

## 造波装置による自由水面流の解析

Computation of Free-Surface Flow

Generated by a Wave Maker

中山昭彦\*・市成準一\*\*・栗真潤二\*\*\*

by Akihiko NAKAYAMA, Junichi ICHINARI and Junnji KURIMA

Complex free-surface flows in the vicinity of an obstacle placed on the floor of a channel to generate a surface wave has been studied experimentally and numerically. The numerical method examined is the simplified MAC method of Hirt & Nichol with the volume of fraction (VOF) method of treating the free surface. This calculation method used with a third-order upwind differencing scheme gives results that agree very well with experiments for not too large waves with relatively small velocities. The experiments show that as the flow volume and the velocity increase, the disturbances appear on the free surface with significant air entrainment. The present calculation method, although does not reproduce the details of the experiment exactly, shows appearance similar disturbances.

Keywords: wave generator, finite difference analysis, free-surface flow, channel experiment

### 1. はじめに

水路床に置かれた障害物により流れを屈折させ、表面波を造る装置が沿岸波のシミュレーション等で応用され始めている<sup>1)</sup>。扉の開閉操作により水槽に貯めた水を流し出す方式は形の特長された波高の大きな波を単数個造るのに適している。また水槽扉開閉の制御、障害物の形状を変える事等により波の形状や特性の調整が可能なので減衰の少ない孤立波を生成する事も可能となるものであるが、造波による流れの特性を理解する必要がある。本研究ではこういった造波装置による自由水面流れの特性を解析するための適切な数値計算法についての検討を行う。また対応する実験を行い計算法の妥当性を詳しく検討する事も目的とする。

自由水面を有する流れを扱う数値計算法には、これまでに差分法（例えば、Miyata<sup>2)</sup>）、有限要素法（例えば、Kawahara et al.<sup>3)</sup>）、Lagrange 座標系を用いた方法（西村<sup>4)</sup>）など数多くの数値解析法が提案されている。水路床起伏が激しく形状の複雑で碎波も起こる場合、粘性の影響、レイノルズ数が大きい場合の乱れの影響、気泡が混入する場合など必ずしも精度ある実用的計算はなされていない。特に実験結果と計算結果の詳細を比較し検証した例は少ない。本研究では上記の造波装置の流れに関する実験及び数値

---

|     |     |      |         |                               |
|-----|-----|------|---------|-------------------------------|
| *   | 正会員 | Ph.D | 神戸大学助教授 | 工学部土地造成工学研究施設（〒657 神戸市灘区六甲台町） |
| **  |     |      | 神戸大学技官  | 工学部土地造成工学研究施設                 |
| *** |     |      | 神戸大学学生  | 工学部土木工学科                      |

計算を同じ条件で行い、結果を比較する事により本装置による造波の特性を調べ、類似した起伏のある底面形状による自由水面を持つ流れに適した数値計算法の検討を行う事を目的とする。

## 2. 数値計算法

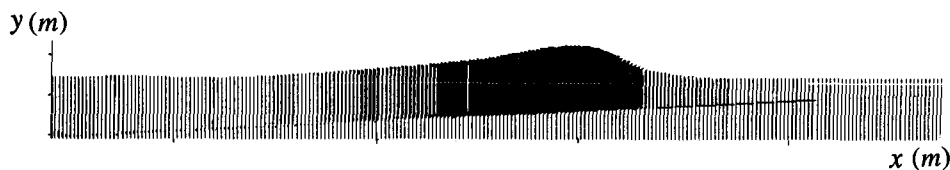
数値計算は二次元非定常流のナビヤ・ストークスの式を Hirt and Nichol<sup>5)</sup> の改良による SOLA-VOF 法を基にした方法で解く。SOLA 法は圧力場の振動を抑えるため速度と圧力の定義される位置をずらせた食い違い格子を用いた MAC 法の改良版の一種である。この方法ではまず圧力勾配項を除いた運動量方程式を陽的に時間積分し、近似速度場を計算する。この近似速度場を連続の式を満足するよう修正するが、修正項は圧力の勾配になるので、修正された速度場が連続式を満たすよう圧力分布を計算していくことになる。基本 MAC 法では圧力に関するポアソンの方程式を解くのに時間が費やされるが、この方法ではその代わりに反復修正演算を行うので効率が良い。本計算ではレイノルズ数が大きい事を考慮にいれ、移流項には Leonard<sup>6)</sup> による 3 次精度風上差分法を不等間隔メッシュでも適応できるようにしてある。長方形格子を用いるが各格子点で関数  $\beta(x,y)$  を導入し、その値を流れ領域内で 1、壁、床などの領域外で -1 と置き、境界を指定する方法をとる。境界に隣接する位置では一次差分をもちいた。自由表面を扱うのには VOF 法をもちいるが、こらは計算格子内に含まれる水の占める体積の格子の体積に対する比を関数で表わす。すなわち関数  $F(x,y,t)$  を

$$F(x,y,t) = \begin{cases} 1, & \text{水のみ} \\ 0, & \text{空気のみ} \\ 0-1, & \text{水面を含む場合} \end{cases} \quad (1)$$

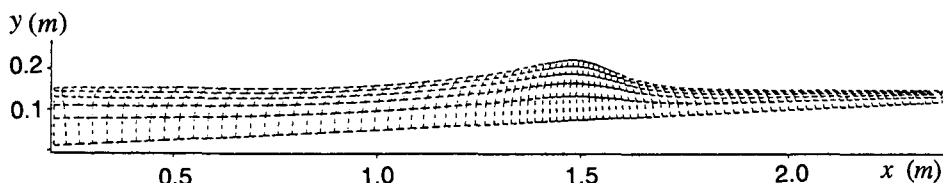
と定義し  $F$  についての保存式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

をナビヤ・ストークスの式と同時に時間積分していく。 $F$  が 0 と 1 の間の値を取るセルには水面があることになるが、その位置と方向は上流側と下流側の両側の水面の位置から水面形を概算し  $F$  の移動量を決



(a) 本計算法による結果



(b) 西村ら<sup>4)</sup> による計算結果

図-1 斜面上の孤立波の計算例

定する「ドナー・アクセプター法」で算定していく。この方法では、水面勾配が急な場合はもちろん、水面高が水平位置の多価関数になる複雑水面形の場合も問題はない。水面では表面張力の効果もいれられ、不安定化を防いでいる。格子間隔は壁面上の境界層も捉えられるよう細かくとり、層流として解いているが、2、3のケースにつき近似的に乱流応力の影響をいれる渦粘性係数を導入し、その効果を調べた。

計算法の検証のため、まず簡単な平らな斜面を遡る孤立波の計算を行い既往の計算結果との比較を行った。西村<sup>4)</sup>が Lagrange 座標を用いた、20度の傾斜面上での波の変形計算と比べるため、同じ条件で計算された。すなわち波は、左端の鉛直壁を  $0 < t < t_e$  の間次式に従って移動させる事により生成した。

$$X_w(t) = B_0 [\tanh((t-t_0)/T) + \tanh(t_0/T)] \quad (3)$$

ここで  $X_w(t)$  は左壁の位置、 $B_0=10.4\text{cm}$ 、 $T=0.213\text{ sec}$ 、 $t_0=0.742\text{sec}$ 、 $t_e=1.48\text{sec}$  で左端初期水位は  $15\text{cm}$  ある。 $t=2.2\text{sec}$ での結果が図-1に示されている。この例では流れの殆どの領域が非回転性で既往のポテンシャル計算と一致すべきで、両者計算の水面形は良く合っているのが分かる。本計算では等間隔格子が用いられているが、図-2の流速ベクトルの拡大図から分かるように、床面の薄い境界層及び自由水面近傍の速度勾配の大きい部分も捉えられている。

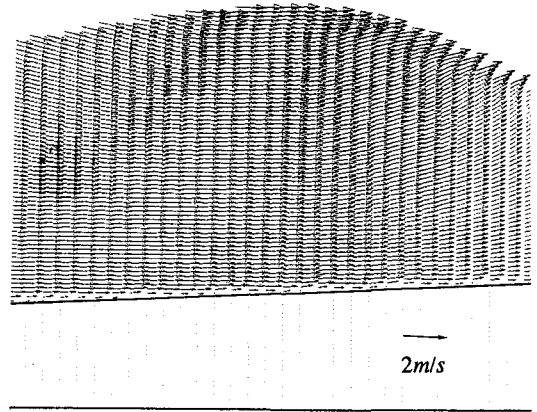


図-2 斜面上の孤立波計算結果の  
速度ベクトルの拡大図

### 3. 実験

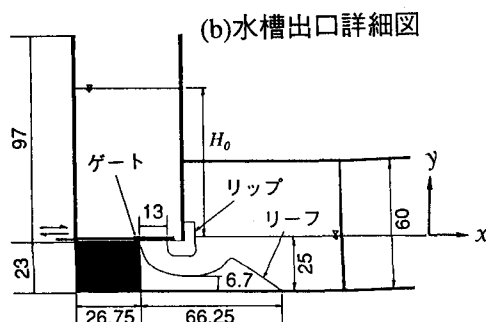
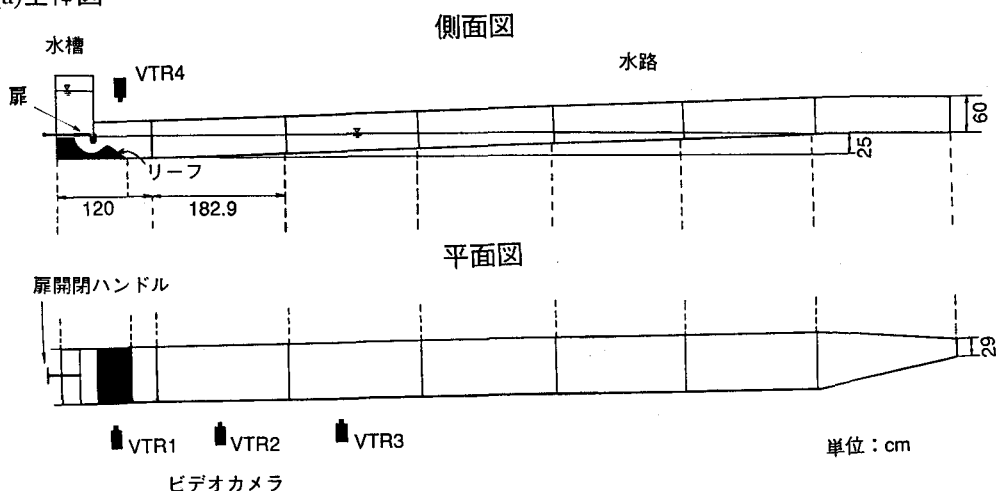
#### 3.1 実験装置

実験は図-3に示すような装置で行われた。図-3(a)の全体図で分かるように装置は長さ約  $15\text{m}$  幅  $92\text{cm}$  の勾配のある水路と上流側の深さ  $97\text{cm}$  の水槽からなる。水路部は6個のセクションを繋げて作ってあるが最下流部は水位調節と排水のため水平で縮幅されている。水槽部及び水路部の上流から2セクションは観測のため側壁はアクリライト板でできているがその他は鋼鉄製である。水路勾配はジャッキで調節可能であるが本実験では  $1/37$  に固定されている。図-3(b)の拡大図では水槽部床面に取り付けられた水平開閉扉、その下の曲面とそのすぐ下流にある、海底の起伏に似た障害物「リーフ」の詳細が描かれている。水槽出口のリップおよびリーフは着脱可能になっており異なった形状のものをテストできる。扉にはシャフトが取り付けられ防水軸受けを通し水槽外の開閉用のハンドルに接続されている。水路側の水位は実験開始前リーフの底から測り  $25\text{cm}$  になるよう設置されている。

#### 3.2 実験概要と結果

実験はまず水槽部に一定の水深（下流側水面から  $H_0$ ）まで水を貯める事で始められた。次に扉の開閉を行うがこれは手動で行われた。その後は水の動きを4台のビデオカメラで流れの状況を撮影した。ビデオカメラの位置は図-1に示されている。ビデオカメラ VTR 1 は扉の開閉及び水槽出口の詳細を撮影するため、VTR 2 はリーフ下流部の波形成部の撮影のため、VTR 3 は形成された波の伝播状況を撮影するため、VTR 4 は3次元性の有無の検証のために水路上部にそれぞれ設置された。試験開始はストロボ

(a)全体図



単位：mm

図-3 実験装置の概要

フラッシュをたき全てのビデオを同調させた。側面の影響は上流側の2セクションでは側面より約10cm程の領域で二次流が顕著に見られたが、ほとんどの場合、水路中央部では流れの三次元性はほとんど見られなかった。

開閉に要した総時間  $t_t$  を約 0.5 秒から 1.7 秒まで変え、水槽初期水位  $H_0$  を 38cm から 78cm まで変えて繰り返し実験を行った。手動での扉操作では精度良く調節出来ないが、実験後ビデオを低速で再生し扉に取り付けられた旗の位置と 1/100 秒刻みの時刻を読みとる事により、開くのに要した時間  $t_o$ 、開いた状態の時間  $t_h$ 、閉じるのに要した時間  $t_c$  を正確に読み取り  $t_t$  の算定を行った。

再生されたビデオ画像は適当な時間間隔で画面を静止させハードコピーが取られ水面形が求められた。形成された波の高さ  $\eta$  は比較のため第2セクションの中央での初期水面を基準にハードコピーより読みとられた。また波伝播速度  $c$  は波頭が基準位置前 1 m、後 1 m の地点を通過する時間より求められた。

#### 4. 実験結果と計算結果の比較

図-4 に  $H_0=38\text{cm}$ 、 $t_o=0.15$  秒、 $t_h=0.30$  秒、 $t_t=0.61$  秒のケースの実験結果と対応する計算結果が示されている。このケースは比較的粗い 70 x 70 のメッシュが用いられた。水面形の計算結果は実線、実験結果は破線で、水面形が表されている。扉開閉のタイミングは図の扉の開き加減から分かる。実験では気泡の混入及び水滴が飛び散っている部分がある。気泡の混入の多い部分は斜線で示されている。この図で分かるように水飛沫の多い部分を除けば本計算は全体的に実験結果とよく合致していると言える。特に閉扉が始まる前 ( $t < 0.51$  秒) まで及びその後も波先端の位置、形状も良く計算されている。

次に図-5では水槽初期水位を  $H_0=70\text{cm}$  と高くし、水路床形状を変え、大きい波を生成する時の  $t=1.2$  秒及び  $t=1.8$  秒での実験結果と計算結果の詳細を比較している。この場合の計算は  $128 \times 90$  の密な格子が用いられたが、図では明瞭にするため1点おきの格子点での結果を表している。 $t=1.2$ 秒での結果は水面の形状及び水槽出口近辺の渦及び水面の不安定も良く再現出来ているのが分かる。 $t=1.8$ 秒での結果は生成された波後方の水面の乱れなども良く再現されているのが分かる。次に図-6では渦度の計算結果を等高線で表している。本造波装置の流

れでは底面で凹曲面になっており、ここからの大きなせん断による渦が発達し回転性の大きい流れになっていることが分かる。非回転流の仮定を用いる方法では不十分である事を意味している。本計算結果では扉出口下流部の強い渦や障害物下流側での渦もうまく再現されている。この図に示されている時間から後の時間では乱れが大きくなり乱流になるがこの影響を正しく反映させるのには乱流モデルが必要になる。

## 5. おわりに

貯水式造波装置による自由水面流を実験により調べ、それに適した数値解析法の検討を行った。こういった複雑な境界と自由水面を有する流れを解析する数値計算法として、改良 MAC 法に基づいた差分法での計算を試みたが、比較的良好な結果が得られた。計算結果は流速の低い乱れの少ない、気泡混入の少ない場合は非常に精度良く実験結果と合うが、流量が多くなり、乱れが多くなる場合の実験結果の詳細は再現出来ない事が分かった。今後は混入気泡の影響を考慮にいれ、精度の良い乱流モデルの導入がなされるべきである。

## 参考文献

- 1) Hornung, H.G. and Killen, P., A Stationary oblique breaking wave for laboratory testing of surfboard, *J. Fluid Mech.*, Vol. 78, pp.459-480, 1976.
- 2) Miyata, H., Finite difference simulation of breaking waves, *J. Computational Physics*, Vol. 65,

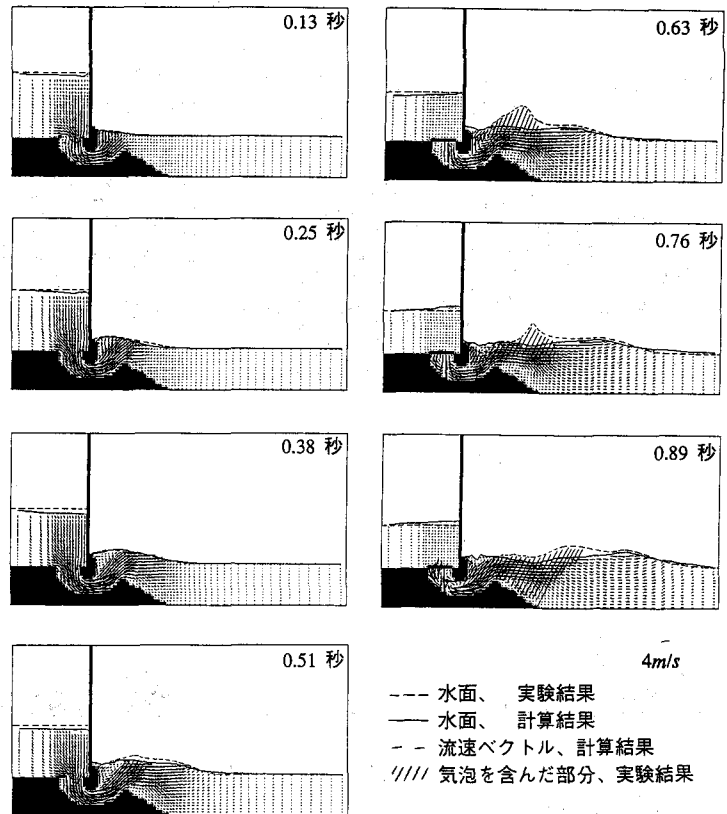
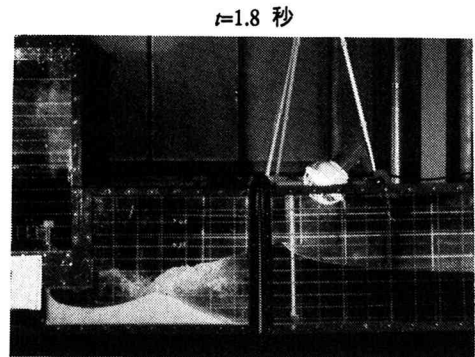
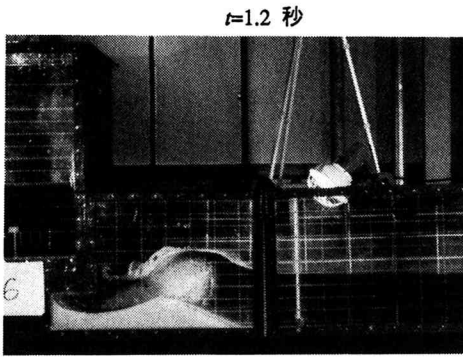


図-4 実験結果と数値計算結果との比較、 $H_0=38\text{cm}$ 、 $t_t=0.61$ 秒

(a) 実験結果



(b) 計算結果

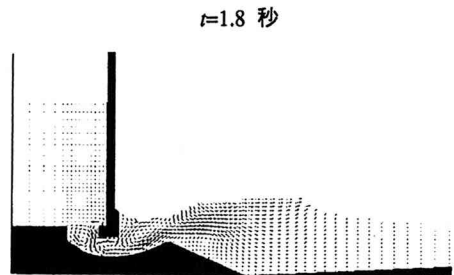
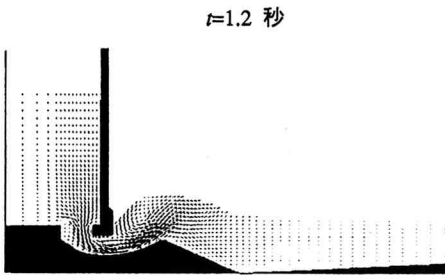


図-5 実験結果と計算結果の詳細の比較、 $H_0=70\text{cm}$ 、 $t_i=1.9$ 秒

pp.179-214, 1986.

- 3) Kawahara, M. Ramaswamy, B. and Anju, A., Lagrangian finite element method for wave motion using velocity correction method, Proc. JSCE, No. 369/II-5, pp.203-211, 1986.
- 4) 西村仁嗣・武若聡：Lagrange 表記による二次元波動の数値解析、土木学会論文集第393号/II-9, pp.191-199、1988.
- 5) Hirt, C.W. and Nichols, B.D., Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Computational Physics*, Vol. 39, pp.201-225, 1981.
- 6) Leonard, B.P., A survey of finite differences with upwinding for numerical modelling of the incompressible convection diffusion equation, Comp. Tech. in Transient & Turbulent Flow, 2, Pineridge Press, 1981.
- 7) 長尾昌朋・後藤智明・首藤伸夫：斜面上における孤立波の碎波波形、土木学会第41回年次学術講演会演習会概要集第2部、pp.541-542、1986.

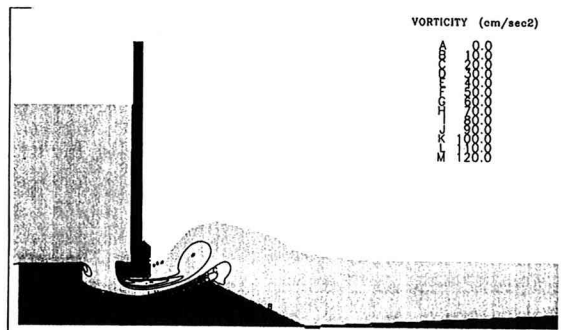


図-6 渦度の計算結果、 $t=1.2$ 秒