

3次元直接数値解析による波・流れ共存下にある人工リーフ周辺の流動場に関する研究

A STUDY ON FLOW FIELD AROUND AN ARTIFICIAL REEF
DUE TO WAVE-CURRENT INTERACTIONS
THROUGH 3D DIRECT NUMERICAL SIMULATION

李 光浩¹・福田直也²・水谷法美³

Kwang-Ho LEE, Naoya FUKUTA, Norimi MIZUTANI

¹正会員 博(工) 名古屋大学助教 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

This study investigates numerically how wave-current interaction affect wave field around an artificial reef installed near river mouth through 3D direct numerical simulation. In the numerical simulations, flow fields around an artificial reef were investigated by making comparisons of the variations of water surface, wave height and velocity distribution for each case: current only, wave only, and coexistence of wave and currents. The numerical results indicated that the wave height increases behind the artificial reef due to the wave-current interactions.

Key Words : Wave-current interaction, artificial reef, submerged mound, scouring

1. はじめに

海岸の安定化を図る消波構造物は様々な構造物が提案されているが、その中で、海岸の環境保全、景観確保の観点から、人工リーフの計画・施工例が近年増加している。その中で施工個所が河口域のような波と流れが相互に作用する場に施工される例や、河口閉塞対策防止対策として河口に人工リーフが施工される例が存在する。波が卓越する場において、人工リーフ周辺の水理特性及びそれに伴う土砂輸送過程の研究は数多く行われている。しかし、河口域のような波と流れが共存する場における人工リーフ周辺の水理特性に関しては十分な検討が行われているとは言いがたい。波と流れの相互作用については、数値計算によりその実態を解析する試みが活発化している。しかし多くの数値モデルでは、鉛直2次元の場を対象としている¹⁾、波による流れ場の非定常性を考慮していない²⁾、流れは時間的に変化しないといった点が存在することから、河口部における波と流れの相互作用の解析に適用するには必ずしも十分ではない。そこで李ら³⁾は、波による流れの変化と流れによる波の変化の両方を同時に解析可能な、Navier-Stokes運動方程式に基づいた3次元数値解析モデルにより、河口テラス形成過程と河口域の流動

場の関係性を明らかにした。

一方、人工リーフ周辺に生じる海浜流の流動場、およびそれに伴う土砂移動過程の研究は、多方面から数多くの研究が行われている。しかし、既往の人工リーフに関する研究の多くは、波のみが作用する場を対象としたものがほとんどである。波と流れが作用する場の人工リーフ周辺の研究としては、宇多ら⁴⁾は河口閉塞対策を目的とした人工リーフを用いた河口処理工の現地観測による検討などにより中小規模の河口処理工として人工リーフが有効であることを明らかにした。しかし、研究は河口閉塞対策としての研究が主である。河川の流れの影響を受ける河口域における人工リーフ周辺の流動場および土砂移動過程を解析することは、実現象により近い解析であるといえ、人工リーフの機能特性をより明らかにするものであるといえる。

そこで本研究では、河口域に人工リーフが存在する場合を想定し、河口および人工リーフ背後域の地形の形成・変形過程、漂砂環境に影響を与える土砂移動過程の主要な外力になる波・流れの特性を明らかにするために、数値波動水槽により、河口付近の人工リーフ周辺を対象とした3次元流動場解析を行う。

2. 数値解析手法

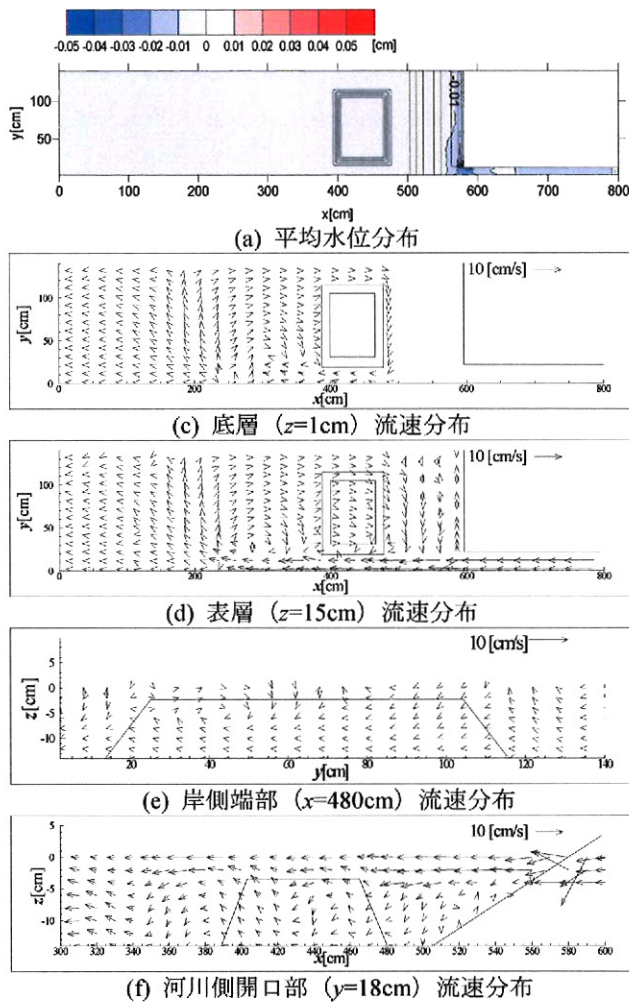


図-2 Case1 流れのみ: $\bar{U} = 10\text{cm/s}$

方向に流れが生じており、この流れと上記で述べた底層部での背後域の y の負の方向への流れにより、図-2(e)の $y=25\text{--}60\text{cm}$ の範囲で時計回りの循環流が生じているのが分かる。図-2(f)では、河川水深より浅い $z=0\text{cm}$ から $z=-3\text{cm}$ にかけて、河川からの流れが沖方向に流出している様子が確認できる。また河川水深以下の $z=-4\text{cm}$ から $z=-15\text{cm}$ の水深域にかけては、離岸方向の流れの中に鉛直方向に蛇行した流れが見てとれる。

Case2の波高 $H_i = 3\text{cm}$ 、周期 $T = 1.2\text{s}$ の波のみを用いた場合の平均水位分布を図-3(a)、波高分布を図-3(b)、底層($z=1\text{cm}$)、表層($z=15\text{cm}$)の水平断面図を図-3(c)(d)、河川側開口部($y=18\text{cm}$)および岸側端部($x=480\text{cm}$)の断面図を図-3(e)(f)に示す。図-3(a)(b)から人工リーフの前面の水位や波高は人工リーフによって生じた反射波によって帯状に分布していることがわかる。沖から進行してきた波が人工リーフ天端上で強制砕波されたことによる水位低下、人工リーフ沖側での波高の増大、岸側での波高の減少が確認できる。また、河川側、沿岸側の両開口部において波高の増大が確認できる。これは沖から進入してきた波が波高からの流れと砕波によって生じた循環流により河川側開口部で波高増大したためである。これは既往の研究²⁾にもあるように、波が流れによって変形される際の特徴的な現象である。背後域

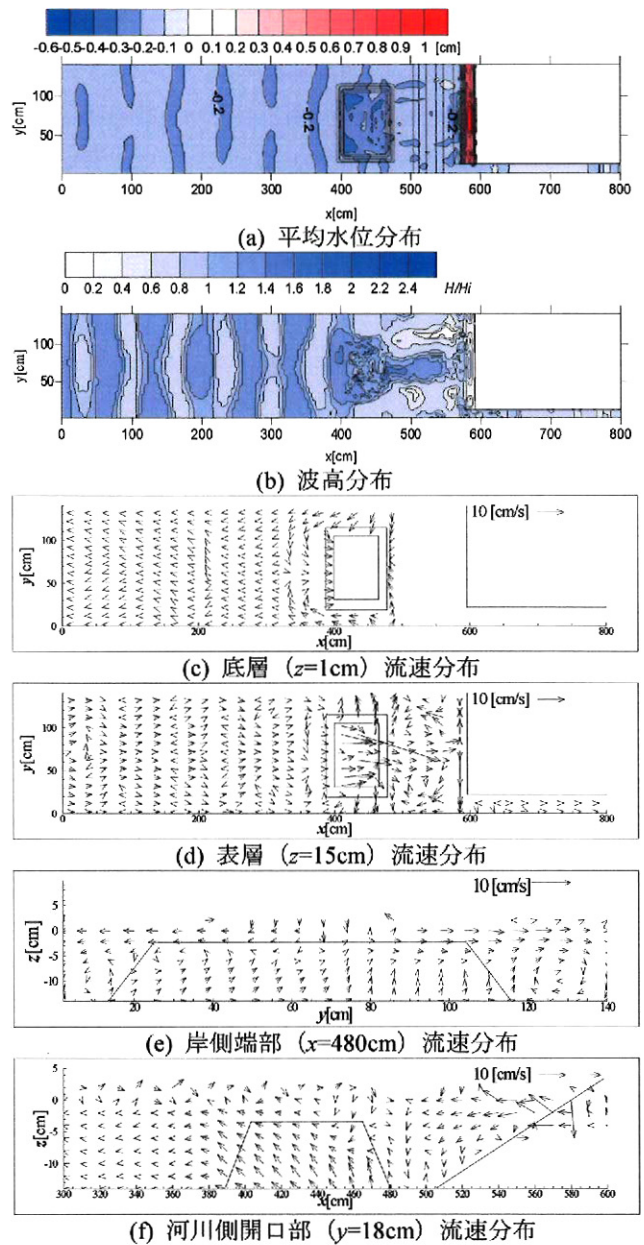


図-3 Case2 波のみ: $H_i = 3\text{cm}$, $T = 1.2\text{s}$

中央部では波高の増大が見られる。これは両開口部から進入してきた波が回折することにより波高増大を引き起こしたためであると考えられる。図-3(c)(d)より人工リーフ中央部から岸向きへの流れが汀線付近で沿岸方向に湾曲し、河口部から沖へ流れ出る一対の循環流が生じていることが確認できる。これは人工リーフ天端上で砕波により生じた流れに起因しているものである。人工リーフ前面においては、両開口部から沖に流出した流れが、人工リーフ前面に回り込むような流れが発生していることが確認できる。人工リーフ後背部では、人工リーフの存在により、表層と底層で流れの方向が大きく異なることが図-3(e)より分かる。

Case3の河川流速 $\bar{U} = 10\text{cm/s}$ と波高 $H_i = 3\text{cm}$ 、周期 $T = 1.2\text{s}$ の波を両方作用させた場合の平均水位分布を図-4(a)、波高分布を図-4(b)、底層($z=1\text{cm}$)、表層($z=15\text{cm}$)の水平断面図を図-4(c)(d)、河川側開口部($y=18\text{cm}$)および岸側端部($x=480\text{cm}$)の断面図を図-

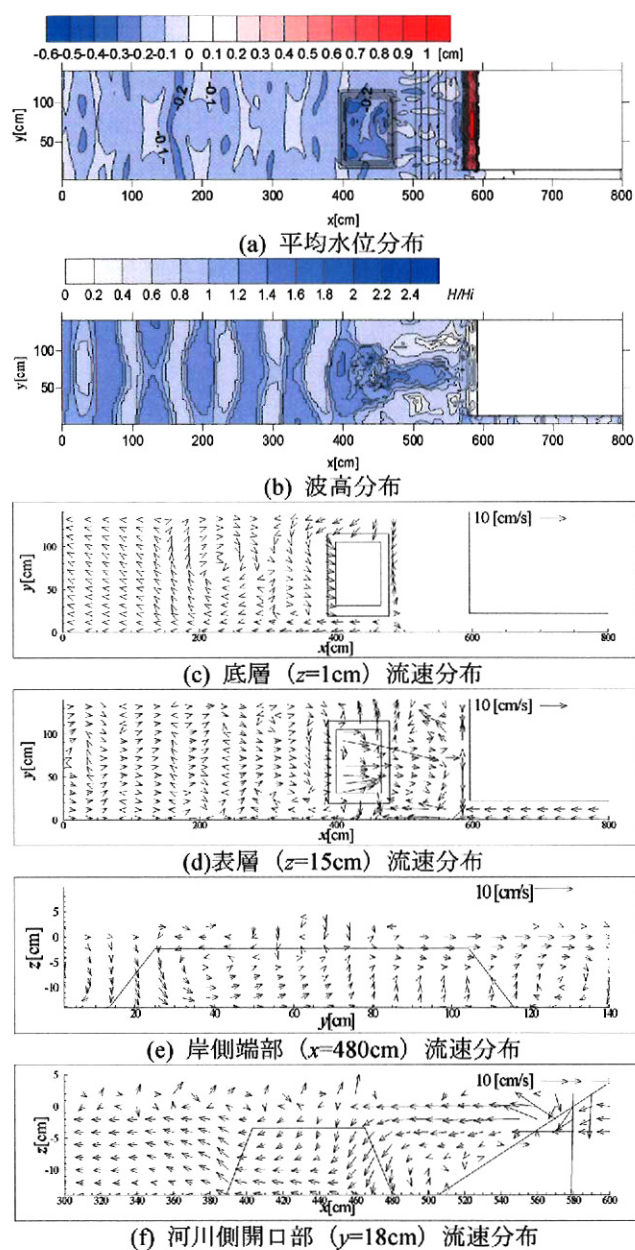


図-4 Case3 波・流れ共存：
 $\bar{U} = 10\text{cm/s}$, $H_i = 3\text{cm}$, $T = 1.2\text{s}$

4(e)(f)に示す。図-4(a)の水位変動においてはCase2の波のみが作用する場合に比べ、水位の変動は少ないが、特に人工リーフ背後域において分布が乱れている様子が見てとれる。これは砕波に起因する流れと河川からの流れにより、人工リーフ背後域において、流動場が不安定になるためであると考えられる。図-4(b)の波高分布より両開口部を比較すると河川側開口部のほうが波高の増大が大きい。これは河川からの流れが砕波によって生じた循環流と合流するため流速が大きくなり、波高の増大を引き起こしたためである。図-4(c)より底層の流動場は沖合において、Case1の流れのみを作用させたときに見られた時計回りの循環流が生じていることが分かる。また、人工リーフ前面においては、Case2の波のみが作用する場合で発生している両開口部から沖に流出した流れが人工リーフ前面に回り込むような流れが発生していることが確認できる。両開口部を比較す

ると河川側開口部では回り込みが少ない。これは河川流によるものと考えられる。また、表層においては、図-4(d)より人工リーフ背後域において、Case2の波のみが作用する場合の結果からも見られた循環流が生じていることが分かる。このことから、河川流の影響は特に底層において現れやすいことが分かる。また、河川内においては河川流速が減少していることが見て取れる。これは波と流れの相互作用による流速の減少のためであると考えられる。Case3では河川流速 $\bar{U} = 10\text{cm/s}$ としたが、波の影響によって河口直前では $\bar{U} = 6\text{cm/s} \sim 7\text{cm/s}$ 程度に流速が減少している。表層、底層ともに河川側では循環流によって生じた冲向きの流れと、河川からの流れが合流し河川側開口部への強い流れが生じていることが図-4(c)(d)からも見てとれる。人工リーフ背後では河川側開口部背後において鉛直下向きの強い流れが生じていることが分かる。また、人工リーフ背後域河口側($y=30 \sim 60\text{cm}$ 付近)にかけての底面に沿ったyの正方向への強い流れが生じていることが分かる。また、図-4(f)より河川側の開口部では河川からの流れが、人工リーフの開口部に進入する際に鉛直下向き方向に湾曲され、開口部を抜けるときに上向きに湾曲される流速場が生じている様子が確認できる。このような河川側開口部および背後部での特徴的な流れはCase1の流れのみが作用した場合、Case2の波のみが作用した場合の流動場ではみられなかったことから、河川からの流れと波の相互作用によって発生すると考えられる。

(2) 水面変動、流動場に影響を与える要因の把握

ここでは波の周期、波高、河川流速が水面変動および流動場にどのような影響を与えるのか解析を行う。短周期、長周期、河川流速が大きい場合をそれぞれCase4,5,6とし、この3ケースとCase3を比較することにより水理特性解析を行った。

Case4の短周期の場合、河川流速 $\bar{U} = 10\text{cm/s}$ と波高 $H_i = 3\text{cm}$ 、周期 $T = 0.8\text{s}$ の波を両方作用させた場合の平均水位分布を図-5(a)、波高分布を図-5(b)、底層($z=1\text{cm}$)、表層($z=15\text{cm}$)の水平断面図を図-5(c)(d)、河川側開口部($y=18\text{cm}$)および岸側端部($x=480\text{cm}$)の断面図を図-5(e)(f)に示す。図-5(a)の水面変動では、人工リーフ天端上、背後域において図-4(a)と比べ、水面変動分布の乱れが激しいことが分かる。これは波と流れの相互作用は波の周期が短いほど波が流れから受ける影響を受けやすいことから、流れが不安定になり、水面変動に乱れが生じたと考えられる。図-5(b)の波高分布において、図-4(b)と比較すると人工リーフ背後域全体的に波高の減少が広がっていることが分かる。人工リーフ背後域中央部の波高の増大域は少なくなっている。これは周期が小さいことにより回折現象が起こりにくいためである。また、図-5(c)(d)から表層の流動場は乱れが激しいことが見てとれる。このことから、波と流れの相互作用による影響が顕著にあらわれていることが分かる。人工リーフ背後域において図-4(c)(d)で見られる循環流はあまり発達していない。図-5(e)(f)においても、図-4(e)(f)と流速が全体的に

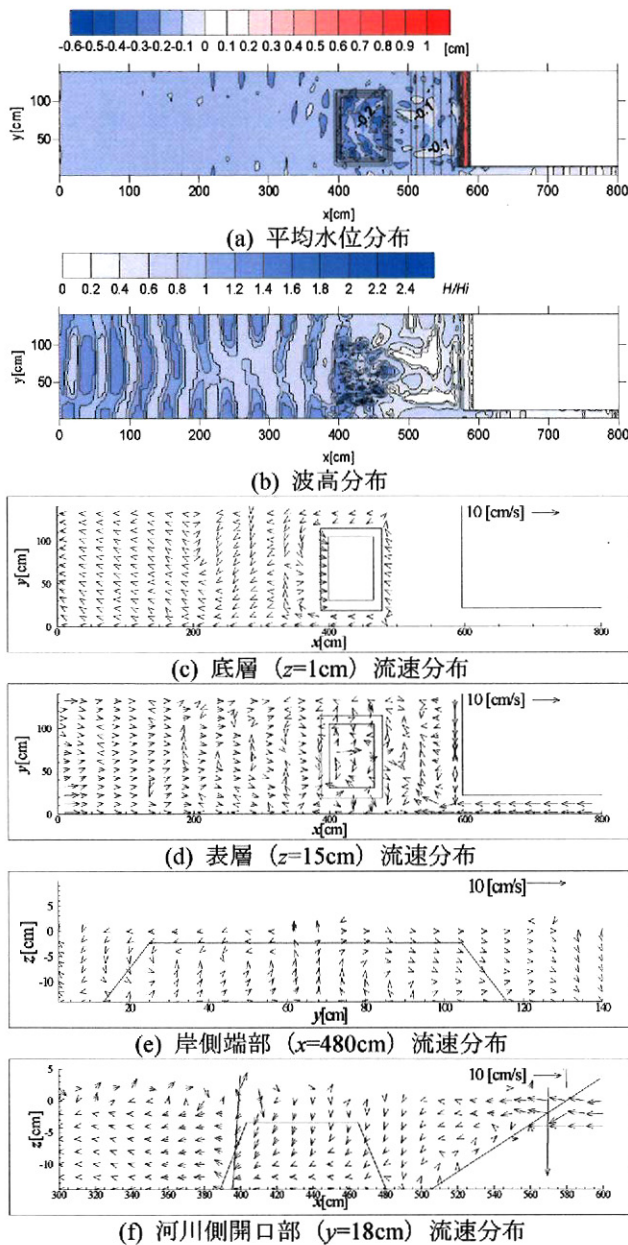


図-5 Case4 短周期、波・流れ共存：

$$\bar{U} = 10\text{cm/s}, H_i = 3\text{cm}, T = 0.8\text{s}$$

小さい値である。これらは周期が小さいことにより流速が小さいためであると考えられる。

Case5の長周期の場合、河川流速 $\bar{U} = 10\text{cm/s}$ と波高 $H_i = 3\text{cm}$ 、周期 $T = 1.6\text{s}$ の波を両方作用させた場合の平均水位分布を図-6(a)、波高分布を図-6(b)、底層($z=1\text{cm}$)、表層($z=15\text{cm}$)の水平断面図を図-6(c)(d)、河川側開口部($y=18\text{cm}$)および岸側端部($x=480\text{cm}$)の断面図を図-6(e)(f)に示す。図-6(a)より人工リーフ背後域では、図-4(a)と比べて一様に水位分布が広がっていることが分かる。開口部の背後では図-4(a)ほどの波高の減少は見受けられない。これは長周期の波は流れの影響を受けにくいことから、波高の減少が穏やかになったためであると考えられる。また、周期が大きいため波速も大きくなり人工リーフ天端上で砕波により生じる流れが大きくなる。そのため、図-6(c)(d)をみると背後域で見られる循環

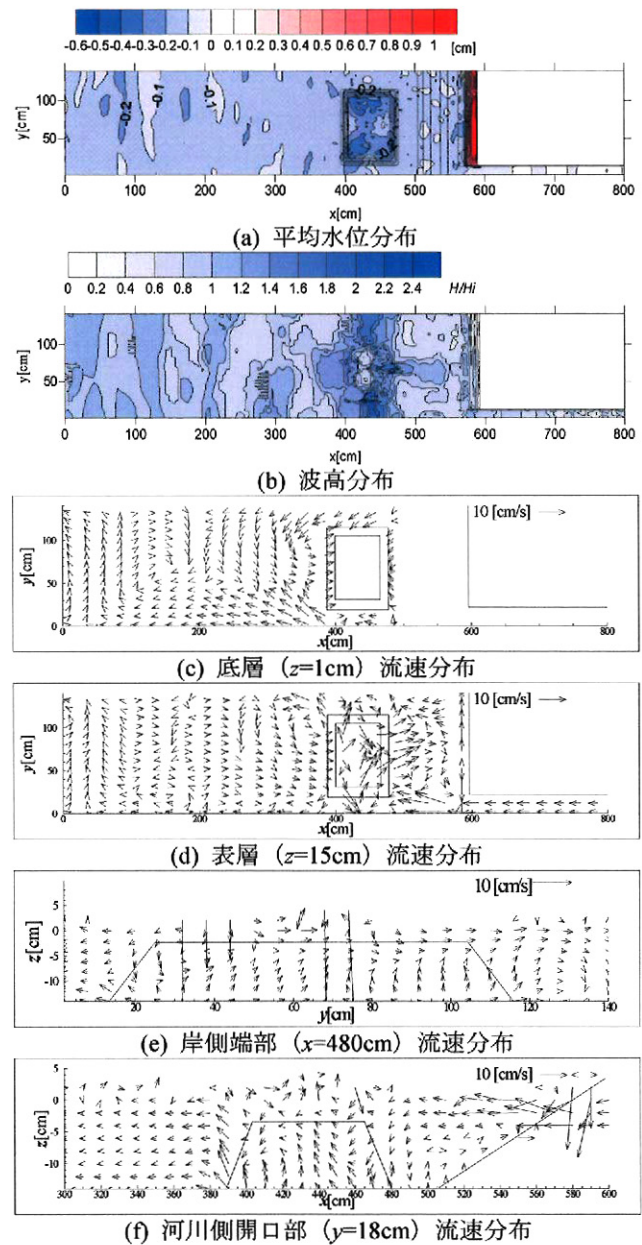


図-6 Case5 長周期、波・流れ共存：

$$\bar{U} = 10\text{cm/s}, H_i = 3\text{cm}, T = 1.6\text{s}$$

流の流速も大きくなっており、図-6(b)をみると砕波によって生じた流れが流れ込む開口部では、波と流れの相互作用が強くなり、両開口部ともに波高が増大していることが分かる。底層では、開口部から沖に流れ出る流れは、河川側開口部のほうが、流速が大きくなっていることから、長周期の波は流れに影響を与えにくいことがここからも分かる。また、表層では両開口部の流速に大きな違いはないことから、河川流速の影響は表層より底層の流動場に大きく影響することが分かる。図-6(e)をみると人工リーフ背後において、河川側底層で図-6(e)では鉛直下方向の流れの成分がみられたが、顕著な鉛直下方向の流れは確認できない。図-6(f)をみても開口部の流動場としては沖向きの流れの中に鉛直上向きの成分を持った流れが見られる。波のみが作用する図-6(e)(f)と流動特性が近いことから、河川側の流

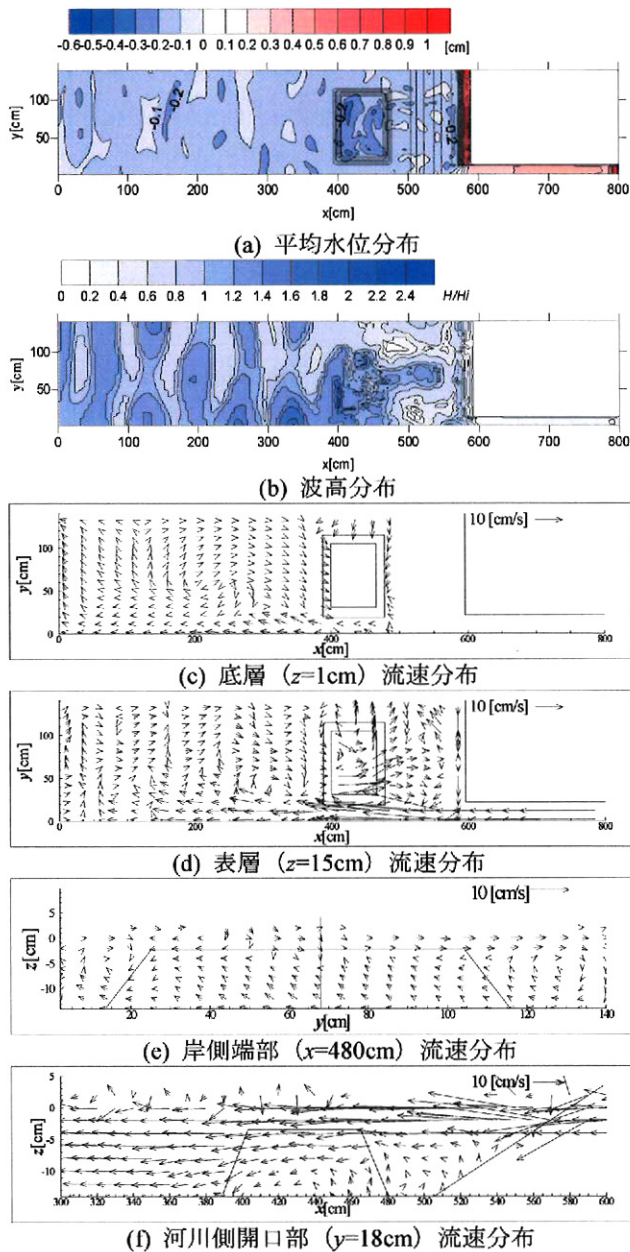


図-7 Case6 河川流速大，波・流れ共存：

$$\bar{U} = 30\text{cm/s}, H_i = 3\text{cm}, T = 1.2\text{s}$$

動場は波の影響が卓越していることがいえる。

Case6の河川流速が大きい場合，河川流速 $\bar{U} = 30\text{cm/s}$ と波高 $H_i = 3\text{cm}$ ，周期 $T = 1.2\text{s}$ の波を両方作用させた場合の平均水位分布を図-7(a)，波高分布を図-7(b) 底層($z=1\text{cm}$)，表層($z=15\text{cm}$)の水平断面図を図-7(c)(d)，河川側開口部($y=18\text{cm}$)および岸側端部($x=480\text{cm}$)の断面図を図-7(e)(f)に示す。水位分布としては河川内の水位上昇が他のケースと比べ著しい。海域では図-4(a)と比べると大きな違いは見受けられない。波高分布としては，図-7(b)より河川側開口部で波高が増大していることが分かる。これは河川流速が大きいために入射してくる波に対する影響が大きくなったためである。図-7(c)を見ると底層の流動場としては時計まわりの循環流が生じており，図-7(d)の表層の流動場としては河川側

開口部では河川からの流れが大きいものの，人工リーフ背後域の流れとしては，砕波によって生じる循環流の流れが確認できる。図-7(e)をみると人工リーフ背後ではそれに伴い，人工リーフ天端高より深い水深において，全体的に y の正の方向に流速が生じているのが分かる。これはCase3の波と流れが相互に作用する場合に発生する流れとは反対の流れである。Case1の流れのみが作用する場合においての流動場と同様の特性を示していることから，底層では河川からの流れの影響が卓越し，表層では波の影響が卓越していると言える。河川側開口部の図-7(f)においては図-4(f)で見られるような，底面に沿うように湾曲された流れは発生しておらず，流速が大きいため波による流路の影響をあまり受けないことが分かる。

4. 結果と考察

本研究では人工リーフが河口部のような波と流れの共存場に設置された場合の水面変動，流速場の特性を把握した。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- 1) 河口域の人工リーフ周辺の流動場は，河川からの流れの存在により，人工リーフ後背域で砕波によって生じる循環流と河川からの流れが合流することにより不安定な流動場を生み，水面変動に乱れが生じる。また，河川からの流れは特に底層の流動場に影響を与える。
- 2) 波と流れの相互作用により，人工リーフの河川側の開口部の底層では離岸方向，後背部の底層では沿岸方向の底面に沿う強い流れが生じる。
- 3) 入射波の波長，波高が異なると人工リーフ天端上での砕波の状況，砕波による流れの流速，開口部からの波の回折効果，流れと波の相互作用の影響の違いにより，波高分布は人工リーフ背後域，開口部で大きく異なる。

参考文献

- 1) 森信人・岡崎拓人・金井聡・角野昇八：波・流れ共存場における波高減衰に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第53巻，pp.41-45，2006。
- 2) 黒岩正光・口石孝幸・松原雄平・砂川真太郎：準3次元海浜流モデルを用いた3次元河口砂州形成数値シミュレーション，海岸工学論文集，第54巻，pp.686-690，2007。
- 3) 李光浩・桑原真吾・水谷法美：波と流れの相互作用が河口周辺の地形変化に及ぼす影響に関する研究，海洋開発論文集，第25巻，pp.1167-1172，2009。
- 4) 宇多高明・竹内正幸・筒井胤雄：暗渠と人工リーフを併用した新しい河口処理工に関する実験的検討，海岸工学論文集，第43巻，pp.611-615，1996。
- 5) 李光浩・大堀文彦・水谷法美：河口から遡上する孤立波および周期波と流れの相互作用に関する基礎的研究，海洋開発論文集，第23巻，pp.159-164，2007。