条件での人工リーフ中央測線上での海浜縦断形の変化を比較したものである。両者の縦断形はほぼ同一となり、人工リーフの波浪条件に応じた堆砂が生じる。波を斜め入射させたことの効果は、人工リーフの中心線に対して左右対称の関係にある測線の縦断形比較から明ら

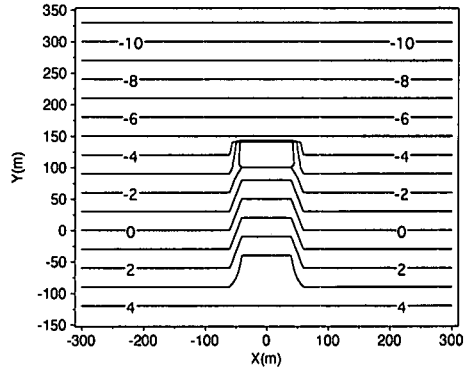


図-9 人工リーフ背後における矩形状養浜の初期形状

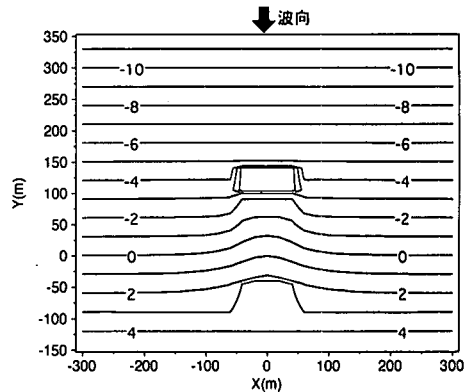


図-10 ケース3 (養浜, 直角入射) の計算結果

かになる。図-7は、ケース2について人工リーフの中央断面とそこから両側にそれぞれ60m離れた測線の縦断形を比較したものである。人工リーフの背後ではその消波効果に応じた舌状砂州が形成されるが、この位置から左に60m離れた測線では人工リーフによる沿岸漂砂阻止効果が現れて全体的に堆砂が起こる。これに対し、右側に60m離れた測線では汀線付近では堆砂が見られるものの、人工リーフの岸側端を中心に侵食が進んでいる。

人工リーフを Y=120m で横断する測線上における海浜横断形の比較を行ったのが図-8である。人工リーフを挟んで右側では人工リーフに接近するほど地盤高が増大し、右側区域では人工リーフと海底面との接点で最も地盤高が低く、人工リーフからの距離とともに地盤高は再び上昇する。このような海底地盤の沿岸方向分布は、沿岸漂砂が卓越した海岸に沿岸漂砂移動を阻止する構造物を建設した時現れる典型的な変化である。

(2) 人工リーフ背後に養浜を行った場合

人工リーフの背後に矩形状の養浜を行ったケース3, 4の初期地形を図-9に示す。まず、ケース3(離岸距離

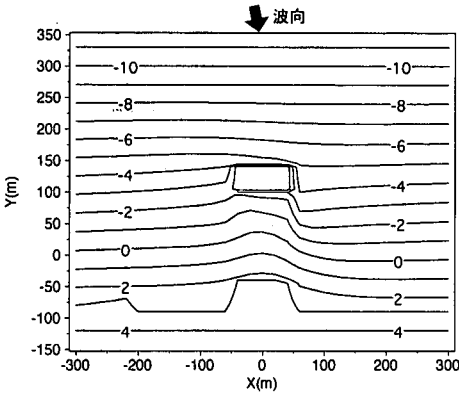


図-11 ケース4 (養浜, 斜め入射) の計算結果

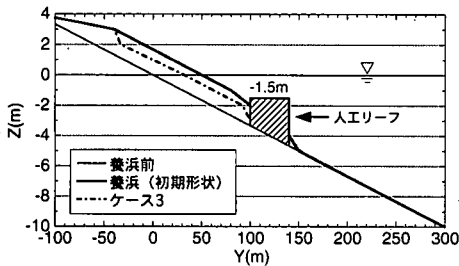


図-12 人工リーフ中央断面における養浜後の海浜縦断形変化

100 m, 直角入射) の計算結果を図-10 に示す。人工リーフ背後の矩形状養浜による初期海浜は、沿岸漂砂の作用によって両側へと流出し、背後の舌状砂州は人工リーフの消波特性によって一義的に定まる形状へと近づいた。このことは人工リーフ背後に過剰な養浜を行ってもその砂は沿岸方向に流出することを意味する。人工リーフの設計の手引きでは、人工リーフを前浜からの冲向漂砂を阻止し、暴浪に対して海浜を維持するために使用することができるとし、冲向漂砂による前浜侵食の発生条件として武田・砂村 (1983), 宇多ら (1989), 堀川ら (1975) の研究結果を示している。しかし人工リーフ背後での養浜の安定性は、上述のように前浜侵食の発生条件の判定とは全く無関係である。現手引き書に記されている前浜の侵食堆積判定は、無限に長い自然海浜を想定し、波浪の強弱による岸沖漂砂による海浜変形を対象とするものである。したがって人工リーフの形状が沿岸方向に完全に一様で、両端が突堤などで完全に区切られた場合を除けば、上述の検討は適用条件外となる。人工リーフが端部を有している場合や、養浜形状が沿岸方向に一様でない場合には、ここで述べたような等深線変化モデル、またはそれと同等な結果を得られる数値モデルによる検討が必要である。

同様にして他の諸元をケース1と同一として、波が人

工リーフに斜め入射した場合の計算結果を図-11 に示す。ケース3の結果に対して非対称性を付加したものとなる。この場合もリーフ背後の標高3mの等高線には変化が見られないが、これはその高さまで波の作用が及ばないことによる。図-12 は人工リーフの中心線上において養浜直後の縦断形とケース3の縦断形を比較したものである。過剰に養浜した土砂は沿岸方向に流出する。

5. まとめ

本研究で明らかになった点を要約すると以下のようである。

- ① 養浜を行った場合の人工リーフ周辺の海浜変形は等深線変化モデルを用いて予測できる。
- ② 人工リーフ背後にはその消波効果見合いの舌状砂州が形成される。
- ③ 斜め入射波条件では、人工リーフは沿岸漂砂の一部を阻止するが、人工リーフ沖では沿岸漂砂の一部が通過する。これは等深線の蛇行によって説明される。
- ④ 人工リーフ背後に養浜を行った場合、その人工リーフの消波効果に見合った安定な舌状砂州形状より過剰に養浜された土砂は沿岸漂砂によって流出する。いわゆる岸沖方向の漂砂とは無関係に舌状砂州形状は定まる。
- ⑤ ある場所に人工リーフを建設すると、人工リーフの消波効果が高い場合、離岸堤と同様に背後に砂が集められる。この砂は周辺海岸から集められるために、周辺海岸では水深が増大し、海岸保全などに新たな問題を生じさせることもある。人工リーフの設計においてはこのような点にも十分な配慮が必要である。

参考文献

芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 綱・熊田貴之 (2002): 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 496-500.

武藤和宏・宇多高明・島 敏明・岡本俊策 (1992): 高波浪によるバーの大規模変動の観測—石川海岸の離岸堤・人工リーフ沖の地形変化—, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 446-450.

宇多高明・秋本 修・小池康雄・柿市勝重・黒木利幸・中村利行 (2000): 河口処理を目的とした人工リーフの波浪減衰および閉塞防止効果の現地観測, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 531-535.

宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之・加留部亮太・三浦正寛 (2002): 沿岸漂砂量, 波による地形変化の限界水深および波候特性の関係, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 803-806.

宇多高明・河野茂樹 (1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp. 121-139.

芹沢真澄・Abdelaziz Rabie・三波俊郎・五味久昭 (1993): 回折領域の不規則波浪場の簡単な計算法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 76-80.

建設省河川局海岸課監修 (1992): 人工リーフの設計の手引き, (社)全国海岸協会, p. 94.