

# 波による二次元汀線変化に関する一考察

堀川清司\*・砂村継夫\*\*・近藤浩右\*\*\*・岡田 滋\*\*\*\*

## 1. はじめに

海浜地形が平常海浜（汀線が前進する，いわゆる堆積型）と暴風海浜（汀線が後退する，いわゆる侵蝕型）という2つのタイプに大別されることが Johnson<sup>1)</sup> によって指摘されて以来，海浜変形に関する主要な研究は，この2つのタイプの境界がどのような波および底質粒径の条件によって決定されるのか，ということに焦点が当てられてきたと言えよう。しかしながら，近年，この2つのタイプ分けが必ずしも汀線の前進・後退とは一致しないことが尾崎<sup>2)</sup> によって指摘されている。

汀線変化の問題は，海浜地形の変化を惹起させるような砂移動の機構との関連において力学的に論じられることが望ましいが，砂移動の現象そのものが複雑であるため，その機構を十分理解するまでには至っていない。

本稿では，汀線変化に関与すると考えられる波・底質粒径・海底地形という3つの要因間にどのような関係が成立する時に，汀線の前進あるいは後退が生ずるのか，という問題をマクロに考察する。従来，このようなアプローチが実験室において試みられており<sup>3)</sup>，ある程度の成果が得られている。これを要約すると次のようになる。

底質材料を砂あるいは細礫（比重 2.6~2.7）とし，一様勾配の初期地形に規則波を 40 時間以上作用させた場合の二次元実験においては，その時の汀線の前進・後退の境界は式 (1) 中の定数  $C$  の値により，式 (2) のように表わすことができる。

$$\frac{H_0}{L_0} = C(\tan \beta)^{-0.27} \left( \frac{d}{L_0} \right)^{0.67} \dots\dots\dots (1)$$

ここに， $H_0$ : 沖波波高， $L_0$ : 沖波波長， $\tan \beta$ : 初期勾配， $d$ : 底質粒径， $C$ : 定数で，

$$\left. \begin{array}{l} C \geq 8 \text{ ならば後退} \\ 4 \leq C \leq 8 \text{ ならば前進あるいは後退} \\ C \leq 4 \text{ ならば前進} \end{array} \right\} \dots\dots (2)$$

式 (1) 中の2つの無次元パラメーター  $[H_0/L_0]$  と

$[(\tan \beta)^{-0.27} \cdot (d/L_0)^{0.67}]$  が，条件の複雑な現地で得られたデータを整理する際にも有効であるのかどうか，という問題は十分に検討されていない。本稿では，上述の実験条件よりは広い範囲の実験の結果に対してもこれらのパラメーターが有効に使えるのかどうかを検討し，現地資料の解析に対する適用性を考える。まず，次の2点を検討する。

- (1) 一様勾配の初期地形から変形が始まる場合，波の作用時間の長短にかかわらず，これらのパラメーターが適用できるかどうか。
- (2) すでに波の作用を受けて変形した地形を初期条件にもつ場合にも，これらのパラメーターが有効であるのかどうか。

このような検討を可能にするためのデータの蓄積をはかる目的で，2. に述べるような実験を行い，既往の実験データと合わせて 3. に上述の問題を検討し，4. にこれらのパラメーターによる現地資料の解析を試みる。なお，汀線変化に関する定量的な問題については，ここでは触れない。

## 2. 二次元水路による一実験

### (1) 実験装置・条件・方法

長さ 25 m，深さ 1 m，幅 0.8 m の両面ガラス張りの二次元造波水路を，仕切り板（厚さ 2 cm）により水路方向に二等分し，一方に粒径 0.2 mm，他方に 0.7 mm の砂を入れ模型海浜を作った。使用した砂はいずれも比重 2.65，Trask の淘汰係数 1.1 で，中央粒径と平均粒径とは等しい。実験水位は常に一定 (40 cm) に保ち，潮位の影響が入るのを除去した。

波の条件は (a)  $H_0=7.6$  cm， $T=1$  sec と (b)  $H_0=3.4$  cm， $T=2$  sec の二種類とした。同一の波の作用時間  $t$  は 160 時間以上とした。まず，いずれの粒径の海浜においても 1/10 の一様勾配の地形を作り，(a) の波を作用させ，次に，これによって作られた最終地形に (b) の波を作用させ，最後に，この場合の最終地形に再び (a) の波を作用させた。このような一連の実験を粒径の異なる二つの海浜で同時に行った。次に，海浜を再び 1/10 の一様勾配にならし，作用させる波の順序を変えて，す

\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科  
 \*\* 正会員 工博 東京大学助手 工学部土木工学科  
 \*\*\* 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科  
 \*\*\*\* 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科

表-1 実験ケース

CASE No.	$d$ (mm)	$H_0$ (cm)	$T$ (sec)	$t$ (hr)	初期地形
I-1	0.2	7.6	1.0	178	一様勾配 (1/10)
I-2	"	3.4	2.0	168	I-1の最終地形
I-3	"	7.6	1.0	192	I-2 "
II-1	0.7	7.6	1.0	178	一様勾配 (1/10)
II-2	"	3.4	2.0	168	II-1の最終地形
II-3	"	7.6	1.0	192	II-2 "
III-1	0.2	3.4	2.0	266	一様勾配 (1/10)
III-2	"	7.6	1.0	171	III-1の最終地形
III-3	"	3.4	2.0	168	III-2 "
IV-1	0.7	3.4	2.0	266	一様勾配 (1/10)
IV-2	"	7.6	1.0	171	IV-1の最終地形
IV-3	"	3.4	2.0	168	IV-2 "

なわち (b)→(a)→(b) として、同様の実験を行った。実験ケースを表-1に示す。

海浜地形のプロファイルの測定は、実験開始後1時間、

3, 6, 9, 24, 以下24時間ごとに行った。

(2) 結果

砂れん、および重複波によって形成された凹凸の地形をならしたプロファイルを図-1に示す。汀線変化に着目してこれらの結果をまとめてみると、次のようになる。なお、汀線の前退・後退の判断は、おのおののケースの実験開始時(すなわち、 $t=0$ )における汀線位置を基準にした。

CASE I-1・2・3 および CASE II-1・2・3 においては、いずれも後退・前進・後退を示しているが、CASE III-1・2・3 においては後退・後退・前進、また CASE IV-1・2・3 では前進・後退・前進を示す。特に CASE III-1 においては、同一の波を作用させている間に汀線が前進から後退へと変化している。実験条件によって

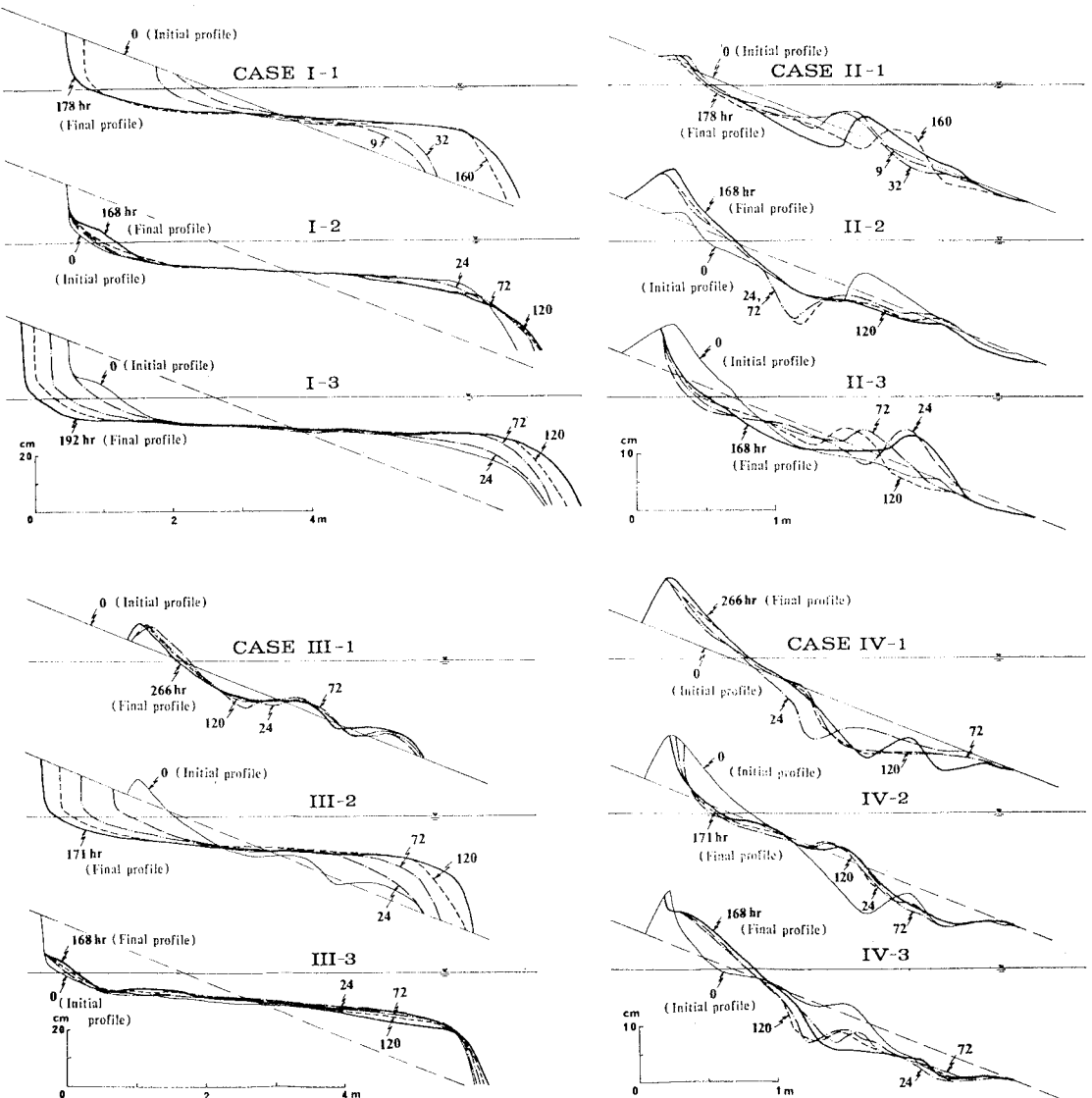


図-1 プロファイルの時間的变化

表—2 既往の実験の条件 (一様勾配の場合)

No.	発 表 者	$d$ (mm)	$\tan \beta$	$H_0$ (cm)	$T$ (sec)	$t$ (hr)	備 考
1	Eaglesn・Glennie・Dracup <sup>5)</sup>	0.37	1/20~1/45	9.1~10.8	1.15~1.53	121~222	二次元・規則波
2	堀川・砂村・鬼頭 <sup>7)</sup>	0.20	1/24	5.3~7.3	1.4~1.7	48~240	〃
3	堀川・砂村・近藤 <sup>8)</sup>	0.20~0.70	1/10~1/30	3.4~7.6	1.0~2.0	160	〃
4	堀川・砂村・近藤・岡田 <sup>9)</sup>	0.20~0.70	1/10	3.4~7.6	1.0~2.0	178~266	〃
5	井島・青野 <sup>10)</sup>	0.21~1.85	1/20	6.8~9.2	1.0~3.3	3~25	〃
6	岩垣・樫木 <sup>11)</sup>	0.30	1/10	2.09~5.88	1.07~1.21	4~12	〃
7	Iwakaki・Noda <sup>12)</sup>	0.22~0.93	1/10	2.13~30.0	0.96~3.58	5~20	〃
8	栗原・篠原・榛・吉岡 <sup>13)</sup>	0.20	1/10	3.84~4.95	1.40~1.65	5~7	〃
9	Monroe <sup>14)</sup>	0.27	1/15	4.33~17.1	1.19~5.06	16~47	〃
10	尾崎 <sup>15)</sup>	0.30	1/80	3.52	1.16	$\geq 20$	〃
11	尾崎・堺 <sup>16)</sup>	0.22~0.49	1/90	2.9~11.4	1.1~3.3	10~80	〃
12	Paul・Kamphuis・Brebner <sup>17)</sup>	0.357~0.63	1/10	4.13~13.6	1.29~1.71	$\geq 36$	〃
13	Popov <sup>18)</sup>	6.0	1/3	31.3	1.73	16.8	〃
14	Raman・Earattupuzha <sup>19)</sup>	0.30	1/8~1/15	6.5~7.54	1.0~2.0	40~45	〃
15	Rector <sup>20)</sup>	0.22~3.44	1/30	10.1~13.1	1.3~3.3	70~200	〃
16	Saville <sup>21)</sup>	0.30	1/10	3.2~5.2	0.74~1.17	20	三次元
17	Saville <sup>22)</sup>	0.22~3.5	1/15	3.05~168	1.77~11.3	40	二次元
18	篠原・榛・斎藤 <sup>23)</sup>	0.20~0.88	1/10~1/20	2.13~7.06	0.74~1.15	4~14	〃
19	田中・新保 <sup>24)</sup>	0.20	1/20	3.2~10.8	0.95~1.98	10~15	〃
20	東大港湾研 <sup>25)</sup>	0.18	1/60	8.37~9.98	0.94~1.72	35~54	〃
21	土屋・吉岡 <sup>26)</sup>	0.20	1/15	7.2	0.62	130	風波
22	土屋・稲田 <sup>27)</sup>	0.22~0.73	1/15	4.26~18.7	0.76~1.34	15~30	〃
23	Watts <sup>28)</sup>	0.22~3.44	1/20	12.7~18.7	2.0~2.68	40	規則波
24	山本・野積 <sup>29)</sup>	0.18	1/10~1/50	11.4~18.8	1.8~2.0	10~31.5	〃

は、このような現象がみられることが既に指摘されており<sup>4)</sup>、既往のデータでみる限りこのような変化は、波の作用時間が40時間以内で生じている<sup>5)</sup>。このケースのように、波が120時間以上も作用した後に、このような変化が観察されたことは注目に値する。

### 3. 実験資料による検討

#### (1) 初期地形が一様勾配である場合

砂あるいは細礫で作られた一様勾配の初期地形に波を作用させた場合の海浜変形を取扱った研究は、表—2に示すように、今まで数多くなされている。ほとんどの研究は二次元実験で規則波を用いたものであるが、風波による実験や三次元実験<sup>\*)</sup>も含まれている。実験条件の範囲についてみてみると、粒径は0.18~6.0mm、勾配は1/3~1/90、波高は2.1~168cm、周期は0.62~11.3sec、波の作用時間は3~266時間で、いずれもかなり広範囲の値を含んでいることがわかる。このようなデータが示す汀線の変化を無次元パラメーター  $[H_0/L_0]$  と  $[(\tan \beta)^{-0.27}(d/L_0)^{0.67}]$  とを用いて整理してみよう。

以下に、汀線の前進・後退は、現地資料の解析の場合を除き、実験開始時の汀線位置を基準とし、最終地形から判断した。地形が与えられていない資料については、その中にある記載に基づいた。汀線位置の時間的変化に関する情報が得られない資料において、数は少ないが、最終汀線の位置が変化していないケースがみられた。このような場合には、「前進」と判断した。なお、プロフ

ファイルの時間的変化が利用できる資料については、汀線の時間的変化の過程をも調べた。

図—2に結果を示す。図中、黒の記号は汀線の後退、白の記号は前進を表わす。前進あるいは後退を示すデータが混在する領域がかなり広いが、波の作用時間の長短にかかわらず、基本的には汀線変化を上述のパラメーターで表わすことができると言えよう。式(1)中の定数  $C$  の値は式(2)と多少異なり、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C \geq 10 & \text{ ならば 後退} \\ 3 \leq C \leq 10 & \text{ ならば 前進あるいは後退} \\ C \geq 3 & \text{ ならば 前進} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

図中、 $E^*$ の列に示されている黒・白の記号は、図—3<sup>81)</sup>に示すように、変形の初期に形成された浜堤 (beach ridge<sup>82)</sup> あるいは swash bar<sup>83)</sup> のため、一時的に汀線は前進するが、さらに波を作用させると、浜堤を形成しつつ汀線が後退してゆくケースを示している。これは、波がその遡上限界点付近に堆積作用を伴いつつ、汀線付近を侵蝕してゆくことを意味している。短時間の波の作用下ではこの現象をみることはむづかしい。このような特徴的な変形過程を示すケース (上述の CASE III—1 もこれに相当する) は、ここで調べた限りでは、ほとんどが  $3 \leq C \leq 10$  の領域に入っている (図—2 参照)。このことは、「堆積」として判断され、この領域内にプロットされたデータの中には、さらに波を作用し続けると、汀線が後退してくるものがありうる、ということを示唆している。

#### (2) 初期地形が一様勾配でない場合

一様勾配をもたない初期地形に波を作用させた時の汀線変化に、上述のパラメーターを適用しようとする場合、

\*) Saville<sup>30)</sup>の結果は沿岸方向に配置されたすべての測点で同一の汀線変化を示しているため、汀線変化に関しては二次元性が保たれていると言える。

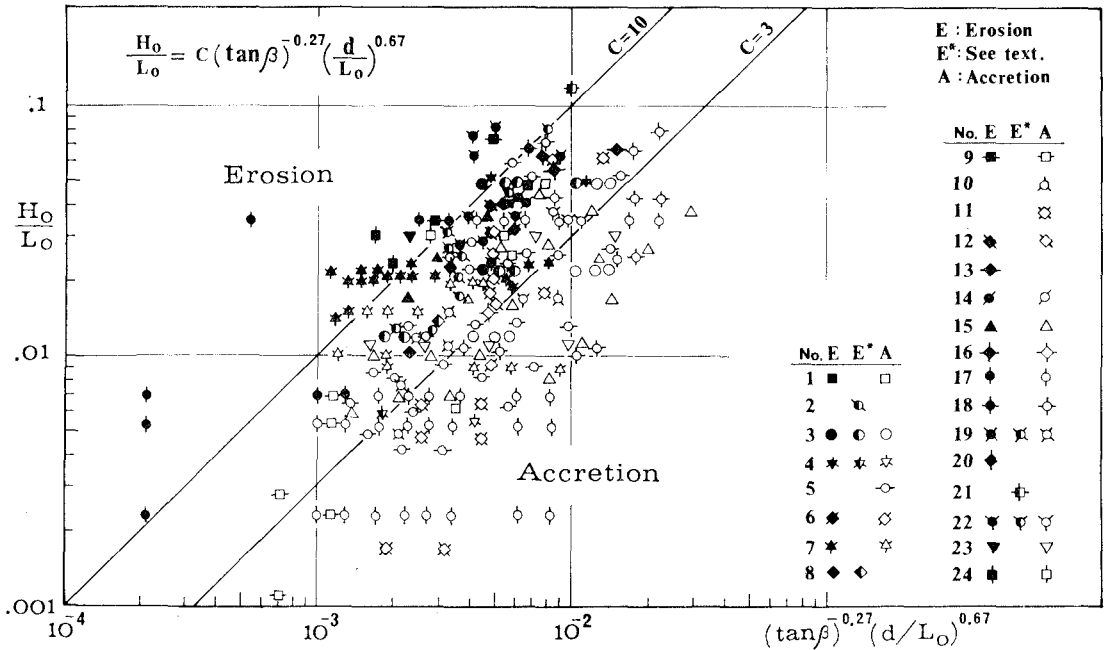


図-2 実験資料(表-2)による汀線の前進・後退(一様勾配の場合)

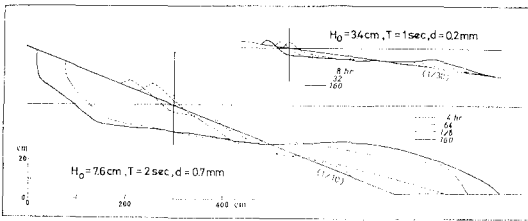


図-3 浜堤を伴いつつ汀線が後退する過程

初期勾配の評価が問題となる。本稿では、砂の初期移動限界水深(堀川・渡辺の式<sup>34)</sup>による)を与える地点と汀線とを結んだ直線の勾配をもって、初期勾配  $\tan \beta_*$  とした。

従来、初期地形が変形しているような実験はあまり数多くは行われていない。これらの中で、初期地形のプロファイルが利用できる資料を表-3に示す。この資料に基づきプロットした結果を図-4に示す。データの数十分ではないが、初期地形が一様勾配でない場合にも、式(1)中の  $\tan \beta$  のかわりに、先に定義した  $\tan \beta_*$  を用いることにより、式(1)中のパラメーターで汀線変化を整理することができると思われる。

上述の(1)および(2)で検討した結果からみて、これ

らのパラメーターを用いて現地資料を解析できる可能性が大きい。

#### 4. 現地資料の解析

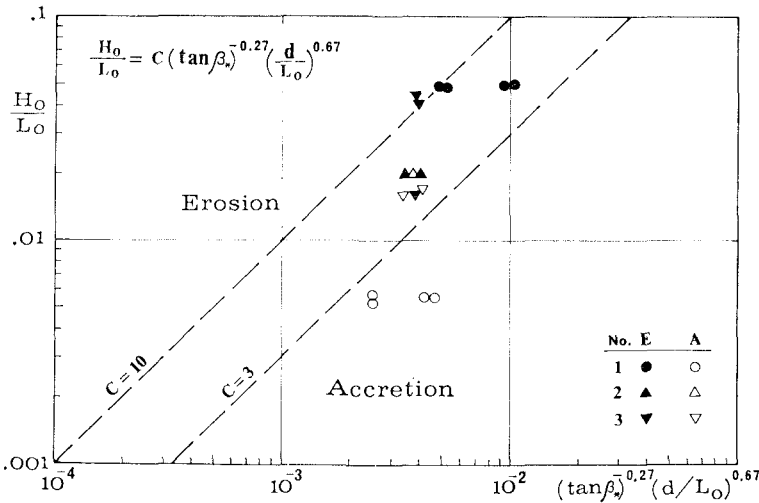
現地の資料を解析する場合、汀線の前進・後退は、対象とする期間の始めにおける汀線位置を基準にとって判断するのが妥当であろう。既往の資料<sup>38)~48)</sup>のほとんどが、対象期間の始めにおける海底地形のプロファイルを示していないので、 $\tan \beta_*$  を求めることができない。そこで便宜的に、汀線より水深20mまでの平均勾配  $\tan \bar{\beta}$  を海図などの資料から求め、 $\tan \beta_*$  のかわりに用いた。

汀線変化を惹起した時の波の資料が記載されている場合は、その波の記録を用いた。また、ある期間の汀線変化を示す資料とともに、その期間の波浪記録が時系列あるいは出現頻度として表わされている資料においては、波高はその期間中で最も大きいものを、周期はその波高に対応するものを選んだ。なお、底質粒径のデータが記載されていない場合は、他の資料で補った。

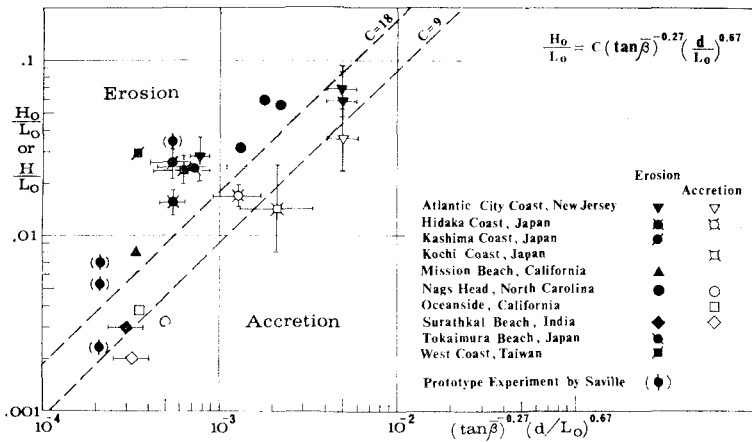
結果を図-5に示す。图中、( )内のデータはSaville<sup>49)</sup>による現地縮尺の模型実験の結果である。汀線の後退を示すこれらのデータが、現地の「後退」領域に

表-3 既往の実験の条件(一様勾配でない場合)

No.	発表者	d (mm)	$\tan \beta_*$	$H_0$ (cm)	T (sec)	t (hr)	備考
1	堀川・砂村・近藤・岡田 <sup>35)</sup>	0.20~0.70	0.031~0.15	3.4~7.6	1.0~2.0	168~192	二次元・規則波
2	鬼頭 <sup>36)</sup>	0.20	0.034~0.039	6.4	1.4	120~240	" "
3	Scott <sup>37)</sup>	0.31	0.073~0.12	5.19~13.1	1.38~1.48	5~44	" "



図—4 実験資料 (表—3) による汀線の前進・後退 (一様勾配でない場合)



図—5 現地資料による汀線の前進・後退<sup>50)</sup>

プロットされていることは興味深い。データの数が十分ではないが、実験データの解析結果 (図—2 および 4) と同様の傾向が認められる。しかし、前進・後退の境界が、実験室のものに比べて全体的に左へずれている。これは縮尺効果によるものであろう。なお、次の条件を満たせば、汀線は後退することがこの図より推察できる。

$$\frac{H_0}{L_0} \geq 18 (\tan \bar{\beta})^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{0.67} \dots\dots\dots (4)$$

5. おわりに

現地資料を解析するに当たり、上述の理由により、ここでは  $\tan \beta_*$  のかわりに  $\tan \bar{\beta}$  を用いているが、その結果はほぼ満足できるものと言える。基本的には  $[H_0/L_0]$  と  $[(\tan \bar{\beta})^{-0.27}(d/L_0)^{0.67}]$  という二つのパラメーターで現地の資料も整理できる。なお、今後の課題として次のようなものがある：(1) 現地における汀線変化に関する二次元性の検討、(2) 底質粒径の取扱い、(3) 汀線変化に

およぼす潮位の影響の検討、など。

最後に、本研究は文部省科学研究費 (研究代表者 土屋義人京大教授) によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Johnson, J.W.: Scale effects in hydraulic model involving wave motion, Trans. A.G.U., Vol. 30, p. 517-525, 1949.
- 2) 尾崎 晃: 海浜平衡勾配における初期勾配の影響について, 第28回年次学術講演会講演概要集(II), p. 88-89, 1973.
- 3) Sunamura, T. and K. Horikawa: Two-dimensional shore transformation due to waves, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., p. 920-938, 1974.
- 4) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三: 波による海浜変形に関する一考察, 第20回海岸工学講演会論文集, p. 357-363, 1973.
- 5) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右: 波による二次元海浜変形に関する実験的研究, 第21回海岸工学講演会論文集, p. 193-199, 1974.
- 6) Eagleson, P. S., B. Glenne, and J. A. Dracup:

- Equilibrium characteristics of sand beaches in the offshore zone, B.E.B. Tech. Memo., No. 126, 66p., 1961.
- 7) 前出 4).
  - 8) 前出 5).
  - 9) 本稿.
  - 10) 井島武士・青野 尚: 海岸汀線物質の砂堆積におよぼす影響(第1報), 第6回海岸工学講演会講演集, p. 49-56, 1959.
  - 11) 岩垣雄一・榎木 享: 海岸の平衡勾配と碎波による砂移動に関する実験, 第2回海岸工学講演会講演集, p. 99-105, 1955.
  - 12) Iwagaki, Y. and H. Noda: Laboratory study of scale effects in two-dimensional beach processes, Proc. 8th Conf. Coastal Eng., p. 194-210, 1962.
  - 13) 栗原道徳・篠原謹爾・椿東一郎・吉岡益男: 波による海浜の砂移動, 第3回海岸工学講演会講演集, p. 151-158, 1959.
  - 14) Monroe, F.F.: Oolitic aragonite and quartz sand: laboratory comparison under wave action, C.E.R.C. Misc. Paper No. 1-69, 29p., 1969.
  - 15) 前出 2).
  - 16) 尾崎 晃・堺 茂樹: 緩勾配の海岸における平衡断面形について, 第29回年次学術講演会講演概要集(II), p. 99-100, 1974.
  - 17) Paul, N.J., J.W. Kamphuis and A. Brebner: Similarity of equilibrium beach profiles, Proc. 13th Conf. Coastal Eng., p. 1217-1234, 1972.
  - 18) Popov, I.J.: Experimental research information by waves of stable profiles of upstream faces of earth dams and reservoir shores, Proc. 7th Conf. Coastal Eng., p. 282-293, 1960.
  - 19) Raman, H. and J. J. Erattupuzha: Equilibrium conditions in beach wave interaction, Proc. 13th Conf. Coastal Eng., p. 1237-1256, 1972.
  - 20) Rector, R.L.: Laboratory study of equilibrium profiles of beaches, B.E.B. Tech. Memo., No. 41, 38 p., 1954.
  - 21) Saville, T., Jr.: Model study of sand transport along an infinitely long, straight beach, Trans. A.G.U., Vol. 31, p. 555-565, 1950.
  - 22) Saville, T., Jr.: Scale effects in two dimensional beach studies, Proc. 7th General Meeting, I.A.H. R., p. A 3-1-8, 1957.
  - 23) 篠原謹爾・椿東一郎・斎藤 隆: 漂砂と波の特性に関する研究, 第5回海岸工学講演会講演集, p. 61-64, 1958.
  - 24) 田中則男・新保 修: 移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について, 港湾技術研究所報告, 第12巻1号, p. 3-57, 1973.
  - 25) 東京大学工学部土木工学科港湾研究室: 新潟海岸養浜模型実験報告書, 172 p., 1970.
  - 26) 土屋義人・吉岡 茂: 風波による海浜変形に関する実験的研究(1), 第25回年次学術講演会講演集(II), p. 97-98, 1970.
  - 27) 土屋義人・稲田和則: 風波による海浜変形に関する実験一特に沿岸砂洲の発生限界について一, 第21回海岸工学講演会論文集, p. 219-224, 1974.
  - 28) Watts, G.M.: Laboratory study of effect of varying wave periods on beach profiles, B.E.B. Tech. Memo., No. 53, 19p., 1954.
  - 29) 山本晃一・野積 尚: 海浜変形の相似性に関する研究一海浜移動床模型実験の相似律一, 土木研究所資料, 975号, 113p., 1975.
  - 30) 前出 21).
  - 31) 前出 5).
  - 32) Fairbridge, R. W. (ed.): The Encyclopedia of Geomorphology, Reinhold, New York, p. 70, 1968.
  - 33) Williams, W.W.: Coastal Changes, Routledge & Kegan Paul, London, p. 108, 1960.
  - 34) 堀川清司・渡辺 晃: 波による砂移動に関する一考察, 第13回海岸工学講演会講演集, p. 126-134, 1966.
  - 35) 本稿.
  - 36) 鬼頭平三: 海浜変形に関する基礎的研究, 東京大学工学部土木工学科修士論文, 119 p., 1973.
  - 37) Scott, T.: Sand movement by waves, B.E.B. Tech. Memo. No. 48, 37 p., 1954.
  - 38) Darling, J.M.: Seasonal changes in beaches of the North Atlantic Coast of the United States, Proc. 7th Conf. Coastal Eng., p. 236-248, 1960.
  - 39) 尾崎 晃: 漂砂による小港湾埋没防止対策に関する一考察, 第19回海岸工学講演会論文集, p. 47-51, 1972.
  - 40) 前出 2).
  - 41) 運輸省第二港湾建設局・港湾技術研究所・茨城県: 鹿島工業港の自然条件について(第二報), 294p., 1962.
  - 42) 上森千秋: 高知海岸の漂砂浜について, 第14回海岸工学講演会講演集, p. 280-285, 1967.
  - 43) 前出 22).
  - 44) Sonu, C.J.: Collective movement of sediment in littoral environment, Proc. 11th Conf. Coastal Eng., p. 373-400, 1968.
  - 45) Wiegel, R.L., D.A. Patrick and H.L. Kimberley: Wave, longshore current and beach profile records for Santa Margarita River Beach, IER, Univ. of Calif., Ser. 3, Issue 357, 6p., 1953.
  - 46) Suryaprakasa Rao, P. and P. Kassim: Field study of Surathkal Beach, Proc. 12th Conf. Coastal Eng., p. 1365-1381, 1970.
  - 47) 日本原子力発電株式会社: 東海村海岸調査報告書(第2報), 172p., 1960.
  - 48) Chang, K.S.T. and F.L.W. Tang: Studies on the shore process and wave features of the Western Coast of Taiwan, Proc. 12th Conf. Coastal Eng., p. 729-737, 1970.
  - 49) 前出 22).
  - 50) 前出 3).