

海浜流の発生機構に関する実験的研究

田 中 寛 好*・ 和 田 明**

1. はじめに

最近、海岸環境問題と関連して海浜流に関する研究が多くの研究者によって実施されつつあるが、海浜流の発生機構やその特性について詳細に検討し適確に論じたものではなく、こうした物理現象、物理過程把握のための基礎研究以前に数値モデルの設定や数値シミュレーションの実施^{1),2),3)}に踏みきっている場合が多いと思われる。一方、海浜流に関する実測調査が積極的に行われるようになり、実現象の把握という意味においてそれ自体好ましいことであるが、種々の条件がからみ合った現地の複雑な現象から海浜流の発生機構やその他の重要な特性を抽出することはなかなか容易ではないと思われる。

こうしたことに鑑み、著者等は、条件の制御、単純化が容易でありしかも定常現象のみならずメカニズム解明の鍵をにぎると思われる遷移現象の把握をも可能な水理実験手法の有効性を認め、可能な限り精密な測定によって海浜流の発生機構やそれと関連する砕波帯内における重要な物理過程を解明することを目的とした研究を実施した。その結果より得られた知見をここに報告する。

2. 実験内容

先の著者等の研究⁴⁾における海浜流の発生機構に関する考察・知見に対してさらに確固たる論拠を得るため、本研究においては、主として以下の項目について実験を実施しその結果についての検討を行なった。

1) 砕波帯内の平均水位平面分布と海浜流速度平面分布との関連性の把握、2) 波が作用しはじめた時の沿岸流の加速度と沿岸方向平均水位勾配に基づく加速度との関連性の把握、3) 波が作用し終わって平均水位上昇が消滅した時点以降の沿岸流減速特性からの無次元海底摩擦係数の算定、4) 沿岸流が定常状態の際水位勾配による力と摩擦力とがバランスすると仮定した時の見かけの無次元海底摩擦係数の算定、5) 波作用開始初期の砕波帯内での岸方向水粒子輸送の実態把握。

本実験は、砕波帯内とその近傍の物理機構や過程を明確に把握する目的の基礎研究に資するものであるため、波は規則波でしかも現地換算の平常時のものよりかなり波高が大きく周期の長いものを対象としている。

実験に使用した水槽は、長さ 50 m、幅 22.6 m、高さ 1.5 m の平面水槽である。水槽の一端には造波機が設置してあり、他端には図-1 に示すような遠浅の海底模型地形が縮尺 1/150 で製作されている。なお、海底地形は底面モルタル仕上げの固定床であり、地形変化が海浜流の特性に与える影響は無視して取扱っている。水面波形の測定には電氣的相互干渉が無く零点移動のほとんど見られない容量式波高計を用い、海浜流流速は超音波式流速計を用いてオイラー的に測定した。静水面下の水粒子輸送速度も超音波式流速計を用いて測定したが、静水面上の水粒子速度を測定する際は波の山谷が交互に来襲する結果センサーが水中に没したり空中に出たりするため超音波式流速計の使用は不可能である。そこで、円筒形ホットフィルム流速計を用い、センサーが空中に出ても焼け切れたり劣化したりしないように、設定抵抗と冷抵抗の比を 1.01 に下げて測定を行なった。wave set-up の測定は厳密な精度を必要とするため、ペン書き記録用紙上に収録したアナログ水面波形を 1 mm 方眼紙にトレースして静水面上と静水面下の面積を方眼により数え上げ、静水面からの平均水面偏位分を求めた。

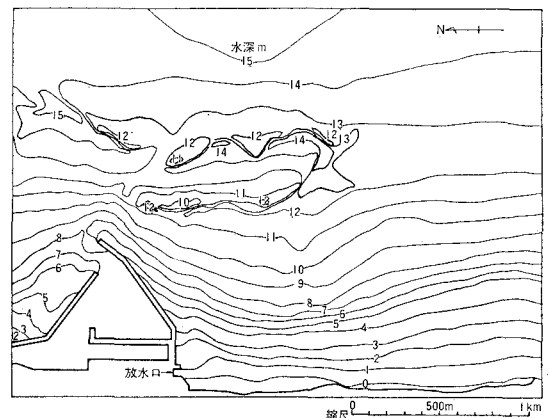


図-1 模型に採用した海域の等深線図

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所土木技術研究所 環境水理部海洋環境研究室

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木技術研究所 環境水理部長

3. 実験結果とその考察

3.1 海浜流発生の直接要因

海浜流の発生要因を明らかにするため、まず、平均碎波波高 3.6 cm, 周期 2.5 s の規則波を作用させて実験を実施した。現地換算で周期の長い波を使用したのは、波高, 平均水位, 海浜流流況等の比較的安定した定常状態が得られ, 定量的把握が容易なためである。

上記の波が汀線に対し直角に入射する条件下で, 現象が定常に達した際の碎波帯内波高平面分布と海浜流速度平面分布との関係を図-2, 碎波帯内 wave set-up の平面分布と海浜流速度平面分布との関係を図-3 に示す。従来の研究の多く⁵⁾は, 碎波波高の小さい所で沖向き, 大きい所で岸向きの海浜循環流の形成は碎波帯内外に生じた radiation stress つまり波高の汀線方向変動に起因するとしており, wave set-up の汀線方向変動が海浜流に及ぼす寄与についてはあまり注目していない。図-2 に示す本実験結果においても, 碎波帯幅が狭く碎波波高の小さい所で離岸流, 碎波点が沖合に突出し碎波波高の大きい所で向岸流が卓越する傾向にあるが, 沿岸流については大局的に波高の大きい場所から小さい場所へ向っているものの局所的には波

による radiation stress の沖岸方向勾配に基づく岸向きの力を上回るようになる。その時点で沖向きの加速度が働いて離岸流が発生しはじめる。また, 離岸流の発生する場所での碎波点のエネルギーレベルは他の碎波点のそれに比べて低い。

図-2, 3 より得られる知見を以下にまとめてみる。

1) 沿岸流つまり汀線に平行な流れは碎波帯内平均水位の汀線方向勾配によって主に支配される。また, 波高分布は set-up を介して間接的に沿岸流流向に関係しているといえよう。2) 離岸流つまり岸沖方向の流れは平均水位分布のみで支配されるとは限らず, 碎波線近傍の岸沖方向水位勾配による沖向きの力が radiation stress の沖岸方向勾配による岸向きの力を上回る場所で発生するものと思われる。

したがって, 本実験結果からは radiation stress の汀線方向変動が海浜流を生み出すとする従来の研究の結論には問題があると考えられる。さらに, 東京電力株式会社の実施した海浜流現地実測調査⁶⁾によっても沿岸流流向と平均水位勾配との相関性が見出されている。

以上の検討より定常状態において沿岸流と汀線方向平均水位勾配との関係の重要性が把握できたが, さらに,

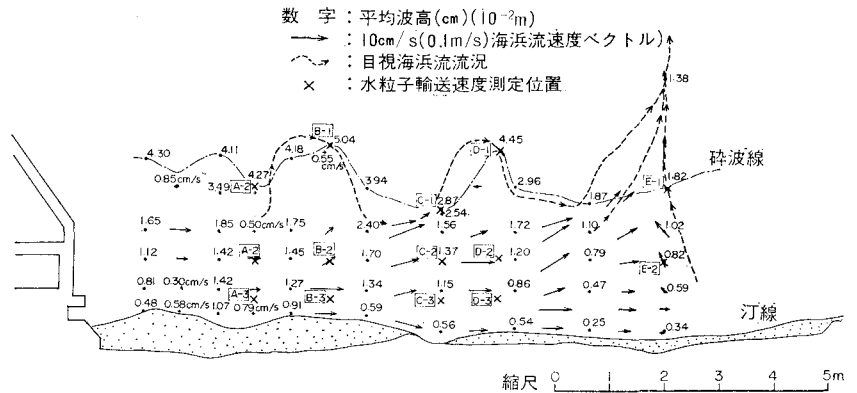


図-2 海浜流速度平面分布と波高平面分布との関係

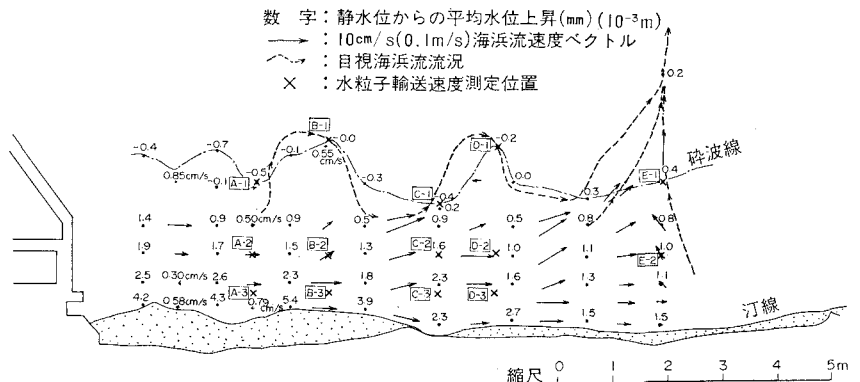


図-3 海浜流速度平面分布と平均水位平面分布との関係

沿岸流が, 碎波帯内の平均水位の低い場所に流入するとその場所の水位は初期よりも上昇するため, 碎波線近傍での岸沖方向水位勾配による沖向きの力が大きくなり, 波

沿岸流が平均水位勾配によって生ずるという明確な根拠を得るため、平均碎波波高 2.5 cm~3.6 cm (0.025 m~0.036 m)、周期 1.25~2.5 s、碎波位置での入射角 (波峰線と汀線とのなす角度) 0°~54° (0~0.94 rad) の数種類の規則波を用い、碎波帯内数ヶ所で、波作用開始初期つまり摩擦力や渦粘性が無視できる時期の沿岸流加速度と汀線方向平均水位勾配に基づく加速度との関係を調べた。

図-4 にはその結果の一例を示す。(a) は、遷移状態の沿岸流流速から沿岸流初期加速度を求めたものであり、(b) は、沿岸流測定点近傍における波作用開始初期の平均水位差より汀線方向初期平均水位勾配に基づく加速度を求めたものである。両加速度はかなり良い一致を示している。さらに、直角入射のみならず斜め入射の場合をも含めた種々の規則波が作用しはじめた時の両加速度を比較したのが 図-5 である。この図より、波がいかなる角度で入射する際にも両加速度はかなり良い一致を示しており、沿岸流の発生は主として set-up の汀線方向

変動に起因していることが明らかとなった。以上の如く本実験結果より得られる結論は、波が斜めに入射する際の沿岸流は shear radiation stress S_{xy} の沖岸方向勾配によって誘起されるとする従来の理論⁷⁾とは異なる興味深いものである。波が斜めに入射する際の沿岸流の発生に関して著者等は以下の如く考える。

波が来襲しはじめた際、汀線に沿った波の上手側では下手側よりも先に水粒子補給が行われ波の沖岸方向成分によって set-up が形成される。しかるに、下手側では未だ波が到達しないため set-up は存在しない。従って、上手側と下手側では汀線方向に平均水位差が生じ沿岸流が発生しはじめる。波が来襲しはじめてから十分時間が経過したある時点を考えて、上手側は下手側に比べてそれまでに多くの波が進入しており岸方向に輸送された水粒子総量が多いため set-up も下手側より大きくなるものと思われる。それ故、常に汀線方向平均水位勾配が存在する。これが底面摩擦力とほぼつり合った段階で波の上手側より下手側に向う定常沿岸流が形成される。

3.2 底面摩擦の効果

外力によって一度沿岸流が生ずるとそれに伴って摩擦、渦粘性、非線形慣性効果等が現われるが、摩擦による抵抗力が最も支配的であってこの効果が主として定常状態の流速を決定するものと考えられる。従って、海浜流流速場を予測するためには摩擦係数の見つくりを適切に行わなくてはならない。

本節においては、流れの過渡状態を利用したアプローチによる無次元摩擦係数算出結果を述べ、さらに沿岸流に及ぼす摩擦力の役割の重要性を把握する。

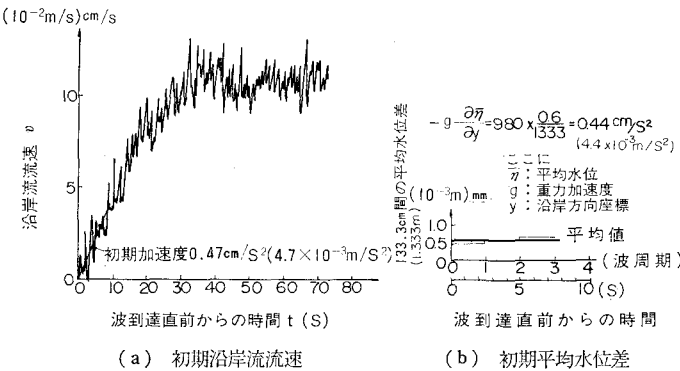


図-4 波作用開始初期の沿岸流加速度と汀線方向平均水位勾配に基づく加速度算出の一例

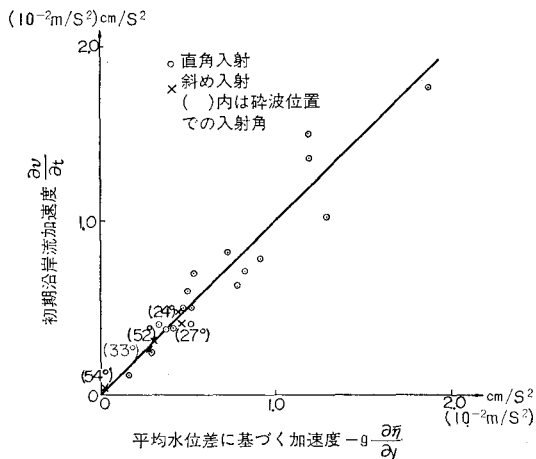


図-5 波作用開始初期の沿岸流加速度と汀線方向平均水位勾配に基づく加速度との関係

沿岸流の発達する様子は、図-4 (a) に示す如くであるが、流れの加速度は初期値から序々に小さくなり 0 に近づく。これは主に海底摩擦による抵抗力つまり負の加速度が加わってくるためである。上記の現象は運動方程式を用いて近似的に表現すれば以下ようになる。

$$\frac{\partial v}{\partial t} \approx -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - F \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 v : 沿岸流流速、 η : 平均水位、 F : 摩擦項、 t : 時間、 y : 汀線方向座標、 g : 重力加速度
 従って、波が作用し終わって set-up が消滅した時点以降つまり外力としては摩擦力のみが作用していると考えられる条件下での流れの減速特性を利用すれば摩擦特性が評価できるはずである。このような考え方に基づいてモルタル仕上げの模型海底面上の摩擦力特性および摩擦係数を求めた実験結果を 図-6 に示す。この図より摩擦による沿岸流減速度は流速のほぼ 2 乗に比例することが

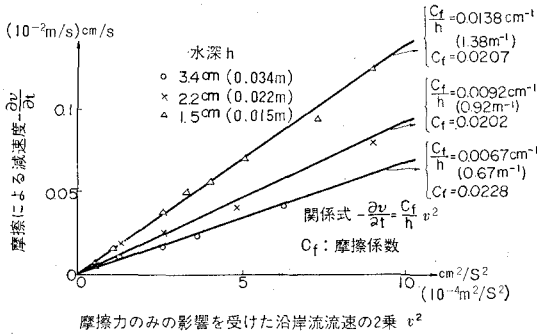


図-6 模型海底面上の摩擦特性および無次元摩擦係数

判明した。従って、運動方程式中の摩擦に係する項 F は

$$F = kv^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

という形で表現できる。 k は図に示すように水深 h にほぼ反比例する。無次元海底摩擦係数 C_f を用いれば、

$$F = C_f/h \cdot v^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

で摩擦項が表現し得、 C_f の値は約 0.02 となる。

次に、沿岸流が定常状態に達した際も (1) 式が成立するものと仮定し、定常状態の平均水位勾配から

$$C_f' = -g \frac{\partial \eta_s}{\partial y} \cdot \frac{h}{v_s^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(suffix s は定常状態での値を示す)

によって求めた見かけの摩擦係数 C_f' の結果を図-7に示す。 C_f' はかなりのバラツキを有するものの平均的には 0.02 近辺であり C_f の値とほぼ等しいことが判明した。このバラツキは C_f が水平渦粘性や非線形慣性項の効果も含んでいるためであろう。

以上の結果より、モルタル仕上げの模型海底上の無次元摩擦係数は約 0.02 であること、沿岸流が定常状態の際、水平渦粘性や非線形慣性項の効果も無視し得ないものの平均水位勾配に基づく力と海底摩擦力とが重要な役割を果たしており両者がほぼ力学的にバランスしている

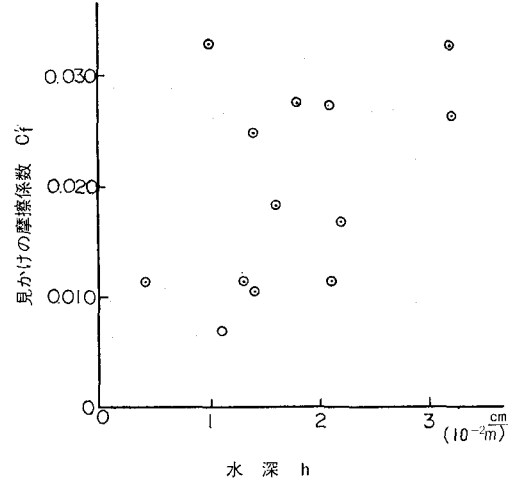


図-7 定常状態の沿岸流流速と平均水位勾配から求めた見かけの摩擦係数

ことが把握できた。

3.3 岸方向水粒子輸送

3.1 においては set-up の汀線方向変動が海浜流の発生に重要な役割を果たすことを述べたが、海浜流の発生、形成過程を明らかにするためには、set-up の発生原因にまでさかのぼる必要がある。本節では、set-up の発生原因を探るため、海浜流やもどり流れが形成されていない時期の砕波帯内における波による岸方向水粒子輸送の実態を実験によって把握した結果について論じる。

図-8 は、図-2, 3 に示す砕波帯内の数点で作用開始第1波 (対象とした規則波は 図-2, 3 におけるものと同じ) による1周期平均岸方向水粒子輸送流量を測定した結果である。円筒形ホットフィルム流速計でとらえた水粒子速度は厳密には水平、鉛直両成分を合成したものであるが、本実験での砕波帯内の波は長波領域にあるため流速計出力を水平成分水粒子速度とみなしても近似度は十分であると考えられる。A~E どの測線について

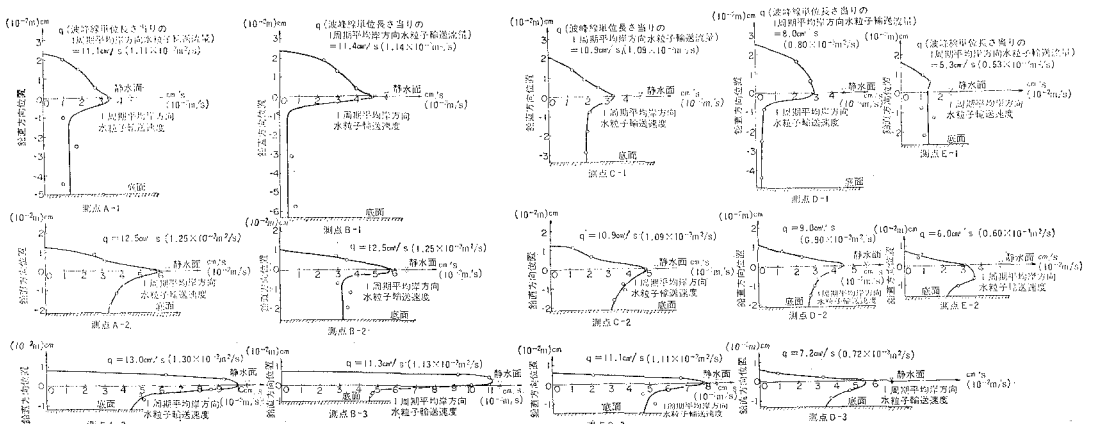


図-8 作用開始第1波による砕波帯内での1周期平均岸方向水粒子輸送

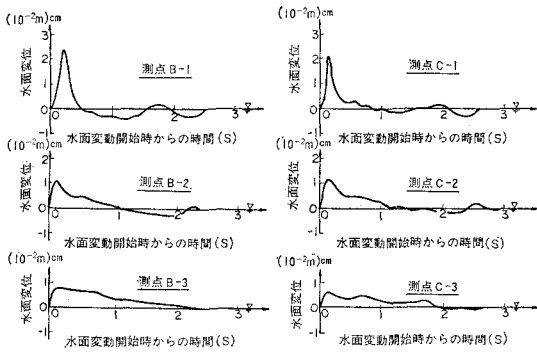


図-9 作用開始第一波の砕波後の時間波形変化2例

も沖岸方向の水粒子輸送量はほぼ保存されており、しかも set-up の大きい測線ほど流量が大きい傾向にある。従って、この岸方向への初期輸送流量が set-up の形成に大きな影響を及ぼすものと考えられる。また、将来離岸流が卓越する場所の初期水粒子輸送流量が小さいのも一つの特徴である。図-9 は作用開始第1波の砕波後の時間波形変化を示す2例である。岸に近づくにつれて波高は小さくなるが、静水面上の波山部分の占める時間比率は大きくなる。岸方向水粒子輸送、波形変化、set-up は次のように関連させて考えることができる。

汀線に近づくにつれ水深が小さくなるため岸方向の水粒子流量を保存するには鉛直方向平均の輸送速度が増大しなければならない。そのために波は進行するにつれてより効率よく水粒子を輸送できるような形に変化する。つまり、1周期のうち水粒子が岸へ輸送される波山の期間が長くしかも波高は小さいが水粒子輸送速度の大きい段波形状を呈してくる。段波はほとんどの部分が波山のみで形成されているため静水面より平均水位は上昇しており、set-up が発生したといえる。エネルギー保存則に基づいて考えれば、岸に向って波エネルギーは減衰するがそれに応じて set-up が起こり位置エネルギーを増加させる。底面摩擦と渦粘性によるエネルギー逸散合計は従来考えられているほど小さくなく、平均水位の上昇に費やされるエネルギーが意外に大きいと思われる。

以上述べたのは波作用開始初期の現象であるが、波作用後時間が経つにつれ海浜流が発達するので沖岸方向水粒子輸送流量は保存されなくなる。また、静水面下の大部分の領域では平均輸送速度は沖向きとなり岸への輸送はほとんどが静水面上の領域に限られるようになる。さらに、set-up も初期の大きさから変化しつつ最終的には海浜流を含めた質量保存則と radiation stress の勾配、底面摩擦、水平渦粘性、非線形慣性項等との力学的つり合いでその大きさは定まる。しかし、現地や平面水槽実

験では鉛直方向平均の輸送速度とその沖岸方向勾配が存在するため非線形慣性項の寄与が無視できず、二次元水路実験におけるように radiation stress の勾配とのつり合いのみから set-up の大きさを単純には決められない。しかも、本実験より砕波帯内の水粒子輸送量はかなりの大きさを有することが判明しており、radiation stress 中の質量輸送に基づく項はかなり重要であるものと推察され、微小振幅理論に基づく議論は不適切であろう。

4. 結 論

海浜流の発生機構に関連した現象を解明するための実験より得られた結論をまとめると以下ようになる。

- (1) 砕波後の波は、岸方向水粒子輸送流量を保存しようとし、進行するにつれて小水深でも効率よく水粒子を輸送できるような段波の形に近づくが、この波はほとんどの部分が波山のみで形成されているため平均水位は静水位より高くなる。このように set-up の発生は波作用初期の岸方向水粒子輸送流量の保存と関連している。
- (2) 沿岸流発生の直接の原因は set-up の沿岸方向変動に基づく圧力差である。
- (3) 沿岸流と離岸流は独立に発生するのではない。沿岸流が先に発生し、平均水位の低い場所に流入した後、砕波線近傍での岸沖方向水位勾配による沖向きの力が radiation stress の沖岸方向勾配による岸向きの力を上回る場所で砕波線を貫いて沖に流出しはじめる。これが離岸流の発生である。
- (4) 摩擦力は流速のほぼ2乗に比例し、モルタル仕上げの模型海底上の無次元摩擦係数は約 0.02 である。
- (5) 平均水位勾配に基づく力と海底摩擦力とが沿岸流の形成に重要な役割を果たす。

参 考 文 献

- 1) 橋本 宏・宇田高明: 海浜流の数値計算法とその応用, 第21回海講論文集, pp. 355~360, 1974.
- 2) 佐藤昭二・永井紀彦・小笹博昭: 波による海浜流の数値計算の一例, 港湾技研資料, No. 290, 16 p., 1978.
- 3) 佐々木民雄: 海浜流の数値予測, 第25回海講シンポジウム資料, pp. 1~8, 1978.
- 4) 田中寛好・和田 明・小森修蔵・竹内 出: 拡散に影響を及ぼす海浜流の特性, 第26回海講論文集, pp. 504~508, 1979.
- 5) 例えば Noda, E. K.: Wave-induced nearshore circulation, Jour. Geophy. Res., Vol. 79, pp. 4097~4106, 1974.
- 6) 例えば 東京電力株式会社: 福島第一原子力発電所海浜流調査(第3回)報告書, 128 p., 1979.
- 7) Longuet-Higgins, M. S.: Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, Jour. Geophy. Res., Vol. 75, pp. 6778~6801, 1970.