

波による移動限界水深を定める代表波の選定法

宇 多 高 明*

1. ま え が き

従来、海岸侵食対策には突堤や離岸堤などが多く利用されて来たが、近年では新たにヘッドランド（人工岬）などの構造物も計画されるようになった。こうした構造物の計画に際しては、構造物の持つ機能が十分発揮されるよう最適な設置位置（水深）を選択する必要がある。海岸侵食対策のために漂砂を積極的に制御しようとする場合、構造物の設置水深と漂砂の移動限界水深との関係が重要である。なぜなら、構造物の先端水深を移動限界水深より深くした場合、沿岸漂砂は完全に阻止されるのに対し、浅ければ沿岸漂砂の一部は構造物の先端を迂回して下手側へと流出するからである。

波の作用の下での漂砂の移動限界水深に関しては多くの公式がある（例えば、土木学会，1985）。公式の形は様々であるが、基本的には波浪・底質条件が与えられれば移動限界水深は求められる。それ故、仮に底質条件が一定であったとしても、波浪条件に合わせて移動限界水深は何通りも計算されることになる。ところが、実際にはこのような形で問題が提起されることは稀である。海岸構造物等の設計においては、海岸において著しい地形変化が見られる範囲の限界を与える限界水深を定めることが必要とされる。すなわち、顕著な地形変動が見られる限界水深を良く表現できる代表波の選定法こそが重要である。ここでは現地海岸の実例をあげつつ測量データをもとに漂砂の移動限界水深を定める方法と、その場合の誤差の考え方について述べる。次に、実測の移動限界水深を最も良く表わすことのできる代表波の選定法について論ずる。現地海岸の例としては、太平洋側より2海岸（高知県の高知海岸、茨城県の東海村海岸）、日本海側より2海岸（富山県の宮崎・境海岸、新潟県の荒川河口部海岸）を選ぶ。

2. 漂砂の移動限界水深の算定式

漂砂の移動限界水深 h_i は次式によって算定される（土木学会，1985）。

$$\frac{H_0}{L_0} = \alpha \left(\frac{d}{L_0} \right)^n \left(\sinh \frac{2\pi h_i}{L} \right) \left(\frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_0 ：沖波波高、 L_0 ：沖波波長、 d ：砂粒子の粒径であり、 α 、 n は公式の種類ごとに変わる定数である。いま、現地海浜における観測結果に基づいて求められた佐藤・田中の式を用いれば、 $n=1/3$ となる。また、佐藤・田中の式では、移動形式の相違によって α は異なり、表層移動（表層の砂が波の進行方向に集団的に掃流される状態）では $\alpha=1.35$ 、完全移動（水深変化が明瞭に現われるほど顕著な移動が見られる状態）では $\alpha=2.4$ と与えられている。

式（1）により移動限界水深を求める場合、表層移動と完全移動では係数 α の値は異なる。深浅測量データより求められる限界水深がどちらに対応するかについては十分議論されておらず、選択に任意性は残るが、ここでは表層移動限界水深との対応を調べることとする。前報（宇多，1989）では完全移動限界水深との対応関係を調べたが、ここでは以下に述べるように実測データとの対応関係が良好な表層移動限界水深を用いる。

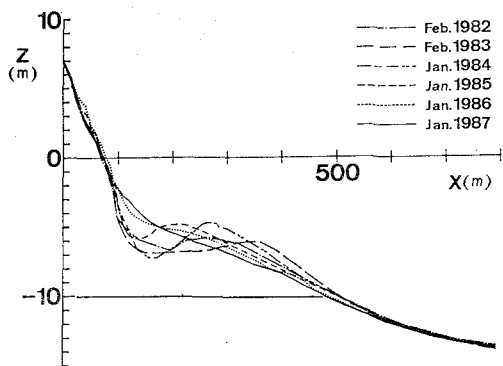
3. 現地海岸における実例

3.1 高知海岸

高知海岸は、我が国でも有数の台風常襲地帯に位置する。汀線付近の海底勾配は約 1/10 と比較的急であるが、沖浜勾配は緩い。調査対象は、物部川河口より西側にある離岸堤周辺部である。この海岸において1973年10月より1987年2月までの間に行われた年1回の深浅測量データを利用し、自然海浜1測線と離岸堤を横切る2測線を選んで分析を進めた（宇多・武中，1988）。

代表的に測線 No. 27 の1982年2月から1987年1月までの海底断面形状の変化を図—1に示す。-6m 付近での地盤高変動量はかなり大きいものの、沖合部ではいずれの測線においても各断面形は重なりを示し、断面形の変化より見ると漂砂の移動限界水深は約 10m にある（図—1 参照）。詳細に調べると、1982年2月時点の海底地形では、水深約 6m に幅約 300m の柵状地形が形成されていたが、1983年2月には沖合 300~400m の区

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長



図—1 高知海岸の測線 No. 27 における海浜断面形の変化

表—1 確率波と佐藤・田中の表層移動限界水深値

地名	確率	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 T (sec)	表層移動限界水深 (m)	
				粒径0.2mm	粒径0.15mm
高知海岸	3%	2.44	8.0	12.7	14.0
	5%	1.69	7.5	7.8	8.7
東海村海岸	10%	1.93	8.4	9.3	10.4
	20%	1.58	8.4	7.4	8.3
宮崎・ 境海岸	5%	1.63	7.7	7.6	8.5
	10%	1.09	7.2	4.5	5.1
荒川河口	10%	2.26	7.5	11.0	12.2
	20%	1.58	6.5	7.2	8.0

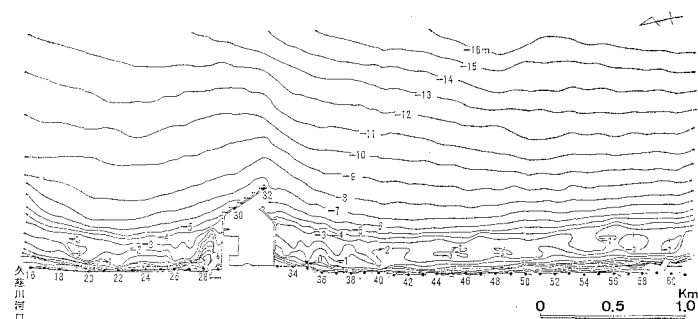
る。また、いずれの断面変化でも、前浜域にはほとんど変化が見られず、沖合でのみ地形変化が生じたことが特徴的である。この点は従来模型実験データを中心として分類がなされているタイプ I, II, III 型の海浜地形変化（堀川ほか, 1973）と特性が異なっている。

高知海岸の住吉地先では水深約 13 m 地点に設置された超音波式波高計により波浪観測が行われている。そこで 1983 年～1987 年のデータをもとに、有義波高と周期の頻度分布を求めた。これによると卓越周期は 7～8 sec, 有義波高は 0.5 m 以下が多数を占める。次に、測定した波高データを高い順に並べたとき、3, 5% 確率となる波高と周期を求めた（表—1）。ただし周期としては、波高階級別の最多頻度となる周期を用いた。移動限界水深を算出するには底質中央粒径が必要であるが、底質粒径については、前浜部では底質調査が行われているが、沖合部での調査は行われていない。一般に、底質粒径は前浜～砕波点付近で最大値を示し、その後水深とともに減少し、移動限界水深付近では 0.15～0.2 mm となる。例えば、典型例は太平洋に面した仙台湾沿岸（野村ほか, 1986）や伊勢湾内の鈴鹿川河口周りの海岸（宇多・山本, 1989）で見られる。そこで中央粒径を 0.2 mm, 0.15 mm と仮定して式（1）により表層移動限界水深を求め、表—1 に示した。先に海浜断面形の変化により求めた移動限界水深は約 10 m であったから、高知海岸では 5% 確率波の $H_{1/3}=1.69$ m, $T=7.5$ sec をわずかに越える波高、周期の場合対応関係が良好である。

3.2 東海村海岸

東海村海岸は茨城県東部にあり、太平洋に東面している。この海岸には日本原子力（株）東海発電所の専用港があり、その港の維持管理を目的として深淺測量が経年的に行われてきている。ここでは 1971 年～1984 年に取得されたデータをもとに、海浜地形変化を分析する。

最初に専用港の周辺の深淺図を図—2 に示す。この海岸では、-3 m 以浅においてはバー・トラフ地形の発達が著しい。この点は堀川（1973）の指摘



図—2 東海村海岸の深淺図(1984年5月測量)と測線配置

間でバーが形成された。1984 年 1 月にはバーの頂部が岸方向へ移動するとともにバーの比高が高くなった。その後トラフは埋め戻され、1987 年 1 月には滑らかな形状へと変化した。水深の最大変化量は約 3 m であった。この測線では、バーは徐々に岸方向へ移動し、トラフ部分が埋め戻され、最終的に滑らかな断面形へ移行した。このように大規模なバー・トラフ地形の形成と消失には約 5 年という長いタイムスケールを要したことが注目され

と良く一致する。-3～-6 m の間は約 1/36 と比較的急勾配であるが、それより沖では緩やかな勾配が広がる。測線は、久慈川河口右岸導流堤の根元の No. 16 より南方向へと配置されている。専用港の北防波堤に隣接するのは No. 29 で、南防波堤には No. 33 が隣接する。久慈川河口と専用港の防波堤の間では -3～-8 m の等深線が弓形となっており、両端で等深線が沖に位置する。特に専用港付近では -7 m の等深線が大きく沖方向に突

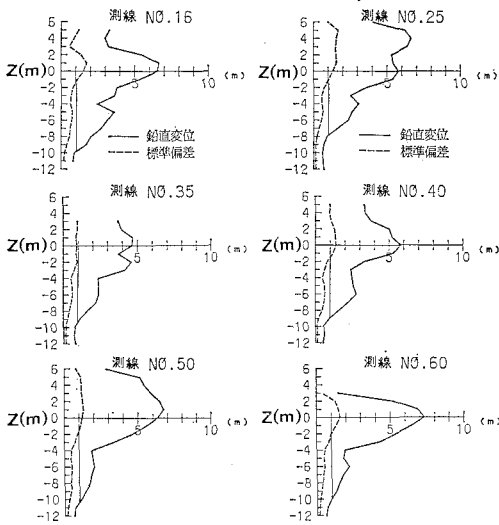


図-3 最大鉛直変位と標準偏差の水深方向分布

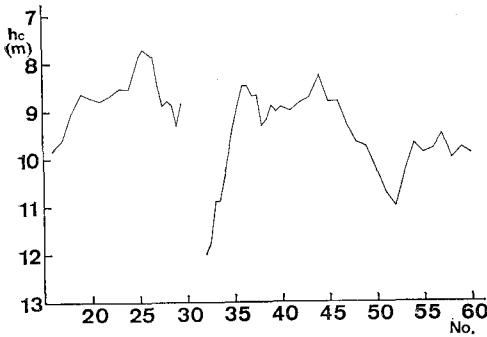


図-4 最大鉛直変位が1m以下となる限界水深の沿岸分布

き出た後、南側では再び汀線方向へと屈曲している。

次に、この平均海浜断面形に重なる変動量の水深方向分布を求めた。すなわち、平均断面形に沿う各水深における水深変動量に関し、最深海床面と最も浅い海床面との差を最大鉛直変位と定義し、この値とともに標準偏差を求め、それらを水深方向分布として整理した。結果を図-3に示す。全体で46本の測線のうち代表的な6測線の結果を示した。各測線における最大鉛直変位は、No. 25を除けばいずれも汀線近傍で最大値を取り、それより陸側または水深方向に減少する分布形を示す。これらの特徴は専用港より離れたNo. 50やNo. 60で顕著である。またこれらの測線では、最大鉛直変位が汀線付近より-4mまでの間に急激に減少し、その後は緩やかな変化となっている。これは、図-2に示したように、バー・トラフ地形の存在する範囲で地形変動量が大いことを意味している。図-3に示した標準偏差の水

深分布によると、標準偏差は水深方向にほぼ単調に減少しており、標準偏差がある限界値より小さくなる点を移動限界水深と定めるのはやや難しい。そこで便宜上、最大鉛直変位が1mとなる地点の水深(h_c)を求めた(図-3参照)。その沿岸分布を図-4に示す。専用港の周りやNo. 48以南では限界水深が大きくなっているが、そのほかの海域の限界水深は、ほぼ8~10mの間にあることが分かる。専用港の周りで限界水深が大きい理由としては、防波堤などからの反射波の影響が考えられる。ところで、ここでは最大鉛直変位が1mとなる水深を限界水深と仮定したが、この地点の標準偏差を全測線に関して算出し、平均値を求めると $\sigma \approx 0.25$ mとなる。

次に、実測値より定めた限界水深と佐藤・田中の移動限界水深との比較を試みた。当海岸の南15kmに位置する大洗港では波浪観測が行われている。深浅測量の行われた期間と同一期間のデータはないので、波浪場の確率特性がエルゴード性を有すると仮定して、1986年1月より1988年12月まで3ヶ年のデータをもとに分析を行った。有義波の波高一周期の複合頻度分布をもとに、移動限界水深を求めた。波浪データをもとに、10, 20% 確率の波高・周期を求めると表-1となる。当海岸においても底質粒径の水深方向分布の詳細調査は行われていない。そこで、前節と同様に $d_{50} \approx 0.2$ mm, 0.15mmと仮定して以下の計算を進めることとした。計算結果を表-1に示す。当海岸ではほぼ10% 確率波高の場合実測値と一致度が良好である。

3.3 宮崎・境海岸

富山県の宮崎・境海岸は、富山湾に面し宮崎漁港と境川により区切られた海岸である。この海岸では主として冬期波浪により西向きの漂砂が生じているが、近年離岸堤と潜堤が建設され、構造物周りでかなり著しい地形変化が生じた。例えば、1988年10月の深浅図を図-5に示す。離岸堤等の建設が開始された1982年以前の1980年の深浅図によると、当時の汀線はほぼ海岸護岸の法線と平行であった。したがって図-5によれば、離岸堤・潜堤群により西向きの沿岸漂砂の移動が阻止され、構造物の上手(東)側で堆砂、下手(西)側で侵食が生じたことが明らかである。注意すべき点として、汀線より水深6mまでの範囲の等深線は良く似た形状を示すのに対し、これより深い約8m以深の等深線形は汀線形とかなり相違することである。これは汀線付近からの急斜面上で沿岸漂砂が活発なことを示している。

次に、海浜断面形の変化を調べるために、図-5に示した代表2断面(A-A': 侵食断面, B-B': 堆積断面)を選び、断面形の変化を図-6に示した。断面形を描く際、沖向きの距離の基準は、海岸護岸ののり先位置に

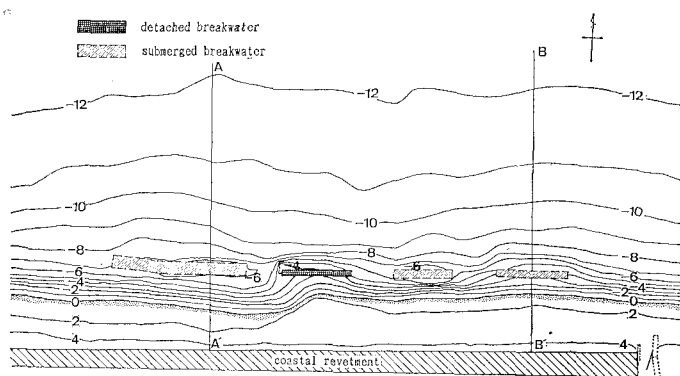


図-5 富山県、宮崎・境海岸の深図(1988年10月測量)

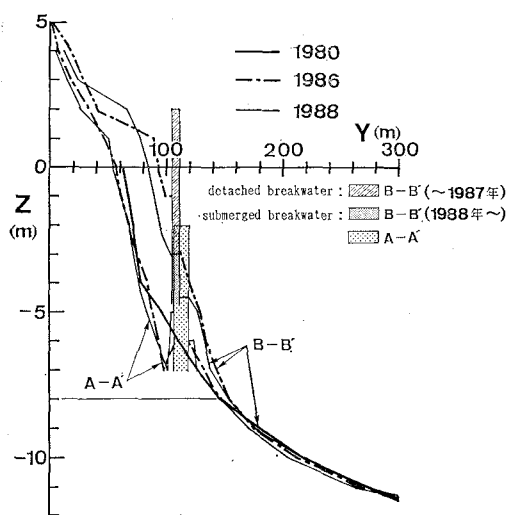


図-6 代表断面形の変化(A-A': 侵食断面, B-B': 堆積断面)

定めた。堆積域にある B-B' 断面では1980年に海面下のみ測量が行われている。これを基準として1986年および1988年の断面形を比較すると、水深約 8 m 以浅より陸上部の 2 m までの範囲で顕著な土砂堆積が生じたことが分かる。一方、侵食域では急勾配で落ち込んでおり、堆積域の断面形が沖側に凸形状となっているのに対し、侵食域では凹形となっている。A-A' 断面と B-B' 断面は護岸上の基準点を重ねて表示したが、図-6 を詳細に調べると、陸上部の断面形は重なりを示さず護岸法線と汀線とは正確には平行ではないことが分かる。そこで、A-A' 断面を沖方向に約 7 m 平行移動させると、沖合の断面形はほぼ重なりを示す。このことから再び、水深約 8 m 以浅で侵食が進んだことが分かる。以上の点より、当海岸において沿岸漂砂の活発な範囲の下限を定める水深は約 8 m にあることが明らかとなった。

次に、波浪条件より移動限界水深を算出し、実測値と

の比較を試みた。波浪条件としては、当地点の西約 11 km に位置する下新川海岸の田中観測所のデータを利用することができる。田中観測所では、水深 15 m 地点に超音波式波高計が設置されており、これにより観測が行われている。1983年～1987年の観測値をもとに、5, 10% 確率波高を求め、中央粒径を 0.2 mm, 0.15 mm と仮定して表層移動限界水深を求めた結果を表-1 に示す。実測値の約 8 m と良い対応を示すのは、5% 確率波の $H_{1/3} = 1.63$ m, $T = 7.7$ sec である。

3.4 新潟県、荒川河口部

新潟県北部に位置する荒川の河口部では1976年以降毎年 1 回深浅測量が行われてきた。測線は、河口を挟んで 10本の測線(番号は 4 の倍数)が配置されている。測線間隔は 200 m, 測線長は基線より 1200 m である。以下では1976年より1987年までに収集された深浅データをもとに種々の解析を行った。

最初に各断面の1976年～1987年のデータをもとに各測線の平均断面形と、それより標準偏差を求め 図-7 に示した。いずれの断面もほぼ $X \geq 600$ m の範囲の断面形は重なりを示す。一方、標準偏差の岸沖分布に関しては、浅海部では変動はあるものの、 $X \geq 600$ m 区間での標準偏差はほぼ一致し、浅海部と比較してずっと小さな値となる。そこで、図-7 において標準偏差が一定と見られる $700 \text{ m} \leq X \leq 1000 \text{ m}$ 区間で各測線ごとにその平均値 $\bar{\sigma}$ を求め、さらに、各測線における $\bar{\sigma}$ の全平均値を求めると、全平均値は 0.28 m となる。

次に、各測線ごとの $\bar{\sigma}$ に対し、一応の目安として σ が初めて $\sigma = 1.1 \bar{\sigma}$ を満足する水深 h_1 を求めた。それらの平均値は、 $h_1 = 7.13$ m となった。すなわち明らかに測量精度を越えて有意な地形変化が生ずる限界水深は約 7 m にあることになる。

荒川河口周りにおける移動限界水深に関しては、既に岩船港で観測された波浪データをもとに計算を行った(宇多, 1989)。しかしながらそこで用いた波浪データを日本海側の他の地点の値と比較すると、高波浪の出現頻度が高過ぎる傾向があった。そこで、ここでは岩船港のデータの代わりに新潟西港沖で測定された値(運輸省港湾技研, 1983, 1984, 1985)を用いて計算を進めた。新潟西港は荒川河口より南西約 37 km に位置する。新潟西港での 1983 年～1985 年の波浪データより有義波高と周期の頻度を求め、更にこのデータをもとに、10, 20% 確率波高を求めるとともに、底質中央粒径を 0.2 mm, 0.15 mm と仮定して移動限界水深を計算し、結果を表-1 に示した。実測値と比較すると、実測値と最も良く

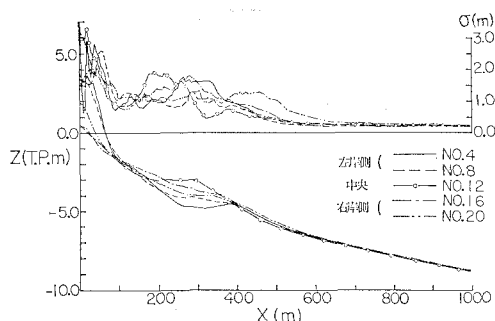


図-7 平均海浜断面形と水深変動量の標準偏差の岸沖分布

対応するのは 20% 確率波であることが分かる。

4. 考 察

前節までの検討により、深浅測量データをもとに日本海側、太平洋側それぞれ2海岸における漂砂の移動限界水深が算出された。移動限界水深値は高知海岸で約 10 m、東海村海岸では構造物周辺を除けばほぼ 8~10 m に、宮崎・境海岸では約 8 m に、更に荒川河口周りでは約 7 m にあった。結局、太平洋側にある高知海岸や東海村海岸の移動限界水深の方が日本海側に位置する宮崎・境海岸や荒川河口周りのそれらよりも大きいことが明らかである。

次に、深浅測量データより定めた移動限界水深値に適合する波浪条件を佐藤・田中の表層移動限界水深式より選定した結果によると、高知海岸ではほぼ 5% 確率波が、東海村海岸では 10% 確率波が、宮崎・境海岸では 5% 確率波が、荒川河口周りでは 20% 確率波が良い一致を示した。結局のところ、少なくともここで例示した4海岸では年間の波浪データに対し、5~20% に当る高波浪によって地形変化の限界水深が定められていることが分かる。

ここでは実測の移動限界水深と表層移動限界水深とが良い一致を示す波浪条件を年間のデータより確率的意味より選択した。しかし、重要な点は、選択された波浪条件よりも、深浅測量データより得られた限界水深が我が国沿岸でかなり狭い範囲に分布することである。実例として挙げた4海岸以外において地形変化の限界水深が明瞭に求められている海岸を列挙すると、遠州海岸の福田漁港周辺では約 11 m であり(富谷ほか, 1988)、仙台湾沿岸では約 7 m (野村ほか, 1986)、皆生海岸では約

8 m (宇多ほか, 1988)、駿河海岸で 8 m (武内ほか, 1985) などである。これらは4海岸で得られた値と同じ範囲に入る。こうしたことから、波浪・底質条件を仮定して式(1)によって計算を行う以前の段階において、近傍の海岸からの類推により求めるべき移動限界水深がほぼ推定されることになる。

5. あとがき

海浜過程への確率概念の応用の試みとして、移動限界水深を決定する際の確率波高の決め方について述べた。検討に際しては、限界水深付近の底質粒径を仮定するなど、多少の問題点は残されている。したがって今後においては、底質調査により底質粒径の水深方向分布を求めることが望まれる。また、他の現地海岸においても分析を進め、最終的には我が国全体での移動限界水深の分布図を作成することも必要とされよう。

最後に、本研究を進めるに際し、建設省四国地方建設局の高知工事事務所、北陸地方建設局の羽越工事事務所、茨城県および日本原子力(株)からは貴重な深浅測量データを提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 土木学会(1985): 水理公式集一昭和60年版一, 546p.
- 堀川清司(1973): 海岸工学, 東京大学出版会, 317p.
- 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三(1973): 波による海浜変形に関する考察, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 329~334.
- 野村和正・宇多高明・因幡昭義・宮内利夫(1986): 阿武隈川河口砂州の変形について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 267~271.
- 武内達夫・宇多高明・中島秀樹・青山春男(1984): 駿河海岸における海浜地形変化の解析, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 360~364.
- 富谷 雄・宇多高明・山本武司(1988): 遠州海岸, 福田漁港周辺の海浜変形, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 382~386.
- 宇多高明・陶山幸夫・中村正敏・富士川洋一(1988): 皆生海岸の沖合部における地形変化とその予測, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 432~436.
- 宇多高明・武中信之(1988): 高知海岸における大規模なバー・トラフ地形の形成, 第43回年講講演集, pp. 754~755.
- 宇多高明・山本幸次(1989): 鈴鹿川河口周辺海岸における沿岸漂砂量と漂砂の移動高, 地形, Vol. 10, No. 2, pp. 113~119.
- 宇多高明(1989): 海浜過程への確率概念の応用, 第3回河川・海岸シンポジウム講演集, pp. 38~48.
- 運輸省港湾技術研究所(1983, 1984, 1985): 沿岸波浪観測年報, 港湾技研資料, No. 574, p. 117, No. 545, p. 77, No. 517, p. 105.