

# 平衡海浜断面形の形成過程とその波浪応答性に関する研究

鳥居 謙一\*・福島 雅紀\*\*・山本 幸次\*\*\*

本研究では、改正「海岸法」によって海岸保全施設として指定できるようになった「砂浜」の安定性を評価する指標と手法について、大型水路を用いた移動床模型実験により検討した。その結果、任意波浪の作用により形成された海浜断面形の安定状態は、砕波位置と汀線位置、および前浜勾配とバーム高さを指標とすれば判断できることを明らかにした。また、任意波浪よりも小さい波浪を作用させた場合には前浜部分と砂漣は変化するが、任意波浪の再作用で安定状態の海浜断面形が復元されることがわかった。そして、養浜により形成させた、高波浪に対しても安定な海浜断面形は、修正した Dean の平衡海浜断面形の式で与えられることを示した。

## 1. はじめに

河川からの流出土砂量の減少や港湾や漁港などの建設にとともに、近年においては海岸侵食が顕在化した。これらの侵食対策として、消波堤や離岸堤などの海岸保全施設の整備が進められてきたが、それが局所的に行われたために海岸環境の悪化を招くことになった(宇多, 1997)。そこで、1999年5月28日に改正「海岸法」が公布され、防護・環境・利用の調和した海岸保全を推進することが義務づけられた(磯部, 1999)。そして、防護・環境・利用において優れた性能を持つ「砂浜」も海岸保全施設として指定・管理できるようになった。

しかし、「砂浜」の指定・管理に関する基準は、まだ明確に示されておらず、その基準を早急に策定する必要がある。そのためには、鳥居ら(2001)が指摘しているように「砂浜」の信頼性、または安定性を評価しなければならない。そこで、本研究では、大型水路を用いた移動床模型実験を行い、任意波浪の長時間作用により形成させた、安定状態の海浜断面形の波浪応答性を調べた。また、養浜により形成させた、高波浪に対しても安定な海浜断面形と、Kriebelら(1991)が示した式による Dean の平衡海浜断面形を比較し、平衡海浜断面形概念が「砂浜」の指定・管理基準に導入できるか否かを検討した。

## 2. 実験方法

実験では中央粒径  $d_{50}=0.22\text{ mm}$  の実験砂を用い、水路底面からの高さ 2.9 m の静水面を Z 軸の基準とし、汀線位置を Y 軸の基準に設定して模型海浜を製作した。模型海浜の諸元は  $Y=-15.0\text{ m}\sim 10.0\text{ m}$  までを 1/30 勾配の斜面とし、 $Y=10.0\text{ m}\sim 60.0\text{ m}$  までを 1/50 勾配の斜面とした(図-1)。波浪条件は波高  $H_0=0.28\text{ m}$ 、周期

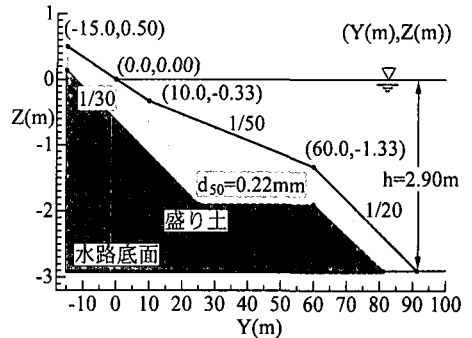


図-1 模型海浜の諸元

$T=3.4\text{ s}$  の規則波とし、その波浪を模型海浜に長時間作用させて、海浜断面形の変化過程を調べた(ケース①)。また、形成された海浜断面形の波浪応答性に関する実験(ケース②~③)、および追加養浜した後の海浜断面形の変化過程に関する実験(ケース④~⑥)も行った。

## 3. 実験結果

### (1) 安定状態の海浜断面形の形成過程

模型海浜の底質粒径と海底勾配、および作用波浪の関係からは中間型の海浜断面形の変化が予測される。実際に、図-2 に示すように  $t=0\sim 32\text{ h}$  では  $Y=-2\sim 3\text{ m}$  にバームが形成され、 $Y=5\sim 25\text{ m}$  が侵食されるとともに、その沖側に砂が堆積してバーが形成された。その後の  $t=32\sim 48\text{ h}$  ではほぼ一様勾配の前浜 ( $Y=2\sim 10\text{ m}$ ) が侵食されて、 $Y=0\text{ m}$  に頂部を持つバームが高くなったが、 $Y=10\text{ m}$  より沖側では大きな地形変化は見られない。 $t=48\sim 64\text{ h}$  では地形変化はほとんど生じなかったが、 $t=64\text{ h}$  以降では  $Y=0\sim 10\text{ m}$  の前浜部分で侵食と堆積を繰り返し、 $Y=10\text{ m}$  の沖側でも砂漣の経時的な変動が見られた。

このように、全体的な海浜断面形はほぼ安定したが、前浜部分や砂漣などの微地形が変動しているため、海浜断面形の安定性の評価のためには何らかの指標が必要とされる。そこで、汀線位置 ( $Y_0$ ) と砕波位置 ( $B_p$ )、前浜

\* 正会員 工 修 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室長

\*\* 正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室主任研究官

\*\*\* 正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室主任研究官

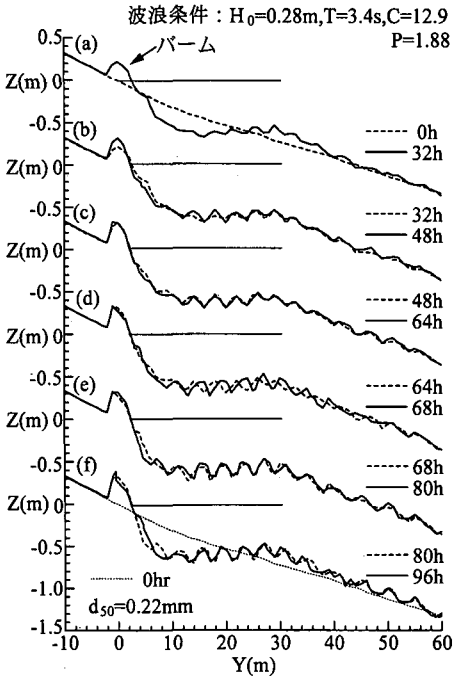


図-2 海浜断面形の経時変化

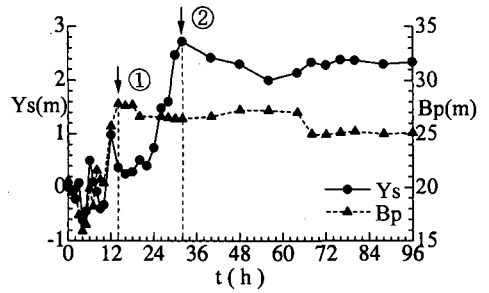


図-3 汀線位置と砕波位置の経時変化

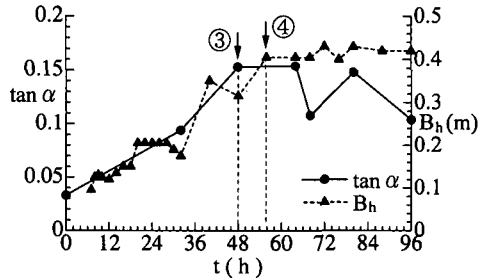


図-4 前浜勾配とバーム高さの経時変化

勾配 ( $\tan \alpha$ ) とバーム高さ ( $B_h$ ) の経時変化から海浜断面形の安定性を検討した。図-3によると、砕波位置 ( $B_p$ ) は徐々に沖側に移動し、 $t=14$  h に  $Y=27.5$  m に達し、その後においてはほぼ固定されたことがわかる。また、汀線位置 ( $Y_s$ ) は  $t=32$  h までに約 2.7 m 前進し、その後の変動は小さい。一方、図-4 に示した前浜勾配 ( $\tan \alpha$ ) は  $t=48$  h までに徐々に急になり、その後においては  $\tan \alpha \approx 0.15$  とほぼ一定となった。バーム高さ ( $B_h$ ) は  $t=56$  h までは徐々に高くなり、その後は  $B_h \approx 0.4$  m とほぼ一定値となった。

以上のことから、最初に砕波位置が固定され、次に汀線位置の変動がほとんどなくなるとともに前浜が急勾配化して、バームが発達していく過程の結果、それらが一定となった  $t=56$  h で海浜断面形が安定状態に達したと判断できる。海浜断面形は  $t=56$  h 以降においては安定状態に達したと判断されたので、 $t=96$  h に形成された海浜断面形と、Kriebelら (1991) が示した式 (1)~(5) で与えられる Dean の平衡海浜断面形との比較を試みた。ここで、 $x$  は岸沖距離 (実験では  $Y$ )、 $h$  は水深、 $m$  は前浜勾配、 $h_T$  は勾配変化点の水深、 $x_0$  は Dean の平衡海浜断面形の開始点の岸沖距離、 $A$  は底質の沈降速度から与えられる定数である。また、 $H_0$  は沖波波高、 $T_0$  は沖波周期、 $w$  は底質の沈降速度、 $g$  は重力加速度である。

まず、底質粒径を  $d_{50}=0.22$  mm、波浪条件を10倍の現地スケールとして、 $A_1$ 、 $m_1$ 、 $h_{T1}$ 、 $x_{01}$  を求め、水深を現

$$x = \begin{cases} h/m & \text{if } h < h_T \\ x_0 + (h/A)^{3/2} & \text{if } h > h_T \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$A = 2.25 \left( \frac{w^2}{g} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

$$m = 0.15 \left( \frac{H_0}{wT_0} \right)^{-0.5} \dots\dots\dots (3)$$

$$x_0 = \frac{h_T}{m} - \left( \frac{h_T}{A} \right)^{3/2} \dots\dots\dots (4)$$

$$h_T = \frac{4}{9} \frac{A^3}{m^2} \dots\dots\dots (5)$$

地スケール ( $h_p$ ) で与えて、岸沖距離 ( $x_p$ ) を算出した。そして、その水深と岸沖距離を 1/10 スケールで図-5 に表記したのが Dean-1 の平衡海浜断面形である。次に、底質粒径と波浪条件を 10 倍の現地スケールとして、 $A_2$ 、 $m_2$ 、 $h_{T2}$ 、 $x_{02}$  を求め、水深を現地スケール ( $h_p$ ) で与えて、岸沖距離 ( $x_p$ ) を算出した。そして、その水深と岸沖距離を 1/10 スケールで表記したのが Dean-2 の平衡海浜断面形である。さらに、実験における底質粒径と波浪条件を用いて  $A_3$ 、 $m_3$ 、 $h_{T3}$ 、 $x_{03}$  を求め、水深を模型スケール ( $h_m$ ) で与えて、岸沖距離 ( $x_m$ ) を算出し、それを表記したのが Dean-3 の平衡海浜断面形である。

これらの平衡海浜断面形と実験における安定状態の海浜断面形を比較した。しかし、図-5 に示すように、いずれの平衡海浜断面形も実験で形成された安定状態の海浜断面形とは一致しない。つまり、Dean の平衡海浜断面形の式では、実験における安定状態の海浜断面形は予測で

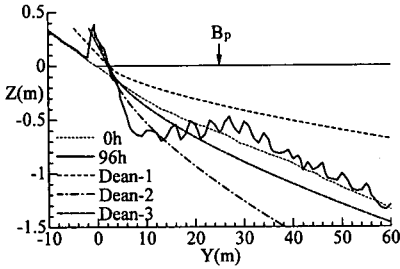


図-5  $t=96$  h の海浜断面形と Dean の平衡海浜断面形の比較

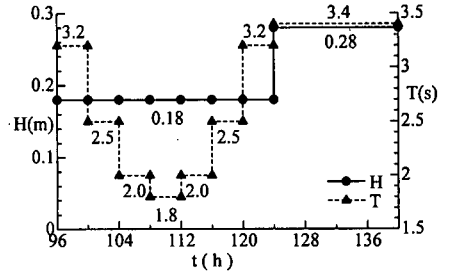


図-6 安定状態の海浜断面形に作用させた波浪 (ケース②)

きないと言える。これは、波高と底質粒径の比が現地海岸と模型実験では大きく異なるためと考えられる。

(2) 安定状態の海浜断面形の波浪応答性

$t=96$  h に形成された安定状態の海浜断面形に、図-6 に示すように波高を  $H=0.18$  m と小さく一定として、周期を  $T=3.2\sim 1.8$  s で変動する波浪を作用させた。その後再び  $H=0.28$  m,  $T=3.4$  s の波浪を作用させて海浜断面形の変化を調べた。その結果を示した図-7 によると、前浜部分がやや変動するものの、全体的な海浜断面形の変化は生じないことがわかる。また、周期の短い波浪を作用させた  $t=104\sim 120$  h では沖側に形成されていた砂漣が消滅し、 $t=120\sim 124$  h では周期の長い波浪の作用で砂漣が再び形成された。さらに、 $t=96$  h と  $t=140$  h の海浜断面形の比較から、 $t=124\sim 140$  h に作用させた  $H=0.28$  m,  $T=3.4$  s の波浪により、安定状態の海浜断面形が復元されたことが確認できる。

$t=140$  h に復元された安定状態の海浜断面形に、図-8 に示すように周期を  $T=2.5$  s と短く一定として、波高を  $H=0.14\sim 0.28$  m で変動する波浪を作用させた。その後再び  $H=0.28$  m,  $T=3.4$  s の波浪を作用させて海浜断面形の変化を調べた。その結果、ケース②と同様に前浜部分がやや変動するものの、全体的な海浜断面形の変化は生じないことが明らかになった(図-9)。また、波高の高い波浪を作用させた  $t=152\sim 156$  h 以降では沖側に形成されていた砂漣が消滅し、 $t=168\sim 184$  h の波浪の作用で砂漣が再び形成された。さらに、ケース③でも  $H=0.28$  m,  $T=3.4$  s の波浪の作用により安定状態の海浜断面形が復元されたことが、図-9(e) の海浜断面形の比較から確認できる。

以上のケース②とケース③から、安定状態の海浜断面形を形成させた波浪よりも小さい波浪を作用させた場合は、前浜部分と沖側の砂漣に変化がみられるものの、形成波浪を再び作用させると安定状態の海浜断面形が復元されることが明らかになった。

(3) 養浜による安定状態の海浜断面形の形成過程

まず、ケース④では形成された安定状態の海浜断面形

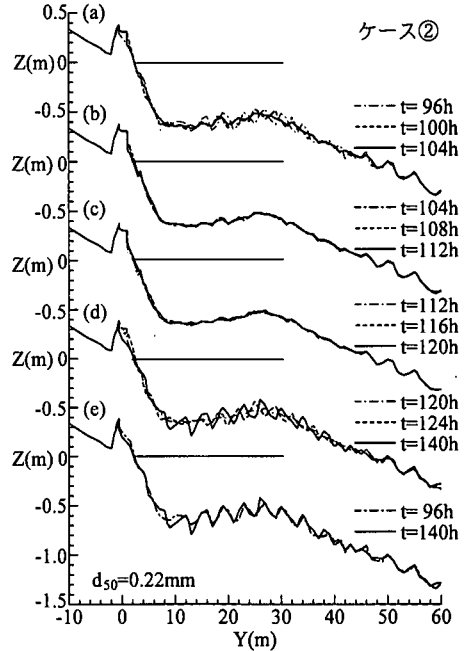


図-7 安定状態の海浜断面形の波浪応答性 (ケース②)

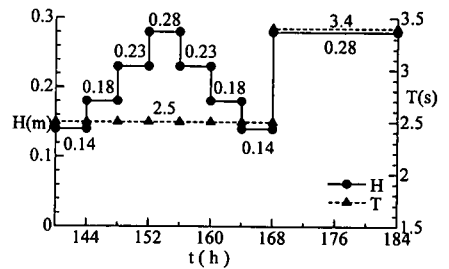


図-8 安定状態の海浜断面形に作用させた波浪 (ケース③)

の沖側において、初期に設定した海浜断面形上に堆積した砂を採取して、それを前浜部分に養浜した。その海浜断面形を初期地形として、安定状態の海浜断面形の形成波浪 ( $H=0.28$  m,  $T=3.4$  s) を 32 時間作用させた。その結果、養浜した前浜部分は侵食されるとともに安定状態の海浜断面形の位置まで後退し、侵食された砂は沖側

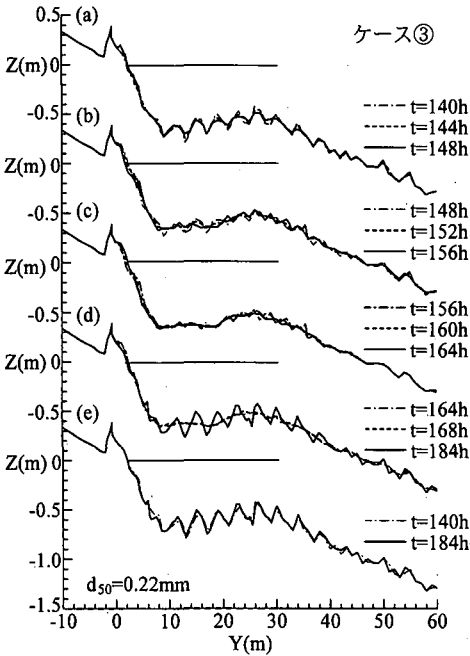


図-9 安定状態の海浜断面形の波浪応答性 (ケース③)

に運ばれて堆積した (図-10)。ただし、 $Y=4\sim 22$  m のトラフだった部分にも砂が堆積して残された。

次に、形成された安定状態の海浜断面形の前浜部分を砂を追加投入し養浜した (ケース⑤)。その海浜断面形を初期地形として、安定状態の海浜断面形の形成波浪 ( $H=0.28$  m,  $T=3.4$  s) を 32 時間作用させた。それによると、図-11 に示すように養浜した前浜部分はやや侵食されて、その砂は  $Y=4\sim 22$  m のトラフに堆積したことがわかる。また、それより沖側ではほとんど変化が生じなかった。

さらに、ケース⑥では形成された安定状態の海浜断面形の前浜基部に砂を追加投入して、リーフ状に養浜した。その海浜断面形を初期地形として、安定状態の海浜断面形の形成波浪 ( $H=0.28$  m,  $T=3.4$  s) を 32 時間作用させた。その結果、養浜したやや部分の  $Y=4\sim 22$  m に砂が残され、それより沖側ではほとんど変化が生じなかった (図-12)。

以上の 3 ケースの養浜実験の結果から、 $t=96$  h の安定状態の海浜断面形はトラフが形成されて沖合に砂が堆積したために、 $Y=4\sim 22$  m では平衡海浜断面形に比較して砂が不足していたと考えられる。一方、沖側の砂が堆積した部分は安定状態の海浜断面形を形成した波浪 (または、それより小さい波浪) の作用では、ほとんど変化が生じない地形応答を示している。したがって、前浜基部の大きなトラフを養浜により埋め戻し、 $H=0.28$  m,  $T=3.4$  s の波浪を作用させて形成させた海浜断面形

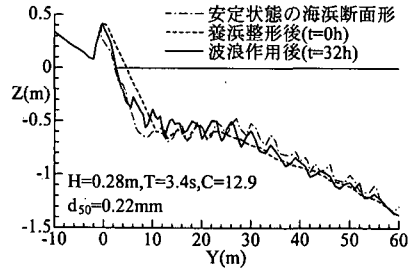


図-10 養浜後の海浜断面形の変化 (ケース④)

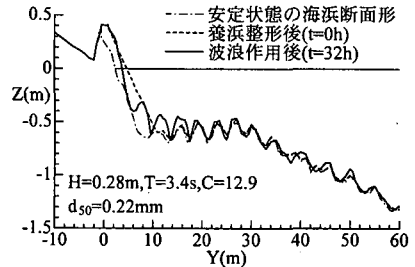


図-11 養浜後の海浜断面形の変化 (ケース⑤)

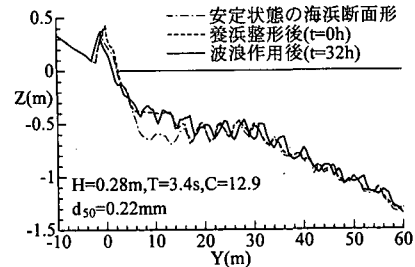


図-12 養浜後の海浜断面形の変化 (ケース⑥)

(ケース⑥の  $t=32$  h) が、本実験における平衡海浜断面形と推定できる。

そこで、ケース⑥の  $t=32$  h 後の海浜断面形に  $H=0.28$  m,  $T=3.4$  s の波浪をさらに 32 時間、その後に波高が  $H=0.34$  m と大きい波浪を作用させて (図-13)、海浜断面形の変化過程を調べた。その結果、図-14 に示すように前浜部分がやや後退し、中間部分は砂漣が平滑化して、その沖側に砂が堆積した。しかし、バームの発達やバーの形成のような大きな地形変化は生じていないことから、高波浪に対してもかなり安定した波浪応答性を示していることがわかる。つまり、ケース⑥の  $t=80$  h 後に形成された海浜断面形が、本実験における最終的な平衡海浜断面形と言える。

#### 4. Dean の平衡海浜断面形の修正

最後に、ケース⑥で形成された最終海浜断面形と式 (1)~(5) による Dean の平衡海浜断面形との比較を再

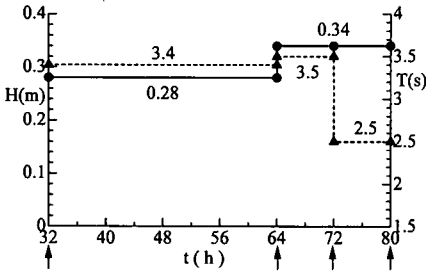


図-13 ケース⑥の  $t=32$  h 後の海浜断面形に作用させた波浪

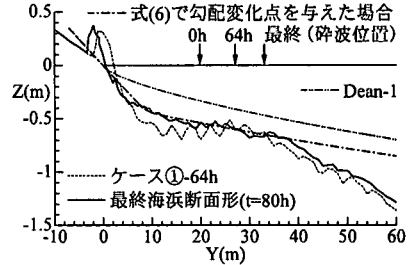


図-15 修正した Dean の平衡海浜断面形の実験結果への適用

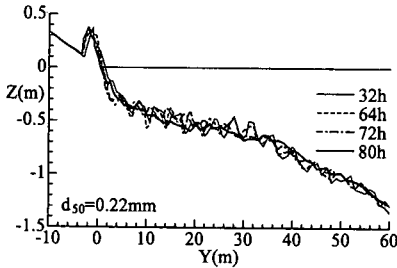


図-14 ケース⑥の安定状態の海浜断面形の波浪応答性

度試みた。図-15 に示すように図-5 で検討した Dean-1 の平衡海浜断面形と、実験における平衡海浜断面形は一致しない。しかし、 $Y=10\sim 40$  m の海浜断面形の勾配は両者ともほぼ同じであることが読みとれる。つまり、Dean-1 の平衡海浜断面形の勾配変化点の水深が深ければ、実験で形成された平衡海浜断面形と Dean の平衡海浜断面形は一致する可能性がある。そこで、三井ら(1974)を参考にして、平衡海浜断面形の勾配変化点の水深を碎波波高と同じ水深である式(6)で与えることにした。

$$h_r = H_0 m^{0.2} (H_0/L_0)^{-0.25} \dots\dots\dots (6)$$

そして、式(1)~(4)に式(6)で求められる勾配変化点の水深 ( $h_r$ ) を代入して、Dean-1 と同じように平衡海浜断面形を計算するとともに表記したのが、図-15 の1点鎖線である。この平衡海浜断面形と実験で形成された平衡海浜断面形を比較すると、汀線位置から  $Y=40$  m まではよく一致することがわかり、Dean の平衡海浜断面形を修正できたと言える。

### 5. おわりに

本研究で得られた知見を以下に要約する。

①任意波浪の作用による海浜断面形の安定状態は、碎波位置と汀線位置、および前浜勾配とバーム高さを指標とし、それらの変動を調べることで判断できる。

②平衡海浜断面形は沖浜の形成とトラフ地形の埋め戻し過程により形成され、それは高波浪に対しても安定な波浪応答性を示す。

③実験における平衡海浜断面形と、勾配変化点の水深を碎波波高と同じ水深である式(6)で与えた Dean の平衡海浜断面形はよく一致する。

④修正した Dean の平衡海浜断面形は「砂浜」の指定・管理基準に導入できると考えられるが、山下ら(1987)が行ったような現地海岸への適用性についての検討が必要とされる。

### 参考文献

磯部雅彦 (1999): 改正海岸法の理念の実現に向けて, 海岸, 第39巻第1号, pp. 14-18.  
 宇多高明 (1997): 「日本の海岸侵食」, 山海堂, 442 p.  
 鳥居謙一・福島雅紀・佐藤傾司・高木利光・Ding Yan (2001): 海岸管理のための汀線変動量の確率的評価, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1021-1025.  
 三井 宏・筒井茂明・中村静弥 (1974): 侵食海岸の準平衡地形, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 201-206.  
 山下隆男・玉田浩一・James R. Tallent・土屋義人 (1987): 現地海岸における波浪エネルギー散逸特性と平衡海浜断面形状, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 317-321.  
 Kriebel, D. L., N. C. Kraus, and M. Larson (1991): Engineering methods for predicting beach profile response, Coastal Sediments '91. ASCE, New York, pp. 557-571.