

VOF 法による 3 次元非線形波動場解析に関する研究

花澤直樹*・小林昭男**・美濃口健***

海岸域の安全性向上に対しては、越波等の 2 次元問題に加え、平常時の緩傾斜護岸の遡上波の戻り流れのような 3 次元問題の解析も必要である。本研究では、波動場を多面的に解析するために、側面に透過境界を有する 3 次元水路内の波動解析プログラムを開発した。計算結果の妥当性に関して、まず 3 次元水路モデル内での孤立波の浅水変形及び碎波の再現性を示した。次に、水路内に波の進行方向を変える斜め固定壁を設け、側面境界からの波の透過現象を示した。さらに水路内に直立壁を設けた場合の回折現象を示した。以上の検討により、本プログラムは 3 次元的な現象について妥当な計算結果を与えることが示された。

1. 緒 言

近年、非線形波動場を対象とする数値計算を海洋構造物の設計に適用する研究が進んでおり、そのひとつの VOF 法 (Volume Of Fluid method) は、非線形性の強い現象に適用性が高い手法である (Hirt ら, 1981)。VOF 法は、碎波や越波等の複雑な自由表面の表現に用いられており、それらの現象を精度良く再現できるとともに、3 次元問題への汎用性も高いことが明らかになっている (富田ら, 2004)。また、藤原ら (2003) は、複雑な形状を有するケーソン式防波堤について、VOF 法を用いた波力の計算結果から耐波安定性を評価することが可能であることを確認している。このことから VOF 法は構造物と波動場の相互作用の解明に関して有効な手法であることが示されている。一方、海洋空間を利用する人々への安全性の向上に関しては、緩傾斜護岸に作用する荒天時の高波や越波といった非線形な現象と、平常時の遡上波の戻り流れのような 3 次元問題に関しての詳細な解析が必要である。しかし、従来の VOF 法を用いた研究は、断面 2 次元での現象を捉えたものがほとんどであり、波動場を 3 次元的に捉えた研究例は少ないのが現状である。そこで本研究では、構造物などによって変化する波動場を 2 次元解析よりも多面的に解析するために、VOF 法を用いた 3 次元数値解析プログラムを開発し、その妥当性を検討した。

2. 基礎方程式

3 次元造波問題の解析に用いる基礎方程式は、磯部ら (1999) を参考にして、式 (1) ~ (5) に示すオイラーの連続式、ナビエ・ストークスの方程式、及び VOF 関数 F の移流方程式を用いる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial u F}{\partial x} + \frac{\partial v F}{\partial y} + \frac{\partial w F}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 t は時間、 x, y, z は水平、奥行、鉛直座標、 u, v, w は水平、奥行、鉛直方向の流速、 P は圧力、 Re はレイノルズ数、 F は VOF 関数、 g は重力加速度である。また、式 (1) ~ (5) は水深 h と長波の波速 ($\sqrt{gh}$) を用いて無次元化を行っている。

3 次元波動水槽のモデル化に際しては、入射波の進行方向に対して平行な側面の境界を不透過の壁面として扱い、Slip 境界条件を与えることがあるが、このモデルでは壁面からの影響を少なくするために計算領域を余分に取る必要がある。そこで本モデルでは、側面を無反射の境界とすることでこの問題点の解決を試み、この側面境界に式 (6) に示す自由流出境界条件を与えた。

$$\begin{aligned} u_{i,j,k} = u_{i,j,k-1}, \quad v_{i,j,k} = v_{i,j,k-1}, \quad w_{i,j,k} = w_{i,j,k-1} \quad \dots\dots\dots (6) \\ u_{i,j,1} = u_{i,j,k+1}, \quad v_{i,j,1} = v_{i,j,k+1}, \quad w_{i,j,1} = w_{i,j,k+1} \end{aligned}$$

3. 数値計算結果及び考察

(1) 3 次元水路内の波動伝播

本解析プログラムの適用性を検討するために、孤立波の浅水変形と碎波を対象とした宮本ら (1999) の模型実

* 東急不動産株式会社 住宅事業本部 戸建事業部
** 正会員 工博 日本大学助教授理工学部海洋建築工学科
*** 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻

験の再現計算を行った。実験は、図-1に示したように造波位置の水深が40.0 cmの2次元水路で実施され、勾配1/20の斜路を孤立波が遡上するものである。数値計算では造波ソースの強さとして、孤立波第3近似解による水平流速を与え、波高12.8 cmの孤立波を造波した。水位の比較は実験の波高計位置として、造波位置から6.0 m, 10.0 m, 14.0 m, 18.0 m, 19.4 mで行った。尚、この計算では3次元造波水路の側面は不透過境界としている。

図-2に計算及び実験によって得られた時系列波形を示す。本モデルでの計測位置は水路幅の中央での値である。各位置とも計算結果と実験結果の波形及び波高はよく一致しており、浅水変形による波高の増加が精度よく再現されていると考えられる。

図-3に計算及び実験によって得られた空間波形を示す。本モデルでの計測位置は図-2と同様に水路の中央での値である。計算結果は、浅水変形により波高が徐々に増加し、9.0 s付近での波高の減少により碎波の開始が示され、これらは実験結果とほぼ一致している。これらのことにより、波形とその位相が精度良く再現されていることが示された。

次に、計算及び実験によって得られた碎波波形と流速分布を図-4, 5に示す。実験結果は、波峰部分から碎波の先端にかけて滑らかな曲線を示しているのに対し、計算では格子内の水位を結んでいるため、完全に再現できているとは言えない。ただし、気泡を含んで碎波していく様子が良く計算されていると考えられる。また、計算結果において波峰部分から波形が崩れ始め碎波が始まり、流速も波峰部が底部の流速を上回っている様子は実験結果と同様の変化が再現されている。

以上は、3次元水路モデル内での孤立波の浅水変形及び碎波の再現性を検討した結果でありプログラムの妥当性が示されたものと考えられる。

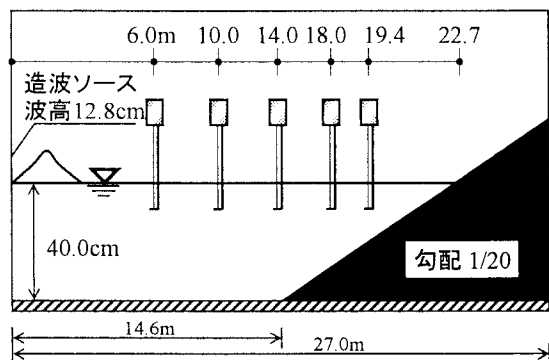


図-1 計算及び実験状況

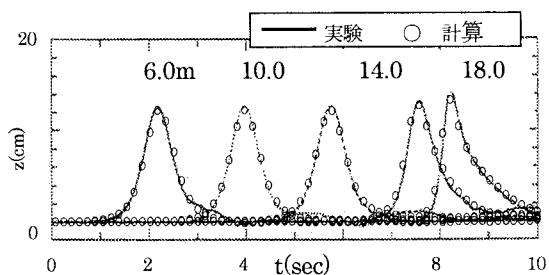


図-2 時系列波形

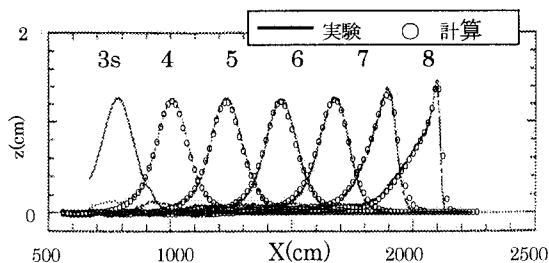


図-3 空間波形

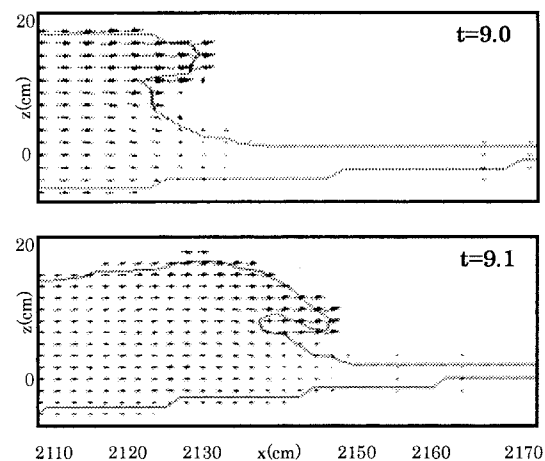


図-4 流速分布(計算)

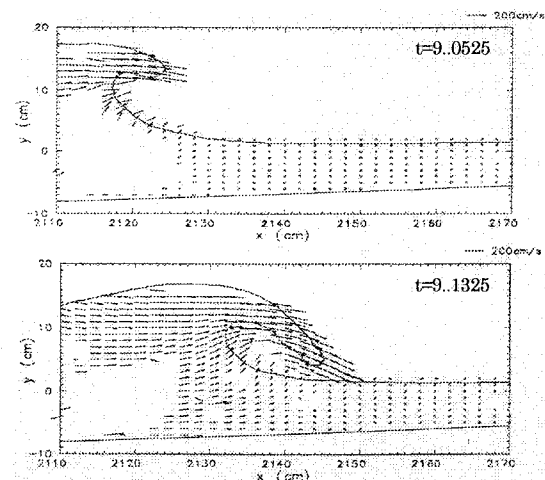


図-5 流速分布(宮元ら, (1999)の実験結果)

(2) 水路側面への透過境界の適用

図-6 に示す 3 次元水路の側面に式 (6) の条件を用いて孤立波の伝播を計算した。水路の端部には側面境界における透過現象が顕著に分かるように、入射波の進行方向に対して 45° 傾けて直立壁を設置した。水路は長さ 5.2 m、幅 2.0 m、水深 0.405 m とし、造波ソースを用いて波高 12.8 cm の孤立波を造波した。

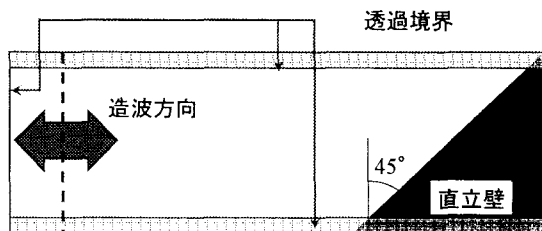


図-6 計算対象の概念図(平面図)

造波開始から無次元時刻 t が、3.46, 3.86, 4.27, 4.68 のときの水位の変化を図-7 に示す。入射波は図中の矢印の方向から入射している。造波開始から時刻 $t = 3.46$ では直立壁に最も近い部分から反射波が生じ、入射波との重複によって水位が増加している。また、 $t = 3.86 \sim 4.27$ では、波が左から右に伝播していく様子を再現している。さらに、その後の $t = 4.68$ では、伝播した波が右側面の透過境界を透過していく様子が再現されている。この結果から、式 (6) による側面の透過境界が有効に機能していることが示された。

(3) 水路内での回折計算

次に 3 次元的回折現象に対する計算の適用性を検討するために、水路内に直立壁を設置して回折計算を行った。計算は、比較のために側面を固定及び透過壁の双方の条件で行った。計算対象は、図-8 に示すように水深 0.81 m、長さ 6.0 m、幅 1.48 m の水路中に、幅 1.0 m、高さが水路の下端から上端までで、厚さが 1.0 m の直立壁を設置したモデルである。造波は図-8 中の点線の位置に、造波ソースを配置し周期 1.0 s、波高 5.0 cm の微小振幅波理論による規則波を造波した。また、計算上の波高計を直立壁前面に 2 本 (波高計 1, 2)、直立壁後面に 4 本 (波高計 3 ~ 6) 設置した。各波高計位置の長手方向の設置位置は左端から 1.2 m, 1.96 m, 3.08 m, 3.64 m, 4.12 m, 4.64 m とした。側面固定境界には Slip 境界条件を与え、側面透過境界には自由流出境界条件を与え、開口部の透過境界には Sommerfeld の放射条件を与えている。

各波高計位置での時系列波形を、側面が固定壁の場合を図-9 に、透過壁の場合を図-10 に示す。各図とも直立壁前面では波高計 1, 2 での水位 Z 、直立壁後面では波

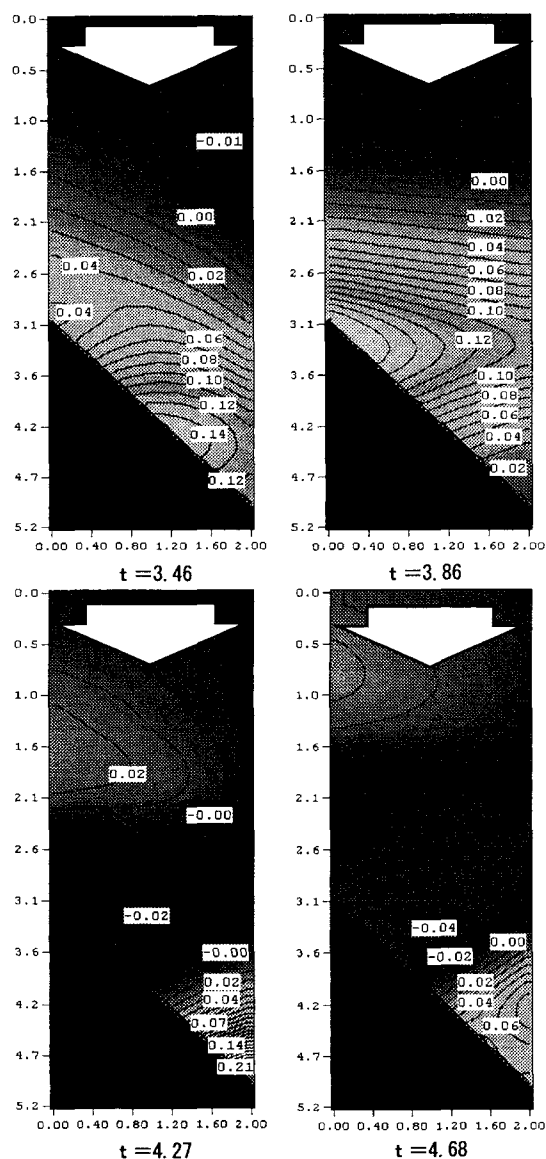


図-7 孤立波の透過状況

高計 3 ~ 6 での水位 Z の波形を示す。直立壁前面の波形については、双方の場合とも入射波と反射波の重複による波高の増加が見られるが、固定壁の場合 (図-9) では時間の経過とともに平均水面が上昇している。一方、透過壁の場合 (図-10) では静水面 ($Z = 0$) まわりで振幅が対称である。次に、直立壁後面の波形について比較すると、固定壁の場合 (図-9) では直立壁直後の波高計 3 の波形が大きく乱れ、後面の波高計で最も大きい波高を示しているが、透過壁の場合 (図-10) では 6 s 付近からは非線形な波形になっているものの波高は安定している。

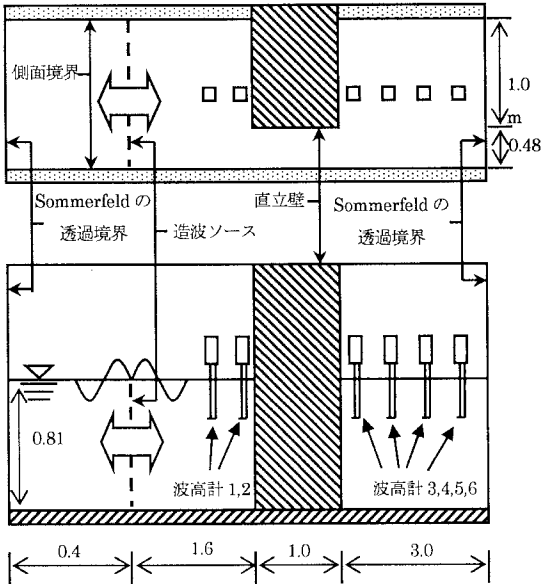


図-8 計算状況概念図 (上:平面図 下:断面図)

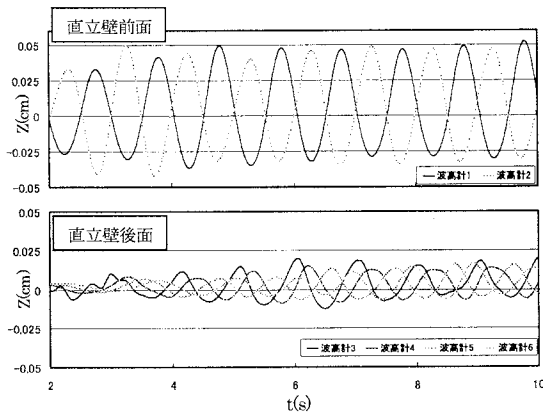


図-9 時系列波形 (固定壁)

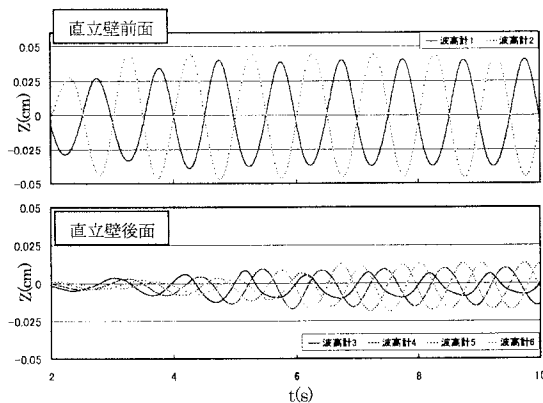


図-10 時系列波形(透過)

次に造波開始から無次元時刻 $t = 2.88, 5.75, 8.63$ s における波高分布について、側面に固定壁を用いた場合の結果を図-11に、透過壁を用いた場合の結果を図-12に示す。各図とも入射波は矢印の方向から入射している。図-11, 12ともに、 $t = 2.88$ sでは入射波は直立壁背後には到達しておらず、回折現象は見られない。しかし、回折波が直立壁による遮蔽部分にまで到達する $t = 5.75$ sでは、固定壁の場合(図-11)では遮蔽部分に水位が高い部分が見られる。これは回折波が側壁によって反射され、入射波と重複したために起こったものと考えられる。この反射波による波動場の擾乱が、この時刻以後の水面の乱れの原因の一つになっている。一方、同時刻の透過壁の場合(図-12)は、直立壁による開口部を中心とした同心円状の波高分布が遮蔽域内に見られる。また、固定壁の場合(図-11)の $t = 8.63$ sでは、側壁による重複波が水路のほぼ全域で生じている。一方、同時刻の透過壁の場合(図-12)では、波動場に乱れは無く、前述の同心円状の波高分布が明確に確認できる。

図-13, 14に $t = 5.75$, 及び 8.63 sにおける直立壁付近の水平方向の流速分布を、波高分布と合わせて示す。側面に固定壁を用いた結果が図-13、透過境界を用いた結果が図-14である。流速は水深60 cmにおける水平面上での値である。図-13, 14ともに、 $t = 8.63$ sでの直立壁後面の隅角部において、波高分布が乱れ、流速も大きく、剥離渦の形成がうかがえる。

以上の計算結果により側面に透過境界を用いた場合には、同水路幅の側面固定条件の場合に比べて回折現象を良く再現できることが示された。

4. 結 言

本研究では、3次元水路内の波動を解析するプログラムを開発し、その基本的な性能として碎波現象への適用性を示した。次に水路側面を透過境界とすることにより反射及び回折を含む3次元的な現象について合理的な計算結果が得られることを示した。今後は波力、斜め波、規則波などへの応用を実施する所在である。

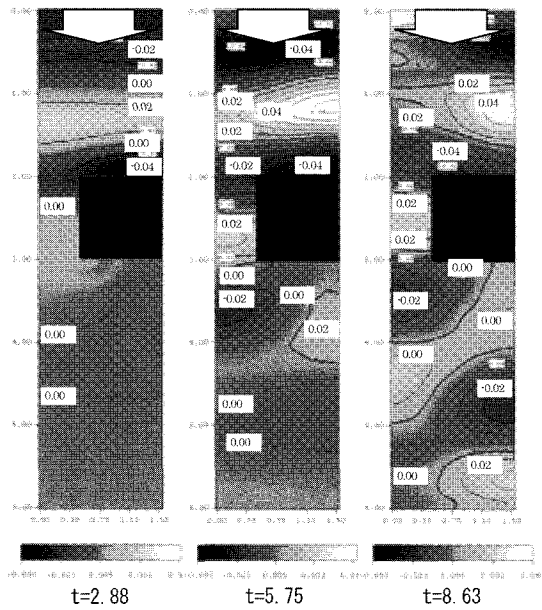


図-11 波高分布(固定壁)

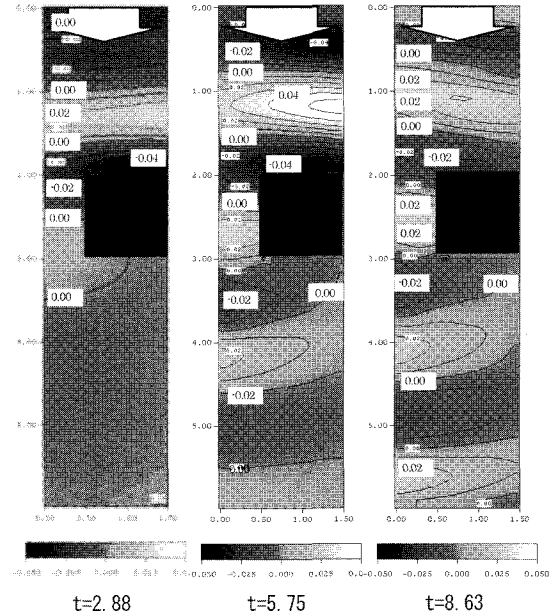


図-12 波高分布(透過)

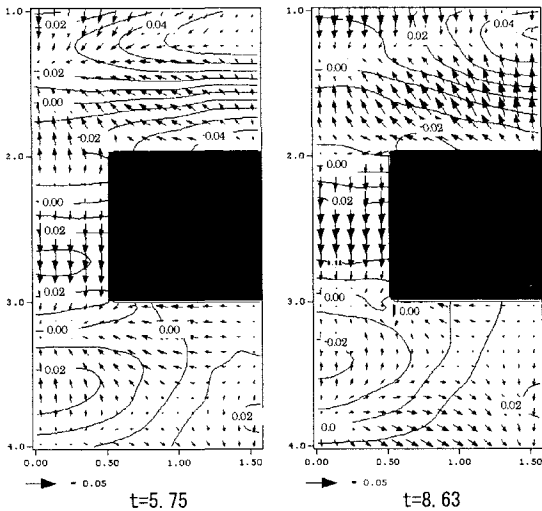


図-13 流速分布(固定壁)

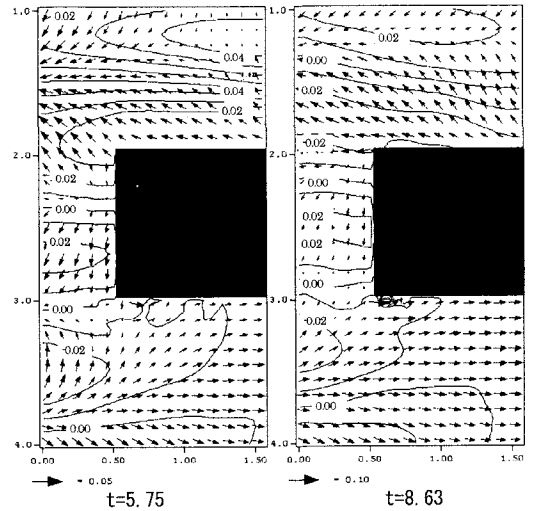


図-14 流速分布(透過)

参 考 文 献

- 磯部雅彦ら(1999)：数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究－VOF法基本プログラムの作成－，海洋開発論文集，vol.15，pp. 321-326.
- 富田孝史・柿沼太郎・島田昭男(2004)：3次元流動モデルによる津波防波堤の防護効果に関する数値計算，海岸工学論文集，第51巻，pp. 296-300.
- 藤原隆一・山崎智弘・橘川正男・早瀬松一(2003)：直立ケーソン式海水交換型防波堤の耐波設計に対する数値波動水路の適用

- 性，海岸工学論文集，第51巻，pp. 681-685.
- 松田博文・陸田秀実(1998)：突入ジェットと気泡混入を伴う碎波後の内部特性の関係，海岸工学論文集，第45巻，pp. 116-120.
- 宮本恭交ら(1999)：孤立波碎波の水面形と流速分布の可視化計画，海岸工学論文集，第46巻，pp. 131-134.
- C.W. Hirt and B.D. Nichols(1981)：Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, Jour. Of Comp. Phys., Vol.39, pp. 201-225.