

BGモデルによる養浜時3次元湖浜変形予測

Prediction of 3-D Beach Changes using BG-Model after Beach Nourishment in Lake Kasumigaura

宇多高明¹・木暮陽一²・銭谷秀徳³・芹沢真澄⁴・渡辺宗介⁵・石川仁憲⁶

Takaaki UDA, Yoichi KOGURE, Hidenori ZENIYA, Masumi SERIZAWA,
Shusuke WATANABE and Toshinori ISHIKAWA

In Lake Kasumigaura, lakeshore vegetations and sandy beach have been devastated in recent years. To recover the sandy beach in Okisu Area in this lake, beach nourishment has been planned with coastal facilities to stabilize the beach, such as groins, detached breakwaters, artificial reefs and artificial headlands. To evaluate the effect of these facilities, BG-model proposed by Serizawa et al. (2006) was applied for predicting the three dimensional topographic changes after the nourishment. It is concluded that the most appropriate method is to stabilize the beach using a headland.

1. まえがき

過去、霞ヶ浦(西浦)では水質もよく、1960年代までは湖岸各地で湖水浴も行われ、夏季には多くの人々によって賑わった。しかし水質の悪化、湖浜侵食や湖岸堤前出しなどに伴う湖浜喪失などによりこれも廃れていった。現在こうした状態を見直し、「泳げる霞ヶ浦」の目標のもと、水質改善策の施工と同時に越波防止もかねた湖浜の復元も行われつつある。こうした状況を受けて、筆者らは、粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて浮島地区の砂嘴周辺における湖浜の復元計画について検討し(宇多ら, 2007), さらに2007年3月には一部の養浜も行われた。同様な検討は現在湖岸各地で行われているが、図-1のように浮島地区などのように湖心周辺にあって広い方向からの波の作用を受けない、土浦入りや高浜入りなどの奥深い入江の湖岸でも湖浜創生の要望が出されている。このような場所では、常時波浪が静穏であるために植生帯もまだ健全な形で残されているが、ある一方向からの波の作用により、それらの基盤が徐々に侵食されつつある。高浜入り北端に位置する沖洲地区では、湖岸整備にあたって遠く筑波山を望み、緩やかに湾曲した砂浜と植生帯を復元するイメージが提案されている。そこで沖洲地区において湖浜創生を進めると同時に、湖浜によって湖岸植生帯を防護する方法を検討するために、各

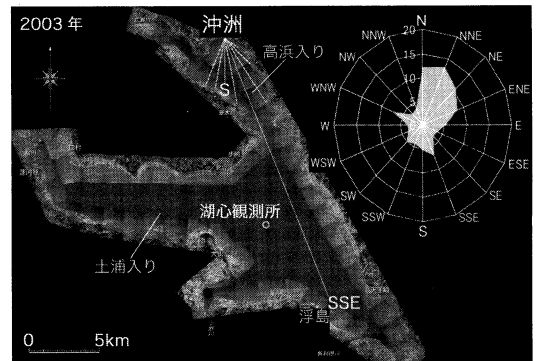


図-1 沖洲の位置と湖心における風配図

種対策施設を設置した条件の下でBGモデルを用いて3次元湖浜変形を予測し、最適防護手法を検討した。ここにBGモデルとは、芹沢ら(2006)により提案された、Inman and Bagnold (1963) による平衡勾配の概念と Bagnold (1963) による energetics approach を応用した海浜変形モデルのことで、Bagnold にちなんで BG モデルと呼ぶ。

2. 霞ヶ浦沖洲地区の特徴

沖洲地区は図-1に示すように高浜入りの奥部に位置し、湖岸線はほぼ南方向に開いている。湖心では冬季のN~ENEと夏季のSSE~SW方向が卓越しており、高浜入りの北端部に位置する沖洲にあっては冬季の卓越風は陸風となるため波浪は発達しない。一方、夏季の卓越風の方角別吹送距離は、SWが3.6km、Sが3.7km、SSEが20.5kmとなるが、有効吹送距離(主風向±45°)では、SWが2.3km、Sが5.2km、SSEが5.1kmであって、S、SSEは同程度となる。また、湖心の確率風速より沖洲における確率波高を推算すると、S方向からの波高が最も高いという結果が得られる。

- | | | |
|---------|-----|---|
| 1 正 会 員 | 工 博 | (財)土木研究センター理事なぎさ総合研究室長
兼 日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 |
| 2 | | 国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所長 |
| 3 | | 同 河川事務所調査課長 |
| 4 正 会 員 | 工 修 | 海岸研究室(有) |
| 5 | | 海岸研究室(有) |
| 6 正 会 員 | 工 修 | (財)土木研究センターなぎさ総合研究室主任研究員 |



図-2 湖浜整備の対象範囲

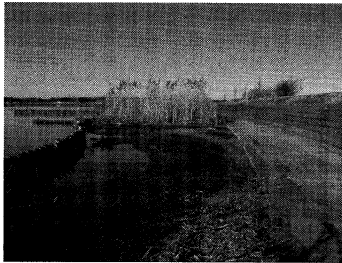


図-3 沖洲地区の南部にある小規模な砂浜 (a地点)

3. モデルの検証

沖洲地区では、モデルの検証に必要な砂浜の変形データはなく、現況で図-2, 3に示すように、板柵列の背後に形成された長さ20m程度の狭い砂浜がポケットビーチとして安定的に存在しているのみである。しかしこれ以外にも長さのごく短い浜が2箇所あるので、これら3箇所を汀線への法線方向から波の入射方向を推定すると、入射角は $S6^{\circ}W$, S , $S8^{\circ}E$ となる。しかしながらいずれも砂浜の規模は小さく、卓越波向の推定には誤差を伴う。そこでモデルの再現性の確認のため、まずこれら3方向からの入射波を与えて砂浜形状の再現性を調べた。再現計算に必要な条件は表-1のようである。対象範囲は植生と粘性土層で覆われており砂移動は見られない。このことから、検証計算では湖底地形を固定床と見做し、宇多ら(2005)と同様な考え方のもとでポケットビーチ沖に砂浜の規模から推定される $350m^3$ の砂(平衡勾配 $1/14$)を図-4(a)のように投入し、波による自由な砂移動を許して、最終安定状態として求められた砂浜形状が実測地形と一致するかどうかを確認した。図-4(b), (c), (d)には3ケースの予測結果を示すが、前述したように沖洲地区に対して有効吹送距離が長く、波高が最も高いS方向からの入射条件でこの砂浜の汀線との一致度が高いことが分かる。よって以下の計算ではS方向を卓越波向とした。

4. 湖浜創生のための基本条件

図-2に示すように、対象地区のうち湖岸整備対象区域300mの西部には排水樋管があることから、その東側300

表-1 計算条件：現況再現

初期地形	湖棚上に $350m^3$ の土砂を楕円形状に分布
地盤高下限	現況の海底地形
平衡勾配	1/10
安息勾配	1/2
入射波高 $H_b(m)$	0.23m (エネルギー平均波の碎波波高)
回折係数 K_d	1.0
入射波向 θ	ケース①: $S8^{\circ}W$ ケース②: S ケース③: $S6^{\circ}E$
漂砂係数	$K_s=0.2$, $K_d/K_s=1.62$
Q の水深分布	宇多・河野の分布
バーム高 h_b	Y.P.+1.3m ($h_b=h_R/0.32$)
波による地形変化の限界水深 h_c	Y.P.+0.4m (実測)
水位	Y.P.+1.1m
計算メッシュ, 時間ビッチ	$\Delta x=\Delta y=2m$, $\Delta t=0.1h$

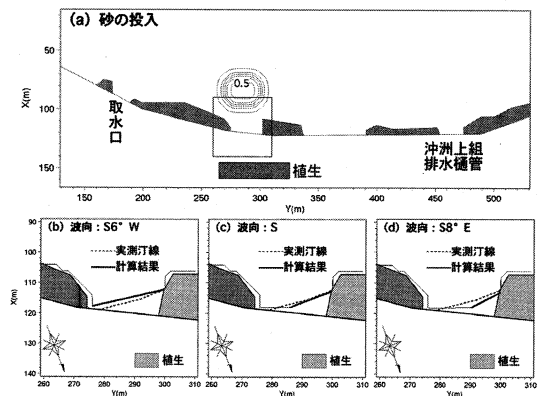


図-4 再現計算結果

mで湖浜の創生を行い、樋管と荷揚げ場の斜め突堤の間は既存植生帯の保護を重点的に行う区間とする。各種砂捕捉施設を設けた上で養浜を行うことにより、既存湖岸植生を防護しつつ新たに湖浜を創出することを目的とする。検討には上記モデルを用い、3次元湖浜変形予測結果をもとに最適案を定めた。計算は表-2のように全体で8ケースからなる。各ケース(No.)の主要な特徴は、突堤群(1), Y字突堤(2), 人工リーフ(3), 離岸堤(4), 離岸堤を東側に移動(5), 離岸堤を70mに延長(6), ヘッドランド(HL)(7), HLの向きを 10° 回転(8)である。以下では、いずれの図においても初期地形(a)と5万ステップ後(b)の湖浜形状を示す。なお、計算の基本条件として、次の7条件を設定した。①Y.P.1.1m時の汀線位置で測った浜幅は最低限15mとする、②既存植生帯に汀線が食い込まないようにする、③施設の規模は最小限とし10m単位とする、④突堤は護岸法線に直角とする、⑤離岸堤は不透水性とし、堤長50mを基本とする、⑥人工リーフの K_t は0.6、堤長は50mを基本とする、⑦波の遮蔽域に最初から砂を投入する。

表-2 計算条件：将来予測

地盤高下限	現況地形を固定床扱い
平衡勾配	1/14=0.071
安息勾配	1/2
入射波高 H_b (m)	0.23m
回折係数 K_d	構造物による遮蔽を考慮 (方向分散法)
入射波向 θ	S方向から入射 構造物による遮蔽を考慮 (方向分散法)
漂砂係数	$K_s=0.2$, $K_{s2}/K_s=1.62$
Qの水深分布	宇多・河野の分布
バーム高 h_b	Y.P.+1.3m (現況再現と同じ)
波による地形変化の 限界水深 h_c	Y.P.+0.4m (現況再現と同じ)
水位	Y.P.+1.1m (現況再現と同じ)
計算メッシュ, 時間ピッチ	$\Delta x=\Delta y=2m$, $\Delta t=0.1h$
計算時間	安定形まで (50,000step)
養浜天端高	Y.P.+1.5m
計算ケース	1: 突堤
	2: Y字突堤
	3: 人工リーフ
	4: 離岸堤
	5: 離岸堤 (設置位置変更)
	6: 離岸堤 (延伸70m)
	7: ヘッドランド
	8: ヘッドランド(10° 回転)

5. 湖浜形状の予測結果

図-5にはケース1の初期地形と5万ステップ後の安定形状を示す。既設の沖洲上組排水樋管(以下、G2と略記)と荷揚場の斜め突堤(G3)の位置はそのままとするが、沿岸漂砂の流出防止のために一部施設の延長を考えた。また、沖洲地区には水深約1m(Y.P.0.4m)の湖棚がある一方、船溜りや荷揚げ場周辺には深く掘削された航路があるのでその区域は避け、湖棚上で湖浜創出を図ることとし、漂砂流出防止のための施設を配置した。とくに東端にはいずれの場合も「く」の字突堤(G1)を配置した。ケース1は基本となる突堤案の場合である。5万ステップではS方向からの入射波の作用下で、施設下手側の等深線が後退し、上手側では前進するという変化が起きた。また遮蔽域では湾曲した等深線となった。図には既存植生帯a,b,c,dも示すが、これらの沖合を緩やかな砂斜面で防護する必要がある、これには植生帯の沖側限界が汀線と重なるか、あるいは汀線が植生帯より沖合となることが求められる。突堤間隔を狭めて配置したにもかかわらず、この場合植生帯bを防護できない。また多数の施設で湖岸線が分断されるという弱点がある。

図-6はケース1における中央部の2基の突堤をY字突堤に変更したケース2の結果を示す。ここで、Y字突堤の先端部は卓越波の入射方向と直角、および平行に定めている。G1とY字突堤との距離が長くなったことから、植生帯aの防護レベルはケース1より低下し、同様にY字突堤とG2間の距離が長くなった結果、植生帯cの中央部が波に晒される危険度が増大した。これらとは逆に、Y字

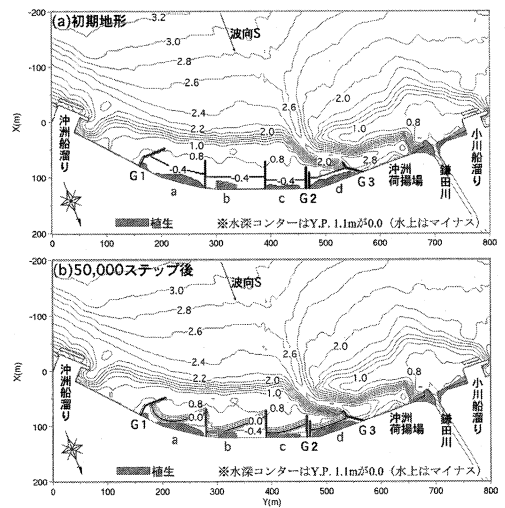


図-5 将来予測計算結果：ケース1

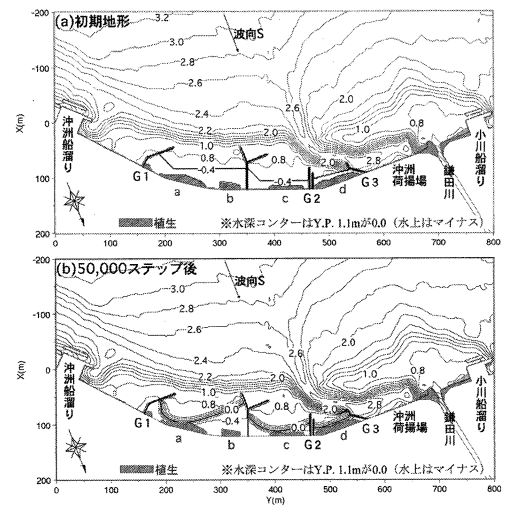


図-6 将来予測計算結果：ケース2

突堤の東側では幅50m程度の前浜が形成され、植生帯bは完全に防護された。この場合には植生帯bは繁茂域の拡大が起こると推定される。またY字突堤による波の遮蔽域でも砂浜が広がることから、植生帯cも繁茂域が広がる可能性が大きい。しかしY字突堤は規模が大きく湖浜を分断するので、砂浜が長く続くというイメージの湖浜創出には向かない。湖岸景観から見ると、G1は沿岸漂砂の流出防止上必要でありやむをえないが、中央部の施設はできれば水面下に没していることが望ましい。そこで中央部に人工リーフを設置したのがケース3である。結果を図-7に示す。人工リーフ設置後、湖岸に沿ってできるだけ広く養浜したが、波の作用後には人工リーフ上手側の養浜砂はほとんど全部西向きに移動し、G2の先端を回り込んで樋管前面に入り込むと同時に、植生帯a,

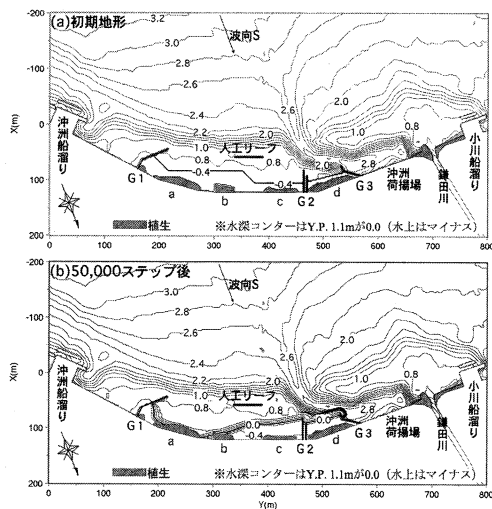


図-7 将来予測計算結果：ケース 3

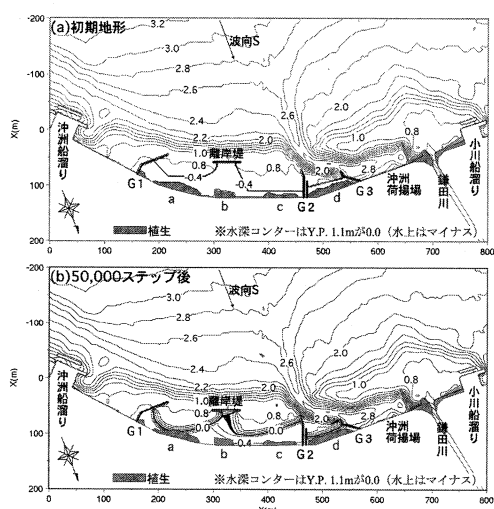


図-9 将来予測計算結果：ケース 5

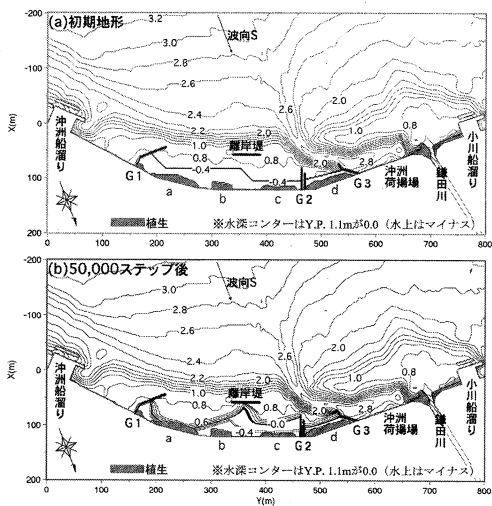


図-8 将来予測計算結果：ケース 4

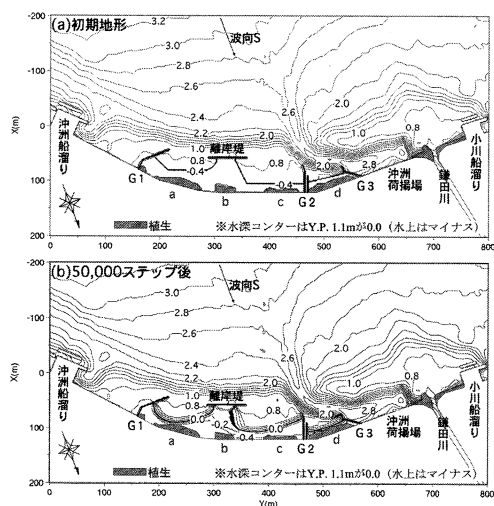


図-10 将来予測計算結果：ケース 6

bの一部が波に晒される。これより人工リーフでは養浜砂の制御がうまくできないことが明らかである。

次に、養浜砂の捕捉度を向上させるために、人工リーフを不透過離岸堤に変えたのがケース4である。人工リーフと異なり波の遮蔽効果が著しく上昇したために離岸堤背後には舌状砂州が発達した(図-8)。浅海部の等深線は離岸堤にまで接続している。また舌状砂州の形状は、離岸堤が入射波向と斜行しているため、東西で非対称形となるなど、しばしば現地海岸で観察される特徴がうまく再現されている。このケースでは、植生帯b,cは広い前浜によって守られるが、植生帯aは直接波に晒され、しかもG1による波の遮蔽域外に位置するため強い波の作用を受けるので植生帯は侵食される。この点よりケース4は対策として不十分である。

ケース4の離岸堤案は、その背後に舌状砂州を発達さ

せることができることからかなりよい案と見なせるが、植生帯aを防護することができない。その理由として、離岸堤が西側に寄り過ぎているため、G1との間隔が長くなり過ぎ、結果として東部での汀線後退量が増したことによる。そこで離岸距離と堤長は同一に保ったまま離岸堤を東側に40mずらした。これがケース5である。結果を見ると、離岸堤背後ではトンボロができて植生帯aの周辺は幾分浅くなり効果が上がっているが、依然として波に晒されている(図-9)。またG2の先端を斜めに10m延長したにもかかわらず砂が先端まで堆積し、樋管への回り込みが懸念される。このことからケース5も対策として不十分である。

ケース5の離岸堤案では植生帯aの防護が不十分であると同時に、G2までの距離が長いために一部の砂が樋管へ回り込む危険性が指摘された。この原因は離岸堤と

表-3 各ケースの比較

ケース	目標浜幅 15m	植生帯防護	樋管堆砂	航路堆砂	養浜土砂量 (m ³)	施設延長 (m)
1: 突堤	○	× : c	○	○	6,000	275
2: Y字突堤	△	○	○	○	8,000	305
3: 人工リーフ	×	× : b, c	×	×	8,000	235
4: 離岸堤	×	× : b	×	○	8,000	235
5: 離岸堤 (設置位置変更)	×	×	○	○	8,500	245
6: 離岸堤 (延伸 70m)	○	○	○	○	9,000	265
7: ヘッドランド	○	○	○	○	8,500	285
8: ヘッドランド (-10° 回転)	○	○	○	○	9,500	275

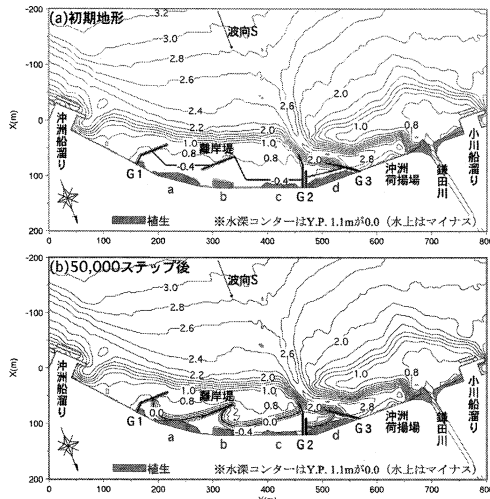


図-11 将来予測計算結果：ケース 7

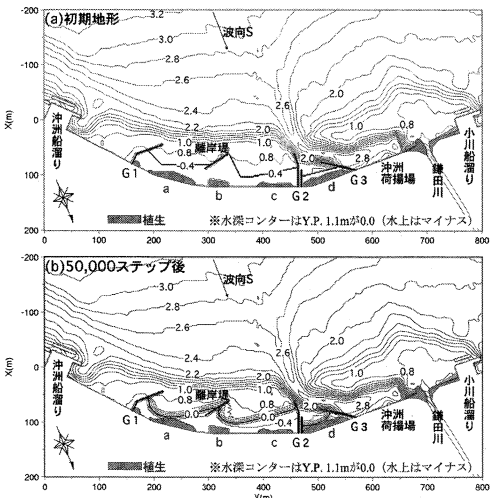


図-12 図-12 将来予測計算結果：ケース 8

G1, G2 までの距離が長いことにある。そこで離岸堤を東西両方向に10m延長して70mとしたのがケース6である。図-10に示す結果を見ると、このケースでは全ての植生帯の防護が可能で、G2への漂砂の回り込みも阻止できる。この意味から一つの案となる。

一方、ケース6の離岸堤は湖岸線と平行に設置されており、また沖合に規模の大きな消波構造物ができて景観

阻害となる可能性もある。そこで堤長60mの離岸堤を反時計回りに21°回転させ、Sと直交する方向に伸ばしてHLと同様に配置したのがケース7である。図-11に示すように、全植生帯は波に対して防護される。沖合に規模の大きな施設ができないという点では一定の効果が見られる。しかしHLの方向が卓越波の入射方向と同一なので、上手側の養浜砂の一部が下手側へと流出しやすい欠点がある。

このことから、ケース8ではHLをさらに10°反時計回りに回転させて養浜を行った。この結果が図-12である。全ての植生帯の防護が可能となり、また沖合に人工構造物が長く造らなくて済むことから最も合理的な案と判断される。

6. 総合評価

表-3には8ケースの計算結果をまとめて示す。目標砂浜幅15m、植生帯防護の両者を満足する案は、ケース2のY字突堤、ケース6の堤長70mの離岸堤、ケース7のHL、およびHLの向きを10°回転したケース8である。これらを工費と比例関係にある施設延長から見ると、ケース2は305mと最も長く不経済である。一方、ケース6の施設延長は短いものの、沖合の視界を妨げる施設ができることから景観上望ましくない。よって、ケース7,8のいずれかが適当と考えられるが、ケース8が施設延長、およびHL下手手への漂砂流出防止上有効と考えられる。以上より、最適案はケース8のHL案となる。

参考文献

- 宇多高明・木暮陽一・平野一彦・大内香織・三波俊郎・熊田貴之(2007): 霞ヶ浦浮島地区における湖浜再生に関する検討, 水工学論文集, 第51巻, pp.1325-1330.
- 宇多高明・清野聡子・大矢忠一・安田武夫・高橋 功・古池鋼・星上幸良(2005): 沖合投入土砂の養浜効果予測手法の開発, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.641-645.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼(2006): Bagnold概念に基づく海浜変形モデル, 土木学会論文集B, Vol.62, No.4, pp.330-347.
- Bagnold, R. A. (1963): Mechanics of marine sedimentation, in The Sea, M. N. Hill (editor), Vol.3, pp.507-528, New York, Wiley.
- Inman, D. L. and Bagnold, R. A. (1963): Littoral processes, in The Sea, M. N. Hill, (editor), Vol.3, pp.529-533, New York, Wiley.