

海 浜 流 の 数 値 解 析

西 村 仁 嗣

1. 海浜流

海浜のダイナミックスにおける第一義的な営力は波であるが、流れもまた漂砂や拡散現象を支配する大きな要因である。とくに、砕波帯内外の浅水域では、海流、潮流といった地球物理学的なスケールの流れよりも、いわゆる海浜流が問題となることが多い。海浜流という用語は、沿岸流、離岸流、向岸流等の波によって誘起される局所的な流れを総称するものである。これらの流れが相互に関連しながら一つの系をなすとき海浜流系と呼ばれ、またそのマクロ的形態によっては海浜循環流という呼称も用いられる。

この種の流れの存在は古くから知られており、1940年代初頭には既にその現象論的な研究の成果が発表されている。1960年代には Longuet-Higgins (1964, 1970) が radiation stress の概念を導入し、海浜流発生メカニズムが理解されるに至った (Bowen, 1969a, 1969b; Bowenら, 1969)。radiation stress とは波の場に内在する応力であり、非一様な波の場ではその不均衡が平均水位の変動、さらには海水流動の直接的な原因となる。

平行等深線海浜に波が直角入射し、浅水変形が生じている場合は、海水に岸向きもしくは沖向きの力のみが作用し、従って平均水面の上昇あるいは下降 (wave setup/setdown) が起こる。すなわち、水位勾配に伴う圧力の岸沖方向勾配が radiation stress の勾配と釣り合う形となって、定常的な流れは生じない。波が斜め入射する場合には波浪力の沿岸方向成分が現われ、これが沿岸流をひき起こす。さらに、地形、入射波あるいは平均水位が沿岸方向に一様でない場合には、向岸流と離岸流を含む複雑な流れの場が生じることになる。

海浜流は海岸工学上看過できない現象であり、本研修会においても過去に“沿岸付近の流れ” (堀川清司, 1972), “海浜流と海浜地形” (玉井佐一, 1977), “海浜流系の現地観測” (佐々木民雄, 1978) 等の講義がなされて来た。講義集にはそれぞれの時点における海浜流研究の成果がとりまとめられている。昨今では、任意地形、任意入射波条件に対して海浜流の場を数値的に解析する試みが多数行われるようになっているので、ここではその技法に的を絞って解説をすすめることにする。なお、波と流れの解析およびこれに関連する最近までの諸研究業績の詳細については本間ら (1985) の著書を参照されたい。

2. 平均流に関する基礎方程式

ある水域の海水の運動を解析するために直交座標系 (x_i, z) を設定する ($i = 1, 2$)。ただし、 x_i 軸は静水面内に、 z 軸は鉛直上向きにとる。この水域内に波と流れが共存する場合を考える。ここでいう流れとは、鉛直方向には、ほぼ、一様で、かつ水平流速成分 U_i は時間的に一定もしくは極めて緩やかに

変化する、いわゆる平均流である。これに対して、波動に伴う水粒子速度 (u_i , w) はある程度の時間 にわたって平均すると消滅する性質のものである。すなわち、このような平均値を上線で表現すると、 $\overline{u_i} = \overline{w} = 0$ である。一方、静水面から測った瞬間的な水面の上昇量を ζ とすると、 $\eta = \bar{\zeta} \neq 0$ であり、この η が wave setup あるいは setdown による平均水面の変動に相当する。

合成された流れに関する通常の連続式を底面から水面まで積分し、時間平均をとると、平均流に関する連続式が次のように得られる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (h + \eta) U_j}{\partial x_j} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h は静水面から測った水深であり、 $j = 1, 2$ について縮約記法を用いた。

運動方程式に関しても全く同様の操作をほどこすことにより、

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + g \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho (h + \eta)} \cdot \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial M_{ij}}{\partial x_j} + \frac{F_i}{h + \eta} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 ρ は海水の密度である (Phillips, 1966)。

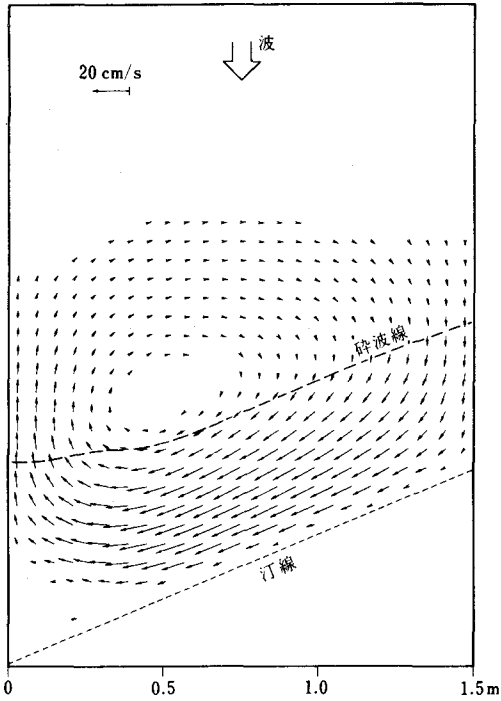
各項のより具体的な内容については以下の各節に譲り、ここでは方程式系の概略的な意味合いを考えよう。式 (1) は局地的な水量の保存を述べたもので、対象とする流れが定常流であれば最初の時間微分項は不要である。運動方程式 (2) 中の第 4 項は波動に伴う諸物理量の平均操作によって消滅しない部分を radiation stress S の各要素の勾配という形で一括表記したもので、これらが平均流の加速度 (第 1, 2 項) および平均水位の勾配 (第 3 項) をもたらす。最後の 2 項は、こうして生じた流れに抗して作用するインピーダンスである。 M は流速の局地的な不均等性に起因し、加速度項から派生した Reynolds 応力で、第 5 項は乱れによる運動量の水平拡散の効果を示している。また、 F は剪断応力に対応する項で、その主要部分は底面摩擦力である。

波の場が算定され、radiation stress が与えられたとき、式 (1) および (2) を満たすように平均流速 U_i および平均水位 η を定めることがここでの課題である。radiation stress の勾配からなる起流力ベクトルを solenoidal な (vector potential の rotation として書かれる) 部分と non-solenoidal な (scalar potential の gradient として書かれる) 部分に分けて考えると、水位勾配ベクトルはそれ自体 non-solenoidal であるから、後者の一部としか釣り合うことができない。残余の起流力に応じて平均流が発生し、インピーダンスとの関連において維持もしくは加速されることになる。

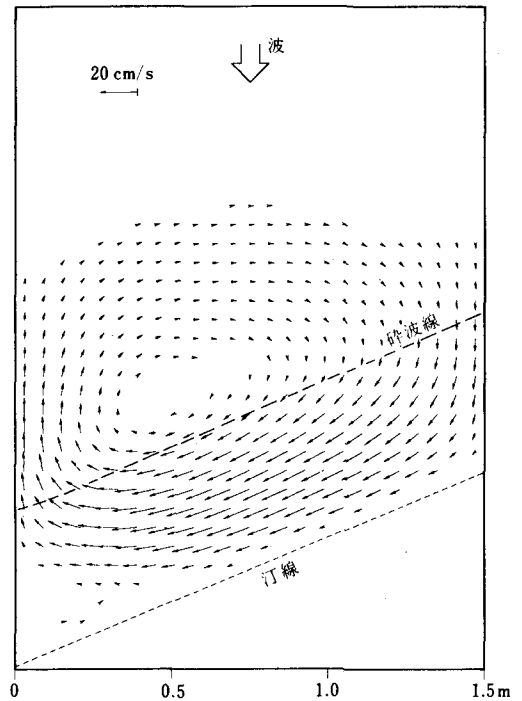
3. 波の場の計算

前節で述べたように海浜流は波の場の非一様性から生じるものであり、流れの計算に先立って radiation stress の分布を知る必要がある。ここで厄介なのは波の場が共存する流れの状況に応じて変化することである。こうした波と流れの相互干渉を考慮するためには、双方の計算を交互に繰り返さねばならないが、現状では波の計算に多大の労力を要するので、一般にはその頻繁な反復は困難である。図-1 は、

図-1 海浜循環流の計算例



(a) 完全な計算

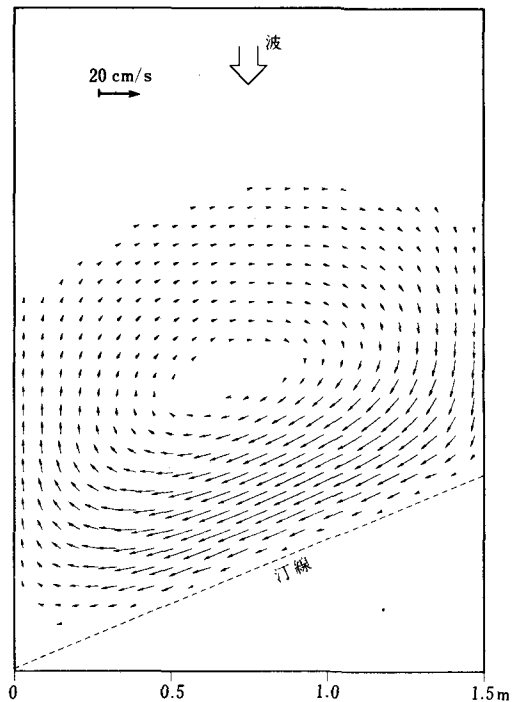


(b) 相互干渉を無視した場合

壁面で側方を区切られた一様勾配海浜に波が斜め入射するという単純な設定で、流れによる波の場の変形が結果として生じる循環流にどのような影響を及ぼすかを例示したものである（本間ら，1985）。波と流れの相互干渉による碎波線の歪みに応じて流況の変化が現われている。

波の屈折ならびに浅水変形の計算には、初期の段階では波向線法が用いられて来た。しかし、流れの計算には格子点毎の波の状態を入力する必要がある、その意味で格子点法による波の計算が有利となる。波向線法を採用する場合には、波の場の計算結果から内挿により流れの計算のための格子点データを準備しなければならない（山口ら，1985）。

Noda (1974) は上述の観点に立ち、波数場の非



(c) 移流項を無視した場合

回転性を表わす方程式から波向、波動エネルギーの保存を表わす方程式から波高を求める格子点方式の計算法を提示した。この方法によれば計算は至って簡単であり、エネルギー保存則と分散関係式に項を追加することによって流れの効果もとり入れられる。実際には、流れとの共存場の解析では、エネルギー保存則よりも wave action の保存則が一層簡便である (Bretherton ら, 1969)。しかしながら、この方法における波向計算は本質的に Snell の法則に基づく計算と等価であり、全域で単一の進行波のみを想定するため、境界形状が複雑で波の回折や反射が問題となる領域には適用できない。

Karlsson (1969) の導いたエネルギー平衡方程式は、上記の手法を方向スペクトルを有するより一般的な波の場に拡張したものである。方程式が一本化され、外見上は簡明であるが、重合波を対象とする分だけ計算量は増大する。また、数値分散による計算精度の低下にはとくに留意する必要がある (西村, 1987)。流れの計算技術がこうして得られる情報を使いこなす段階に至っていないことから、この場合には不適切と言えよう。

回折、反射までを考慮した波の場の計算に向けては、緩勾配方程式 (Berkhoff, 1972, 1976; Mei, 1983) が唯一の出発点である。任意反射境界をとり扱うなど実用的な観点からは、これを書き改めて形式的に非定常過程を記述する連立方程式とし (西村ら, 1983; 渡辺ら, 1984)、数値波動解析法 (谷本ら, 1975; Abbott, 1978) に準じて解くとよい。この方程式は実際には海底勾配のかなり急な場合にも適用できるとされるが (Smithら, 1975; Booij, 1983)、楕円型であるため数値積分に大きな労力を要する点が最大の問題である。流れとの共存場についても対応する方程式が導かれているが (Booij, 1981; Liu, 1983)、そのとり扱いはさらに困難である。

計算の簡略化を図る目的で、緩勾配方程式を放物型方程式で近似する試みは Radder (1979) および Lozano ら (1980) によって始められた。波向の大幅な変化がなく、沖に向かう反射波がそれ程重要でない場合には有力な手法であろう。

海浜流はとくに砕波帯内で卓越するので、砕波時およびその後の波の変形を知ることが重要である。ところが、残念ながらこの点に関する既往の知見は正確なモデル化には未だ不十分である。当面、上述の各種方程式に経験的な減衰項を付加して、実際の現象を近似せざるを得ない。ここでは関連するいくつかの検討例を挙げるにとどめる (Sawaragi ら, 1974; 水口, 1979; 泉宮, 1980, 1983; 西村, 1982)。

4. 起流力

運動方程式 (2) 中の radiation stress S_{ij} は、波動性の擾乱に関わる諸項のうち時間平均操作の後も残存して、平均的な海水のダイナミックスの原因となる部分を取りまとめたものであり、その内容は次の通りである (Phillips, 1966)。

$$S_{ij} = \int_{-h}^{\zeta} \rho u_i u_j dz + \delta_{ij} \left[\int_{-h}^{\zeta} p dz - \frac{\rho g}{2} (h + \eta)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 p は圧力、 δ_{ij} は Kronecker の記号で $i = j$ の場合にのみ括弧内の 2 項が付加されることを示

す。

単一の微小振幅進行波に対しては、

$$S_{ij} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \left[n \beta_i \beta_j + \delta_{ij} \left(n - \frac{1}{2} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 H は局地的な波高、 n は群速度と位相速度の比、 β_i は波向の方向余弦である。

緩勾配方程式等に基づいて解析を行うと、波に伴う線流量成分 q_i がそれぞれ水位変動 ζ と異なる位相角を有するような波の場が得られる。

$$\zeta = \eta + \hat{\zeta} \cos(\sigma t + \phi_0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$q_i = \hat{q}_i \cos(\sigma t + \phi_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式において、 σ は波の角周波数、 t は時間、 ϕ_i は位相角で、 A は振幅を表わす。この場合の radiation stress の算定式として、渡辺ら (1982) は次式を導いた。

$$S_{ij} = \rho g \left[\frac{n k^2 \hat{q}_i \hat{q}_j}{2 \sigma^2} + \delta_{ij} \left\{ \frac{\hat{\zeta}^2}{2} \left(n - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{8 \sigma} \cdot \frac{\partial \hat{\zeta} \hat{q}_r^*}{\partial x_r} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $\hat{q}_r^* = \hat{q}_r \sin(\phi_0 - \phi_r)$ 、 k は波数であり、波の重複によって生じる局地的な水位変化に寄与するとみなされる項は除去されている。当然のことながら、とくに位相差が存在しない ($\phi_0 = \phi_1 = \phi_2$) ときは、上式は式 (4) に帰着する。

波の場が複雑になると、これに応じて radiation stress の分布も複雑になるが、これがそのまま錯綜した海浜流の場に結びつくわけではない。平面水槽内の一様勾配斜面上に置かれた離岸堤模型に波が直角入射する状況を想定し、堤周辺の波と radiation stress を計算した結果が図-2および3にそれぞれ示されている。(渡辺ら, 1984 本間ら, 1985)。図-4はこの結果に基づいて計算した堤背後の循環流を実験データと比較したものである(西村ら, 1984)。流れはかなり平滑化された形で現われており、その形態は実測結合とよく符合している。

5. 水平拡散

Reynolds 応力 M_{ij} は渦動拡散係数 ε を用いて通常次のようにモデル化される。

$$M_{ij} = \varepsilon \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

拡散係数 ε については様々な議論がなされているが、とくに定説はない。例えば、Longuet-Higgins (1970) は

$$\varepsilon = N l \sqrt{g(h + \eta)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

なる表示を用いている。 l は水平渦径を代表する長さとして離岸距離を表わし、 N は無次元の定数で 0.016以下の値をとるものとされている。水平、鉛直両方向の代表長さを含む一応合理的な表記と思われるが、いずれにしてもこれらは定性的な推論に基づいて得られており、それ程厳密なものではない。従って、

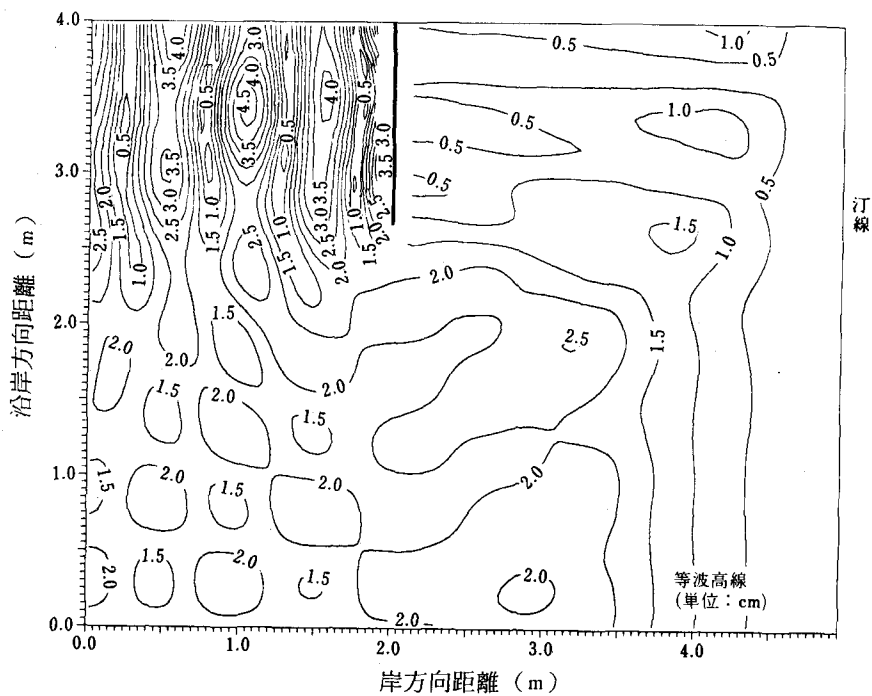


図-2 波高の平面分布 (計算値)

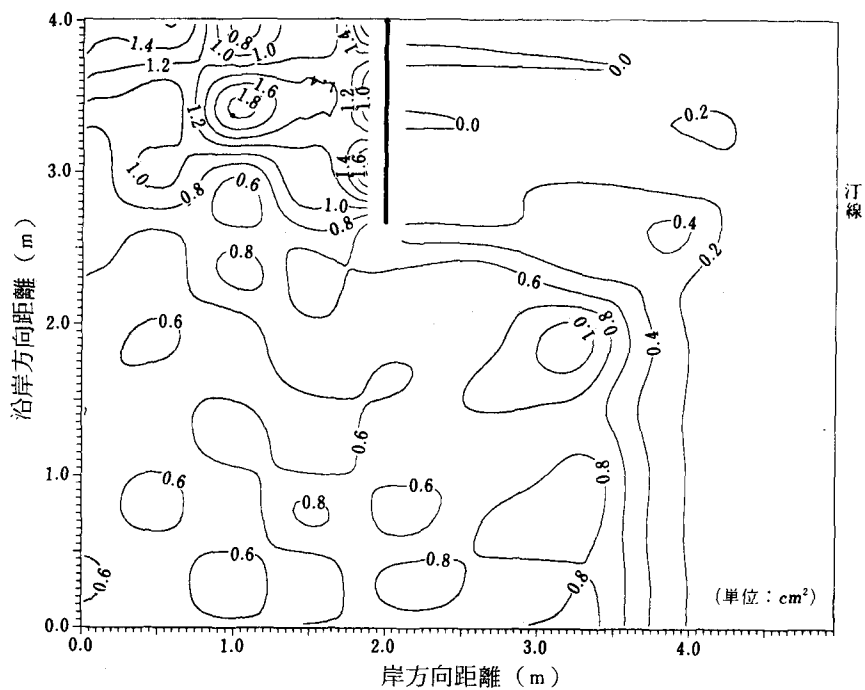


図-3 radiation stress の平面分布
(a) $S_{11}/\rho g$

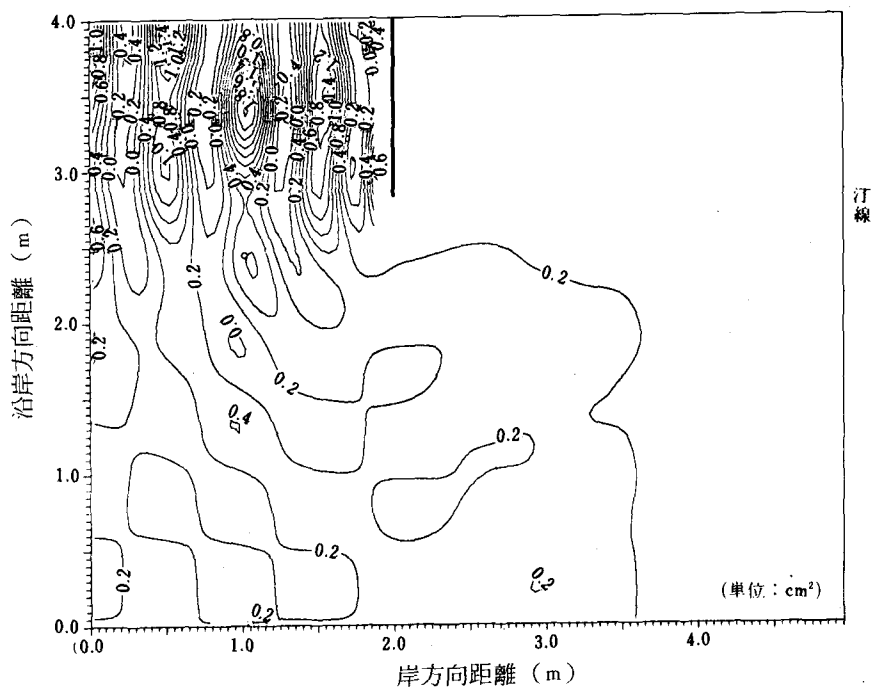


圖-3 (b) $S_{22}/\rho g$

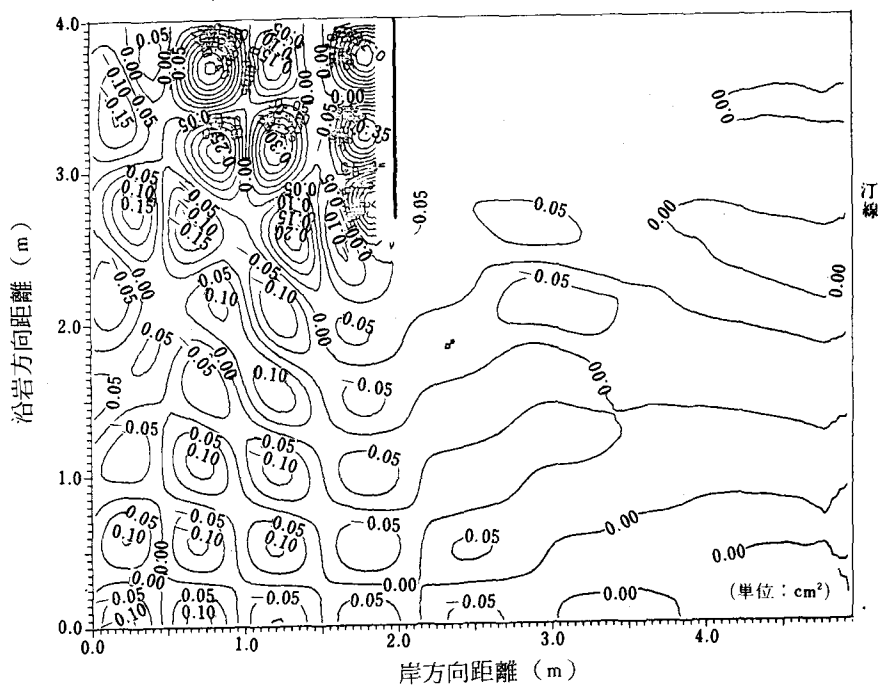


圖-3 (c) $S_{12}/\rho g$

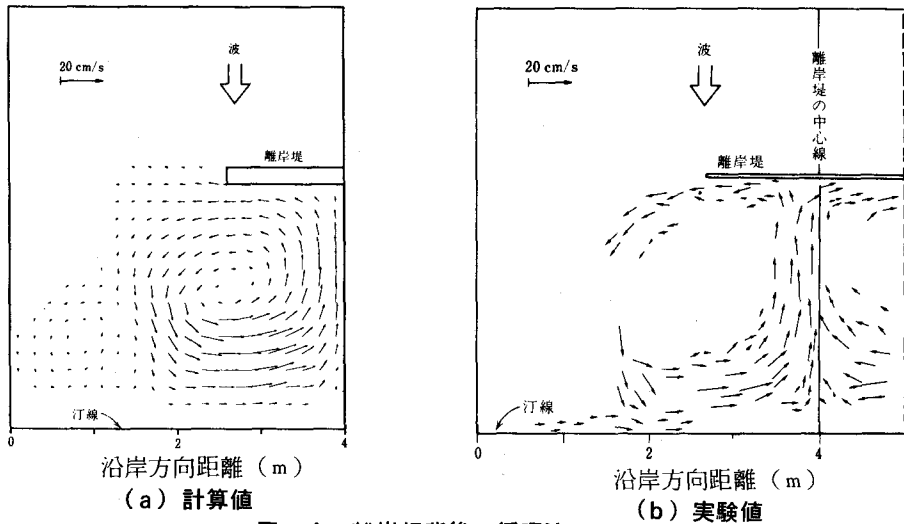


図-4 離岸堤背後の循環流

$$\frac{\partial M_{ij}}{\partial x_j} = \varepsilon \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

とし、離岸距離が定義し難い場合には、 l として水深を平均海底勾配で除したものをを用いるなど、臨機の処置をとって差し支えないと思われる。

砕波帯外で $\varepsilon = 0$ とした計算例も過去にあるが、これはいささか不穏当である。とくに構造物が存在すると、水深の比較的大きい領域でも非一様な波の場が生じ得る。このような水域では底面摩擦の効果が小さいので、少なくとも砕波線近傍におけると同等程度の拡散効果を想定し、過大な流れの発生を抑制する必要がある。

6. 底面摩擦

波と海浜流の共存場における底面摩擦の実態はGrantら(1979)、水口(1979)、Tanakaら(1981)、および田中ら(1984)によって研究されているが、正確かつ実用的な数理モデル化にはさらに検討を要する。現時点では、定常流の解析に用いられる形の抵抗則を交番流に拡張するなどの便宜的な扱いがしばしばなされる。

この場合、

$$F_i = C_f (U_i + u_{bi}) \sqrt{(U_j + u_{bj})^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 u_{bi} は波に伴う底面付近の水粒子速度、 C_f は無次元の摩擦係数である。上式の平均操作を数値的に行うと、これが計算所要時間の大きな部分を占めることになりかねない。そこで、西村ら(1982)は水粒子速度を矩形波で置き換えることにより、単一の進行波を対象として次の近似式を導いた。

$$F_i = C_f \left(W U_i + \frac{w_{bi}}{W} \cdot w_{bj} U_j \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$W = \{ \sqrt{(U_j + w_{bj})^2} + \sqrt{(U_j - w_{bj})^2} \} / 2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$w_{bi} = \beta_i \sigma H / \{ \pi \sinh k (h + \eta) \} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 w_{bi} は波による底面流速成分の振幅である。上式は、波もしくは流れのいずれか一方が卓越する条件下で Liu ら (1978a) が与えた近似表現を滑らかに補間するものとなっている。

式 (5) のように流速成分間に位相差がある場合には、

$$u_{bi} = \{ \hat{q}_i / \sinh k (h + \eta) \} \cos (\sigma t + \phi_i) \quad \dots\dots\dots (15)$$

であり、 $\sigma t = (\phi_1 + \phi_2 + m\pi) / 2$ 、($m = 0, 1, 2, 3$) なる代表的な 4 つの位相の流速値について平均をとれば、ほぼ満足すべき精度で式 (11) 右辺の評価がなされる。

7. 境界条件

平均水位の境界値を与えることも論理的には可能であるが、その微細な差異が大きな流況変化に結びつく恐れもあり、数値解析に際しては流速値を境界条件とするような格子点配置の採用が望ましい。

1) 沖側境界

計算範囲を砕波帯外の水深の十分大きい領域にまで広げ、沖側端では平均流が存在しないものと考えればよい。また、沖側境界上の 1 点で平均水位を固定しておく必要がある。

2) 岸側境界

自然海浜を対象とするとき、まず考えられるのは、実質水深が 0 となる点を結んで境界とし、そこでの流速を 0 とすることである。しかし、この場合 wave setup のために汀線位置が事前に確定せず、計算の過程でこれを修正する作業が要求される。また、水深 0 という状態は波の計算においても流れの計算においても精度上の問題をひき起こし勝ちである。こうした困難を回避するには、一定の静水深に対応する等深線位置に直立壁を想定すればよい。ただし、swash zone では波の斜め遡上と戻り流れによって汀線方向の海水輸送が生じるなど、特異な状況も起こり得るので、岸側境界で沿岸流速を 0 とすることには検討の余地がある。

3) 側方境界

計算領域側端を構造物等に沿ってとることができれば、境界に垂直な方向の流速成分を 0 とする条件が与えられる。境界を横切る流れが存在するような開境界問題では、その流速の設定が計算領域内の流れの分布を直接支配することになる。便宜的に側方境界近傍のある区間で平行等深線を想定すれば、沿岸流速および平均水位がともに沿岸方向に一樣な状況が得られ、その具体的な値は岸沖 1 次元の解析によって知られる。これに近い条件の領域に側端をとるか、もしくは計算領域を沿岸方向にできるだけ拡張して上述の状態を仮想するなど、問題とする範囲の計算結果に及ぼす境界の影響を極力小さくする工夫が必要である。

8. 数値解析の手法

以上の各節で述べて来たところを総合すると、式 (1) および (2) の基礎方程式系の表記が確定する

ので、これらを離散化して数値積分すれば、平均流と平均水位の変動状況もしくは平衡値が求められる。staggered scheme を用いると、変量ならびに方程式の合理的な離散化が可能である。ここでは、各種の計算手法の詳細を論じるゆとりはないので、その考え方の概略と計算上の留意点について記述することにする。

8.1 非定常解析

しかるべき初期状態の水域に radiation stress が作用した場合の流れの変化を非定常過程として解析する。基礎方程式中の時間微分項を前方差分で近似し、ある時点における平均流と平均水位の平面分布から次の時間ステップにおけるそれらを計算するのが普通である。式(1)から平均水位、式(2)から各方向の平均流速成分の変動を算定する作業を反復実行することになる。この方法では、時間きざみを十分小さくすることが計算の安定性を維持する上で肝要である。

初期条件として静水状態を想定し、起流力を突然作用させると、領域全般にわたる静振が発生して、流れが定常化するまでかなりの時間がかかる。現実には、流れの場の変化の過程よりも、最終的に得られる定常流の状況を知りたいというケースが多いので、このような場合にはインピーダンス項を漸減させ、あるいは起流力項を漸増させることによって静振を抑制するとよい(橋本ら, 1974; 西村ら, 1984)。また、起流力ベクトル中の non-solenoidal な部分と釣り合うように初期水位を設定すると、より効果的である。こうした措置が加わると、本手法はむしろ時間微分項を残差項とした緩和法の一種となる。

8.2 定常解析

定常な流れの場については、基礎方程式中の時間微分項がすべて0となる。この形でも、これらの方程式はやはり平均流速と平均水位に関する連立系であるが、非線形項を含むためその数値積分は必ずしも容易ではない。

陽的な解法としては、1計算点毎に補正を繰り返す通常の緩和法や、4つの計算点を含む計算セルを単位として補正を行う Hardy-Cross 法などがある。この種の計算では残差分布の平滑化に伴い、局地的な補正が相互にキャンセルし合う膠着状態に陥り易いので、何らかの方法で計算の加速を図らねばならない。逆に、計算の安定性維持のために減速緩和が必要となることもある。

ADI 法は1本の格子線上に並ぶ全計算点における補正を同時的に行い、これを交互に縦横に繰り返すことによって補正の広域化を企図する技法である。格子線毎の補正は比較的容易であり、有力な方法と言えるが、時として縦横の補正計算間に coupling が生じることがある。

安定性の面では、同時に全域の補正を行う陰的なとり扱いが最も有利である。例えば、渡辺(1981)は全域的な Newton-Raphson 補正による流れの解析を試みている。この場合にも、方程式の線形化に伴って行列演算の反復が要求され、計算時間が過大となる傾向がある。行列のバンド幅を狭める目的で方程式中の一部の変数に既往値を与えたり、また、SOR 法等によって連立方程式を解くことも考えられるので、必ずしも陽的な解析手法と本質的に異なるものとは言えない。

以上とはいく分異質の有力な計算手法として、有限要素法も用いられている(Liuら, 1978b; Kawahara

ら, 1982a, 1982b, 1984; Kashiya ら, 1985; Bettess ら, 1979)。

8.3 数値解析におけるその他の注意

一般に、数値計算に際しては、その精度と安定性の維持、および計算所要時間の節減が技法上の問題となる。

図-1 (a) および (c) を比較すると、移流項を無視することにより向岸流と離岸流の形態が大きく変わっている。移流項の効果の重要性がうかがわれるが、一方その非線形性はしばしば計算の乱れの増幅、伝播の原因となる。風上差分の採用は本質的な解決とは言えないまでも、これを阻止する効果的な手段である。拡散項が計算値の平滑化に寄与することはその差分表示の形から明らかである。しかしながら、渦動拡散係数 ϵ をある程度以上に大きくとると、overshoot が生じて逆効果となる。

離散化における格子間隔は、計算所要時間を支配する最大の要因の一つである。平均流の空間変動のスケールは波動のそれに比して大きいので、流れの計算では格子間隔を粗くとり、波の場のデータを数個毎に平均して用いるのが妥当である。

9. 海浜流計算の信頼性

以上、流れの数値モデルおよび実際の計算について概説して来たが、最後にその問題点をとりまとめておく。

平均流に関する基礎方程式の骨格はほぼ確立しており、これを数値的に積分することも、容易ではないまでも不可能ではない。方程式の記述における弱点はインピーダンス項、すなわち水平拡散項と底面摩擦項にあるが、これらが流れの強弱に応じて生じるものである以上、ここに例示した表記や他の類似の表記はある程度容認し得る。表示式中の諸係数値については今後とも追算を通じて検討して行かねばならない。境界条件設定の困難さが計算上の障害となることも多い。

しかしながら、実際には流れの計算自体よりも、その根拠となる波の場の算定により大きな問題が内在している。とりわけ swash zone をも含めて碎波後の領域における波の変形、および流れとの因果関係については一層の研究がまたれる。また、波の計算、流れの計算ともに相当な演算時間を要する現状では、これらの反復実行により両者間の相互干渉を考慮することは一般には困難である。

謝 辞

本稿の執筆に際して、一部の図面を御提供頂いた東京大学工学部、渡辺晃教授に謝意を表する。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・磯部雅彦・渡辺 晃・堀川清司 (1980) : 波および沿岸流共存場における内部流速と底面摩擦係数について, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 168-172。
- 泉宮尊司・堀川清司 (1983) : 碎波帯における波のエネルギー方程式のモデリング, 第30回海岸工学講演

会論文集, pp. 15-19。

泉宮尊司・堀川清司(1984): 沿岸砂州のある海浜における波動場および海浜流場予測, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 401-405。

岩垣雄一・酒井哲郎・岡 幸夫(1977): 流れによる波の屈折と波高変化, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 25-29。

片岡真二・足立二雄・佐々木民雄・五十嵐 元(1977): 海浜流シュミレーション・モデルの現地への適用, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 582-585。

佐々木民雄(1978): 海浜流系の現地観測, 水工学シリーズ, 土木学会水理委員会, 78-B-8, 15 pp.

榎木 亨・出口一郎・樽野次雄(1978): 波および沿岸流による底部摩擦に関する一考察, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 42-45。

榎木 亨・李 宗燮・出口一郎(1984): 河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 411-415。

榎木 亨・出口一郎・金 京鎭・松浦秀和(1985): 波および沿岸流共存場における水平混合係数および波向の推定法について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 243-247。

田中 仁・首藤伸夫(1980): 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167。

田中 仁・首藤伸夫(1982): 一方向流を伴う振動流に関する実験, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 259-263。

田中 仁・首藤伸夫(1984): 波・流れ共存場の抵抗則と境界層の区分, 土木学会論文報告集, No.342, pp. 10-25。

田中寛好・和田 明(1983): 数値モデルによる現地海浜流の再現, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 485-489。

谷本勝利・小舟浩治・小松和彦(1975): 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 35-58。

玉井佐一(1977): 海浜流と海浜地形, 水工学シリーズ, 土木学会水理委員会, 77-B-4, 25 pp.

西村仁嗣(1982): 海浜循環流の数値シュミレーション, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 333-337。

西村仁嗣・丸山康樹・平口博丸(1983): 直接数値積分による波の場の解析, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 123-127。

西村仁嗣・丸山康樹・桜井 力(1984): 海浜流の数値計算法について, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 396-400。

西村仁嗣(1987): エネルギー平衡方程式の積分に伴う数値分散について, 第34回海岸工学講演会論文集。(印刷中)

橋本 宏・宇多高明(1974): 海浜流の数値計算法とその応用, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 355-

- 堀川清司 (1972) : 沿岸付近の流れ, 水工学シリーズ, 土木学会水理委員会, 72-B-6, 20 pp.
- 本間 仁監修・堀川清司編 (1985) : 海岸環境工学——海岸過程の理論・観測・予測方法, 東京大学出版会, 582 pp.
- 水口 優 (1979) : 海浜循環流の定量的評価への一考察——平均摩擦係数——, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 509-513。
- 水口 優 (1980) : 海浜循環流のメカニズムに関する基礎的研究, 海岸環境工学研究センター, Rep. No 12, 115 pp.
- 山口正隆・畑田佳男・日野幹雄・細野浩司 (1985) : 流れおよび海底地形による波浪の変形計算法, 土木学会論文集, 第357号/Ⅱ-3, pp. 187-195。
- 山口正隆・細野浩司・川原博満 (1986) : 波の非線形性を考慮した海浜流の数値モデル, 土木学会論文集, 第369号/Ⅱ-5, pp. 185-194。
- 渡辺 晃 (1981) : 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。
- 渡辺 晃・塩崎正孝 (1982) : 構造物周辺の波浪・海浜流場について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 110-114。
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984) : 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410。
- Abbott, M. B., Petersen, H. M. and Skovgaard, O. (1978) : On the Numerical modelling of short waves in shallow water, J. Hyd. Res., Vol.16, No 3, pp. 173-204。
- Berkhoff, J. C. W. (1972) : Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 471-490。
- Berkhoff, J. C. W. (1976) : Mathematical models for simple harmonic linear water waves - Wave diffraction and refraction, Pub. No 163, Delft Hyd. Lab., 103 pp.
- Bettess, P., Fleming, C. A., Heinrich, J. C., Zienkiewicz, O. C. and Austin, D. I. (1979) : Longshore currents due to surf zone barrier, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 776-790。
- Booij, N. (1981) : Gravity waves on water with non-uniform depth and current, Communication on Hydraulics, No 81-1, Dept. of Civil Eng., Delft Univ. of Tech., 131 pp.
- Booij, N. (1983) : A note on the accuracy of the mild-slope equation, Coastal Engineering, vol. 7, pp. 191-203。
- Bowen, A. J. (1969a) : The generation of longshore currents on a plane beach, J. Mar.

- Res., Vol. 27, No 2, pp. 206–215.
- Bowen, A. J. (1969b) : Rip currents, 1. Theoretical investigation, J. Geophys. Res., Vol. 74, No 23, pp. 5467–5478.
- Bowen, A. J. and Inman, D. L. (1969) : Rip currents, 2. Laboratory and field observations, J. Geophys. Res., Vol. 74, No 23, pp. 5479–5490
- Bretherton, F. P. and Garrett, C. J. (1969) : Wave trains in inhomogeneous moving media, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 302, pp. 529–554.
- Copeland, G. J. M. (1985) : Practical radiation stress calculations connected with equations of wave propagation, Coastal Engineering, Vol. 9, No 3, pp. 195–220.
- Dalrymple, R. A., Eubanks, R. A. and Birkemeier, W. A. (1977) : Wave-induced circulation in shallow basins, Proc. ASCE, Vol. 103, No WW1, pp. 117–135.
- Ebersole, B. A. and Dalrymple, R. A. (1980) : Numerical modelling of nearshore circulation, Proc. 17th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 2710–2725.
- Grant, W. D. and Madsen, O. S. (1979) : Combined wave and current interaction with a rough bottom, J. Geophys. Res., Vol. 84, No C4, pp. C4, pp. 1797–1808.
- Greenwood, B. and Sherman, D. J. (1986) : Longshore current profiles and lateral mixing across the surf zone of a barred nearshore, Coastal Engineering, Vol. 10, No 2, pp. 149–168.
- Huntley, D. A. (1976) : Lateral and bottom forces on longshore currents, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 645–659.
- Inman, D. L., Tait, R. J. and Nordstrom, C. E. (1971) : Mixing in the surf zone, J. Geophys. Res., Vol. 75, No 15, pp. 3493–3514.
- Jonsson, I. G., Skovgaard, O. and Wang, J. D. (1970) : Interaction between waves and currents, Proc. 12th Coastal Eng. Conf., ASCE, Vol. 1, pp. 489–507.
- Jonsson, I. G., Skovgaard, O. and Jacobsen, T. S. (1974) : Calculation of currents generated by obliquely incident breaking waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 699–714.
- Kaneko, A. (1983) : A numerical experiment on nearshore circulation in standing edge waves, Coastal Engineering, Vol. 7, No 3, pp. 271–284.
- Karlsson, T. (1969) : Refraction of continuous ocean wave spectra, Proc. ASCE, Vol. 95, No WW 4, pp. 437–448.
- Kashiyama, K., Kawahara, M. and Sakurai, H. (1985) : A numerical simulation for surface waves and nearshore current around structures using finite element method,

- Proc. Int. Symp. "Ocean Space Utilization '85", pp. 197-204.
- Kawahara, M. and Takagi, T. (1982 a) : Stream function finite elements for nearshore current, *Advances in Water Resources*, Vol. 5, pp. 195-207.
- Kawahara, M., Hirano, H., Tsubota, K. and Inagaki, K. (1982 b) : Selective lumping finite element method for shallow water flow, *Int. J. Num. Meth. Fluid.*, Vol. 2, pp. 89-112.
- Kawahara, M. and Kashiwayama, K. (1984) : Selective lumping finite element method for nearshore current, *Int. J. Num. Meth. Fluid.*, Vol. 4, pp. 71-97.
- Kirby, R. T. and Dalrymple, R. A. (1983) : A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography, *J. Fluid Mech.*, Vol. 136, pp. 453-466.
- LeBlond, P. H. and Tang, C. L. (1974) : On energy coupling between waves and rip current, *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, No 6, pp. 811-816.
- Liu, P. L.-F. and Dalrymple, R. A. (1978 a) : Bottom frictional stresses and long-shore currents due to waves with large angles of incidence, *J. Mar. Res.*, Vol. 36, No 2, pp. 357-375.
- Liu, P. L.-F. and Lennon, G. P. (1978 b) : Finite element modeling of nearshore currents, *Proc. ASCE*, Vol. 104, No WW2, pp. 175-189.
- Liu, P. L.-F. (1983) : Wave-current interactions on a slowly varying topography, *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, No C7, pp. 4421-4426.
- Liu, P. L.-F. and Tsay, T. K. (1985) : Numerical prediction of wave transformation, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 111, pp. 843-855.
- Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W. (1962) : Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf-beats", *J. Fluid Mech.*, Vol. 13, pp. 481-504.
- Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W. (1964) : Radiation stresses in water waves: a physical discussion with applications, *Deep-Sea Res.*, Vol. 11, pp. 529-562.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970) : Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1 & 2, *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, No 33, pp. 6778-6801.
- Lozano, C. and Liu, P. L.-F. (1980) : Refraction-diffraction model for linear surface water waves, *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, pp. 705-720.
- Mei, C. C. (1983) : *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, John Wiley & Sons, New York, 740 pp.

- Noda, E. K. (1974) : Wave-induced nearshore circulation, J. Geophys. Res., Vol. 79, No 27, pp. 4097-4106.
- Noda, E. K., Sonu, C. J., Rupert V. C. and Collins, J. I. (1974) : Nearshore circulations under sea breeze conditions and wave-current interactions in the surf zone, Tetra Tech. Rep., No TC-149-4, 216 pp.
- Phillips, O. M. (1966) : The Dynamics of the Upper Ocean, Camb. Univ. Press, London, 336 pp.
- Putnam, J. A., Munk, W. H. and Traylor, M. A. (1969) : The prediction of long-shore currents, Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 30, No 3, pp. 337-345.
- Radder, A. C. (1979) : On the parabolic equation method for water-wave propagation, J. Fluid Mech., Vol. 95, pp. 159-176.
- Sawaragi, T. and Iwata, K. (1974) : On wave deformation after breaking, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 481-497.
- Smith, R. and Sprinks, T. (1975) : Scattering of surface waves by a conical island, J. Fluid Mech., Vol. 72, pp. 373-384.
- Tanaka, H. and Shuto, N. (1981) : Friction coefficient for a wave-current coexistent system, Coastal Eng. in Japan, JSCE. Vol. 24, pp. 105-128.
- Wu, C. -S. and Liu, P. L. -F. (1985) : Finite element modeling of nonlinear coastal currents, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 111, No 2, pp. 417-432.