

バー・トラフ地形変化と底質特性の変動

加藤 一正*・藤田 誠**・柳 嶋 慎一**
村上 裕幸**・末次 広児***

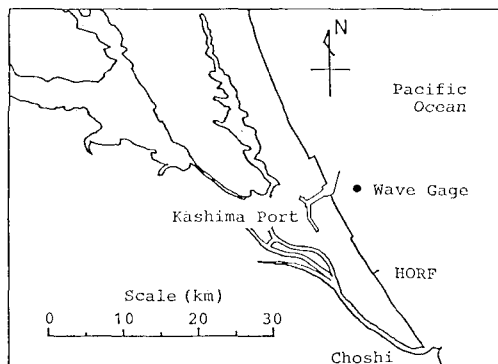
1. はじめに

砕波帯内は、砕波を伴う激しい流体運動による漂砂現象のもっとも顕著なところであり、しばしば沿岸砂州、トラフが形成されている。このような場における漂砂機構、地形変化機構を調べるために、まずその外力である流体運動の機構が、近年の流速測定技術の発達および理論検討によって、徐々に解明されつつある。この研究の方向は漂砂機構の原因から結果に向かうものであり、正統的かつ望ましいものである。これに対して、逆に結果から機構・原因を検討する研究も有用な結論を得る、あるいは現象を理解する有効な手法となる。

本報告は、茨城県鹿島灘で実施した砕波帯内の海底断面地形測量と底質採取の結果得られたデータをもとに、まずバー・トラフ地形変化と底質特性の変動（粒度組成の変化）の実態を調べ、底質のふるい分け機構について若干の考察を試みたものである。

2. 現地調査の方法

現地調査は、図一1に示す鹿島灘に面した砂浜海岸にある全長 427 m の波崎海洋研究施設（略称 HOLF）で行った。ここでは、観測桟橋に沿う海底断面を毎日一回測量している¹⁾。底質の採取は、桟橋先端から後浜まで



図一1 調査地点（波崎海洋研究施設）

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室長
** 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室
*** 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部 海象調査研究室

表一1 底質採取日、採取方法

No	調査年月日	採取方法	前回採取日から経過日数
1	1986.3.13.	ダイバー	
2	3.19.	ダイバー	6
3	6. 8.	SM採泥器	81
4	10.23.	SM採泥器	137
5	11.27.	SM採泥器	35
6	12.23.	SM採泥器	26
7	1987.1.28.	SM採泥器	36
8	2.26.	SM採泥器	29
9	4. 8.	SM採泥器	42
10	5.20.	SM採泥器	42
11	6.17.	SM採泥器	28
12	6.23.	SM採泥器	6
13	8.11.	SM採泥器	49
14	9.24.	SM採泥器	44
15	10.22.	SM採泥器	28

の範囲を岸沖方向 10 m 間隔で、1986 年 3 月～1987 年 10 月の間に 15 回（表一1 参照）実施した。特に、1987 年 6 月 23 日の底質採取は時化（6 月 20 日、極大有義波高 5.8 m、周期 9.0 s）の直後に行ったものである。海底の採砂は、最初の 2 回はダイバーにより行い、その後は水産工学研究所と共同²⁾で SM 採泥器（口径 22 cm×22 cm）を使用し実施した。前浜から後浜にかけての陸上部ではスコップで採取した。

採取した試料を水洗い乾燥後、ふるい分け試験を行った。その結果得られた底質の粒度組成より、中央粒径（ d_{50} ）ならびに次式で定義される³⁾ふるい分け係数（ S_0 ）、偏わい度（ S_k ）を求めた。

$$S_0 = (d_{75}/d_{25})^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$S_k = (d_{75} \times d_{25}) / (d_{50})^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 d_{25} 、 d_{50} 、 d_{75} はそれぞれ、粒度加積曲線で累加百分率が 25%、50%、75% に対応する粒径である。

3. 海底断面と底質特性の岸沖分布

図一2 に、15 回調査の全データをまとめて示した。

上段は底質採取時の海底断面を D.L. (=T.P.-0.69 m) 基準で、重ね合わせたものである。岸沖方向測点 180 m より沖側の範囲は、海底レベル変化が激しく、2～3 m の変化が生じている。測点 175 m 地点の海底レ

ベルがあまり変化せず、断面変化全体の節になっているところは、栈橋橋脚が2本あるところに一致している。

二段目は中央粒径(d_{50})の岸沖分布である。最頻出現中央粒径は、測点20m~70mの領域(ほぼD.L.0m)で粒径がやや大きく0.18~0.19mmとなっており、後浜方向および沖方向に、徐々に小さくなっている。最頻出現中央粒径をほぼ下限とし、しばしば大きな粒径の砂が現われている。特に測点180~300mで大きな粒径が出現する傾向がある。

図-2の三段目は、ふるい分け係数(S_0)の岸沖分布である。最頻出現ふるい分け係数は1.1~1.2の範囲にあり、ふるい分け度は極めて良好であると言える。ところが、 S_0 についても、しばしばその値が大きくなっていることが認められる。

図-2の最下段は、偏わい度(S_k)の岸沖分布である。最頻出現偏わい度は、ほぼ1.0である。しかし偏わい度についても、時として(特に、190mより沖側では)1.0からずれたものが現われている。

以上概略を述べたように、底質の最頻出現特性は、中央粒径が0.16~0.19mm程度であり、ふるい分け度は極めて良好、偏わい度はほぼ1.0である。しかし、海底断面は毎回異なり、底質特性もその時の海底地形や入射波の状況の影響を受けて動的に変化しているようである。この変動傾向は、バー・トラフが形成されている測点180mより沖側で著しいので、この範囲についてさらに調べることにする。

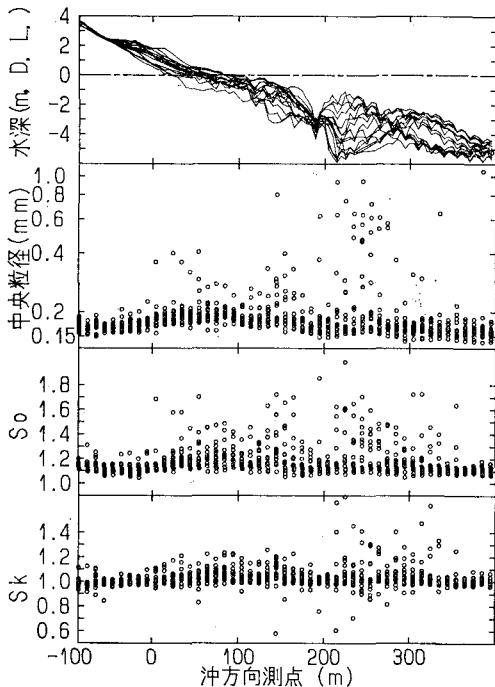


図-2 海底断面および中央粒径、ふるい分け係数、偏わい度の岸沖分布

4. バー・トラフ地形近傍の底質粒度組成

図-3は、底質採取日の海底断面を測点180m~350mの範囲について調査年月日順に表示したものである。各断面に細い線で重ねて示した断面は、底質採取日(15回)の平均断面である。平均断面より海底レベルが高い(堆積)ところを斜線で、逆に平均断面より海底レベルが低い(侵食)ところを斑点で表示してある。このパターンを見ると、海底地形変化は、測点260m~280m付近を節とする重複モードになっていて、260mより岸側が堆積しているときには沖側が侵食し、逆に岸側が侵食されたときは沖側が堆積していることが分かる。すなわち、バー・トラフ地形の形成が繰り返されている。このことから、ここでは

測点180m~260mの範囲を [トラフ形成地域]、

測点280mより沖測を [バー形成地域]

と呼ぶことにする。

図-3の各断面上にははそのときの底質中央粒径を、3段階に区分して、

○ 白丸 ($d_{50} < 0.23$ mm),

● 黒丸 ($0.23 \text{ mm} < d_{50} < 0.45$ mm),

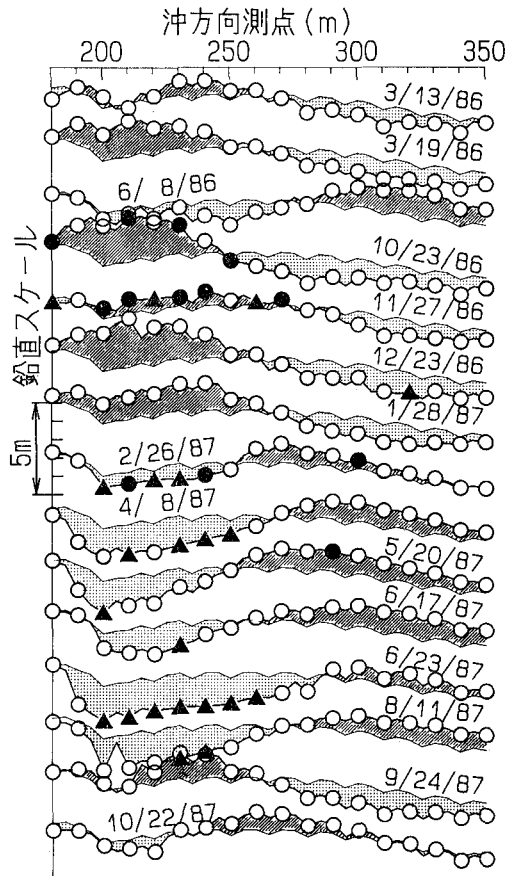


図-3 海底断面と底質中央粒径の岸沖分布

▲ 黒三角 ($0.45 \text{ mm} < d_{50}$)

で示した。バー形成地域(測点 280 m より沖測)では、顕著な海底レベル変化が生じているにもかかわらず、ほとんどの場合中央粒径は 0.23 mm 以下(120 サンプル中 117 サンプル)で変化がない。ふるい分け係数も変化せず、極めてふるい分け度がよかった ($1.07 \sim 1.15$)。これに対して、トラフ形成地域(測点 $180 \text{ m} \sim 260 \text{ m}$)では、堆積状態のときに中央粒径が小さく、侵食状態のときには大きい傾向が認められる。後者の典型的な例である時化直後(1987 年 6 月 23 日)には、トラフ底全域で中央粒径が 0.45 mm 以上になっている。

図-4 は、底質特性の変動が大きいトラフ形成地域の中央粒径(d_{50})とふるい分け係数(S_k)の関係をプロットしたものである。ただし、栈橋中央の踊り場の 4 本の橋脚⁴⁾近くに測点が位置する測点 200 m, 210 m のデータは外してある。図-4 によると、中央粒径が $0.15 \text{ mm} \sim 0.30 \text{ mm}$ の範囲では、粒径が大きくなるにつれてふるい分け係数も大きくなる。しかし、中央粒径が 0.3 mm 以上になると、逆にふるい分け係数が小さくなる。すなわち、両者の間には図中に一点鎖線で示した $d_{50} = 0.3 \text{ mm}$ 付近をピークとする放物線型の関係がある。

図-5 は、トラフ形成地域(測点 200 m, 210 m は除く)の中央粒径(d_{50})と偏り度(S_k)の関係をプロットしたものである。データはややバラつくものの、概ね図中に一点鎖線で示した関係が存在する。すなわち、中央粒径が大きくなると、 0.2 mm までは偏り度も大

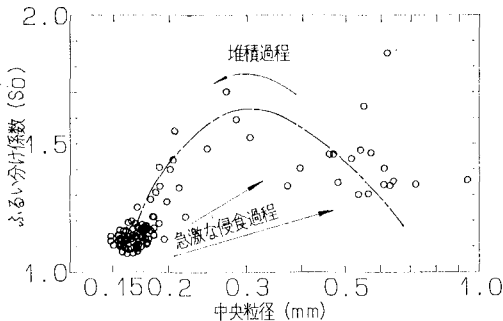


図-4 中央粒径とふるい分け係数の関係(トラフ形成地域)

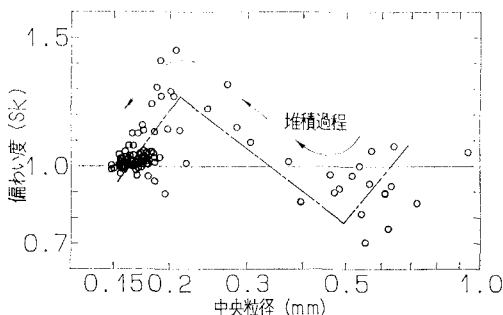


図-5 中央粒径と偏り度の関係(トラフ形成地域)

きくなる。中央粒径が 0.2 mm より大きくなるにつれて偏り度が小さくなり、 $d_{50} = 0.34 \text{ mm}$ で $S_k = 1.0$ 、さらに大きくなると $d_{50} = 0.5 \text{ mm}$ で $S_k = 0.75$ まで直線的に減少する。そして、中央粒径が 0.5 mm 以上になると偏り度は大きくなり、 $d_{50} = 0.6 \text{ mm}$ で再び $S_k = 1.0$ になる。

5. トラフ底における底質粒度の双峰型分布

現地の前浜部の底質について、Sonu⁴⁾、白井・土屋⁵⁾、近藤・谷野⁶⁾は中央粒径とふるい分け係数の間に図-4 の様な放物線型の関係が存在することを報告している。特に Sonu は、中央粒径の異なる 2 つの粒度組成の底質が混合したとき、図-4, 5 の関係が現われることを示した。

図-6 は、調査日毎に測点 220~260 m の範囲(橋脚の影響の少ないところ)の 5 地点の平均粒度分布を示したものである。ただし、図-6 の粒度分布の表示は、調査日順にはなっていないことに留意されたい。最上段の

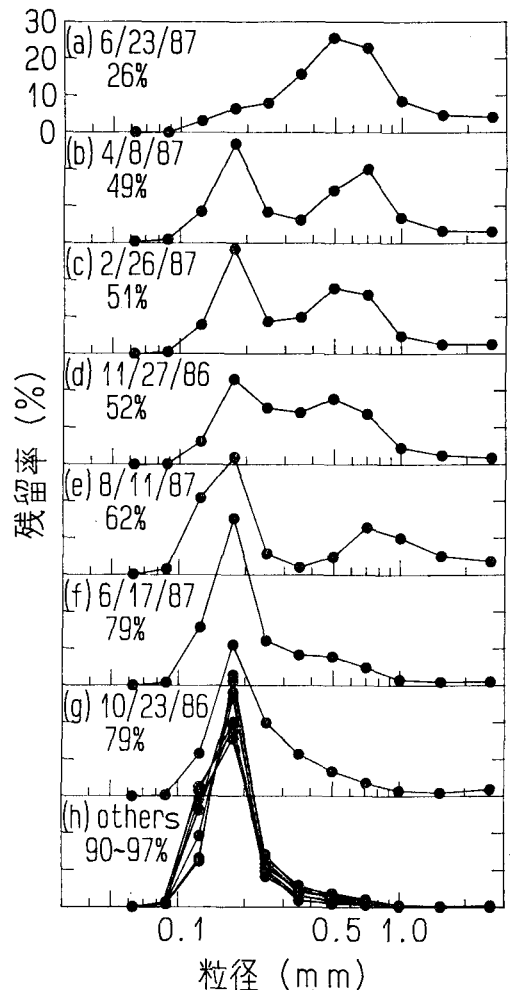


図-6 平均粒度分布(トラフ形成地域)

分布（時化直後）は、粒径 $0.5 \sim 0.7 \text{ mm}$ にピークを有する単峰型である。下段方向に移るにつれて、このピークは徐々に小さくなる、と同時に粒径 0.18 mm の所にもう一つのピークが現われて双峰型の粒度分布になる。そして、最下段では小さい粒径の所にピークを有する単峰型の分布となる。いずれの分布も、ピーク粒径の異なる2つの粒度分布モード（図-6 の最上段と最下段）がある割合で混合したものであると見なすことができる。

この粒度組成の特性から、図-4, 5 の関係が説明できる。すなわち、何れか一方のモードの支配的な単峰型分布ではふるい分け度がよいが、中央粒径がその中間となる双峰型分布ではふるい分け度が悪くなる（図-4 の説明）。偏わい度が 1.0 ということは、粒度分布が左右対称であることに対応する。したがって、単峰型分布と左右対称の双峰型分布では $S_k = 1.0$ となる。しかし、双峰型分布でも、粒径の大きい側のピークが大きいときには $S_k < 1.0$ 、粒径の小さい側のピークが大きいときには $S_k > 1.0$ となる（図-5 の説明）。

図-6 に示した各粒度分布について、粒径 0.3 mm 以下の粒子の重量百分率を計算した（各粒度分布の左側に明記）。この小粒径重量百分率と、測点 $220 \text{ m} \sim 260 \text{ m}$ の範囲の平均海底レベルの関係をプロットしたのが図-7 中の黒丸である。大きな傾向としては、平均海底レベルが高い（堆積）ほど小粒径の割合が多くなる。図-7 には、調査日以前の平均海底レベルの変化の概略を矢印および J 型矢印で示してある。上向き破線矢印、下向き実線矢印は、それぞれ海底が 17 日以上にわたって単調な堆積、侵食があったことを意味し、矢印の起点は初期の海底レベルである。単調な地形変化のうち、特に堆積が生じた後の底質は小粒径重量百分率が 90% 以上になっている。J 型矢印は過去 16 日以内に侵食が生じ、その後堆積したものである。このような海底レベルの変化があったときには、小粒径重量百分率が小さく、その傾向は侵食後の堆積量が少ないほど顕著である。また、侵

食量が少なく海底レベルが高いときには、堆積量がわずかでであっても、小粒径重量百分率は相対的に大きい。

ここでの調査は、いろいろな状況のもとで実施したものであるけれども、以上の結果を考慮すると、トラフ形成領域において以下のような底質特性の変化が推察できる。大きな時化がきてトラフが形成されると、底質は大粒径単峰型になる。その後、粒径の小さい砂が堆積し、粒度分布特性は図-6 の上段から下段に向かって徐々に変化する。したがって、トラフ形成地域の底質特性は図-4, 5 に矢印で示したように変動する。

6. 底質のふるい分け機構？

図-6 によると、粒径 $0.25 \sim 0.3 \text{ mm}$ 程度の底質はトラフ形成領域には非常に少ない。図-8 の黒丸は、粒度分布が単峰型でピーク粒径が 0.3 mm 付近（中粒径単峰型分布）となっているところを各断面に重ねて表示したものである。この結果から、 0.3 mm 付近の粒径は、トラフ形成地域より岸側にしばしば存在すると言える。

図-9 は、時化の直後の調査日（1987 年 6 月 23 日）の海底断面（破線は平均断面）と底質粒度特性を示したものである。図中の記号はそれぞれ

○：小粒径単峰型分布、(III 領域)

⊙：中粒径単峰型分布、(I 領域)

▲：大粒径単峰型分布、(II 領域)

を表している。また、各々の代表 5 地点の平均粒度分布を図中に示してある。この図によると、時化時には、測点 $200 \sim 260 \text{ m}$ の範囲から、小粒径の砂が沖方向に、中粒径の砂が岸方向に運ばれ、大粒径の砂はそこに取り残されるといったふるい分け作用があるように見受けられる。ただし、もともと中粒径の砂が存在するのは、測点 200 m より岸側の汀線に近い範囲であるので（図-8）、中粒径の砂は浅いところから運ばれてきて堆積したものであるとも考えられる⁴⁾。しかし、例えそうであっても、

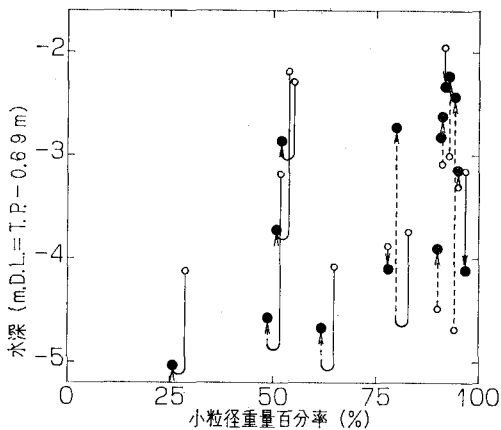


図-7 海底レベルと小粒径重量百分率の関係

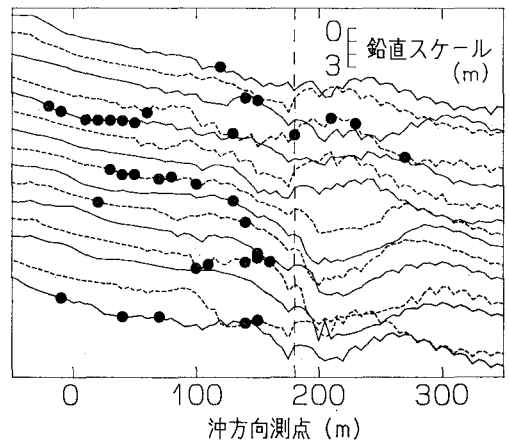


図-8 中粒径単峰型分布地点（調査日順）

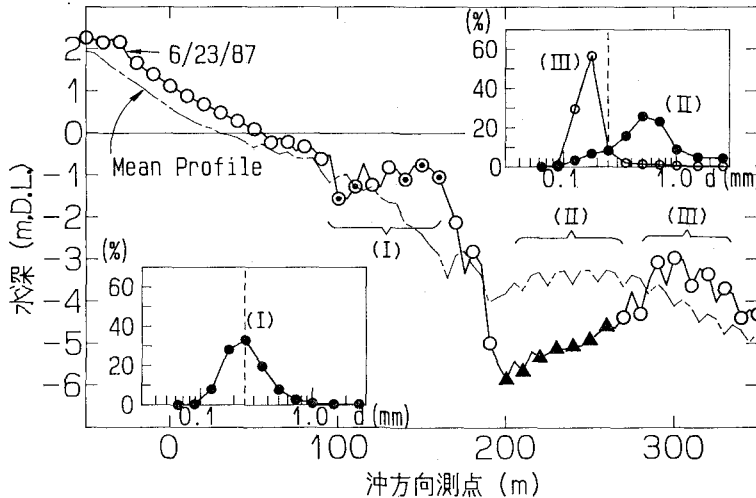


図-9 時化直後(1987年6月23日)の底質特性

中粒径の砂が測点 160~200 m の範囲に留まるためには、測点 200~260 m のトラフ形成地域に中粒径の砂を岸方向に運ぶ機構がなければならない。すなわち、結局最初に考えたようなふるい分け作用が存在する必要がある。

このふるい分け機構を、Dean の無次元沈降時間パラメータの概念で説明しようとする、以下のような問題が生じる。底質が岸方向に運ばれるためには、入射波の半周期程度の時間内に浮遊状態から海底面まで沈降しなければならない。そうすると、中粒径の砂の沈降速度は 3~4 cm/s、波の半周期は 5 s 程度であるので、中粒径の砕波による浮遊高さは海底面からせいぜい 20 cm 以内でなければならなくなる。これ以上に高く浮遊すると沖方向に運ばれる。荒天時のトラフにおける浮遊砂粒径の鉛直分布を正確に測定して確認する必要がある。

Bowen は彼の導いた浮遊砂量式⁹⁾を用いて、粒径の大きい砂は勾配を急にするように岸方向に移動し、粒径の小さい砂は勾配をなだらかにするように沖方向に移動するという説明をした。この概念で図-9 を説明しようすると不明な点が生じる。測点 200~280 m の範囲の海底が逆勾配になっているところでは、Bowen の浮遊砂量式によると、全ての底質は岸向き移動となる。したがって、小さい粒径の砂が沖方向に運ばれることを説明するためには、バーを越えて沖方向への有意な一様流(例えば, undertow)が存在しなければならない。ただし、Bowen の式では、浮遊砂量がそのときの瞬間流速の関数になっている。しかし、観測栈橋上から砕波、およびそれに伴う浮遊砂の巻き上げを観察すると、一旦巻き上

げられた浮遊砂は、しばらく浮遊状態を継続して、浮遊砂濃度はそれ以前の流速、砕波現象とも関係していることが推察できる。Bowen の式には、この現象が取り込まれていない。

5. おわりに

主要な結論は、以下のとおりである。

- (1) バー形成地域では、底質特性は変化せず、常に小粒径単峰型の粒度分布である。
- (2) トラフ形成地域では、大きな時化がくると底質は大粒径単峰型粒度分布になる。その後、

徐々に双峰型粒度分布を経て、小粒径単峰型粒度分布になる。このために、中央粒径とふるい分け係数、偏り度の間に図-4, 5 の関係が存在する。

- (3) トラフ形成地域では、時化時には、小粒径の砂が沖方向に、中粒径の砂が岸方向に運ばれ、大粒径の砂はそこに残り残されるといったふるい分け作用がある。この機構を説明するためには、浮遊砂、流れ等をさらに測定しなければならない。

参考文献

- 1) 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児：汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み、港湾技術研究所報告、第26巻、第2号、pp. 63~96, 1987。
- 2) 日向野純也・安永義暢：開放性砂浜域における海底地形変化と二枚貝の分布性状について、第35回海岸工学講演会論文集、pp. 767~771, 1988。
- 3) 合田良実・佐藤昭二：新訂版、海岸・港湾、わかり易い土木講座 17、彰国社、396 p., 1981。
- 4) Sonu, C. J.: Bimodal composition and cycle characteristics of beach sediment in continuously changing profiles, Jour. of Sedimentary Petrology, Vol. 42, No. 4, pp. 852~857, 1972。
- 5) 白井 亨・土屋義人：大潟海岸における海浜地形と底質特性の関連について、第24回海岸工学講演会論文集、pp. 206~210, 1977。
- 6) 近藤柳郎・谷野賢二：イタンキ海岸の海浜変形過程、第25回海岸工学講演会論文集、pp. 260~263, 1978。
- 7) Coastal Engineering Research Center: Shore protection manual, Vol. 1, pp. 4-81 to 4-84, 1977。
- 8) Bowen, A. J.: Simple models of nearshore sedimentation; beach profiles and longshore bars. in The Coastline of Canada, Geological Survey of Canada, pp. 1~11, 1980。