

岸沖漂砂による海浜断面変化の予測指標に関する研究

福島雅紀*・山本幸次**・鳥居謙一***

1. はじめに

海岸保全計画, 特に侵食対策を立案する上で, 養浜後や沖合施設設置後の砂浜の安定性を評価することがしばしば必要となる。現在, 砂村・堀川の C 値, 武田・砂村の K 値, 現地データに基づいた宇多らの算定図が, その評価手法として用いられている (建設省河川局海岸課, 1992)。しかしながら, 前者の 2 つに関しては, 侵食型・堆積型のタイプ分類の閾値となる C 値, K 値が波高粒径比等のスケールに依存することが指摘されている (山本・佐藤, 1999)。そのため, 海岸ごとに閾値が異なる可能性もあり, 計画の妥当性の評価や施設規模の設定において問題となる場合がある。また, 宇多らの算定図は, 波長が長い程侵食型となること, データのばらつきが大きいことが問題として挙げられる。

砂浜の断面変化の予測に関しては, これまで多くの研究がなされており (Sunamura and Horikawa, 1974; 武田・砂村, 1983; 宇多ら, 1989), 沖波波高, 沖波周期, 底質の中央粒径, 海浜勾配などが与えられれば, 各指標に基づいて変形後の海浜形状のタイプ分類を行うことができる。Kraus ら (1991) は, これらの指標を構成するパラメータを再整理し, いくつかの大規模実験データおよび現地データに基づいて, スケールに依存しない断面変化予測式を提案した。しかしながら, 海浜勾配が底質から決定されるとの理由から, Kraus らの検討したパラメータには海浜勾配が含まれていない。海浜勾配は, 養浜の設計条件になると同時に, 一様勾配の海岸を特徴付ける重要なパラメータである。

筆者らは海浜勾配を含むパラメータとして前浜勾配より算出される砕波帯相似パラメータに着目した。砕波帯相似パラメータは砕波形態とも関係しており (Battjes, 1974), 海浜変形を考える上でも重要である。ここでは, 過去数年間にわたって行われてきた 49 ケースの水路実

験結果を整理し, Kraus らが提案したパラメータに砕波帯相似パラメータを加えた 6 つのパラメータを用い, スケールに依存しない新しい断面変化予測式を提案した。さらに, ここで提案された予測式の現地への適用性を検討するために, 阿字ヶ浦漂砂観測用棧橋 (以下, 棧橋) で得られた断面測量データの分類も試みた。

2. 海浜断面変化を予測するパラメータ

Kraus ら (1991) は, 海浜断面変化を表すパラメータを式 (1)~(5) のように整理し, 大規模水路実験および現地データを用いて, 各パラメータによって構成される予測式の妥当性を評価した。ここで, H_o は沖波波高, T は周期, L_o は沖波の波長, D_{50} は底質の中央粒径, w は底質の沈降速度, g は重力加速度である。

$$D \equiv H_o/D_{50} : \text{Wave height to Sediment grain size} \dots\dots\dots (1)$$

$$G \equiv \pi w/gT \dots\dots\dots (2)$$

$$N_o \equiv H_o/wT : \text{Fall speed parameter} \dots\dots\dots (3)$$

$$S \equiv H_o/L_o : \text{Wave steepness} \dots\dots\dots (4)$$

$$N_f \equiv w/\sqrt{gH_o} : \text{a Froude-type number} \dots\dots (5)$$

Kraus ら (1991) の結果によると, $S-N_o$, $S-G$, $S-N_f$, N_o-N_f および $S-D$ 面において, 岸沖漂砂による断面変化をある程度タイプ分類できるが, 特に $S-N_o$ 面において最も適切なタイプ分類がなされることが確認されている。また, 波のエネルギー散逸と底質の移動とを関連付けたパラメータ N_o , N_f は, 1 つのパラメータのみでもデータをタイプ分類できる可能性が示されている。さらに, 不規則波の場合, 各パラメータに含まれる沖波条件として平均波を用いることで, より適切にタイプ分類できることが示されている。この点に関しては, 山本・佐藤 (1999) も確認しており, 本研究においても沖波条件は平均波を用いることとした。

第 1 節で述べたように, 上記の 5 つのパラメータには海浜勾配が含まれていない。自然海浜は常時変化する波浪の作用を受けており, 粒径によって決定される海浜断面が形成されることは非常に稀である。また, 人工海浜や養浜を行った後の海浜の安定性を判断するためには, 一様勾配の断面を初期状態とする海浜変化を予測するこ

* 正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所企画部企画課建設専門官
** 正会員 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研究官
*** 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

とが必要となる。

山本・佐藤(1999)は、式(6)で表される碎波帯相似パラメータを用いて、 $\xi-N_f$ 面上に大規模水路実験データを整理し、式(7)で表される断面変化予測式を提案した。ここで、 $\tan \beta$ は海浜勾配である。その結果、 $P < 1.0$ で堆積型、 $1.9 \geq P \geq 1.0$ で中間型、 $P > 1.9$ で侵食型の海浜変形となることを示した。ただし、定式化において、碎波波高 H_b の影響を考慮して、式(8)で表される碎波帯相似パラメータを用いている。また、海浜勾配の影響を考慮して、 N_f を $(\tan \beta)^{1.5}$ で除したパラメータを用いている。

$$\xi = \tan \beta / \sqrt{H_b/L_o} \dots\dots\dots (6)$$

$$\xi_b = \frac{1}{P} \{N_f / (\tan \beta)^{1.5}\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\xi_b = \tan \beta / \sqrt{H_b/L_o} \dots\dots\dots (8)$$

本研究では、式(1)~(6)で表される6つのパラメータを用いて断面変化予測式を検討する。その際、式(3)、(5)などのいくつかのパラメータを求めるために底質の沈降速度を求める必要がある。ここでは、Rubey(1933)によって提案された算定式を用いることとする。Rubeyの式の一般性を評価するために、これまでに提案されてきた算定式(Hallermeier, 1981; Gibbs et al, 1971; Fredsøe and Deigaard, 1992)と比較した結果を図-1に示す。実線で示されたRubeyの結果は比較的小さな値を示すが、他の算定値と同程度の沈降速度であり、以下で提案される予測式の閾値に大きな影響を与えることがないことを確認できる。

3. 実験結果と断面変化予測式の提案

3.1 各パラメータによる実験結果の分類

表-1は、49ケースの実験結果を示す。No.10~45は、長さ150m、幅2m、深さ5mの水路を用い、それぞれに示す波浪条件を各作用時間分だけ作用させたときの海浜変形を調べた結果である。No.1~9, No.46~49は、比較

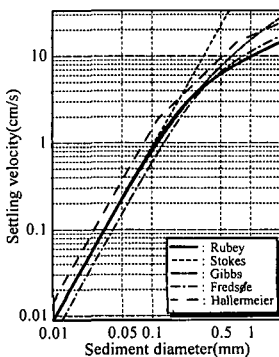


図-1 沈降速度の比較

のための中規模および小規模実験結果である。

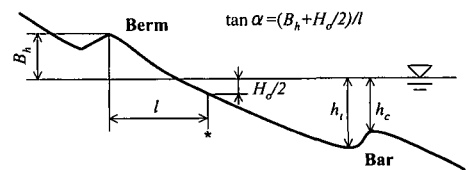
表中の初期海浜断面の状態は、波作用前の断面の状態を表す。一様勾配とは、前浜から沖浜にかけて平坦な断面、もしくは養浜によって前浜付近のみ平坦な断面を表す。複雑な断面とは、ある波の作用を長時間受けバーやバームが形成された後の断面であり、その断面を初期断面として別の波を作用させた場合を示す。

複雑な断面の場合、海浜勾配や海浜変形のタイプ分類が一義的には決定されず、その決定方法を定義する必要がある。ここでは、初期海浜勾配として波打ち帯の平均海浜勾配である前浜勾配を用いる。タイプ分類は、地形変化から算出される岸沖漂砂の向きによって判断する。すなわち、地形変化の生じた全領域において、岸向きの漂砂が確認された場合を堆積型、その逆を侵食型、それら以外を中間型とした。この定義によると、初期断面形状の状態が一様勾配の場合には、砂村・堀川の定義と等しくなる。

表-1のバーム高さ B_h 、トラフ水深 h_t 、バー頂部水深 h_c 、変形後前浜勾配 $\tan \alpha$ は、図-2で定義される。各値は、波の作用を作用時間分受けた後に計測された断面形状から読み取った値であり、'-'は対象となる地形が形成されなかったことを表す。ただし、小規模実験においては欠測を意味する。

図-3(a)~(d)は、表-1の実験データを $S-N_b$ 、 $S-G$ 、 $S-N_f$ 、 N_b-N_f 面に両対数プロットした結果である。各図には、Krausら(1991)の示したタイプ分類式も実線で示されている。図-3(e)および(f)は、同実験データをそれぞれ $\xi-N_b$ 、 $\xi-N_f$ 面にプロットした結果である。さらに、既存の指標と比較するために、同実験データをそれぞれ砂村・堀川の算定図、山本・佐藤の算定図にプロットした結果を図-3(g)および(h)に示す。砂村・堀川の式においては $C > 18$ で侵食型、 $C < 18$ で堆積型になり、実験室では $C > 8$ で侵食型、 $8 \geq C \geq 4$ で中間型、 $4 > C$ で堆積型となる(Sunamura and Horikawa, 1974)。山本・佐藤の式は、前述した通りである。

図-3(a)~(f)を見ると、侵食型と堆積型が適切に分類されたものではなく、ここで取り上げた6つのパラメータによっては海浜断面変化をタイプ分類できないように見える。しかしながら、 Δ 印で示された複雑な断面のケー



* Stepが形成された場合は、その位置とする。

図-2 用語の定義

表-1 実験結果の一覧

No.	作用時間 (hour)	波高 H_0 (m)	周期 T (s)	水深 h (m)	初期海浜勾配 $\tan \beta$	中央粒径 D_{50} (m)	海浜変形のタイプ	初期断面形状の状態	バーム高さ B_0 (m)	トラフ水深 h_t (m)	バー頂部水深 h_c (m)	変形後前浜勾配 $\tan \alpha$	備考	
1	1.6	0.14	1.4	0.7	1/10	0.004	堆積型	一様勾配	0.11	—	—	0.187	規則波 均一砂 中規模	
2	2.0	0.15	1.8	0.7	1/10	0.004	堆積型	一様勾配	0.17	—	—	0.238		
3	3.4	0.18	3.1	0.7	1/10	0.004	堆積型	一様勾配	0.33	—	—	0.288		
4	1.6	0.15	1.4	0.7	1/10	0.004	中間型	一様勾配	0.07	0.17	0.09	0.14		
5	2.0	0.15	1.8	0.7	1/10	0.001	堆積型	一様勾配	0.13	—	—	0.189		
6	3.4	0.21	3.1	0.7	1/10	0.001	堆積型	一様勾配	0.4	—	—	0.272		
7	2.3	0.14	1.4	0.7	1/10	0.0003	侵食型	一様勾配	—	0.19	0.1	0.152		
8	3.0	0.14	1.8	0.7	1/10	0.0003	侵食型	一様勾配	—	0.16	0.09	0.138		
9	0.4	0.15	3.1	0.7	1/10	0.0003	中間型	一様勾配	0.17	0.13	0.12	0.114		
10	4.0	0.30	3.0	4.0	1/10	0.0003	侵食型	一様勾配	—	0.31	0.19	0.095	規則波 均一砂	
11	4.0	0.54	3.0	4.0	1/10	0.0003	侵食型	一様勾配	—	0.81	0.44	0.116		
12	4.0	0.50	3.9	4.0	1/10	0.0003	侵食型	一様勾配	—	0.59	0.36	0.086		
13	4.0	0.72	4.0	4.0	1/10	0.0003	侵食型	一様勾配	—	1.22	0.76	0.1		
14	21.0	0.30	4.4	3.0	1/10	0.0003	侵食型	一様勾配	—	0.44	0.32	0.1		
15	21.0	0.32	4.4	3.0	1/20	0.0003	中間型	一様勾配	0.2	0.43	0.21	0.102		
16	21.0	0.30	4.4	3.0	1/30	0.0003	中間型	一様勾配	0.18	0.59	0.29	0.099		
17	8.0	0.42	3.3	3.6	1/20	0.0016	堆積型	一様勾配	0.13	0.46	0.3	0.082		規則波 混合砂
18	8.0	0.51	2.5	3.6	1/20	0.0016	中間型	一様勾配	0.12	0.5	0.3	0.067		
19	18.0	0.25	2.2	3.6	1/20	0.0003	中間型	一様勾配	0.32	0.41	0.38	0.062	不規則波 均一砂 平均波 (下段, 有殺波)	
20	18.0	0.39	2.6	3.6	1/20	0.0003	侵食型	一様勾配	—	0.78	0.52	0.056		
21	96.0	0.28	3.4	2.9	1/30	0.00022	中間型	一様勾配	0.42	0.67	0.54	0.104	規則波 均一砂	
22	4.0	0.18	3.2	2.9	0.113	0.00022	中間型	複雑な断面	0.31	—	—	0.221		
23	4.0	0.18	2.5	2.9	0.221	0.00022	中間型	複雑な断面	0.178	—	—	0.142		
24	4.0	0.18	2.0	2.9	0.142	0.00022	侵食型	複雑な断面	0.105	—	—	0.145		
25	4.0	0.18	1.8	2.9	0.145	0.00022	侵食型	複雑な断面	0.087	0.15	0.096	0.125		
26	4.0	0.18	2.0	2.9	0.125	0.00022	中間型	複雑な断面	0.189	0.113	0.095	0.131		
27	4.0	0.18	2.5	2.9	0.131	0.00022	中間型	複雑な断面	0.183	—	—	0.133		
28	4.0	0.18	3.2	2.9	0.133	0.00022	中間型	複雑な断面	0.275	—	—	0.178		
29	4.0	0.14	2.5	2.9	0.151	0.00022	堆積型	複雑な断面	0.191	—	—	0.148		
30	4.0	0.18	2.5	2.9	0.148	0.00022	中間型	複雑な断面	0.197	—	—	0.143		
31	4.0	0.23	2.5	2.9	0.143	0.00022	侵食型	複雑な断面	0.199	0.141	0.132	0.117		
32	4.0	0.28	2.5	2.9	0.117	0.00022	侵食型	複雑な断面	0.206	0.243	0.181	0.15		
33	4.0	0.23	2.5	2.9	0.150	0.00022	堆積型	複雑な断面	0.206	—	—	0.122		
34	4.0	0.18	2.5	2.9	0.122	0.00022	堆積型	複雑な断面	0.2	—	—	0.147		
35	4.0	0.14	2.5	2.9	0.147	0.00022	中間型	複雑な断面	0.15	0.129	0.115	0.161		
36	32.0	0.28	3.4	2.9	1/10	0.00022	侵食型	一様勾配	0.416	—	—	0.165		
37	32.0	0.28	3.4	2.9	1/10	0.00022	侵食型	一様勾配	0.412	—	—	0.158		
38	32.0	0.28	3.4	2.9	0.144	0.00022	侵食型	一様勾配	0.375	—	—	0.123		
39	32.0	0.28	3.4	2.9	0.123	0.00022	中間型	複雑な断面	0.345	—	—	0.222		
40	8.0	0.34	3.5	2.9	0.222	0.00022	侵食型	一様勾配	0.357	—	—	0.161		
41	8.0	0.34	2.5	2.9	0.161	0.00022	中間型	複雑な断面	0.205	—	—	0.111		
42	32.0	0.08	2.0	3.2	1/20	0.00022	堆積型	一様勾配	0.236	—	—	0.187	不規則波 均一砂 平均波 (下段, 有殺波)	
43	32.0	0.08	2.0	3.2	1/15	0.00022	堆積型	一様勾配	0.262	—	—	0.224		
44	8.0	0.39	3.0	3.2	1/15	0.00022	侵食型	一様勾配	—	0.953	0.664	0.082		
45	14.0	0.08	2.0	3.2	1/10	0.00022	堆積型	一様勾配	0.302	—	—	0.223		
46	4.0	0.05	1.0	0.3	1/20	0.00014	侵食型	一様勾配	—	—	—	—	均一砂 規則波 小規模	
47	4.0	0.03	1.0	0.3	1/20	0.00014	中間型	一様勾配	—	—	—	—		
48	4.0	0.08	1.3	0.3	1/20	0.00014	中間型	一様勾配	—	—	—	—		
49	4.0	0.02	1.6	0.3	1/20	0.00014	堆積型	一様勾配	—	—	—	—		

ス除去して各図を見ると、侵食型と堆積型とをある程度区分できるようになる。特に、図-3(e)でその区分が明確であり、次節では $\xi-N_b$ 面で断面変化予測式を導くことを考える。

図-3(g), (h)についても、複雑な断面のケースを除去し分類結果を見ると、砂村・堀川の算定図については、上述したように実験スケールの影響を確認できる。山本・佐藤の算定図では、実験スケールに依存することなく、ほぼ適切なタイプ分類が行われている。

3.2 断面変化予測式の提案

初めに、一様勾配のケースについて検討する。図-4は、図-3(e)のうち一様勾配のケースのみを抽出した結果である。小規模実験の一つの例外を除き、侵食型と中

間・堆積型とを直線で分類できることがわかる。ここで、直線は式(9)で表され、 $B > 1.5$ の時侵食型、 $B \leq 1.5$ で中間・堆積型である。Krausら(1991)によると、一つのパラメータ N_b で評価した場合、 $N_b < 2$ で堆積型になることが述べられているが、 $N_b = 2$ のとき、式(9)から $\xi = 0.53$ となる。一方、碎波形態の区分から $\xi < 0.58$ で崩れ波碎波となることが知られており、式(9)がそれらのほぼ境界に位置していることを確認できる。これは碎波形態が海浜変形と深く関係していることからも妥当な結果であると言える。

$$\xi = BN_b^{1.5} \dots\dots\dots (9)$$

次に、複雑な断面のケースについて検討する。図-3の△印で示されたデータに注目すると、パラメータに前浜

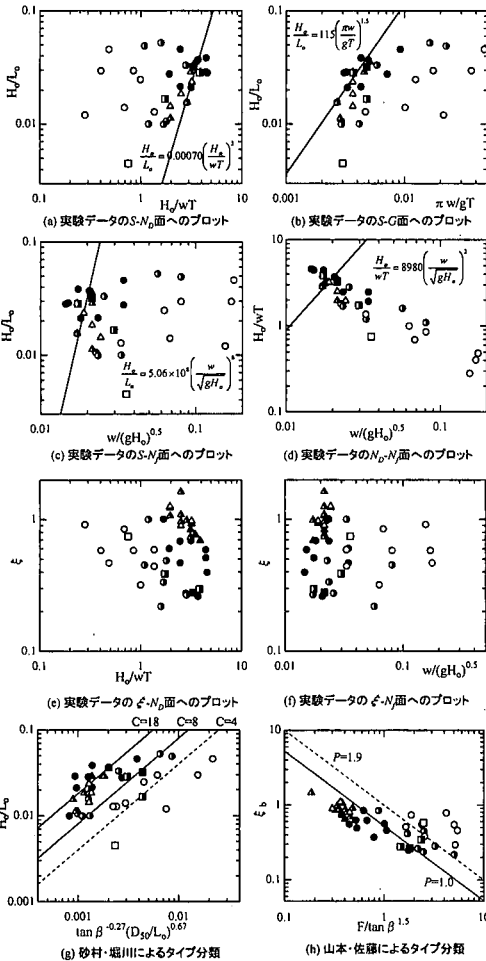


図-3 各指標による実験データのタイプ分類

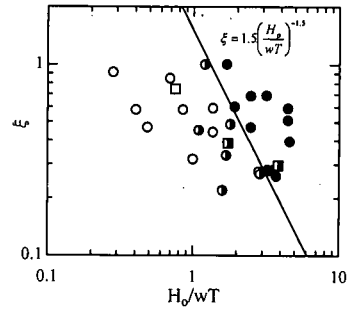


図-4 実験データのξ-N_d面へのプロット (一様勾配のケースのみ)

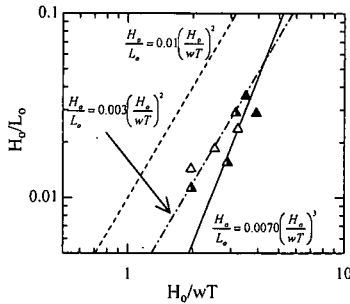


図-5 実験データのS-N_d面へのプロット (複雑な断面のケースのみ)

式(11)はN_dのべき数は異なるが、図-3(a)に示されたKrausらの結果とほぼ等しく、S-N_d面でデータが整理されることとなる。図-5は、図-3(a)の複雑な断面のケースのみを抽出した結果であるが、B'=0.01としたときの式(11)がデータを適切にタイプ分類しているとは言えない。ただし、B'を0.003と設定すれば、ほぼ適切にタイプ分類が行われる。

$$\tan \alpha = 0.15 N_d^{0.5} \dots\dots\dots (10)$$

$$S = B' N_d^2 \dots\dots\dots (11)$$

4. 現地データへの適用

棧橋では、1976年から約20年間にわたって断面測量が実施されてきた。その断面形状の経時変化に着目すると、常陸那珂港の建設工事に伴って1980年代後半から岸沖漂砂による海浜変形が卓越してきたことが確認されている(山本ら, 1999)。そこで、現地データとして1990年以降に棧橋で計測されたデータを用い、初期断面の状態が複雑な断面であることを考慮して、S-N_d面でデータの分類を試みる。

現地データの整理にあたり、約一週間ごとの断面データから海浜変化のタイプ分類を行うのは非常に困難である。ここでは、バームが存在し、かつ汀線が1m以上前進した場合を堆積型、バームが存在せず、かつ汀線が1m

勾配を含まない図-3(a)~(d)において比較的データが分散している。一方、それをパラメータとして含む図-3(e)~(h)では、データがある領域に集中し、分類可能な状態になっていない。これは、一義的に定義することが困難な海浜勾配を前浜勾配で代表させたことが原因と考えられる。

そこで、式(9)を前浜勾配が含まれない形へ変形することを考える。式(10)はKriebelら(1991)によって導かれた式であり、tan αは波浪条件に応じて変形した後の前浜勾配を表す。式(9)のtan βをtan αで置換すると式(11)となり、これは波によって変形が生じた後の平衡状態を表す式と考えられる。すなわち、この式により複雑な断面のタイプ分類が可能となるが、前浜勾配の変化による海浜変形は無視した分類となることが予想される。ここで、B'は定数であり、(0.15/B')²の値を持つ。

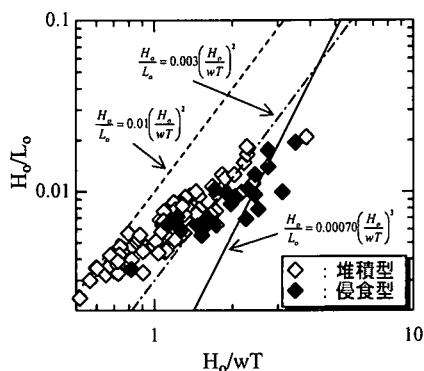


図-6 現地データの $S-N_b$ 面へのプロット

以上後退した場合を侵食型とした。また、波浪条件も常時変化しているため、地形変化に影響を与えた波浪条件を特定するのも困難であった。そこで、堆積型の場合には、断面測量日に測定された平均波高の平均値を、侵食型の場合には、断面測量日およびその前日に観測された平均波高の中で最大値を用いた。底質に関しては、汀線付近の陸側と海側において表層で採取された砂の粒度分析結果から 0.55 mm とした。これは、5年間にわたり断面測量ごとに採取されたデータの平均値である。

図-6は、現地データを $S-N_b$ 面にプロットした結果である。実線は Kraus らの示した結果であり、破線は $B=0.01$ の場合の式 (11) である。データの重複領域が多く、閾値を明確に設定することはできないが、一点鎖線で示すように両直線の間に境界が存在することは確認できる。現地の海浜変形は、潮位変化に伴う地形変化や沿岸漂砂による変形などが複合した結果であり、これが明確な閾値を設定できない理由と考えられた。

5. 結 論

海浜断面変化の予測パラメータとして式 (1)~(6) を用い、岸沖漂砂による断面変化予測式を検討した。その結果得られた主要な結論は以下の通りである。

- ① 養浜後の地形など一様勾配断面に波が作用した場合の海浜変形については、式 (9) によりタイプ分類を行うことができる。この指標は、小規模実験から

大規模実験までを同一の閾値で評価できるスケールに依存しない断面変化予測式である。

- ② 複雑な断面に波が作用した場合の海浜変形については、式 (9) をそのまま適用することはできない。この場合、 $S-N_b$ 面における式 (11) によりタイプ分類の可能性が示された。ただし、その閾値の設定については検討の余地が残された。
- ③ 砂村・堀川の式で砂浜の安定性を評価する場合、閾値の設定がやはり問題となる。スケールに応じた閾値の設定が必要であり、海岸ごとに閾値が異なる可能性があり、適用に際して注意すべきである。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣 篤・竹淵 勉 (1989): 前浜地形変化の支配要因とバームの形成過程, 土木学会論文集, No. 411/II-12, pp. 227-236.
- 武田一郎・砂村継夫 (1983): 砂浜海岸の堆積過程における地形変化, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 254-258.
- 建設省河川局海岸課 (1992): 人工リーフの設計の手引き, 全国海岸協会, 94 p.
- 山本幸次・佐藤慎司 (1999): 養浜により造成した海浜の断面変形に関する実験的研究, 土木技術資料, Vol. 41, No. 5, pp. 56-61.
- 山本幸次・福島雅紀・佐藤慎司 (1999): 阿字ヶ浦海岸における長期断面変化と砂層厚, 海岸工学論文集, Vol. 46, pp. 636-640.
- Fredsoe, D. and Deigaard, R. (1992): Mechanics of coastal sediment transport, Vol. 3, Advanced series on ocean engineering, World scientific, pp. 198-201, 209-212.
- Gibbs, R. J., M. D. Mathews and D. A. Link (1971): The relationship between sphere size and settling velocity, Jour. of sedimentary petrology, Vol. 41, pp. 7-18.
- Hallermeier, R. J. (1981): Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains, Sedimentology, Vol. 28, pp. 859-865.
- Kriebel, D. L., Kraus, N. C. and Larson, M. (1991): Engineering Methods for Predicting Beach Profile Response, Coastal Sediment '91, pp. 557-571.
- Kraus, N. C., Larson, M. and Kriebel, D. L. (1991): Evaluation of beach erosion and accretion predictors, Coastal Sediments '91, pp. 572-587.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th ICCE, pp. 920-938.
- Rubey, W. W. (1933): Settling velocities of gravel, sand and silt particles, American Jour. of Sci., Vol. 25, pp. 324-338.