

石狩湾新港周辺の海岸断面地形変化の再考察

RE-CONSIDERATIONS OF BEACH CHANGES AROUND THE NEW PORT OF ISHIKARI BAY

戸巻 昭三¹ ・ 竹沢 三雄²

Shozo TOMAKI and Mitsuo TAKEZAWA

¹正会員 工博 株式会社クマシロシステム設計(〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目8)

²フェロー会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

The beach change in the neighborhoods of the breakwater is re-considered by using results of the bottom sounding and the wave observation which have been surveyed on the new port of Ishikari Bay.

As results, the beach change is influenced by the breaking water depth, the breaking wave height, and the equilibrium beach profile.

Key Words: breaking water depth, breaking wave height, equilibrium beach profile.

1. はじめに

現地海岸の防波堤近傍における海岸断面地形変化は、主として漂砂形態に応じた波による砂移動と汀線からの戻り流れや、防波堤からの反射波による沖向き漂砂のバランスによって生じている。

そこで本研究は、石狩湾新港建設に伴い東防波堤の右(R)側と西地区埋立護岸の左(L)側海岸において、汀線から海岸断面地形が安定する地点¹⁾(stable point)までの間で海岸断面地形がどのように変化し、そこにはどのような漂砂機構が存在しているのか、石狩湾新港において実測された深淺測量結果と波浪観測結果を用いて防波堤建設地点近傍の海岸断面地形変化について若干の再考察を試みたものである。

2. 石狩海岸の地形と波浪

(1) 現地の概要

現地調査地点の石狩湾新港は、図-1 に示すように北海道の日本海に面する石狩湾奥に位置し、その周辺の砂浜海岸は、銭函から知津狩まで途中石狩川河口をはさんで約 24km にわたって海浜が連続している。石狩湾の海底地形は水深 20m までその等深線が港奥地形にはほぼ平行し、その海底勾配は比較的緩やかで遠浅である。そして石狩湾は、その開口部が NW 方向に向いており、日本海からの高波浪はこの NW 方向から入射する。

(2) 現地調査の範囲

調査対象区域²⁾は、図-2 に示すように石狩湾新港

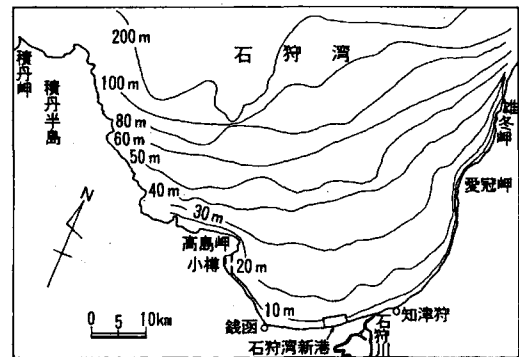


図-1 石狩海岸の位置図²⁾

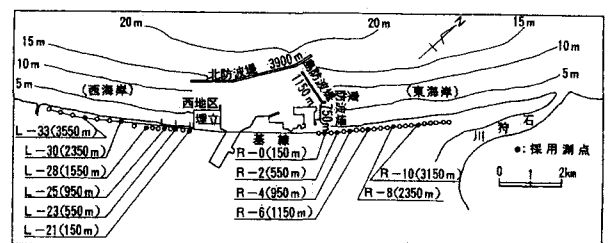


図-2 石狩海岸の調査範囲²⁾

により海浜地形が影響を受けられる東防波堤より東(R)側 3,500m の範囲と、西地区埋立護岸より西(L)側 3,500m の範囲の海岸とし、1984 年から 1991 年までの 8 年間(年 2 回 7 月～8 月, 12 月)の 16 回にわたって実測した 152 測線の海岸断面地形について検討した。

(3) 波浪条件

石狩海岸の波浪は、石狩湾新港沖合 5km の地点(水

深 24m)で北海道開発局³⁾により観測されている。図-3 は、この観測から得られた観測期間 5 ヶ年(1996～2000 年)の夏季及び冬季の波向別波高頻度である。最多頻度の波向は、夏季は R 側海岸に關係の深い NNW 方向の 21%, 冬季は当海岸に直角方向(NW)の 54% である。

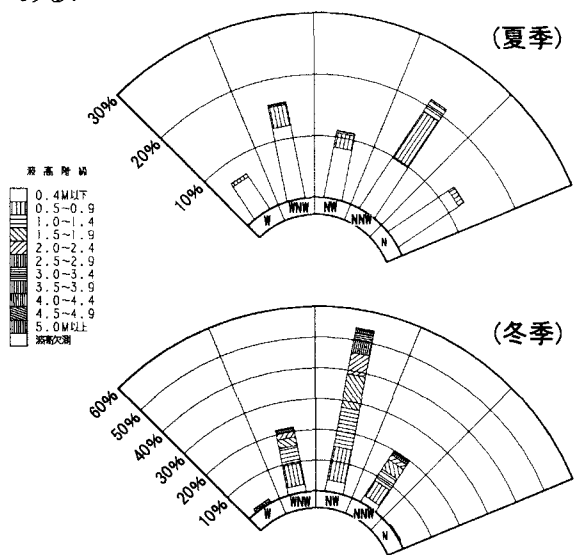


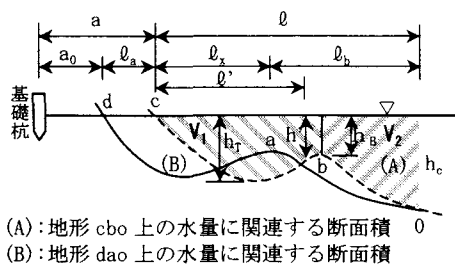
図-3 波向別波高頻度

3. 汀線から沿岸砂州頂部までの地形変化

図-4 は、沿岸砂州頂部から汀線までの岸側水量(V_1)と海岸断面が安定する地点(stable point)までの沖側水量(V_2), ならびに平均海底勾配($\tan\alpha=h'/\ell'$)を示したものである。

平均海底勾配($\tan\alpha$)と汀線の前進・後退及び沿岸砂州の岸沖移動の關係は、R 側では $\tan\alpha \approx 0.010 \sim 0.030$ で汀線が前進と後退を繰返し、それに伴って沿岸砂州も岸沖に移動し、一方、L 側海岸では $\tan\alpha \approx 0.010 \sim 0.015$ で汀線と沿岸砂州が岸沖方向に移動している²⁾。

そこで、(V_1), (V_2)と汀線と平均水深 h' までの水平距離 ℓ' との關係について、現地データからプロットすると図-5 のとおりである。図-5 から、R 側、L 側海岸とも ℓ' と (V_2) が極めてよい相関を有していることが認められたが、(V_1) と ℓ' の相関が小さい。したがって R 側、L 側海岸共に海岸地形変化に影響を



(A): 地形 cbo 上の水量に關する断面積 0
(B): 地形 dao 上の水量に關する断面積

図-4 海浜断面 (模式図)

及ぼす要素は(V_1)に關する区域の土砂量であることが推察される。

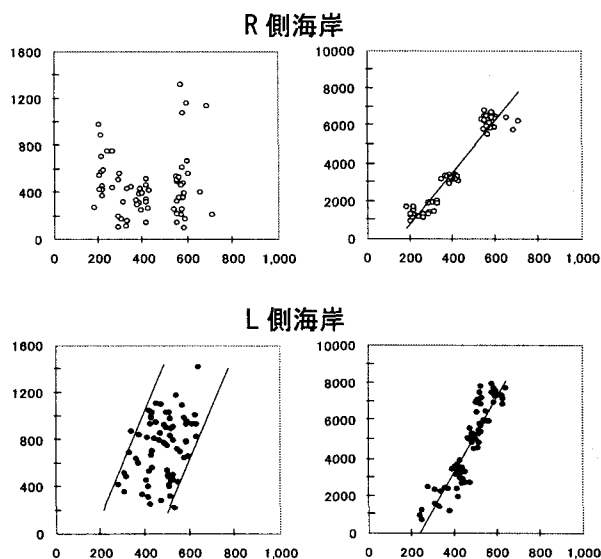


図-5 R 側・L 側海岸における (V_1) 及び (V_2) と ℓ' の關係

4. 地形変化量 (v) と碎波水深の關係

沿岸砂州頂部から汀線までの地形上の水量に關連する断面積(V_1)が地形変化に及ぼす機構を明らかにするため、①碎波帯における波の平均エネルギーと、②碎波帯相似パラメータである $\tan\theta/\sqrt{H_b/L_0}$ によってどのように断面地形が変化しているかを考察する。

Dibajnia⁴⁾は、流速時に周囲の流れから体積 V の底質に伝達される平均エネルギー(E_k)は近似的に次式で与えられることを示した。

$$E_k = \frac{1}{2} \rho V u_c^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ρ : 海水の密度、 u_c : 流速、 V : 体積。

式(1)における体積 V については、石狩海岸の R 側、L 側海岸共に沿岸砂州頂部から汀線までの地形上の水量に關連する断面積(V_1)における 1 回目と 2 回目実測地形変化量の差(ΔV_1)とした。

また砂の移動限界流速は、佐藤ら⁵⁾による底面における掃流砂の移動限界流速(u_{oc})を用いた。すなわち、

$$u_{oc} = \frac{0.114^{3/4}}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{3/4} (g^3 d T^2)^{1/4} \\ = 28.23 d^{1/4} \cdot T^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 ρ_s : 砂の密度、 g : 重力の加速度、 d : 砂の中央粒径、 T : 入射波周期 である。

一方、碎波帯地形について、Battjes⁶⁾は碎波帯相似パラメータ(I_{rb})の $\tan\theta$ に碎波点までの平均勾配を選び、

$$I_{rb} = \left(\frac{h_b}{\ell'_b} \right) / \sqrt{H_b/L_0} \dots\dots\dots (3)$$

が碎波帯地形の変形過程に大きく影響する因子であると示唆している。

なおここで、 h_b ：碎波水深、 H_b ：碎波波高、 ℓ'_b ：汀線から碎波水深までの水平距離、 L_0 ：深水波波長である。

図-6 は、石狩海岸の汀線から沿岸砂州頂部までの地形変化量の差(ΔV_1) (侵食●と堆積○) をパラメータにして、R 側海岸と L 側海岸の平均エネルギー E_k と碎波帯相似パラメータ I_{rb} の関係を示したものである。

図-6 から、平均エネルギー E_k の各 I_{rb} に対する最大値を順次結んだ包絡線は、R 側、L 側海岸共に非対称分布(歪み+)を形成し、平均エネルギー E_k の極大となる I_{rb} は R 側海岸で $I_{rb}=0.056$ 、L 側海岸で $I_{rb}=0.065$ である。すなわち

$$(h_b/\ell'_b)/\sqrt{H_b/L_0} = (0.065 \ 0.056) \dots\dots\dots (4)$$

である。ただし () は、左側が L 側海岸、右側が R 側海岸の I_{rb} の値である。

図-7 は、 ΔV_1 が最大となる場合の碎波水深 h_b と $(0.065, 0.056) \ell'_b \sqrt{H_b/L_0}$ の関係である。

図-7 から、海浜地形の侵食(堆積)に及ぼす重要な要素は碎波水深(h_b)である。そして、汀線から沿岸砂州頂部までの地形変化量の差(ΔV_1)に影響を及ぼす最大エネルギー時における碎波水深(h_b)は、 ℓ'_b と $\sqrt{H_b/L_0}$ によって表示できる。

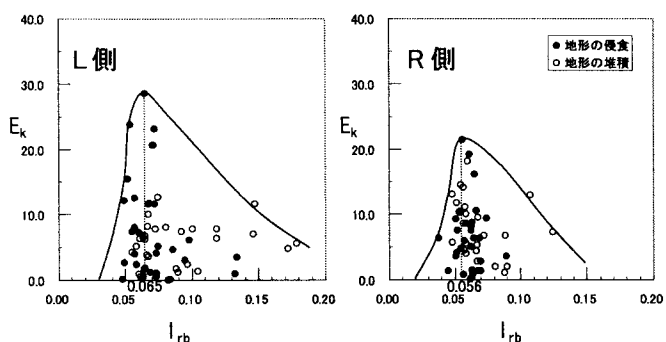


図-6 E_k と I_{rb} の関係

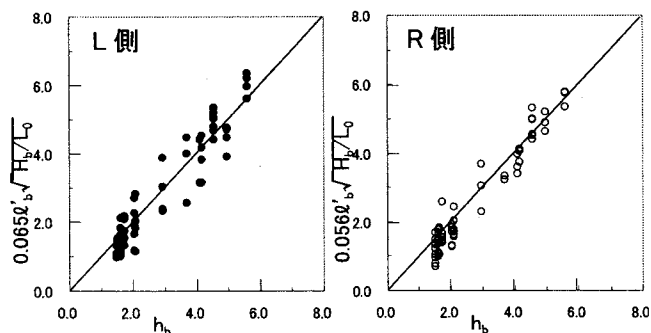


図-7 h_b と $\ell'_b \cdot \sqrt{H_b/L_0}$ の関係

5. 海岸断面地形の平衡性

図-8 は、石狩湾新港の東防波堤及び西地区埋立護岸よりそれぞれ東・西に 3200m 離れた 2 測線分を 1980 年より 2003 年まで年 1 回(7 月)実測した連続 23 回の深浅測量結果を用いて、2 つの海岸断面の侵食(堆積)量と沿岸砂州の岸沖移動及び汀線の前進・後の時系列変化である。また、図-8 の下段にはそれらの発生回数を付記した。

なお、図-8 の作成にあたって、実測最初の 1980 年 7 月の断面地形の変化量をベースとしたので、図示された変化量は 22 点の実測値である。

図-8 から、その下段の表は、データ数が少ないので侵食や堆積などの地形変化、沿岸砂州の岸沖移動、汀線変化等がどのような機構のもとに変化するのかといったことまで十分解明するにはいたらなかったが、侵食や堆積などの地形変化は時間の経過と共に侵食と堆積を繰り返しながら、ある平均値($A'=0$)のまわりで揺らいでいる⁷⁾。ただし、 A' は侵食量と堆積量の差である。

すなわち、各領域の地形変化量は、ある平均値($A'=0$)より大幅に大きくなったり、小さくなったりすることは殆んどないが、平均値 $A'=0$ から堆積側(+)や侵食側(-)に少しずれることはほぼ同じ頻度で起こっており、結局、この間を行き来することから丁度 $A'=0$ の値であることが最も多いことになる。すなわち、自然海浜では常に季節的変動を繰り返しているが、その過程で侵食地形から堆積地形(堆積地形から侵食地形)へと変化を繰り返す時には、地形変化量($A'=0$)となることが生じ、その時に平衡地形になる⁸⁾。

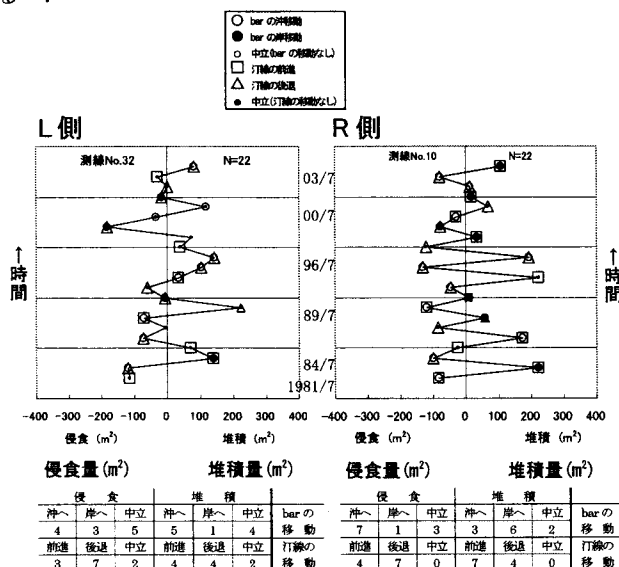


図-8 岸沖漂砂移動量と沿岸砂州の岸沖移動と汀線変化の関係

6. 地形変化の内部機構

(1) 地形変化量と波のエネルギー

波の進行方向に輸送される1周期平均の波のエネルギー(W)は、水面から海底までの単位面積あたりの波の平均の全エネルギー(E)と波の群速度(C_g)の積によって与えられる。

富永⁹⁾¹⁰⁾は、砕波帯で海底の摩擦によって失われる波のエネルギーは EC_g に比例すると考え、 u_0 を波による水の平均摩擦速度とすれば、波峰の単位長さ当たりが海底に作用する摩擦力は EC_g/u_0 になると述べている。

図-9は、石狩湾新港のR側、L側海岸における現地データから、平均水深(h')における波の平均エネルギー(E)を、また u_0 は式(2)の移動限界流速(u_{0c})を用いて求めた海底に作用する摩擦力(EC_g/u_{0c})に対して、地形変化量(A')がいかに変化するかを調べたものである。

図-9から、汀線から海岸断面地形が安定する地点(stable point)までの地形変化量(A')は、R側、L側海岸共に波の平均エネルギー(EC_g)と移動限界流速(u_{0c})との比 EC_g/u_{0c} によって支配されることが推測され、 $EC_g/u_{0c} \approx 400 \sim 500$ で A' が最小値になる。

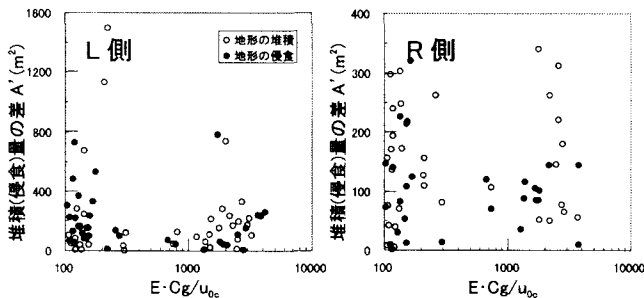


図-9 地形変化量の差(A')と $E \cdot C_g / u_{0c}$ の関係

(2) 地形変化量の分類

図-10は、平均水深 $h' = A/\ell$ と砕波水深(h_b)の比(h'/h_b)に対し、汀線から海岸断面地形が安定する地点(stable point)までの地形変化量の差(A')を侵食(堆積)量に区分した関係を示したものである。また、トラフ水深(h_T)をパラメータとして示した¹¹⁾¹²⁾。

図-10から、現地データのためバラついてはいるが、パラメータのうち同じトラフ水深を辿ってみると、トラフ水深 h_T ごとに分類され、しかもその侵食(堆積)量に極小値が存在することが認められた。すなわち、図-8で、地形変化を繰り返す時には平衡地形と見なせる地形が多く認められたが、図-10から、平衡地形は、平均勾配の水深(h')と砕波水深(h_b)の比によって決定され、R側海岸では平均水深 $h' = (1.8 \sim 2.5)h_b$ 、L側海岸では $h' = (1.5 \sim 2.2)h_b$ になることが

明らかになった。

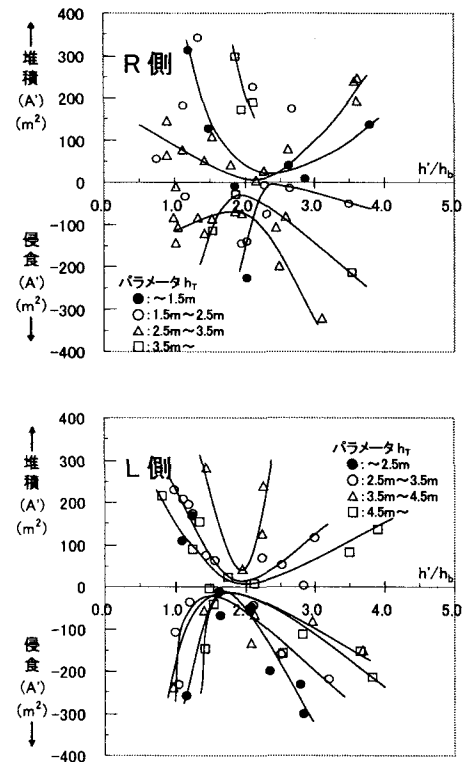


図-10 地形変化量の差(A')と h'/h_b の関係

(3) 漂砂量に対する周期と戻り流れの関係

無次元漂砂量 $A'/\sqrt{sgd^3}$ とJames¹³⁾が提案した無次元周期 $T(g/h_b)^{1/2}$ の関係に、佐藤¹⁴⁾による戻り流れ

$$u_b = AH^2/h \cdot T \approx 4.0 \times H_b^2/h' \cdot T$$

をパラメータとして、R側、L側両海岸について示したのが図-11である。なお、ここで A' :地形変化量の差、 S :水中における底質の相対密度、 g :重力の加速度、 d :砂の粒径、 h_b :砕波水深、 T :波の周期、 A :戻り流れの係数($=4.0$)、 H :入射波高、 H_b :砕波波高である。

また、図-11には無次元周期の $T(g/h_b)^{1/2}$ と無次元漂砂量 $A'/\sqrt{sgd^3}$ における戻り流れ u_b の平均値を同時に示した。

図-11のR側海岸の無次元周期 $T(g/h_b)^{1/2}$ が、12.5に近づくと戻り流れの平均値が最大になる。そこでその関係式を変形すると、

$$L_0/h_b \approx 25 \dots \dots \dots (5)$$

となる。すなわち戻り流れの最大は、沖波波長($L_0 = gT^2/2\pi$)と砕波水深(h_b)が式(5)の関係になった時に発生することになる。

一方、無次元漂砂量 $A'/\sqrt{sgd^3} = 1.8 \times 10^6$ になると、戻り流れの平均値が最大になる。

しかし、L 側海岸における無次元漂砂量に対する戻り流れの最大値は 4 箇所認められる。これは R 側海岸より L 側海岸の海岸地形変化が多いことを意味するものと考えられる。

樫木¹⁵⁾は流速変動が漂砂量にどのような影響を及ぼすのか、漂砂量を計算するとともに漂砂量 0 とおくことにより、平衡断面勾配 ($\tan\theta$) を

$$\tan\theta = 5w_0/C = 5w_0\sigma/g \tanh kh$$

のように表している。ここで、水深 (h) を平均水深 (h') とすると、式 (6) が与えられる。

$$\tan\theta = 3.3/T \tanh(2\pi h'/L) \dots\dots\dots (6)$$

また、樫木¹⁵⁾は、与えられた粒径に対する平衡勾配 $\tan\theta$ を 3 つの無次元量

$$\tan\theta = f(w_0\sigma/g, ak_0, k_0h)$$

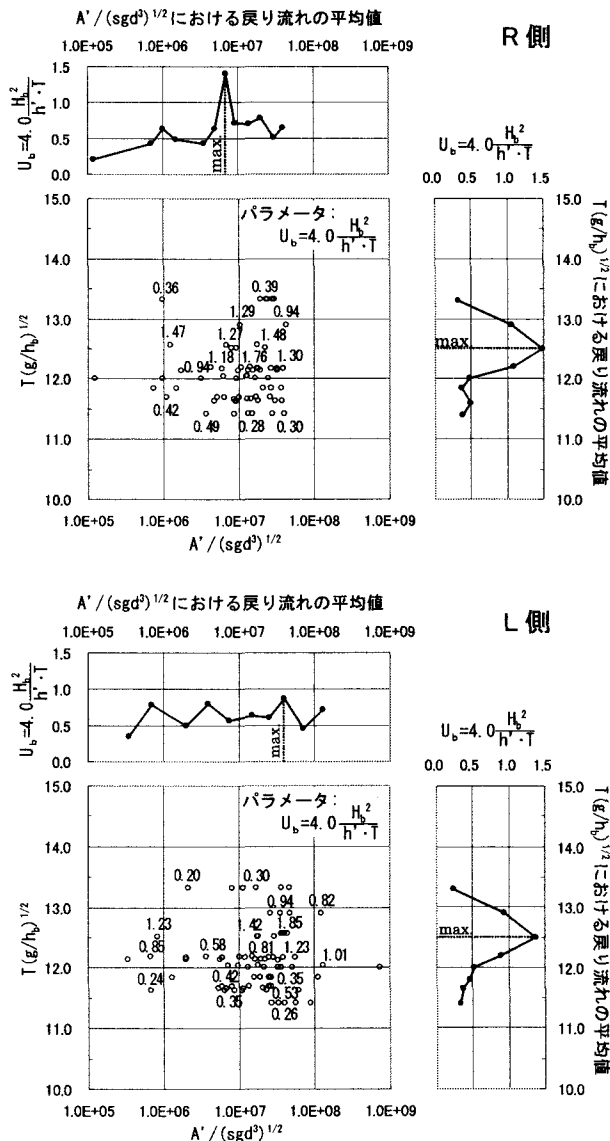


図-11 無次元漂砂量と無次元周期の関係

で表している。

ここに $k_0 = \sigma^2/g$, $a = H/2$, $\sigma = 2\pi/T$, w_0 = 海水の単位体積重量 である。

いま $\tan\theta = f(w_0\sigma/g)$ を用いると、

$$\tan\theta = f(w_0\sigma/g) = f(0.04w_0T/h_b) \dots\dots\dots (7)$$

となる。なお式 (7) の整理にあたって、 L_0 は最大戻り流れが発生する場合の式 (5) を用いた。

式 (6) と式 (7) を用いて、R 側海岸及び L 側海岸における現地データをプロットしたのが図-12 である。

図-12 から、海岸断面地形の平衡勾配 ($\tan\theta$) は、防波堤からの距離によって異なるが、周期、碎波水深によりほぼ決定することができる。また、防波堤から遠ざかるにしたがって、 $\tan\theta$ の値は大きくなる。

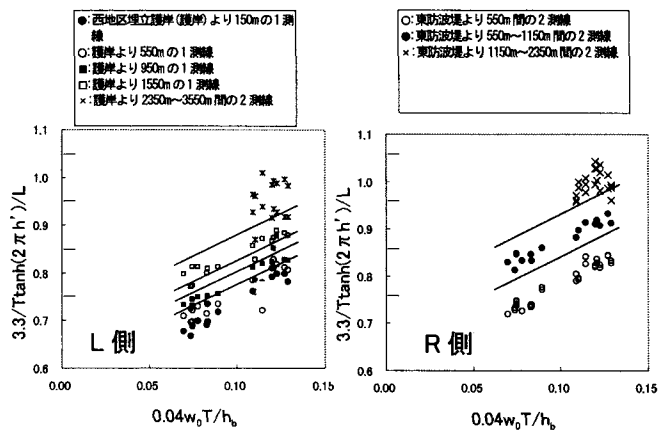


図-12 平衡勾配の関係

7. むすび

1980 年より実施している石狩湾新港周辺の深浅測量結果を基に、海岸断面地形変化の機構について再考察した結果得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 平均水深 (h') から汀線までの水平距離 (l') と、沿岸砂州頂部から汀線までの地形上の水量に関連する断面積 (V_l) との関係を示す図-5 から、(V_l) は海浜地形変化に影響を及ぼす土砂量であることが明らかになった。さらに、地形変化量の差 (ΔV) に影響を及ぼす最大エネルギー時における碎波水深 (h_b) は、図-7 に示す汀線から碎波水深までの水平距離 (l_b') と $\sqrt{H_b/L_0}$ によって表示できる。
- 2) 地形変化量 (A') は、いつも時間変化 (実測時) に対し、ある平均値 ($A'=0$) のまわりで侵食 (堆積) 量が揺らいで、 $A'=0$ の値であることが最も多い。これは海浜地形の平衡性を表現しているものと考えられる。
- 3) 汀線から海岸断面地形が安定する地点 (stable point) 間の侵食 (堆積) 量が最小になる時の平均水深 (h') と碎波水深 (h_b) の関係は、R 側海岸では $h' = (1.8 \sim 2.5)h_b$ 、L 側海岸では $h' = (1.5 \sim 2.2)h_b$ である。これは、図-8 に示す $A'=0$ の状態における海

岸断面地形の平衡性の機構と関連しているものと考えられる。

- 4) 戻り流れの最大は、沖波波長 (L_0) と碎波水深 (h_b) との関係が $L_0=25h_b$ の関係になった時に生ずる。
- 5) 海浜地形の平衡勾配 ($\tan\theta$) は、周期と碎波水深によりほぼ決定することができ、防波堤から遠ざかるにしたがって、 $\tan\theta$ の値は大きくなる

謝辞：本研究を行うにあたり、北海道開発局小樽港湾建設事務所から貴重な資料を提供して頂いた。ここに記して深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 久宝雅史, 戸巻昭三：海浜断面の平衡点について, 第28回海講論, PP. 247-250, 1981.
- 2) 戸巻昭三, 竹沢三雄：石狩湾新港周辺海浜の性能評価について, 海洋開発論文集, 第19巻, PP. 373-378, 2003.
- 3) 北海道開発局：石狩湾新港深浅測量図資料, 1996-2000.
- 4) Mohammad Dibajnia, 渡辺晃：非対象振動流によるシートフローの発生と漂砂量, 第38回海講論, PP. 236-240, 1991.
- 5) 佐藤幸雄, 鰐目淑範：碎波点における砂移動に関する一考察, 第16回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, PP. 299-302, 1979.
- 6) Battjes, J. A. : Surf similarity, proc. of 14th Conf. on Coastal Eng., PP. 466-480, 1974.
- 7) 香取眞理：複雑系を解く確率モデル, PP. 184-190, (株)講談社, 1998.
- 8) 堀川清司編：海岸環境工学, PP. 172-181, 東京大学出版会, 1985.
- 9) 富永政英：海洋波動, PP. 439-443, 共立出版(株), 1976.
- 10) Inman, D. L. and R. A. Bagnold: Littoral Process, The Sea, Hill, M. N. (editor), Interscience, PP. 529-553, 1963.
- 11) Kuriyama Y. and Ozaki : Longshore current distribution on a bar-trough beach-Field measurements at HOF and numerical model, Rep. of Port and Harbour Res. Inst., vol. 32, No. 3, Pp. 3-37, 1993.
- 12) 戸巻昭三, 竹沢三雄：石狩湾新港における防波堤周辺の海浜変形について, 海洋開発論文集, 第15巻, PP. 475-480, 1999.
- 13) James, I. D. : A non-linear theory of longshore currents, Estuarine and Coastal Marine Science, Vol. 2, PP. 235-249, 1974.
- 14) 佐藤慎司, 福浜方哉, 堀川清司：斜面上における不規則波の碎波変形と底面流速に関する実験的研究, 第34回海講論, PP. 36-40, 1987.
- 15) 榎木亨：漂砂と海岸侵食, PP. 100-103, 森北出版(株), 1982.