

II-271 斜面上砕波の数値計算手法

大阪大学工学部 正員 後野正雄

大阪大学工学部 正員 榎木 亨

まえがき: 砕波は海岸工学において非常に重要な現象であり、精力的な研究が進められているにもかかわらず、砕波時の流体場には不明な点は数多く残されている。本研究は砕波時の流体場の中でも鉛直2次元面内の水面波形とその変形に関する精度の高い数値計算手法を取り扱ったものである。本計算手法はLonguet-Higginsらが深海波に対して適用したものと基本的に同じものであり、Newらはこれを一様水深場に適用している。斜面上に対しては喜岡らがすでに成果を報告しているが、境界条件として鏡像境界を導入した疑似砕波となっている。これに対して本研究では、実験水槽全体を計算領域としたものであり、数値実験水槽により近い手法となっている。

計算方法: 本計算手法は2次元水槽内の初期値境界値問題を解くものであり、境界値問題としては連続式、圧力方程式に対応する $\nabla^2 \varphi = 0$ 、 $\nabla^2 \varphi_t = 0$ の2つのラプラス方程式を線形要素による境界要素法を用いて解いている。ここに $\varphi = \varphi(x, y, t)$ は速度ポテンシャルであり、添字 t は時間に関する偏微分値を示す。計算対象領域は図1の網掛け部分であり、造波板の運動は既知であるとする。従って、境界条件で問題となるのは水面の形状(位置)と水面上での φ 、および φ_t の値である。水面に対する運動学的、力学的境界条件より、以下のような水面の位置(水面上の水粒子のラグランジュ座標値 X, Y)と φ および φ_t に関する式が得られる。

$$dX/dt = \varphi_x \quad \dots (1)$$

$$dY/dt = \varphi_y \quad \dots (2)$$

$$d\varphi/dt = 1/2(\nabla\varphi)^2 - gY \quad \dots (3) \quad \varphi_t = -1/2(\nabla\varphi)^2 - gY \quad \dots (4)$$

ここに d/dt はラグランジュ微分を示し、添字 x, y は x, y 方向の偏微分値を表す。式(1)、(2)、(3)は1階常微分方程式になっており、以下に示す2階常微分方程式と合わせて、差分化表示することにより初期値問題としての水面の形状(X, Y)と水面上のポテンシャル値 φ を求めることができる。

$$d^2X/dt^2 = \varphi_{xt} + \varphi_x \varphi_{xx} + \varphi_y \varphi_{xy} \quad \dots (5)$$

$$d^2Y/dt^2 = \varphi_{yt} + \varphi_x \varphi_{xy} + \varphi_y \varphi_{yy} \quad \dots (6)$$

$$d^2\varphi/dt^2 = \varphi_x d^2X/dt^2 + \varphi_y d^2Y/dt^2 - g\varphi_y \quad \dots (7)$$

ここで式(1)、(2)は運動学的境界条件を表す式であり、式(3)、(4)は力学的境界条件を用いて導かれている。また式(7)は運動学的境界条件($dp/dt=0$)を用いて得られる。初期条件は流底、造波板ともに静止とし、水面上のポテンシャル値は $\varphi=0$ とした。時間ステップ Δt は $\Delta t / \Delta t \leq \sqrt{(\nabla\varphi)^2}$ を満たすこととし、この条件が満たされない場合には Δt を計算の途中で変更している。ここに Δl は水面上の各要素の長さである。

計算結果: 図2は波高計により計測した水位変動記録と計算による波高計設置位置での水位変動の比較の1例を示したものであり、図中の□記号が実験値、実線が計算値を示し、造波板の運動開始時刻を $t=0$ としている。また図中の(A)、(B)、(C)は図1に示した波高計A、B、Cと対応している。図2(A)の結果を見ると計算値は実験値に現れる細かな振動を表現していないが、これは境界条件として用いた造波板の運動に関する実験結果を1/20秒間隔で解析したのに対し、計算は1/80秒間隔で実施したため、造波板の高周波数の運動成分が境界条件に含まれていなかったことによるものと思われる。一方、図2(B)、(C)は実験結果と計算結果とがよく一致しており、計算結果が波の伝播の様子を正確に再現していることを示している。図3は砕波近傍の空間波形に関する実験結果と計算結果の比較をしめたもので、破線は0.2秒間隔で撮影した写真解析により得られた実験結果であり、実線は計算結果を示している。図中には2つの実験結果に対応すると思われる時刻の計算結果に造波開始後の時刻を記入してある。砕波近傍の水位上昇量に関してみると計算結果は実験結果を過大に評価している。しかしながら水面の形状特性及びその変形の様子について見ると計算結果は実験結果を十分に表しており、この図より計算結果は砕波時の波形とその変化を十分に再現するものと考えてよからう。この砕波は図2(C)に示されている第

2 番目の波峰による碎波を示したものである。なお第 1 番目の波峰は斜面上では碎波せずに先端まで達し、図 4 に示すような斜面を遡上する先端部で非常に小さな碎波状態を呈する。図中の番号は節点番号で節点 1 及び 2 の間がほぼ鉛直に切り立っており、これが先端部の碎波である。このような状態になると計算を進めることができないので、本計算では破線で示すように節点 2 および 3 から外挿により新しい 1' をもとめこれを節点 1 として計算を進めた。このような人工的な補正がその後の計算結果にどのような影響を及ぼすのかについて、現段階では不明点が多いが、先の計算結果が水位上昇量に関して実験結果より大きくなっているのはこの理由によるものとも考えられる。図 5 はこのような先端部の碎波が生じないように造波板の初期位相を調節して計算を行った結果であり、先端部碎波による補正は行っていない。図中には周期の異なる 4 つの碎波を示してあるが、周期あるいは Surf-similarity parameter $I_r (= i / \sqrt{H_b / L_o})$ によって碎波形態や碎波水深の変化する様子が明確に現れている。今後この計算結果を用いて碎波時の流体場や碎波限界などに対する水理学的な理解を深める研究を続けていく所存である。最後に本計算を進めるに当たり貴重な御助言を頂いた名工大喜岡助教授に謝意を表します。

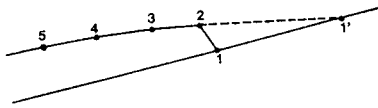


図 4 先端部碎波の補正

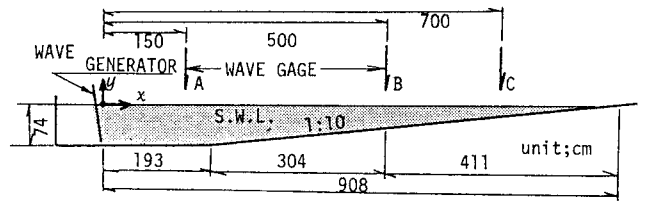


図 1 実験水槽と解析対象領域

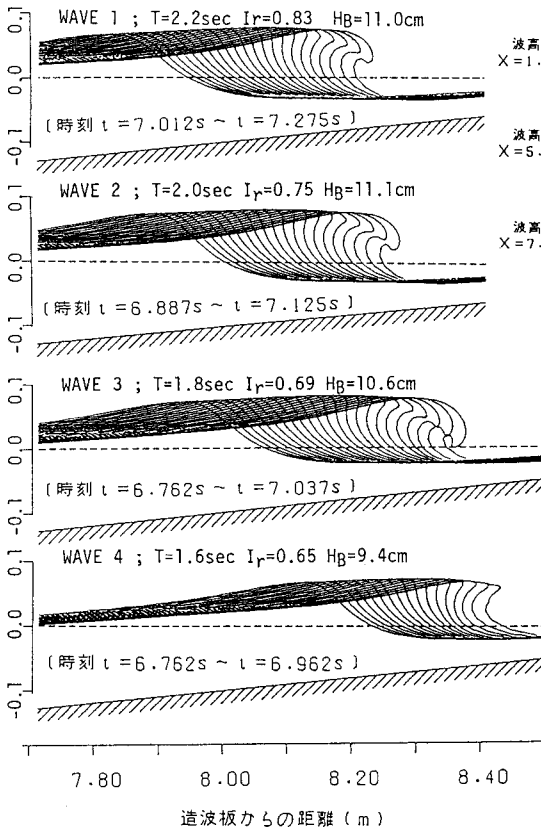


図 5 周期による碎波形態の変化

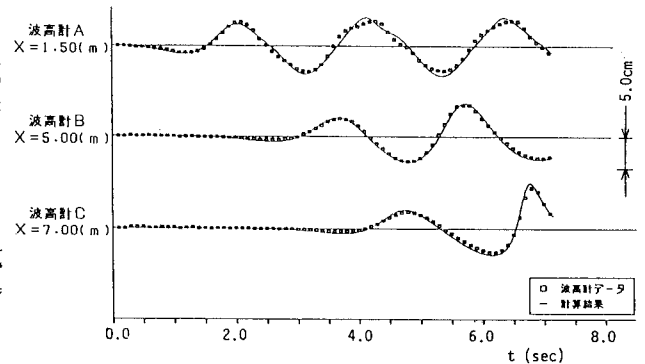


図 2 計算値と実験値の比較（時間波形）

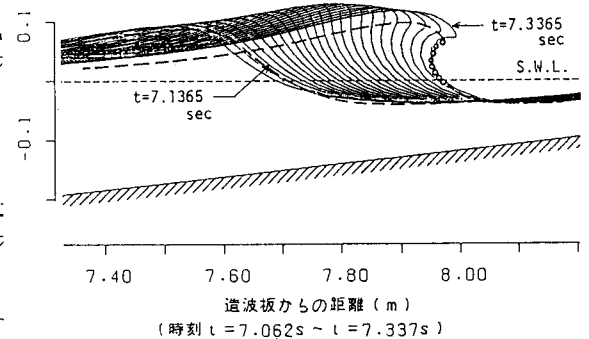


図 3 計算値と実験値の比較（空間波形）