海岸構造物周辺の波浪場の数値モデル

京都大学防災研究所　正員　○　山下隆男・土屋義人，　電力中央研究所　正員　松山昌史

1. 緒　言： 波浪の伝播計算は海岸工学の分野では最も重要かつ基礎的研究であるが，周期波を仮定しても，複雑な海底地形や人工構造物が存在する海域における波動場の計算は容易ではない．そこでは，屈折，回折，反射，砕波によるエネルギー散逸，波動運動の非線形性，海浜流等との相互作用が波浪の伝播を支配する．

Berkhoff(1972) により屈折，回折を同時に考慮した線形波の基礎方程式，緩勾配方程式が提案され，波浪場を計算する場合のその方程式の有用性が水理実験により示されて以来，海浜流計算の波浪モデルとして広く使われるようになってきた．この方程式は楕円型で，屈折，回折の他に反射の影響も考慮しており，いわば海底勾配が緩かである仮定の下で Helmholtz 方程式に屈折の効果を導入した方程式であると考えられる．Berkhoff(1976) が最初に行ったように，この方程式は有限要素法で解かれるが，海浜流計算の対象となる規模の領域においては，計算時間，容量の点で効率が良くない．このため，方程式の近似化や効率的な数値解法の開発は，流れとの相互作用，砕波や海底摩擦による波浪エネルギー散逸の効果の導入とともに，その後の研究課題であった．

Radder(1979) は，楕円型緩勾配方程式の放物型近似（放物型方程式）を誘導し，従来の波向き線法では計算できなかった焦点 (caustics) の生じるような海底地形でも，進行型計算法 (marching) で，反射の入らない場合の計算が効率的にできることを示した．その後，この方法で反射を入れる試みや，任意波向きの場での計算方法が開発されてきたが，放物近似の仮定のため，一般的な波浪場の計算には限界があり，最近では楕円型緩勾配方程式を効率的に解くための研究に力が入れられるようになってきた．

Warren(1985) らの研究を発端として，Copeland(1985) は楕円型緩勾配方程式を 1 階の双曲型 3 元連立方程式系（長波の伝播を記述する方程式系と同型の複素変数の方程式系）に変換し，その定常解を求める方法を開発した．Copeland は差分法（陽解法）によりこの方法の有効性を示したが，その後，Madsen and Larsen(1987) は ADI 法を適用し，任意境界条件下での計算を可能にするため，sponge layer の概念を導入した．しかしながら，この方法では，直角に近い入射条件に対しては有効であるが，大きな入射角の場合には人工的な回折が生じるため，本研究では任意反射率の境界条件によりこの問題点を解決した．また，定常状態の平面波を記述する 2 階の楕円型緩勾配方程式は複素ポテンシャルで表示され，実部は位相関係，虚部はエネルギー保存関係を意味する．これは，複素関数表示の水位，流量関数（2 成分）を用いて，1 階の非定常双曲型 3 元連立方程式に変換される．その方程式系の実部は，水位，断面平均流量の非定常場を記述する．すなわち，実部を時間発展型として解き定常解を求めることにより，楕円型緩勾配方程式と等価な実数関数の速度ポテンシャルが得られる（非定常緩勾配方程式）．さらに，虚部方程式系を解くと，緩勾配方程式の複素ポテンシャルが得られる．本研究ではこれを双曲型緩勾配方程式と呼ぶことにし，この方程式に基づき海岸構造物周辺での波浪場を計算するための波浪伝播数値モデルを構築した．

2. 双曲型緩勾配方程式による波浪伝播モデル： 砕波や海底摩擦による波浪エネルギーの散逸を考慮した緩勾配方程式は，複素水位変動 ζ で表示すると次式となる．

$$\nabla(cc_g\nabla\zeta) - \frac{c}{c_g}\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2} + i\omega W\zeta = 0$$

ここに，$W = D/E$, D: 波浪エネルギー散逸率，E : 波浪エネルギーである．　この方程式は楕円型で数値計算上，任意境界条件が設定しにくい．この問題を解決するため，1 階の 3 元連立双曲型偏微分方程式系に変換する．この場合，複素変数の実部を解くと，水位変動量 η，線流量の時間変化（波形）が得られる

Takao YAMASHITA, Yoshito TSUCHIYA and Masafumi MATSUYAMA

（数値波動解析法，非定常緩勾配方程式）．この方法では計算時間は短縮されるが，精度，取扱上では複素変数として解くほうが有利である．また，複素変数として解く場合には，時間波形には依存しないことから調和振動成分を取り除くことができ，空間刻みを粗くすることができる．すなわち，次式のように仮想的な水位 S，線流量 P, Q を導入する．

$$\zeta = S(x,y,t)\exp(-i\omega t), \quad P^* = P(x,y,t)\exp(-i\omega t), \quad Q^* = Q(x,y,t)\exp(-i\omega t)$$

ここで仮想的であるということは，S, P, Q を定常解を得るための繰り返し計算回数 t の関数としていることを意味する．

上式の関係を用いると，双曲型緩勾配方程式の基礎方程式として，次式を得る．

$$\frac{c_g}{c}\frac{\partial P}{\partial t} + c_g^2\frac{\partial S}{\partial x} - \frac{c_g}{c} i\omega P = 0$$

$$\frac{c_g}{c}\frac{\partial Q}{\partial t} + c_g^2\frac{\partial S}{\partial y} - \frac{c_g}{c} i\omega Q = 0$$

$$(\frac{c_g}{c} + \frac{iW}{\omega})\frac{\partial S}{\partial t}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} - (\frac{c_g}{c} + \frac{iW}{\omega}) i\omega S = SS$$

ここに，SS は造波境界点での波源（吹き出し）項であり，位相 χ と振幅 A_o により $ss = \frac{c\Delta S}{\Delta x \Delta y} A_o e^{i\chi}$ で与えられる．また，任意反射境界を与える方法は数値波動解析法で谷本らが検討した方法を適用し，直角入射に近い消波境界には sponge layer 境界を用いる．砕波減衰モデルとしては泉宮・堀川のものを用いた．また，数値計算法は有限差分法の交互陰解法（ADI 法）を適用した．

以上のような波浪伝播数値モデルにより計算された海岸構造物周辺の波浪場の一例を，図-1 に示した．

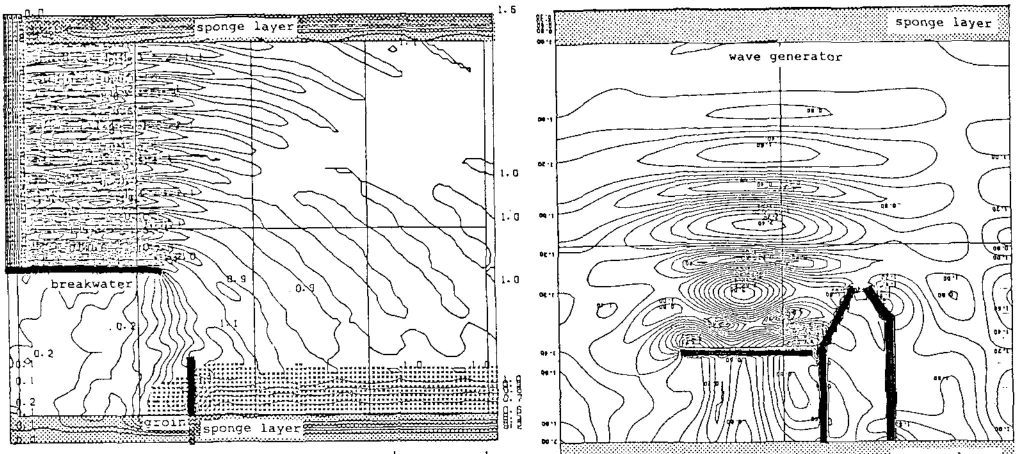

図-1 海岸構造物周辺の波浪場の計算結果の一例