

海岸構造物周辺の海浜流と地形変化の特性

Characteristics of nearshore current and beach profile near the coastal structures.

建設省土木研究所	正会員	橋本 宏
同	同上	宇多高明
同	同上	林 敏夫

1. ま え が き

比較的平坦な砂浜海岸における海浜流は、砕波帯付近の物質の拡散や、海岸構造物周辺の海底地形の変化に重要な役割を有することが知られている。この海浜流の研究に関しては、堀川・佐々木ら¹⁾が現地観測によって多くの新しい知見を得ており、また離岸流系の発生理論については、日野²⁾を始めとして多くの人々が精力的に研究を進めている。一方、実際の海岸の流れやそれによる地形変化の予測等の問題については、著者ら³⁾も構造物周辺の海底地形変化に関して、固定床平面実験によって構造物周辺の海浜流の特性を明らかにした。また数値モデルによる流況の再現性について論じ、波の場が与えられた時には、流れの場の定量的予測が可能なることを明らかにした。しかし波と流れによる地形変化を論ずるに際しては、波動と流れの場の予測、及び地形変化の予測に関して多くの問題が解決されねばならない。

本論文では、上記の第2、第3の問題について検討を進めることを目的とし、その第1歩として既に行った固定床平面実験と同条件のもとで移動床実験を行い、海底地形が時間的に変化する条件における海浜流の再現性を検討した。この結果移動床においても流況や水位の再現性は相当良好なことが判明した。このため、新たに波と流れによる地形変化のモデルを作成し、実験値との比較を行うことにした。

2. 実験方法

実験は鹿島試験所の幅30m、長さ25mの平面水槽を用い、波の諸元、水深、初期海底勾配等を一定とし、海岸構造物の種類と配置を変えて行った。実験条件としては、入射波高が6.5m、周期は1.2秒、平坦部水深は35cm、初期海底勾配は1/20とした。構造物の種類は突堤、潜堤、離岸堤であり、潜堤は汀線と平行に設置した。また離岸堤は不透過構造とした。底質は中央粒径0.35mmの砂を用いた。次に、測定は波高、水位流況、拡散、空隙率及び地形測量について行った。これらの測定は地形変化を考慮して実験開始後0.5時間と20時間後の2回行った。まず波高は6台の容量型波高計を用いて50cm間隔で測定した。水位は水位計

(7台)によって測定した。流況は浮子を投入してその移動状況を写真撮影して求めた。浮子には小さなポリビンのふた(径約3cm)を4色に着色して使用した。またこれと同時に拡散係数を算定するために、フローレンセンを注入しその拡がり状態も撮影した。撮影は浮子投入後2.4秒に1枚の割合で行った。更に、波向測定はスケッチと写真撮影によって行い、また空隙率は体積約250cm³の空缶を用いて測定した。

3. 解析方法

基礎式は、汀線方向にx軸、これと直角にy軸をとり、各々の方向の流量をM、Nとし、また静水面より上方に水位 η をとれば、式(1)~(3)となる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{2M}{H} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{H} \frac{\partial M}{\partial y} + \frac{M}{H} \frac{\partial N}{\partial y} = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} - r_b U_0 U + L \nabla^2 M - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{H} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{H} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{2N}{H} \frac{\partial N}{\partial y} = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} - r_b U_0 V + L \nabla^2 N - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ただし、 $M=U(h+\eta)$ 、 $N=V(h+\eta)$ であり、 S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yy} は radiation stress を示し、波のエネルギーと群速度によって表示される。その定義式については文献3)を参照されたい。

計算は差分法によって式(1)~(3)を差分化して解くが、その方法についてはここでは省略する。

4. 実験・計算ケースと計算条件

実験は表-1に示すように、突堤間隔を3 mと4 mの2種類とし、構造物の組合せを4種類変えて行った。数値計算はこれら8ケースのうち、代表例として突堤+潜堤の場合(ケース①)と突堤+離岸堤(ケース④)の2ケースを選んで行うことにした。計算条件として、格子間隔(Δs)は25 cmとした。したがってこの Δs で分割された格子点で波高と入射角を与える必要があるが、これは50 cm間隔で測定された実験値を補間して求めた。次に水平方向の渦動粘性係数は後に述べるように実験値より定めた。また摩擦係数は $\tau_b = 0.0064$ とおいた。

5. 実験と計算の比較

5.1 拡散係数

まず最初に、染料の拡がりより求めた拡散係数を等価半径(r)との関係において図示したのが図-1, 2である。図-1は突堤間隔が3 m, 図-2が4 mの場合である。ただし図中の○印は、構造物の配置・形状と測定時刻の区別(A=0.5時間, B=20時間)がなされている。図-1と図-2を比較すると、平均的には突堤間隔が狭い方が僅かに拡散係数が小さい傾向を持つものの、ほぼ同程度の値を有しており、両者共図中実線で示された2乗則に従っている。平均的な拡散係数としてはほぼ10~20 cm^2/sec と言えよう。

次に図-3は構造物の種類別による係数の変化を調べたものであり、代表例として突堤+潜堤(ケース①), 突堤+離岸堤(ケース④と⑧)が示されている。これによれば、ケース①の場合は他のものと比較すると少し大きな値を有しており、潜堤では構造物で囲まれた領域内の乱れ流速が大きいと考えられる。

一方、従来より海浜流計算では渦動粘性係数はLonguet-Higgins⁴⁾の定義した式(4)を用いて来たが、

$$L = \rho N |y| \sqrt{gh} \quad (4)$$

仮に渦動粘性係数と拡散係数が等しいとしたとき、実験条件に対応する拡散係数は図-3の細い実線で示す範囲で変化する。この値は平均的にみると1オーダー実験値より大きい。この原因としてはいくつかの理由が考えられるが、Longuet-Higginsの定義式は本来構造物の存在しない海岸における値を示すものであり、ここで扱っているような構造物に囲まれた領域の係数の算定に適さないことなどが考えられる。

以上のように、拡散係数は式(4)によるものより1オーダー小さい結果が得られたために、数値計算では渦動粘性係数の値としては実験による拡散係数の範囲と同程度として計算を行った。

5.2 潜堤の場合(ケース①)

実験で測定した波高分布については、その詳細な点をここでは説明することができないが、その特長は次の通りであった。すなわち、0.5時間においては開口部の波高が7 cm以上あつ

表-1 実験計算ケース

実験ケース	構造物の種類	突堤間隔 ℓ	摘 要
①	突堤+潜堤	3 m	
②	突堤+潜堤	4 m	
③	突堤+離岸堤	3 m	T字型, 開口部ナシ
④	突堤+離岸堤	4 m	"
⑤	突堤+離岸堤	3 m	T字型, 開口部アリ
⑥	突堤+離岸堤	4 m	"
⑦	突堤+離岸堤	3 m	開口部に離岸堤
⑧	突堤+離岸堤	4 m	"

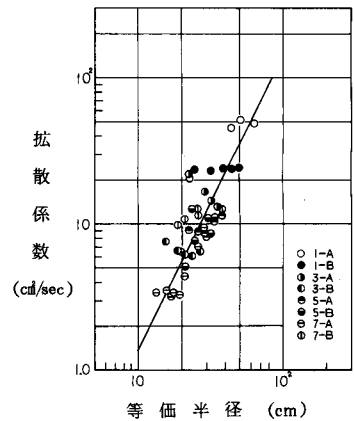


図-1. 拡散係数と等価半径($\ell = 3 \text{ m}$)

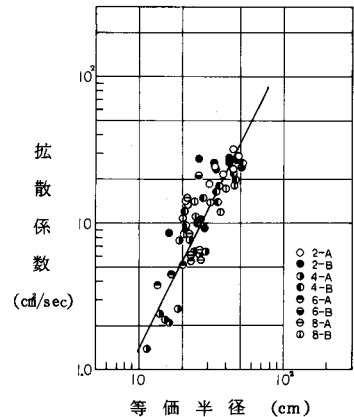


図-2. 拡散係数と等価半径($\ell = 4 \text{ m}$)

たが、20 時間後には海底地形変化のために約 6 cm に低下した。このような波高分布の変化に対応して流況は刻々その姿を変えた。これを示すのが図-4 と 5 である。図-4 は初期 0.5 時間の流況を、また図-5 は 20 時間後の流況を示している。ただし、図中の数字は 2.4 秒おきに定めた浮子の位置の変化順序を示しており、格子間隔 (50 cm) との対比より移動距離を求め、それを経過時間で割れば平均速度となる。図-4 では突堤間のはぼ中央より流入する流れがあり、また両側へ循環流が生じている。一方、海底地形変化に伴って流況は変化し、図-5 ではほぼ 1 個の反時計回りの循環流が形成されている。この場合の流況は固定床の場合の特長³⁾と同様である。このケースでは流況は時間的に相当変化し、また拡散係数も大きいことと考え合わせると潜堤内の底質は安定化しにくいことが予想される。

次に、計算による流況を示すのが図-6、7 である。これら

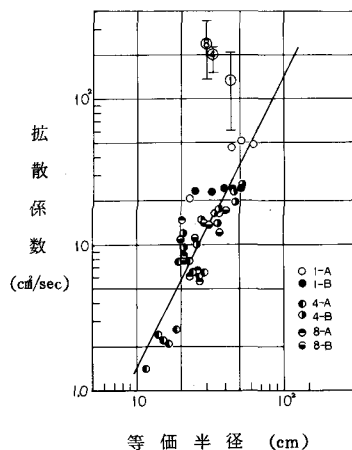


図-3. 拡散係数と等価半径

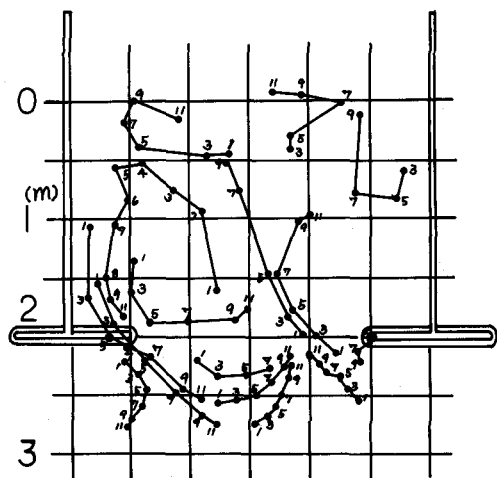


図-4. 流況図 (①-A, 実験)

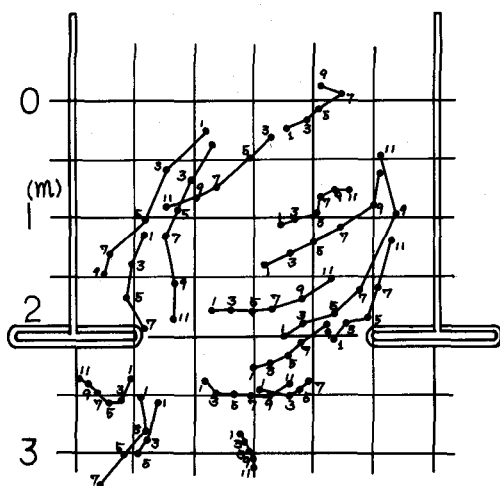


図-5. 流況図 (①-B, 実験)

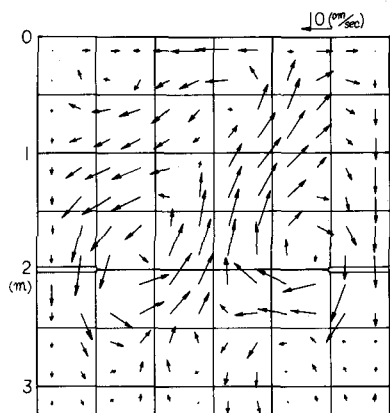


図-6. 流況図 (①-A, 計算)

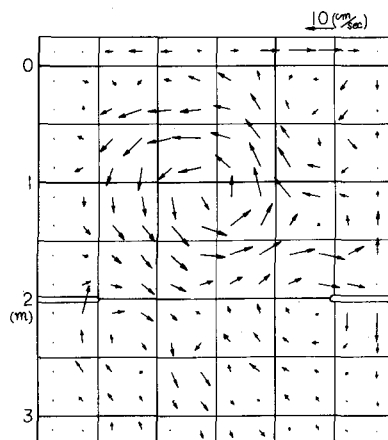


図-7. 流況図 (①-B, 計算)

のうち図-6は図-4に、図-7は図-5に各々対応している。ただし渦動粘性係数としては図-3より求めた平均的な拡散係数 $K = 30 \text{ cm}^2/\text{sec}$ を用いた。

まず 0.5 時間後のものを比較すると、計算値においても突堤間の中央部に向岸流が発生し、やがて二つの循環流を形成しており、流況は良い一致をみている。また 20 時間後には、ほぼ 1 個の反時計回りの循環流が発生しているが、このパターンも図-5と良く対応している。また図-8は初期汀線より 50 cm の位置における wave set-up の沿岸方向分布について実験と計算の比較を試みたものである。初期地形は波の条件に対して非平衡な状態になっているが、この地形は波との response に

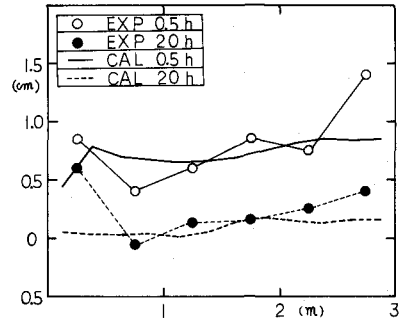


図-8. Wave set-up の沿岸方向分布

5.3 離岸堤の場合 (ケース④)

次に図-9, 10 は離岸堤を配置した場合の流況であり図-9 は 0.5 時間後の、また図-10 は 20 時間後の流況を示している。これらに対応する波高分布の特長としては、離岸堤が不透過のため堤背後の波高は開口部の約 1/4 に低下した。また波高分布は時間的に変化したが、その大きさや波向の変化は潜堤のときよりも小さかった。流況の特長としては、両者とも二つの循環流が形成³⁾されている。ただし 20 時間後の方が波高分布の場所的な変化が大きかったために典型的な循環流となっている。

次に、計算による流況を示すのが図-11, 12 である。基本的な特長は両図共同様であるが、図-12 ではトンボロの形成を考慮しているために、流況が僅かに変化している。実験値 (図-9, 10) との比較では 0.5 時間においては実験値が多少バラツキがあるために、必ずしも相似性が高いとは言えないが、20 時間後のものについてはほぼ一致していると言えよう。ところで、このような循環流は、堤背後の波高が小さいことと考え合わせると、浮遊した底質が堤の背後方向へ輸送されることによって、トンボロの形成が促されると考えられよう。

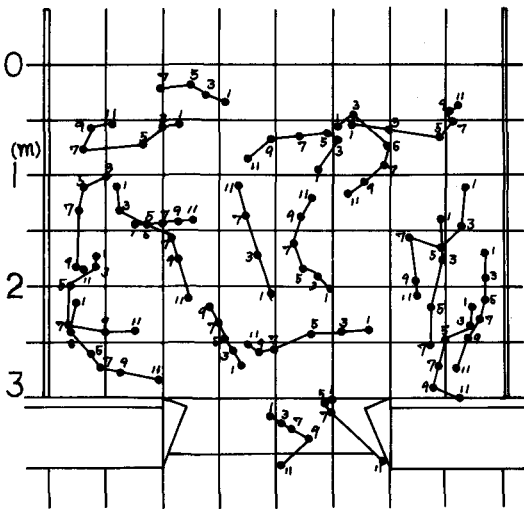


図-9. 流況図 (④-A, 実験)

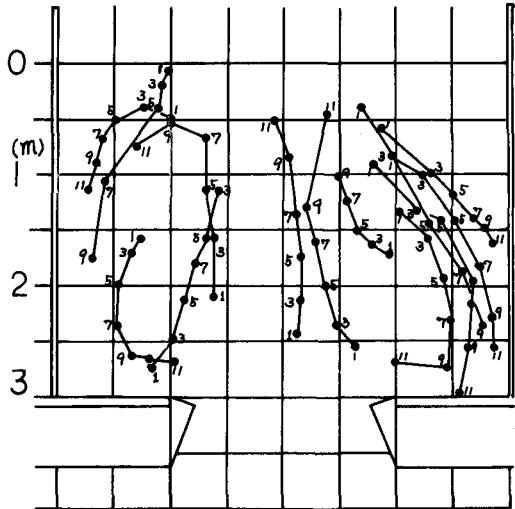


図-10. 流況図 (④-B, 実験)

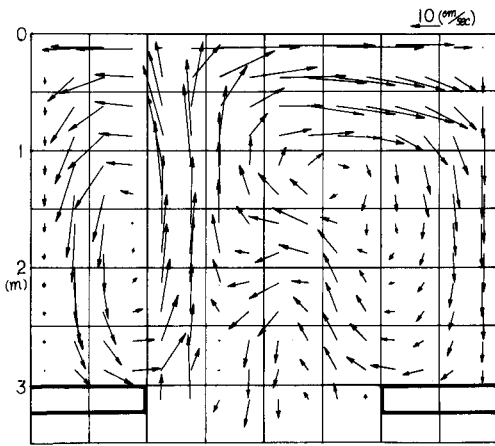


図-11. 流況図 (④-A, 計算)

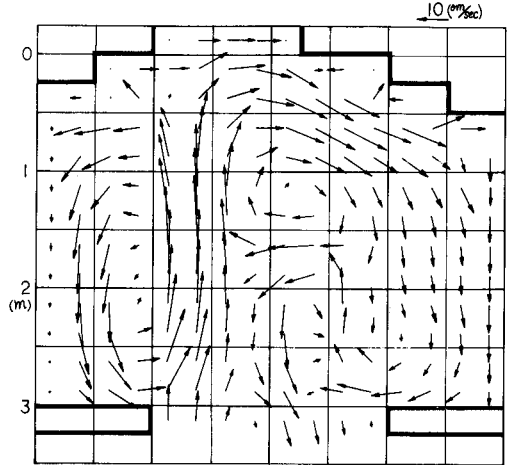


図-12. 流況図 (④-B, 計算)

6. 地形変化モデル

前節の検討によって移動床実験においても流れの再現性はほぼ良好ことが明確になったので、次に流砂量公式の導入によって波と流れによる地形変化のモデル化の可能性について検討することにした。まず図-13に示すように、汀線方向に x 軸、これと直角に岸向きに y 軸をとる。また x 、 y 方向の流れの流速を (U , V) とし、更に波による底面流速の振幅を u_0 、波の入射角を θ とすれば、波と流れを合成した流速 $\underline{u}$ は式(5)となる。

$$\underline{u} = (u_0 \cos \theta \cos \omega t + U, u_0 \sin \theta \cos \omega t + V) \quad (5)$$

一方、流砂量 $\dot{u}$ は底面摩擦力を τ とおけば、

$$\dot{u} = K \tau |\underline{u}| \quad (6)$$

と置くことができる。ここに、

$$\tau = C \rho \underline{u} |\underline{u}| \quad (7)$$

である。式(7)を式(6)へ代入し、 x 、 y 成分を分離した後、一周積分して平均値を求めると、

$$\bar{i}_x = KC \rho (U^2 + V^2) + \frac{1}{2} KC \rho (U u_0^2 + 2 U u_0^2 \cos^2 \theta + 2 V u_0^2 \cos \theta \sin \theta) \quad (8)$$

$$\bar{i}_y = KC \rho (U^2 + V^2) + \frac{1}{2} KC \rho (V u_0^2 + 2 U u_0^2 \sin \theta \cos \theta + 2 V u_0^2 \sin^2 \theta) \quad (9)$$

となる。ただし、 $\bar{i}_x$ 、 $\bar{i}_y$ は重量単位での輸送量を示すが、これらは $(\rho_s - \rho)g$ で割れば体積単位での輸送量 (q_x , q_y) に変換される。ただし、 ρ_s は底質の密度である。

地形変化は、以上の結果を地形変化に関する連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_x}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial x} \right) \quad (10)$$

へ代入すれば求めることができる。ただし流れの場合は非常に複雑なために数値計算が必要になる。このためには、入射角は実験値を用い、また各点の流速は海浜流計算の結果を利用すれば良い。

さて、図-14は、ケース④について実験によって得られた20時間後の水深より0.5時間における水深を差し引いて求めた地形変動量を示している。図中正の領域は侵食領域を、一方負の領域は堆積した場所を示している。これによれば、底質は離岸堤背後に運ばれる一方、大量の底質がいわゆる直角方向漂砂によって

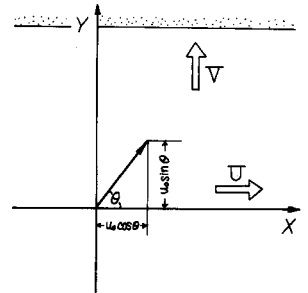


図-13. 座標系

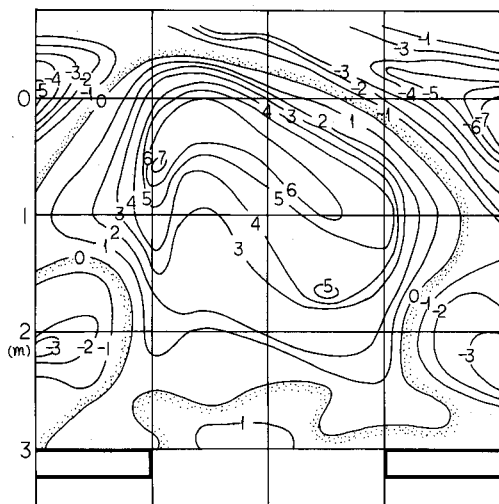


図-14. 平面的地形変化(実験値, cm単位)

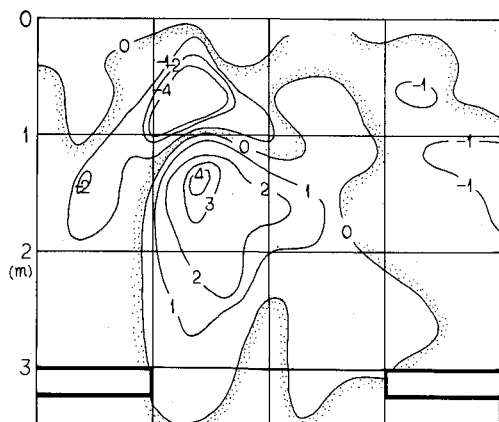


図-15. 平面的地形変化(実験値, cm単位)

初期汀線以上の地点に打上げられていることがわかる。このような初期汀線上に打上げられる漂砂は、ここで提案したモデルでは検討し得ないことが予想されるが、一応モデルとの比較を行うこととする。

ところで、本来ここで提案したモデルは、流況計算と組合せた繰り返し計算を必要とするが、ここでは定性的な比較に止めることとして繰り返し計算は行わずに計算を行うことにする。更に、実験で得られた地形変化とそのオーダーが等しくなるように係数値を選択する。図-15は、底質の比重を $\rho=2.65$ 、摩擦係数を $C=0.0064$ 、空隙率を $\lambda=0.6$ 、また係数 K として 5.6×10^{-3} とおいたときの計算結果を示している。図-15と図-14を比較すると、離岸堤の背後が堆積し、中央部が侵食される傾向は一致するものの、侵食位置が全体として沖合へ移動している。この原因は既に述べたように、直角方向に波によって打上げられる底質の移動量をここで提案した方法では扱い得ないことが主因であり、この点については更に検討が必要であろう。

7. あとがき

本論文では、構造物周辺の海浜流と地形変化に関して、移動床水理実験を行うとともに、それに対応させて海浜流計算を行った。この結果、場所的・時間的に海浜地形が相当変化する場合においても海浜流計算モデルの再現性は相当良好なことが明らかになった。このため、この計算値を用いて地形変化計算を行うことは一応合理的と考えられたために、新たに二次元地形変化モデルを提案し、モデル計算を行った。しかし実験値との比較は定性的な段階に止まった。モデルについては今後充分な検討が必要である。特に、ここで用いた流砂量式は拡散タイプの現象を扱えないし、また係数 K については、砕波の乱れによる浮遊砂量の相違の情報が入っていない点等については再検討が必要である。

参考文献

- 1) 佐々木民雄・堀川清司・久保田進：海浜流に関する研究(第5報)，第24回海講論文集，1977。
- 2) 日野幹雄：海浜流系の発生理論，土木学会論文報告集，第225号，1974。
- 3) 橋本 宏，宇多高明・林 敏夫：海浜流の再現性に関する研究，第22回水講論文集，1978。
- 4) Longuet-Higgins, M. S. : Progress in the study of Longshore Currents, pp.203 ~ 248, 'Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport, edited by R. E. Meyer, Academic Press, 1972.