

波浪・海浜流共存場における海浜変形と漂砂量モデル

清水 琢三*・三村 信男**・渡辺 晃**

1. 緒 論

近年、海岸構造物の設置等に伴う海浜変形を数値シミュレーションによって予測しようとする試みが盛んに行なわれるようになってきた。いわゆる三次元海浜変形予測モデルにおいては、波浪・海浜流場の計算結果に基づいて漂砂量の分布が求められ海浜地形の変化が計算されるという手順がとられるが、そのためには波と海浜流が共存する場合にも適用できる漂砂量算定式が必要である。しかし、これまでのところこうした算定式には確立されたものがなく、渡辺のモデル¹他二、三の試みがあるのみである。

そこで本研究では、既存の沿岸漂砂量および岸沖漂砂量算定式と整合性を持ち、しかも三次元海浜変形予測モデルに適用可能な新しい局所的漂砂量モデルを提案する。さらに、沿岸流が卓越する条件下での移動床実験、離岸堤設置海浜の移動床実験、および螢光砂を用いた局所的砂移動実験に対して本モデルを適用し、その妥当性を検討する。

2. 新しい局所的漂砂量モデル

本研究では、各地点での局所的な底質・波・流れ等の条件によってその地点における漂砂量を与えるモデルを取り扱うが、それを局所的漂砂量モデルと呼ぶことにする。従来、岸沖漂砂と言えは波による汀線に直角方向の漂砂を、沿岸漂砂と言えは沿岸流の存在下で生じる汀線に平行な方向の漂砂を指して用いられてきた。しかし、一般の海浜では、波は必ずしも汀線に直角に入射するわけではなく、また屈折、回折によっても各地点における波向が異なるので、このような場での漂砂を機械的に汀線に直角な方向と平行な方向とに分けて扱うのは妥当ではない。そこで、ここでは各地点において波の進行方向とそれに直角な方向に座標軸をとり直し、それに基づいて漂砂量を考えることにする。この時、波の進行方向の漂砂がいわゆる岸沖漂砂に対応することになる。

図-1 に示すように、 (x, y) 座標上の任意の地点にお

いて波の進行方向に ξ 軸を、それと直角に η 軸をとり、まず波の進行方向の漂砂について考える。

波・流れ共存場における波の進行方向の流速波形は 図-2 に示すようになっていいる。岸向き流速時 $(0 \leq t \leq t_1)$ を考えた場合、漂砂フラックス $\bar{q}_{on}$ はその間移動状態にある砂の単位面積当りの平均体積 V_{on} と平均流速 $\bar{u}_{on}$ との積で表わされ、

また、 V_{on} は岸向き流速時の最大底面せん断応力 τ_{on} と限界せん断応力 τ_{crit} の差に比例して次のように表わされるとする。

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_{on} &= V_{on} \cdot \bar{u}_{on} \\ V_{on} &= K(\tau_{on} - \tau_{crit}) / \rho g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 K は無次元定数である。

一方、沖向き流速時 $(t_1 < t \leq T)$ についても、漂砂フラックス $\bar{q}_{off}$ が同様に表わされ、結局、1 周期当りの波の進行方向のネットの漂砂フラックス $\bar{q}_\xi$ は、岸向き流速・沖向き流速おのおのの継続時間を考えることにより次式で与えられる。

$$\bar{q}_\xi = K'(\bar{q}_{on} \cdot t_1 - \bar{q}_{off} \cdot t_2) / T \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 K' は堤砂の方向を示す無次元定数で、1 または -1 の値をとる。

次に、波の進行方向と直角な方向を考えると、移動状態にある底質は波動流速の向きによらず平均流速 $\bar{u}_\eta$ で運ばれると考えられるから、漂砂フラックス $\bar{q}_\eta$ は次式のように表わされることになる。

$$\bar{q}_\eta = [(V_{on} \cdot \bar{u}_\eta t_1 + (V_{off} \cdot \bar{u}_\eta t_2)] / T$$

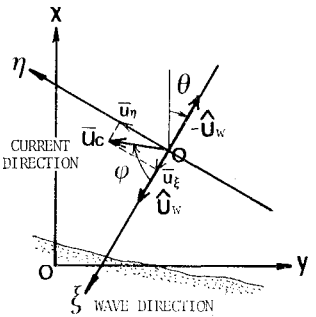


図-1 座標軸の定義

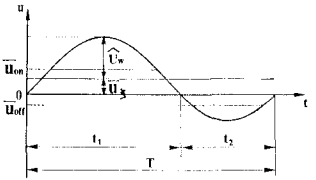


図-2 波の進行方向の流速波形

* 正会員 工務 五洋建設(株) 土木設計部
** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

$$=K[(\tau_{on}-\tau_{crit})t_1+(\tau_{off}-\tau_{crit})t_2]\bar{u}_\eta/\rho gT$$

..... (3)

さて、 $\bar{q}_s$ 、 $\bar{q}_\eta$ を求めるために必要な波・流れ共存場における底面せん断応力はTanaka・Shutoの理論²⁾を用いて評価する。波・流れ共存場における底面せん断応力を考えると、図-3に示すように波動成分の向きによって2つの極値

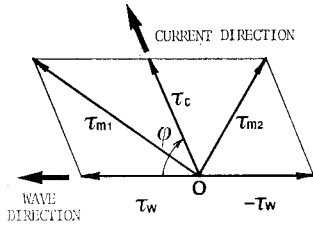


図-3 波・流れ共存場の底面せん断応力

τ_{m1} と τ_{m2} が現われる。Tanaka・Shutoの摩擦係数 f_{cw} を用いて評価されるのは τ_{m1} であり、

$$\tau_{m1}=\frac{\rho}{2}f_{cw}\hat{U}_w^2$$

..... (4)

で表わされる($\hat{U}_w$ は波動流速の振幅)。もう一方の極大せん断応力 τ_{m2} も、 τ_o 、 τ_w と波と流れのなす角 ϕ を知ることにより計算できる。

従って、平均流の波の進行方向成分 $\bar{u}_\xi$ の正負により τ_{on} と τ_{off} とは次のように与えられる。

$$\left. \begin{array}{ll} \bar{u}_\xi \geq 0 \text{ のとき} & \tau_{on}=\tau_{m1}, \quad \tau_{off}=\tau_{m2} \\ \bar{u}_\xi < 0 \text{ のとき} & \tau_{on}=\tau_{m2}, \quad \tau_{off}=\tau_{m1} \end{array} \right\}$$

..... (5)

但し、このような表示ができるのは τ_{m2} が極大値となるという条件から $|\bar{u}_\xi| < \hat{U}_w$ の場合である。

以上のことから、波の周期と波動流速、波向、平均流の大きさと流向、水深および底質の条件が与えられれば、式(2)、(3)を用いて任意地点の漂砂フラックスが計算されることになる。

つぎに、従来提案されている漂砂量算定式との比較のために、平均流のない場合($\bar{u}_c=0$)を考えてみよう。波動流速に正弦波形を仮定すると、 $\bar{u}_{on}=2\hat{U}_w/\pi$ となるので岸向き流速時の漂砂フラックスは次のように表わせる。

$$\bar{q}_{on}=\frac{2K}{\pi\rho^{3/2}g}\sqrt{\frac{2}{f_{cw}}}(\tau_{on}-\tau_{crit})\sqrt{\tau_{on}} \quad \text{..... (6)}$$

これを、砂の沈降速度 w_0 、粒径 d 、水中比重 s 等によって無次元化した漂砂量 $\bar{\phi} (= \bar{q}/w_0d)$ とシェルスズ数 $\psi (= \tau/\rho g d)$ とを用いて表わすと、次式のように渡辺の表示¹⁾と同様な関係式に帰着する(c は無次元定数)。

$$\bar{\phi}_{on}=c(\psi_{on}-\psi_{crit})\psi_{on}^{1/2} \quad \text{..... (7)}$$

また、ネットの岸冲漂砂が無視できる場合($\bar{q}_s=0$)を考えると、式(3)

は底面せん断応力の表示が異なるだけでKomar³⁾の表示と本質的には変らない。

このように、今回提案した局所的漂砂量モデルは、従来の岸冲および沿岸漂砂量算定式と整合性のあるものになっている。

3. 沿岸流が卓越する海浜に対するモデルの検討

新しい局所的漂砂量モデルの妥当性の検討の手始めとして、沿岸流が卓越する条件下での移動床実験に本モデルを適用する。そのためSawaragiらの実験結果⁴⁾を利用した。

3.1 Sawaragi・Deguchiの実験の概要

この実験の特徴は、移動方向別に漂砂量を測定できるサンドトラップを考案し、沿岸漂砂と岸冲漂砂を分離して実測したことである。実験は、2種類の底質粒径($d=0.68, 0.34$ mm)を用い、冲波波形勾配(H_0/L_0)をかえて合計6ケースが行なわれた。実験データとしては、波高、平均流および波向の岸冲分布が得られている。沿岸流は砕波帯幅を X_b とすると、汀線から $0.4X_b$ 付近でピークを持ち、最大値は $25\sim30$ cm/sである。

3.2 漂砂量の岸冲分布

沿岸方向と岸冲方向の漂砂量の岸冲分布を計算し、実測された漂砂量分布との比較を試みた。計算の方法と仮定は以下の通りである。①波動流速は微小振幅波理論により波高から計算した。②平均流の方向は汀線に平行であると仮定した。③水深は底面からHuntの式によって求まるRun-upの最大到達点と砕波点における静水位とを結ぶ直線までの高さで与えた。④無次元定数 K' は、冲向きの漂砂移動を生じているので $K'=-1.0$ とし、 K の値は仮に 1.0 とした。⑤限界せん断応力 τ_{crit} は底質の

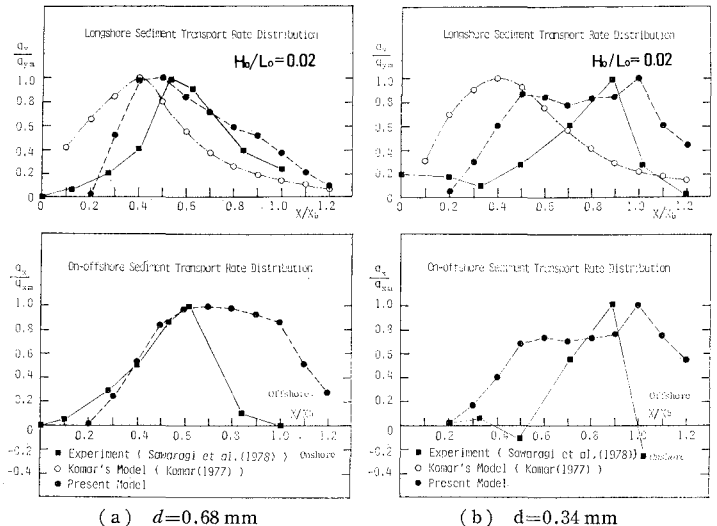


図-4 漂砂量の岸冲方向分布

移動限界に関する従来の研究を参考にして限界シールズ数 ϕ_{crit} として 0.06 とした。

以上の計算結果と実験結果とを比較して 図-4 に示す。まず沿岸漂砂量の分布形に着目すると、粗砂 ($d=0.68\text{ mm}$) のケースでは汀線近くピークを持ち、細砂 ($d=0.34\text{ mm}$) では砕波点に近い所でピークを生じるという特徴的な実験結果を計算結果はよく表現している。Komar のモデル³⁾による計算結果も 図-4 に併せて示されているが、波の進行方向の漂砂量を考慮していないため実験結果とは一致せず、沿岸流の分布形状に近いものになっている。

つぎに岸沖方向の漂砂量の分布形を見ると汀線付近や砕波点近くで一致度が悪くなっている。これは、無次元定数 K を場所によらず一定としたことや砕波帯内の波浪場を微小振幅波理論で与えたことによると考えられるが、このことから波の進行方向の漂砂の移動の向きを正しく見積るためには流速波形の非対称性や移動形態の効果をモデルの中に取り込む必要があることが示唆される。

表-1 漂砂量の比較

粒 径		$d=0.68\text{ mm}$			$d=0.34\text{ mm}$		
H_0/L_0		0.02	0.04	0.06	0.02	0.04	0.06
q_{ym} ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)	exp.	0.012	0.014	0.011	0.015	0.0093	0.011
	cal.	0.088	0.072	0.023	0.057	0.098	0.091
q_{xm} ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)	exp.	0.034	0.031	0.017	0.011	-0.0025	0.006
	cal.	0.117	0.066	0.028	0.129	0.117	0.178
$Q_{y\text{exp}}$ (cm^3/s)		1.3	1.3	1.0	0.6	0.7	0.3
$Q_{y\text{cal}}$ (cm^3/s)		8.7	6.8	2.5	8.2	11.6	8.9
E_y ($\text{kgf}\cdot\text{cm}/\text{s}/\text{cm}$)		429	228	159	610	429	238
$Q_{y\text{cal}}/E_y$		0.020	0.029	0.015	0.013	0.027	0.037

注: q_{ym} , q_{xm} : 沿岸漂砂量および岸沖漂砂量(沖向正)の最大値。
 $Q_{y\text{exp}}$, $Q_{y\text{cal}}$: 全沿岸漂砂量の実験値および計算値 ($K=-1.0$)。
 E_y : 単位汀線長当りの沿岸方向波浪エネルギーフラックス。

3.3 無次元定数 K の評価

次に今回提案したモデルによって計算される漂砂量と実測された漂砂量とを比較することにより無次元定数 K の値を見積ることを試みる。そのために用いたのは沿岸および岸沖漂砂量の最大値 q_{ym} と q_{xm} 、それに全沿岸漂砂量 Q_y であり、表-1 にこれらの指標の実験値と計算値 ($K=-1.0$ とした場合) とを示した。

表-1 中に示されている岸沖漂砂量 q_{xm} のオーダーは、渡辺らの 2 次元実験⁵⁾の結果得られた漂砂量のオーダーと同程度であり、Sawaragi らの実験結果はほぼ妥当なものであると考えられる。ただし、漂砂量が 1 オーダー小さい細砂の場合、浮遊砂が卓越してトラップの捕砂効率が低下していたと考えられるため検討の対象からはずした。粗砂の実験 3 ケースにおいて、指標とした漂砂量の実験値と計算値がよく対応するように定数 K の値

を求めたところ、0.3 と見積られた。

他方、従来の漂砂量算定式と関連づけて K の値を評価することもできる。式 (6) と (7) を比べることによって

$$K = \frac{\pi}{2} w_0 \left(\frac{f_{cw}}{2} \right)^{1/2} s^{-3/2} g^{-1/2} d^{-1/2} \cdot c \quad \dots\dots (8)$$

という関係が成り立つ。標準的な実験条件を念頭において $d=0.2\text{ mm}$, $s=1.65$, $f_{cw}=0.02$ とし、定数 c には渡辺¹⁾に従って $c=7$ を与えると $K \approx 0.3$ という結果を得る。こうした結果から、室内実験においては定数 K を 0.3 としよと考えられる。

さらに表-1 中には沿岸方向の波浪エネルギーフラックス E_y を各ケースについて求め、全沿岸漂砂量との比をとって示してある。この比がすべてのケースで同程度の値をとることから、本モデルが従来パワーモデルとして知られている沿岸漂砂量式の結果とも矛盾しないことがわかる。

4. 離岸堤設置海浜に対する検討

4.1 実験の概要

複雑な波浪・海浜流場における本モデルの適用性を調べるために、離岸堤が設置された海浜の地形変化を検討した。本実験は、著者らが前回行ったもの⁹⁾と同じく、平面造波水槽内に、中央粒径 0.2 mm の砂を敷いて $1/20$ の一様勾配斜面を作り、その中央に離岸堤を設置して実施したものである。波は汀線に直角に入射させ、沖波波高 4.9 cm と 6.2 cm との 2 ケースについて実験を行なった。

測定した項目は、波高分布、砕波の位置、流速と流況、および地形の変化である。実験の手順は 図-5 に示す通りであり、測定領域等は前報とほぼ同じである。

測定項目のうち、流速は今回新たに超音波流速計を

CASE 1			CASE 2		
	測定時間	測定内容		測定時間	測定内容
CASE 1-1	0:00	地形 (1-1)	CASE 2-1	0:00	地形 (2-1)
		写真撮影			写真撮影
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
	0:52	写真撮影		0:53	写真撮影
		地形 (1-2)			地形 (2-2)
		写真撮影			写真撮影
CASE 1-2	2:37	波高・流速の測定	CASE 2-2	2:08	波高・流速の測定
		写真撮影			写真撮影
		地形 (1-3)			地形 (2-3)
		写真撮影			写真撮影
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
	5:05	写真撮影		4:24	写真撮影
CASE 1-3		地形 (1-4)	CASE 2-3		地形 (2-4)
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
CASE 1-4		波高・流速の測定	CASE 2-4		波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
CASE 1-5		波高・流速の測定	CASE 2-5		波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
CASE 1-6		波高・流速の測定	CASE 2-6		波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定
		波高・流速の測定			波高・流速の測定

図-5 実験の手順

用いて測定した。センサーの大きさ等に難点は残るものの直交する二成分が同時に測定でき、しかも浮遊砂が存在する移動床実験においても安定した出力が得られた。得られた流速記録から平均流速と波動成分とを分離した流速場の測定精度がかなり改善されたものと言える。

4.2 螢光砂による局所的砂移動実験

局所的な砂の移動方向を調べるため、離岸堤設置海浜の実験の一環として螢光砂を用いた実験を行なった。

図-6に示す6地点に3色の螢光砂を砂ぐいとして打ち込み、投入点を囲む円周上の24点でコアサンプリングした。サンプリングは、まず投入5分後に、以後は15分ごとに波をとめて行ない、各方向の螢光砂の数を数えて漂砂の移動方向の経時変化を調べた。同時に、投入点

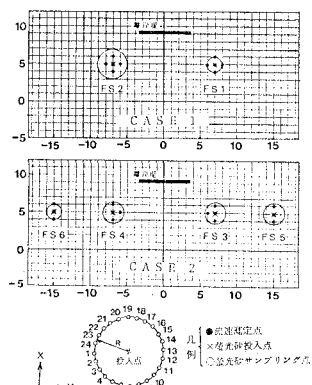


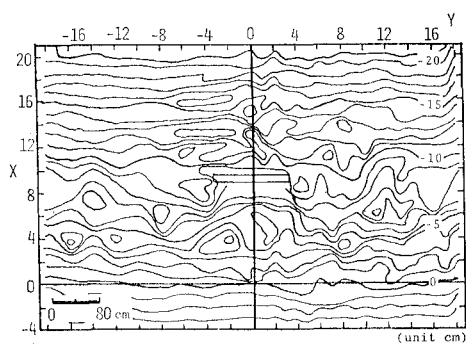
図-6 螢光砂の投入地点とサンプリング点

およびその周辺の数地点で流速を測定し、平均流の流向および波向と砂の移動方向とを比較した。

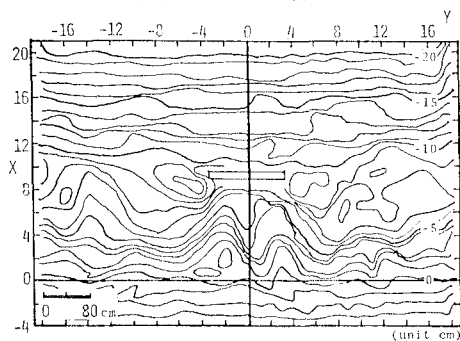
4.3 離岸堤設置海浜における地形変化

実験結果の特徴をケース2を取り上げて簡単に示す。ケース2-1と2-2の波高と底面付近の平均流速の分布を図-7に、各ケースの終了後と最終的な地形を図-8に示す。

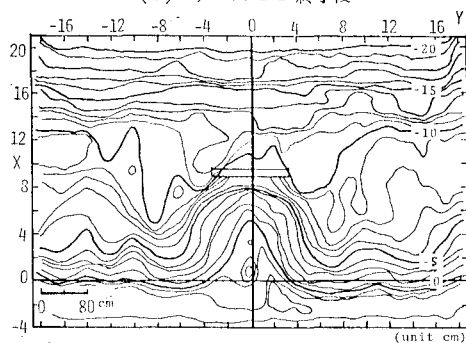
図-7を見ると、離岸堤周辺に反射と回折による特徴的な波高場が形成されていることがわかる。これに伴ない離岸堤の背後には明瞭な循環流が形成され、地形変化に大きな寄与をしている。



(a) ケース 2-1 終了後

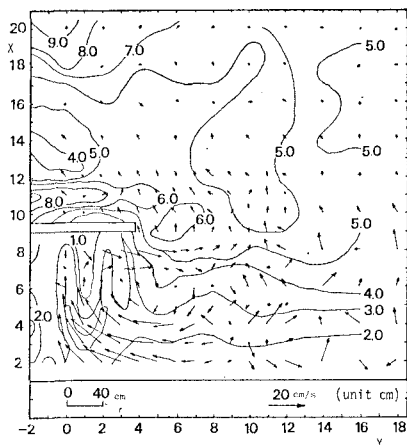


(b) ケース 2-2 終了後

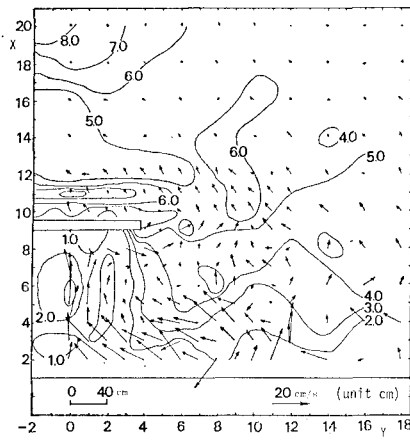


(c) 最終地形

図-8 地 形

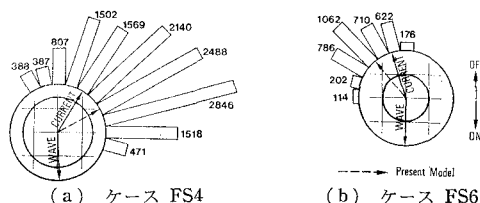


(a) ケース 2-1



(b) ケース 2-2

図-7 波高と底面付近の平均流速の平面分布



(a) ケース FS4 (b) ケース FS6

(図中の数字はカウントされた螢光砂の数を示す)

図-9 螢光砂実験に対する検討

一方、今回特徴的であった地形変化のパターンは、前報のように離岸堤設置後スムーズにトンボロ地形が発達していない事である。これは、前回の実験ではある程度地形が平衡状態に達した後に離岸堤を設置したのに対して、本実験では一様勾配斜面上に最初から離岸堤を設置したため、沿岸漂砂だけでなく岸沖漂砂も生じたことによると考えられる。

4.4 螢光砂実験によるモデルの検討

本節での検討の最初に螢光砂実験の結果と局所的漂砂量モデルによる計算結果とを比較した。ここでの検討の対象は漂砂フラックスの方向である。計算に際しては、実測された平均流速、波動流速および波向を用い、また、波動流速の非対称性を考慮して波峰および波谷での流速の値を用いて底面せん断応力 τ_{on} と τ_{off} を評価した。限界せん断応力 τ_{crit} は 3.2 と同様に $\phi_{crit}=0.06$ として求めた。

全観測時間を通じて平均した螢光砂の移動方向について、実験結果と計算結果とを比較した一例が 図-9 である。図中には平均流の流向と波向も併記されている。これを見ると螢光砂の移動方向と平均流の流向とは概ね一致するものの多少のズレがあり、波の進行方向の漂砂の重要性が示唆される結果となっている。こうした効果を取り込んだ本モデルによる漂砂移動方向の計算結果は、実測の卓越方向とほぼ良好な一致を示している。

4.5 離岸堤設置海浜の実験によるモデルの検討

次に、離岸堤設置海浜の移動床実験に本モデルを適用し実験結果との比較を試みた。計算方法は、4.4 の場合と同じく、二次元的に配置された測定点で得られる平均流速、波動流速と波向のデータを用いて各点ごとの漂砂量を求めるというものである。離岸堤背後の回折領域では波が重なり波向の判定が問題となるが、今回は卓越した方向に単一波があるものと仮定した。また K の値としては、3.3 の検討に基づいて -0.3 を用いた。

各測定点で囲まれた 20 cm メッシュの領域における土砂収支を砂面の高さの変化量として示したのが 図-10 である。図-10 はケース 2-2 の場合であるが、この計算では、図-7 に示す波と流れの場が約 2 時間変化しないものと仮定した。

この図を見ると離岸堤背後で砂が堆積し、その横の領域が侵食されるという全般的な傾向は比較的よく再現さ

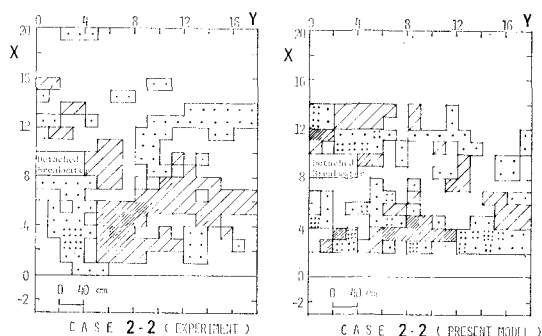


図-10 土砂の移動量の比較

れている。しかし、計算結果では離岸堤背後でも侵食される箇所が見られたり、堆積域と侵食域とが細かく混在している等細部には問題が残る。こうした傾向は、メッシュ間隔や測定時間といった実験上の制約や回折領域における単一波の仮定等単純化した取り扱いによる部分も大きいと考えられるが、本モデルが内包する問題としても更に検討を要する点である。

5. 結 語

今回提案した局所的漂砂量モデルは比較的単純なものではあるが、従来の岸沖漂砂量および沿岸漂砂量の研究成果を平面的な波、流れ共存場における漂砂現象へ拡張する場合の一つの方向を与えるものと考えられる。その適用可能性についても本論中で論じた。しかし、波の進行方向のネットの漂砂の移動の向きの判定、波動流速に比してその方向の平均流速が大きくなった場合への拡張等課題も多い。今後も漂砂の運動機構の理解に基づいてより妥当性の高いモデル化を進める必要があろう。

最後に、本研究を進めるにあたり、貴重な実験資料を提供して下さった大阪大学榎木 亨教授、出口一郎助教授、終始ご指導頂いた東京大学堀川清司教授、実験に協力していただいた高瀬健三君に深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 渡辺 晃: 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 285~289, 1981.
- 2) Tanaka, H. and N. Shuto: Friction coefficient for a wave-current coexistent system, Coastal Eng. in Japan, Vol. 24, pp. 105~128, 1981.
- 3) Komar, P. D.: Beach transport rate: Distribution and total drift, Proc. ASCE, Vol. 104, No. WW2, pp. 225~239, 1977.
- 4) Sawaragi, T. and I. Deguchi: Distribution of sand transport rate across a surf zone, Proc. 16th Conf. Coastal Eng., pp. 1569~1613, 1978.
- 5) 渡辺 晃・利穂吉彦・堀川清司: 二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 172~176, 1979.
- 6) 三村信男・清水琢三・渡辺 晃: 離岸堤による波浪海浜流場の変化と海浜変形, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 299~303, 1982.