

段波に押流される構造物周りの 流れに関する研究

STUDY ON THE FLOW AROUND THE BORE INFLUENCED DROWNING STRUCTURE

入部綱清¹・仲座栄三²
Tsunakiyo IRIBE, Eizo NAKAZA

¹正会員 修(工) 琉球大学 島嶼防災研究センター(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

²正会員 工博 琉球大学 工学部(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

Coastal forests that acted as the wind-break-forest against the tsunami currents during tsunami disasters have already been reported in many studies. These studies also raised issues of complex flows induced by interactions between drowned structures and tsunami currents.

Estimation of such complex currents and behaviors of drowned pieces of structures are important for designing coastal structures with the view of making countermeasures against tsunami. MPS method is used in this study for numerical simulation of the interactions between the tsunami currents and behaviors of drowned structures. Results showed some interesting pattern of behaviors with the drowned structures and tsunami currents.

Key Words : tsunami, bore, MPS method, numerical simulation

1. はじめに

津波や急激な河川増水に伴う段波によって、構造物や人が流されるという災害事例が報告されている^{1), 2)}。それらの多くは、実際に撮影されたビデオ画像や被災後の現地調査に基づいており、こうした研究事例からは、津波などが構造物を回り込む際に強い流れが発生することや、津波の引き波時に強い局所的な流れが発生すること、さらに流木や構造物が漂流物として含まれることで、複雑に流れが変化することが示されている。したがって、構造物回りの津波の流れや洪水の流れの予測は、防災という観点からは非常に重要と言える。

観測データや実験によって、こうした現象の再現性を確認することは、複雑な条件設定等の観点から非常に困難を伴う。また、数値計算を行う場合でも、水表面の変化の激しい自由表面流れ、複雑な三次元構造物の周りの三次元流れ、さらに移動する三次元構造物間の相互作用やそれらと流れとの相互作用のように、実際の現象を想定した解析は容易ではない。

越塚により開発されたMPS(Moving Particle Semi-implicit)法³⁾は、通常、数値計算が不得意とする分野の数値計算を比較的容易に取り扱えるという利点を有しており、近年、海洋開発分野においても、船舶の岸壁への乗り揚げり挙動の解析等に用いられている⁴⁾。

本研究は、MPS法の数値計算上の利点を利用して、津波や洪水などに伴う段波に押流される構造物周り

の流れを数値解析によって検討するものである。

2. 計算手法及び計算モデル

MPS法については、文献3)にその理論及び数値計算手法が説明されている。したがって、ここでは必要な部分の説明にとどめる。

(1) 離散化

MPS法は非圧縮性流れを解く有力な数値解析法の一つであり、メッシュやセルを必要としないため、自由境界の大変形を比較的容易に表現することが可能である。

非圧縮性流れの支配方程式は連続の式とNavier-Stokes式である。連続の式とNavier-Stokes式には微分演算子としてGradientとLaplacianが含まれるが、MPS法ではある粒子*i*の勾配とラプラシアンはそれぞれ次式で表される。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) \nu(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (1)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) \nu(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (2)$$

ここで、 j は近傍粒子を示し、 $\vec{r}$ は位置ベクトル、 d は次元数、 w は重み関数である。重み関数 w は粒子間距離 r を用いて次式で表される。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_c - r}{r_c} & r \leq r_c \\ 0 & r_c < r \end{cases} \quad (3)$$

r_c は粒子間相互作用の及ぶ範囲の半径である。また、粒子数密度 n_i は重み関数 w を用いて次式で定義される。

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (4)$$

式(4)は粒子 i と、その近傍粒子 j との重み関数の和を表している。式(2)に含まれる λ は解析定数である。

(2) 計算アルゴリズム

MPS法では非圧縮性流れに半陰解法アルゴリズムを適用している。そのため、陽解法と陰解法を用いて計算を行う。

まずNavier-Stokes式である式(5)から圧力項を除いた式(6)の計算を陽解法で行う。

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p_i + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (5)$$

$$\vec{u}_i^* = \nu \nabla^2 \vec{u}^n dt + \vec{F} dt \quad (6)$$

ここで $\vec{u}$ は流速ベクトル、 μ は動粘性係数、 ∇^2 はLaplacian、 $\vec{F}$ は外力ベクトルである。式(6)より仮の速度 $\vec{u}_i^*$ を求めて式(7)より仮の位置 $\vec{r}_i^*$ を求める。

$$\vec{r}_i^* = \vec{r}_i^n + \vec{u}_i^* dt \quad (7)$$

仮の位置 $\vec{r}_i^*$ で粒子数密度 n^* を求めると密度一定条件を満たしていないため、初期粒子数密度 n^0 とは一致していない。そこで、仮の位置で求められた粒子数密度 n^* と初期粒子数密度 n^0 の差より圧力を解く。圧力 p は陰解法を用いて計算する。

$$\nabla^2 p_i^{n+1} = -\frac{\rho}{dt^2} \frac{n_i^* - n^0}{n^0} \quad (8)$$

式(8)より圧力を求め、式(9)に代入し修正速度 $\vec{u}_i'$ を求める。

$$\vec{u}_i' = -\frac{1}{\rho} \nabla p_i^{n+1} dt \quad (9)$$

式(9)より求めた修正速度を仮の速度に加えて次ステップの速度を求める。最後に修正速度 $\vec{u}_i'$ より修正される変位 $\vec{u}_i' dt$ を仮の位置 $\vec{r}_i^*$ に加え、式(10)より次のタイムステップの位置 $\vec{r}_i^{n+1}$ を求めて1タイムステップが終了する。

$$\vec{r}_i^{n+1} = \vec{r}_i^* + \vec{u}_i' dt \quad (10)$$

(3) 計算モデル及び段波の初期条件

数値計算の対象となるモデルを図-1に示す。計算では、図-1(a)に示すように、幅5.0mの水路に段波が入射し、構造物に衝突する場合を想定した。また、構造物の配置は、ケース1から4までの4通りを考えた(図-1(b))。ケース4は、構造物を2段積み上げた場合に当たり、積み上げられたブロックや小型のコンテナなどの構造物を想定している。構造物には、空中重量1トンのコンクリートブロックを想定し、図-1(b-4)に示す寸法を設定した。

計算条件を表-1に示す。段波の発生として、図-1(a)の上流側から高さ1mの水を継続的に供給し、一定距離進行させて構造物に衝突させた。構造物は、底面に固定した場合と、流れに伴い移動する場合を想定した。また、考察に用いた段波の流速は、水路を長手方向に0.2m、幅方向に0.5m間隔の格子に分割し、その格子に含まれる粒子の速度の平均とした。

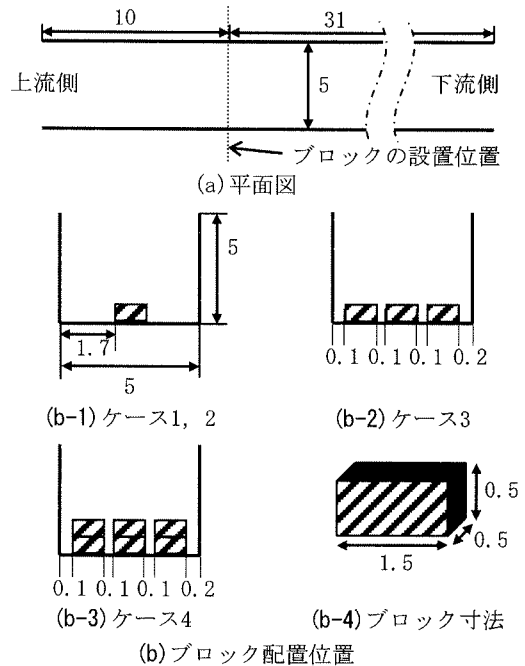


図-1 三次元解析モデル(単位:m)

表-1 計算条件

ケース	1	2	3	4
水路内初期水位	0.1m			
段波の初期高さ	1m			
段波の初期速度	2.5m/s			
粘性係数	0.001Pa・s			
壁面条件	Non-slip			
流体の密度	1000kg/m ³			
ブロックの密度	2300kg/m ³			
ブロック-底面間 およびブロック- ブロック間の摩擦	固定	静摩擦係数0.4 動摩擦係数0.3		
粒子径	0.1m			
計算時間刻み	0.005s			

3. 計算結果及び考察

図-2, 3に, ケース1及びケース2の計算結果を示す。ケース1はコンクリートブロックを底面に1個固定した場合であり, ケース2はブロックを移動可能とした場合である。計算結果は, 段波の先端が5m付近に達した時刻を基準として, 1.0秒後(衝突時), 5.5秒後を表示した。また, 各図の上図は色の濃さが水深に対応した平面図, 中図は平面流速強度, 下図は側面流速強度であり, 平面流速強度は表面の流速, 側面流速強度は水路横断方向中央の流速を示している。

図-2に示すように, 固定したブロックに衝突した段波は, 衝突によりとび跳ね, 構造物通過後は側壁からの反射波を伴い構造物背後に三次元的で複雑な流れ場を形成している。構造物背後の中心線に沿って, 流れが比較的遅くなる箇所が形成され, その両端部(側壁側)に速い流れ場が形成されている。

これに対し, 構造物が流れに伴い移動する場合の計算結果を図-3に示す。図-3(b)の下段に示す流速分布の断面図に示すように, 移動可能な構造物に衝突した段波は, 図-2(b)の下段に示す場合と比較して, さほど水しぶきの発生を伴っていない。この場合, 最もケース1と異なる特徴的な流れは, 構造物近傍の流れにある。ケース1の場合, 構造物前面に堰上げによる流れの停滞が見られ, 構造物背後にも後流淀みが見られる。これに対し, ケース2の場合には構造物の両端から斜め背後にかけてかなり強い流れの発生が認められ, 構造物真後ろには流れの淀み域の形成が見られる。流れと構造物の相互作用が作り出すこうした構造物周りの流れの違いは, 津波の段波等による人の被害を検討する上で非常に重要な要素と言える。

図-4に, ケース3の結果を示す。このケースは, 3個のブロックを流れ方向に垂直に設置した場合であり, かつ移動可能とした場合である。ほぼ水路の全幅に亘って構造物が段波の進行を妨げるため, 衝突の瞬間は図-3の場合よりも高い水面の上昇を与えている(図-4(b))。図-4(c)は, 構造物が流れによってばらばらの配置状態で流されていく様子を示しているが, その様子は単純でなく, 流れの方向と構造物の長軸がなす角度により, 大きく蛇行および回転を引き起こしながら流れに引きずられる。また, 段波に対する構造物の遮蔽効果が利くことで, 構造物周りの段波の水位は高くなっている。

図-5に, ケース3の場合と同じ構造物の並びであるが, それらを2段に積み上げた場合の計算結果を示す。図-5(b)に示すように, 入射段波は高く積み上げたブロックを越えられず激しく堰上げている。図-5(c)は, 図-4(c)に対応する状態を示すが, すでに多くのブロックが図の表示外にまで流された状態にある。残って見えるのは, 2段のままで, 流れにほぼ並行に流されているブロックである。

ケース4についてはさらに時間間隔を短くして図-

6に示す。水路両サイド側にあり, 前方に倒れ込んだ上段のブロックは, 下段のブロックと一体となって流されている様子が分かる。中央のブロックは流れをせき止め, その両サイドに速い流れを形成している。その速い流れによって, 両サイドのブロックはさらに速く流されている。こうしたメカニズムによって, この場合の構造物は図-4に示す場合よりも速い速度で流下している。

こうした現象に加え, 図-4に示す構造物の流れは, いくつかの構造物の位置が上下に入れ替わるなど, 複雑な経路を取ることに伴う効果で流下速度が低下した形にある。図-5及び6に示すブロックの移動は, 流れに対して, ほぼ平行に移動していることが, 流下速度に図-4の場合との大きな違いを生じさせた原因と考えられる。

ケース4について, 段波衝突直前直後の様子を拡大して図-7に示す。2段に積み上げられたブロックは, 上段が段波の衝撃で前面に倒れ込み, 下段のブロックが後方に滑り込む形で移動している。段波の先端が下段のブロックに先に衝突し, 先に衝撃力を与えること, その際に上段のブロックは慣性により前方に倒れ込む様子が示されている。

4. おわりに

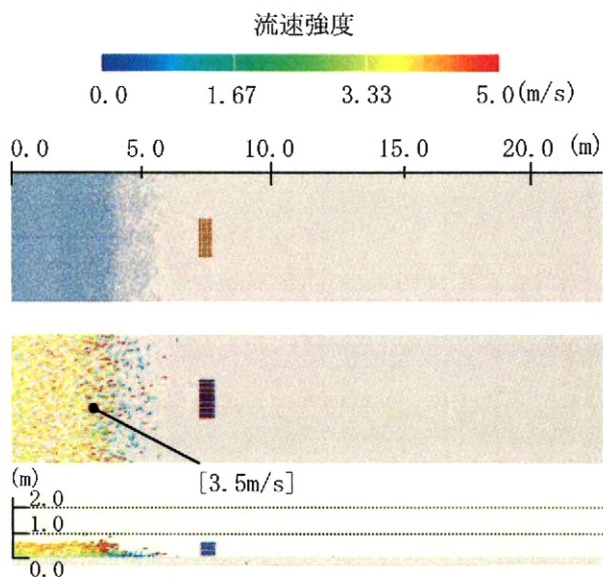
水表面の変化の激しい自由表面流れ, 複雑な構造物周りの三次元流れなどの解析を行うのに優れた利点を有するMPS法を用い, 津波や洪水などに伴う段波に押流される構造物周りの流れを数値解析によって検討した。

その結果, 構造物が固定されている場合と移動する場合の流れ場は, かなり異なる状態であることが示された。特に, 移動する物体近傍の流れは固定された構造物回りの流れよりも強い流れを伴う場合もあることがわかった。

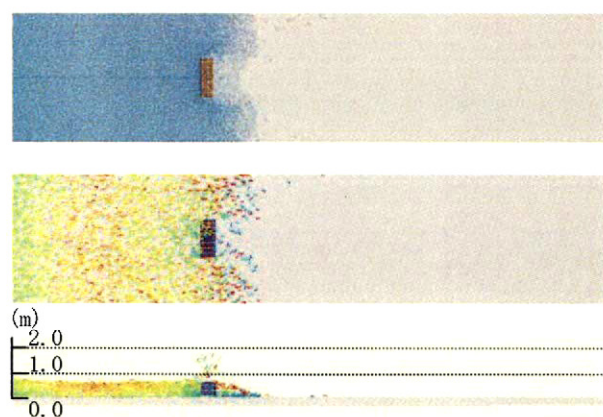
流れにより移動する構造物が複数の場合, 構造物の位置によって形成された複雑な流れ場にさらに他の構造物が入り込むことで, 流れ場や構造物そのものの移動形態が大きく変化することが示された。今後は水理実験などによる検証を課題とする。

参考文献

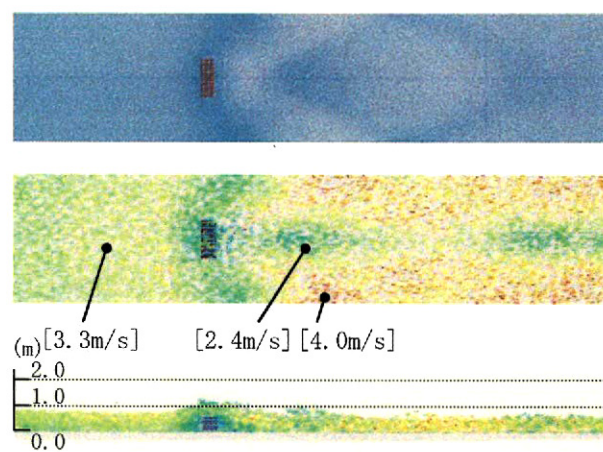
- 1) 松富英夫, 高橋智幸, 松山昌史, 原田賢治, 平石哲也, Seree Supartid, Sittichai Naksuksakul: タイのKhao LakeとPhuket等における2004年スマトラ島沖津波とその被害, 海岸工学論文集, Vol. 52, pp. 1356-1360, 2005.
- 2) 土木学会都賀川水難事故調査団: 都賀川水難事故調査について, 22p., 2009.
- 3) 越塚誠一: 粒子法, 丸善株式会社, 2005.
- 4) 増田光弘, 増田光一, 居駒知樹, 鈴木雄太, 大塚文和: MPS法による船舶の岸壁への乗り揚げり挙動に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 24, pp. 999-1004, 2008.



(a)時刻0.0秒

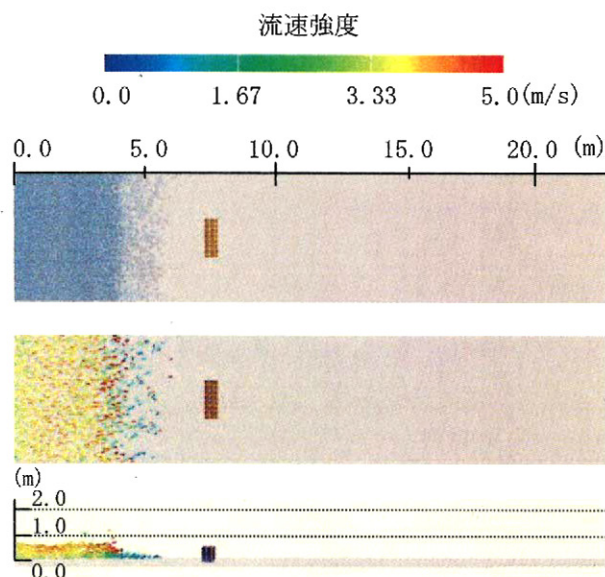


(b)時刻1.0秒

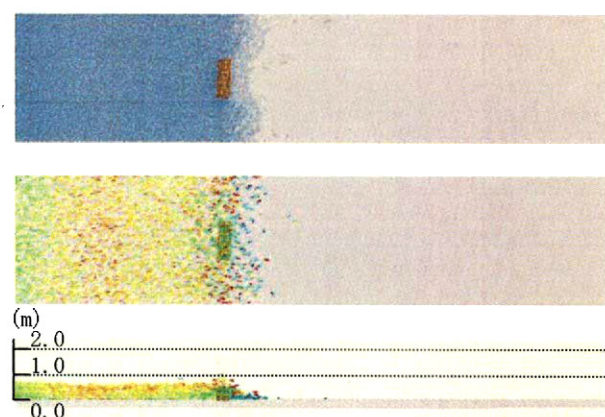


(c)時刻5.5秒

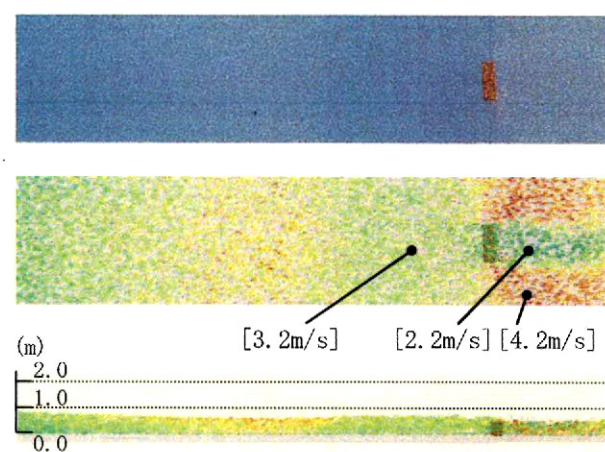
図-2 ケース1の解析結果（上：平面図，中：平面流速強度，下：側面流速強度） 以下同様



(a)時刻0.0秒

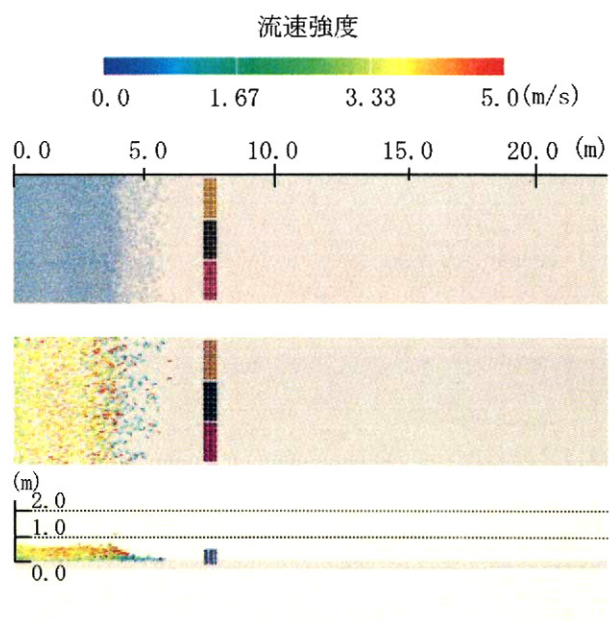


(b)時刻1.0秒

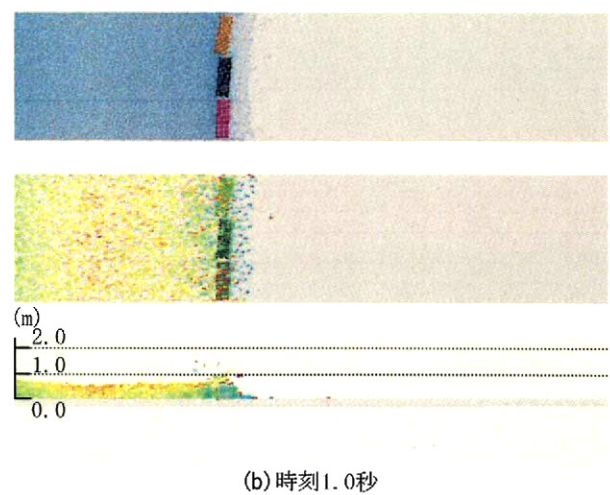


(c)時刻5.5秒

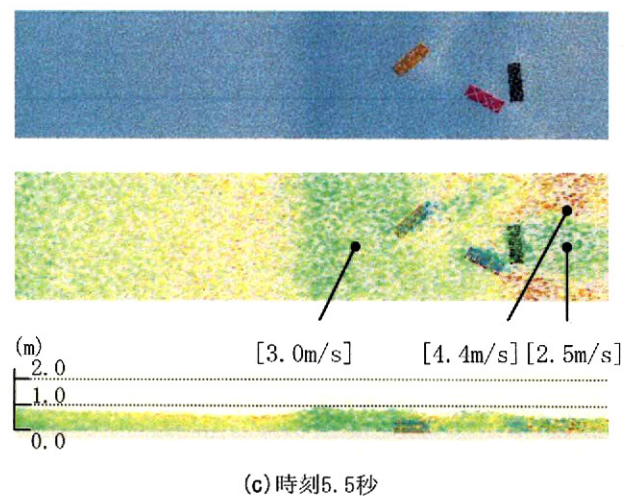
図-3 ケース2の解析結果（上：平面図，中：平面流速強度，下：側面流速強度）



(a) 時刻0.0秒

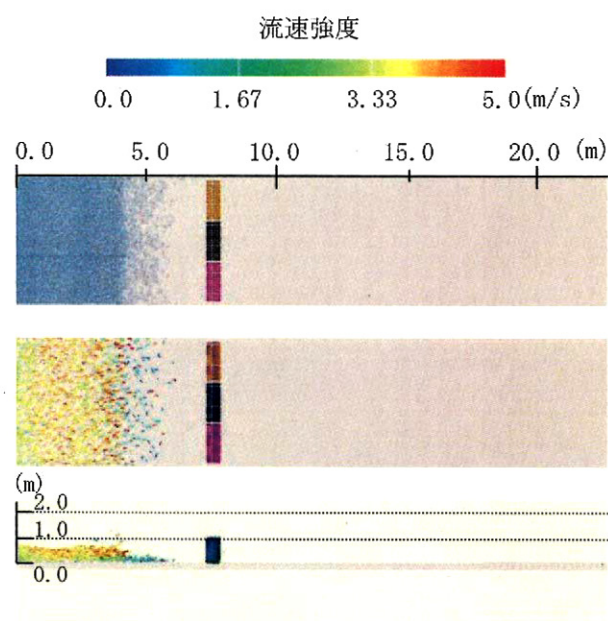


(b) 時刻1.0秒

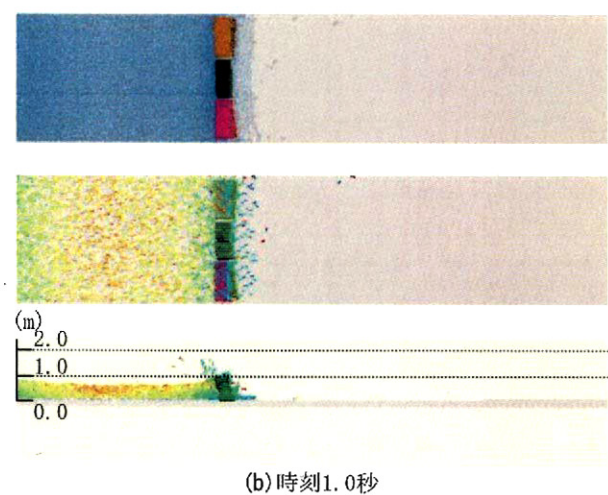


(c) 時刻5.5秒

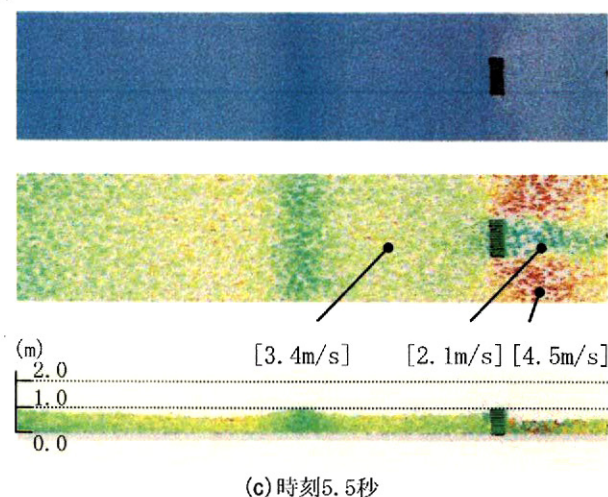
図-4 ケース3の解析結果 (上：平面図，中：平面流速強度，下：側面流速強度)



(a) 時刻0.0秒

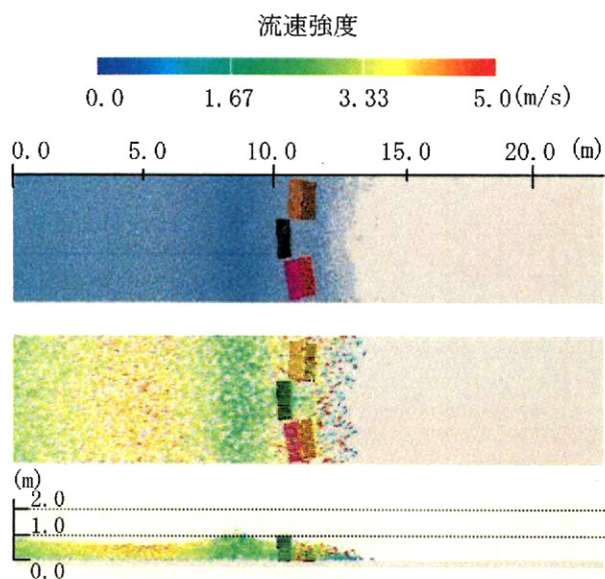


(b) 時刻1.0秒

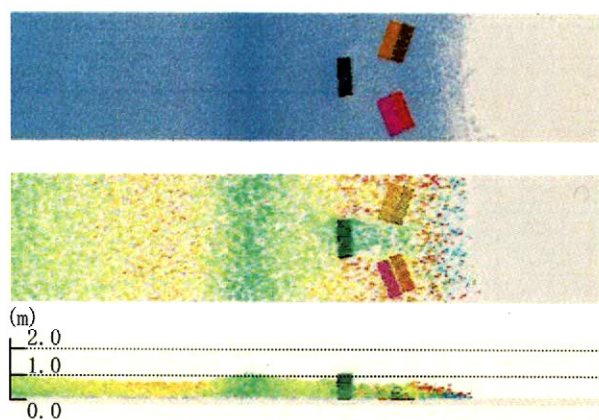


(c) 時刻5.5秒

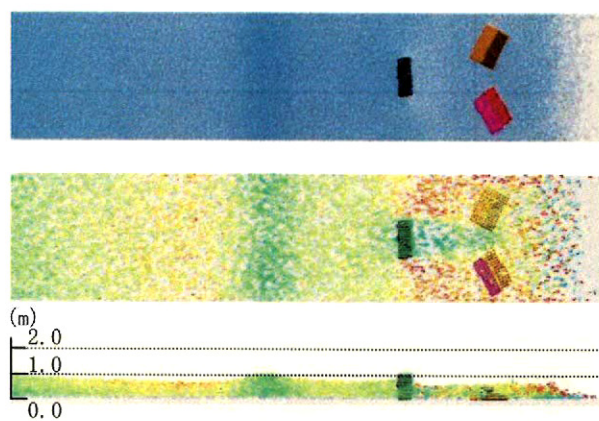
図-5 ケース4の解析結果 (上：平面図，中：平面流速強度，下：側面流速強度)



(a)時刻2.0秒

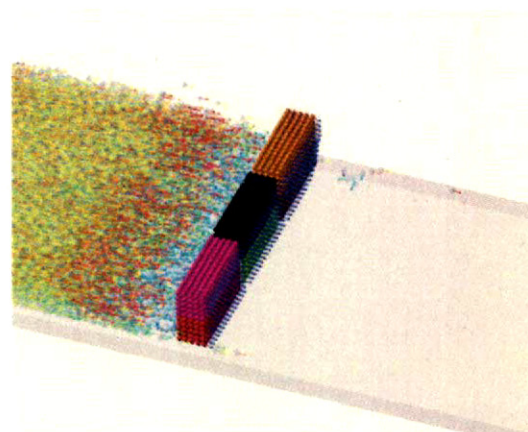


(b)時刻3.0秒

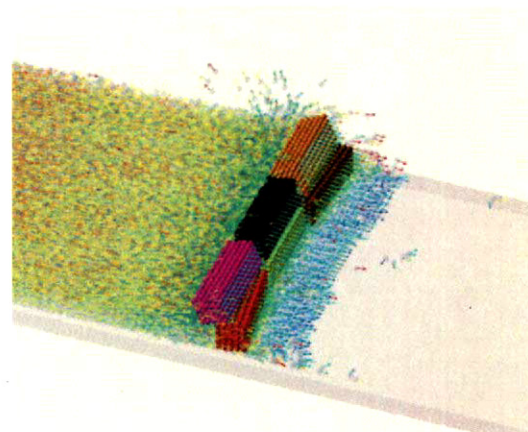


(c)時刻4.0秒

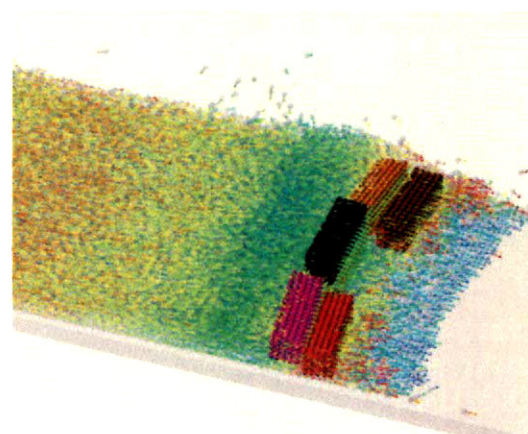
図-6 ケース4の解析結果（上：平面図，中：平面流速強度，下：側面流速強度）



(a)時刻0.5秒



(b)時刻1.0秒



(c)時刻1.5秒

図-7 ケース4の解析結果（段波衝突直前直後）