

流れ、水深および入射波浪の非定常変化と考慮した不規則波浪の変形計算法

愛媛大学工学部 正員 山口 正 隆
愛媛大学工学部 〇正員 畑 田 佳 男
愛媛大学工学部 佐々木 俊 裕

1. はじめに：潮流域など強い流れが存在する場所での波浪変形の究明は科学的にも実用的にも重要な課題である。しかし、流れ、水深および入射波浪が時間的に変化する場合には不規則波浪の変形計算モデルは皆無であることから、本研究では、この問題に対する数値計算法を開発したので、報告する。

2. 波浪変形計算法：波浪変形の計算に用いる基礎方程式は次式で与えられる。

$$\frac{dk_x}{dt} = \frac{\partial k_x}{\partial t} + (C_g \cos \theta + U) \frac{\partial k_x}{\partial x} + (C_g \sin \theta + V) \frac{\partial k_x}{\partial y} = -\frac{gk^2 \operatorname{sech}^2 kh}{2\omega r} \frac{\partial h}{\partial x} - k_x \frac{\partial U}{\partial x} - k_y \frac{\partial V}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{dk_y}{dt} = \frac{\partial k_y}{\partial t} + (C_g \cos \theta + U) \frac{\partial k_y}{\partial x} + (C_g \sin \theta + V) \frac{\partial k_y}{\partial y} = -\frac{gk^2 \operatorname{sech}^2 kh}{2\omega r} \frac{\partial h}{\partial y} - k_x \frac{\partial U}{\partial y} - k_y \frac{\partial V}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N(k)}{\partial t} + (C_g x + U) \frac{\partial N(k)}{\partial x} + (C_g y + V) \frac{\partial N(k)}{\partial y} + \frac{dk_x}{dt} \frac{\partial N(k)}{\partial k_x} + \frac{dk_y}{dt} \frac{\partial N(k)}{\partial k_y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 k ：波数、 k_x, k_y ：波数の x, y 成分、 θ ：波向、 C_g ：群速度、 C_{gx}, C_{gy} ：群速度の x, y 成分、 U, V ：流れ成分、 $\omega r = \sqrt{gk \tanh kh}$ ：流れに相対的な角振動数、 h ：水深、 $N(k)$ ：wave action 波数スペクトル密度、である。式(3)は、式(1)、(2)および次式

$$dx/dt = C_g \cos \theta + U, \quad dy/dt = C_g \sin \theta + V \quad (4)$$

で定義される波向線上で $N(k_x, k_y) = \text{const}$ が成立し、wave action 波数スペクトル密度が保存されることを意味する。これを周波数方向空間で表せば、

$$\psi(f, \theta) = \left\{ (C_g + U \cos \theta + V \sin \theta) / 2\pi k \right\} \left\{ E(f, \theta) / \omega r \right\} = \text{const} \quad (5)$$

となる。さて、定常状態における波浪変形計算法として、1点法と格子点法が開発されているが、非定常問題に対して格子点法は非常に長い計算時間を必要とするので、ここでは1地点に到達する各成分波の経路に沿った計算結果を合成する1点法に基づいて波浪変形計算モデルを展開する。すなわち、まずある特定の時刻における対象地点での絶対周波数 ω 、流れ (U, V) および水深 h を与えて、

$$\omega a = \omega r + k_x U + k_y V = \sqrt{gk \tanh kh} + k_x U + k_y V \quad (6)$$

を Newton 法で解くことにより、対象地点での k_x, k_y および C_g を算出するとともに、これらの値を初期値として式(1)、(2)および(4)と3次の Runge-Kutta 法で解いて、沖側境界での波向線上の波数および方向を求めるという逆屈折計算を各成分波に対して行う。波向線の計算過程では、流れや水深の非定常な変化を考慮するため、波向線上での諸量を空間のみならず時間に関して線型内挿を行なって求める。ついで、逆屈折計算から得られた沖側境界での波数（周波数）および波向に対する入力方向スペクトルを適当な方向スペクトルモデルから求め、これに対象地点での周波数および波向に対する方向スペクトルとすれば、特定の時刻における1つの成分波に対する変形計算が終了する。したがって、この計算を全周波数・方向成分について実施し、方向および

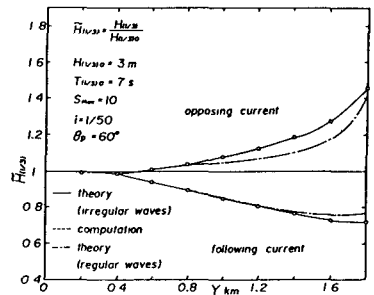


図-1 波高変化に関する理論値と計算値の比較

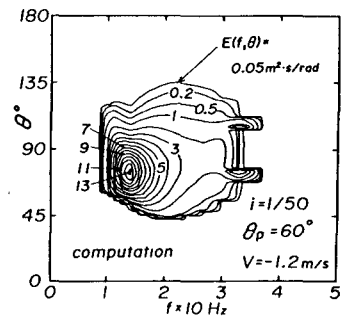


図-2 (a) 方向スペクトルの等値線分布（逆流状態）

が周波数に関する積分を行えば、特定時刻の方向スペクトル、周波数スペクトルおよび有義波高が計算される。そして、任意に指定される次の時刻に対して同様の計算と繰り返せば、波浪特性の経時変化を算出できることになる。

3. 定常流れ場での波浪変形計算：いま、流れ、水深および入射波特性の定常性が仮定されるならば、平行等深線地形上での不規則波の変形に対する解析解が導かれるので、理論解と数値解と比較することにより、定常問題に対する数値モデルの妥当性を検証することができる。図-1は岸沖方向に $\Delta S=100m$ で23に等分割された海底勾配($i=1/50$)領域に1次元流れ($0, V(y)$)($(12V/23)=1/1000$)が存在するという場合に対し、光易型周波数スペクトルおよび方向分布関数と有する不規則波($H_{(1/50)}=3m, T_{(1/50)}=7s$)が、主方向 $\theta_p=60^\circ$ をもて入射した場合の有義波高の変化に対する理論解と数値解と比較したものである。図中には、有義波に相当する波高、周期と主方向に相当する波向を手えて計算した規則波の理論曲線も明示されている。この図を見ると、理論解と数値解はほぼ完全に一致することや、水深変化に伴う規則波の変形量は不規則波に比べて小さいことから、波の不規則性は波高の増大・減少効果と助長することがわかる。次に、図-2は前述のケースに対する $h=8m$ 地点での方向スペクトルの

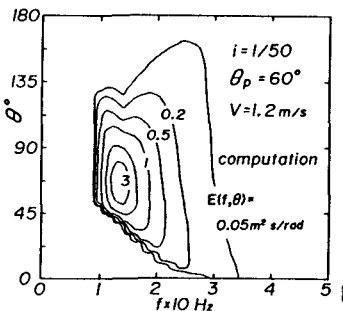


図-2(b) 方向スペクトルの等値線分布(順流状態)

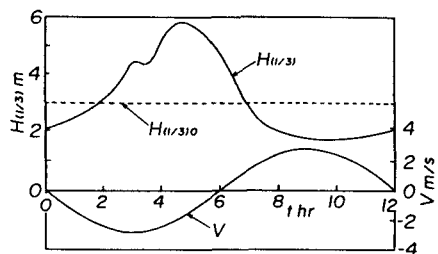


図-3 非定常流れによる波高の経時変化

計算結果と等値線分布として示したものである。方向スペクトル分布は逆流の場合狭くなり、一方、順流の場合には広がるが、この場合理論結果(図省略)と計算結果はほぼ完全に一致する。

4. 非定常流れ場での波浪変形計算：数値計算は流れの変動周期が潮流に相当する12時間である場合について行われた。図-3は岸沖方向に $\Delta S=100m$ で42に等分割された一様勾配($i=1/1000$)領域において、流れの場合、

$$U=0, V=\begin{cases} -0.1/(j-7)\sin\{(k-1)\pi/6\} & ; j \geq 7 \\ 0 & ; j \leq 6 \end{cases} \quad (7)$$

によって1時間ごとに与えたとともに、入射波特性を $H_{(1/1000)}=3m, T_{(1/1000)}=7s, \theta_p=60^\circ$ として、30分ごとに変形計算を実施した場合の水深 $8m$ 地点における波高変化を示したものである。この図によると、逆流および順流の影響が大きいと現れるので、波高は非常に大きな振幅を伴って周期的に変動する。また、方向スペクトルの変形に及ぼす順流と逆流の効果は異なることから、波高の時間変形は非対称になる。図-4は方向スペクトル分布の時間変化を4時間ごとに等値線分布として示したものである。この場合、エネルギー卓越成分波の対象領域における伝播時間は2~3時間程度であるから、対象地点の方向スペクトルは計算時刻より過去約3時間程度の流れ変化の影響を受けることになり、これらの挙動は定常流れに対する結果(図-2)から説明される。すなわち、 $t=0$ では順流の影響を受けることから、波高は入射波高より減少し、方向スペクトル幅は広がるが、時間の経過とともに逆流の影響が増大し、 $t=4hr$ では方向スペクトルの集中傾向が顕著になる。しかし、さらに時間が経過すれば、順流の影響が有効に作用しはじめて、幅広い方向スペクトルに変化し、 $t=12hr$ では再び $t=0$ 時点の方向スペクトルとほぼ同様に

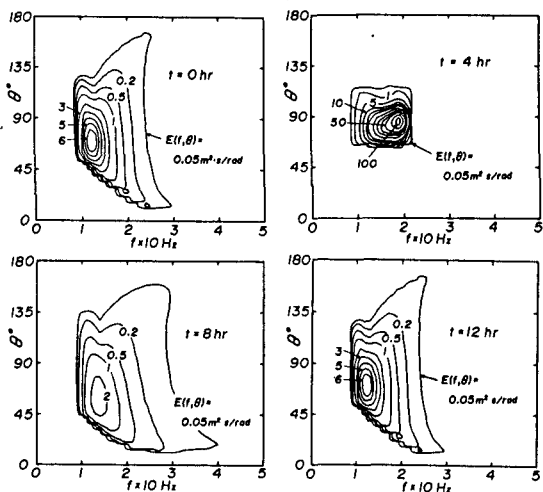


図-4 非定常流れによる方向スペクトルの経時変化

なる。