

VOF 法による波動場シミュレーションの精度と適用性に関する検討

九州大学工学部 学生員 古本 裕一 久留島暢之 金 相昊
 正会員 山城 賢 吉田 明德

1. はじめに

近年、沿岸域における波動場の数値解析法に関する研究は盛んに行われており、多くの数値解析法が提案されている。中でも、VOF 法¹⁾は砕波等の強非線形現象までも取り扱えることから、数々の問題に適用されており、実用を目的とした数値波動水路 (CADMAS-SURF)²⁾と呼ばれる数値モデルが開発され、その開発段階において計算精度に関する多くの検討がなされ、ある程度の計算精度を満足するためのセル幅等の計算条件について一定の基準が示されている。しかしながら、最適な計算条件や計算精度の限界については必ずしも明らかではなく、実際に計算を行う際に対象とする問題に応じた最適条件をそのつど調べて適用するというのが実情と思われる。当研究室では BEM と VOF を結合した波動場解析法を開発中であり³⁾、一連の研究の中で VOF 法本来の計算精度を十分に把握することの重要性を認識した。そこで、本研究では VOF 法に基づく数値波動水路を使用し、単純な波の伝播と複雑な現象の一例として直立壁における波の打上げを対象に、VOF 法の計算精度の限界を把握することを試みた。

2. 定形進行波の伝播

2.1 計算条件および検証方法

計算条件は「数値波動水路の研究・開発」²⁾で行われている定形進行波の伝播に関する精度検証の条件を参照した。解析領域を図-1に示す。水深 10m、波高 4.0m、周期 8.0s、波長 72.7m のクノイド波を 20 周期間造波し、4 つの観測点で得られた水面変動から 1 波毎の波高を求め、図-2に示すように、造波直後と反射波の影響がでる範囲を除いた第4波目から第15波目の波高について、計算値と理論値との差 H をとり、その 2 乗平均誤差 $\epsilon = \sqrt{\sum \Delta H^2 / N}$ を図中の計算式より算出した。ここで、 N は波数を示している。同様の計算をセル幅を変えて

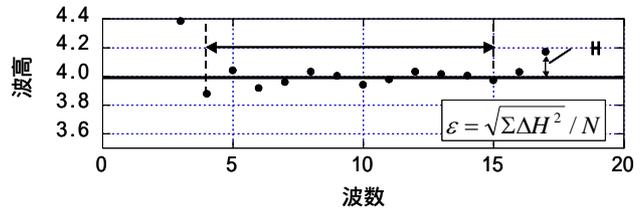


図-2 波高の時間変動の一例 (観測点3)

行い、最適なセル幅を検討した。なお、セル幅は本研究に使用したコンピュータ (CPU: Pentium(R)4 3.2GHz、メモリ: 1.5GB) で計算し得る限界まで細かく設定した。

2.2 結果および考察

各観測点において、計算ケース毎に算出した波高の 2 乗平均誤差を図-3に示す。横軸の X, Z はそれぞれ X 方向、 Z 方向のセル幅を、縦軸の ϵ は 2 乗平均誤差を示しており、図中にはその観測点における最適なセル形状を示している。図より、観測点が造波境界から離れるにつれて全体的に誤差の値が大きくなっていることがわかる。また、観測点 2, 3, 4 では概ねセル幅が細かい程、誤差が小さくなっているものの、最も精度の良い最適セルの形状は、必ずしもセル幅を最も細かくしたものとは限らなかった。逆に、造波直後の観測点 1 ではセルを細かくするほど誤差が大きくなる傾向がみられた。この原因については現在検討中である。「数値波動水路の研究・開発」²⁾ではセルの縦横の比率を 1:1 とすることが推奨されているのに対し、本計算結果では 1:1 よりも 1:2 のほうが精度が良いという傾向が見られた。ここで用いた波の条件では鉛直方向の変動に比べ水平方向の変動が圧倒的に大きいため、このような結果になったのではないかと考えられる。また、セル幅を細かくするにつれて多大な計算時間を必要とし、例えば最も大きなセルでの計算時間は約 30 秒であったのに対し、セルを細かくすると、最大で約 10 時間の計算時間を要した。

3. 直立壁における波の打上げ

3.1 水理模型実験の概略

長さ 28m、幅 30cm、深さ 50cm の 2 次元反射吸収式造波水路を用いて行った。水路内に図-4に示す不透過な直立壁および護岸前面長さ $B=90\text{cm}$ 、斜面勾配 $=20^\circ$ のマウンドを設け、 $H1/3=6\text{cm}$ 、 $T1/3=1.3\text{sec}$ ($kh=0.75$) の不規則波を作用させた。沖側水深 $h=20\text{cm}$ とし、マウンド上の水深 $d=12.5\text{cm}$ とした。水中に

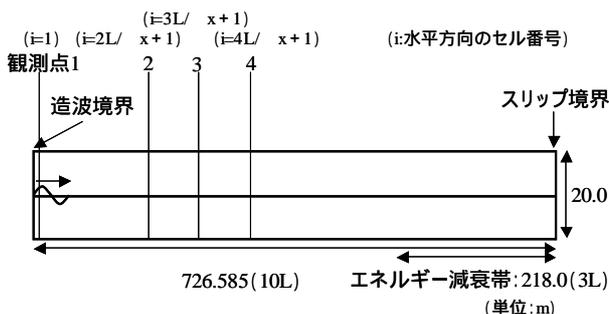


図-1 解析領域

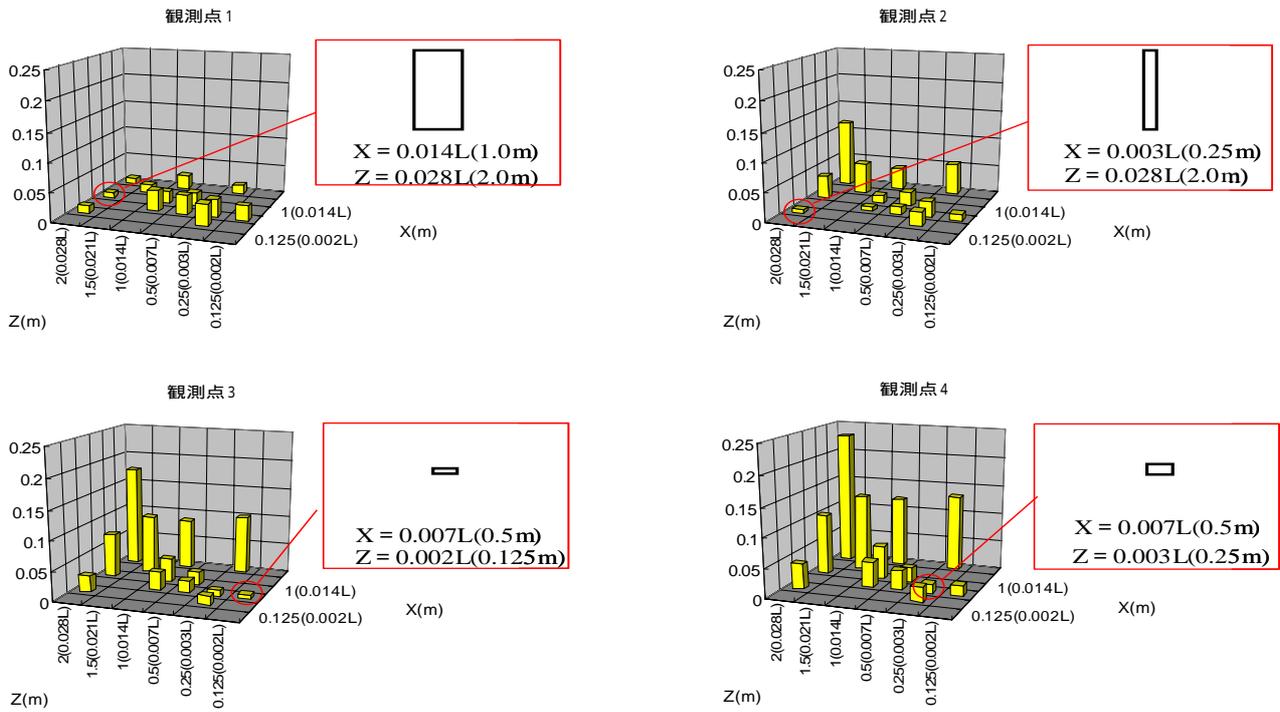


図-3 波高の2乗平均誤差の比較

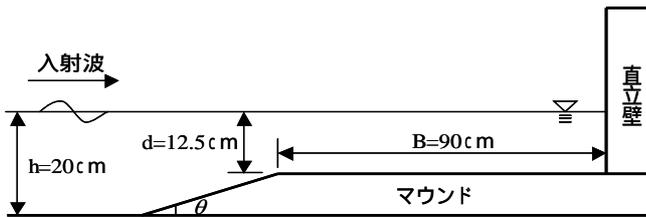


図-4 実験模型

粒径 $80\ \mu\text{m}$, 比重 1.03 のナイロン樹脂粒子を混入し, 打上げの様子を高速度カメラ (250fps) で撮影し, その画像を PIV (流体解析ソフト Flow-vec32 (株)ライブラリー製) により解析し, 流速ベクトルを求めた.

3.2 数値シミュレーション結果の検討

数値シミュレーションでは水理模型実験における検討断面を同スケールで再現した. 造波方法には造波ソースを用い, セル幅は比較的細かく正方形となるよう, $X=0.009L$ (0.015m), $Z=0.009L$ (0.015m) に設定した. 時間刻み幅は自動計算とした.

打上げの瞬間の様子について実験結果と計算結果との比較を図-5に示す. 図より, 全体的に計算結果は波が直立壁に打ち上がる様子を良く再現できているように思われる. 詳細に比較すると, 解析できていない打上げ先端を除いて, 図-5の赤い矢印で示すように実験結果のほうが流速ベクトルの傾きが大きくなる傾向が見られた.

4. おわりに

VOF 法による数値シミュレーションは実験で生じる現象を概ね再現できていることが分かった. しかし, その詳細については現在, 比較検討中であり, 今後, さらに詳細に VOF 法の適用性を検討していく.

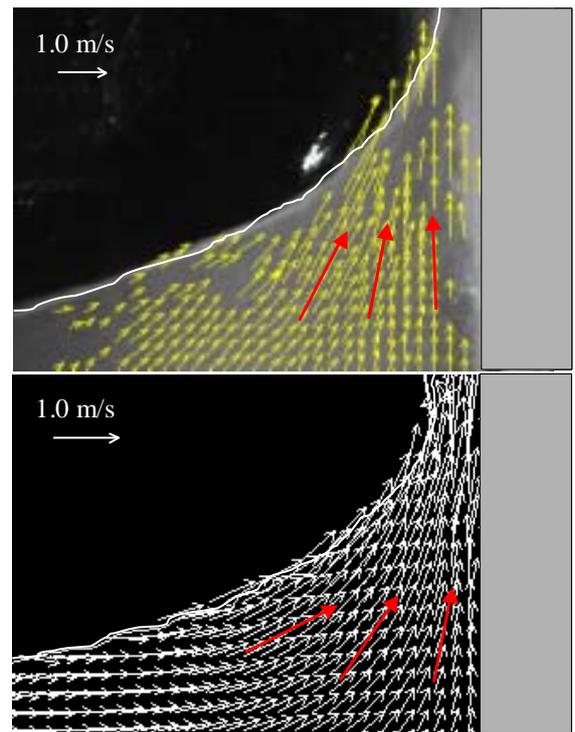


図-5 打上げ時の流速ベクトルの比較 (上図: 実験結果, 下図: 計算結果)

参考文献

- 1) Nichols, B.D., C.W.Hirt, and R.S.Hotchkiss. (1980) : SOLA-VOF, A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory report LA-8355, 119p.
- 2) 沿岸開発技術研究センター編 (2001) : 数値波動水路の研究・開発, 296p.
- 3) エン曙光ら (2004) : BEM と VOF の結合解析法による構造物近傍波動場の解析, 海岸工学論文集, 第 51 巻 pp.31-35.