

可視化実験によるダブルバリア型浮消波堤 周辺における流動場特性の画像解析

PIV ANALYSIS OF FLOW CHARACTERISTICS BELOW DOUBLE BARRIER FLOATING BREAKWATER

沖和哉¹・柿木哲哉²・辻本剛三³・由比政年⁴・山田文彦⁵

Kazuya OKI, Tetsuya KAKINOKI, Gozo TSUJIMOTO,
Masatoshi YUHI and Fumihiko YAMADA

¹ 正会員 博(工) 京都大学講師 先端技術グローバルリーダー養成ユニット
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4)

² 正会員 博(工) 神戸高専准教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

³ フェロー 工博 神戸高専教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

⁴ 正会員 博(工) 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

⁵ 正会員 博(工) 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

Experimental study in 2D wave flume is conducted for visualization of flow characteristics below Double Barrier Floating Breakwater (DBFB). PIV analysis is employed for investigation. Flow fields are observed on four on-offshore sections to check the differences over the crossing section. In this study, the generation mechanism of pairs of circulations around barriers is revealed. Vorticities calculated from averaged flow field on four different sections are compared to each other. Distributions of bottom velocity below DBFB are also investigated and bottom shear stress is estimated.

Key Words : Visualization, barrier, floating breakwater, PIV, vorticity, bottom shear stress

1. はじめに

防波堤で保護された漁港やマリーナ等の小規模閉鎖性水域では水質悪化が懸念されるため、消波や静穏度確保の対策工のひとつとして、たとえば海水交換が自由に行える没水型構造物が考えられる。潜堤に代表されるような没水型構造物は、天端上で碎波させることによって波のエネルギーを減衰させるという機構上、大断面の構造物となり、それに伴って施工コストが増大する。また、今後予測される地球温暖化によって海面が上昇する場合、天端水深が大きくなってその効果が減少することが危惧される。一方、浮消波堤も海水交換を許容する消波工のひとつであるが、前述の没水型構造物と比較してコンパクトなため、施工費や維持管理費の面において有利であり、また、海水面が上昇しても浮体も共に上昇するためその機能の低下は限定的と考えられる。浮消波堤は設置型である没水型消波構造物とは異なり、移設や撤去も容易という利点もある。さらに、矩形浮消波堤の岸沖両側に鉛直板（バリア）が装着されたダブルバリア型浮消波堤（以下DBFBと略）は、バリア先端で誘起される渦によってエネルギー減衰効果を高めるだけでなく、活発化する底質移動

により航路や港内の埋没を抑制する効果も期待されている。これらの効果により港内の浚渫工事の回数を減らすことができれば、維持管理費の更なるコストダウンが可能となる。DBFBによる消波効果や静穏域に関する研究は行われているが（たとえば、沖ほか¹⁾）、海水交換機能や底質移動制御効果を積極的に利用するためには、DBFB周辺の流動場特性を詳細に把握する必要がある。

尹ほか²⁾は、通水路型防波堤を用いることにより、海水交換機能に加え、港内振動の変化および剥離渦の制御によって港内堆砂を制御する方法を実験的に検討している。港口の副防波堤先端を適切な形状に変えるか、あるいは通水路型防波堤を用いることにより顕著に堆砂量を減少させることができるとしている。また、中山ほか³⁾は、港内埋没対策技術の開発を目的として、水理模型実験によって海水導入工の効果について検討し、港奥に運ばれる漂砂量が減少することを示した。これらの港内堆砂制御法は、海水交換機能を有しており、水質などの環境面からも有効な手法と考えられる。しかし、既存施設にこれらの手法を導入する場合には大掛かりな工事や施工費が不可欠となる。供用開始後の中小規模の漁港やマリーナでは特にコストを低減させたいという要

求があるため、これらの方法は適さない。

一方、浮消波堤周辺の流速分布に関する研究として、Jung et al.⁴⁾ は、矩形浮体構造物近傍の流速分布をPIVによって実験的に調べ、浮体を固定した場合と可動の場合についての渦度および乱れ強度を比較している。また、辻本ほか⁵⁾ は、DBFBの沖側バリア周辺における流速分布をPIVによる画像解析で調べ、固定の場合と可動の場合の渦の形成について比較した結果、渦により誘起される流れの定常成分の向きが固定と可動で異なるとしている。これらの実験は浮消波堤の消波特性あるいはエネルギー減衰性を検討するのが主目的であるため、解析範囲が構造物周辺に限定されている。水質改善および漂砂制御効果を調べるためには底面付近も含めた広い範囲での計測が必要であるが、その目的に合った実験的研究は見当たらない。

本研究は、DBFBを用いた海水交換機能および底質移動制御効果の検証を念頭において、水底近傍も含めたDBFB周辺の流動場特性を把握するための可視化実験によるPIV画像解析を行う。なお、本研究を進める中で予備的に行ったDBFB周辺の移動床実験についても触れる。

2. 流動場の可視化実験

図-1に示すように、長さ18m、深さ0.8m、幅0.6mの両面ガラス張り二次元造波水路に、岸沖方向幅0.25m、横断方向幅0.58mのDBFB模型を設置し、周辺流動場の可視化実験を行う。模型はアクリル製で、矩形部分の高さは7.2cm、バリアの長さは5cm、バリアの厚さは1.3cmである。また、静水時におけるバリア先端からの喫水は9.1cmである。図-2に示すようにDBFBは水路上部に組まれた檣に固定された4本の鋼製杭で支持されており、ベアリングによって上下方向にのみ滑らかに動く。DBFBが安定した上下動を繰り返すことができる範囲内で杭の長さが最短になるように調整し、杭が流れ場に与える影響をなるべく少なくする。本研究では異なる岸沖方向断面における流動場特性の違いを調べるために、図-1(b)に示すようにDBFB中央を通る岸沖方向断面に加え、中央断面から側方へ5cm、10cmおよび20cm離れた計4断面について計測する。それぞれの断面を中央から順にc00、c05、c10およびc20とする。座標は、岸側バリア側面中心直下の水底を原点とし、沖向きにx、水路横断方向にy、鉛直上向きにzとする。可視化のために2mm厚のレーザーシートを水路側面からガラス越しに垂直に入射させ、水中に鉛直に立てた幅3cm程度の細長い鏡によってレーザーを岸向きに直角に反射させて観測面を作成する。なお、目視の範囲では水中に立てた鏡による波浪への影響はなかった。水深は31.5cm

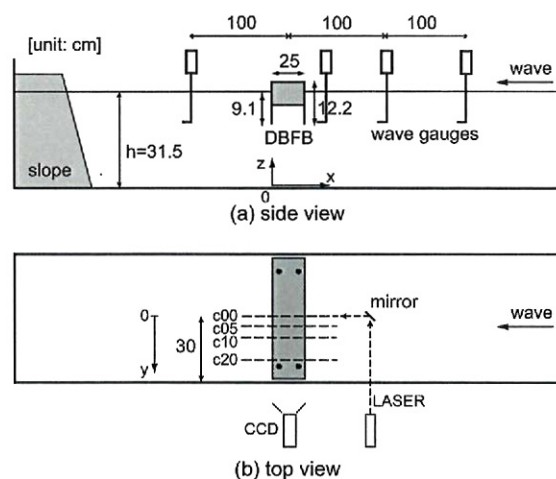


図-1 実験装置



図-2 ダブルバリア型浮消波堤模型の設置

として周期1sec、波高6cmの規則波を入射させる。安定した波が到達してから3～5波を計測するが、この間造波板からの再反射は生じない。また、DBFB上での越波も生じない。可視化実験によって得られる画像にPIVを用いて流速ベクトルを算出し、DBFB周辺の流動場特性を調べる。なお、画像の解像度を確保するため、沖側バリア周辺、DBFB中央周辺および岸側バリア周辺の3つの領域をそれぞれ上側と下側に分け、1つの断面を計6つの領域に分けて観測を行う。ただし、それぞれの領域には重複する範囲がある。

3. PIVによる画像解析

画像撮影にはレーザー・プローブ一体型の装置を用い、ダブルパルスの間隔は2000μsecおよび5000μsecとする。フレームレートは1/15secとし、トレーサーには粒径50ミクロンのポリスチレンを使用する。CCDカメラの画素数は1008×1018ピクセルであり、1つの撮影領域は25cm×25cm程度の範囲とする。流速のオーダーが不明であったためダブルパルスの間隔を前述のように2種類設定して実験を行ったが、画像解析を行ったところ、2000μsecの間隔で流速分布を把握することができたため、以下の結果ではこの条件のみを採用して示す。

2枚1組の画像からPIVにより流速ベクトルを作成する。PIVで画像処理を行うと流速が過大である誤ベクトルが生じる場合があるが、これについては流速の大きさに対して閾値を設定し、それを超えるものは周辺からの平均値で代用して処理する。それ以外にも方向が真値とは異なる誤ベクトルなどが存在すると考えられるが、それらについては目視で確認することとし、特別な処理は行わない。

4. 底質移動予備実験

可視化実験における計測断面の位置を適切に設定するためには、横断方向位置による底質移動特性の相違をあらかじめ確認しておく必要がある。このため、PIV計測に先立って簡易な移動床実験を行い、その結果得られる底面地形変化に基づいて流動計測断面を設定することとした。ここでは、その移動床予備実験について述べる。二次元造波水路の底に10cm程度の砂層を敷き、水路底面から鉛直に立てた4本の鋼製杭によって支持したDBFBモデルを設置して、水深は30cm、20cmおよび16cm、周期は1.0secおよび1.5sec、波高は6cm程度で越波は生じない条件で規則波を入射させて実験を行った。その結果、図-3に示すようにDBFB中心直下のやや沖側において横断方向に非一様なすり鉢状の底質地形変化が生じた。その大きさは、底質にほぼ動きが見られなくなった状態で、岸沖方向30cm程度、横断方向20cm程度、深さ1cm程度であった。いずれの水深および周期の条件においても同様の傾向がみられた。水路の横断方向に関して非一様に岸沖方向の底質移動が生じる原因として、水底から立てた鉛直杭の影響が考えられたため、先に示した本実験のように水路上部に組んだ櫓から杭を鉛直下向きに固定し、DBFBの動揺する範囲を考慮しつつ水中の杭の影響を極力排除するように設置し、再度実験を行ったところ、結果は杭を水中から立てた場合と変わらず、横断方向に非一様な底質の移動が生じた。この実験では長時間波浪を作用させたことにより、水路内では多重反射が形成されていたと考えられるた

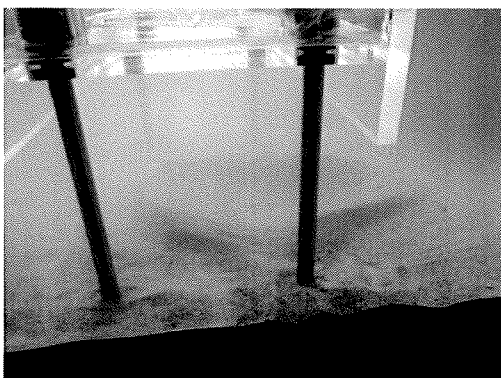


図-3 移動床実験の結果

め、必ずしも整った条件下での実験ではなかったが、この結果を受け、本研究では中央断面だけでなく、底質移動が生じた範囲の水路横断方向境界付近にあたるc10断面と、c10断面と中央断面との中間にあたるc05断面、および顕著な底質移動がみられなかった壁面付近のc20断面の計4つの計測断面を設定した。

5. 結果と考察

(1) DBFB周辺の残差流分布の特性

DBFBに波が到達してから3周期間の瞬間流速をもとに、周期平均流速を算出する。図-4に各断面における周期平均流速ベクトルとそれに基づいて算出した渦度分布をそれぞれ示す。渦度は反時計回りを正とする。結果として得られた流速分布において、バリア付近およびDBFB下部での残差流の形成が特徴的であったため、分割した6つの撮影領域のうち、上側については沖側と岸側の領域を、下側については中央の領域のみを抽出し、渦度については上側の領域のみ示す。なお、重なり合う部分についてはそのまま図示しているため、ベクトルの表示密度と流速の大きさには関係がないことに注意されたい。図中に示すDBFBおよび水位は静水時の位置であり、図-4(a)の渦度の凡例は(b)以降にも共通である。

中央断面では、沖側バリア先端付近から岸側斜め下向きに底面付近まで到達する強い残差流がある。この傾向は、辻本ほか⁵⁾の結果と一致する。一方、その他の断面では循環流周辺以外での残差流が全体的に小さい。沖側のバリア先端部ではバリアを中心として沖側と岸側に対する循環流がほぼ同じ高さに生成される。その二つの循環流を比較すると、沖側の循環流での渦度が強い。また、岸側のバリア先端部でも対の循環流が生成されるが、バリア直下の少し沖側(DBFB下側)と岸側上方にそれぞれ位置する。これら二つの循環流においても、沖側の循環流での渦度が強い。岸沖二つの循環流対を比較すると、沖側バリア先端の循環流対の渦度の方が、岸側バリア先端の循環流対よりも強い。循環流対の形成位置やその強度などの特徴はすべての断面において共通である。断面による違いについては、c05およびc10断面における渦度が他の断面と比較してやや強い。定常成分ではDBFBの岸側と沖側の間の海水交換に寄与するような顕著な流れはみられない。

(2) バリア周辺の循環流対の形成機構

図-5に、浮体が最下位置にあるときを開始時刻 $t/T=0$ として、c00断面における瞬間流速ベクトルの時系列変化を示す。ここでは上側および下側ともに、沖側および岸側の解析領域を抽出して示す。周期平均の図-4と同様に、重なる部分はそのまま図

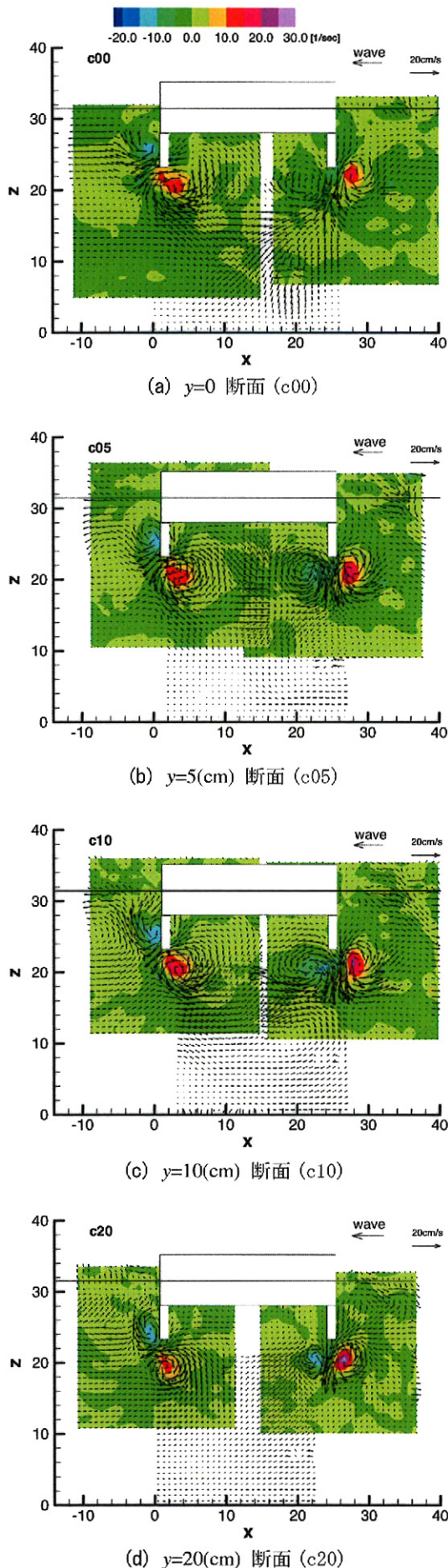


図-4 周期平均流速および渦度分布

示しているため、ベクトルの表示密度と流速の大きさは関係しない。図-5(a)の参照ベクトルは(b)以降でも共通である。時系列変化をみると、岸側および沖側それぞれのバリア先端付近において、対となっている循環流が半周期ごとに片方ずつ交互に生成される。ただし、沖側と岸側での循環流生成のタイミングおよびメカニズムは異なる。以下にそれぞれの循環流対について詳しく説明する。

沖側バリア周辺では、DBFB 最下位置において、沖側での水位上昇に伴って DBFB 下部から沖側上方へ向かう流れが発生する (図-5(a))。DBFB が上昇し (b)、静水位での位置よりも高くなる辺りで (c)、沖側から DBFB 下部へ流れ込むように流れの向きが変化する。DBFB が最高位へ到達する前後では DBFB の沖側での水位の低下に伴い、鉛直下向きおよび DBFB の下部へ向かう流れが発生する ((d) および (e))。ここでの流速分布は辻本ほか⁶⁾ が示した計算結果と一致する。DBFB が下降を始めると、DBFB 直下の流塊が沖側下方へ押し出される向きの流れが形成される (f)。その後、DBFB が最下位に近づくにつれて流れの向きが沖向き斜め下方から沖向き水平方向に変化し (g)、最下位置では次の波の影響で DBFB 下部から沖側上方へ向かう流れとなる (h)。したがって、静水位から下降して最下位に達し、再び静水位へと戻る過程において沖側の循環流が生成され、静水位から上昇そして下降する過程において対となる他方の循環流が生成される。

一方、岸側バリア周辺では、DBFB が最下位にあるとき、バリア岸側で鉛直下向きの流れが発生している (図-5(a))。DBFB の上昇に伴い、下向きの流れは DBFB の下部に流れ込む向きとなり (b)、沖向き水平、やがて沖向き上方へと変化する (c)。DBFB が静水位の位置から上方へ移動する辺りでは、DBFB 下部から岸側へ向かう流れが発生する (d)。DBFB が下降を始めると (e)、DBFB からやや岸側に離れた辺りでは岸向き上方への流れが発生し、一方 DBFB 近傍では DBFB と共に下降する流れが発達する (f)。DBFB が最下位へ到達する過程においては、流れの向きは DBFB 下部へと変化する ((g) および (h))。したがって、DBFB が最下位置から上昇する過程において沖側 (DBFB 下側) の循環流が形成され、DBFB が最高位から下降する過程において対となるもうひとつの循環流が生成される。

海水交換の観点から現象をみると、DBFB が最高位付近 (図-5(e)) にて沖向きの流れが、DBFB が最下位付近 (図-5(a)) において岸向きの流れがそれぞれ DBFB 下部にて発生している。したがって、1 周期間に岸向きおよび沖向きの流れがそれぞれ 1 回ずつ生じるが、周期平均流速の結果を合わせて考えるとそれらの大きさに差はみられない。

中央断面以外においても、上記の循環流生成の過程を含む流れ場の特性は同様であった。

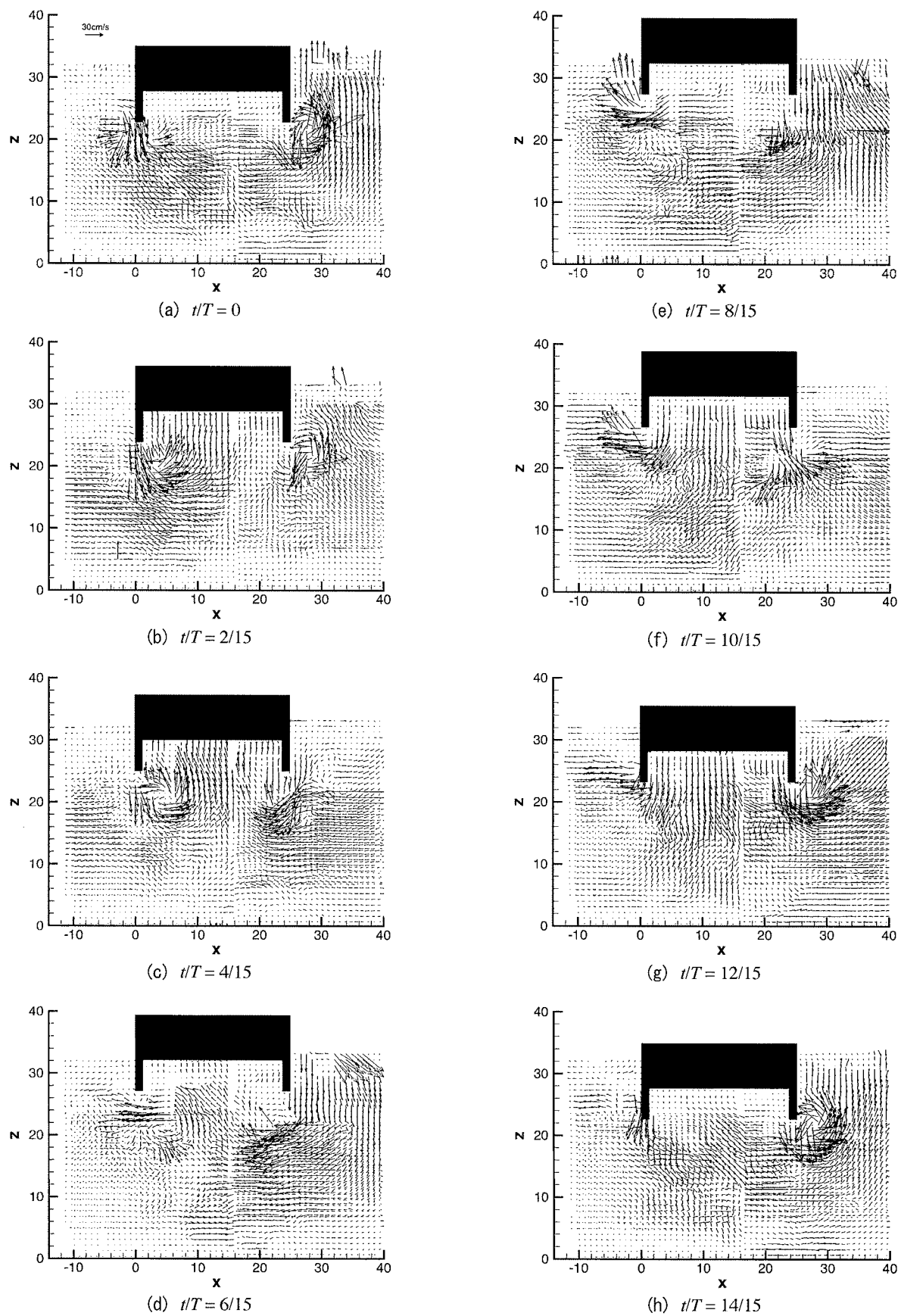


図-5 $y=0$ 断面における瞬間流速時系列変化

(3) 横断方向位置による底面流速変動の相違

図-6 に、底面付近における沖向き最大流速および岸向き最大流速の平均値と周期平均流速を示す。

PIV 画像解析の性質上、底面から 1cm 程度上方での流速を参照している。横軸は岸沖方向の位置、縦軸は沖向きを正とする流速であり、各断面とも上から

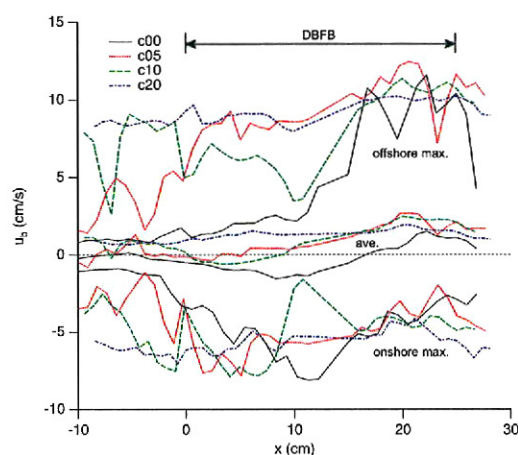


図-6 底面付近の流速分布（岸沖最大および周期平均）

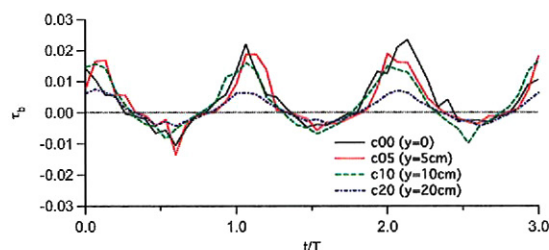


図-7 沖側バリア直下 ($x=25\text{cm}$) における底面せん断力の時系列変化

順に沖向き最大流速、周期平均流速、岸向き最大流速の結果である。DBFBは $x=0\sim 25\text{ (cm)}$ に位置する。まず、沖向き最大流速は、沖側バリア直下よりやや岸側においてもっとも大きくなる。中央断面に近い断面(c00 および c05)においては極大値が大きい、その付近での値の変動も大きい。一方、側壁に近くなるにつれ、極値はやや小さくなり、また変動も小さい。DBFB 岸側では最大流速は小さくなり、特に中央断面 c00 では顕著である。次に、岸向き最大流速は、中央断面においては DBFB 中央直下付近で最小値をとるが、いずれの断面においても値が -5cm/s 前後となっており、ばらつきはあるものの横断方向の位置による違いはあまりみられない。最後に、周期平均流速では、中央断面を除くすべての断面において概ね沖向き流速が卓越しており、特に沖側バリア直下でその傾向が強い。これらの傾向は、底質移動予備実験で見られた結果にそうものである。

図-7 に、沖向き流速が卓越している沖側バリア直下の底面における岸沖方向流速から求めた底面せん断力を示す。横軸は無次元時刻、縦軸は沖向きを正とした底面せん断力をそれぞれ示す。この結果から、中央付近の c00, c05 および c10 断面においては岸向き底面せん断力より沖向き底面せん断力の方が大きいことがわかる。c20 断面においては他の断面に比べて沖向き底面せん断力が小さい。得られた底面せん断力をもとに先述の移動床予備実験の条件に合わせてシールズ数を計算すると、移動限界シールズ数よりも 1 オーダー程度小さくなった。しかし、得られた傾向は移動床予備実験において底質が移動

した範囲によく一致しており、定性的には再現できた。

6. おわりに

本研究では、DBFB を用いた海水交換機能および底質移動制御効果の検証を念頭に、水底近傍も含めた DBFB 周辺の流動場特性を把握するための可視化実験による PIV 画像解析を行った。異なる 4 つの岸沖方向断面において計測し、流速分布の違いを調べた。その結果、沖側および岸側バリア周辺においてそれぞれ循環流対が発生しており、それらの生成メカニズムを明らかにした。水路側壁に近い断面と比較して、中央付近では流速や渦度が大きく、また、岸沖方向にも値の変動が大きいことがわかった。底面付近の流速振幅および底面せん断力についても同様に、中央付近では大きくなるが、変動も大きかった。これらは底質移動を予測する上で大きな影響を与える。しかし、これらの原因については、本研究の結果のみでは断定できない。また、本研究で用いた入射波条件が 1 ケースのみであるため、共振など浮体の応答を勘案すると得られた結果は限定的なものである。今後は入射波周期を変えて実験を行うとともに、側壁の影響に左右されない平面水槽において同様の実験を行い、より詳細な DBFB 周辺の流動場特性および底質移動特性について調べたい。

謝辞：本研究は社団法人近畿建設協会より研究助成（代表者：沖和哉）を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 沖和哉, 江島隆晃, 山田文彦, 由比政年, 辻本剛三: ダブルバリア型浮消波堤における波高低減率算定モデルの開発, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp. 701-706, 2009.
- 2) 尹晟鎮, 森田修二, 出口一郎: 通路型防波堤を有する小規模港湾の堆積制御に関する研究, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp. 303-308, 2003.
- 3) 中山哲蔵, 新井雅之, 大村智宏, 小林学, 田村仁, 灘岡和夫, 半沢稔: 海水導入工による港内埋没対策に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 481-485, 2005.
- 4) Jung, K.H, Chang K.A. and Huang, E.T.: Two-dimensional flow characteristics of wave interactions with a free rolling rectangular structure, Ocean Engineering, Vol.32, pp.1-20, 2005.
- 5) 辻本剛三, 沖和哉, 山田文彦, 柿木哲哉, 由比政年, 江島隆晃, 今村格, 津嶋了: ダブルバリア型浮消波堤の透過率算定と平面波浪場への適用, 海岸工学論文集, pp. 761-765, 2009.