

沿岸漂砂卓越海岸における多段バーの消失・形成予測モデル

Model for Predicting Formation and Deformation of Multiple Bars on Coast with Predominant Longshore Transport

清水達也¹・小林昭男²・宇多高明³・芹沢真澄⁴・熊田貴之⁵・野志保仁⁶

Tatsuya SHIMIZU, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA
Takayuki KUMADA and Yasuhito NOSHI

A model for predicting the formation and deformation of the multiple bars is developed. The model developed by Shimizu et al. (2008), which can predict 2-D formation of the multiple bars applying the contour-line-change model, is further expanded to predict 3-D formation and deformation of the multiple bars. Taking the beach changes around Fukude fishing port, where multiple bars developed before the construction of the breakwater, but it disappeared after the construction of the breakwater obstructing longshore sand transport as an example, numerical simulations were carried out. The formation and deformation of the multiple bars were predicted by the model.

1. はじめに

緩勾配の細砂で構成される砂浜海岸では、しばしば多段バーが形成される。粒径の細かい砂で構成される多段バーは沿岸漂砂の供給条件の変化を受けやすい一方で、多段バーは碎波変形をも促すことから、海岸保全上重要な役割を果たしている。また、バー周辺にはチョウセンハマグリなどの二枚貝類が多く生息し、彼らの成長過程で必要とされる生息環境を与えている。こうしたことから、バーの発生を予測可能とすることは、海岸保全だけでなく二枚貝類などの魚介類の生息環境の評価にも役立つと考えられる。清水ら(2008)は、石川県羽咋海岸を例として多段バーの形成にかかわる海浜変形予測モデルを開発したが、その研究では海浜断面形の予測にとどまっていたため、沿岸漂砂の枯渇による侵食過程においてバーが消失して漁場環境が劣化するなどの問題には適用できなかった。これには多段バーの形成を平面場でも予測可能とする必要がある。そこで本研究では、沿岸漂砂の供給条件の変化に伴う多段バーの消失および形成を予測可能とするため、芹沢ら(2002)の等深線変化モデルを応用した実用モデルの開発を行った。

2. 多段バーの発達モデル

バーの中でも、緩勾配海岸に形成される多段バーの形

成機構についてBowen(1980)は、Bagnoldの漂砂式(Inman and Bagnold, 1963; Bagnold, 1966)をもとに、波の作用に伴う岸向き漂砂と、海浜斜面向きに作用する重力効果による沖向き漂砂がバランスして平衡海浜断面が形成されることを示し、その上に海浜へ入射する長周期波とその海浜斜面からの反射波とが合わさって生じる定常波(以下、「反射定常波」)の作用が重なると平衡海浜断面への摂動解として多段バーが形成されることを理論的に検討し、浮遊砂の卓越する条件では、反射定常波の水面波形の腹の位置に多段バーが形成されることを示した。同様な考え方をもとに、加藤(1984)も実海岸に形成される多段バーを対象として、それらの資料解析結果から反射定常波による多段バーの成因を示した。

反射定常波の作用下では、各点の水面は時間的に周期変動する。また、その振幅は岸沖方向に周期的に変化し、ある間隔で節と腹が交互にできる。腹は、水面変動の最大点であり、同時に水平流速の最小点でもある。浮遊砂は水平流速の小さい箇所に集積しやすいため、浮遊しやすい細砂が水面波形の腹の位置に堆積してバーを形成すると考えられる。いま、一様勾配斜面に長周期波が直角入射し、斜面で完全反射する条件を考えると、入・反射波により反射定常波が形成される。この解は、Bessel関数を用いて表される。堀川(1985)、Short(1999)などによると式(1)で定義する沖向き距離の無次元パラメータ Y を用いて水面波形 η は式(2)のように表わされる。

$$Y = \frac{\omega^2 y}{g \tan \beta} \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta = a J_0(\sqrt{4Y}) \cos \omega t \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 y は汀線を原点とする沖向き距離、 t は時間、

-
- | | | |
|--------|------|--|
| 1 学生会員 | 修(工) | 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 |
| 2 正会員 | 工博 | 日本大学教授理工学部海洋建築工学科 |
| 3 正会員 | 工博 | (財)土木研究センター理事なご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 |
| 4 正会員 | | 海岸研究室(有) |
| 5 正会員 | 博(工) | (株)水圏科学コンサルティング |
| 6 正会員 | 博(工) | (有)アイコムネット |

β は海底勾配角, g は重力加速度, ω は長周期波の角周波数, a は汀線位置での η の振幅, J_0 は0次のBessel関数である. 図-1には式(2)の水面波形の具体的計算結果を示すが, 式(1)に含まれる長周期波の角周波数 ω , 海底勾配 $\tan\beta$ の変化に伴い水面波形の腹の位置も変化することがわかる. このことから, 反射定常波の腹の位置, すなわちバーの形成位置は長周期波の角周波数と海底勾配によって定まることが分かる.

しかし, 実海岸におけるバーの形成位置を長周期波の角周波数と海底勾配のみで特定することは困難である. そこで本研究は, 等深線変化モデル(芹沢ら, 2002)をベースにして, 実海岸における多段バーの形成位置を精度よく予測可能とするため, Bowen (1980)の波作用により形成される平衡海浜断面に反射定常波の作用が重なることで多段バーが形成されるという考え方を参考に, 波と反射定常波両者の作用によって形成される海浜断面を式(3)で与え, 反射定常波によって形成される多段バーの岸沖方向の地形変化量が式(4)で与えられると仮定する.

$$y = y_w + y_L \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$y_L = R \cos S \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$R = R_0 \exp\left(-c \frac{-z \cot \beta_C}{L}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$S = 2\pi \left(\frac{-z \cot \beta_C}{L}\right)^p \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに, y は波と反射定常波両者の作用によって定まる海浜断面の標高 z の等深線までの汀線からの沖向き距離, y_w は波作用の寄与分, y_L は反射定常波の作用の寄与分である. R は振幅, R_0 は第1バーを基準とする振幅, β_C は平衡勾配角, S は位相, L は汀線から第1バーまでの沖向き距離である. 式(5), (6)に示すとおり, 多段バーの振幅および波長を標高 z の関数で表し, それぞれ係数 c , p を与えることにより, 対象海岸ごとの多段バーの形成位置を制御できるようにした. 式(5)の R は水深の増加とともに振幅が減衰し, 多段バーの比高が沖向きに減衰するという性質を有する. 以上のように水平距離を z の関数とする考え方では, 通常バーは z の多価関数になるが, 本研究では, 等深線変化モデルに組み込むために, 近似的に z の1価関数として扱う. 式(6)の S は $p=1$ とすれば波長が水深方向に一定となり, $p<1$ とすれば水深方向に波長が長くなる. これは現地海岸で観察される多段バーの間隔が沖向きに広くなるという性質を表現している. 加藤(1984)の用いた一様勾配斜面における反射定常波の解の場合, $p=0.56$ となるが, 本研究ではこれを標準値とし, 対象海岸の条件に合わせて p を決定する

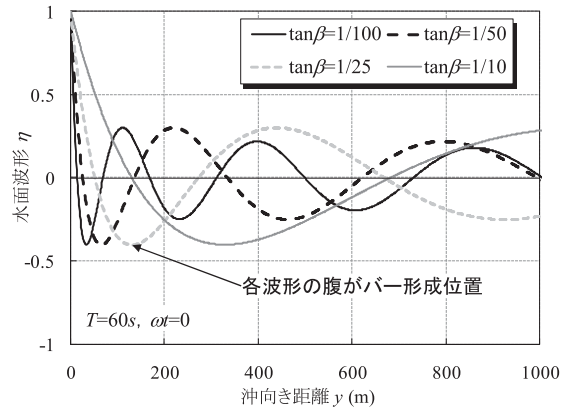


図-1 反射定常波の水面波形 η の岸沖分布

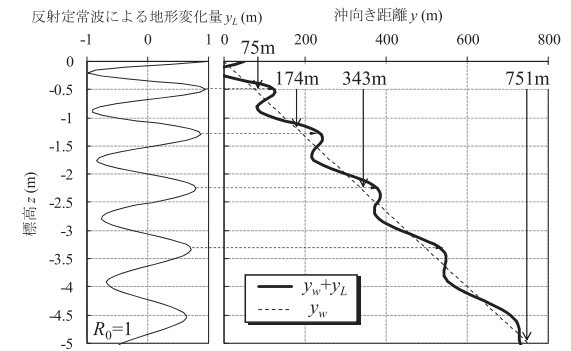


図-2 式(3)の波と反射定常波の作用で形成される海浜断面

ことにする.

式(3)の実海岸における具体的計算例として, $p=0.73$, $c=0.05$, として石川県羽咋海岸の多段バーの形成位置の計算結果を図-2に示す. 右図の破線が波の作用により形成される海浜断面を, 左図の実線が反射定常波の作用により生じる地形変化量を示す, また, 右図の実線が波と反射定常波両者の作用により形成される海浜断面を示す. ただし, 波による形成される海浜断面 y_w とそれに重なる反射定常波の作用との差を把握しやすいように50倍表示で示した. 多段バーの実測位置は75m, 174m, 343m, 751mであるが, 図によれば, 計算結果は第3バーまでの多段バーの実測位置とほぼ一致している. したがって多段バーの振幅と形成位置に関する式(3)~(6)は現実に近いバーの形成位置を与えることが可能である.

以上をもとに, 沿岸方向単位幅当たりの岸沖漂砂量 q_z について考える. Bowen (1980)は反射定常波の作用が重なると平衡海浜断面への摂動解として多段バーが形成されるとした. これを考慮すると, 岸沖漂砂量 q_z はBowen (1980), 加藤(1984)の考え方に従い, 式(7)に示すとおり波による岸沖漂砂量 q_{zw} と, 反射定常波による岸沖漂砂量 q_{zL} の線形和で与えられる.

$$q_z = q_{zW} + q_{zL} \dots\dots\dots (7)$$

$$q_{zW} = A \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_C} - 1 \right) (-h_C \leq z \leq h_R) \dots\dots\dots (8)$$

$$A = \varepsilon_z(z) K_z (EC_g)_b \sin \beta_C \dots\dots\dots (9)$$

ここに、式(8)の波による漂砂量 q_{zW} には等深線変化モデル(芹沢ら, 2002)の基礎式を用いる。 K_z は漂砂量係数、 $(EC_g)_b$ は砕波点での波のエネルギーフラックスである。また h_C は波による地形変化の限界水深、 h_R はバーム高であり、波による漂砂は限界水深 h_C からバーム高 h_R の間で生ずるとする。式(9)で与えられる係数 A は波による漂砂強度を表し、波の作用強度に比例する係数である。さらに、式(9)の $\varepsilon_z(z)$ は岸沖漂砂強度の水深方向分布関数であり、本研究では宇多・河野(1996)の与えた沿岸漂砂量の水深方向分布を用いる。

式(8)の波による漂砂量 q_{zW} は、海底勾配角が平衡勾配角に達すると静的に安定する機構を備えている。いま、式(7)において、波による成分と反射定常波による成分とが釣り合って、ネットの漂砂量がゼロとなり地形変化が生じない静的安定状態を考えると、式(7)において岸沖漂砂量 $q_z=0$ と置くことで、波による漂砂量 q_{zW} と反射定常波による漂砂量 q_{zL} の釣合を表す式(10)を得る。

$$q_{zL} = -A \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_C} - 1 \right) \dots\dots\dots (10)$$

$$\cot \beta = -\frac{dy}{dz} \dots\dots\dots (11)$$

式(3)、(10)、(11)、および波作用による平衡海浜断面の関係式 $-dy_W/dz = \cot \beta_C$ より、反射定常波の漂砂量式(12)を得る。

$$q_{zL} = A \frac{R}{L} \left\{ c \cos S + 2\pi p \left(\frac{-z \cot \beta_C}{L} \right)^{p-1} \sin S \right\} \dots\dots (12)$$

反射定常波による岸沖漂砂量 q_{zL} の特徴を調べるために式(12)に含まれる係数を $c=0.2$ 、 $\cot \beta_C=100$ 、 $L=100$ 、 $p=0.8$ として計算した q_{zL} の水深分布を図-3に示す。図には、式(12)の $c \cos S$ (第一項)を細線、第二項を太線で示し、さらに第一項と第二項の和を破線で示す。また簡単のため $AR/L=1$ としている。図を見ると、第二項の振幅に対して第一項の振幅は微小であり、第二項の振幅と両者の和の振幅を比較してもほとんど差がない。したがって、式(12)における第一項は無視し、式(13)で計算しても実務上は問題ないと考えられる。よって以下の数値計算では式(13)を用いた。

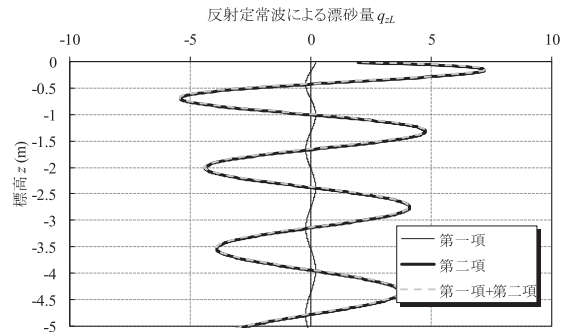


図-3 反射定常波による岸沖漂砂量 q_{zL} の水深分布

$$q_{zL} = A \frac{R}{L} 2\pi p \left(\frac{-z \cot \beta_C}{L} \right)^{p-1} \sin S$$

$$= A K_L \exp \left(-c \frac{-z \cot \beta_C}{L} \right) \left(\frac{-z \cot \beta_C}{L} \right)^{p-1} \sin S \dots (13)$$

$$K = 2\pi p \frac{R_0}{L} \dots\dots\dots (14)$$

式(7)、(8)、(12)あるいは式(13)により、入射波高 H から求めた砕波点でのエネルギーフラックス、バーム高 h_R 、限界水深 h_C 、汀線から第1バーまでの沖向き距離 L 、バー形成間隔を定めるための係数 p 、バーの振幅減衰を定めるため係数 c を条件として与えると多段バーの形成が再現可能となる。

3. 沿岸漂砂量の変化に伴う多段バーの消失・形成予測

図-4 (a)、(b)に示す静岡県遠州灘に面した福田漁港

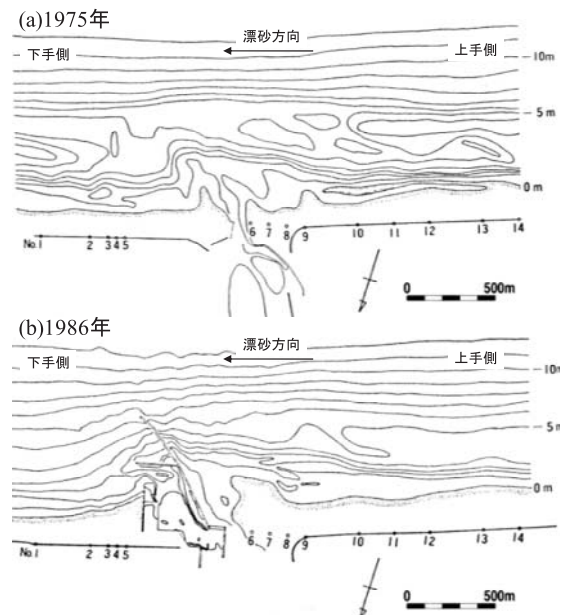


図-4 福田漁港周辺の深浅図

表-1 計算条件

計算ケース			1	2	3
初期地形			1/100 一様勾配	Case 1 最終ステップ地形	Case 2 最終ステップ地形
平衡勾配 $\tan\beta_c$			1/100		
安息勾配 $\tan\beta_G$		陸側	1/2		
		海側	1/3		
入射波高 H_b (m)			1.0		
入射波向 α (deg)			10		
q_{-W}	漂砂量係数 K_z		0.2		
	地形変化の 水深範囲	限界水深 h_C (m)	6.0		
		バーム高 h_R (m)	2.0		
	漂砂量係数 K_L		0.1		
q_{-L}	汀線から第1バーの冲向距離 L (m)		200		
	バーの形成間隔係数 p		1.0		
	バーの振幅減衰係数 c		0.0		
境界条件			左：土砂供給 (1.8×10^4 m ³ /yr)	左：突堤設置 (沿岸漂砂阻止)	左：サンドバイパス (1.8×10^4 m ³ /yr)
計算範囲	沿岸距離 x (m)		0 ~ 5000		
	標高 z (m)		5.0 ~ -10.0		
計算メッシュ	沿岸座標 Δx (m)		50		
	標高座標 Δz (m)		0.5		
計算時間間隔 Δt			0.5		
計算ステップ数(×10 ⁵)			1.0		

周辺海岸では、福田漁港の建設後、沿岸漂砂の連続性が断たれたために、漁港下手側では1975年には形成されていた多段バーが消失した（宇多，2004）．本研究では、このような現象を再現するために、一定量の沿岸漂砂が上手側から供給されることによって動的に安定している海浜をケース1として設定し、その上で動的安定海浜に対して上手側からの沿岸漂砂を阻止した場合における多段バーの消失について検討した（ケース2）．さらにケース2に対し上手端から細砂養浜を行った場合における多段バーの復元について検討した（ケース3）．計算条件を表-1に示す．

ケース1では1/100の平行等深線を初期地形とし、波向 $\alpha = 10^\circ$ 、波高 $H = 1.0\text{m}$ の波を作用させる．さらに、前述のように動的安定海浜を形成するために、漂砂上手側から $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で土砂を流入させた．等深線の計算結果および沿岸距離 $X=1,500\text{m}$ の海浜縦断面形をそれぞれ図-5に示す．入射波の波向は 10° であるから、両端で沿岸漂砂を阻止すれば、図中点線で示す初期地形は反時計回りに変形するはずであるが、実線で示す安定地形は左端部からの土砂供給があることによって平行等深線のまま保たれる．また、縦断面を見ると、岸沖距離 $Y=200, 300, 400, 500, 600\text{m}$ にそれぞれ5段の多段バーが規則正しく形成されたことがわかる．

次に、沿岸漂砂の阻止に伴って形成されていた多段バーの変化を調べるために、ケース1の安定地形を初期地形とし、左端からの沿岸漂砂の流入を止めた．また、実海岸における侵食域では細砂が下手側へと運び去られることで底質が粗粒化し、前浜が急勾配になる．粗粒化し

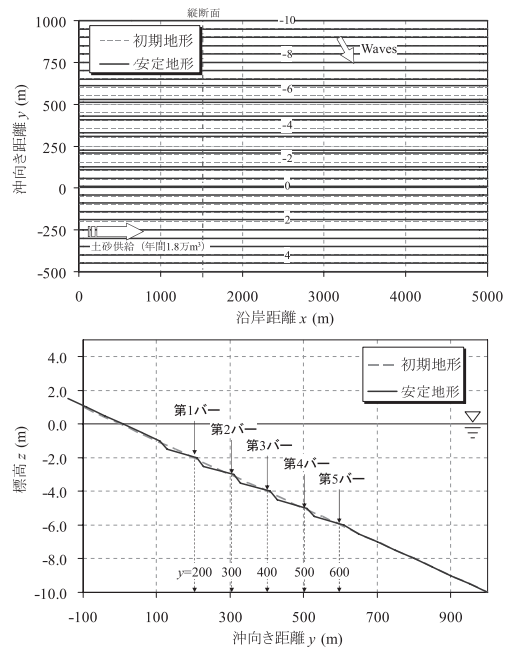


図-5 動的安定海浜に形成される多段バーの計算（ケース1）

た海浜ではバーを形成するのに必要な細砂量が不足することになり、結果としてバーの形成が見られなくなると考えられる．しかし、本モデルは均一粒径を考慮したモデルであるため、底質粒度組成の変化や粒度組成変化に伴う前浜勾配の変化については検討できない．そこで、ケース1で予測された動的安定海浜を、沿岸砂州の形成が起こらないような粒径の大きな粗粒土砂の層上に細砂が堆積して形成された多段バーと見なし、ケース1で形成

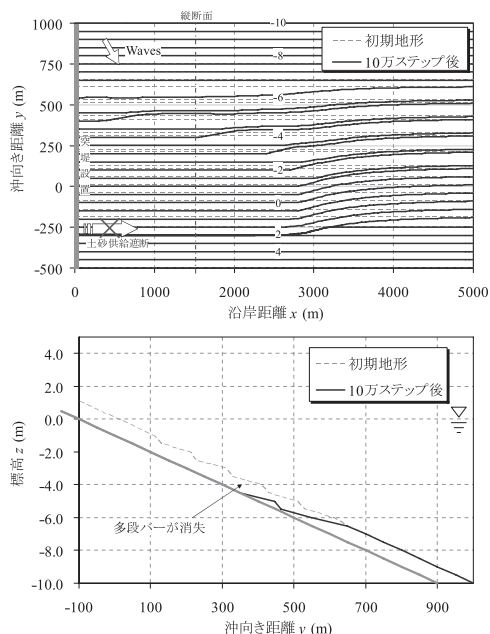


図-6 沿岸漂砂阻止による多段バーの消失計算結果(ケース2)

された安定縦断形の地盤面より下方1m以上を固定床として扱った。ケース2の等深線および沿岸距離 $X=1,500\text{m}$ の海浜縦断形の計算結果をそれぞれ図-6に示す。

沿岸距離 $X=2,500\text{m}$ より上手(左)側の多段バーを形成していた細砂が下手(右)側へと移動した結果、多段バーが消失している。また、縦断形を見ても、固定床が露出しそこに多段バーを形成しうる細砂が存在しないことが確認できる。以上より、上手側からの沿岸漂砂の供給が途絶えた結果、多段バーを形成していた細砂の消失とともに多段バーが消失したことがわかる。これは図-4の福田漁港の事例と対応している。

ケース3では、沿岸漂砂の供給が途絶えた海岸において、人工的に砂供給を行う条件を設定した。すなわち、元々供給されていた沿岸漂砂量($1.8 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$)をケース2の条件に対して再度流入させた、ケース3の等深線および沿岸距離 $X=1,500\text{m}$ の海浜縦断形の計算結果をそれぞれ図-7に示す。

計算結果を見ると、沿岸距離 $X=2,500\text{m}$ より上手(左)側で消失した多段バーが再び形成され、復元されている。しかし、縦断形を見ると、5段形成されていた多段バーは4段までしか復元されていない。これは元の細砂量が少ないことが原因であり、5段バーの復元にはさらなる細砂の供給が必要なが分かる。

4. まとめ

本研究では、長周期波の角周波数と海底勾配のみで定まる多段バーの形成に関して、式(3)～(6)に示す新

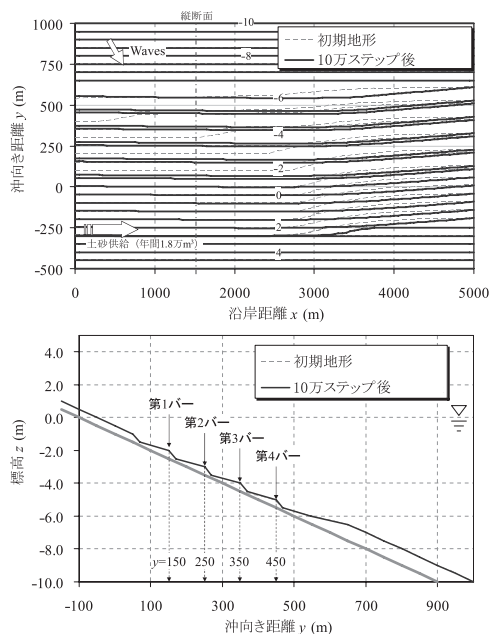


図-7 サンドバイパスによる多段バーの復元計算結果(ケース3)

たな多段バーの形成予測式を提案し、多段バーの形成間隔と振幅を係数によって制御することにより、海岸毎の多段バーの形成間隔を予測可能にした。そして、清水ら(2008)が開発した多段バーの縦断予測モデルを平面モデルに拡張することにより、図-4に示す福田漁港のような沿岸漂砂が卓越する海岸に形成される多段バーの消失および復元についての予測が可能となった。

参考文献

- 宇多高明 (2004): 海岸侵食の実態と解決策, 山海堂, pp.50-51.
- 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.
- 加藤一正 (1984): 長周期波と多段砂州の成因について, 海岸工学論文集, 第31巻, pp.441-445.
- 清水達也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之・野志保仁 (2008): 等深線変化モデルを応用したバー・トラフ形成に関する縦断モデル, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.456-460.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・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.
- 堀川清司 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp.92-96.
- Bagnold, R. A. (1966): Mechanics of Marine Sedimentation, in the Sea, Vol.3, pp.507-528.
- Bowen, A. J. (1980): Simple models of nearshore sedimentation; beach profiles and longshore bars, The Geological Survey of Canada, pp.1-11.
- Inman, D. L. and Bagnold, R. A. (1963): Littoral Processes, in the Sea, Vol.3, pp.529-533.
- Short, A. D. (1999): Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics, Wiley and Sons, Chichester, pp.113-118.