

波動場に設置された水平板周辺の流動構造に関する数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW PATTERN AROUND A HORIZONTAL PLATE IN WAVE FIELD

加藤雅也¹・渡部靖憲²・佐伯浩³

Masaya KATO, Yasunori WATANABE and Hiroshi SAEKI

¹正会員 日本データサービス株式会社 総合解析室 (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1-14)

²正会員 工博 北海道大学助手 工学研究科環境資源工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³フェロー 工博 北海道大学教授 工学研究科環境資源工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

The horizontal plate has usually been used for coastal and ocean structures, such as an upper slab of pier and a buffer structure around a bridge pier. And there have been also a lot of research on the use of horizontal plate for submerged breakwater against beach erosion and artificial sea bed for the fish-raising industry. Much effort has so far been devoted to the research of wave fields around a horizontal plate, especially about the impact force to pier and the wave deformation around submerged horizontal plate in terms of the design for the structure. However, the flow pattern around horizontal plate in a wave field has not been explicated. The current study has attempted to numerically analyze some of the wave fields around a horizontal plate. Based on the results of this study, this paper discusses the characteristics of the evolution process of fluid motion and eddy motion around a horizontal plate.

Key Words : Horizontal plate, numerical simulation, wave field, eddy

1. はじめに

港湾・海洋構造物のコスト削減や周辺環境への影響評価を精度良く行うためには、構造物近傍の渦や乱れを含む複雑な流れを解明する必要がある。港湾・海洋構造物の様々な形状のうち、水平板形状は、古くから栈橋上部工、橋脚緩衝工等に利用されてきた。さらに、近年では没水平板型消波構造物や人工海底¹⁾等への利用も研究されている。しかしながら、水面上に設置される場合の作用衝撃波力の研究(例えば谷本ら²⁾)や没水平板による波の分裂、消波性能および波力特性に関する研究(例えば小島ら³⁾)は多いものの、水平板周辺の詳細な流動構造は鉛直板の場合に比べてほとんど解明されていない。

一方、構造物周辺の流動構造を詳細に調べる場合、多数の計測点の時系列データが必要であり、現地計測や水理模型実験で十分なデータを得るためには多大な労力と費用がかかる。近年、コンピュータの飛躍的な性能向上に伴って可視化技術や数値解析技術が進展し、波動場における碎波等の複雑な流れを詳細にかつ精度良く調べる手法が確立されつつある。

そこで、本研究では、Navier-Stokes方程式を基礎方程式とした数値計算により、波動場に設置され

た水平板周辺の断面2次元流れ場をシミュレートし、主に渦運動に着目して流動構造を解明することを目的とした。

2. 数値計算方法

(1) 支配方程式と解法の概要

本研究では、水深と長波の波速で無次元化した2次元非圧縮性流体の連続式とNavier-Stokes方程式を支配方程式とした。ただし、開境界処理と入射境界での無反射造波のために、川崎⁴⁾と同様にエネルギー吸収項と造波ソース項を加えている。

方程式の解法は、渡部・佐伯⁵⁾と同様な方法で行った。すなわち、Navier-Stokes方程式を移流と非移流の2段階に分けて差分法により離散化し、非移流の計算では概ねMAC法(Marker and Cell Method)と同様に圧力に関するポアソン方程式を解き、移流の計算には数値拡散を低減させるため、CIP法(Cubic-Interpolated Pseudo-Particle/Propagation method)⁶⁾を用いた。なお、自由表面の取り扱いには密度関数法を用い、密度関数の移流計算にもCIP法を適用している。

(2) 計算条件

図-1に数値計算領域と座標系を、表-1に計算条件を示す。表-1に示すとおり、本研究では、水平板の厚さ h_s 、没水深 R 、水深 h 、入射波周期 T を一定とし、水平板の長さ B や入射波波高 H_1 の異なる3ケースについて計算した。

境界条件として、構造物および底面はスリップ条件とした。本来、構造物近傍の剥離現象を正確に捉えるためには nonslip 条件とすべきであるが、計算負荷の点から境界層まで考慮するほど空間メッシュを十分細かくすることができないことと、本研究では水平板の後流域に生成される大規模渦運動が支配的であると考えスリップ条件を用いた。ただし、CASE-1については、比較のため構造物と底面を nonslip 条件とした場合についても計算した。

本研究では、入射境界である造波ソースに3次のストークス波を与え、初期の静止状態から造波開始後7周期分をシミュレートした。なお、急激な造波運動による計算の不安定を起こさないように、造波開始後3周期間で徐々に波高が設定値に近づくように調整した。

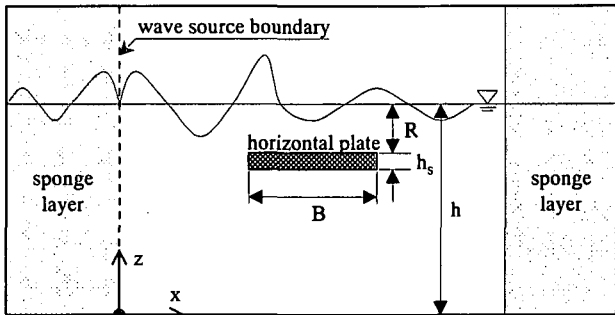


図-1 計算領域および座標系概略図

表-1 計算条件

	CASE-1	CASE-2	CASE-3
水深 h (m)	0.3		
波高 H_1 (m)	0.05		0.1
周期 T (s)	1.5		
没水深 R (m)	0.1		
水平板長 B (m)	0.6	1.2	0.6
水平板厚 h_s (m)	0.015		
空間メッシュ	$h/60$		
$\Delta x, \Delta z$	(エネルギー吸収帯では $\Delta x = h/60 \sim h/30$)		
タイムステップ Δt	$T/1024$		

3. 計算結果

図-2に、CASE-1の無次元渦度の時間変化を示す。図中、時計回りの渦度を正（白色）、反時計回りの渦度を負（黒色）で示している。図に示した位相は、造波開始後6周期目と7周期目の2周期分であり、1周期を8分割している。最初に、水平板の沖側端部周

辺の流れに着目すると、波峰の通過に通過に伴って水平板上部に時計回りの渦が発生する。その後、この渦はわずかに岸向きに移流されると共に水平板上水深の減少により若干潰され、波谷の通過時に逆回転の渦を伴って沖側に移流される。さらに、沖側に移流された渦は、緩やかに下方に沈降する場合、次の周期で発生した渦と干渉して渦の合体や分裂が起こる場合等、時々刻々変化していく。一方、水平板の岸側端部では、波峰到達前に水平板上部に反時計回りの渦が発生する。本ケースでは、沖側端部で時計回りの渦が発生する位相と概ね同じ位相となっている。波峰が岸側端部に到達すると渦は構造物から離れ、その後、逆回転の渦を伴って沖側下方に移流される。二つの渦は底面に達した後、沖側と岸側に分離して移流される。このように底面に達した渦は局所洗掘の原因になると考えらる。以上のように、渦の発生から移流の状況は沖側と岸側で異なるが、渦の存在範囲は沖側、岸側共に、水平板の先端から水平板の半分の長さ程度に限定されている。

図-3に、CASE-2の無次元渦度の時間変化を示す。水平板沖側端部では波峰通過時に水平板上部に渦が発生し、その渦は水平板上で岸側水面方向に引き伸ばされ、波谷通過時に水平板上水深の減少により潰される。この渦はCASE-1と異なり、沖側へは移流されずそのまま水平板上に残存する。また、波谷通過時には沖向き流れにより別の比較的小規模な渦対が沖向きに発生するが、次の波による岸向き流れで水平板上方に移流され、水平板上に残存していた渦と合体する。一方、岸側端部では、CASE-1と同様に波峰通過前に生成された反時計回りの渦が波峰の通過に伴い沖側下方へ移流される。しかしながら、この際CASE-1とは異なり、前の周期で一旦沖側下方に移流した渦対のうち時計回りの渦だけが上方に引き上げられ、新たに生成された反時計回りの渦と対を成して沖側下方に移流される。また、残された反時計回りの渦は水平板下面にトラップされる。CASE-2の水平板長 B と入射波波長 L との比は $B/L \approx 0.5$ であり、CASE-1の B/L の2倍である。そこで、CASE-1とは異なり、水平板長が長い分だけ岸側と沖側での渦の発生に位相差が生じている。また、相対的に構造物に対して周期の短い運動となるため、発生する渦の規模がCASE-1に比較して小さくなっている。渦の存在範囲は水平板端部近傍に限定される。

図-4に、CASE-3の無次元渦度の時間変化を示す。本ケースは入射波波高をCASE-1の2倍にしているため、発生する渦の規模がCASE-1に比較して大きくなっている。特に水平板岸側では、水平板端部から発生する渦と水平板上での碎波に伴い発生する渦との相互干渉により渦の合体や分裂が起こり、非常に複雑な流動構造となっている。また、渦の存在範囲は、沖側ではCASE-1と同様に水平板の先端から水平板の半分の長さ程度に限定されているのに対して、岸側では水平板の先端から水平板の長さと同程度にまで及んでいる。

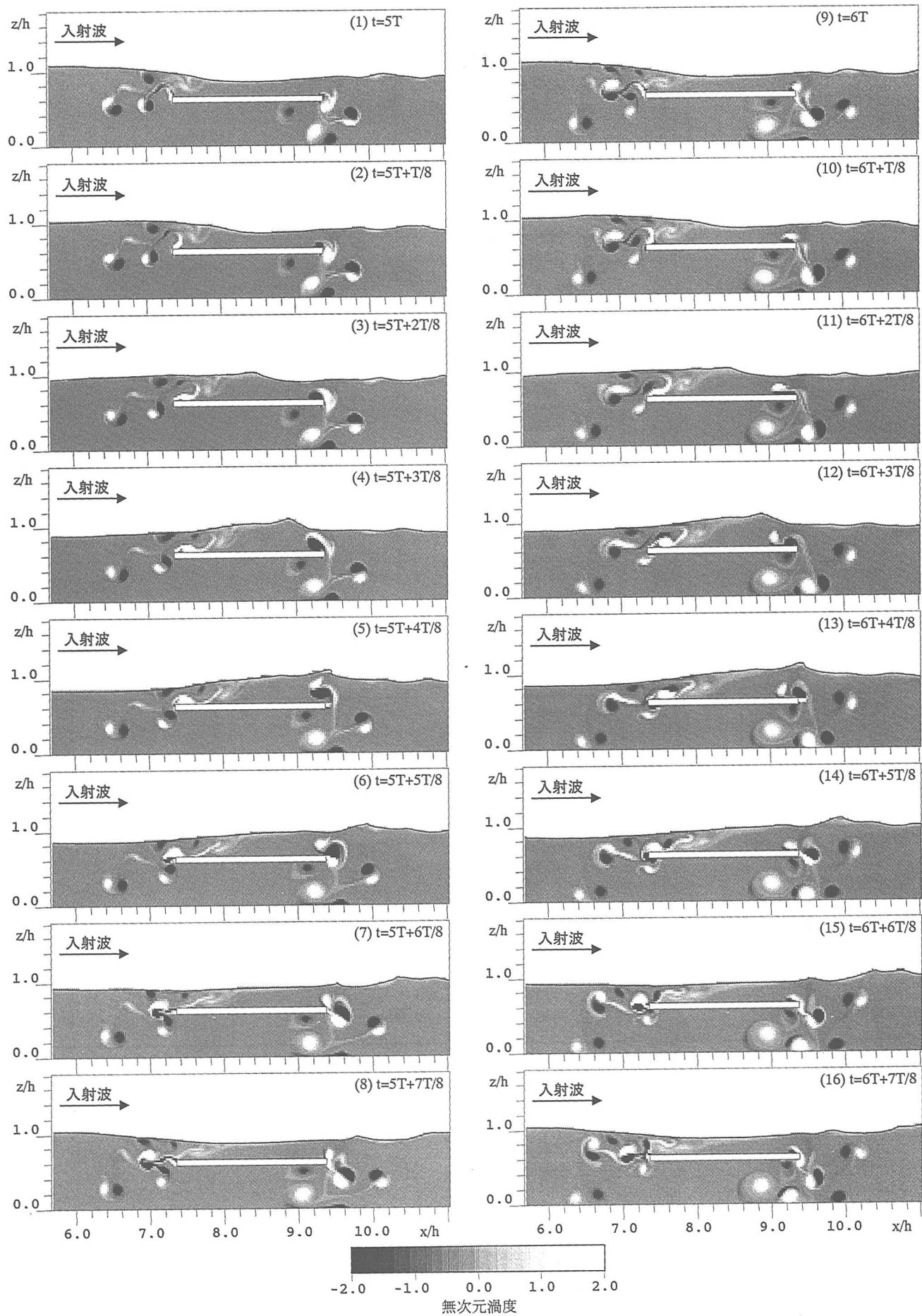


図-2 渦度の時空間変動 (CASE-1)

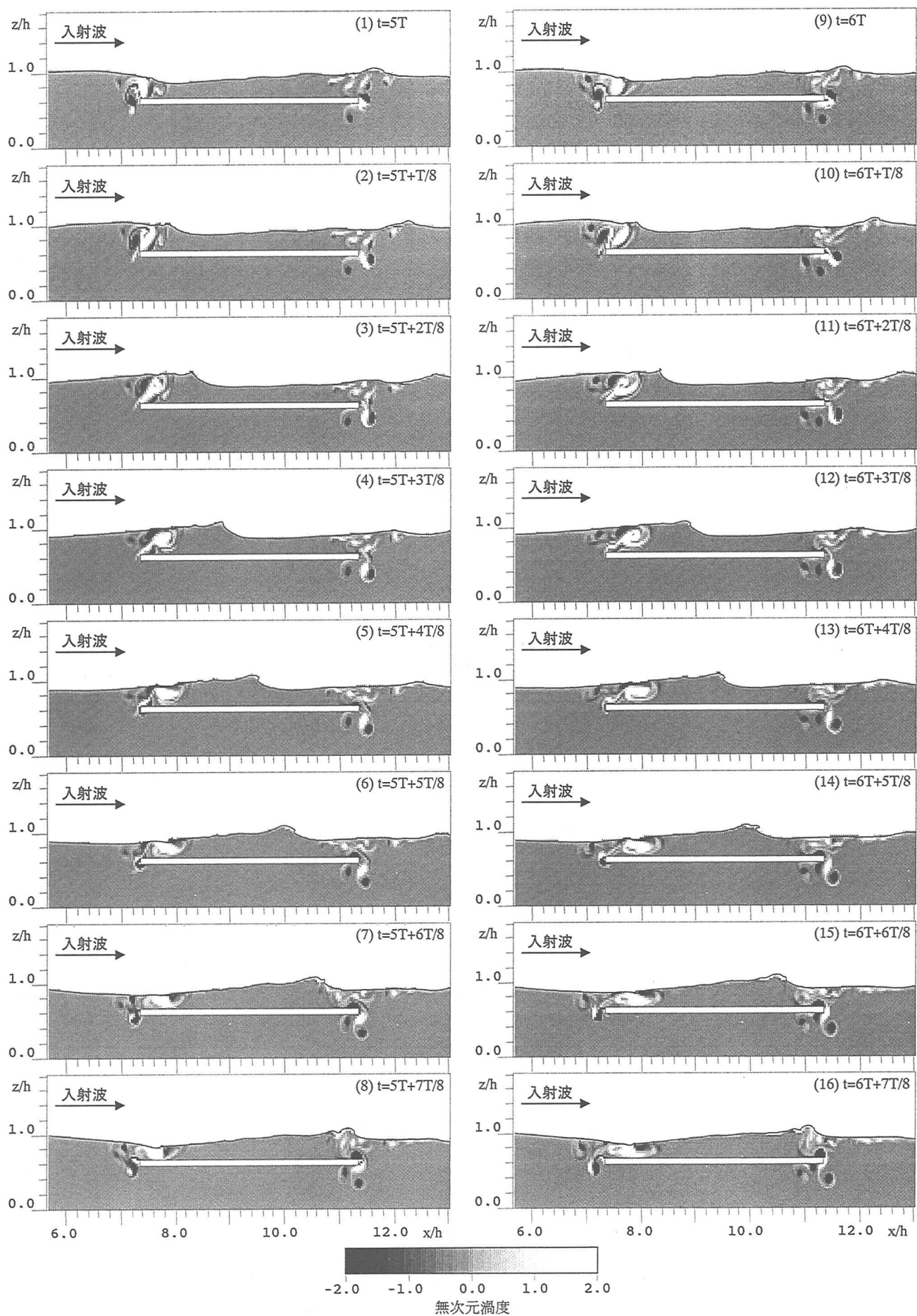


図-3 渦度の時空間変動 (CASE-2)

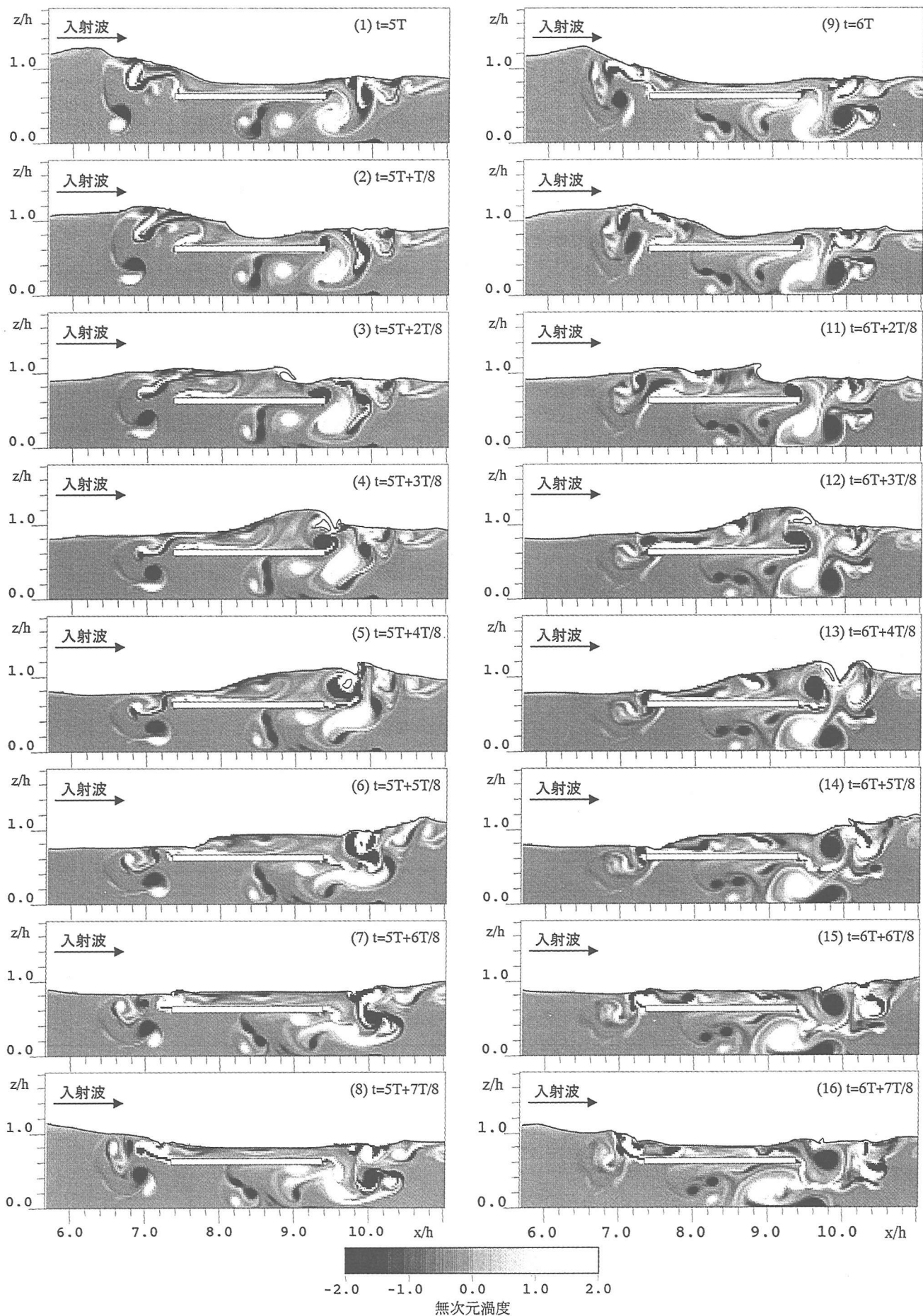
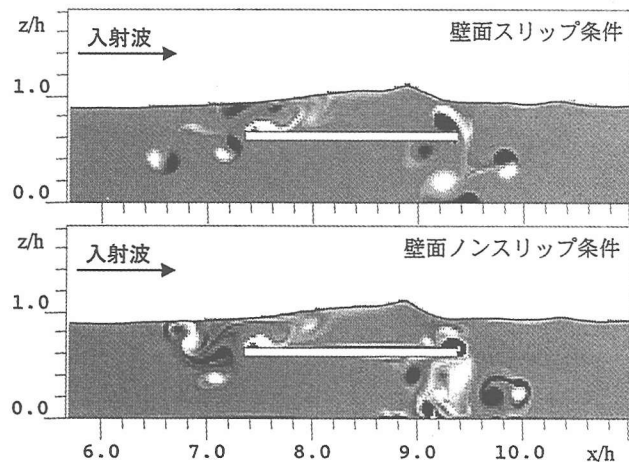
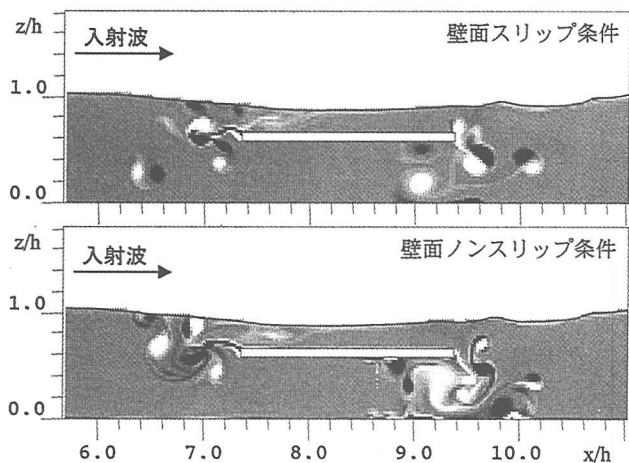


図-4 渦度の時空間変動 (CASE-3)

図-5にスリップ条件で計算した結果と nonslip 条件で計算した結果の比較の一例を示す。渦の発生は酷似しているが、水平板から渦が離脱する様子や離脱後の運動、底面境界層との干渉等が異なり、nonslip 条件で計算した方がより複雑な流動構造となっている。



(a) 波峰通過時 ($t=6T+3T/8$)



(b) 波谷通過時 ($t=6T+7T/8$)

図-5 壁面条件による相違

4. 結論

断面2次元Navier-Stokes方程式に基づく数値計算により、波動場に設置された水平板周りの流動構造をシミュレートし、その複雑な流動構造のうち渦運動に着目してその特徴を捉えることができた。渦の生成から移流・拡散する様子は、構造物や入射波の条件によって異なるのに加えて、前の周期で残存した渦の影響によって周期ごとにも変化するが、概ね以下に示すとおりであった。

- ・ 波峰の通過に伴い水平板の両端から上方に向かって比較的規模の大きい渦が発生する。
- ・ 沖側端部で発生した時計回りの渦は、一旦岸側に動き水平板上の水深の減少に伴い若干潰される。この渦は、水平板長に対して入射波波長が

長い場合は沖側へ移流されるが、波長が短い場合は水平板上にトラップされる。

岸側端部から発生した反時計回りの渦は水平板沖側下方へ移流される。その際、水平板下側角から発生する逆回転の渦、前の周期の残存渦、碎波に伴い発生する渦等と相互干渉しながら移動し、渦が底面付近や水平板下部中央付近にまで達する場合がある。

以上に示したとおり、水平板周辺の流動構造が概ね明らかとなった。ただし、本計算では壁面近傍の剥離現象に対しては不十分である。また、本計算では乱流モデルを用いていないので、格子サイズ以下の現象は考慮していない。したがって、乱流の高周波数成分へのエネルギーの移行およびエネルギー散逸する過程はシミュレートされず、渦が実際の現象より長時間残存している結果となっている場合もあると考えられる。さらに、このような複雑な流れは初期の2次元性が保たれず3次元構造に発展することが考えられ、3次元での計算も必要である。これらの点は今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 金戸俊道, 加藤雅也, 浜中建一郎: グリーンの公式を用いた構造物回りの波の3次元変形と力, 海洋開発論文集, Vol.10, pp.49-54, 1994.
- 2) 谷本勝利, 高橋重雄, 和泉田芳和: 水平版に働く揚圧力に関する研究, 港研報告, Vol.17, No.2, pp.3-47, 1978.
- 3) 小島治幸, 中村哲也, 入江功, 吉田明德: 没水水平板に作用する線形および非線形波力の特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.751-755, 1992.
- 4) 川崎浩司: 潜水構造物による碎波変形と再生過程に関する基礎的研究, 名古屋大学博士論文, p.186, 1998.
- 5) 渡部靖憲, 佐伯浩: 碎波帯内の流速場のダイレクトシミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.71-75, 1996.
- 6) Takewaki, H., Nishiguchi, A. and Yabe, T.: The Cubic-Interpolated Pseudo-Particle (CIP) Method for Solving Hyperbolic-Type, J. Comput. Phys., 61, pp.261-268, 1985.