

Bagnold 概念に基づく海浜変形予測モデルによる港内堆砂と周辺海岸の侵食予測

MODEL FOR PREDICTING BEACH CHANGES BASED ON BAGNOLD'S CONCEPT AND APPLICATIONS

宇多高明¹・芹沢真澄²・三波俊郎³・古池 鋼³・石川仁憲⁴

Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA, Toshiro SAN-NAMI, Kou FURUIKE and Toshinori ISHIKAWA

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 (〒110-0016 台東区台東 1-6-4 タカラビル)

² 正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 301)

³ 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 301)

⁴ 正会員 (財) 土木研究センターなぎさ総合研究室 (〒110-0016 台東区台東 1-6-4 タカラビル)

Regarding the prediction of three-dimensional beach changes, Serizawa *et al.* (2006) derived sand transport equations, while returning to the fundamental concepts of Bagnold's basic study, and developed a model for predicting beach changes by applying the concept of the equilibrium slope and the energetics approach. In this study, this model is applied to investigate the relationship between the refilling of a navigation channel behind a port breakwater and beach erosion on the nearby coast. It is concluded that sand back passing, in which dredged material is used for beach nourishment on the eroded coast, is required to prevent the expansion of beach erosion to the nearby coast.

Key Words : Bagnold, predictive model, beach changes, refilling of sand, navigation channel, beach erosion

1. はじめに

一般に、外海・外洋に面した海岸のように漂砂が活発な海岸において長い防波堤が建設されると、それにより形成される波の遮蔽域の外側から内側へと向かう沿岸漂砂が誘起され、遮蔽域外では侵食が、遮蔽域内では砂の堆積が起こる。過剰な土砂堆積は状況によっては航路埋没を招き船舶の通行に危険を及ぼす。この場合通常行われる対策としては、漂砂の流入防止のための防砂突堤の建設や浚渫がある。これらのうち後者について、現在まで使われてきている港湾や漁港の基準では、異常堆砂が生じた場合には危険防止のために堆積土砂を除去すること、また浚渫土砂は建設材料として埋め立てなどに有効利用すべきとされている¹⁾。しかしこの考え方では、所管が異なる周辺海岸の侵食へ及ぼす影響は考慮されていない。このため堆積土砂の浚渫を繰り返して行くと、周辺海岸全体の土砂の損失に繋がると考えられる。過剰な土砂の堆積も、土砂の欠損(海岸侵食)も同じ程度に問題であるが、立場の相違によって考え方は異なる。しかし問題を放置すれば、IPCCの報告にあるような近い将来の地球温暖化に伴う海面上昇が起きた場合、急速な砂浜の消失に伴って最早対処できない

悲惨な結果を招く恐れが大きい。問題の解決には土砂を限りある資源と捉えて再利用することが必要であるが、現在使用されている各種基準ではそのような考え方は明記されていない。この問題について、宇多²⁾は基準の精査を行ったものの、砂移動の機構は模式的に示したのみであった。また宇多²⁾はHsu・Evansの方法を3次元に拡張した方式で、浚渫とその後の堆積の問題を扱い簡単に考察した。しかしこの方式も漂砂量の時間的・空間的分布を正確に予測した上での計算ではないため、任意の境界条件を持つ実海岸への適用には限界があり、この種の問題の定量的評価や対策検討は十分に行うことができない。最近芹沢ら³⁾は、Bagnoldの研究の原点に立ち戻って漂砂量式を導き、平衡勾配とenergetics approachを考慮して海浜変形モデルを構築した。このモデルは上記問題にも適用が可能なことから、ここでは芹沢らの式に基づく数値計算によりこの問題について検討する。

2. モデルの基本式

芹沢ら³⁾は、Inman・Bagnold⁴⁾による平衡勾配の概念と、Bagnold⁵⁾によるenergetics approachを応用して海

浜変形モデルを構築した。このモデルでは、実海岸で測定された海底勾配を平衡勾配として与えることにより、岸沖・沿岸漂砂を分離せずに漂砂量を評価し、砕波点での波条件のみを用いて漂砂フラックスが算定されている。いま、デカルト座標 (x, y) を考え、高さ $Z(x, y, t)$ を解くべき変数とする。波が $\tan\beta$ の一様勾配海岸に斜め入射する場合、ネットの砂輸送フラックス $\vec{q} = (q_x, q_y)$ は式 (1) で与えられる。

$$\vec{q} = \frac{G}{\tan\beta_c} \left[\tan\beta_c \vec{e}_w - \nabla Z \right] \quad (1)$$

$$G = C_0 K_1 \Phi = C_0 K_1 \varepsilon(Z) (EC_g)_b \cos^2 \alpha_b \tan\beta_c \quad (2)$$

$$C_0 = \frac{1}{(\rho_s - \rho)g(1-p)} \quad (3)$$

$$\int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon(Z) dZ = 1 \quad (4)$$

$$\varepsilon(Z) = \begin{cases} = \frac{2}{h_c^3} \left(\frac{h_c}{2} - Z \right) (Z + h_c)^2 & (-h_c \leq Z \leq h_R) \\ = 0 & (Z < -h_c, h_R < Z). \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 $\vec{e}_w = (\cos\theta_w, \sin\theta_w)$ は波向方向の単位ベクトル、 θ_w は波向角、 $\nabla Z = (\partial Z/\partial x, \partial Z/\partial y)$ は Z の勾配ベクトルで、その方向は等深線直角方向岸向き、その大きさは $\tan\beta$ に等しい。 Φ は単位時間、単位長さ当りの波のエネルギー逸散割合、 $(EC_g)_b$ は砕波点におけるエネルギーフラックス、 α_b は砕波角、 K_1 は沿岸漂砂量係数、 C_0 は水中重量表示と砂の堆積表示での漂砂量係数の比、 ρ_s と ρ は砂と海水の比重、 g は重力加速度である。また p は砂の空隙率、 h_c は波による地形変化の限界水深、 h_R は波の打ち上げ高に対応するバーム高である。 $\varepsilon(Z)$ は沿岸漂砂量強度の水深方向分布で、宇多・河野⁶⁾の3次式を用い、 h_c から h_R までの積分値が1となるよう式 (5) で与える。 $\tan\beta_c$ は平衡勾配であり、直角入射条件の下で岸沖漂砂が0となるときの海底勾配である。式 (1) は波が汀線に直角方向から入射する条件では、局所勾配が平衡勾配に等しい条件で岸沖漂砂が0となり、局所勾配が平衡勾配より小さければ岸向き漂砂が起こることを表す。計算では、芹沢ら⁷⁾と同様海浜の長期的変化予測を考え、構造物建設前の平均勾配を平衡勾配とおく。海浜変形は次の連続式を解いて求める。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q} \quad (6)$$

計算領域は Δx と Δy のメッシュで分割する。 Z と漂砂量 $\vec{q} = (q_x, q_y)$ は $1/2$ メッシュずつずらして配置し陽形式差分法で解く。初期地形と H_b 、 α_b 、 h_c 、 h_R 、平衡勾配を与えると、漂砂フラックス (q_x, q_y) が式 (1) で計算され、 Δt 後の地形変化量が式 (6) で求められる。これ

らの計算が繰り返し行われる。境界条件としては構造物境界では漂砂量を0と置く。

3. モデルの応用

上記海浜変形モデルを用いて、防波堤背後の波の遮蔽域での砂の堆積機構を分析するとともに、航路埋没防止のための掘削が周辺地形に及ぼす影響の定量評価を行った。地形変化計算においては、防波堤背後の回折係数 K_d と波向は酒井ら⁸⁾の方向分散法により求め、砕波波高は K_d を乗じて減少させた。また h_c と h_R も K_d を乗じて減少させた。

まず、図-1のように平行直線状等深線を有する海岸の一端に防波堤が伸ばされたとする。初期勾配は $1/20$ の一様勾配、陸上・海中の限界勾配は $1/2$ 、砕波波高は 3m の一定値、 h_c は 10m 、 h_R は 3m と仮定する。図-2は、この条件下で求めた20,000ステップ後の、完全に安定状態に至った海浜形状を示す。防波堤による波の遮蔽効果のために、海岸線に沿って左向きの沿岸漂砂が生じ、運ばれた砂が防波堤背後に堆積する。同時に周辺海岸では砂が運び去られた結果侵食が起こる。また防波堤背後では砂が深い場所まで急勾配をなして落ち込んでいる。これと逆に堆積域の陸上部では広い前浜が形成される。図-3は対応する水深変化量である。侵食が広域で起こり、最大地形変化量は 1m である。一方、防波堤背後では大量の砂が堆積し、最大堆積厚は 9m にも達する。このような著しい地形変化

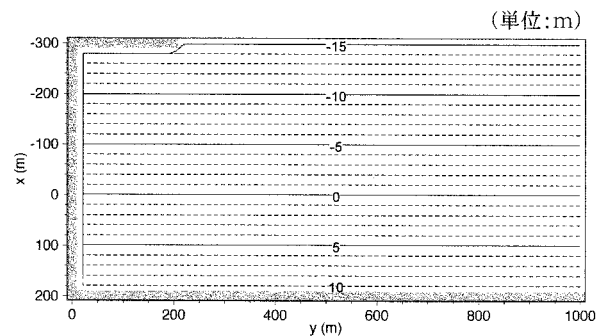


図-1 初期形状（平行直線状等深線を持つ海岸の一端に防波堤が伸ばされ場合）

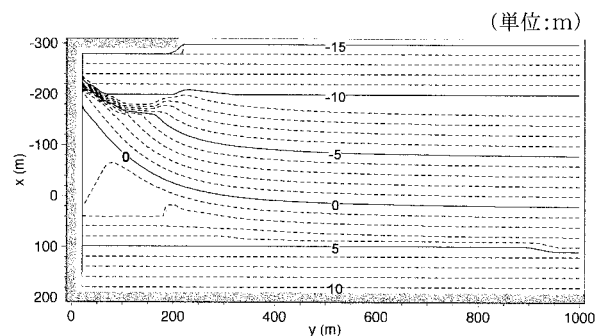


図-2 20,000ステップ後に完全な安定状態に至った海浜形状

は堆砂防止の施設なしの条件であり、実際にはほとんど防砂突堤が完成しているから現況では起こりにくい。

そこでいま砂の堆積の防止のために防砂突堤が造られている条件を考える。ただし多くの事例では、防砂突堤の先端水深は、その海岸における波による地

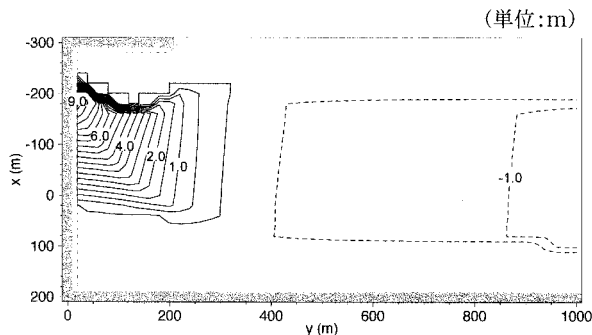


図-3 水深変化量の平面分布

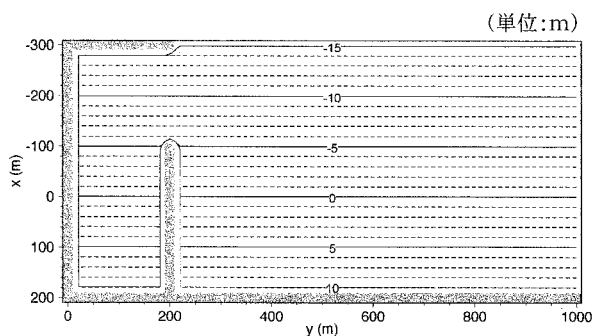


図-4 初期形状（先端水深6mの防砂突堤を設置した場合）

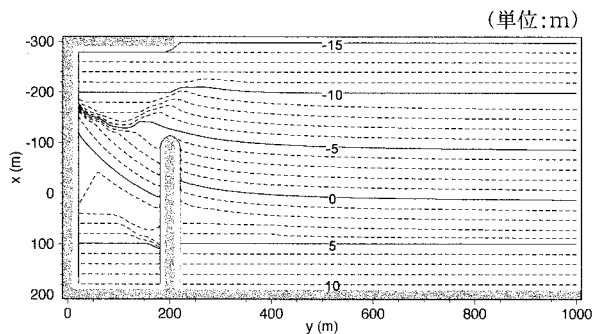


図-5 20,000ステップ後の予測地形（先端水深6mの防砂突堤を設置した場合）

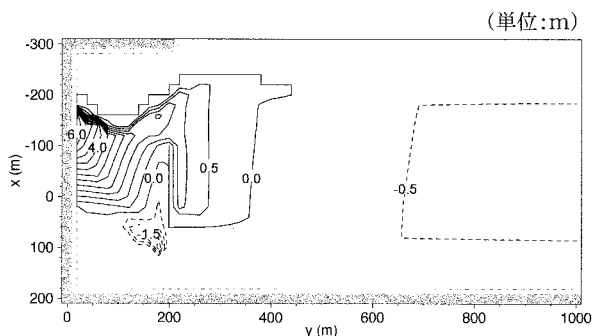


図-6 水深変化量の平面分布

形変化の限界水深 (h_c : 外海・外洋に直接面した海岸ではほぼ10m程度) より小さいので、ここでも先端水深は h_c より小さい条件とする。図-4, 5は先端水深が6mの防砂突堤を設置した場合の初期地形と、20,000ステップ後の地形変化予測の結果である。突堤なしと比較して、突堤が堆砂防止を図る上で有効なことが明らかであるが、突堤の先端水深が h_c と比較して小さいためにその効果は限られる。図-6は対応する地形変化量の分布である。突堤なしと比較して最大堆積厚は9mから6mまで低下しているが、依然として大量の砂が突堤先端を回り込んで堆積することとなる。結局、その先端水深が h_c より小さい突堤では港内堆砂を完全に防止することは困難となる。

防波堤背後の波の遮蔽域が航路または泊地として使われる場合を考えると、十分な水深を維持するために一般に維持浚渫が行われる。この場合、防砂突堤の先端水深が h_c より浅ければ、上述のように浚渫後沿岸漂砂により再び波の遮蔽域へと砂が運ばれることになる。まずこの状態の予測を行った。図-7は浚渫直後の海底形状であり、図-5に示した初期地形が浚渫されて深くなっている。掘削後砂が直ちに運ばれ図-8のように航路に堆積した。その後、2, 3, 4, 5回と浚渫が繰り返し行われるとし、そのたびごとに図-8と同じ初期状態まで埋め戻される。この場合の海浜変形計算の結果が図-9である。浚渫後港内に半円形の堆積域が形成される。防砂突堤脇ではあたかも砂嘴のようにほぼ半円形状の砂州を形成して砂が堆積する。ここで波の遮蔽域の外側での海浜変形に着目すると、浜崖の形成区域が右端から次第に防砂突堤へと接近

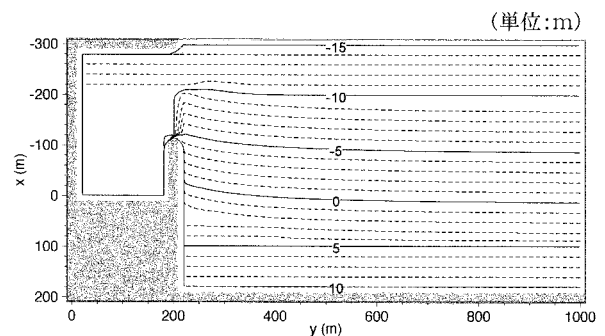


図-7 浚渫直後の海底形状

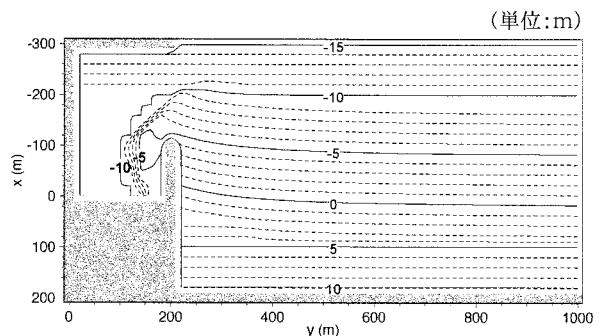


図-8 1回目の浚渫後に埋め戻された海底地形

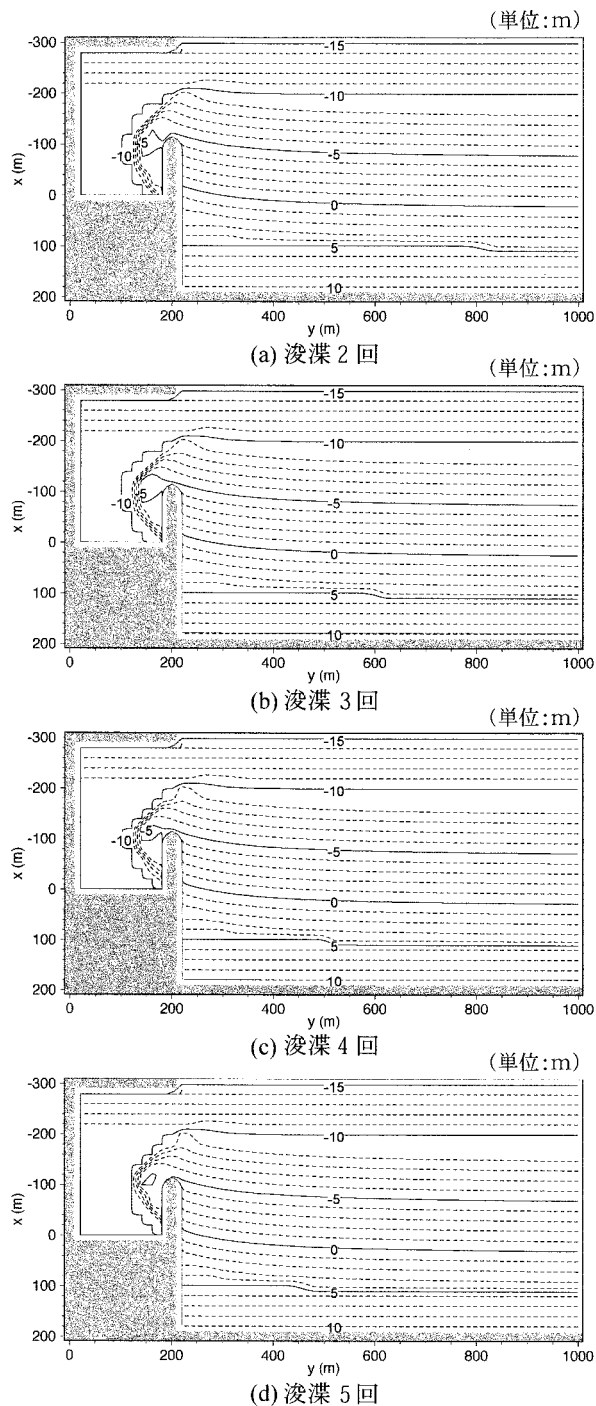


図-9 2～5回の浚渫後の海底形状

していることが見て取れる。このように周辺海岸では侵食が徐々に進むことが明らかである。図-10は地形変化量の分布である。毎回の掘削後、砂は最大5mの深さで半円形状に堆積する。一方周辺海岸にあっては h_c より浅い区域全体で侵食が進む。図-11は毎回の掘削後の汀線変化であるが、毎回の掘削ごとに汀線は後退していく。このことは砂の再堆積防止措置が十分でない港で浚渫が繰り返されることは、周辺海岸の侵食をもたらすことに繋がることを示してい

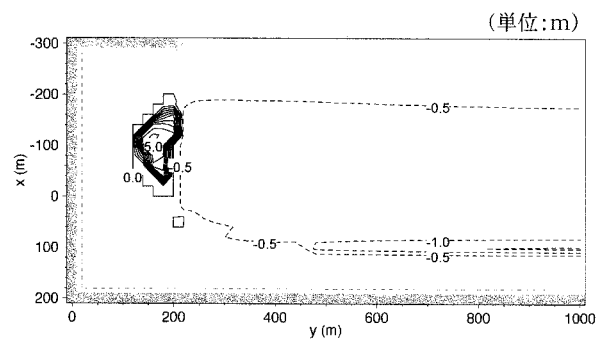


図-10 5回の浚渫後の地形変化量の平面分布

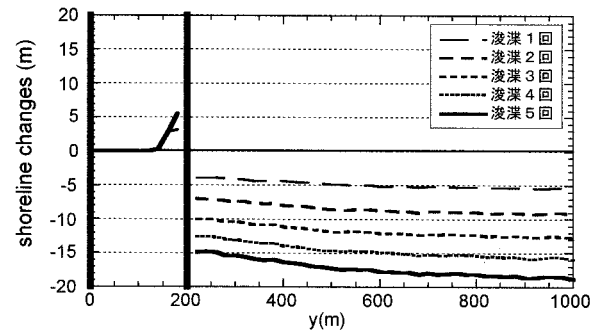


図-11 5回の浚渫後の汀線変化

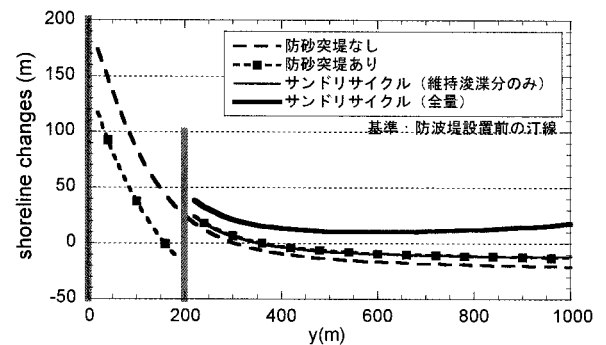


図-12 建設当初からの堆積土砂全量を右端から投入した場合の汀線変化

る。一つの対策として、毎回の浚渫土砂を計算領域の右端の汀線から投入した場合の計算を行った(図-12参照)。投入土砂は波の遮蔽域へと向いた沿岸漂砂によって左向きに運ばれ、抜け出ていく漂砂と注入する漂砂は動的にバランスするため、初期の汀線がほぼ保たれ侵食は起こらない。このことから、砂のリサイクルを行うことによれば隣接海岸をうまく保全できることが分かる。一方、図-12には防砂突堤ありの条件で、維持浚渫だけでなく建設当初からの堆積土砂全量を右端から投入した場合の汀線変化も示す。この場合、港建設のための掘削土砂が隣接海岸に養浜されることになり、周辺海岸では全体に汀線が前進することになる。

4. 考察

実際の事例では、港内や航路への堆積土砂はここで予測したように周辺海岸から運ばれた砂のみが堆積するのではなく、閉鎖性水域に周辺の陸地から流れ込んだ物質も堆積し、いわゆるヘドロと呼ばれるものも堆積する事例が多い。このため条件によっては浚渫土砂をそのまま浜での養浜に利用しようとすると思いが発生して周辺住民から苦情が出る、あるいは過剰な濁りが発生して海域での漁獲の障害となる恐れもある。これを考えると、目先の障害を取り除くという視点において、浚渫土砂の沖合投棄は、「周辺環境に優しい手法」といえなくもない。しかしかたにヘドロ分があったとしても、上記の沿岸漂砂が発生しうる外海・外洋に面し、波浪エネルギーの大きな海岸に位置する港での浚渫土砂には、必ず周辺海域から運び込まれた砂が含まれている。従って、それに含まれた砂分を無視して浚渫土砂の沖合投棄または他の場所への持ち出しを続けると、結局は土砂収支から考えて周辺海岸の侵食に繋がることになる。この状況をそのままにし、侵食が進む海岸において侵食対策として護岸や人工リーフなどを造ることは、海岸法の精神と逸脱し、多額の維持費を要しつつも劣化の止まらない海岸に造り変えていく行為に等しい。このように考えれば、水産行政において既に行われてきているように、漁港内の堆積物に含まれるヘドロ分が少なくするよう水質改善を促進し、できる限り砂分の堆積のみとするように工夫することが必要である。そのようにヘドロ分が少ない土砂であれば、鳥取県⁹⁾が近年採用したように、浚渫土砂を沖合で養浜するなどしてネットの砂の損失を起こさない手法を取ることが可能となり、漁民からの反対も受けずに砂のリサイクルが可能になると考えられる。また港から離れた場所に養浜した場合、その砂は時間経過とともに波の遮蔽域へと戻るが、それが港の管理者の立場から見れば無駄な維持に予算を要していると短絡的に判断することは避けるべきである。例えば維持費がかかっても、砂の適正な管理を行うことによって自然状態の海岸から大きくずれない姿を保つことが長期的には合理性を有していると考えられるからである。その場合さらに土砂の投入方法などの工夫を行って維持費を少なくする手法を考えていくことが有効である。

5. 結論

芹沢らの海浜変形モデルを用いて、波の遮蔽域が航路や泊地として利用されている場合の堆積土砂の浚渫が周辺海岸へ及ぼす影響を予測した。この結果、港内での砂の過剰な堆積と周辺海岸の海岸侵食はセットで起こるものであり、過剰な堆積と土砂の流出（侵食）は表裏の関係にあることを明らかにした。過剰な堆積物は障害物であり、同時に起こる砂の流出は資源の損失であって、両者は裏腹の問題であるがゆえに問題を総合的に解決する視点が必要である。そのことが近未来起こる海面上昇の被害を小さくする上でも必須と考えられる。

参考文献

- 1) 宇多高明：漁港・港湾・河川の基準における浚渫の取扱いと海岸侵食，海洋開発論文集，第 21 巻，pp. 463-468, 2005.
- 2) 宇多高明：「海岸侵食の実態と解決策」，山海堂，p.304, 2004.
- 3) 芹沢真澄，宇多高明，三波俊郎，古池 鋼：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, 2006.
- 4) Inman, D. L. and R. A. Bagnold: Littoral Processes, in The Sea, M. N. Hill, (ed.), Vol. 3, pp. 529-533, New York, Wiley, 1963.
- 5) Bagnold, R. A. : Mechanics of Marine Sedimentation, in The Sea, M. N. Hill (ed.), Vol. 3, pp. 507-528, New York, Wiley, 1963.
- 6) 宇多高明，河野茂樹：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, 1996.
- 7) 芹沢真澄，宇多高明，三波俊郎，古池 鋼，熊田貴之：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, 2002.
- 8) 酒井和也，小林昭男，宇多高明，芹沢真澄，熊田貴之：波の遮蔽構造物を有する海岸における 3 次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 496-500, 2003.
- 9) 安本善征，宇多高明，松原雄平，佐藤慎司：鳥取沿岸の総合的な土砂管理ガイドラインの策定と実施，海洋開発論文集，第 22 巻，pp. 415-420, 2006.