

LES-VOF 法によるリーフ上での数値波動解析

谷本勝利*・趙

群**・中村廣昭***

1. はじめに

自由水面を有する流体運動の数値計算法の一つとして、Hirt・Nichols (1981) による SOLA-VOF 法があり、1990 年代になって、一部改良が図られつつ、砕波を含めた非線形波動の数値計算に応用されるようになってきた (たとえば、van der Meer ら, 1992; 川崎・岩田, 1996)。しかしながら、砕波に伴う乱れ、特に小さいスケールの渦によるエネルギー逸散の適切な評価などの問題が残されており、いまだ汎用的実用化に向けて発展途上の段階にあるといえる。そのため、本研究では、Volume Of Fluid (VOF) 法と乱流の数値計算に用いられている Large Eddy Simulation (LES) とを組み合わせた方法を採用し、急斜面と浅い水平部を有したリーフに適用して、その実用性を検討する。ただし、ここではとりあえず二次元計算に限っている。

2. 基礎式

LES における基礎式は次のとおりである (Deardorff, 1970)。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - g_i + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + 2 \frac{\partial \nu_T S_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

ここに、添字 $i=1, 2$ はそれぞれ水平 ($x_1=x$ 軸) 方向、鉛直 ($x_2=z$ 軸) 方向を表し、 j はダミーインデックスである。 t は時間、 $\bar{u}_i$ は流速成分、 $\bar{p}$ は圧力、 ρ は密度、 g_i は外力成分 ($g_1=0, g_2=g$: 重力の加速度)、 ν は動粘性係数、 ν_T は渦動粘性係数であり、オーバーバーは次のように数値計算における一つのセル内での平均量を表す。

$$\bar{u}_i(x, z, t) = \frac{1}{\Delta x \Delta z} \int_{x-\frac{1}{2}\Delta x}^{x+\frac{1}{2}\Delta x} \int_{z-\frac{1}{2}\Delta z}^{z+\frac{1}{2}\Delta z} u_i(\xi, \zeta, t) d\xi d\zeta \quad (3)$$

また、

$$\nu_T = \sqrt{2} C_s |S_{ij}| \Delta x \Delta z \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

であり、 C_s は Smagorinsky 係数 ($=0.1$)、 $\Delta x, \Delta z$ はそれぞれ x, z 軸方向の差分間隔である。実際計算では、物理的流体域の外側での $\bar{u}$ や $\bar{p}$ の値をどのように与えるかということが大きな問題となるが (Chan & Street, 1970)、ここでは、水面上については水面下の値から一次外挿する手法をとりあえず用いている。

水面を決定する VOF 関数 F は次式で与えられる。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial u_j F}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

数値計算は基礎式を差分化して、境界条件と初期条件のもとに step by step に解いていく方法による。差分化には staggered mesh を用いており、圧力および VOF 関数 F をセル中心に、速度成分をセルの 4 辺のそれぞれ中央に位置づけている。移流項の差分は Hirt & Nichols (1981) によるスキームに基づき、制御パラメータは 0.3 とする。粘性項および SGS 項すなわち式 (1) 右辺の最後の項は中央差分スキームによる。自由水面は $F=0.5$ の内挿点を結ぶ線で定義し、砕波に対し特別な扱いはしていない。計算は式 (1) により新しい時間ステップでの流速の近似値を求め、式 (2) の連続の式を満足するように流速および圧力を iteration によって修正し、最後に VOF 関数を求める手順で行う。

さらに、本研究では、沖側の無反射性造波境界や岸側境界の無反射性を取り入れた数値波動水路を構築している。その計算法や消波性能については Zhao & Tanimoto (1998) および Zhao ら (1998) を参照されたい。入射波としてはストークス波の第二次近似理論を用いている。

3. 計算結果と考察

(1) 実験水路と数値波動水路

以下、規則波に対するいくつかの計算結果を、まず既往の実験結果と比較しながら示す。図-1 は実験水路と数値波動水路との関係を示したものである。リーフの模

* 正会員 埼玉大学教授 工学部建設工学科
** 正会員 埼玉大学工学部 特別研究員
*** 正会員 埼玉大学助手 工学部建設工学科

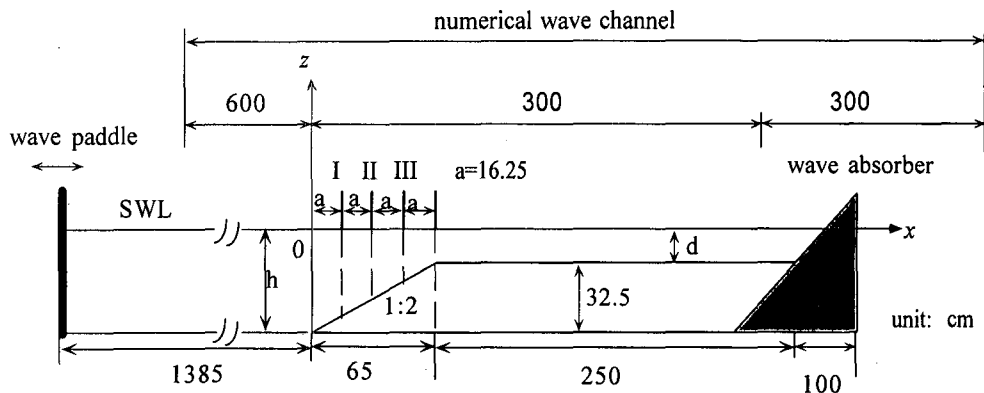


図-1 実験水路と数値波動水路

型は沖側斜面の勾配が1:2、高さ32.5 cm、水平棚の長さ250 cmで、木製である。沖側一定水深 h は37.5 cm (ケース1)、45.0 cm (ケース2)の2種に変化させており、それに対応する水平棚上の水深 d はそれぞれ5.0、12.5 cmとなる。静水面上波の進行方向に x 軸、鉛直上向きに z 軸をとり、原点はリーフの斜面の起点を通る鉛直線上にとっている。造波板の中立位置は $x=-1,385$ (cm)である。

これに対し、数値波動水路では、造波板位置を $x=-600$ (cm)におき、水路をやや短くしている。また、水平棚の長さも235 cmとやや短くとり、水路端の消波部の長さを300 cmとしている。

(2) 波形および波高分布 (ケース1)

図-2は波形 η の時間変化を実験結果と比較したものである。条件は、 $h=37.5$ (cm)、 $d=5.0$ (cm)で、入射波高 $H_{in}=5.64$ (cm)、周期 $T=1.6$ (s)であり、計算における差分間隔は $\Delta x=2$ (cm)、 $\Delta z=1$ (cm)、初期の時間間隔 Δt は0.005 sである。 $x=-200$ (cm)は沖側一定水深、 $x=16.25$ (cm)は斜面上砕波点前方、 $x=57.0$ (cm)は斜面上波高最大地点、 $x=75.0, 160$ (cm)は水平棚上に位置している。ただし、計算波形は測点に最も近い位置でのものであり、位相は実験による波形に適宜合わせてある。計算結果はリーフにおける波形の変化をよく表しているものの、砕波後の細かい波形にやや相違が見られる。

一方、図-3は同条件での波高 H と平均水位 $\bar{\eta}$ の分布を比較したものである(L_{in} は入射波の波長)。ここでも、波高分布では砕波後の減衰が、平均水位では砕波点での低下、砕波後の上昇が実験結果と比べてやや小さいといった相違が認められる。しかし、二次現象はともかく、リーフ前方での部分重複波、浅水変形、砕波波高、砕波直後の波高減衰など全体的には実験結果とよく合っている。

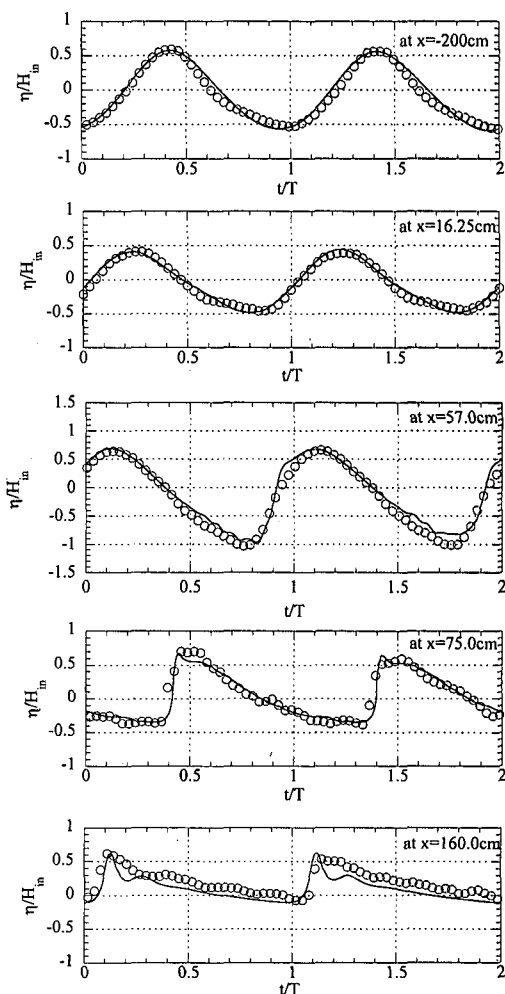


図-2 波形の時間変化

(3) 流速および圧力の鉛直分布 (ケース2)

ケース2については、斜面上で砕波点より沖側、すな

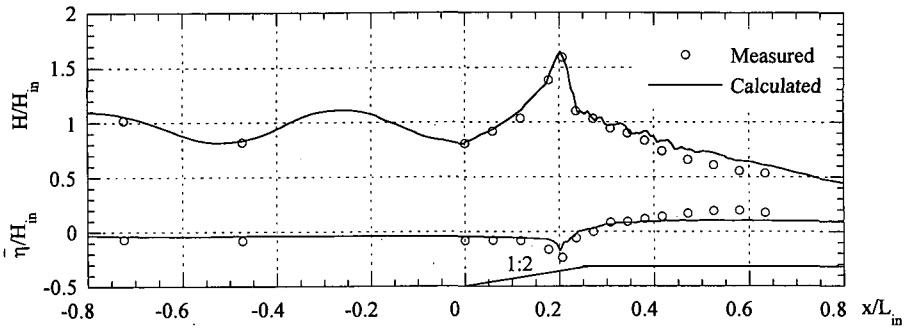


図-3 波高分布

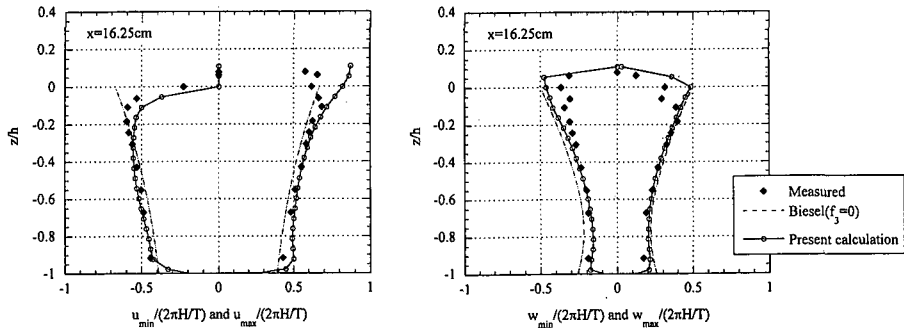


図-4 流速成分の最小・最大値 (測線 I)

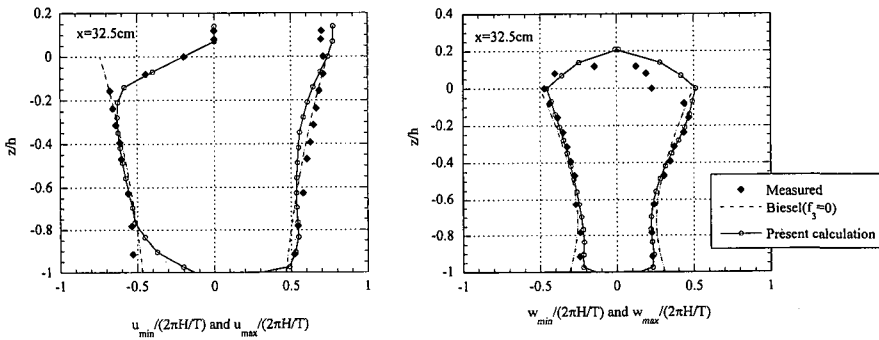


図-5 流速成分の最小・最大値 (測線 II)

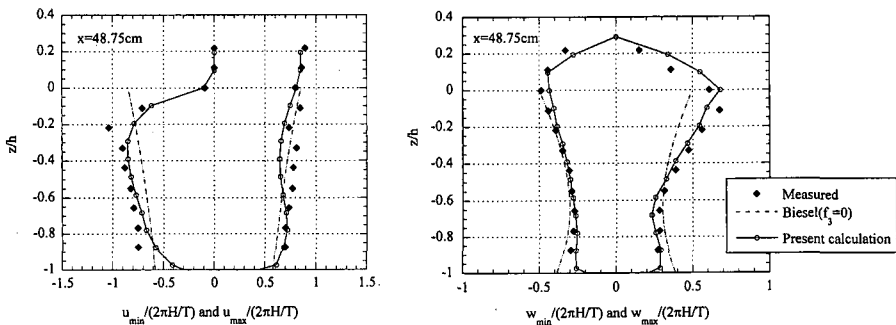


図-6 流速成分の最小・最大値 (測線 III)

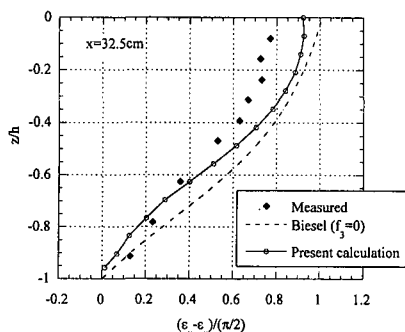


図-7 流速成分の位相差 (測線II)

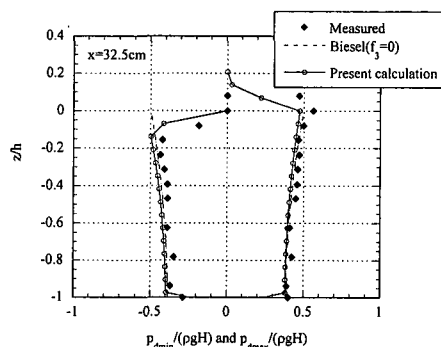


図-8 波動圧の最小・最大値 (測線II)

わち碎波による乱れの影響がほとんどないところであるけれども、図-1 に示した測線 I, II, III において、流速成分や圧力を測定しているの、次にその実験結果との比較を示す。条件は、 $h=45.0$ (cm)、 $d=12.5$ (cm) で、 $H_{in}=6.60$ (cm)、 $T=1.6$ (s) であり、計算における差分間隔は $\Delta x=\Delta z=2$ (cm)、初期の時間間隔 Δt は 0.005 s である。

図-4~6 に水平流速成分と鉛直流速成分の最小・最大値 (測線 I, II, III)、図-7 に水平・鉛直流速成分の位相差 (測線 II)、図-8 に波動圧 p_d の最小・最大値 (測線 II) の鉛直分布を示している。いずれも谷本ら (1996) が計算した Biesel による第二次近似理論値も参考のため併せて示してある。図中の H は実験あるいは計算で得られた測線地点での波高である。これらにおいて、水面や水底 (計算では no-slip) 付近で一部相違が目立つものの、鉛直流速成分や位相差など急斜面上での波動の性質をよく表しており、全体的には良好な結果が得られている。

(4) 渦度および渦動粘性係数の分布 (ケース 1)

ケース 1 の条件に戻って、数値計算による碎波の内部構造についていくつかの結果を示す。まず、図-9 は計算開始後 $t=10.4$ (s) での流速分布である。斜面上端付近で碎波した波が段波状となって水平棚上を少し伝播した

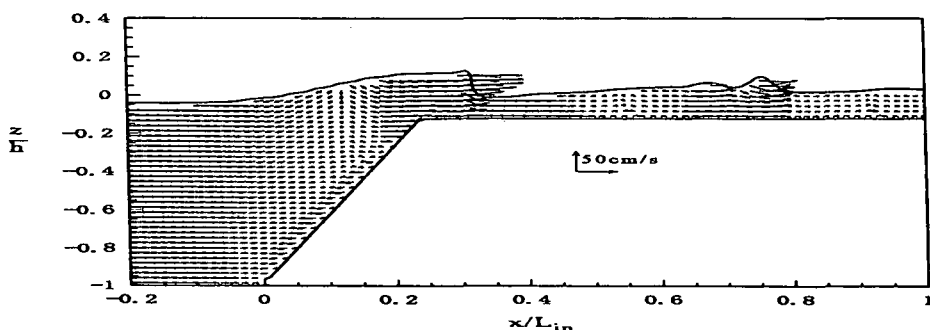


図-9 流速の空間分布

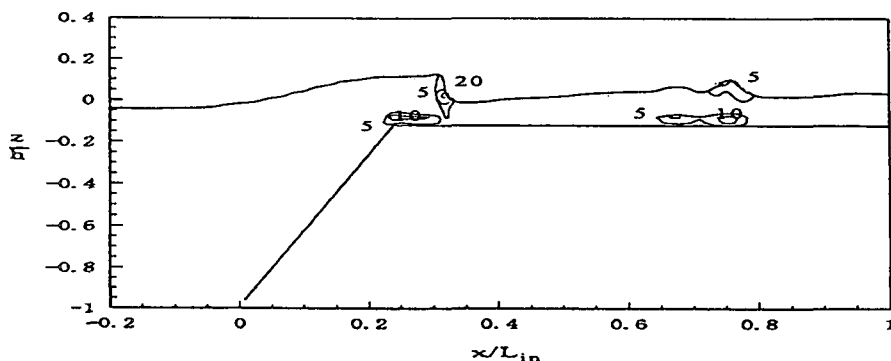


図-10 渦度の空間分布

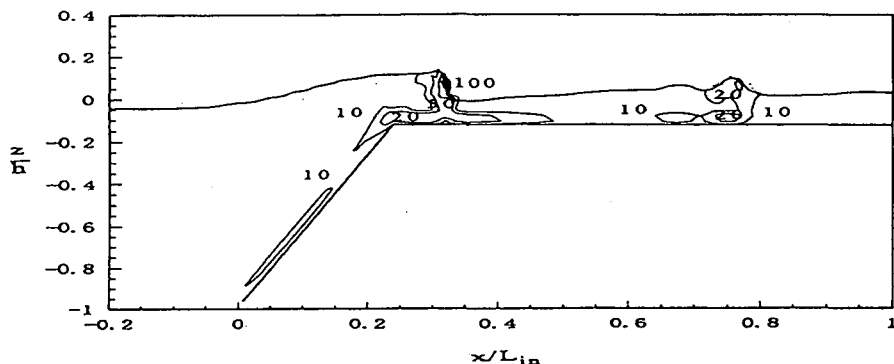


図-11 渦動粘性係数/動粘性係数の分布

タイミングであり、 $x/L_{in}=0.75$ あたりにその前の段波が見える。流速は段波のフロント部分で大きく最大 65.6 cm/s に達している。

図-10 は $x-z$ 面と直角方向の渦度成分 ω_y 、図-11 は渦動粘性係数の分布をそれぞれ示したものである。渦度成分は段波の足元付近で 20 s^{-1} と大きい。また、斜面と水平棚のコーナー付近および先行段波のフロントの水底付近でも 10 s^{-1} 程度のところが認められる。渦動粘性係数の値はずれの変形速度の大きさに比例しているが、段波のフロント付近で 100 を超えるところがあるなど特に大きい。また、コーナー付近など乱れの大きいところで大きく、LES の特徴がよく現れている。ただし、今回の研究では乱れの特性を定量的に調べるには至っていない。LES を導入したのは乱れそのものを正しく計算するというよりも、乱れの大きいところでエネルギー逸散が大きくなるようにする一つの便法と考えている。

5. むすび

本研究において、LES-VOF 法に基づいた数値波動水路を構築した。ここではその性能試験の結果を示していないけれども、無反射性造波方式など、物理的造波水路の性能以上の結果を得ることができる。本数値計算法を急斜面と浅い水深の水平棚を有したリーフに適用し、実験結果と比較した結果、波形、流速分布、波高分布など、リーフ上での波動をよく再現できることが例証された。しかし、今回の計算では、斜面上端付近で水底が露出に近い状態となった場合、計算が収束しないなどの問題点が残されている。今後、その解決とともに、リーフ境界

を free slip とした場合の検討、さらには海岸堤防、防波堤等海岸構造物への波の作用へ適用できるよう発展を図っていきたい。

なお、著者の一人趙は文部省国費留学を修了した後、本年 4 月より日本学術振興会の外国人特別研究員に採用され本研究を継続したものであり、ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 川崎浩司・岩田好一朗 (1996): 3 次元波動場に設置された潜堤による Spilling 型碎波の変形過程に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 96-100.
- 谷本勝利・中村 茂・趙 群・中村廣昭 (1996): 急斜面上での波動場とラディエーション・ストレスの評価, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 26-30.
- Chan, R. K. C. and R. L. Street (1970): A computer study of finite amplitude water waves, J. Computational Physics, Vol. 6, pp. 68-94.
- Deardorff, J. W. (1970): A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, J. Fluid Mech., Vol. 41, Part 2, pp. 453-480.
- Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981): Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225.
- van der Meer, J. W., H. A. H. Petit, P. van den Bosch, G. Klopman and R. D. Broekens (1992): Numerical simulation of wave motion on and in coastal structures, Proc. 23rd ICCE, pp. 1772-1784.
- Zhao, Q. and K. Tanimoto (1998): Numerical simulation of breaking waves by large eddy simulation and VOF method, Abstract of 26th ICCE (in press).
- Zhao, Q., K. Tanimoto, V. T. Ca and H. Nakamura (1998): Numerical wave channel by VOF method, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集 (in press).