

海浜断面地形と波浪との相互関係について

On the mutual relation between profiles and waves of sandy beaches.

戸 巻 昭 三^{*}

Shozo Tomaki

There are a stable point relating the movement of sand near the wave breaking point in the beach profile.

It is described in this present paper that the change of beach profile at 17 coasts of Japan is analyzed by using Ursell number ($U_r = H_b L_b^2 / h_b^3$) in relation to waveheight (H_b), wave length (L_b) and water depth (h_b) at the wave breaking point from the wave observation data, and a stable point (h_c) of beach profile is explained by the Ursell number (U_r) and the wave breaking point (h_b).

Keywords: beach profile, frequency of wave, stable point.

1. はじめに

海浜地形は、波浪、流れなどの絶えず変化する外的条件が砕波帯を中心とする海浜過程に関係する諸現象と大きなかわりをもちながら大規模かつ長い時間スケールで変化している。

勿論、対象とする現象の時間的・空間的スケールである波高・周期別出現頻度が海浜変形過程の特性にどのようにかかわっているのかといった事項については、過去の経験を通して定性的に理解されてきたが、その詳細な機構については必ずしも明らかにされていない。

そこで本研究は、海浜断面地形における砕波点近傍で砂移動が顕著でなくなる平衡点^{2) 3)}について、現地における波浪観測データを用いて砕波地点における波高 (H_b)、波長 (L_b) 及び水深 (h_b) に関するアーセル数 ($U_r = H_b L_b^2 / h_b^3$) を求め、そのアーセル数 (U_r) と砕波水深 (h_b) および海浜断面地形の平衡点水深 (h_c) との関係について、日本沿岸17ヶ所における海浜地形変化から明らかにしたものである。

2. 海浜地形断面の選択

現地海岸の現象解明のために、任意性が入らぬよう次の点に留意し、港湾（漁港）の計画に際して実測した深淺測量図から適用海岸の選択を行った。

海浜断面地形は波浪に応答し常に変化するので、波浪特性が異なる太平洋、日本海、そしてオホーツク海の3つの外洋から海岸を選択した。海浜断面地形を知る上で必要となる深淺測量の時期と回数は、夏季と冬季では波浪特性の変化が大きいので、海浜断面地形を重ね合わせた時に季節毎の重みが増えらるよう頻度を高めて海浜断面地形変化の評価を行った。

また深淺測量の範囲については、港湾（漁港）施設からできるだけ離れ、かつ島嶼や岬などによって影響を受けているような地点の海浜断面地形は除外し、外洋に直面した海岸を選択した。以上の条件のもとに選択した17ヶ所の海岸を表-1に示す。

表-1 選択した海岸名

外 洋	海 岸 名		計
	直接若しくは隣接した地点の波浪観測データを利用できる海岸	波浪観測データのない海岸	
太 平 洋	白老、苫小牧、大樹、厚内、大津（以上北海道）、鹿島（茨城県）、むつ小川原（青森県）、仙台（宮城県）	イタンキ浜（北海道）	9
日 本 海	石狩（北海道）、秋田（秋田県）、酒田（山形県）、金沢（石川県）	岩 内（北海道）	5
オホーツク海	猿骨、能取、斜里（以上北海道）		3

3. 海浜形状の変化特性

3. 1 海浜形状と波浪特性との関係

本研究でいう平衡点とは、海浜断面地形における砕波点近傍で砂移動が顕著でなくなる地点を指し、その代表的な海浜断面地形を表-1のうちから苫小牧海岸（昭和48年12月～昭和53年3月）、石狩海岸（昭和47年10月～昭和49年7月）および猿骨海岸（昭和49年9月～昭和50年11月）を選択し、比較したのが図-1である。

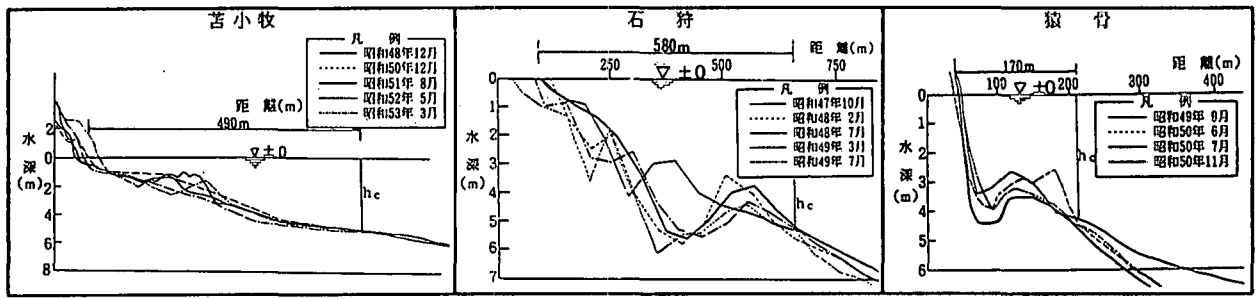


図-1 海浜断面

図-1から、何れの海浜断面地形も平衡点とみられる点より岸側におけるトラフとバーの最大と最小の差は苦小牧海岸で1.7m、石狩海岸3.3m、狼骨海岸1.9mと実測され、そのうち石狩海岸ではわずか4ヶ月間で同一地点でバーとトラフが3mの差をもって逆転するなど、何れの海浜断面地形においても短い時間スケールの中でのいろいろな形態が形成され、海浜断面地形の不安定性を示している。

これらの現象は、砕波による砂の移動とともに底質が海浜断面地形に影響を与えているものと考えられる。そこで、波浪と海浜断面地形との関係について考察する。

いま、図-1に示す3つの海岸における波高・周期別出現頻度分布表から、波高・周期の結合分布をみると、波高と周期の相関性は日本海側の石狩海岸で強く、太平洋側の苦小牧海岸では弱いことを示す(図-2)。

しかし、オホーツク側の狼骨海岸(紋別)の波高・周期別出現頻度線の形状が、太平洋側と日本海側との中間程度となっており、これは冬季間海面に流水が張りつめ、波による影響は皆無となる時期があるという異質の環境にあるためと考えられ、図-1に示す狼骨海岸の海浜断面地形が石狩海岸や苦小牧海岸と多少形態を異にするのも、このような原因によるものと考えられる。

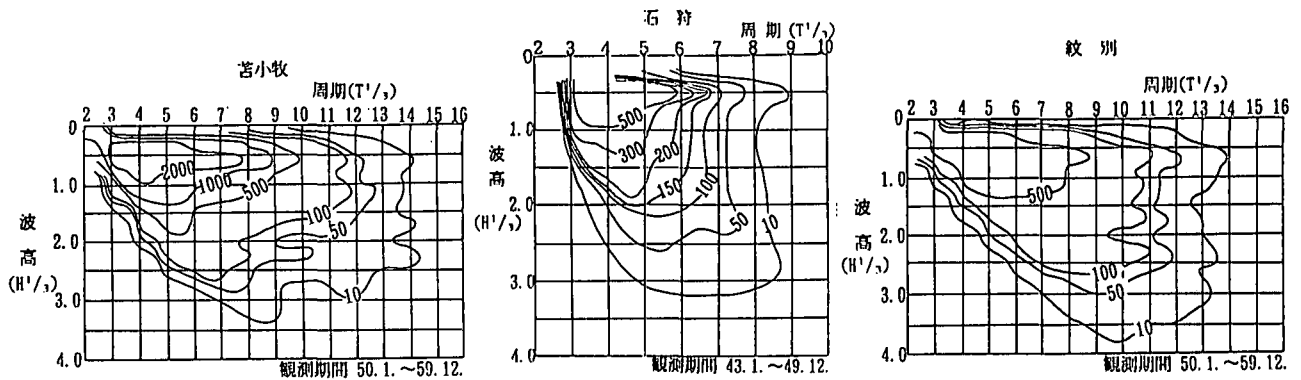


図-2 波高・周期別出現頻度分布

このように海浜断面地形の変化は、波高と周期の発生頻度が大きく寄与しているものと考えられる。

なお、波浪観測データは、運輸省港湾技研資料⁴⁾ 沿岸波浪観測年報、北海道開発局土木試験所報告⁶⁾ などから採用し、また底質粒径は、深淺測量時に同時測定した資料並びに港湾計画書資料などから採用した。

3. 2 平衡点の発生率

時間の経過とともに、波浪と海浜断面地形は互いに影響し合いながら安定形状に近づくが、その途中の段階で砕波点の位置は常に変化する。そこで、この砕波水深を仮に砕波に相当する水深(h_b)とし、この h_b の発生率と波浪の関係を合田の砕波指標をもとに、波高・周期別出現頻度表から出現頻度毎に求めた。図-3は石狩海岸における砕波に相当する水深(h_b)とその発生率を示したものである。ここで、砕波に相当する水深(h_b)が本研究で提案する海浜断面地形の平衡点水深(h_c)にほぼ近似するものと仮定して、図-3から図-1の平衡点水深(h_c)に等しい砕波に相当する水深(h_b)を求め、平衡点水深(h_c)の発生頻度とした。

以上と同様な方法により、15地点の海浜断面地形と波浪データとの対比によって平衡点水深(h_c)が砕波に相当する水深(h_b)に近似すると仮定した場合の平衡点水深(h_c)の発生率を図示したのが図-4

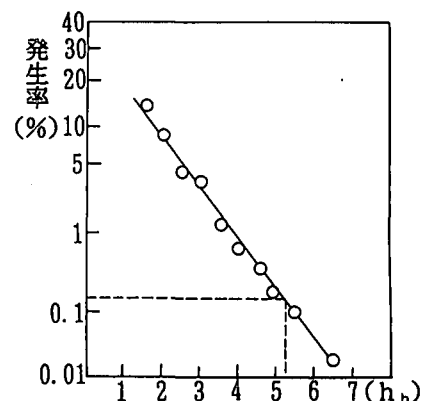


図-3 砕波に相当する水深の発生率 (石狩海岸)

である。図-4から、その発生率にはかなりのバラツキがみられるものの、概ね直線に近似し全体の傾向を良く示しているものといえる。

図-1の海浜断面地形と図-3の碎波に相当する水深(h_b)の発生率の関係から、例えば沿岸砂州の著しい石狩海岸の海浜断面地形では、水深5.3mを1つの分岐点として発生率が0.16%以上の浅海における海域は碎波帯と考えられ、また0.16%以下の区域は海岸を沖浜と外浜とに分けたときの沖浜に相当する位置を占めているものと考えられる。

3. 3 海浜断面地形変化と平衡点水深(h_c)

一般に海浜の変化は、地形的要素のほか海底勾配、底質粒径などの要因もあるが、その基本となるのは波浪特性であると考えられる。

しかし、この海浜断面地形の変化を波浪特性で表現する場合にどのような指標を用いることが適当であるかは種々議論のあるところであろう。波は一波毎に異なり、また海浜断面地形の平衡点は海岸に來襲する波全体を考慮に入れて算出することが望ましいという前提条件のもとに、波がどのように変化した時に海底地形がどう応答するかを理解できる一つの方法として、アーセル数(U_r)を用いる。

$$U_r = \frac{H_b L_b^2}{h_b^3} = \frac{H_b/L_b}{(h_b/L_b)^3} = \frac{H_b/h_b}{(h_b/L_b)^2} \quad (1)$$

ここに H_b 、 L_b は、碎波に相当する水深(h_b)における波高及び波長である。

図-5は波浪観測データの波高・周期別出現頻度分布表から、相対碎波水深(h_b/L_b)と相対碎波波高(H_b/h_b)の関係を波浪の頻度の重みを加味して碎波に相当する水深(h_b)毎にそのアーセル数($H_b/L_b^2/h_b^3$)を累計したものである。

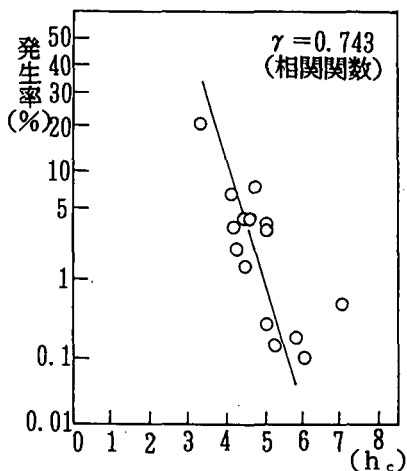


図-4 平衡点水深(h_c)の発生率

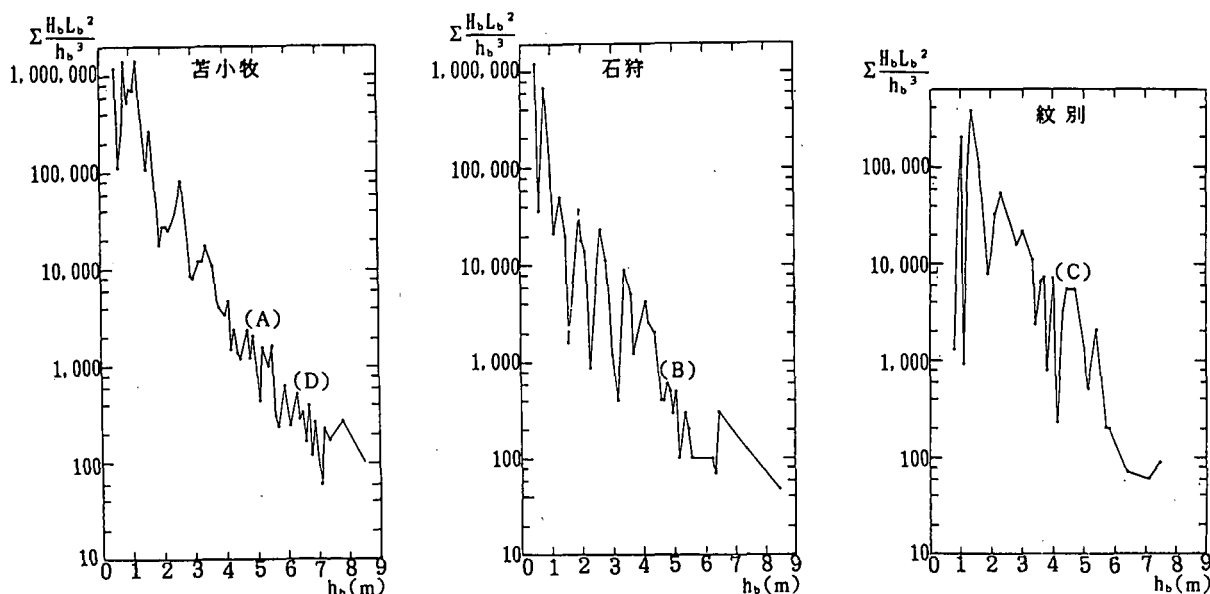


図-5 碎波に相当する水深(h_b)における ΣU_r の変化

図-5から、アーセル数の累計 ΣU_r は碎波に相当する水深(h_b)毎に振幅のある峯や谷が頻繁に現われるが、日本海側の石狩海岸ではその振幅が大きく、太平洋側の苫小牧海岸ではその振幅が小さい。また、図-5の主峯の後に振幅の小さい副峯(A)部、(B)部、(C)部が存在している。

このように、連続した累積アーセル数(ΣU_r)の波形に、副峯が生ずる現象は波の変化に対応した地形変化の応答性であると考えられ、これを ΣU_r の波形についてみるならば、振幅の小さい副峯が続いている区間は h_b と強くかかわっていることになる。すなわち、 ΣU_r の波形に於て不連続な副峯波形が生じている所を変曲点とするならば、この点に対応する海底には遷移状態にある平衡点が存在しているものと考えられる。

なお、表-1に示したように、波浪観測データのない場合は、隣接地点のものを利用したが、例えば苫小牧海岸より22km離れた白老海岸の場合は、苫小牧海岸のデータを用い図-5に示す ΣU_r の波形の(D)部が相当する副峯であるとした。また、対象の海浜断面地形に平衡点が2ヶ所ある場合は、図-5に示す ΣU_r の波形の副峯から判断して平衡点を求めた。

そこで、図-1に表示した海浜断面地形の平衡点水深 (h_c) と図-5の副峯が続く範囲に存在する碎波に相当する水深 (h_b) との関係、表-1に示す全国15ヶ所の現地データを用いてプロットすると図-6のとおりである。

図-6から平衡点水深 (h_c) と碎波に相当する水深 (h_b) は波浪データと現地測量という誤差の多い条件であるにもかかわらず非常に近似することから、図-5の h_b を用いて h_c としてもよいと判断される。

累積アールセル数 ΣU_r の波形に副峯が生じた所は、平衡点水深に相当しているので、全体の ΣU_r 波形の中で副峯を構成している波高と周期を波浪観測データから抽出し、 $h_b = h_c$ とし、底質粒径 (d_{50}) (最大0.19~0.20mmを△印、最小0.10~0.13mmを○印、中間を●印) をパラメータにして、 h_b/L_b と H_b/L_b との関係を整理すると図-7のようになり、平衡点における底質移動限界水深は、

$$H_b/L_b = 0.512 (h_c/L_b)^{0.858} \quad (2)$$

であたえられる。

なお、岩垣・樫木⁹⁾は波の特性と平衡勾配との関係において海浜変形の出発点となる底質移動水深の無次元表示に、沖波よりも碎波の特性を用いている。

図-7から、海浜断面地形における平衡点水深 (h_c) は、式(2)であたえられ、 ΣU_r の波形の副峯を構成する波条件により生ずるものと解釈される。

3. 4 従来の研究成果との比較

図-7は著者の式(2)と荒木の実験式、岩垣・樫木の式を比較したものである。荒木は移動限界水深に最も近い結果をあたえる h_c について、函館大森浜海岸において長さ160mの栈橋を利用して現地観測し、海底移動を波浪エネルギーと水深との関係から式(3)を表している。

$$h_c^3/H^2L^2 = 0.2 \quad (3)$$

ここに h_c : 底質の移動限界水深、 H : h_c における波高、 L : h_c における波長
波辺は、式(3)に浅海波理論を適用して式(4)を求めており、図-7には式(4)を示した。

$$h_c/L_0 = 0.464 (H_0/L_0)^{2/3} \quad (4)$$

なお、実験された海浜の底質粒径は $d_{50} = 0.1\text{mm}$ 前後であり、海浜断面地形は図-8に示すように緩勾配であった。

岩垣・樫木らによる研究では、平衡勾配に達した海浜が存在しているかどうかを調べ、波と平衡勾配との関係、さらに底質粒径の効果などについて明らかにしようとしたものである。これらの研究方針に従い、泉南海岸及び網野海岸の海浜断面地形を実測し、さらに実験により汀線と直角方向の漂砂の移動量と漂砂の移動限界水深を求め、それらと波の特性の関係を求めている。

なお、現地観測された泉南海岸の1つである海浜断面地形と底質粒径の分布を図-9に示すが、この海浜地形は函館大森浜海岸と同様緩勾配であった。

海浜断面地形の変化は波の特性や水深のほか底質の粒径にも関連することは言うまでもない。そこで著者は、海浜断面地形変化と底質粒径分布との関係を見るために図-7で底質粒径をパラメータにしたところ、平衡点の

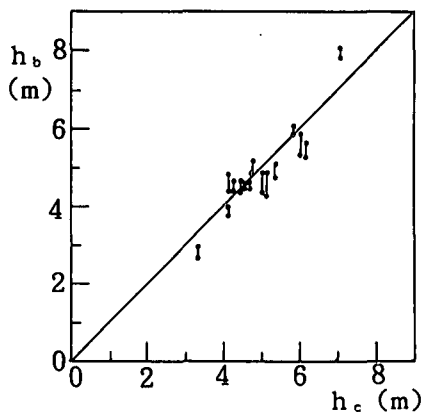


図-6 h_c と h_b の関係

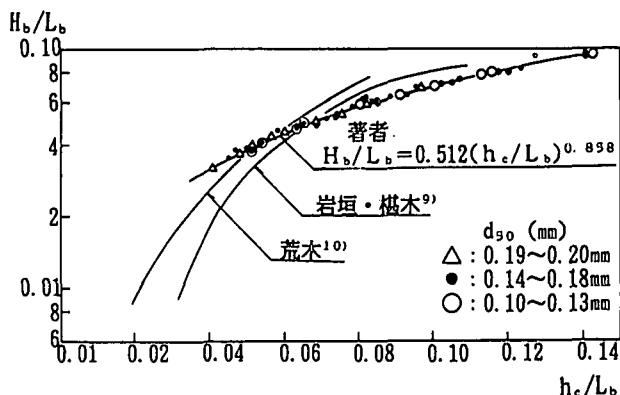
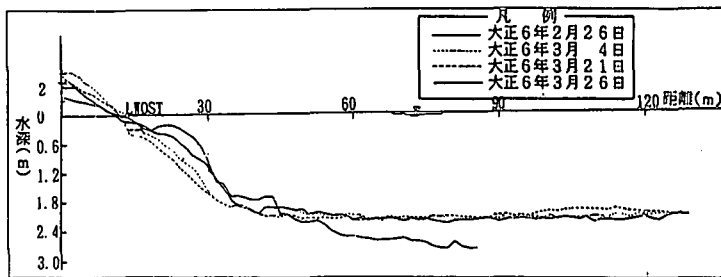


図-7 平衡点における移動限界水深の無次元表示



注) 原本の単位は尺であるが著者の責任でmに換算した。

図-8 函館大森浜における海底変化図¹⁰⁾

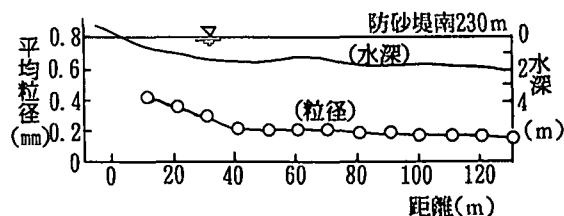


図-9 泉南海岸における海浜断面と底質粒径の分布¹²⁾

発生は底質粒径 d_{50} の大きさによって差が生じ、両者には強い関連性があることが認められた。

しかし、いずれの式においても、 h_c/L_b が減少するにつれて h_b/L_b が小さくなる傾向にあるが、 $0.05 < h_c/L_b < 0.08$ の範囲では互いに近似し大きな相違はないようである。しかし、 $h_c/L_b < 0.04$ になると著者の式は岩垣・樫木の式よりも大きくなり、底質粒径 d_{50} によって岩垣・樫木の式及び荒木の式と多少異なる。

4. 平衡点の生じる位置

著者は、波浪と海底勾配に注目し、平衡断面地形の形成には平衡点と海底勾配の相互因子が決定的に支配していることを現地観測の結果から報告した。

そこで、この考え方を基本に水際線から平衡点までの距離 (ℓ) を求めると、

$$h_c/\ell = \alpha \tan \theta$$

となる。

ここで $\tan \theta$ は平衡点における海底勾配、 α は定数である。

図-10 は、 ℓ と $h_c/\tan \theta$ との関係を17地点についてプロットしたもので、

$$\ell = 0.42h_c/\tan \theta + 147.87 \quad (5)$$

となる。

すなわち、平衡点までの距離 (ℓ) は、図-7 と同様に底質の大きさに関係し、平衡点水深 (h_c) とその地点の海底勾配 ($\tan \theta$) の関数として表すことができる。

図-11 は式(2)を形成している波条件を用いて $h_c/H_{1/3}$ と $H_{1/3}/L_{1/3}$ との関係について底質粒径 d_{50} をパラメータにして示したものである。

図から明らかなように、平衡点 (h_c) が発生するおおよその限界は、

$$H_{1/3}/L_{1/3} \leq 0.04, \quad h_c/H_{1/3} \geq 1.48$$

であり、これより波形勾配 ($H_{1/3}/L_{1/3}$) が小さくなると $h_c/H_{1/3}$ は指数函数的に増大していくが、波形勾配の $H_{1/3}/L_{1/3}$ が 0.04 以上になれば、 $h_c/H_{1/3} = 1.48$ (一定) となる。

すなわち、平衡点の殆どは、 $h_c/H_{1/3} \geq (1.48 \sim 2.3)$ の範囲に於て生じ、 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が 0.04 以上になれば、平衡点はあまり生じない。

さらに、底質粒径 $d_{50} = 0.19 \sim 0.20 \text{ mm}$ の場合は、波形勾配が小さく、しかも $h_c/H_{1/3}$ の大きい範囲に於て分布し、 d_{50} が小さくなればその逆となる。しかし、これらの中間の底質粒径 d_{50} の場合には、波形勾配や $h_c/H_{1/3}$ に関係なく広く分布していることがわかった。

5. むすび

現地観測データを用いて、平衡点水深についての定量的な検討を試みたが、その結果は次のように要約される。

- 1) 波浪データの頻度の重みを加味して各砕波水深ごとに、そのアール数を累計した所、副峯が生じる砕波に相当する水深 (h_b) と実測した海浜断面地形の平衡点水深 (h_c) が近似する結果が得られた。
- 2) 副峯を構成する箇所の波浪データを抽出し、平衡点水深 (h_c) を算出する関係式を誘導し、底質粒径 (d_{50}) との関連性及び特定海岸の実測値や模型実験から得られた式とを比較し、その有効性を確認することができた。
- 3) 平衡点 (h_c) の殆どは、 $h_c/H_{1/3} \geq (1.48 \sim 2.5)$ の範囲で生じていることを明らかにした。

謝 辞

本研究を行うにあたっては、日本大学教授 竹沢三雄氏にご指導いただいた。ここに記して謝意を表する。

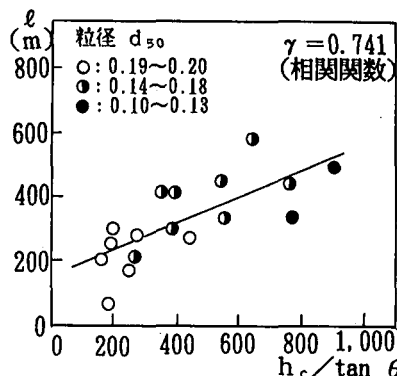


図-10 ℓ と $h_c/\tan \theta$ との関係

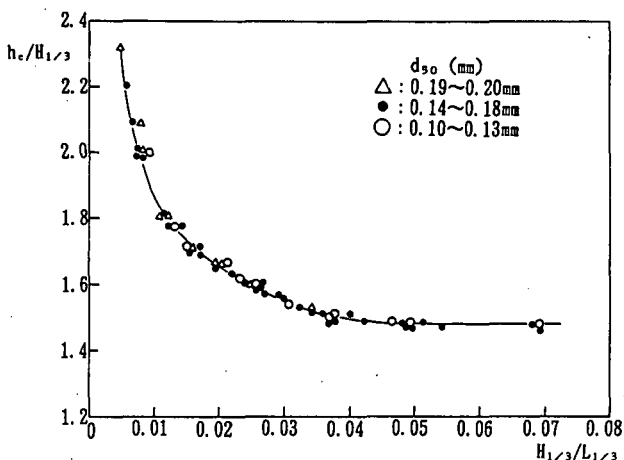


図-11 $h_c/H_{1/3}$ と $H_{1/3}/L_{1/3}$ との関係

参 考 文 献

- 1) 宇多高明：波による移動限界水深を定める代表波の選定法，海岸実務講義集，PP. 25～35，1989.
- 2) 久宝雅史・戸巻昭三：海浜横断面の平衡点について，第28回海岸工学講演会論文集，PP. 247～250，1981.
- 3) 久宝雅史・戸巻昭三：海底断面変化と平衡点との相互関係について，第31回海岸工学講演会論文集，PP. 436～440，1984.
- 4) 運輸省港湾技術研究所：沿岸波浪観測年報，港湾技研資料（No. 417.， No. 554），1981. 1986.
- 5) 北海道開発局土木試験所：土木試験所報告，No. 71，1979.
- 6) 秋田・金沢・酒田・むつ小川原港湾管理者：港湾計画書資料，1968. 1970. 1993.
- 7) 北海道開発局：石狩湾の自然条件について，1970.
- 8) 合田 良実：碎波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，PP. 39～49，1970.
- 9) 岩垣雄一・榎木 亨：海浜の平衡勾配と碎波による砂移動に関する実験，海岸工学講演会講演集，PP. 99～105，1955.
- 10) 荒本文四郎：砂浜における港湾改修と漂砂との関係について，土木学会誌，第12巻，第6号 PP. 1155～1199，1926.
- 11) 渡辺 弥作：海岸工学，コロナ社，1973.
- 12) 岩垣雄一（1954）：汀線侵食，海岸工学研究発表会論文集，PP. 69～80，1954.